

Entwicklung einer hydraulisch selbstgeregelten Abflusssteuerung für Hochwasserrückhalteräume

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTOR-INGENIEURES

von der Fakultät für
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Frank Seidel
aus Friedrichshafen

Tag der mündlichen Prüfung:
23. Juni 2010

Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c.mult. Franz Nestmann
Koreferent: Prof. Dr.-Ing. habil Hans Helmut Bernhart

Karlsruhe 2010

Kurzfassung

In Baden-Württemberg werden heute knapp 700 Stauanlagen und Hochwasserrückhaltebecken betrieben, wovon ca. 630 sogenannte Hochwasserrückhaltebecken *im Hauptschluss* sind. Bei dieser Bauweise wird der gesamte Talraum für den Hochwasserrückhalt herangezogen und das Gewässer durch das Hochwasserrückhaltebecken geleitet. Gemäß der gewässerökologischen Definition sind Hochwasserrückhaltebecken im Hauptschluss daher als Querbauwerke anzusehen. Für die im und am Gewässer lebende Fauna können Hochwasserrückhaltebecken eine Wanderbarriere darstellen und die ökologische Durchgängigkeit im Sinne der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) beeinträchtigen bzw. verhindern. Neben der aquatischen Durchgängigkeit ist auch der Forderung nach amphibischer und terrestrischer Durchgängigkeit solcher Hochwasserrückhaltebecken nachzukommen.

Hochwasserrückhaltebecken stehen daher im Interessenskonflikt zwischen dem gesellschaftspolitischen Ziel des Hochwasserschutzes und der in der WRRL hinterlegten Forderung der longitudinalen Durchgängigkeit der Fließgewässer. Der Einfluss eines Hochwasserrückhaltebeckens auf die ökologische Durchgängigkeit hängt dabei entscheidend von der konstruktiven Ausführung und der Bewirtschaftungsstrategie ab.

Mit dem Ziel, ein ökologisch angepasstes Durchlassbauwerk mit einer selbstregulierenden Abflusssteuerung zu konzipieren wurde im Auftrag der Projektträger-schaft Programm Baden-Württemberg - Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS) das dieser Arbeit zugrunde liegende Forschungsprojekt *Die Schwingklappe, ökohydraulisches Durchlassbauwerk für regulierbare Hochwasserrückhalteräume - Planung, Bauweise, Betrieb* bearbeitet.

Im Rahmen des Forschungsprojektes zur Schwingklappe wurde ausgehend von einer ersten Studie aus dem Jahre 1998 die komplette Entwicklung vom Konzept der Schwingklappe bis zum Bau einer Pilotanlage durchlaufen. Neben der Erarbeitung der für das Systemverständnis der Schwingklappe wichtigen Grundlagen wurde dabei mit einer ingenieurtechnischen Herangehensweise ein praxistaugliches Gesamtkonzept für ein ökologisch angepasstes Durchlassbauwerk mit einer Schwingklappe als Regelorgan entwickelt.

Auf Basis der im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit gewonnenen Ergebnisse zur hydraulischen Funktion und zur Fragestellungen der Betriebssicherheit konnte ein Bemessungskonzept für die Schwingklappe aufgestellt werden. In Zusammenarbeit mit dem Tiefbauamt der Stadt Karlsruhe ist es gelungen, eine Pilotanlage zur Schwingklappe zu realisieren und den erarbeiteten Bemessungsansatz zu verifizieren. Mit der Pilotanlage konnte der Anwendungsbereich der Schwingklappe vergrößert werden und wertvolle Betriebserfahrungen gesammelt werden.

Abstract

Currently, more than 700 water retraining works and flood retention basins are in operation within the German Federal State of Baden-Württemberg, about 630 of them are located in the river reach itself. Herby, the river is routed through the flood retention basin and the complete river valley is used for flood retention. Therefore, these flood retention basins are transverses structure in the sense of river ecology. For the river fauna, these flood retention basins usually form an ecological barrier and can disturb the longitudinal connectivity of the respective ecosystem, as it is stipulated in the European Water Framework Directive. This not only affects the aquatic fauna, but also the amphibian and the terrestrial fauna.

Therefore, flood retention basins are often in the field of conflict between the socio-political goal of flood retention and the ecological aspects of river connectivity. The impact of a flood retention basin on the connectivity is closely linked to the design of the structure and the basin management strategy.

The aim of this work was to conceptualize an ecologically adapted culvert for flood protection basins with a self regulating flap for discharge regulation. This work synthesizes the results of a research project which was founded by the Federal State of Baden-Württemberg.

In the context of this work, all work stages in terms of design, construction and operation of the self regulating flap, the so called *Schwingklappe*, were processed. The laboratory investigations were closely linked to the first experiments with the self regulating flap in the year 1997. With a focus on a practical orientation, the design of an ecological customized culvert of a flood retention basin with a self reglulating flap was developed.

The results of the research project lead to a design concept for the self regulating flap, with a special focus on hydraulic function and operational safety. In cooperation with the *Tiefbauamt Karlsruhe*, a pilot plant could be implemented and the developed design criterias could be verified in a case study. With this pilot plant, a new field of application for the self regulating flap was defined, as it regulates the discharge of a fischway.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Veranlassung und Motivation	2
1.2	Inhalte und Ziele	3
2	Grundlagen	4
2.1	Zur Entwicklung der Schwingklappe	4
2.2	Beschreibung des Funktionsprinzips	6
2.3	Die Schwingklappe als Regulierorgan eines Hochwasserrückhaltebeckens	8
2.3.1	Stauraumdefinitionen bei einem HRB	8
2.3.2	Klassifizierung von HRB	9
2.3.3	Lage des HRB zum Gewässer	10
2.3.4	HRB in Baden-Württemberg	12
2.3.5	Bemessungsgrundlagen für HRB	14
2.3.6	Rechtliche Kriterien zu HRB	15
2.3.7	Ökologische Anforderungen an ein Durchlassbauwerk	16
2.4	Selbstregulierende Abflusssteuerung bei HRB - Anwendungsbeispiele .	17
2.4.1	HRB Apfelbach, schwimmergesteuerter Schieber	18
2.4.2	HRB Alzey, Abflusssteuerung mit Wirbelventil	22
2.5	Selbstregelung ohne Fremdenergie, ein Sicherheitsrisiko?	26
3	Experimentelle Untersuchungen	28
3.1	Wasserbauliche Modellversuche	28
3.1.1	Modellähnlichkeit	28
3.1.2	Modellähnlichkeit bei Schwingungsproblemen	30
3.2	Versuchseinrichtungen	32
3.2.1	Versuchseinrichtung Maßstab 1:3	33
3.2.2	Versuchseinrichtung Prototyp	35

4	Ergebnisse und Diskussion	44
4.1	Entwicklung des Klappendesigns	44
4.1.1	Design des Klappenkörpers	44
4.1.2	Überlegungen zur Lage der Drehachse	52
4.1.3	Untersuchte Lagerungsgeometrie	54
4.2	Untersuchungen zum hydraulischen Verhalten	55
4.2.1	Abflussbeiwert	55
4.2.2	Strömungssituation im Nahfeld der Schwingklappe	64
4.2.3	Einfluss der Unterwasser-Randbedingung	64
4.2.4	Einfluss der Achslage	69
4.2.5	Regulierwirkung	70
4.2.6	Vergleich der Ergebnisse mit den bisherigen Studien zur Schwingklappe	74
4.2.7	Untersuchungen mit veränderter Lage des Schwerpunktes	76
4.3	Untersuchungen zum kinematischen Verhalten der Schwingklappe	78
4.3.1	Grundlagen	78
4.3.2	Bestimmung der Eigenfrequenz	81
4.3.3	Dämpfungsverhalten	86
4.3.4	Druckverhältnisse/Druckschwankungen entlang der Stauhaut	93
4.3.5	Abschließende Bewertung des kinematischen Verhaltens	101
4.4	Untersuchungen zur Betriebssicherheit	102
4.4.1	Geschwemmseltrieb	104
4.4.2	Geschiebetrieb	109
4.4.3	Eis	112
4.4.4	Bewertung der Betriebssicherheit	114
4.5	Betrachtungen zur Retentionsraumbewirtschaftung	114
4.5.1	Grundlagen zur Bewirtschaftung von HRB	114
4.5.2	Bewirtschaftungsverhalten der Schwingklappe	115
4.5.3	Simulation der Retentionsraumbewirtschaftung	117
4.5.4	Diskussion der Ergebnisse	120

5	Anwendungsmöglichkeiten der Schwingklappe	125
5.1	Ökologisch angepasstes HRB mit Schwingklappe	125
5.1.1	Rechenkonzept	126
5.1.2	Einlaufbereich	134
5.1.3	Sohlgestaltung im Durchlassbereich	136
5.1.4	Auslaufbereich	139
5.1.5	Hochwasserentlastung	141
5.1.6	Allgemeine Betrachtung des Gefährdungspotentials	143
5.2	Weitere Anwendungsbereiche der Schwingklappe	144
6	Bemessungskonzept für die Ingenieurpraxis	146
6.1	Klappengeometrie	146
6.2	Entwicklung der Spaltweite s_N	147
6.3	Bemessung der Spaltweite s_{90} und der Breite B der Schwingklappe . .	149
6.4	Bemessung der Achslage	150
6.5	Herausforderungen bei der hydraulischen Bemessung	152
6.6	Dimensionierung des Klappenkörpers und der Lager	152
6.7	Konstruktive Ausführung der Dichtungen	153
6.8	Zusammenfassung des Bemessungskonzeptes	154
7	Pilotanlage und Betriebserfahrungen	155
7.1	Projektbeschreibung	156
7.2	Hydraulisches Gesamtkonzept	159
7.3	Bemessung der Schwingklappe	160
7.4	Bauausführung	161
7.5	Überprüfung der hydraulischen Bemessung	162
7.5.1	Messtechnik	163
7.5.2	Ergebnisse Klappenneigung	165
7.5.3	Ergebnisse Abflussbestimmung	168
7.6	Betriebserfahrungen	172
7.6.1	Geschwemmseltrieb	172
7.6.2	Eisgang	174
7.7	Fazit	177

8 Zusammenfassung und Ausblick	178
Literaturverzeichnis	180
<hr/>	
Anhang	188
A Siebkurve des synthetischen Sohlmaterials	II
B Simulation der Retentionsraumbewirtschaftung	IV
C Liste der begutachteten HRB	X
D Fotodokumentation Bauausführung	XI
E Zeitreihe der Lufttemperatur in Karlsruhe	XX
F Zeitreihe der Wassertemperatur der Gewässer Murr und Rems	XXI

Abbildungsverzeichnis

2.1	Funktionsprinzip der Schwingklappe	7
2.2	Begriffsdefinitionen beim Hochwasserrückhaltebecken	9
2.3	Klassifizierung von Hochwasserrückhaltebecken nach DIN 19700-12.	10
2.4	Systemskizze eines HRB im Hauptschluss, verändert nach [70].	11
2.5	Systemskizze eines HRB im Nebenschluss, verändert nach [70].	11
2.6	Übersicht über die Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren mit und ohne Dauerstau, aus [78].	13
2.7	Anhaltswerte für die Wahl des Hochwasserschutzgrades (Wiederkehrzeit T_n) in Baden-Württemberg für bestehende Nutzungsarten, nach [72]	15
2.8	HRB Apfelbach, Lage	19
2.9	HRB Apfelbach, Ansicht von der Unterwasserseite (links), Ansicht von der Oberwasserseite (rechts)	19
2.10	Schematischer Schnitt und Seitenansicht des <i>Alpheus</i>	20
2.11	HRB Apfelbach, Blick auf die Schwimmerunterkante (links), redundanter Schieber des Betriebsauslasses an der Unterwasserseite der Stauwand (rechts).	20
2.12	Schwimmerweg und Spaltweite des Alpheus-Systems, HRB Apfelbach	21
2.13	Abflusskennlinie des Alpheus-Systems, HRB Apfelbach	22
2.14	HRB Alzey, Lage	23
2.15	HRB Alzey, Abflusssteuerung mit Wirbelventil, aus [14].	24
2.16	HRB Alzey, Schnitt durch das Durchlassbauwerk, aus [14]	24
2.17	HRB Alzey, Blick auf das Durchlassbauwerk.	25
2.18	HRB Alzey, Anordnung und Ausführung der ersten und zweiten Steuerung.	25
2.19	Draufsicht auf die technischen Komponenten für die elektro-mechanische Abflussregelung	27
3.1	Aus den Modellversuchen von Binder (2002) ermittelter Frequenzmaßstab [11]	31
3.2	untersuchte Klappengeometrien	34
3.3	Versuchsanordnung mit einer Breite von 27 cm	35

3.4	Versuchsordnung für die Prototypentest in der großen Versuchsrinne .	35
3.5	Detailansicht des untersuchten Prototyp-Klappenkörpers	36
3.6	Schema der eingesetzten Mess- und Regeltechnik	38
3.7	Messonden im Inneren der Schwingklappe (links), Wägezelle für die Messung der Rückstellkraft (rechts)	38
3.8	Anordnung der Druckmessdosen entlang der Stauhaut	39
3.9	Graphische Benutzeroberfläche der entwickelten Modellregelungs- und Datenerfassungssoftware	39
3.10	Beispiel einer Steuerung in der offenen Wirkungskette	40
3.11	Grundstruktur eines Regelkreises	41
4.1	Durch Umströmung hervorgerufene Kräfte auf einen Körper	44
4.2	Untersuchtes Tragflächenprofil als Schwingklappe [48]	45
4.3	Verschiedene Anordnungen von Stauwand und Tragkonstruktion [124]	46
4.4	instabile und stabile Strömungsablösung an unterströmten Schützen [94]	47
4.5	Instabile Abflusszustände können zu Schwingungen führen, a), abhil- feschaftende Maßnahme, b) [101]	47
4.6	Trapezförmiger Klappenkörper	49
4.7	Ungünstige Strömungsablösungen an der oberstromigen Kante des Trapez-Hohlkörpers.	49
4.8	Endversion der Geometrie des Klappenkörpers	51
4.9	links: stabile Gleichgewichtslage eines Körpers in einem stehendem Fluid, rechts: Entstehung eines Rückstellmomentes bei Auslenkung des Körpers	52
4.10	links: Kraftangriffspunkte bei einer tiefer Lage des Lagerpunktes, rechts: Kraftangriffspunkte bei einer hohen Lage des Lagerpunktes .	53
4.11	links: minimale Spaltweite bei tiefer Lage des Lagerpunktes, rechts: minimale Spaltweite bei hoher Lage des Lagerpunktes	53
4.12	Definition der Lagergeometrie	54
4.13	Freier Abfluss unter einem Schütz	55
4.14	Vergleich der theoretischen Berechnungsergebnisse mit experimentel- len Untersuchungen	58
4.15	Verhalten des Abflussbeiwertes während des Aufschwimmvorganges .	59

4.16	Rückgestauter Abfluss unter einem Schütz	60
4.17	Rückgestauter Abfluss, Neigung 90°	61
4.18	Rückgestauter Abfluss, Neigung 45°	61
4.19	Rückgestauter Abfluss, Neigung 30°	62
4.20	Rückgestauter Abfluss, Neigung 15°	62
4.21	Strömungssituation im Nahfeld der Schwingklappe bei einer Klappen- neigung von 43° (links) und 62° (rechts).	64
4.22	Vergleich unterschiedlicher Gewässergeometrien in Bezug auf die Was- serstands-Abfluss-Beziehung	65
4.23	Mögliches Gewässerprofil zur Einhaltung der erforderlichen Wasser- stands-Abfluss-Beziehung	66
4.24	Untersuchte Wasserstands-Abfluss-Beziehungen der unterwasserseiti- gen Gewässerstrecke	67
4.25	Entwicklung der Neigung der Schwingklappe bei unterschiedlichen Unterwasser-Randbedingungen	68
4.26	Funktionsbereich der Schwingklappe	70
4.27	Entwicklung der Wasserstände im OW und UW während des Auf- schwimmens der Schwingklappe.	71
4.28	Beginnender Eingriff in das Abflussgeschehen durch die Schwingklap- pe, Einfluss der Neigung.	72
4.29	Beginnender Eingriff in das Abflussgeschehen durch die Schwingklap- pe, Einfluss der mittleren Fließgeschwindigkeit im Durchlassquerschnitt.	72
4.30	Entwicklung des Verlustbeiwertes ζ während des Aufrichtens der Schwing- klappe.	74
4.31	Schemaskizze, Schwingklappe als selbsttätige Stauvorrichtung [67]	75
4.32	Vergleich des in den Versuchen ermittelten Abflussverhaltens mit den rechnerischen Ergebnissen [67]	76
4.33	Funktionsbereich der Schwingklappe	77
4.34	Prinzipskizze der strömungsinduzierten Schwingungen mit den wich- tigsten Parametern und Variablen, nach [10]	80
4.35	Zonen potentieller Schwingungsanfachungsmechanismen bei der Schwing- klappe	80
4.36	Ermittelte Eigenfrequenz in Abhängigkeit der Klappenneigung	82
4.37	Einfluss der Lagergeometrie auf die Energie (Amplitude) der freien Schwingung	83

4.38	Ermittelte Eigenfrequenz in Abhängigkeit der Klappenneigung, Prototyp und Modell Maßstab 1:3	84
4.39	Viskos gedämpfte Schwingung einer Kugel in einem Fluid	86
4.40	Freie Schwingung nach Auslenkung, Lagerungspunkt 6	89
4.41	Vergleich der freien Schwingung nach Auslenkung, Lagerungspunkt 6	89
4.42	Klassifizierung des Schwingungsverhaltens [85]	90
4.43	Dämpfungsmaß D in Abhängigkeit der Klappenneigung und des Lagerpunktes.	91
4.44	Druckverlauf entlang der Stauhaut	94
4.45	Dynamischen und hydrostatischen Druckverteilung, [104]	94
4.46	Schwankungsbereich der Druckhöhen an der oberwasserseitigen Stauhaut	95
4.47	Spektralanalyse, Druckmessstelle 2, Betrachtung bei 15° und 45° , Betrachtung des Prototypen	97
4.48	Spektralanalyse, Druckmessstelle 5, Betrachtung bei 15° und 45° , Betrachtung des Prototypen	98
4.49	Spektralanalyse, Druckmessstelle 6, Betrachtung bei 30° und 45° , Betrachtung des Prototypen	100
4.50	Verklebtes Schütz, HRB Haslach, [Foto: Bernhart]	102
4.51	Beispiel für eine bei Einstau unzugängliche Schieberarmatur	103
4.52	Geschwemmseltrieb bei Hochwasser [128]	103
4.53	Überblick über die im Rahmen der Versuche untersuchten Geschwemmselfraktionen	104
4.54	Sequenzen der Geschwemmseldrift bei einer Spaltweite $s_N = 20$ cm und einer Klappenneigung von 30°	106
4.55	Sequenzen der Geschwemmseldrift bei einer Spaltweite $s_N = 32$ cm und einer Klappenneigung von 17°	106
4.56	Gräser im Spalt (links), konstruktive Optimierung mittels Bürste (rechts).	107
4.57	Rückstellverhalten der Schwingklappe, Vergleich der Ausgangslagen 30° und 45°	108
4.58	Sohlbeschaffenheit verschiedener HRB im Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach: a.) HRB Gemmingen, b.) HRB Mönchzell, c.) HRB Waldwimmersbach-Lobbach, d.) HRB Spechbach	110

4.59	Versuchseinrichtung mit naturähnlicher Sohlauf- lage (Mächtigkeit von 20 cm)	111
4.60	Versuchseinrichtung mit naturähnlicher Sohlauf- lage nach Einstau. Links ohne zusätzliche Steinsicherung, rechts mit ver- klammerter Sohle.	111
4.61	Einfluss einer ungesteuerten und gesteuerten Ab- gabe auf die Hochwasserwelle	115
4.62	Einfluss der Unterwasser-Kennlinie auf die Stau- raumbewirtschaftung, schematische Betrachtung der Blende (links) und der Schwingklappe (rechts).	117
4.63	Lage des HRB A 26 Aglasterhausen - Rittersbach im Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach.	118
4.64	Durchlassbauwerk des HRB A 26 Aglasterhausen - Rittersbach im Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach, Blick von Oberstrom.	119
4.65	Wirkungsweise des HRB A26 Aglasterhausen - Rittersbach, Datenquelle: [127]	119
4.66	Lage des HRB A54 Forellenbach II, Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach	120
4.67	Vergleich der simulierten Abflussganglinien für das HRB A26	121
4.68	Vergleich der simulierten Abflussganglinien für das HRB A54	123
5.1	Links: hochliegender Steuerschieber/Ökoschieber mit Sohlstufe behindert die Durchwanderbarkeit auf der Berme; Rechts: Rechen oberstrom der Anlage ohne durchgängige Uferberme behindert die terrestrische Durchgängigkeit	126
5.2	Anschauungsmodell einer Gesamtanlage mit Schwingklappe	126
5.3	Unterschiedliche Rechenkonstruktionen in der Praxis, Stababstand 12 cm (links), Stababstand 30 cm (rechts).	127
5.4	Systemskizze des für die Schwingklappe erar- beiteten Rechenkonzeptes.	128
5.5	Beispiele für nicht freigehaltene Retentions- räume; Holzlager (links) und landwirtschaftliches Gerät bei Hochwasser (rechts) [128].	129
5.6	Geschwemmselanfall HRB Raußmühle beim Schadensfall im März 2002 [128].	130
5.7	Palisadenrechen, HRB Raußmühle (links) und HRB Mönchzell (rechts). 131	
5.8	Palisaden während eines Hochwasserereignisses, HRB Insenbach (links), HRB Oberschwarzenbach (rechts) [128].	132

5.9	Verkläusung der Palisaden bei Niedrigwasser (links), Ausräumen per Traktor (rechts) [128].	132
5.10	Räumlicher Feinrechen, HRB Raußmühle (links), HRB Möchzell (rechts). 133	
5.11	Blick von Unterstrom auf das Durchlassbauwerk des HRB Apfelbach	135
5.12	Abflussgeschehen unterstrom des Durchlassbauwerkes bei Hochwasser, HRB A26 Rittersbach (links), HRB M18 Mönchzell (rechts) [128]	136
5.13	In der Praxis eingesetzte Sohlbauweisen im Durchlassbereich, betonierte Flügelwände (links), Flügelwände aus Blocksteinen (rechts) . .	137
5.14	Blick von Unterstrom auf die seitlichen Sohlstreifen	138
5.15	schematische Draufsicht auf den Geschiebekorridor	139
5.16	Strömungszustand bei plötzlicher Querschnittsaufweitung, nach [95]	140
5.17	Verhalten hydraulisch überlastbarer / nicht überlastbarer Systeme, verändert nach [27]	142
5.18	Anwendungsfall einer Schwingklappe für ein HRB im Nebenschluss .	144
6.1	Normierte Klappengeometrie	147
6.2	Parameter zur Bestimmung der neigungsabhängigen Spaltweite s_N . .	148
6.3	Entwicklung der Spaltweite beim Aufrichten der Schwingklappe, Vergleich verschiedener Lagerungsgeometrien	149
6.4	Bemessungsdiagramm, normiert auf die Klappenlänge L	150
6.5	Beziehung zwischen dem Unterwasserstand und dem Lagerpunkt . . .	151
7.1	Übersicht über das Projektgebiet	156
7.2	Pegelstellen im Projektgebiet	157
7.3	Wasserstands- und Abflussschwankungen der Pfinz vor Inbetriebnahme der Schwingklappe	158
7.4	Hydraulisches Schema des entwickelten Gesamtkonzeptes	159
7.5	Einbauskizze der Schwingklappe an der FAA Obermühle	160
7.6	Erarbeitetes Kennliniendiagramm für die Schwingklappe an der FAA Obermühle	161
7.7	Integration der Schwingklappe in das Schütz an der FAA Obermühle	162
7.8	Schützmodul mit Schwingklappe beim Einbau	162
7.9	Eingesetzte Messtechnik für die hydraulische Überprüfung	163
7.10	Messquerschnitt für die Abflussmessung mittels Vielpunktmessung . .	164

7.11	Verteilung der Lotrechten für die Vielpunktmessung	164
7.12	Verteilung der Messpunkte über die Lotrechten und exemplarische Darstellung der Geschwindigkeitsmessungen, Messung vom 20.10.2009	165
7.13	Vergleich der Klappenneigung beim Absenken und beim Aufrichten der Schwingklappe	166
7.14	Entwicklung der Wasserstände im Oberwasser und Unterwasser während des Aufschwimmen, Vergleich der berechneten Werte mit Messungen	166
7.15	Hydraulische Situation unterstrom der Schwingklappe	167
7.16	Isotachendarstellung des Geschwindigkeitsfeldes	168
7.17	Vergleich der berechneten und gemessenen Abflüsse für die Schwingklappe an der FAA Obermühle	169
7.18	Wasserstands- und Abflussschwankungen nach Inbetriebnahme der Schwingklappe	171
7.19	Schwimmbalken vor dem Zulaufbereich der Schwingklappe	173
7.20	Geschwemmsel an der Schwingklappe	174
7.21	Stichprobenartig erfasste Wassertemperatur der Pfinz an der Messstelle Pfinz/Berghausen [79]	175
A.1	Siebkurve des synthetischen Sohlmaterials	II
B.1	Simulierte Retentionsraumbewirtschaftung, Vergleich feste Blende und Schwingklappe, HRB A26, Bemessungsregen 2h	IV
B.2	Simulierte Retentionsraumbewirtschaftung, Vergleich feste Blende und Schwingklappe, HRB A26, Bemessungsregen 48h	V
B.3	Simulierte Retentionsraumbewirtschaftung, Vergleich feste Blende und Schwingklappe, HRB A26, Speicherkennlinien	VI
B.4	Simulierte Retentionsraumbewirtschaftung, Vergleich feste Blende und Schwingklappe, HRB A54, Bemessungsregen 2h	VII
B.5	Simulierte Retentionsraumbewirtschaftung, Vergleich feste Blende und Schwingklappe, HRB A54, Bemessungsregen 48h	VIII
B.6	Simulierte Retentionsraumbewirtschaftung, Vergleich feste Blende und Schwingklappe, HRB A54, Speicherkennlinien	IX
D.1	Altes Holzschütz am Einlauf der FAA vor Einbau der Schwingklappe, Blick von Untertrom	XI
D.2	Altes Holzschütz am Einlauf der FAA vor Einbau der Schwingklappe, Blick von Untertrom	XI

D.3	Rippe des Klappenkörpers und seitliche Führungswand	XII
D.4	Vorgebogene Beplankung für den Klappenkörper	XII
D.5	Montage der Rippen mit Führungsschienen	XIII
D.6	Aufschweißen der Beplankung auf das Rippenskelett	XIII
D.7	Fixierung der Beplankung im Punktschweißverfahren	XIV
D.8	Rohbau des neuen Edelstahlschützes	XIV
D.9	Montage der seitlichen Führungswände am Schütz	XV
D.10	Fertig montiertes Schütz	XV
D.11	Einbringen des Schützes mit integrierter Schwingklappe	XVI
D.12	Fertig eingebautes Schütz	XVI
D.13	Flutung der Baustelle	XVII
D.14	Erster Wasserkontakt der Schwingklappe	XVII
D.15	Die Schwingklappe schwimmt auf	XVIII
D.16	Die Schwingklappe schwimmt auf	XVIII
D.17	Die Dammbalken der Baustellenabdichtung werden gezogen	XIX
D.18	Ansicht des neuen Schützes mit integrierter Schwingklappe, Blick von Oberwasser	XIX
E.1	Lufttemperatur in Karlsruhe, 51 KW 2009 und 1 KW 2010	XX
F.1	Messstelle Murr/Murr [79]	XXI
F.2	Zeitreihe der Wassertemperatur, Messstelle Murr/Murr [79]	XXI
F.3	Messstelle Neustadt/Rems [79]	XXII
F.4	Zeitreihe der Wassertemperatur, Messstelle Neustadt/Rems [79]	XXII

Tabellenverzeichnis

2.1	Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeiten für BHQ_1 und BHQ_2	14
3.1	Umrechnungsfaktoren des Froude´schen Modellgesetzes	32
3.2	Untersuchte Klappengeometrien	34
3.3	Einstellregeln nach Zielger-Nichols	42
4.1	technische Daten des untersuchten Prototyp-Klappenkörpers	51
4.2	Beziehung zwischen Lagerpunkt und Schwerpunkt	54
4.3	Kennwerte der Untersuchungsserie mit veränderter Schwerpunktlage	77
4.4	Messergebnisse zum Dämpfungsgrad von Brücken [39]	92
4.5	Messergebnisse zum Dämpfungsgrad von Aussichtstürmen [91]	92
4.6	Statistische Auswertung einer 60 s Messreihe entlang der Stauhaut der Schwingklappe	95
4.7	Technische Daten zum Hochwasserrückhaltebecken Haslach	102
4.8	Aufstellung der Modellgeschwemmselfraktionen	104
4.9	Rückstellkraft bei einer Fehlstellung der Schwingklappe von 20° in Folge einer vollständigen Verklausung im vorderen Klappenbereich	108
7.1	Technische Daten der an der FAA Obermühle eingesetzten Schwing- klappe	160
7.2	Sensitivitätsanalyse der Abflussermittlung	169
7.3	Temperaturmessungen Schwingklappe/Pfinz	175

Symbolverzeichnis

	1. Arabische Zeichen	Einheit
A	senkrecht angeströmte Querschnittsfläche	[m ²]
a	vertikaler Versatz der Schützunterkante	[m]
B	Breite	[m]
b	Dämpfungskoeffizient	[-]
c_A	Auftriebsbeiwert	[-]
C_C	Kontraktionsbeiwert	[-]
C_Q, c_q, μ	Abflussbeiwert	[-]
c_W	Widerstandsbeiwert	[-]
D	Dämpfungsmaß	[-]
D	Federkonstante	[-]
$d(t)$	Störgröße	[-]
d	Stärke der Schützlippe	[m]
e	Schützbreite	[-]
$e(t)$	Regelabweichung	[-]
f	Frequenz	[1/s]
f_0	Eigenfrequenz	[1/s]
F	Federkraft	[N]
F_A	Auftriebskraft	[N]
F_G	Gewichtskraft	[N]
F_L	Kraft auf das Lager	[N]
F_R, Fr	Reibungskraft	[N]
F_{Res}	resultierende Kraft	[N]
F_W	Widerstandskraft	[N]
Fr	Froudezahl	[-]
Fr^*	kornbezogene Froudezahl	[-]

1. Arabische Zeichen		Einheit
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
H, h, y	Wassertiefe	[m]
H_O, H_{OW}	Stauhöhe, Oberwasserstand	[m]
H_{max}	maximaler Beckenwasserstand	[m]
HQ_{20}	Hochwasserereignis mit einer Jährlichkeit von 20 Jahren	[m ³ /s]
HQ_{100}	Hochwasserereignis mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren	[m ³ /s]
K_p	Verstärkungsfaktor des P-Gliedes	[-]
L	Länge	[m]
L_P	Lagerpunkt	[-]
LS	relative Lage des Lagerpunktes	[-]
LS^*	relative Lage des Lagerpunktes bei ungleichmäßiger Gewichtsverteilung	[-]
L_{SE}	Abstand zwischen Schwerpunkt und Klappenendkante	[m]
L_{SL}	Abstand zwischen Schwerpunkt und Lagerpunkt	[m]
m	Masse	[Kg]
M_{FT}	Maßstabszahl der Trägheitskräfte	[-]
M_L	Maßstabszahl der Länge	[-]
M_t	Maßstabszahl der Zeit	[-]
p_e	Eisdruck	[N/m ²]
q	spezifischer Abfluss	[m ³ /sm]
Q	Abfluss	[m ³ /s]
Q_{Bem}	Bemessungsabfluss	[m ³ /s]
Q_R	Regelabgabe	[m ³ /s]
$Q_{Z,max}$	maximaler Beckenzufluss	[m ³ /s]
$Q_{A,max}$	maximaler Beckenabfluss	[m ³ /s]
Re	Reynoldszahl	-]
S	Speicherinhalt des HRB	[m ³]
s	Spaltweite	[m]

	1. Arabische Zeichen	Einheit
S_h	Strouhal-Zahl	[-]
S_{ci}	Scruton-Zahl der Schwingung in i-Richtung	[-]
s_{90}	Spaltweite bei einer Klappenneigung von 90°	[m]
T_D	Dauer des Hochwasserereignisses	[h]
T_{krit}	Wellenlänge der resonanten Schwingung	[s]
T_n	Jährlichkeit des Hochwasserereignisses	[-]
T_N	Nachstellzeit des I-Gliedes	[s]
Tu	Turbulenzgrad der Strömung	[-]
t	Zeit	[s]
$u(t)$	Stellgröße	[-]
$u(0)$	Geschwindigkeit an der <i>Vena Contracta</i>	[m/s]
\bar{v}	Geschwindigkeitsvektor mit den Komponenten u, v, w	[-]
v	Fließgeschwindigkeit	[m/s]
v_m	mittlere Fließgeschwindigkeit	[m/s]
$w(t)$	Führungsgröße	[-]
x	Weg	[m]
x_m	Wert der ersten Amplitudes im Ausssschwingveruch	[-]
x_n	Wert der zweiten Amplitudes im Ausssschwingveruch	[-]
\dot{x}	Schwingungsgeschwindigkeit	[m/s]
\ddot{x}	Schwingungsbeschleunigung	[m/s ²]
$y(t)$	Regelgröße	[-]

	1. Griechische Zeichen	Einheit
α, θ, δ	Neigungswinkel	[°]
γ	Dämpfungskonstante	[-]
λ	Lösungsparameter	[-]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]
ω_0	Eigenkreisfrequenz	[rad/s]

1. Griechische Zeichen Einheit

ρ	Dichte	[kg/m ³]
ρ_F	Dichte Feststoff	[kg/m ³]
ρ_W	Dichte Wassers	[kg/m ³]
τ	Schubspannung	[N/m ²]
τ_0	Sohlschubspannung	[N/m ²]

Indizes

bem	Bemessungsfall
c, crit	kritisch
lab	Laborversuch
max	maximal
M	Modell
N	Natur
0	Referenzwert

1 Einleitung

Die großen Hochwasserereignisse an der Elbe im Sommer 2002 und 2006, das Winterhochwasser am Main im Januar 2003 und das Hochwasser an der Donau im Jahre 2006 bilden nur das Ende einer langen Reihe von Hochwasserereignissen weltweit. In Europa gab es seit 1998 über 100 größere Hochwasserereignisse.

Scheinbar machtlos musste die Bevölkerung mit ansehen, wie ganze Landstriche unter Wasser standen und enorme Sachschäden verursacht wurden und darüber hinaus auch Menschenleben zu Schaden kamen. Als Ursache für die scheinbar immer häufiger wiederkehrenden Fluten werden die globale Klimaveränderung und die Flussbegradigungen, die eine Beschleunigung der Hochwasserwelle zufolge haben, genannt. Außen vor bleibt jedoch die Tatsache, dass die Menschen in den letzten Jahrzehnten aufgrund des Siedlungsdruckes immer näher an das Wasser und sogar in ehemalige Überflutungsflächen siedelten und so dem Fluss wertvollen Retentionsraum nahmen. Die fehlenden Retentionsvolumen führen aus hydraulischer Sicht zu einer Erhöhung der Scheitelwerte der Hochwasserereignisse und zu einer Beschleunigung der Hochwasserwelle. Für stromabwärts gelegene Gebiete führt dies zu einer weiteren Verschärfung der Hochwassersituation. Die in den ehemaligen Überflutungsflächen geschaffenen Sachgüter in Form von Infrastruktureinrichtungen, Wohngebäuden und gewerblichen Objekten führen zu den enormen volkswirtschaftlichen Schäden.

Hochwasserereignisse sind jedoch nicht nur ein Problem an großen Fließgewässern, auch in kleineren Einzugsgebieten können durch Hochwasserereignisse erhebliche Schäden verursacht werden. Im Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach im nördlichen Baden-Württemberg verursachten beispielsweise die Hochwasserereignisse im Dezember 1993 und im Juni 1994 bei der Überflutung zahlreicher Ortschaften materielle Schäden von über 150 Mio. €.

Die Rahmenbedingungen für den Hochwasserschutz müssen von der Politik vorgegeben werden, da nur eine gemeinsame, länderübergreifende Strategie einen effizienten Hochwasserschutz ermöglichen kann. Auf Bundesebene ist am 10.05.2005 das *Gesetz zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes* in Kraft getreten. In diesem Gesetz wird im Wesentlichen die Priorität auf die Bausteine *Bewertung der Hochwasserrisiken, Kartierung der Gefahr und der Risiken* und *Erstellung von Maßnahmenplänen* gelegt. Die Voraussetzungen für einen vorbeugenden Hochwasserschutz wurden mit der Novellierung des Wasserhaushaltsgesetzes, des Baugesetzbuches, des Raumordnungsgesetzes und des Bundes-Bodenschutzgesetzes geschaffen. Aufgabe der Länder und Kommunen ist es, diese rechtsverbindlich umzusetzen.

Die Hochwasserschutzstrategie des Landes Baden-Württemberg baut auf diesen Gesetzesgrundlagen auf und definiert die folgenden drei Handlungsfelder als die Kernpunkte für einen erfolgreichen und ganzheitlichen Hochwasserschutz.

- Technischer Hochwasserschutz als Infrastrukturmaßnahme
- Hochwasser-Flächenmanagement mit Flächenvorsorge für hochwassergefährdete Gebiete und Wasserrückhaltung in der Fläche
- Hochwasservorsorge mit Bauvorsorge, Verhaltensvorsorge und Risikovorsorge

Im Handlungsfeld *Technischer Hochwasserschutz* unterstützt z.B. das Land Baden-Württemberg die Kommunen und Verbände, für vorhandene Siedlungs-, Gewerbe- und Verkehrsflächen in Gewässernähe die Hochwassergefahr durch technische Maßnahmen zu vermindern. Neben Deichen, Mauern und mobilen Schutzwänden stellen Hochwasserrückhaltebecken dabei eine Lösungsmöglichkeit dar.

1.1 Veranlassung und Motivation

In Baden-Württemberg werden heute knapp 700 Stauanlagen und Hochwasserrückhaltebecken betrieben, wovon ca. 630 so genannte Hochwasserrückhaltebecken im Hauptschluss sind. Bei dieser Bauweise wird der gesamte Talraum für den Hochwasserrückhalt herangezogen und das Gewässer durch das Hochwasserrückhaltebecken geleitet. Gemäß der gewässerökologischen Definition sind Hochwasserrückhaltebecken im Hauptschluss daher als Querbauwerke anzusehen. Für die im und am Gewässer lebende Fauna können Hochwasserrückhaltebecken eine Wanderbarriere darstellen und die ökologische Durchgängigkeit im Sinne der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) beeinträchtigen bzw. verhindern. Neben der aquatischen Durchgängigkeit ist auch der Forderung nach amphibischer und terrestrischer Durchgängigkeit solcher Hochwasserrückhaltebecken nachzukommen [4].

Hochwasserrückhaltebecken stehen daher im Interessenskonflikt zwischen dem gesellschaftspolitischen Ziel des Hochwasserschutzes und der in der WRRL hinterlegten Forderung der longitudinalen Durchgängigkeit der Fließgewässer. Der Einfluss eines Hochwasserrückhaltebeckens auf die ökologische Durchgängigkeit hängt dabei entscheidend von der konstruktiven Ausführung und der Bewirtschaftungsstrategie ab.

In Baden-Württemberg wurden im Jahr 2008 209 ungesteuerte Hochwasserrückhaltebecken an kleineren Fließgewässern betrieben. Bei einer ungesteuerten Abgabe ist die lichte Querschnittsöffnung im Durchlassbereich fix eingestellt, eine Anpassung der Spaltweite während eines Hochwasserereignisses erfolgt nicht. Dies führt im Gegenzug dazu, dass die lichte Querschnittsfläche sehr klein ist, da sie in der hydraulischen Bemessung auf den Vollstau des Beckens und die Abgabe an die Unterlieger zu dimensionieren ist. Lichte Querschnittsflächen von weniger als $0,25 \text{ m}^2$ sind dabei keine Seltenheit, so dass es zu einer erheblichen Beeinflussung der Leitwirkung des Gewässers und der ökologischen Durchgängigkeit kommt.

Ungesteuerte Hochwasserrückhaltebecken kommen vor allem wegen der geringeren Investitionskosten auf Grund der nicht benötigten Steuer- und Regeltechnik und dem Mangel an ökologisch angepassten, selbstregulierenden Abflusssteuerungen zum Einsatz.

Mit dem Ziel, ein ökologisch angepasstes Durchlassbauwerk mit einer selbstregulierenden Abflusssteuerung zu konzipieren wurde im Auftrag der Projektträgerschaft Baden-Württemberg - Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS) unter der Zuwendungs-Nr. BWR 24020 das dieser Arbeit zugrunde liegende Forschungsprojekt *Die Schwingklappe, ökohydraulisches Durchlassbauwerk für regulierbare Hochwasserrückhalteräume - Planung, Bauweise, Betrieb* gefördert. Das Projekt wurde gemeinschaftlich durch das Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des KIT und das Institut für Landespflege der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg bearbeitet. Ziel war es, betrieblichen und hydraulischen Fragestellungen umfassend zu untersuchen und dieses System der Schwingklappe in die Praxis zu transferieren.

1.2 Inhalte und Ziele

Im Rahmen des genannten Forschungsprojektes zur Schwingklappe wurde ausgehend von einer ersten Studie aus dem Jahre 1998 die komplette Entwicklung vom Konzept der Schwingklappe bis zum Bau einer Pilotanlage abgearbeitet. Neben der Erarbeitung der für das Systemverständnis der Schwingklappe wichtigen Grundlagen wurde dabei mit einer ingenieurtechnischen Herangehensweise ein Bemessungskonzept erarbeitet.

In Kapitel 2 werden als Einstieg in die Thematik die Grundlagen zur Schwingklappe und zu Hochwasserrückhaltebecken aufgearbeitet. Hier wird aufgezeigt, welche Relevanz die ökologische Durchgängigkeit z.B. auf Grund der Vielzahl von Hochwasserrückhaltebecken in Baden-Württemberg hat und welche selbstregulierenden Abflusssteuerungen heute schon bei Hochwasserrückhaltebecken zum Einsatz kommen.

Der gewählte modelltechnische Untersuchungsansatz wird in Kapitel 3 vorgestellt und hinsichtlich verschiedener Modellarten abgegrenzt. Die Versuchseinrichtungen und die eingesetzte Mess- und Regeltechnik wird vorgestellt.

In Kapitel 4 werden die im Rahmen der Arbeit gewonnenen Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. Ausgehend von den ersten Ideen zur Schwingklappe werden die Entwicklungsarbeiten zum Design des Klappenkörpers aufgezeigt. Darauf aufbauend werden die Untersuchungen zum hydraulischen und kinematischen Verhalten der Schwingklappe dargestellt. Hieraus wird die zur Anwendung gekommene Vermeidungsstrategie hinsichtlich der Schwingungsanfälligkeit deutlich. Auch die Fragestellung bezüglich der Betriebssicherheit der Schwingklappe bei Geschwemmsel- und Geschiebetrieb wird anhand der Ergebnisse einer Versuchsreihe aufgezeigt. Das Kapitel schließt mit einer Simulation des Bewirtschaftungsverhaltens der Schwingklappe im Vergleich zu einem realisierten Hochwasserrückhaltebecken mit einer ungesteuerten Abgabe.

Die aus den Laboruntersuchungen zur Schwingklappe und einer Begutachtung von gebauten Hochwasserrückhaltebecken gewonnenen Erkenntnisse werden in Kapitel 5 zusammengeführt und ein ökologisch angepasstes Durchlassbauwerk mit einer Schwingklappe wird vorgestellt. Dabei werden sämtliche Bauteile im Durchlassbauwerk diskutiert und ökologische Optimierungspotentiale aufgezeigt. Abschließend wird ein Ausblick auf weitere Anwendungsmöglichkeiten der Schwingklappe gegeben.

In Kapitel 6 wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Bemessungskonzept für die Ingenieurpraxis vorgestellt. Neben konstruktiven Hinweisen zur Bauweise und zur Bemessung des Klappenkörpers werden hier auch die Anwendungsgrenzen der Schwingklappe aufgezeigt.

Der erfolgreiche Praxistransfer der Forschungsarbeit wird anhand der Ausführungen zur Pilotanlage in Kapitel 7 dokumentiert. Hier werden die projektspezifischen Randbedingungen und die Bemessungsgrundlagen aufgeführt. Die Praxistauglichkeit des erarbeiteten Bemessungskonzeptes wird anhand der Ergebnisse einer Naturmesskampagne nachgewiesen. Die Arbeit schließt in Kapitel 8 mit einer Zusammenfassung.

2 Grundlagen

Das Konzept der Schwingklappe zur selbsttätigen Abflussregelung von Hochwasserrückhaltebecken wurde Mitte der 90er Jahre erarbeitet. In diesem Kapitel werden die Funktionsweise der Schwingklappe vorgestellt und die bisherigen Untersuchungen aufgezeigt. Die für den Einsatz der Schwingklappe im Hochwasserschutz wichtigen Begrifflichkeiten und Regelwerke werden vorgestellt. Abschließend werden noch zwei grundverschiedene und in der Praxis befindliche Systeme zur selbsttätigen Abflusssteuerung von Hochwasserrückhaltebecken vorgestellt.

2.1 Zur Entwicklung der Schwingklappe

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 Ingenieurgesellschaft Breinlinger und Partner aus Tuttlingen bearbeitet. Die angedachte selbstregulierende Stauvorrichtung sollte unabhängig vom Oberwasserstand eine konstante Regelabgabe aus einem Hochwasserrückhaltebecken ableiten. Dieses neuartige Bauwerk sollte dabei folgende Bedingungen erfüllen:

- Optimale Bewirtschaftung der Retentionsräume
- Gute Landschaftsverträglichkeit
- Geringe Auswirkungen auf das Fließgeschehen 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 durch den Verzicht auf kostenintensive Antriebe)
- Justierbarkeit des Regulierorganes

Die Ergebnisse der Studie wurden 1998 in der Reihe Handbuch Wasser 2 in Heft 43 von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg veröffentlicht [67]. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die Schwingklappe im Vergleich zu den näher untersuchten Bauarten mit festen Staubalken eine interessante Alternative im Hinblick auf das Abflussverhalten und die Bau- und Betriebskosten darstellt. Auf Grund der herausgearbeiteten Vorteile der Schwingklappe wurde in der Studie auf weiterführende Untersuchungen verwiesen.

1997 wurde das Institut für Wasserbau und Kulturtechnik (IWK) der Universität Karlsruhe (heute: Institut für Wasser und Gewässerentwicklung) von der Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg beauftragt, eine vertiefende Machbarkeitsstudie zur Schwingklappe zu erarbeiten. In theoretischen Abhandlungen wurden Problempunkte bezüglich

der Konstruktion, der Statik und der Hydraulik diskutiert und mögliche Lösungsansätze aufgezeigt. Vorteile versprach man sich in der Machbarkeitsstudie vor allem hinsichtlich der ökologischen Durchgängigkeit und auf Grund der nicht benötigten Antriebe und Steuerung sowie den hierdurch entsprechend geringen Bau- und Betriebskosten. Zusätzlich wurde der konkrete Einsatz einer Schwingklappe in eine Hochwasserrückhaltebecken an der Rems vorgestellt. Seinerzeit zielte man vor allem auf den Einsatz der Schwingklappe bei große Becken. Bei dem anvisierte HRB zwischen Winterbach und Schorndorf im Bereich des Remsknies liegt das HQ_{100} bei $266 \text{ m}^3/\text{s}$.

Die Machbarkeitsstudie des IWK kam zu dem Ergebnis, dass die Untersuchungen und Studien die Konsistenz der bis dahin angestellten Überlegungen zum Konzept der Schwingklappe aufzeigen und dass für die Planung und den Einsatz der Schwingklappe umfassende Untersuchungen an einem wasserbaulichen Modell erforderlich sind [48].

Anknüpfend an die Studie von 1998 wurde das Konzept der Schwingklappe weitergehend untersucht. Im Auftrag des Regierungspräsidiums Stuttgart wurden 1998 am IWK hydraulische Modellversuche zur Schwingklappe im Maßstab 1:7 durchgeführt. Es konnte nachgewiesen werden, dass bei Einhaltung bestimmter Parameter ein selbstständiges Aufrichten der Schwingklappe realisiert werden kann und das hierdurch eine selbstregulierende Abflusssteuerung ermöglicht wird. Für zwei Varianten des Klappenkörpers wurde der Arbeitsbereich in Form eines Wasserstands-Abfluss-Diagrammes aufbereitet. Auf Grund der Vielzahl von möglichen Randbedingungen (z.B. Klappengewicht, Lage des Drehpunktes) und beobachteter hydrodynamischer Instabilitäten wird in der Zusammenfassung auf die Notwendigkeit von weiterführenden Modellversuchen verwiesen [49].

Die vorgeschlagenen weiterführenden Modellversuche wurden nicht beauftragt. Erst durch ein größer angelegtes Verbundprojekt zur ökologischen Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken führte zur Wiederaufnahme der Untersuchungen zur Schwingklappe im Jahre 2005. Im Zuge der Wiederaufnahme der Untersuchungen wurde auch der Einsatzbereich der Schwingklappe als Regulierorgan in einem ökologisch angepassten Durchlassbauwerk neu definiert. Man zielte jetzt auf kleinere Hochwasserrückhaltebecken.

Ein Grund hierfür sind die verbesserten Methoden bei der Flussgebietsmodellierung, die vor allem bei den *großen Hochwasserrückhaltebecken* (vgl. Abbildung 2.3 zu neuen Anforderungen bezüglich der Stauraumbewirtschaftung führen. 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 Steuerung und Regelung nicht so stark ins Gewicht fallen, büßt in diesem Fall die Schwingklappe ihre wirtschaftlichen Vorteile ein.

In Baden-Württemberg werden im Rahmen des dezentralen Hochwasserschutz aber immer noch eine Vielzahl von kleinen Hochwasserrückhaltebecken gebaut und geplant. Beispielfhaft seien hier die Aktivitäten des Zweckverbandes Hochwasserschutz Elsenz-Schwarzbach genannt, der insgesamt 35 HRB betrieb und weitere Anlagen in der Planung hat. Aus Kostengründen wird hier häufig auf eine Steuerung verzichtet und das Durchlassbauwerk mit einer Blende ausgestattet, wodurch nur eine *ungesteuerte Abgabe* (vgl. Kapitel 4.5.1) bewerkstelligt werden kann.

Die hydrologische Auslegung von Hochwasserrückhaltebecken sieht vor, dass die Abgabe aus dem Becken während des Hochwasserereignisses möglichst konstant auf die sogenannte Regelabgabe Q_R 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.

Neben der nicht optimalen Bewirtschaftung des zur Verfügung stehenden Retentionsvolumens wirkt sich die für den Vollstau entsprechend klein dimensionierte Blendenöffnung auch negativ auf die ökologische Durchgängigkeit aus. Ein Auszug aus der von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Baden-Württemberg (LUBW) gepflegten WIBAS-Datenbank zeigt, dass im September 2008 in Baden-Württemberg 209 ungesteuerte HRB betrieben wurden.

Die Schwingklappe stellt für die kleinen Hochwasserrückhaltebecken eine kostenneutrale Alternative zu den Durchlassbauwerken mit Blende dar, die zudem systembedingt einen geringeren Einfluss auf die ökologischen Durchgängigkeit hat. Auf Grund der einfachen und robusten Konstruktion ist auch die Kostenneutralität für den Betrieb gegeben [67]. Neben dem Einsatz der Schwingklappe bei einem HRB-Neubau ist auch die Nachrüstung einer bestehenden Anlage denkbar, da nur wenige Anlagenteile von einem Umbau betroffen wären.

Kriterien für einen Einsatz der Schwingklappe sind die Wirtschaftlichkeit und die statischen Randbedingungen bei der Konstruktion des Klappenkörpers. Nach derzeitigem Wissensstand erscheint bei HRB mit Dammhöhen kleiner als 4,0 m und Regelabgaben Q_R zwischen 0,1 m³/s und 3,0 m³/s ein ökonomischer Einsatz der Schwingklappe möglich.

2.2 Beschreibung des Funktionsprinzipes

Die geforderte Aufgabe der selbstregulierenden Abflusssteuerung ist aus hydraulischer Sicht nicht einfach zu realisieren. Mit dem Anstieg des Wasserstandes im Retentionsraum steigt auch das hydraulische Potential oberstrom des Regulierorganes, wodurch sich bei gleichbleibender Stellung des Regulierorganes ein gesteigerter Durchfluss ergibt (vgl. Kapitel 4.2.1). Um einen gleichbleibende Abgabe zu gewährleisten, muss das Regulierorgan dem größeren Potential entgegenwirken. Dies geschieht bei motorgetriebenen Schützen z.B. durch eine Verkleinerung der Spaltweite. Bei der Schwingklappe erfolgt eine solche Spaltweitenverringern ohne dem Einsatz einer aufwändigen Steuer- und Regeltechnik und ohne Fremdenergie.

Das Funktionsprinzip der Schwingklappe kann wie folgt beschrieben werden: Die Schwingklappe ist eine Hohlkörperkonstruktion, die mit einem Freiheitsgrad auf einer Achse gelagert ist. Bei geringen Oberwasserständen ruht die Klappe in einer horizontalen Position (Klappenneigung 0°) und gibt eine große Querschnittfläche frei (vgl. Abbildung 4.26 a). Hierdurch wird die Durchgängigkeit des Luftraumes und der Lichteinfall in den Durchlassbereich gegenüber einer Blende verbessert.

Die exzentrisch angeordnete Achse führt dazu, dass sich bei anlaufendem Hochwasser und dem damit verbundenen Anstieg des Oberwasserstandes der Klappenkörper in Folge des Auftriebs aufrichtet und sich die Spaltweite unter der Klappe reduziert. 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 dieser Arbeit zugrunde liegenden hydraulischen Untersuchungen und die statische Bemessung des Klappenkörpers haben gezeigt, dass die Schwingklappe mit einer Dichte von ca. 300 kg/m^3 auszuführen ist. Die Klappe muss folglich zu etwa 30 % eingetaucht sein, um in einen Schwimmzustand zu gelangen. Durch die erarbeitete Klappen- und Lagergeometrie, die in Kapitel 4 vorgestellt werden, kann über eine größere Bandbreite an Oberwasserständen eine gleich bleibende Regelabgabe durch das Bauwerk sichergestellt werden (vgl. Abbildung 4.26 b).

Wenn der Oberwasserstand weiter ansteigt, so nimmt die Auftriebskraft zu und die Schwingklappe richtet sich weiter auf. Auf Grund der Exzentrizität des Lagerpunktes verringert sich die abflussrelevante Spaltweite. Die Schwingklappe wirkt somit der Erhöhung des hydraulischen Potentials im Oberwasser mit einer Verkleinerung der Spaltöffnung entgegen. Mit steigendem Oberwasserstand wird zudem die Neigung der Klappe steiler, was zu einer Reduzierung des Abflussbeiwertes C_q führt und sich somit ebenfalls positiv auf die Abflusssteuerung auswirkt (vgl. Kapitel 4.2). Mit den Versuchen, welche die Basis dieser Arbeit bilden, konnte gezeigt werden, dass die Schwingklappe in Abhängigkeit des gewählten Lagerpunktes erst ab einer Klappenneigung von mehr als 15° bis 30° in das Abflussgeschehen eingreift und den Durchfluss konstant hält. Der Wasserstand Ober- und Unterstrom der Schwingklappe ist also bis zu dieser Neigung nahezu identisch.

Im weiteren Verlauf des Hochwassers steigen der Zufluss und damit der Wasserstand im Gewässer weiter an und die Schwingklappe richtet sich weiter auf (vgl. Abbildung 4.26 c). Die Energie für den gesamten Aufrichtvorgang wird bei der Schwingklappe lediglich über die Auftriebskraft des Klappenkörpers bezogen. Bei jedem Oberwasserstand bildet sich ein stabiles Momentengleichgewicht um den Lagerpunkt aus.

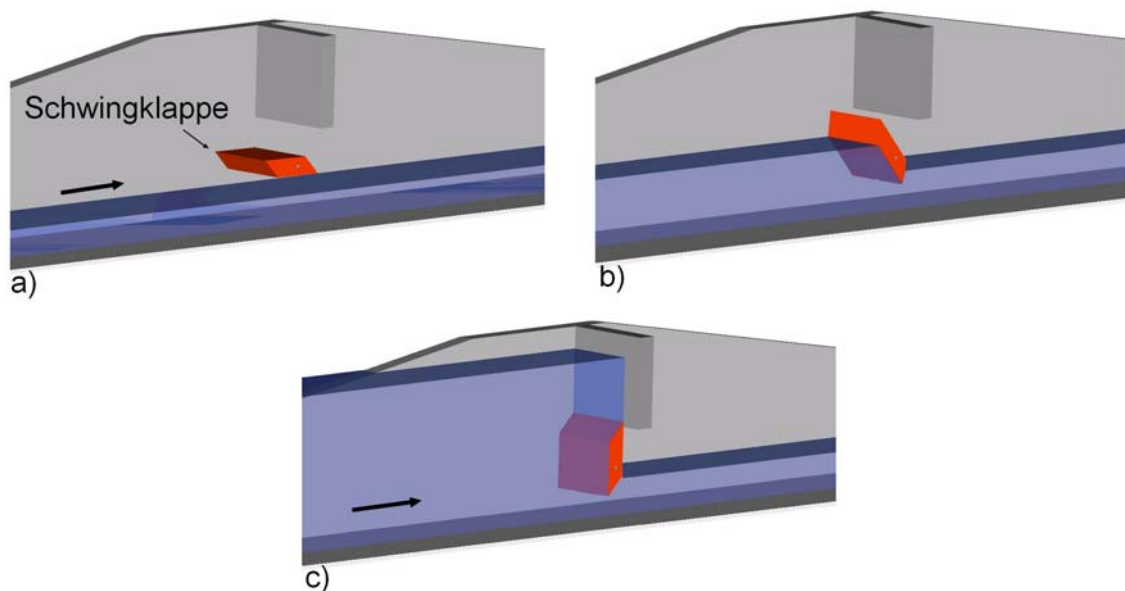


Abbildung 2.1: Funktionsprinzip der Schwingklappe

Im Rahmen der dieser Arbeit zugrunde liegenden Versuchen zum hydraulischen Verhalten der Schwingklappe konnte erarbeitet werden, dass an der Schwingklappe bis zum Erreichen der senkrechten Position (Klappenneigung 90°) immer rückgestauter Abfluss herrschen muss und somit ein entsprechend hoher Unterwasserstand baulich realisiert werden muss. Nur so kann die benötigte Auftriebskraft erzeugt werden. Der unterstromige Wasserstand hat damit aber auch immer einen Einfluss auf die Abflussabgabe der Schwingklappe, da keine vollständige Abflusskontrolle erwirkt wird. Detaillierte Ausführungen zum hydraulischen Verhalten der Schwingklappe sind in Kapitel 4.2 enthalten.

2.3 Die Schwingklappe als Regulierorgan eines Hochwasserrückhaltebeckens

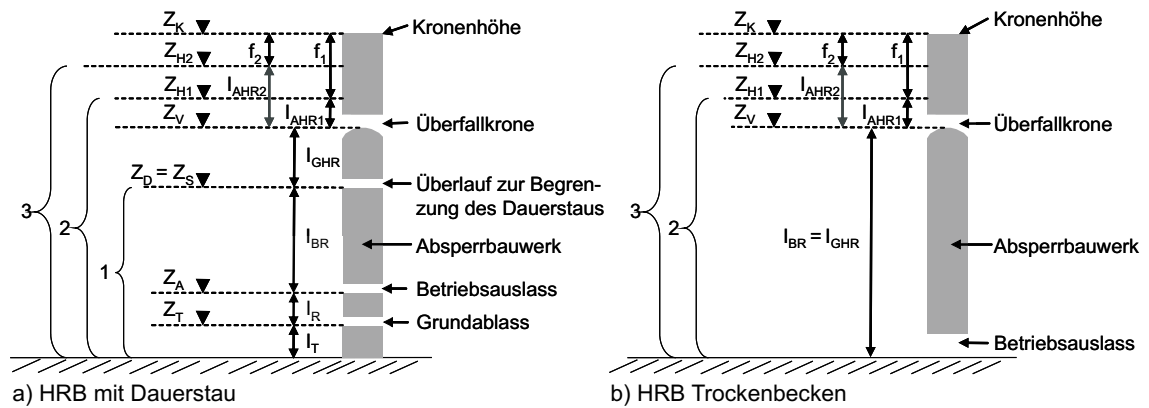
Alle bisherigen Studien zur Schwingklappe definieren den Einsatzbereich als Regulierorgan bzw. Verschluss zur Abflusssteuerung aus einem Hochwasserrückhaltebecken. Im folgenden Abschnitt wird daher einführend auf die relevanten wassersirtschaftlichen und wasserbaulichen Aspekte und Kriterien zu Hochwasserrückhaltebecken eingegangen.

2.3.1 Stauraumdefinitionen bei einem HRB

Hochwasserrückhaltebecken (HRB) sind besonders einfache Arten von Talsperren. Wenn Wasser zu einem anderen Zweck als dem Hochwasserschutz (z.B. Naherholung) im Stauraum zurückgehalten wird, so spricht man von einem *Dauerstaubecken*. *Trockenbecken* hingegen werden ausschließlich für Hochwasserrückhalt genutzt.

Die Bemessungskriterien für Hochwasserrückhaltebecken sind in der Stauanlagennormen DIN 19700 Teile 10, 11 und 12 zusammengetragen. Unterschieden werden bei der Bemessung eines Hochwasserrückhaltebeckens nach DIN 19700 Teil 12 die in Abbildung 2.2 dargestellten Teilräume.

Bei Dauerstaubecken beginnt der gewöhnliche Hochwasserrückhalteraum erst über dem Dauerstauziel Z_D bzw. dem Stauziel Z_S . Der gewöhnliche Hochwasserrückhalteraum wird nach den Erfordernissen des Hochwasserschutzes für die Unterlieger und dem ereignisrelevanten Gebietszufluss bemessen. 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 Hochwasserrückhalterausms und der Grundablass ist für die Bewirtschaftung des Dauerstaus vorzusehen.



Legende:

- f_1 Freibord im HWBF 1
- f_2 Freibord im HWBF 2
- Z_K Kronenstau = Wasserspiegel in Höhe der Krone des Absperrbauwerkes
- Z_{H2} Hochwasserstauziel 2 in Folge BHQ_2 im HWBF 2
- Z_{H1} Hochwasserstauziel 1 in Folge BHQ_1 im HWBF 1
- Z_V Vollstau = Wasserspiegel in Höhe Überfallkrone
- Z_S Stauziel
- Z_A Absenkziel
- Z_T Tiefstes Absenkziel
- I_{AHR2} Außergewöhnlicher Hochwasserrückhalteraum im HWBF 2
- I_{AHR1} Außergewöhnlicher Hochwasserrückhalteraum im HWBF 1
- I_{GHR} Gewöhnlicher Hochwasserrückhalteraum
- I_{BR} Betriebsraum
- I_R Reserveraum
- I_T Totraum
- 1 Dauerstauraum
- 2 Gesamtstauraum im HWBF 1
- 3 Gesamtstauraum im HWBF 2

Abbildung 2.2: Begriffsdefinitionen beim Hochwasserrückhaltebecken

2.3.2 Klassifizierung von HRB

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 [23].

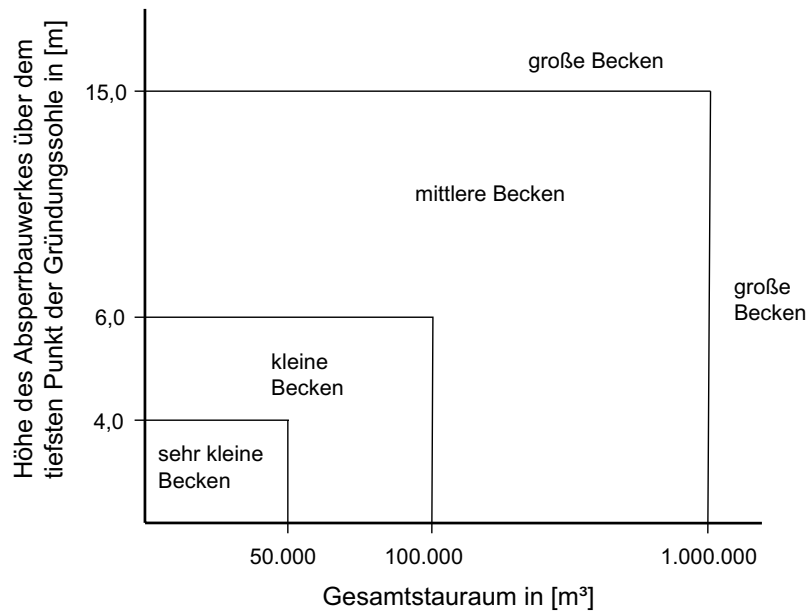


Abbildung 2.3: Klassifizierung von Hochwasserrückhaltebecken nach DIN 19700-12.

Neben der Klassifizierung nach DIN 19700 werden die Hochwasserrückhaltebecken auch bezüglich der konstruktiven Ausgestaltung gruppiert und definiert werden. So unterscheidet man die Durchlassbauwerke in offene und geschlossene Durchlassbauwerke und je nach Ausführung in Rohrdurchlässe oder geschlossene Kastenprofile. Eine Gruppierung ist auch anhand der Beschaffenheit der Sohle möglich. Besteht die Sohle im Durchlassbereich aus natürlichem Substrat oder liegt eine glatte Betonsohle vor? Auch die Art der hydrologischen Funktion kann für eine Eingruppierung herangezogen werden, man unterscheidet hier z.B. gesteuerte und ungesteuerte HRB (vgl. Abbildung 4.61).

2.3.3 Lage des HRB zum Gewässer

Ein Hochwasserrückhaltebecken besteht aus dem Absperrbauwerk und dem zugehörigen Staubecken. Je nach Lage des Beckes zum Gewässer unterscheidet man zwischen Becken im *Hauptschluss* und Becken im *Nebenschluss*. Staubecken im Hauptschluss werden vom Gewässer unmittelbar durchflossen. Das Absperrbauwerk ist quer zum Tal angeordnet (vgl. Abbildung 2.4).

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 Flussdeich modifiziert werden und als Längsdamm dienen (vgl. Abbildung 2.5).

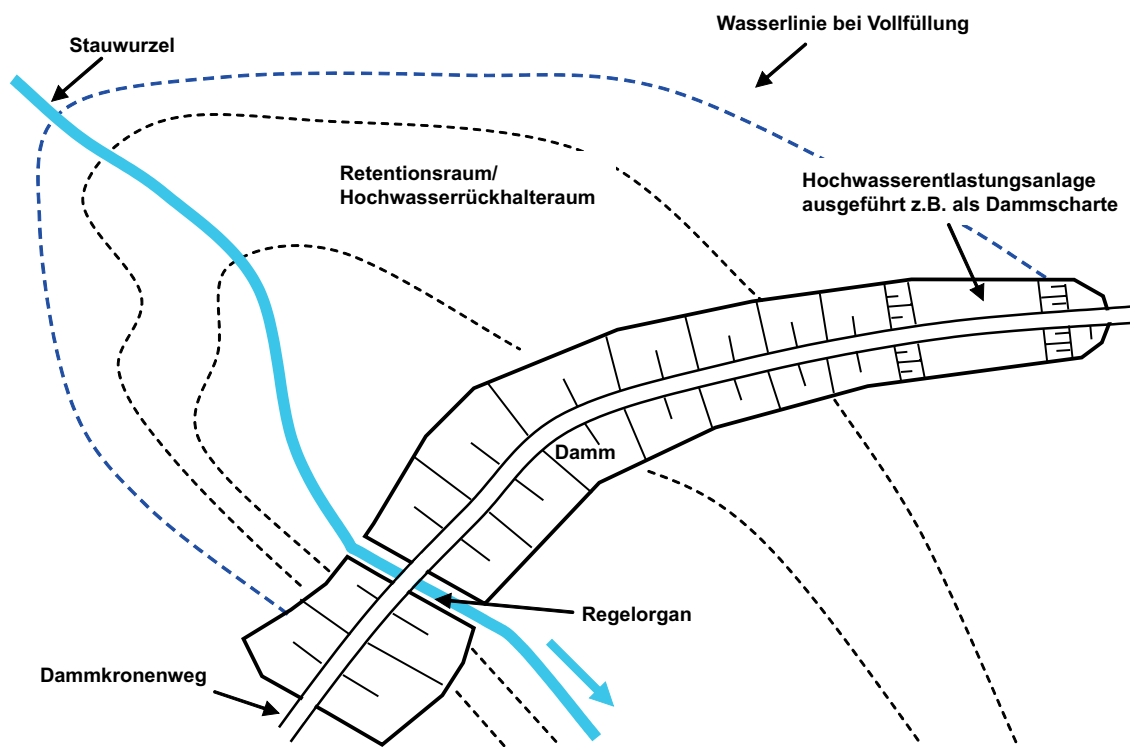


Abbildung 2.4: Systemskizze eines HRB im Hauptschluss, verändert nach [70].

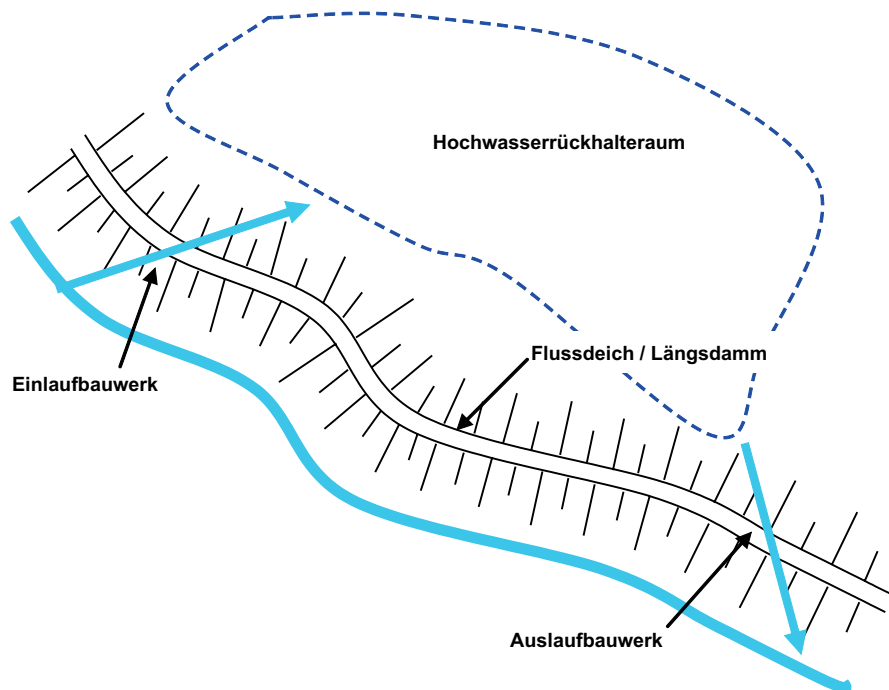


Abbildung 2.5: Systemskizze eines HRB im Nebenschluss, verändert nach [70].

2.3.4 HRB in Baden-Württemberg

In der Wassermengenbewirtschaftung spielt der Hochwasserschutz eine wichtige Rolle. Auf Grund der von Hochwässern verursachten monetären Schäden gibt es eine Vielzahl von Bestrebungen, die Hochwassergefahr zu mindern und die Schadenshöhen zu verringern. Der Hochwasserschutz muss daher eine Daueraufgabe und ein Schwerpunkt der Umweltpolitik sein. Dies spiegelt sich auch in den rechtlichen Rahmenbedingungen wider.

Auf europäischer Ebene hat der Europäische Rat am 18.09.2007 eine Richtlinie zur Bewertung und zum Management von Hochwasser verabschiedet. Die Richtlinie soll dazu beitragen, eine einheitliche Vorgehensweise beim vorbeugenden Hochwasserschutz und dem Management von Hochwasserrisiken unter den Mitgliedsstaaten zu erreichen. In der Richtlinie werden die drei folgenden Bausteine eingeführt:

- Bewertung der Hochwasserrisiken,
- Kartierung der Gefahr und der Risiken und
- Erstellung von Maßnahmenplänen

Auf Bundesebene ist am 10.05.2005 das *Gesetz zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes* in Kraft getreten. Auch hier wird im wesentlichen die Priorität auf die Bausteine Bewertung, Kartierung und Erstellung von Maßnahmenplänen gelegt. Die Voraussetzungen für einen vorbeugenden Hochwasserschutz wurden mit der Novellierung des Wasserhaushaltsgesetzes, des Baugesetzbuches, des Raumordnungsgesetzes und des Bundes-Bodenschutzgesetzes geschaffen. Aufgabe der Länder und Kommunen ist es, diese rechtsverbindlich umzusetzen.

Die Hochwasserschutzstrategie des Landes Baden-Württemberg baut auf diesen Gesetzesgrundlagen auf und definiert die folgenden drei Handlungsfelder als die Kernpunkte für einen erfolgreichen und ganzheitlichen Hochwasserschutz.

- Technischer Hochwasserschutz als Infrastrukturmaßnahme,
- Hochwasser- Flächenmanagement mit Flächenvorsorge für hochwassergefährdete Gebiete und Wasserrückhaltung in der Fläche und
- Hochwasservorsorge mit Bauvorsorge, Verhaltensvorsorge und Risikovorsorge

Der Etat für den Hochwasserschutz wurde in den vergangenen Jahren erhöht und viele Maßnahmen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes konnten hierdurch umgesetzt werden [90].

Im Handlungsfeld technischer Hochwasserschutz unterstützt das Land Baden-Württemberg dabei die Kommunen und Verbände, für vorhandene Siedlungs-, Gewerbe- und Verkehrsflächen in Gewässernähe die Hochwassergefahr durch technische Maßnahmen zu vermindern. Neben Deichen, Mauern und mobilen Schutzwänden stellen Hochwasserrückhaltebecken eine Lösungsmöglichkeit dar.

Der Betrieb von Hochwasserrückhaltebecken und Stauanlagen ist schon seit jeher eine bekannte Möglichkeit, den Hochwasserschutz lokal zu verbessern. Der Betrieb von Stauanlagen hat auch in BW eine lange Tradition, die älteste erfasste Stauanlage ist der Pfaffensee in Stuttgart, welcher 1560 von Herzog Christoph zur nachhaltigen Wasserversorgung der Mühlen im Nesenbachtal angelegt wurde.

Auch heute werden in Baden-Württemberg eine Vielzahl von Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren betrieben. Alle Bauwerke sind in der durch die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz gepflegten Datenbank des Informationssystems Wasser, Immissionsschutz, Boden, Abfall und Arbeitsschutz (WIBAS) erfasst. Mit Stand September 2008 wurden in Baden-Württemberg 686 Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren betrieben.

Betrieben werden diese Anlagen von Kommunen, Wasser- und Zweckverbänden, Firmen, Privatleuten und vom Land Baden-Württemberg, wobei ca. 50 % der Becken von Kommunen und weitere 35 % von Zweck- und Wasserverbänden betrieben werden. Der älteste Betreiber ist der Wasserverband Wedel-Brenz, der im Jahre 1955 gegründet wurde. Der Betreiber mit den meisten Hochwasserrückhaltebecken ist der Zweckverband Hochwasserschutz Elsenz-Schwarzbach, der im Jahre 2008 allein 35 Becken betrieb [78]. Abbildung 2.6 gibt einen Überblick über die in Baden-Württemberg betriebenen Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken.

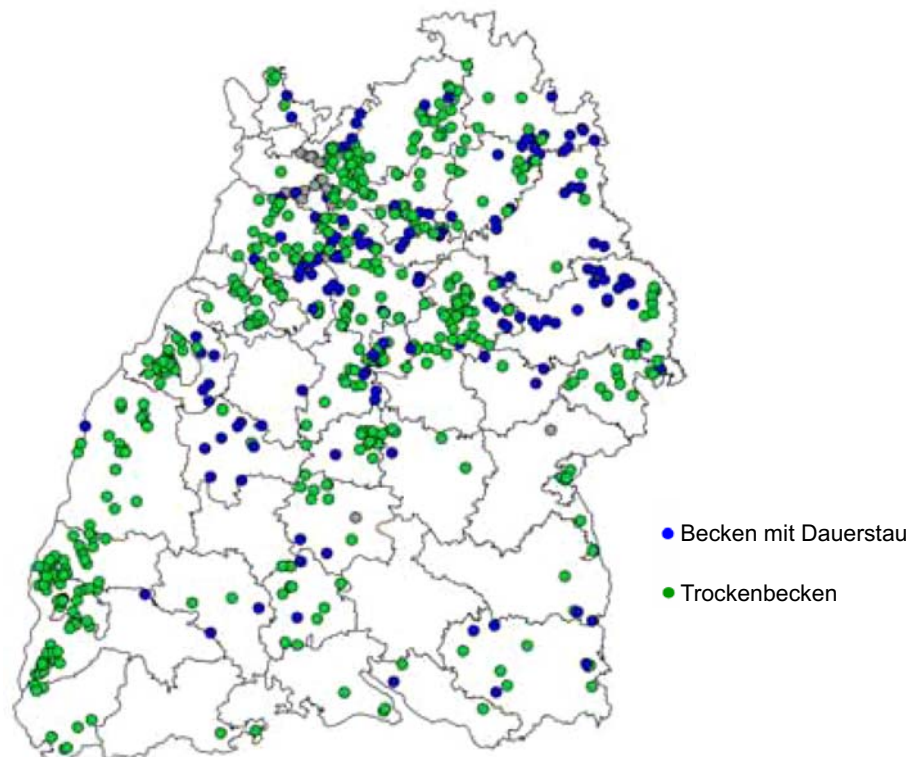


Abbildung 2.6: Übersicht über die Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren mit und ohne Dauerstau, aus [78].

In Kapitel 2.1 wurde der Einsatzbereich der Schwingklappe abgesteckt. Derzeitig scheint ein Einsatz bei *sehr kleinen* und *kleinen* Trockenbecken im Hauptschluss (Klassifizierung gemäß DIN 19700) wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll. Ein Auszug aus der WIBAS-Datenbank zeigt, dass in Baden-Württemberg 209 sehr kleine und kleine ungesteuerten Trockenbecken im Hauptschluss betrieben werden, also potentielle Standorte für die Schwingklappe darstellen. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass sich diese Anzahl in Zukunft noch erhöhen wird, da im Zuge der Betreibungen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes weitere technische Maßnahmen geplant und umgesetzt werden.

2.3.5 Bemessungsgrundlagen für HRB

Die Bemessung eines Hochwasserrückhaltebeckens muss hinsichtlich zweier Aspekte erfolgen. Zum einen müssen die Anlagenteile einen optimalen Hochwasserschutz für die Unterlieger gewährleisten, zum anderen muss das Hochwasserrückhaltebecken selber vor Schäden und Zerstörung durch eine hydraulische Überlastung gesichert werden. Hydrologische Daten stellen dabei die wesentlichen Grundlagen für die Planung und den Betrieb von Hochwasserrückhaltebecken dar.

Diese unterschiedlichen Anforderungen führen auch zu den in der DIN 19700-10 unterschiedenen Hochwasserbemessungsfällen (HWBF). Die Hochwasserbemessungsfälle 1 und 2 berücksichtigen dabei den Gedanken der Anlagensicherheit. Die Hochwasserentlastungsanlage wird anhand des HWBF 1 und des dazugehörigen Abflusses BHQ_1 bemessen, der Nachweis der Stauanlagensicherheit bei Extremhochwasser wird im HWBF 2 über den Abfluss BHQ_2 berücksichtigt. Die für Hochwasserrückhaltebecken maßgeblichen jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeiten für die Bemessungshochwasserzuflüsse sind Tabelle 2.1 zu entnehmen.

Tabelle 2.1: Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeiten für BHQ_1 und BHQ_2

Klassifikation gemäß DIN 19700	BHQ_1	BHQ_2
Große HRB	$T = 1.000 \text{ a}$	$T = 10.000 \text{ a}$
Mittlere und kleine HRB	$T = 500 \text{ a}$	$T = 5.000 \text{ a}$
Sehr kleine HRB	$T = 200 \text{ a}$	$T = 1.000 \text{ a}$

Der Hochwasserschutzgrad für die Unterlieger wird bei der Bemessung des gewöhnlichen Hochwasserrückhalteriums mit dem HWBF 3 erfasst. Die Bemessungsgrößen für den gewöhnlichen Hochwasserrückhalterium 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 [44]. Die von der LFU (2005) veröffentlichten Anhaltswerte für die Wahl des Hochwasserschutzgrades im Leitfaden *Bemessungshochwasser* sind in Abbildung 2.7 dargestellt.

Nutzungsarten	HQ ₅	HQ ₁₀	HQ ₂₅	HQ ₅₀	HQ ₁₀₀	HQ ₂₀₀
Naturlandschaften und landwirtschaftliche Flächen	Kein Hochwasserschutz					
Einzelgebäude, lokale Infrastruktur						
Siedlungen, Infrastruktur mit überörtlicher Bedeutung, Industrieanlagen						
Sonderobjekte, Sonderisiken						

Abbildung 2.7: Anhaltswerte für die Wahl des Hochwasserschutzgrades (Wiederkehrzeit T_n) in Baden-Württemberg für bestehende Nutzungsarten, nach [72]

Trotz aller technischer Bemühungen ist ein absoluter Hochwasserschutz nicht möglich. Bei Hochwasserereignissen größer BHQ_3 springt planmäßig die Hochwasserentlastung an und die Sicherung des Bauwerkes steht bei der Anlagensteuerung im Vordergrund. Durch die Hochwasserentlastung kommt es zu einer Überschreitung des Regelabgabe Q_R und die Hochwasserschutzwirkung für die Unterlieger wird geringer und kann im Extremfall vollständig verloren gehen. Die Unterlieger sind über die verbleibende Hochwassergefahr zu informieren. In Baden-Württemberg kann das z.B. mittels der Hochwassergefahrenkarten aufgezeigt werden [77].

2.3.6 Rechtliche Kriterien zu HRB

Bei der Bemessung und der Planung von Hochwasserrückhaltebecken gilt DIN 19700 als *Stand des Wissens*. In der überarbeiteten DIN 19700 - Stauanlagen, Stand 2004, finden sich die Vorgaben für Hochwasserrückhaltebecken in den drei Teilen - Teil 10 Gemeinsame Festlegungen, Teil 11 Talsperren und Teil 12 Hochwasserrückhaltebecken. Um eine einheitliche Anwendung der DIN 19700 in Baden-Württemberg zu ermöglichen, wurden ergänzende Regelungen von der Landesanstalt für Umwelt, Naturschutz und Messungen (LUBW) veröffentlicht [77].

Das für Hochwasserrückhaltebecken ebenfalls wichtige DVWK-Merkblatt 202/1991 wurde anlässlich der Aktualisierung der DIN 19700 im Dezember 2005 zurückgezogen. Da es jedoch nicht durch neuere Vorschriften oder technische Regelwerke ersetzt wurde oder auf Grund eines verbesserten Kenntnisstandes überholt ist, ist es weiterhin als Teil der allgemein anerkannten Regeln der Technik anzusehen.

In Abbildung 2.2 wurden die grundsätzlichen Begrifflichkeiten von Hochwasserrückhaltebecken mit Dauerstau und von Trockenbecken geklärt. Der Anwendungsbereich der Schwingklappe wurde in Kapitel 2.1 skizziert, demnach entspricht nur ein Einsatz in Trockenbecken denen mit dem Konzept der Schwingklappe verfolgten ökologischen Zielen. Bei Trockenbecken dient der Grundablass häufig auch als Betriebsauslass und ist in der Regel mit einem steuerbaren Verschluss ausgestattet.

Das Konzept der Schwingklappe ist entsprechend der Klassifizierung nach DIN 19700 und dem in den bisherigen Ausführungen aufgezeigten Anwendungsbereich für *kleine* und *sehr kleine* Trockenbecken geeignet. Gemäße DIN 19700-12 reicht bei diesen Randbedingungen

ein Betriebsauslass/Grundablass aus. Eine Beachtung der (n-1)-Regel für den Betriebsauslass muss nur bei *mittleren* und *großen* Becken erfolgen.

2.3.7 Ökologische Anforderungen an ein Durchlassbauwerk

Natürliche Fließgewässer und ihre Auen stellen mit ihren unterschiedlichen Gewässerstrukturen einen vielfältigen Lebensraum für verschiedene Tier- und Pflanzenarten dar. In den heute weit verbreiteten Kulturlandschaften bilden Fließgewässer sogenannte linienhafte Biotope und stellen ein longitudinales Kontinuum von der Quelle bis zur Mündung dar. Natürliche Fließgewässer ermöglichen aber auch den Austausch und die Wanderung zwischen Gewässer und Aue (laterale Durchgängigkeit) und zwischen Sohle und fließender Welle (vertikale Durchgängigkeit).

Kommt es durch anthropogene Einflüsse zu einer Unterbrechung des Kontinuums, so kann das natürliche Ausbreitungsverhalten von Flora und Fauna gestört werden. Im Extremfall kann dies, bedingt durch die Isolation, zur genetischen Verarmung und zur Auslöschung von Populationen führen. Die Möglichkeit zur Wanderung in und entlang der Fließgewässer ist für viele Arten durch die Lebenszyklen bedingt und somit überlebenswichtig. Neben den aquatischen Organismen wie den Fischen und Benthosorganismen trifft dies auch auf Landtiere (terrestrische Durchgängigkeit) und Tiere der Wasserwechselzone (amphibische Durchgängigkeit) zu. Die Wanderbewegungen und deren Ausprägung hängt dabei stark von den artspezifischen Anforderungen ab. Manche Fische unternehmen entsprechend ihrer Lebenszyklen zielgerichtete Wanderungen gewässerauf- oder gewässerabwärts und legen dabei große Strecken zurück. Demgegenüber ist der Ortswechsel von wirbellosen Kleintieren auf einen kleinen Bereich beschränkt und oft auch eine passive Wanderung in Form einer Verdriftung. Diese Verdriftungen werden jedoch häufig durch aktive Aufwanderungen, z.B. Kompensationsflug, ausgeglichen. Neben den Tieren, die im Gewässer leben, wird das linienhafte Biotop Fließgewässer auch von flugfähigen Insekten und Säugetieren als Wanderweg oder zumindest als Orientierungshilfe genutzt [9].

Die Bedeutung eines durchgängigen Fließgewässers für die im und am Gewässer lebenden Tiere wird auch in der EU-Wasserrahmenrichtlinie berücksichtigt, da hier die Durchgängigkeit der Gewässer als zentrale Zielvorgabe verankert ist. Einen guten Überblick über die Grundlagen der Durchgängigkeit für Tiere gibt der Leitfaden der LUBW *Durchgängigkeit für Tiere in Fließgewässern, Leitfaden Teil 1 - Grundlagen* .

In Kapitel 2.3.3 wurden die zwei verschiedenen Anordnungsmöglichkeiten von Hochwasserrückhaltebecken zum Gewässer beschrieben. Vor allem die Hochwasserrückhaltebecken im Hauptschluss stellen mit ihren talquerenden Dämmen und den im Gewässer angeordneten Durchlassbauwerken einen erheblichen Eingriff in das Längskontinuum eines Fließgewässers dar. Oftmals bilden sie ein Wanderhindernis für die aquatische, amphibische und terrestrische Tierwelt [28].

Durch eine ökologisch angepasste Konstruktion kann jedoch der Einfluss eines Hochwasserrückhaltebeckens auf die Durchgängigkeit eines Gewässers minimiert werden. Wichtig ist dabei, dass die Anforderungen der landschaftstypischen Fauna und dabei vor allem die Anforderungen der gewässertypischen Fischfauna und der Benthosorganismen berücksichtigt werden. Ausführungsbeispiele für ökologisch angepasste Durchlassbauwerke sind im Leitfaden der LUBW *Durchgängigkeit für Tiere in Fließgewässern, Leitfaden Teil 3*

- *Hochwasserrückhaltebecken* enthalten. Folgende wichtige Punkte sollten bei der Planung und dem Bau eines Hochwasserrückhaltebeckens (Trockenbecken) im Hauptschluss berücksichtigt werden [73].

- Hohe Fließgeschwindigkeiten, geringe Wassertiefen und eine strukturarme, glatte Sohle führen zu einer signifikanten Beeinträchtigung der Durchgängigkeit für aquatische Organismen.
- Das Gewässer sollte in seiner natürlichen Gestalt (Breite, Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, Sohlmaterial, usw.) durch das Hochwasserrückhaltebecken geführt werden.
- Tosbecken sind so zu gestalten, dass sie das Fließgeschehen im Nichteinstaufall nicht verändern.
- Die Durchgängigkeit von Feststoffen muss gewährleistet sein, damit keine Sedimentfallen entstehen. Durch die Verschlammung kann es zu einer ungünstigen Veränderung der Sohlstruktur und damit einhergehend zu einer Veränderung des Lebensraumes im Nahbereich des HRB kommen.
- Abstürze und Sohlschwelen sind im Durchlassbauwerk zu vermeiden.
- Eine betriebs- und gewässerangepasste Unterhaltung der Rechen ist erforderlich.
- Ein beidseitiger Uferstreifen sollte durch das Durchlassbauwerk und durch den Schieberbereich geführt werden, um die amphibische Durchgängigkeit sicher zu stellen.
- Ungesteuerte Becken wirken sich auf Grund der ganzjährigen kleinen Schieberöffnungen negativ auf die Durchgängigkeit aus. Wenn möglich sollte eine gesteuerte Retentionsraumbewirtschaftung vorgesehen werden.
- Die terrestrische Durchgängigkeit kann durch den Absperrdamm beeinflusst werden. Ein flacher Damm hat eine geringere Barrierewirkung für Landtiere. Kleine Landtiere können die Uferstreifen für die Durchwanderung des Hochwasserrückhaltebeckens verwenden.
- Die natürliche, gewässerbegleitende Gehölzstruktur sollte durch das Durchlassbauwerk geführt werden, da sich flugfähige Insekten und Vögel bei ihren Wanderungen an dieser Begleitvegetation orientieren. Hochwasserrückhaltebecken mit großen Dammhöhen haben einen größeren Einfluss auf die Durchgängigkeit des Luftraumes als kleinere Anlagen.
- Ein ausreichender Lichteinfall in den Durchlassbereich sollte sichergestellt werden.

2.4 Selbstregulierende Abflusssteuerung bei HRB - Anwendungsbeispiele

In der wasserbaulichen Praxis stellt sich häufig die Aufgabe, dass der Abfluss oder der Wasserstand mit Hilfe einer wasserbaulichen Anlage gesteuert oder geregelt werden soll. Die Abflusssteuerung erfolgt dabei durch ein sogenanntes Regel- oder Verschlussorgan. Aspekte wie Wartung, Investitionen und Betriebssicherheit können dabei zu der Forderung führen,

dass die Abfluss- oder Wasserstandssteuerung ohne den Einsatz von Fremdenergie und ohne aufwendige mechanische oder elektronische Regelungstechnik erfolgen soll. Regelorgane, die diese Forderung erfüllen nennt man *selbstregulierend*.

In den letzten Jahrzehnten sind eine Vielzahl von selbstregulierenden Verschlüsse im Labor entwickelt und auch teilweise in die Praxis transferiert worden (z.B. Raemy (1998), Litrico (2005)). Hydrodynamische Instabilitäten, mangelnde Betriebsgenauigkeit und Störanfälligkeit haben jedoch den Einsatz dieser selbstregulierenden Systeme im Wasserbau weitestgehend verhindert [?]. Lediglich im Bereich der Abwasserbehandlung haben sich selbstregulierende Abfluss- und Wasserstandssteuerung in Form von schwimmergesteuerten Schiebern, Überlaufklappen und Wirbelventilen etabliert.

Für den Einsatz in einem ökologisch angepassten Hochwasserrückhaltebecken (HRB) kommen grundsätzlich nur Systeme zur Abflusssteuerung in Frage, die einen sohlebenen Durchlass besitzen und die Sohldurchgängigkeit nicht einschränken. Zudem müssen die Systeme in der Lage sein, den Abfluss zu regeln. Die meisten der entwickelten selbstregulierenden Systeme sind Wasserstandsregler. Bei Einhaltung eines vorgegebenen Stauzieles (Oberwasserstand) regulieren sie den Durchfluss. Für den Einsatz in einem HRB sind diese Systeme daher nicht geeignet, hier wird der umgekehrte Fall benötigt. Eine konstante Regelabgabe an die Unterlieger soll unabhängig vom Wasserstand im Retentionsraum erfolgen. Im folgenden Abschnitt werden zwei Anwendungsbeispiele für eine selbstregulierende Abflusssteuerung bei HRB näher vorgestellt.

2.4.1 HRB Apfelbach, schwimmergesteuerter Schieber

Das Hochwasserrückhaltebecken Apfelbach auf der Gemarkung Affalterbach, Kreis Ludwigsburg, ist als Trockenbecken im Hauptschluss mit einem offenen Durchlassbauwerk konzipiert. Die Dammhöhe beträgt ca. 9,0 m und das bereitgestellte Stauvolumen umfasst 33.000 m³. Die Hochwasserentlastungsanlage ist als überströmbare Dammscharte ausgebildet. Die Regelabgabe des im Jahre 2005 in Betrieb genommenen HRB beträgt 1,9 m³/s. Nach DIN 19700 ist das HRB Apfelbach der Kategorie *mittleres HRB* zugeordnet, so dass neben dem Betriebsdurchlass ein redundanter Grundablass vorgesehen werden muss. In der Stauwand befindet sich eine zweite Öffnung, die mit einem von Hand zu betätigendem Schieber verschlossen ist. Die Planung und die Bauleitung beim HRB Apfelbach wurde vom Ingenieurbüro Frank GmbH aus Backnang übernommen.

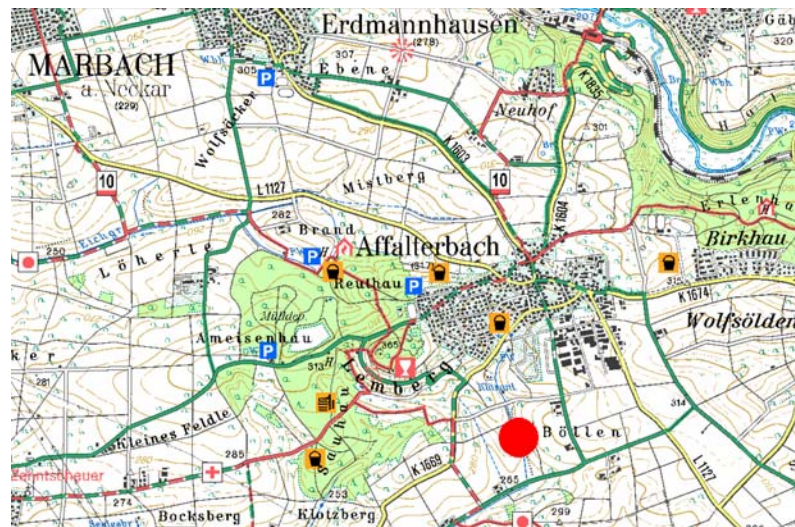


Abbildung 2.8: HRB Apfelbach, Lage



Abbildung 2.9: HRB Apfelbach, Ansicht von der Unterwasserseite (links), Ansicht von der Oberwasserseite (rechts)

Der Betriebsauslass ist mit einem schwimmergesteuerten Schieber der Firma Biogest AG, Typ *Alpheus*, ausgestattet. Ursprünglich wurde dieses System für den Einsatz in der Abwassertechnik entwickelt.

Bei diesem System ist auf der Oberwasserseite der Stauwand ein Schwimmer angeordnet, der über eine einstellbare Hebelmechanik die Schieberplatte betätigt. Sowohl der Schwimmer als auch die Mechanik ist mit einer Haube vor Beschädigung geschützt. Im Nicht-einstaufall ruht der Schwimmer oberhalb des Durchlasses in der Ruheposition und der Schieber gibt die komplette Querschnittsfläche frei. Die Regelung des *Alpheus* beginnt, wenn der Wasserstand im Becken die Unterkante des Schwimmers erreicht. Durch das Anheben des Schwimmers wird die Schieberplatte angesenkt, so dass der Abflussquerschnitt verkleinert wird. Die Übertragung der Schwimmerbewegung auf die Schieberplatte erfolgt

über eine unter einer Schutzhaube angeordnete Mechanik, die durch eine Besonderheit des *Alpheus* weitestgehend im Trockenem angeordnet ist.

Die Haube ist luftdicht ausgeführt und der Schwimmer komprimiert beim Aufsteigen ein Luftpolster, so dass der Wasserstand im Retentionsraum nicht mit dem Wasserstand in der Haube identisch ist. Hierdurch kann der benötigte Verfahrweg des Schwimmers verkleinert und damit besser auf die Bewegung der Schieberplatte abgestimmt werden. Abbildung 2.10 zeigt das Funktionsprinzip und Abbildung 2.14 gibt einen Eindruck der Schwimmersteuerung beim HRB Apfelbach. Zu erkennen ist dabei der an der unterwasserseitigen Stauwand angebrachte redundante Handschieber.

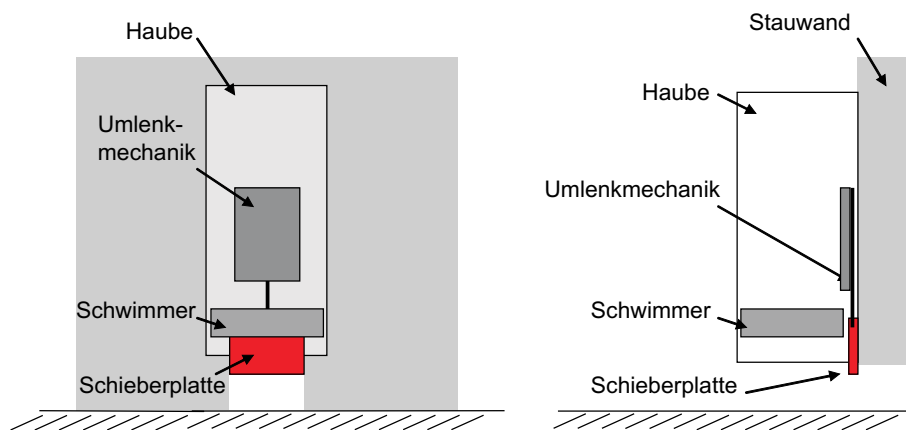


Abbildung 2.10: Schematischer Schnitt und Seitenansicht des *Alpheus*



Abbildung 2.11: HRB Apfelbach, Blick auf die Schwimmerunterkante (links), redundanter Schieber des Betriebsauslasses an der Unterwasserseite der Stauwand (rechts).

Durch die besondere Konstruktion des schwimmergesteuerten Schiebers beim HRB Apfelbach und die Justierbarkeit der Mechanik kann eine gleichmäßige Regelabgabe im Hochwasserfall ohne den Einsatz von Fremdenergie oder einer aufwändigen Steuer- und Regelungstechnik realisiert werden. Die vom Hersteller errechnete Entwicklung des Schwimmerweges

und der Spaltweite sowie die Abflusskennlinie in Abbildung 2.12 und Abbildung 2.13 zeigen dies deutlich auf. Anzumerken ist hierzu, dass die Berechnungsgrundlagen des Herstellers von einem freien Abfluss unterstrom des Schiebers ausgehen. Ein Rückstau aus dem Gewässer ist bei der Dimensionierung nicht berücksichtigt und würde sich auf das gleichmäßige Regelverhalten auswirken. Im Falle des HRB Apfelbach ist auf Grund der Topographie das Gefälle des unterstromigen Fließabschnittes ausreichend, um diese Forderung zu erfüllen. Je nach Standort des HRB könnten sich hieraus jedoch Einschränkungen für den Einsatz des *Alpheus* ergeben (vgl. Abbildung 5.12).

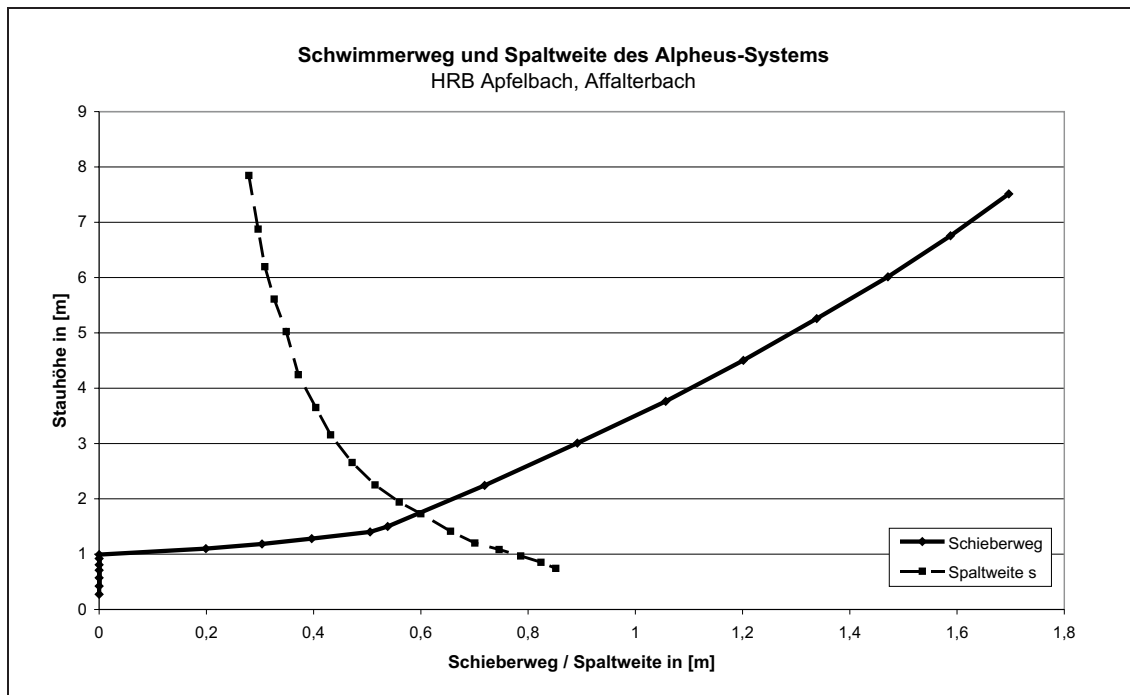


Abbildung 2.12: Schwimmerweg und Spaltweite des Alpheus-Systems, HRB Apfelbach

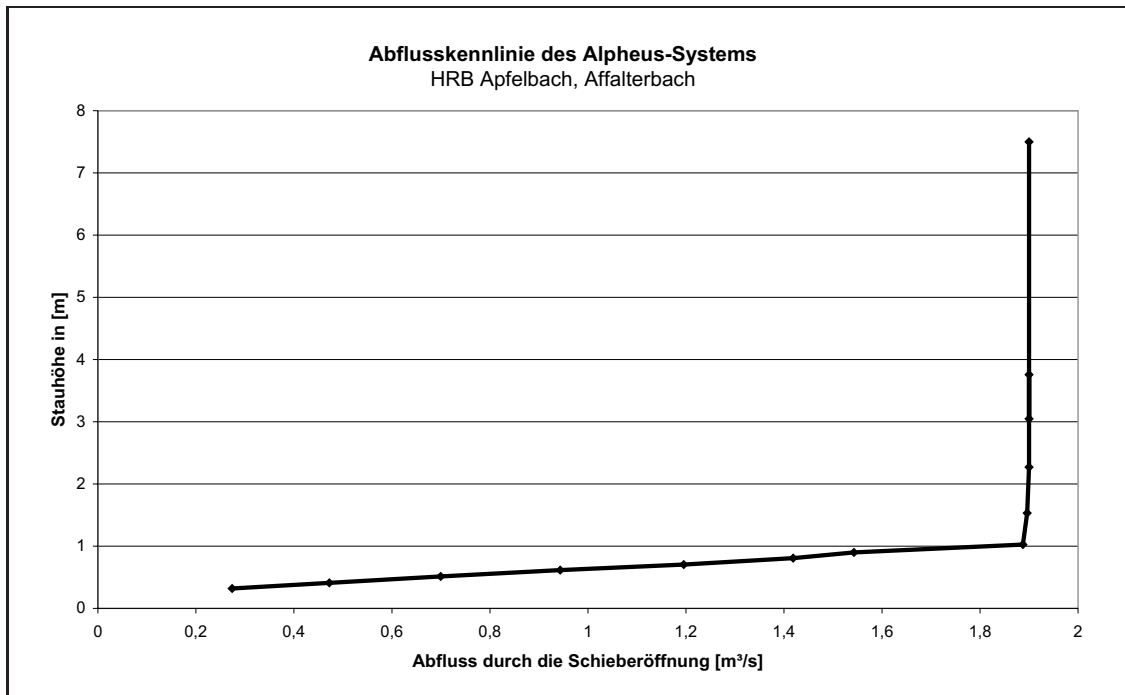


Abbildung 2.13: Abflusskennlinie des Alpheus-Systems, HRB Apfelbach

Auf Grund der hydrologischen Bedingungen und der Lage des HRB Apfelbach unterstrom der Ortslage Affalterbach kommt es vor allem bei kurzen und sehr intensiven Regenereignissen in Folge der Überlastung der Regenüberlaufbecken im Stadtgebiet zu Einstauereignissen. Bedingt durch die kurzen Einstauzeiten und der Tatsache, dass das Becken über keine Pegel oder sonstige Messtechnik verfügt, ist eine genaue Analyse des Abflussverhaltens und der Regulierwirkung nicht möglich. Seit der Inbetriebnahme im Jahre 2005 kam es 13 mal zu Einstauereignissen, wovon bei zweien der Retentionsraum zu ca. dreiviertel gefüllt wurden. Die Erfahrungen, die mit dem *Alpheus* als Regulierorgan eines HRB in den vergangenen fünf Jahren gesammelt werden konnten, sind durchwegs positiv.

Wie in Abbildung 2.9 zu erkennen ist, wurde auf einen Feinrechen im Bereich des Schiebers verzichtet. Zur Geschwemmselabwehr besitzt das HRB Apfelbach lediglich einen dreistufigen Palisadenrechen im Zulaufbereich. Auch dieses Konzept hat sich am Standort HRB Apfelbach in den vergangenen fünf Jahren bewährt. Verklausungstendenzen am schwimmgesteuerten Schieber konnten nicht beobachtet werden.

2.4.2 HRB Alzey, Abflusssteuerung mit Wirbelventil

Eine weitere, aus hydraulischer Sicht sehr interessante selbstgesteuerte Abflussregelung stellt das im HRB Alzey /Rheinland-Pfalz eingebaut Wirbelventil dar. Das 1981 in Betrieb genommene HRB Alzey liegt westlich der Stadt Alzey an der Selz und ist als Dauerstau-becken mit einem Gesamtstauraum von $150.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgeführt. Gemäß DIN 19700 ist es als mittleres Becken klassifiziert.

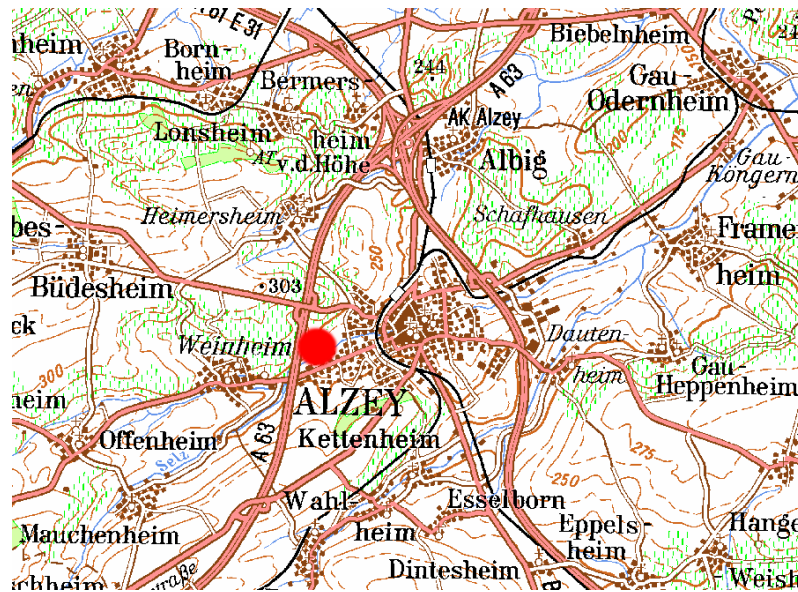


Abbildung 2.14: HRB Alzey, Lage

Die Abflusssteuerung erfolgt über ein sogenanntes Wirbelventil, bei dem Wirbelströmungseffekte gezielt ausgenutzt werden. Die ersten Untersuchungen hierzu wurden von Thoma (1928) durchgeführt und vor allem durch die intensiven Forschungsarbeiten von Brombach (1972) für verschiedene Anwendungsfälle im Wasserbau und der Abwassertechnik weiterentwickelt. Ziel der Arbeiten war es, eine Abflusssteuerung ohne bewegliche Teile zu ermöglichen. Vorteile versprach man sich hierdurch im Bereich der Betriebssicherheit und des Wartungsaufwandes. Brombach (2010) zeigt die Entwicklung des aus der *Fluidik* abgeleiteten Wirbelventiles und vor allem dessen Einzug in die wasserbauliche Praxis auf.

Abbildung 2.15 zeigt eines der zwei im HRB Alzey eingesetzten doppelgesteuerten Wirbelventile. Bei kleinen Abflüssen der Selz tritt das Wasser durch die Versorgungsdüse in die Wirbelkammer mit einem Durchmesser von 2,7 m ein und durchquert sie auf geradem Weg ohne nennenswerte Umlenk- und Druckverluste. Kommt es bei einem Hochwasserereignis zu einer Füllung des Retentionsraumes, so werden in Abhängigkeit des Wasserstandes die zwei Steueröffnungen beaufschlagt. Der Wasserstrom durch die erste Steueröffnung gibt dem Versorgungsstrom einen seitlichen Impuls, so dass in der Wirbelkammer eine Wirbelströmung induziert wird. Aus der Wirbelströmung resultieren höhere Druckverluste für den Abfluss der Versorgungsdüse durch die Wirbelkammer, so dass hiermit dem erhöhten energetischen Potential auf der Oberwasserseite entgegengewirkt wird und eine gleichmäßige Regelabgabe erzielt werden kann.

Steigt der Wasserstand im Becken während des Hochwasserereignisses weiter an, so wird vor Erreichen des Stauzieles die zweiten Steueröffnung beaufschlagt. Der Volumenstrom aus der zweiten Steueröffnung wirkt der Wirbelanfängerung der ersten Steueröffnung entgegen und hebt damit den Drehimpuls in der Wirbelkammer auf. Hierdurch erhöht sich der Abfluss aus der Versorgungsdüse durch die Wirbelkammer, was einer Vorentlastung des Retentionsraumes dient.

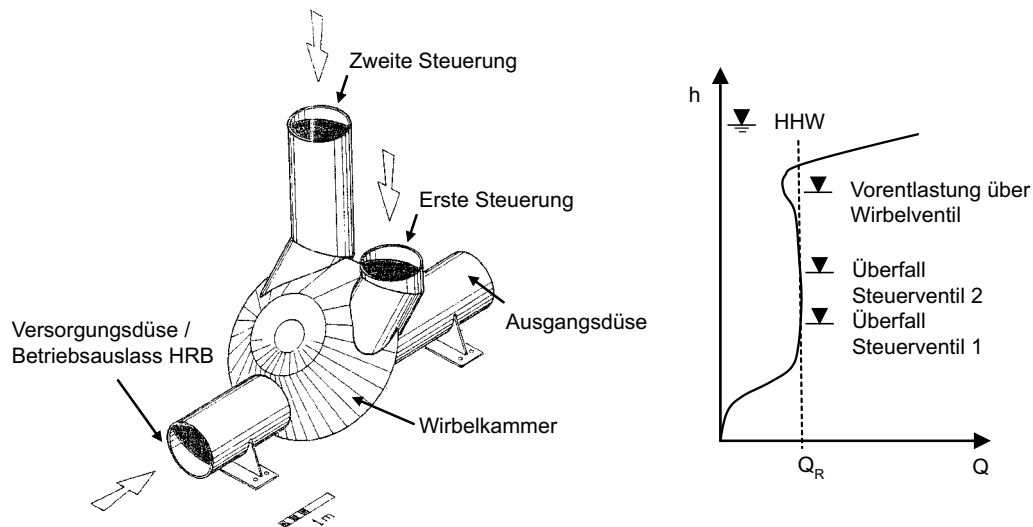


Abbildung 2.15: HRB Alzey, Abflusssteuerung mit Wirbelventil, aus [14].

Die Einbindung der beiden Wirbelventile in das Durchlassbauwerk des HRB Alzey ist in Abbildung 2.16 dargestellt. Abbildung 2.17 und Abbildung 2.18 geben einen optischen Eindruck der Gesamtanlage. Die hydraulischen Komponenten des Durchlassbauwerkes befinden sich auf der wasserseitigen Dammböschung außerhalb des Dammkörpers. Durch den Damm selbst führt ein quadratischer Stollen mit einer Querschnittsfläche von $8,12 \text{ m}^2$. Die Regelabgabe des HRB Alzey beträgt $8,0 \text{ m}^3/\text{s}$, im Hochwasserfall können bis zu $36,0 \text{ m}^3/\text{s}$ abgeführt werden.

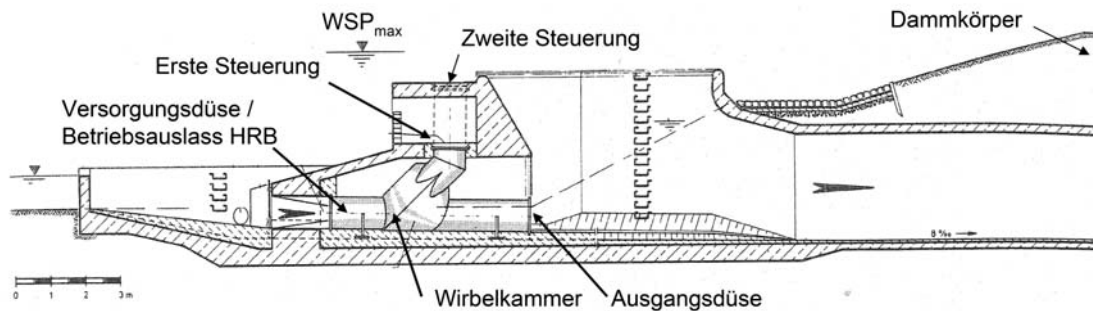


Abbildung 2.16: HRB Alzey, Schnitt durch das Durchlassbauwerk, aus [14]

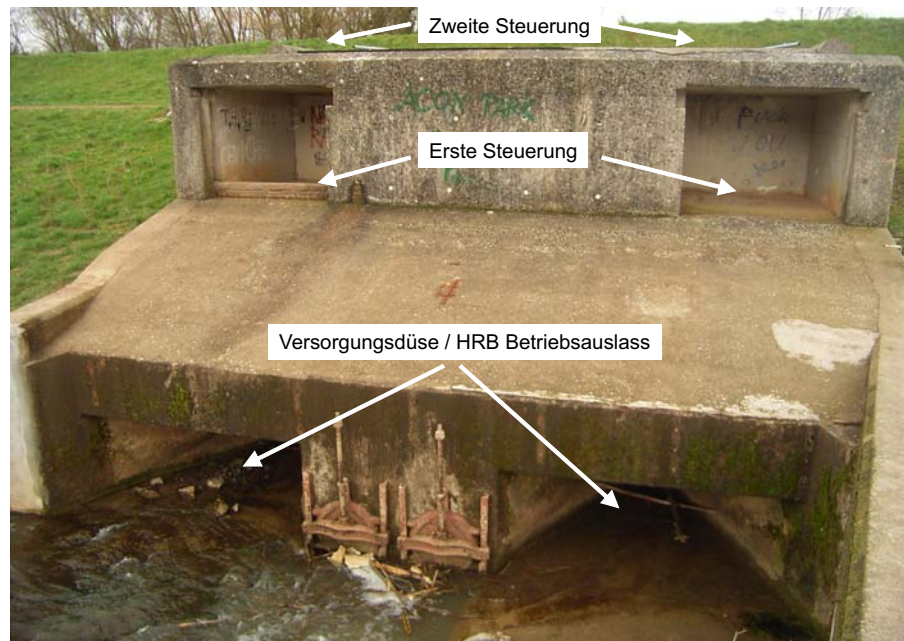


Abbildung 2.17: HRB Alzey, Blick auf das Durchlassbauwerk.



Abbildung 2.18: HRB Alzey, Anordnung und Ausführung der ersten und zweiten Steuerung.

Die Praxistauglichkeit von Wirbelventilen zur Abflusssteuerung von HRB konnte mit dem HRB Alzey aufgezeigt werden. Seit der Inbetriebnahme im Jahre 1981 verrichten die beiden Wirbelventile zuverlässig ihren Dienst. Neben dem HRB Alzey sind in Deutschland ca. 20 weitere Hochwasserrückhaltebecken mit Wirbelventilen ausgestattet [14], in Baden-Württemberg z.B. das HRB Laire in Bötzingen. Das 1971 erbaute HRB hat ein Retentionsvolumen von 15.000 m³ bei einer Dammhöhe von 8,95 m.

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die hydraulischen und betrieblichen Anforderungen, die an ein Durchlassbauwerk gestellt werden, mit Wirbelventilen sehr gut abgedeckt werden können. Auf Grund der Bauweise von Wirbelventilen sind ökologische Faktoren wie z.B. die Sohlaufgabe oder der Lichteinfall nur schwer zu realisieren, so dass diese Technologie nicht zum Erhalt der ökologischen Durchgängigkeit bei HRB geeignet ist [78].

2.5 Selbstregelung ohne Fremdenergie, ein Sicherheitsrisiko?

Im Zusammenhang mit dem Konzept der Schwingklappe und der Abflussregelung ohne Fremdenergie und ohne Regeltechnik wurden innerhalb einer landesweiten *Arbeitsgruppe Ökologische Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken* unter der Leitung der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), auf Fachtagungen und bei Laborbesichtigungen am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des KIT zahlreiche Gespräche mit Fachleuten geführt. Neben dem hydraulischen Verhalten wurde dabei immer wieder die Betriebszuverlässigkeit und -sicherheit einer Abflussregelung ohne Fremdenergie und ohne Regeltechnik, wie sie bei der Schwingklappe vollzogen wird, diskutiert.

Hochwasserrückhaltebecken verringern das Risiko von Schäden bei Ereignissen, die kleiner als das Bemessungsereignis sind (z.B. HQ_{100}). Bei Ereignissen, die größer als das Bemessungsereignis sind, haben sie früher oder später auf Grund des vollständig gefüllten Retentionsraumes nur noch einen verzögernden Einfluss auf die Hochwasserwelle. Gleichzeitig wird durch das Hochwasserrückhaltebecken aber ein neues Risiko geschaffen.

Der Rückhalt des Wassers im Retentionsraum mit einer temporären Stauhöhe von mehrere Meter und die damit verbundene Erhöhung des hydraulischen Potentials stellen im Falle eines Versagens der Anlage ein Risiko dar, welches in dieser Größenordnung natürlicherweise nicht vorhanden wäre. Das Durchlassbauwerk und die Hochwasserentlastungsanlage stellen dabei diejenigen Bauteile dar, welche eine technisch kontrollierte Abgabe des hohen Potentials aus dem Retentionsraum an die Unterwasserstrecke bewerkstelligen müssen. Bei der Planung und Konzeption dieser Bauteile muss daher die Betriebssicherheit an erster Stelle stehen.

Neben den bautechnischen Ausführungen kommt dem Regelungskonzept dabei eine entscheidende Bedeutung zu. Moderne Anlagen mit Motorschütze werden über einen elektromechanische Regelung betrieben, bei der mehrere Betriebsszenarien definiert werden. Im Retentionsbetrieb wird die Abgabe an den unterwasserseitigen Gewässerabschnitt über den einen Unterwasserpegel und der dazugehörigen Wasserstands-Abflussbeziehung eingestellt. Im Hochwasserentlastungsfall wird die Schützstellung dagegen nur auf den Wasserstand im Retentionsraum geregelt.

Wie sieht nun die technische Umsetzung einer solchen Regelung und die Wahrung der damit verbundenen Sicherheitsanforderungen in der Praxis aus? Die technische Ausstattung von kleineren Hochwasserrückhaltebecken soll beispielhaft am HRB E 87 Birkenbach, Kirchardt-Berwangen in der Zuständigkeit des Hochwasser-Zweckverbandes im Einzugsgebiet Elsenz/Schwarzbach erläutert werden. Die Anlage ist auf Grund ihrer Größe repräsentativ für eine große Anzahl von Hochwasserrückhaltebecken in Baden-Württemberg.

Das im Jahr 2005 errichtete Hochwasserrückhaltebecken ist als gesteuertes Trockenbecken im Hauptschluss konzipiert und wird mit seiner Dammhöhe von 7,7 m als *mittleres Becken* klassifiziert. Die für die Abflussregelung implementierten Komponenten sind in Abbildung 2.19 dargestellt.

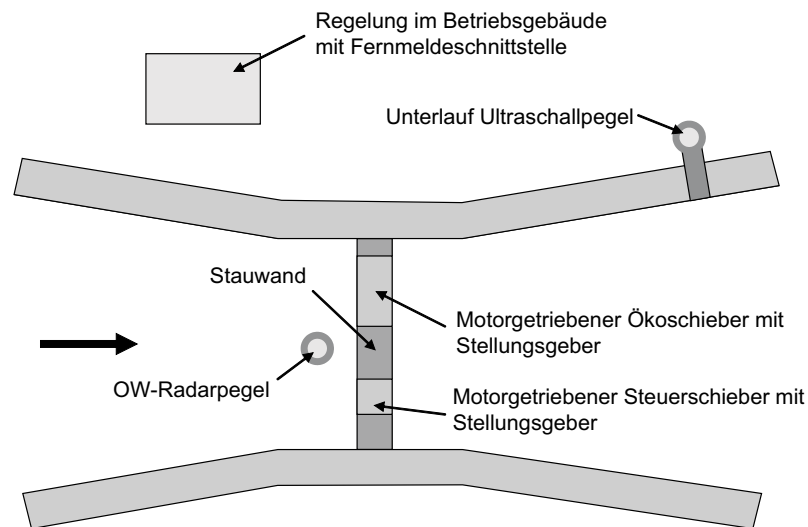


Abbildung 2.19: Draufsicht auf die technischen Komponenten für die elektro-mechanische Abflussregelung

Aus Abbildung 2.19 geht der technisch nötige Aufwand und die Vielzahl der benötigten Komponenten für eine elektro-mechanische Regelung eines HRB hervor. Grundvoraussetzung für diese Art der Regelung ist das Vorhandensein von Elektrizität. Da im Hochwasser- und Katastrophenfall mit einer Beeinträchtigung oder Unterbrechung der Stromversorgung zu rechnen ist, sind hier redundante Systeme erforderlich. Im Zuständigkeitsbereich des Zweckverbandes Hochwasserschutz Elsenz-Schwarzbach wird dies über eine externe Einspeisung bewerkstelligt. Im Falle eines Stromausfalles wird der Stauwärter und der Betriebsbeauftragte mit einer SMS benachrichtigt, so dass die entsprechenden Maßnahmen eingeleitet werden können. Die Stromversorgung für den Versand der SMS ist dabei über einen Akku abgesichert. Auch bezüglich der gemessenen Pegelstände und Schieberpositionen müssen Redundanzen vorhanden sein, sowie eine Plausibilisierung der Werte erfolgen, um die zuvor definierte Regelstrategie einzuhalten.

Die Ausführungen zeigen, dass ein gewisser technischer Aufwand betrieben werden muss, um der Betriebssicherheit bei einer elektro-mechanischen Regelung Rechnung zu tragen. Trotzdem ist der Einsatz von fachkundigem Personal während des Hochwasserereignisses am HRB erforderlich, um im Falle eines Ausfalls der Regelung eine manuelle Bedienung des Hochwasserrückhaltebeckens vornehmen zu können. Für diesen Fall empfiehlt es sich, ausgedruckte Steuerkurven in Form von Wasserstands-Abfluss-Beziehungen für verschiedene Schieberöffnungen auf der Ablage vorzuhalten.

Bei der fremdenergieelosen Selbstregelung, wie sie mit der Schwingklappe vollzogen wird, ist hingegen der technische Aufwand, vor allem was die Sensorik betrifft, äußerst gering. Die bei der Dimensionierung der Schwingklappe eingestellte Regelcharakteristik wird während des Hochwasserereignisses eigenständig eingehalten. Mögliche Versagenspunkte oder Ausfälle hinsichtlich der Regelung sind auf Grund der Einfachheit des Systems minimiert und daher nicht zu erwarten. Der Einsatz von fachkundigem Betriebspersonal während des Hochwasserereignisses ist dennoch dringend erforderlich.

3 Experimentelle Untersuchungen

Das wasserbauliche Versuchswesen gehört seit Jahrzehnten zum Handwerkszeug von Ingenieuren bei der Lösung von wasserbaulichen Fragestellungen. Viele der im Wasserbau gebräuchlichen Bemessungsansätze basieren zudem auf empirischen Formelwerken, die mittels Versuchen erarbeitet wurden. Die Ausstattung der Laboreinrichtungen lässt es dabei selten zu, dass die Versuchseinrichtungen im Maßstab 1:1 errichtet und betrieben werden, so dass auf Grundlage einer Ähnlichkeitsmechanischen Betrachtung Versuche an einem verkleinerten Modell durchgeführt werden und die gewonnenen Ergebnisse auf die Natur übertragen werden.

Für viele wasserbaulichen Fragestellungen eignen sich auch hydrodynamisch-numerische Modelle. Diese liefern für große Untersuchungsgebiete detaillierte Aussagen über die lokalen Verteilungen von Fließgeschwindigkeit, Wasserstand, Sohlschubspannung und weiterer abhängiger hydraulischer Größen. Je nach räumlicher Auflösung wird hier zwischen 1D, 2D und 3D Verfahren unterschieden.

Für die im Zusammenhang mit dem Funktionsprinzip der Schwingklappe stehenden Fragestellungen werden hohe Anforderungen an eine numerische Strömungssimulation gestellt. Das Systemverhalten der Schwingklappe wird von der Turbulenz der Anströmung beeinflusst, so dass die in der ingenieurtechnischen Anwendung gebräuchliche Abbildung der Turbulenz über ein Turbulenzmodell nicht die geforderte Genauigkeit ermöglicht. Nötig wäre eine sogenannte *Direkte Numerische Simulation*, kurz DNS, bei der die instationären Navier-Stokes-Gleichungen vollständig gelöst werden. Auf Grund der Fluid-Festkörper-Interaktion im Bereich der Schwingklappe und der Turbulenz der Anströmung ($4 \cdot 10^4 < Re < 10^5$) stellt dies extreme Anforderungen an das numerische Verfahren und die Rechenleistung. Diese Art der numerischen Strömungssimulation stellt bezüglich der Anforderungen eine grundlagenorientierte Forschungsaufgabe dar und wurde daher nicht bei den Untersuchungen zur Schwingklappe eingesetzt.

3.1 Wasserbauliche Modellversuche

Als wasserbauliches Modell wird eine geometrisch verkleinerte Nachbildung einer geplanten Natursituation (z.B. Durchlassbauwerk eines Hochwasserrückhaltebeckens) mit einer wasserbaulichen Fragestellung bezeichnet. Im Unterschied zu einem abstrakten Modell (z.B. mathematisches Modell) ist das wasserbauliche Modell ein konkretes Modell, d.h. die messbaren mechanischen Strömungsabläufe sind von der Art, dass sie unter der Wirkung gleicher physikalischer Ursachen kinematisch und z.T. dynamisch ähnlich ablaufen.

3.1.1 Modellähnlichkeit

Im Modell gewonnene Ergebnisse und Parameter können dann auf das Naturbauwerk übertragen werden, wenn es sich um Ergebnisse aus Prozessen handelt, die den physikalischen Gesetzmäßigkeiten folgen.

Es ist daher ein notwendiges Kriterium für belastbare wasserbauliche Modellversuche, dass geometrische, dynamische und kinematische Größen in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen. Nur dadurch wird gewährleistet, dass eine Übertragbarkeit vom Labor

zurück auf die Natursituation möglich ist. Dieses Verhältnis wird allgemein als Maßstab bezeichnet.

Die mit dem Modell erhobenen Ergebnisse können nur dann verlässlich auf die Natur übertragen werden, wenn als hinreichendes Kriterium die vorherrschenden Randbedingungen im Modell eine Ähnlichkeit zur Natursituation aufweisen.

Die Kriterien für eine Übertragbarkeit werden somit durch die folgenden Ähnlichkeitsgesetze festgelegt:

- **Geometrische Ähnlichkeit**

Man spricht von geometrischer Ähnlichkeit, wenn alle Längen L_N der Natur in einem konstanten Verhältnis zu den äquivalenten Längen des Modells L_M stehen. Dieses Verhältnis wird als Maßstabszahl L_r des Modells bezeichnet.

$$L_r = \frac{L_N}{L_M} = konst \quad (3.1)$$

- **Kinematische Ähnlichkeit**

Mit der Forderung nach kinematischer Ähnlichkeit wird gewährleistet, dass zwischen zeitabhängigen Vorgängen im Modell und in der Natur ein konstantes Verhältnis, der Zeitmaßstab besteht.

$$L_t = \frac{t_N}{t_M} = konst \quad (3.2)$$

Für eine Übertragung der Verhältnisse vom Modell auf die Natursituation stellt die kinematische Ähnlichkeit (ebenso wie die geometrische Ähnlichkeit) eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung dar.

- **Dynamische Ähnlichkeit**

Die dynamische Ähnlichkeit ist der kinematischen Ähnlichkeit und der geometrischen Ähnlichkeit übergeordnet und beschreibt die Ähnlichkeit der Kräfte F . Dynamische Ähnlichkeit ist dann gegeben, wenn einander entsprechende Kräfte im Modell und in der Natur in einem konstanten Verhältnis stehen. Nur dann ist gewährleistet, dass die Größe und Richtung der resultierenden Fluidbewegung und demnach das ganze Strömungsverhalten in Modell und in der Natur ähnlich ablaufen.

$$L_F = \frac{F_N}{F_M} = konst \quad (3.3)$$

Die volle dynamische Ähnlichkeit zwischen Natur und Modell ist nur dann gegeben, wenn alle Kräfteverhältnisse (Trägheitskraft, Schwerkraft, Reibungskraft, Oberflächenspannung usw.) im gleichen Verhältniss stehen. Dies ist nur bei einer Maßstabszahl $L_r = 1$ gegeben, was in der Praxis einen eher ungewöhnlichen Maßstab für ein wasserbauliches Modell darstellt. Angenäherte dynamische Ähnlichkeit ist dann erreichbar, wenn nur die jeweils zwei dominierenden Kräftearten berücksichtigt werden und der Einfluss der übrigen Kräftearten vernachlässigt wird.

In der Praxis des wasserbaulichen Versuchswesens haben sich die folgenden Ähnlichkeitsgesetze bewährt, da bei vielen hydraulischen Fragestellungen die Trägheitskraft, die Schwerkraft und die Reibungskraft des Strömungsgeschehen dominieren:

- **Froude-Ähnlichkeit**

In Strömungen mit freier WSP-Oberfläche wird das Strömungsgeschehen maßgeblich von den Trägheitskraft dominiert, die Reibungskraft spielt nur eine untergeordnete Rolle. Neben der geometrischen Ähnlichkeit muss daher auch sichergestellt sein, dass die Froudezahl Fr als Verhältnis zwischen der Trägheits- und der Schwerkraft im Modell und in der Natur gleich groß gehalten wird. Das Froudsche Modellgesetz lautet:

$$Fr_r = \frac{V_r}{\sqrt{g_r L_r}} = 1 \quad (3.4)$$

- **Reynolds-Ähnlichkeit**

In Strömungen, in denen Zähigkeitskräfte das Strömungsgeschehen dominieren (z.B. laminare Fließbewegung, Rohrströmung), muss neben der geometrischen Kennzahl auch die Reynoldszahl Re für Modell und Natur gleich gehalten werden. Für das Reynoldsche Modellgesetz gilt:

$$\frac{Re_n}{Re_m} = Re_r = \frac{\rho_r V_r L_r}{\mu_r} \quad (3.5)$$

Ist ein Strömungssystem von Trägheits-, Strömungs- und Schwerekräften dominiert, so ist nur dann eine korrekte Abbildung des Strömungsgeschehens und der Druckverteilung gewährleistet, wenn die Froude- und die Reynoldsähnlichkeit eingehalten wird. Werden die vorhandenen Kräfte oder eine davon fehlerhaft nachgebildet oder deren Einfluss auf das zu untersuchende Phänomen außer acht gelassen, so mindert dies die Aussagekraft und die Übertragbarkeit der Ergebnisse. In diesem Fall spricht man von Maßstabseffekten.

3.1.2 Modellähnlichkeit bei Schwingungsproblemen

Bezüglich der Übertragung der hydraulischen Parametern einer wasserbaulichen Fragestellung über die Froude- oder Reynoldsähnlichkeit existiert ein großer Erfahrungsschatz, so dass bei Beachtung gewisser Grenzen eine verlässliche Übertragbarkeit der gewonnenen Ergebnisse gesichert ist. Zu beachten ist hierbei z.B. die Turbulenzgrenze, die Fließwechselgrenze, die Kavitationsgrenze, die Kapillargrenze und die Rauigkeitsgrenze.

Strömungsinduzierte Schwingungen sind nicht nur von den strukturnahen Strömungsbedingungen und der Geometrie des Bauteils abhängig, sondern werden auch durch die dynamischen Randbedingungen des Bauteils, wie z.B. der Steifigkeit und des Dämpfungsverhaltens selbst beeinflusst.

Eine Schwingung bezeichnet eine definierte Auslenkung über die Zeit, sie besitzt folglich eine Geschwindigkeit. Es stellt sich die Frage, ob ein Schwingungsphänomen allein über die Betrachtung der Froudeähnlichkeit von einem Modell auf die Natur übertragen werden kann. Binder (2002) hat sich mit dem Nachweis der Gültigkeit des Froude'schen Modellgesetzes bei der Nachbildung strömungsinduzierter Schwingungen beschäftigt. Hierzu wurden quadratische Platten im Stillwasser von einem Excenter erregt und über die Auswertung von Druckmessungen der Frequenzmaßstab nach Froude ermittelt. Die Versuche deckten jedoch nur den Maßstabsbereich 1:1 bis 1:2,5 ab, die Werte für kleinere Längenmaßstäbe wurden über eine Regressionsanalyse aus den Versuchen abgeleitet. Der Vergleich der Frequenzmaßstäbe nach Froude und aus den Messergebnissen ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

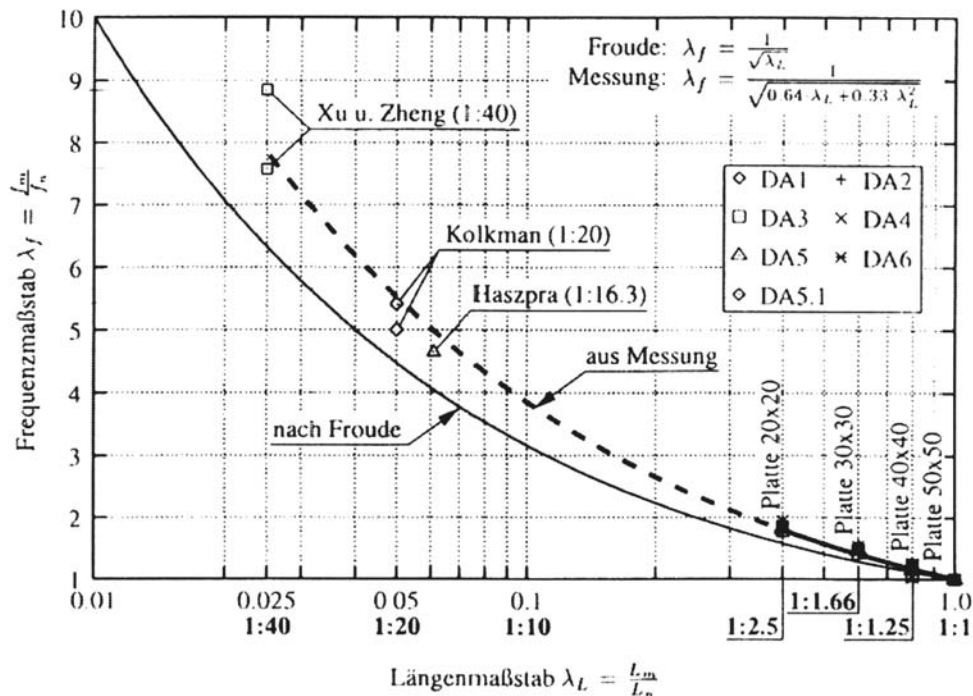


Abbildung 3.1: Aus den Modellversuchen von Binder (2002) ermittelter Frequenzmaßstab [11]

Es zeigt sich, dass die Abweichungen zwischen den gemessenen Frequenzen und dem Frequenzmaßstab nach Froude mit kleiner werdendem Längenmaßstab zunehmen. Binder (2002) hat die Ergebnisse von Modellversuchen von Xu und Zheng (1984) zu den Zugseggenschützen des Kraftwerkes Gezoube im Maßstab 1:40 mit Naturmessungen der fertig gestellten Anlage verglichen und dabei Abweichungen bezüglich der Frequenz von 20 % bis 40 % abgeleitet. Auch die Untersuchungen von Kolkman (1976) zeigen Abweichungen bei der Übertragung der Frequenzen nach Froude von bis zu 20 % auf.

Reibenwein (2004) hat aufbauend auf den Versuchen von Binder (2002) die Versuchsreihe um Rechteckquerschnitte und Kreiszyylinder ergänzt und auch den Maßstabsbereich bis zu einem Maßstab von 1:5 weiter ausgedehnt. Da die Versuche nicht im Stillwasser durchgeführt wurden, wurden auch unterschiedliche Anströmsituationen im Bereich von $300 < Re < 3000$ mit in das Untersuchungsprogramm aufgenommen. Dabei zeigte sich, dass der Turbulenzgrad der Anströmung einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Frequenz von Wirbelablösungen hat. Auch Reibenwein (2004) kommt zu dem Ergebnis, dass zumindest für den untersuchten Anwendungsfall mit der stark verminderten Turbulenz die Frequenzumrechnung nach Froude fehlerbehaftet ist.

3.2 Versuchseinrichtungen

In Kapitel 2.2 wurde das Funktionsprinzip der Schwingklappe erläutert. Hinsichtlich der Einflussgrößen ist festzustellen, dass das System der Schwingklappe maßgeblich von den Schwere- und Trägheitskräften beeinflusst wird. Der Turbulenzgrad der Anströmung ist ausreichend groß, um auch die Bedingungen der Reynoldsähnlichkeit zu erfüllen. Da zusätzlich eine freie Wasseroberfläche vorhanden ist, können die Ergebnisse aus den Versuchsreihen, unter Beachtung der Übertragungsgrenzen, über die Froude'sche Modellähnlichkeit in andere Maßstäbe übertragen werden.

Tabelle 3.1: Umrechnungsfaktoren des Froude'schen Modellgesetzes

physikalische Größe	Umrechnungsfaktor
Länge, Höhe, Breite	$(L_r)^1$
Fläche	$(L_r)^2$
Volumen	$(L_r)^3$
Zeit	$(L_r)^{0,5}$
Geschwindigkeit	$(L_r)^{0,5}$
Durchfluss	$(L_r)^{2,5}$
Kraft	$(L_r)^3$
Arbeit, Energie	$(L_r)^4$
Dichte	1

Wie jedoch in Kapitel 3.1.2 aufgezeigt wurde, ist die Übertragung der Ergebnisse der Schwingungsuntersuchungen nur mit Einschränkungen möglich. Die Fehler bezüglich der Frequenzumrechnung nehmen mit kleiner werdendem Längenmaßstab zu, so dass hier gewisse Einschränkungen hinsichtlich eines belastbaren Maßstabes gegeben sind. Um die Maßstabeffekte bezüglich des Schwingungsverhaltens zu eliminieren, bzw. um sie klein zu halten, wurde daher eine Modellfamilie der Schwingklappe mit Prototyp 1:1 und Modell 1:3 ins Untersuchungsprogramm aufgenommen.

Die Versuche am Prototypen im Maßstab 1:1 wurden auch gewählt, um eine gewisse Sicherheit hinsichtlich des geplanten Anwendungsbereiches der Schwingklappe zu erhalten. Das System ist im Versuchsstand so groß abgebildet, dass auch eine angedachte Vergrößerung bzw. Skalierung der Schwingklappe nicht zu Maßstabeffekten führt. In Abhängigkeit der späteren praktischen Anwendung der Schwingklappe kann der Prototyp-Versuchsstand z.B. auch als Modell im Maßstab 1:2 angesehen werden und die Ergebnisse der Untersuchungen können belastbar in einem engen Rahmen skaliert werden. Die in Kapitel 4 vorgestellten Ergebnisse werden daher, wenn möglich, normiert über die Klappen geometrie dargestellt.

3.2.1 Versuchseinrichtung Maßstab 1:3

Für die Versuchsreihen wurde die Schwingklappe in eine 12,0 m lange Rinne mit horizontaler Sohle eingebaut. Die Rinne war 27 cm breit und 36 cm hoch. Der Zulaufbereich bis zum Klappenkörper war 6,0 m lang. Auf Grund der horizontalen Sohle können sich keine Normalabflussbedingungen einstellen. Auf die Belastbarkeit der Versuchsergebnisse hat dies jedoch keinen signifikanten Einfluss, da der Versuchsaufbau als *hydraulisch kurzes* Modell konzipiert wurde. Das Strömungsverhalten und die Strömungswiderstände im Bereich der Bauwerke werden überwiegend durch die Bauwerksgeometrie und die hierdurch induzierten lokalen Verluste auf Grund von Umlenkungen, Ablösungen, usw. bestimmt. Die kontinuierlichen Reibungsverluste entlang der Gerinneberandung und der Sohle spielen wegen der Kürze des abgebildeten Fließstrecke eine untergeordnete Rolle. Die Wasserstands-Abfluss-Beziehung im Unterwasser der Schwingklappe wird also nicht über eine Kalibrierung der Wandrauheit erreicht, sondern über die unterstrom angeordneten Stellbleche eingestellt.

In der Versuchsanordnung mit der horizontalen Sohle spiegelte sich aber auch die praxisbezogene Auslegung der Versuche wider, da bei vielen der realisierten und geplanten Hochwasserrückhaltebecken aus bautechnischen Gründen des Durchlassbauwerkes horizontal ausgeführt wird.

In der Versuchsrinne wurden unterschiedliche Klappen geometrien hinsichtlich der sich einstellenden Strömungsverhältnisse untersucht. Die Klappenkörper bestanden aus PVC und konnten über unterschiedliche Lagerpunkte in der Versuchseinrichtung fixiert werden. Die Achse der Klappe war frei drehbar, mittels eines Haltegestänges konnte die Neigung für die exakte Bestimmung des Abflussbeiwertes wahlweise fixiert werden. Die Höhe der Achslage über der Gerinnesohle konnte mittels Gewindestangen exakt eingestellt werden.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Abbildung 3.2 zeigt zwei der untersuchten Klappenkörper, die dazugehörigen technischen Daten sind in Tabelle 3.2 aufgetragen.

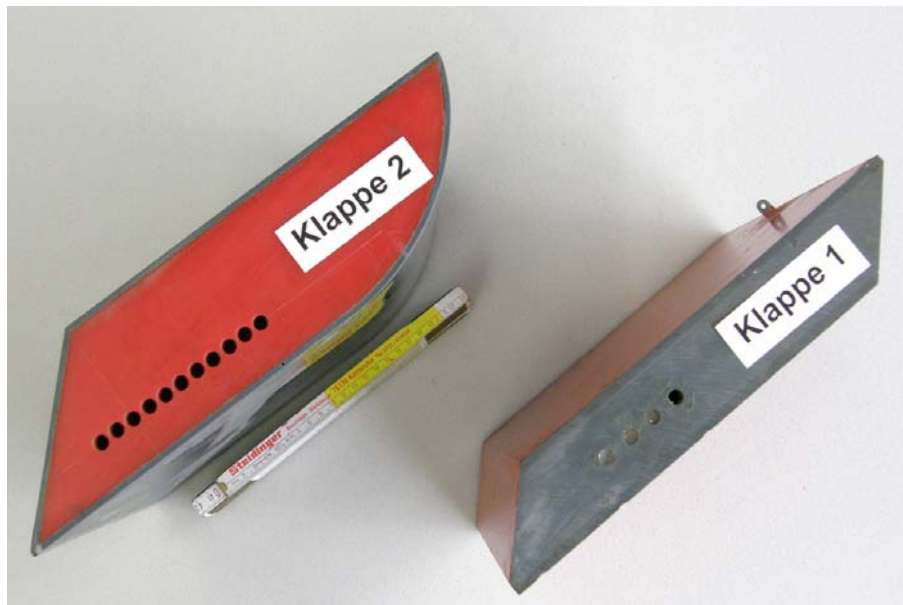


Abbildung 3.2: untersuchte Klappengeometrien

Tabelle 3.2: Untersuchte Klappengeometrien

	Klappe 1	Klappe 2
Material	PVC	PVC
Konstruktion	Bepunktetes Rippenskelett	Bepunktetes Rippenskelett
Breite	27,0 cm	27,0 cm
Länge	29,0 cm	32,0 cm
Höhe	5,0 cm	8,3 cm
Gewicht	1,54 kg	1,73 kg
Dichte	466 kg/m ³	292 kg/m ³

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

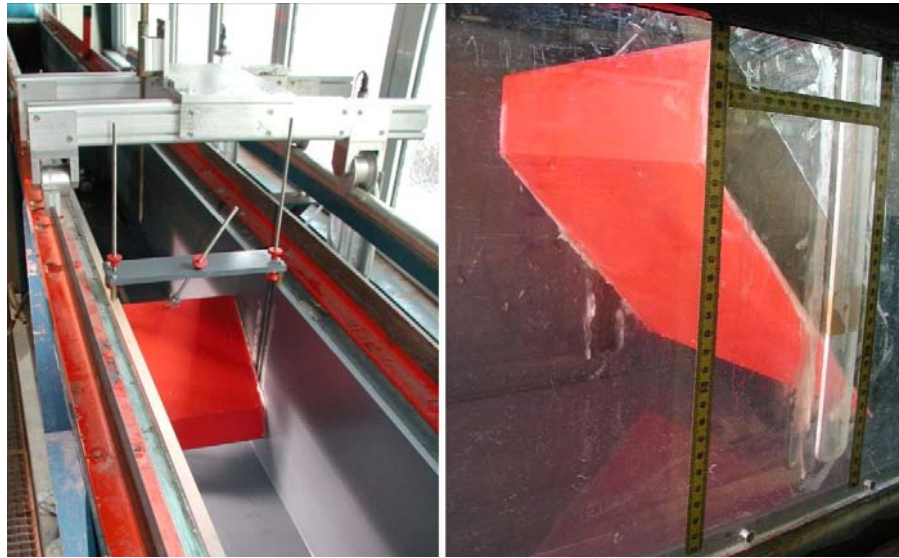


Abbildung 3.3: Versuchsanordnung mit einer Breite von 27 cm

3.2.2 Versuchseinrichtung Prototyp

Die Versuchsrinne im Theodor-Rehbock-Wasserbaulaboratorium hatte eine Gesamtlänge von 11,2 m, war 1,0 m breit und 1,25 m hoch. Am Übergang des Zulaufbeckens zur 4,9 m langen Anströmung auf die Schwingklappe war eine Beruhigungswand aus Lochziegeln angeordnet. Im Bereich der Schwingklappe war die Seitenwand aus Plexiglas ausgeführt, so dass das Strömungsgeschehen optisch beobachtet und dokumentiert werden konnte. Abbildung 3.4 zeigt den Versuchsaufbau.

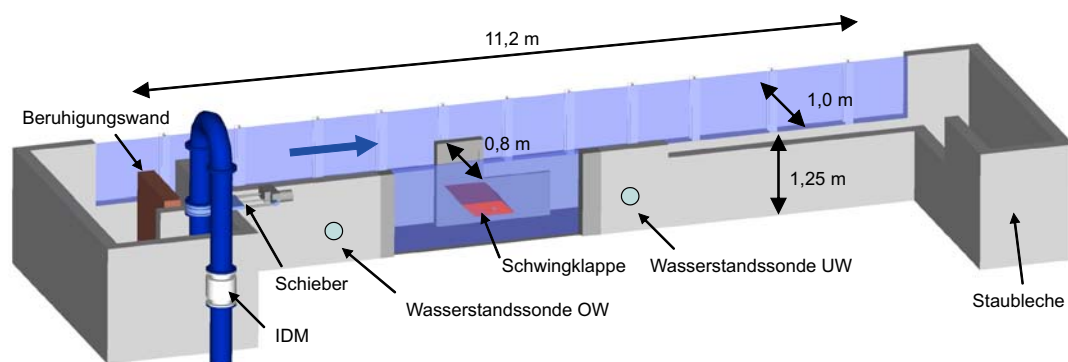


Abbildung 3.4: Versuchsanordnung für die Prototypentest in der großen Versuchsrinne

Bei der gewählten Versuchsanordnung war die Schwingklappe auf der rechten Seite plan an der Gerinneberandung gelagert und auf der linken Seite war das Lager in einen Pfeiler integriert. Der angedeutete Pfeiler stellte die Lagerung dar, wie sie bei einem Hochwasserrückhaltebecken zur Ausführung kommen könnte. Durch die gewählte Versuchsanordnung als *Ausschnittsmodell* könnte somit zusätzlich Aussagen zum Einfluss der Lagerung und der hydraulischen Kontur des Zulaufbereiches gemacht werden.

Der 80 cm breite, 96 cm lange und 25 cm hohe Klappenkörper der Schwingklappe war aus PVC gefertigt und wog 43 kg. Sowohl die Konstruktion des Klappenkörpers in Rippenbauweise mit Beplankung als auch das Gewicht gingen aus einer gemeinsamen Abstimmung und einer statischen Dimensionierung in Zusammenarbeit mit dem *Ingenieurbüro Stahlwasserbau Ernst Hänßler GmbH* hervor. Die vermaßte Geometrie des Klappenkörpers ist in Abbildung 6.1 in Kapitel 6 genauer beschrieben, Abbildung 3.5 zeigt den untersuchten Klappenkörper.



Abbildung 3.5: Detailansicht des untersuchten Prototyp-Klappenkörpers

Unterstrom des Klappenkörpers folgte eine 6,3 m lange Gerinnestrecke mit anschließendem Rücklauf in das Kreislaufsystem. Der unterstromige Wasserstand konnte mittels Stellblechen am Auslauf des Versuchstandes eingestellt werden. Über diese Randbedingung konnte der Einfluss von unterschiedlichen Wasserstands-Abfluss-Beziehung der Unterwasserstrecke auf die Funktionsweise der Schwingklappe untersucht werden.

Die Sohle der Versuchsrinne war nicht geneigt (horizontale Sohle). Bei der Beschreibung des Versuchstandes mit einer Breite von 27 cm wurde bereits auf die Konzeption als *hydraulisch kurzes* Modell hingewiesen (vgl. Kapitel 3.2.1).

3.2.2.1 Messtechnik, Versuchseinrichtung Prototyp

Für die Dokumentation und die zeitliche Erfassung des Verhaltens der Schwingklappe wurden während der Versuchsdurchführung einzelne Parameter zeitlich hoch aufgelöst mit einer Abtastfrequenz von 100 Hz erfasst.

Im Hohlraum der Schwingklappe waren unterschiedliche Messsonden implementiert, die kontinuierlich sämtliche für die Hydraulik und Kinematik der Klappe wichtigen Parameter während der Versuchsdurchführung erfassten. Die analogen Messwerte wurden verstärkt

und gefiltert und über einen Analog-Digital-Wandler einem PC zur Speicherung und abschließender Auswertung übermittelt. Eine Übersicht über die erfassten Messgrößen gibt die folgende Zusammenstellung. Abbildung 3.6 zeigt dazu das Schema der eingesetzten Mess- und Regeltechnik.

Durchfluss:

Der Durchfluss der beiden Zulaufleitungen wurde mit magnetisch-induktiven Durchflussmessern (IDM), Typ Copa-XE der Firma ABB aufgezeichnet. Der Nenndurchmesser der Leitungen betrug DN 300.

Schieberstellung:

In den Zulaufleitungen waren motorgetriebene Schieber von Erhard Armaturen installiert. Die Antriebs- und Positionseinheit Aumatic 10.3 wurden von der Firma Auma geliefert.

Wasserstand:

Der Wasserstand in der Rinne wurde Ober- und Interstrom der Schwingklappe über zwei Wasserstandssonden MTS der Firma Tempotronics-RB erfasst. Das System arbeitet nach dem magnetostriktiven Prinzip: Die Position des magnetischen Schwimmers wird unter Ausnutzung der Magnetostraktion eines Wellenleiters berührungslos bestimmt. Auf Grund der hohen Fließgeschwindigkeiten im Gerinne waren die Sonden nicht direkt im Gerinne angeordnet, sondern in eigenen Schächten integriert, welche nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren mit dem Wasserstand im Gerinne gekoppelt waren.

Neigung:

Die Neigung der Klappe gegenüber der Ruhelage wurde mit einem Neigungsmesser IS1A5P20 von GEMAC mit einem Messbereich von $\pm 45^\circ$ aufgezeichnet. Der Sensor war an einer vertikalen Rippe der Schwingklappe in einem Winkel von 45° montiert, wodurch Klappenneigungen zwischen 0° und 90° erfasst werden könnten.

Druck:

In der Mittellinie der Stauhaut waren 6 Druckmessdosen P11 von Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) plan eingelassen, wovon eine den Druck auf der Abströmseite der Schwingklappe erfasst hat. Aufgrund der baulichen Länge der Messdosen konnten diese nicht bis an die Ablösekannte herangeführt werden. Abbildung 3.8 zeigt die Lage der Messstellen.

Beschleunigung:

Der Beschleunigungssensor B12 von HBM war normal zur Stauhaut montiert. Um für die im Modell typischerweise auftretenden Beschleunigungen eine gute Auflösung des Signals zu erhalten, war eine Verstärkung um den Faktor 100 integriert.

Rückstellkraft:

Die Schwingklappe befindet sich in allen Betriebszuständen in einer Gleichgewichtslage, welches sich aus den Momenten aus Strömungs-, Auftriebs- und Gewichtskraft ergibt. Die Klappe wurde 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 werde bei allen Versuchen an einem definierten Punkt angesetzt, so dass auch Aussagen über das rückstellende Moment getroffen werden können.

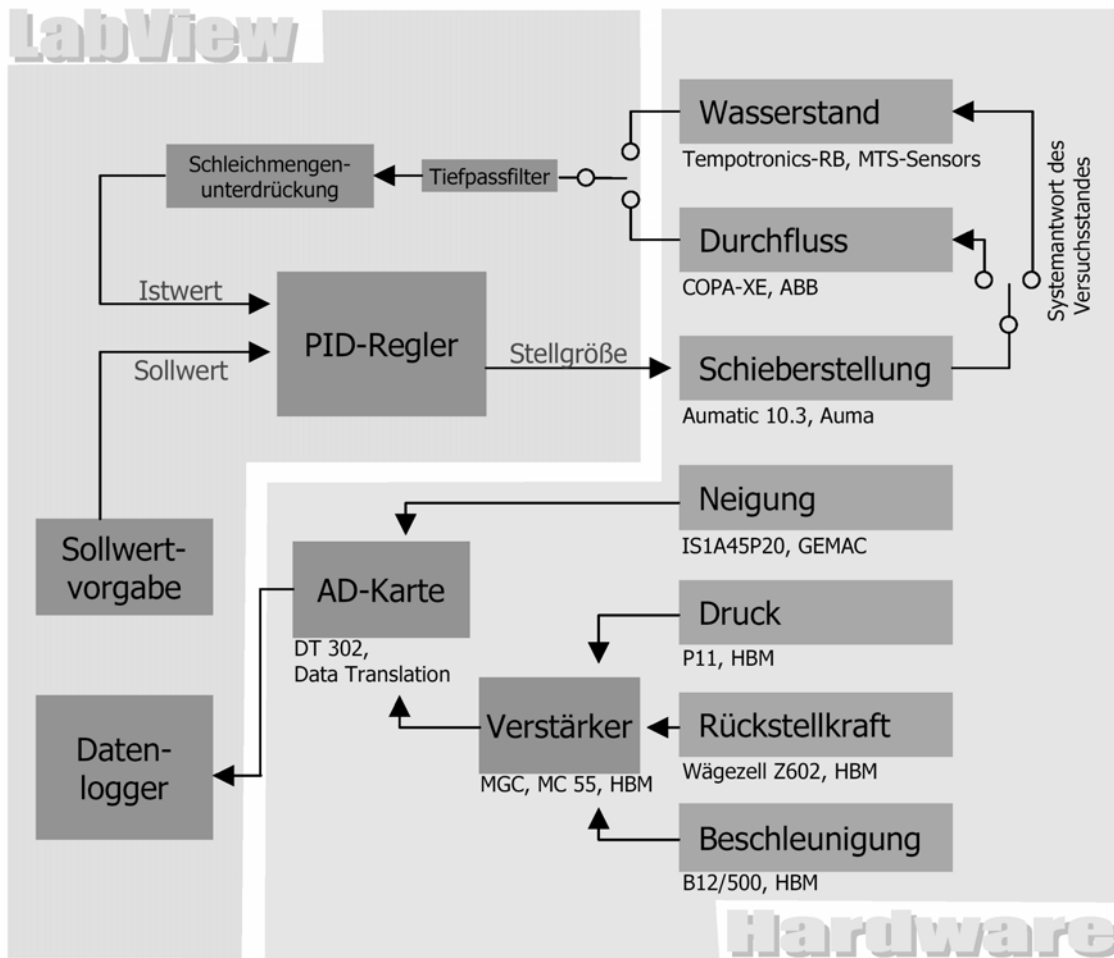


Abbildung 3.6: Schema der eingesetzten Mess- und Regeltechnik

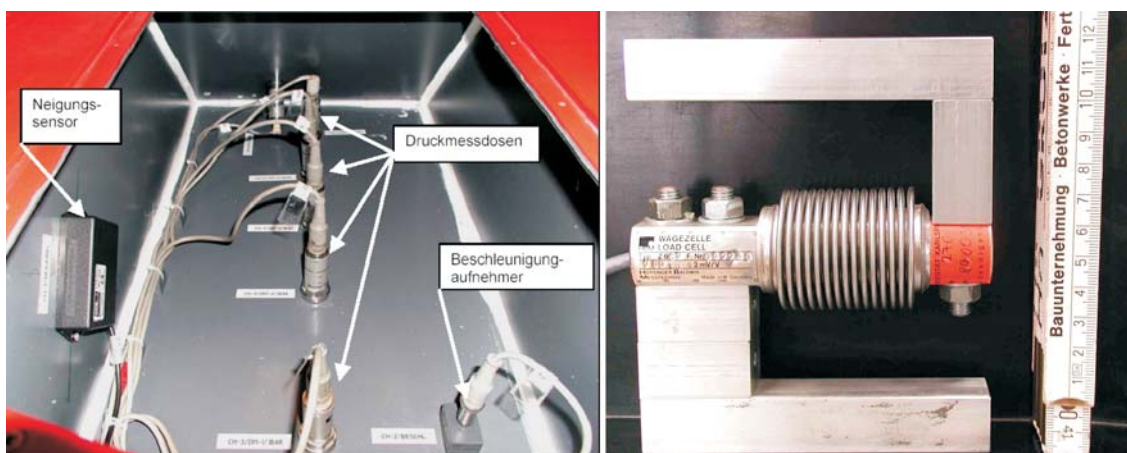


Abbildung 3.7: Messsonden im Inneren der Schwingklappe (links), Wägezelle für die Messung der Rückstellkraft (rechts)

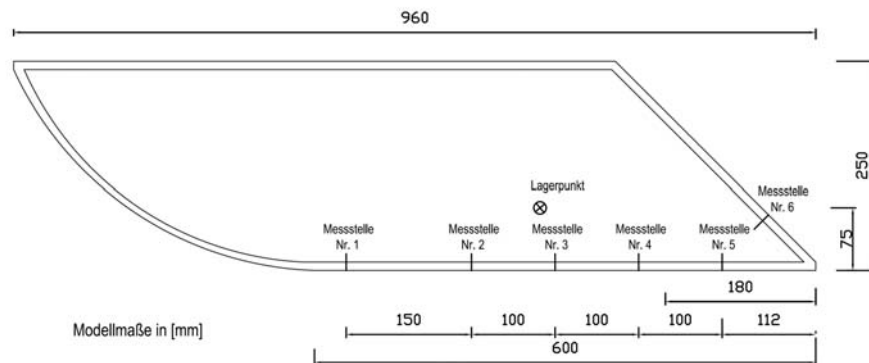


Abbildung 3.8: Anordnung der Druckmessdosen entlang der Stauhaut

3.2.2.2 Entwicklung eines automatisierten Modellbetriebes

In Abbildung 3.6 ist die technische Ausstattung der Versuchseinrichtung dargestellt. Neben der zeitlich hochaufgelösten Erfassung der Messsignale war auch eine präzise Steuerung des Versuchstandes für die Qualität der Ergebnisse von entscheidender Bedeutung. Im Rahmen der Untersuchungen zur Schwingklappe wurde daher ein Regel- und Steuerkonzept für wasserbauliche Modelle erarbeitet. Dabei werden die Durchflussdaten der Induktiven Durchflussmesser (IDM) und die Schieberstellungen von einem zentralen Steuer-PC eingelesen. Die Daten werden im Programmiersystem *Lab VIEW* von *National Instruments* verarbeitet und in einer Benutzeroberfläche angezeigt. Abbildung 3.9 zeigt die entwickelte Benutzeroberfläche.



Abbildung 3.9: Graphische Benutzeroberfläche der entwickelten Modellregelungs- und Datenerfassungssoftware

Über die Benutzeroberfläche ist es möglich, die Schieberstellung vom Steuer-PC aus vorzugeben und den sich einstellenden Abfluss anzuzeigen. Über die Datenloggerfunktion können diese Werte zusammen mit den Messwerten der einzelnen Sonden in eine Textdatei geschrieben werden. In diesem Fall wird der Durchfluss gesteuert. 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 Eingangsgößen, andere als Ausgangsgößen auf Grund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeit beeinflussen. Kennzeichen für die Steuerung ist der offene Wirkungsablauf über das einzelne Übertragungsglied oder die Steuerkette.

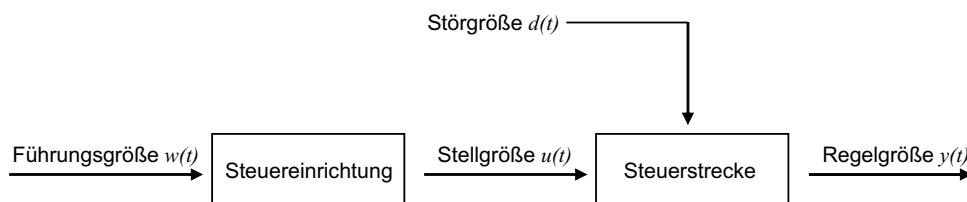


Abbildung 3.10: Beispiel einer Steuerung in der offenen Wirkungskette

Ziel einer Steuerung ist es, eine Regelgröße $y(t)$ entsprechend der Führungsgröße $w(t)$ zu erhalten ($y(t) = w(t)$). Unter Beachtung der dynamischen Eigenschaften der Steuerstrecke kann die Stellgröße $u(t)$ so gewählt werden, dass die Bedingung $y(t) = w(t)$ erfüllt ist. Dies ist nur möglich, wenn keine äußere Störung (Störgröße $d(t)$) auf die Steuerstrecke einwirkt. Im Falle einer Störung wird diese direkt an die Regelgröße $u(t)$ weitergegeben, eine Reaktion in Form einer Anpassung der Stellgröße $u(t)$ ist nicht möglich [80].

Kommt es z.B. zu Druckänderungen im laboreigenen Wasserkreislauf, so verändert sich der Durchfluss auf Grund der konstanten Schieberstellung und des variierenden hydraulischen Potentials. Die Druckänderung ist eine Störgröße, die auf das System einwirkt. Druckänderungen im Leitungssystem können z.B. in Folge von Abschaltungen andere Versuchseinrichtungen auftreten.

Um derartige Instationaritäten und den sich daraus ergebenden Einfluss auf die Versuche zu minimieren, wurde eine Regelung in der *LabVIEW* Umgebung implementiert. 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.

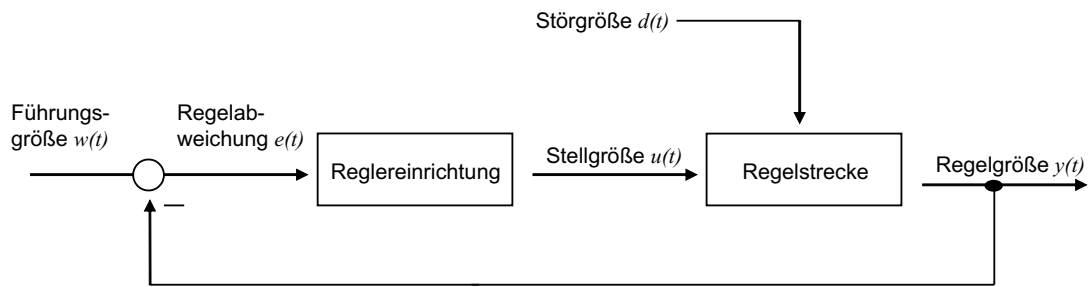


Abbildung 3.11: Grundstruktur eines Regelkreises

Bei der Regelung wird durch die Störgröße $d(t)$ die Regelstrecke beeinflusst. Die Änderung in der Regelstrecke wirkt sich auf die Regelgröße $y(t)$ aus. Ziel der Regelung ist es nun, die Führungsgröße $w(t)$ so nachzuführen, so dass für alle Zeitschritte t die Bedingung $y(t) = w(t)$ erfüllt ist. Dem Regler muss daher die Stellgröße $u(t)$ so vorgeben werden, dass die Störung kompensiert wird. Der Regler vergleicht hierfür die Differenz aus Führungs- und Regelgröße und bestimmt die Regelabweichung $e(t)$ über die Funktion:

$$e(t) = w(t) - y(t) \quad (3.6)$$

In Abhängigkeit der Regelabweichung $e(t)$ ermittelt der Regler für jeden Zeitschritt die Stellgröße $u(t)$ [80].

Im Falle der Versuchseinrichtung wurden ein derartiger *geschlossener Regelkreis* realisiert, der entweder den Wasserstand in der Versuchseinrichtung oder den Durchfluss in den Zulaufleitungen regelt. Kommt es z.B. zu einer Druckänderung im Wasserkreislauf (Störgröße $d(t)$), so ändert sich bei konstanter Schieberstellung der Abfluss. Die Abweichung des Ist-Wertes vom Soll-Wert wird vom Regler erfasst (Regelabweichung $e(t)$) und dieser minimiert die Abweichung durch ein entsprechendes Kommando an den Motorschieber (Stellgröße $u(t)$).

Der fortlaufende Abgleich zwischen Soll- und Ist-Wert und die Erzeugung der Stellgröße erfolgt im Falle der Versuchseinrichtung für die Schwingklappe mit einem PI-Regler. Ein PI-Regler besteht aus einem P-Glied (proportional Anteil) und einem I-Glied (Anteil der Integration). Die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Wert wird durch das P-Glied und dessen Parameter K_p verstärkt. Das I-Glied wirkt durch die zeitliche Integration der Regeldifferenz über den Parameter T_N ein. Über die Parameterisierung können die Parameter K_p und T_N so eingestellt werden, dass die gewünschte Regelcharakteristik erreicht wird. Bezogen auf die erforderliche Regelgeschwindigkeit hat sich herausgestellt, dass das hydraulische System der Versuchseinrichtung als träge bezeichnet werden kann und dass daher der Einsatz eines zusätzlichen D-Gliedes (Differenzierer) nicht zielführend war. Dieser reagiert auf die Änderungsgeschwindigkeit der Regeldifferenz und eignet sich daher besonders für schnelle Regler.

Im Falle einer Abflussregelung wird die Regeldifferenz ($e = Q_{ist} - Q_{soll}$) nach folgender Formel vom PI-Regler verarbeitet.

$$\Delta Q = K_p \left(e + \frac{1}{T_N} \int e \, dt \right) \quad (3.7)$$

In der Regelungstechnik existieren mehrere standardisierte Verfahren zur experimentellen Ermittlung der Verstärkung K_p und der Nachstellzeit T_N . Die Parameterisierung des Reglers der Versuchseinrichtung erfolgt mit dem Einstellverfahren nach Ziegler-Nichols. Dabei wird der Regler zunächst als reiner P-Regler betrieben ($T_N \rightarrow 0$) und die Verstärkung schrittweise erhöht, bis das System mit gleich bleibender Amplitude schwingt ($K_{p,krit}$). Die Wellenlänge dieser Schwingung wird als T_{krit} bezeichnet. Nach Ziegler-Nichols gelten für einen Regler nun folgende Einstellungen:

Tabelle 3.3: Einstellregeln nach Ziegler-Nichols

	K_p	T_N
P-Regler	$0,5 \cdot K_{p,krit}$	
PI-Regler	$0,45 \cdot K_{p,krit}$	$0,83 \cdot T_{krit}$

Der nach diesen Vorgaben parameterisierte Regler zeigte schon eine zufriedenstellende Regelcharakteristik, die dem trägem hydraulischen System gut entsprach. Für das Untersuchungsprogramm wurden nur noch kleine Veränderungen an diesen Grundeinstellungen vorgenommen.

Mit Hilfe der implementierten Regelung ist es nun möglich, reproduzierbar und mit einer hohen Genauigkeit Abfluss- und Betriebszustände anzufahren. Darüber hinaus bietet die installierte Hard- und Software aber auch die Möglichkeit, den Versuchsstand automatisiert zu betreiben. Die entwickelte Regel- und Messsoftware besitzt zudem folgende Leistungsmerkmale:

Abtastfrequenz:

Die Abtastung der analogen Messdaten (Druckmessdosen, Beschleunigungsaufnehmer ect.) erfolgt über eine Analog-Digitalkarte mit einer Abtastfrequenz von 100 Hz pro Kanal.

Regelkreise:

Softwareseitig sind sechs geschlossene Regelkreise realisierbar. Die in den Regelkreis einfließenden Messgrößen können in der Konfiguration aus einer Liste der vorhandenen Hardware frei ausgewählt werden. Es ist somit auch möglich, einen Sensor (z.B. Wasserstand) in mehreren Reglern zu berücksichtigen. Im Falle des Versuchsstandes für die Schwingklappe kann entweder eine Abfluss- oder eine Wasserstandsregelung erfolgen.

Displays:

Neben den sechs Regelkreisen sind sechs weitere Displays in der Benutzeroberfläche vorhanden, an denen Messwerte angezeigt werden können.

Umrechnung der Messwerte:

In der Konfiguration der Displays besteht die Möglichkeit, den erfassten Messwert (z.B. Durchfluss) über eine lineare Beziehung zu verstärken. Alle erfassten Größen können bei skalierten Modellen z.B. als Prototyp-Werte angezeigt und aufgezeichnet werden.

Schreiber:

Maximal sechs Messwerte können in einem Graphen mitgeschrieben werden, den

einzelnen Graphen können hierbei unterschiedliche Farben zugewiesen werden. Neben der optischen Analyse der Messwerte wird mittels dieses Leistungsmerkmals eine optische Kontrolle und Bewertung des Regelverhaltens ermöglicht.

Ganglinien:

In einem Untermenü wird die Programmierung von Betriebssequenzen ermöglicht. In Abhängigkeit der Zeit kann hier eine Abfolge von Soll-Werten hinterlegt werden. Die Soll-Werte müssen dabei nicht von einem Regelkreis sein, es ist auch möglich, die Abfolge von unterschiedlichen Regelkreisen zu definieren. Im Falle einer Abflussregelung kann z.B. eine zeitlich diskretisierte Ganglinie einer Hochwasserwelle hinterlegt werden, die dann vollständig automatisiert abgefahren wird. Die programmierten Ganglinien können mit der Benutzeroberfläche gespeichert und verwaltet werden.

Datenaufzeichnung:

In der Konfiguration können bis zu zwölf Displays ausgewählt werden, die im Rahmen der Datenaufzeichnung in eine Textdatei geschrieben werden sollen. Die Datenerfassungsrate kann frei gewählt werden, die obere Grenze liegt bei einem Intervall von 1,0 s. Es kann gewählt werden, ob der Mittelwert über das vorangegangene Intervall oder der Momentanwert geschrieben wird. In Verbindung mit dem Ganglinien-Tool besteht die Möglichkeit, die instationären Übergangsphasen zwischen zwei Zuständen in der Datenaufzeichnung auszublenden. Hierfür kann eine maximal zulässige Abweichung eines Displays definiert werden. Erst wenn der Messwert dieses Abweichungsband für eine zu definierende Zeitspanne nicht mehr über- oder unterschreitet, wird die Datenaufzeichnung ausgelöst. Nach Abschluss der frei bestimmbaren Messzeit wird dann der nächste Zustand über das Ganglinien-Tool angefahren.

Funktionaler Zusammenhang mehrerer Regelkreise:

Mit diesem Untermenü kann eine Verknüpfung zwischen einem Soll-Wert eines Displays mit dem Ist-Wert eines anderen Displays verknüpft werden. Der funktionale Zusammenhang dieser Verknüpfung kann mittels eines Polynomes 5. Grades definiert werden.

Die Wirkungsweise soll anhand eines Modells eines Hochwasserrückhaltebeckens erläutert werden. Das Modell besitzt zwei Randbedingungen, den Zufluss am oberen Modellrand und den Auslauf am unteren Modellrand. Im Falle der Wasserstandsregelung auf den Oberwasserstand wird der Abfluss vom Regler so gewählt, dass ein konstanter Wasserstand gehalten wird. Diese Änderung des Abflusses muss sich aber auch auf den Wasserstand am unteren Modellrand auswirken, da auch in der Natur der Wasserstand an dieser Stelle über die Schlüsselkurve in einem funktionalen Zusammenhang mit dem Abfluss steht. Besitzt das Modell nun eine geregelte untere Randbedingung, so kann die Schlüsselkurve hier hinterlegt werden und der Soll-Wert wird in Abhängigkeit des Zuflusses im Modell angepasst.

Das im Rahmen der Untersuchungen zur Schwingklappe entwickelte Steuer- und Regelkonzept kommt in einer weiterentwickelten Version mittlerweile standardmäßig bei vielen Experimenten im Theodor-Rehbock-Wasserbaulabor mit großem Erfolg zu Einsatz. Vor allem bei hydraulisch komplexen Modellen können hierdurch neuartige Modellkonzepte realisiert werden. Darüber hinaus ergibt sich durch den automatisierten Betrieb eine höhere Datendichte und die Möglichkeit, z.B. Leistungskurven in Abhängigkeit des Unterwasserstandes automatisiert aufzunehmen.

4 Ergebnisse und Diskussion

Im vorangegangenen Kapitel wurde die für die Untersuchungen zur Schwingklappe gewählte Methodik und die dazugehörigen Versuchseinrichtungen vorgestellt. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt und diskutiert. Dabei wird der Gesamtrahmen der Untersuchungen in die Themenblöcke Hydraulik, Kinematik, Betrieb und Stauraumbewirtschaftung unterteilt.

4.1 Entwicklung des Klappendesigns

In Kapitel 2 wurde das System der Schwingklappe vorgestellt. Durch seine Geometrie und die Art der Lagerung hat der Klappenkörper einen großen Einfluss auf die Funktion und die Betriebssicherheit der gesamten Anlage. Neben den hydraulischen Aspekten wirkt sich die Geometrie des Klappenkörpers, und hier vor allem der Bereich die unterstromige Klappenendkante, signifikant auf das kinematische Verhalten des gesamten Systems aus. Das kinematische Verhalten hat wiederum einen entscheidenden Einfluss auf die Betriebssicherheit.

Ausgehend von einer umfassenden Literaturrecherche wurde das Ziel verfolgt, mögliche Schwachstellen an der Formgebung des Klappenkörpers in einer frühen Projektphase durch theoretische Überlegungen zu beseitigen. Im Folgenden wird die Vermeidungsstrategie vorgestellt.

4.1.1 Design des Klappenkörpers

Zentrales Element der Schwingklappe ist der hohle Klappenkörper und dessen geometrische Ausbildung. In einer ersten Modelluntersuchung [49] wurde ein tragflächenähnliches Profil für die Klappe gewählt. Ziel war es, neben dem statischen Auftrieb auf Grund einer Dichte von kleiner 1000 kg/m^3 auch den dynamischen Auftrieb, der aus der Auftriebskraft der umströmten Tragflächenform resultiert, auszunutzen.

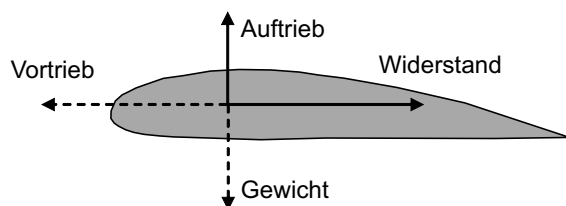


Abbildung 4.1: Durch Umströmung hervorgerufene Kräfte auf einen Körper

Bewegt sich ein Körper bestimmter Form relativ zu einem Fluid, so werden durch die Strömung Kräfte hervorgerufen. Ursache hierfür ist die Druckverteilung entlang der Oberfläche. Nach dem Gesetz von Bernoulli kommt es bei einem Geschwindigkeitsanstieg gleichzeitig zu einem Abfall des Drucks (Prinzip der Energieerhaltung). Im Falle eines tragflächenartigen Körpers wird die Oberseite auf Grund der längeren Strecke schneller umströmt, woraus der hydrodynamische Unterdruck und letztlich eine *Auftriebskraft* F_A resultiert.

$$F_A = c_A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A \quad (4.1)$$

Neben der Auftriebskraft wird durch die Umströmung auch eine *Widerstandskraft* F_W hervorgerufen.

$$F_W = c_W \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A \quad (4.2)$$

Das Ausnutzen des dynamischen Auftriebes ist bei der Schwingklappe nur bedingt möglich. Grundsätzlich kommt es während des Aufrichtvorganges der Schwingklappe zu einem sehr großen Anstellwinkel bzw. einer großen Klappenneigung, so dass die Strömung an der Oberseite des Körpers nicht mehr laminar anliegt, sondern abreißt und der Auftriebskraftbeiwert schlagartig kleiner wird. In der Aerodynamik spricht man in diesem Fall von einem *Stall*. Bei modernen Flugzeugprofilen sind Anstellwinkel bis ca. 20° möglich, ohne dass die Strömung an der Oberseite abreißt [3].

Durch die Ausführungen wird klar, dass der dynamische Auftrieb bei der Schwingklappe, wenn überhaupt, nur in einem kleinen Arbeitsbereich von 0° bis 20° Klappenneigung ausgenutzt werden könnte. Die Versuche mit dem Tragflügelprofil haben darüber hinaus zu massiven hydraulischen Problemen geführt: Die abgerundete Stauhaut im unterstromigen Bereich der Klappe besitzt keinen definierten und ortsfesten Ablösepunkt für die Strömung. Hierdurch kommt es zu einer ständigen Änderung des Momentengleichgewichts aus Gewicht-/Auftriebs- und Strömungskraft, was in der Folge zu einer instabilen Klappenlage und zu einem hydraulisch instabilen Abflussgeschehen führte. Eine Modifikation der Ablösekante in Form einer Verlängerung der Profilform führte zu keiner Verbesserung (vgl. Abbildung 4.2).

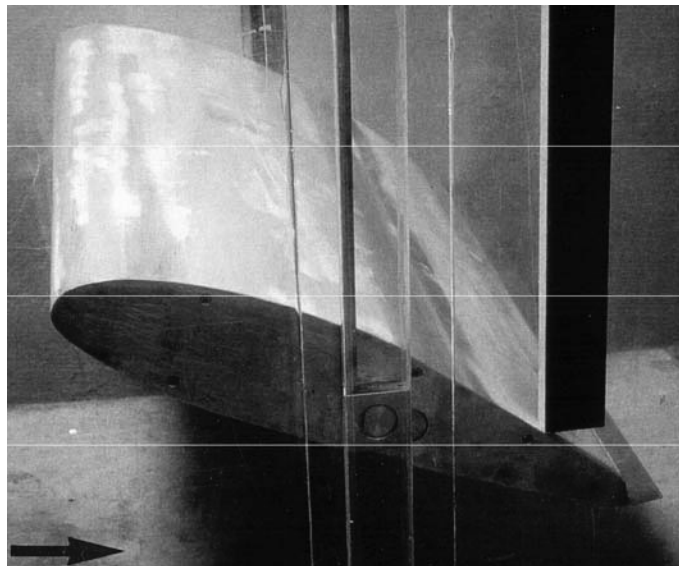


Abbildung 4.2: Untersuchtes Tragflächenprofil als Schwingklappe [48]

Bei der Wiederaufnahme der Untersuchungen zur Schwingklappe im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Fokus auf die hydromechanische Optimierung des Klappenkörpers und der damit zusammenhängenden Prozesse gelegt.

Die Schwingklappe ist rein mechanisch betrachtet ein schwingendes 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 gedämpft. Wirken äußere, periodische Kräfte in der Größenordnung der Eigenfrequenz der Schwingklappe auf das System ein, so besteht die Gefahr einer Resonanz. In den bisherigen Studien zur Schwingklappe wurden keinerlei Untersuchungen zum Schwingungsverhalten durchgeführt.

Bei der Festlegung der Klappengeometrie wurde daher in puncto Resonanz eine Vermeidungsstrategie verfolgt. Äußere, periodische Kräfte, die z.B. durch Druck- und Geschwindigkeitsoszillationen entlang der Stauwand und am unterstromigen Ende der Schwingklappe induziert werden können, waren zu minimieren.

Von der hydraulischen Funktion und der Gestalt des Strömungsfeldes her betrachtet kann eine Analogie zwischen der Schwingklappe und einem unterströmten Schütz hergestellt werden, so dass für die Recherche zur Vermeidungsstrategie auf Untersuchungen zu Schwingungsproblemen bei Tiefschützen zurückgegriffen werden konnte.

In Grundlagenuntersuchungen hat Wickert (1971) die auslösenden Faktoren für Schwingungs- und Resonanzzustände analysiert und konstruktive Ausführungsvorschläge für resonanzhemmende Schützgeometrien erarbeitet. Die in Abbildung 4.3 dargestellten Anordnungen von Stauwand und Tragkonstruktion wurden bewertet.

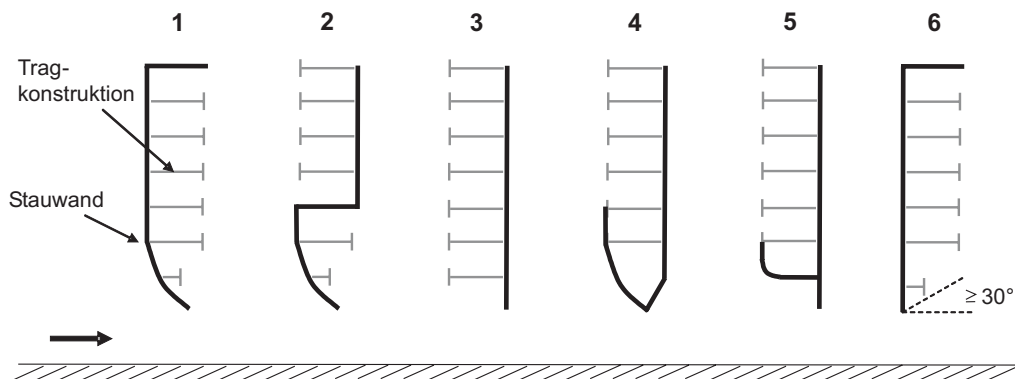


Abbildung 4.3: Verschiedene Anordnungen von Stauwand und Tragkonstruktion [124]

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 und Tragkonstruktion besitzen einen stabilen Ablösepunkt und haben sich zur Verringerung der Schwingungsanfächerung bewährt.

Auch Naudascher (1994) hat sich intensiv mit strömungsinduzierten Schwingungen beschäftigt und Vorschläge für schwingungsunanfällige Schütze erarbeitet. Das entscheidende Kriterium für die Vermeidung von vertikalen Schüttschwingungen ist demnach eine stabile Lage des Ablösepunktes der Strömung bei allen relevanten Betriebszuständen (vgl. Abbildung 4.4). Ob eine stabile Strömungablösung vorliegt kann über das Verhältnis des vertikalen Versatzes a^* und der Schützbreite e ermittelt werden. Für $a^*/e < 1$ liegt eine instabile Strömungablösung vor, für $a^*/e \gg 1$ kann von einer stabilen Strömungablösung ausgegangen werden. Der a^*/e -Wert, der instabile von stabilen Strömungablösungen trennt, ist

abhängig von den Fließgeschwindigkeiten und kann über eine Betrachtung der Scherschichtentwicklung und über den empirischen Kontraktionsbeiwert C_c bestimmt werden.

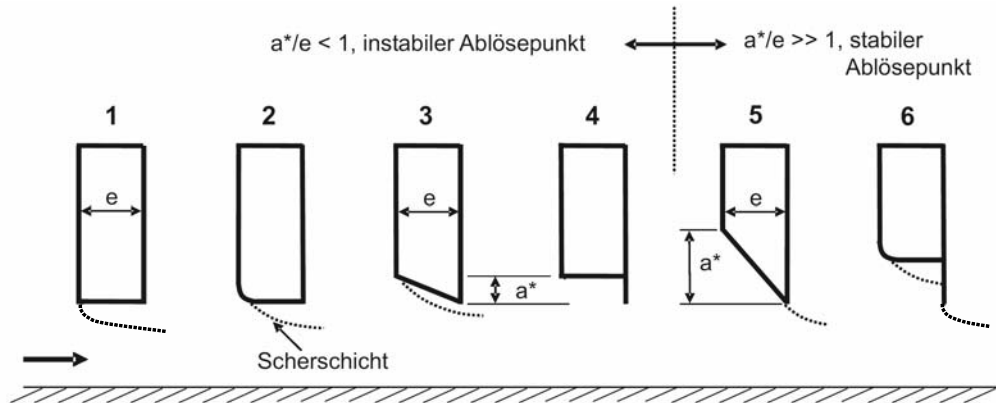


Abbildung 4.4: instabile und stabile Strömungsablösung an unterströmten Schützen [94]

Neben der Geometrie der strömungszugewandten Seite des Schützes kann es auch auf Grund des Strömungsgeschehens an der rückwärtigen Schützgeometrie zu Schwingungen eines Schützes kommen. Petrikat (1955) hat hierzu Beispiele und Lösungsvorschläge zusammengestellt. Abbildung 4.5 zeigt eine großflächig in die turbulente Rückströmung eingetauchte Tragkonstruktion und einen möglichen Lösungsvorschlag zur Verringerung der strömungsinduzierten Schwingungen.

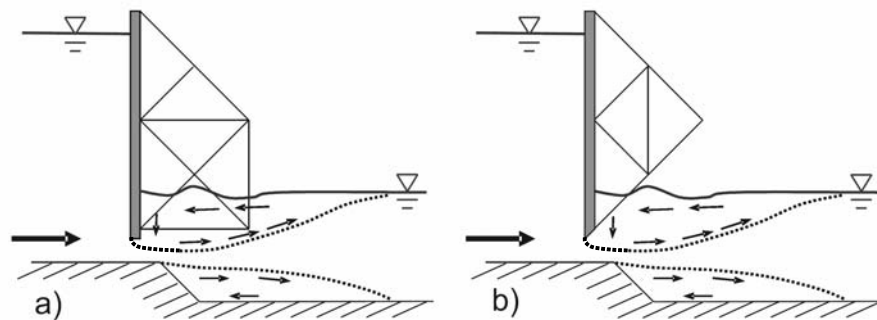


Abbildung 4.5: Instabile Abflusszustände können zu Schwingungen führen, a), abhilfeschaftende Maßnahme, b) [101]

Die Geometrie des Schütz- oder Klappenunterkante hat neben dem beschriebenen Einfluss auf die Erregung von Schwingungen auch einen Einfluss auf die an der Schützunterkante wirkenden Kräfte. Diese hydrodynamischen Kräfte werden auch *Downpull* genannt. In Folge der erhöhten Fließgeschwindigkeiten im Schützbereich kommt es lokal zu einem Absinken des Druckes. Dieser Druck wirkt auf die Fläche der Schützunterkante, was zu einer resultierenden Kraft führt, die, wie die Schwerkraft, nach unten gerichtet ist. Vor allem bei großen Druckhöhen und großen Fließgeschwindigkeiten wirkt sich der Downpull signifikant auf die an einem Schütz angreifenden Kräfte aus [96].

Für die Schwingklappe bedeutet dies, dass die Klappenendkante bei allen Betriebszuständen möglichst schmal ausgeführt sein muss. Zudem sollte der Kraftangriffspunkt des Downpull während des Aufrichtvorganges nicht variieren, da es sonst zu schnellen Änderungen im Momentengleichgewicht und damit einhergehenden instabilen Klappenneigungen kommen kann.

Zusammenfassend lassen sich aus den obigen Ausführungen folgende Empfehlungen für das Design der Schwingklappe ableiten:

- Periodische hydraulische Kräfte erzeugen mechanische Schwingungen bei unterströmten Schützen.
- Solche Kräfte treten dann auf, wenn ein Unterdruck vorhanden ist und die Fläche, auf der dieser Unterdruck wirkt, groß genug ist.
- Die Schützunterkante ist in diesem Fall 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.
- Bei Rückstau von UW sollte kein zu steiler Absturz des Wehrhöckers gewählt werden ($<30^\circ$).

Bezüglich des Systems der Schwingklappe ergibt sich zusätzlich die Anforderung, dass diese Kriterien für möglichst alle Betriebszustände erfüllt sein sollten. Bedingt durch das Funktionsprinzip treten Klappenneigungen von 0° bis 90° auf, so dass vor diesem Hintergrund die Auswahl einer schwingungshemmenden Geometrie zusätzlich eingeengt wird. 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 und ein 45° -Rücksprung der unterwasserseitigen Enden reduziert weitestgehend die Schwingungsanregung infolge der turbulenten Strömung im Tosbecken. Aufbauend auf diesen Überlegungen wurde der in Abbildung 4.6 dargestellte, trapezförmige Klappenkörper in einer ersten Versuchsreihe untersucht.

Hinsichtlich des sich ausbildenden Stömungsfeldes konnten die Überlegungen zu dieser Klappenengeometrie bestätigt werden. Bei höheren Anströmgeschwindigkeiten konnte jedoch das in Abbildung 4.7 dargestellte Abflussgeschehen beobachtet werden. Die Klappe lag in der Ruheposition und erzeugte einen Aufstau nach Oberwasser. Der Strahl löste an der vorderen Kante der Stauhaut ab und legte sich nicht mehr an die Klappe an. Die Strömung löste somit nicht mehr an der eigentlichen Ablösekannte ab, so dass die Bestimmung des Abflusses über die Geometrie an der Endkante folglich fehlerbehaftet war. Auch bezüglich der Schwingungsanfachung stellte das beobachtete Strömungsgeschehen ein kritischen Zustand dar, da es im Verlauf des Aufrichtens der Schwingklappe zu einer räumlichen Verlagerung des Strömungablösepunktes kam. In einem Übergangsbereich schwenkte der

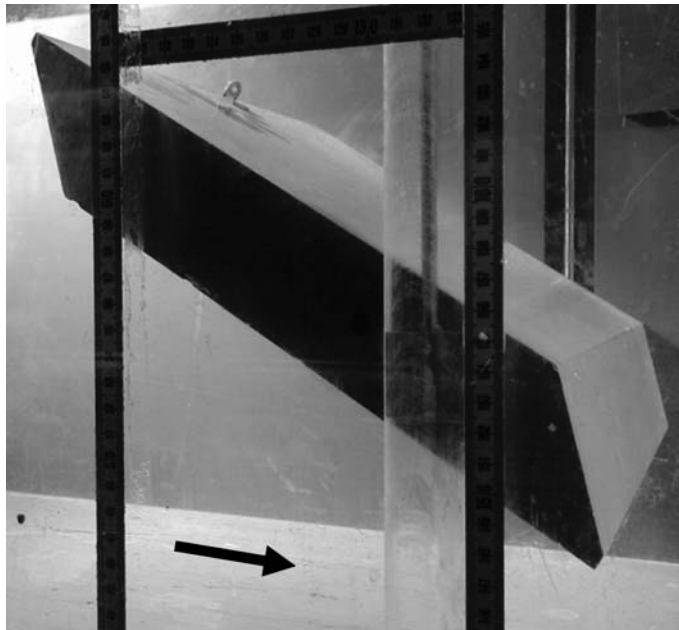


Abbildung 4.6: Trapezförmiger Klappenkörper

Ablösepunkt zwischen den beiden Lagen hin und her, was zu massiven Änderungen im Momentengleichgewicht und damit zu einer instabilen und resonanzanfälligen Lage der Schwingklappe führte.

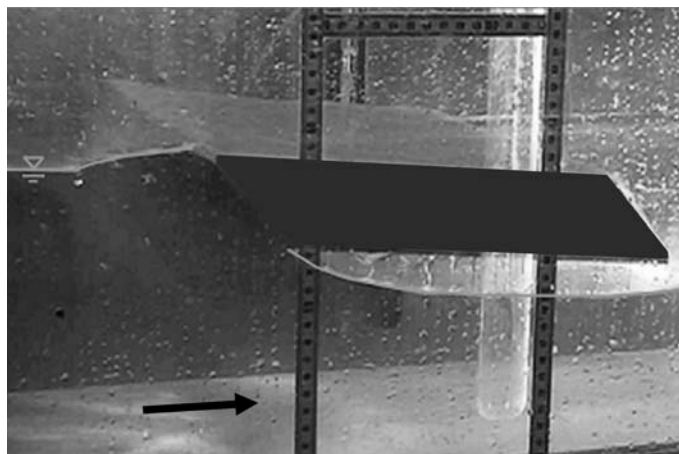


Abbildung 4.7: Ungünstige Strömungsablösungen an der oberstromigen Kante des Trapez-Hohlkörpers.

Die ungewollte Strömungsablösung an der oberstromigen Kante des Trapez-Hohlkörpers wurde durch eine Modifikation des oberstromigen Klappenbereiches beseitigt. Anstelle eines kantigen Übergangs wurde die Stauhaut ausgerundet ausgeführt. Die Strömung wird hierdurch am oberwasserseitigen Ende der Schwingklappe gleichmäßig beschleunigt und löst gezielt und ohne räumliche Varianz bei allen Betriebszuständen an der unterwasserseitigen Kante ab. Die in Abbildung 4.8 dargestellte Geometrie der Schwingklappe stellt

den hinsichtlich der Schwingungsproblematik optimierten Klappenkörpers dar. Die exakte Geometrie mit einer auf die Klappenlänge L normierten Bemaßung ist in Kapitel 6 in Abbildung 6.1 dargestellt.



Abbildung 4.8: Endversion der Geometrie des Klappenkörpers

Alle Versuche zum hydraulischen und kinematischen Verhalten der Schwingklappe wurden mit der in Abbildung 6.1 aufgetragenen Geometrie durchgeführt. Entsprechend der Dimension der Versuchsrinne ergeben sich die in Tabelle 4.1 folgende Kennwerte der Prototyp-Schwingklappe.

Tabelle 4.1: technische Daten des untersuchten Prototyp-Klappenkörpers

	Klappenkörper
Material	PVC
Konstruktion	Bepunktetes Rippenskelett
Breite	79,5 cm
Länge	96,0 cm
Höhe	25,0 cm
Gewicht	43,0 kg
Dichte	289,00 kg/m ³

4.1.2 Überlegungen zur Lage der Drehachse

Wie in Abbildung 4.8 zu erkennen ist, ist die Lagerebene nicht in der Mittelachse der Schwingklappe angeordnet, sondern um 0,051 L Richtung der wasserseitiger Stauhaut verschoben. Diese Anordnung wurde aus zweierlei Gründen gewählt. Zum einen wird postuliert, dass sich hierdurch eine stabilere Schwimmelage des Klappenkörpers beim beginnenden Aufrichten einstellt. Zum anderen ergeben sich hierdurch auch Vorteile hinsichtlich der Entwicklung der Spaltweite während des Aufrichtens.

Wenn ein Körper in einem stehenden Fluid schwimmt, so greifen die Gewichtskraft und Auftriebskraft in der gleichen Wirkungslinie an. Man spricht in diesem Fall von einer stabilen Gleichgewichtslage (vgl. Abbildung 4.9, links). Wird der Körper durch äußere Einwirkungen aus der stabilen Gleichgewichtslage gebracht, so verschiebt sich der Mittelpunkt des eingetauchten Volumens, wohingegen der Körpermittelpunkt unverändert bleibt. Die Wirkungslinien der beiden Kräfte liegen nun nicht mehr in der gleichen Ebene, wodurch ein rückstellendes Drehmoment entsteht (vgl. Abbildung 4.9, rechts).

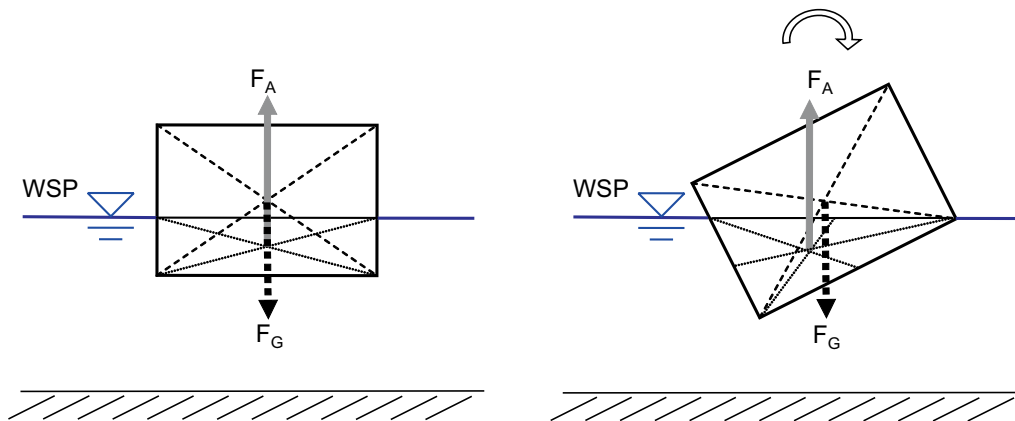


Abbildung 4.9: links: stabile Gleichgewichtslage eines Körpers in einem stehendem Fluid, rechts: Entstehung eines Rückstellmomentes bei Auslenkung des Körpers

Ob das angreifende 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 der Gewichtskraft oberhalb des Angriffspunktes für die Auftriebskraft liegt, desto instabiler ist der Gleichgewichtszustand [35].

Diese grundlegenden Überlegungen zur Schwimmstabilität sind bei der Wahl der Lagerebene berücksichtigt worden. Ziel war es, eine stabile Schwimmelage des Klappenkörpers für Betriebszustände während des Aufrichtvorganges zu erwirken, bei denen die Schwingklappe noch nicht in das Abflussgeschehen eingreift und somit der Ober- und Unterwasserstand identisch ist. Dies sind, wie in Kapitel 4.2.5 aufgeführt, je nach Wahl des Lagerungspunktes Klappenneigungen im Bereich von 10° bis 30° . Aus mechanischer Sicht führt eine stabilere Schwimmelage zu einem steiferen System, durch das die Amplituden im Falle einer äußeren Anregung verringert werden können. Weitere Ausführungen zum Themenkomplex der Eigenfrequenz, der Amplituden der freien Schwingung und zum Dämpfungsverhalten der Schwingklappe sind in Kapitel 4.3.2 enthalten.

Bei dem System der Schwingklappe schwimmt der Körper nicht frei im Fluid sondern wird durch eine zusätzliche Lagerkraft gehalten. Für die Betrachtungen zur Schwimmstabilität bedeutet dies, dass es neben den Angriffspunkten für die Gewichtskraft und Auftriebskraft noch den zusätzlichen Angriffspunkt der Lagerkraft gibt. Die Lagerkraft wirkt in die gleiche Richtung wie die Gewichtskraft, so dass diese auch zusammengefasst werden können (vgl. Abbildung 4.10). Da jede Lage der Schwingklappe eine Gleichgewichtslage ist, liegt die Wirkungslinie dieser resultierenden Kraft auf der Wirkungslinie der Auftriebskraft.

Durch die Verschiebung der Lagerebene nach unten wird auch der Kraftangriffspunkt der resultierenden Kraft um die Länge Δh nach unten verschoben. Der Abstand zwischen dem Angriffspunkt der resultierenden Kraft und der Auftriebskraft wird vergrößert, was nach den grundlegenden Ausführungen zu einer stabileren Schwimmelage führt.

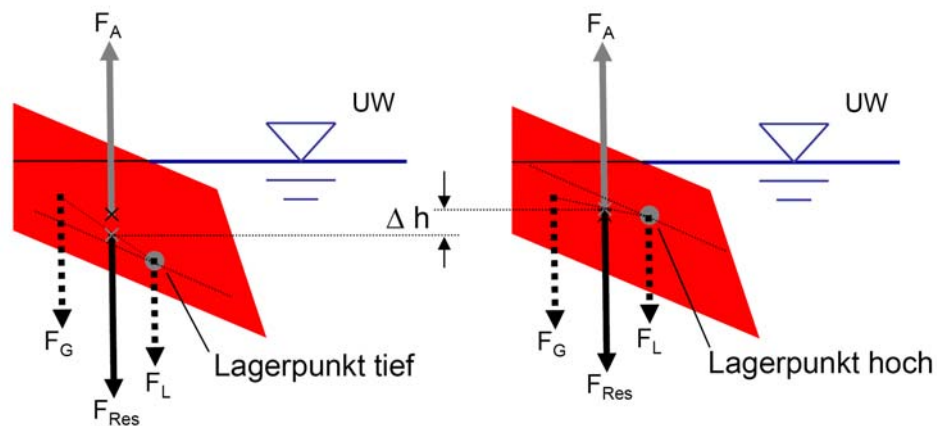


Abbildung 4.10: links: Kraftangriffspunkte bei einer tiefen Lage des Lagerpunktes, rechts: Kraftangriffspunkte bei einer hohen Lage des Lagerpunktes

Neben den postulierten Vorteilen bezüglich der Schwimmstabilität hat die außermittige Anordnung der Lagerung auch Vorteile bezüglich der Entwicklung der Spaltweite beim Aufrichtvorgang. Durch die exzentrische Lage kann bei gleicher Ausgangslage der Schwingklappe die minimale Spaltweite s_{min} reduziert werden. Abbildung 4.11 zeigt den Zusammenhang. Aus konstruktiven Gründen wurde eine noch tiefere Lagerebene verworfen.

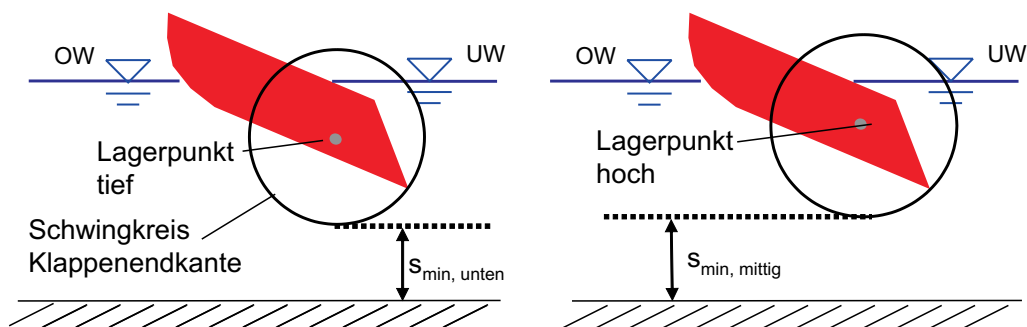
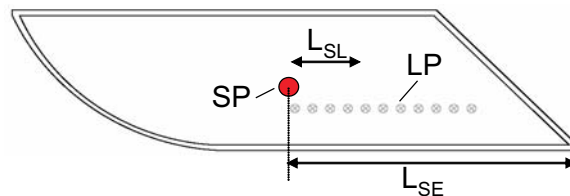


Abbildung 4.11: links: minimale Spaltweite bei tiefer Lage des Lagerpunktes, rechts: minimale Spaltweite bei hoher Lage des Lagerpunktes

4.1.3 Untersuchte Lagerungsgeometrie

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 hydraulischen Regulierwirkung. Die Untersuchungen zur Lage der Drehachse wurden für die Laboruntersuchungen mittels 11 verschiedener Lagerungspunkte realisiert. Tabelle 4.2 gibt einen Überblick über die untersuchten Lagerpunkte. Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 4.1.2 zur Lage der Drehachse war die Ebene der Lagerpunkte nicht in der Klappenmittelachse angeordnet, sondern um 10 cm Richtung Stauhaut verschoben. Bedingt durch die bauliche Ausführung lag der Schwerpunkt bei 50,9 % der Klappenlänge, bei Betrachtung von der Endkante aus (L_{SE})



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

Abbildung 4.12: Definition der Lagergeometrie

Tabelle 4.2: Beziehung zwischen Lagerpunkt und Schwerpunkt

Lager Nr.	1	2	3	4	5	6
L_{SL} [cm]	0,875	3,875	6,875	9,875	12,875	15,875
L_{SE} [cm]	48,0	48,0	48,0	48,0	48,0	48,0
$LS = L_{SL}/L_{SE}$ [-]	0,018	0,081	0,143	0,206	0,268	0,331
Lager Nr.	7	8	9	10	11	
L_{SL} [cm]	18,875	21,875	24,875	27,875	30,875	
L_{SE} [cm]	48,0	48,0	48,0	48,0	48,0	
$LS = L_{SL}/L_{SE}$ [-]	0,393	0,456	0,518	0,581	0,643	

4.2 Untersuchungen zum hydraulischen Verhalten

Im vorangegangenen Kapitel wurden die theoretischen Überlegungen und Vorversuche zum Design des Klappenkörpers vorgestellt. Im folgendem werden die im Rahmen der Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich des hydraulischen Verhaltens der Schwingklappe vorgestellt. Dabei wird vor allem auf die für die Bemessung der Schwingklappe notwendigen Aspekte wie den Abflussbeiwert, das Regelverhalten und die benötigten Randbedingungen eingegangen. Abschließend werden die neuen Ergebnisse mit den bisher veröffentlichten Erkenntnissen zur Schwingklappe verglichen, die rein auf theoretischen Überlegungen beruhen.

4.2.1 Abflussbeiwert

In der Literatur gibt es eine Vielzahl von Untersuchungen zum Abflussverhalten bei 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.

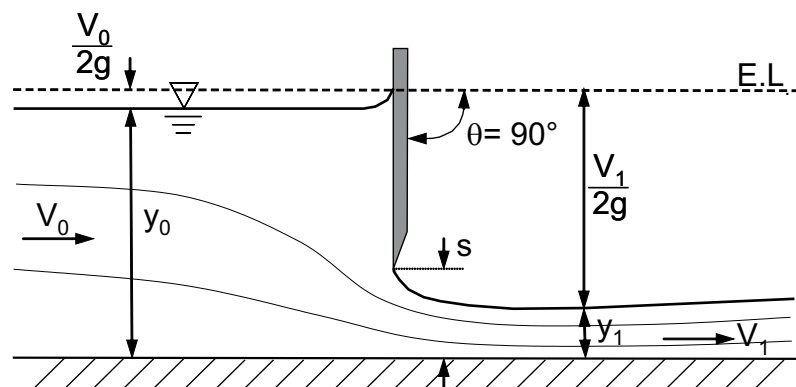


Abbildung 4.13: Freier Abfluss unter einem Schütz

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 Nahbereich der Schütztafel 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

$$y_1 = C_C \cdot s \quad (4.3)$$

beschrieben werden, wobei C_C als empirischer Kontraktionsbeiwert bezeichnet wird.

Geht man von reibungsfreien Strömungsverhältnissen zwischen den Querschnitten 0 und 1 aus (vgl. Abbildung 4.13), so gilt:

$$y_0 + \frac{V_0^2}{2g} = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (4.4)$$

umgeformt nach V_1 und nach Gleichung 4.3

$$V_1 = \sqrt{2g \cdot (y_0 - C_C \cdot s) + V_0^2} \quad (4.5)$$

Aus der Kontinuitätsbedingung

$$Q = V_1 \cdot C_C \cdot s \cdot B \quad (4.6)$$

folgt der Standardtyp der Abflussformel unter einem Schütz:

$$Q = C_C \sqrt{1 - \frac{C_C s}{y_0} + \frac{V_0^2}{2g \cdot y_0}} \cdot \sqrt{2g \cdot y_0} \cdot s \cdot B \quad (4.7)$$

Fasst man die ersten beiden Terme auf der rechten Seite als empirischen Abflussbeiwert C_Q bzw. C_q zusammen, so gilt:

$$Q = C_Q \cdot \sqrt{2g \cdot y_0} \cdot s \cdot B \quad (4.8)$$

bzw.

$$q = C_q \cdot \sqrt{2g \cdot y_0} \cdot s \quad (4.9)$$

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

$$C_Q = f\left(\frac{s}{y_0}, Fr_0, \theta, Geometrie, Re, We\right) \quad (4.10)$$

Eine direkte Bestimmung bzw. Berechnung des Abflussbeiwertes C_Q/C_q nur mit geometrischen oder hydraulischen Parametern ist nicht möglich. Für den planenden Ingenieur stehen daher in der Literatur Tabellenwerke für gebräuchliche Schützformen zur Verfügung (z.B. [95], [12]), in denen der Abflussbeiwert C_q über die Schützform und die geometrischen 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 [2].

Die praktische Anwendbarkeit dieses Berechnungsverfahrens nach Aigner (1997) 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:

$$C_{C0} = 1,3 - 0,8 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha - 205}{220}\right)^2} \quad (4.11)$$

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 4.11 berücksichtigt. Die Annahme $s/y_0 = 0$ stellt jedoch keinen praxisrelevanten Zustand dar, da in diesem Fall die Spaltweite gegen Null geht und somit kein Abfluss möglich ist. Die Betrachtung ist vielmehr als Grenzwertbetrachtung zu verstehen. Aigner (1997) ist der Frage nachgegangen, 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:

$$C_C = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{C_{C0}} - 1\right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{s}{y_0}\right)^{\frac{210}{\theta}}}} \quad (4.12)$$

und der Abflussbeiwert C_q

$$C_q = \frac{C_C}{\sqrt{1 + \frac{C_C}{\frac{y_0}{s} - 0,5}}} \quad (4.13)$$

bestimmt werden [2].

Abbildung 4.14 zeigt einen Vergleich der berechneten Werte nach Gleichung 4.12 und 4.13 mit Messreihen von Gentilini, Aigner und eigenen Messungen an einer starr eingespannten Schwingklappe. Aufgetragen sind nur Abflussbeiwerte im Neigungsbereich zwischen 0° und 90° , da konstruktionsbedingt bei der Schwingklappe nur Neigungen in diesem Bereich auftreten können.

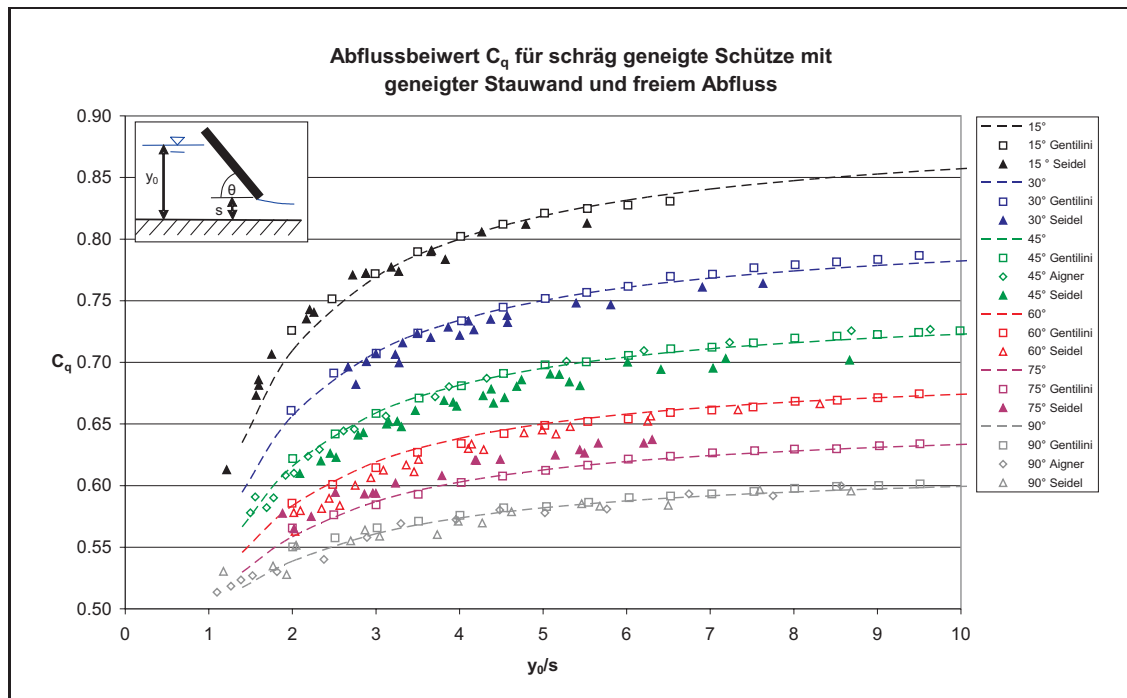


Abbildung 4.14: Vergleich der theoretischen Berechnungsergebnisse mit experimentellen Untersuchungen

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 unterstromige Klappenendkante mit einer Breite von 0,5 cm im Prototypen 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.

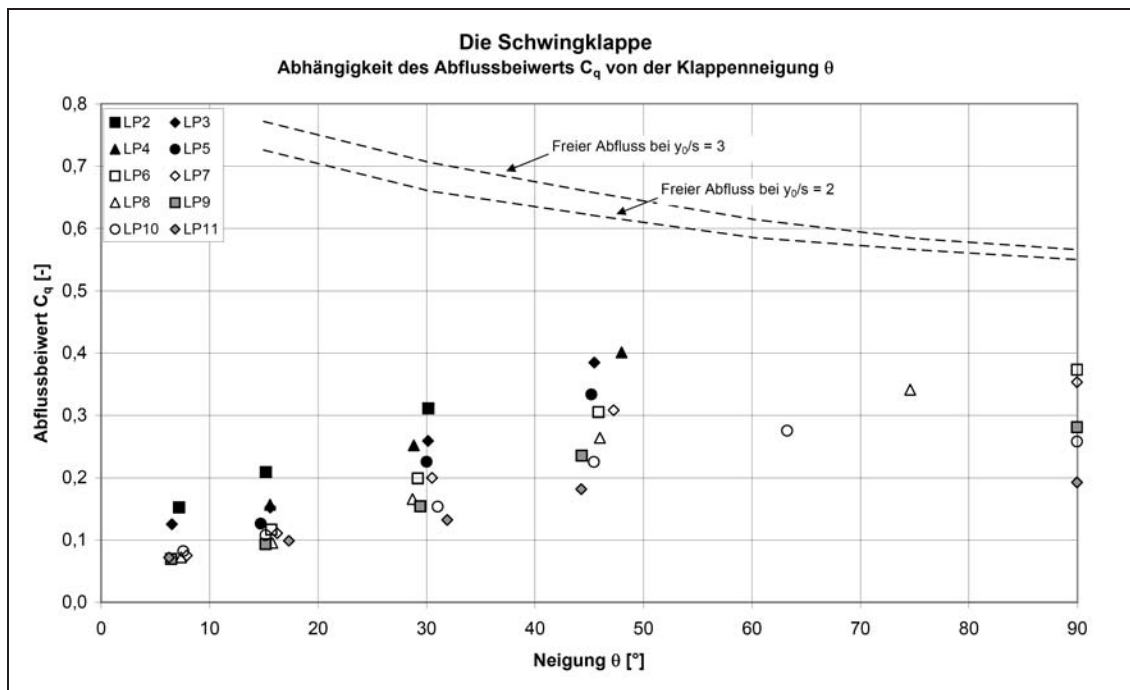


Abbildung 4.15: Verhalten des Abflussbeiwertes während des Aufschwimmvorganges

Der Abflussbeiwert C_q liegt bei allen Versuchen und über den kompletten Arbeitsbereich der Schwingklappe zwischen 0° und 90° im Bereich zwischen 0,07 und 0,4. 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 4.2.5 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° bis 20° in das Abflussgeschehen eingreift. Die Abflussbeiwerte für kleine Neigungen wurden dennoch 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 aufgezeigt 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° 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° würde man Abflussbeiwerte in der Größenordnung von 0,7 erwarten.

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 von:

$$y_0 = f(s, \theta, C_q, y_3) \quad (4.14)$$

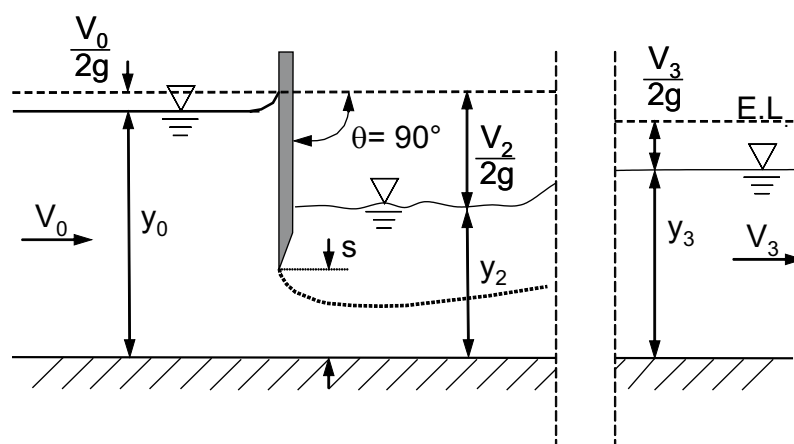


Abbildung 4.16: Rückgestauter Abfluss unter einem Schütz

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

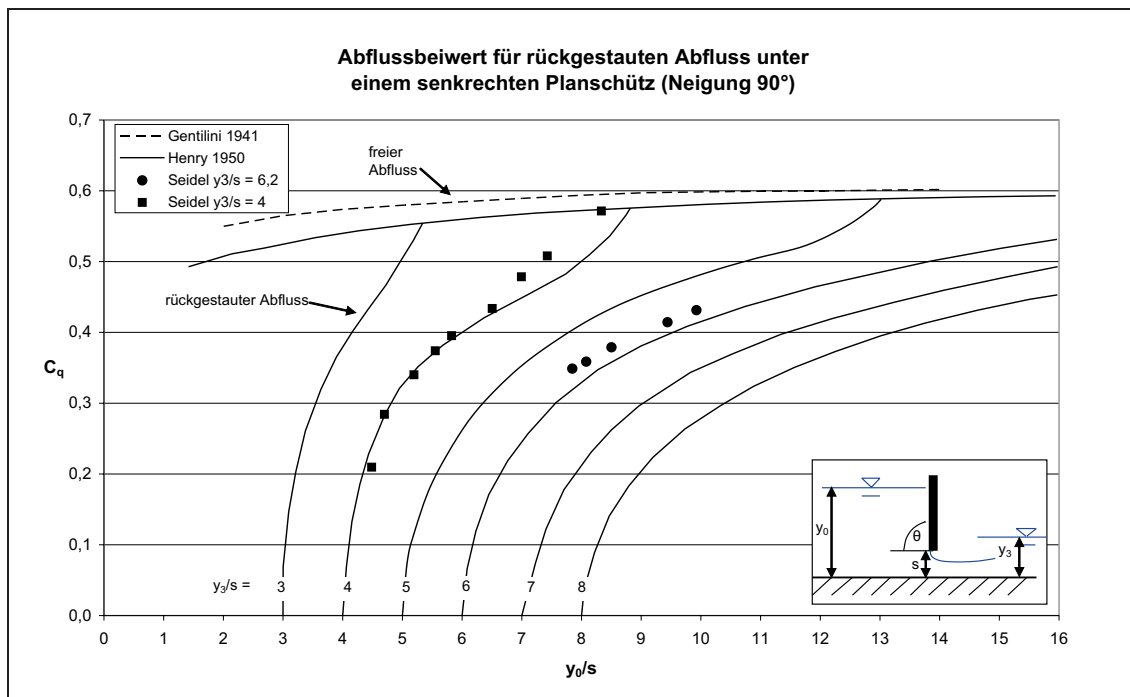


Abbildung 4.17: Rückgestauter Abfluss, Neigung 90°

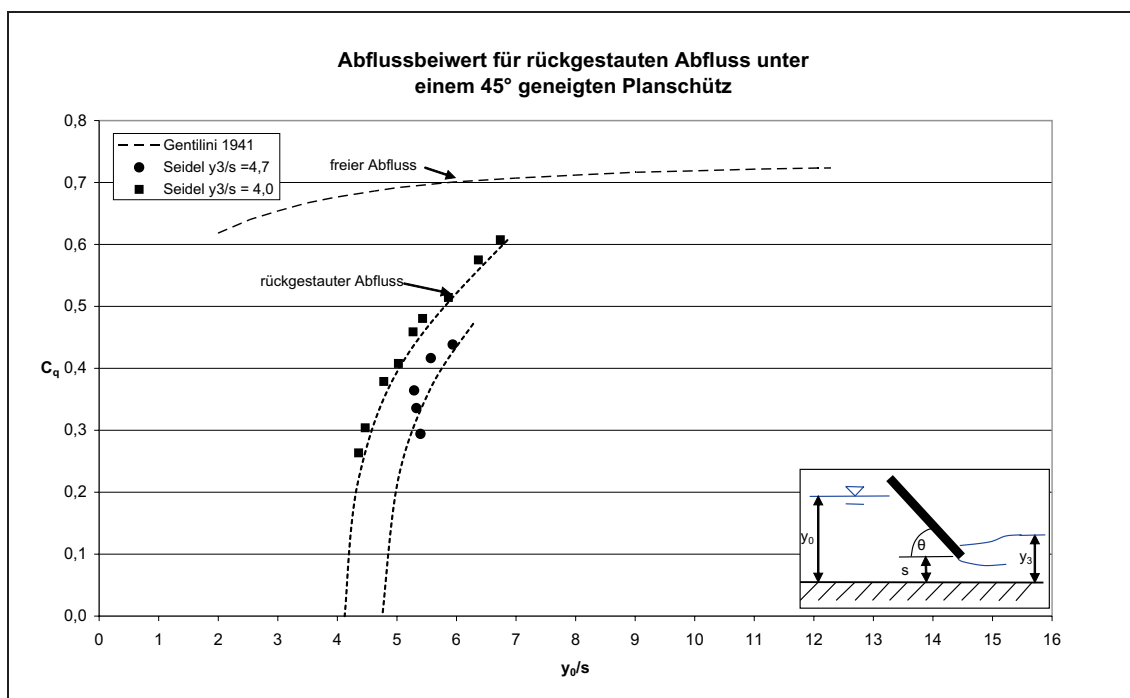


Abbildung 4.18: Rückgestauter Abfluss, Neigung 45°

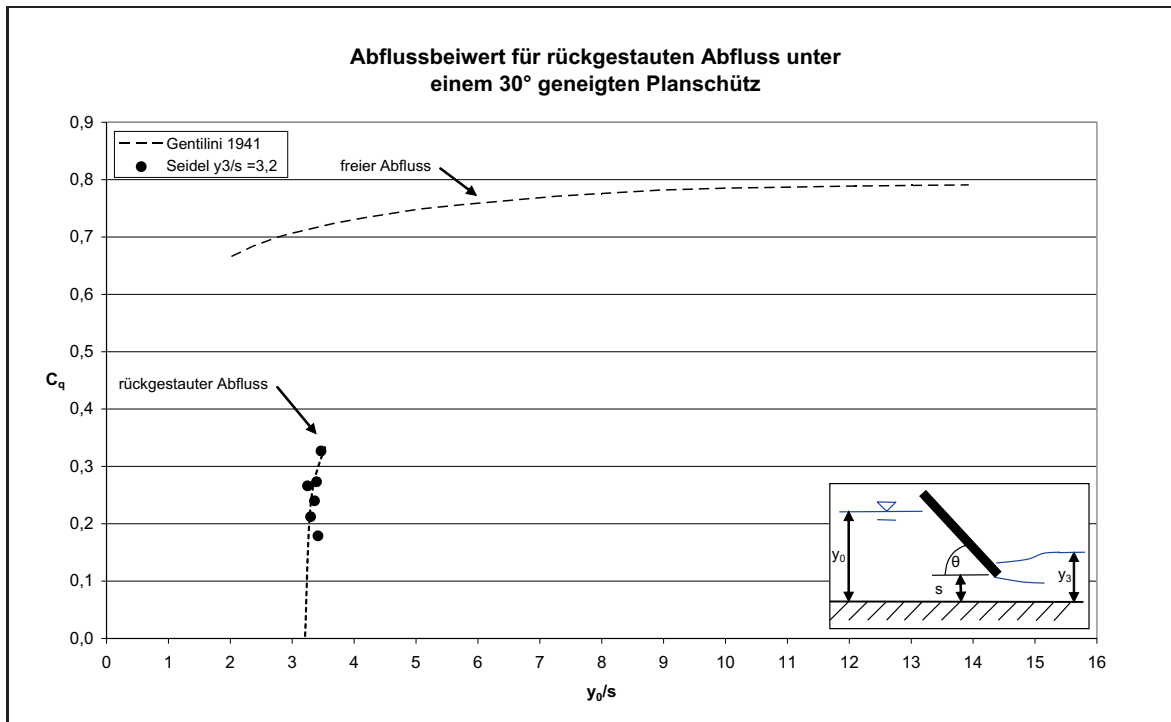


Abbildung 4.19: Rückgestauter Abfluss, Neigung 30°

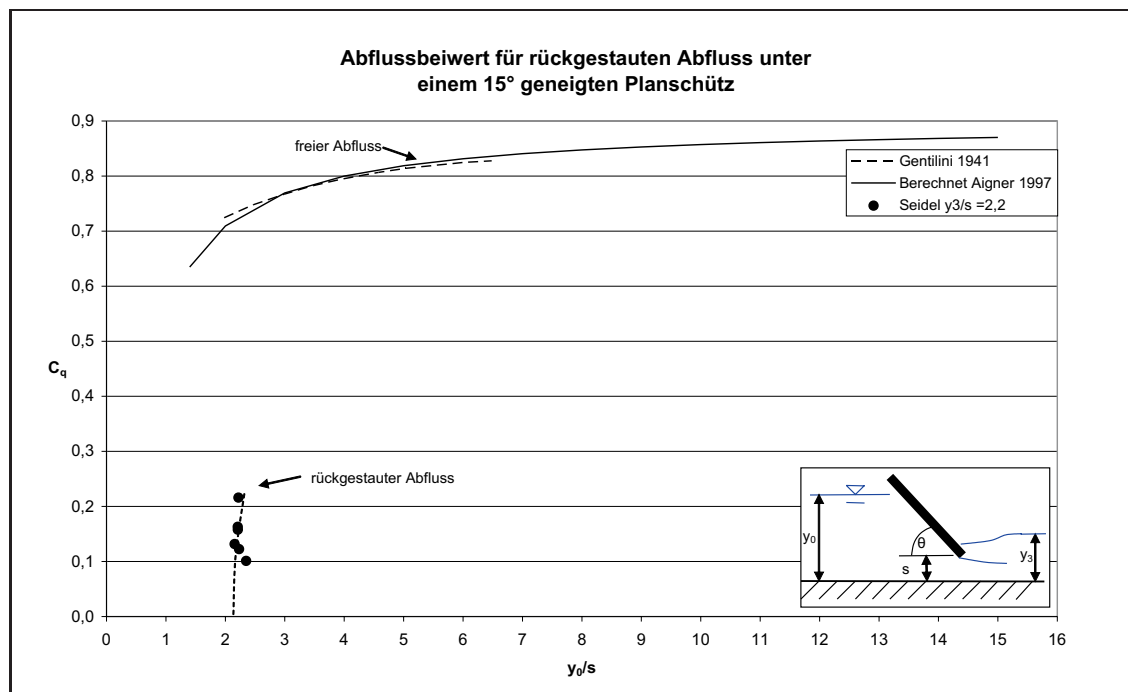


Abbildung 4.20: Rückgestauter Abfluss, Neigung 15°

Die rückgerechneten Abflussbeiwerte der eigenen Versuche decken sich sehr gut mit den Ergebnissen anderen Untersuchungen (vgl. Abbildung 4.18). Für geneigte Planschütze gibt es in der Literatur nur sehr wenige Untersuchungen unter Rückstau einfluss. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erfassten Daten tragen daher dazu bei, Datenlücken zu schließen.

Mit der Herleitung zum Abflussbeiwert (vgl. Gleichungen 4.4 bis 4.8) 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 physikalische Effekt wird jedoch nicht korrekt in der Formelarchitektur berücksichtigt, sondern über eine Abminderung des Abflussbeiwertes modelliert. Nähern sich Ober- und Unterwasserstand zunehmend an, so wird der Abflussbeiwert immer kleiner bis er bei ausgespiegelten Wasserständen den Wert Null annimmt. Auf Grund der Formelarchitektur ist dann auch der Abfluss im Falle einer horizontalen Sohle, physikalisch korrekt, gleich 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 extremem Rückstau einfluss 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 % 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 der Untersuchungen zur Schwingklappe 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.

4.2.2 Strömungssituation im Nahfeld der Schwingklappe

In den vorangegangenen Ausführungen zum Abflussbeiwert in Kapitel 4.2.1 wurde auf die Tatsache hingewiesen, dass bei der Schwingklappe aus Gründen des Funktionsprinzips während des Aufrichtens des Klappenkörpers immer rückgestauter Abfluss einstellen muss. Die sich einstellende Strömungssituation im Nahfeld der Schwingklappe ist für zwei Neigungen in Abbildung 4.21 dargestellt.

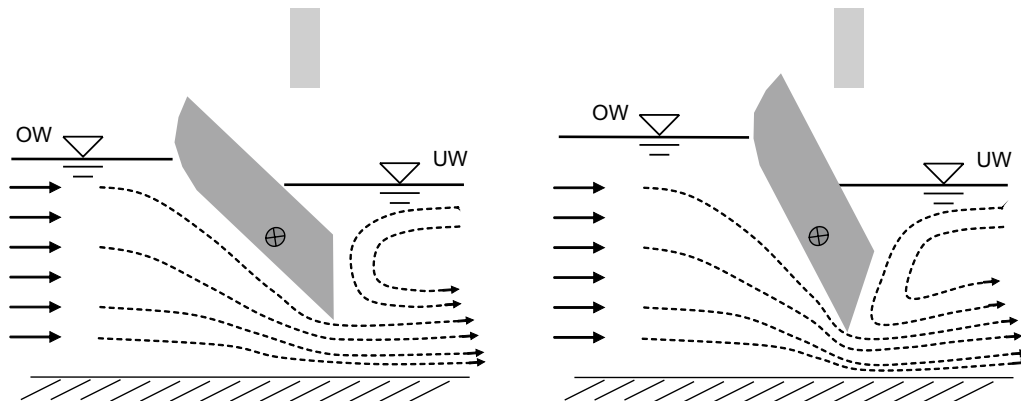


Abbildung 4.21: Strömungssituation im Nahfeld der Schwingklappe bei einer Klappenneigung von 43° (links) und 62° (rechts).

Ausgehend von der gleichmäßigen Anströmung im Zulaufkanal wird die Strömung zum Klappenendkante hin beschleunigt und ausgerichtet. An der Klappenendkante kommt es durch die gewählte Geometrie zu einer gezielten Ablösung der Strömung. Der Strahl mit den hohen Fließgeschwindigkeiten fächert im weiteren Fließverlauf nur geringfügig auf und setzt sich als kohärenter Strahl in den Unterwasserbereich fort. In der Überdeckungszone des Strahles bildet sich eine große, stationäre Rücklaufzone aus und in unmittelbarer Nähe zum Klappenkörper entstehen Totzonen.

4.2.3 Einfluss der Unterwasser-Randbedingung

Das Funktionsprinzip der Schwingklappe wurde bereits in Kapitel 2.2 diskutiert. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Kraft für das Aufrichten der Klappe über die Auftriebskraft des Hohlkörpers bereitgestellt wird. Damit die Auftriebskraft erzeugt wird, muss bei jedem Betriebszustand ein Teil des Klappenkörpers in das Wasser eintauchen. Nur dann kann sich das für die Funktion der Schwingklappe notwendige Momentengleichgewicht aus Gewichts-, Auftriebs- und Strömungskräften einstellen.

Die Versuchsreihen zur Schwingklappe haben aufgezeigt, dass für ein selbständiges Aufrichten der Schwingklappe gewisse Anforderungen an die unterwasserseitige Wasserstands-Abfluss-Beziehung gestellt werden. Die Untersuchungen hierzu wurden am Prototypen durchgeführt und werden im Folgenden auf Grund der anvisierten Anwendung der Schwingklappe bei einem Hochwasserrückhaltebecken exemplarisch für eine um den Faktor zwei skalierte Schwingklappe dargestellt. Der benötigte Verlauf der Wasserstands-Abfluss-Beziehung kann dabei wie folgt charakterisiert werden:

- Steiler Anstieg der Kurve zur Bereitstellung der Auftriebskräfte bis ca. $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$
- Übergangsbereich zwischen $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ 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 als Regulierorgan für kleinere Hochwasserrückhaltebecken vorgesehen. Für gewöhnlich wird die Regelabgabe Q_R eines Hochwasserrückhaltebeckens so dimensioniert, dass Unterstrom im Hochwasserfall bordvoller Abfluss herrscht. Als typische Gerinneform des unterstromigen Fließabschnittes kommen in der Praxis häufig mehr oder weniger stark ausgeprägte Trapezprofile mit einer Böschungsneigung von 1:2 bis 1:3 zum Einsatz.

Es erscheint offensichtlich, dass der benötigte Wasserstands-Abfluss-Verlauf nicht bei einem normalen Regelprofil wie z.B. Trapez- oder Rechteckgerinne vorliegt. In Abbildung 4.22 ist die Wasserstands-Abfluss-Beziehung für verschiedene Gewässergeometrien dem erforderlichen Verlauf gegenübergestellt.

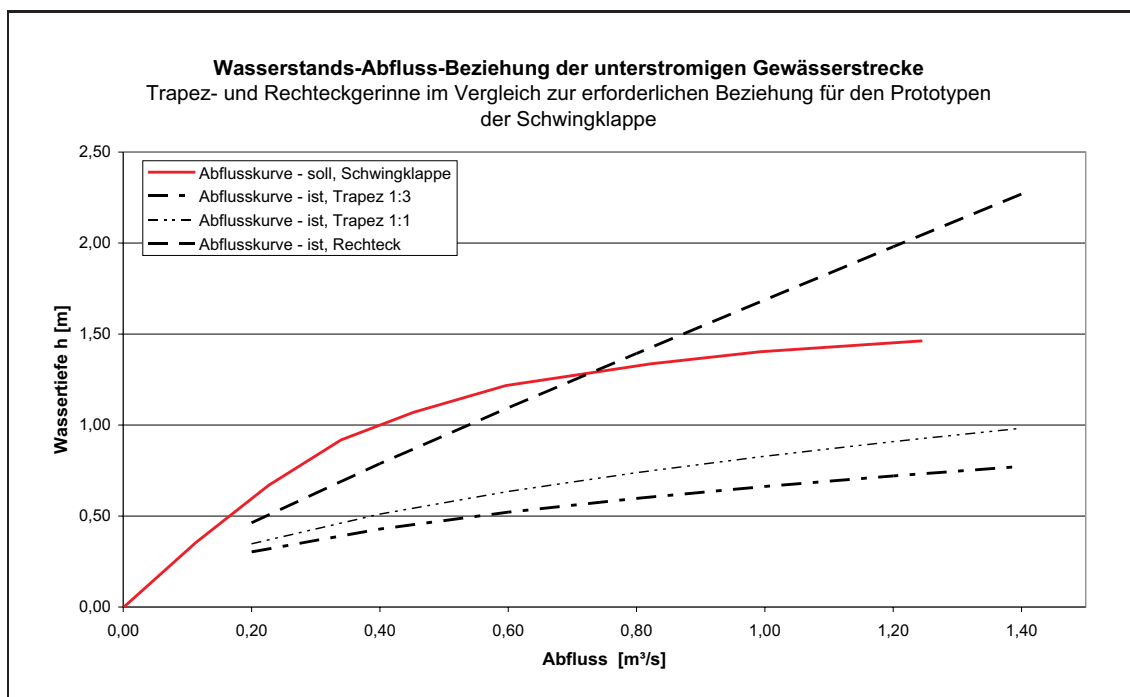


Abbildung 4.22: Vergleich unterschiedlicher Gewässergeometrien in Bezug auf die Wasserstands-Abfluss-Beziehung

Die unterwasserseitige Gewässerstrecke muss folglich über eine gewisse Fließstrecke mit einem Sonderprofil ausgestattet werden. Ein mögliches Sonderprofil und die dazugehörige Wasserstands-Abfluss-Beziehung ist in Abbildung 4.23 dargestellt.

Das entwickelte und dargestellte Sonderprofil 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. Das mittlere Sohlgefälle

beträgt 0,2 % und die Rauigkeit wurde mit einem Strickler-Beiwert von $k_{St} = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ berücksichtigt. In seiner Charakteristik entspricht das Sonderprofil mit seinem steilen Anstieg bei kleineren Abflüssen und dem flacheren Verlauf bei höheren Abflüssen den genannten Anforderungen.

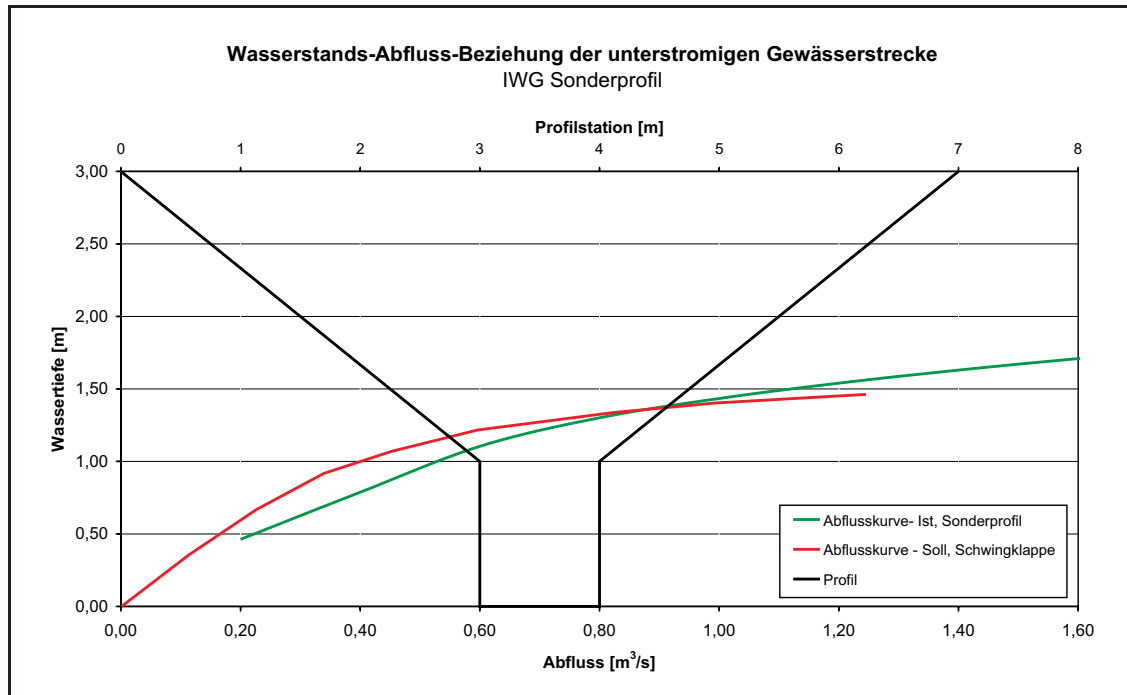


Abbildung 4.23: Mögliches Gewässerprofil zur Einhaltung der erforderlichen Wasserstands-Abfluss-Beziehung

Das beschriebene Sonderprofil stellt nur eine Möglichkeit dar, den aus Gründen der Funktionsfähigkeit der Schwingklappe geforderten Verlauf der Wasserstand-Abfluss-Beziehung zu realisieren. Je nach Randbedingungen wie z.B. Sohlneigung, Rauheitselemente usw. können vom planenden Ingenieur auch andere Profilformen entwickelt werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, mit anderen flußbaulichen Maßnahmen, wie etwa dem Einbau eines Steinriegels oder Buhnen, die geforderte Abflusscharakteristik herzustellen. Je nach Anwendung der Schwingklappe ist auch eine auf die Sohlage der unterstromigen Gewässerstrecke bezogene tiefere Einbaulage möglich.

Bei genauer Betrachtung und Analyse des Funktionsprinzips der Schwingklappe (vgl. Kapitel 2.2) wird ersichtlich, dass das Momentengleichgewicht aus Auftriebs-, Gewicht- und Strömungskraft auf Grund der kurzen Hebelarme sensibel auf Veränderungen einer der drei Kräfte reagiert. Die Gewichtskraft des Klappenkörpers verändert sich nicht und auch die Variation der Strömungskräfte ist als gering anzusehen. Änderungen im Wasserstand wirken sich auf Grund der exzentrischen Lagerung der Schwingklappe hingegen sehr stark auf die Auftriebskraft und damit auf das Momentengleichgewicht aus.

Im Rahmen der Versuchsreihen wurde daher der Einfluss von zwei verschiedenen Wasserstands-Abfluss-Beziehungen auf die Abflussregelung der Schwingklappe untersucht. Wie schon bei den vorherigen Ausführungen wurden die Daten im Versuchsstand des Prototypen ermittelt und auf eine um dem Faktor zwei skalierte Schwingklappe umgerechnet.

Bei den beiden untersuchten Wasserstands-Abfluss-Beziehungen variierte der Wasserstand um ca. 20 cm. Abbildung 4.24 zeigt die untersuchten Unterwasserrandbedingungen. Abbildung 4.25 zeigt die Entwicklung des Abflusses über die Neigung bei den verschiedenen Wasserstands-Abfluss-Beziehungen im Unterwasser.

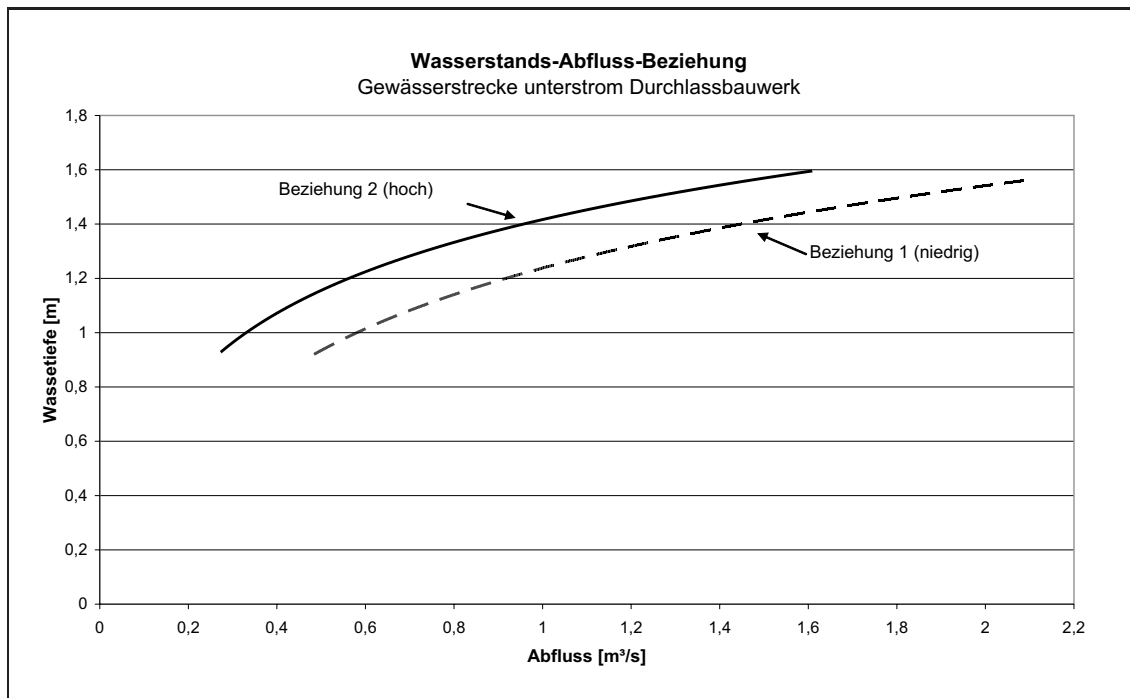


Abbildung 4.24: Untersuchte Wasserstands-Abfluss-Beziehungen der unterwasserseitigen Gewässerstrecke

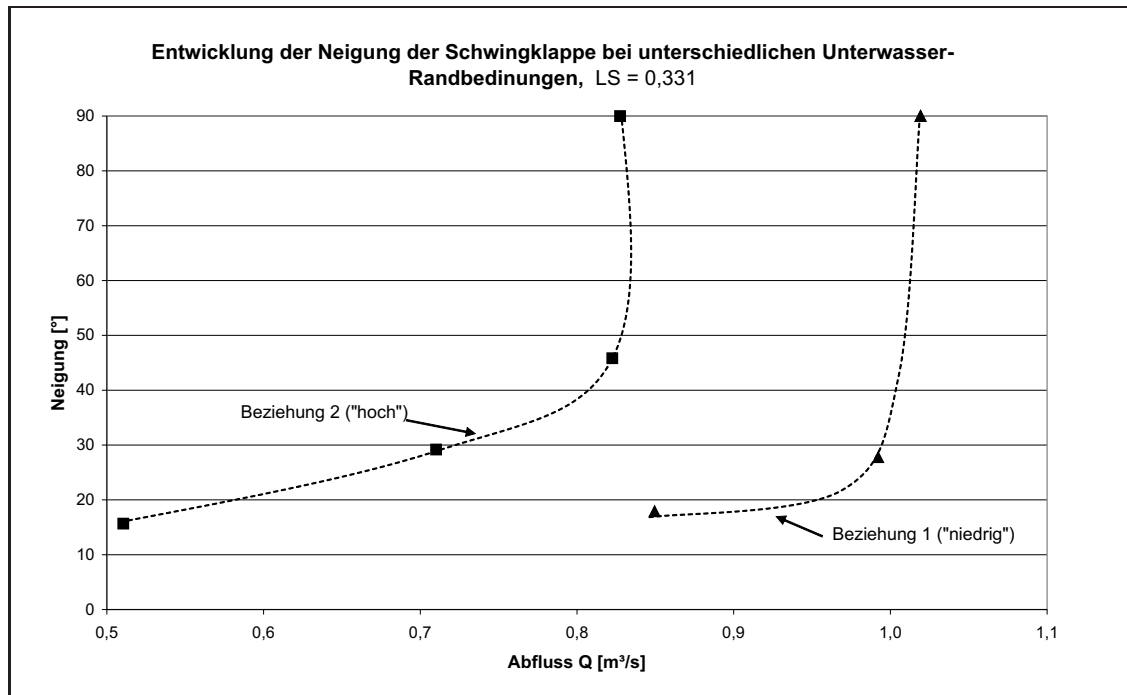


Abbildung 4.25: Entwicklung der Neigung der Schwingklappe bei unterschiedlichen Unterwasser-Randbedingungen

Man erkennt das stark variierende Verhalten der Schwingklappe in Abhängigkeit vom Unterwasserstand. Bei einer Klappenneigung von 45° 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 hingegen beim Verlauf der beiden Kurven festgestellt werden. Die Änderung der Neigung bei Erhöhung des Abflusses verläuft nahezu identisch.

Die Versuche zum Einfluss des Unterwassers auf das Abflussverhalten zeigen auf, welche Schwierigkeiten sich bei der Bemessung der Schwingklappe ergeben können. Für Abflüsse in der Größenordnung der Regelabgabe Q_R muss der Wasserstand der unterwasserseitigen Gewässerstrecke exakt bekannt sein. Eine Abweichung im Wasserstand von nur 20 cm wirkt sich signifikant auf die Neigung und damit auf die Abflussregelung der Schwingklappe aus, so dass es zu einer Abweichung des Abflusses unter der Klappe von 40 % kommt. 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 Abflüssen in der Größenordnung der Regelabgabe Q_R mit Ungenauigkeiten behaftet.

Lehmann (2005) hat in seiner Arbeit langjährige Naturmessdaten eines renaturierten Abschnittes der Enz bei Pforzheim hinsichtlich des Widerstandsverhaltens und dessen zeitlicher Variation analysiert. Die Ergebnisse zeigen auf, dass sich gerade bei kleineren Fließgewässern wegen der schmalen Gerinnegeometrie der Vegetationswiderstand an den Ufern signifikant auf das Strömungsverhalten und damit auf die Wasserstands-Abfluss-Beziehung auswirkt. Darüber hinaus kommt es zu einer signifikanten jahreszeitlichen Veränderung

des Vegetationswiderstandes auf Grund der unterschiedlichen Wachstumsphasen. Zudem zeigen die Auswertungen auch auf, dass es in einer größeren zeitlichen Skala auf Grund der morphologischen Aktivität und der Sukzession zu bedeutenden Veränderungen des Widerstandsverhaltens in naturnahen Fließgewässern kommt.

Darüber hinaus darf ein zweiter Aspekt nicht vernachlässigt werden: Wie kann man sicherstellen, dass sich der Einfluss von Sohlumlagerungen und Erosion von Uferbereichen einschließlich der Vegetation im Hochwasserfall nicht auf den Wasserstand auswirkt? Welche Sicherungsmaßnahmen müssen getroffen werden, um die Wasserstands-Abfluss-Beziehung der unterwasserseitigen Gewässerstrecke auch im Hochwasserfall zu fixieren?

Das in diesem Kapitel vorgestellte Sonderprofil kann die oben angesprochene Problematik bezüglich der Variation des Widerstandverhaltens und damit einhergehend der Inkonsistenz der Wasserstands-Abfluss-Beziehung umgangen werden. Hydraulisch betrachtet stellt diese Einengung des Gewässers unterstrom des Durchlassbauwerkes mit dem Sonderprofil einen Kontrollquerschnitt dar. Der Einbau des Kontrollquerschnittes und der damit verbundene lokale Aufstau des Gewässers steht dabei jedoch im Widerspruch zu der Forderung bezüglich der ökologischen Durchgängigkeit, wonach die Fließcharakteristik (Fließgeschwindigkeiten, Wassertiefe, Sohlneigung, usw.) im Durchlassbereich nicht von den freien Fließstrecken im Gewässer abweichen sollte [73]. Durch den Aufstau kann es lokal zu einer Absenkung der Fließgeschwindigkeit und daraus resultierend zu einer Sedimentation von Schweb- und Feststoffen kommen. Dies kann zu einer Verschlammung der Sohle führen. Die betrieblichen Folgen und der Einfluss des benötigten Aufstaus auf die Stauraumbewirtschaftung werden in Kapitel 4.5 diskutiert.

4.2.4 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 die auftretenden Momente. In Kapitel 4.1.3 wurde bereits das Variantenstudium zur Anordnungen des Lagerpunktes vorgestellt.

Damit eine einwandfreie Funktion der Schwingklappe gegeben ist, darf die Achslage nur in einen gewissen Bereich des Klappenkörpers angeordnet sein. Wird die Achse zu nahe an den Schwerpunkt gelegt, richtet sich die Klappe nur unvollständig auf und wird dann überspült. Abbildung 4.26 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.

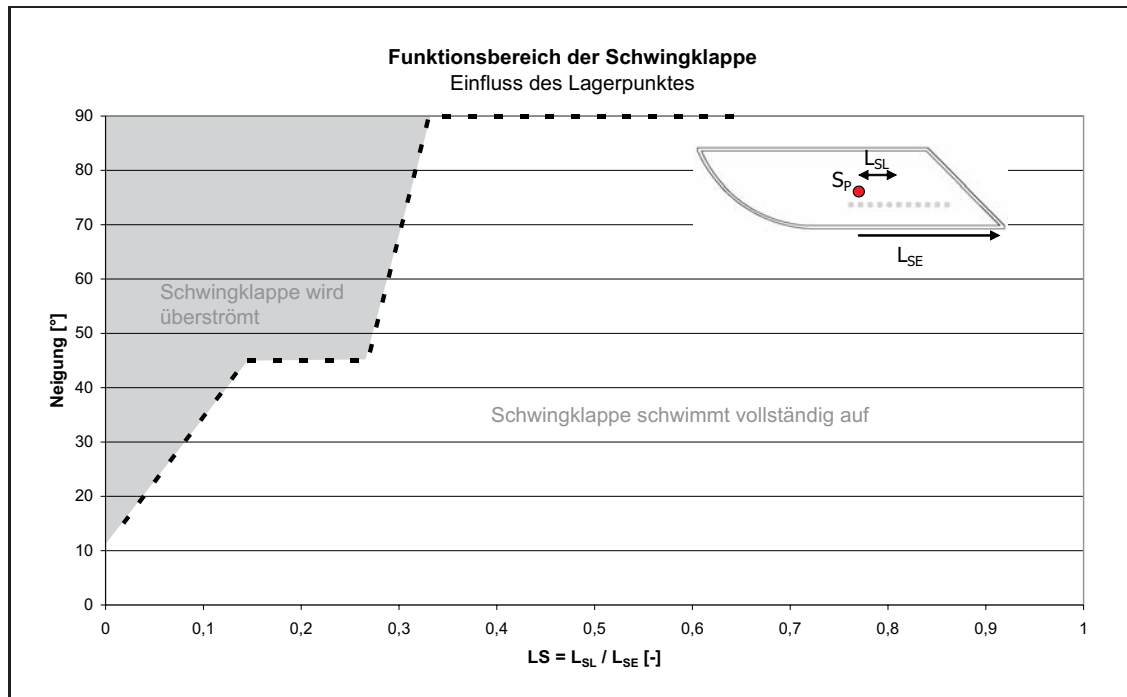


Abbildung 4.26: Funktionsbereich der Schwingklappe

4.2.5 Regulierwirkung

In den Ausführungen in Kapitel 4.2.3 wurde bereits darauf eingegangen, dass für die Funktionsweise der Schwingklappe eine unterstromige *Kontrolleinrichtung* benötigt wird, da zur Erzeugung der Auftriebskraft eine spezielle Wasserstands-Abfluss-Beziehung in der unterstromigen Gewässerstrecke vorhanden sein muss. Charakteristisch für die benötigte Wasserstands-Abfluss-Beziehung ist ein steiler Verlauf bei kleinen Abflüssen. Dies kann z.B. mit einem speziellen Gewässerquerschnitt realisiert werden (vgl. Abbildung 4.23).

In Niedrigwasserphasen übernimmt das Gewässerprofil über die Stützkraft die Abflusskontrolle. Steigt der Abfluss im Gewässer und damit auch der Wasserstand weiter an kommt es zu einem Aufschwimmen der Schwingklappe. Der Wasserstand im Gewässer wird immer noch durch die Geometrie und das Rauheitsverhalten bestimmt. Die Schwingklappe greift jedoch in das Abflussgeschehen ein und drosselt den Abfluss. Auch bei höheren Oberwasserständen übernimmt die Schwingklappe nicht die vollständige Abflusskontrolle, da, wie in Kapitel 4.2.1 dargestellt, der Abfluss unter der Schwingklappe stets rückgestaut ist.

Die Entwicklung der Wasserstände im Ober- und Unterwasser der Schwingklappe ist exemplarisch in Abbildung 4.27 für eine um den Faktor zwei skalierte Schwingklappe mit einer Spaltweite bei einer Klappenneigung von 90° $s_{90} = 50$ cm aufgetragen. Man erkennt deutlich das Eingreifen der Schwingklappe in das Abflussgeschehen und die Drosselwirkung während des Anlaufens des Hochwassers.

Wie lässt sich der Beginn der Drosselwirkung beschreiben? In Abbildung 4.28 sind charakteristische Parameter zum Zeitpunkt der Beeinflussung des Abflussgeschehens durch die Schwingklappe aufgetragen. Definiert wird die Drosselwirkung durch einen Wasserstandsunterschied Ober- und Unterstrom der Schwingklappe von 1,0 cm. Aufgetragen sind

verschiedene Konstellationen von Lagerpunkten und Spaltweiten s_{90} . Deutlich zu erkennen ist, dass die Neigung zum Zeitpunkt des Drosselbeginns mit zunehmender Spaltweite s_{90} geringer wird, jedoch in einem Band zwischen 10° und 30° liegt.

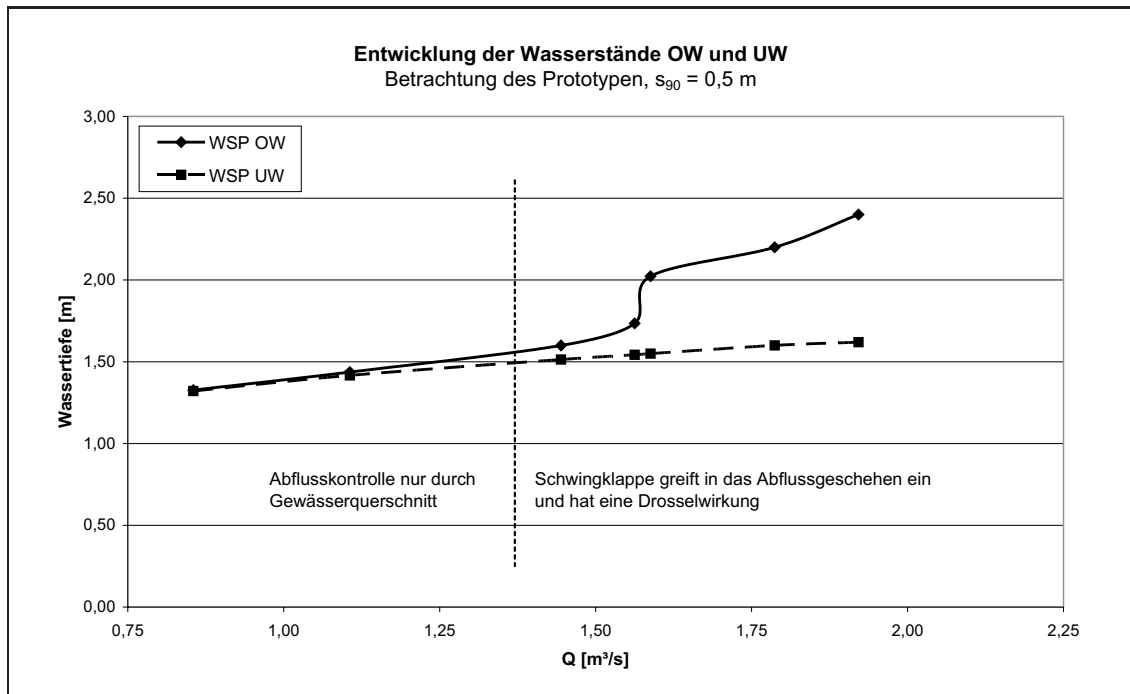


Abbildung 4.27: Entwicklung der Wasserstände im OW und UW während des Aufschwimmens der Schwingklappe.

Betrachtet man statt der Klappenneigung die mittlere Fließgeschwindigkeit im Durchlassquerschnitt, so zeigt sich ein anderes Bild. Wie in Abbildung 4.29 zu erkennen, ist bei allen untersuchten Spaltweiten bei vollständiger Aufrichtung (s_{90}) die Fließgeschwindigkeit zum Zeitpunkt der beginnenden Drosselwirkung nahezu konstant und liegt im Bereich zwischen $0,6 \text{ m/s}$ und $0,7 \text{ m/s}$.

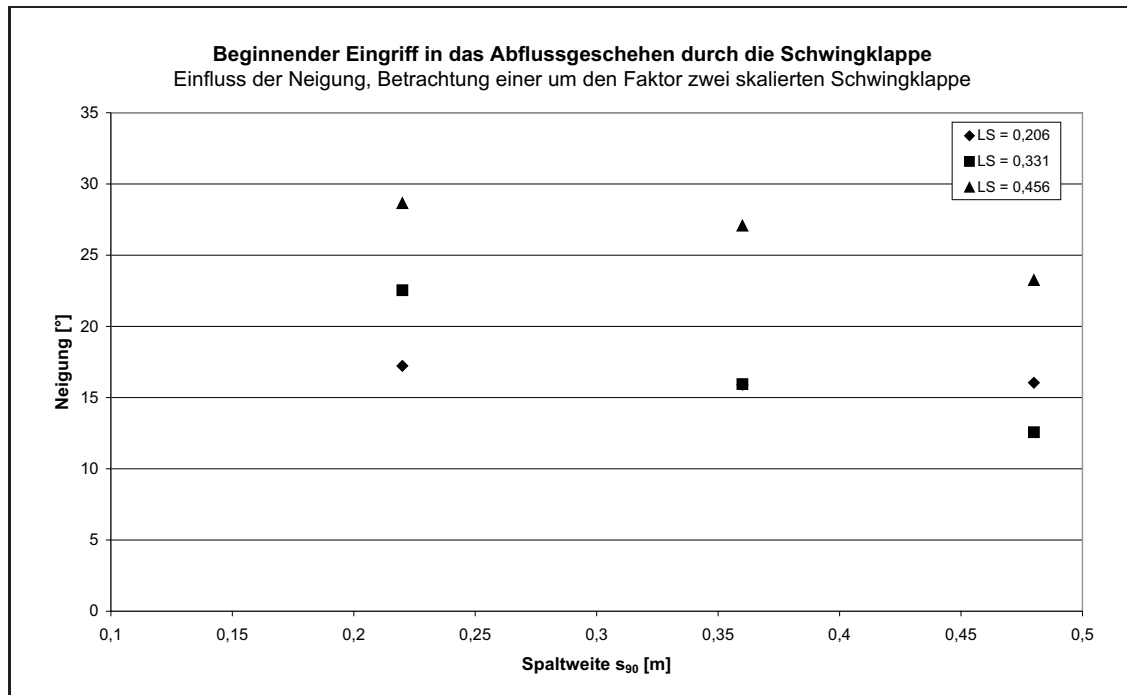


Abbildung 4.28: Beginnender Eingriff in das Abflussgeschehen durch die Schwingklappe, Einfluss der Neigung.

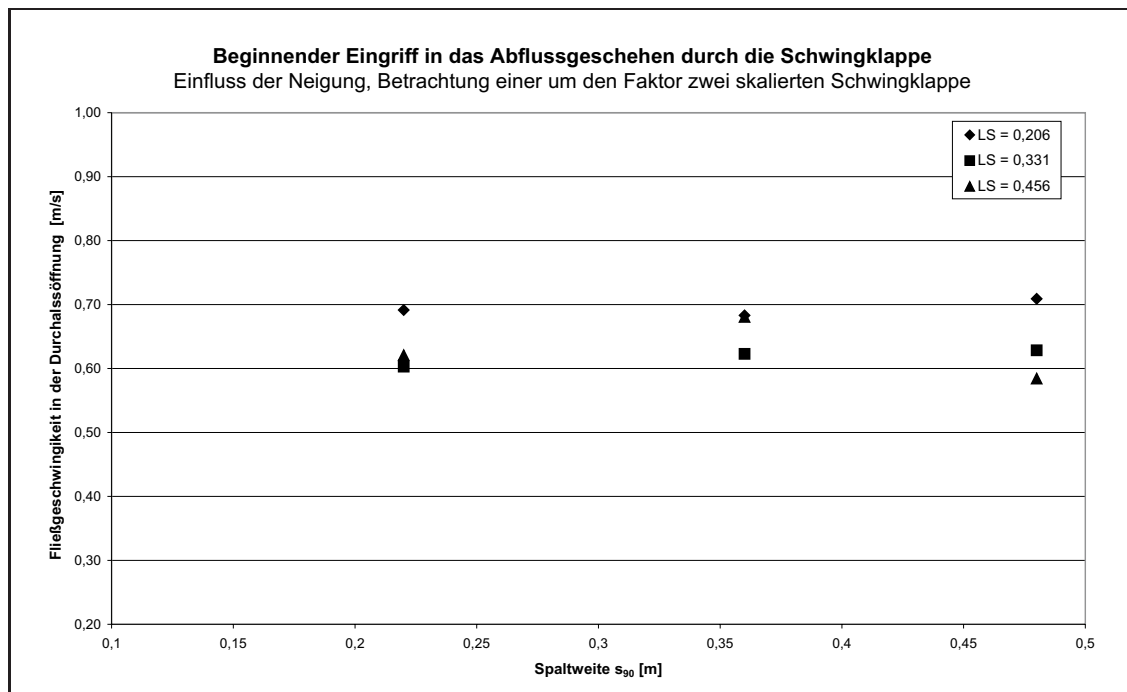


Abbildung 4.29: Beginnender Eingriff in das Abflussgeschehen durch die Schwingklappe, Einfluss der mittleren Fließgeschwindigkeit im Durchlassquerschnitt.

Die Darstellung der beginnenden Regulierwirkung der Schwingklappe über die Fließgeschwindigkeiten im Durchlassbereich zeigt den funktionalen Zusammenhang auf. Der Aufstau im Oberwasser wird nicht maßgeblich durch die Neigung der Klappe beeinflusst, sondern vielmehr über die durch den Klappenkörper erzwungenen Fließverluste, und diese sind abhängig von der Fließgeschwindigkeit. Durch die Einengung der Querschnittsfläche kommt es durch innere Schubspannungen zu Energieverlusten infolge von Strömungsumlenkungen, einer Beschleunigung und Verzögerung der Fließbewegung und der Bildung von Ablösezonnen. Die Energieverluste zeigen sich durch ein erhöhtes energetisches Potential in Form des größeren Oberwasserstandes.

Die Tatsache, dass die Neigung des Klappenkörpers bei diesem Prozess nur eine untergeordnete Rolle spielt zeigt auf, dass die Energiedissipation in dem durch die Schwingklappe erzeugten Abflussgeschehen in den betrachteten Neigungsbereichen von 10° bis 30° in einer gleichen Größenordnung liegt.

Durch den Anstieg des Oberwasserstandes richtet sich der Klappenkörper weiter auf, was zu einer zunehmenden Beschleunigung der Fließgeschwindigkeiten im Durchlassbereich und damit zu erhöhten Energieverlusten führt. Die beschriebenen Energieverluste im Nahfeld der Schwingklappe können auch als örtliche Verluste angesehen werden. Örtliche Verluste werden bei der Energiebilanzierung mit dem Verlustbeiwert ζ über

$$h_v = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4.15)$$

ermittelt. Die Strömungsgeschehen im Nahfeld der Schwingklappe ist voll-turbulent ausgeprägt ($4 \cdot 10^4 < Re < 1 \cdot 10^5$), so dass der Verlustbeiwert ζ unabhängig von der Reynoldszahl Re ist. Abbildung 4.30 zeigt die aus den Untersuchungen rückgerechnete Entwicklung des Verlustbeiwertes ζ in Abhängigkeit der Klappenneigung.

Für gegebene geometrische Randbedingungen (z.B. Querschnittsaufweitung, Pfeilerstau) ist der Verlustbeiwert unabhängig von der Fließgeschwindigkeit. In der Literatur (z.B. [95]) stehen für die Bemessung von wasserbaulichen Anlagen Tabellenwerke für verschiedenste Strömungssituationen zur Verfügung.

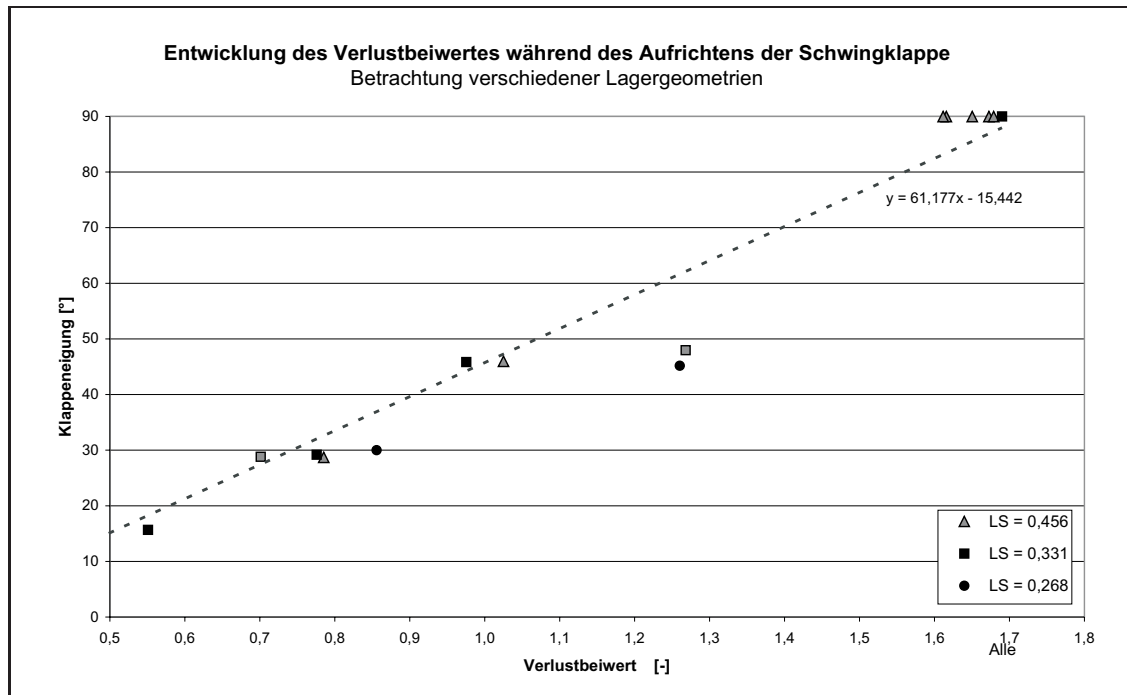


Abbildung 4.30: Entwicklung des Verlustbeiwertes ζ während des Aufrichtens der Schwingklappe.

Die Auswertung des Verlustbeiwertes ζ während des Aufrichtens der Schwingklappe in Abbildung 4.30 zeigt auf, dass der Verlustbeiwert während des Aufrichtens nicht konstant ist, sondern durch die Klappenneigung dominiert wird. Dieses Verhalten ist plausibel, da sich gewissermaßen zu jeder Klappenneigung ein neues geometrisches System mit einem eigenen Verlustbeiwert einstellt. Die Auswertung zeigt auch, dass das der neigungsabhängige Verlustbeiwert bei den exemplarisch dargestellten Klappenneigungen unabhängig vom Lagerpunkt ist und über eine lineare Ausgleichsgerade gut abgebildet werden kann. Wie schon bei den Ausführungen zum Abflussbeiwert in Kapitel 4.2.1 zeigt sich auch bei der Betrachtung der lokalen Verluste, dass in Folge der veränderten Klappenneigung die für unbewegliche Systeme konstanten Beiwerte C_q und ζ während des Aufrichtens der Schwingklappe variieren. Das hieraus resultierende Abflussverhalten der Schwingklappe während des Aufrichtens ist in Abbildung 4.2.6 und in den Ausführungen zur Pilotanlage in Kapitel 7.3 dargestellt.

4.2.6 Vergleich der Ergebnisse mit den bisherigen Studien zur Schwingklappe

Im vorangegangenen Kapitel 4.2.3 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 ([67], [48]) nicht ausreichend berücksichtigt worden. Abbildung 4.31 zeigt das den Berechnungen in der Studie der LFU (1998) zugrunde gelegte System.

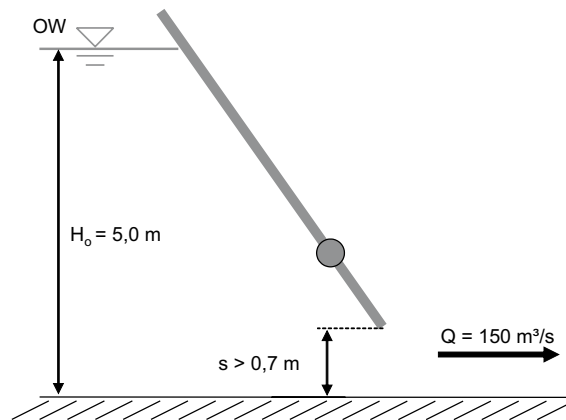


Abbildung 4.31: Schemaskizze, Schwingklappe als selbsttätige Stauvorrichtung [67]

Der in der Studie der LFU (1998) dargestellte errechnete Abfluss unter der Schwingklappe während des Einstauvorganges ist in Abbildung 4.32 dargestellt. Der mit 1 markierte Bereich stellt den Bereich dar, bei dem die Schwingklappe noch nicht in das Abflussgeschehen eingreift, Bereich 2 markiert den Regelbereich der Schwingklappe. Auffallend ist die sehr konstante Regelabgabe in Bereich 2.

In der Studie sind im Anhang die Datengrundlage und die Berechnungsschritte aufgetragen. Hieraus geht hervor, dass die Abhängigkeit des Abflussbeiwertes von der Neigung nicht ausreichend berücksichtigt worden ist. Der Abflussbeiwert C_q wurde in einer Bandbreite von 0,55 bis 0,59 angesetzt. Die Abhängigkeit des Abflussbeiwertes von der Neigung der Stauhaut wurde in Abbildung 4.14 vorgestellt. Für das den Berechnungen zugrundeliegende System (vgl. Abbildung 4.31) mit einer $y_0/s = 7,14$ müssten gemäß den Ausführungen von Naudascher (1987) aber Abflussbeiwerte in einem Bereich von 0,58 bis 0,88 angesetzt werden. Auch der für die Funktion der Schwingklappe notwendige Rückstau einfluss wurde nicht ausreichend berücksichtigt. Die Ergebnisse aus Kapitel 4.2.1 zeigen auf, dass während des Aufrichtens der Schwingklappe der Abflussbeiwert in einen Bereich von 0,05 und 0,40 liegt.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche zur Schwingklappe zeigten bezüglich des Abflussverhaltens ein anderes Bild. Bei allen untersuchten Szenarien und Lagerpunkten war der Abfluss rückgestaut (vgl. Kapitel 4.2.1). Die Ergebnisse aus Kapitel 4.2.1 zeigen auf, dass während des Aufrichtens der Schwingklappe der Abflussbeiwert in einen Bereich von 0,05 und 0,40 liegt. Ein hoher Unterwasserstand ist hingegen eine zwingende Voraussetzung für das Aufschwimmen der Schwingklappe. 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° bis 30° 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.

Aufbauend auf diesen Überlegungen wurde im Rahmen der Untersuchungen des hydraulischen Verhaltens der Schwingklappe ein direkter Vergleich der im Versuch ermittelten Daten mit den rechnerischen Ergebnissen aus der Studie durchgeführt. Abbildung 4.32 zeigt die Ergebnisse der Versuche im Vergleich zu den Ergebnissen der Studie. Aufgetragen

sind dabei zwei verschiedene Szenarien, die sich in der Position des Lagerpunktes unterscheiden.

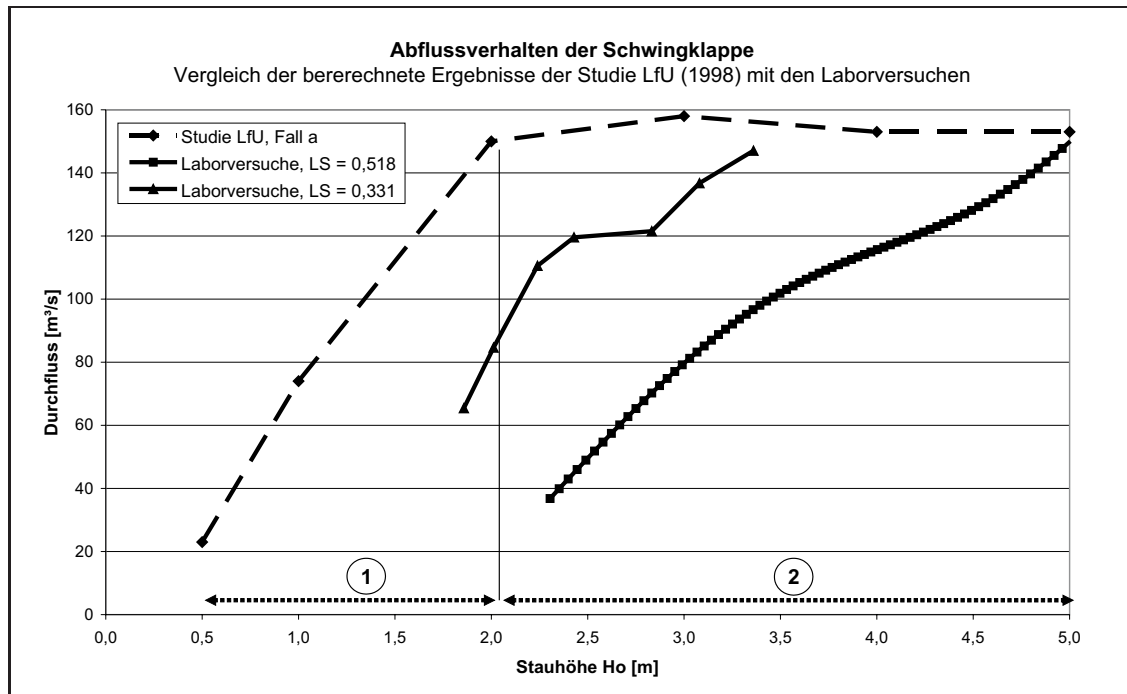


Abbildung 4.32: Vergleich des in den Versuchen ermittelten Abflussverhaltens mit den rechnerischen Ergebnissen [67]

Aus Abbildung 4.32 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° . 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 geringer aus, als die berechneten Werte aus der Studie. Die Steigung dagegen ist bei kleinen Stauhöhen nahezu identisch, was gut zu den Ausführungen in Kapitel 4.2.3 und den dort 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.

4.2.7 Untersuchungen mit veränderter Lage des Schwerpunktes

Neben den in Kapitel 4.1.3 aufgetragenen Lagerpunkten wurde eine zusätzliche Versuchsreihe mit einer veränderter Lage des Schwerpunktes und einer veränderter Masse des

Klappenkörpers durchgeführt. Durch das Anbringen von Gewichten im Bereich der rück-springenden Klappenendkante wurde die durch die Konstruktionsweise bedingte Schwer-punktlage in Richtung Klappenendkante verschoben. In Tabelle 4.3 sind die Kennwerte der Versuchsreihe aufgetragen.

Tabelle 4.3: Kennwerte der Untersuchungsserie mit veränderter Schwerpunktlage

Lagerpunkt Nr.	Gewicht Klappe	L_{SL}	L_{SE}	LS^*
6	43 kg	15,875	48	0,331
6	54 kg	5,00	38,0	0,132
6	65 kg	- 1,0	32,0	- 0,031

Durch die Veränderung der Kennwerte der Schwingklappe wird prinzipiell auch das hy-draulische Verhalten beeinflusst. In Abbildung 4.33 ist exemplarisch die Entwicklung des Oberwasserstandes in Abhängigkeit der Klappenneigung für verschiedene Klappengewichte abgebildet.

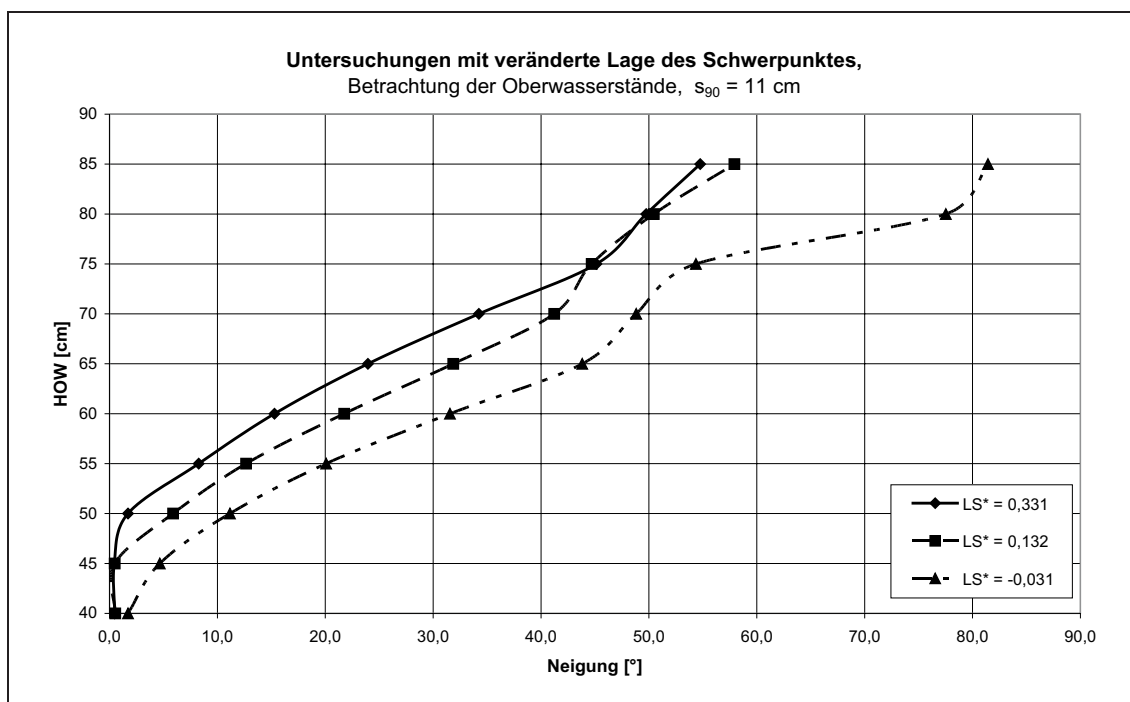


Abbildung 4.33: Funktionsbereich der Schwingklappe

Die Auswertung der Oberwasserstände zeigt eine gute Übereinstimmung hinsichtlich des Verlaufes bei kleinen Klappenneigungen. Ab einer Klappenneigung von ca. 45° zeigen sich gewisse Unstetigkeiten. Diese sind auf Messungenauigkeiten zurückzuführen, da für eine exakte Zuordnung der Klappenneigung zu einem Oberwasserstand stationäre Abfluss-verhältnisse zwingend erforderlich sind. Im Rahmen der Versuchsreihen zeigte sich, dass dies nur mit Einschränkungen möglich war, da der Neigungsbereich zwischen 45° und 75° im

Versuch sehr schnell durchlaufen wird und zudem die Neigung merklich vom Wellenbild in der Versuchsrinne beeinflusst ist.

Aus Abbildung 4.33 geht auch der funktionale Zusammenhang bei einer Veränderung der Lage des Schwerpunktes hervor. Durch das Anbringen der Gewichte wandert der Schwerpunkt näher an die Klappenendkante. Da der Lagerpunkt unverändert bleibt, stellt sich ein neues Momentengleichgewicht zwischen den Kräften aus Auftrieb, Gewicht und Strömung ein. Um nun die Schwingklappe in die gleiche Neigung zu versetzen, wird durch die veränderte Schwerpunktslage eine geringere Auftriebskraft benötigt. Dies zeigt sich an den niedrigeren Oberwasserständen.

Die Versuche mit unterschiedlichen Schwerpunktslagen wurden auch mit anderen Lagergeometrien durchgeführt. Zusammenfassend zeigte sich immer, dass durch die veränderte Gewichtsverteilung das Abflussgeschehen beeinflusst werden kann, dass jedoch die Funktionsweise der Schwingklappe nicht von diesen Veränderungen beeinträchtigt wird.

Die hier vorgestellten Arbeiten zur Schwingklappe haben zum Ziel, einen einfachen, übertragbaren und praxisgerechten Bemessungsansatz für die Schwingklappe zu erarbeiten. Ziel ist es daher auch, die durch den planenden Ingenieur festzulegenden Randbedingungen auf das notwendige Maß zu reduzieren. Vor diesem Hintergrund wurde die Versuchsreihe zu einer ungleichmäßigen Gewichtsverteilung innerhalb des Klappenkörpers nicht weiter verfolgt. Alle in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auch auf eine gleichmäßige Gewichtsverteilung innerhalb der Schwingklappe.

4.3 Untersuchungen zum kinematischen Verhalten der Schwingklappe

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 im 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.

4.3.1 Grundlagen

Wird ein elastischer oder elastisch gelagerter Körper von einem Fluid umströmt, so führen die Druckschwankungen in der Strömung oder entlang der Strömungsberandung zu anfachende Kräfte zwischen dem Fluid und dem Körper. Man spricht dann von *strömungsinduzierte Schwingungen*.

Nach Billeter (1998) 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 eine 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 auf Grund von 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 Anströmung ist voll turbulent ($40.000 < Re_{Lab} < 100.000$) und bei einer Drehung um die Achse ändern sich die Druck- und Geschwindigkeitsverhältnisse entlang der Stauhaut. Bedingt durch das Funktionsprinzip der Schwingklappe mit dem vorherrschenden Momentengleichgewicht aus Strömungs-, Gewicht- und Auftriebskräften können zusätzlich auch Oberflächenwellen aus dem Oberwasser eine Schwingung mit Energie versorgen.

Liegt die Frequenz einer periodischen Druckschwankungen 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 Frequenz einer periodischen Druckschwankung jedoch in der gleichen Größenordnung wie die 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 [10].

Besteht zwischen der energieeintragenden Anfachung und der Körperbewegung keine Kopplung, so spricht man von einer fremderregten Schwingung. Systeme, bei denen die Anfachung vom Schwingungsverhalten beeinflusst sind, werden als *selbsterregt* bezeichnet.

Naudascher (1980) hat ein Klassifikationssystem für strömungsinduzierte Schwingungen vorgestellt, das die Frage der Rückkoppelung berücksichtigt. Die Art der Schwingungsanfachung kann demnach in die drei Hauptkategorien

- Fremdanregt (*Extraneously Induced Excitation*, EIE)
- Instabilitäts- bzw. wirbelbedingte Anregung (*Instability Induced Excitation*, IIE)
- Bewegungsinduzierte Anregung (*Movement Induced Excitation*, MIE)

eingeteilt werden. Billeter (1998) hat zu dieser Thematik die in Abbildung 4.34 dargestellte Prinzipskizze erstellt.

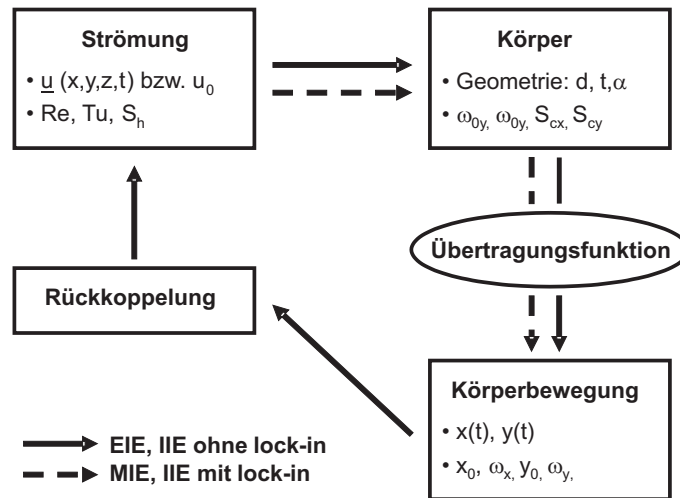


Abbildung 4.34: Prinzipskizze der strömungsinduzierten Schwingungen mit den wichtigsten Parametern und Variablen, nach [10]

Überträgt man diese grundlegenden Überlegungen auf das System der Schwingklappe, so kann festgestellt werden, dass bei der Schwingklappe unterschiedliche Mechanismen der Schwingungsanfänger vorliegen. Im Oberwasser kommt es durch die Strömungsturbulenz und die Schwerewellen zu einer erzwungenen Anregung, Typ EIE (vgl. Abbildung 4.35, Bereich a). An der Stauhaut kommt es ebenfalls zu einer erzwungenen Anregung in Folge der Turbulenz der Anströmung oder der Strömungsinstabilitäten, Typ EIE, IIE (vgl. Abbildung 4.35, Bereich b). An der Endkante der Schwingklappe kann es zu einer Anfänger von zum Teil sehr regelmäßigen Schwingungen in Folge von Wirbelbildungen und Ablösungen kommen, Typ EIE. Die Bewegung der Klappenendkante hat wiederum einen Einfluss auf das nahe Strömungs- und Druckfeld und kann eine alternierende Fluidkraft hervorrufen. Dieser Mechanismus ist selbsterregt, Typ MIE (vgl. Abbildung 4.35, Bereich c)). Die turbulente Abströmung im Bereich der unterwasserseitigen Stauhaut bzw. Tragstruktur kann ebenfalls zu einer periodischen Anregung beitragen, Typ EIE (vgl. Abbildung 4.35 d).

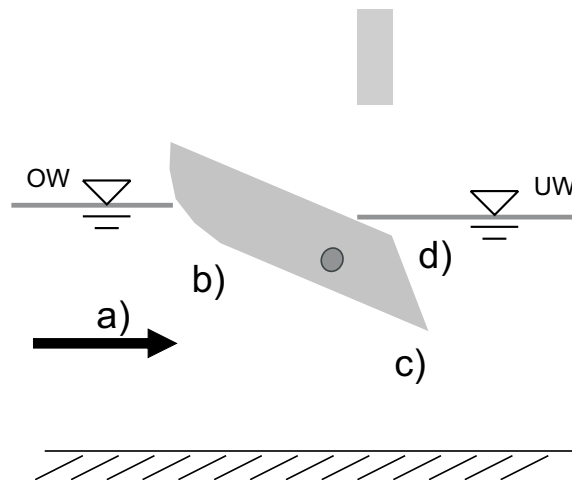


Abbildung 4.35: Zonen potentieller Schwingungsanfängermechanismen bei der Schwingklappe

Bei der Konzeption des Versuchsstandes und der messtechnischen Ausstattung wurde darauf geachtet, die Bereiche potentieller Anregung separiert analysieren zu können. Aus den Druckmessungen entlang der Stauhaut lassen sich beispielsweise die hier auftretenden Druckschwankungen herausgelöst betrachten. Die Ausführungen hierzu sind in Kapitel 4.3.4 dargestellt. Dies gilt auch für Analyse der anregenden Mechanismen an der unterwasserseitigen Stauhaut. Eine weitere Differenzierung nach den in Abbildung 4.35 dargestellten Bereichen konnte, bedingt durch die eingesetzte Messtechnik, nicht erfolgen.

4.3.2 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 bedingt durch das Funktionsprinzip eingetaucht sein muss. Als Eigenfrequenz wird diejenige Frequenz bezeichnet, mit der ein System nach einmaliger Anregung schwingt. Die Eigenfrequenz kann über sogenannte Ausschwingversuche ermittelt werden.

Die Eigenfrequenz f_0 der Schwingklappe wurde bei den Ausschwingversuchen derart bestimmt, dass die eingetauchte Klappe aus der Ruhelage ausgelenkt und dann schlagartig sich selbst überlassen wurde. Die sich daran anschließende Pendelbewegung um die Achse wurde mittels des Beschleunigungsaufnehmers aufgezeichnet und über eine Fouriertransformation (FFT) in der Programmumgebung *MATLAB* von *Mathworks* die spektrale Leistungsdichte, auch Power Spektrum genannt, ermittelt.

Bei der Darstellung der spektralen Leistungsdichte werden auf der x-Achse die Frequenzen und auf der y-Achse die Stärke des Signals (Power) in der Dimension *Leistung · Zeit* = Energie aufgetragen. Die Stärke des Signals kann dabei als ein Maß für die Amplituden der Schwingung angesehen werden. Bei einer Verdoppelung der Amplitude ergibt sich eine vierfach erhöhte Leistung, und damit einhergehend auch eine vierfach höher Energie. Als Eigenfrequenz wird nun diejenige Frequenz bezeichnet, bei der die größte Energie auftritt. Die Versuche zur Eigenfrequenz wurden ausgehend von verschiedenen Neigungen und bei den unterschiedlichen Lagerungspunkten durchgeführt und entsprechend ausgewertet. In Abbildung 4.36 ist die Entwicklung der Eigenfrequenz über die Neigung für die verschiedenen Lagerungsgeometrien (*LS*) aufgetragen.

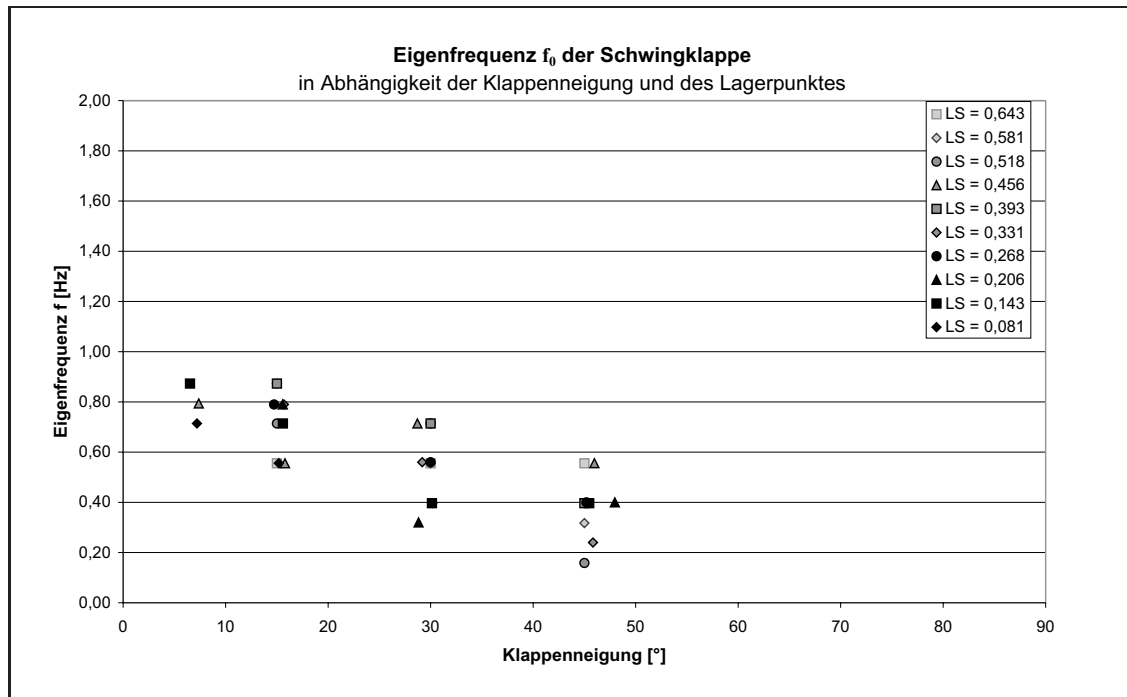


Abbildung 4.36: Ermittelte Eigenfrequenz in Abhängigkeit der Klappenneigung

Die Auswertung in Abbildung 4.36 zeigt, dass die Eigenfrequenz der eingetauchten Schwingklappe mit zunehmender Neigung abnimmt. Überträgt man diesen Sachverhalt auf die Schwingung eines 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 Lagerpunkten entsprechend.

Durch die Veränderung der Lagergeometrie LS kommt es auf Grund der veränderten Hebelverhältnisse zu einer Veränderung des schwingenden Systems. Dennoch zeigt die Auswertung, dass die Eigenfrequenzen bei Betrachtung einer Lagergeometrien in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Als Ursache hierfür wird das die Schwingklappe umgebende Wasser angesehen. Bedingt durch das Funktionsprinzip ist die Schwingklappe im Ober- und Unterwasser bei jedem Betriebszustand von einem Wasserkörper umgeben, so dass das schwingende System nicht nur aus der Schwingklappe sondern auch aus dem umhüllenden Wasserkörper besteht. Der Wasserkörper muss daher als so genannte *added mass* bei den Untersuchungen zum Schwingungsverhalten berücksichtigt werden.

Die Auswertung zeigt aber auch, dass die Reihenfolge der Eigenfrequenz bezüglich der Lagerung (LS) bei den untersuchten Neigungen nicht gleichbleibend ist und auch nicht entsprechend des Abstandes vom Lagerpunkt zum Schwerpunkt verteilt ist. Ein Grund hierfür ist sicherlich in der Versuchsdurchführung begründet. Auf Grund des stark gedämpften Verhaltens der Schwingung wurden bei den Ausschwingversuchen nur zwei bis drei Amplituden aufgezeichnet (vgl. Abbildung 4.40), so dass bei der Bestimmung der Eigenfrequenzen gewisse Ungenauigkeiten zu erwarten sind.

Nur über die messtechnisch bedingten Ungenauigkeiten lässt sich das dokumentierte Verhalten der Eigenfrequenz nicht erklären. Vielmehr kann davon ausgegangen werden, dass

der umgebende Wasserkörper sich signifikant auch auf die Eigenfrequenz auswirkt und den Effekt der veränderten Hebelverhältnisse bei den unterschiedlichen Lagerungsgeometrien überlagert.

Aus messtechnischen Gründen ist eine Bestimmung der Eigenfrequenz des Klappenkörpers über Ausschwingversuche in Trockenlage nicht möglich. Es ist jedoch davon auszugehen, dass auf Grund der veränderten Hebelverhältnisse erhebliche Unterschiede der Eigenfrequenz in Abhängigkeit von der Lagerung vorhanden sein würden. Ebenso ist zu erwarten, dass mit größer werdendem Abstand des Lagerpunktes vom Schwerpunkt (großes LS) die Eigenfrequenz kleiner wird, da durch die veränderten Hebelverhältnisse auch andere Momente wirken.

Neben der Auswertung bezüglich der Eigenfrequenzen wurden die Ergebnisse der FFT auch hinsichtlich der Energie bzw. der Amplituden der bei unterschiedlichen Lagergeometrien und Neigungswinkel analysiert. Abbildung 4.37 zeigt die Ergebnisse dieser Auswertung.

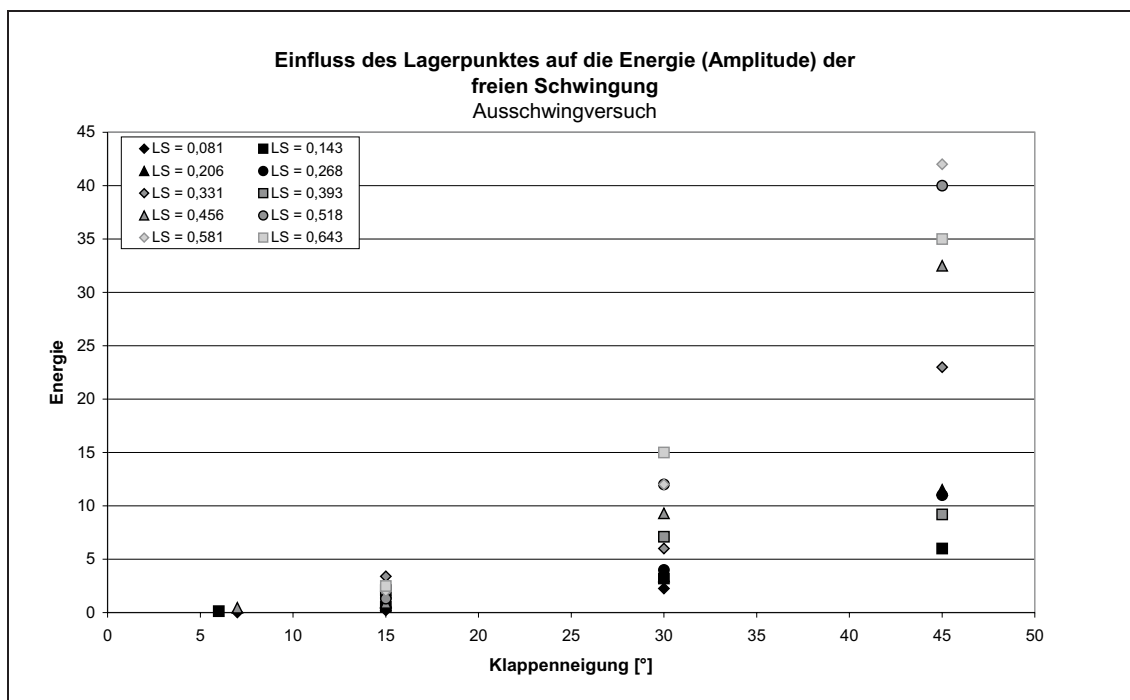


Abbildung 4.37: Einfluss der Lagergeometrie auf die Energie (Amplitude) der freien Schwingung

Die Auswertung zeigt deutlich, dass die Energie der Schwingung, und damit einhergehend die Amplitude der Schwingung, mit zunehmender Klappenneigung größer wird. Dies bestätigt die bisherigen Ausführungen, wonach das System der Schwingklappe mit größer werdenden Klappenneigung aus mechanischer Sicht weicher bzw. flexibler wird, da die Eigenfrequenz kleiner und die Amplitude der Schwingung größer wird. Bei Betrachtung der Energie bei den einzelnen Neigungen zeigt sich, dass die Amplituden zunehmen, wenn der Lagerpunkt weiter vom Schwerpunkt entfernt liegt (z.B. $LS = 0,643$). Auch diese Aussage fügt sich gut in das bisherige Verständnis der Schwingklappe, wonach das System der Schwingklappe bei großen Abständen zwischen dem Lagerpunkt und dem Schwerpunkt elastischer wird.

Die Eigenfrequenz der Schwingklappe bei unterschiedlichen Lagergeometrien wurde auch im Versuchsstand Maßstab 1:3 bestimmt. Wie in der Modellbeschreibung in Kapitel 3.2.1 dargestellt, verfügt der Versuchsstand im Maßstab 1:3 nicht über die messtechnische Ausrüstung wie der Prototyp-Versuchsstand. Die Bestimmung der Eigenfrequenzen wurde daher mittels Videoauswertung realisiert. Analog zur Eigenfrequenzbestimmung im Maßstab 1:1 wurde die Klappe aus der Ruhelage ausgelenkt und die freie Schwingung mit einer Videokamera aufgezeichnet. Über eine Software wurden die Einzelbilder extrahiert. Somit standen 25 Einzelbilder pro Sekunde zur Verfügung, die die Schwingung dokumentierten. An der Scheibe der Versuchseinrichtung waren Messstreifen aufgebracht, so dass die Neigung des Klappenkörpers für jeden Zeitschritt ermittelt werden konnte. Abbildung 4.38 entspricht Abbildung 4.36 ergänzt durch die Ergebnisse zur Eigenfrequenz aus den Versuchen im Maßstab 1:3.

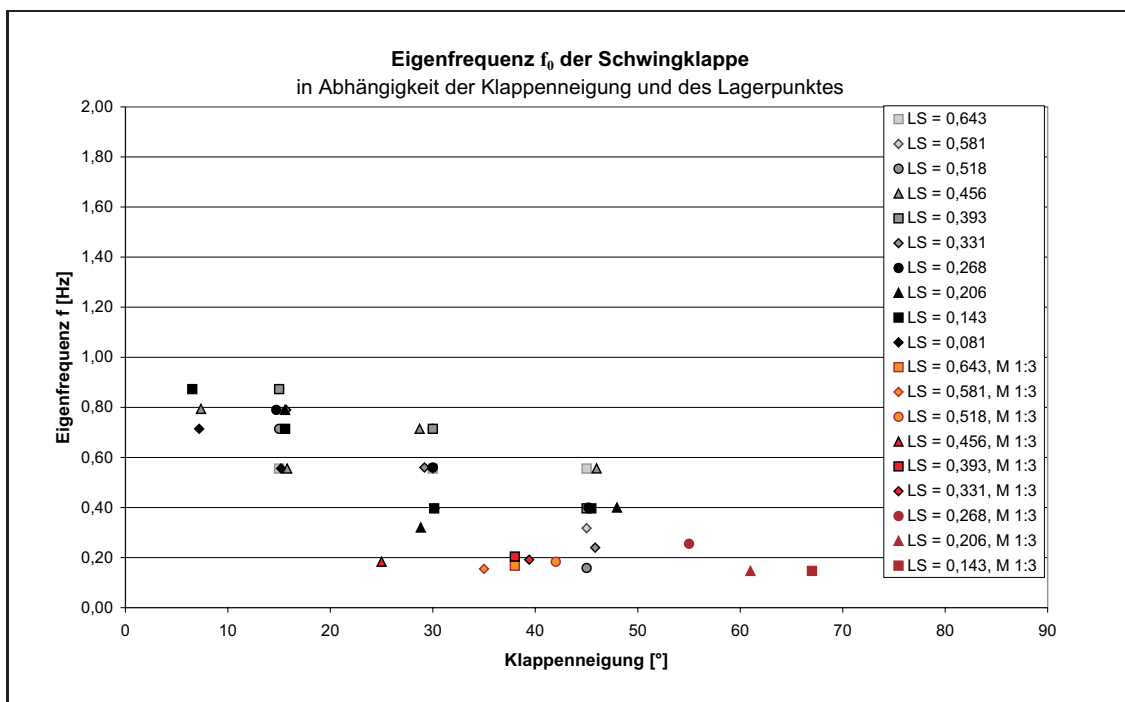


Abbildung 4.38: Ermittelte Eigenfrequenz in Abhängigkeit der Klappenneigung, Prototyp und Modell Maßstab 1:3

Der Vergleich der im Maßstab 1:3 ermittelten Eigenfrequenzen der Schwingklappe bei den unterschiedlichen Lagergeometrien mit den im Prototyp-Versuchsstand bestimmten Eigenfrequenzen zeigt eine gute Übereinstimmung sowohl bezüglich der Größenordnung der Eigenfrequenz als auch bezüglich des grundsätzlichen Verhaltens bei einer Änderung der Klappenneigung.

Aus Abbildung 4.38 kann jedoch abgelesen werden, dass die Eigenfrequenzen der Schwingklappe in der Versuchsreihe M 1:3 generell niedriger sind als im Versuch des Prototypen. Ursache hierfür ist höchstwahrscheinlich die konstruktive Ausführung des Lagers im Versuchsstand M 1:3. Das Lager ist hier über eine PVC-Gleitlager ausgebildet, so dass auf Grund der Fertigungstoleranzen die Lagerreibung größer ist als im Versuchsstand des Prototypen, so dass die Drehung des Klappenkörpers gebremst bzw. gedämpft wird. In Folge

dieser zusätzlichen Dämpfung werden vor allem die höherfrequenten Bewegungen verhindert, wodurch sich die Eigenfrequenz verringert. Bestätigt wird diese Vermutung durch die Aufzeichnung der Pendelbewegung in Abbildung 4.41. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Veränderung der Klappenneigung im Versuchsstand im Maßstab 1:3 im Vergleich zum Prototyp-Versuchsstand gedämpfter abläuft.

Die Untersuchungen zur Eigenfrequenz der Schwingklappe in den unterschiedlichen Maßstäben zeigen dennoch eine gute Übereinstimmung, so dass die Aussagekraft und die Übertragbarkeit der Versuchsreihen bezüglich der Eigenfrequenz gesichert ist. Mit den Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Lagergeometrie einen untergeordneten Einfluss im Hinblick auf die Eigenfrequenz der Schwingklappe hat und dass vielmehr der die Schwingklappe umgebende Wasserkörper das Schwingungsverhalten beeinflusst. Hieraus kann abgeleitet werden, dass auch kleinere Modifikationen der Geometrie (z.B. Klappenlänge) im Vergleich zu den untersuchten Abmessungen zu keinen signifikanten Veränderungen im Schwingungsverhalten führen werden.

Die Versuchseinrichtungen zur Schwingklappe wurden als 2D-Ausschnittsmodell konzipiert (vgl. Kapitel 3.2). Das schwingende System der Schwingklappe hat als Freiheitsgrad die Drehung um die Achse, die rechtwinklig zur Fließrichtung und damit rechtwinklig zu den Modellgrenzen verläuft. Eine Ausweitung und Übertragung der Ergebnisse auf andere Klappenbreiten ist daher ohne Einschränkungen möglich, da es hierdurch nicht zu einer Veränderung der Hebel- oder Kraftverhältnisse oder der hydraulischen Belastung kommt.

An unterströmten Schützen und Wehrverschlüssen kam es in der Vergangenheit und kommt es gegenwärtig immer wieder zu Problemen auf Grund von strömungsinduzierten Schwingungen, so dass zu dieser Thematik zahlreiche Natur- und Laboruntersuchungen durchgeführt wurden.

Miller (1977) nennt in seiner Arbeit zwei ausgeführte Projektbeispiele, bei denen die Eigenfrequenz der Schütze durch Ausschwingversuche ermittelt worden ist. Für das geschweißte Segmentwehr des Hilfswehres Schinzach Bad am Kraftwerk Wildegg-Brugg mit einer Verschlusshöhe von 3,5 m und einer Breite von 22,5 m wurde eine Eigenfrequenz von $f_0 = 4,08 \text{ s}^{-1}$ ermittelt. Das zweite Projekt besitzt ein Tiefschütz mit einer Stauhöhe von 71,3 m, einer Verschlusshöhe von 11,5 m und einer Verschlussbreite von 7,07 m. Die Eigenfrequenz des Tiefschützes beträgt $f_0 = 8,5 \text{ s}^{-1}$. Diese beiden Beispiele zeigen, dass die Eigenfrequenzen von Tiefschützen und Wehren niedrig sind und allgemein im Bereich zwischen $2,0 \text{ s}^{-1}$ bis $10,0 \text{ s}^{-1}$ liegen [89].

Auch am Segmentschütz des Kulturwehres Kehl am Rhein wurden bei Betriebszuständen mit kleinen Öffnungsweiten resonante Schwingungen beobachtet. Larsen (1988) hat mit einer aufwändigen Messtechnik die Frequenz der resonanten Schwingung bestimmt und mit theoretischen Überlegungen zur Eigenfrequenz des 20 m breiten Segmentes verglichen. Die ermittelte Eigenfrequenz beträgt demnach 21 s^{-1} und die Erregung erfolgte auf Grund einer durch die Strömung angeregten Dichtlippe.

Billeter (1998) hat für seine Untersuchungen zu strömungsinduzierten Schwingungen an Schützen mit mehreren Freiheitsgraden einen Versuchsstand entwickelt, bei dem Eigenfrequenzen ebenfalls im Bereich zwischen $2,4 \text{ s}^{-1}$ und $8,6 \text{ s}^{-1}$ eingestellt werden konnten.

Wie in diesem Kapitel dargestellt wurde, liegt die Eigenfrequenz f_0 der Schwingklappe, je nach verwendeter Lagergeometrie, zwischen $0,2 \text{ s}^{-1}$ bis $1,0 \text{ s}^{-1}$, wobei der Freiheitsgrad die Drehung um die Achse ist. Die Eigenfrequenz der Schwingklappe ist somit deutlich kleiner als die typischen Eigenfrequenzen von Tiefschützen oder Wehrverschlüssen. Übertragen auf die Steifigkeit eines Systems folgt hieraus, dass das System der Schwingklappe eine geringere Steifigkeit aufweist als die typischen Bauweisen von Schützen. Bei den Schützen ist jedoch keine Bewegung oder Verdrehung wie bei der Schwingklappe vorgesehen, so dass die dokumentierten Abweichungen im Erwartungsbereich liegen.

4.3.3 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

$$F = -D \cdot x \quad (4.16)$$

die *Stokessche Reibungskraft* F_R berücksichtigt werden. Diese ist wie folgt definiert:

$$F_R = -b \cdot v \quad (4.17)$$

Die Reibungskraft F_R ist dabei dem Geschwindigkeitsvektor entgegengerichtet und proportional zum Geschwindigkeitsbetrag $|v|$. b ist der Dämpfungskoeffizient.

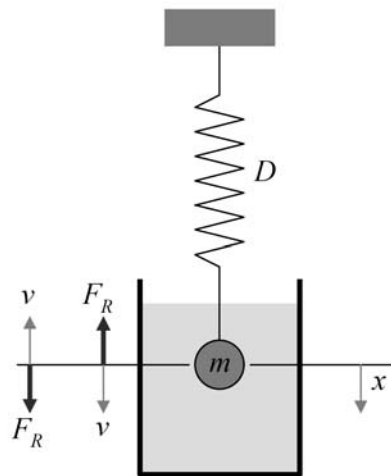


Abbildung 4.39: Viskos gedämpfte Schwingung einer Kugel in einem Fluid

Ganz allgemein können freie, gedämpfte Schwingungen durch folgende Differentialgleichung beschrieben werden [85]:

$$m \cdot \ddot{x} = -D \cdot x - b \cdot \dot{x} \quad (4.18)$$

Mit den Abkürzungen:

$$\omega_0^2 = \frac{D}{m} \quad (4.19)$$

$$2\gamma = \frac{b}{m} \quad (4.20)$$

erhält man die allgemeine Bewegungsgleichung einer gedämpften Schwingung mit der Dämpfungskonstante γ :

$$\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (4.21)$$

Über den Lösungsansatz

$$x(t) = c \cdot e^{\lambda t} \quad (4.22)$$

und die Bestimmungsgleichung

$$\lambda^2 + 2\gamma\lambda + \omega_0^2 = 0 \quad (4.23)$$

ergibt sich die Lösung

$$\lambda_{1,2} = -\gamma \pm \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} \quad (4.24)$$

und die allgemeine Lösung:

$$x(t) = e^{-\gamma t} \left[c_1 e^{\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} \cdot t} + c_2 e^{-\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} \cdot t} \right] \quad (4.25)$$

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

$$\frac{\text{mittlere Rueckstellkraft}}{\text{mittlere Reibungskraft}} = \frac{\langle |D \cdot x| \rangle}{\langle |b \cdot \dot{x}| \rangle} = \frac{m \cdot \omega_0^2 \sqrt{\overline{x^2}}}{2 \cdot \gamma \cdot m \sqrt{\overline{\dot{x}^2}}} = \frac{\omega_0}{2\gamma} \quad (4.26)$$

d.h. von der relativen Größe von ω_0 und γ ab.

Hieraus lassen sich drei verschiedene Dämpfungsfälle ableiten [18]:

- Fall 1: $\gamma^2 - \omega_0^2 < 0$ oder $\gamma < \omega$ schwache Dämpfung, gedämpfte Schwingung
- Fall 2: $\gamma^2 - \omega_0^2 > 0$ oder $\gamma > \omega$ starke Dämpfung, Kriechfall
- Fall 3: $\gamma^2 - \omega_0^2 = 0$ oder $\gamma = \omega$ mittlere Dämpfung, aperiodischer Grenzfall

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. Je nach Schreibweise kann das Dämpfungsmaß D ohne Einheit oder in Prozent angegeben werden. Für frei schwingende, abklingende Schwingsysteme kann der Dämpfungsgrad über das Verhältnis der Amplitude zweier aufeinander folgender Ausschläge gleicher Richtung über das logarithmische Dekrement Λ wie folgt berechnet werden [18]:

$$\Lambda = \ln \frac{x_m}{x_n} = \frac{2\pi\delta}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} = \delta T \quad (4.27)$$

$$D = \frac{\Lambda}{\sqrt{(2\pi)^2 + \Lambda^2}} \quad (4.28)$$

Im Rahmen der Versuchreihen wurde das Dämpfungsmaß D über eine Auswertung der Amplituden ermittelt. Hierzu wurden die Aufzeichnungen des Neigungssensors herangezogen. Abbildung 4.40 zeigt einen typischen Schwingungsverlauf und die dazugehörige Vorgehensweise zur Bestimmung des Dämpfungsmaßes D .

Die Aussagekraft der Ergebnisse wurde wiederum durch die Betrachtung der Modellfamilie überprüft. Abbildung 4.41 zeigt exemplarisch den Verlauf der Schwingung für die Lagergeometrie $LS = 0,331$ für den Prototypen und im Maßstab 1:3. Die Dämpfung im Versuchsstand Maßstab 1:3 fällt im Vergleich zum Prototypen deutlicher aus und man kann keine ausgeprägte Schwingung mehr erkennen. Ursache hierfür ist die modelltechnische Ausbildung des Lagers. Die Reibungskräfte des PVC - Gleitlagers im Modell im Maßstab 1:3 sind größer, so dass der Schwingung weniger Energie zur Verfügung steht als im Prototyp-Versuchsstand. Die Größenordnung der Schwingung und Rückstellzeit bestätigen jedoch die Ergebnisse der Versuche am Prototypen.

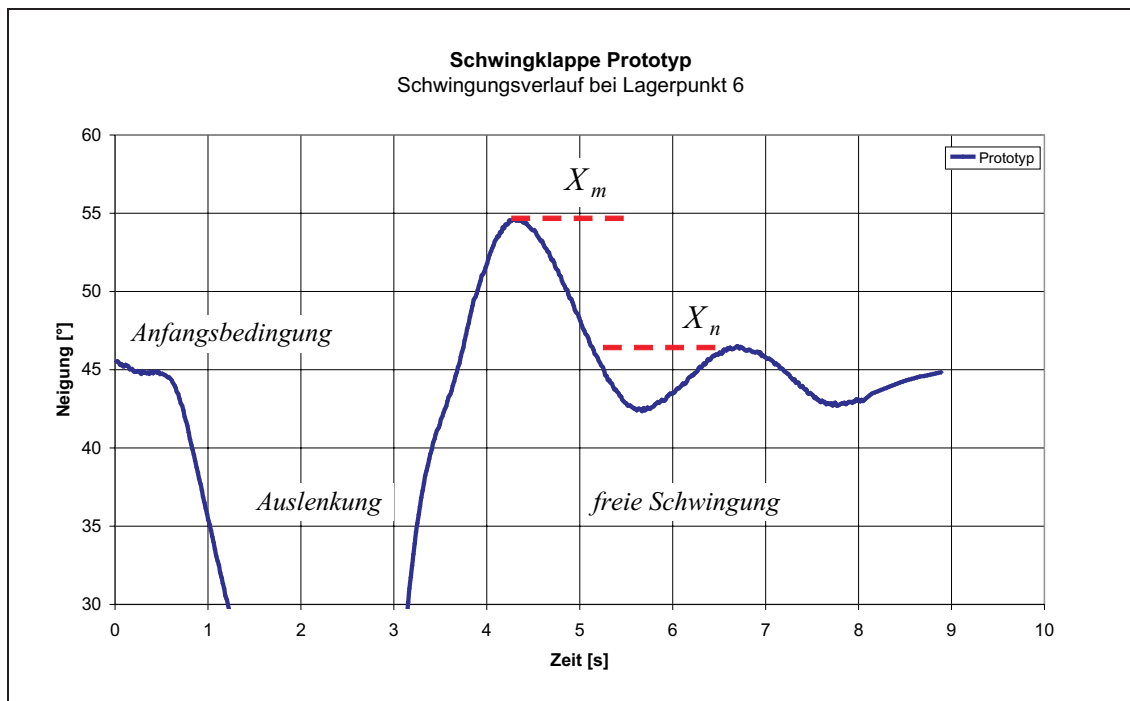


Abbildung 4.40: Freie Schwingung nach Auslenkung, Lagerungspunkt 6

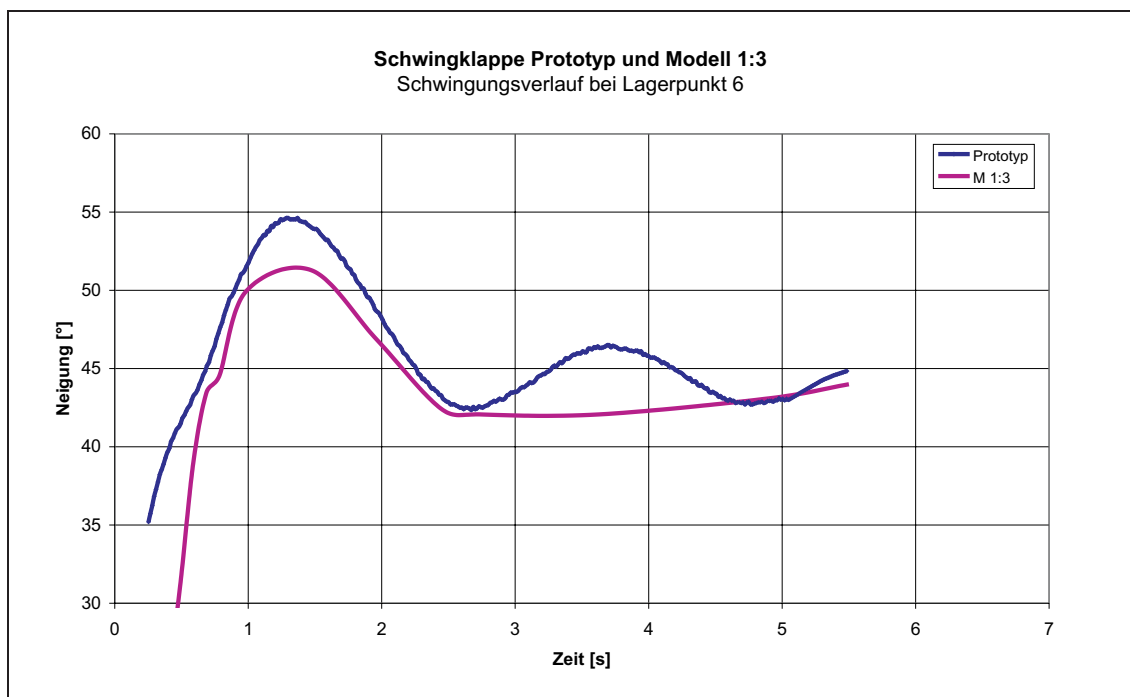


Abbildung 4.41: Vergleich der freien Schwingung nach Auslenkung, Lagerungspunkt 6

Das Schwingungsverhalten der Schwingklappe im Falle einer Auslenkung (vgl. Abbildung 4.40 und Abbildung 4.41) kann zusätzlich anhand des Schwingungsverhaltens des eingangs aufgezeigten physikalischen Experimentes (vgl. Abbildung 4.42) näher analysiert werden.

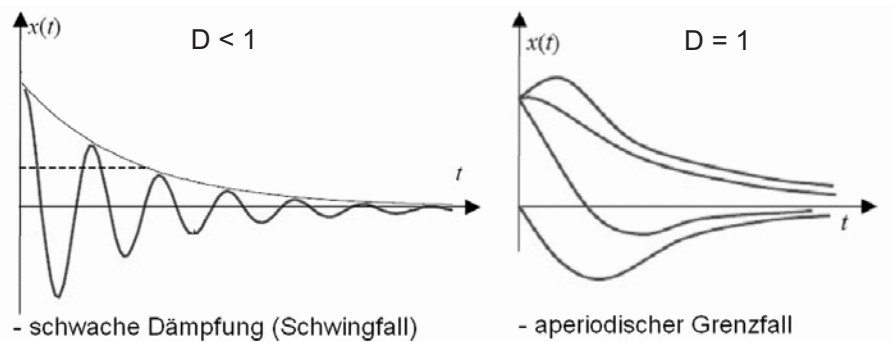


Abbildung 4.42: Klassifizierung des Schwingungsverhaltens [85]

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 4.42, 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 [85].

Das Dämpfungsmaß D wurde für sämtliche Lagerungspunkte und Anfangsneigungen vor der Auslenkung über Ausschwingversuche bestimmt. In Abbildung 4.43 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.

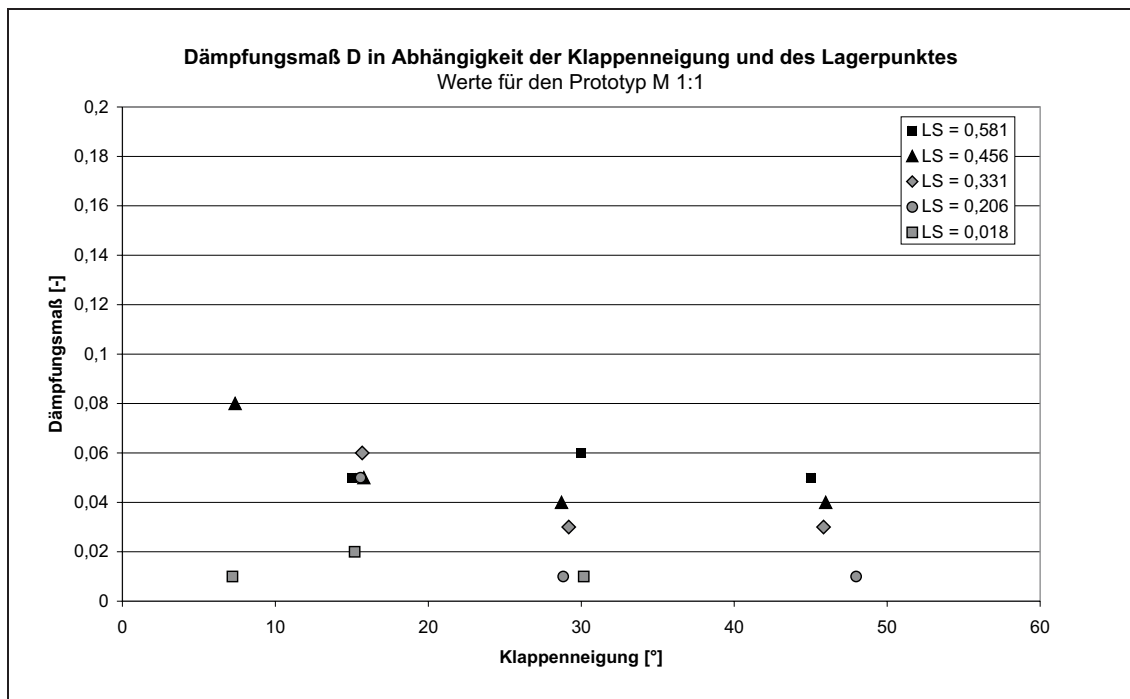


Abbildung 4.43: Dämpfungsmaß D in Abhängigkeit der Klappenneigung und des Lagerpunktes.

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° kann die Dämpfung als konstant angesehen werden. Die Ursache hierfür ist das hydraulische Verhalten während des Aufschwimmvorganges der Schwingklappe. Beim Aufrichten wandert der Schwerpunkt näher an den Lagerungspunkt, was nach der bisherigen Definition einer Verkleinerung von LS gleichzusetzen ist. Hierdurch verändern sich die Trägheitsmomente und damit einhergehend auch das Dämpfungsverhalten.

In Kapitel 4.2.5 konnte gezeigt werden, dass die Schwingklappe erst ab einer Klappenneigung von 15° bis 30° in das Abflussgeschehen eingreift. Erst bei diesen Neigungen 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. Es wird vermutet, dass durch diese Einspannung der Einfluss der Neigung auf das Dämpfungsverhalten verringert bzw. eliminiert 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 der Schwingklappe wurden auch mit Literaturangaben von realisierten Brückenprojekten und Aussichtstürmen verglichen. Die Tabellen 4.4 und 4.5 geben einen Überblick.

Tabelle 4.4: Messergebnisse zum Dämpfungsgrad von Brücken [39]

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

Tabelle 4.5: Messergebnisse zum Dämpfungsgrad von Aussichtstürmen [91]

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

Im Rahmen der Untersuchungen zur Schwingklappe wurden auch Beispiele für das Dämpfungsverhalten von wasserbaulichen Anlagenkomponenten recherchiert.

Billeter (1998) hat sich intensiv mit der Untersuchung von strömungsinduzierten Schwingungen von Schützen beschäftigt und hierzu auch wasserbauliche Modellversuche durchgeführt. In seinem Versuchsstand konnten verschiedene Dämpfungsgrade für die jeweiligen Raumrichtungen zu $\beta_y = 1,4\%$ bis $3,0\%$ und $\beta_x = 1,5\%$ bis $2,0\%$ eingestellt werden.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass das Dämpfungsmaß der Schwingklappe mit Werten zwischen $1,0\%$ und $8,0\%$ zum Teil deutlich über den üblichen und akzeptierten Werten aus der Baupraxis oder bei wasserbaulichen Anlagen liegt. Abhängig von der Konstruktion liegen z.B. die Dämpfungsmaße von Brücken 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 des Gefährungspotentials, welches von solchen Bauwerken ausgeht, als gerechtfertigt.

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

- Das System der Schwingklappe weist eine signifikante Dämpfung mit einem Dämpfungsgrad je nach Lagerungspunkt und Neigung zwischen 1,0 % - 8,0 % 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.

4.3.4 Druckverhältnisse/Druckschwankungen entlang der Stauhaut

Für die statische Dimensionierung des Klappenkörpers und der Lagerung müssen die auftretenden Kräfte auf die Stauhaut bekannt sein. Da bei der Schwingklappe im Betrieb verschiedenste Szenarien (Klappenwinkel, Oberwasserstand, Unterwasserstand) durchlaufen werden, wurde im Zuge der hydraulischen Untersuchungen die maximale auftretende Belastung des Klappenkörpers und der Lagerung ermittelt.

Im wasserbaulichen Modell wurden hierzu Druckmessungen entlang der Stauhaut durchgeführt. Die zur Erhebung der Daten eingesetzte Messtechnik ist in Kapitel 3.2.2 detailliert beschrieben. Für die Bemessung des Klappenkörpers ist neben der Ermittlung der mittleren Kräfte auch die Kenntniss der auftretenden Kraftspitzen und deren Schwankungsbreite wichtig. Die Druckmessungen im Versuchsstand wurden daher mit einer hohen zeitlichen Auflösung von 100 Hz durchgeführt, so dass auch diesbezüglich aussagekräftige Ergebnisse ermittelt werden konnten.

In einem ersten Schritt wurden die durchschnittlichen Drücke entlang der Stauhaut bei verschiedenen Klappenneigungen analysiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.44 normiert über die Spaltweite s dargestellt.

Die gemessenen Drücke im oberstromigen Bereich des Klappenkörpers (kleine Wassertiefe) stimmen sehr gut mit der hydrostatischen Druckverteilung überein. Der dokumentierte Abfall des Druckes zur Klappenendkante hin (große Wassertiefen) entspricht auch den Erwartungen. In diesen Bereich kommt es zu einer Beschleunigung der Strömung. Bei der energetischen Betrachtung steigt somit die kinetische Energie an den jeweiligen Orten. Aus dem Energieerhaltungssatz lässt sich ableiten, dass es lokal zu einer Druckabnahme kommen muss. Auf Grund der Baugröße der Druckmessdosen konnte direkt an der Klappenendkante keine Messungen durchgeführt werden.

Reamy (1998) hat sich bei seinen Untersuchungen zu einer selbstregulierenden Klappe auch intensiv mit den Druckverhältnissen entlang der Stauhaut einer geneigten Platte beschäftigt. Abbildung 4.45 zeigt seine Ergebnisse für ein Verhältnis der Klappenlänge L zur Einstauhöhe h_0 von $L/h_0 = 1$. Zu Beachten ist hierbei, dass der Klappenwinkel in den Darstellungen von Reamy nicht der Definition der Klappenneigung bei der Schwingklappe entspricht sondern der Nebenwinkel ist.

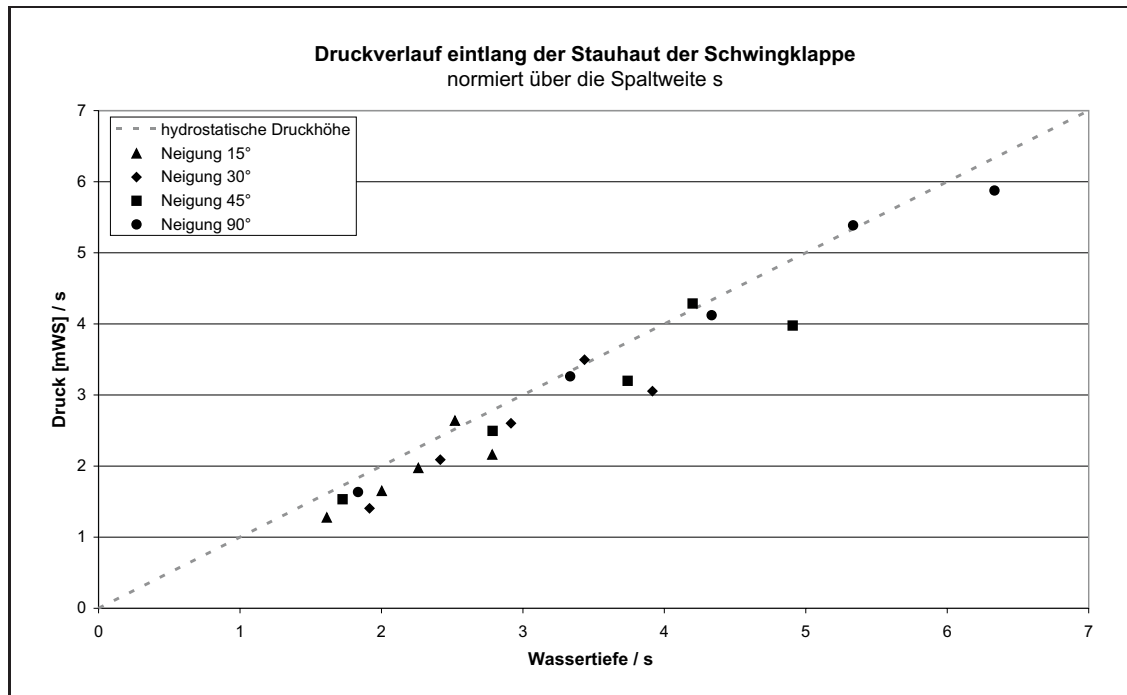


Abbildung 4.44: Druckverlauf entlang der Stauhaut

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 Neigungswinkel δ zu.

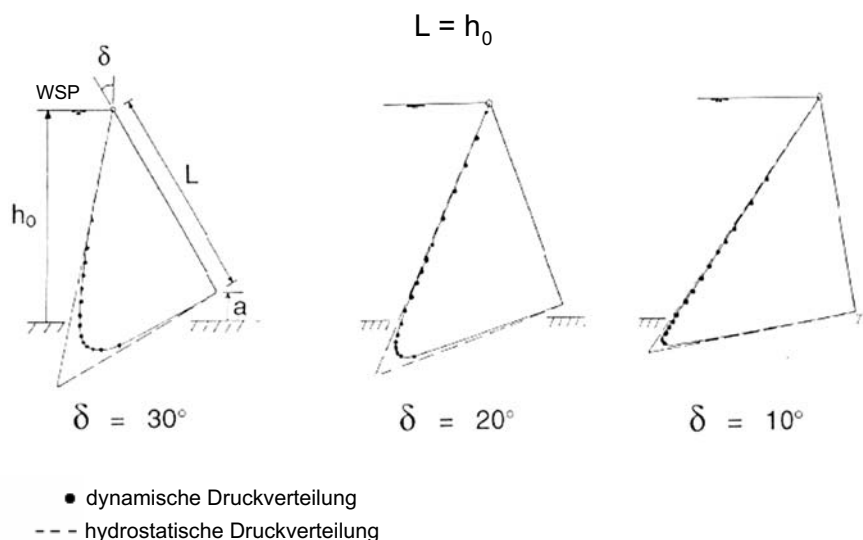


Abbildung 4.45: Dynamischen und hydrostatischen Druckverteilung, [104]

Neben der Betrachtung der Mittelwerte der Drücke wurden im Rahmen der Druckuntersuchungen auch die zeitlich hoch aufgelösten Datenreihen statistisch analysiert. Die aufgenommenen Einzelwerte sind in Abbildung 4.46 beispielhaft über ein Zeitspanne von 16 s aufgetragen. Die statistische Auswertung einer 60 s Zeitreihe ist in Tabelle 4.6 aufgetragen. Auf Grund eines Defektes ist die Druckmessdose der Messstelle 1 während der hydraulischen Untersuchungen zur Schwingklappe ausgefallen, so dass hierfür leider keine auswertbaren Messwerte vorliegen.

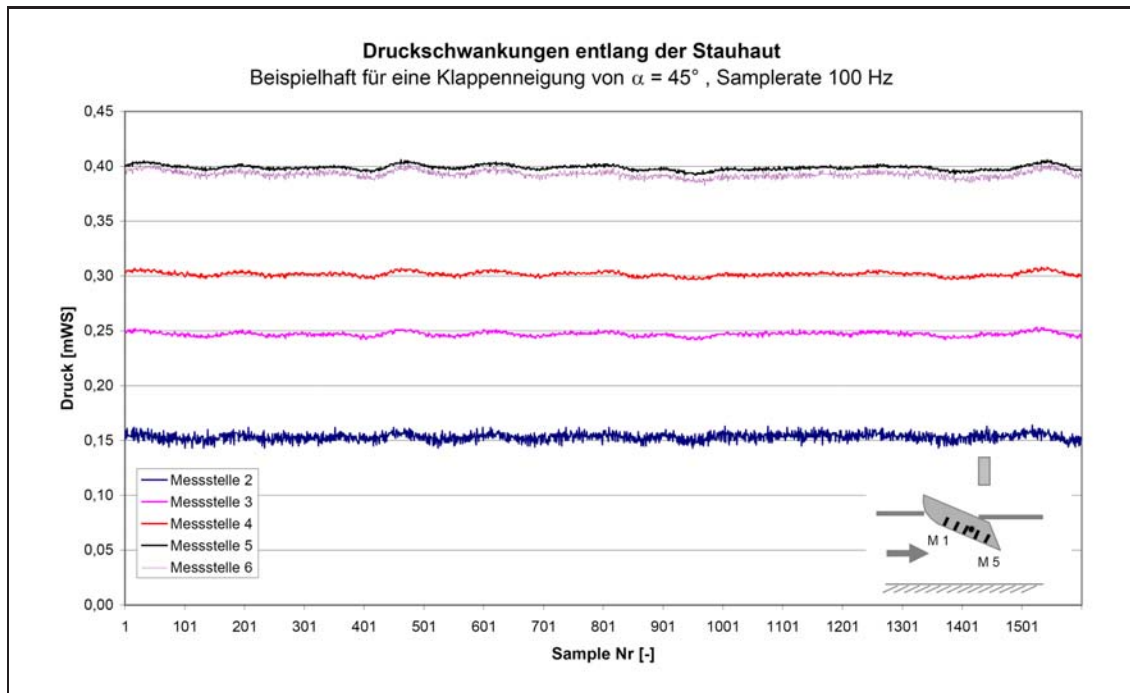


Abbildung 4.46: Schwankungsbereich der Druckhöhen an der oberwasserseitigen Stauhaut

Tabelle 4.6: Statistische Auswertung einer 60 s Messreihe entlang der Stauhaut der Schwingklappe

	Messt. 2	Messt. 3	Messt. 4	Messt. 5	Messt. 6
Mittelwert [mWS]	0,0153	0,247	0,302	0,399	0,393
Max [mWS]	0,164	0,253	0,308	0,406	0,403
Min [mWS]	0,143	0,242	0,297	0,392	0,382
Standartabweichung [mWS]	0,0054	0,0065	0,0078	0,010	0,010

Die statistische Auswertung der Druckmessungen entlang der Stauhaut in Tabelle 4.6 sowie die Auftragung der Einzelmesswerte in Abbildung 4.46 zeigen deutlich, dass die Schwankungsbreite der Druckkräfte bezogen auf den Mittelwert sehr gering sind. Auch künstlich herbeigeführte Betriebszustände, wie etwa eine Pendelbewegung der Klappe, hatten keine signifikanten Auswirkungen auf den Druckverlauf entlang der Stauhaut.

Die Zonen für potentielle Schwingungsanfachungen bei der Schwingklappe wurden in Abbildung 4.35 markiert. Entlang der Stauhaut kommt es auf Grund der turbulenten Strömung zu Druck- und Geschwindigkeitsschwankungen. Die messtechnische Ausstattung des Klappenkörpers mit Druckmessdosen lässt eine genauere Betrachtung der Zonen b) und c) zu.

Die Signale der in der Stauhaut verbauten Druckmessdosen wurden wie die der anderen Sensoren hochfrequent mit 100 Hz über eine Messzeit von 60 s aufgezeichnet, so dass die 6000 Messwerte analog zu den Daten des Beschleunigungsaufnehmers mittels einer Fouriertransformation (FFT) hinsichtlich der spektrale Leistungsdichte ausgewertet werden konnten (vgl. Kapitel 4.3.2). Die Auswertung wurde für die sechs Druckmessstellen jeweils bei einer Neigung von 15° , 30° und 45° durchgeführt.

In Abbildung 4.47 ist das ermittelte Frequenzspektrum bei einer Klappenneigung von 15° und 45° bei für die Lagergeometrie $LS = 0,393$ exemplarisch für die Druckmessstelle 2 dargestellt. Abbildung 4.49 zeigt das Frequenzspektrum für die Druckmessstelle 5, ebenfalls für eine Neigung von 15° und 45° .

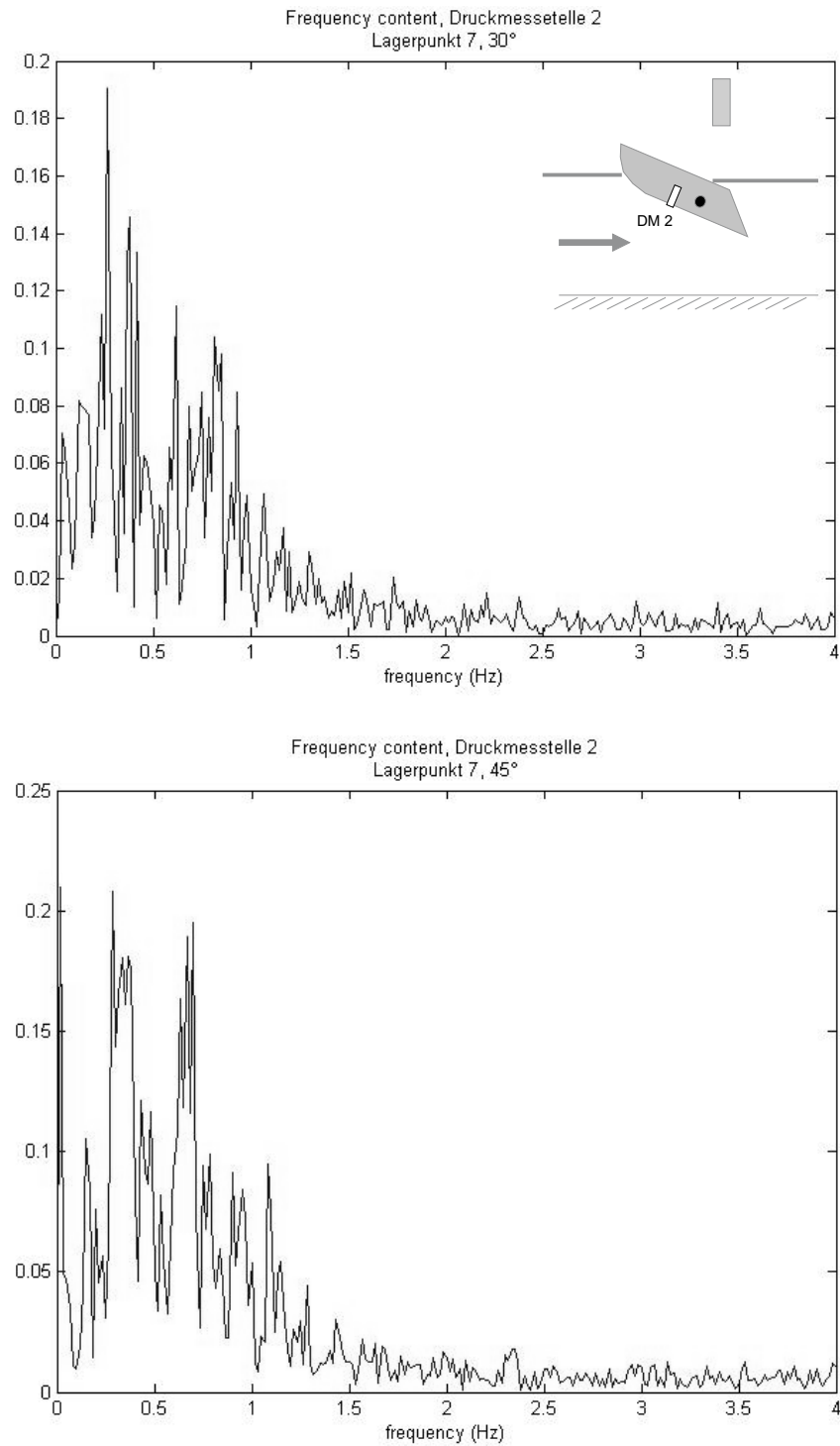


Abbildung 4.47: Spektralanalyse, Druckmessstelle 2, Betrachtung bei 15° und 45°, Betrachtung des Prototypen

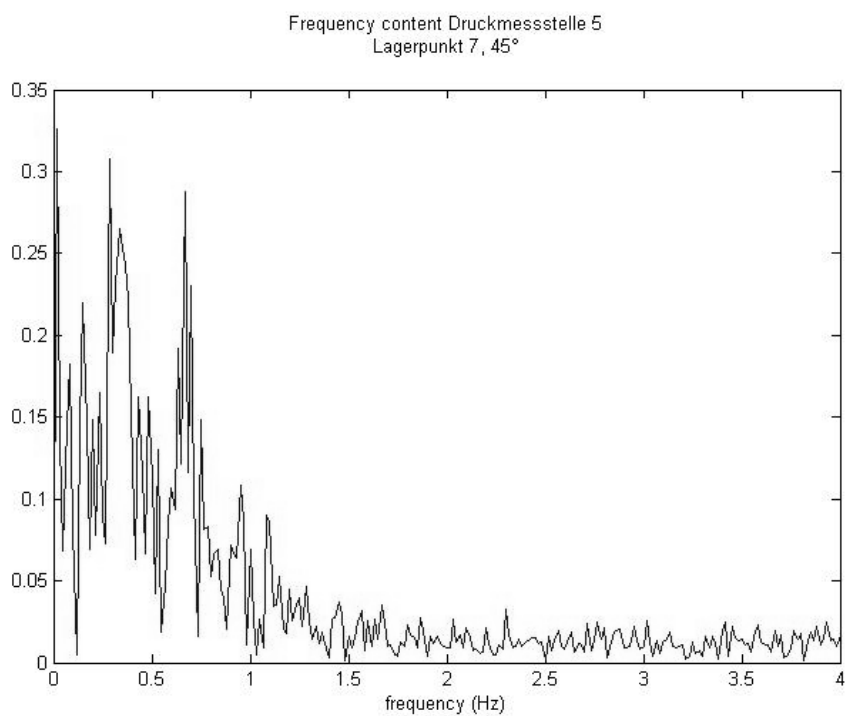
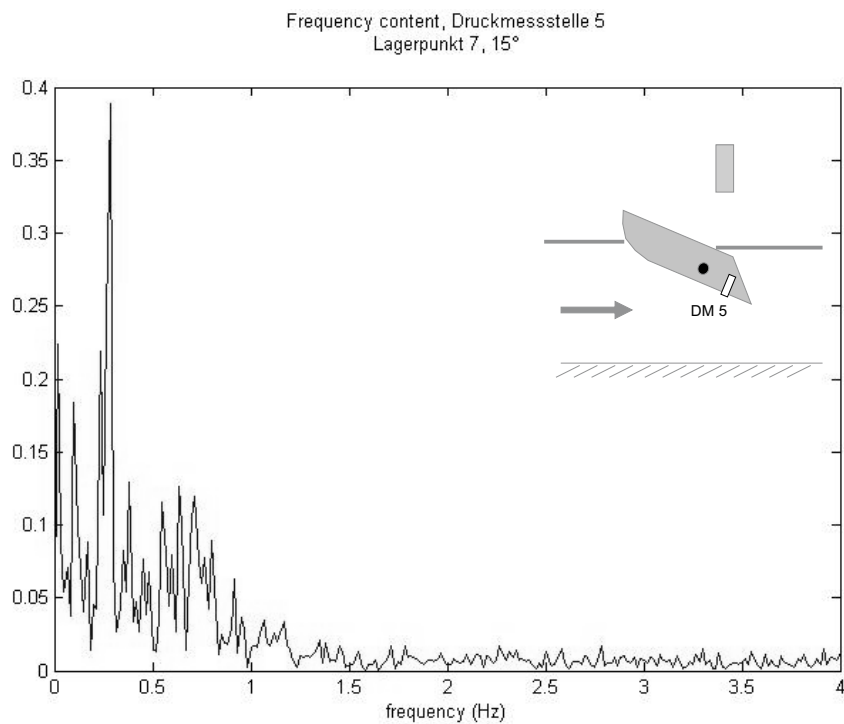


Abbildung 4.48: Spektralanalyse, Druckmessstelle 5, Betrachtung bei 15° und 45°, Betrachtung des Prototypen

Bei der Analyse der ermittelten Frequenzspektren aller sechs Druckmessstellen konnten keine Auffälligkeiten bezüglich der turbulenten Anströmung dokumentiert werden.

Ein Wirbel kann seine Energie nur durch Dissipation in Folge molekularer Reibung verlieren, wobei die kinetische Energie in einem Wirbel in Wärmeenergie und Schall umgewandelt wird. Man spricht von einer Kaskadierung der Energie durch *vortex-stretching* bzw. dem *Turbulenzmodell von Kolmogorov*. 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 auf Grund der molekularer Reibung dissipiert [112].

Dieses Phänomen spiegelt sich auch in den Darstellungen der für die Schwingklappe ermittelten Frequenzspektren wieder (vgl. Abbildung 4.47 und 4.49). Die turbulente Strömung entlang der Stauhaut wird über ein breites Frequenzband mit abfallenden Amplituden abgebildet. Ursache hierfür ist, dass große Wirbel auf Grund ihres Impulses eine größere Energiedichte besitzen als kleine, dafür aber langsamer drehen und daher in der Darstellung der Spektren im Bereich der niedrigen Frequenzen auftauchen.

Einzelne, stark ausgeprägte Peaks sind in der Darstellung der Spektren nicht vorhanden. Die zu erkennenden kleineren Peaks haben ihre Ursache vermutlich im Aufbau der Druckmessdosen und in der gewählten Messzeit. Beim Einbau der Druckmessdosen ergaben sich kleinere Rücksprünge im Übergang der Stauhaut zur Membran der Druckmessdose. Die Randströmung entlang der Stauhaut wird durch diese Rücksprünge beeinflusst und es bilden sich Strömungsablösungen mit den daraus resultierenden Druckschwankungen aus. Diese Druckschwankungen sind dann in der Darstellung der Spektren als kleinere Peaks zu erkennen.

Eine weitere Ursache für die dokumentierten Peaks in der Spektrendarstellung liegt bei der verwendeten Messzeit von 60 s. Eine FFT kann gewissermaßen auch als statistische Auswertung angesehen werden, so dass nur bei einer entsprechend großen Stichprobe eine qualitativ hochwertige Auswertung erfolgen kann. Die gewählte Messzeit von 60 s reicht offensichtlich nicht aus, um die Charakteristik der turbulenten Anströmung wiederzugeben und Wirbel aller Größen, und damit auch Drehfrequenzen, in einer ausreichenden Anzahl zu erfassen, so dass es hierdurch zu den dokumentierten Peaks und dem ‘ausgefranst’ Spektrenverlauf kommt.

In Kapitel 4.3.1 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 und des Klappenlörpers 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, so dass auch hier die zu erwartenden Abnahme der Energie mit zunehmender Frequenz erkannt werden kann. Auch an der rückspringenden Klappenendkante konnten folglich keine ausgeprägten Anregungsmechanismen dokumentiert werden.

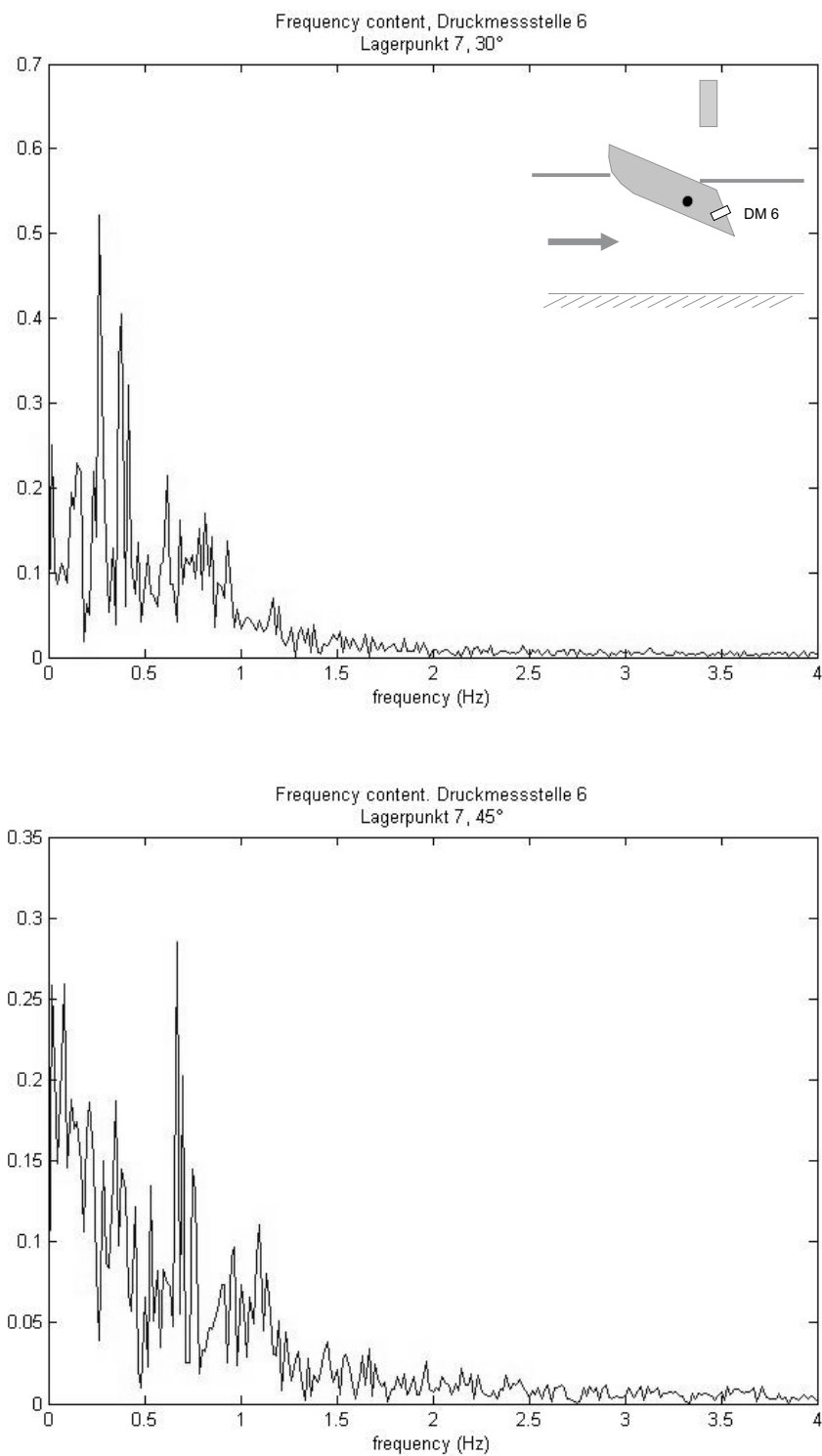


Abbildung 4.49: Spektralanalyse, Druckmessstelle 6, Betrachtung bei 30° und 45°, Betrachtung des Prototypen

Die Ergebnisse bezüglich der Frequenzspektren am rückspringenden Bereich der Klappenendkante bestätigen die in Kapitel 4.1.1 vorgestellten Überlegungen zum Klappendesign. Aufbauend auf einem Literaturstudium wurde eine Vermeidungsstrategie beim Design des Klappenkörpers verfolgt. Ziel war es, über ein breites Band an Betriebszuständen die Schwingungsanfachtung infolge von turbulenten Druckschwankungen an der rückspringenden Endkante der Schwingklappe zu vermeiden. Die oben aufgetragenen Ergebnisse bestätigen die Richtigkeit der gewählten Strategie beim Design des Klappenkörpers.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die durchgeführten Messungen und Auswertungen zur Anregung der Stauhaut gut mit den Angaben mit den aus der Literatur bekannten Turbulenzmodellen (z.B. [112]) 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 turbulenten Strömung die Stauhaut der Schwingklappe mit einer Frequenz von kleiner 1,0 Hz anregen.

4.3.5 Abschließende Bewertung des kinematischen Verhaltens

In Kapitel 4.3.2 wurde die Eigenfrequenz des schwingenden Systems der Schwingklappe für unterschiedliche Betriebsszenarien untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Eigenfrequenz des gelagerten Klappenkörpers, abhängig von der Klappenneigung und der Lage des Lagerpunktes, beim untersuchten Prototypen im Bereich $< 1,0$ Hz liegen. In Kapitel 3.1.2 wurde die Grenzen der Übertragbarkeit von Schwingungsphänomenen aufgezeigt. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die Maßstabeffekte bei der Umrechnung der Frequenzen nach dem Froude'schen Modellgesetz (vgl. Kapitel 3.1.1) mit größer werdendem Maßstab anwachsen. Wie in Kapitel 6.1 dargestellt wurde, ergeben sich auch aus konstruktiven Gründen Grenzen bei der Skalierung der Geometrie des Klappenkörpers. Eine Skalierung um den Faktor zwei wird hier als Maximum angesehen. Bei diesem Skalierfaktor sind jedoch noch keine signifikanten Maßstabeffekte zu erwarten, so dass die ermittelten Eigenfrequenzen nach dem Froude'schen Modellgesetz umgerechnet werden können.

Für die Versuche zur Bestimmung der Eigenfrequenz wurde der Klappenkörper bis zu 45° aus der Ruhelage ausgelenkt und schlagartig entlastet. Nach der Entlastung folgte eine gedämpfte Bewegung mit einer leichten Überschwingung zurück in die Ruhelage. Bezogen auf die Schwingungsanfälligkeit kann aus den gewonnenen Erkenntnissen ohne Einschränkungen die Praxistauglichkeit der Schwingklappe abgeleitet werden.

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 (vgl. Kapitel 4.3.3) 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 realisierten Bauprojekten von Brücken, Türmen und wasserbaulichen Anlagen unterstreicht dies.

4.4 Untersuchungen zur Betriebssicherheit

Hochwasserrückhaltebecken dienen im Hochwasserfall der Minderung von Schadenpotentialen und der Sicherung von Menschenleben. Der Scheitel der Hochwasserwelle wird in Folge des Wasserrückhaltes im Retentionsraumes für die Unterlieger gedämpft. Durch den Rückhalt des Wassers im Hochwasserrückhaltebecken 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 Haslach, auch bekannt als die Stauanlage *Rot an der Rot*, bei dem es in Folge einer schlechten Auslegung der Schiebermechanik am 17. August 1969 zu einem Bruch der Antriebsspindel kam und das Schütz nicht mehr verstellt werden konnte. Die Wasserabfuhr durch die Schütze konnte nicht mehr gewährleistet werden und der Wasserstand im Becken überstieg die Dammoberkante. In der Folge kam es zu einem Dambruch [40].

Tabelle 4.7: Technische Daten zum Hochwasserrückhaltebecken Haslach

Einzugsgebietsgröße	40,0 km ²
Retentionsvolumen	300.000 m ³
Regelabgabe Q_R	9,5 m ³ /s
Dammhöhe	6,0 m



Abbildung 4.50: Verklebtes Schütz, HRB Haslach, [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 4.51). Redundante Schieberbetätigungen kommen nur selten zum Einsatz.

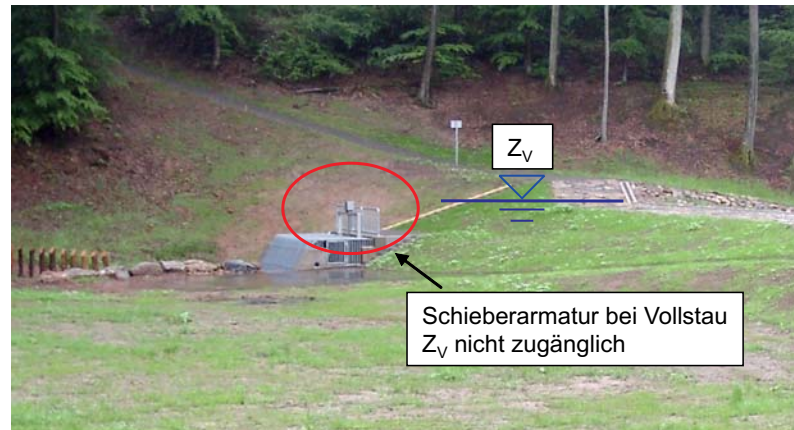


Abbildung 4.51: Beispiel für eine bei Einstau unzugängliche Schieberarmatur

Bei der Konzeption des Durchlassbauwerkes muss vor allem aber beachtet werden, dass mit der Hochwasserwelle auch Fest- und Schwimmstoffe mittransportiert werden. Je nach Einzugsgebiet und Jahreszeit werden auch Sohlmaterial und erhebliche Mengen an Geschwemmsel in Richtung Durchlassbauwerk bewegt (vgl. Abbildung 4.52). 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 5.1.1.



Abbildung 4.52: Geschwemmseltrieb bei Hochwasser [128]

4.4.1 Geschwemmseltrieb

Neben der hydraulischen Betrachtung der Sicherheit eines Hochwasserrückhaltebeckens muss gemäß ATV (2001) auch eine ausreichende Sicherheit gegenüber einer Verklausung bzw. Verstopfung der Hochwasserentlastungsanlage und der Grund- und Betriebsauslässe gewährleistet sein. Hierzu sind bei der Planung entsprechende Rechenbauwerke vorzusehen. Unter einer Verklausung wird dabei der teilweise oder vollständige Verschluss eines Fließgewässerquerschnittes oder Bauwerkes infolge angeschwemmten Treibgutes oder Totholzes verstanden.

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 von verschiedenen Geschwemmselfraktionen untersucht (vgl. Abbildung 4.53).



Abbildung 4.53: Überblick über die im Rahmen der Versuche untersuchten Geschwemmselfraktionen

Tabelle 4.8: Aufstellung der Modellgeschwemmselfraktionen

	Material	Länge
a.)	kleinere Äste	20 - 40 cm
b.)	Gräser	10 - 40 cm
c.)	Stauden	30 - 60 cm
d.)	Blattwerk	20 - 50 cm

Nach ATV (2001) geht von großen Ästen und ganzen Bäumen die größte Verklausungsgefahr aus. Lange und Bezzola (2006) haben aufbauend auf Untersuchungsergebnissen zur Schwemmholtzproblematik in alpinen Gewässern die Gefährdung eines Durchlassbauwerkes mit der lichten Querschnittsfläche in Verbindung gebracht. Demnach geht von Treibholz und Geschwemmsel, was länger ist als die kürzere Kante des Rechteckdurchlasses, die größte Verklausungsgefahr aus.

In Kapitel 6.3 wird aus Gründen der Betriebssicherheit eine minimale Spaltweite von $s_{90} = 25$ cm gefordert. Im Modellversuch wurden daher größtenteils Gräser, Stauden und Blattwerk in Längen von 10 cm bis 60 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 Mobilisierung von im Einzugsgebiet und Retentionsraum vorhandenen Geschwemmseldepots findet statt.

In den unterschiedlichen Untersuchungsreihen wurden jeweils verschiedene Alterungsstufen (frisch gemäht bis getrocknet) der einzelnen Geschwemmselfraktionen eingebracht. Über alle Versuchsreihen konnte ein ähnliches Verhalten bezüglich der Geschwemmseldrift festgestellt werden. Auffallend war hierbei, dass unabhängig von der Alterungsstufe das Material oberflächennah mit der Strömung auf die Schwingklappe geleitet wurde.

Vor dem Klappenkörper verfängt sich ein Teil des Materials (vgl. Abbildung 4.54, Bild 1). Die Verklausung wurde immer mächtiger, bis es schließlich von den tiefer liegenden Strömungsbereichen erfasst wurde (vgl. Abbildung 4.54, 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 4.54, 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 einer Ansammlung von Geschwemmsel.

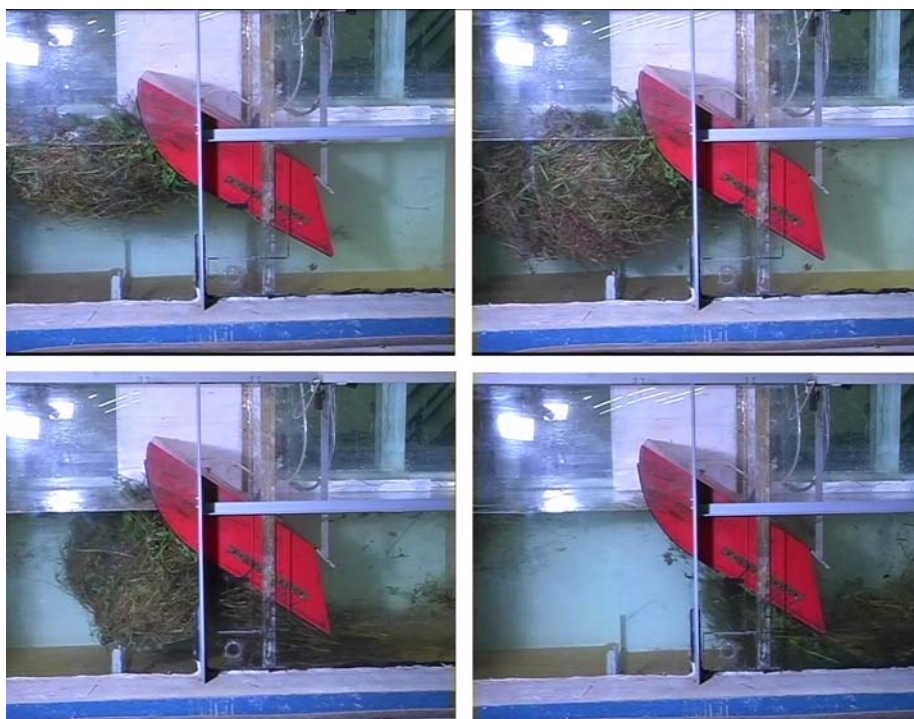


Abbildung 4.54: Sequenzen der Geschwemmseldrift bei einer Spaltweite $s_N = 20$ cm und einer Klappenneigung von 30°

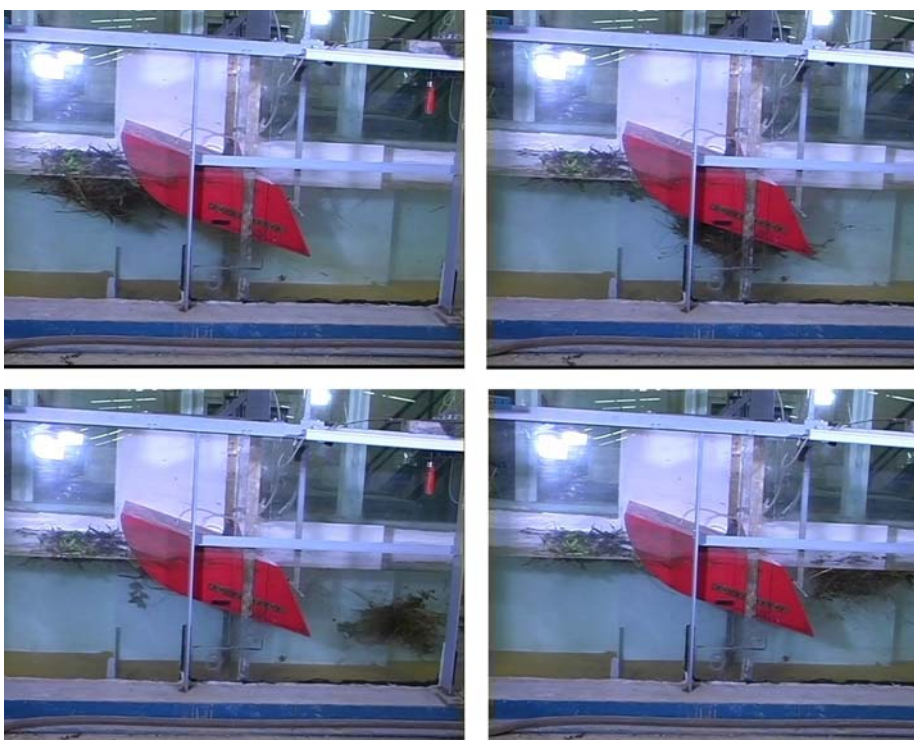


Abbildung 4.55: Sequenzen der Geschwemmseldrift bei einer Spaltweite $s_N = 32$ cm und einer Klappenneigung von 17°

Bei keinem Versuch kam es zu einer dauerhaften 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 von Geschwemmsel kommen kann (Abbildung 4.56). Im Extremfall könnte dies zu einem Festsitzen der Klappe führen.



Abbildung 4.56: Gräser im Spalt (links), konstruktive Optimierung mittels Bürste (rechts).

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. Der Eintrag von Gräsern und Geschwemmsel in den Spalt kann wirkungsvoll durch eine auf den Klappenkörper aufgebrachte Bürste verhindert werden, die den Spaltbereich bis zur Wand abdeckt. Die Reibungsverluste dieser Maßnahme sind derart gering, dass es zu keiner Beeinflussung der Drehbewegung der Schwingklappe kommt.

Sollte es im Praxiseinsatz dennoch zu einer Verlegung des Spaltes zwischen der seitlichen Führung und des Klappenkörpers kommen, so stellt sich die Frage, ob die Schwingklappe sich trotzdem *Freischwingen* kann. Kommt es auf Grund einer Verklausung des Spaltes zu einer Verhinderung der Drehbewegung, so werden bei einem weiteren Anstieg des Oberwasserstandes und damit einhergehenden weiteren Eintauchend des Klappenkörpers zusätzliche Auftriebskräfte erzeugt. Hierdurch entsteht ein Moment, welches die Klappe in die Gleichgewichtslage zurück zu stellen versucht. Die im Rahmen der Modellversuche ermittelten Rückstellmomente sind in Abbildung 4.57 aufgetragen.

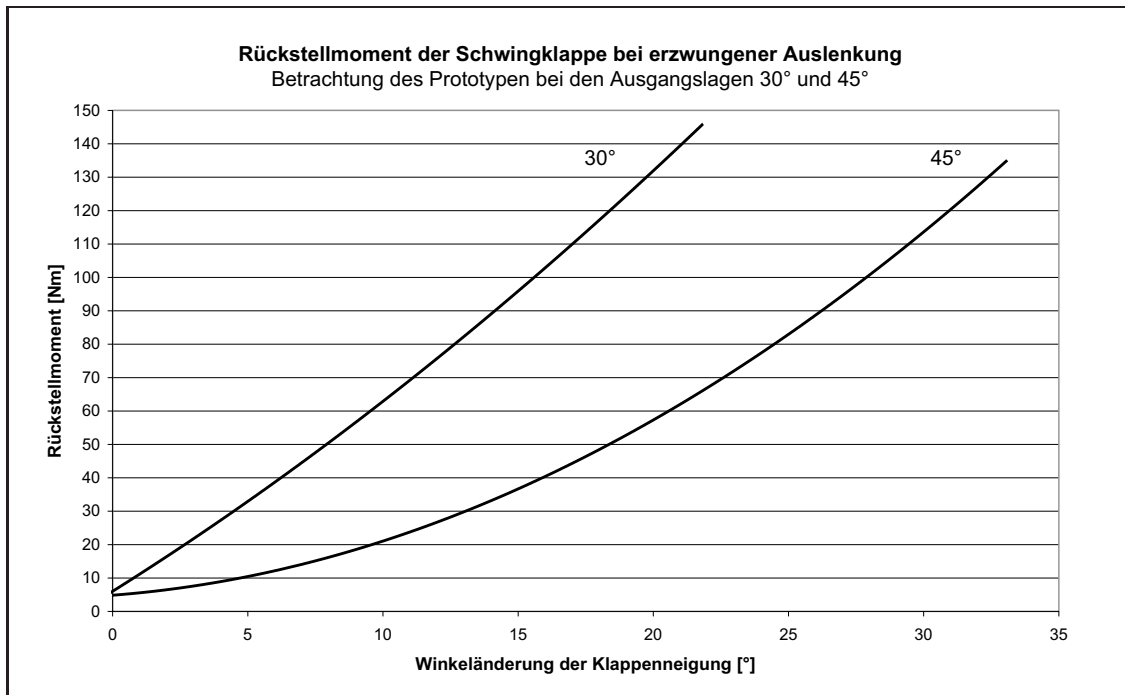


Abbildung 4.57: Rückstellverhalten der Schwingklappe, Vergleich der Ausgangslagen 30° und 45°

Geht man z.B. von einer vollständigen Verklausung des Spaltes zwischen dem Klappenkörper und der seitlichen Führung im vorderen Bereich der Klappe aus (vgl. Abbildung 4.56, links), so ergeben sich die in Tabelle 4.9 dargestellten Rückstellkräfte. Es wurde die Annahme getroffen, dass die Drehbewegung vollständig verhindert wird und dass sich eine *Fehlstellung* in der Klappenneigung von 20° einstellt. Hydraulisch führt dies noch nicht zu einem Überströmen der Schwingklappe.

Tabelle 4.9: Rückstellkraft bei einer Fehlstellung der Schwingklappe von 20° in Folge einer vollständigen Verklausung im vorderen Klappenbereich

Ausgangslage	Rückstellkraft
30°	28 kg
45°	13 kg

Zum Vergleich: Bei den in der Abwassertechnik zum Einsatz kommenden schwimmergesteuerten Schiebern werden in der Regel Auftriebskräfte in der Größenordnung von ca. 100 kg angesetzt, um eine sichere Funktion der Armatur zu gewährleisten. Mit dieser Kraft muss die Reibung in der Lagernut und in der Umlenkmechanik überwunden werden. Darüber hinaus muss auch noch eine gewisse Reserve für Verklausungen vorgehalten werden.

Das System der Schwingklappe weist nur im Bereich der Achse Reibungen auf, so dass die in Tabelle 4.9 aufgetragenen Kräfte genügend Reserven hinsichtlich einer Verklausung beinhalten.

4.4.2 Geschiebetrieb

Im Falle eines Hochwasserereignisses kommt es auf Grund der hohen Fließgeschwindigkeiten zu einer hydraulischen Belastung der Gewässersohle. Bei anlaufender Hochwasserwelle kann davon ausgegangen werden, dass die durch die Strömung erzeugte Schubspannung an der Sohle

$$\tau_0 = \rho_W \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I_S \quad (4.29)$$

die kritische Schubspannung

$$\tau_{crit} = Fr_{crit}^* \cdot (\rho_F - \rho_W) \cdot g \cdot d_m \quad (4.30)$$

überschreitet und Sohlmaterial in Bewegung gerät. Bezogen auf das Durchlassbauwerk ist dieser Prozess zu Beginn einer Hochwasserwelle relevant, da hier auf Grund der geringen Stauhöhen im Retentionsraum die Fließgeschwindigkeiten sehr hoch sind. Bei gefülltem Retentionsraum ist der Geschiebe- und Schwebstofftransport eingeschränkt bzw. unterbrochen und es kommt zu Sedimentationsprozessen. Die Ablagerungen werden auch im Falle der Entleerung des Retentionsraumes häufig nicht remobilisiert. Durch den Einstau des HRB wird ein Teil der in der Hochwasserwelle mitgeführten Feststoffe im Bereich der Stauwurzel abgelagert [121].

In einer weiteren Versuchsreihe zur Betriebssicherheit wurde daher der Einfluss von Geschiebetrieb auf die Funktion der Schwingklappe untersucht. Hierzu wurde die Sohle der Versuchsrinne mit einer 20 cm starken, natürlichen Sohlaufgabe versehen.

Die Zusammensetzung der einzelnen Kornfraktionen einer natürlichen Sohle hängt von einer Vielzahl von Parametern ab. Je nach Beschaffenheit des Einzugsgebietes und der hydraulischen Kenngröße, kann in der Natur eine große Variation dokumentiert werden. Abbildung 4.58 zeigt einen Überblick der Sohlbeschaffenheit im Oberwasser einiger Hochwasserrückhaltebecken im Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach. Deutlich zu erkennen ist dabei, dass neben den feinen Fraktionen auch sehr große Einzelsteine mit einer Kantenlänge von bis zu 20 cm vorhanden sind.



Abbildung 4.58: Sohlbeschaffenheit verschiedener HRB im Einzugsbegebiet Elsenz-Schwarzbach: a.) HRB Gemmingen, b.) HRB Mönchzell, c.) HRB Waldwimmersbach-Lobbach, d.) HRB Spechbach

Für die Laborversuche zum Geschiebetrieb wurde daher ein aus den Naturbeobachtungen abgeleitetes synthetisches Sohlmaterial eingesetzt. Die Kornverteilungskurve ist in Anlage A aufgetragen. Abbildung 4.59 zeigt den Versuchsaufbau mit der natürlichen Sohlauf-lage. Die Spaltweite s_{90} bezogen auf die fixierte Sohle betrug 30 cm.



Abbildung 4.59: Versuchseinrichtung mit naturähnlicher Sohlaufage (Mächtigkeit von 20 cm)



Abbildung 4.60: Versuchseinrichtung mit naturähnlicher Sohlaufage nach Einstau. Links ohne zusätzliche Steinsicherung, rechts mit verklammerter Sohle.

Bei den durchgeführten Versuchen traten trotz massiver Geschiebeumlagerungen keine Probleme bezüglich der Betriebssicherheit der Schwingklappe auf. Bei Steinen, deren Kantenlänge kleiner als die Spaltweite der Schwingklappe im aufgerichteten Zustand s_{90} ist, war das Risiko einer dauerhaften Blockade der Drehbewegung gering. Während des gesamten Aufschwimmvorganges erfuhr die Strömung zur Klappenendkante hin eine Beschleunigung, so dass kleinere Fraktionen, die einmal mobilisiert wurden auch sicher durch das Durchlassbauwerk geleitet wurden.

Von Steinen, deren Kantenlänge größer ist als die Spaltweite im aufgerichteten Zustand, geht die größte Gefahr aus. Derartige Einzelsteine werden in der Praxis zur Verbesserung der Gewässerstruktur und zur Sicherung von Bermen im Zulaufbereich von Durchlassbauwerken an HRB eingesetzt (vgl. Abbildung 4.58). Entsprechend den Ausführungen zur

Bemessung der Spaltweite bei der Schwingklappe in Kapitel 6.3 und auf Grund der hydraulischen Gegebenheiten liegen die Spaltweiten im aufgerichteten Zustand im Bereich > 25 cm. Gemäß den Technischen Lieferbedingungen für Wasserbausteine (TLW) geht die größte Gefahr demnach von Steinen der Klasse $LMB_{5/40}$ und größer aus, deren Gewicht im Bereich von mehr als 40 kg liegt. Peterka (1964) hat sich im Rahmen seiner Untersuchungen zu Tosbecken auch mit der Dimensionierung von Steinschüttungen beschäftigt. Demnach werden Steine mit einem Gewicht von 40 kg erst ab einer Sohlgeschwindigkeit von mehr als 3,0 m/s mobilisiert.

Geht man von einer logarithmischen Geschwindigkeitsverteilung in der Anströmung der Schwingklappe aus, so ist die Geschwindigkeit in Sohlhöhe geringer als die mittlere Fließgeschwindigkeit. Mit den Ansatz der *sicheren Seite* kann die Sohlgeschwindigkeit folglich durch die mittlere Fließgeschwindigkeit ersetzt werden.

Wie in Kapitel 4.2.1 dargestellt, kann der Abfluss unter einem Schütz wie folgt berechnet werden:

$$Q = C_Q \cdot \sqrt{2g \cdot y_0} \cdot s \cdot B \quad (4.31)$$

Über die Anwendung der Kontinuitätsbedingung $Q = v \cdot A$ ergibt sich die mittlere Fließgeschwindigkeit an der Klappenendkante folglich zu

$$v_m = C_q \cdot \sqrt{2g \cdot y_0} \quad (4.32)$$

und nach der Wassertiefe umgeformt

$$y_0 = \frac{v^2}{C_q \cdot 2g} \quad (4.33)$$

Die Versuche zum Abflussbeiwert der Schwingklappe während des Aufschwimmvorganges haben ergeben, dass der Abflussbeiwert C_q bei einer Neigung von 50° mit 0,4 sein Maximum hat (vgl. Abbildung 4.15). Mit dieser vereinfachten Betrachtung kann aufgezeigt werden, dass erst bei Potentialunterschieden zwischen Ober- und Unterwasser von mehr als 1,1 m die für die Betriebssicherheit der Schwingklappe relevanten Einzelsteine in Bewegung versetzt werden. Im Rahmen einer Risikobetrachtung stellen auch größere Einzelsteine bei einer Schwingklappe mit einer minimalen Spaltweite von $s_{90} = 25$ cm kein signifikantes Risiko dar.

4.4.3 Eis

Bezogen auf die Betriebssicherheit eines Schützes oder einer Klappe stellt die Bildung von Eis eine Gefahr für die Funktionsfähigkeit dar. In Folge von Eisdruck oder Eisstoß kann es zu einer erhöhten statischen Belastung der Schütztafel und der Tragkonstruktion kommen. Die für der Dimensionierung der Schützanlage anzusetzenden Kräfte aus dem Eisdruck sind in der DIN 19704 geregelt. Unterschieden wird dabei nach Gewässern mit mäßiger und Gewässern mit starker Eisbildung. Je nach konstruktiven Element wird die Eislast als

Flächenlast oder als Linienlast angesetzt. Für Gewässer mit mäßiger Eisbildung wird für die Dimensionierung der Stauwand eine Eisdecke mit einer Mächtigkeit von weniger als 30 cm beispielsweise durch einen gleichmäßigen Flächendruck von $p_e = 20 \text{ kN/m}^2$ abgebildet.

Wickert und Schmaußer (1971) empfehlen bei unterströmen Schützen zusätzlich zu den hydrodynamischen Kräften eine Linienlast an der Konstruktionsunterkante anzusetzen, die den Aufprall von Eisschollen abbildet. Zusätzlich sollte auch der Auftrieb von Eisschollen, die sich an der Tragkonstruktion verfangen haben, bei der Dimensionierung eines Schützes beachtet werden. In der DIN 19704 finden sich hierzu jedoch keine konkreten Angaben. Interessant ist hier ein Blick in das benachbarte Ausland. In Schweden rechnet man bei angefrorenem Eis mit einer Mächtigkeit von 35 cm bis 50 cm und steigendem Wasser mit einer vertikalen Ersatzlast von 1,5 kN/m [124].

Neben den statischen und dynamischen Kräften, die vom Eis verursacht werden, kann es in Folge der Eisbildung auch zu Einschränkungen der Funktionsweise kommen, wenn beispielsweise bewegliche Komponenten festfrieren. Die größte Gefahr geht hier von Leckwasser auf der Luftseite der Dichtung bzw. der Stauwand aus, weshalb bei der Auslegung der Schütze auf eine effektive Dichtung und einen ständigen Anpressdruck geachtet werden sollte. Je nach klimatischen Bedingungen des Anlagenstandortes kann somit der Einsatz einer Heizung erforderlich werden. In der Praxis stehen verschiedenste Heizverfahren zur Verfügung (lokale Wassererwärmung, Druckluftenteisung, Ölheizung), um exponierte und gefährdete Bauteile eisfrei zu halten [124].

Wie ist nun gemäß den grundlegenden Überlegungen die Gefährdung der Schwingklappe einzuschätzen? Bezüglich der durch Eisdruck oder Eisstoß verursachten Kräfte kann bei der Schwingklappe keine große Gefährdung erkannt werden. In der Phase des Aufrichtens würde ein eventuell auftretender Eisdruck oder Eisstoß durch eine Ausweichbewegung der Schwingklappe reduziert und der Klappenkörper entlastet. Hierdurch wird das Abflusgeschehen beeinflusst, die Betriebssicherheit der Anlage ist jedoch nicht gefährdet. Bei höheren Wasserständen im Retentionsraum liegt die Schwingklappe fest an der Stauwand an, so dass eine Beeinflussung des Momentengleichgewichtes auf Grund der möglicherweise zusätzlich wirkenden Eiskräfte nicht gegeben ist. Wegen der glatten Oberfläche der Stauhaut und der verkleideten Tragkonstruktion ist auch das Risiko einer Eisbildung auf der Stauhaut, die einen Einfluss auf das Auftriebsverhalten der Schwingklappe hat, minimiert.

Im Zusammenhang mit Eisdruck und Eisstoß ist ferner zu beachten, dass für die Schwingklappe als Regulierorgan eines Hochwasserrückhaltebeckens im Zuge des Praxistransfers ein Rechenkonzept erarbeitet wurde (vgl. Kapitel 5.1.1). Hierdurch kann eine Belastung des Klappenkörpers durch Eisschollen wirkungsvoll verhindert werden. Die langjährigen Betriebserfahrungen des Zweckverbandes Hochwasserschutz Elsenz-Schwarzbach bestätigen die Argumentation, wonach Eisschollen analog zu Treibholz anzusehen sind und somit durch den Rechen wirkungsvoll vom Regulierorgan ferngehalten werden können.

Um das Gefahrenpotential einer Vereisung der Schwingklappe weitergehend zu diskutieren, müssen die relevanten Randbedingungen genauer betrachtet werden. Zuerst muss festgehalten werden, dass die Schwingklappe als Regulierorgan gemäß den Ausführungen in Kapitel 2.1 gemäß DIN 19700 für sehr kleine und kleine HRB vorgesehen ist. Demzufolge sind auch die Einzugsgebietsgrößen klein. In kleinen Einzugsgebieten sind Hochwasserereignisse meist die Folge von lokalen, kurzzeitigen Starkregenereignissen oder von schlagartig einsetzender Schneeschmelze in Kombination mit länger anhaltendem Regen. Auch hier zeigen

die Betriebserfahrungen des Zweckverbandes Hochwasserschutz Elsenz-Schwarzbach, dass die Hochwasserereignisse gehäuft im Spätwinter und im Sommer auftreten.

Eine Vereisung des Spaltes zwischen Klappenkörper und Führungswand ist nur dann zu befürchten, wenn die Wassertemperatur nahe dem Gefrierpunkt liegt. Im Zusammenhang mit der hydraulischen Überprüfung der Pilotanlage der Schwingklappe an der Pfinz wurden auch die Wassertemperatur der Pfinz im Winterhalbjahr stichprobenartig bestimmt (vgl. Kapitel 7.6.2). Zusätzlich wurden auch die kontinuierlichen Temperaturmessungen der LUBW an den Gewässern Murr und Rems analysiert. Die Auswertungen hierzu sind in Anlage F enthalten.

In fließenden Gewässern kommt die Wassertemperaturen auch bei länger anhaltenden Kälteperioden jedoch selten in den Bereich des Gefrierpunktes, da in Folge der inneren und äußeren Reibung des Wassers während des Fließvorganges Energie in Wärme dissipiert. Die Übertagbarkeit der Erkenntnisse zur Wassertemperatur der Pfinz (Einzugsgebietsgröße 223 m²) kann auf andere Gewässer mit kleinen Einzugsgebieten erscheint dabei möglich.

4.4.4 Bewertung der Betriebssicherheit

Die Versuche zur Betriebssicherheit der Schwingklappe bei Geschiebe- und Geschwemmeltrieb haben gezeigt, dass eine Beeinträchtigung der Funktionsweise nicht zu erwarten ist. Das Funktionsprinzip der Schwingklappe und deren Konstruktion haben sich im Labor als robust erwiesen. Neben der hydraulischen Stabilität (vgl. Kapitel 4.2) ist auch eine Robustheit gegenüber in der Strömung mittransportierten Schwimm- und Feststoffe gegeben.

Auf Grund der bei einem Hochwasser mitgeführten großen Mengen an Geschwemmel muss dennoch bei der Schwingklappe als Regulierorgan eines Hochwasserrückhaltebeckens ein angepasstes Rechenkonzept vorgeschaltet werden. Die Ausführungen hierzu finden sich in Kapitel 5.1.1.

4.5 Betrachtungen zur Retentionsraumbewirtschaftung

Schon in der ersten Studie zur Schwingklappe kam man zu dem Ergebnis, dass neben den ökologischen und betrieblichen Vorteilen der Schwingklappe auch eine optimierte Bewirtschaftung des Retentionsraumes im Vergleich zu einer festen Blende ermöglicht wird [67]. Grundsätzlich stehen für ein Hochwasserrückhaltebecken zwei unterschiedliche Steuerungsarten zur Verfügung, die gesteuerte und die ungesteuerte Abgabe.

4.5.1 Grundlagen zur Bewirtschaftung von HRB

Von einer ungesteuerten Abgabe spricht man, wenn die Abgabe aus dem Becken über einen Grundablass mit einer konstanten Querschnittsfläche erfolgt. Die Querschnittsfläche wird bei steigendem Wasserstand im Retentionsraum nicht verändert. Die Abgabe aus dem Hochwasserrückhaltebecken ist auf Grund der veränderlichen Druckhöhe im Retentionsraum folglich eine Funktion des Wasserstandes im Retentionsraum (vgl. Abbildung 4.61, oben). Die Querschnittsfläche des Grundablasses wird in der Praxis so dimensioniert, dass

bei bordvollem Retentionsraum die Regelabgaben Q_R abgegeben wird, wodurch die Querschnittsfläche relativ klein dimensioniert werden muss. Die Regelabgabe Q_R tritt somit im Verlauf des Bemessungsereignisses nur zu dem Zeitpunkt auf, bei dem das Becken vollständig gefüllt ist und bei einem erhöhten Zufluss aus dem Gewässer, der kleiner als die Regelabgabe Q_R ist, erfolgt bereits der Beckeneinstau [44].

Bei der gesteuerten Abgabe (vgl. Abbildung 4.61, unten) wird versucht, das vorhandene Beckenvolumen optimal zu bewirtschaften. Dies wird erreicht, indem erst spät in den Ablauf eines Hochwasserereignisses eingegriffen wird. Ist der Zufluss aus dem Gewässer kleiner oder gleich groß wie die Regelabgabe, so erfolgt kein Beckeneinstau. Erst wenn der Zufluss die Regelabgabe überschreitet, setzt die Abflussdrosselung ein und das Becken wird eingestaut.

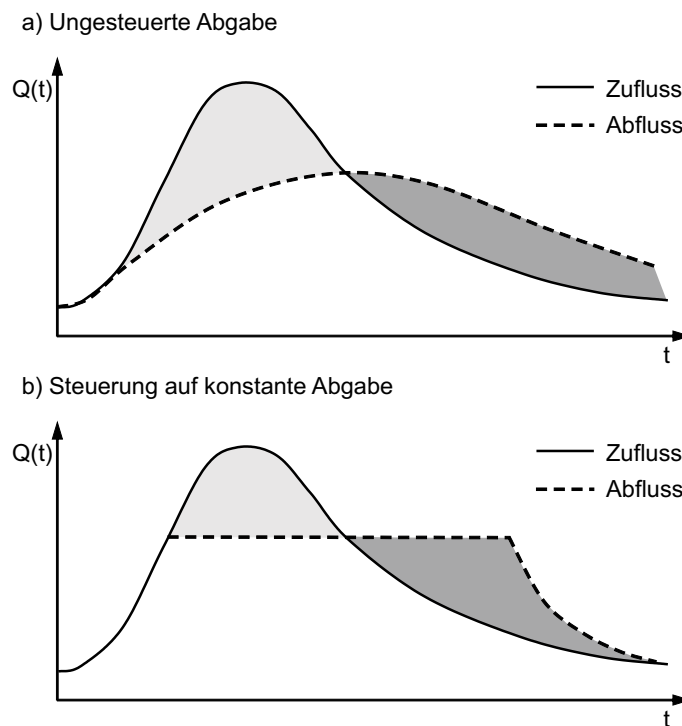


Abbildung 4.61: Einfluss einer ungesteuerten und gesteuerten Abgabe auf die Hochwasserwelle

Eine gesteuerte Abgabe erfordert zusätzliche technische Einrichtungen, da während des Beckeneinstaus der Wasserstand im Retentionsraum und damit die Druckhöhe ansteigt. Der ansteigenden Druckhöhe muss daher mit einer Verkleinerung der Querschnittsfläche des Grundablasses entgegengewirkt werden, um einen konstanten Abfluss aus dem Retentionsraum zu gewährleisten. In der Praxis wird dies mit motorgetriebenen Schützen realisiert, die von einem Regler angesteuert werden und die veränderliche Druckhöhe kompensieren.

4.5.2 Bewirtschaftungsverhalten der Schwingklappe

In Kapitel 3.2.2.2 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 der Wasserspiegellage im Retentionsraum angesehen werden. Hierdurch steigt das energetische Potential 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 unterwasserseitigen Wasserspiegel aus. Der veränderte Wasserspiegel bewirkt sowohl einen veränderten Rückstau einfluss des Abflusses unter der Schwingklappe aber auch ein verändertes 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.

Wendet man die in Kapitel 4.5.1 dargestellten Grundlagen zur Retentionsraumbewirtschaftung auf das System der Schwingklappe an, so wird ersichtlich, dass die Beckenabgabe im Falle der Schwingklappe als *gesteuerte Abgabe* anzusehen ist, da erst bei Abflüssen in der Größenordnung der Regelabgabe Q_R in das Abflussgeschehen eingegriffen wird und erst dann der Retentionsraum gefüllt wird. In den bisherigen Studien zur Schwingklappe geht man deshalb davon aus, dass das Retentionsvolumen hierdurch optimiert bewirtschaftet werden kann [48].

Im Kapitel 4.2 wurde das hydraulische Verhalten der Schwingklappe beleuchtet. Dabei hat sich gezeigt, dass die Wasserstands-Abfluss-Beziehung der unterwasserseitigen Gewässerstrecke gewisse Anforderungen erfüllen muss, um die Funktionsfähigkeit der Schwingklappe zu ermöglichen. Bei kleinen Abflüssen muss der Wasserstand im Gewässer z.B. durch einen Kontrollquerschnitt in Relation zur Achslage der Schwingklappe angehoben und fixiert werden (vgl. Kapitel 4.2.3).

Eine technische Lösung für dieses Problem wäre z.B. die Eintiefung der Sohle im Bereich des Durchlassbauwerkes, um eine tiefere Einbaulage der Schwingklappe zu ermöglichen. Diese Eintiefung steht jedoch im Widerspruch zu den ökologischen Forderungen, wonach die Charakteristik des Gewässers (Fließtiefe, Fließgeschwindigkeit, usw.) auch im Durchlassbereich erhalten bleiben muss [73].

Um die notwendige Höhe des Unterwassers sicher zu stellen, muss durch die geeignete Wahl des unterwasserseitigen Gewässerquerschnittes ein lokaler Aufstau erreicht werden (vgl. Kapitel 4.2.3). Dieser Aufstau wirkt sich jedoch auch auf den Wasserstand im Retentionsraum aus. Bei anlaufender Hochwasserwelle ist der Wasserstand bei der Schwingklappe im Retentionsbereich im Vergleich zu einem Durchlassbauwerk mit fester Blende bereits erhöht (vgl. Abbildung 4.62 rechts).

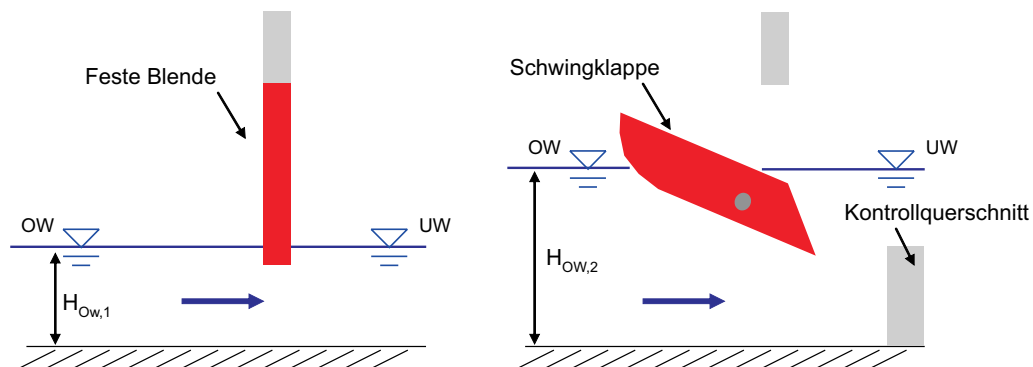


Abbildung 4.62: Einfluss der Unterwasser-Kennlinie auf die Stauraumbewirtschaftung, schematische Betrachtung der Blende (links) und der Schwingklappe (rechts).

4.5.3 Simulation der Retentionsraumbewirtschaftung

Um den 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 A26 Aglasterhausen/Rittersbach und das in Planung befindliche HRB A54 Forellenbach II im Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach herangezogen.

Die Simulation wurde mit dem Softwarepaket *Hochwasseranalyse und -berechnung (HW-Berechnung 6.0)* durchgeführt, das 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. Als Eingangsgröße für die Simulation wurden jeweils zwei Bemessungshochwasserereignisse herangezogen, $HQ_{100}/2h$ und $HQ_{100}/48h$ (vgl. Abbildung 4.65). Die beiden Ereignisse sind das Ergebnis einer Niederschlags-Abfluss-Berechnung und stellen den Abfluss im Gewässer bei einem 100-jährlichen Regenereignis mit einer Dauer von 2 h bzw. 48 h dar. Die Geometrie der festen Blenden wurde entsprechend der Dimensionen des realen bzw. des geplanten Hochwasserrückhaltebeckens übernommen. Die Abflussregelungseigenschaften der Schwingklappe wurden aus den Versuchsergebnissen zum hydraulischen Verhalten der Schwingklappe (vgl. Kapitel 4.2) übernommen und in Form einer Oberwasserstand-Abfluss-Beziehung bei der Simulation in der Programmumgebung *SEERET* berücksichtigt.

4.5.3.1 Beschreibung HRB A26 Aglasterhausen - Rittersbach

Bei dieser Hochwasserschutzanlage handelt es sich um ein überörtliches Hochwasserrückhaltebecken im Einzugsgebiet Elsenz/Schwarzbach, das für einen 100-jährlichen Hochwasserschutz dimensioniert ist. Mit dem Speicherinhalt von 46.000 m³ wird der Abfluss bei einem Starkregen im 3,30 km² großen Einzugsgebiet von bisher 2,80 m³/s auf 0,97 m³/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 wurde im Frühjahr 2005 fertig gestellt. Die Lage des HRB A 26 ist in Abbildung 4.63 eingetragen, Abbildung 4.64 zeigt eine Detailaufnahme des Durchlassbauwerkes.



Abbildung 4.63: Lage des HRB A 26 Aglasterhausen - Rittersbach im Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach.



Abbildung 4.64: Durchlassbauwerk des HRB A 26 Aglasterhausen - Rittersbach im Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach, Blick von Oberstrom.

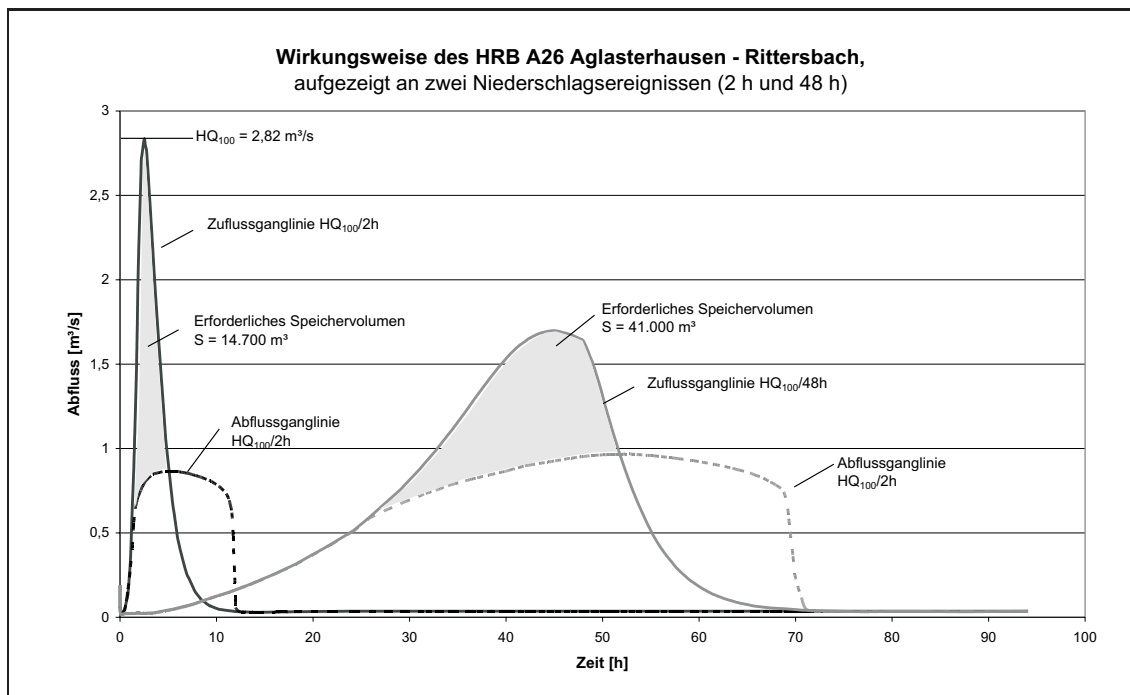


Abbildung 4.65: Wirkungsweise des HRB A26 Aglasterhausen - Rittersbach, Datenquelle: [127]

4.5.3.2 Beschreibung HRB A 56 Forellenbach II

Das geplante HRB A54 Forellenbach II in Reichartshausen (Rhein-Neckar-Kreis) hat eine Dammhöhe von 2,5 m. Die Hochwasserentlastungsanlage ist als überströmbarer Damm realisiert. Mit dem Speichereinhalt von 30.000 m³ wird der Abfluss im Falle des HQ_{100} aus dem 9,09 km² großen Einzugsgebiet von bisher 11,66 m³/s auf 4,97 m³/s gedrosselt. In der Planung und im Flussgebietsmodell ist das HRB als ungesteuertes Becken ausgewiesen. Abbildung 4.66 zeigt die projektierte Lage. Nach Auskunft des Zweckverbandes Hochwasserschutz Elsenz-Schwarzbach ist der weitere Zeitplan für die Umsetzung der Baumaßnahme mit Stand Januar 2010 offen.

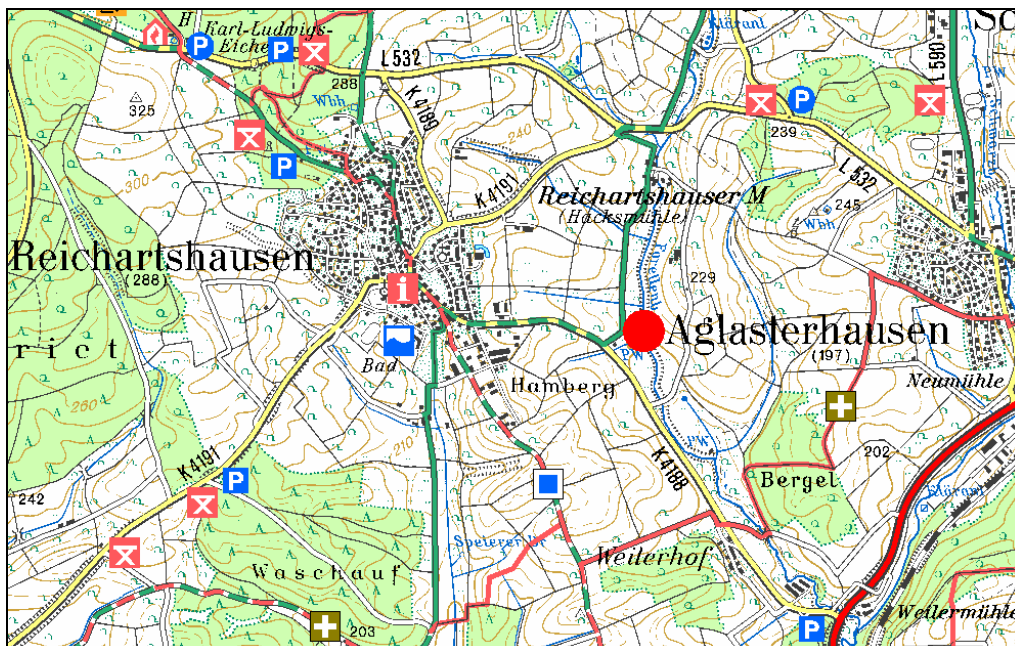


Abbildung 4.66: Lage des HRB A54 Forellenbach II, Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach

4.5.4 Diskussion der Ergebnisse

Die ausführlichen Ergebnisse der Simulationen zum Betrieb der untersuchten Hochwasserrückhaltebecken und der Vergleich zwischen dem Verhalten einer festen Blende und der Schwingklappe sind in Anhang B dargestellt. Abbildung 4.67 zeigt exemplarisch den Verlauf der simulierten Abflussganglinien am HRB A26 für zwei unterschiedliche Abflussereignisse jeweils für eine feste Blende und die Schwingklappe.

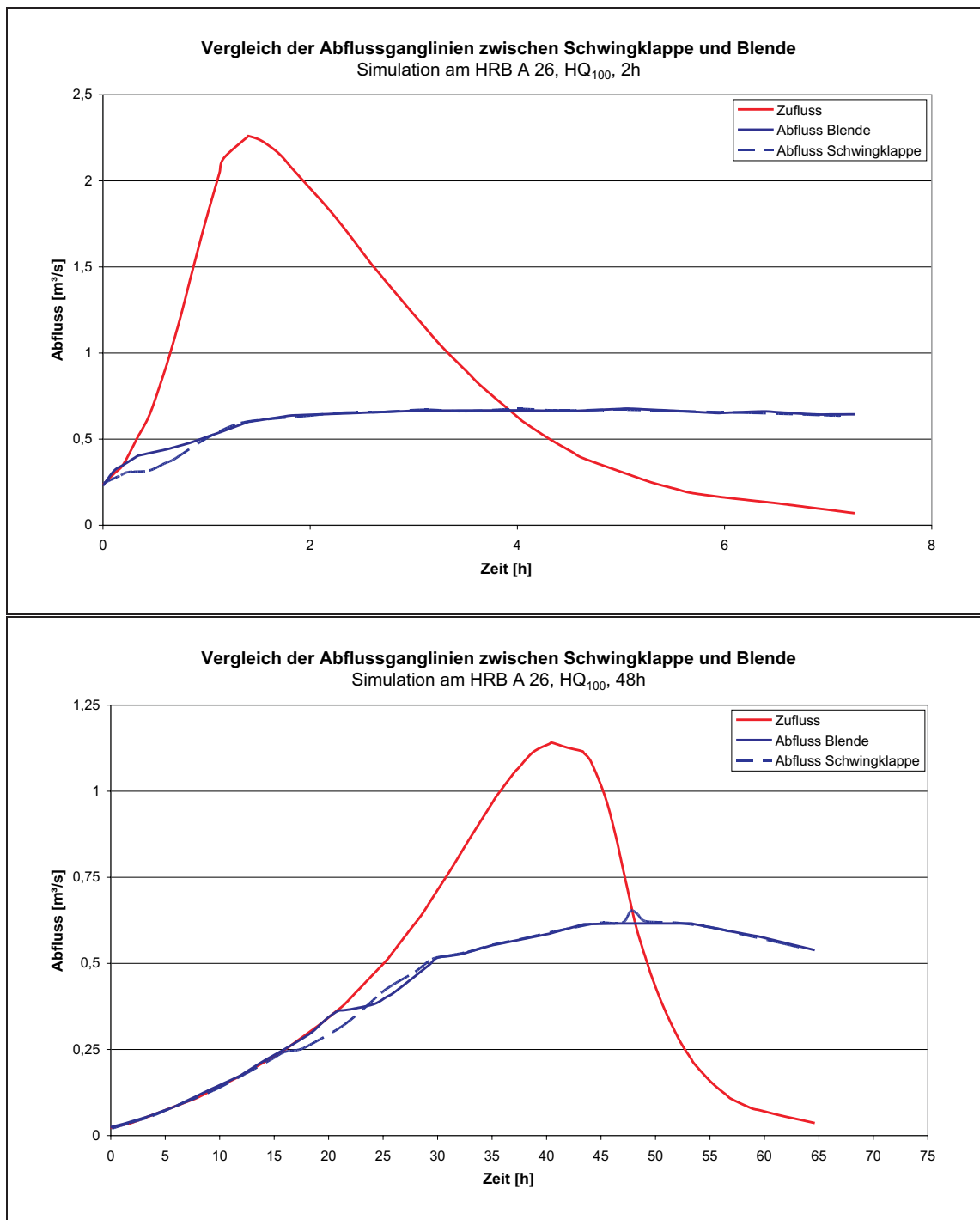


Abbildung 4.67: Vergleich der simulierten Abflussganglinien für das HRB A26

Die Ergebnisse der Simulation zum HRB A26 in Abbildung 4.67 zeigt deutlich, dass durch die in Kapitel 4.5.2 beschriebene Anordnung eines Kontrollquerschnittes unterstrom der Schwingklappe und dem damit verbundenen erhöhten Unterwasserstand bei Niedrigwasser die Vorteile der Schwingklappe hinsichtlich der Bewirtschaftung des Stauraumes aufgebraucht werden. Der Verlauf der Abflussganglinien ist bei der Schwingklappe und der Blende von der Charakteristik her gleich. Lediglich zu Beginn des Einstaus zeigen sich kleinere Unterschiede im Abflussverhalten, wobei es hier bei der Schwingklappe sogar noch zu einem früheren Eingreifen in das Abflussgeschehen als bei der festen Blende kommt.

Der erhöhte Unterwasserstand wirkt sich bei einer Erhöhung des Zuflusses bis in den Retentionsraum aus, so dass es unter diesen Bedingungen auch bei der Schwingklappe zu einem frühzeitigen Eingriff in das Abflussgeschehen kommt. Das verfrühte Eingreifen führt in der Folge zu einem frühzeitigem Einstau und damit zu einer nicht optimalen Bewirtschaftung des Retentionsvolumens.

Auch für das HRB A54 Forellenbach II im Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach wurde eine Simulation durchgeführt, um in gleicher Weise die Wirkungsweise der Schwingklappe im Vergleich zu einer Blende zu untersuchen. Beispielhaft sind die Ergebnisse für zwei Abflussereignisse in Abbildung 4.68 aufgetragen.

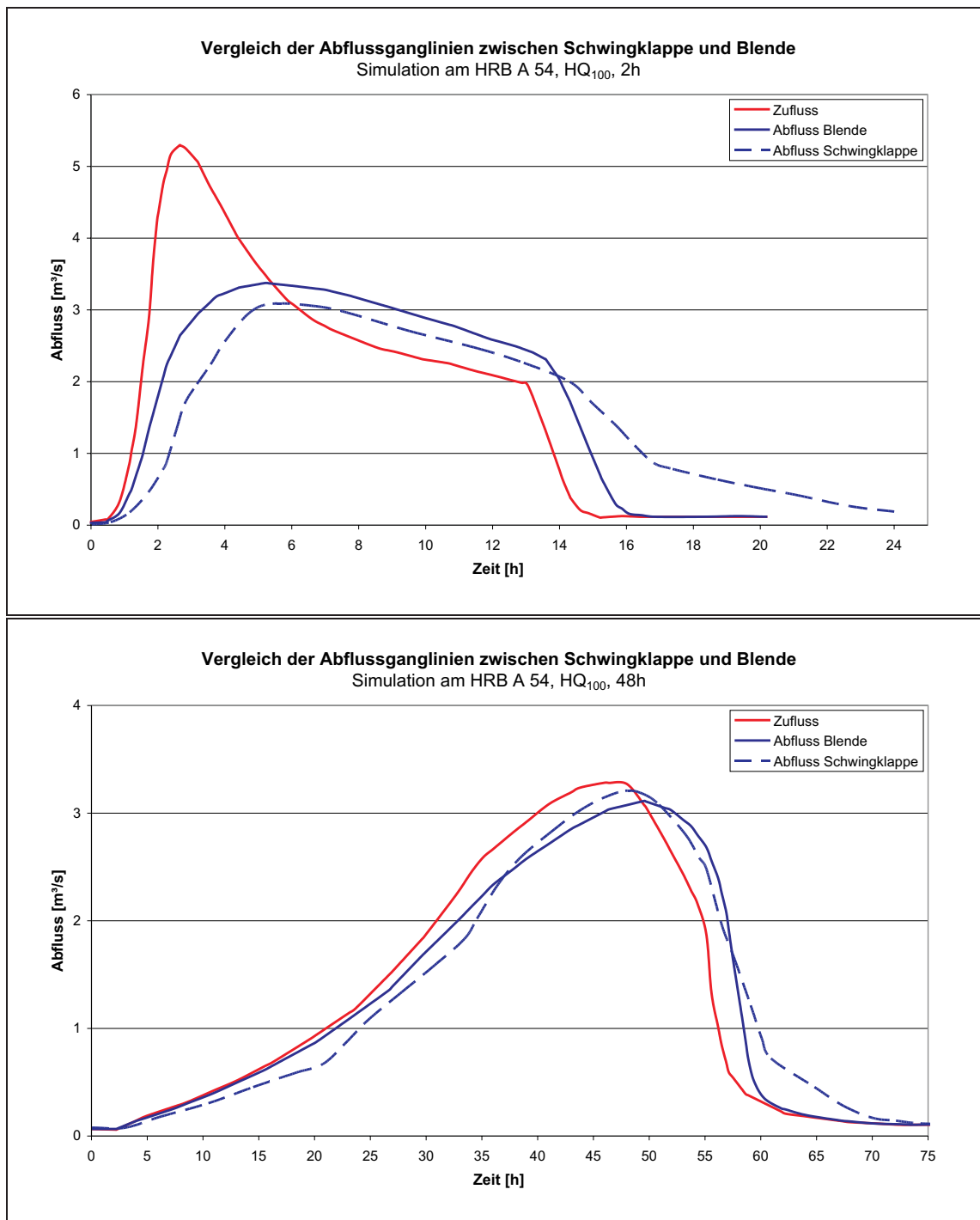


Abbildung 4.68: Vergleich der simulierten Abflussganglinien für das HRB A54

Auch die Ergebnisse zu den Untersuchungen zum HRB A54 Forellenbach II zeigen keine größeren Unterschiede in der Charakteristik der Abflussganglinien zwischen den beiden Regulierorganen. Im Vergleich zu den Simulationen für das HRB A26 fällt auf, dass die Abweichungen zwischen den Kurven generell größer sind. Die Ursache hierfür liegt in der Definition der Randbedingungen für die Simulation. Um die Schwingklappe an das jeweils zu simulierende HRB anzupassen, müssen die Randbedingungen aus den Versuchen (Spaltbreite, Breite des Durchlasses, Achslage, usw.) solange variiert werden, bis eine gute Übereinstimmung für den Scheitelwert der abfließenden Hochwasserwelle vorliegt. In diesem Falle hat die Schwingklappe ihren oberen Anschlag eingenommen (Klappenneigung 90°) und ist aus hydraulischer Sicht äquivalent zu einer festen Blende. Im Falle des HRB A54 ist diese zeitaufwändige Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten frühzeitig abgebrochen worden. Die Ergebnisse der Simulation bestätigen dennoch die Aussagen zur Retentionsraumbewirtschaftung, wonach die Schwingklappe im Vergleich zur Blende keine wesentlichen Vorteile besitzt.

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. Daraus wurde die Schlussfolgerung abgeleitet, dass die Schwingklappe zu einer optimierten Bewirtschaftung des Retentionsraumes beitragen kann, da erst bei Abflüssen in der Größenordnung der Regelabgabe Wasser zurückgehalten wird. Diese Überlegungen konnten mit der Simulation mit dem Softwarepaket *SEERET* nicht bestätigt werden. Der bei der Schwingklappe erforderliche erhöhte Unterwasserstand braucht den Vorteil des späten Eingreifens in die Abflussdrosselung gegenüber einer festen Blende vollständig auf. Andere technische Lösungen zur Erfüllung der Anforderungen an die Unterwasser-Randbedingung (z.B. Eintiefung des Gewässers im Bereich des Durchlassbauwerkes) stellen nach derzeitigem Wissensstand auf Grund der ökologischen Probleme keine Alternative dar.

5 Anwendungsmöglichkeiten der Schwingklappe

Alle bisherigen Studien zur Schwingklappe (vgl. Kapitel 2.1) zielten auf einen Einsatz im Durchlassbauwerk eines Hochwasserrückhaltebeckens ab. Aus diesem Grund besitzen die in Kapitel 4 dargestellten Ergebnisse teilweise einen Fokus auf diesen Anwendungsfall.

Das Grundkonzept der Schwingklappe zielt darauf ab, die ökologische Durchgängigkeit eines Hochwasserrückhaltebeckens herzustellen. Hierzu ist es nötig, neben dem Regulierorgan auch sämtliche andere Komponenten hinsichtlich der ökologischen Anforderungen zu optimieren. Im ersten Teil dieses Kapitels wird ein ökologisch angepasstes Hochwasserrückhaltebecken mit einer Schwingklappe vorgestellt. Im zweiten Teil folgt ein Ausblick auf weiterführende, potentielle Einsatzbereiche des Systems der Schwingklappe.

5.1 Ökologisch angepasstes HRB mit Schwingklappe

Westrich et al. (2006) hat im Rahmen eines vom Land Baden-Württemberg geförderten Forschungsvorhabens 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 [73]. Im Rahmen der Arbeiten zur Schwingklappe wurden insgesamt 33 Hochwasserrückhaltebecken in unterschiedlichen Einzugsgebieten mit unterschiedlichen Durchlasstypen besichtigt. In Anlage C sind die begutachteten HRB aufgetragen.

Bei der Bewertung der ökologischen Durchgängigkeit fällt immer wieder auf, dass nicht der Grundtyp (offenes oder geschlossenes Bauwerk, Art der Durchflussregelung, mit oder ohne durchgehende Uferberme) als Hauptursache für die Behinderung der Durchgängigkeit angesehen werden kann. Oft sind Details der Anlage ungünstig ausgeführt und verschlechtern unnötigerweise die laterale Durchgängigkeit. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch der Grundgedanke, dass der für die Durchwanderbarkeit ungünstigste Bereich eines Durchlassbauwerkes über die Gesamtfunktionalität entscheidet. An welcher Stelle die Längsdurchgängigkeit für die aquatische, terrestrische und amphibische Fauna unterbrochen ist, spielt keine Rolle. Konstruktive, betriebliche oder finanzielle Gründe für die gewählte, ungünstige Ausführung konnte oft nicht erkannt werden. Beispielfhaft sei hier auf Abbildung 5.1 verwiesen.

Aufbauend auf den Untersuchungen und Bewertungen von Hochwasserrückhaltebecken von Westrich et al. (2006) wurde im Rahmen der Untersuchungen zur Schwingklappe ein so genannter Bauweisenkatalog erstellt. Unterschieden nach Einlaufbereich, Durchlass und Auslaufbereich werden in der Praxis angewandte Bauweisen vorgestellt und ökologisch bewertet. Die Bewertungen stützten sich dabei auf die Erkenntnisse aus dem Lebensraumkatalog ([121]) sowie auf die Ergebnisse der Laboruntersuchungen [9]. Die konstruktive Funktion der Bauweise bzw. des Bauteils wird erklärt und Verbesserungsmöglichkeiten werden aufgezeigt. Der Bauweisenkatalog ist als Anlage dem Bericht von Bernhart et al. (2009) beigefügt.



Abbildung 5.1: Links: hochliegender Steuerschieber/Ökoschieber mit Sohlstufe behindert die Durchwanderbarkeit auf der Berme; Rechts: Rechen oberstrom der Anlage ohne durchgängige Uferberme behindert die terrestrische Durchgängigkeit

Die im Zusammenhang mit den Arbeiten am Bauweisenkatalog gewonnenen Erkenntnisse sind in die Konzeption einer Gesamtanlage eines HRB mit einer Schwingklappe als Regulierorgan eingeflossen. Im Folgenden werden die einzelnen Bauteile und Bereiche des entwickelten, ökologisch angepassten Durchlassbauwerkes näher beschrieben.



Abbildung 5.2: Anschauungsmodell einer Gesamtanlage mit Schwingklappe

5.1.1 Rechenkonzept

Hochwasserereignisse haben auf Grund ihrer Abflussdynamik 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 diesen extremen Ereignissen sichergestellt sein.

Das in der Hochwasserwelle mitgeführte Treibgut und Geschwemmsel kann die Funktion eines Regulierorganes einschränken oder gar verhindern. Es ist daher dringend erforderlich, ein geeignetes Rechenkonzept zu entwickeln und zu implementieren. Ein allgemein gültiges, einheitliches Rechenkonzept ist dabei auf Grund der unterschiedlichen Ausprägung der Hochwasserrückhaltebecken und ihrer Standorte nicht möglich. Abhängig von der Charakteristik des Einzugsgebietes, von der Hydrologie und vom gewählten Regulierorgan lassen sich unterschiedliche Anforderungen an eine Rechenanlage ableiten, die in der Praxis zu mannigfachen Bauweisen führen.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Schwingklappe wurden insgesamt 33 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 nach DIN 19700 kleine und mittlere Becken, die meist mit festen Kontrollorganen versehen sind.

Bei der Analyse der umgesetzten Rechenkonzepte zeigte sich, dass bei den meisten Hochwasserrückhaltebecken eine zweistufige Rechenanlage vorhanden ist. Ein Grobrechen aus Palisaden (lichte Weiten 25 cm bis 50 cm) im Abstand von ca. 20 m bis 50 m vor dem Durchlassbauwerk 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. Bei den Ortsbegehungen wurde festgestellt, dass selbst bei ähnlichen hydraulischen und hydrologischen Randbedingungen z.B. die Geometrie der eingesetzten Rechenstäbe sich stark voneinander unterscheiden. Die zwei in Abbildung 5.3 aufgeführten Beispiele verdeutlichen diesen Sachverhalt. In Gesprächen mit Betreibern wurde hierzu angemerkt, dass der gewählte Rechenabstand vor allem vom Planungsbüro und der Genehmigungsbehörde abhängt.



Abbildung 5.3: Unterschiedliche Rechenkonstruktionen in der Praxis, Stababstand 12 cm (links), Stababstand 30 cm (rechts).

Für die Schwingklappe als Regulierorgan und damit zentralem Bauteil einer wasserbaulichen Anlage musste ein entsprechendes Rechenkonzept erarbeitet werden. In einer Kooperation mit dem Zweckverband Hochwasserschutz Elsenz-Schwarzbach wurden dabei die betrieblichen Erfahrungen der in der Praxis angewandten Rechenkonzepte aufgearbeitet. Neben den betrieblichen und hydraulischen Aspekten wurden bei der Erarbeitung des Rechenkonzeptes auch die ökologischen Belange beachtet.

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 5.4). Eine Adaption des erarbeiteten Rechenkonzeptes auf andere Hochwasserrückhaltebecken mit ähnlichen hydraulischen und hydrologischen Randbedingungen ist möglich.

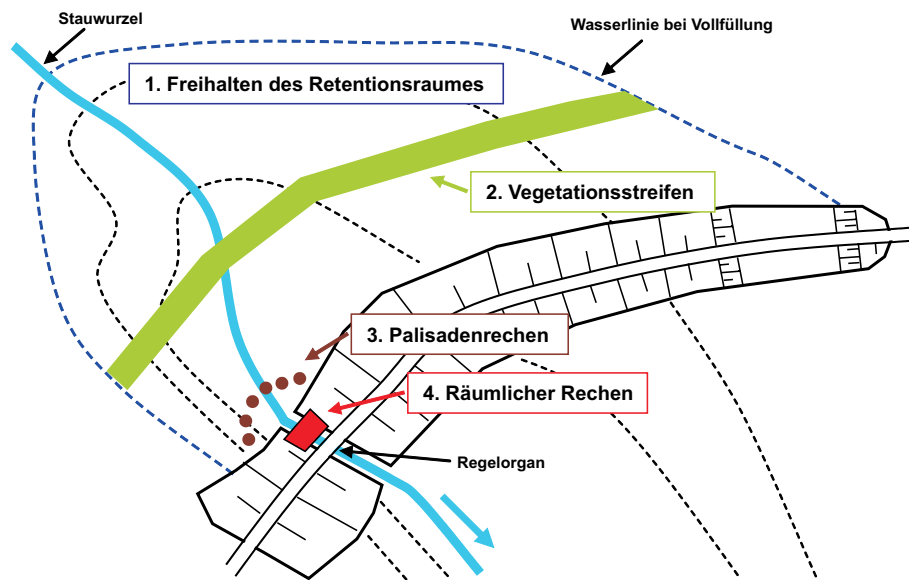


Abbildung 5.4: Systemskizze des für die Schwingklappe erarbeiteten Rechenkonzeptes.

Rechenkonzept Stufe 1: Pflege / Unterhaltung des Retentionsraumes

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. Bei der Besichtigung der 33 HRB konnte immer wieder festgestellt werden, dass in den Retentionsräumen z.B. Holzlager vorhanden sind (vgl. Abbildung 5.5).

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 5.5: Beispiele für nicht freigehaltene Retentionsräume; Holzlager (links) und landwirtschaftliches Gerät bei Hochwasser (rechts) [128].

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 des Mähgutes kommen und sich ein massiver Geschwemmselteppich bilden. Hieraus können betriebliche Probleme am Rechen und an der Hochwasserentlastungseinrichtungen resultieren (vgl. Schadensfallbeschreibung auf Seite 129).

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 Mähgutes ausgeht, könnte so auf ein zeitliches Minimum beschränkt werden. Im Rahmen der Pachtverträge und Bewirtschaftungspläne sollte überprüft werden, inwieweit eine Silage möglich ist und vertraglich fixiert werden kann. Es sollte auch geprüft werden, ob eine komplette Aufgabe der landwirtschaftlichen Nutzung im Retentionsraum in Frage kommt.

Rechenkonzept Stufe 2: Anordnung von Vegetationsstreifen

Am 21. März 2002 kam es bei einem Hochwasserereignis im Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach am HRB Raußmühle in Eppingen zu einem Schaden an der Steinschüttung der Hochwasserentlastungsanlage. Aus diesem Ereignis lassen sich Rückschlüsse für eine erfolgreiche Geschwemmselabwehr ableiten. Was war passiert?

Ergiebige und lang anhaltende Regenfälle im Kraichgau hatten zu einem Volleinstau des HRB Raußmühle und in der Folge zu einer Entlastung über die Hochwasserentlastungsanlage geführt. Die Hochwasserentlastung erfolgt beim HRB Raußmühle über einen 266 m langen überströmbaren Dammbereich. Die Gesamtlänge des Dammes beträgt 322 m, so dass

das Dammbauwerk als vollüberströmbar eingestuft werden kann. Die maximale Dammhöhe des HRB beträgt 2,60 m, das Speichervolumen 148.000 m³. Die konstante Regelabgabe von 2,33 m³/s wird mittels eines motorgetriebenen Tafelschütz mit einer lichten Öffnung von 1,20 m · 1,20 m geregelt, bei Volleinstau beträgt die Spaltweite für die Regelabgabe 0,40 m [55].

Das Einzugsgebiet des HRB Raußmühle ist durch Grünland und Ackerflächen geprägt. Während des Hochwasserereignisses am 21. März 2002 wurde aus diesen Flächen große Mengen an Mulchmaterial und Mähgut in den Retentionsraum geschwemmt. Im Zusammenhang mit dem an diesem Tag herrschenden stürmischen Windverhältnissen wurde das Mulchmaterial in Form von walzenähnlichen Gebilden in Richtung der Hochwasserentlastungsanlage geschwemmt.

Auf der linksseitigen Dammscharte hatte sich ein großer Geschwemmselteppich angelagert und die Kote der Überfallkante erhöht (vgl. Abbildung 5.6 unten). Im Nahbereich des Durchlassbauwerkes hatte sich jedoch eine Lücke in den Ablagerungen gebildet, durch die 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 weitestgehend 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 5.6 oben). Dieser wirkte wie ein vorgeschalteter Rechen und hat einen Großteil des Geschwemmsels des rechtsseitigen Beckenbereiches von der HW-Entlastungsanlage fern gehalten. Die Baumkronen dieses Vegetationsstreifens ragen bei Volleinstau ca. 1 m bis 2 m aus dem Wasser.



Abbildung 5.6: Geschwemmselanfall HRB Raußmühle beim Schadensfall im März 2002 [128].

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

- Vegetationsstreifen im Retentionsraum können wie ein Rechen wirken und Geschwemmel in großer Entfernung zum Durchlassbauwerk zurückhalten [56].
- Die Vegetationsstreifen sollten möglichst parallel zur Dammachse und talquerend angeordnet werden.
- Der seitliche Eintrag von Geschwemmel 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 erforderlichen Unterhaltung abgesehen werden.

Rechenkonzept Stufe 3: Palisadenrechen

Als dritte Stufe im vorgeschlagenen Rechenkonzept kommt ein Palisadenrechen zum Einsatz. Die in der Praxis bewährten Palisaden werden meist im Zulaufquerschnitt des Durchlassbauwerkes angeordnet und bestehen meist aus geramnten Holzpfählen mit einer lichten Weite von 30 cm bis 50 cm (vgl. Abbildung 5.7). Die Empfehlungen der LUBW (2007) sehen den Einsatz des Palisadenrechens im Bereich der Stauwurzel vor. Dies ist jedoch nur wirkungsvoll, wenn eine intensive Unterhaltung und Freihaltung des Retentionsraumes gewährleistet ist. Anderenfalls kann Geschwemmel aus dem Retentionsraum am räumlichen Rechen für betriebliche Probleme sorgen.

Die Höhe der Palisaden 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 Geschwemmel weitestgehend vom Durchlassbauwerk fern gehalten wird. Abbildung 5.8 zeigt die Wirkungsweise während eines Hochwassereignisses.



Abbildung 5.7: Palisadenrechen, HRB Raußmühle (links) und HRB Mönchzell (rechts).



Abbildung 5.8: Palisaden während eines Hochwasserereignisses, HRB Insenbach (links), HRB Oberschwarzenbach (rechts) [128].

In Niedrig- und Mittelwasserphasen kann es zu einer lokalen Verklausung des Palisadenrechens kommen. Hydraulisch wirkt der Rechen dann wie ein Absturz, was bezogen auf die ökologische Durchgängigkeit unerwünscht ist (vgl. Abbildung 5.9, links). Von baulicher Seite muss eine Möglichkeit vorgesehen werden, den Palisadenrechen maschinell zu reinigen. Dies kann z.B. mittels eines Zufahrtweges und dem Einsatz eines Traktors bewerkstelligt werden (vgl. Abbildung 5.9, rechts). Eine regelmäßige Überprüfung der Verlegung sollte in den Unterhaltungsplan aufgenommen werden.



Abbildung 5.9: Verklausung der Palisaden bei Niedrigwasser (links), Ausräumen per Traktor (rechts) [128].

Rechenkonzept Stufe 4: Räumlicher Feinrechen

Die letzte Stufe des vorgeschlagenen Rechenkonzeptes bildet ein Rechen direkt oberstrom der Schwingklappe. Der Rechen sollte als räumlicher Rechen ausgeführt werden, der an die Seitenwangen und an die Stauwand anschließt (vgl. Abbildung 5.10). 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 Teilverklauung 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. Abbildung 5.9) vermieden und der Unterhaltungsaufwand verringert werden. Die lichte Höhe darf dabei nicht größer sein als die Höhe der Öffnung unter der Schwingklappe. Die Fläche des Schlupfes sollte maximal 75 % des größten Durchmessers des nachgeschalteten Durchlassquerschnittes betragen [77]. Diese Empfehlung deckt sich auch sehr gut mit Untersuchungen zur Schwemmholzproblematik im alpinen Bereich [60]. Auch hier wird empfohlen, die lichte Weite des Rechens an die Querschnittsverhältnisse des Durchlasses anzupassen. Die lichte Öffnung des Rechens sollte demnach so gewählt werden, dass sie kleiner ist als die kürzere Kante der Öffnung. Übertragen auf den Betriebsauslass von Hochwasserrückhaltebecken entspricht dies in den meisten Fällen der Spaltweite s des Schiebers.



Abbildung 5.10: Räumlicher Feinrechen, HRB Raußmühle (links), HRB Möchzell (rechts).

Hinsichtlich der ökologischen Durchgängigkeit hat die Konstruktion des Rechens einen großen Einfluss auf die Durchwanderbarkeit sowohl der aquatischen, terrestrischen und amphibi-schen Fauna aber auch auf das Durchflugverhalten von Vögeln. Beim vorgeschlagenen räumlichen Rechen reicht, wie bereits geschildert, die Rechenunterkante nicht bis auf die Gewässersohle, so dass Sohlabstürze auf Grund einer Verlegung des Rechens verhindert werden können. Die durch eine Verlegung verursachten Sohlabstürze können leicht eine Höhensprung von 10 cm und mehr aufweisen [56], was zu einer erheblichen Verschlechterung der Durchgängigkeit für die aquatische Fauna führt.

Auch die amphibische und terrestrische Durchgängigkeit wird durch die Rechenkonstruktion beeinflusst. Durch den räumlichen Rechen mit seiner freien Querschnittsfläche im sohl-nahen Bereich wird sichergestellt, dass die Uferberme und die Wasserwechselzone nicht von dem Rechen beeinflusst wird (vgl. Abbildung 5.10) und somit auch die Durchwanderbarkeit nicht beeinflusst ist.

Durch den Einsatz eines räumlichen Rechens werden auch die Bedingungen für den Durchflug von Vögeln und Fledermäusen durch das Bauwerk verbessert. Westrich et al. (2006) haben bei den Untersuchungen und Beobachtungen an verschiedenen Hochwasserrückhaltebecken den Flug von verschiedenen Individuen dokumentiert und Kriterien für eine gute Durchgängigkeit des Luftraumes aufgestellt. Für Vögel sollte demnach die lichte Querschnittsfläche des Durchlasses mindestens $0,50 \text{ m} \cdot 1,00 \text{ m}$ betragen, für Fledermäuse werden $1,00 \text{ m} \cdot 1,50 \text{ m}$ empfohlen. Bei diesen Empfehlungen wurde nicht explizit auf die Rechenkonstruktion verwiesen, es erscheint aber angebracht die Empfehlungen für die Durchlassbauwerke auch auf die Rechen anzuwenden, da diese, je nach Stababstand, von Vögeln und Fledermäusen als monolythisch wahrgenommen werden.

Nicht zuletzt wird durch einen räumlichen Rechen der Lichteinfall in den Durchlassbereich verbessert, da ein Teil der Querschnittsfläche unverbaut bleibt. Durch die verbesserten Lichtverhältnisse werden auch die Wachstumsbedingungen für Pflanzen verbessert, so dass der Forderung nach einem weit in den Durchlassbereich hineinragenden Gehölzstreifens besser nachgekommen werden kann [121].

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 als 12 cm gewählt wird; Dies entspricht den nach DIN 18065 [20] und den Vorschriften für Sicherheit und Gesundheitsschutz VSG, auch Unfallverhütungsvorschriften genannt, geforderten Stababständen bei Geländern.

Durch das vierstufige Rechenkonzept wird die Geschwemmselbelastung der Schwingklappe weitestgehend verhindert. Mit den wasserbaulichen Versuchen zur Betriebssicherheit (vgl. Kapitel 4.4.1) konnte zusätzlich nachgewiesen werden, dass das Funktionsprinzip der Schwingklappe und deren Mechanik unanfällig gegenüber Geschwemmseltrieb ist, so dass die Betriebssicherheit der Schwingklappe mit dem erarbeiteten Rechenkonzept gewährleistet ist.

5.1.2 Einlaufbereich

Der Einlaufbereich eines Hochwasserrückhaltebeckens ergibt sich letztlich durch die Verschneidung des luftseitigen 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 kontinuierliche Querschnittseinstellung, gleichbedeutend mit einer gleichmäßigen Beschleunigung der Strömung, erzielt werden.

Aus ökologischen Gesichtspunkten sollte das Gewässer in seiner natürlichen morphologischen Struktur bis an das Regulierorgan herangeführt werden. Gewässeraufweitungen oder der Einbau einer horizontalen Sohle können 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 Lebensraum dienen.

Die Lebensraumqualität des Einlaufbereiches kann durch den Einsatz einer Natursteinmauer anstelle einer betonierten 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 bei Sonneneinstrahlung sehr stark und bilden ein eigenes Mikrohabitat. Solche künstlich geschaffenen Lebensräume sind oft nicht für den Gewässerstandort typisch, sie können jedoch wertvolle Ersatzhabitate darstellen [121]. Abbildung 5.11 zeigt beispielhaft ein Hochwasserrückhaltebecken mit einem großen Öffnungswinkel der Flügelmauern in Natursteinbauweise.



Abbildung 5.11: Blick von Unterstrom auf das Durchlassbauwerk des HRB Apfelbach

5.1.3 Sohlgestaltung im Durchlassbereich

Die Durchgängigkeit der Sohle stellt ein wichtiges Kriterium bei der Beurteilung der ökologischen Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken dar. Um für Makrozoobenthos und andere Kleinstlebewesen einen Wanderkorridor in der Sohle zu gewährleisten, sollte eine natürliche oder naturnahe Sohlaufage mit einer Mächtigkeit ca. 20 cm vorhanden sein [73].

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 entsprechend gegen Erosion gesichert werden. Bautechnisch wird dies meist mit einer fixierten oder betonierten Sohle im gesamten Durchlassbauwerk realisiert.

Neben den statischen Aspekten ist eine unveränderliche Höhenlage der Sohle auch für die Funktionsweise eines HRB von entscheidender Bedeutung. Bei der Bemessung und Dimensionierung der freien Querschnittsfläche einer festen Blende oder der Schwingklappe muss eine in ihrer Höhe unveränderliche Sohlage angenommen werden. Wie in Kapitel 4.2.1 gezeigt werden konnte, geht die lichte Spaltweite linear in die Berechnung des Abflusses unter einer Blende ein, so dass sich Veränderungen in der Sohlage signifikant auf das Bewirtschaftungsverhalten des HRB auswirken.

Aus Gründen der Betriebssicherheit besteht hingegen nicht die Notwendigkeit einer massiven Sicherung der Sohle im Durchlassbereich. Mit den Versuchen zur Geschiebeumlagerung bei Betrieb der Schwingklappe konnte gezeigt werden, dass das Funktionsprinzip der Schwingklappe unempfindlich gegenüber Sohlumlagerungen ist (vgl. Kapitel 4.4.2).



Abbildung 5.12: Abflussgeschehen unterstrom des Durchlassbauwerkes bei Hochwasser, HRB A26 Rittersbach (links), HRB M18 Mönchzell (rechts) [128]

In der Praxis stehen für diese Sohlsicherung im Bereich des Durchlasses mehrere Bauweisen zur Verfügung, die je nach Gestaltung der Flügelwände zum Einsatz kommen. Bei Durchlassbauwerken mit betonierten Flügelwänden wird aus statischen Gründen meist ein kompletter U-Querschnitt in Betonbauweise erstellt. Vor allem in den letzten Jahren sind

viele HRB in offener Bauweise mit Flügelwänden aus Blocksteinen errichtet worden. Um den Fuß der Blocksteinwand sicher vor Erosion zu schützen wird bei dieser Bauweise die Sohle aus einem vergossenem Deckwerk mit großen Einzelsteinen erstellt (vgl. Abbildung 5.13).

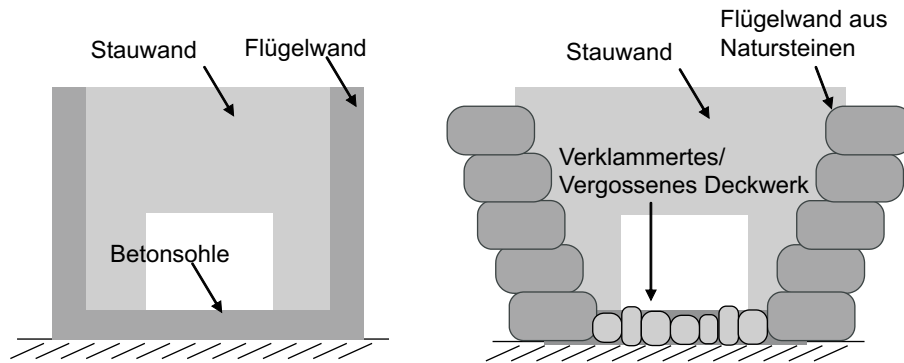


Abbildung 5.13: In der Praxis eingesetzte Sohlbauweisen im Durchlassbereich, betonierete Flügelwände (links), Flügelwände aus Blocksteinen (rechts)

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 nach Intensität und Dauer des Hochwasserereignisses wird das Sohlmaterial jedoch großflächig ausgetragen, so dass auf Basis der bisher bekannten Wiederbesiedlungsgeschwindigkeiten die biotische intakte Sohle längerfristig unterbrochen ist.

Auch aus hydraulischer Sicht ergeben sich aus der Opferschicht Probleme, da sichergestellt werden muss, dass das Sohlmaterial während des Einstaus ausgetragen wird, da es ansonsten zu veränderten Abflussbedingungen und zu einer veränderten Regelabgabe kommen kann. Angesichts der Unsicherheiten bezüglich der Konrverteilungskurve des abgelagerten Sohlmaterials und dessen Konsolidierungsgrades erscheint eine präzise Dimensionierung schwierig. Das Nichtaustragen von Sohlmaterial kann zu Beginn eines Hochwasserereignisses zu einer verminderten Abgabe und damit zu einer vorzeitigen Füllung und zu einer nicht optimierten Bewirtschaftung des Retentionsraumes führen.

In Zusammenhang mit den Laborversuchen zur Schwingklappe wurden verschiedene Konzepte zur besseren Vereinbarkeit der konkurrierenden ökologischen und hydraulischen Forderungen erarbeitet. Ausgangspunkt für die Lösungskonzepte sind die Versuche von Bernhart et al. (2009), mit denen gezeigt werden konnte, wie wichtig der Erhalt von Kiesflächen im Durchlassbereich für die Wiederbesiedelung dieses Gewässerabschnittes mit Makrozoobenthos nach einem Hochwasserereignis ist.

Für die Versuche wurde in einer Versuchsrinne naturähnliches Sohlmaterial eingebaut und mit Bachflohkrebsen besiedelt. Anschließend wurde die Sohle hydraulisch belastet. Die Fließgeschwindigkeit wurde dabei bis zur vollständigen Austragung der Sohle gesteigert. Dabei hat sich gezeigt, dass sich Bachflohkrebse an einzelnen Steinen festhalten können und somit im Strömungsschatten die große hydraulische Belastung ohne Verdriftung ins

Unterwasser überstehen. Aus diesen ersten Ergebnissen kann gefolgert werden, dass die Wiederbesiedlung der Sohle im Durchlassbereich maßgeblich beschleunigt werden kann, wenn einzelne Geschiebeinseln auch im Hochwasserfall nicht ausgetragen werden.

Die nachfolgend vorgestellten Konzepte konzentrieren sich daher auf eine Reduzierung der Wiederbesiedlungszeit. Da die Wandergeschwindigkeit der Mikroorganismen limitiert ist muss für eine beschleunigte Wiederbesiedlung folglich die Strecke zwischen der intakten Sohle und dem neu eingebrachten Sohlsubstrat verringert werden.

Ein Lösungsansatz zum Erhalt von biologisch intaktem Sohlmaterial im Durchlassbereich im Hochwasserfall ist der im Zusammenhang mit den Arbeiten zur Schwingklappe entwickelte und in Abbildung 5.14 dargestellt *Sohlstreifen*. 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 dann die Wiederbesiedlung erfolgen.



Abbildung 5.14: Blick von Unterstrom auf die seitlichen Sohlstreifen

Ein weitere möglicher Lösungsansatz stellt dar sogenannte *Sohltunnel* dar. 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 kommen kann, die jedoch nicht dem Strömungsangriff eines Hochwassers standhält. Nachteilig ist bei diesem Konzept die fehlende Lichteinfall in den Tunnel zu bewerten. Legt man jedoch die Lichtverhältnisse in einer natürlichen Sohlauflage mit einer Mächtigkeit von 20 cm zugrunde, so kann angenommen werden, dass die Verhältnisse im Sohltunnel nicht maßgeblich von den natürlichen Verhältnissen abweichen.

Eine Weiterentwicklung dieses Lösungsansatzes stellt der sogenannte *Geschiebekorridor* dar. Das Konzept entspricht weitestgehend dem Sohlentunnel. Das verbindende Element besteht hierbei 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 5.15).

Der Korridor sollte nicht geradlinig ausgebildet werden, damit es im Hochwasserfall bei den dann hohen Fließgeschwindigkeiten nicht zu einer Ausräumung des Sohlmaterials kommt. Denkbar wäre eine Anordnung von mehreren 90° Bögen. Ein Einfluss des Korridors auf die Hydraulik der Schwingklappe ist nicht zu erwarten.

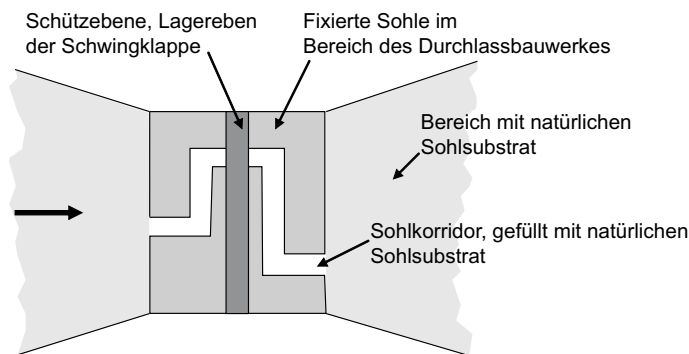


Abbildung 5.15: schematische Draufsicht auf den Geschiebekorridor

Um eine intakte Sohlaufage zu erwirken, wäre auch der Einsatz eines *Drahtgittergeflechtes* dankbar, das die Erosionsresistenz der Sohle erhöht. Westrich et al. (2004) hat eine ähnliche Bauweise für die Sicherung der luftseitigen Böschung von überströmbaren Dämmen erarbeitet. Gegenüber einer als Steinschüttung ausgeführten Böschung konnte die Widerstandsfähigkeit gegenüber einer hydraulischen Belastung entscheidend vergrößert werden.

Die hier vorgestellten Lösungskonzepte sind zum Teil auch für andere Durchlassbauwerke und Armaturen geeignet. Ein Nachweis der Wirksamkeit und der tatsächlichen Wiederbesiedelungszeit konnte auf Grund des Umfangs der hierzu nötigen Untersuchungen nicht im Rahmen der Arbeiten zur Schwingklappe erbracht werden. Die theoretischen Überlegungen zeigen jedoch ein Optimierungspotential gegenüber den heute meist gebräuchlichen Bauweisen auf.

5.1.4 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 Verschlämzung der Gewässersohle bei Niedrigwasser und der Forderung nach einer unveränderten Fließgewässercharakteristik im Durchlassbereich aus.

Nach DIN 19700-11 müssen Energieumwandlungsanlagen so ausgelegt werden, dass alle Abflüsse bis zum Bemessungsabfluss BHQ_1 schadlos für die Stauanlage abgeführt werden können. Bei größeren Abflüssen bis zum BHQ_2 muss die Tragsicherheit des Absperrbauwerkes sichergestellt sein.

Ein großer Öffnungswinkel der Flügelwände im Auslaufbereich wirkt sich neben den ökologischen Aspekten wie z.B. Lichteinfall auch positiv auf die Hydraulik aus. In Folge der Querschnittsaufweitung können sich große Wirbelzonen bilden und diese können zu einer gezielten Energieumwandlung beitragen. Auch bezüglich der Erosion von Sohlmaterial kann sich eine starke Aufweitung positiv auswirken. In Folge der starken Aufweitung des Gerinnequerschnittes kommt es zu einer Ablösung des Stahles von der Wand und es bilden sich Rücklaufzonen mit sehr geringen Fließgeschwindigkeiten, wodurch die Erosionsgefahr in den Randbereichen erheblich gemindert wird (vgl. Abbildung 5.16).

Das in Abbildung 5.12 zu sehende Abflussgeschehen im Hochwasserfall zeigt die Problemstellungen auf, die sich bedingt durch die großen Fließgeschwindigkeiten ergeben können. Der kohärente Strahl, der durch die Querschnittseinengung erzeugt wird, weitet sich im weiteren Fließverlauf nur geringfügig auf, so dass ein Bereich mit hohen Fließgeschwindigkeiten weit in den Unterwasserbereich transportiert wird. Die für die Standsicherheit des Dammes notwendigen Bauteile müssen für diese Belastung ausgelegt sein. Um auch den Unterhaltungsaufwand und die Schäden an nicht tragenden Elementen (z.B. modelliertes Gewässerbett, Uferbereich, Vegetation) im Hochwasserfall zu verringern, sollten auch hier Maßnahmen zur Erhöhung der Erosionsbeständigkeit getroffen werden. Bauweisen des naturnahen Wasserbaus eignen sich hier besonders, um den ökologischen Anforderungen und dem Landschaftsbild Rechnung zu tragen (vgl. [65]).

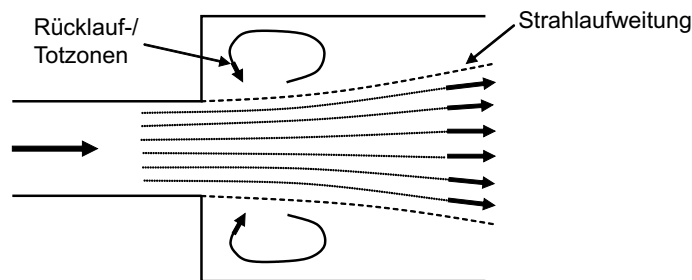


Abbildung 5.16: Strömungszustand bei plötzlicher Querschnittsaufweitung, nach [95]

Der Einfluss einer schlagartigen Querschnittsaufweitung auf das Strömungsgeschehen im Abströmbereich ist in Abbildung 5.12 deutlich zu erkennen. Beim HRB A 26 Rittersbach im Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach weitet sich der Gerinnequerschnitt unterstrom des Schiebers nicht auf, so dass hier auf einer langen Gerinnestrecke hohe Fließgeschwindigkeiten über die gesamte Gewässerbreite vorliegen. Anders sieht es im Auslaufbereich des HRB M18 Möchnzell aus. Das Durchlassbauwerk ist mit zwei Schiebern ausgestattet, wobei im Hochwasserfall ein Schieber geschlossen wird, um den Sedimentaustrag in einem Teilbereich zu verhindern. Das Gerinne weitet sich daher direkt hinter der Schützeben auf und man kann deutlich die Rückströmzone erkennen.

5.1.5 Hochwasserentlastung

Das Regulierorgan eines Hochwasserrückhaltebeckens wird so dimensioniert, dass bei Beckenvollstau die so genannte Regelabgabe Q_R durch den Betriebsauslass an die unterwasserseitige Gewässerstrecke abgegeben wird. Da das Retentionsvolumen begrenzt ist, muss eine technische Einrichtung dafür sorgen, dass bei vollständig gefülltem Becken und anhaltenden Abflüssen, die größer als die Regelabgabe sind, ein Entlastung stattfinden kann, um ein unkontrolliertes Überströmen des Dammes zu verhindern. Es muss sichergestellt werden, dass die Standsicherheit der Dämme und technischen Anlagen auch unter dem Einfluss eines Extremhochwassers erhalten bleibt. Dieser Grundgedanke spielt sich auch in den Bemessungsfällen der DIN 19700 wider.

In der Ingenieurpraxis stehen eine Vielzahl von DIN 19700 konformen Bauweisen für eine Hochwasserentlastungsanlage zur Verfügung, die nach ihrer räumlichen Anordnung wie folgt gruppiert werden können.

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

Aus betrieblichen Gründen empfiehlt die LUBW für Hochwasserrückhaltebecken in Baden-Württemberg mindestens eine obenliegende, also überlastbare Hochwasserentlastung. Darüber hinaus sollte über diese obenliegende, überlastbare und verklausungssichere Hochwasserentlastung ein möglichst großer Anteil des BHQ_1 abgeführt werden. Eine hydraulische Überlastung eines Überfalles führt z.B. zu einem höheren spezifischen Abfluss (Abfluss pro Breitereinheit) und größeren Überströmhöhen. Die Betriebssicherheit der Anlage ist jedoch nicht gefährdet. Bei Rohrdurchlässen und Entlastungstollen kommt es bei einer hydraulischen Überlastung zu instabilen Strömungsverhältnissen und Pulsationen, die letztendlich zu einem Zuschlagen des Rohre und zu einer Abnahme des Abflusses führen kann (vgl. Abbildung 5.17). Die maximale Leistungsfähigkeit von Rohrleitungen mit Freispiegelabfluss stellt sich nach Gujer (2007) bei einem Teilfüllungsgrad von 90 % ein. Für die Dimensionierung wird ein maximaler Teilfüllungsgrad von 85 % empfohlen. Bei größeren Füllhöhen stellt sich das beschriebene instabile Abflussgeschehen ein.

Auch im DVWK-Merkbaltt 2020 (1991) werden Hochwasserentlastungsanlagen an Rückhaltebecken in *hydraulische nicht überlastbare* und *hydraulisch überlastbare* Anlagen unterteilt. Hinsichtlich der Bauwerkssicherheit sind gemäß ATV-DVWK (2001) immer hydraulisch überlastbare Bauwerke zu bevorzugen.

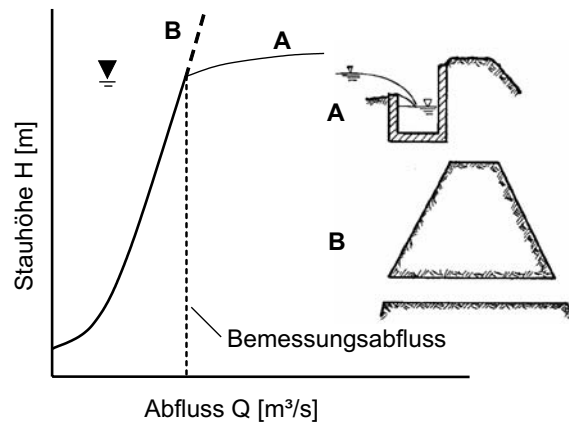


Abbildung 5.17: Verhalten hydraulisch überlastbarer / nicht überlastbarer Systeme, verändert nach [27]

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

Die Anordnung der Hochwasserentlastungsanlage außerhalb des Durchlassbauwerkes wirkt sich neben den ökologischen Vorteilen auch positiv auf die Betriebssicherheit der Schwingklappe aus. Bei großen spezifischen 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 Schwingungserregung des Klappenkörpers und einer daraus resultierenden resonanten Bewegung (vgl. Kapitel 4.3). Im 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 HRB mit einem ökologisch angepassten Schwingklappen-Durchlassbauwerke 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* wurde eine begrünbare Bauweise mit einer Asphalt-Mastix als hydraulisches Sicherungselement entwickelt und in die Praxis transferiert [102]. Auf Grund der kompletten Überströmbarkeit des Dammes kann auf den nach DIN 19700 geforderten 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.

5.1.6 Allgemeine Betrachtung des Gefährdungspotentials

In Kapitel 4.4 wurden die Untersuchungen vorgestellt, die vor dem Hintergrund der Betriebssicherheit durchgeführt wurden. Ziel war es, das Verhalten der Schwingklappe auch unter extremen externen Belastungen zu analysieren und technische Vorkehrungen zur Vermeidung von betrieblichen Problemen zu erarbeiten. Ein Ergebnis der Untersuchungen zur Betriebssicherheit ist z.B. das in Kapitel 5.1.1 vorgestellte Rechenkonzept.

Trotz aller technischen und betrieblichen Vorkehrungen können Ereignisse auftreten, für die eine Anlage nicht bemessen ist. Unter einem Ereignis ist in diesem Zusammenhang z.B. eine Kombination aus Regenereignis und extremen Geschwemmseltrieb zu verstehen. Bei allen technischen Anlagen verbleibt folglich ein gewisses Restrisiko. In diesem Kapitel wird eine Abschätzung des Restrisikos der Schwingklappe vorgenommen. Um eine differenzierte Analyse vornehmen zu können, wird dabei in die drei Versagensformen

- die Schwingklappe richtet sich nicht auf,
- die Schwingklappe blockiert während des Aufschwimmens in einer bestimmten Position,
- die Schwingklappe versagt bei Vollstau

unterschieden.

Bei der ersten Versagensform wird davon ausgegangen, dass sich die Schwingklappe trotz steigender Wasserstände im Retentionsraum nicht aufrichtet. Grund hierfür könnte z.B. Vandalismus sein. Wie in Kapitel 2.2 erläutert, liegt die Schwingklappe bei Niedrigwasserabflüssen nicht dauerhaft im Wasser, so dass eine Verklausung der Spalte durch Geschwemmsel nicht zu befürchten ist. Auch Sohlumlagerungen, die zu einer Verhinderung der Drehbewegung der Schwingklappe führen könnten, sind bei diesen Abflüssen nicht zu befürchten. Auch durch die turnusmäßigen Begehungen der Anlage durch den Betreiber könnten solche Probleme frühzeitig erkannt und behoben werden.

Sollte es dennoch zu einer Verhinderung der Drehbewegung des Klappenkörpers kommen, so wird im Hochwasserfall die Abflussmenge durch die Schwingklappe nicht auf die Regelabgabe begrenzt. Wegen der großen Öffnung in der Stauwand fließt das Wasser ungehindert durch das Durchlassbauwerk, der Einstau und Rückhalt im Retentionsraum ist nur gering. Das Hochwasserrückhaltebecken verliert seine Funktion, es wird jedoch kein erhöhtes Gefahrenpotential für die Unterlieger aufgebaut.

Die zweite Versagensform nimmt eine Verhinderung der Drehbewegung der Schwingklappe während des Aufschwimmens an. Ursache hierfür könnte z.B. eine massive Verklausung des Spaltes zwischen der seitlichen Führung und dem Klappenkörper sein. Wie schon bei der ersten Versagensform würde hierdurch die Funktionsweise der Schwingklappe eingeschränkt werden und die Hochwasserschutzwirkung des Beckens reduziert. Auch von dieser Versagensform geht keine erhöhte Gefährdung der Unterlieger aus. Bei der dritten analysierten Versagensform wird von einem statischen Versagen des Klappenkörpers bei Vollstau des Retentionsraumes ausgegangen. Da der Klappenkörper hier in einer senkrechten Position steht, ist als Ursache für diese Versagensform nur eine falsche Auslegung der Lager oder des Klappenkörpers, also rein konstruktive Fragestellung, denkbar. Das Funktionsprinzip

der Schwingklappe hat hierauf keinen Einfluss. Von dieser Versagensform geht ein enormes Gefahrenpotential für Leib und Leben aus, da mit dem Versagen der Schwingklappe die Querschnittsfläche in der Stauwand schlagartig vergrößert wird und das im Retentionsraum befindliche Wasser zusätzlich zum schon bestehenden Hochwasserabfluss an die Unterlieger weitergegeben wird. Diese Gefahrenpotential ergibt sich aber bei allen in der Praxis angewandten Regelorganen (z.B. Plattenschieber) bei Hochwasserrückhaltebecken.

Zusammenfassend zeigt die Analyse des Gefährdungspotentials auf, dass bei einer *worst-case* Betrachtung vom Funktionsprinzip der Schwingklappe keine gesteigerte Gefährdung der Unterlieger erzeugt wird. Im Falle eines Versagens der selbstständigen Aufrichtung geht jedoch die Hochwasserschutzwirkung der Anlage zum Teil verloren.

5.2 Weitere Anwendungsbereiche der Schwingklappe

Im vorangegangenen Kapitel wurde der Einsatz einer Schwingklappe in einem Hochwasserrückhaltebecken im Hauptschluss vorgestellt. Dabei wurden auch die zum Durchlassbauwerk gehörenden Komponenten (z.B. Einlaufbereich) hinsichtlich ihres Einflusses auf die ökologische Durchgängigkeit betrachtet und Empfehlungen hinsichtlich einer ökologischen Optimierung ausgesprochen.

Die Schwingklappe kann jedoch auch bei HRB im Nebenschluss zum Einsatz kommen. Das im Rahmen dieser Arbeit begutachtete HRB Flutmulde Weisweil-West am Seegraben im Landkreis Waldshut (vgl. Kapitel 7) stellt einen derartigen Anwendungsfall dar. Im Gewässer sollte ab einem gewissen Durchfluss ein Aufstau im Oberwasser erzeugt werden, so dass ein Teil des Abflusses über eine feste Wehrschwelle in den parallel zum Gewässer angeordneten Retentionsraum ausgeleitet werden kann (vgl. Abbildung 5.18). Durch den Einsatz der Schwingklappe hätte die Länge des Überfalls reduziert werden können, da ein gezielter Höherstau bei Abflüssen, die größer als die Regelabgabe sind, selbstregulierend bewerkstelligt werden kann.

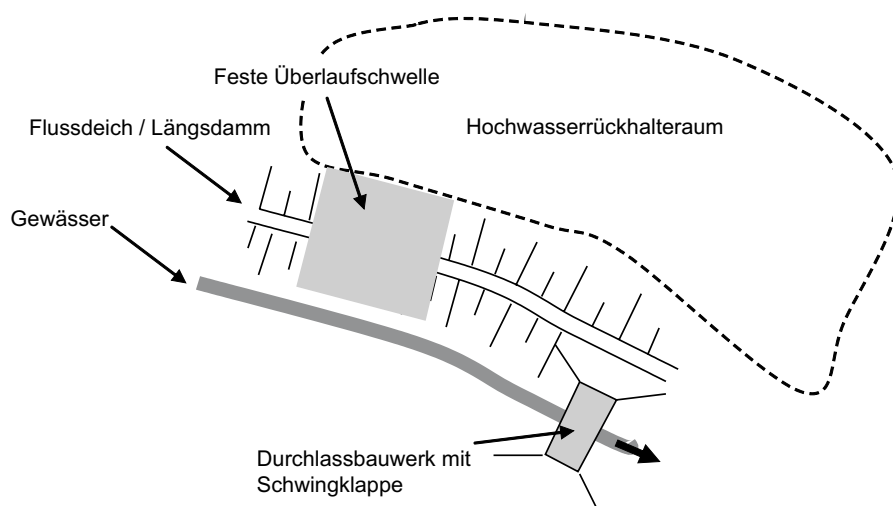


Abbildung 5.18: Anwendungsfall einer Schwingklappe für ein HRB im Nebenschluss

Grundsätzlich ist die Schwingklappe für Anwendungen geeignet, bei denen eine selbstregulierende Abflusssteuerung ohne den Einsatz von Fremdenergie erfolgen soll. Hierzu zählen z.B. Anwendungsfälle in Kanalsystemen von Bewässerungsanlagen oder in Anlagen der Abwasserentsorgung. In der Abwassertechnik werden für diesen Anwendungsfall heute meist schwimmergesteuerte Schieber eingesetzt.

Mit den Untersuchungen zum hydraulischen Verhalten der Schwingklappe konnte gezeigt werden, dass die Abflusssteuerung zwar nicht der Qualität der Abflusssteuerung von Schwimmergesteuerten Systemen entspricht (z.B. System *Alpheus*, Kapitel 2.4.1), dass aber durchaus Vorteile der Schwingklappe bezüglich der Unempfindlichkeit der Mechanik und des benötigten Platzangebotes bestehen. Vor allem für die Hochwasserbewirtschaftung von großen Sammelkanälen in Abwassersystemen können diese Vorteile der Schwingklappe eine Rolle spielen. Erste Gespräche hierzu wurden bereits mit dem Tiefbauamt der Stadt Karlsruhe geführt.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit der Schwingklappe ist in der Abflusssteuerung von Fischaufstiegsanlagen (FAA) bei Kleinwasserkraftanlagen zu sehen. Die Steuer- und Regelungstechnik vieler Kleinwasserkraftanlagen lässt zum Teil Schwankungen im Oberwasser im Dezimeterbereich zu. Diese Wasserstandsschwankungen wirken sich, je nach Konstruktionsweise des Einlaufes der FAA auf den Abfluss durch die FAA aus. Die Schwingklappe kann hier zu einer ökologisch wertvollen Vergleichmäßigung der Abflüsse in der FAA auch bei schwankenden Oberwasserständen beitragen. Ein derartiger Anwendungsfall der Schwingklappe ist in Kapitel 7 detailliert beschrieben und die gesammelten Betriebserfahrungen werden vorgestellt und diskutiert.

6 Bemessungskonzept für die Ingenieurpraxis

Die Ergebnisse der Versuchsreihen zum hydraulischen und kinematischen Verhalten der Schwingklappe wurden in Kapitel 4 ausführlich beschrieben. Darüber hinaus wurde im Rahmen der Untersuchungen auch die Betriebssicherheit der Schwingklappe bei Geschwemmsel- und Geschiebetrieb untersucht.

Die Ausführungen zum hydraulischen Verhalten der Schwingklappe zeigen deutlich auf, dass sich das Momentengleichgewicht und das damit zusammenhängende Aufrichtverhalten der Schwingklappe wesentlich komplexer darstellen als in den bisherigen Studien (z.B. [67]) erörtert. Vor allem der signifikante Einfluss des unterwasserseitigen Wasserstandes auf die Klappenneigung (vgl. Kapitel 4.2.3) und dessen Sensitivität bezüglich des hydraulischen Verhaltens der Schwingklappe ist in allen bisherigen Studien und Modellversuchen nicht ausreichend behandelt worden. Im Rahmen der in dieser Arbeit dargestellten Untersuchungen wurde diese Thematik erstmals ausführlich und umfassend untersucht .

Für den Praxistransfer des Konzeptes der Schwingklappe ist es nun notwendig, die Ergebnisse der Versuche derart aufzubereiten, dass der planende Ingenieur anhand eines Bemessungskonzeptes das System der Schwingklappe sicher und fehlerfrei für unterschiedlichste Randbedingungen und Örtlichkeiten dimensionieren kann. Für die Untersuchungsreihen zum hydraulischen und kinematischen Verhalten der Schwingklappe wurden elf verschiedene Lagergeometrien untersucht. Es konnte aufgezeigt werden, unter welchen Randbedingungen das System der Schwingklappe wie funktioniert. Im Sinne des Praxistransfers und einer einfachen, praxistauglichen Bemessung des Systems der Schwingklappe wurde für das erarbeitete Bemessungskonzept die Lagergeometrie fixiert. Aufbauend auf den Versuchsergebnissen und den gewonnenen Erfahrungen wird die Wahl der Lagergeometrie nicht in die Hände des planenden Ingenieurs gelegt.

Die Fragestellungen und Probleme rund um den Einfluss des Unterwasserstandes spiegeln sich auch im erarbeiteten Bemessungsansatz wider und führen nach derzeitigem Wissensstand zu einer Begrenzung des Anwendungsbereiches. Trotzdem ist der Einsatz der Schwingklappe zur Abflussregelung von kleineren Hochwasserrückhaltebecken und anderen Anwendungsfällen, unter Beachtung der Anwendungsgrenzen, möglich.

Die Praxistauglichkeit und die Funktionalität des erarbeiteten Bemessungsansatzes konnte mit der Realisierung der Pilotanlage an der Fischaufstiegsanlage Obermühle/Pfinz aufgezeigt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Pilotanlage findet sich in Kapitel 7. 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 der Bauweise der Schwingklappe mit einer Gleichverteilung der Materialstärken innerhalb der Rippen und der Beplankung. Die Lage des Schwerpunktes muss bei der Planung zur Bauausführung überprüft werden. Kleinere Abweichungen im cm-Bereich können jedoch toleriert werden, da sich das Bemessungskonzept auf eine relative Lage des Lagerungspunktes zum Schwerpunkt stützt.

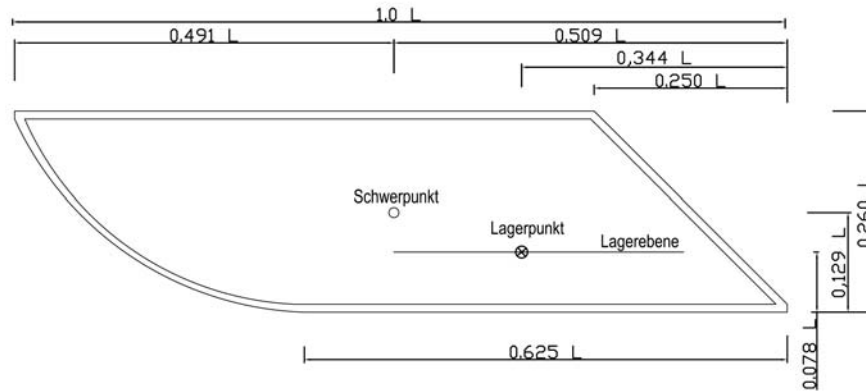


Abbildung 6.1: Normierte Klappen­geometrie

Eine Anpassung der Klappen­geometrie an die jeweiligen geometrischen und hydraulischen Randbedingungen erfolgt derart, dass die Klappe bei Beibehaltung der Längenverhältnisse entsprechend vergrößert oder verkleinert wird. Die hydraulischen und kinematischen Parameter sind in diesem Fall nach dem Froude'schen Modellgesetz umzurechnen (vgl. Tabelle 3.2). In Kapitel 3.1.2 wurde die Problematik der Übertragbarkeit und Skalierbarkeit von Schwingungsproblemen nach dem Froude'schen Ähnlichkeitsgesetz aufgezeigt. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei großen Skalierfaktoren Maßstabeffekte hinsichtlich des Frequenzmaßstabes zu verzeichnen sind.

Aus Gründen der Betriebssicherheit sollte die untersuchte Schwingklappen­geometrie mit einer Klappenlänge von $L = 0,96 \text{ m}$ (vgl. Tabelle 4.1) nicht zu klein skaliert werden, da ansonsten bei einem Einsatz in einem natürlichen Gerinne betriebliche Zwangspunkte und Verklausungen zu befürchten sind. Als Minimalwert ist hier $L = 0,48 \text{ m}$ anzusehen.

Entsprechend den Ausführungen zum Frequenzmaßstab sind auch bei einer Vergrößerung des Klappenkörpers Grenzen hinsichtlich der Übertragbarkeit der erarbeiteten Ergebnisse gegeben. Vor allem aber die statische Dimensionierung des Klappenkörpers erscheint hierbei als limitierender Faktor. Das Funktionsprinzip der Schwingklappe basiert auf einem Gleichgewichtszustand zwischen den Momenten aus Gewicht-, Auftriebs-, und Strömungskraft. Bei der Bauausführung muss daher darauf geachtet werden, dass die Dichte des Klappenkörpers (Gewicht Klappe / Volumen Klappe) unabhängig von der Größe der Schwingklappe im Bereich zwischen 275 kg/m^3 und 300 kg/m^3 liegen muss. Da die Lasten aus der Hydraulik überproportional zur Skalierung der Längen anwachsen, ergeben sich hierdurch gewisse Grenzen. Eine Ausführung der Schwingklappe mit $L = 2,88 \text{ m}$ ist dabei als maximal denkbare Ausführungsgröße anzusehen. Maßstabeffekte bezüglich des Schwingungsverhaltens sind bei den beschriebenen Anwendungsgrenzen nicht zu erwarten.

6.2 Entwicklung der Spaltweite s_N

Die geometrischen Verhältnisse der Schwingklappe lassen sich über die trigonometrische Betrachtung des Systemes ableiten. Die betriebszustandsabhängige Spaltweite s_N hängt dabei von den in Abbildung 6.2 dargestellten Längen und der Neigung des Klappenkörpers ab.

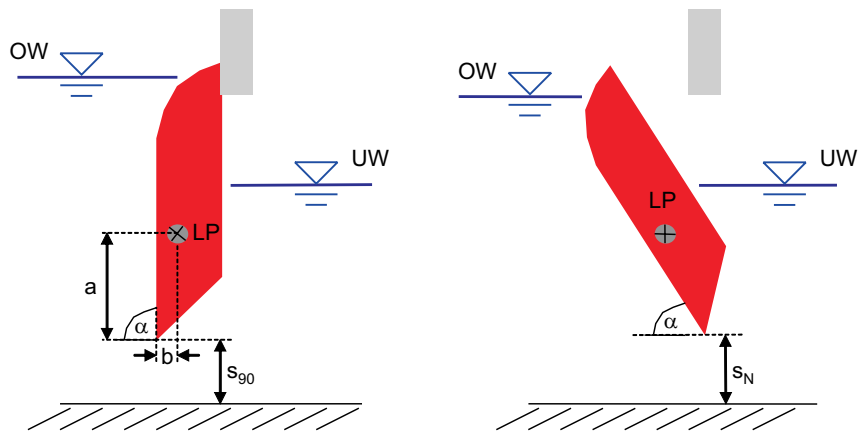


Abbildung 6.2: Parameter zur Bestimmung der neigungsabhängigen Spaltweite s_N

Die resultierende Spaltweite zu jeder Neigung kann dabei über folgende, im Rahmen der Untersuchungen aufgestellten Formel für jede Lagergeometrie ermittelt werden:

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

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

Aus der Grafik geht hervor, dass der Zugewinn an Spaltweite in der Ruhestellung umso größer ist, je näher der Lagerpunkt am Schwerpunkt liegt (kleines LS). Mit der Schwingklappe als Regulierorgan eines Hochwasserrückhaltebeckens soll das Ziel verfolgt werden, im Nichteinstaufall eine möglichst große Querschnittsfläche in der Stauwand zu realisieren. Um die Vorteile der Schwingklappe bezüglich der freien Querschnittsfläche in der Ruhestellung (Neigung 0°) gegenüber einer festen Blende möglichst vollständig auszunutzen, sollte der Lagerpunkt folglich nahe am Schwerpunkt angeordnet sein.

In Kapitel 4.2.4 wurde die Abhängigkeit der Funktionsfähigkeit von der Lage des Lagerpunktes aufgezeigt. Hieraus geht hervor, dass ein gewisser Abstand des Lagerpunktes vom Schwerpunkt vorhanden sein muss, um ein Überströmen des Klappenkörpers während des Aufrichtvorganges zu vermeiden. Die beiden Anforderungen stehen folglich im Widerspruch zueinander.

Im Sinne einer größtmöglichen Ausnutzung des Effektes des Spaltweitzugewinns wurde für die ingenieurtechnische Anwendung der Schwingklappe daher der in Abbildung 6.1 dargestellte Lagerpunkt mit $LS = 0,331$ gewählt.

Aus Abbildung 6.3 geht auch hervor, dass die neigungsabhängige Spaltweite s_N ihr Minimum nicht bei einer Neigung von 90° hat. Beim Aufrichten der Klappe ergeben sich Spaltweiten s_N , die kleiner als die Spaltweite s_{90} bei einer Klappenneigung von 90° sind. Ursache hierfür ist der geometrische Zusammenhang zwischen dem Lagerpunkt und der Klappenendkante. Aus statischen und hydraulischen Gründen (vgl. Kapitel 4.1.2) liegt der Lagerpunkt nicht in der Ebene der Stauhaut und der Klappenendkante, wodurch es während des Aufrichtvorganges zu der dokumentierten Entwicklung kommt.

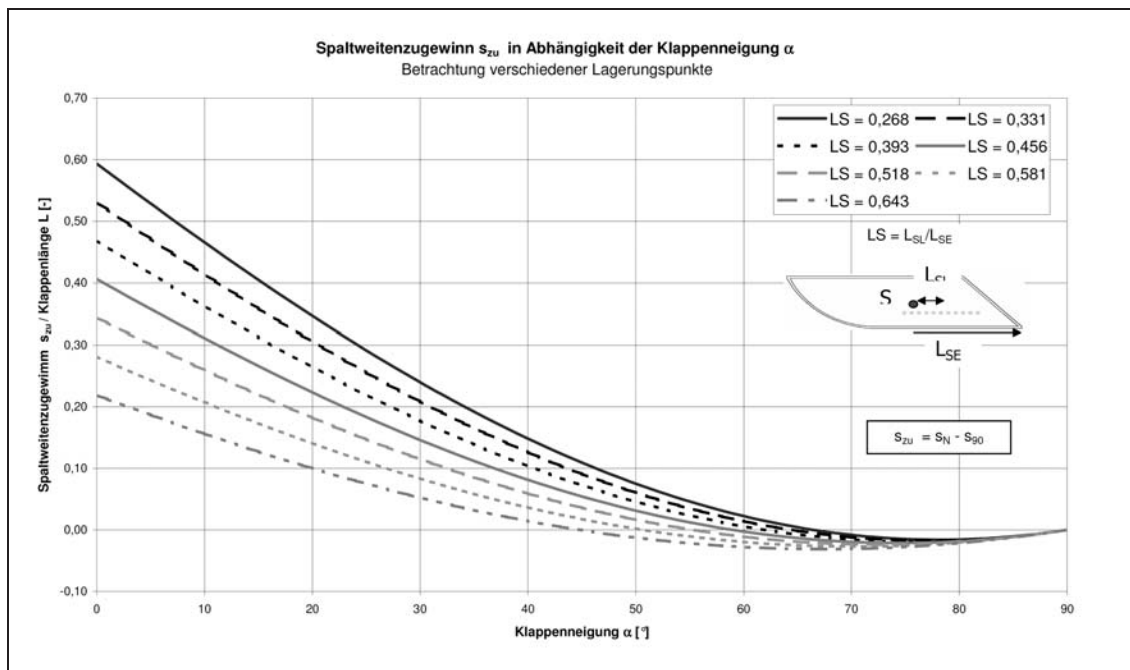


Abbildung 6.3: Entwicklung der Spaltweite beim Aufrichten der Schwingklappe, Vergleich verschiedener Lagerungsgeometrien

6.3 Bemessung der Spaltweite s_{90} und der Breite B 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. Da sich das Verhalten der Schwingklappe bei einer Neigung von 90° nicht von einem Planschütz unterscheidet, können die zur Dimensionierung benötigten Bemessungstabellen aus der Literatur (z.B. [95]) entnommen werden. Über den maximalen Wasserstand im Becken und den Abflussbeiwert bei einer Klappenneigung von 90° lässt sich unter Beachtung des rückgestauten Abflusses an der Schwingklappe die benötigte Querschnittsfläche und folglich die Breite B und die Spaltweite s_{90} ableiten. Eigene Bemessungstabellen für die Schwingklappe sind nicht notwendig. Dies vereinfacht den Planungsablauf, da der planende Ingenieur auf die Erfahrung bei der Dimensionierung von unterströmten Planschützen zurückgreifen kann.

Die Versuche zum Geschiebe- und Geschwemmeltrieb haben keine erhöhte Anfälligkeit der Schwingklappe gegenüber einer Verklauung erkennen lassen (vgl. Kapitel 4.4.1 und Kapitel 4.4.2). Dennoch sollte die Spaltweite s_{90} nicht zu klein ausgeführt werden. Aufbauend auf den Ergebnissen der Geschiebeversuche wird eine Mindestspaltweite von $s_{90,min} = 0,25$ m empfohlen.

Die Anpassung des Systems der Schwingklappe an eine gewünschte Regelabgabe Q_R wird über die Breite des Klappenkörpers erreicht. Eine Abänderung der Breite des Klappenkörpers ist dabei ohne Einschränkungen möglich. Die Versuche wurden als Ausschnittsmodell gefahren und sämtliche Prozesse sind somit von der Breitenentwicklung der Klappe unabhängig.

6.4 Bemessung der Achslage

Die Achslage des Klappenkörpers ist für den sicheren Betrieb der Schwingklappe von entscheidender Bedeutung. Das Zusammenspiel zwischen Auftriebs-, Gewichts- 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. Im Untersuchungsprogramm wurden elf verschiedene Lagerungspunkte hinsichtlich ihres Einflusses auf das hydraulische und kinematische Verhalten der Schwingklappe untersucht. Um einen einfachen, praxistauglichen Bemessungsansatz bereitstellen zu können, ist die Wahl des Lagerpunktes, wie auch die Kontur des Klappenkörpers, nicht Bestandteil der Bemessung durch den planenden Ingenieur. Die Synthese der Ergebnisse der umfangreichen Untersuchungen führte zu einer Festlegung des Lagerpunktes mit einem $LS = 0,331$. In Abbildung 6.4 ist das hieraus resultierende Verhalten der Schwingklappe dem Unterwasserstand gegenüber gestellt.

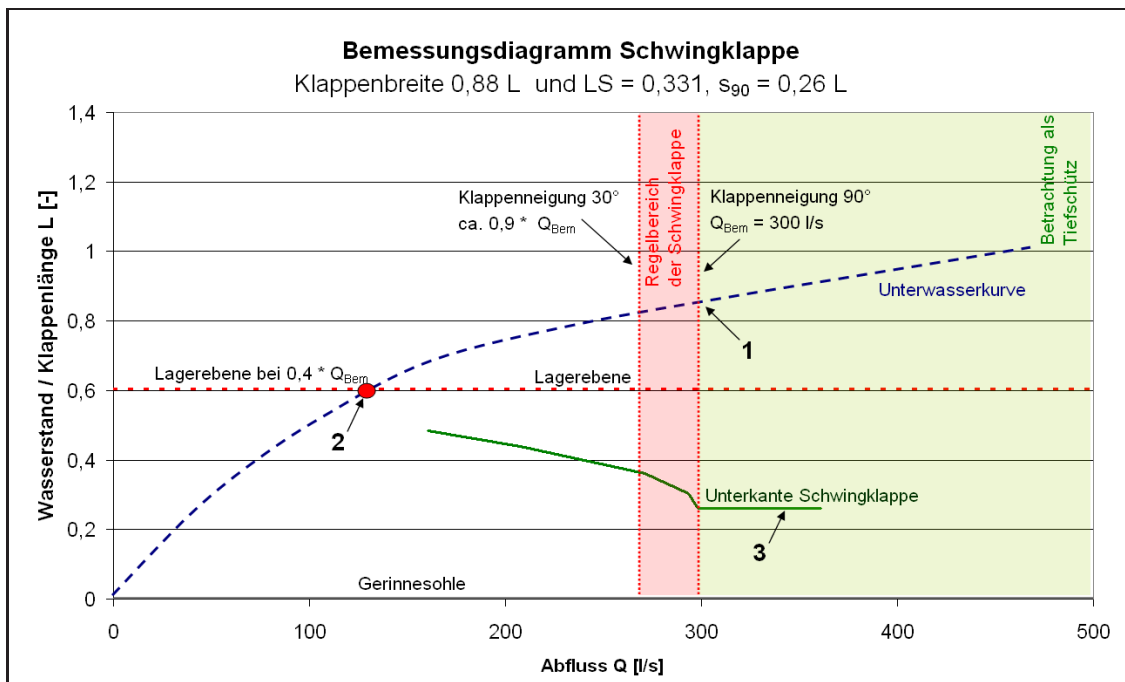


Abbildung 6.4: Bemessungsdiagramm, normiert auf die Klappenlänge L

Ausgangspunkt für die Festlegung der Achslage ist der Wasserstand im Unterwasser, bei dem die Schwingklappe ihre senkrechte Position erreicht s_{90} . Der dazugehörige Abfluss wird im Folgenden als Bemessungsabfluss Q_{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 Scharparameter 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

LS (Abstand des Lagerpunktes vom Schwerpunkt) wandert der Unterwasserstand dabei näher an den Lagerpunkt.

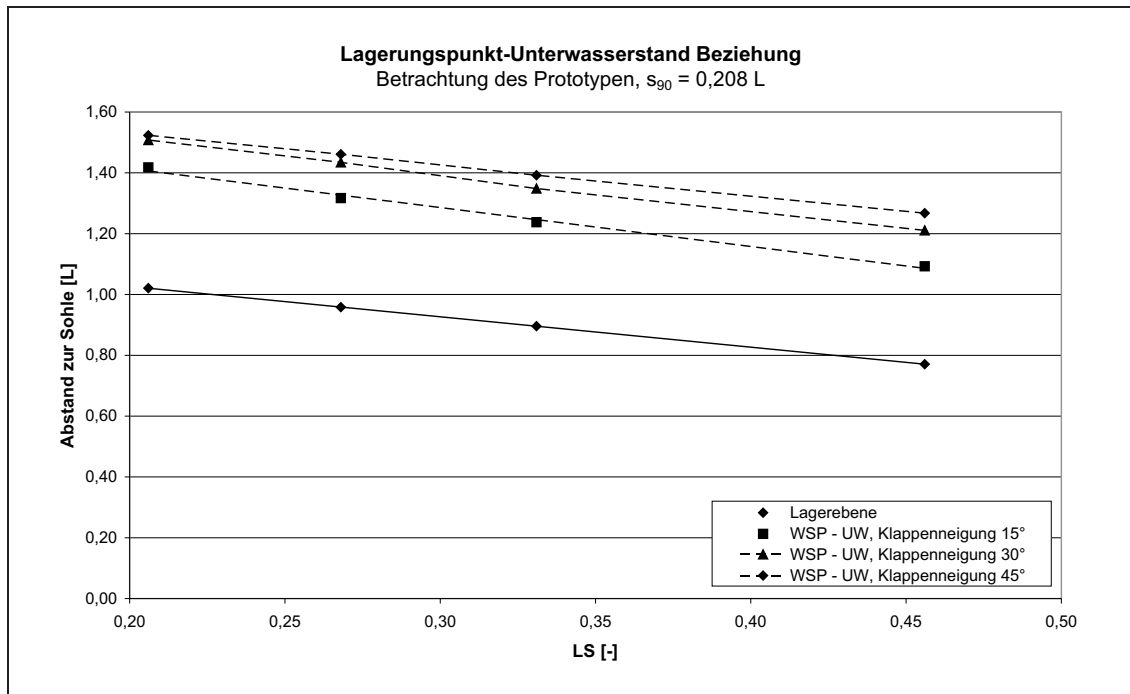


Abbildung 6.5: Beziehung zwischen dem Unterwasserstand und dem Lagerpunkt

In Kapitel 4.2.3 wurde bereits auf die Anforderungen an die Wasserstands-Abfluss-Beziehung des unterwasserseitigen Gewässerabschnittes hingewiesen. Im Rahmen der Untersuchungen zur Schwingklappe konnte erarbeitet werden, dass die Lagerebene bei dem Wasserstand einzurichten ist, der sich bei ca. 40 % des Bemessungsabflusses Q_{Bem} im Unterwasser einstellt (vgl. Abbildung 6.4, Punkt 2).

Übersteigt der Zufluss den Bemessungsabflusses Q_{Bem} , so kann die Schwingklappe nicht mehr in das Abflussgeschehen eingreifen, da sich der Klappenkörper bereits in einer Neigung von 90° befindet. Daher ändert sich ab diesem Abfluss auch die Spaltweite nicht mehr (vgl. Abbildung 6.4, Punkt 3). Die Schwingklappe wirkt nun als Tiefschütz.

Die Breite der Schwingklappe wird anschließend, analog zu der Dimensionierung eines Schützes über die maximale Druckhöhe, die Spaltweite und den Rückstau einfluss an der Schützttafel über die in der Literatur zur Verfügung stehenden Bemessungswerte (z.B. [95]) errechnet.

6.5 Herausforderungen bei der hydraulischen Bemessung

Mit dem hier aufgeführten Bemessungskonzept können die Ergebnisse aus den Laboruntersuchungen 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 Q_R 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 verlässlich dokumentiert und statistisch ausgewertet ist. Dies wirkt sich auch auf die Unsicherheiten bei eventuell vorhandenen numerischen Modellen des entsprechenden Gewässerabschnittes aus, da selten verlässliche Kalibrierungsdaten für die Eichung des 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 herstellt. 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.

6.6 Dimensionierung des Klappenkörpers und der Lager

Für die Dimensionierung des Klappenkörpers und der Lagerung der Schwingklappe müssen neben den angreifenden Auftriebs- und Gewichtskräften auch die Druckverhältnisse an der Stauhaut bekannt. Im Rahmen der Laboruntersuchungen wurde hierzu ausführliche Druckmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in 4.3.4 dargestellt. Aus den Erkenntnissen wurden die folgenden, praxisnahen Dimensionierungshinweise abgeleitet.

- Die gemessenen mittleren Drücke entlang der Stauhaut entsprechen der hydrostatischen Druckverteilung. Dem Ansatz der sicheren Seite folgend sollte die Druckabnahme an der Klappenkante nicht in die Bemessung des Klappenkörpers oder der Lager miteinfließen.
- Die Druckmessungen zu den unterschiedlichen Klappenneigungen zeigen keine Auffälligkeiten oder Abweichungen gegenüber der hydrostatischen Druckverteilung, so dass für die statische Bemessung der Schwingklappe der Lastfall des maximalen Einstaus mit einer Klappenneigung von $\alpha = 90^\circ$ (senkrechte Position) herangezogen werden sollte.

- Die vektorielle Größe der maßgeblichen Lagerkraft kann durch Integration der hydrostatischen Druckverteilung entlang der Stauhaut 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. Es wird jedoch empfohlen, für die Lagerdimensionierung den vollen Auftrieb der Schwingklappe, bezogen auf den maximalen Oberwasserstand, anzusetzen.
- Gemäß den Ausführungen in Kapitel 4.4.3 müssen bei kleinen Einzugsgebieten im Mittelgebirge keine zusätzlichen Belastungen in Folge von Eisdruck oder Eisstoß angesetzt werden.
- Die ermittelten Werten sind mit den entsprechenden Sicherheiten gemäß DIN 19704 zu berücksichtigen.

In Zusammenarbeit mit der Firma Hänßler Stahlwasserbau aus Steinen wurde ein Entwurf für die Konstruktion der Schwingklappe erarbeitet und der Klappenkörper statisch dimensioniert. Bei dem gewählten Konzept ist der Klappenkörper selbst als tragendes Element ausgeführt. Die zwei Außenwangen mit der Aufnahme der Lagerung sowie zwei Stützrippen werden mit der Stauhaut und der luftseitigen Abdeckung beplankt und wasserdicht verschweißt. Auch für die Pilotanlage zur Schwingklappe an der Pfinz (vgl. Kapitel 7) wurde dieses Konstruktionsprinzip angewandt. Die Fotodokumentation in Anlage D verdeutlicht den Aufbau des Klappenkörpers.

6.7 Konstruktive Ausführung der Dichtungen

Der Übergangsbereich zwischen dem Hohlkörper der Schwingklappe und der Seitenwand kann auf Grund der betriebsbedingten Bewegungsfreiheit der Schwingklappe nicht bündig oder mit einer engsitzenen Dichtung hergestellt werden. Um eine glatte Oberfläche und konstante Spaltweiten im Drehbereich sicherzustellen, sollte dieser Bereich mit einer Einfassung aus Edelstahl versehen werden. Die Edelstahleinfassung wird nach der Montage des Hohlkörpers justiert und anschließend der Übergangsbereich zwischen Erstbeton und Edelstahleinfassung ausbetoniert.

Aus hydraulischer Sicht ist eine Abdichtung nicht notwendig, da das Durchlassbauwerk nicht komplett verschließbar ausgeführt wird. Für die Prototyp-Versuche im Labor wurde eine Spaltweite zwischen dem Klappenkörper und der Seitenwand von 0,5 cm gewählt. Die hydraulischen Versuche haben gezeigt, dass die Spaltströmung keinen signifikanten Einfluss auf die Funktion der Schwingklappe besitzt. Die Abflussmengen, die über den Spalt abgeführt werden liegen in einer für die Ermittlung des Gesamtabflusses der Schwingklappe irrelevanten Größenordnung.

Im Zuge der Untersuchungen zur Betriebssicherheit der Schwingklappe wurde die Gefahr einer Verklausung des Spaltes weitergehend untersucht (vgl. Kapitel 4.4.1). Hierbei zeigte sich, dass es auf Grund der Strömung im Spaltbereich hier zu einem Eintrag von Getreibsel kommen kann. Diese Ansammlung von Getreibsel im Spaltbereich könnte im Extremfall

zu einer Verhinderung der Drehbewegung führen. Im Zuge der Untersuchungen wurde daher ein Geschwemmselabweiser in Form einer Bürste an der Stauhaut angebracht, der den Spaltbereich freihält. Die durch die Bürste erzeugte zusätzliche Reibungskraft ist sehr gering, so dass eine Beeinflussung der Funktionsweise der Schwingklappe ausgeschlossen werden kann. Im Zusammenhang mit den Untersuchungen zum Geschwemmseltrieb wurde auch das Rückstellmoment ermittelt, welches von der Schwingklappe erzeugt wird, wenn die Klappenneigung nicht dem Momentengleichgewicht entspricht und somit eine zusätzliche Auftriebskraft angreift (vgl. Abbildung 4.57). Die Größenordnung der ermittelten Rückstellkraft zeigt auf, dass die Schwingklappe eine Resistenz gegenüber einer Verklauung des Spaltbereiches aufweist.

6.8 Zusammenfassung des Bemessungskonzeptes

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Grundlagen für die ingenieurtechnische Bemessung der Schwingklappe dargestellt. Es konnte aufgezeigt werden, dass der Einfluss der äußeren Randbedingungen auf die Funktionsweise der Schwingklappe sehr groß ist und dass daher ein allgemeingültiger Bemessungsansatz im Rahmen der Arbeit nicht entwickelt werden konnte. Hierzu sind weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der Entwicklung eines Simulationswerkzeuges nötig.

Das vorgestellte Bemessungskonzept zielt daher auf eine Skalierung der den Untersuchungen zugrunde liegenden Klappen­geometrie ab. Der im Versuch untersuchte Prototyp und die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse können nach dem Froude'schen Modellgesetz auf andere Randbedingungen transferiert werden. Darüber hinaus ist eine Vergrößerung der Klappenbreite B zur Anpassung der Schwingklappe an größere Regelabgaben Q_R ohne hydraulische Einschränkungen möglich.

Die in Kapitel 7 vorgestellte Pilotanlage der Schwingklappe wurde entsprechend dieser Vorgehensweise erfolgreich bemessen. Bei neuartigen Bauweisen oder Systemen besteht immer der Zusammenhang, dass die Implementierung in die ingenieurtechnische Praxis entscheidend von den Erfahrungen und dem Erfolg der ersten ausgeführten Anlagen abhängt. Vor diesem Hintergrund und den im Rahmen dieser Arbeit aufgezeigten Herausforderungen bei der Bemessung wird daher empfohlen, für neue Planungen wasserbauliche Modellversuche durchzuführen, um Planungssicherheit zu erhalten und den Erfolg des Systems der Schwingklappe zu gewährleisten. Da es bei diesen Versuchen nur um die Klärung der hydraulischen Fragestellungen geht, können hier wirtschaftliche Maßstäbe im Bereich 1:5 bis 1:15 angewendet werden.

7 Pilotanlage und Betriebserfahrungen

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden durch das Förderprogramm BWPLUS (Baden-Württemberg Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung) des Umweltministeriums Baden-Württemberg finanziert. In den Förrichtlinien heißt es:

Mit dem Förderprogramm BWPLUS verfolgt das Umweltministerium das Ziel, Projekte der anwendungsorientierten Umweltforschung zu fördern, die für Baden-Württemberg in besonderem Maße relevant sind. Entwickelt werden sollen natur- und sozialwissenschaftliche, technische und methodische Beiträge sowie Instrumente zur Lösung von Problemen, um die Herausforderungen zu bestehen, eine dauerhaft lebenswerte Umwelt zu gestalten.

In der anwendungsorientierten Forschung ist der Praxistransfer letztendlich der entscheidende Baustein für eine erfolgreich Forschungsarbeit. Während der gesamten Projektlaufzeit wurden daher intensive Bemühungen unternommen, parallel zu den Laboruntersuchungen mögliche Standorte für eine Pilotanlage zu identifizieren und in enger Zusammenarbeit mit dem entsprechenden Betreibern den Praxistransfer einer Schwingklappe vorzubereiten. Eine enge Kooperationen konnten dabei mit der Gewässerdirektion südlicher Oberrhein, Bereich Waldshut-Tiengen und dem Zweckverband Hochwasserschutz Elsenz-Schwarzbach aufgebaut werden. Im Zuständigkeitsbereich dieser Institutionen konnten dabei mehrere projektierte Hochwasserrückhaltebecken (HRB) identifiziert werden, die für den Einsatz der Schwingklappe geeignet erschienen. Die folgenden HRB wurden nähergehend analysiert:

- Flutmulde Weisweil-West am Seegraben im Landkreis Waldshut
- HRB Bollschweil im Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald
- HRB Aglasterhausen - Rittersbach (A26) im Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach
- HRB Forellenbach II (A54) im Einzugsgebiet Elsenz-Schwarzbach

Bei keinem dieser Projekte konnte das Konzept der Schwingklappe implementiert werden. Zum Teil war der zeitliche Versatz zwischen den Laboruntersuchungen und den Projektrealisierung zu groß, um die für die Dimensionierung und die Betriebssicherheit relevanten Daten erarbeiten zu können. Auf der anderen Seite wurden auch geplante Bauvorhaben zeitlich zurückgestellt, so dass der Einsatz einer Schwingklappe hier immer noch möglich ist. Bernhart et al. (2009) gibt einen detaillierten Überblick über die anvisierten Projekte.

Auf Grund der Schwierigkeiten bei der Suche eines geeigneten HRB wurden auch alternative Anwendungsfälle näher betrachtet. In Zusammenarbeit mit dem Tiefbauamt der Stadt Karlsruhe konnte das Konzept der Schwingklappe an der Pfingst in Durlach dann erstmals in die Praxis transferiert werden. Die Schwingklappe kommt hierbei nicht im Hochwasserschutz zum Einsatz, sondern regelt den Abfluss in eine Fischaufstiegsanlage (FAA). Durch den Einsatz der Schwingklappe kann der Einfluss von oberwasserseitigen Wasserstandsschwankungen auf den Abfluss in der Fischaufstiegsanlage minimiert und die ökologische Durchgängigkeit an diesem Standort verbessert werden.

7.1 Projektbeschreibung

Die Pfinz ist auf Höhe des Turmberg-Freibades aufgestaut und wird zur Energieerzeugung mit einem Wasserrad genutzt. Der Betreiber des Wasserrades ist der Verein *Naturfreunde Durlach*. Zur Gewährleistung der Längsdurchgängigkeit ist am rechten Ufer eine Fischaufstiegsanlage (FAA) in Rauhgerinnebauweise integriert. Der Abfluss in die FAA wurde bis zum Projektbeginn über ein fest eingestelltes, unterströmtes Schütz gesteuert und soll laut Wasserrecht mindestens 200 l/s betragen. Etwa 1 km oberstrom der FAA befindet sich ein Dachwehr, bei dem Wasser aus der Pfinz in den Pfinz-Entlastungskanal abgeschlagen wird (vgl. Abbildung 7.1). Das Abflussspektrum der Pfinz im Bereich der FAA ist somit eingeschränkt. Im Hochwasserfall wird dieser Abschnitt mit maximal 5,5 m³/s beaufschlagt. Die Schluckfähigkeit des Wasserrades und die Leitsungsfähigkeit der Spülschütze reichen jedoch nicht aus, um diese Abflussmengen abzuführen, so dass im Hochwasserfall bis zu 2,7 m³/s über die FAA abgeleitet werden muss.



Abbildung 7.1: Übersicht über das Projektgebiet

Auf Grund der am Wasserrad eingesetzten Steuer- und Regelungstechnik und des stark variierenden Wasserangebotes der Pfinz kam es in der Vergangenheit immer wieder zu starken Schwankungen des Wasserspiegels im Oberwasserbereich des Wasserrades. In diesem Bereich befindet sich auch der Einstieg in die FAA, der hydraulisch als breitkroniger Überfall angesehen werden kann. Die Schwankungen in den Wasserspiegellagen führen folglich zu Abflussänderungen in der FAA.

Die Betriebserfahrungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass die auftretenden Abflussvariationen in der FAA 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. Im Rahmen der Voranalyse der hydraulischen Randbedingungen zur Implementierung einer Schwingklappe an der FAA Obermühle wurden längerfristige Pegelaufzeichnungen des Tiefbauamtes Karlsruhe ausgewertet. Über einzelne Abflussmessungen konnte dabei auch eine Wasserstands-Abfluss-Beziehung für den Einlaufbereich in die FAA abgeleitet werden, so dass aufbauend auf den Variationen der Wasserspiegellagen auch die Abflussvariationen ausgewertet werden konnten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.3 dargestellt.

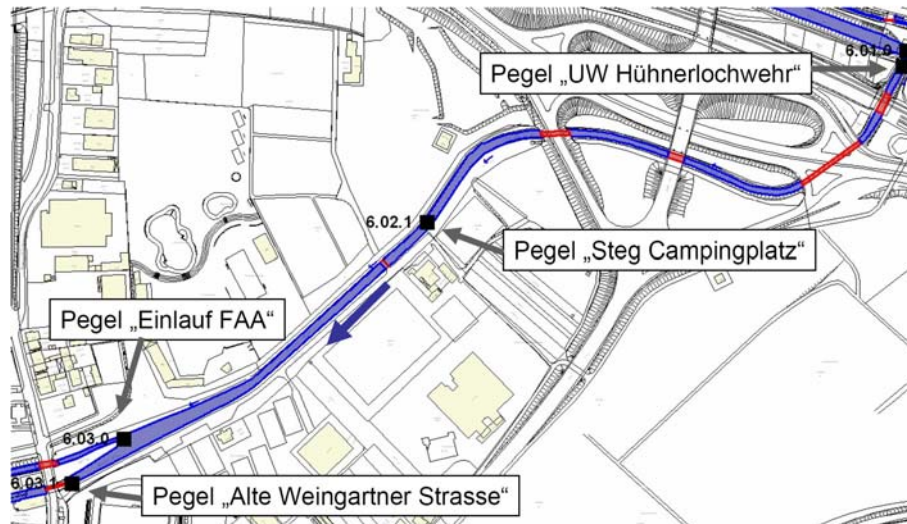


Abbildung 7.2: Pegelstellen im Projektgebiet

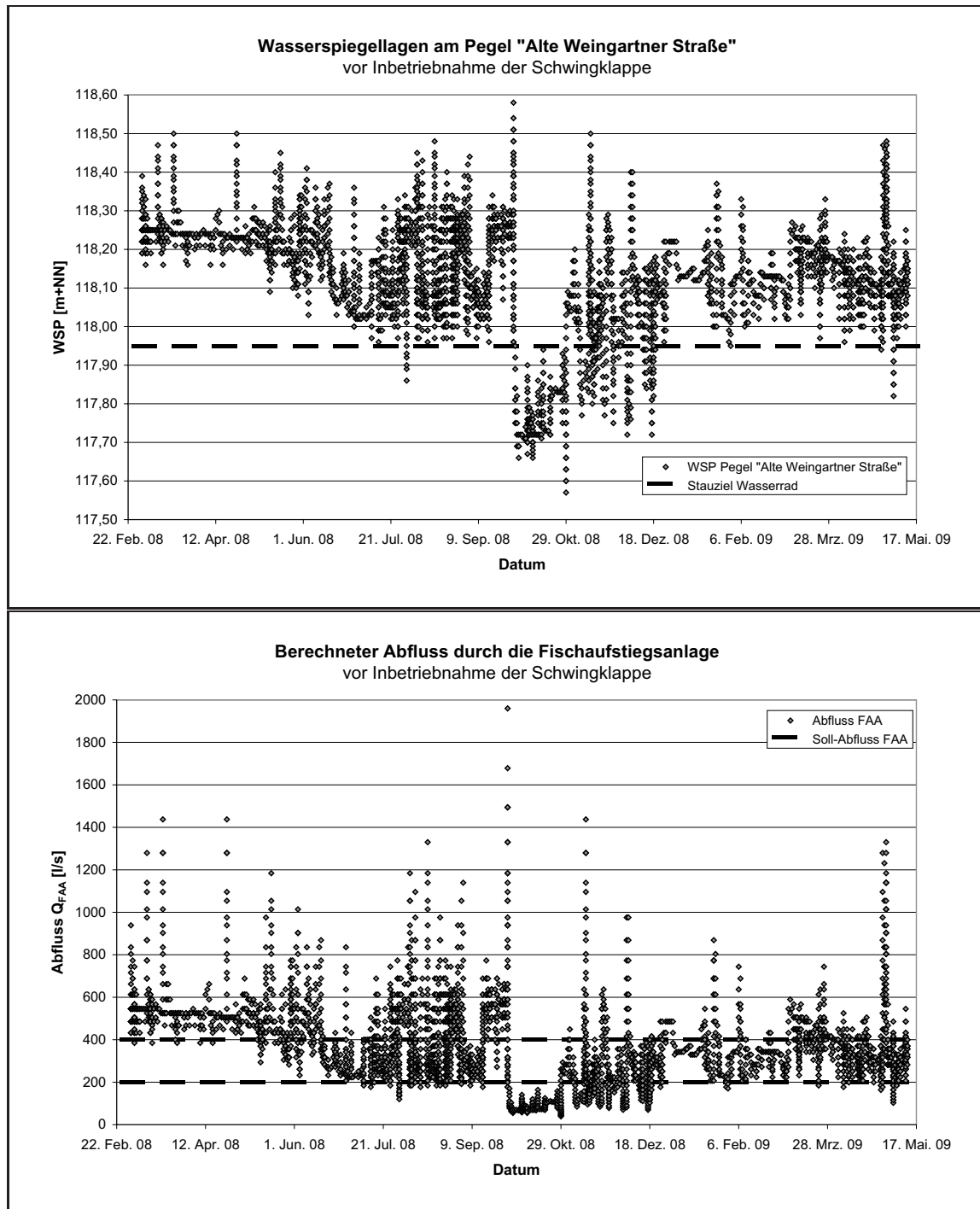


Abbildung 7.3: Wasserstands- und Abflussschwankungen der Pfinz vor Inbetriebnahme der Schwingklappe

7.2 Hydraulisches Gesamtkonzept

Im Zusammenhang mit der Dimensionierung der Schwingklappe für den Einlauf der FAA Obermühle an der Pfinz wurde ein hydraulisches Gesamtkonzept entwickelt, das die Abflussverhältnisse in der FAA ohne den Einsatz einer Steuer- oder Regelungstechnik vergleichmäßig. Folgende Zielvorgaben waren dabei einzuhalten:

- Gewährleistung eines minimalen Abflusses von $Q_{FAA,min} = 200 \text{ l/s}$.
- Regelung des Abflusses zur FAA auf ca. 250 bis 350 l/s bei Wasserständen zwischen 117,96 m+NN und 118,20 m+NN im Oberwasser.
- Zur Sicherstellung der Hochwassersicherheit des Gesamtsystems sollen temporär bis zu $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$ Abfluss über die FAA bei einem Wasserstand im Oberwasser von 118,55 m+NN abgeleitet werden können.

Bezogen auf das Abflussspektrum lassen sich diese Anforderungen in die drei Aufgaben *Niedrigwasserstützung*, *Mittelwasserregelung* und *Hochwasserentlastung* eingruppiert. Für diese drei Aufgaben wurden wiederum hydraulische Bauteile entwickelt und dimensioniert. Die Schwingklappe bildet dabei das zentrale Bauteil für die Mittelwasserregelung (vgl. Abbildung 7.4).

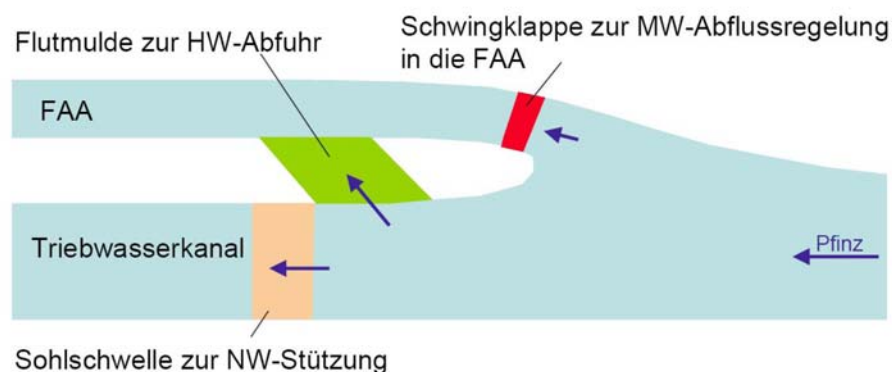


Abbildung 7.4: Hydraulisches Schema des entwickelten Gesamtkonzeptes

7.3 Bemessung der Schwingklappe

Bei der durchgeführten Dimensionierung der Schwingklappe zur Durchflussregelung am Einlauf der FAA ergaben sich die in Tabelle 7.1 aufgetragenen Klappenkennwerte. Die erarbeitete Dimension des Klappenkörpers entspricht dabei in etwa der Größe der Klappe im Laborversuch, so dass die Bemessung im Rahmen einer Versuchsreihe im Theodor-Rehbock-Wasserbaulaboratorium überprüft werden konnte. In Abbildung 7.7 ist die Einbaulage der Klappe schematisch dargestellt. Die hydraulischen Kenngrößen zur Funktion der Schwingklappe sind in Abbildung 7.6 dargestellt.

Tabelle 7.1: Technische Daten der an der FAA Obermühle eingesetzten Schwingklappe

	Klappenkörper
Material	Edelstahl
Konstruktion	Bepunktetes Rippenskelett
Breite	85,0 cm
Länge	96,0 cm
Höhe	25,0 cm
Gewicht	50,0 kg
Dichte	350 kg/m ³
Kote Sohle	117,20 m+NN
Kote Achse	117,78 m+NN
Spaltweite s_{90}	0,25 m

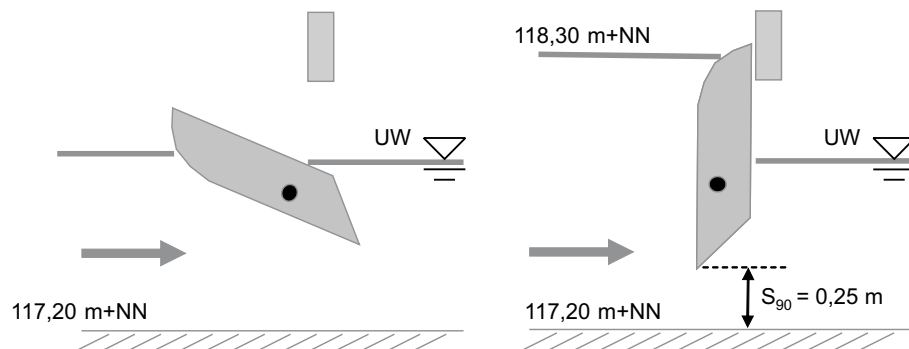


Abbildung 7.5: Einbauskizze der Schwingklappe an der FAA Obermühle

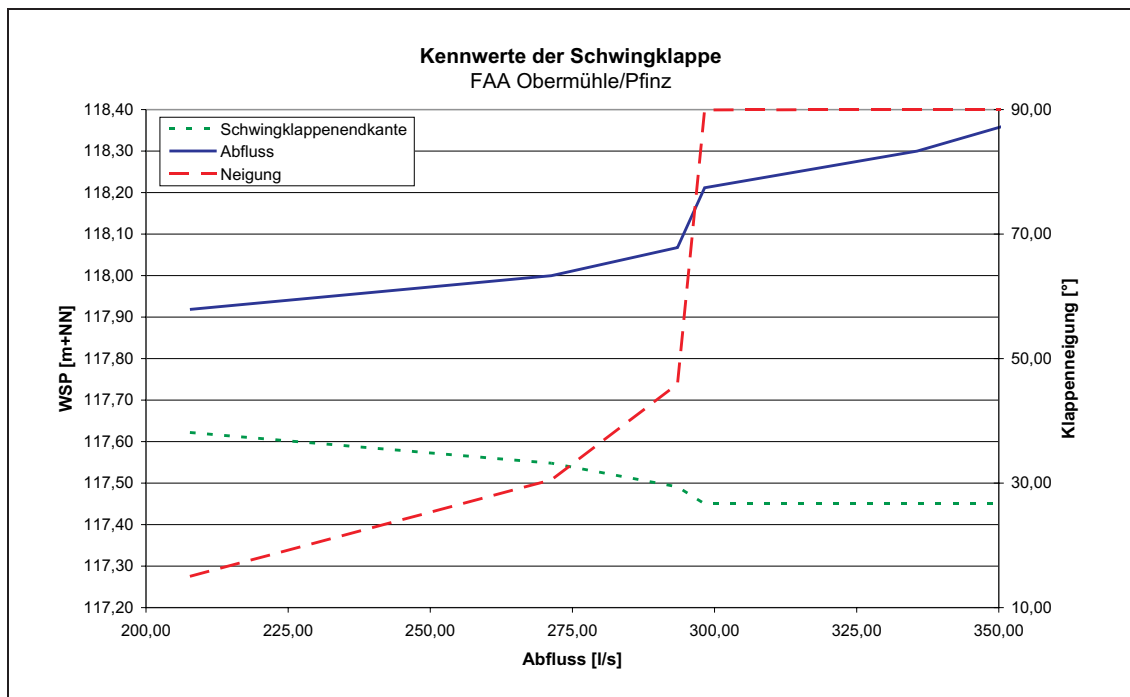


Abbildung 7.6: Erarbeitetes Kennliniendiagramm für die Schwingklappe an der FAA Obermühle

7.4 Bauausführung

Für die Realisierung der Pilotanlage wurde von Seiten des IWG die Planungs- und Bemessungsgrundlagen erarbeitet und dem Tiefbauamt der Stadt Karlsruhe zur Verfügung gestellt. Die Koordination der Gesamtbaumaßnahme wurde vom Tiefbauamt übernommen und der Klappenkörper sowie die komplette neue Schützenanlage wurden von der Schlosselei des Tiefbauamtes gefertigt. Auf Grund der geringen Druckhöhen in diesem speziellen Anwendungsfall wurde nur eine vereinfachte statische Bemessung des Klappenkörpers, aufbauend auf den Erfahrungen des Tiefbauamtes, durchgeführt.

In enger Zusammenarbeit zwischen dem IWG und dem Tiefbauamt wurde die Ausführung von konstruktiven Details diskutiert und Lösungsvorschläge erarbeitet. Zielsetzung war dabei die Anpassbarkeit der Schwingklappe an veränderte hydraulische Bedingungen zu verbessern und die Haltekonstruktion für die Schwingklappe im Einlaufbereich der FAA zu entwickeln. Die alte Schützenanlage am Einstieg der FAA wies deutliche Alterungsercheinungen auf und konnte nicht für den Einbau der Schwingklappe saniert werden, so dass der Beschluss gefasst wurde, eine neue Schützenanlage zu errichten.

Um der Forderung der Anpassbarkeit gerecht zu werden, wurde die Schwingklappe in die neue Edelstahl-Schütztafel integriert. Bei gezogener Schütztafel können somit auch eventuell nötige Wartungsarbeiten an der Schwingklappe im trockenen durchgeführt werden. Abbildung 7.7 und Abbildung 7.8 zeigen die Einbausituation. Mit den Schweißarbeiten wurde im Februar 2009 begonnen. Die Arbeiten an der neuen Schütztafel waren im Mai 2009 abgeschlossen und nach Einbau der neuen Führungsschienen wurde die Schwingklap-

pe am 15. Juni 2009 in Betrieb gestellt. Eine ausführliche Fotodokumentation zum Bau des Klappenkörpers und der baulichen Integration in das Schütz ist in Anlage D enthalten.

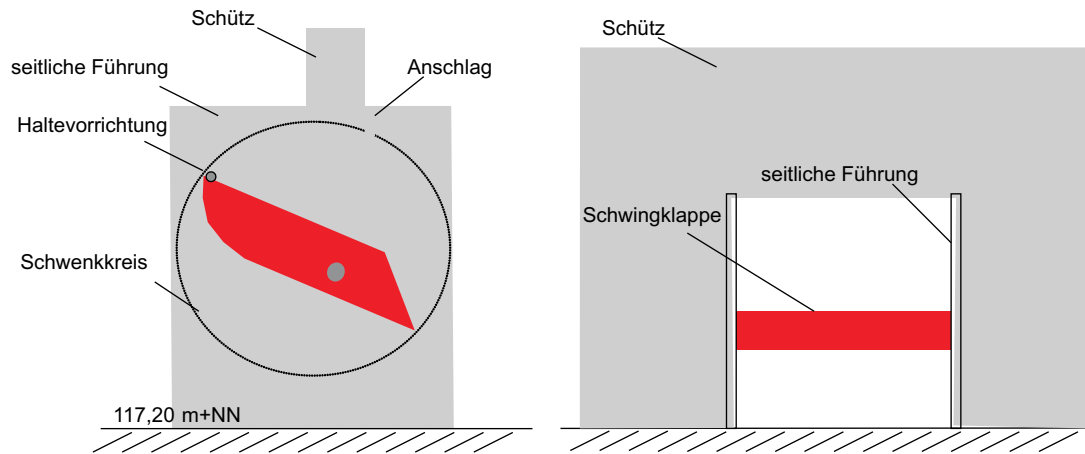


Abbildung 7.7: Integration der Schwingklappe in das Schütz an der FAA Obermühle



Abbildung 7.8: Schützmodul mit Schwingklappe beim Einbau

7.5 Überprüfung der hydraulischen Bemessung

Am 15.06.2009 wurde die Schwingklappe an der FAA Obermühle in Betrieb genommen. Neben den Erfahrungen die bezüglich der betrieblichen Fragestellungen gemacht werden konnten (vgl. Kapitel 7.6) war auch die Überprüfung der hydraulischen Bemessung für den weiteren Praxistransfer der Schwingklappe von Interesse. Im Zeitraum von der Inbetriebnahme bis zum 31.01.2010 wurde die Anlage in regelmäßigen Abständen besucht und das Verhalten der Schwingklappe optisch bewertet. Darüber hinaus wurde im Zeitraum Oktober 2009 bis Januar 2010 eine Messkampagne durchgeführt, die eine detaillierte Bewertung der hydraulischen Eigenschaften der Schwingklappe an der FAA Obermühle ermöglicht.

7.5.1 Messtechnik

Für die hydraulische Bewertung und den Vergleich des Regelverhaltens mit den erarbeiteten Bemessungswerten müssen der Wasserstand, der Abfluss und die Klappenneigung vor Ort dokumentiert werden. Auf Grund der technischen Gegebenheiten und der benötigten Genauigkeit der Daten wurde für die Erfassung der Wasserspiegellagen und der Klappenneigung ein einfaches, optisch abzulesendes Messsystem vor Ort installiert. Die Wasserspiegellagen wurden dabei über Pegellatten im Ober- und Unterwasser der Schwingklappe ermittelt, die über einen im Nahbereich der Anlage vorhandenen Vermessungspunkt referenziert werden konnten. Die Klappenneigung wurde über Markierungen auf dem Führungsblech abgelesen. Abbildung 7.9 zeigt die eingesetzte Messtechnik.



Abbildung 7.9: Eingesetzte Messtechnik für die hydraulische Überprüfung

Die Erfassung der exakten Abflüsse vor Ort stellte sich hingegen schwieriger da: Der Abfluss der Pfinz ist im Bereich der Obermühle durch die Regelung des Hühnerlochwehres beeinflusst (vgl. Kapitel 7.1). Eine Abflussbestimmung des unterstromigen Fließabschnittes der Pfinz ist über das Regelverhalten des Hühnerlochwehres nicht möglich. Darüber hinaus sind auch die hydraulischen Bedingungen am Wasserrad nicht eindeutig, da neben den Leckageverlusten auch Wasser über ein Spülschütz ins Unterwasser gelangen kann.

Der Abfluss in der FAA wurde daher mittels einer Vielpunktemessung im Zulaufquerschnitt der Schwingklappe bestimmt. Hierzu wurde ein geeignet erscheinendes Querprofil 4,0 m oberstrom der Schwingklappenachse ausgewählt. Die in der Arbeitsanleitung Daten- und Pegeldienst Baden-Württemberg aufgeführten Kriterien bezüglich des Gewässerprofils sind hier weitestgehend erfüllt. Das ausgewählte Gewässerprofil ist regelmäßig, auch bei unterschiedlichen Wasserständen eindeutig begrenzt und weist eine hindernisfreie Anströmstrecke mit einer Länge von ca. 10 m auf, was bezogen auf die Breite des Gewässers das 2,7-fache der Gewässerbreite entspricht [76].

Das ausgewählte Querprofil ist ein massiv eingefasster Rechteckquerschnitt mit einer lichten Weite von 3,72 m und einer Wassertiefe von ca. 1,15 m. Auf der rechten Seite in Fließrichtung gesehen sind an der Sohle kleinere Sedimentablagerungen mit Pflanzenwachstum vorhanden, ansonsten besitzt der Querschnitt eine betonierte Sohle.

Die Vielpunktmessungen wurden mit fünf vertikalen Messprofilen mit jeweils fünf bis sechs Messpunkten über die Höhe mit dem induktiven Geschwindigkeitsmessgerät *Nautilus C 2000* von *OTT* von einem mobilen Steg aus durchgeführt. Der *Nautilus C 2000* ist für den Einsatz in verkrauteten Uferzonen mit sehr geringen Fließgeschwindigkeiten ausgelegt. Die Messzeit an jedem Punkt wurde auf Grund der geringen Fließgeschwindigkeiten auf 60 s festgelegt. Hierdurch kann der Einfluss der turbulenten Pulsationen und der hieraus resultierende zufällige Fehler bei kurzen Messzeiten verringert werden. Andererseits stellt diese Messzeit auch einen guten Kompromiss bezüglich der Gesamtmesszeit dar [76]. Abbildung 7.10 gibt einen optischen Eindruck des ausgewählten Gewässerprofils.

Gemäß den Empfehlungen der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) sollten 8-15 Messlotrechte mit einem maximalen Abstand von 5,0 m über den Querschnitt verteilt werden. Der Abstand der Messlotrechten ist dort enger zu wählen, wo starke Änderungen in der Fließgeschwindigkeit vorliegen. Die Querschnittsgeometrie im Messquerschnitt ist sehr kompakt und hinsichtlich ihrer Sohllage als unstrukturiert zu bezeichnen, so dass für die Abflussbestimmungen der FAA die in Abbildung 7.11 dargestellten Messlotrechten verwendet wurden.

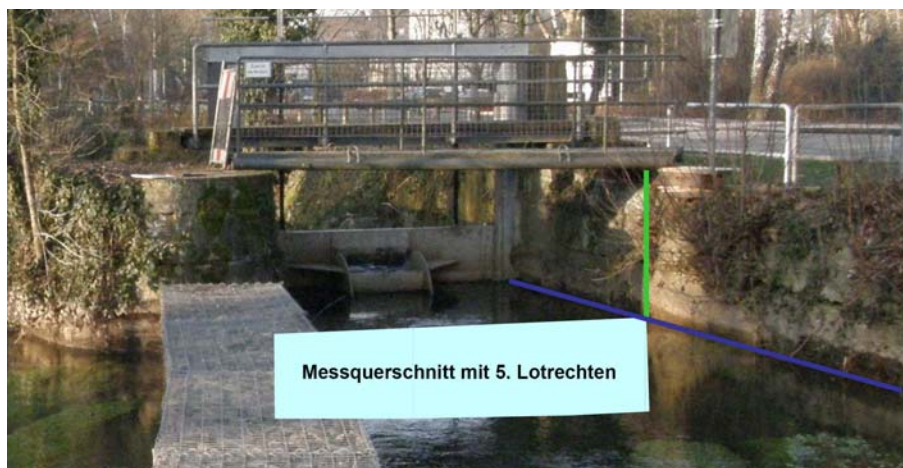


Abbildung 7.10: Messquerschnitt für die Abflussmessung mittels Vielpunktmessung

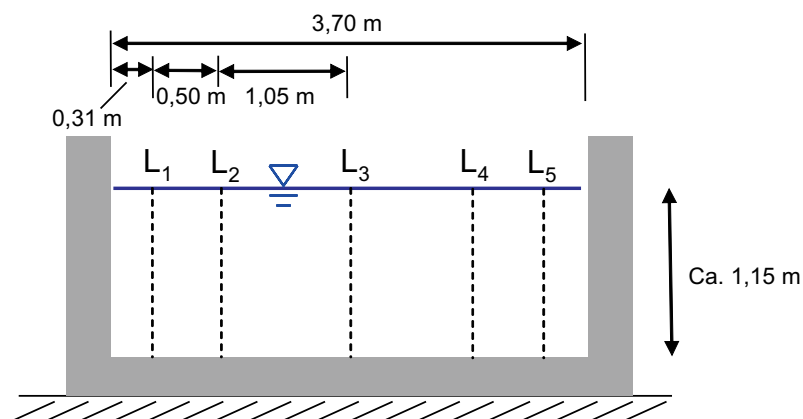


Abbildung 7.11: Verteilung der Lotrechten für die Vielpunktmessung

Entsprechend den Empfehlungen der Arbeitsanleitung Pegel- und Datendienst Baden-Württemberg wurden die Messpunkte gleichmäßig auf der Lotrechten verteilt. Ausgehend von der oberflächennahen Messung wurden die Messpunkte jeweils in einem Abstand von 20 cm gesetzt. Im sohnahen Bereich wurde der Abstand wegen der hier vorliegenden sehr geringen Fließgeschwindigkeiten teilweise vergrößert. Die genaue Lage der Messpunkte in den einzelnen Messlotrechten ist zusammen mit den gemessenen Geschwindigkeiten am 20.10.2009 in Abbildung 7.12 dargestellt.

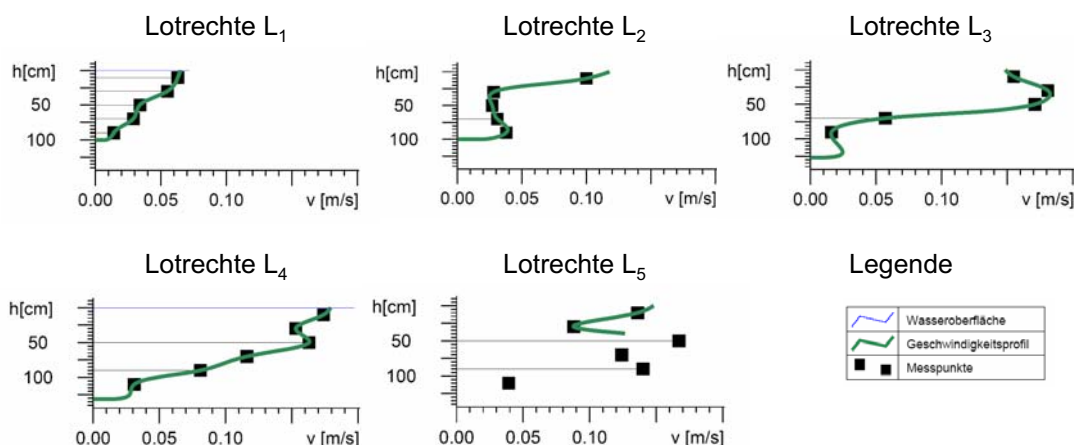


Abbildung 7.12: Verteilung der Messpunkte über die Lotrechten und exemplarische Darstellung der Geschwindigkeitsmessungen, Messung vom 20.10.2009

7.5.2 Ergebnisse Klappenneigung

In einem ersten Schritt wurde untersucht, inwiefern die Lagerreibung einen Einfluss auf die Klappenneigung hat, und ob sich hieraus Hystereseeffekte ergeben. Auf Grund der besonderen hydraulischen Situation an der Obermühle ist es möglich, durch die Betätigung des Spülschützes am Wasserrad die Wasserspiegellagen im Oberwasser der Schwingklappe unabhängig vom Abfluss in der Pfinz und vom Betriebszustand des Wasserrades einstellen zu können. Für die Versuche zum Hystereseeffekt wurde ausgehend von einer Klappenneigung von 60° die Klappe bis zu einer Neigung von 28° abgesenkt. Anschließend wurde die Klappe bis zu einer Klappenneigung von 90° aufgerichtet. Die Auswertung dieser Versuchsreihe ist in Abbildung 7.13 dargestellt.

In der Auswertung zum Hystereseeffekt erkennt man, dass die Klappenneigungen im Falle eines Ablegens nicht mit den Klappenneigungen beim Aufrichten übereinstimmt. Während des Aufrichtvorganges liegen die Wasserspiegellagen, wie auf Grund der Lagerreibung zu erwarten war, jeweils höher als beim Absenken. Die Abweichungen der Wasserspiegellagen bei gleichen Neigungen betragen jedoch lediglich 5,0 cm, so dass die dokumentierten Hystereseeffekte bei den weiteren Auswertungen im Rahmen der angestrebten Genauigkeit nicht weiter beachtet wurden.

Das hydraulische Verhalten der Schwingklappe wurde ausgehend von den Ergebnissen der Laborversuche für den Standort an der FAA Obermühle vor Einbau der Schwingklappe berechnet (vgl. Kapitel 7.3). In einem zweiten Schritt wurde daher die gemessene Wasserstands-Klappenneigungs-Beziehung mit den berechneten Werten verglichen.

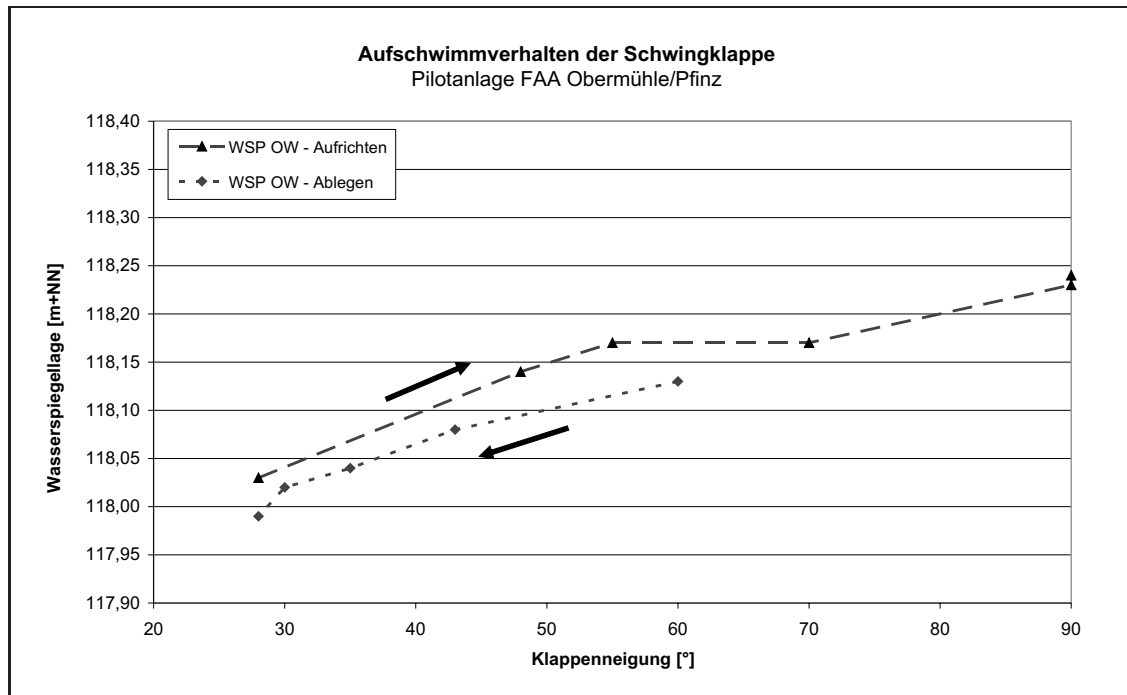


Abbildung 7.13: Vergleich der Klappenneigung beim Absenken und beim Aufrichten der Schwingklappe

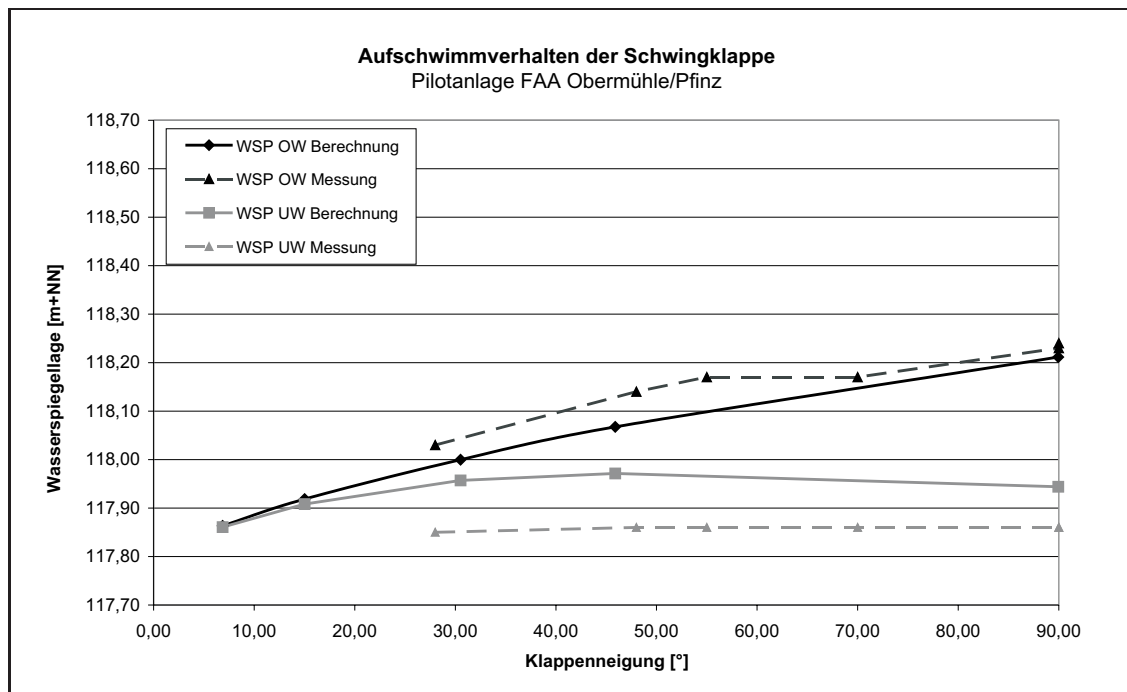


Abbildung 7.14: Entwicklung der Wasserstände im Oberwasser und Unterwasser während des Aufschwimmens, Vergleich der berechneten Werte mit Messungen

Für die Wasserstände im Oberwasser der Schwingklappe (vgl. Abbildung 7.14, schwarze Linien) zeigt die Auswertung eine gute Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Klappenneigung auf. Die Abweichungen betragen maximal 8° , wobei noch die Unsicherheit von $2^\circ - 3^\circ$ bei der Bestimmung der Klappenneigung vor Ort berücksichtigt werden müssen. Die verbleibenden Abweichungen werden der Lagerreibung zugeschrieben. Bestärkt wird dies durch die Tatsache, dass die gemessenen Wasserstände über den berechneten Werten sind. Ein weiterer Hinweis auf eine nicht unwesentliche Lagerreibung ist der Verlauf der Wasserspiegellagen zwischen einer Klappenneigung von 55° und 70° . Hier ist der Verlauf des Wasserspiegels horizontal, was ohne zusätzliche Lagerreibung nicht zu erklären wäre.

Auch der Verlauf der Wasserstände unterstrom der Schwingklappe (vgl. Abbildung 7.14, graue Linien) zeigt eine gute Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Werte. Die Abweichungen liegen in einer Größenordnung von ca. 10 cm. Auffallend ist, dass die Wasserstände im Unterwasser in der Natur tiefer liegen als berechnet.

Die dokumentierten Abweichungen in den Wasserspiegellagen im Unterwasser sind systematische Abweichungen und können daher nicht über Ablesefehler oder sonstige Ungenauigkeiten erklärt werden. Vielmehr bedarf es einer detaillierten Betrachtung des hydraulischen Systems unterstrom der Schwingklappe.

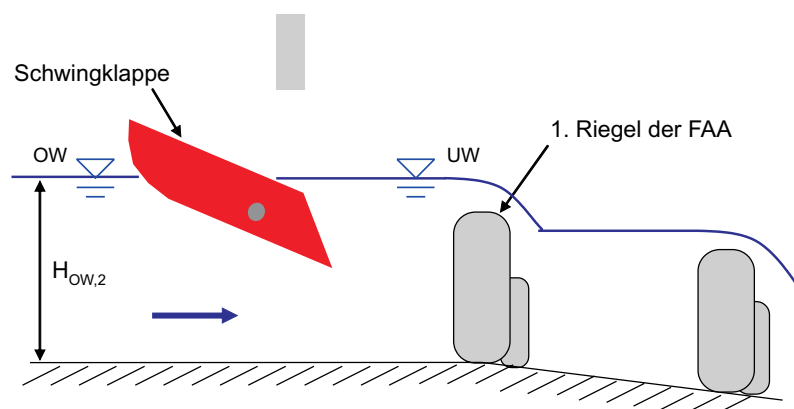


Abbildung 7.15: Hydraulische Situation unterstrom der Schwingklappe

In Kapitel 4.2.3 wurde die besondere Bedeutung der Wasserstands-Abfluss-Beziehung der unterstromigen Gewässerstrecke auf die Funktionsweise der Schwingklappe aufgezeigt. Um überhaupt aufschwimmen zu können, muss die Schwingklappe von Unterstrom her eingestaut werden, weshalb bei sämtlichen Betriebszuständen rückgestauter Abfluss unter der Schwingklappe vorherrscht. Im Falle der Pilotanlage an der FAA Obermühle übernimmt die Geometrie des ersten Riegels des naturnahen Beckenfischpasses diese Funktion (vgl. Abbildung 7.15). Der Abfluss über den Riegel kann dabei hydraulisch als Abfluss über ein breitkroniges Wehr angesehen werden.

Aus Abbildung 7.14, graue Linien, kann abgelesen werden, dass das derzeitige hydraulische Verhalten des ersten Riegels nicht den Vorgaben aus der Bemessung entspricht. Es wird empfohlen, im Zuge der Unterhaltungsmaßnahmen den Abflussquerschnitt im ersten Riegel durch das Einbringen eines zusätzlichen Störsteines zu verkleinern. Mit den Versuchen zum hydraulischen Verhalten der Schwingklappe (vgl. Kapitel 4.2) konnte gezeigt werden, dass durch ein Anheben des Unterwasserstandes bei ansonsten gleichen Randbedingungen

die Klappenneigung größer wird. Ursache hierfür ist die Vergrößerung der Auftriebskraft. Durch die Anpassung der Geometrie des ersten Riegels wird folglich die Klappenneigung zu den jeweiligen Oberwasserständen vergrößert.

7.5.3 Ergebnisse Abflussbestimmung

Über die in Kapitel 7.5.1 beschriebenen Vielpunktmessungen wurde bei verschiedenen Betriebszuständen der Abfluss in der FAA ermittelt. Die Geschwindigkeitsmessungen mit dem induktiven Messgerät *Nautilus* werden mit Hilfe der Software *Biber* von *Kisters AG* weiterverarbeitet. Ausgehend von der aufgemessenen Geometrie des Messquerschnittes und den Geschwindigkeiten an den insgesamt 20 - 25 Messstellen wurde die Geschwindigkeitsverteilung im Messquerschnitt abgeleitet. Über eine Integration der konnte der Abfluss ermittelt werden. Abbildung 7.16 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen am 20.10.2009 als sogenannte Isotachendarstellung (Linien gleicher Geschwindigkeit).

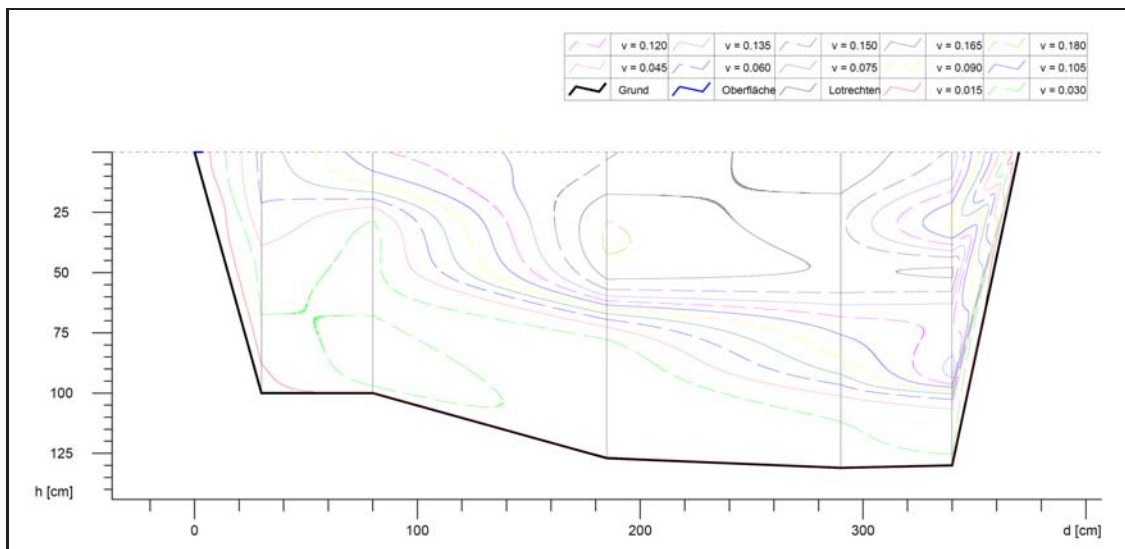


Abbildung 7.16: Isotachendarstellung des Geschwindigkeitsfeldes

Die Auswertung des Geschwindigkeitsfeldes zeigt auf, dass der Messquerschnitt entgegen der augenscheinlichen Begutachtung nicht homogen durchströmt wurde. Die maximale Fließgeschwindigkeit betrug 0,183 m/s, es wurden aber auch großflächige Bereiche mit einer Fließgeschwindigkeit von 0,03 m/s durchströmt. Vor allem im linken Bereich des Querschnittes im Bereich der Sedimentationsflächen und der Vegetation wurden nur sehr geringe Fließgeschwindigkeiten erreicht. Die Ergebnisse der Abflussermittlung sind in Abbildung 7.17 den im Rahmen der Dimensionierung der Schwingklappe an der FAA Obermühle berechneten Abflüssen gegenübergestellt.

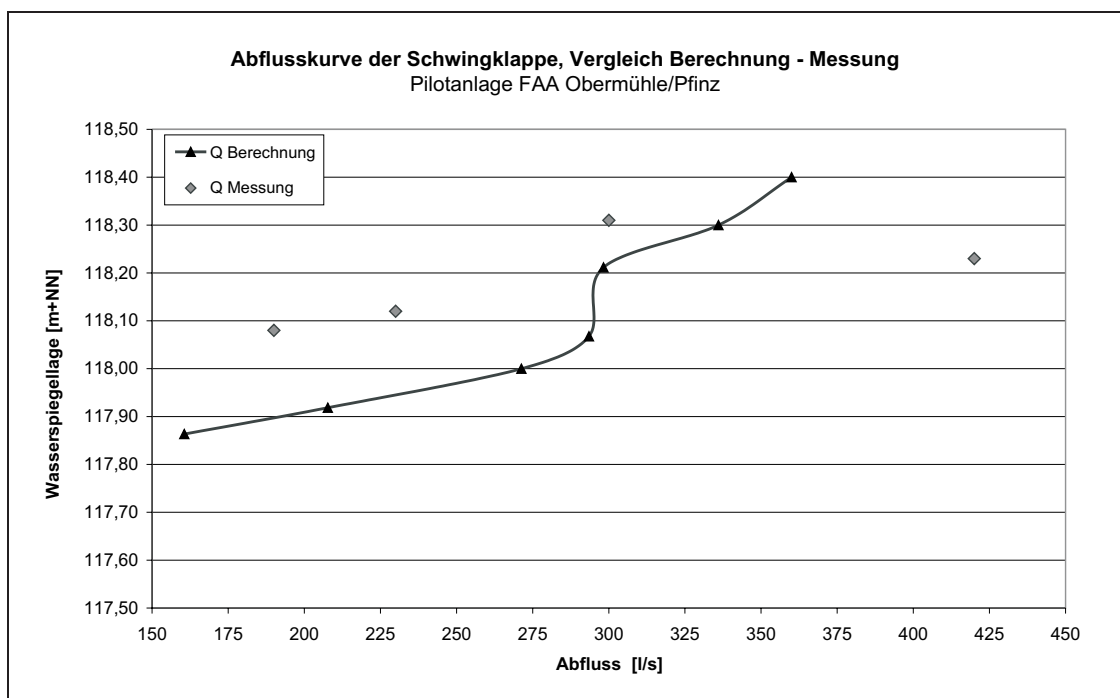


Abbildung 7.17: Vergleich der berechneten und gemessenen Abflüsse für die Schwingklappe an der FAA Obermühle

Die Grafik zeigt, dass die gemessenen Werte zum Teil erheblich von den berechneten Abflüssen abweichen. Vor allem der gemessene Abfluss von 419 l/s ordnet sich nicht in den zu erwartenden Verlauf ein und liegt auch bezüglich der Größenordnung in einem nicht zu erklärenden Bereich. Daher wurde diese Messung weitergehend analysiert. Hierzu wurde mit der Software *BIBER* eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der verwendeten Lotrechte durchgeführt. Durch ausblenden einzelner Lotrechte für die Berechnung kann so der Einfluss auf den ermittelten Gesamtabfluss abgeschätzt werden (vgl. Tabelle 7.2).

Tabelle 7.2: Sensitivitätsanalyse der Abflussermittlung

Anzahl der berücksichtigten Lotrechten	Lotrechte Nr.	Q [m ³ /s]
5	L ₁ , L ₂ , L ₃ , L ₄ , L ₅	0,418
3	L ₂ , L ₃ , L ₄	0,397
2	L ₁ , L ₅	0,552
1	L ₃	0,394

Die Sensitivitätsanalyse zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der ermittelten Abflüsse bei Verwendung der schneller durchströmten mittleren Lotrechte, so dass der große Fehler nicht durch eine Fehlmessung an einer einzelnen Lotrechten hervorgerufen werden kann. Wie zu erwarten war, weicht nur die Abflussermittlung, die nur auf den randnahen Lotrechten L₁ und L₅ basiert, deutlich ab.

Bei den Messungen an der Schwingklappe konnte jedoch festgestellt werden, dass die Abflussbedingungen in der Pfinz auf Grund der Abflussregelung am Hühnerlochwehr nicht stationär sind. Die Anlagenregler am Wasserrad und am Hühnerlochwehr sind nicht ausreichend aufeinander abgestimmt, so dass es in der Pfinz zu Schwall- und Sunkerscheinungen kommt und somit keine stationären Bedingungen bei den Geschwindigkeitsmessungen gegeben sind. Die große Abweichung der Abflussmessung mit 419 l/s wird dieser Instationarität zugeordnet.

Bei den beiden kleinsten Abflüssen (190 l/s und 230 l/s) beträgt die Abweichung zwischen den berechneten und gemessenen Oberwasserständen ca. 18 cm. Deutlich zu erkennen ist jedoch, dass die beiden Werte hinsichtlich ihres Verlaufes gut zu den berechneten Abflüssen passen. Auch die Abflussmessung von 300 l/s passt vom Verlauf her gut zu den berechneten Werten, auch hier tritt jedoch ein höherer Oberwasserstand auf als berechnet.

Woher kommen nun diese Abweichungen bei den gemessenen Abflüssen bzw. in den Oberwasserständen? Es ist anzumerken, dass die Bestimmung des Abflusses über eine Vielpunkt-messung in dem ausgewählten Querprofil auf Grund der dokumentierten Strömungssituation sicherlich fehlerbehaftet ist. Die Inhomogenität der gemessenen Fließgeschwindigkeiten und die hieraus entstehenden Fehler bei der Interpolation und Integration über die Querschnittsfläche können zu den dokumentierten Abweichungen im Abfluss führen. Auch bei den Abflussbestimmungen der FAA Obermühle im Jahre 2003 wurden große Abweichungen hinsichtlich der ermittelten Abflüssen bei ansonsten gleichen Randbedingungen festgestellt [43]. Der Abfluss wurde bei den damaligen Messungen im unterstromigen Abschnitt der FAA mit einer Vielpunkt-messung und über Tracermessungen bestimmt.

Aus den Messungen der Unterwasserstände lässt sich dennoch die Wirkungsweise der Schwingklappe aufzeigen. Wie bereits beschrieben ist der erste Riegel der FAA aus hydraulischer Sicht als breitkroniges Wehr anzusehen. Über die dort vorhandene Wasserstands-Abfluss-Beziehung ist der Zusammenhang zwischen dem Oberwasserstand und dem Abfluss definiert. Eine Erhöhung des Abflusses führt auf Grund der vergrößerten örtlichen Fließverluste folglich zu einer Erhöhung des Oberwasserstandes. Aus Abbildung 7.14 kann jedoch abgelesen werden, dass der gemessene Unterwasserstand über das aufgetragene Spektrum an Klappenneigungen als konstant angesehen werden kann. Dies zeigt auf, dass damit einhergehend auch die von der Schwingklappe abgegebenen Abflüsse über den Aufrichtvorgang konstant sind. Aus Abbildung 7.17 kann abgelesen werden, dass auch die Größenordnung des für die FAA Obermühle angestrebten Abflusses eingehalten wird.

Um die Abflussregelung der Schwingklappe weitergehend zu dokumentieren, wurde eine Auswertung der Wasserstände am Pegel *Alte Weingartner Straße* nach Inbetriebnahme der Schwingklappe analog zu Abbildung 7.3 durchgeführt. Bei den Auswertungen des Ist-Zustandes wurden die im Untersuchungszeitraum gemessenen Wasserstände unter Zuhilfenahme der bekannten Wasserstands-Abfluss-Beziehung des Einlaufbereiches der FAA in eine Darstellung der Abflüsse überführt.

Grundlage für die Umrechnung der gemessenen Wasserstände in den Abfluss der FAA nach Inbetriebnahme der Schwingklappe war die in Abbildung 7.6 dargestellte Abflusskennlinie. Diese basiert auf den Ergebnissen der Laboruntersuchungen. Die im Untersuchungszeitraum nach Inbetriebnahme gemessenen Wasserstände am Pegel *Alte Weingartner Straße* und die daraus berechneten Abflüsse in der FAA sind in Abbildung 7.18 aufgetragen.

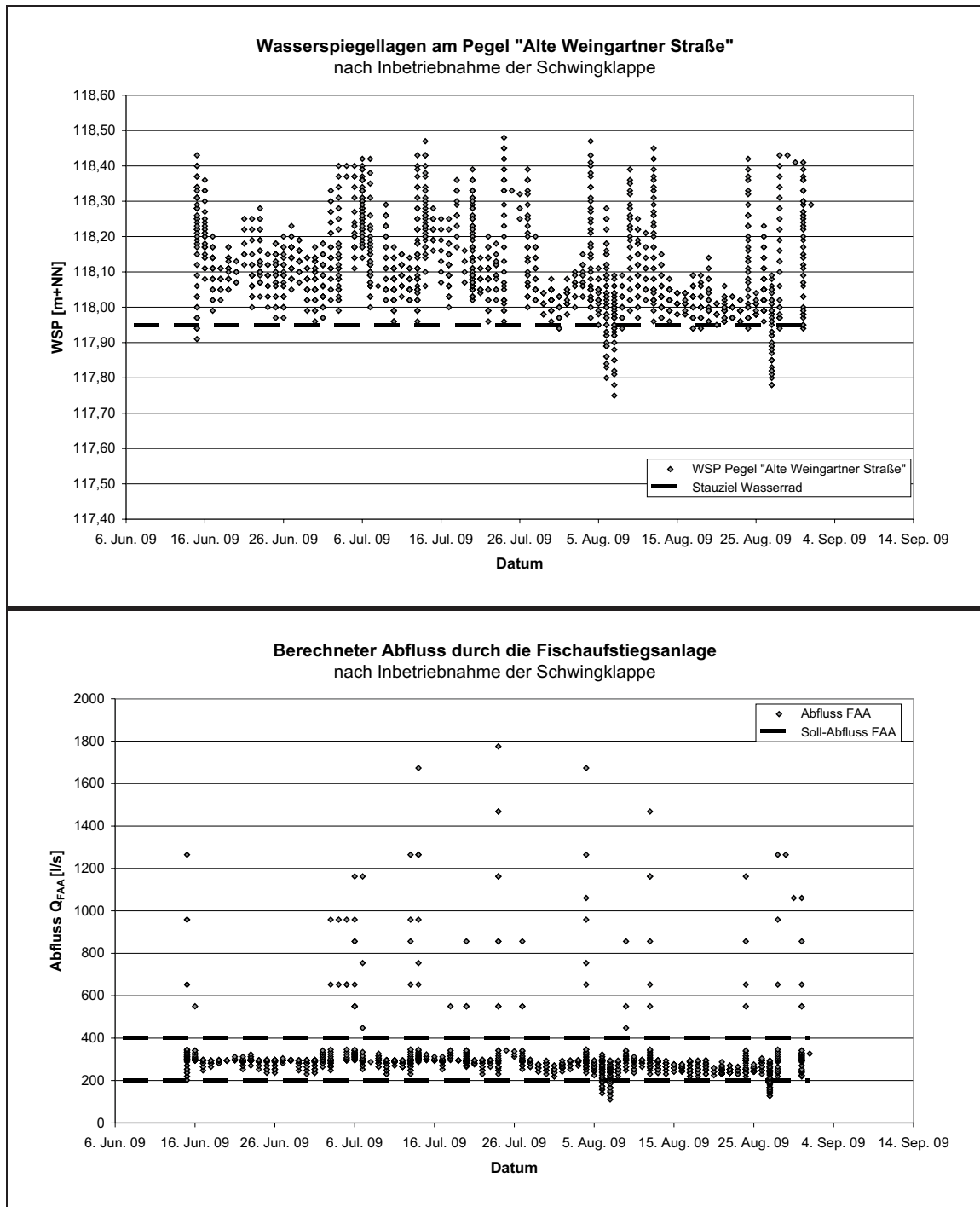


Abbildung 7.18: Wasserstands- und Abflussschwankungen nach Inbetriebnahme der Schwingklappe

Hinsichtlich der Wasserstände in der Pfinz zeigt sich nach Inbetriebnahme der Schwingklappe ein ähnliches Bild wie vor dem Einbau. Die Wasserstände liegen dauerhaft über dem vorgegebenen Stauziel des Wasserrades von 117,96 mNN. Ein Grund hierfür ist sicherlich die hydraulische Situation zwischen dem Pegel und dem Einlauf des Wasserrades.

Hier befindet sich ein 25 m langer Rohrdurchlass mit einem Durchmesser von 1,8 m, der zu größeren Fließverlusten führt. Gemäß den Unterlagen zum Hochwassernachweis liegen die Fließverluste des Rohrdurchlasses auch bei sehr großen Abflüssen ($Q = 5,0 \text{ m}^3/\text{s}$) im Bereich von weniger als 10 cm. Die Fließverluste im Untersuchungszeitraum bei Normalbetrieb des Wasserrades ($Q \approx 2,0 \text{ m}^3/\text{s}$) sind nochmals geringer, so dass die beobachteten Abweichungen nicht allein den hydraulischen Verhältnissen am Rohrdurchlass zugeschrieben werden können.

Vielmehr zeigt sich, dass die Regelung des Wasserrades die Anforderungen nicht erfüllt. Bei den diversen Ortsterminen im Untersuchungszeitraum konnte festgestellt werden, dass das Wasserrad nicht immer in Betrieb war und dass daher der Wasserstand im Oberwasser der Schwingklappe zu hoch war.

Wie wirken sich die dokumentierten Wasserstände auf die Abflüsse in der FAA aus? Aus Abbildung 7.18 wird die Wirkungsweise der Schwingklappe ersichtlich. Über einen großen Zeitraum wird der geforderte Abflussbereich zwischen 200 l/s und 400 l/s eingehalten. Einzelne große Abflüsse durch die FAA sind jedoch auch zu erkennen. Ursache hierfür ist die im hydraulischen Gesamtkonzept integrierte Hochwasserentlastung in Form der Flutmulde (vgl. Kapitel 7.2): Wenn der Wasserstand im Oberwasser die Höhe 118,30 mNN überschreitet, dann springt die Hochwasserentlastung an und eine hydraulische Überlastung der FAA wird in Kauf genommen.

Die Auswertung zeigt diesbezüglich, dass die Hochwasserentlastung häufig anspringt so dass eine weitere Optimierung der Reglerparametrisierung des Wasserrades und eine bessere Abstimmung im Zusammenspiel mit der Wasserabgabe am Hühnerlochwehr nötig ist.

7.6 Betriebserfahrungen

Neben den hydraulischen Aspekten wurde im Rahmen des durchgeführten Monitorings und bei zusätzlichen Besuchen auf der Anlage in Durlach das Verhalten der Schwingklappe hinsichtlich der betrieblichen Fragestellungen dokumentiert. Ein Schwerpunkt war hier vor allem das Verhalten bei Geschwemmseltrieb und die Anfälligkeit gegenüber Vereisung. Fachlich begleitet wurde diese Dokumentation vom Betreiber der Schwingklappe (Tiefbauamt der Stadt Karlsruhe) und vom Betreiber des Wasserrades Obermühle (Verein Naturfreunde Durlach).

7.6.1 Geschwemmseltrieb

Die Pfinz überwindet auf ihrer knapp 60 km langen Fließstrecke einen Höhenunterschied von 220 m. Das 231 km² große Einzugsgebiet liegt im südlichen Kraichgau und ist Land- und Forstwirtschaftlich geprägt, so dass vor allem im Herbst eine große Menge an Getreisel anfällt. Der Einsatz der Schwingklappe zur Abflussregulierung der Fischauftiegsanlage weicht vom ursprünglichen Anwendungsfall ab, so dass auch eine Anpassung des vorgeschlagenen Rechenkonzeptes (vgl. Kapitel 5.1.1) erfolgen musste. Zum einen unterliegen die Wasserstände der Pfinz nicht so großen Schwankungen wie im Retentionsraum eines Hochwasserrückhaltebeckens, zum anderen geht von der Schwingklappe an der Pfinz im Vergleich zu einem Hochwasserrückhaltebecken ein viel geringeres Risiko für Mensch und

Umwelt aus, so dass hier wichtige Erfahrungen zur Schwingklappe gesammelt werden können. Verstärkt wird dies noch durch die Tatsache, dass die Schwingklappe an der Pfinz ohne Unterbrechung im Wasser liegt und somit fortlaufend den äußeren Bedingungen wie z.B. Geschwemmseltrieb ausgesetzt ist.

Bei der Projektrealisation wurde daher in Absprache mit dem Tiefbauamt auf eine Rechenanlage verzichtet. Zur Geschwemmselabwehr wurde lediglich ein Schwimmbalken im Einlaufbereich der Fischaufstiegsanlage angeordnet (vgl. Abbildung 7.19).



Abbildung 7.19: Schwimmbalken vor dem Zulaufbereich der Schwingklappe

Im Zeitraum vom 15.6.2009 bis zum 31.01.2010 wurde die Schwingklappe durch das Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, das Tiefbauamt der Stadt Karlsruhe sowie vom Wasserradbetreiber intensiv überwacht. Im gesamten Beobachtungszeitraum konnten dabei keine betrieblichen Einschränkungen auf Grund von Geschwemmsel dokumentiert werden. Die dokumentierte Robustheit der Schwingklappe gegenüber Geschwemmsel wird durch die Tatsache bestärkt, dass im Untersuchungszeitraum keine Reinigung oder eine Entnahme von Geschwemmsel stattgefunden hat. Es bildeten sich lediglich kleinere Ansammlungen von Geschwemmsel im Oberwasser und auch Teilverlegungen des Spaltes zwischen dem Klappenkörper und der seitlichen Führungswand konnten beobachtet werden (vgl. Abbildung 7.20). Die Verlegungen und Geschwemmselansammlungen waren jedoch nur temporär, so dass der Schwingklappe eine gewisse Selbstreinigung zugesprochen werden kann.

Die Unempfindlichkeit der Schwingklappe gegenüber Geschwemmsel soll anhand eines Vergleiches mit den Betriebserfahrungen am Wasserrad Obermühle verdeutlicht werden. Im Zeitraum zwischen dem 7.11.2009 und dem 12.11.2009 überlagerte sich in Karlsruhe starker Wind mit dem Blattabwurf der Bäume, so dass sehr viel organisches Material in die Gewässer gelangte. Der Anlagenbetreiber des Wasserrades Obermühle berichtete von großen Problemen bei der Geschwemmselabwehr. Der manuell zu reinigende Grobrechen mit einem Stabanstand von 200 mm musste halbstündlich gereinigt werden. Auf Grund des erforderlichen Personaleinsatzes wurde das Wasserrad schließlich außer Betrieb genommen. Auch bei diesem extremen Ereignis kam es zu keinerlei betrieblichen Problemen an der Schwingklappe.

Der Beobachtungszeitraum ist mit Blick auf die Auswirkungen des Geschwemmseltriebes äußerst günstig, da gerade im Herbst viel organisches Material in die Gewässer eingetragen wird. Aus diesem Grund erscheint auch eine Ausdehnung der Ergebnisse zum Geschwemmselverhalten auf das volle Kalenderjahr als gerechtfertigt.



Abbildung 7.20: Geschwemmsel an der Schwingklappe

7.6.2 Eisgang

Die Temperaturen in Durlach sind im bundesweiten Vergleich meist milder als der Durchschnitt. Die Monatsmittelwerte der Messtation Karlsruhe liegen in der Zeitreihe 1971 bis 2000 im Dezember bei 3,0°C, im Januar bei 1,9°C und im Februar bei 2,9°C [88].

In Kapitel 4.4.3 wurde bereits die Thematik des Eisstaus und der Vereisung diskutiert. Es konnte aufgezeigt werden, dass bei kleinen Einzugsgebieten und dem Einsatz einer Schwingklappe als Regulierorgan eines Hochwasserrückhaltebeckens auf Grund der hydrologischen Gegebenheiten nur ein geringes Gefährdungspotential vom Eisgang ausgeht. Im Falle der Schwingklappe zur Abflussregelung der FAA Obermühle/Pfinz können die Überlegungen nicht direkt übertragen werden, da der Klappenkörper auch bei geringen Abflüssen im Wasserkörper eingetaucht ist. Im Beobachtungszeitraum wurde daher auch ein Augenmerk auf die Frage der Funktionsfähigkeit bei geringen Temperaturen gelegt.

Bezogen auf die Lufttemperatur konnten im Beobachtungszeitraum zwei länger anhaltende Kälteperioden festgestellt werden. In der 51. KW 2009 und in der 1. KW 2010 lagen die über

mehrere Tage herrschenden Durchschnittswerte mit $-1,8^{\circ}\text{C}$ und $-2,3^{\circ}\text{C}$ deutlich unter den Monatsmittelwerten (vgl. Anhang E). Neben der Lufttemperatur wurde an zwei Tagen auch die Wassertemperatur und die Temperatur des Klappenkörpers gemessen (vgl. Tabelle 7.3). Vereisungen am Klappenkörper konnten bei den Begehungen nicht festgestellt werden.

Tabelle 7.3: Temperaturmessungen Schwingklappe/Pfinz

	18.12.2009/10:00 MEZ	28.01.2010/10:00 MEZ
Lufttemperatur	$-4,0^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,0^{\circ}\text{C}$
Wassertemperatur	$+5,0^{\circ}\text{C}$	$+5,0^{\circ}\text{C}$
Temp. Klappenkörper	$\pm 0,0^{\circ}\text{C}$	$+2,0^{\circ}\text{C}$

Bei den Temperaturmessungen zeigt sich deutlich, dass die gemessenen Wassertemperaturen eine gute Übereinstimmung zu den stichprobenartigen Messdaten der LUBW an der Messstelle Pfinz/Berghausen aufweisen (vgl. Abbildung 7.21). Auch bei sehr niedrigen Lufttemperaturen sinken die Wassertemperaturen in der Pfinz auf Grund der eingetragenen Energie nicht wesentlich unter 5°C . Zwischen dem Wasserkörper und der Schwingklappe findet ein Wärmeübergang statt, so dass die Klappentemperatur deutlich über der Lufttemperatur liegt.

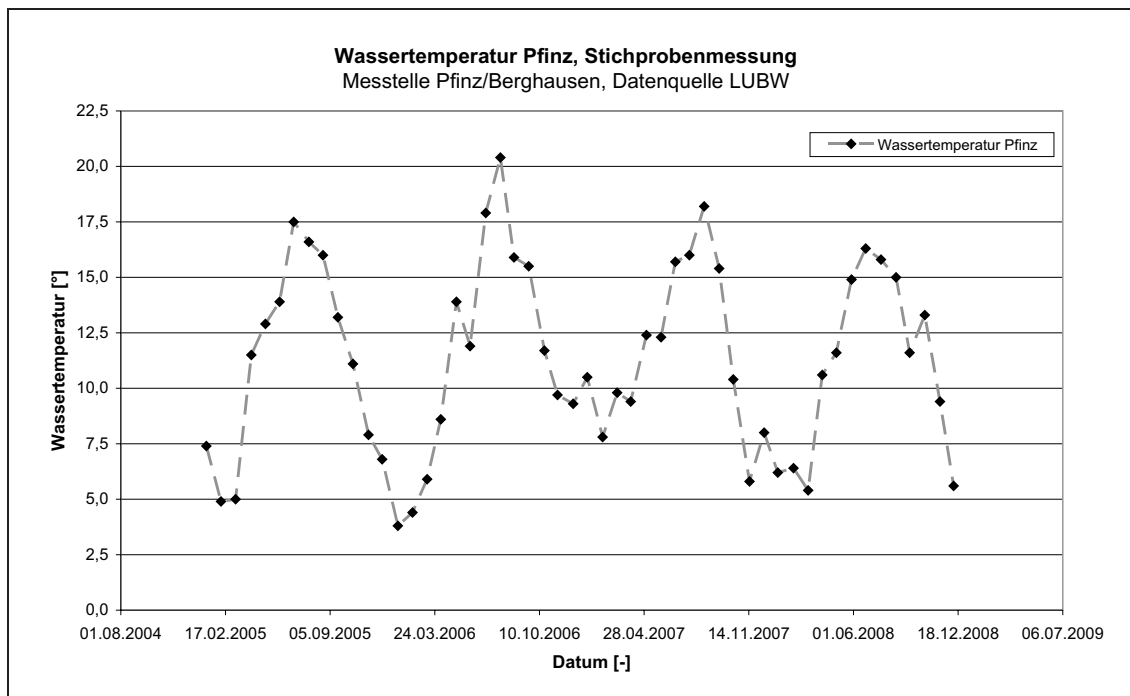


Abbildung 7.21: Stichprobenartig erfasste Wassertemperatur der Pfinz an der Messstelle Pfinz/Berghausen [79]

Die punktuellen Messergebnisse bestätigten die Überlegungen und Ausführungen aus Kapitel 4.4.3, wonach Probleme mit Vereisung der Schwingklappe auf Grund der relativ hohen Wassertemperaturen von fließenden Gewässern nicht zu erwarten sind. Die Wärmeleitfähigkeit der Edelstahlkonstruktion hat ein λ von 40 W/mK, so dass die Wassertemperatur schnell auf den Klappenkörper übergeht. Nach Wickert und Schmaußer (1971) kann es bei Schützen vor allem an der luftseitigen Dichtung zu Vereisungen kommen. Auf Grund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Gummi ($\lambda = 0,16$ W/mK) kann gefolgert werden, dass die Temperatur der Dichtung nur geringfügig von der Wassertemperatur beeinflusst sondern vielmehr von der Lufttemperatur dominiert wird. Das durch die Dichtung dringende Wasser gefriert folglich beim Kontakt der luftseitigen Dichtung. Diese Überlegungen machen deutlich, dass sich der Verzicht auf eine Dichtung zwischen dem Klappenkörper und der Führungswand positiv auf die Sicherheit gegenüber einer Vereisung auswirkt.

Neben den punktuellen Temperaturmessungen werden auch kontinuierliche Aufzeichnungen durchgeführt. Die LUBW betreibt an allen größeren Gewässern in Baden-Württemberg Gewässermessstellen, an denen neben anderen Parametern auch die Wassertemperatur stündlich mitgeschrieben wird. Für den Vergleich mit den Wassertemperaturen der Pfinz wurden die zwei Messstellen Murr/Murr und Neustadt/Rems ausgewählt. Die Einzugsgebiete Murr und Rems besitzen im Messnetz der LUBW die kleinsten Einzugsgebietsgrößen. Die hydrologischen und hydraulischen Daten dieser Gewässer liegen jedoch außerhalb der Anwendungsgrenzen der Schwingklappe. Die Zeitreihen der stündlichen Wassertemperaturmessungen sind in Anlage F aufgetragen.

Die Auswertung zeigt, dass bei den beiden untersuchten größeren Gewässern die Wassertemperaturen im Winterhalbjahr deutlich unter der an der Pfinz gemessenen minimalen Temperaturen von $+ 5,0$ °C liegen. Teilweise wurden Wassertemperaturen nahe dem Gefrierpunkt gemessen. Die langjährigen Temperaturmessungen der LUBW an vielen Gewässern in Baden-Württemberg zeigen, dass je größer der Abfluss bzw. das Wasservolumen ist, desto gedämpfter folgt die Wassertemperatur der Lufttemperatur. Die bei lang anhaltenden Kälteperioden auftretenden Wassertemperaturen liegen jedoch unabhängig von der Gewässergröße in einem ähnlichen Bereich.

Grundsätzlich besteht zwischen den drei Wassertemperaturmessstellen der LUBW und der eigenen Messstelle an der Pfinz ein Unterschied bezüglich der Art der Beprobung. Bei den Messstellen an der Murr und Rems wird die Wassertemperatur kontinuierlich mit einer Sonde im Böschungsfuß gemessen und bei der Messstelle an der Pfinz und den eigenen Messungen wurde die Wassertemperatur oberflächennah in Gerinnemitte bestimmt.

Als Ursache für die dokumentierten Unterschiede der minimalen Wassertemperaturen wird nun die Temperaturverteilung innerhalb des Gewässerquerschnittes angesehen. In den ufernahen Bereich ist die Fließgeschwindigkeit geringer, so dass hier auch der Eintrag von Energie auf Grund der turbulenten Strömungsvorgänge geringer ist.

Die Ausführungen in Kapitel 4.4.3 sowie die Erfahrungen zur Pilotanlage der Schwingklappe zeigen auf, dass die Gefährdung der Schwingklappe als Regulierorgan eines Hochwasserrückhaltebeckens oder bei sonstigen Anwendungen in fließenden Gewässern durch Eis sehr gering ist und dass bei einem Einsatz in kleinen Einzugsgebieten (z.B. Mittelgebirge) keine technischen Vorkehrungen zur Beheizung des Klappenkörpers notwendig sind. Die Ausführungen zeigen auch, dass die Kräfte aus Eisdruck und Eisstau bei der Dimensionierung des Klappenkörpers und des Lagers nicht berücksichtigt werden muss (vgl. Kapitel 6.6).

7.7 Fazit

In diesem Kapitel wurde der erfolgreiche Praxistransfer der Schwingklappe in Form einer Pilotanlage an der Pfinz in Durlach ausführlich aufgezeigt und erläutert. Aufbauend auf den Ergebnissen der umfangreichen Laboruntersuchungen ist es gelungen, die hydraulischen Randbedingungen vor Ort richtig einzuschätzen und eine korrekte Bemessung der Schwingklappe durchzuführen. Dies bestätigen die im Rahmen eines mehrmonatigen Monitorings erhobenen Daten. Eindrucksvoll zeigt sich dabei, wie die Schwingklappe, eingebettet in ein hydraulisches Gesamtkonzept, zu einer wesentlichen Verbesserung der Abflusssituation in der FAA beiträgt und von Außen einwirkende Einflüsse, wie z.B. der alternierende Betrieb des Wasserrades, ausgleicht.

Mit der Pilotanlage konnten auch wertvolle Erfahrungen hinsichtlich der betrieblichen Belange der Schwingklappe gesammelt werden. Bedingt durch den Anwendungsfall liegt die Schwingklappe der FAA Obermühle ständig im Wasser und ist somit fortlaufend den Einflüssen des Wassers, des Geschiebes und des Geschwemmseltriebes ausgesetzt. Im Vergleich zu einer Schwingklappe als Regulierorgan eines HRB, bei dem die Schwingklappe nur temporär diesen Einflüssen ausgesetzt ist, können die gewonnen Erkenntnisse gewissermaßen als Zeitraffer angesehen werden. Im 7,5-monatigem Untersuchungszeitraum ergaben sich keinerlei Probleme auf Grund von Geschiebe, Geschwemmsel oder Eis, und dass obwohl bewusst auf eine Reinigung oder Wartung der Schwingklappe verzichtet wurde. Dies dokumentiert die dem Konzept der Schwingklappe zugesprochene Robustheit und bestätigt die im Rahmen dieser Arbeit verfolgte Vermeidungsstrategie beim Design des Klappenkörpers.

Auch von Seiten des Tiefbauamtes der Stadt Karlsruhe als Betreiber der Schwingklappe und dem Eigentümer des Wasserrades Obermühle herrscht große Zufriedenheit in Bezug auf die Schwingklappe. Vor allem der geringe Wartungsaufwand und die Robustheit der Schwingklappe werden als äußerst Positiv bewertet.

Zusammenfassend kann die im Rahmen dieser Arbeit bemessene und überprüfte Schwingklappe an der FAA Obermühle als erfolgreicher Praxistransfer angesehen werden. Neben dem ursprünglich anvisierten Einsatz der Schwingklappe als Regulierorgan eines HRB konnte eine interessante Alternativenanwendung aufgezeigt werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Handlungsfeld des technischen Hochwasserschutzes werden vor allem an kleineren Gewässern Hochwasserrückhaltebecken (HRB) eingesetzt, um die Hochwassersituation für die Unterlieger zu entschärfen. Im Rahmen dieses dezentralen Hochwasserschutzes wurden in Baden-Württemberg annähernd 700 Stauanlagen und Hochwasserrückhaltebecken errichtet.

Vor allem durch die Bauart der kleinen, ungesteuerten Hochwasserrückhaltebecken im Hauptschluss wird die ökologische Durchgängigkeit beeinträchtigt und die Leitstruktur des Gewässers wird verringert. Allein in Baden-Württemberg werden derzeit über 200 solcher ungesteuerter HRB betrieben.

Das dieser Arbeit zugrunde liegende Forschungsvorhaben ist mit dem Ziel angetreten, für derartige Randbedingungen ein ökologisch angepasstes, selbstregulierendes Durchlassbauwerk zu entwickeln und in die Praxis zu transferieren. Zentrales Bauteil ist hierbei die Schwingklappe.

Aufbauend auf einem Literaturstudium wurde in einem ersten Schritt die Geometrie des Klappenkörpers erarbeitet. Die Kontur des Klappenkörpers hat Auswirkungen sowohl auf die hydraulischen, als auch auf die kinematischen Prozesse. Für das Klappendesign wurde daher eine Vermeidungsstrategie verfolgt, um strömungsinduzierte Schwingungen bei allen Betriebszuständen ausschließen zu können.

Der entwickelte Klappenkörper wurde dann eingehend bezüglich seines hydraulischen und kinematischen Verhaltens in zwei Versuchseinrichtungen (Maßstab 1:1 und Maßstab 1:3) untersucht. Mit den Untersuchungen zum hydraulischen Verhalten konnte die fehlerbehaftete Darstellung des Abflussverhaltens der Schwingklappe in den bisherigen Studien korrigiert werden. Die Untersuchungen zum kinematischen Verhalten bestätigten das Funktionsprinzip, da auf Grund der starken Dämpfung eine resonante Schwingung oder Pendelbewegung des Klappenkörpers nicht zu befürchten ist.

Im Rahmen der Laboruntersuchungen wurde die Betriebssicherheit der Schwingklappe bei Geschwemmsel- und Geschiebetrieb analysiert. Hierbei zeigte sich, dass durch die konstruktive Ausbildung und die einfache Mechanik keine größeren betrieblichen Zwangspunkte vorhanden sind und dem System der Schwingklappe eine gewisse Unempfindlichkeit gegenüber Schweb- und Feststoffen zugesprochen werden kann. Für den Einsatz in einem Hochwasserrückhaltebecken wurde auf Grund des Gefährdungspotentiales dennoch ein angepasstes Rechenkonzept erarbeitet. Dieses ist auch auf andere Verschlüsse und Regelorgane übertragbar.

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden für die ingenieurtechnische Anwendung zu einem Bemessungskonzept aufbereitet. Hier zeigte sich, dass eine korrekte Bemessung auf Grund des Einflusses der unterwasserseitigen Gewässerstrecke eine Herausforderung für den planenden Ingenieur darstellt und dass hier gewisse Randbedingungen zu beachten sind. Es konnte aufgezeigt werden, dass der Einfluss der äußeren Randbedingungen wie z.B. der Unterwasserstand auf die Funktionsweise der Schwingklappe sehr groß ist und dass daher ein allgemeingültiger Bemessungsansatz im Rahmen der Arbeit nicht entwickelt werden konnte. Hierzu sind weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der Entwicklung eines Simulationswerkzeuges nötig.

Für das Funktionsprinzip der Schwingklappe wird ein Rückstau von Unterwasser benötigt. Das in dieser Arbeit vorgeschlagene Lösungskonzept mit einem definierten Gewässerquerschnitt unterstrom führt im Gegenzug aber zu ungünstigen Randbedingungen hinsichtlich der ökologischen Durchgängigkeit. Hier steht die Entwicklung anderer Lösungskonzepte noch aus.

In Zusammenarbeit mit dem Tiefbauamt der Stadt Karlsruhe konnte der anvisierte Praxistransfer der Schwingklappe im Nachgang zu den Untersuchungen dennoch realisiert werden. Damit konnte nicht nur die Praxistauglichkeit der Schwingklappe nachgewiesen werden, sondern es konnte auch der Anwendungsbereich der Schwingklappe erweitert werden. Die Schwingklappe regelt hier den Abfluss in eine Fischaufstiegsanlage. Die ersten Betriebserfahrungen hierzu sind durchweg positiv und bestätigen den im Rahmen dieser Arbeit aufgestellten Bemessungsansatz und die Anwendung des ingenieurtechnischen Ansatzes der Vermeidungsstrategie.

Mit den Versuchen konnte aufgezeigt werden, dass das System der Schwingklappe grundsätzlich für alle Anwendungsfälle geeignet ist, bei denen eine gewisse Abweichung von einer exakten Abflusssteuerung zugelassen werden kann und bei denen kein Platz für eine komplizierte Mechanik zur Verfügung steht. In ersten Gesprächen mit dem Tiefbauamt der Stadt Karlsruhe wurde z.B. der Einsatz der Schwingklappe zur Hochwasserbewirtschaftung von größeren Abwassersammlern diskutiert.

Literatur

- [1]
- [2] AIGNER, Detlev ; HANS-B., Horlacher: *Optimum Design of Self-Regulation Spring Steel Throttles for Sewer Overflow Tanks*. XXVII IAHR Congress San Francisco, Thema: A, S.75 - 80. 1997
- [3] ANDERSEN, D. ; EBERHARDT, S.: How airplanes fly. In: *Sport Aviation Magazin* (1999)
- [4] ATV-DVWK: *Hochwasserrückhaltebecken, Probleme und Anforderungen aus wasserwirtschaftlicher und ökologischer Sicht*. Schriftenreihe, 2001
- [5] BATCHELOR, G.K.: *An introduction to fluid mechanics*. Cambridge university press, 9. print., 2007. – ISBN 978-0-521-66396-0
- [6] BAUMGART, J.: *Ökologische Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken, Merkblatt Nr. 18*. Merkblätter des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen, 1999
- [7] BERNHART, H.H.: Landschaftsverträgliche Bauweisen für den Hochwasserschutz. In: *Tagungsband zum Symposium Überströmbare Dämme am 11.11.2003 in Stuttgart*, 2003
- [8] BERNHART, H.H.: Naturverträglicher Hochwasserschutz, wasserbauliche Aspekte. In: *Natur und Landschaft* (2003). – 78. Jahrgang, Heft 4, S. 138-142
- [9] BERNHART, H.H. ; SEIDEL, F. ; KONOLD, W. ; KAISER, O. ; RÖCK, S.: *Die Schwingklappe, Ökohydraulisches Durchlassbauwerk für regulierbare Hochwasserrückhalteräume*. Schlussbericht zum Forschungsprojekt BWR 24020 im Auftrag der Projektträgerschaft Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung, Baden-Württemberg, 2009
- [10] BILLETTER, Peter: *Strömungsinduzierte Schwingungen von Schützen mit mehreren Freiheitsgraden*. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Heft 160, 1998
- [11] BINDER, M.: *Schwingungsuntersuchungen im wasserbaulichen Versuchswesen*. Dissertation, TU Wien, 2002
- [12] BOLLRICH, Gerhard (Hrsg.): *Technische Hydromechanik*. Bd. 1: Grundlagen. 6., durchges. u. korr. Aufl. Berlin : Verlag für Bauwesen, 2007. – ISBN 978-3-345-00912-9
- [13] BROMBACH, H.J.: *Untersuchung strömungsmechanischer Elemente (Fluidik) und die Möglichkeit der Anwendung von Wirbelkammerelementen im Wasserbau*. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart, Heft 25, 1972
- [14] BROMBACH, H.J.: Abflusssteuerung am Hochwasserrückhaltebecken Alzey mit Wirbelventilen. In: *Wasserwirtschaft, 70. Jahrgang, Heft 12, S. 422-423* (1980)

- [15] BROMBACH, H.J.: 50 Jahre Fluidik - Wirbelströmungseffekte und Abflusssteuerung. In: *Wasserwirtschaft, 100. Jahrgang, Heft 1-2, S. 73-78* (2010)
- [16] BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU: *Anpassung der Technischen Lieferbedingungen für Wasserbausteine (TLW) an die neue DIN EN 3383 - Wasserbausteine*. BAW Brief Nr. 1, März 2004
- [17] BWPLUS, PROJEKTTRÄGER KARLSRUHE (PTKA-BWP): *Umweltforschung in Baden-Württemberg*. 2006. – <http://bwplus.fzk.de>, letzter Besuch 05.03.2010
- [18] DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme, 5. Aufl.* Springer-Verlag, 2008
- [19] DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E.V.: *Arbeitsblatt DWA-A 110 - Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserleitungen und -kanälen*. 2006
- [20] DIN 18065, DEUTSCHE NORM: *Gebäudetreppen - Begriffe, Messregeln, Hauptmaße*. 2000
- [21] DIN 18123, DEUTSCHE NORM: *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung*. 2010
- [22] DIN 19226 - TEIL 1, DEUTSCHE NORM: *Regelungstechnik und Steuerungstechnik, Allgemeine Grundbegriffe*. 1994
- [23] DIN 19700 - TEIL 12, DEUTSCHE NORM: *Stauanlagen, Hochwasserrückhaltebecken, Die Auswirkungen des Betriebes von Hochwasserrückhaltebecken*. 2004
- [24] DIN 19704 - TEIL 1, DEUTSCHE NORM: *Stahlwasserbauten, Berechnungsgrundlagen*. 1998
- [25] DÖRSCHIEDT, F. ; LATZEL, W.: *Grundlagen der Regelungstechnik, 2. Auflage*. B.G. Teubner, Stuttgart, 1993
- [26] DVWK, DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU: *Wasserbauliches Versuchswesen, 2. revidierte Auflage*. Zusammengestellt von Helmut Kobus, 1984. – ISBN 3-490-03997-1
- [27] DVWK, DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU: *DVWK-Merkblatt 202, Hochwasserrückhaltebecken*. 1991
- [28] DVWK, DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU: *DVWK-Materialien 4/93 - Die Auswirkungen des Betriebs von Hochwasserrückhaltebecken auf Lebensräume, Tier- und Pflanzengemeinschaften*. 1993
- [29] EADS: *Freizeitkarte Baden-Württemberg 1:50.000*. Geogrid, 2007
- [30] FÖLLINGER, O.: *Regelungstechnik, 8. Auflage*. Dr. Alfred Hüthig Verlag GmbH, Heidelberg, 2005
- [31] FRANKE, P.: Theoretische Betrachtung zur Strahlkontraktion beim Ausfluss unter Schützen. In: *Die Bautechnik, 33. Jg, S 73-77, Heft 3 - März* (1956)

- [32] GEWÄSSERDIREKTION SÜDLICHER OBERRHEIN-HOCHRHEIN BEREICH WALDSHUT-TIENGEN: *Hochwasserschutzmaßnahmen am Schwarzbach und Seegraben, Erläuterungsbericht Flutmulde Weisweil-West vom 07.06.2004*. 2004. – unveröffentlicht
- [33] GIESECKE, J.: *Automatische Abflusssteuerung für Hochwasserrückhaltebecken und Bewässerungsanlagen durch Strömungsverstärker*. Mitteilung Nr. 11 des Institutes für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Hochschule Aachen, S. 113-139, 1976
- [34] GMBH, Biogest I.: *Alpheus-Abflussbegrenzer, Typ Standard, Montage- und Betriebsanleitung für alle Baugrößen*. 2001
- [35] GROSS, D. ; HAUGER, W. ; SCHNELL, W.: *Technische Mechanik. 4*. Springer-Verlag, Berlin, 2004. – ISBN 978-3540220992
- [36] GUJER, Willi (Hrsg.): *Siedlungswasserwirtschaft. 3.*, bearbeitete Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – ISBN 978-3-540-34330-1
- [37] HAGER, W.H.: *persönliche Mitteilung*. –
- [38] HAGER, W.H. ; REAMY, Felix: Hydraulic level control by Hinged Flap Gate. In: *Proc. Instn. Civ. Engrs. Water, Maritim and Energy 130(6)* (1998). – S. 95-103
- [39] HAMM, P.: *Ein Beitrag zum Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Fußgängerbrücken aus Holz*. Dissertation TU-München, 2003
- [40] HAU, H.P. ; BUTSCHER, E.: *Versagen der Stauanlage Rot an der Rot*. WBW Fortbildungsgesellschaft GmbH, Umweltministerium Baden-Württemberg, Berichtsband anlässlich der 14. Jahrestagung am 20. Nov. 2007 in Stuttgart, Thema: Sicherheitsrelevante Einwirkungen auf Hochwasserrückhaltebecken, Extreme Betriebszustände, 2007
- [41] INGENIEURBÜRO DR.-ING. KARL LUDWIG: *Untersuchung der Abflussregelung im Klettgau, Gutachten*. 1995. – unveröffentlicht
- [42] INSTITUT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMAFORSCHUNG, KIT: *Temperaturdaten der Wetterstation Physikhochhaus*. 2010
- [43] IWG, INSTITUT FÜR WASSER UND GEWÄSSERENTWICKLUNG: *Fischtreppe Durlach / Pfinz, Bestimmung des Durchfluss, wasserbauliche Studie*. 2003. – unveröffentlicht
- [44] IWG, INSTITUT FÜR WASSER UND GEWÄSSERENTWICKLUNG, UNIVERSITÄT KARLSRUHE: *Hydrologie, kursbegleitendes Skriptum, Stand 10/2006*. 2006. – unveröffentlicht
- [45] IWG, INSTITUT FÜR WASSER UND GEWÄSSERENTWICKLUNG, UNIVERSITÄT KARLSRUHE: *Wasserbauliches Versuchswesen, kursbegleitendes Skriptum, 1. Auflage, 2007*. 2007. – unveröffentlicht
- [46] IWG, INSTITUT FÜR WASSER UND GEWÄSSERENTWICKLUNG, UNIVERSITÄT KARLSRUHE: *Obermühle in Durlach/ Pfinz, Hydraulisches Konzept zur Abflussregelung an der Fischaufstiegsanlage, wasserbauliche Studie*. 2008. – unveröffentlicht

- [47] IWG, INSTITUT FÜR WASSER UND GEWÄSSERENTWICKLUNG, UNIVERSITÄT KARLSRUHE: *Softwarepaket Hochwasseranalyse und -berechnung*, 2008. – interne Dokumentation
- [48] IWK, INSTITUT FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURTECHNIK, UNIVERSITÄT KARLSRUHE: *Machbarkeitsstudie Schwingklappe im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz*. 1997. – unveröffentlicht
- [49] IWK, INSTITUT FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURTECHNIK, UNIVERSITÄT KARLSRUHE: *Die Schwingklappe, Ökohydraulisches Durchlassbauwerk, Stuttgart*. 1998. – 2D-Modelluntersuchungen im Auftrag des Regierungspräsidiums, unveröffentlicht
- [50] JIRKA, G.H.: *Einführung in die Hydromechanik*,. 3. überarbeitete Auflage, Universitätsverlag Karlsruhe, 2007. – ISBN 978-3-86644-458-3
- [51] JIRKA, G.H. ; LANG, C.: *Einführung in die Gerinnehydraulik*,. Universitätsverlag Karlsruhe, 2009. – ISBN 978-3-86644-363-1
- [52] KAPPUS, B. ; BÖHMER, J. ; RAWER-JOST, C.: Zur Problematik der ökologischen Durchgängigkeit an Wasserkraftanlagen, Grundlagen und Lösungsmöglichkeiten. In: *2. Seminar Kleinwasserkraft, Praxis und aktuelle Entwicklung*, Institut für Strömungsmechanik und hydraulische Strömungsmaschinen, Stuttgart, 1999. – Mitteilung Nr. 16, S. 13-25
- [53] KISTERS AG: *Dokumentation Softwarepaket BIBER*. 2009
- [54] KNAPP, Fred H.: *Ausfluss, Überfall und Durchfluss im Wasserbau*. 1960. – eine angewandte Hydraulik auf physikalischer Grundlage; mit 46 Tabellen
- [55] KNÖDL, L.: *Schadensfall übertrömbarer Damm HRB Raußmühle in Eppingen*. WBW Fortbildungsgesellschaft GmbH, Umweltministerium Baden-Württemberg, Berichtsband zum zehnten Erfahrungsaustausch 3. Juli 2003 in der Nagoldtalsperre in Erzgrube, Thema: Sanierung von Hochwasserrückhaltebecken, 2003
- [56] KNÖDL, L.: *Verklauserung/Wind/Vandalismus*. WBW Fortbildungsgesellschaft GmbH, Umweltministerium Baden-Württemberg, Berichtsband anlässlich der 14. Jahrestagung am 20. Nov. 2007 in Stuttgart, Thema: Sicherheitsrelevante Einwirkungen auf Hochwasserrückhaltebecken, Extreme Betriebszustände, 2007
- [57] KOLKMAN, P.A.: *Flow-induced gate vibrations*. Hydraulic Laboratory Delft, 1976
- [58] LANDESAMT FÜR WASSER UND ABFALL NORDRHEIN WESTFALEN: *Biotopgestaltung an Talsperren, Hochwasserrückhaltebecken und Flussauen*. LWA Merkblätter, Heft Nr. 19, 1992
- [59] LANDESVERMESSUNGSAMT BADEN-WÜRTTEMBERG: *Topographische Karten, TK 25*. 2007
- [60] LANGE, Daniela ; BEZZOLA, Gian R.: *Schwemmholz, Probleme und Lösungsansätze*. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Heft 188, 2006

- [61] LANZENDORF, W.: EDV-Überwachung von Rückhaltebecken. In: *Wasser & Boden, Heft 12* (1994)
- [62] LARSEN, P.: *Kulturwehr Kehl, wasserbauliches Gutachten*. 1988. – unveröffentlicht
- [63] LEHMANN, Boris: *Empfehlungen zur naturnahen Gewässerentwicklung im urbanen Raum: Unter Berücksichtigung der Hochwassersicherheit*. Mitteilungen des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung, Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik mit Theodor-Rehbock-Wasserbaulaboratorium der Universität Karlsruhe (TH) ; Heft 230, 2005
- [64] LEWIN, Jack: *Hydraulic gates and valves in free surface flow and submerged outlets*. 1. publ. 1995. – ISBN 0-7277-2020-1
- [65] LFU, LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: *Bauweisen des naturnahen Wasserbaus - Umgestaltung der Enz in Pforzheim*. Handbuch Wasser 2, 1991
- [66] LFU, LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: *Ökologie der Fließgewässer*. Handbuch Wasser 2, Heft 6, 1992
- [67] LFU, LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: *Studie über ökohydraulische Durchlassbauwerke für regulierte Hochwasserrückhalteräume*. Handbuch Wasser 2, Heft 43, 1998
- [68] LFU, LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: *Anlagen zur Herstellung der Durchgängigkeit von Fließgewässern*. Handbuch Wasser 2, Heft 63, 2000
- [69] LFU, LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: *Ökohydraulische Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken*. Bericht der LFU-Fachexkursion vom 22. Mai 2003, 2003. – unveröffentlicht
- [70] LFU, LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: *Überströmbare Dämme und Dammschaften*. Leitfaden, 1. Auflage, 2004
- [71] LFU, LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: *Durchgängigkeit für Tiere in Fließgewässern, Leitfaden Teil 1, Grundlagen*. 2005. – ISBN 3-88251-292-x
- [72] LFU, LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: *Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes*. Leitfaden, 1. Auflage, 2005. – ISBN 3-88251-288-1
- [73] LFU, LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: *Durchgängigkeit für Tiere in Fließgewässern, Leitfaden Teil 3, Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren*. 2006. – ISBN 3-88251-315-2
- [74] LITRICO, Xavier et a.: Hydraulic modelling of an automatic upstream waterlevel control gate. In: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, March/April* (2005). – S. 176-189

- [75] LUA, LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN: *Ökologische Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken*. Merkblätter Nr. 18, Essen, 1999
- [76] LUBW, LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: *Arbeitsanleitung Pegel- und Datendienst Baden-Württemberg, Durchflussermittlung mit Messflügeln*. 2003
- [77] LUBW, LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: *Arbeitshilfe zur DIN 19700 für Hochwasserrückhaltebecken*. 2007. – ISBN 978-3-88251-327-1
- [78] LUBW, LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: *Hochwasserrückhaltebecken und Talsperren, Bauwerkstypen und Übersicht*. 2008. – ISBN 978-3-88251-336-6
- [79] LUBW LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: *Temperaturmessdaten*. 2010
- [80] LUNZE, J.: *Regelungstechnik 1 : Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen, 7. Auflage*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008. – ISBN 978-3-540-68909-6
- [81] LWA, LANDESAMT FÜR WASSER UND ABFALL NORDRHEIN-WESTFALEN: *Biotopgestaltung an Talsperren, Hochwasserrückhaltebecken und Flussauen*. LWA Merkblätter Nr. 9, Düsseldorf, 1992
- [82] MACHA, L.: *Untersuchungen über die Wirksamkeit von Tosbecken*. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Berlin, Mitteilung Nr. 61, 1963
- [83] MARKOWITZ, G.: *Selbsttätige Stauvorrichtungen*. Franck'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1935
- [84] MATHIAK, F.: *Baudynamik, Einführung und Grundlagen*. Fachhochschule Neubrandenburg, 2002
- [85] MEIER, J.: *Schwingungen - Wellen - Optik, Skriptum Physik*. Fachhochschule München, Fachbereich Feinwerk- und Mekrotechnik, Physikalische Technik, 2008
- [86] MESCHÉDE, D. (Hrsg.): *Gerthsen Physik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 23., überarbeitete Auflage, 2006. – ISBN 978-3-540-29973-8
- [87] MEUSBURGER, Hubert: *Energieverluste an Einlaufrechen von Flusskraftwerken*. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Heft 179, 2002. ISSN 0374-0056
- [88] MÜHR, Bernhard: <http://www.klimadiagramme.de>. 2009
- [89] MILLER, Ch.: *Ein Beitrag zur Bestimmung der schwingungserregenden Kräfte an unterströmten Wehren*. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 42, 1977. – ISBN 3-921694-42-6

- [90] MINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND VERKEHR, BADEN-WÜRTTEMBERG: *Hochwasserschutzstrategie, Homepage des Ministeriums*, <http://www.uvm.baden-wuerttemberg.de>. 2010. – letzter Besuch 05.03.2010
- [91] MÜLLER, I.: *Messtechnisches Praktikum, Messergebnisse aus den Jahren 2006-2008*. Institut für Mechanik, Universität Karlsruhe, 2008. – unveröffentlicht
- [92] MUTH, W.: *Hochwasserrückhaltebecken, Planung, Bau und Betrieb*. 3. Auflage, Expert Verlag, 2001. – ISBN 3-8169-1907-3
- [93] NAUDASCHER, E. (Hrsg.): *Flow-Induced Structural Vibrations: Symposium IUTQM-IAHR, Karlsruhe/Germany, August. 14-16, 1972, Univ. of Karlsruhe*. Springer, 1974. – ISBN 3-540-06317-X
- [94] NAUDASCHER, E. (Hrsg.): *Practical experiences with flow-induced vibrations : Symposium International Association for Hydraulic Research, Karlsruhe/Germany, Sept. 3-6, 1979, Univ. of Karlsruhe*. Springer, 1980. – ISBN 3-540-10314-7 ; 0-387-10314-7
- [95] NAUDASCHER, E.: *Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke*. Zweite, verbesserte Auflage, Springer Verlag, 1987. – ISBN 3-211-82366-2
- [96] NAUDASCHER, E.: *Hydrodynamic forces*. Balkema, 1991. – ISBN 90-6191-993-2
- [97] NAUDASCHER, E.: *Hydraulic design considerations for low- and high-head gates*. Karlsruhe : Universität Karlsruhe (TH), Institut für Hydromechanik, 1999
- [98] NESTMANN, F.: Eigenschaften und Nutzungen von Fließgewässern. In: *Wasserwirtschaft Jg. 86, 1996, Heft 7/8, S. 378 - 383* (1996)
- [99] OGRIS, H.: Ein automatischer Durchflussregler für Hochwassersperren. In: *Der Bauingenieur, Heft 50, S.143-145* (1975)
- [100] PETERKA, A. J.: *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. US Government Printing Office, Washington, DC, Engineering monograph ; 25, 1964
- [101] PETRIKAT, K.: Schwingungen im Wasserbau. In: *Der Stahlbau Nr.9 und 12* (1955). – Seite 198 und 272
- [102] QUEISSER, Jan: *Entwicklung landschaftsvertäglicher Bauweisen für überströmbare Dämme*. 2006. – ISBN 3-86644-016-2
- [103] RÖCK, S. (Hrsg.) ; KONOLD, W. (Hrsg.): *Durchgängigkeit von Hochwasserrückhaltebecken*. Tagungsband zur gleichnamigen Tagung am 23.02.2006 in Freiburg, 2007. – ISBN 3-933390-37-0
- [104] REAMY, Felix: Selbsttätige Klappschütze zur Wasserstandsregelung. In: *wasser, energie, luft - 90 Jahrgang, Heft 5-7* (1998). – S. 117
- [105] REIBENWEIN, C.: Die Problematik der Nachbildung strömungsinduzierter Schwingungen im wasserbaulichen Modellversuch. In: *Konstruktiver Wasserbau - Landschaftswasserbau, Band 20, Institut für Konstruktiven Wasserbau, TU Wien*, 2004

- [106] REIBENWEIN, C. ; PRENNER, R. ; DROBIR, H.: Experimentelle Untersuchung des Froude'schen Frequenzmaßstabes anhand zweier Modellfamilien aus prismatischen und zylindrischen Profilen. In: *Konstruktiver Wasserbau - Landschaftswasserbau, Band 20, Institut für Konstruktiven Wasserbau, TU Wien, 2004*
- [107] RICKERT, K.: *Der Einfluss von Gehölz auf die Lichtverhältnisse und das Abflußverhalten in Fließgewässern*. Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landw. Wasserbau der Universität Hannover, 1986. – Dissertation H. 61
- [108] SAGAR, B.T.A.: Peculiar problems with weir gates. In: *28th IAHR congress, IAHR Congress, Graz (1999)*
- [109] SCHERLE, Jürgen: *Entwicklung naturnaher Gewässerstrukturen - Grundlagen, Leitbilder, Planung*. Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Heft 199, 1999
- [110] SCHMAUSSER, Gerhard ; NÖLKE, Heinz ; HERZ, Ernst: *Stahlwasserbauten, Kommentar zu DIN 19704*. Berlin : Ernst, 2000. – ISBN 3-433-01321-7
- [111] STÖCKER, Horst (Hrsg.): *Taschenbuch der Physik: Formeln, Tabellen, Übersichten*. Frankfurt am Main, 2007. – ISBN 3-8171-1720-5. – Nachdruck der 5., korr. Aufl.
- [112] TENNEKES, H. ; LUMELY, John L.: *A first course in turbulence*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1982. – ISBN 0-262-20019-8
- [113] THOMA, D.: *Vorrichtung zur Behinderung des Rückströmens*. Deutsche Patentschrift 507 713 vom 12. Juni, 1928
- [114] TLW: *Technische Lieferbedingung Wasserbausteine*. 2003
- [115] USACE, US. ARMY CORPS OF ENGINEERS: *Vertical lift gates, engeneering and design*. 1997
- [116] VISCHER, D.: Sie selbsttätige Schlauchdrossel zur Gewährleistung konstanter Beckenausflüsse. In: *Wasserwirtschaft, 69. Jahrgang, Heft 12 (1979)*
- [117] VISCHER, D. (Hrsg.): *Energy dissipators*. 1995. – ISBN 90-5410-198-9
- [118] VISCHER, Daniel ; HAGER, Willi H. ; NAEF, Felix: *Hochwasserrückhaltebecken*. Verl. der Fachvereine Zürich, 1992. – ISBN 3-7281-1762-5
- [119] WEINMANN, A.: *Regelung - Analyse und technischer Entwurf, 3. Auflage, Band 1. Systemtechnik linearer und linearisierter Regelungen auf anwendungsnaher Grundlage*. Springer-Verlag, Wien, 1994
- [120] WERNER, W.: *Ableitung einer kinematischen Beziehung zur Berechnung des Durchflusses unter Planschützen nach der Theorie der freien Stromlinien*. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden, Heft 6, S 1693-1699. 1963

- [121] WESTRICH, B. ; SIEBEL, R. ; KONOLD, W. ; KAISER, O. ; RÖCK, S.: *Kriterien für Gestaltung, Betrieb sowie Unterhaltung von Stau- und Retentionsanlagen zur Gewährleistung der ökologischen Durchgängigkeit*. Schlussbericht zum Forschungsprojekt BWR 24005 im Auftrag der Projektträgerschaft Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung, Baden-Württemberg, 2006
- [122] WESTRICH, B. ; SIEBEL, R. ; VERMEER, P.A. ; B. ZWESCHPER, B.: *Neue naturnahe Bauweisen für überströmbare Dämme an dezentralen Hochwasserrückhaltebecken*. Schlussbericht zum BWPLUS-Forschungsprojekt BWT 22005, Institut für Wasserbau, 3/2004, 2004
- [123] WICKERT, G.: *Hydrodynamische Probleme im Stahlwasserbau*. Verein Deutscher Ingenieure, VDI Zeitschrift, Band 105, Nr. 3, 1963
- [124] WICKERT, G. ; SCHMAUSSER, G.: *Stahlwasserbau, Theorie, konstruktive Lösungen, spezielle Probleme*. Springer Verlag, 1971
- [125] ZACHARIDES, W. ; WINKLER, E. ; GEBHARDT, M.: *Hochwasserrückhaltebecken Ellbach, Hochwasserschutz unter Einhaltung der ökologischen Durchgängigkeit*. Wasserwirtschaft, 88 Jahrgang, Heft 10, 1998
- [126] ZIEGLER, J. ; NICHOLS, N.B.: *Optimum settings for automatic controllers*. Trans. ASME 64, 1942. – S. 759-768
- [127] ZWECKVERBAND HOCHWASSERSCHUTZ, EINZUGSGEBIET ELSENZ-SCHWARZBACH: *Erläuterungsbericht zum Bau des Hochwasserrückhaltbeckens A26 Aglasterhausen/Rittersbach*. 2003. – unveröffentlicht
- [128] ZWECKVERBAND HOCHWASSERSCHUTZ, EINZUGSGEBIET ELSENZ-SCHWARZBACH: *digitales Bildarchiv*. 2009

Anhang

A Siebkurve des synthetischen Sohlmaterials

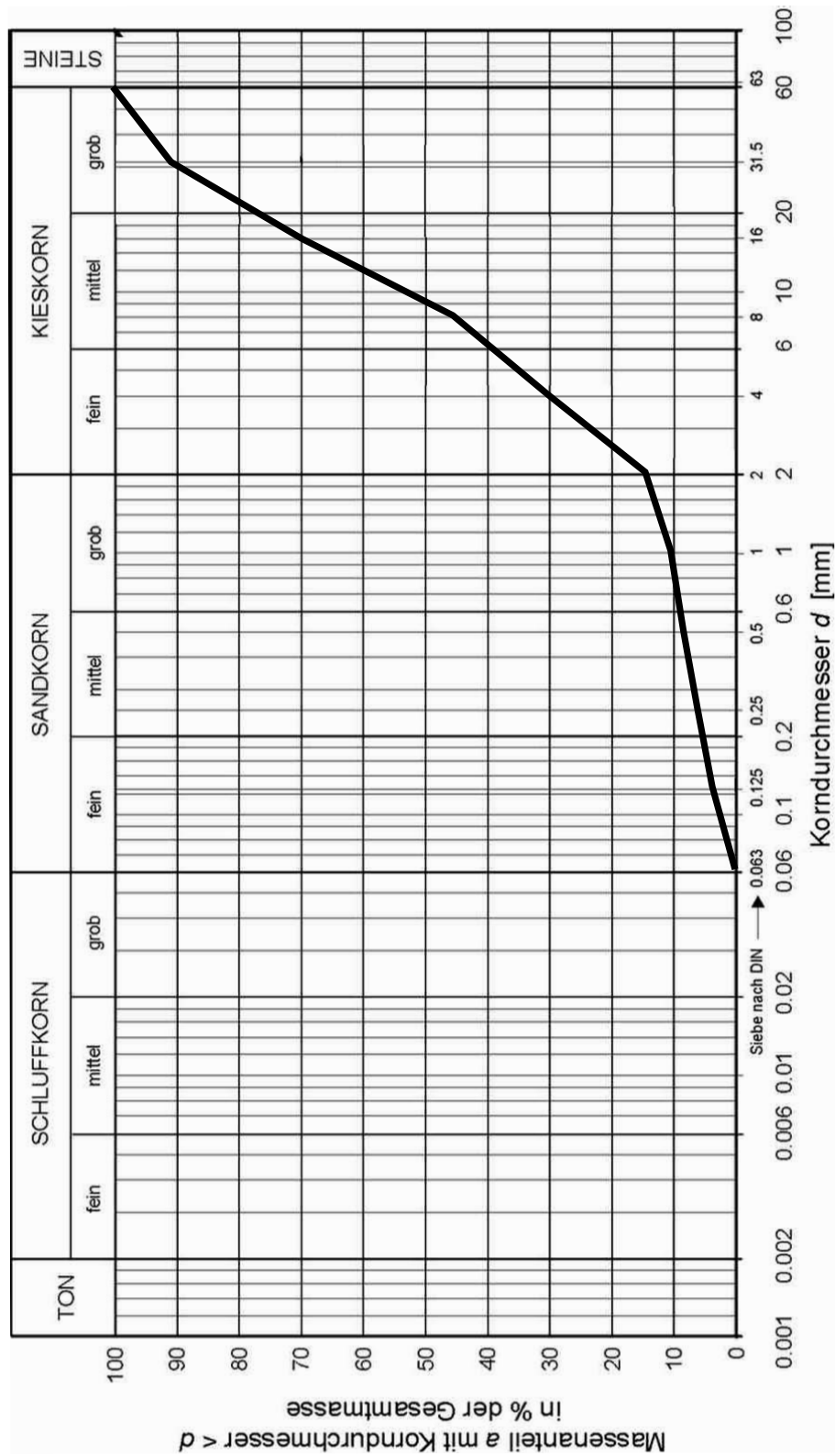


Abbildung A.1: Siebkurve des synthetischen Sohlmaterials

B Simulation der Retentionsraumbewirtschaftung

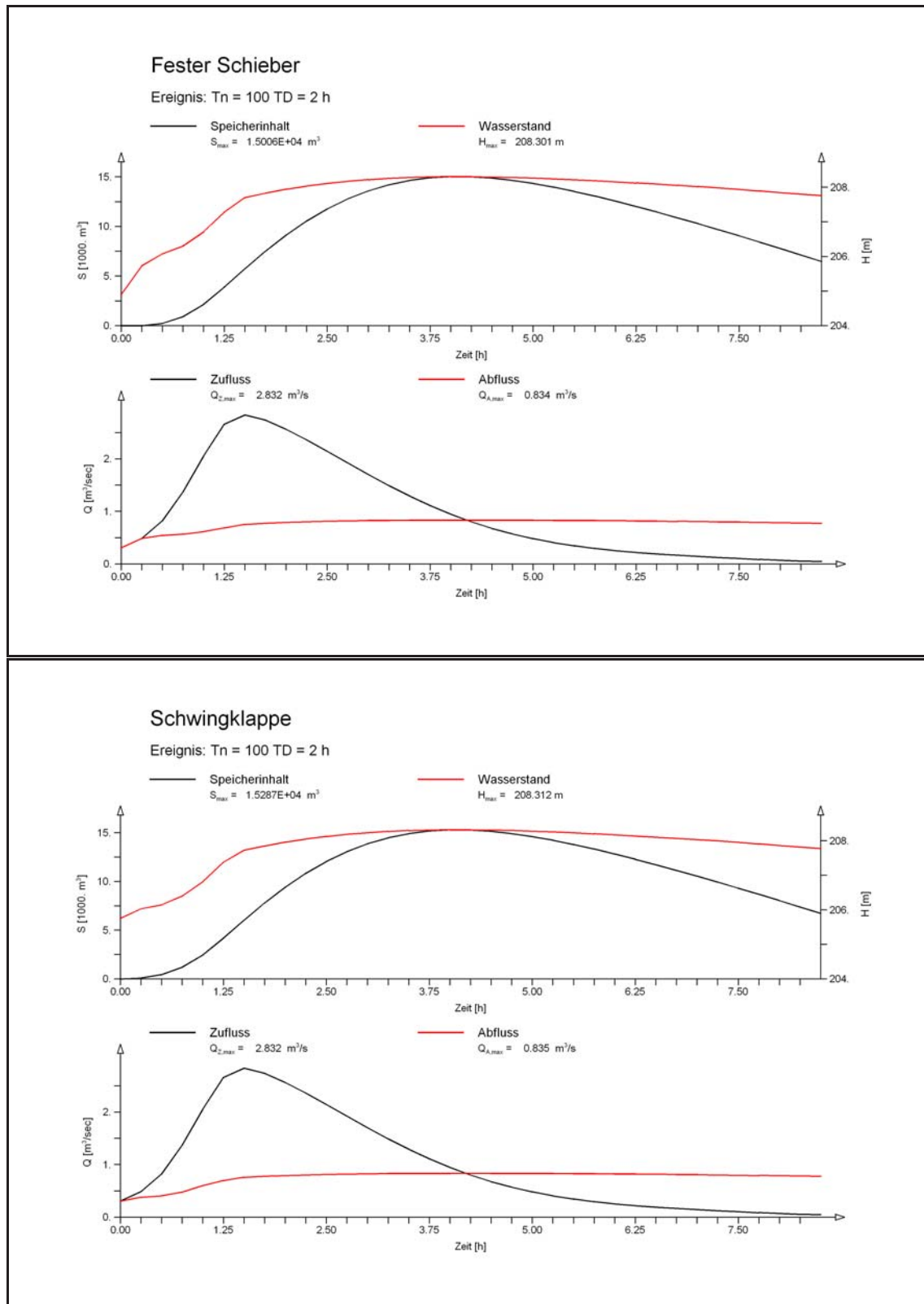


Abbildung B.1: Simulierte Retentionsraumbewirtschaftung, Vergleich feste Blende und Schwingklappe, HRB A26, Bemessungsregen 2h

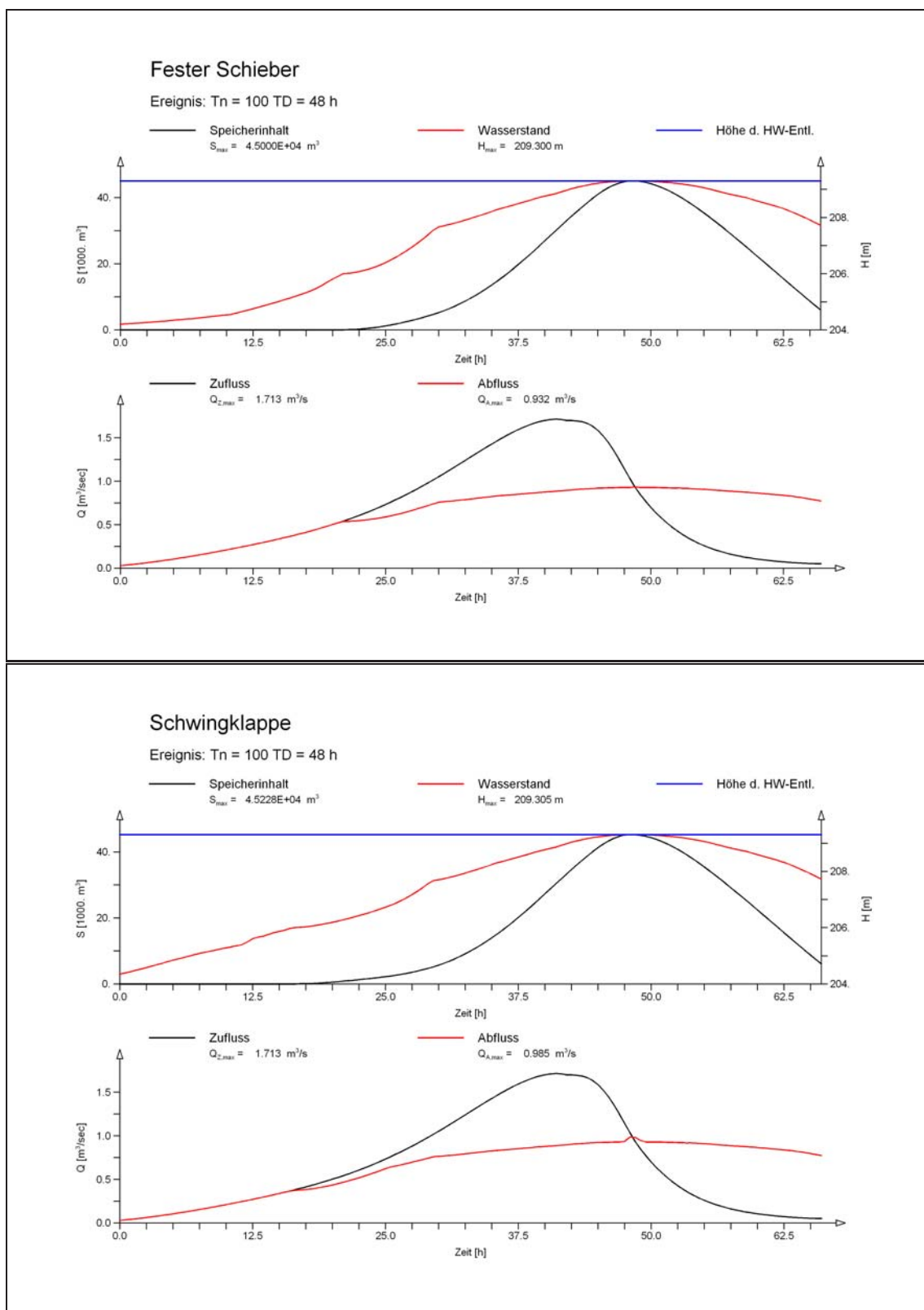


Abbildung B.2: Simulierte Retentionsraumbewirtschaftung, Vergleich feste Blende und Schwingklappe, HRB A26, Bemessungsregen 48h

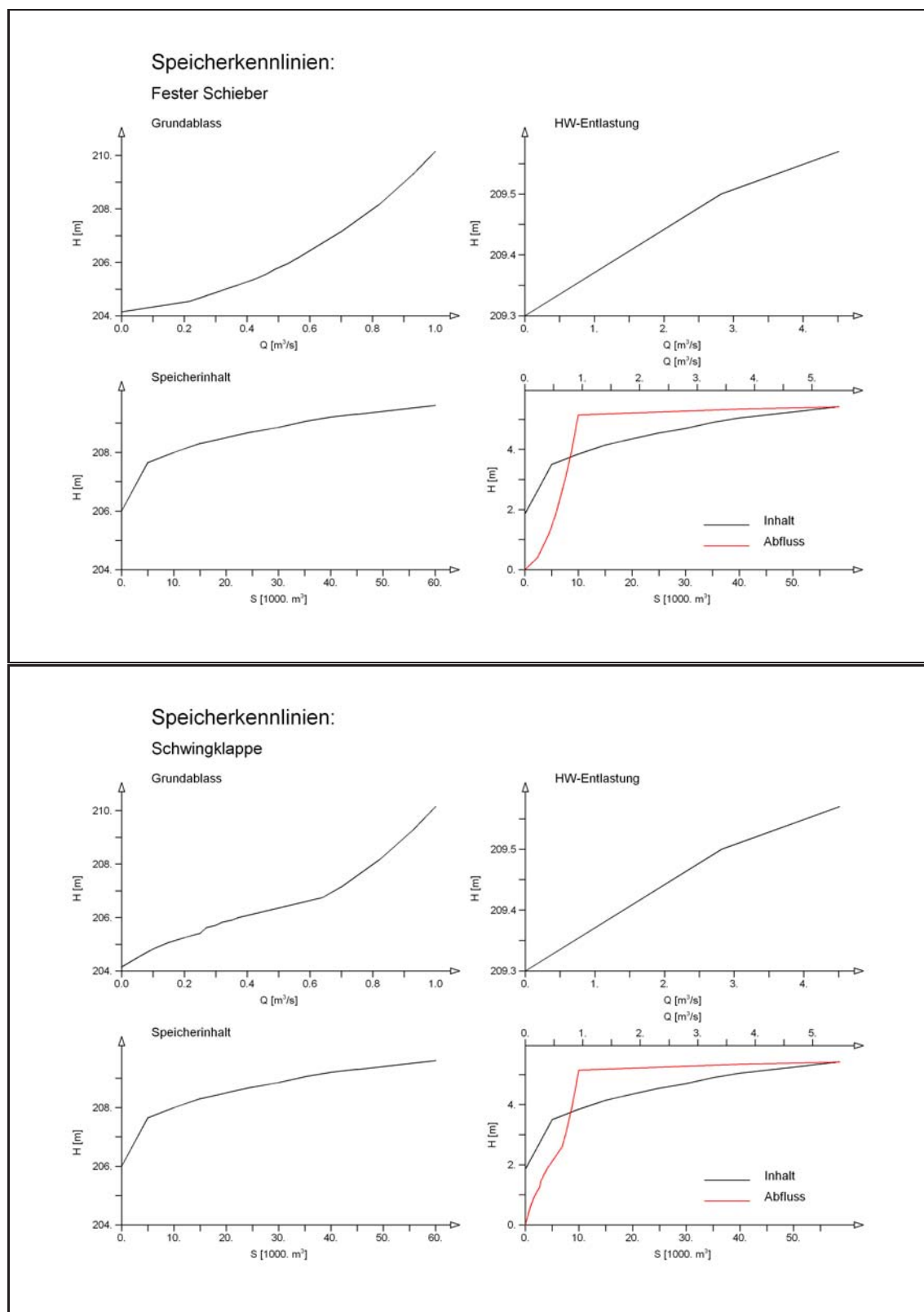


Abbildung B.3: Simulierte Retentionsraumbewirtschaftung, Vergleich feste Blende und Schwingklappe, HRB A26, Speicherkennlinien

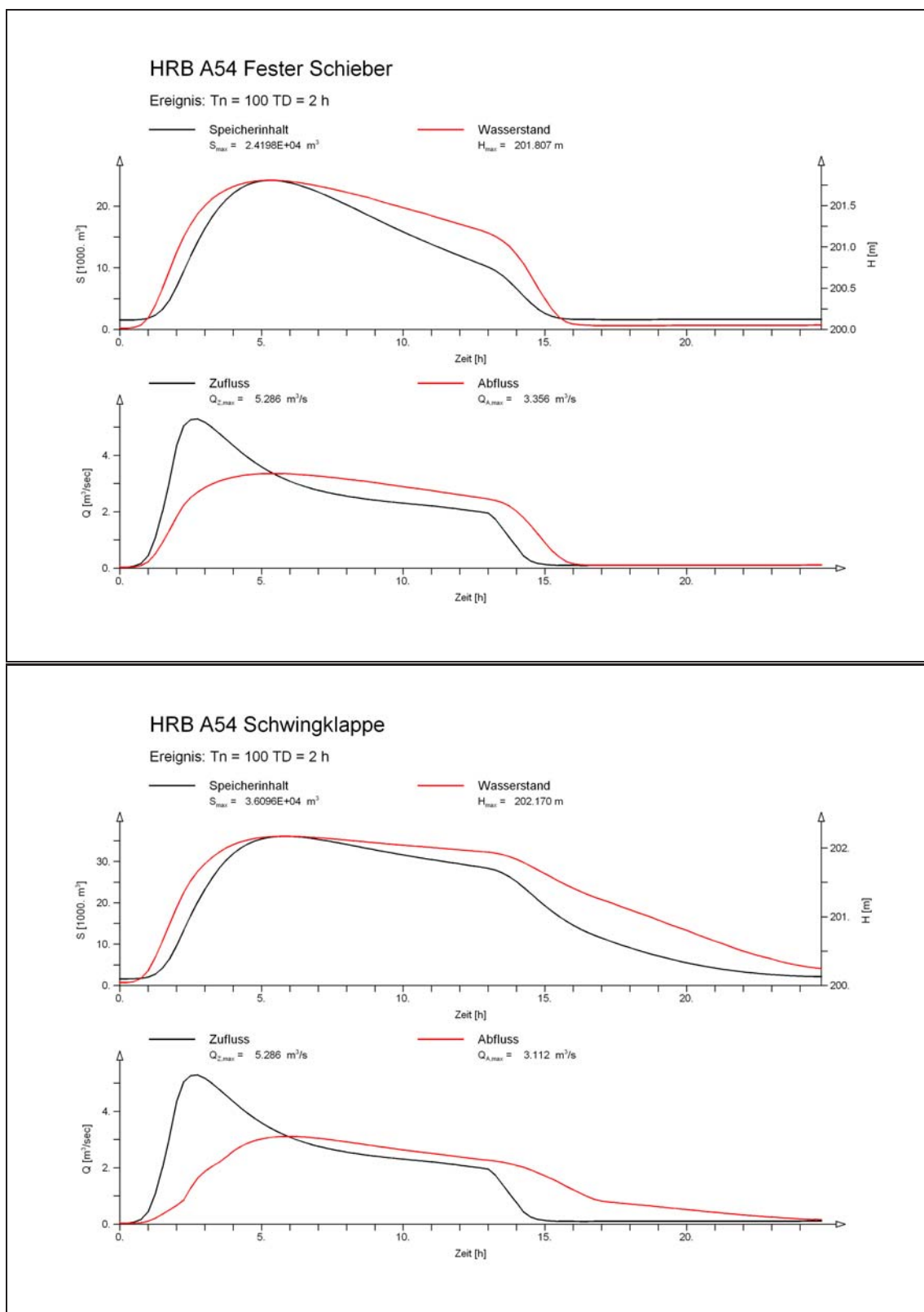


Abbildung B.4: Simulierte Retentionsraumbewirtschaftung, Vergleich feste Blende und Schwingklappe, HRB A54, Bemessungsregen 2h

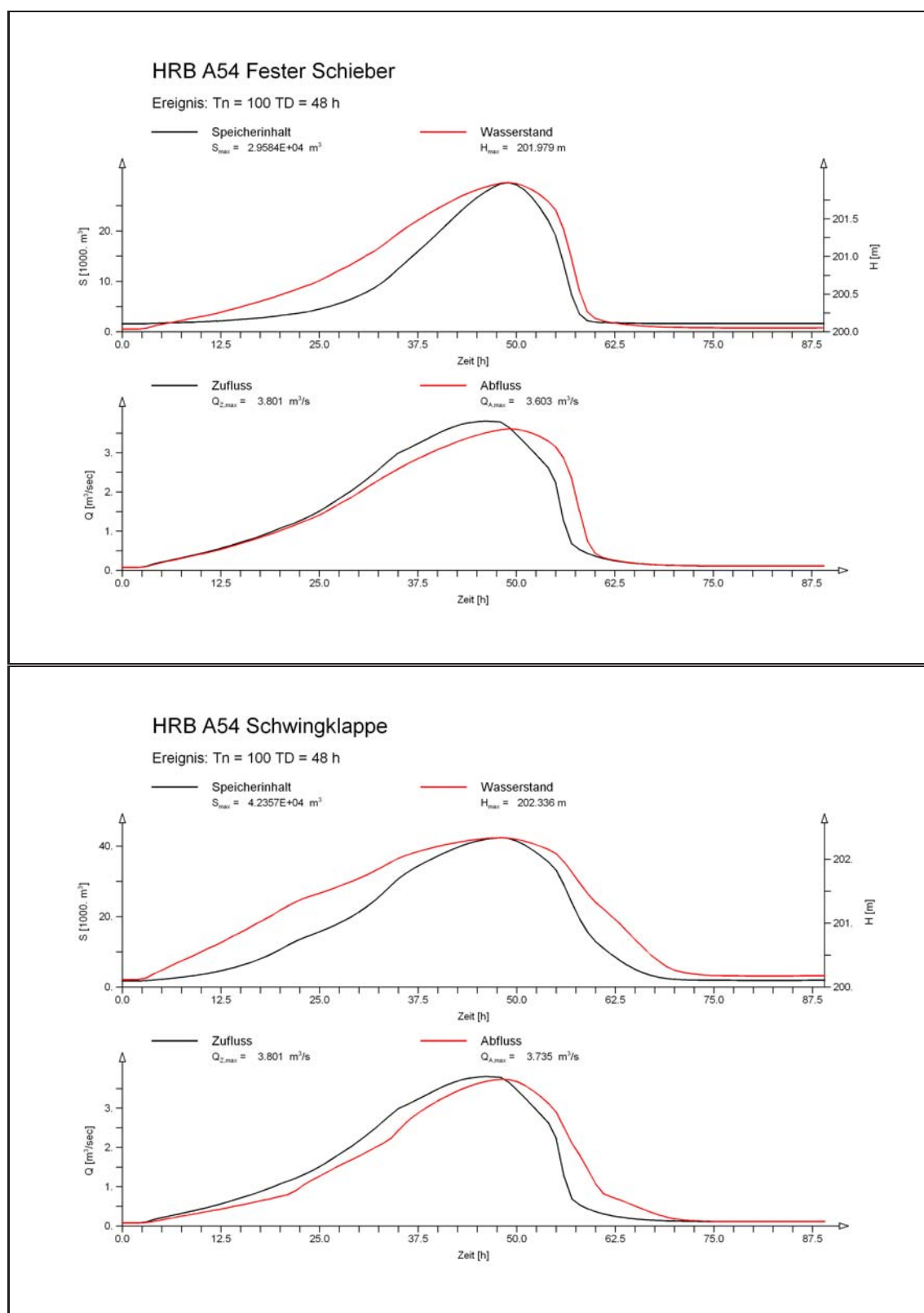


Abbildung B.5: Simulierte Retentionsraumbewirtschaftung, Vergleich feste Blende und Schwingklappe, HRB A54, Bemessungsregen 48h

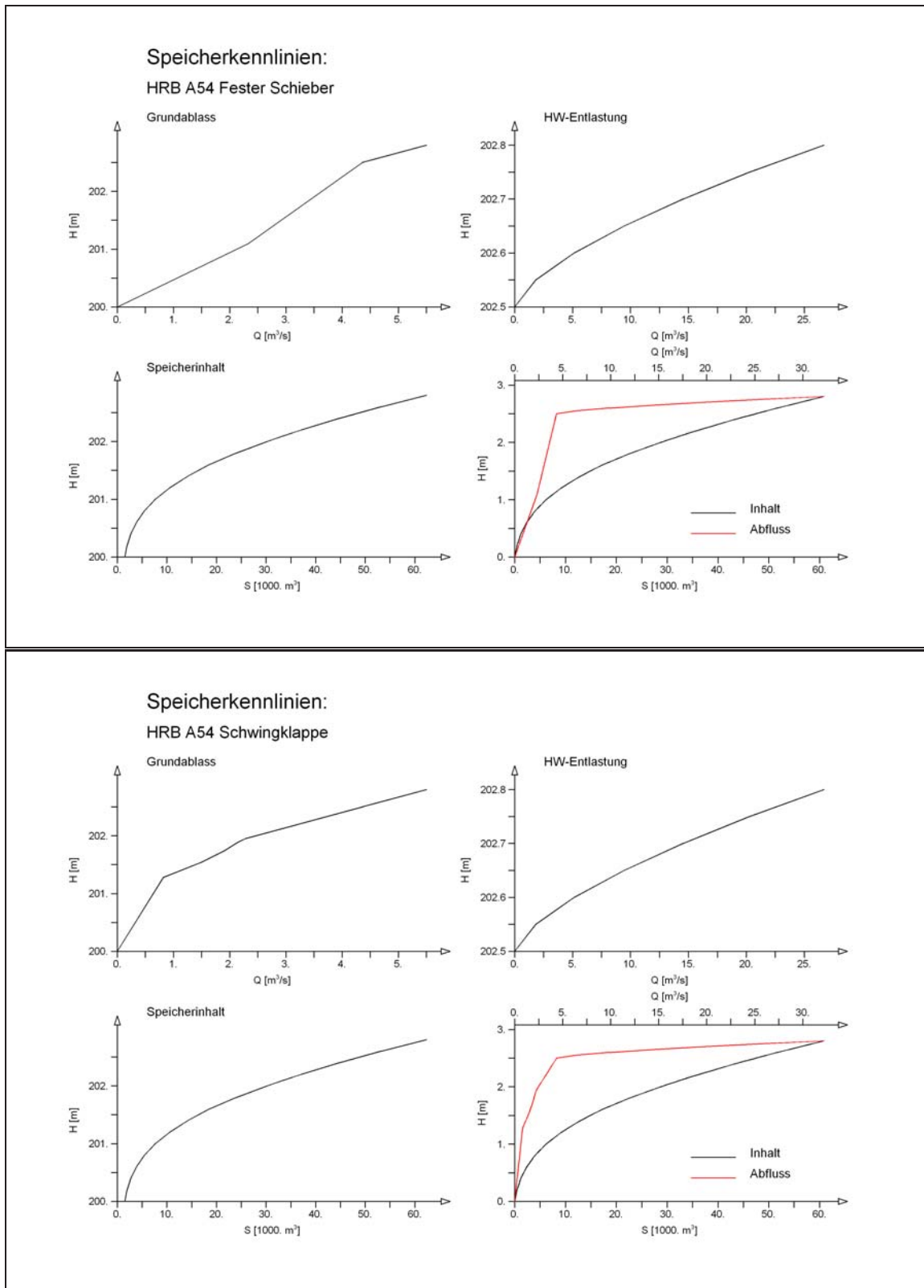


Abbildung B.6: Simulierte Retentionsraumbewirtschaftung, Vergleich feste Blende und Schwingklappe, HRB A54, Speicherkenlinien

C Liste der begutachteten HRB

Regierungsbezirk	Name	Betreiber
Landkreis Lörrach	HRB Waidbach/Degerfelden	Große Kreisstadt Rheinfelden
Landkreis Freudenstadt	Trinkwassersperre Kleine Kinzig	ZV Wasserversorgung Kleine Kinzig
Stadtkreis Baden-Baden	HRB 11 Mührichbächle	ZV HWschutz Baden-Baden / Bühl
Enzkreis	HRB Nöttingen	Gemeinde Nöttingen
Stadtkreis Karlsruhe	HRB Hatzenwies	Stadt Karlsruhe
Stadtkreis Karlsruhe	HRB Tiefentalgraben	Stadt Karlsruhe
Neckar-Odenwald-Kreis	HRB Alte Wiese, A41	ZV HWschutz Elsenz-Schwarzbach
Neckar-Odenwald-Kreis	HRB Bockwiese, A21	ZV HWschutz Elsenz-Schwarzbach
Neckar-Odenwald-Kreis	HRB Rittersbach, A26	ZV HWschutz Elsenz-Schwarzbach
Rhein-Neckar-Kreis	HRB Wiesenbach	Gemeinde Angelbachtal
Rhein-Neckar-Kreis	HRB Gaulbach, A91	ZV HWschutz Elsenz-Schwarzbach
Rhein-Neckar-Kreis	HRB Haager Tal, M5	ZV HWschutz Elsenz-Schwarzbach
Rhein-Neckar-Kreis	HRB Haager Tal, M6	ZV HWschutz Elsenz-Schwarzbach
Rhein-Neckar-Kreis	HRB Mannbach M2	ZV HWschutz Elsenz-Schwarzbach
Rhein-Neckar-Kreis	HRB Mönchzell, M18	ZV HWschutz Elsenz-Schwarzbach
Rhein-Neckar-Kreis	HRB Bernau, W18	ZV HWschutz Elsenz-Schwarzbach
Rhein-Neckar-Kreis	HRB Binsenklinge, S28	ZV HWschutz Elsenz-Schwarzbach
Rhein-Neckar-Kreis	HRB Wiesentalpoder, S63	ZV HWschutz Elsenz-Schwarzbach
Rhein-Neckar-Kreis	HRB Spechbach, W91	ZV HWschutz Elsenz-Schwarzbach
Landkreis Heilbronn	HRB Raubach	Stadt Bad Rappenau
Landkreis Heilbronn	HRB Wollenberg	ZV HWschutz Elsenz-Schwarzbach
Landkreis Heilbronn	HRB Ellbach	Wasserverband Sulm
Landkreis Heilbronn	HRB Raußmühle	ZV HWschutz Elsenz-Schwarzbach
Landkreis Heilbronn	HRB Staudbach E72	ZV HWschutz Elsenz-Schwarzbach
Landkreis Heilbronn	HRB Berwangen/Birkenbach E87	ZV HWschutz Elsenz-Schwarzbach
Landkreis Heilbronn	HRB Schwaigern/Lein	ZV Hochwasserschutz Leintal
Landkreis Heilbronn	HRB Stadtseebach	Wasserverband Sulm
Hohenlohekreis	HRB A3 Brettach	WV Neuenstädter Brettach
Hohenlohekreis	HRB A4 Brettach	WV Neuenstädter Brettach
Landkreis Ludwigsburg	HRB Apfelbach	Gemeinde Affalterbach
Rems-Murr-Kreis	HRB 4 Plüderhausen/Urbach	Wasserverband Rems
Rems-Murr-Kreis	HRB 6 Schorndorf/Winterbach	Wasserverband Rems

D Fotodokumentation Bauausführung



Abbildung D.1: Altes Holzschütz am Einlauf der FAA vor Einbau der Schwingklappe, Blick von Untertrom



Abbildung D.2: Altes Holzschütz am Einlauf der FAA vor Einbau der Schwingklappe, Blick von Untertrom



Abbildung D.3: Rippe des Klappenkörpers und seitliche Führungswand



Abbildung D.4: Vorgebogene Beplankung für den Klappenkörper



Abbildung D.5: Montage der Rippen mit Führungsschienen



Abbildung D.6: Aufschweißen der Bepunktung auf das Rippenskelett



Abbildung D.7: Fixierung der Bepankung im Punktschweißverfahren



Abbildung D.8: Rohbau des neuen Edelstahlschützes



Abbildung D.9: Montage der seitlichen Führungswände am Schütz



Abbildung D.10: Fertig montiertes Schütz



Abbildung D.11: Einbringen des Schützes mit integrierter Schwingklappe



Abbildung D.12: Fertig eingebautes Schütz



Abbildung D.13: Flutung der Baustelle



Abbildung D.14: Erster Wasserkontakt der Schwingklappe



Abbildung D.15: Die Schwingklappe schwimmt auf



Abbildung D.16: Die Schwingklappe schwimmt auf



Abbildung D.17: Die Dammbalken der Baustellenabdichtung werden gezogen



Abbildung D.18: Ansicht des neuen Schützes mit integrierter Schwingklappe, Blick von Oberwasser

E Zeitreihe der Lufttemperatur in Karlsruhe

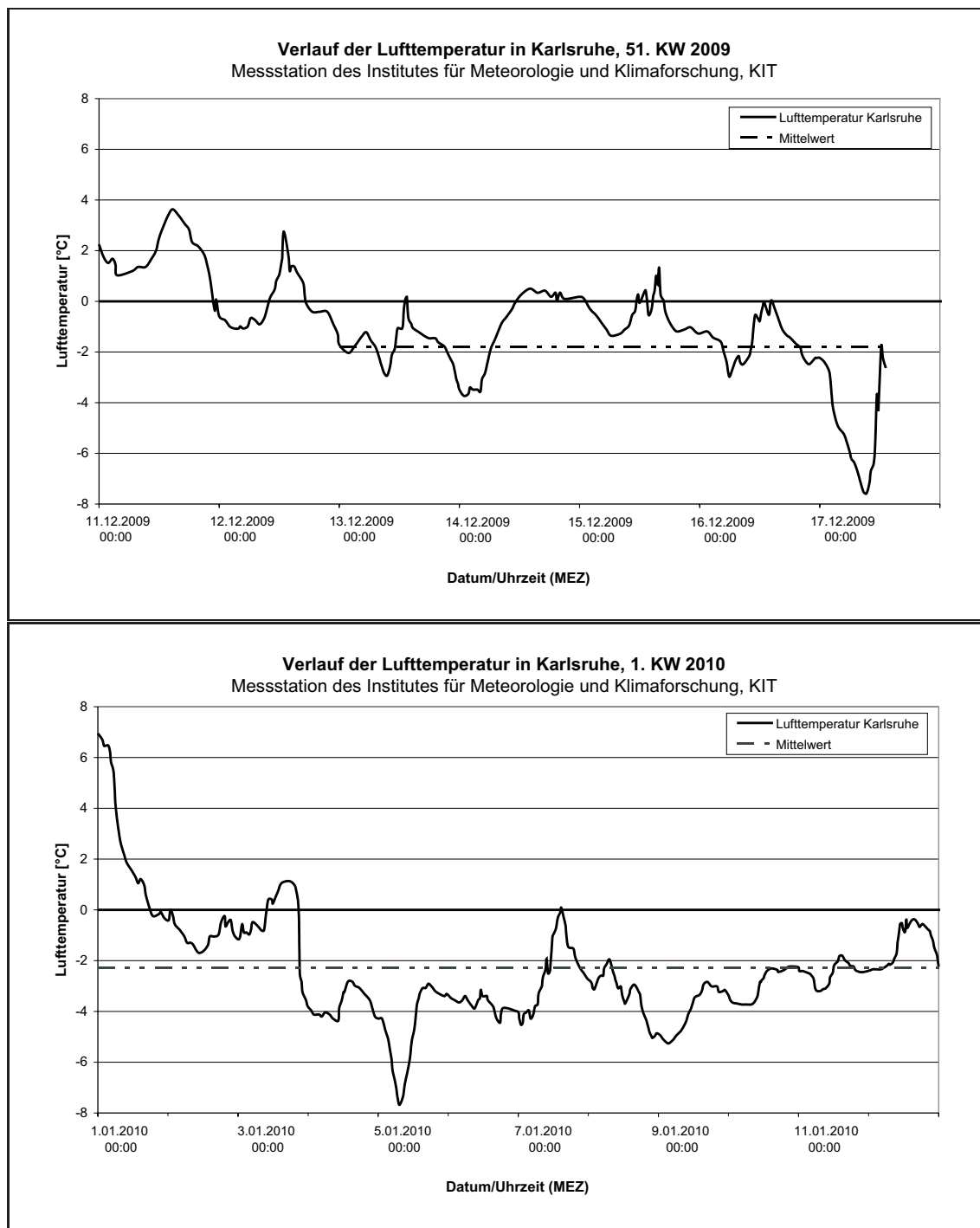


Abbildung E.1: Lufttemperatur in Karlsruhe, 51 KW 2009 und 1 KW 2010

F Zeitreihe der Wassertemperatur der Gewässer Murr und Rems

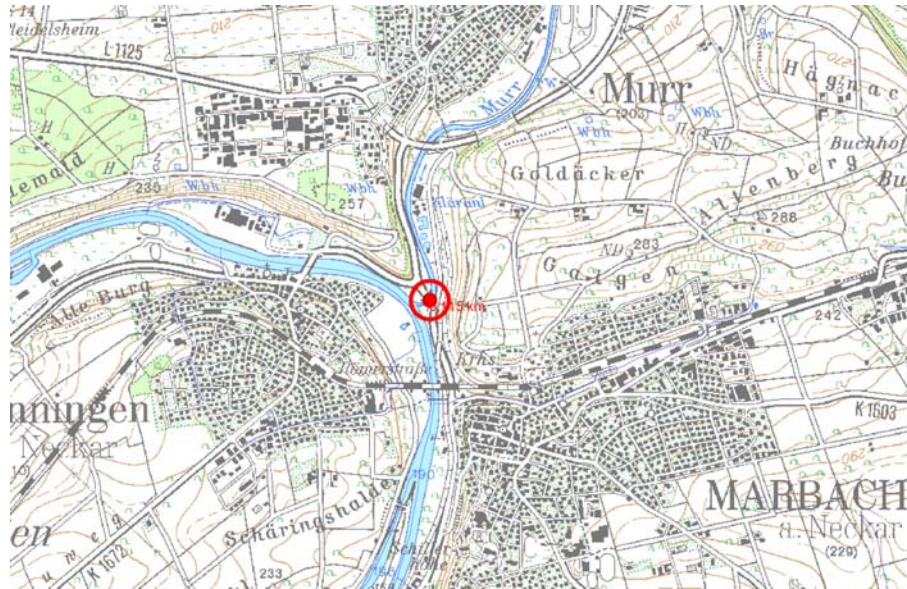


Abbildung F.1: Messstelle Murr/Murr [79]

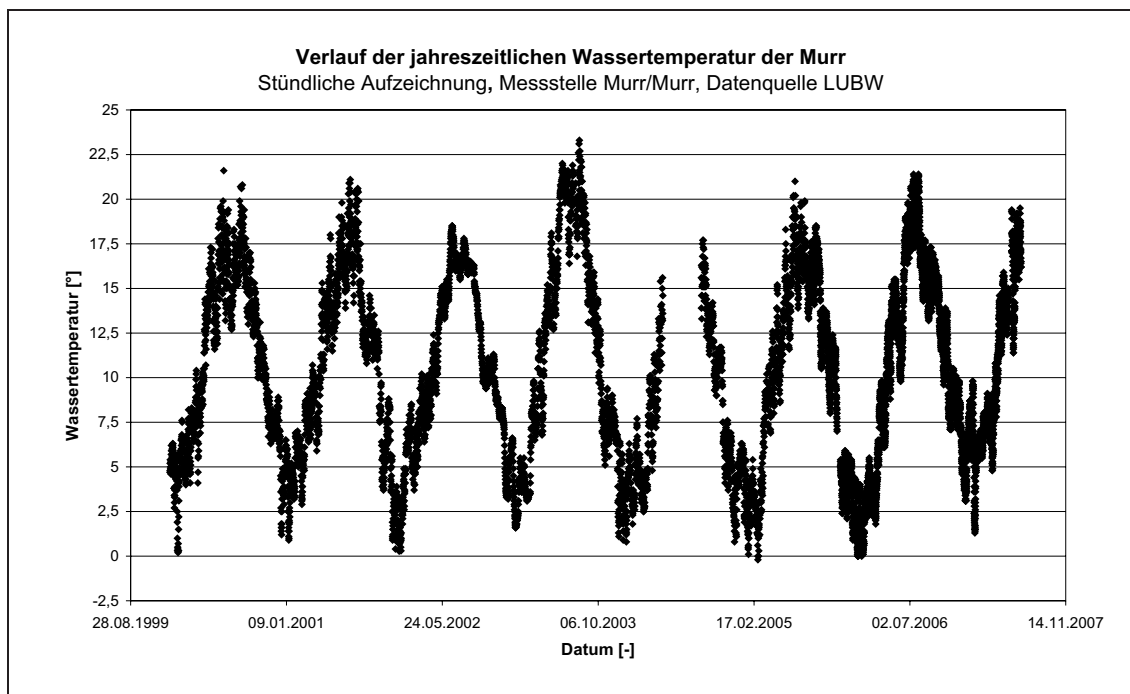


Abbildung F.2: Zeitreihe der Wassertemperatur, Messstelle Murr/Murr [79]

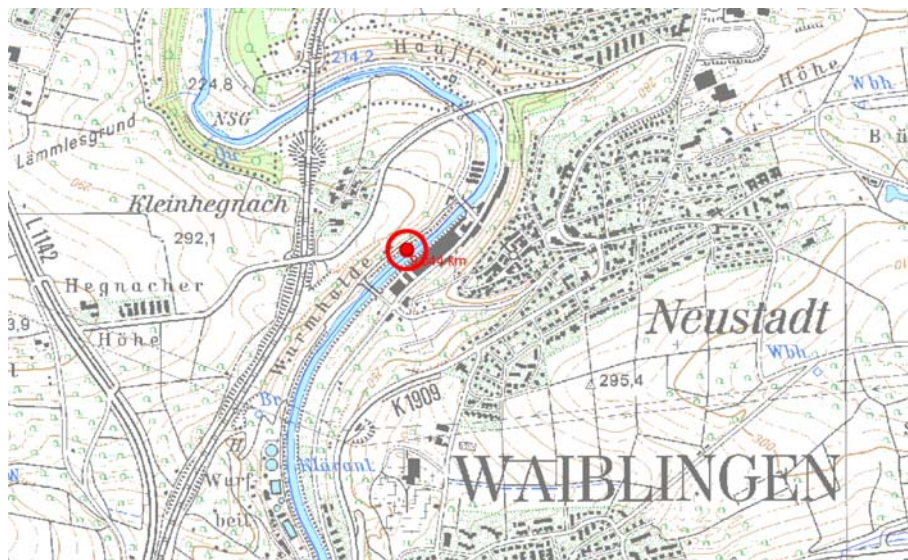


Abbildung F.3: Messstelle Neustadt/Rems [79]

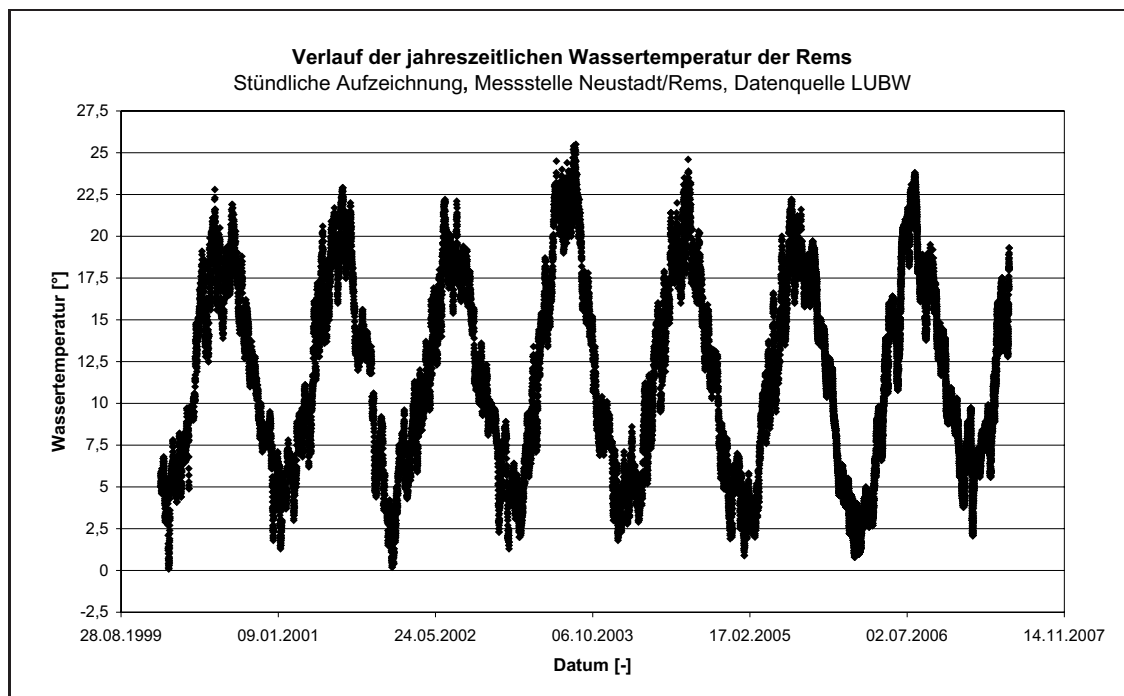


Abbildung F.4: Zeitreihe der Wassertemperatur, Messstelle Neustadt/Rems [79]