

Dr.-Ing. J.W. D i e t z

HYDRAULISCHE PROBLEME BEI DER PLANUNG VON STAUSTUFEN

Hydraulic Problems at the Projection of Barrages

Zusammenfassung

Die Ergebnisse von Modellversuchen an Staustufen, wie z.B. zuletzt Iffezheim/Rhein, haben gezeigt, daß bestimmte charakteristische hydraulische Probleme im Zusammenhang mit der Lage und Ausbildung der Hauptbauwerke und der Vorhäfen in ähnlicher Form immer wieder auftreten und häufig auch in übereinstimmender Weise gelöst werden können. Es werden einige für den Ausbau von Schifffahrtsstraßen wichtige Probleme dargestellt und unter Berücksichtigung von Versuchsergebnissen sowie bekanntgewordener Erfahrungen Lösungswege für künftige Planungen gezeigt.

Summary

The results of model tests at barrages, as e.g. recently Iffezheim/Rhein, have shown that certain characteristic hydraulic problems are occurring continually in similar form in connection with the position and the formation of the main structures and the outer harbors and that they can also be solved conformably. Some essential problems for the construction of the navigable waterways will be demonstrated and considering the test results as well as the known experiences, ways for the solution of future projections will be shown.

I n h a l t

	Seite
1. Einleitung	3
2. Grundrissgestaltung der Staustufen	4
3. Lage und Ausbildung der Vorhafentrennmolen	8
4. Ausbildung des Wehres	10
5. Schrifttum	16

1. Einleitung

Bei der Planung von Staustufen steht der projektierende Ingenieur nicht nur vor der Aufgabe, die einzelnen Hauptbauwerke wie Wehr, Schiffahrtsanlagen und gegebenenfalls Kraftwerk so zu entwerfen, zu bemessen und auszubilden, daß ihre Standsicherheit möglichst lang gewährleistet ist, sondern er hat auch darauf zu achten, daß diese verschiedenen Bauteile an einer Staustufe ihre Funktionen optimal erfüllen können. Da diese Funktionen immer in irgendeiner Weise auf die Regulierung, die Führung, die Bewegung und die Nutzung des strömenden Wassers abzielen, sollen die Kanalisierungsbauwerke strömungsgemäß gestaltet sein.

Erfahrungsgemäß bereitet die strömungsgerechte Ausbildung der Hauptbauwerke an einer Staustufe dem im Entwurf tätigen Ingenieur die meisten Schwierigkeiten, da die dabei auftretenden hydraulischen Probleme sich oftmals nicht so leicht und vor allem nicht so sicher klären lassen, wie dies im Interesse einer verantwortungsvollen, strömungstechnisch sauberen und auch wirtschaftlichen Planung erforderlich ist. Wohl können heute schon viele Strömungsabläufe beschrieben und rechnerisch dargestellt werden und es ist auch in vielen Fällen möglich, die Wirkung eines Bauwerkes auf das Strömungsgeschehen theoretisch nachzuempfinden, aber ein umfassendes Bild aller Einflüsse und vor allem von den Wechselbeziehungen zwischen Bauwerk und Strömung erhält man nur durch Modellversuche.

Betrachtet man die Aufgabenstellungen der bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in den 25 Jahren ihres Bestehens bearbeiteten Modellversuche über die Ausbildung von Kanalisierungsbauwerken, so stellt man unschwer fest, daß viele der genannten Aufgaben sehr eng an die speziellen Bedingungen einer Staustufe und ihrer einzelnen Glieder gebunden sind, die von Fall zu Fall immer wieder neu aufgegriffen und geklärt werden müssen.

Diese Beobachtung finden wir bei der Betrachtung der Versuchsergebnisse bestätigt, die größtenteils so stark mit den speziellen örtlichen Gegebenheiten und den verschiedenartigen Bauteilen zusammenhängen, daß es nicht möglich ist, sie systematisch zu ordnen und aufzuarbeiten, um dadurch zu allgemeingültigen Grundsätzen und Regeln für die Planung von Staustufen zu kommen. Trotzdem stehen wir heute nicht mit leeren Händen da, wenn es um die hydraulisch günstige Gestaltung von Kanalisierungsbauwerken geht.

Bestimmte Probleme können heute über eine mit der Entwicklung der modernen EDV-Anlagen einhergehende hydraulische Berechnung bzw. in einem mathematischen Modell so weit vorgeklärt oder gar abschließend behandelt werden, daß der Versuchsumfang im hydraulischen Modell nennenswert verkürzt, wenn nicht sogar auf ein Teilmodell eingeschränkt werden kann [11]. Hier sind beispielsweise die mathematischen Modelle für die Ermittlung von Wasserspiegeln sowie von Schwall- und Sunkvorgängen zu nennen.

Den gleichen Vorteil bringt auch das in einigen Fällen aus der Fülle des vorliegenden Ergebnismaterials kommende Wissen, wo und in welcher Form eine Lösung gesucht werden muß, das umfangreiche Versuche zur Entwicklung einer bestimmten strömungsgemäßen Form zugunsten einiger gezielter Kontrollversuche entfallen läßt. Als Beispiel darf hier auf die Ausbildung von Trennmolen am Wehr, Krafthaus und Schleusenvorhöfen hingewiesen werden.

Es gibt aber immer noch Probleme und für sie soll stellvertretend die Ausbildung des Tosbeckens unterhalb von Wehren bei Berücksichtigung räumlicher Strömungsabläufe angeführt werden, die nur mit dem Verfahren des Modellversuchs verlässlich und wirtschaftlich gelöst werden können.

Die uns heute bekannten Lösungswege und Möglichkeiten zur strömungsgerechten Planung von Kanalisierungsbauwerken sollen im folgenden unter Berücksichtigung der vorliegenden Versuchsergebnisse, bekannt gewordener Erfahrungen und der verfügbaren Angaben im Schrifttum in einer Bestandsaufnahme breiter herausgestellt werden, ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Unter Hinweis auf die speziellen Arbeiten über mathematische Modelle der Überlagerung von Sunk- und Schwallwellen in Wasserstraßen [9], [10] und Entwicklungstendenzen in der Schleusenhydraulik [15], [19] bleiben diese Teilgebiete ohnedies außerhalb der vorliegenden Betrachtung. Ein weiterer Schnitt wird beim Laufwasserkraftwerk vorgenommen, von dem an dieser Stelle nicht mehr gesagt werden kann, als schon im umfangreichen Fachschrifttum hierüber zu finden ist.

2. Grundrißgestaltung der Staustufen

Die Lage einer Staustufe wird bei Flußkanalisierungen im allgemeinen durch das Längsgefälle des Stromes, seiner Führung im Grundriß und durch die vorhandenen Geländeverhältnisse bestimmt. In speziellen Fällen kann auch das Vorhandensein von Brücken, Bepflanzungen oder Nebenflüssen bei der Standortfrage eine Rolle spielen, wie auch Anliegerinteressen und Kostenüberlegungen von Bedeutung sein können.

Obwohl auch aus Gründen einer guten Anströmung lokale strömungstechnische Gesichtspunkte beachtet werden sollen, bleibt dieser Einwand bei der Vielzahl der anderen gewichtigen Standortgründe allzu leicht im Hintergrund und wir finden dann möglicherweise die Staustufe in einer Flußkrümmung geplant, was im allgemeinen vermieden werden soll. Der Wasserbauer steht jetzt vor der Aufgabe, mit den ihm verbleibenden bescheidenen Mitteln wie leichte Verschiebungen und Verdrehungen einzelner Bauglieder für gute Strömungsverhältnisse zu sorgen oder durch bauliche Einzelmaßnahmen den gegebenen ungünstigen Strömungsabläufen Rechnung zu tragen. In beiden Fällen ist die Durchführung eines Modellversuchs unumgänglich, jedoch kann auch das zuerst genannte Anströmproblem schon in einfacher Weise in einem elektrischen oder aerodynamischen Analogiemodell geklärt werden.

Mit der Anordnung einer Staustufe in einer Flußkrümmung ist unmittelbar die Frage verbunden, auf welcher Seite des Stromes die einzelnen Hauptglieder der Staustufe liegen sollen, um durch die stärkere Strömung am Außenufer je nach ihrer Funktion entsprechend begünstigt oder entsprechend abgeschirmt zu sein. Hiermit wird die Allgemeinanzordnung der Hauptbauwerke gegeneinander angesprochen, die jedoch unter Hinweis auf eingehende Darstellungen im Fachschrifttum (z.B. [20][23]) zugunsten zweier für den Wasserstraßenbau bedeutungsvoller Teilaspekte dieses Gebietes in diesen Überlegungen ausgespart bleiben soll, und zwar

Anordnung der Hauptbauwerke aus Gründen der Bauausführung
und

Lage der Schiffsschleusen bzw. ihrer Zufahrten in Flußkrümmungen.

Beim Ausbau des Rheins unterhalb von Kehl/Straßburg finden wir die sogenannte QuerdammLösung, bei der die Stauregelung zwar im Fluß selbst vorgenommen wird, jedoch Wehr, Kraftwerk und Schleusen ohne Einengung des vorhandenen Flußbettes auf den seitlichen Vorländern errichtet werden (Abb.1).

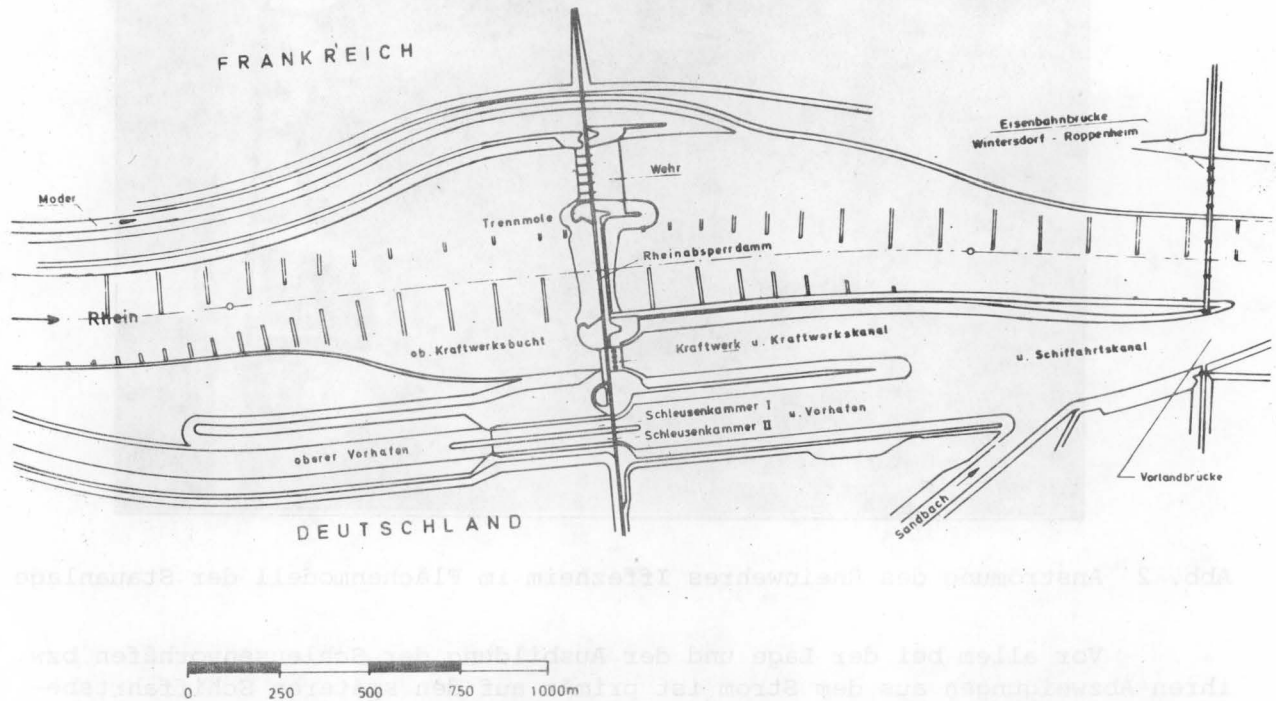


Abb. 1 Rheinstaustufe Iffezheim; Lageplan der Hauptbauwerke in der für die Ausführung vorgesehenen Anordnung

Die Vorteile der Bauausführung liegen auf der Hand. Ohne Störung der Schifffahrt können die Bauarbeiten auf beiden Seiten parallel laufen, was nicht unwesentlich zur Verkürzung der Gesamtbauzeit beiträgt. Nach französischen Ermittlungen sind die Kosten für eine Staustufe (ohne Kraftwerk) mit dem Bau von Schleuse und Wehr in trockenen Baugruben beiderseits des Rheins um 30 % niedriger als eine Bauweise im Strom unter gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Schifffahrt. Der Hochwasserabfluß erfolgt gefahrlos durch den bis zum Schluß freibleibenden Flußschlauch.

Der hydraulische Nachteil dieser Lösung folgt auf dem Fuß. Infolge der extremen Buchtlage des Wehres ließ sich auch durch eine noch so großzügige Aufweitung der oberstromigen Wehrbucht und auch durch eine strömungsgerechte Gestaltung der Trennmole zum Querdamm hin eine leichte Schrägströmung des Wehres nicht vermeiden, wie die Modellversuche gezeigt haben (Abb.2). Drückt man aber diesen Nachteil in der dadurch verminderten Abflußleistung des Wehres aus, so ist er im behandelten Beispiel verhältnismäßig gering, so daß die vorher genannten bautechnischen Gründe für diese Anordnung sprechen.

Hiermit soll aber nicht prinzipiell der Vorrangigkeit der Bauausführung das Wort geredet werden, sondern betont werden, daß man sich die Entscheidung über die Allgemeinanordnung der Hauptbauwerke nicht leicht machen soll, denn wie schnell handelt man sich für eine bequeme kurzdauernde Bauausführung bleibende Nachteile beim langfristigen Betrieb ein.

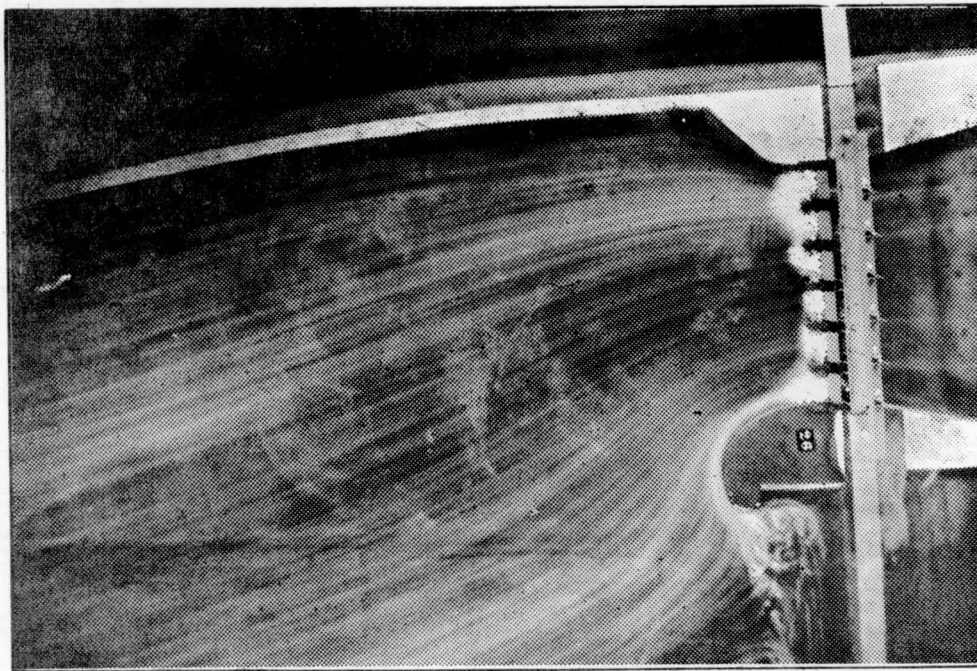


Abb. 2 Anströmung des Rheinwehres Iffezheim im Flächenmodell der Stauanlage

Vor allem bei der Lage und der Ausbildung der Schleusenvorhöfen bzw. ihren Abzweigungen aus dem Strom ist primär auf den späteren Schiffsverkehrs- betrieb und weniger auf Vorteile bei der Bauausführung zu achten, da hier betriebliche Mängel, wie sie aus ungünstigen Strömungsverhältnissen kommen können, ein ständiges Ärgernis darstellen, dessen spätere Behebung nur mit großen Aufwendungen möglich ist.

Im Fachschrifttum findet man häufig den Hinweis (z.B. [4],[22]), daß die Schleusenvorhöfen bei einer unumgänglichen Anordnung in Flußkrümmungen möglichst am Außenufer liegen sollen, und zwar wegen der dort vorhandenen größeren Wassertiefe, der geringeren Verlandungsgefahr und der besseren Sichtbedingungen bei der Zufahrt. Hinzu kommt, daß diese Lage dem ebenfalls auf der Außenseite der Krümmung liegenden Schiffskurs verkehrsgerecht entgegenkommt.

Bei den Modelluntersuchungen für den Ausbau der Mosel [13] konnte aber erkannt werden, daß die Beachtung dieser Argumente allein noch keinen einwandfreien Schiffsverkehrs- betrieb in den Vorhafeneinfahrten (besonders den oberen) sicherstellt. Denn nicht nur die Schiffsfahrt, sondern auch die Strömung bevorzugt den Weg an der Außenseite der Krümmung, da die Anlandung am Innenufer die größeren Strömungsgeschwindigkeiten nach dem Außenufer verlagert. Damit stößt die Strömung direkt gegen die Einfahrt zum oberen Vorhafen und kann ihren Weg zum Wehr hin nur durch eine starke Umlenkung vor dem Kopf der Trennmole nehmen, was ungünstige Querströmungen für die Schiffs- fahrt zur Folge hat [18], die sich umso stärker ausbilden, je mehr die dem Wehr zustrebende Strömung durch die obere Trennmole eingeengt wird.

In angespannten Fällen ist es nicht mehr möglich, diese Querströmungen durch eine besondere Formgebung der Trennmole zu vermindern, so daß hier die Anordnung am Innenufer zu empfehlen ist. Da die Vorhafensohle

meist höher als die übrige Flußsohle liegt, tritt der Nachteil der Geschiebeanlandung etwas zurück. Eindeutig auf der Habenseite liegen aber das Wehr und gegebenenfalls das Krafthaus, deren Anordnung auf der Außenseite dem Verlauf der Strömung weitgehend angepaßt ist.

Wie die hier vorgetragenen Gesichtspunkte gegeneinander abgewogen, bevorzugt beachtet oder nach eingehender Prüfung vernachlässigt werden müssen, soll anhand zweier Beispiele von der geplanten Umkanalisierung des Mains verdeutlicht werden (Abb.3).

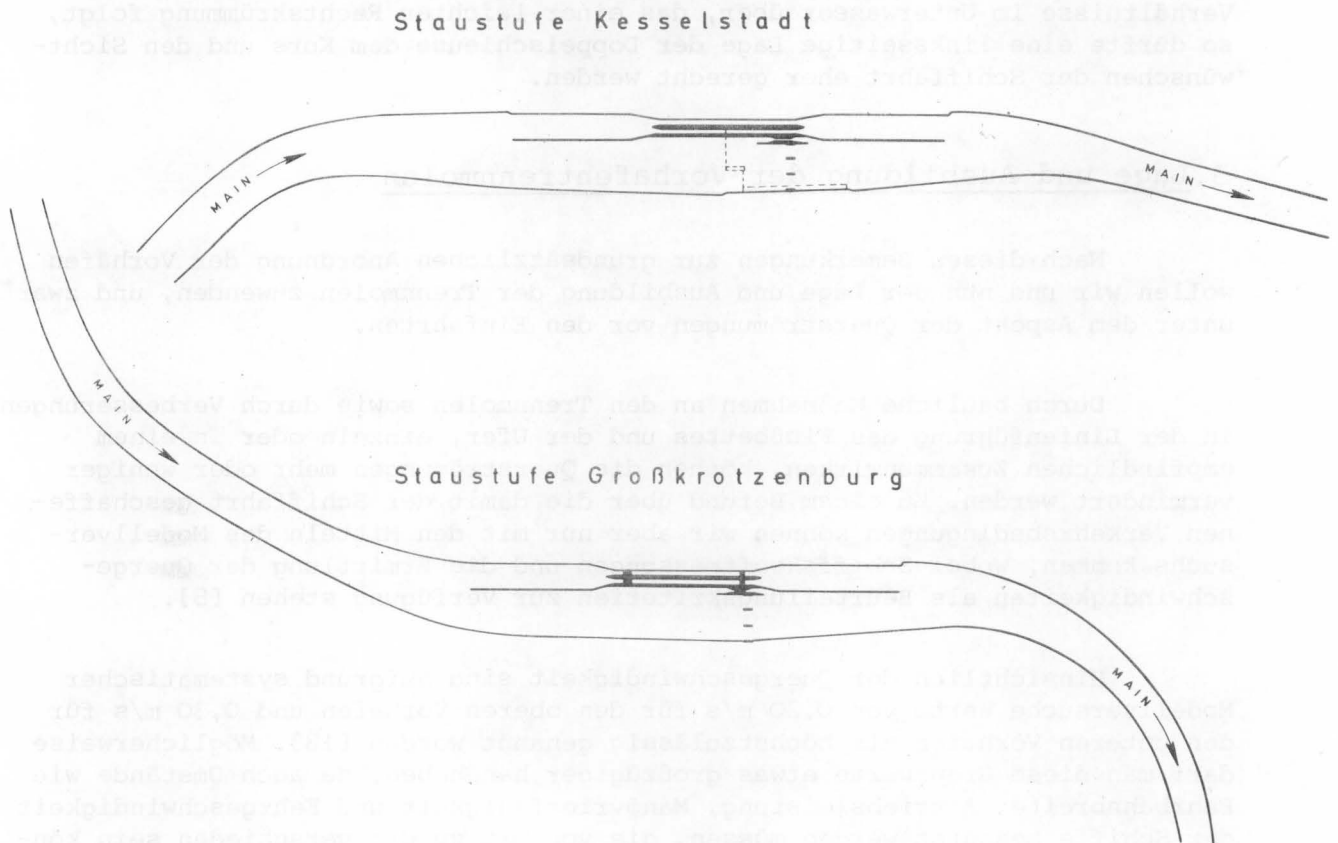


Abb. 3 Geplante Anordnung der Hauptbauwerke bei den Mainstaustufen Kesselstadt und Großkrotzenburg

In der klassischen Lage am Außenufer der Flußkrümmung finden wir die bestehende Schleusenanlage Großkrotzenburg, von der bisher keine Schiffahrtsschwierigkeiten bei der Zufahrt zum oberen Vorhafen bekannt geworden sind. Nunmehr soll eine Doppelschleuse geplant werden, durch die der Anteil des Vorhafens an der Gesamtbreite des Flusses so ungünstig vergrößert wird, daß mit einer scharfen Umlenkung der Strömung am Kopf der oberstromigen Trennmole gerechnet werden kann, wenn man bei der Anordnung der Schleusen am einbuchtenden Ufer bleibt. Hierbei erhält man noch den zweiten und wohl wesentlichen Nachteil, daß die Einfahrt des unterstromigen Vorhafens kurz vor dem Innenufer der nun folgenden scharfen Rechtskrümmung liegt, die Schiffahrt aus Gründen der Fahrwassertiefe also gezwungen sein wird, an das gegenüberliegende Außenufer zu wechseln und die Sichtverhältnisse für dieses Manöver überdies ungünstig sind.

Aus diesen Gründen ist für den Neubau der Doppelschleuse das linke Mainufer vorzuziehen, zumal bei der überwiegenden Schwebstoffführung des Mains der Verlandungseffekt an den Vorhafeneinfahrten auf beiden Flußseiten gegeben ist.

Obwohl die geplante neue Staustufe Kesselstadt ebenfalls in einer Krümmung zu finden ist, stellen sich hier die Strömungsverhältnisse im Oberwasser günstiger dar, da die Wehrachse etwa 1,3 km stromab Kurvenende liegt, also eine genügend lange gerade Strecke zum Ausgleich der Quer- und Spiralströmungen vorhanden ist. Unter diesem Gesichtspunkt ist es unerheblich, auf welcher Mainseite die Doppelschleuse angeordnet wird. Geht man aber auf die Verhältnisse im Unterwasser über, das einer leichten Rechtskrümmung folgt, so dürfte eine linksseitige Lage der Doppelschleuse dem Kurs und den Sichtwünschen der Schifffahrt eher gerecht werden.

3. Lage und Ausbildung der Vorhafentrennmolen

Nach diesen Bemerkungen zur grundsätzlichen Anordnung der Vorhäfen wollen wir uns nun der Lage und Ausbildung der Trennmolen zuwenden, und zwar unter dem Aspekt der Querströmungen vor den Einfahrten.

Durch bauliche Maßnahmen an den Trennmolen sowie durch Verbesserungen in der Linienführung des Flußbettes und der Ufer, einzeln oder in einem empfindlichen Zusammenwirken, können die Querströmungen mehr oder weniger vermindert werden. Zu einem Befund über die damit der Schifffahrt geschaffenen Verkehrsbedingungen können wir aber nur mit den Mitteln des Modellversuchs kommen, wobei Schiffskraftmessungen und die Ermittlung der Quergeschwindigkeiten als Beurteilungskriterien zur Verfügung stehen [8].

Hinsichtlich der Quergeschwindigkeit sind aufgrund systematischer Modellversuche Werte von 0,20 m/s für den oberen Vorhafen und 0,30 m/s für den unteren Vorhafen als höchstzulässig genannt worden [18]. Möglicherweise darf man diese Grenzwerte etwas großzügiger handhaben, da auch Umstände wie Fahrbahnbreite, Antriebsleistung, Manövrierfähigkeit und Fahrgeschwindigkeit der Schiffe beachtet werden müssen, die von Ort zu Ort verschieden sein können.

Die Einfahrt des oberen Vorhafens ist durch die Linienführung der Trennmole und des seitlichen Ufers so zu gestalten, daß die Strömung ohne eine allzu scharfe Umlenkung auf ihren weiteren Weg zum Wehr hin gebracht wird, eine starke Einengung der natürlichen Abflußbreite durch die Trennmole also vermieden wird. Andererseits muß aus Schifffahrtsgründen der Vorhafen möglichst gestreckt in den eigentlichen Strom führen. Diese beiden teils entgegengesetzt gerichteten Gesichtspunkte können nicht immer zu einer schifffahrtsgerechten Lösung vereint werden.

Aus dieser Schwierigkeit kann eine durchbrochene Molenverlängerung heraushelfen, die so gestaltet sein muß, daß sie in Form von zunehmenden Durchlaßöffnungen einen kontinuierlichen Übergang von der geschlossenen Trennmole bis zum freien Querschnitt herstellt. Aus Modellversuchen weiß man, daß die Wirkung einer solchen Mole dann am günstigsten ist, wenn die Summe der Öffnungsfläche zur gesamten benetzten Molenfläche etwa 30 bis 40 % beträgt [1], [18]. Durch eine oder mehrere Abwinkelungen der durchbrochenen Mole zum Fluß hin, wie z.B. bei der Moselstaustufe St. Aldegund, und dem damit

verbundenen leichten Wassereinzug im oberen Teil des Vorhafens können die Strömungsverhältnisse im Bereich der Einfahrt so entschärft werden, daß die Schifffahrt einwandfreie Fahrverhältnisse vorfindet.

Die durchbrochene Mole kann entweder als Schlitzwand oder als Tauchwand ausgeführt werden, die sich in ihrer Wirkung auf die Querströmungen etwa entsprechen, wie es beispielsweise bei den Modelluntersuchungen für die Schleusenanlage Kostheim/Main [1] speziell nachgewiesen werden konnte (Abb.4).

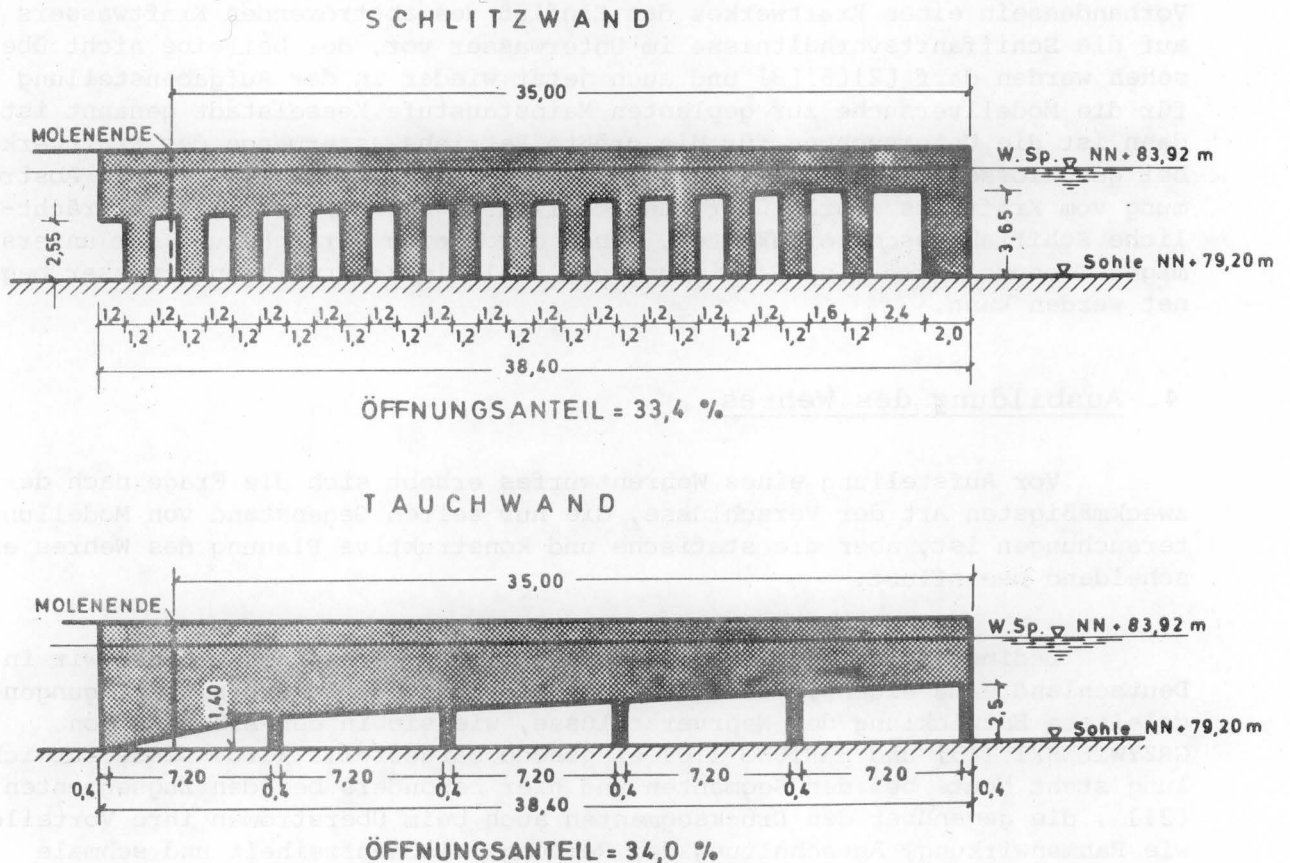


Abb. 4 Schlitzwand und Tauchwand aufgrund der Versuchsergebnisse für die Schleusenanlage Kostheim/Main

In beiden Fällen müssen aber die Öffnungen von der Sohle her etwa 2 m unterhalb des Wasserspiegels enden, damit ein vorbeifahrendes Schiff nicht von den Strömungsvorgängen im Bereich der Durchbrechungen gestört oder gar an die Mole gedrückt wird. Die Tauchwand hat unter Anlegung weiterer Maßstäbe aber den Nachteil, daß ihr Öffnungsverhältnis mit der Lage des Wasserspiegels und mit Eintiefungen oder Anlandungen an der Sohle empfindlicher reagiert als die Schlitzwand, die sich damit für die unterstromige Trennmole empfiehlt.

Im Unterwasser findet man mit umgekehrtem Vorzeichen eine grundsätzlich ähnliche Strömungssituation vor. Jetzt ist es die unterhalb der Trennmole folgende Erweiterung des Abflußquerschnittes, die eine Querströmung vor der Einfahrt bewirkt [26]. Auch hier kann durch eine aufgelöste Molenverlängerung Abhilfe geschaffen werden, die jedoch nur in wenigen Fällen

erforderlich ist, weil der untere Vorhafen schiffahrtsmäßig die geringeren Probleme aufwirft [18] und vor allem aber durch herkömmliche Maßnahmen weit besser beherrscht werden kann. Im allgemeinen führt hier die Zurücknahme oder Abflachung des dem Vorhafen gegenüberliegenden Ufers und eine Eintiefung der Sohle unterhalb des Wehres zum Ziel [2][8].

Da die Strömungsgeschwindigkeiten und damit die den Querströmungen innewohnenden Quergeschwindigkeiten mit der Größe des Abflusses zunehmen [18], ist für die hier behandelten Strömungserscheinungen in den Vorhafeneinfahrten der höchste schiffbare Wasserstand maßgebend. Nimmt man sich aber beim Vorhandensein eines Kraftwerkes den Einfluß des abströmenden Kraftwassers auf die Schifffahrtsverhältnisse im Unterwasser vor, der beileibe nicht übersehen werden darf [2][5][8] und auch jetzt wieder in der Aufgabenstellung für die Modellversuche zur geplanten Mainstaustufe Kesselstadt genannt ist, dann ist die Untersuchung für die größte Betriebswassermenge des Kraftwerkes bei geschlossenem Wehr zu führen. In ungünstigen Fällen verläuft die Abströmung vom Krafthaus schräg über den Schifffahrtsweg und verursacht beträchtliche Schifffahrtsschwierigkeiten, denen durch eine Verlängerung der unterstromigen Trennmole und eine Eintiefung der Sohle im Kraftwerksunterwasser begegnet werden kann.

4. Ausbildung des Wehres

Vor Aufstellung eines Wehrentwurfes erhebt sich die Frage nach der zweckmäßigsten Art der Verschlüsse, die nur selten Gegenstand von Modelluntersuchungen ist, aber die statische und konstruktive Planung des Wehres entscheidend beeinflusst.

Bedingt durch die wasserwirtschaftlichen Verhältnisse haben wir in Deutschland eine eigene, von statischen und hydromechanischen Überlegungen geleitete Entwicklung der Wehrverschlüsse, wie sie in den Arbeiten von GRZYWIENSKI [15] und HARTUNG [16] eingehend dargestellt wird. Diese Entwicklung steht heute bei den Segmenten und hier besonders bei den Zugsegmenten [21], die gegenüber den Drucksegmenten auch beim Überströmen ihre Vorteile, wie Rahmenwirkung, Ausschaltung der Reibung, Nischenfreiheit und schmale Pfeiler ohne Einschränkung behalten und eine dem Auge gefällige Unterwasseransicht bieten. Zugsegmente sind für alle in Frage stehenden Lichtweiten zwischen 16,0 und 24,0 m gleich günstig anwendbar [21], aber an Verschlusshöhen über 4,0 m gebunden, wenn die Wirtschaftlichkeit gewahrt bleiben soll. So sind beim Ausbau der Saar zur Schifffahrtsstraße und bei der Umkanalisierung der unteren Fulda Zugsegmente geplant, die sich in einer eingehenden Untersuchung zur Wahl der Wehrverschlüsse als wirtschaftlichste Lösung zeigten [27].

Nach der Wahl der Verschlussart und von dieser streng abhängig folgt die Gestaltung der Wehrschwelle, die so geartet sein soll, daß sie eine Strahlablösung verhindert und auf der Wehrkrone nirgends ein Unterdruck entsteht. In vielen Fällen findet man schon mit den Hinweisen im Schrifttum (z.B. [12] [16] [17]) und mit einem gesunden Gefühl für Strömungsvorgänge eine strömungstechnisch saubere Form. Will man aus Kostengründen die Neigung der Wehrschwelle möglichst steil wählen, um dadurch zu einer Verkürzung der festen Wehrkonstruktion zu kommen, empfiehlt sich eine Untersuchung im hydraulischen Teilmodell, das möglicherweise schon für die Dimensionierung des Tosbeckens zur Diskussion steht. Im Nachtrag spricht ebenfalls noch für das Zugsegment, daß es eine steilere Wehrschwelle als andere Verschlussarten zuläßt [16].

Beim Wehrpfeiler, um ein weiteres, wichtiges Konstruktionselement zu nennen, hat sich vernünftigerweise der halbkreisförmig abgerundete Pfeilerkopf durchgesetzt, der gegen eine Schräganströmung, wie sie vor allem beim Verschuß einer Wehröffnung auftritt, am wenigsten empfindlich ist. Da sich um das Pfeileroberhaupt ein Hufeisenwirbelsystem ausbildet, das sehr stark auf die Sohle einwirkt, muß im Zuströmbereich des Wehres eine Befestigungsstrecke angeordnet werden, wobei der Bemessungsfall durch den Verschuß einer Wehröffnung gegeben ist, bei dem ein gedrungenes, breites Hindernis mit einer entsprechend starken Wirbelbildung vorliegt.

Für das Pfeilerende sollte möglichst eine rechteckige Form gewählt werden, die über ihre bautechnischen Vorteile bei der Schalung und beim Anschluß der Notverschlüsse hinaus auch unter Anlegung strömungstechnischer Maßstäbe und schon durch diese allein als günstig zu bezeichnen ist. Bei der rechteckigen Ausbildung des Unterhauptes liegen an den Kanten stabile Ablösungspunkte vor, so daß die Gefahr unstabiler Strömungsvorgänge im Unterwasser herabgesetzt wird. Es ist vorteilhaft, wenn das rechteckige Pfeilerende zum Unterwasser hin geneigt wird. Dadurch wird die Entstehung der Ablösungswirbel nach der Tiefe verzögert und eine Störung der Wirbelvorgänge im Pfeilernachlauf erreicht, was deren schnelleres Abklingen im Unterwasser zur Folge hat.

Die Frage nach der Pfeilerlänge führt uns wieder auf die Art der Verschlüsse, hängt aber auch mit der Form und der Länge des Tosbeckens zusammen. Abgesehen von den statischen Bedürfnissen läßt sich eine eindeutige Antwort ohne einen speziellen Modellversuch in Verbindung mit der Bemessung des Tosbeckens nicht finden, wenn auch die Untersuchungen für das geplante Rheinwehr Iffezheim gezeigt haben, daß eine Pfeilerlänge bis zum Sturzbettende hinsichtlich der Kolkbildung von Vorteil ist.

Bleiben wir bei der senkrechten Führung des Wehrabflusses, so kommen wir zwangsläufig zu den beiden Randpfeilern bzw. den Wehrwangen. Diese sollen im Oberwasser hochwasserfrei liegen, möglichst senkrecht sein und als Grundrißform empfiehlt sich eine Ellipse, die nach den umfangreichen Untersuchungen von ROUVE [24] [25] über den Strömungsverlauf an gekrümmten Wänden als sogenannte "kurze Ellipse" ausgebildet werden kann, wie sie aufgrund positiver Versuchsergebnisse auch beim Rheinwehr Iffezheim zur Ausführung kommt (Abb.5).

Wesentlich verwickelter sind die Verhältnisse im Unterwasser, da die vom Wehr an den seitlichen Rändern senkrecht gefaßte Strömung auf das normale Profil zurückgeführt werden muß, wobei Ablösungsvorgänge nicht vermieden werden können, die sehr gefährlich auf die bewegliche Sohle einwirken und in kritischen Fällen die Auskolkungen in der Wehrmitte an Ausmaß und Tiefe weit übertreffen [6] [14] (Abb. 6).

Im gezeigten Beispiel erkennt man deutlich den Zusammenhang zwischen den seitlichen Ablösungswalzen und den tiefen, dreidimensionalen Kolken unterstrom der beiden Randfelder des Wehres.

Bei der Ausbildung der unterstromigen Wehrwangen kommt es also darauf an, die unvermeidbaren räumlichen Strömungserscheinungen auf eine gerade noch vertretbare Mindestwirkung zurückzuhalten. Infolge der großen Zahl der maßgebenden Faktoren und ihrer wechselseitigen Beeinflussung kann diese Aufgabe nur mit Hilfe eines Modellversuchs geklärt werden.

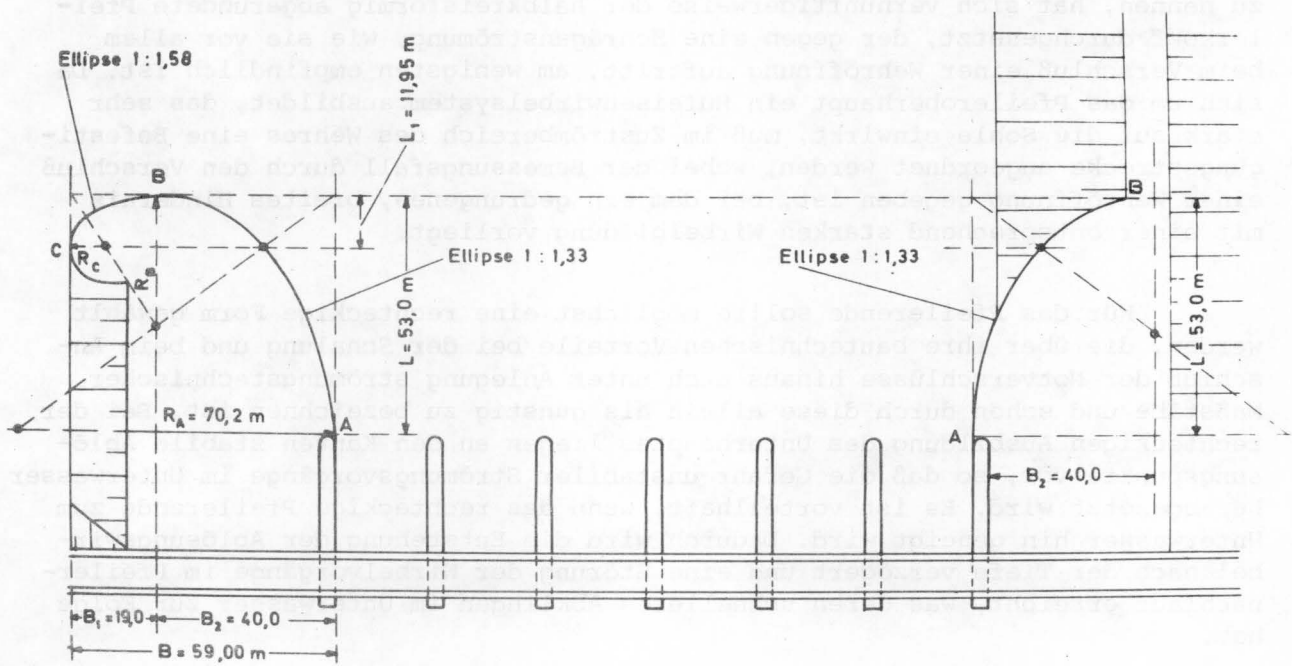


Abb. 5 Oberstromige Wehrwangen am Rheinwehr Iffezheim

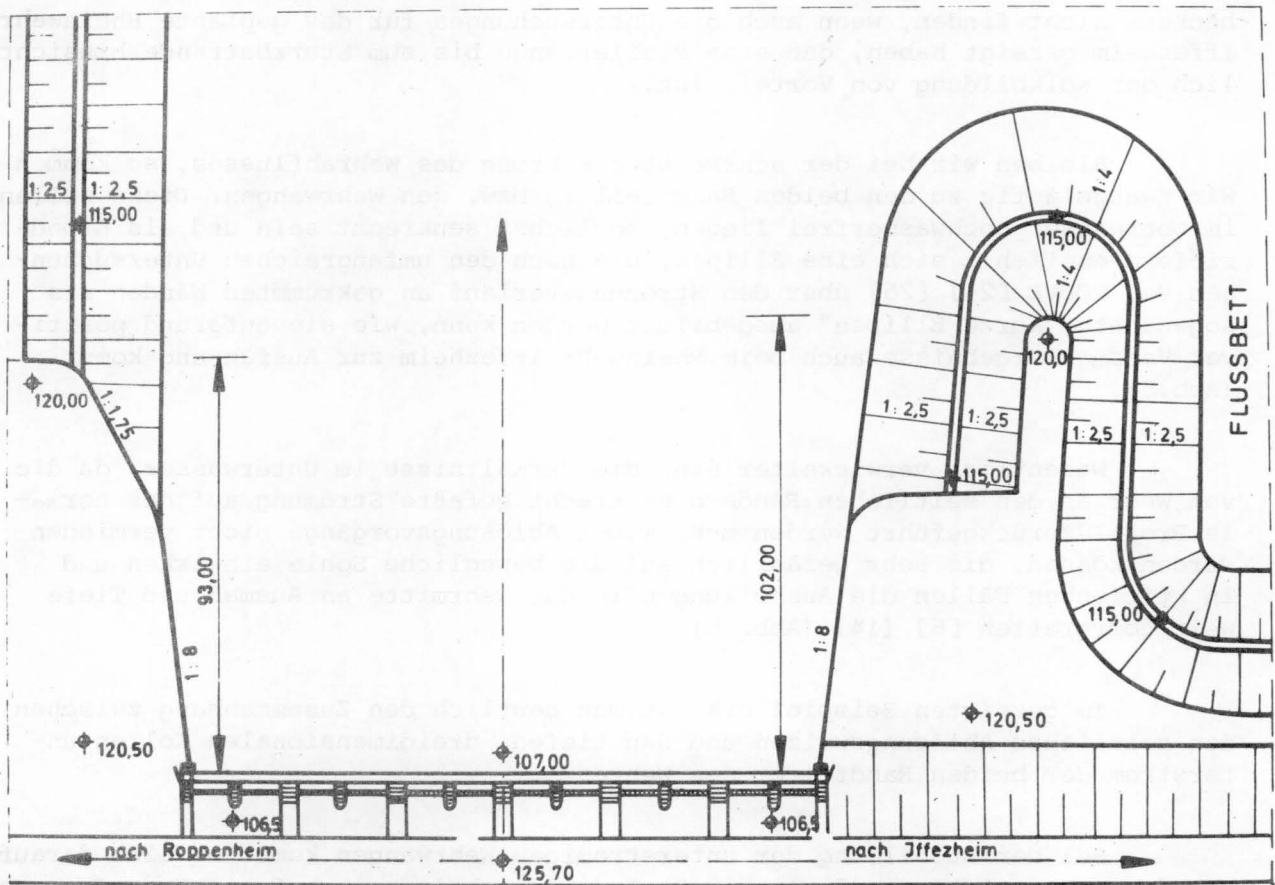


Abb. 7 Unterstromige Wehrwangen am Rheinwehr Iffezheim

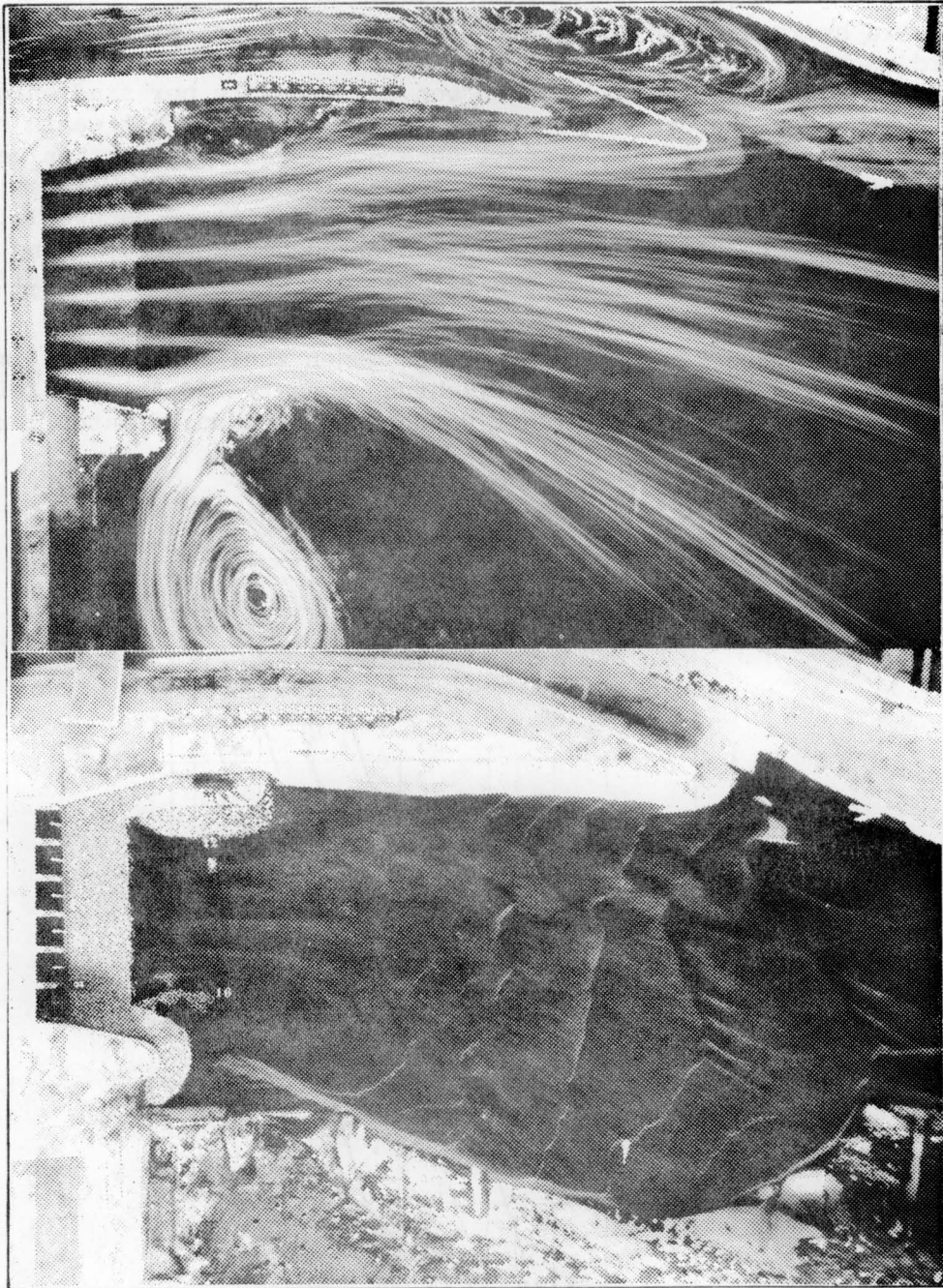


Abb. 6 Strömungsverlauf und Kolkbildung bei ungünstiger Ausbildung der unterstromigen Wehrrangen

Für das schon mehrmals genannte Rheinwehr Iffezheim ließ sich eine ausführungsfähige Lösung (Abb.7) nur Schritt für Schritt finden, da sich zeigte, daß schon mit den kleinsten baulichen Veränderungen beträchtliche Verschiebungen der Kolkvorgänge im Unterwasser verbunden sind. Generell brachten diese Versuche das Ergebnis, daß eine Verwindungsstrecke zwischen der senkrechten Begrenzung des Wehres und der Uferböschung in keiner Weise die Vorteile bringt, die man häufig von ihr erwartet.

Es steht außer Frage, daß in die räumlichen Strömungserscheinungen im Unterwasser auch die Art der Energieumwandlung im Tosbecken hineinspielt

[14] . Hiermit sind wir in unserer Betrachtung beim Tosbecken angekommen.

Die hydraulischen Forderungen an ein Tosbecken sind bekannt und ihnen wird auch durch eine Vielzahl von Bemessungsformeln und Berechnungsverfahren Genüge getan. Die Forderungen von der Bauseite her sind entgegengesetzt, da aus Kostengründen der Wunsch nach einem möglichst wenig eingetieften verhältnismäßig kurzen Sturzbett ohne Schikanen besteht. Den vermeintlichen Kompromiß kennen wir auch: Das konventionelle (meist eingetiefte) Tosbecken mit horizontaler Sohlplatte und rechteckiger Endschwelle, das in seiner Ausführungshäufigkeit alle anderen Arten von Tosbecken ohne Rücksicht auf deren Güte in der hydraulischen Wirksamkeit bei weitem übertrifft.

Dieses Tosbecken ist in den vergangenen zwei Jahrzehnten immer kürzer geworden, wie uns schon die Betrachtung von etwa 40 Anlagen zeigen kann, für die Modellversuche durchgeführt worden sind und deren Daten verfügbar waren (Abb.8).

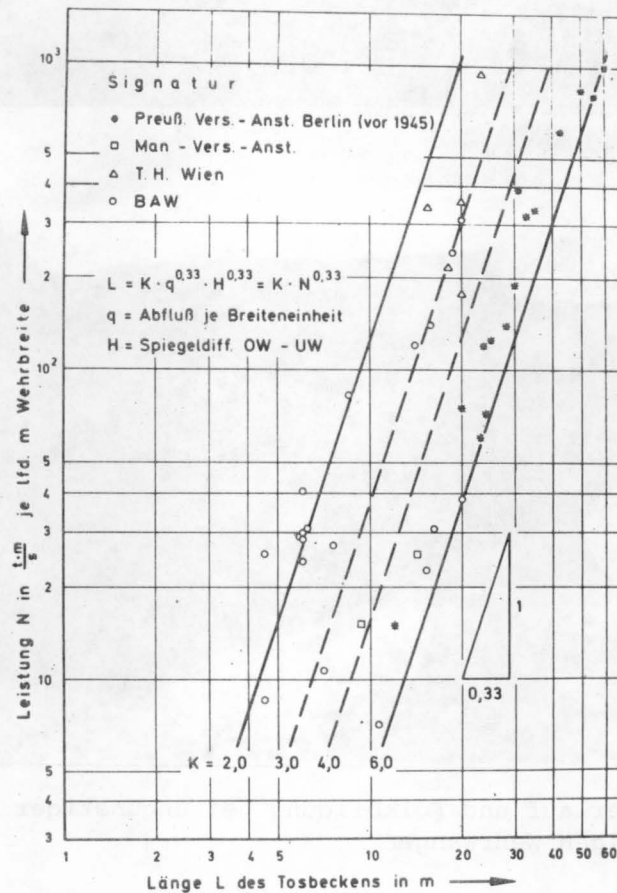


Abb. 8 Länge des Tosbeckens in Abhängigkeit von der Abflußleistung für etwa 40 im Modell untersuchte Wehranlagen

Stellt man die Länge des Tosbeckens der spezifischen Belastung der Wehranlage gegenüber, so findet man zunächst nur einen losen, durch eine große Streubreite gekennzeichneten Zusammenhang. Wenn man aber weiß, daß alle ganz rechts im Kurvenband liegenden Punkte vor dem Jahre 1945 Gegen-

stand von Modelluntersuchungen waren, während beispielsweise ganz links die Daten der Moselstaustufen liegen, dann läßt sich das vorliegende Material schon mit mehr Erfolg ordnen. Jetzt erkennen wir deutlich, daß die erforderliche Länge des Tosbeckens mit der Leistung der Wehranlage je lfdm Breite nach einer Potenzfunktion anwächst, jedoch linear mit einem Faktor K gekoppelt ist, der in den vergangenen Jahrzehnten immer kleiner geworden ist.

Bei dieser Entwicklung spielt ohne Zweifel die Erfindung der Befestigungsstrecke unterstrom des Tosbeckens eine Rolle, die das hydraulische Gewissen beruhigen konnte, wenn die Forderungen der Bauseite nach Verkürzungen und Vereinfachungen zu viel Gewicht erhielten. Wenn man so will, kann man die Befestigungsstrecke als scheinbare Verlängerung des Tosbeckens ansehen. Scheinbar deswegen, weil eine Befestigungsstrecke nie die hydraulische Wirksamkeit eines gut entworfenen Tosbeckens und vor allem nicht dessen Stabilität erreichen kann. Sie ist aber bautechnisch sehr einfach anzuordnen, wenn man von Steinschüttungen unter Wasser ausgeht und all die planerischen und konstruktiven Gesichtspunkte [7] außer acht läßt, von denen wir heute wissen, daß sie für den Bestand einer Befestigungsstrecke von ausschlaggebender Bedeutung sind. Es darf daran erinnert werden, daß wir uns im Unterwasser befinden, in dem die räumlichen Strömungsvorgänge mit ihren hohen Turbulenzen und starken Wirbelbildungen besonders heftig auf die Sohle einwirken. Will man aber eine Befestigungsstrecke so sorgfältig gegen alle Strömungserscheinungen wappnen, daß ihre Standsicherheit auch bei aussergewöhnlichen Belastungsfällen gewährleistet ist, dann klingen ihre sogenannten Vorteile ab und uns ist die Frage gestellt, ob nicht doch der Schritt zu einem längeren Tosbecken gewagt werden soll.

Auch ein anderer Gesichtspunkt spielt hier eine Rolle. Die Kolkbildung im Unterwasser kann durch eine gut ausgebildete Befestigungsstrecke wohl etwas ermäßigt und vom Wehr stromabwärts verlagert werden, aber verhindern läßt sie sich nicht. So stehen wir bei derartigen Anlagen vor der Situation, daß sich mit dem Tosbecken, der Befestigungsstrecke und dem anschließenden Kolkessel die Energieumwandlung in drei aufeinanderfolgenden Abschnitten vollzieht, von denen die beiden letzten Abschnitte mit den größten Risikofaktoren bezüglich der Standsicherheit der Unterwasserbauwerke des Wehres behaftet sind. Eine Verminderung dieser Risikofaktoren läßt sich mit letzter Konsequenz nur mit einer bedeutenden Verlängerung des Tosbeckens erreichen, wenn nicht sogar erst mit einer anderen Form, wobei zusätzlich auch Schikanen denkbar sind.

Ein erster Schritt auf diesem Weg stellt das Tosbecken für das geplante Rheinwehr Iffezheim dar, in dem Strahlaufreißer und Störkörper miteinander so ausgewogen wirken, daß sich bei allen im Modell betrachteten Abflußfällen die geringstmöglichen Sohlangriffe ergaben (Abb.9). Wohl finden wir auch hier wieder die ominöse Befestigungsstrecke, jedoch trägt diese ausschließlich den räumlichen Strömungsvorgängen an den unterstromigen Leitbauwerken Rechnung und ist aufgrund der Versuchsergebnisse im Flächenmodell konstruktiv so gestaltet, daß eine langzeitige Standfestigkeit erwartet werden kann. Es dürfte an dieser Stelle noch interessieren, daß die gewählte Tosbeckenlänge von 20 m (und nach Abb.8 der Faktor $K = 3,0$) wieder auf die stärkere Beachtung der hydraulischen Bedürfnisse hinweist.

Auf einen anderen und vielversprechenden Weg führen uns die Untersuchungen von CSALLNER [3], GRZYWIENSKI [15] und HARTUNG [16], die auf ein muldenförmiges Tosbecken mit aufwärts geneigter Sohle ohne Endschwelle hinzielen. Dieses Tosbecken wurde zwar schon eingehend und mit viel Erfolg im

Labor untersucht, aber nur in ganz wenigen Fällen gebaut, so daß uns leider keine Freiland erfahrungen zur Verfügung stehen.

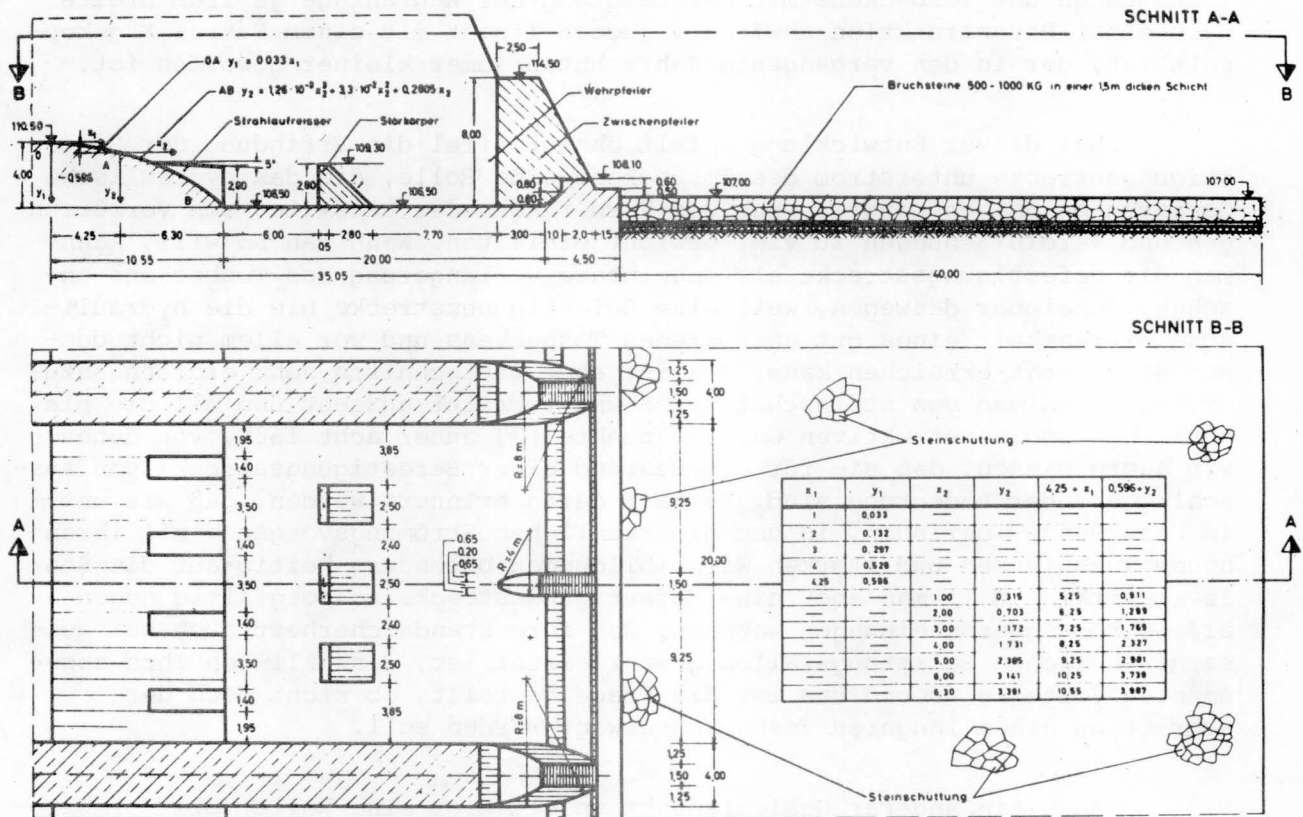


Abb. 9 Wehrschwelle, Tosbecken und Sohlensicherung am Rheinwehr Iffezheim

Wir wissen aber, was es mit dem konventionellen, meist zu kurzen Tosbecken drauen auf sich hat und die Sorgen um die stndige Kolkbildung sowie die laufenden Aufwendungen zu ihrer Behebung [7] sollen uns Anla genug sein, bei zukünftigen Aufgaben weniger konventionell zu sein, sondern freier von bautechnischen Einwänden ein Tosbecken zu planen, das die Hand eines fortschrittlichen, aber auch verantwortungsbewuten Hydraulikers erkennen lt.

5. Schrifttum

- [1] BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU : Schleusenanlage Kostheim/Main. Unveröffentlichter Bericht über Modelluntersuchungen (1965)
- [2] BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU : Neue Staustufe Kleinostheim/Main. Unveröffentlichter Bericht über Modellversuche zur Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse im Unterwasser (1965)
- [3] CSALLNER, K. : Zur Frage der Tosbecken bei Fluwehren. Die Wasserwirtschaft 57 (1967) H.2, S.100-101
- [4] DEHNERT, H. : Verkehrswasserbau, Band II: Flukanalisierung und Schifffahrtskanäle. Sammlung Göschen, Bd.597, Berlin 1950

- [5] DIETZ, J.W. : Einfluß der Saugschlauchbeaufschlagung bei Kaplan-Turbinen auf die Schiffahrtsverhältnisse im Unterwasser von Staustufen. Mitt.Bl. der BAW 14 (1966), H.23, S.79-92
- [6] DIETZ, J.W. : Modellversuche über die Kolkbildung. Die Bautechnik 49 (1972), H.5, S.162-168 u. H.7, S.240-245
- [7] DIETZ, J.W. : Sicherung der Flußsohle unterhalb von Wehren und Sperrwerken. Wasserwirtschaft 63 (1973) H.3, S.76 - 83
- [8] DIETZ, J.W. : Modelluntersuchung der Schleusenvorhöfen an der Rheinstaustufe Iffezheim. Mitt.Bl. der BAW 21 (1973), H.35, S.90-121
- [9] DORER, H. : Berechnung des nichtstationären Abflusses in nicht-prismatischen offenen Gerinnen. Mitt.Bl. der BAW 20 (1972), H.31, S.33-77
- [10] DORER, H. : Mathematische Modelle der Überlagerung von Sunk- und Schwallwellen in Wasserstraßen. Vortragsveranstaltung der BAW Karlsruhe 1973
- [11] DORER, H. : Combination of a physical and a mathematical river model with fixed bed. Internat. Symp. on River Mech., Bangkok, Jan.1973, Paper C 7
- [12] ENGEZ, N. : Über die Kronenform der Überfallwehre. Der Bauingenieur 36 (1961), H.11, S.426-429
- [13] FELKEL, K. : Die Modelluntersuchungen für zehn Moselstaustufen. Mitt.Bl. der BAW 9 (1961), H.16, S.3-32
- [14] GARBRECHT, G. : Seitenkolke an Wehren, Abstürzen und Grundschnellen. Die Wasserwirtschaft 47 (1957), H.9, S.230-235
- [15] GRZYWIENSKI, A. : Neue Tendenzen in der Ausbildung von Flußkraftwerken und Schiffsschleusen. Wasserwirtschaft 54 (1964), H.6, S.160-170
- [16] HARTUNG, F. : Die Strömungstechnische Entwicklung in Konstruktion und Gestaltung der Staustufen. Tiefbau (1970) H.3, S.201-230
- [17] JAMBOR, F. : Mögliche Erhöhung und Entwicklung der festen Wehrschwelle sowie Gestaltung der damit verbundenen Wehrkonstruktionen, im besonderen des Sektorwehres. Die Bautechnik 36 (1959), H. 6, S.221-228 und H. 8, S.297-300
- [18] JAMBOR, F. : Lage und Gestaltung der Schleusen und ihrer Zufahrten. Mitt.Bl. der BAW 8 (1960), H.15, S.3-13
- [19] LASAR, S. : Entwicklungstendenzen in der Schleusenhydraulik. Vortragsveranstaltung der BAW Karlsruhe 1973

- [20] MOSONYI, E. : Wasserkraftwerke, Band I: Niederdruckanlagen. 2.Auflage. VDI-Verlag Düsseldorf 1966
- [21] MÜLLER, W. : Über das Zugsegment als Verschuß im Stahlwasserbau. Die Wasserwirtschaft 57 (1967), H.11, S.385-392
- [22] PRESS, H. : Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen. 1.Auflage. Verlag Wilhelm-Ernst & Sohn, Berlin 1956
- [23] PRESS, H. : Wasserkraftwerke. 2.Auflage. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1967
- [24] ROUVE, G. : Der Krafthaustrennpfeiler. Strömungsverhältnisse an gekrümmten Wänden. 145.Arbeit a.d. Theodor-Rehbock-Flußbaulaboratorium d. Universität Karlsruhe, Januar 1958
- [25] ROUVE, G. : Untersuchungen über den Krafthaustrennpfeiler. Die Wasserwirtschaft 50 (1960), H.4, S.90-95 und H. 5, S.129-133
- [26] WIGAND, V. : Verhinderung von Geschiebeablagerungen vor den unteren Schleusenvorhäfen von Staustufen. Mitt. Bl. der BAW 4 (1956), H.6, S.17-23
- [27] WASSER- UND SCHIFFFAHRTSAMT SAARBRÜCKEN : Studie zur Wahl der Wehrverschlüsse beim Ausbau der Saar zur Schifffahrtsstraße. Unveröffentl. Bericht vom September 1971.