

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Eckoldt, Martin; Fuchs, Heinz; Gamer, Ernst; Jambor, Franz; Kuhn, Rudolf; Waas, Heinrich; Wiedemann, Gerhard; Wittmann, Heinrich

Bautechnische Probleme, die sich auf die Binnenschifffahrt auf Wasserstrassen mit Mehrzweck-Stauanlagen beziehen

Deutsche Beiträge. Internationaler Schifffahrtskongress (PIANC)

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
PIANC Deutschland

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104743>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Eckoldt, Martin; Fuchs, Heinz; Gamer, Ernst; Jambor, Franz; Kuhn, Rudolf; Waas, Heinrich; Wiedemann, Gerhard; Wittmann, Heinrich (1961): Bautechnische Probleme, die sich auf die Binnenschifffahrt auf Wasserstrassen mit Mehrzweck-Stauanlagen beziehen. In: PIANC Deutschland (Hg.): Deutsche Beiträge. 20. Internationaler Schifffahrtskongress; Baltimore, USA, 1961. Bonn: PIANC Deutschland. S. 33-68.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Abteilung I — Binnenschifffahrt

Frage 2

Bautechnische Probleme, die sich auf die Binnenschifffahrt auf Wasserstraßen mit Mehrzwecke-Stauanlagen beziehen:

- a) Gestaltung der Schiffsöffnungen, ihre Bezeichnung und Beleuchtung
- b) Auswirkung des Schwellbetriebes und der Betätigung der Verschlussorgane bei Hochwasser auf die Schifffahrt
- c) Lage und Gestaltung der Schleusen und ihrer Zufahrten
- d) Füll- und Entleerungsvorrichtungen
- e) Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei der Bemessung der Schleusenkammer und der Leit- und Schutzmauern
- f) Automatischer Betrieb

von Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. Heinrich Wittmann, Professor, Technische Hochschule Karlsruhe, Dr.-Ing. Martin Eckoldt, Oberregierungsbaurat, Wasser- und Schiffsdirektion Stuttgart, Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. Heinz Fuchs, Direktor, Rhein-Main-Donau AG, München, Dipl.-Ing. Ernst Gamber, Direktor, Neckar AG, Stuttgart, Dr.-Ing. Franz Jambor, Oberregierungsbaurat, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Dr.-Ing. Rudolf Kuhn, Rhein-Main-Donau AG., München, Dr.-Ing. E. h. Heinrich Waas, Ministerialrat, Bundesministerium für Verkehr, Bonn, Dr.-Ing. Gerhard Wiedemann, Ministerialrat, Bundesministerium für Verkehr, Bonn

Zusammenfassung

- a) *Die Gestaltung von Schiffsdurchlässen an Stauwehren, ihre Bezeichnung und Beleuchtung*

Die lichte Weite der Schiffsdurchlässe ist so zu bemessen, daß zwischen Schiff und Wehrpfeilern reichlicher Spielraum vorhanden ist. Wehrschwellen, Tosbecken und abgesenkte Verschlusssteile dürfen nicht über die Flußsohle herausragen; die Unterkante der hochgezogenen Verschlüsse und der Wehrbrücke muß in ausreichender Höhe über dem höchsten schiffbaren Wasserstand liegen.

Für die Bezeichnung der Schiffsdurchlässe ist ebenso wie für die Schleusen eine Tragweite von 500 bis 1500 m ausreichend. Das in Genf 1957 vorgeschlagene einheitliche System zur Bezeichnung der Binnenschifffahrtstraßen hat sich bewährt. Lichttagessignale verdienen gegenüber Formsignalen den Vorzug. Für die Beleuchtung hat das Bundesverkehrsministerium 1952 Richtlinien aufgestellt, die sich ebenfalls bewährt haben. Als Lichtquellen eignen sich Natriumdampflampen besonders gut.

- b) *Auswirkung des Schnellbetriebes und der Betätigung der Verschlussorgane bei Hochwasser auf die Schifffahrt*

Am Neckar ist Schwellbetrieb bei gleichzeitig stattfindender Schifffahrt in einer Kette von 9 Kraftwerken mit gutem Erfolg ausgeführt worden. Als oberes Speicherbecken wurde eine der Stauhaltungen verwendet. Die beim Schwellbetrieb entstehenden Wasserspiegelschwankungen halten sich im Rahmen der ohnehin durch Schleusenbetrieb und

Schiffahrt verursachten Schwankungen und lassen sich durch geeignete Handhabung beherrschen. Die Vorgänge werden anhand einer graphischen Darstellung der Kraftwerksleistungen und der Wasserstände im einzelnen verfolgt.

c) Lage und Gestaltung der Schleusen und ihrer Zufahrten

Für eine Staustufe als Mehrzweckanlage wird nach Erörterung einer günstigen Anlage im Zuge der allgemeinen Flußgestaltung im besonderen auf die Einfahrtverhältnisse in den Schleusenvorhafen eingegangen; die dort herrschenden Quergeschwindigkeiten werden als Ursache von Schiffahrtsschwierigkeiten bei höheren Wasserführungen herausgestellt. Das hierfür noch zulässige Maß von 0,20 m/s vor dem Schleusenoberhafen und 0,30 m/s vor dem Schleusenunterhafen wird durch Vergleiche von Einfahrtverhältnissen an 5 Abzweigungen von Schiffahrtskanälen vom Fluß in der Natur mit den entsprechenden Ergebnissen von Modellversuchen im Maßstab 1:25 bis 1:35 gefunden, wobei einschließlich der Untersuchungen für St. Aldegund/Mosel durch gleichzeitige Ermittlung der Schiffsverdrehungsmomente und der Quergeschwindigkeitsfelder auch die Beziehung zwischen Schiffsverdrehungsmoment und Quergeschwindigkeit angegeben wird. Anhand der Modelluntersuchungen für St. Aldegund/Mosel werden die zusätzlichen Baumaßnahmen — eine vorgesezte, durchbrochene und mehrmals abgewinkelte Molenverlängerung — entwickelt, die im Stande sind, auch bei sehr ungünstigen Ausgangsverhältnissen die Quergeschwindigkeiten vor dem Schleusenoberhafen auf das zulässige Maß herabzumindern. Über die Ermittlung des Verhältnisses zwischen Quergeschwindigkeit und Flußwasserführung für den Vorhafen Müden/Mosel kann nachgewiesen werden, daß ohne Ausführung dieser zusätzlichen Baumaßnahmen die Schiffahrtszeit auf der Mosel für zwei Monate im Jahre eingestellt werden müßte.

d) Füll- und Entleerungseinrichtungen

Die hydraulischen Vorgänge beim Füllen sind das entscheidende Merkmal für die Sicherheit der Schiffsbewegungen in der Schleusenkammer. Die Füllzeit ist eine Funktion der zulässigen Trossenkraft. Sie darf bestimmte Werte nicht überschreiten, wodurch die Steiggeschwindigkeit des Wasserspiegels in der Kammer und die Füllwassermenge bestimmt werden. Von den verschiedenen Arten der Füllung werden die Füllungen vom Oberhaupt aus, durch Längskanäle und Grundläufe einer Betrachtung unterzogen, wobei auch eine kombinierte Füllung, sowie die Füllung gleichzeitig vom Oberhaupt und Unterhaupt erörtert wird. Bei Mehrzweck-Stauanlagen sind es vielfach wasserwirtschaftliche Gesichtspunkte, die die Konstruktion der Verschlüsse entscheidend beeinflussen.

e) Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei der Bemessung der Schleusenkammer und der Leit- und Schutzmauern

Bei einzelnen Staustufen in wasserreichen, aber gefällearmen Flüssen sind die Schiffahrtsanlagen so groß zu bemessen, daß die verschiedenartigen Formen der Fahrzeuge und Schiffszüge ohne Gefahr und rasch durchgeschleust werden können. Einer betriebswirtschaftlichen Rechnung eher zugänglich sind kanalisierte Flußstrecken von etwa 100 km Länge, einheitlicher Ausbaugröße und Ausbautart. Da der Bauvollzug erfahrungsgemäß lange dauert und während der Bauzeit solcher Kraftwasserstraßen sich das Verkehrsbedürfnis, die Gütermenge und die Verkehrsart ändern, sind anfängliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen beim Vollausbau meist in positivem Sinne überholt.

Die Uferbegrenzungen im Bereich einer Schleuse können wirtschaftlich bemessen werden, wenn es gelingt, die angreifenden Kräfte günstig zu beeinflussen. Es wird die Wirkung besprochen, die eine Erhöhung der Wandrauigkeit auf den Erddruck ausübt. Als

wirksamste Maßnahme wird dann die Absenkung des Grundwasserspiegels behandelt und am Beispiel der Staustufe Jochenstein erläutert. Es folgt ein Hinweis auf baubetriebliche Maßnahmen, die geeignet sind, die Sohlenpressungen in der Gründungsfuge günstig zu beeinflussen.

f) *Automatischer Betrieb*

Die Schifffahrt kann schneller und gefahrloser durch Mehrzwecke-Stauanlagen geführt werden, wenn der Schleusenbetrieb zum Teil automatisiert und die Stellung der Wehrverschlüsse vollautomatisch geregelt wird.

Am Beispiel der Moselkanalisierung wird gezeigt, welche Aufgaben eine solche Automatisierung übernehmen kann und welche Einrichtungen dazu nötig sind.

Dadurch, daß Maschinen menschliche Arbeit und Überlegungen übernehmen, läßt sich bei den hohen Lohnkosten eines hochindustrialisierten Landes auch bei Mehrzwecke-Stauanlagen die Wirtschaftlichkeit steigern.

Inhalt

	Seite
Einleitung	35
a) Die Gestaltung von Schiffsdurchlässen an Stauwehren, ihre Bezeichnung und Beleuchtung	37
b) Auswirkung des Schwellbetriebes und der Betätigung der Verschlußorgane bei Hochwasser auf die Schifffahrt	41
c) Lage und Gestaltung der Schleusen und ihrer Zufahrten	46
d) Füll- und Entleerungseinrichtungen	52
e) Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei der Bemessung der Schleusenkammer und der Leit- und Schutzmauern	61
f) Automatischer Betrieb	65

Einleitung

Mehrzwecke-Stauanlagen haben die Aufgabe, den Stau auszunutzen für die Schifffahrt, die Wasserkraftnutzung, die Bewässerung und die Reinhaltung des Gewässers. Der Stauraum kann zugunsten von Ober- und Unterlieger, zur Wasserabgabe für Bewässerung, sowie zur Wasserentnahme für Hochspeicherwerke bewirtschaftet werden. Das Stauziel ist dann veränderlich. Die Aufgaben der Mehrzwecke-Stauanlagen werden um so komplexer, je mannigfaltiger die Nutzungen des Flusses sind. Ihre Koordinierung erfordert besondere technische Vorrichtungen für alle Zwecke.

Wird die Kombination Schifffahrt und Wasserkraftnutzung — Laufkraftstufe und Hochspeicherwerk — betrachtet, so ergeben sich für die drei Teile der Gesamtanlage, das Stauwehr, die Schifffahrts- und die Anlage zur Erzeugung elektrischer Energie, besondere Einrichtungen, die insbesondere der störungsfreien Abwicklung der Schifffahrt dienen. Wird das Beispiel auf einen Fluß bezogen, bei dem der Wert der Wasserkraftnutzung in einem Energie-Verbundnetz die verkehrswirtschaftliche Bedeutung der Wasserstraße einengt, kann es möglich sein, daß die Schifffahrtsanlagen gewisse Konzessionen zugunsten

der Wasserkraftnutzung machen müssen, selbst wenn sich dies nur in einer Beschränkung der für die Kammerfüllung verfügbaren Wassermenge äußert. Besondere Schwierigkeiten entstehen, wenn die Anlagen für die Wasserkraftnutzung der Entwicklung eines Schiffahrtsweges Jahre und Jahrzehnte vorausgegangen sind.

Im normalen Betrieb ist der Vorgang wasserwirtschaftlicher Natur derart, daß die Nutzung der Wasserkraft einem Optimum zustrebt, ohne die Häufigkeit und Geschwindigkeit der Schleusenfüllungen zu beeinträchtigen. Im Schwellbetrieb läßt sich eine Kette von Laufkraftstufen auch bei beschränkten Speicherräumen zur Deckung von Energiespitzen in Starklastzeiten und dadurch zur Ergänzung der Hochspeicherwerke heranziehen. Dieser Art von Energieerzeugung ist durch die von der Schifffahrt verlangte Fahrwassertiefe eine Grenze gesetzt. Es sei denn, daß von vornherein eine Stauhaltung am Anfang der Kette als Schwellbecken und eine zweite, am Ende der Kette, als Ausgleichbecken angelegt sind und die Fahrwassertiefen durch die Schwankungen der Wasserstände nicht eingeschränkt werden.

Im anomalen Betrieb, besonders beim Extrem des plötzlichen Ausfalles der Wasserkraftanlage, treten im Ober- und Unterwasser der Stauanlage Schwall- und Sunkerscheinungen auf, die ohne sofort wirkenden Gegenmaßnahmen die Schifffahrt stören. Die Maßnahme im Krafthaus einer Laufkraftstufe bezieht sich nach den neuesten theoretischen und praktischen Untersuchungen und Erfahrungen auf die Regeltechnik der Turbinen. Während es bisher beim plötzlichen Ausfall der elektrischen Anlage an besonders wasserreichen Flüssen und Strömen üblich war, die Kaplanturbinen etwa nach der Linie a von Bild 1 zu schließen, die einen erheblichen Schwall im Oberwasser, im oberen Vor-

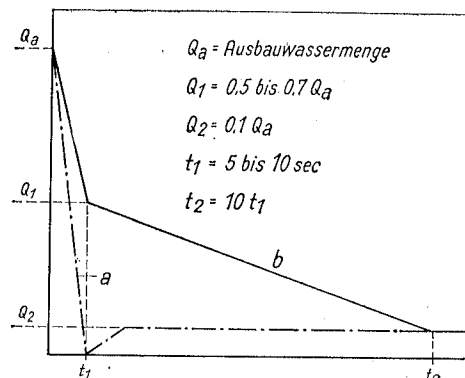


Abb. 1. Schließgesetz für Kaplanturbinen
in Mehrzweck-Stauanlagen

hafen und bei offenem Obertor in der Schleuse, sowie den entsprechenden Sunk im Unterwasser mit seinen Nachteilen für die Schifffahrt erzeugt, wird neuerdings für solche Mehrzweck-Laufkraftstufen ein Schließgesetz entwickelt, das im Prinzip dem Druckstoß bei Hochdruckleitungen entspricht. Es fehlt diesem Schließgesetz jedoch die Einfachheit der allseitigen, nahezu gleichbleibenden Umgrenzung, weil die freie Oberfläche des Wasserspiegels den durch die Topographie, die örtlich wechselnden Strömungsgeschwindigkeiten und die Stauvorgänge erzeugten Veränderungen unterworfen ist. Von Wasserwiderständen, besonderen Entlastungsbauwerken, sich sehr schnell senkenden Wehrverschlüssen kann abgesehen werden, wenn ein Schließgesetz in der Form der Linie b von Bild 1 bei den Turbinen angewendet wird. Der Anfangsschwall und -sunk werden erheblich gedämpft, so daß er und seine Reflexionen schadlos für die Schifffahrt verlaufen.

Die nicht stationären Strömungen beim Schwellbetrieb, bei den Schwall- und Sunkerscheinungen bedürfen sorgfältigster hydraulischer Prüfung. Während z. B. die Entnahme für Hochspeicherwerke und die Rückgabe der genutzten Wassermenge bei genügend großen, sorgfältig geregelten Stauräumen der Schiffahrt keine Schwierigkeiten bereiten, kann durch stromaufwärts fortschreitende Sunkwellen der unterhalb liegenden Laufkraftstufe auch die einem Schwall nachfolgenden, und die Sunkwelle des Primärwerkes ein kurzfristiger Mangel an Fahrwassertiefe eintreten, dem durch eine über das übliche Maß hinausgehende Austiefung der Schleusensole, des unteren Vorhafens und des Unterwassers im Primärwerk in gleicher Weise wie bei einem kontinuierlichen Schwellbetrieb vorgebeugt werden muß. Öffnungen in den Leitmolen der oberen und unteren Vorhäfen vermögen nicht nur die Ein- und Ausfahrt zu den Schleusenkammern zu erleichtern, sondern auch die Schwall- und Sunkwirkungen zu dämpfen. Bei dem durch Bewirtschaftung des Stauraumes veränderlichen Stauziel müssen diese Öffnungen jedoch tief unter das unterste Stauziel hinabreichen. Eine einwandfreie Nutzung des Zuflusses zur Füllung der Kammerschleuse, zur Energieerzeugung im Kraftwerk und zur Stauhaltung der Wehrverschlüsse läßt sich nur durch umfassende Automation des gesamten Betriebes einer Mehrzwecke-Stauanlage erreichen. Die Schiffahrt hat erkannt, daß bei einem derartig sorgfältigen Betrieb der Aufenthalt in den Schleusen weder die Schiffe gefährdet, noch die Verkehrsleistung der Wasserstraße herabsetzt, weil auch die geringe Strömungsgeschwindigkeit in den Stauhaltungen die Bergfahrt wesentlich erleichtert und den Zeitverlust in den Schleusen ausgleicht.

Während des Baues einer Mehrzwecke-Stauanlage sind ihre Benutzer bestrebt, baldmöglichst in den Genuß ihrer Nutzung zu kommen: Die Schiffahrt dadurch, daß sie entweder durch bereit gehaltene Wehröffnungen verkehren, oder schon vor der Errichtung des Staues die Schleusanlagen benutzen kann, das Kraftwerk dadurch, daß es einzelne Maschineneinheiten frühzeitig zum Betrieb bereitstellt. Voraussetzung ist das Vorhandensein des Stauwerkes, auch wenn im Anfangsstadium des Betriebes nur ein Teilstau erzeugt werden kann. Bautechnische, betriebstechnische und kostenmäßige Überlegungen führen zu einem sorgfältig ausgedachten Bauausführungsplan, der sich besonders auch der Arbeiten im Stauraum anzunehmen hat.

a. Die Gestaltung von Schiffsdurchlässen an Stauwehren, ihre Bezeichnung und Beleuchtung.

Stauwehre müssen schiffbar sein oder wenigstens eine Schiffahrtsöffnung erhalten, wenn

1. der Stau nur bei geringer Wasserführung gehalten werden, im übrigen aber die Schiffahrt den freien, genügend tiefen Fluß benutzen soll,
2. die Schiffahrt auf einem ständig aufgestauten Fluß in gewissem Umfang auch für den Fall möglich sein soll, daß
 - a) die mit dem Wehr verbundene Schleusenanlage unbenutzbar ist oder
 - b) der Stau vorübergehend gelegt werden muß und der Oberkanal und der Oberdremmel der Schleuse nicht so tief liegen, daß die Schiffe ohne Stau durch die Schleuse fahren können,
3. die Schiffahrt aus besonderen Gründen während des Baues durch das Wehr geführt werden muß.

Bei einer Niederwasser-Stauregelung nach Fall 1 sind die Anforderungen an die Ausmaße und die Gestaltung der Schiffahrtsöffnungen eines Wehres besonders hoch,

weil es sich bei der Durchfahrt durch das Wehr um einen normalen, dem Ausbauziel entsprechenden Vorgang handelt. Es müssen daher folgende Bedingungen erfüllt sein:

1. Der Schiffahrtsdurchlaß muß so weit sein, daß für die größten Schiffe und die breitesten Schiffszüge genügend Spielraum vorhanden ist und daß der Pfeilerstau die Durchfahrt nicht beeinträchtigt.
2. Im Bereich des Schiffsdurchlasses darf das Wasser weder beschleunigt noch verzögert werden und es dürfen sich keine Grund- und Deckwalzen einstellen. Deshalb darf die Wehrschwelle des Schiffsdurchlasses keinen Höcker erhalten und sie muß mit dem unteren Wehrboden bündig mit der Flußsohle liegen; das Tosbecken muß in die Flußsohle versenkt werden.
3. Verschlüsse, die abgesenkt oder umgelegt werden, dürfen in dieser Lage nicht wesentlich über die Flußsohle hinausragen.
4. Hebbare Verschlüsse müssen so hoch gezogen werden können, daß die für den HSW übliche Durchfahrtshöhe gewahrt ist, ohne daß die Schiffe ihre Aufbauten zu verändern brauchen.
5. Wenn mehrere Wehrfelder vorhanden sind, müssen bei allen die Wehrschwelle und der untere Wehrboden gleich tief liegen, weil sonst im Bereich des Schiffsdurchlasses oberhalb und unterhalb des Wehres Querströmungen entstehen, die die Schiffahrt, wenn nicht gefährden, so doch behindern.

Stauregelungen dieser Art sind in Deutschland mit der Entwicklung der Großschiffahrt im allgemeinen außer Gebrauch gekommen. Soweit entsprechend eingerichtete Schiffsdurchlässe vorhanden sind, werden sie nur noch ausnahmsweise benützt. Dies ist z. B. der Fall am Untermain zwischen Mainz und Aschaffenburg, wo besonders erfahrene Schiffer durch die Schiffsdurchlässe der Wehre fahren, wenn bei hohen Wasserständen die Schleusen überflutet sind, die Schiffahrt im Fluß aber gerade noch möglich ist.

Neue Anlagen dieser Art sind nur an zwei Stellen geplant. Das kommt einmal daher, daß die in letzter Zeit durch Aufstau geregelten Flüsse, wie z. B. der Main, der Neckar und die Weser von Natur aus nicht sehr wasserreich und daher nicht so tief sind, daß für die Großschiffahrt zeitweise auf den Stau verzichtet werden könnte. Zum anderen wird der Aufstau fast immer auch zur Energieerzeugung benutzt; das ist aber in wirtschaftlicher Weise nur möglich, wenn der Stau ständig gehalten und nur vorübergehend bei Hochwasser oder bei Reparaturen gelegt wird. Geplant ist eine auf die Niederwasserzeit beschränkte Stauregelung in der Elbe beim Magdeburger Domfelsen. Auch in der Strecke Regensburg—Kelheim der Rhein-Main-Donau-Großschiffahrtstraße ist eine derartige Stauregelung vorgesehen. Dort soll bei Sinzig eine Staustufe gebaut werden, die nur 2,2 m hydrostatische Fallhöhe besitzt und daher nicht zur Wasserkraftnutzung herangezogen werden kann. Der Stau soll bei Eintritt von Mittelwasser, sobald die natürliche Wassertiefe für die Großschiffahrt ausreicht, gelegt werden. Die Wassergeschwindigkeit im Bereich des Wehres ist dabei nur 0,9 m/s. Der Schiffsdurchlaß soll in der Mitte des dreifeldrigen Wehres liegen und 30 m breit werden. Die lichte Höhe über HSW soll 6,4 m betragen.

In den Fällen 2 und 3 sind die Anforderungen an die Ausmaße des Schiffsdurchlasses geringer, weil das Wehr höchstens für die Fahrzeuge schiffbar zu sein braucht, die verkehren konnten, ehe der Fluß durch Aufstau geregelt und für größere Schiffe befahrbar wurde. So hat man beim Staffelausbau des Mains*) in der Strecke Aschaffenburg—Würzburg die dreifeldrigen Wehre so eingerichtet, daß die 300—500 t großen Schiffe der

*) Der Ausbau erfolgt nach Klasse IV der internationalen Binnenwasserstraßen, d. h. für Schiffe von 1350 t Tragfähigkeit

vordem üblichen Kleinschiffahrt eine der 3 Wehröffnungen auch bei gelegtem Stau durchfahren können. Dabei wurde nach folgenden Grundsätzen verfahren:

1. Lichtweite des Schiffsdurchlasses: 30 m
2. Wassertiefe über der Wehrschwelle bei NSW und aufgehobenem Stau unter Berücksichtigung der Wasserspiegelabsenkung, die sich dadurch ergibt, daß oberhalb und unterhalb des Wehres notfalls eine besondere Kleinschiffahrtsrinne ausgebaggert wird: 1,10 m
3. Lichte Höhe über dem höchsten Schiffahrtswasserstand: 5,40 m

Das Einbinden der Wehrschwelle, des Tosbeckens und des unteren Wehrbodens in der Flußsohle zeigt der beigegebene Schnitt durch das Wehr der Mainstaustufe Rothenfels, die 1933 bis 1937 gebaut wurde. Wehrschwelle, Tosbecken und unterer Wehrboden liegen in allen drei Wehröffnungen auf gleicher Höhe (Bild 2).

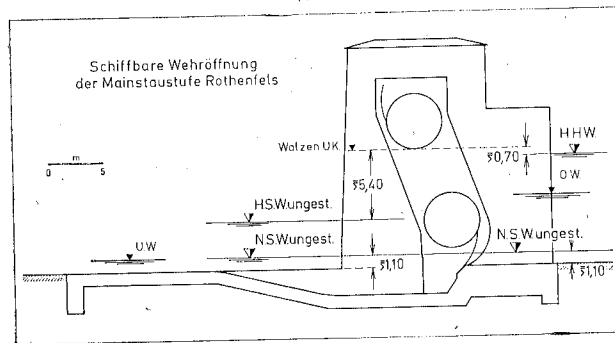


Bild 2

Schiffbare Wehröffnung der Mainstufe Rothenfels

Da mit dem fortschreitenden Ausbau des Mains die Kleinschiffahrt mehr und mehr zurückging, hat man in der Strecke Würzburg—Bamberg auf die Schiffbarkeit des Wehres und die dazu notwendige Kleinschiffahrtsrinne ganz verzichtet. Der Entschluß dazu war um so leichter, als die Kleinschiffahrt die Schiffsdurchlässe so gut wie nie benutzt hat. Lediglich während des Baues mußte sie in einigen Fällen durch das Wehr geleitet werden. Das läßt sich aber vermeiden, wenn man der Schleuse einen ausreichend tiefen Drempe gibt und den Bau so einteilt, daß die Schleuse rechtzeitig vor dem Wehr fertig wird. Im übrigen hat die Schiffahrt erkannt, daß die geringe Wassergeschwindigkeit in den Stauseen die Bergfahrt wesentlich erleichtert und den Zeitverlust in den Schleusen ausgleicht.

Die Bezeichnung und Beleuchtung der Schiffsdurchlässe, zu denen im Endzustand der Mehrzwecke-Stauanlagen auch die Schleusen, die oberen und unteren Vorhäfen sowie die Liegeplätze gehören, sind bedingt durch die Forderung, daß der Schiffsführer für seine Fahrt rechtzeitig die richtigen Informationen bekommt, entweder in der bestimmten Form der Zeichen oder durch die allgemeine Unterrichtung, die die Beleuchtung am Fahrwasser oder in den Schleusen gestattet.

Die Aufgabe der Bezeichnung ist vor allem, daß der zu benutzende Weg eindeutig und klar erkannt wird und die verkehrsregelnden Mitteilungen noch so rechtzeitig an den Schiffsführer gelangen, daß er Zeit und Raum hat, die notwendigen Maßnahmen für die Regelung seiner Fahrt zu treffen. Im allgemeinen genügt hierfür auf Binnenschiffahrtstraßen eine Tragweite der Zeichen von 500—1500 m.

Die Bezeichnung ergänzt weitgehend die bauliche Gestaltung des Fahrwassers. Wenn der Zugang zu den Schleusen oder der Abgang an sich eindeutig erkennbar ist, kann eine Bezeichnung erspart werden. Wenn sie aber notwendig wird, sollte sie einem allgemein bekannten System entnommen sein. Sonderzeichen sind auf ein Minimum zu beschränken, da sie in jedem Falle eine Belastung für den Schiffer darstellen. Aus den Erfahrungen an etwa 100 Schleusen, die in den letzten Jahren in der Bundesrepublik Deutschland neu bezeichnet sind, ergibt sich, daß das in Genf 1957 vorgeschlagene einheitliche System zur Bezeichnung der Binnenschiffahrtstraßen den meisten Anforderungen genügt.

Für Schleusen und Einfahrten in Seitenkanäle sind es meistens die Gebotszeichen, z. B. Gebot, eine Richtung einzuschlagen (Pfeil), Gebot, zu halten (liegender Strich) oder die Verbotsszeichen, z. B. Verbot, festzumachen (durchkreuztes P) und schließlich die Sperrzeichen (rot-weiß-rote Tafel oder 2 rote Lichter übereinander). Nach langjährigen Versuchen ist die Normalabmessung der Tafeln mit 1×1 bzw. $1 \times 1,5$ m so gewählt, daß bei Tag und Nacht (als Transparentschild) eine Erkennbarkeit von 500 m unter Normalverhältnissen erreicht wird.

Als Signale sind Lichttagesignale eingeführt, die auch den Genfer Empfehlungen entsprechen. Sie haben auch bei Tage (blauer Himmel mit weißen Wolken) eine Tragweite von 1000 m. Ihr Vorteil gegenüber den alten Formsignalen ist, daß Tag und Nacht die gleichen Signalbilder gezeigt und daß sie leicht ferngeschaltet werden können. Damit besteht größere Freizügigkeit im Aufstellungsort, die bei den sehr verschiedenen Verhältnissen an Wasserstraßen oft erwünscht ist.

Die Beleuchtung ist nach folgenden Gesichtspunkten gestaltet:

1. Bei der Einfahrt soll der Schiffsführer möglichst einen Raum vor sich sehen, in dem er aus sicherer Erkenntnis von Entfernung und Breite ähnlich wie am Tage navigieren kann.
2. Der Wechsel von der dunklen Strecke in das höhere Beleuchtungsniveau in der Schleuse und vor allem wieder hinaus auf die dunkle Strecke soll allmählich erfolgen, damit der Schiffsführer sich adaptieren kann und z. B. nicht ins „schwarze Loch“ fahren muß.

Diese Forderungen waren 1952 in Richtlinien für die Schleusenbeleuchtung vom Bundesverkehrsministerium niedergelegt. Sie haben sich bewährt und sind in das DIN-Blatt 67 500 „Schleusen und Vorhafenbeleuchtung, Richtlinien“ übernommen worden. Sie werden verwirklicht durch eine Vorhafenbeleuchtung mit ansteigendem Beleuchtungsniveau von etwa 1 lux bis 8—10 lux in der Schleuse und bei der Ausfahrt wieder abfallend auf 1 lux. Dadurch wird auch erreicht, daß der Vorbereitungsraum für die Schleusung bzw. die Liegestellen klar zu übersehen sind und der Durchlauf damit auf der ganzen Strecke flüssiger und sicherer wird.

Die Beleuchtung ist so gerichtet, daß nicht die Wasserfläche beleuchtet wird — das würde leicht Blendung auf der spiegelnden Fläche ergeben —, sondern die Uferfläche, die Schiffsdurchlässe und in der Schleuse die Plattform und die Schleusenwände, also die Arbeitsflächen. Als Lichtquellen haben sich mit Abstand Natriumdampflampen eingeführt. Die Schleusen mit Leuchtstofflampen sind, obgleich sie ein „natürlicheres“ Licht geben als die „gelben“ monochromatischen Natriumlampen in der Minderzahl. Breitstrahlende Spiegelleuchten, Auslegermasten, Lichtpunkthöhen von 8—8,5 m und -abstände von etwa 40 m sind die üblichen Ausführungen. Die Kosten je Lichtpunkt einschließlich der Erdarbeiten und Verkabelung betragen im großen Mittel etwa 2000 DM. An etwa 50 Schleusen hat sich die Beleuchtung nach diesen Richtlinien bereits bewährt.

b. Auswirkung des Schwellbetriebes und der Betätigung der Vorschlußorgane bei Hochwasser auf die Schifffahrt

1. Bei dem 1921 begonnenen Ausbau des Neckars zur Großschiffahrtsstraße (vgl. Bulletin 1959 Vol. II S. 119) wurden an den Staustufen neben den Wehren und Schleusen auch Kraftwerke erstellt. Gegenwärtig sind am kanalisiertem Neckar auf insgesamt 203 km Flußstrecke (Mannheim—Plochingen) 24 Wehren, 23 Schleusen und 23 Kraftwerke vorhanden (Bild 3). Die meisten dieser Werke wurden von der Neckar-Aktiengesellschaft, dem zum Ausbau des Neckars 1921 errichteten gemischtwirtschaftlichen Unternehmen, erbaut und werden auch von ihr betrieben. Der erzeugte Strom wird in

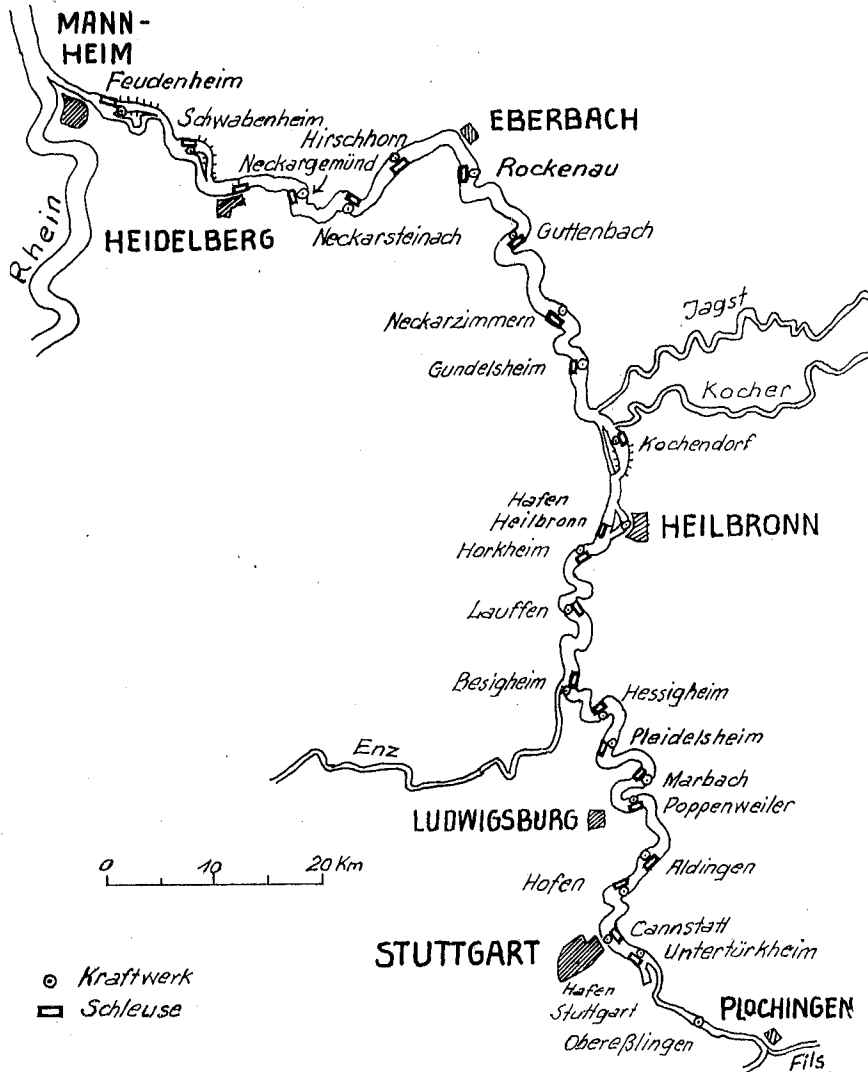


Bild 3
Übersichtslageplan des kanalisiertem Neckars

die Netze großer, im Verbundbetrieb arbeitender Elektrizitätsversorgungsunternehmen eingespeist. Die Voraussetzungen dafür, diese Kraftwerke auch bei Niedrigwasser durch Schwellbetriebe stärker, als es bei reinem Laufbetrieb möglich ist, zur Deckung der Bedarfsspitzen heranzuziehen, sind verhältnismäßig günstig. Betrachtet man zunächst den unteren Neckar zwischen der Mündung des letzten großen Nebenflusses, der Jagst, und der Mündung in den Rhein bei Mannheim (Bild 3), so sind auf dieser 101 km langen Flußstrecke die 9 vorhandenen Kraftwerke für 80 bis 100 m³/s Zufluß ausgebaut. Das mittlere Niedrigwasser beträgt 28 m³/s, Niedrigwasser (Oktober 1949) sogar nur 13 m³/s. Der Durchfluß und damit die Leistung der Kraftwerke kann also bei Schwellbetrieb auf das Mehrfache gesteigert werden (Bild 4). Ein solcher Beitrag zur Deckung des Strombedarfs in den Starklastzeiten der einzelnen Tage war besonders in den ersten Jahren nach dem 2. Weltkrieg erwünscht, in denen die Stromknappheit zum Teil zur Abschaltung von Verbrauchern gezwungen hatte; so wurde der Schwellbetrieb am 9. Juli 1947 erstmals angewendet und in der Folge in den Zeiten, in denen der Zufluß unter 60 % der Ausbaugröße zurückging, in der Kraftwerkskette von Gundelsheim bis zum Rhein weiter fortgeführt, bis er im Dezember 1955 aus Gründen, die mit dem fortschreitenden Ausbau der Wasserstraße zusammenhängen, vorläufig eingestellt werden mußte. Doch steht in Aussicht, daß er in absehbarer Zeit wieder aufgenommen werden kann. — Bei mittlerem Niedrigwasser konnten die Werke im Schwellbetrieb mit annähernd voller Leistung täglich 2 Stunden lang, bei höherem Zufluß entsprechend länger arbeiten. Die Zeit des Schwellbetriebs innerhalb des Tages wurde nach den Wünschen des Lastverteilers der Elektrizitätsversorgungsunternehmen festgesetzt, in der Regel im Sommer auf 10.30 Uhr bis 12.30 Uhr, im Winter auf 17.00 Uhr bis 19.00 Uhr, zum Teil auch auf 2 Zeiten zur Deckung der Morgen- und der Abendspitze aufgeteilt. Auch bei größeren Störungen in der Stromversorgung wurde der Einsatz des Schwellbetriebes angefordert und gegeben, wobei natürlich ein weiterer Einsatz an diesem Tage unmöglich wurde.

2. Am Neckar als einer Großschiffahrtstraße mußte der Schwellbetrieb von vornherein darauf abgestellt werden, daß die Schiffahrt durch ihn nicht leidet. Durch enge Zusammenarbeit zwischen der Neckar-Aktiengesellschaft und der Wasser- und Schiffahrtsdirektion Stuttgart sowie den nachgeordneten Wasser- und Schiffahrtsämtern ist es möglich gewesen, Schäden zu vermeiden.

- 2.1 Eine mögliche Auswirkung des Schwellbetriebes auf die Schiffahrt wäre zunächst die, daß die während der Schwellzeit erhöhte Fließgeschwindigkeit stören könnte. Dies kann jedoch am Neckar nicht eintreten. Der Abfluß aus den Kraftwerken während des Schwellbetriebes kann höchstens die oben erwähnte Ausbaugröße von 80 bis 100 m³/s erreichen; die Schiffahrt wird dagegen erst eingestellt, wenn die Wasserführung auf 450 m³/s gestiegen ist (vgl. Eckoldt, Bestimmung des höchsten Schiffahrtswasserstandes, Beitrag zum XVIII. Internationalen Schiffahrtskongreß Rom 1953, Kongreßbericht S. 2 bis 8), sie kann also eine viel stärkere Fließgeschwindigkeit ertragen.

- 2.2 Schwieriger ist dagegen die Frage, wie die zum Schwellbetrieb notwendige Speicherung in einem oberen und einem unteren Speicherbecken mit der Schiffahrt in Einklang zu bringen ist. Auf ein unteres Speicherbecken ist allerdings verzichtet worden, weil die Schwankungen des Abflusses aus dem Neckar in den Rhein bei dessen vielfach größerer Wasserführung dort keine nachteiligen Folgen hat. Als oberes Speicherbecken mußten Stauhaltungen des Neckars verwendet werden. Absenkungen unter Normalstau konnten dabei wegen der Fahrwassertiefe im oberen Teil der Haltungen nicht zugelassen werden; doch ließ sich der Umstand

ausnützen, daß an allen neueren Wehren die Krone der Verschlüsse 0,20 m über Normalstau gelegt worden ist, um bei den unvermeidbaren Spiegelschwankungen ein Überschwappen von Wasser zu vermeiden, was einen Wasserverlust bedeutet und bei Frostwetter die Verschlüsse zum Vereisen bringt. Es stehen somit nur diese 0,20 m Speicherhöhe zur Verfügung. Als günstig für Speichierzwecke bot sich vor allem die Haltung Lauffen wegen ihrer großen Spiegeloberfläche an. Da jedoch das Wasser der großen Nebenflüsse Kocher und Jagst in den Schwellbetrieb mit einbezogen werden sollte, war es außerdem nötig, die Haltung Gundelsheim, in die diese Flüsse einmünden, mit zur Speicherung heranzuziehen. Aus der Haltung Lauffen allein können mit einer Speicherhöhe von 0,20 m und bei einer Spiegeloberfläche von 1 280 000 m² im Schwellbetrieb 2 Stunden lang

$$\frac{1\,280\,000 \times 0,20}{2 \times 3\,600} = 35,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

zusätzlich abgegeben werden. Von Lauffen bis Gundelsheim konnte der Zuschuß wegen örtlicher Umstände nicht im Schwellbetrieb genutzt werden; er mußte daher in Lauffen 1 bis 2 Stunden früher abgelassen werden als in der im Schwellbetrieb gefahrenen Kraftwerkskette von Gundelsheim bis zum Rhein.

Die Speicherung in Lauffen und Gundelsheim wurde vor allem in der Zeit geringen Stromverbrauchs, also in der Nacht, vorgenommen, in der auch der Wasserverbrauch der Schleusen wegfällt; auch wurden kurze Wasseranschwellungen, die zuweilen durch örtliche Starkregen entstehen, aufgefangen. Es war angeordnet worden, daß beide Speicherhaltungen — ebenso wie alle übrigen in den Schwellbetrieb einbezogenen Haltungen — täglich 6 Uhr Vollstau haben, so daß die Kraftwerkskette von diesem Zeitpunkt an jederzeit für die Abgabe der erhöhten Leistung bereit stand und außerdem die für die Schifffahrt und den Schleusenbetrieb notwendigen Wasserstände vorhanden waren.

2.3 Die dritte und entscheidende Wirkung des Schwellbetriebs auf die Schifffahrt ist der Einfluß, den das Beschleunigen und Verzögern der fließenden Wassermasse beim Schwellbetrieb auf die Wasserstände ausübt. Kritisch ist vor allem das Verzögern des Wasserabflusses am Ende der Schwellzeit; hierbei verkleinert sich der Zufluß in die Haltung, wodurch die Wasserstände in ihrem oberen Teil sinken müssen, also gerade in dem Abschnitt, in dem die Fahrwassertiefe nicht, wie im unteren Teil, überreichlich ist, sondern durch Baggern auf den garantierten Mindestwert (2,70 m) gebracht worden ist und nur durch Baggern erhalten werden kann. Die Wassertiefe wird auch nicht, wie man vermuten könnte, durch das Fließgefälle in der Haltung vergrößert, da dieses bei den vorhandenen, von der Schifffahrt geforderten Querschnittsgrößen und bei den Abflüssen, bei denen Schwellbetrieb stattfindet, in den verhältnismäßig kurzen Haltungen des Neckars — die längsten 2 Haltungen sind 13,7 km lang — praktisch Null ist. Viel mehr als durch das Fließgefälle werden die Wasserstände beeinflusst durch die Schleusungen, in deren Verlauf rd. 5 min. lang bis etwa 40 m³/s aus den Haltungen entnommen oder in sie eingeführt werden, und auch durch die Schubwirkung der fahrenden Schiffe. Die Wasserstände im kanalisiertem Fluß können also niemals so stetig verlaufen, wie man es von einem ungestauten Fluß gewöhnt ist; der Schwellbetrieb ist nur eine von mehreren Ursachen mehr oder weniger kurzer Wasserstandsschwankungen, die sich richtig nur in einem sehr großen Zeitmaßstab darstellen ließen und durch Drosselung des Zulaufs zum Pegelschacht gegen gewöhnliche örtliche Wellenbildungen abgegrenzt werden müssen.

Das sich aus diesen Einflüssen ergebende Spiel der Wasserstände in einer Haltung (Neckarzimmern) ist für einen Tag mit Schwellbetrieb in Bild 4 dargestellt. Der

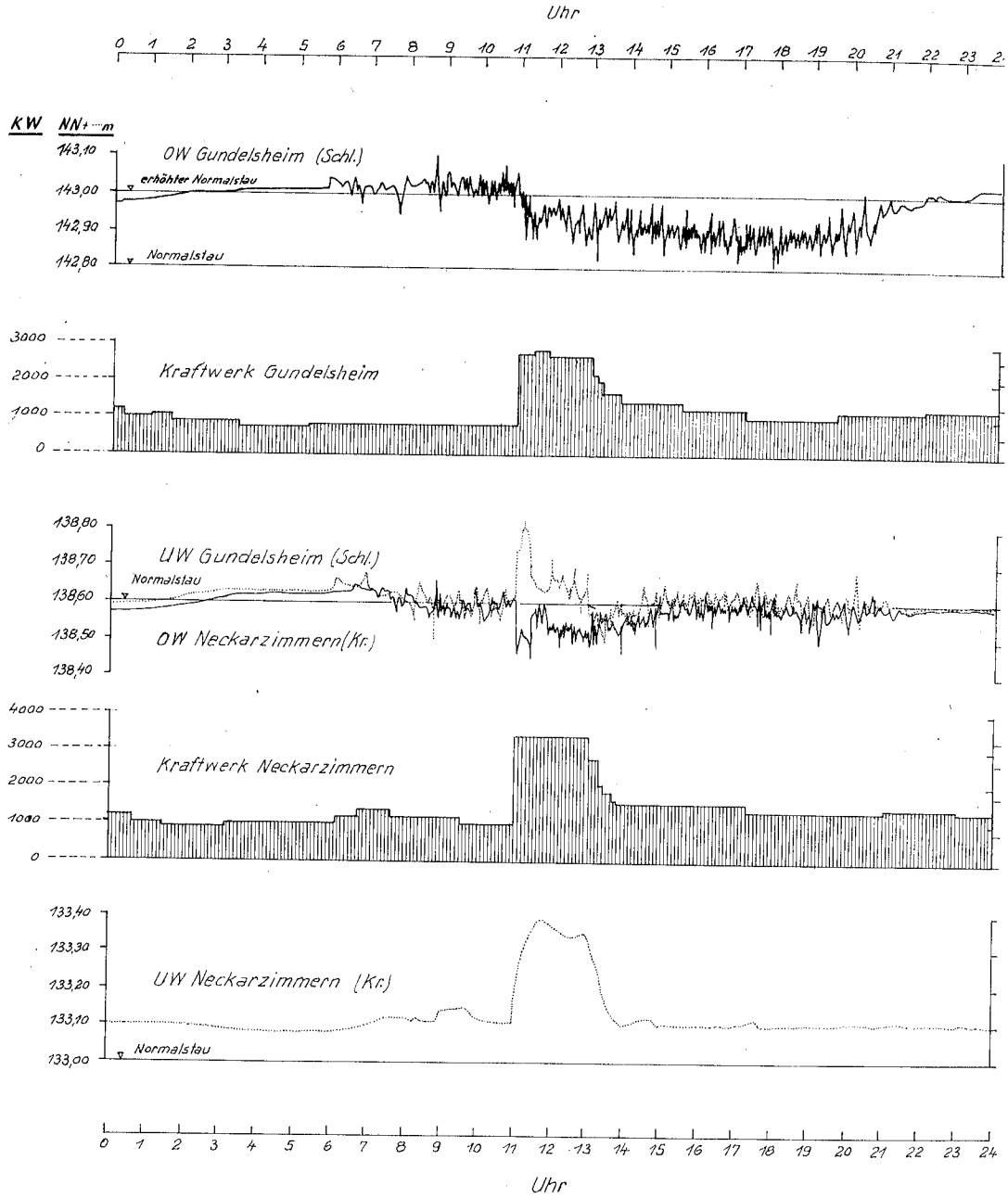


Bild 4
Schwellbetrieb am kanalisierten Neckar

Schwellbetrieb ist durch die Ganglinie der Generatorleistung, die annähernd auch als Ganglinie des Turbinendurchflusses angesehen werden kann (siehe Skala am rechten Rande) gekennzeichnet. Die Wasserstände am oberen und unteren Ende der Haltung, im Unterwasser Gundelsheim und im Oberwasser Neckarzimmern, sind auf gemeinsamer Skala aufgezeichnet, so daß die Differenz zwischen den beiden Linien die Fallhöhe des Wasserspiegels innerhalb der Haltung (kraftwirtschaftlich gesehen: die Verlustfallhöhe) bedeutet.

Im einzelnen zeigt die Betrachtung der Leistungs- und Wasserstandsganglinien (Bild 4) folgendes:

- a) Die Schleusenbetriebszeit macht sich im Oberwasser und Unterwasser Gundelsheim sowie im Oberwasser Neckarzimmern durch kurze Schwankungen bemerkbar. Im Unterwasser Neckarzimmern werden sie durch starke Drosselung des Zulaufs zum Pegelschacht unterdrückt.
 - b) Die Wasserspiegeldifferenz an den Staugrenzen in der Haltung Neckarzimmern beträgt nur wenige Zentimeter und wächst — wie zu erwarten — nur in der Schwellzeit stärker an. An ihrem Anfang erreicht sie für etwa 20 min durch den Sunk im Oberwasser Neckarzimmern und den Schwall im Unterwasser Gundelsheim etwa 0,30 m, geht dann aber rasch auf 0,10 m zurück.
 - c) Der Oberwasserstand Gundelsheim ist, wie es der oben erwähnten Speicherabsicht entspricht, von 0 Uhr bis zum Beginn der Schleusenbetriebszeit langsam erhöht, während der Schwellzeit abgesenkt und anschließend, vor allem vom Ende der Schleusenbetriebszeit an, wieder angespannt worden.
 - d) Der Oberwasserstand Neckarzimmern ist, wie es dem Prinzip der Durchlaufspeicherung entspricht, mit geringen Schwankungen konstant gehalten worden; lediglich am Beginn der Schwellzeit ist er, wie zu erwarten, gut 0,10 m abgesunken. Da die Wassertiefe im Oberwasser reichlich ist, hat dies keine Nachteile.
 - e) Die aufgetragenen Unterwasserstände (Gundelsheim und Neckarzimmern) zeigen das zu erwartende markante Ansteigen während der Schwellzeit (bis 0,30 m).
 - f) Kritisch ist, wie erwähnt, vor allem der Unterwasserstand am Ende der Schwellzeit (13 Uhr). In Neckarzimmern ist der Unterwasserstand genau auf die Höhe vor der Schwellzeit zurückgegangen und damit noch erheblich über Normalstau geblieben. In Gundelsheim dagegen ist er für etwa 1½ Stunde (von 13 bis 14.30 Uhr) unter Normalstau zurückgegangen, allerdings meist nur um etwa 0,03 m. Der tiefste Stand liegt 0,10 m unter Normalstau und auch unter dem gleichzeitigen Wasserstand am unteren Ende der Haltung (Oberwasser Neckarzimmern). Kurzzeitiger Unterstau dieser Größe kann bei kleiner Wasserführung auch ohne Schwellbetrieb durch die Sogwirkung bergwärts fahrender Schiffe eintreten. Bei weiterem Schwellbetrieb wäre es möglich, durch noch kleinere Schritte beim Zurückschalten der Turbinen ungünstigen Einfluß des Schwellbetriebs, falls nötig, noch vollkommener auszuschließen.
3. Die Betätigung der Verschlüßorgane der Wehre bei Hochwasser kann sich auf die Schifffahrt am kanalisierten Neckar nicht auswirken, weil diese dann eingestellt ist und die Schiffe an den hierfür vorbereiteten Stellen, besonders in den unteren Schleusenvorhöfen, mittels der an Land angebrachten Poller festgemacht werden. Dabei sind die Wehrwärter angewiesen, die Verschlüsse langsam ein- und auszufahren, damit die Gefahr vermieden wird, daß Schiffe durch ein plötzliches Ansteigen des Wasserstandes losgerissen werden oder bei einem plötzlichen Abfallen auf einem geböschten Ufer aufsitzen. Selbstverständlich ist es dabei erforderlich, daß die Schiffsbesatzung an Bord Wache hält.

c. Lage und Gestaltung der Schleusen und ihrer Zufahrten

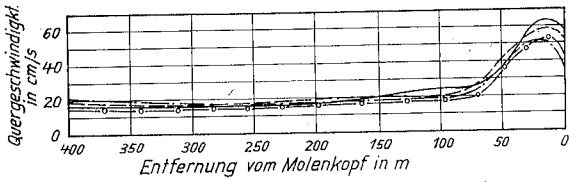
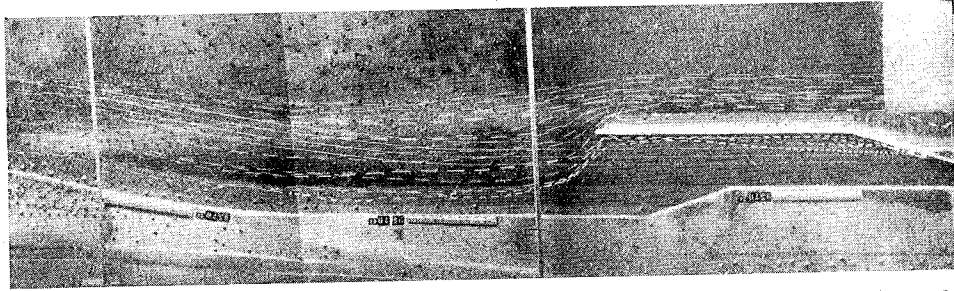
Eine Staustufe, als Mehrzweckanlage, erfordert in der Regel eine größere Breite als die natürliche mittlere Breite des Flusses. Im Interesse des Schiffahrtsbetriebes sollen die Schleuse und der mindestens gleichlange Aus- und Einfahrtabschnitt im oberen und unteren Schleusenvorhafen auf gerader oder nur sehr leicht gekrümmter Achse liegen. Es ergibt sich daher für eine heute übliche mittlere Schleusenlänge von rd. 170 m eine gerade Achse der Fahrstraße von reichlich 500 m, an die sich erst ober- oder unterhalb Stromkrümmungen mit zugelassenem Halbmesser anschließen dürfen. Muß die Stauanlage aus örtlichen Gründen in eine Flußkrümmung gelegt werden, so entstehen Schwierigkeiten in der Unterbringung der Schleusen mit Vorhäfen, wenn sie an der äußeren konkaven Uferseite angeordnet werden. Außerdem treten störende Querströmungen vor dem oberen Vorhafen auf. Den Schleusen fällt damit die innere konvexe Uferseite zu, obwohl die Versandungsgefahr für den oberen und unteren Vorhafen größer ist als auf der gegenüber liegenden Uferseite. Das mit der Stauanlage verbundene Kraftwerk kommt dadurch an die günstige äußere konkave Uferseite. Im oberen Schleusenvorhafen läßt sich die Versandung vermindern, da die notwendige Tiefe des oberen Vorhafens meist wesentlich geringer ist als die vorhandene Stautiefe im Fluß. Die Vorhafensohle kann in die Flußsohle mit einer Neigung von 1:3 bis 1:5 überführt werden. Der auf der Flußsohle nach der Innenseite der Krümmung wandernde Sand oder das Geschiebe müßte einen erheblichen Höhenunterschied überwinden, um in den Vorhafen zu gelangen. Da dies nur kleinen Mengen gelingt, bleibt der obere Vorhafen trotz seiner Anlage am inneren konvexen Ufer im wesentlichen versandungsfrei. Die Gefahr der Verschlickung durch Schwebstoffe ist für beide Uferseiten gleich zu bewerten. Die Versandungsgefahr des unteren Vorhafens kann durch Anordnung von Geschiebeablenkern flußseitig der Vorhafensemole verringert werden (siehe Empfehlung des XVIII. Schiffahrtskongresses in Rom, Abteilung I Frage 3 b).

Für die Länge der Schleuse selbst besteht mit zunehmendem Anteil der Einzelfahrer am Schiffsverkehr und stetiger Abnahme des Anteils der Schleppzüge die Tendenz, von langen Schleppzugsschleusen abzugehen. Es hat sich erwiesen, daß kurze Schleusen, evtl. mehrere nebeneinander, bei gleichem Bauaufwand leistungsfähiger sind (siehe XVIII. Schiffahrtskongreß in Rom Abt. I Mitteilung 3). Bei Einführung der Schubschiffahrt muß die Schleusenlänge der Schubeinheit entsprechen. Für die Schleusen an der Mosel wäre dann eine nutzbare Schleusenlänge von 165 m erforderlich.

Die Mindestbreite des oberen und unteren Schleusenvorhafens soll so groß sein, daß ein Schiff im Vorhafen warten kann, während ein anderes Schiff bei noch ausreichendem Zwischenraum an ihm vorbei in die Schleuse ein- oder ausfahren kann. Die Leitwand als Übergang von der Schleuse zum Vorhafen wird heute allgemein 1:4 zur gemeinsamen Schleusen- und Vorhafenchse geneigt. Die nutzbare Vorhafentlänge soll mindestens dem größten durch die Schleuse verkehrenden Schiff entsprechen, damit es im Vorhafen auf die Schleusung warten kann. Eine größere Länge ist zweckmäßig und erwünscht, um die Einfahrtverhältnisse besonders bei den höchsten Schiffahrtswasserständen (HSW) zu verbessern. Sie bestimmen die Leistungsfähigkeit und Benutzbarkeit der Schleusenanlage während der gesamten Schiffahrtsperiode sehr wesentlich. Daher sei darauf im besonderen näher eingegangen.

Der Schleusenvorhafen ist ein Stillwasserkanal im Gegensatz zum Fluß, der mit zunehmender Abflußmenge eine immer größere Strömungsgeschwindigkeit aufweist. Im Übergangsbereich beider Strömungen müssen sich Ablösungswirbel und Walzen ausbilden, die das Schiff quer zu seiner Fahrtrichtung treffen und es verdrehen. Ferner wird die Breite des Abflußquerschnittes durch den Vorhafen eingeengt und die Abflußmenge

$Q = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$; Ausgangsvorschlag ohne Molenverlängerung

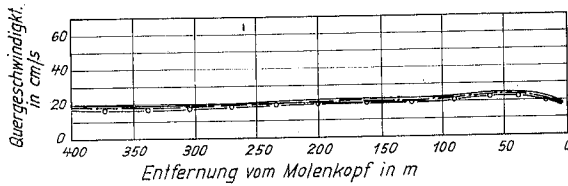
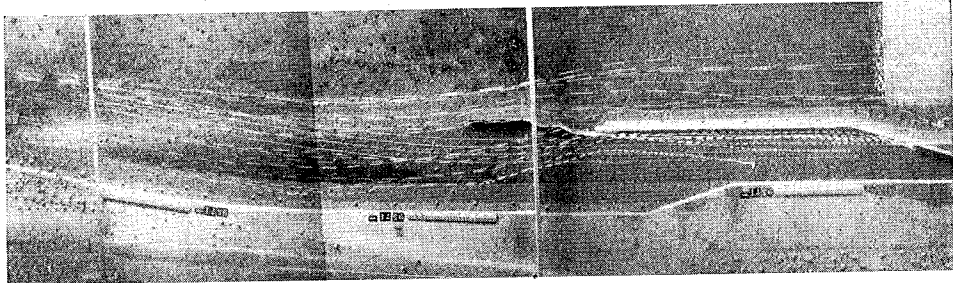


Die max. Quergeschwindigkeiten sind auf jene Schiffsachsen bezogen, die einen Abstand von

- a. ————— 5 m
- b. - - - - - 10 m
- c. ······· 15 m
- d. ○ ○ ○ ○ ○ 20 m

von der festen Mole besitzen.

$Q = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$; 85m vorgesetzte, 2 mal abgewinkelte, durchbrochene Mole



Die max. Quergeschwindigkeiten sind auf jene Schiffsachsen bezogen, die einen Abstand von

- a. ————— 5 m
- b. - - - - - 10 m
- c. ······· 15 m
- d. ○ ○ ○ ○ ○ 20 m

von der festen Mole besitzen.

Bild 5

Einfahrt in den oberen Schleusenvorhafen Müden/Mosel

muß sich mit der restlichen Flußbreite begnügen. Es legt sich daher vor den Vorhafen eine von der Strömungsgeschwindigkeit des Flusses abhängige Querströmung, die das ein- oder ausfahrende Schiff ebenfalls aus seiner Richtung bringt (siehe Bild 5 der fotoelektrischen Aufnahmen der Oberflächengeschwindigkeiten). Das Schiff kann dem nur durch sein Ruder entgegenwirken. Bei begrenztem Ausschlag des Ruders und begrenzter Schiffsgeschwindigkeit gibt es für das Schiff eine obere Grenze der Querströmung, die es bei der Ein- oder Ausfahrt noch überwinden kann. Wird der Wert überschritten, kommt es zu Schiffshavarien. Der Klärung dieser Frage dienten Naturbeobachtungen an Abzweigungen des Dortmund-Ems-Kanals aus dem Emsfluß im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Münster im Vergleich mit den diesen Kanalabzweigungen ent-

sprechenden Modelluntersuchungen (Maßstäbe 1 : 25 bis 1 : 30 unverzerrt) in der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe. An den Kanalabzweigungen Bollingerfähr, Hanekenfähr, Hüntel, Hilter und Dütthe wurden in der Natur die Abflußmengen und Wasserstände beobachtet, bei denen die Schiffahrtsschwierigkeiten beginnen. Im Modell wurde in einzelnen Punkten über die ganze Einfahrtstrecke durch unmittelbare Kraftmessung das auf das Schiff wirkende Drehmoment und die es abtreibende Querkraft ermittelt. Die so über die Einfahrtstrecke erhaltenen Momenten- und Querkraftlinien zeigen an einem Punkt ihren Maximalwert an. Es ergab sich, daß mit nur geringen Abweichungen an allen untersuchten Kanalabzweigungen die Schiffahrtsschwierigkeiten eintraten, wenn das größte Verdrehungsmoment 20 tm und die größte Querkraft 2 t erreichte oder überschritt. Damit war für das Meßschiff von 1000 t und die Fahrgeschwindigkeit von rd. 8 km/Stunde ein Maß gefunden, das aus Sicherheitsgründen bei Neuanlagen nicht erreicht oder überschritten werden darf. Es wurden daher Kanalabzweigungen nicht mehr angewendet, bei denen das Moment 12 bis 15 tm und die Querkraft rd. 1,5 t überschreiten. Damit ist gegen Schiffahrtsschwierigkeiten noch eine Sicherheit von 5 bis 8 tm und 0,5 t gegeben. Die zufriedenstellenden Verhältnisse an den genannten 5 Kanalabzweigungen und den später gebauten von Volkach/Main und Landesbergen/Weser bestätigten diesen Erfahrungswert. Da zur Überprüfung hierfür bei unmittelbarer Kraftmessung aber ein verhältnismäßig großes Modell im Maßstab 1 : 25 bis höchstens 1 : 35 benötigt wird, erschien es notwendig, eine Methode zu finden, die es bei wesentlich kleinerem Modell ebenfalls gestattet, die zweckentsprechende Form der Kanalabzweigung zu finden. Es liegt nahe, hierfür die eigentliche Ursache der Schiffahrtsschwierigkeiten, die Querströmung, also die Komponente der Strömungsgeschwindigkeit senkrecht zur Schiffsachse in m/s in der Form der leicht meßbaren Oberflächengeschwindigkeiten heranzuziehen. Es zeigte sich übereinstimmend für alle oben angeführten untersuchten Kanalabzweigungen, daß die Grenze der zulässigen Querströmung mit 0,3 m/s erreicht oder überschritten wird. Bis zu dieser Querströmung kann das Schiff durch seine Ruderkraft (1000 t Schiff mit 8 km/Stunde Geschwindigkeit) noch die Kanaleinfahrt erreichen.

Bei einem verhältnismäßig kurzen oberen Vorhafen muß ein Schiff seine Einfahrtsgeschwindigkeit wesentlich vermindern, um im Vorhafen selbst oder spätestens in der Schleuse zu stoppen. Bei abnehmender Schiffsgeschwindigkeit nimmt auch die Steuerfähigkeit des Schiffes, und zwar mit dem Quadrat seiner Fahrgeschwindigkeit ab. Nimmt also die Schiffsgeschwindigkeit etwa auf $\frac{2}{3}$ ab, so vermindert sich die Steuerfähigkeit auf $(\frac{2}{3})^2 \approx \frac{1}{2}$, bei Abnahme der Schiffsgeschwindigkeit auf $\frac{1}{2}$ geht die Steuerfähigkeit auf $(\frac{1}{2})^2 = \frac{1}{4}$ zurück. Im gleichen Ausmaß müssen dann auch die oben angegebenen Werte für das Verdrehungsmoment verringert werden. Das zulässige Verdrehungsmoment unmittelbar vor der Schleuseneinfahrt beträgt dann höchstens 3 bis 4 tm.

In Anbetracht der Bedeutung, die der oben angeführten Quergeschwindigkeitsgrenze zukommt, wurde nochmals an einem Modell der Staustufe St. Aldegund/Mosel im Maßstab 1 : 33 $\frac{1}{3}$ unverzerrt die unmittelbare Kraftmessung der Messung von Oberflächengeschwindigkeiten gegenübergestellt. Hierbei wurden auch die günstigsten Baumaßnahmen entwickelt, um das Verdrehungsmoment, die Querkraft und die Quergeschwindigkeit auf die oben angeführten zulässigen Maße zu vermindern. Der Fluß wird in diesem Falle um 44 % seiner Breite durch die Vorhäfen für beide Schleusen von 12 und 20 m Breite eingeengt. Bis zu einer größten schiffbaren Wassermenge (HSQ) von 1350 m³/s, bei der der Normalstau zur Vermeidung von Rückstauschäden um einen halben Meter abgesenkt wird, müssen Schiffe noch sicher in den oberen Vorhafen einfahren können. Die mittlere Quergeschwindigkeit im Fluß oberhalb des Oberhafens beträgt dabei 1,35 m/s. Für den Ausgangsvorschlag einer Vorhafenlänge von 258 m mit

flußseitiger fester Mole ergibt sich bei der Einfahrt in den Oberhafen der flußseitigen Schleuse für die größte noch schiffbare Wassermenge (HSQ) von 1350 m³/s ein größtes Schiffsverdrehsmoment von 151 tm und eine größte Querkraft von etwa 15,0 t (siehe Bild 6). Die hierbei ermittelte größte Quergeschwindigkeit beträgt 0,92 m/s. Bei diesen

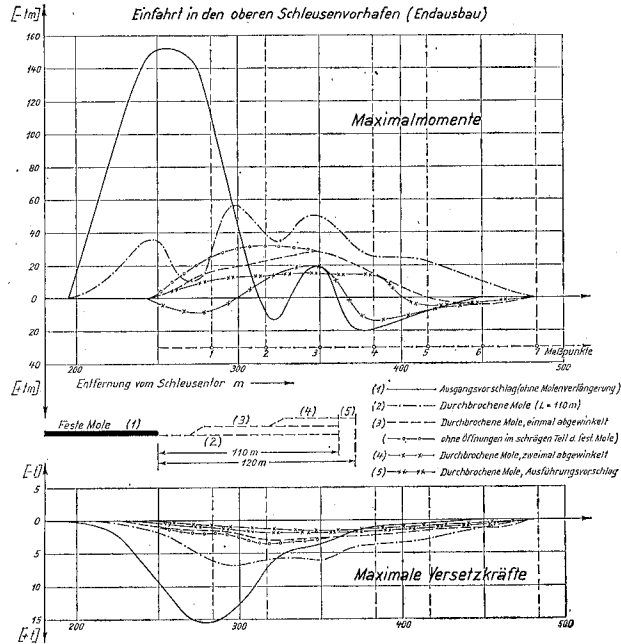


Bild 6
Verdrehsmomente und Querkräfte für ein 1000-t-Schiff

Verhältnissen ist die Einfahrt eines Schiffes bei der größten schiffbaren Abflußmenge unmöglich. Nach früheren Erfahrungen können diese Werte wesentlich verringert werden, wenn die feste Mole des Vorhafens durch eine gerade durchbrochene Mole verlängert wird. Doch müssen diese Durchbrechungen von der Sohle beginnend 1 bis 2 m unter der Wasseroberfläche bleiben, damit ein vorbeifahrendes Schiff nicht von der Strömung, die sich in den Durchbruchöffnungen einstellt, an die Mole gedrückt wird. Für eine optimale Wirkung ist das Öffnungsverhältnis (Summe der Öffnungsfläche : gesamte benetzte Molenfläche) und der Übergang dieses Verhältnisses von der Molenspitze zur festen Mole von besonderer Bedeutung.

Aus der Untersuchung einer größeren Serie der hierfür möglichen Fälle ergab sich als günstigster Fall ein Gesamt-Öffnungsverhältnis von 40 %, wobei dieses im einzelnen von der Molenspitze mit 50 % abnimmt auf 30 % im Übergang zur festen Vorhafenmole. Den Untersuchungen lag stets eine durchbrochene Molenlänge von 100 m zugrunde, der 10 m als Führungslänge vorausgingen. Das Verdrehsmoment wird dadurch auf 57,5 tm bei 6,7 t Querkraft und 0,49 m/s größter Quergeschwindigkeit verringert (Bild 6). Auch diese Werte befriedigen noch nicht. Jedoch ist eine weitere wesentliche Verlängerung der durchbrochenen Mole nicht günstig. Der Linienzug der Verdrehsmomente zeigt deutlich einzelne Zwischenmaxima, deren Beseitigung anzustreben ist. Dies gelang durch Abwinkeln eines Teiles der durchbrochenen Mole um 5 m an der maßgebenden

Stelle. Diese Abwinkelung soll den zum Fluß hinlaufenden Strömungsfäden eine bremsende Stoßkomponente entgegensetzen. Das Verdrehungsmoment ermäßigt sich damit auf 30,5 tm bei 3,6 t Querkraft. Durch einen Wassereinzug in den Vorhafen mit einer maximal auftretenden Längsgeschwindigkeit von 0,30 m/s (Durchbrechen des schrägen Teils der festen Vorhafenmole) und Anordnung einer zweiten Molenabwinkelung kann das Moment auf 20 tm, die Querkraft auf 1,5 t und die größte Quergeschwindigkeit auf 0,28 m/s (in guter Übereinstimmung mit dem oben genannten Wert von 0,30 m/s) verringert werden. Eine bessere Lösung ergibt sich durch weitere Verlängerung der durchbrochenen Mole um 10 m auf insgesamt 120 m Länge und geänderte Öffnungsanordnung in den im Grundriß schrägen Teilen der Mole. Die Molenspitze ist auf 11,6 m Länge nicht durchbrochen. Hierdurch sinkt das Verdrehungsmoment auf 14 tm, die Querkraft steigt auf 1,9 t und die größte Quergeschwindigkeit fällt auf 0,20 m/s ab. Die so gefundene Form der durchbrochenen Mole, die auch bei sehr schlechten Ausgangsverhältnissen bis zur größten schiffbaren Abflußmenge ein sicheres Einfahren gewährleistet, zeigt Bild 7.

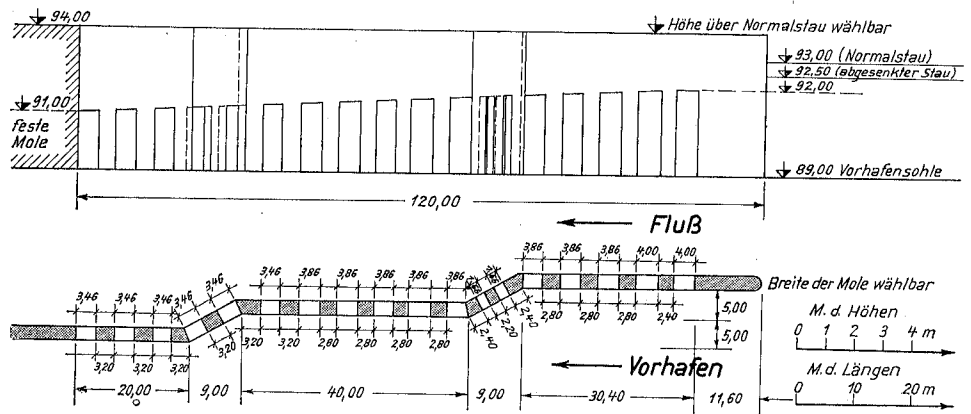


Bild 7

Molenverlängerung am oberen Schleusenvorhafen der Staustufe St. Aldegund/Mosel

Der Wert von 0,20 m/s stellt nunmehr das zulässige Maß für die größte Quergeschwindigkeit beim Eintritt in den oberen Vorhafen dar. Den Zusammenhang zwischen Quergeschwindigkeit und Schiffsverdrehungsmoment zeigt Bild 8.

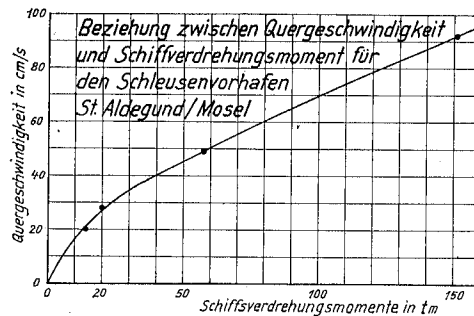


Bild 8

Beziehung zwischen Quergeschwindigkeit und Verdrehungsmoment

Für den unteren Vorhafen sind die Verhältnisse günstiger, da ein einfahrendes Schiff stets die Flußströmung gegen sich hat und dadurch eine gute Steuerfähigkeit hat. Ein ausfahrendes Schiff beschleunigt sich stetig, so daß damit auch seine Steuerkraft zunehmend größer wird. Deshalb kann für den unteren Vorhafen die größte auftretende Quergeschwindigkeit bis zum vollen Wert von 0,30 m/s zugelassen werden. Können die zulässigen Werte für die Verdrehungsmomente und die Querkräfte nicht durch unmittelbare Kraftmessung nachgewiesen werden, gelten die Werte 0,20 m/s für den oberen Vorhafen und 0,30 m/s für den unteren Vorhafen als größte zulässige Werte. Sie können durch entsprechende Baumaßnahmen auch bei sehr schlechten Ausgangsverhältnissen eingehalten werden, wie es die eingehenden Untersuchungen für die 13 neuen Moselstauungen nachweisen.

Wie die Quergeschwindigkeit mit zunehmender Flußwassermenge ansteigt, zeigt eine Untersuchung für den oberen Schleusenvorhafen der Staustufe Müden/Mosel für Wasserführungen von 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 und 1400 m³/s. Hierfür wurden die Oberflächen-Geschwindigkeitsfelder vor dem oberen Schleusenvorhafen auf foto-elektrischem Wege ermittelt und daraus für 4 Achsen in 5, 10, 15 und 20 m Entfernung von der festen Mole die Quergeschwindigkeiten ermittelt und unter den entsprechenden Lichtbildern aufgetragen (Bild 5). Das Ergebnis für 10 m Abstand der Schiffsachse von der festen Mole zeigt Bild 9 für 3 Varianten: Ausgangsvorschlag ohne besondere Molenverlänge-

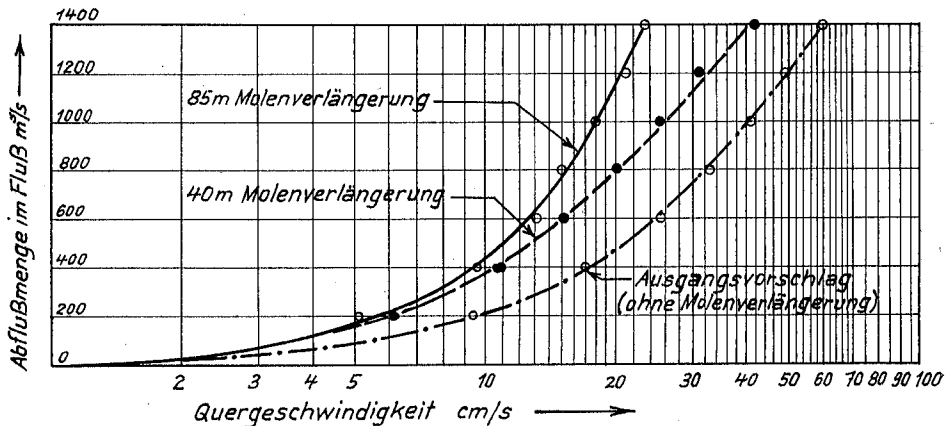


Bild 9

Abhängigkeit der max. Quergeschwindigkeit von der Abflußmenge im Fluß.
Oberer Vorhafen Müden/Mosel

rung, 40 m Molenverlängerung nach der oben beschriebenen Art und 85 m Molenverlängerung. Eine Molenverlängerung von 90 m erlaubt die Einhaltung der Quergeschwindigkeitsgrenze von 0,20 m/s bis zur größten schiffbaren Abflußmenge von 1400 m³/s, während ohne ihre Ausführung die Schifffahrt schon bei etwa 500 m³/s Wasserführung mit ersten Schwierigkeiten zu rechnen hätte. Auf der Mosel müßte dann die Schifffahrt für etwa 2 Monate im Jahr eingestellt werden.

d) Füll- und Entleerungseinrichtungen

I. Allgemeines

Bei der Füllung eines Gefäßes wird die kinetische Energie des Wassers im Gefäß in eine andere Energieform umgewandelt. Der Füllvorgang und die Fülleinrichtungen sind deshalb für das Prisma einer Kammerschleuse, dessen Länge die Breite und Tiefe allgemein um ein Vielfaches übersteigt, von übergeordneter Bedeutung. Die Entleerung und die Einrichtungen für die Entleerung werden durch die Maßnahmen zur Füllung weitgehend bestimmt. Sie sind bei Doppelschleusen besonders zu beachten, wenn die Wirkung des Entleerungswassers auf ein in die zweite Kammer einfahrendes Schiff beurteilt werden muß.

Für die Wahl und die Bemessung von Füll- und Entleerungseinrichtungen an Schiffschleusen sind folgende grundsätzliche Überlegungen maßgebend:

1. Die hydraulischen Vorgänge in der Kammer während der Füllung und Entleerung sollen eine möglichst ruhige Lage des Schiffs gewährleisten. Ein in der Schleusenkammer liegendes Schiff folgt unmittelbar der Neigung des Wasserspiegels. Sie hat verschiedene Ursachen:

- a) Beim Eintritt des Füllstrahls in das bei Beginn der Füllung noch geringe Wasserpulster der Schleusenkammer wird die Geschwindigkeit des eintretenden Füllstrahles in Druck umgewandelt.
- b) Der Schiffswiderstand erzeugt einen Aufstau vor dem Schiff.
- c) In den langen, schmalen Kammern treten durch die Veränderung des sekundlichen Zuflusses dQ/dt [m³/s²] erhebliche Schwallen mit Reflexionen auf.

Um während der Füllung oder Entleerung der Schleusenkammer die Bewegungen des Schiffes auf ein ungefährliches Maß zu verringern, wird das Schiff am Bug und am Heck mit Stahlrossen an Haltekreuzen in der Kammerwand festgehalten. Dadurch entstehen Kräfte in den Trossen, deren zulässige Größe bisher zu $1/600$ bis zu $1/1000$ des Bruttoschiffsgewichts angenommen wurde. Für ein Schiff von 1200 Tonnen Gewicht ergibt sich damit eine maximal zulässige Trossenkraft von 2,0 t (10fache Sicherheit). Die neuzeitlichen Füllmaßnahmen zielen darauf ab, die Vertäuung der Schiffe in der Kammer überflüssig zu machen.

2. Die Füllzeit der Kammer soll möglichst kurz sein. Sie ist von der größten zulässigen Wasserentnahme aus dem Fluß oder aus dem oberen Vorhafen abhängig. Bei Entnahme aus dem oberen Vorhafen ist eine zu große Sunktiefe, vor allem eine zu große Sunkneigung zu vermeiden. Eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 0,4 bis 0,5 m/s soll an der Stelle des oberen Vorhafens nicht überschritten werden, an der er vom Oberhaupt ausgehend seine größte Breite erreicht. Bei unbeschränkter Wasserentnahme aus dem Fluß hängt die Füllzeit von der zulässigen Trossenkraft ab, die aber durch entsprechende, wenn auch baulich aufwendige Maßnahmen reduziert werden kann. Im Endziel ist bei Mehrzwecke-Stauanlagen nur die aus dem Gesamtbetrieb der Anlage sich ergebende für den Schiffahrtsbetrieb verfügbare Füllwassermenge für die Füllzeit maßgebend.

3. Die Antriebsorgane der Verschlüsse für die Füll- und Entleerungseinrichtungen sollen aus maschinen- und betriebstechnischen Gründen möglichst mit einer gleichförmigen Geschwindigkeit bewegt werden. Sie weichen damit allerdings von dem Ideal der sich stetig steigernden Geschwindigkeit ab.

Wenn unmittelbar durch das Tor gefüllt wird, lassen sich ohnehin zwei Antriebsgeschwindigkeiten nicht vermeiden, da nach beendetem Füllvorgang das Tor rasch vollständig gehoben (Hubtor) oder abgesenkt (Senktor, Hub-Senktor) werden muß, damit das Schiff in die Schleusenkammer einfahren kann.

Für die Hubgeschwindigkeiten von Toren und Schützen können folgende Werte als Anhalt dienen:

- a) Tore Füllen (Oberhaupt)
 - Senken 1,5 bis 2,0 mm/s
 - Heben 1,0 bis 2,0 mm/s
- Entleeren (Unterhaupt)
 - Heben 2,0 bis 3,0 mm/s
- b) Schütze (im Tor oder in Umläufen)
 - Oberhaupt 2,0 bis 4,0 mm/s
 - Unterhaupt 3,0 bis 5,0 mm/s
- c) Schütze (in Längskanälen und Grundläufen) 10,0 bis 30,0 mm/s

Die mittlere Steiggeschwindigkeit des Wasserspiegels in der Kammer soll aus Rücksicht auf die Trossenkräfte bei der Füllung vom Oberhaupt durch das Tor folgende Werte nicht überschreiten:

- im Mittel 0,9 bis 1,1 m/min
- maximal 1,6 bis 2,0 m/min

Wird die Kammer mit sich stetig steigender Öffnungsgeschwindigkeit der Füllorgane, etwa durch hydraulische Steuerung bei unbeschränkter Füllwassermenge und unter Verwendung von Längskanälen und Grundläufen gefüllt, können mittlere Steiggeschwindigkeiten bis zu 3,5 m/min erreicht werden. Nennenswerte Trossenkräfte sind hierbei zu vermeiden.

II. Hydraulische Grundlagen

Jeder Füll- und Entleerungsvorgang wird durch die Hub-(Senk-)kurve ($H = f(t)$) und durch die Füll-(Entleerungs-)wassermengenkurve ($Q = f(t)$) gekennzeichnet (Bild 10).

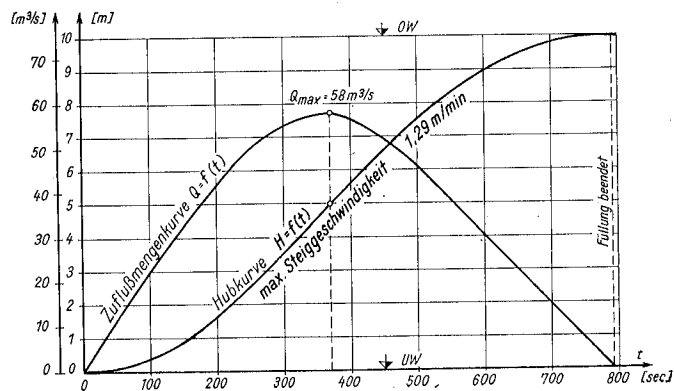


Bild 10
Hubkurve, Füllwassermengenkurve

Folgende Füllphasen können bei einer Kammerfüllung auftreten:

- A. Füllung mit konstanter Druckhöhe
 - a) durch stetig zunehmenden Füllquerschnitt
 - b) durch konstanten Füllquerschnitt
- B. Füllung mit veränderlicher Druckhöhe
 - a) durch stetig zunehmenden Füllquerschnitt
 - b) durch konstanten Füllquerschnitt

Eine nicht stetige Zunahme des Füllquerschnitts hat hydraulische und für die Bewegung des Schiffes in der Kammer beachtliche Vorteile. In der nachfolgenden hydraulischen Analyse wird nur die stetige (lineare) Zunahme des Füllquerschnittes berücksichtigt.

Es bedeuten:

- t = Zeit [sec]
- h = konstante Druckhöhe [m]
- H_t = Druckhöhe zur Zeit t [m]
- Q_t = Füllwassermenge zur Zeit t [m³/s]
- f_0 = Füllquerschnitt vor Beginn der Füllung [m²]
- F = Gesamtfläche der Schleusenkammer [m²]
- F_0 = Fläche des Speicherbeckens im Oberwasser [m²]
- c = Flächenzunahme des Füllquerschnitts [m²/s]

Der Verlustbeiwert μ kann je nach Füllart in folgender Größenordnung geschätzt werden:

μ_T = Füllung durch das Tor	0,60 bis 0,70
μ_K = Füllung durch Torumläufe	0,50 bis 0,60
μ_L = Füllung durch Längskanäle (Grundläufe)	0,60 bis 0,85
μ_S = Füllung aus Speicherbecken	0,55 bis 0,65

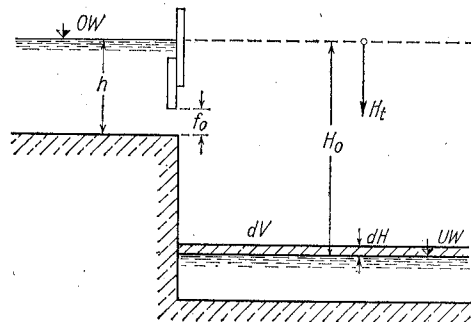


Bild 11

Füllung mit konstanter Druckhöhe

Nach Trennung der Veränderlichen:

$$\frac{dH}{\sqrt{H_t}} = - \frac{\mu \sqrt{2g} (F_o + F)}{F_o \cdot F} (f_o + c \cdot t) dt \quad (5b)$$

Aus der Integration der Gl. (4b) in den Grenzen $t = 0$ und $t = t$ folgt

$$\sqrt{H_t} = \sqrt{H_o} - \frac{\mu \sqrt{2g} (F_o + F)}{2 \cdot F_o \cdot F} (f_o \cdot t + \frac{c \cdot t^2}{2}) \quad (6)$$

Die Füllwassermenge wird aus

$$Q_t = \mu (f_o + c \cdot t) \sqrt{2g} \sqrt{H_t} \quad (7)$$

berechnet, wobei $\sqrt{H_t}$ aus Gl. (6) einzusetzen ist

III. Verschiedene Arten der Füllung

1. Entnahme aus dem oberen Vorhafen

An den Wasserstraßen mit Mehrzwecke-Stauanlagen wird das Füllwasser für die Schleusen meistens den oberen Vorhäfen entnommen. An sich verlangt schon die Verkehrsichte breite Vorhäfen für einen reibungslosen Betrieb. Dadurch bleiben bei der Entnahme von Füllwasser die Strömungsgeschwindigkeiten in dem für die Steuerfähigkeit der Schiffe zulässigen Bereich. Die Füllzeit ist dann im wesentlichen durch die Füllschwalle in der Kammer und die davon abhängigen Trossenkräfte beschränkt.

1.1 Füllung vom Oberhaupt

Jede Füllung einer Schleuse vom Oberhaupt hat die gleichen hydraulischen Merkmale. Der Füllschwall verursacht zuerst eine Wasserspiegelneigung zum Unterhaupt. Durch Reflexion am unteren Tor und Überlagerungen der einzelnen Schwalle tritt im Verlauf des Füllvorgangs eine Neigung zum Oberhaupt auf, die bis zum Ende der Füllung durch den abnehmenden sekundlichen Zufluß dQ/dt nahezu verschwindet. Die auf das Schiff einwirkenden Kräfte entsprechen je nach Lage des Schiffes in der Kammer den Neigungen des Wasserspiegels.

Das Füllwasser wird im Bereich des Oberhauptes auf kürzestem Weg in die Kammer geleitet. Konstruktiv ergeben sich zwei grundsätzliche Möglichkeiten:

- a) Füllung durch Tore verschiedener Bauart: Hubtor, Hub-Senktor, Senktor, Stemmtore mit eingebauten Füllöffnungen (Segmente, Rollkeilschütze), Segmenttor, Klapptor.
- b) Füllung durch Torumläufe mit besonderen Verschlüssen. Sie haben gegenüber der unmittelbaren Füllung durch das Tor den Vorteil, daß bei Ausfall einer Seite der Torumläufe die Kammer durch die zweite Seite, wenn auch langsamer, gefüllt werden kann.

Von der Wiedergabe der außerordentlich mannigfaltigen Ausführungsarten der Verschlüsse wird mit Absicht abgesehen, weil ihre Formen ort- und zweckgebunden, und die Konstruktionsarbeit eine Aufgabe des konkurrierenden Stahlwasserbaues ist. Bei Mehrzwecke-Stauanlagen ist die Dichtung jeglicher Verschlusßart besonders zu beachten. Wasserverluste infolge nicht einwandfreier Dichtungen an den Verschlüssen der Wehr- und Schleusanlage bedeuten den Verlust von elektrischer Energie oder sonstiger Nutzungen des Zuflusses.

Bei Beginn der Füllung vom Oberhaupt trifft der Füllstrahl in der Kammer auf ein niedriges Wasserpelster. Die entstehenden Schwallen rufen durch Reflexionen am unteren Tor und an den Kammerwänden Wasserspiegelneigungen hervor, deren Auswirkungen auf das in der Kammer liegende Schiff in Längs- und in Querrichtung Gefahrezustände erzeugen können. Deshalb muß bei der Füllung vom Oberhaupt die Energieumwandlungsanlage besonders sorgfältig ausgebildet werden. Sie hat die Aufgabe, Ungleichmäßigkeiten des in die Kammer eintretenden Füllstrahls, die sich als heftige Querimpulse bemerkbar machen, zu dämpfen und auszugleichen. Von den Möglichkeiten einer ausreichenden Energieumwandlung hängen die Öffnungsgeschwindigkeiten der Füllorgane, die auftretenden Trossenkräfte und die Füllzeit ab. Die konstruktiven Eigenarten der Energieumwandlungsumlage sind bei der Füllung durch das Tor abhängig von der Form des Verschlusses. Diese Einheit kann vielfach nur durch Modellversuche gefunden werden.

1.2 Füllung durch Längskanäle oder Grundläufe mit Stichkanälen

Das Füllwasser ist auf die gesamte Kammerlänge verteilt. Der Füllschwall wird dadurch bei größeren mittleren Steiggeschwindigkeiten des Wasserspiegels erheblich verringert. Die hydraulischen Zusammenhänge sind nicht mehr eindeutig wie bei der Füllung vom Oberhaupt, sondern hängen von der Anordnung und Zahl der Stichkanäle, sowie der Speisung der Grundläufe oder Längskanäle ab. Die Schiffskräfte werden deshalb auch von der Lage des Schiffs in der Kammer beeinflusst.

Für den Entwurf eines Längskanal- oder Grundlaufsystems bieten sich viele Möglichkeiten an.

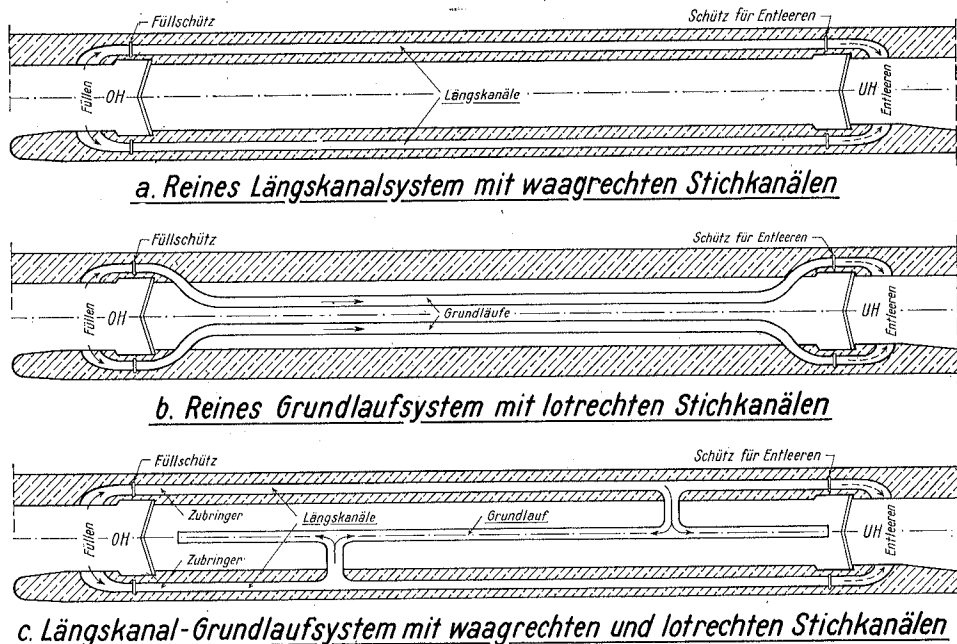


Bild 13

Längskanal-Grundlaufsystem

Beim reinen Längskanalssystem mit waagrechten Stichkanälen (Bild 13a) und beim reinen Grundlaufsystem mit lotrechten Stichkanälen (Abb. 13b) kann die beidseitige Entnahme aus dem oberen Vorhafen oder eine Entnahmeöffnung in der Sohle des oberen Vorhafens vorgesehen werden. Das Längskanal-Grundlaufsystem (Bild 13c) gewährleistet nach den neuesten Untersuchungen die optimale Verteilung des Füllwassers über die gesamte Kammerlänge. Von Bedeutung ist die Wahl der Punkte, an denen die Einleitung des Füllwassers aus den Längskanälen in die Grundläufe erfolgt (Bild 13c).

Längskanäle oder Grundläufe werden dort angewendet, wo die Verkehrsdichte kleine Füllzeiten verlangt.

1.3 Kombinierte Füllung

Als „kombinierte Füllung“ wird die gleichzeitige Füllung durch ein Längskanal- oder Grundlaufsystem und die Füllung durch das Obertor bezeichnet.

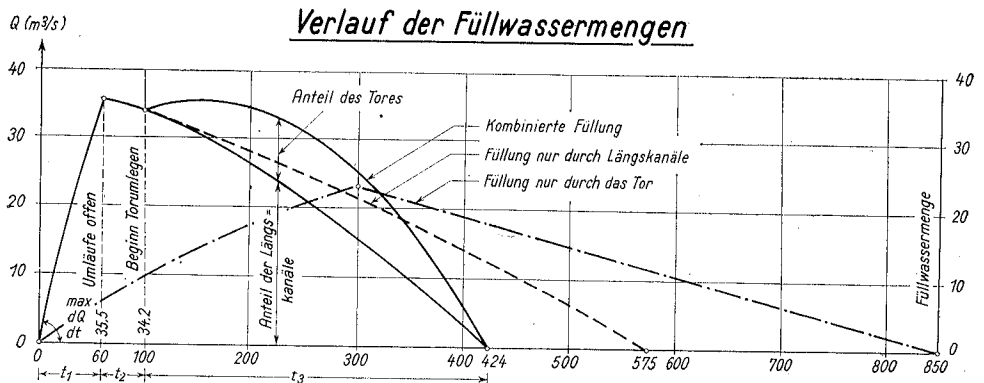


Bild 14
Kombinierte Füllung

Auf Bild 14 ist der Verlauf der Füllwassermengen in Abhängigkeit von der Füllzeit dargestellt. Gegenüber der einfachen Füllung durch das Tor dauert die kombinierte Füllung nur die halbe Zeit. Das Öffnen des Tores (oder der Torschütze) muß derart erfolgen, daß während einer möglichst großen Zeitspanne Q möglichst groß bleibt.

Es muß in jedem besonderen Fall ein betriebswirtschaftlicher Nachweis geführt werden, daß der Bauaufwand dieser Einrichtung vertretbar ist.

2. Entnahme unmittelbar aus dem gestauten Fluß

Bei genügender Wasserführung des Flusses, aber begrenztem Querschnitt des oberen Vorhafens, kann das Füllwasser ganz oder teilweise unmittelbar der Stauhaltung des Flusses entnommen werden. Bei den neueren Mehrzweck-Stauanlagen an Flüssen geringer Breite wird diese Art der Entnahme bevorzugt, da die Schiffsbewegungen im oberen Vorhafen nicht gestört werden.

2.1 Füllung durch Längskanäle oder Grundläufe mit Stichkanälen

Bild 15 zeigt die Systematik der Speisung des Grundlaufsystems einer Schleuse unmittelbar aus dem Stauraum einer Mehrzwecke-Stauanlage. Die Zubringerkanäle liegen in den Viertelpunkten der Schleusenammer. Die Einläufe müssen hydraulisch so ausgebildet werden, daß keine Luft unter Wirbelbildung miteingerissen wird.

Die Entleerung erfolgt unmittelbar in das Unterwasser der Stauanlage.

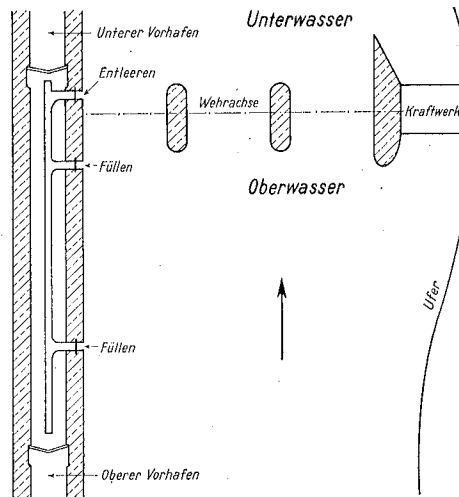


Bild 15
Entnahme unmittelbar aus dem gestauten Fluß

2.2 Füllung vom Oberhaupt und Unterhaupt

Auf ein Längskanalssystem kann verzichtet werden, da die hydraulischen Voraussetzungen ein schnelleres Füllen als nur vom Oberhaupt erlauben. Die Füllwassermengen an den Häuptern sollen gleich groß sein. Die Füllorgane sind so zu steuern, daß die Füllschwalle sich gegenseitig aufheben. Durch geeignete konstruktive Maßnahmen ist eine möglichst gleichmäßige Verteilung über die ganze Kammerbreite anzustreben.

3. Füll- und Betriebseinrichtungen in besonderen Fällen

Die wasserwirtschaftlichen Eigenarten eines Flusses erfordern von den Benutzern der Mehrzwecke-Stauanlage eine gegenseitige Berücksichtigung des Wasserdargebots.

3.1 Bei Niedrigwasser stört die Entnahme des Schleusungswassers den Betrieb einer Wasserkraftanlage. An Doppelschleusen kann die Hälfte der Füllwassermenge gespart werden, wenn eine besondere Einrichtung vorhanden ist, die den gegenseitigen Austausch des Wassers zwischen den Schleusen ermöglicht. Die Doppelschleuse wird dann zur „Zwillingsschleuse“ (Bild 16).

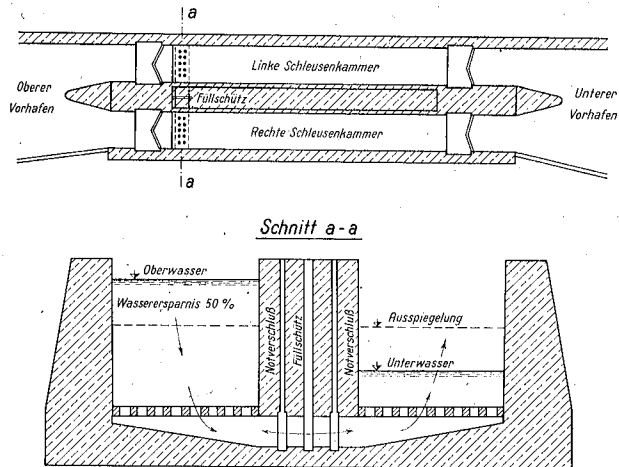


Bild 16
Zwillingsschleuse

Die Anordnung hat den betriebstechnischen Nachteil, daß die Füll- und Entleerungsvorgänge in beiden Kammern voneinander abhängig sind. Sie wird daher auch nur bei geringer Wasserführung des Flusses in Betrieb genommen.

3.2 Die sichere Hochwasserabführung ist bei den meist in unmittelbarer Nähe menschlicher Siedlungen liegenden Mehrzweck-Stauanlagen unbedingt notwendig. Die eigentliche Stauanlage wird deshalb so bemessen, daß bei erforderlichen Wehrröffnungen und dem Versagen eines Verschlusses eine zusätzliche Entlastungsanlage für das Wehr vorhanden ist. Die Schleusen können als zusätzliche Entlastungsanlagen für das Wehr benutzt werden, wenn die Ausbildung der Kammer und ihre Verschlüsse von vornherein auf die betrieblichen und hydraulischen Besonderheiten einer derartigen Mehrzweckschleuse Rücksicht nehmen. Schleusensole und Drempeel des Oberhauptes sollen auf gleicher Höhe liegen. Die Oberhäupter von Doppelschleusen müssen die gleiche Drempeelhöhe aufweisen, da andernfalls die Anströmungsverhältnisse ungünstig sind. Der Verschuß im Oberhaupt verlangt besonders große Betriebssicherheit. Das Öffnen und Schließen des Verschlusses muß jederzeit gewährleistet sein, der Verschuß muß also den Anforderungen genügen, die an einen Weherverschuß gestellt werden. Diese Forderung schließt eine Benutzung des Obertores zur Füllung der Kammer nahezu aus. Die Verschlüsse im Unterhaupt sind, wenn sie nicht vollständig aus dem Wasser gehoben werden können (Hubtor) gegen Beschädigung bei Hochwasser zu sichern.

Die Abflußleistung einer Schleusenammer entspricht etwa derjenigen eines gleichbreiten Weherverschlusses, wenn der obere Vorhafen eine eindeutig günstige Anströmung des oder der Obertore gewährleistet.

Im oberen Vorhafen einer Mehrzweck-Stauanlage sammeln sich bei Hochwasser oft erhebliche Mengen von *Treibzeug* und *Geschwemmsel* an. Die Verunreinigungen der Wasseroberfläche sollen nach Ablauf des Hochwassers möglichst rasch und ohne größere Wasserentnahme aus dem oberen Vorhafen in das Unterwasser abgeleitet werden. Der Verschuß im Oberhaupt muß dieser Forderung entsprechen. Das Hub-Senktor gestattet z. B. durch seine betriebliche Eigenart bei geöffnetem Unterhauptverschuß eine

rasche Abführung des Treibzeugs (Eis) in das Unterwasser. Bei einer anderen Verschlußart im Oberhaupt läßt sich das Treibzeug oder Eis durch eine aufgesetzte Klappe durch die Schleusenammer in das Unterwasser abführen.

IV. Entleerung

Die Entleerungszeiten entsprechen im allgemeinen den Füllzeiten. Bei der Entleerung in den unteren Vorhafen sorgt eine toskammerartige Energieumwandlungsanlage am Unterhaupt für eine gleichmäßig und ruhige Abströmung des Entleerungswassers. Bei Einzelschleusen und symmetrischer Erweiterung des Vorhafens sind ungünstige Strömungsverhältnisse nicht zu erwarten. Beim Entleeren von Doppelschleusen tritt häufig der Betriebszustand auf, daß eine Kammer zur Aufnahme des bergfahrenden Kahnens bereit und geöffnet ist, während die zweite Kammer entleert wird. Im nicht durchströmten Teil des breiten unteren Vorhafens bildet sich hierdurch eine lange bergwärts drehende Walze mit lotrechter Achse, die sogar in die Fahrstraße der zweiten Kammer reicht. Durch die Intensität der Drehbewegung würde das Schiff, das im Drehsinn der Walze in die Kammer einfahren muß, aus dem Ruder laufen.

Es müßte warten bis die Drehbewegung der Walze abgeklungen ist. Diese Wartezeit vermindert die Verkehrsleistung der Schleuse. Es bedarf eines geringen Impulses, um die Drehbewegung der Walze aufzuhalten. Es kann durch die Mittelmole zwischen den beiden Schleusen aus dem Oberwasserstand ein Strahl in das Unterwasser gelenkt werden, der nach rechts und links die Walzenbewegung sich nicht entfalten läßt. Die Entnahme aus dem Oberwasser ist ein Wasserverlust für andere Nutzungen. Es lassen sich ferner im unteren Vorhafen unterhalb der Mittelmole und außerhalb der Fahrstraße Leitflügel zur Umlenkung des austretenden Entleerungsstrahles anordnen. Es kann schließlich das Entstehen der schädlichen Drehbewegung durch einen langsameren Entleerungsvorgang der Kammer vermieden werden. Die Entleerungszeit wird dadurch größer und die Leistung der Schleusenanlage geringer.

e) Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei der Bemessung der Schleusenammer und der Leit- und Schutzmauern

1. Allgemeines

Für die Länge und Breite der Schleusenammer, sowie für die Höhenlage der Schleusensole unter dem NSW sind maßgebend die Schiffsgrößen und Schiffszüge der einzelnen Wasserstraßen oder des zusammenhängenden Wasserstraßennetzes. In zunehmendem Maße hat sich das Schiff mit eigener Triebkraft auch auf den Binnenwasserstraßen durchgesetzt. Die langen Schlepplüge beschränken ihre Fahrt auf den Unterlauf der großen Ströme, wo wegen des geringen Gefälles und trotz vielfach vorhandener großer Abflußmengen Stauanlagen mit dem Ziel der Wasserkraftnutzung sich nicht lohnen. Nur wenn Erosion die Sohle austieft und die Stauanlage das Fortschreiten dieses Vorganges wegen seiner schädlichen Einwirkungen auf die Grundwasserstände vermindert, ist die Mehrzwecke-Stauanlage auch bei geringem Gefälle notwendig. Ebenso kann in Felsstrecken mit großem Gefälle, aber sehr ungleichförmiger Sohle, zur Verbesserung der Schifffahrt eine Stauanlage zweckmäßig sein. Das in der Fallhöhe zusammengefaßte Gefälle wird durch eine Schleusenanlage überwunden, bei der Länge und Breite der Kammer, sowie die Leit- und Schutzmauern dem örtlich vorhandenen oder zu erwartenden Verkehr anzupassen sind. Von einer Wirtschaftlichkeit solcher Einzelstufen im allgemein wirtschaftlichen, privat- oder betriebswirtschaftlichen Sinne kann nicht gesprochen werden, da ihre Wirkung sich nicht auf das Objekt, sondern auf eine geschätzte oder

schwer errechenbare zukünftige Entwicklung des Schiffverkehrs stützt. Jedenfalls wird diese Schleusenanlage groß anzulegen sein. Für europäische Maßstäbe sind Kammerbreiten bis 24 m und Kammerlängen bis 220 m bei mindestens 3,5 m Tiefe der Kammersohle unter NSW nötig.

Einer betriebswirtschaftlichen Rechnung oder Schätzung eher zugänglich sind Flußstrecken von über 100 km Länge mit einheitlicher Ausbaugröße und Ausbauart. Da jedoch der Bauvortrag solcher langen Kraftwasserstraßen erfahrungsgemäß viele Jahre, wenn nicht Jahrzehnte, dauert, können die Betriebsarten, für die die Schleusen bemessen werden, sich oft grundlegend ändern. So verlangte die Flößerei auf dem Main eine 300 m lange Schleusenkammer. Flöße fahren auf dem Main nur noch selten zu Tal, so daß die 300 m lange Kammermündung durch ein Mittelhaupt in eine 100 und eine 200 m lange Kammer unterteilt wird. Um an Füllwasser zu sparen, ein Vorgang der gleichbedeutend mit Energiegewinn im Kraftwerk ist, wird nur die für die rasche Abwicklung des Schiffverkehrs notwendige Kammer gefüllt.

Die Schätzungen des künftigen Verkehrs, die von einem vorhandenen Güterumlauf ausgehen und eine knappe Zuwachsrate berücksichtigen, werden nach Inbetriebnahme einer Wasserstraße oder eines industriell bedeutsamen Teilstückes der Wasserstraße meist rasch überholt. Für die Teilstrecke des Neckars von der Rheinmündung bis Heilbronn waren 1925 etwa 2 Millionen Tonnen Umschlag auf der ganzen Strecke vorausgerechnet. Allein im Hafen Heilbronn wurden 1955 etwa 8 Millionen Tonnen umgeschlagen. Der Umschlag des Hafens Basel war 1925 mit 1,3 Millionen Tonnen geschätzt. Er beträgt 1960 nach dem Ausbau des Oberrheins 6 Millionen Tonnen.

Die beiden Angaben über den Hafenumschlag kennzeichnen den Charakter einer Wasserstraße für die Entwicklung seines Hinterlandes. Aus diesen im voraus unwägbareren Größen läßt sich die Wirtschaftlichkeit einer Schleusenanlage äußerst schwer ableiten. Für die genannte Neckarstrecke, deren Mehrzweck-Stauanlagen zunächst mit einer 110 m langen und 12 m breiten Schleusenkammer ausgerüstet waren, verlangte die zunehmende Verkehrsdichte die zweite, daneben liegende Schleusenkammer und die Erweiterung der Leit- und Schutzmauer.

Welcher Art von Erweiterung bei geändertem oder vergrößertem Verkehrsanfall der Vorzug zu geben ist, kann allgemein nicht bestimmt werden. Hier spielen Topographie des Flußtales, Morphologie des Flusses, industrielle und landwirtschaftliche Siedlung, Landschaftscharakter und die primäre Aufgabe des Flusses, Vorfluter der Tallandschaft zu sein, eine oft entscheidendere Rolle, als die mit der Zahl ausgeklügelten Einsparungen an Fracht oder ein mit Imponderabilien belasteter Wirkungsgrad der Schleuse.

Was berechnet werden kann und in die wirtschaftliche Betrachtung einer Schiffahrtsanlage eingeht, sind die Bauwerke selbst, bei denen durch theoretische und praktische Erkenntnisse ein ausgereifter Plan entsteht. Solche Möglichkeiten, die Uferbegrenzungen im Bereich eines Schleusenbauwerks wirtschaftlich zu gestalten, liegen in der statisch günstigen Beeinflussung der angreifenden Kräfte.

2. Beeinflussung des Erddruckes

Schwergewichtsmauern erhalten infolge der Verteilung der angreifenden Kräfte einen nach unten zunehmenden dreiecksförmigen Querschnitt mit senkrechter Vorderseite und geneigter Rückseite. Die Größe und die Richtung des an der Mauerrückseite angreifenden Erddruckes hängen u. a. auch vom Wandreibungswinkel δ ab, dessen Größtwert gleich dem Winkel ρ der inneren Reibung ist.

Das umstürzende Moment des Erddruckes sinkt mit wachsendem δ so daß in dieser Hinsicht diejenigen Querschnittsformen am wirtschaftlichsten sind, die es erlauben, den Größtwert $\delta = \rho$ anzusetzen. Wendet man deshalb anstelle einer ebenen Rückfläche mit $\delta < \rho$ z. B. eine abgestufte Rückwand an (Bild 17), dann verläuft die sekundäre

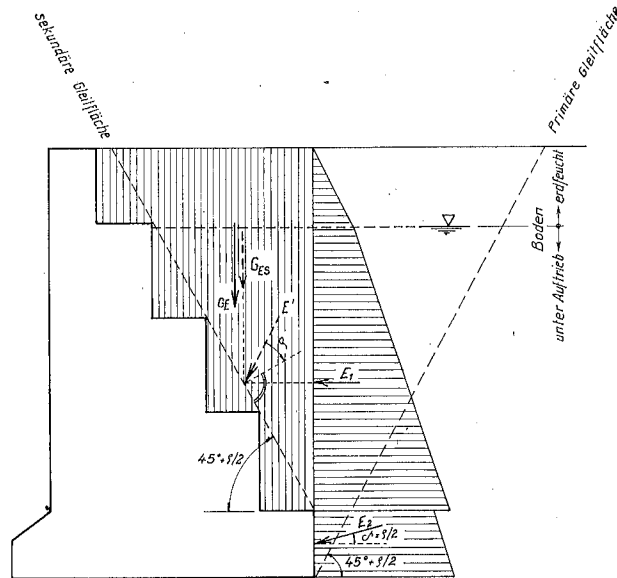


Bild 17

Erddruck auf eine Stützmauer mit abgestufter Rückwand

Gleitfläche im Erdreich. Damit setzt sich im Bereich der Stufen der jetzt unter $\delta = \rho$ geneigte Erddruck E' aus dem Rankine'schen Erddruck E_1 auf eine durch die Mauerhinterkante gezogene senkrechte Fläche und dem Gewicht G_{ES} des Erddruckes zwischen dieser Fläche und der sekundären Gleitfläche als stabilisierender Auflast zusammen. (In der praktischen Rechnung wird G_{ES} mit dem Gewicht des Erdreiches unterhalb der sekundären Gleitfläche zum Gesamtgewicht G_{ES} zusammengefaßt).

Allgemein kann dieser Vorteil erzielt werden, wenn die Mauerrückfläche so rauh gestaltet wird, daß ein Wandreibungswinkel $\delta = \rho$ gewährleistet ist. Dazu kann auch an Stelle einer glatten Schalung ein sägeförmiges Profil angewendet oder die Schalung durch ein Maschendrahtgewebe oder Streckmetallgewebe ersetzt werden. Trotz der höheren Kosten für derartige Sonderschalungen werden die Querschnitte durch Einsparung an Mauerdicke wirtschaftlicher.

3. Beeinflussung des Wasserdruckes

Der Grundwasserstand hinter den Schleusen- und Leitmauern und damit die Belastung der Mauerrückflächen durch Wasserdruck werden durch den Verlauf der Sickerströmung um die Schleuse herum vom Oberwasser zum Unterwasser bestimmt. Da der Wasserdruck einen hohen Anteil an den umstürzenden Kräften besitzt, kann jede Maßnahme zur Herabsetzung des Grundwasserspiegels die Bemessung der Mauer wirtschaftlich

beeinflussen. Dazu gehören in erster Linie eine wirksame Querabriegelung der Sickerströmung am Oberhaupt und eine zuverlässige Abführung des Grundwassers unterhalb der Abriegelung. Als Beispiel diene die Ausführung an der Schleuse in Jochenstein (Bild 18). Der Boden hinter den Schleusenmauern wird durch die Oberkanalufermauern

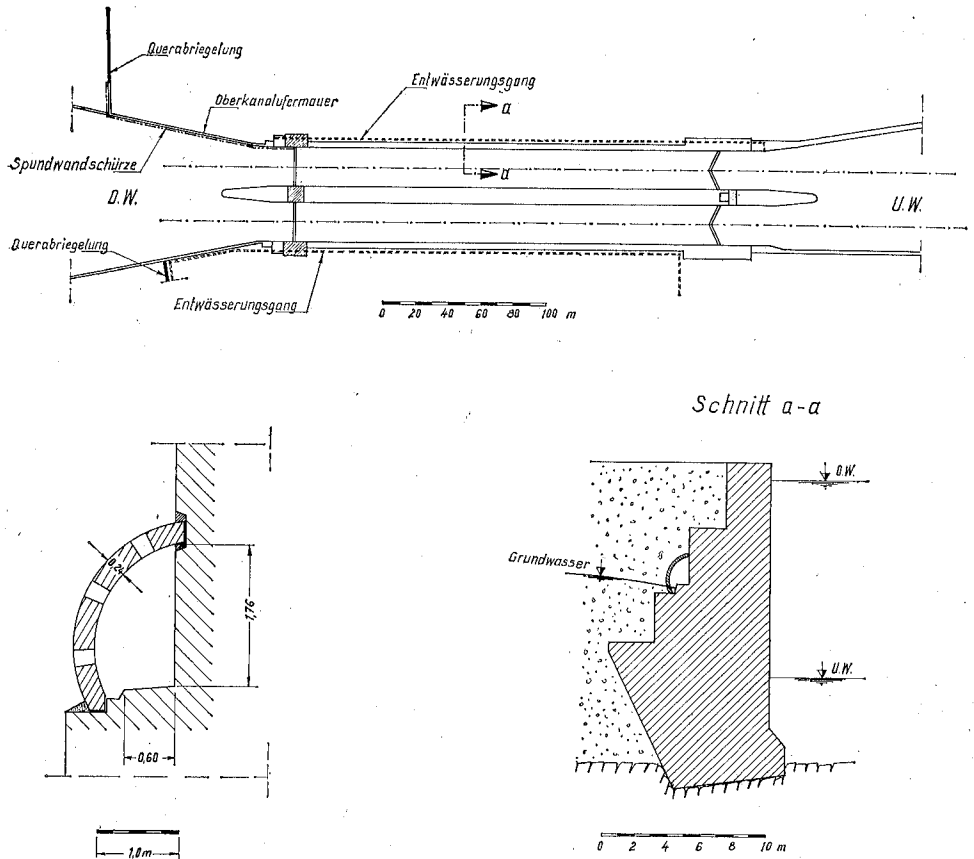


Bild 18

Donaustufe Jochenstein. Entwässerungsgänge hinter den Schleusenkammermauern

und daran anschließende, massive Querabriegelungswände gegen das Oberwasser zu abgeschirmt. Auf einer Stufe der abgetreppten Schleusenmauerrückwand leitet ein begehbare Entwässerungsgang das Grundwasser im freien Gefälle ins Unterwasser ab und sichert damit die Mauer gegen eine Überschreitung des der Berechnung zugrundegelegten niedrigen Grundwasserstandes ab. Die Wände des Ganges aus lose nebeneinander gelegten Fertigbeton-Bogenstücken weisen außer den offenen Stoßfugen noch zahlreiche Öffnungen auf, so daß das Wasser in den Gang eintreten und die Wirksamkeit der Entwässerung jederzeit beobachtet und gegebenenfalls wieder hergestellt werden kann. Die Höhenlage des Entwässerungsganges richtet sich nach der Höhe des Unterwassers; nur an wenigen Tagen im Jahr wird der Gang durch Rückstau überflutet. Durch eine günstige Wahl der Mündungsstelle des Ganges und unter Umständen auch der Mündungsrichtung in den freien Wasserlauf kann eine Verschlämung des Ganges beim

Rückstau vermieden oder in erträglichen Grenzen gehalten werden. Eine Rückstauklappe an der Mündung ins Unterwasser oder eine Spülvorrichtung mit Hilfe einer verschließbaren Verbindung zwischen dem oberen Gange und dem Oberwasser können zur Reinhaltung vorgesehen werden.

4. Beeinflussung der Bodenpressungen

Ein erosionsgefährdeter Baugrund erfordert einen dichten Abschluß der Schleusenkammer gegen den Untergrund. Dazu werden Seitenwände und Sohle zu einem U-förmigen Rahmen vereinigt. Betoniert man die Schleusensohlenplatte gleichzeitig mit den Fundamenten der Wände als eine durchgehende Platte, so erhält sie durch die hohen Seitenaufasten starke Biegebungsbeanspruchungen, die unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit des Untergrundes einen hohen Aufwand an Bewehrung erfordern, ganz abgesehen von der Problematik der Berechnung des elastisch gelagerten Tragwerkes. In vielen Fällen wird die Tragfähigkeit des Baugrundes es zulassen, die Schleusensohlenplatte und die Mauern solange durch Arbeitsfugen zu trennen, bis die Setzungen der Mauern größtenteils abgeklungen sind (Bild 19). Die Fugen sollen weit genug sein, daß

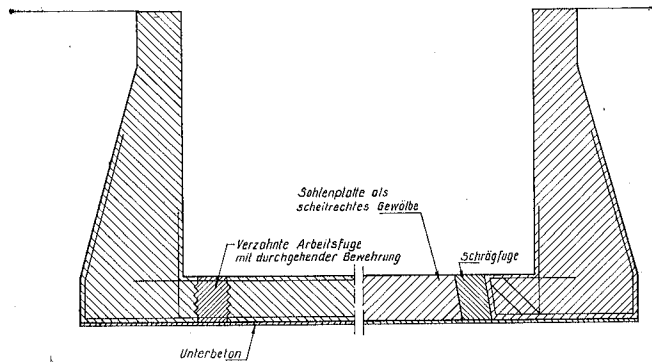


Bild 19

Entlastung der Sohlenplatte durch Arbeitsfuge

sie Platz zu einem einwandfreien Einbauen und Verdichten des schließenden Betons bieten und daß die durchgehende Bewehrung durch die ungleichen Setzungen von Mauer und Sohle keine nennenswerten Biegungsspannungen erhält. Eine geeignete Verzahnung der Fugenwand ermöglicht später die einwandfreie Übertragung der Querkräfte. Unter Umständen können durch die vorübergehende Trennung die Bodenpressungen unter der endgültigen Sohlenplatte so stark herabgesetzt werden, daß die Platte ohne Bewehrung und nur als scheinbares Gewölbe wirkend, ausgeführt und mit einer unverzahnten Schrägfuge entsprechend dem Verlauf der Stützlinie im Gewölbe angeschlossen werden kann.

f) Automatischer Betrieb

1. Automatischer Betrieb von Wehren

1.1 Aufgabe der Automatik

An einem kanalisiertem Fluß mit Kraftwerken, Schleusen und Wehren mit bewegbaren Verschlüssen schwanken die Höhen der Wasserspiegel im Ober- und Unterwasser in Abhängigkeit vom Gesamtzufluß, von der Kraftwassermenge, vom Schleusungswasser

und der Überströmung der Wehrverschlüsse. Die Schwankungen dürfen bestimmte Werte nach oben und unten nicht überschreiten, damit wasserbauliche Anlagen und die Ufer nicht überflutet werden oder die Schiffe den Grund nicht berühren. Innerhalb dieses Spielraumes sind zeitweilige Vergrößerungen der Fallhöhen des Kraftwerks erwünscht. Sie lassen sich durch Verstellen der bewegbaren Verschlüsse des Wehres erzielen. Auch bei neuzeitlichen Mehrzweckanlagen erfolgt dies häufig noch von Hand, wobei das Bedienungspersonal Maschinen zur Hubbewegung einschaltet, sobald eine Pegelanzeige hierzu Anlaß gibt.

Durch eine Automatik, die das ständige Bedienungspersonal entlastet oder überflüssig macht, lassen sich diese Aufgaben jedoch besser lösen. Hierbei ist die Automatik als eine Regelanlage auszubilden, die ihre Informationen von den Meßwerten der Pegel und des Kraftwerkes erhält. Sie verarbeitet diese Daten und stellt Energie bereit zur Bewegung der Wehrverschlüsse. Dabei muß sie drei Aufgaben erfüllen.

1.11 Einhaltung des Stauzieles

Solange das Kraftwerk ungestört arbeitet, brauchen nur die Abweichungen vom zulässigen Stauziel auf die Regelanlagen einzuwirken, wobei entsprechend der Entfernung zwischen Pegel und Wehr auf die Zeit Rücksicht zu nehmen ist, die vergeht, bis sich die Veränderung des Wasserstandes am Pegel auswirkt (Trägheit des Regelkreises). Auf diese Weise kann die Regelung das Stauziel sehr genau halten.

1.12 Einwirkung auf Sunk und Schwall

Wenn sich das Kraftwerk plötzlich ausschaltet und die Schnellschlüsse der Turbinen betätigt werden, kann unterhalb des Wehres Wassermangel (Sunk) eintreten, der bei einer Regelung nur durch den Oberwasser-Pegel zu spät durch Absenken der Wehrverschlüsse ausgeglichen würde. Dadurch können Grundberührungen von Schiffen auftreten. Ebenso besteht die Gefahr unzulässig großer Hebung des Oberwasser-Spiegels (Schwall). Deshalb müssen unmittelbar vom Kraftwerk Impulse auf die Regelanlage gegeben werden, die ohne Zeitverlust eine Schnellsenkung der Wehrverschlüsse bewirken und die veränderte Wasserentnahme der Turbinen ausgleichen.

1.13 Schwellbetrieb

Die Regelanlage soll zeitweilig die Leistung des Kraftwerks durch eine größere Stauhöhe steigern (Schwellbetrieb). Die Sollwerte des Pegelstandes im Oberwasser müssen daher verstellbar werden können, ohne daß die Regelung außer Betrieb kommt.

1.2 Vorteile der Regelung

Gegenüber einer Handregelung hat eine automatische Regelung folgende Vorteile: Die Möglichkeit menschlichen Versagens ist ausgeschaltet, und bei dem hohen Entwicklungsstand neuzeitlicher, elektrischer und hydraulischer Einrichtungen ist — vielleicht nach einigen Anfangsschwierigkeiten — mit technischen Störungen weniger zu rechnen. Ferner ist die Genauigkeit größer, da die Methoden der Regelungstechnik den Einfluß der Zeit zwischen der Information und der dadurch ausgelösten Veränderung besser berücksichtigen können als der Mensch. Die Energie des Wassers kann bestens genutzt werden. Die Schifffahrt wird weniger gefährdet. Schließlich wird auch der Betrieb wirtschaftlicher, da die Kosten der ständigen Bedienung mehr ins Gewicht fallen als die der Regelapparate einschließlich ihrer Instandhaltung.

In besonderen Fällen, bei Störungen oder Montagearbeiten, kann die Automatik ausgeschaltet werden, so daß jeder Wehrverschluß unmittelbar vom Wehrpfeiler aus bedient werden kann.

1.3 Besonderheiten beim Ausbau der Mosel

Bei den zur Zeit im Bau befindlichen Staustufen der Mosel kommen die Vorteile einer Regelung besonders gut zur Geltung. Die Wasserführung ist dort sehr unterschiedlich und die Speicherräume der Haltungen sind zum Teil sehr klein. Die Gefahr von unzulässigen Wasserspiegelschwankungen für die Schifffahrt und die Ufer ist daher groß. Die Regelanlage hält den Wasserspiegel an den als Sektoren ausgebildeten Wehrverschlüssen mit einer Genauigkeit von ± 2 cm.

Durch eine Handregelung wäre diese Genauigkeit nicht zu erzielen. Bei geringen Schwankungen wirkt nur der Sektor einer Wehröffnung, die anderen Sektoren bleiben zur Einsparung von Regelarbeit mit Freibord stehen.

Da bei der Mosel die Planung und Vergabe von 9 Wehranlagen des deutschen Bereiches in einer Hand liegt und sich über einen verhältnismäßig geringen Zeitraum erstreckt, kann an jeder Staustufe die gleiche Regelanlage ausgeführt werden. Dadurch, daß eine Firma alle Anlagen liefert, können die Teile der einzelnen Anlagen mit Sicherheit untereinander ausgetauscht werden. Die Instandhaltung läßt sich dadurch für alle Staustufen gemeinsam und mit einem Minimum von Spezialisten durchführen. Dies ist die wirtschaftlichste und betriebssicherste Lösung.

1.31 Technische Einrichtungen

Die technischen Einrichtungen konnten weitgehend aus bereits fertigen Elementen zusammengestellt werden. Die Impulsgeber für die Wasserstände sind Schwimmpegel mit elektrischer Übertragung, die Impulsgeber für die Energieabgabe des Kraftwerkes sind Frequenzmesser und Leistungsmesser. Durch elektrische und hydraulische Einrichtungen werden die Werte dem Regelgerät zugeführt. Die Sektorverschlüsse an den Staustufen der Mosel verändern die Stauhöhe durch Änderung des Wasserinhaltes im Raum des Sektors. Die Regelanlage braucht nur Absperrorgane für den Zu- und Abfluß zur Sektorkammer zu betätigen. Für notwendige Schnellabsenkungen des Wehres dienen pneumatisch betätigte Rohrschieberverschlüsse.

Im allgemeinen ist für die Bedienung der Sektorverschlüsse einer Staustufe kein besonderes Personal erforderlich. Im Steuerstand der zugehörigen Schleuse sind die für die Verschlüsse notwendigen Instrumente vereinigt, von dort kann der Schleusenbeamte in die Regelung eingreifen. Eine besondere Alarmeinrichtung spricht an, wenn das Stauziel überschritten oder unterschritten wird oder andere Störungen vorliegen. Sie weckt im Zentralsteuerstand der Schleuse oder in den Wohnungen. Pegelschreiber und Schreibgeräte für die Stellung der Verschlüsse schreiben ständig, so daß bei besonderen Vorkommnissen Beweismittel vorliegen.

2. Automatischer Betrieb von Schleusen

2.1 Aufgabe der Automatik

Die Zeit, die für eine Schleusung benötigt wird, soll möglichst kurz und die Gefahr von Unfällen möglichst klein sein. Ferner soll der Betrieb wirtschaftlich sein, wobei die Einsparung von Personal an erster Stelle steht. Durch den Entwurf der Schleuse und die Konstruktion der Einzelheiten der Tore und Einrichtungen für das Füllen und Leeren wird dieser Forderung bereits Rechnung getragen. Die Art, wie die Anlage bedient wird, läßt aber noch ein erhebliches Spiel für den Zeitbedarf einer Schleusung zu. Hier ergibt sich eine Verbesserungsmöglichkeit durch Automatisierung. Für alle Vorgänge, die nicht unbedingt von Menschenhand gesteuert werden müssen, ist daher der optimale Ablauf zu ermitteln und als „Steuerprogramm“ von Maschinen zu über-

nehmen. Die übrigen Vorgänge sollen für das Bedienungspersonal der Schleuse gut übersehbar und so leicht lenkbar sein, daß sie von nur einem Mann ausgeführt werden können. Für die modernen Schleusen an der Mosel mit starkem Verkehr konnten diese Forderungen durch folgende Anordnung erfüllt werden:

2.11 Alle Einrichtungen für Überwachung und Lenkung des Betriebes sind in einem zentralen Steuerstand mit gutem Überblick über Schleuse und Vorhäfen untergebracht. Bei normalem Betrieb ist die Bedienung der Schleuse nur von diesem Stand aus vorgesehen. Nur in Sonderfällen, etwa bei Eisgang und bei Überholungs- oder Reinigungsarbeiten, wird eine unmittelbar an den Schleusentoren vorgesehene „örtliche Steuerung“ eingeschaltet.

2.12 Der Überwachung dienen Fernsehgeräte. Sie senden zum Steuerstand Bilder von den Stellen, die nicht hinreichend eingesehen werden können. Es hat sich im allgemeinen bewährt, den Steuerstand an das Untere und ein schwenkbares Fernsehgerät an das Obere zu setzen.

2.13 Die Pegelstände von Oberwasser, Unterwasser und Schleusenammer sowie die Stellung der Sektorverschlüsse werden zum Steuerstand übertragen.

2.14 Die Signale für die Schifffahrt werden vom Steuerstand gegeben. Ferner kann die Schifffahrt von dort durch Lautsprecher oder Funkprechgerät angesprochen werden.

2.15 Die Anzeigegeräte für die Stellung von Schleusentoren und von Füll- oder Entleerungsöffnungen sind in einem Pult als Teile eines Wirkungsbildes zusammengefaßt. Es enthält auch alle Betätigungsknöpfe für den Schleusungsvorgang und für die Signale.

2.16 Durch einen Druck auf den Betätigungsknopf werden automatisch nach einem Programm die Tore geöffnet oder geschlossen und die Wasserstände entsprechend ausgeglichen. So werden zum Beispiel durch den Druckknopf „Talschleusung“ folgende Vorgänge nacheinander ausgelöst:

- a) Das Obertor (Hub-Senktor) wird geschlossen.
- b) Unmittelbar nach Beendigung dieser Bewegung öffnen sich die Schütze in dem Untertor (Stemmtor).
- c) Durch den Wasserspiegelausgleich ausgelöst öffnen sich die Torflügel, während sich die Schütze wieder schließen.

Sobald die Schiffe aus der Schleuse ausgelaufen und die zu Berg fahrenden eingelaufen sind und festliegen, wird die Bergschleusung durch Betätigung eines anderen Knopfes in ähnlicher Weise ausgelöst.

Bei Störungen oder bei der Notwendigkeit, aus anderen Gründen in den Ablauf einzugreifen, kann durch Öffnen einer Klappe im Pult die Automatik ausgeschaltet und jedes Element dieser Kette von Vorgängen einzeln in beliebiger Reihenfolge betätigt werden.

Die Schleusenbedienung wird dadurch so weit vereinfacht, daß sie von einem Mann ausgeführt werden kann, der darüber hinaus für die Beobachtung der Schifffahrt noch hinreichend Zeit hat.

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen automatischen Anlagen für Wehrverschlüsse handelt es sich bei den Schleusen also nicht um eine Regelung, sondern um eine automatische Programmsteuerung. Hierbei ist der Ablauf des Programms so ermittelt und festgelegt, daß möglichst viel Zeit eingespart wird und Schäden für Schiffe oder Bauwerke vermieden werden.