

# Strömungsmechanische Probleme bei der Kühlwasserführung in Kernkraftwerken

## Hydraulic Problems in Cooling Water Recirculating Systems of Nuclear Power Plants

### Kurzfassung/Summary

Die hydraulischen Probleme beim Entwurf der Bauwerke im druckfreien Teil des Kühlwasserkreislaufs (Entnahme- und Verteilerbauwerk, Kraftschlußbecken, Kühltasse) werden beschrieben. Es werden die Anforderungen an die hydraulische Leistungsfähigkeit des Kühlsystems zur Realisierung von Frischwasser-, Ablauf-, Kreislauf- und Mischkühlung skizziert, sowie versuchstechnische und numerische Lösungsmöglichkeiten an Hand ausgeführter repräsentativer Untersuchungen an bestehenden und geplanten Kraftwerken aufgezeigt.

Hydraulic design problems of the structures in the free-surface part of the recirculating system (intake and distribution structure, control weir, cooling tower) are described. The capacity of the cooling system required for realization of once-through cooling, blow-down, recirculation and mixed mode operation is discussed, and experimental and numerical methods of solution are illustrated by means of several representative investigations of existing and planned installations.

### 1 Vorbemerkung

Im vorliegenden Aufsatz wird aus Erfahrungen berichtet, welche die Autoren in den zurückliegenden 6 Jahren bei der hydraulischen Gestaltung der Kühlwasserkreisläufe für mehrere Kernkraftwerke (Kernkraftwerke Philippsburg I und II, Isar und Hamm) sammeln konnten. Von den hydraulischen Berechnungen und Modellversuchen, welche teils an der Universität Karlsruhe, teils an der Universität Stuttgart durchgeführt und größtenteils gemeinsam bearbeitet wurden, werden im vorliegenden Aufsatz einige der Ergebnisse wiedergegeben, welche für die hydraulische Gestaltung von Kühlkreisläufen von allgemeinem Interesse sind.

### 2 Einleitung

Beim Betrieb thermischer Kraftwerke fallen große Abwärmemengen an, die ohne wesentliche Beeinträchtigung der Umweltbedingungen durch geeignete Maßnahmen abgeführt werden müssen. Nachdem dem Wärmeabfuhrvermögen der Oberflächengewässer [1] durch die zulässigen Aufwärmespannen enge Grenzen gesetzt sind, müssen in der Planung für neue Kraftwerke alternative Möglichkeiten der Wärmeabgabe während des Betriebs vorgesehen werden. Dies erfordert insbesondere den Bau von Kühltürmen, über die die Abwärme ohne nennenswerte Belastung der Oberflächengewässer direkt an die Atmosphäre abgegeben werden kann, was allerdings mit einem nicht unerheblichen Rückgang des Gesamtwirkungsgrades des Kraftwerks erkauft werden muß [2].

Für einen wirtschaftlichen Kraftwerksbetrieb ist deshalb der Kühlwasserkreislauf so auszulegen, daß je nach hydrologischen und meteorologischen Bedingungen Durchlauf-, Ablauf-, Kreislauf- oder Mischbetrieb gefahren werden kann, wie dies schematisch in *Bild 1* dargestellt ist. Eine derart variable Betriebsweise stellt entsprechende Anforderungen an die hydraulische Gestaltung des Kühlkreislaufs und seiner Komponenten (*Bild 2*).

Im *Entnahmebauwerk* wird das Kühlwasser aus dem Oberflächengewässer entnommen und über mehrere Reinigungsstraßen mit Rechen- und Siebbandanlagen den Hauptkühlwasserpumpen zugeführt. Von dort strömt es im geschlossenen Leitungssystem durch den Kondensator, und gelangt dann mit rund 10 K Aufwärmung in das *Kraftschlußbecken*. Von dort wird es entweder über die Kühlturmpumpen dem Kühlturm zugeführt, oder aber es strömt über die Kraftschlußschwelle und über die Ablaufleitung zum *Übergabebauwerk*, wo die Rückgabe in den Vorfluter erfolgt. Entnahme- und Übergabebauwerk müssen hierbei so angelegt sein, daß keine hydraulische Kurzschlußströmung auftreten kann und daß die zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Schiffahrtsrinne eingehalten werden. In bestimmten Grenzen kann hierbei die Durchmischung im Gewässer durch Gestaltung des

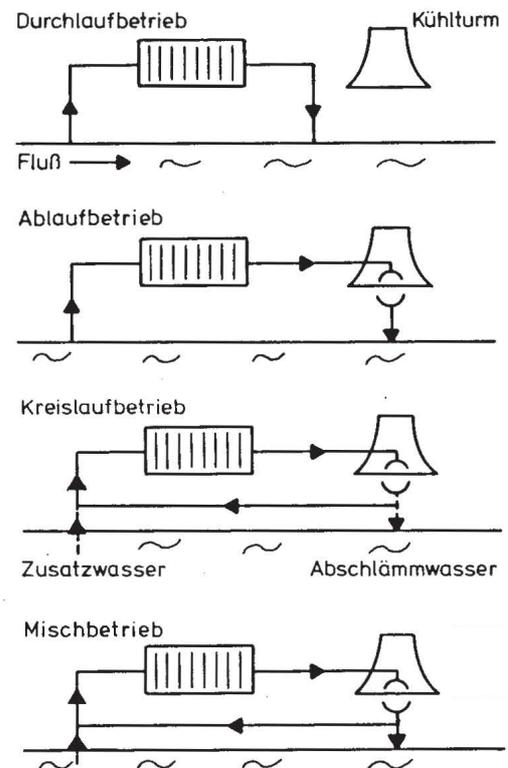


Bild 1: Verschiedene Kühlbetriebsarten

Übergabebauwerks und seiner thermo-hydraulischen Kennwerte beeinflusst werden [3].

Im *Kühlturm* wird das Kühlwasser verregnet und abgekühlt in der Kühlturmtasse wieder gesammelt. Von dort wird es im freien Gefälle zurückgeführt. Im *Kreuzungsbauwerk* wird es bei Ablaufbetrieb in die Ablaufleitung zum Übergabebauwerk eingespeist, während im Rückkühlbetrieb der Kühlwasserstrom dem Verteilerbauwerk zugeführt wird. Bei Mischbetrieb muß der Kühlwasserstrom im Kreuzungsbauwerk in die entsprechenden Teilströme aufgeteilt werden. Im *Verteilerbauwerk* wird der Rückkühlanteil des Kühlwasserstroms wiederum dem Entnahmebauwerk zugeführt und dort anteilig den einzelnen Reinigungsstraßen vor den Feinrechen zugegeben.

Auch beim Kreislaufbetrieb kann das System nicht völlig geschlossen gefahren werden. Zum Ausgleich für die Verdunstungsverluste und für das Abschlammwasser, welches zur Steuerung der Eindickung des Kreislaufwassers abgeführt wird, muß dem System ständig Zusatzwasser zugeführt werden.

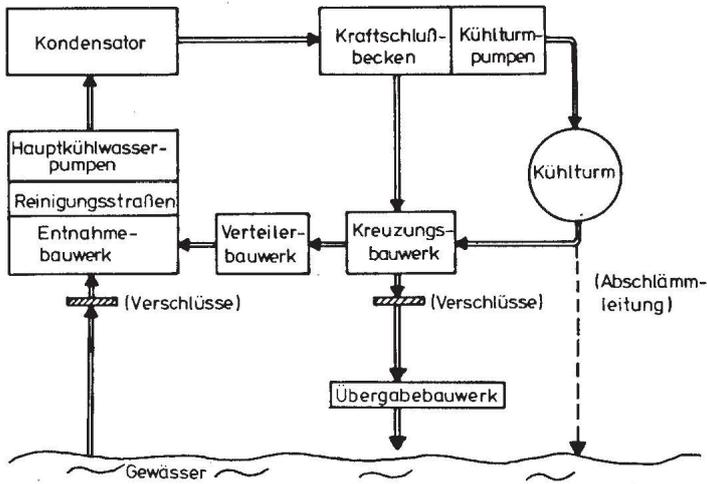


Bild 2: Bauwerke im Kühlkreislauf

Der Kühlkreislauf stellt ein komplexes hydraulisches System dar, das so ausgelegt werden muß, daß es alle gewünschten Betriebsarten zuläßt, einfach zu regeln und umzuschalten ist und von den Wasserstandsschwankungen im Gewässer weitgehend unbeeinflusst bleibt. Im vorliegenden Beitrag werden einige Gesichtspunkte der hydraulischen Bemessung solcher Systeme angesprochen, wobei vor allem die oben aufgezählten Bauwerke behandelt werden. Ausgeklammert bleiben hier instationäre Probleme, wie sie bei Umschaltvorgängen oder bei Pumpenausfall auftreten, sowie die Strömung durch den Kondensator im geschlossenen Leitungssystem zwischen Hauptkühlwasserpumpe und Kraftschlußbecken, da diese Fragen im nachfolgenden Aufsatz [4] aufgegriffen werden.

### 3 Kühlwasserentnahme- und Verteilerbauwerk

#### 3.1 Entnahmebauwerk

Bei Anordnung und Gestaltung des Entnahmebauwerks muß für die Vermeidung von Schlammablagerung und für möglichst gleiche Beaufschlagung der Reinigungsstraßen Sorge getragen werden. Wesentliche Kenngrößen für die Strömungsverhältnisse sind das Verhältnis der mittleren Geschwindigkeiten von Entnahme- und Flußströmung, die Wassertiefe und der Entnahmewinkel. Zur strömungstechnisch günstigen Gestaltung des

Entnahmebauwerks stellen [Untersuchungen an Wasser- oder Luftmodellen wertvolle Hilfsmittel dar [5, 6, 7].

Im Entnahmebauwerk muß das aus dem Vorfluter entnommene Wasser mechanisch gereinigt und möglichst störungsfrei den Kühlwasserpumpen zugeführt werden. Hierzu dienen Grobrechen, Feinrechen, Siebbandmaschine und eine räumlich ausreichend dimensionierte, für alle Reinigungsstraßen gemeinsame Pumpenvorkammer (Bild 3).

Bei Modellmessungen von Energieverlusten in Entnahmebauwerken (Bild 3) ist zu beachten, daß hinsichtlich des Hauptanteils, der durch Rechen und Siebbandmaschine verursacht wird, Berechnungen zur Berücksichtigung des Reynoldszahl-Effekts notwendig sind [9]. Die auf diese Bauwerke wirkenden stationären Strömungskräfte lassen sich relativ einfach – zumeist mittels Dehnungsmeßstreifen – ermitteln. Komplexer ist die Erfassung der schwingungserregenden Strömungskräfte an den Rechen. So führten beispielsweise bei einem 4,57 m auf 3,35 m großen Rechen aus Edelstahl selbsterregte Rechen-schwingungen in Strömungsrichtung zu starken Beschädigungen [10]. Die Vorhersage solcher Probleme anhand von Modellversuchen erfordert eine elastisch ähnlich nachgebildete Rechenkonstruktion.

Ein wichtiger Gesichtspunkt der hydraulischen Gestaltung des Entnahmebauwerks besteht in der Rückführung des Kühlwassers für Kreislaufbetrieb. Bild 3 zeigt die Lösung für eine Anlage, bei der die behördliche Auflage für zeitweisen Kreislaufbetrieb erst nach Baubeginn erteilt wurde. Ziel der hierfür durchgeführten Modellversuche war es, das Kühlwasser auf engstem Raum von oben so in die Reinigungsstraßen einzuleiten, daß ungleiche Anströmung und asymmetrische Belastung der Reinigungsanlagen vermieden wird, was trotz örtlicher intensiver Querströmungen und Walzenbildungen an der Einleitungsstelle weitgehend realisiert werden konnte. Die stark erhöhten Energieverluste für diesen Betriebsfall sind aus Bild 3 zu entnehmen.

Bei der Gestaltung der Pumpenvorkammer ist zu beachten, daß Schräganströmung in Verbindung mit vertikal drehenden Wirbeln bzw. Walzen verhindert werden muß, weil diese die Gefahr des Luftensaugens mit sich bringen und eine drallbehaftete Pumpenanströmung zu Leistungsminderungen führt [11]. Eine Beurteilung dieser Verhältnisse ist ohne Modellversuche weder für den Betriebsfall noch für Störfälle bei Ausfall einer Pumpe oder einer Reinigungsstraße möglich.

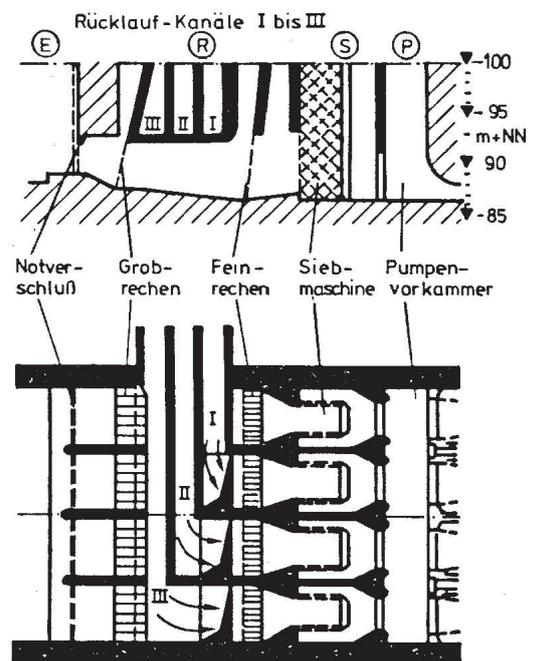
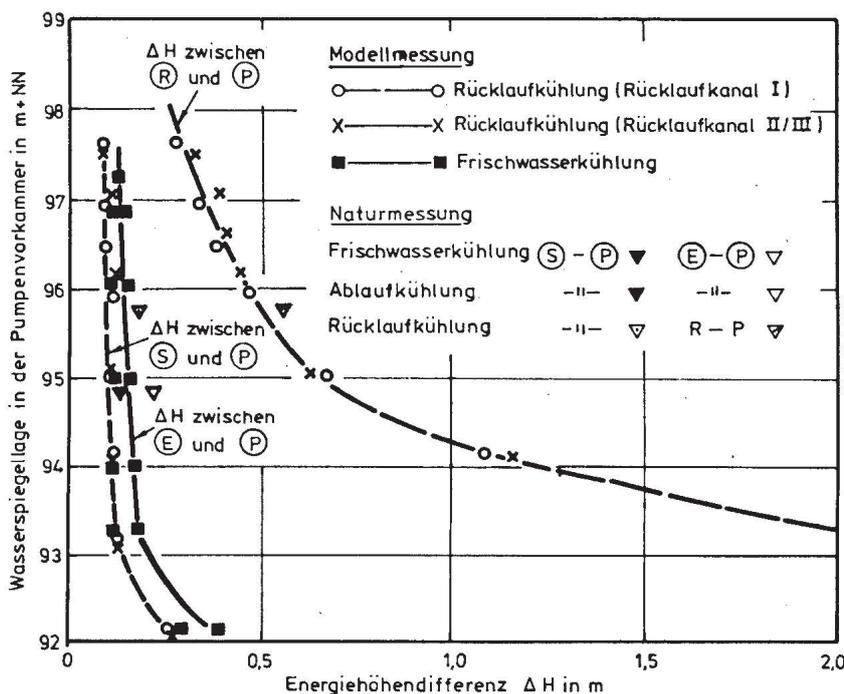


Bild 3: Energieverluste im Entnahmebauwerk des Kernkraftwerks Philippsburg, Block I

### 3.2 Verteilerbauwerk

Das Verteilerbauwerk dient dem Zweck, bei Kreislauf- oder Mischbetrieb das von der Kühlturm- oder Wasserpumpe zurückgeführte Wasser gleichmäßig auf die einzelnen Reinigungsstraßen des Entnahmebauwerks zu verteilen. Gleichzeitig dient es zur Einhaltung eines vorgegebenen Wasserspiegels in der Kühlturm- oder Wasserpumpe und häufig auch als Entlastungswasserschloß für den plötzlichen Ausfall der Hauptkühlwasserpumpen.

Je nach den Betriebsbedingungen sind unterschiedliche Zuflüsse zu den einzelnen Rückleitungskanälen meist nach festem Verteilungsschlüssel erforderlich. Die gewünschte Aufteilung des rückgeführten Kühlwassers kann prinzipiell mit Regelorganen oder festen Wehrschwellen realisiert werden. Zur Beherrschung dieses Problems sollten jedoch, wenn immer möglich, unbewegliche Kontrollbauwerke, wie freie Überfälle, Überfall-Wehrrücken oder Sohlenschwellen, angeordnet werden. Im Falle des in Bild 4 dargestellten Verteilerbauwerks wurde beispielsweise eine durchgehende feste Wehrschwelle gewählt, welche bei allen Betriebszuständen eine prozentual gleichbleibende Aufteilung des zurückgeführten Kühlwasserstroms gewährleistet. Die vor den Wehrrücken angeordneten Hubschütze dienen zur Anhebung des Wasserspiegels im Verteilerbauwerk und in der Kühlturm- oder Wasserpumpe oder auch bei bestimmten Betriebszuständen zur Änderung der Abflußanteile der einzelnen Kanäle. Bedingt durch die bestehenden baulichen Gegebenheiten liegen die beiden äußeren Rückleitungskanäle sehr tief. Sie wurden mit einem steil abfallenden Wehrrücken und mit Zahnschwellen versehen, um so bei allen Be-

triebszuständen eine rasche Energieumwandlung sicherzustellen und außerdem den im Wechselsprung unvermeidbaren Lufteintrag möglichst gering zu halten, so daß die Luft im anschließenden Abschnitt bis zum Eintritt in die Rückleitungskanäle entweichen kann.

Die Einläufe zu den Rückleitungskanälen müssen ausreichend tief liegen und so gestaltet sein, daß möglichst wenig Luft eingesaugt wird [11]. Da sich Lufteinschlüsse selten ganz vermeiden lassen, kann es in den Rückleitungskanälen zu instationären, den Betrieb störenden Druck- und Abflußschwankungen kommen. Für eine wirksame Entlüftung der Rücklaufkanäle muß deshalb durch zusätzliches Anbringen von Entlüftungsschächten an geeigneten Stellen gesorgt werden.

### 4 Kraftschlußbecken

Das Kraftschlußbecken hat die Aufgabe, bei allen Betriebsarten den Wasserspiegel möglichst genau auf einem vorgegebenen Niveau zu halten, so daß jederzeit der „Kraftschluß“ im Druckleitungssystem, d.h. eine kavitationsfreie Strömung zwischen Hauptkühlwasserpumpen und Kraftschlußbecken, gewährleistet ist. Meist ist es zweckmäßig, das Kraftschlußbecken hydraulisch vom Vorfluter zu trennen, wobei für 100% Frischwasserkühlung ein rückstaufreier Abfluß zum Vorfluter vorhanden sein muß. Dies ist das Auslegungskriterium für die Höhenlage der Kraftschlußschwelle in Abstimmung auf den maßgebenden Wasserstand im Vorfluter. Die Kraftschlußschwelle sollte ausreichend lang ausgelegt sein, um bei reduziertem Kühlwasserstrom (beispielsweise zufolge einer Betriebsstörung)

eine möglichst geringe Absenkung des Wasserspiegels im Becken zu verursachen. Gegebenenfalls kann auch der Kraftschluß durch Anheben beweglicher Tafelschütze hergestellt werden.

Kraftschlußbecken weisen eine von der Betriebsart abhängige Durchströmungscharakteristik auf. Während für den Frischwasserbetrieb eine gleichmäßige An- und Überströmung der Kraftschlußschwelle anzustreben ist, muß bei Ablauf- und Kreislaufbetrieb für eine strömungsgünstige Zuströmung zu den Kühlturmpumpen Sorge getragen werden. Ein funktionsfähiges Kraftschlußbecken muß daher allen verschiedenen Betriebsarten gerecht werden. Bei Kraftwerksblöcken mit großer Leistung nimmt das Kraftschlußbecken Dimensionen an, bei denen die Gefahr der Verschlamung gegeben ist. Absatzgefährdete Zonen sind vorwiegend im Bereich der Pumpeneinläufe vorhanden, da dort zur Gewährleistung einer drall- und luftfreien Ansaugung eine relativ große Wassertiefe mit entsprechend kleinen Geschwindigkeiten bei Frischwasserbetrieb vorhanden ist. Der Wasser- und Schwebstoffaustausch zwischen Becken und Pumpenzulauf führt bei längerem Frischwasserbetrieb zur Sedimentation in den Pumpenzuläufen und kann beim Umschalten auf Ablauf- bzw. Kreislaufbetrieb zu Betriebsstörungen führen.

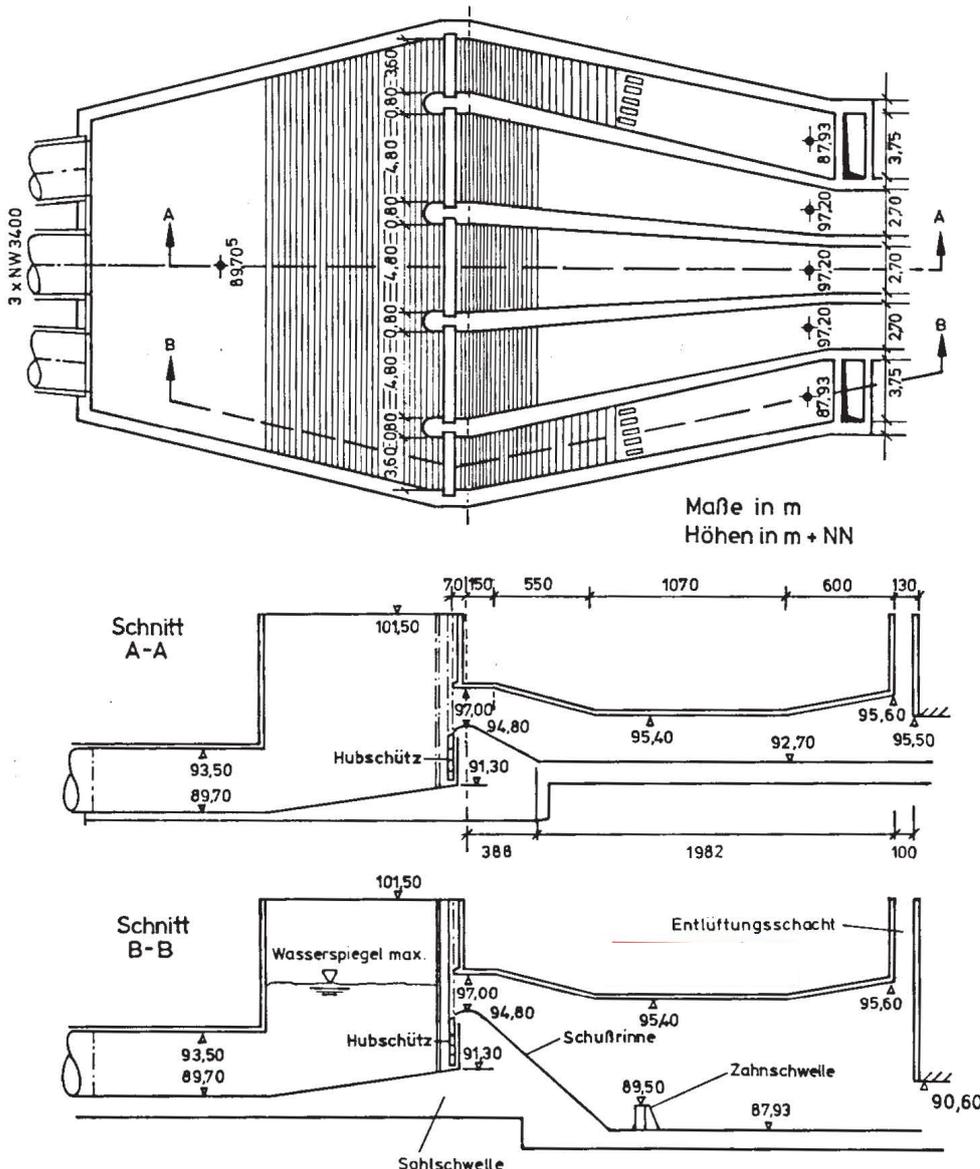


Bild 4: Verteilerbauwerk des Kernkraftwerks Philippsburg, Block II

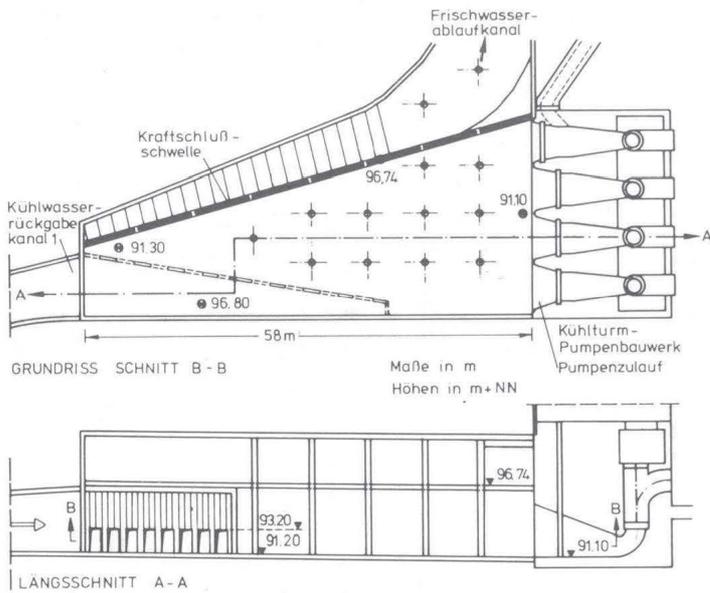


Bild 5: Kraftschlußbecken des Kernkraftwerks Philippsburg, Block II

Dem Problem der Verschlämzung des Kraftschlußbeckens kann auf verschiedene Weise begegnet werden. Eine Möglichkeit besteht darin, bei allen Betriebsarten das Gesamtbecken unter Ausnutzung der kinetischen Strömungsenergie in ausreichendem Maße zu durchströmen, so daß einer Absetzung der Schwebeteilchen entgegengewirkt wird. Dies ist baulich durch eine geeignete Gestaltung der Einleitung zu erreichen, wie dies in Bild 5 für ein Beispiel dargestellt ist. Zur Unterstützung der Spülwirkung können an der Sohle vor den Pumpeneinläufen Spüleleitungen verlegt werden, die mit Druckluft oder Wasser betrieben werden können. Diese Spüleleitung muß für den Frischwasserbetrieb so ausgelegt werden, daß eine ausreichende Zirkulationsströmung in den absetzgefährdeten Zonen erzeugt wird [12]. Die Spülanlage kann im zeitlichen Intervall betrieben werden, wenn dies der Konsolidierungsvorgang der sedimentierten Schwebstoffe zuläßt.

## 5 Kühlturmtasse

### 5.1 Zu- und Ablaufbedingungen

Der Zu- und Ablauf in der Kühlturmtasse wird wesentlich durch die Betriebsweise des Kühlsystems bestimmt. Bei Ablauf- und Kreislaufbetrieb gelangt das dem Kühlturm zugeleitete Wasser durch die Verrieselungsanlage im allgemeinen gleichmäßig verteilt auf die Tassenfläche. Ausnahmen stellen die der Vereisungsgefahr entgegenwirkenden Winterbetriebsarten wie beispielsweise Bypass-Betrieb oder Freischaltung einer Verrieselungszone im Kern der Tasse mit konzentrierter Randzonen-Beregnung und die Streifenberegnung dar.

Die Strömungsvorgänge sind für Tief- und Flachtassen unterschiedlich. Wegen der Absetzgefahr werden bei Wasser mit starker Schwebstoffführung in jüngster Zeit immer mehr Flachtassen ausgeführt. Kriterien für die Dimensionierung der Kühltassen sind einerseits Mindestwassertiefen auf der Beregnungsfläche, um der Gefahr einer durch Regeneintrag verursachten Betonerosion und der Lärmerzeugung entgegenzuwirken, und andererseits die Einhaltung einer möglichst niedrigen Freibordhöhe in der Tasse zum Zwecke der Minimierung der Bauhöhe und der Pumpkosten. Da bei Ablaufbetrieb der Unterwasserspiegel von der Wasserspiegellage des Vorfluters abhängt, muß bei niedrigen Wasserständen im Vorfluter mittels einer Sohlschwelle die geforderte Mindestwassertiefe am Kühlturmauslauf garantiert werden.

Im Kühlturmtassenauslauf wird das Kühlwasser von einem Freispiegel- in einem Druckabfluß überführt. Bei niedrigen Flußwasserständen muß daher dafür gesorgt werden, daß sich ein Wechselsprung in möglichst großer Entfernung vom Ein-

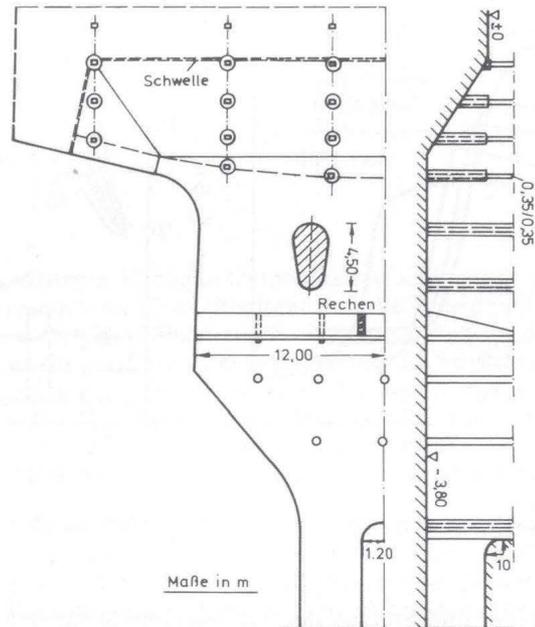
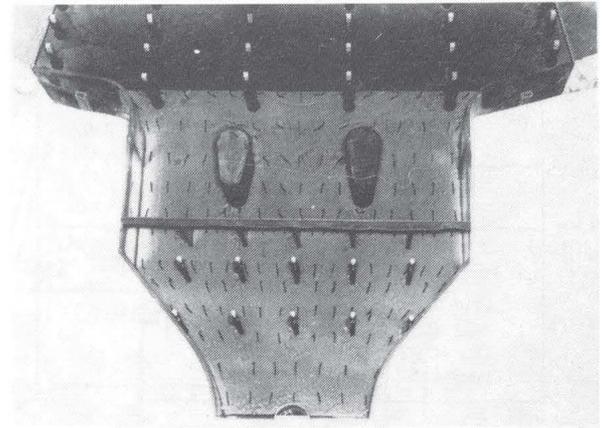


Bild 6: Auslaufbauwerk der Kühlturmtasse des Kernkraftwerks Hamm

lauf zum Druckstollen einstellt, ähnlich dem Problem der Luftaufnahme im Verteilerbauwerk. Zur Vermeidung unnötig hoher Energieverluste sollte der Auslauf möglichst strömungstechnisch günstig gestaltet werden. Eine in Modellversuchen optimierte strömungsgünstige Formgebung vom Auslaufbauwerk des Kernkraftwerks Hamm wird in Bild 6 wiedergegeben. Die durch Wollfäden sichtbar gemachte Sohlströmung zeigt an, daß Ablösungen weitgehend verhindert werden konnten.

### 5.2 Freibordbedingung

Bei der Ermittlung des Freibords in der Kühltasse spielen eine Anzahl sehr unterschiedlicher Aufstauereffekte eine Rolle. In erster Linie handelt es sich um den Aufstau durch Regeneintrag, Energieverluste durch Stützen- und Pfeilereinbauten, Sohlreibungsverluste und – bei Flachtassen mit Prielkanälen – um Verluste an den Kanal-Vereinigungsstellen. Die Wasserspiegelneigung infolge Regeneintrag ergibt sich aus der Impuls- und Energiegleichung für den zweidimensionalen Fall zu

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-(J_e - J_o) - 2Qq^*/gA^2}{1 - Q^2/gA^2 r_{hy}}$$

wobei  $J_e$  das Energieliniengefälle,  $J_o$  das Sohlgefälle,  $Q$  der Gesamtabfluß,  $q^*$  die Regenintensität,  $A$  der Abflußquerschnitt und  $r_{hy}$  der hydraulische Radius im Abflußquerschnitt (Bild 10) bedeuten [13]. Noch ungeklärt ist hierbei der Energieverlust infolge des tropfenartigen Wassereintrags. Zur Frage des Strömungswiderstands  $W$  bzw. der Energieverlusthöhe  $\Delta H$ ,

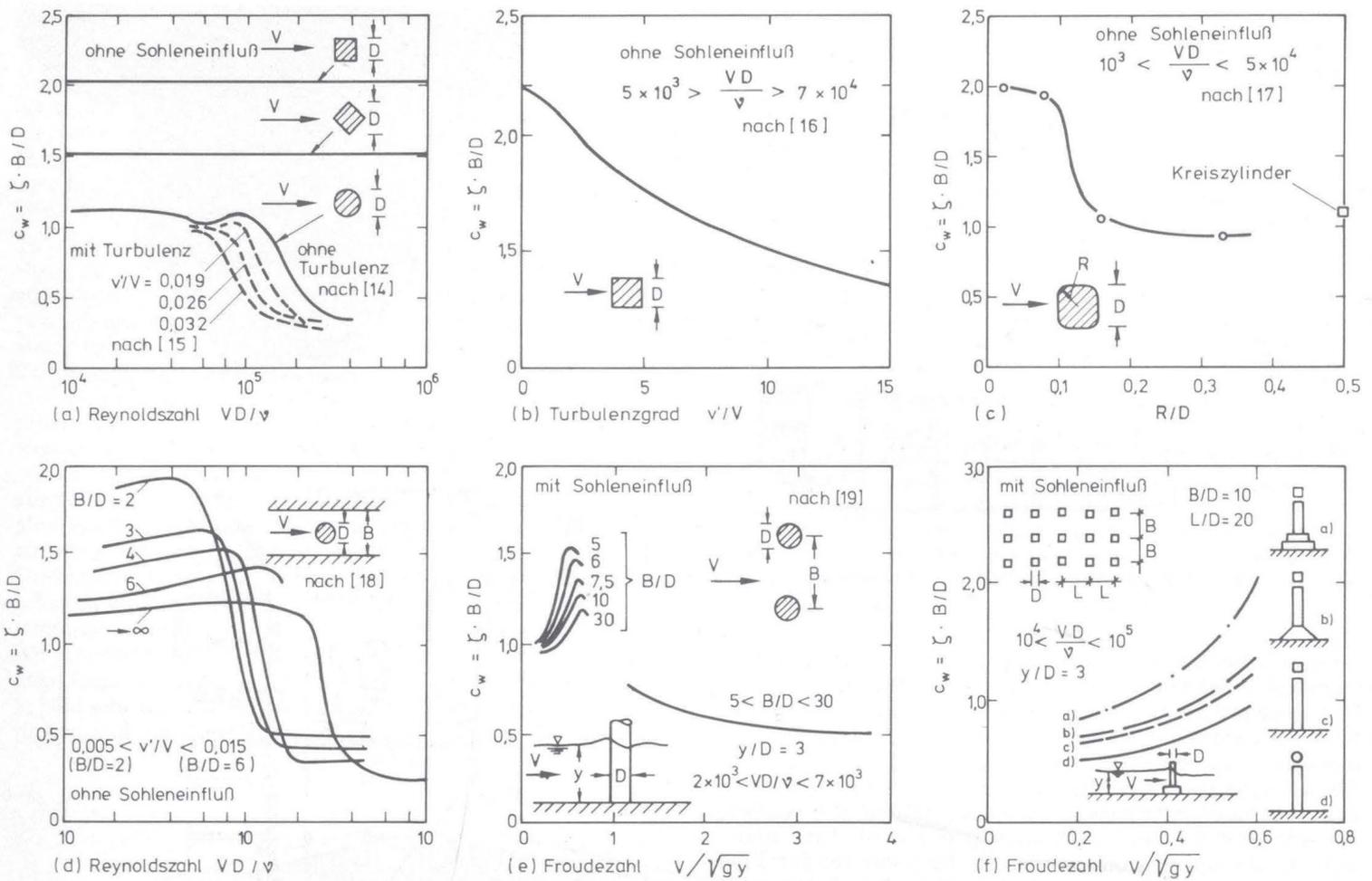


Bild 7: Widerstandsbeiwerte  $c_w$  bzw. Verlustbeiwerte für Stützen ohne (a,b,c,d) und mit (e,f) Einfluß der freien Oberfläche

die durch die Pfeiler und Stützen der Verrieselungsanlage hervorgerufen werden, gibt es eine Vielzahl von Informationen [14 bis 19], die allerdings keine unmittelbare Anwendung auf die spezielle Kühlturnersituation erlauben. In Bild 7 wurden einige wichtige Einflüsse auf den Widerstandsbeiwert  $c_w$  zusammengestellt, der mittels einer Energiebetrachtung dem Verlustbeiwert  $\zeta$ , multipliziert mit dem Verbaunverhältnis  $B/D$ , gleichgesetzt werden kann.

$$c_w \equiv \frac{W/Dy}{\rho V^2/2}; \quad \zeta \equiv \frac{\Delta H}{V^2/2g}$$

Besonders sei hier auf die starke Beeinflussung von  $c_w$  bzw.  $\zeta$  vom Turbulenzgrad der Beckenströmung (Bild 7a,b), von

selbst geringsten Abrundungen der Stützkanten (Bild 7c), dem Verbaungrad (Bild 7d, e) und der Sockelausbildung (Bild 7f) hingewiesen. Außerdem geht aus Bild 7 deutlich hervor, daß der durch Stützen und Pfeiler verursachte Aufstau sowohl von der Froudezahl  $V/\sqrt{gy}$  als auch der Reynoldszahl  $VD/v$  beeinflusst wird.

Energieverluste durch Vereinigung zweier Freispiegelströmungen lassen sich wegen einer nach größeren Vielzahl von Einflußgrößen nur für Einzelfälle ohne Modellversuche vorhersagen [13]. Sie können jedoch aus Angaben zu Vereinigungsverlusten bei geschlossenen Querschnitten abgeschätzt werden. Als hilfreich zu diesem Zweck seien hier die Handbücher von Idel'chick [20], und Miller [21] erwähnt.\*

Die Kombination von mehreren Kühlklassen mit gleichzeitigem Regeneintrag und Kühlwasserzulauf aus Nachbarbecken stellt besonders komplexe Randbedingungen für die Dimensionierung der Becken dar. Besondere Beachtung verdient hier die Freibordeinhaltung. Wegen der mannigfaltigen zusätzlichen Energieverluste in den Verbindungskanälen und bei den Strömungsvereinigungen empfehlen sich deshalb Modelluntersuchungen, wie sie im Falle des Kernkraftwerks Isar durchgeführt wurden (Bilder 8 und 9). Bild 9 zeigt den Wasserspiegelverlauf in einem der Kühlbecken für den 100% und 50% Betrieb. Man beachte die relativ starke Wasserspiegelnegung, die durch Umlenkung des beregnenden Wassers und diverse Energieverluste verursacht ist, sowie die gute Übereinstimmung zwischen Modell- und Naturmessungen.



Bild 8: Hydromechanisches Modell (1:20) der Kühlbecken des Kernkraftwerks Isar

\*Leider findet man hierzu auch fehlerhafte Angaben – z.B. bei Rösert [22] auf S. 128 zu Stromvereinigungsverlusten bei einem Winkel =  $45^\circ$  und  $Q_1/Q_2 = 0,4$ . Eine besonders kritische Bewertung der Literatur ist deshalb angezeit.

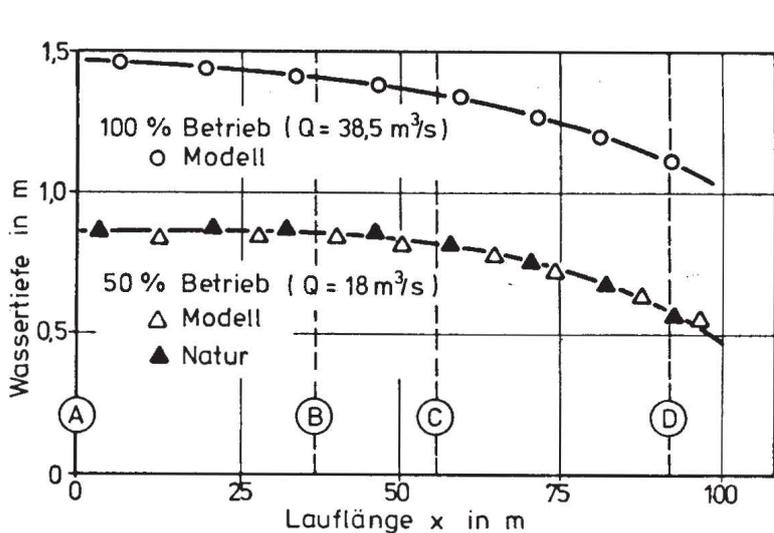
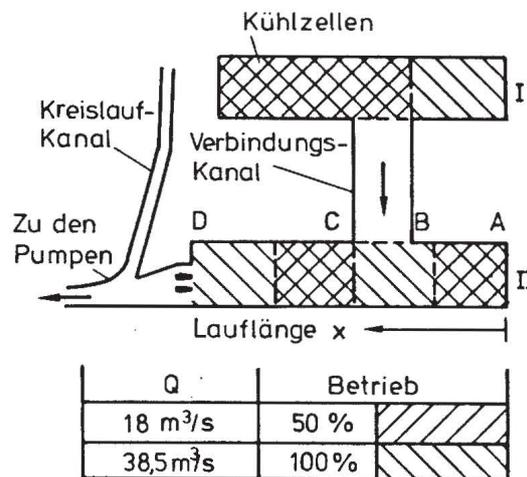


Bild 9: Wasserspiegelverlauf im Kühlbecken 2 des Kernkraftwerks Isar



### 5.3 Schlammfreihaltung

Um Ablagerungen in Kühlturmtassen möglichst zu vermeiden, muß eine Mindestgeschwindigkeit der Strömung im Bereich der Tasse vorhanden sein. Diese kritische Geschwindigkeit ist abhängig von den spezifischen Eigenschaften (Sinkgeschwindigkeit, Kohäsion) der absetzbaren Wasserinhaltsstoffe und von deren Konzentration (Bild 10). Der maßgebende Betriebsfall mit den kleinsten Fließgeschwindigkeiten ist meist der Kreislaufbetrieb mit 100% Kühlwasserdurchsatz; bei Ablaufbetrieb liegen die Fließgeschwindigkeiten in der Tasse in der Regel höher.

Wenn bei einem vorgegebenen Kühlwasser erhöhte Verschlamungsfahr besteht und daher eine Flachtasse angestrebt wird, dann empfiehlt es sich, die ohnehin verfügbare Energie des verrieselten Kühlwasserstroms zur Schlammfreihaltung auszunutzen [23]. Dies ist durchaus möglich, wenn ausreichend große hochliegende Ablaufflächen vorgesehen werden, deren Niveau und Aufgliederung im Grundriß gesehen so festgelegt wird; daß sich die Wassertiefen auf den Ablaufflächen innerhalb bestimmter Grenzen (meist 10 bis 30 cm) einstellen. Aus baulichen und betrieblichen Gründen sind die hochgelegten horizontalen Ablaufflächen sehr vorteilhaft: die Stützlänge der Pfeiler wird kürzer, die Auftriebssicherheit der Tasse wird erhöht und der Erdaushub verringert.

Die mittleren Fließgeschwindigkeiten  $V$  und die Wassertiefen  $y$  auf den Ablaufflächen lassen sich mit dem oben angegebenen Ansatz ausreichend genau bestimmen. Um die Fließverhältnisse auf den Ablaufflächen unabhängig von der Kühlungsart im gewünschten Bereich zu halten, müssen sogenannte Prielkanäle vorgesehen werden, die von den Ablaufflächen hydraulisch dadurch getrennt sind, daß der maximal auftretende Kanalwasserspiegel stets unterhalb des Ablaufniveaus liegt. Die Fließquerschnitte und das Sohlgefälle sollten so ausgelegt werden, daß die erforderlichen Mindestfließgeschwindigkeiten eingehalten werden (Bild 10). Für die hydraulische Dimensionierung der Entwässerungskanäle (Sohlgefälle, Breite, Tiefe) werden in der Regel Modelluntersuchungen unumgänglich sein, um den Einfluß individueller Randbedingungen wie Kühlbetriebsvorschriften und Einbauten hinreichend genau erfassen zu können. Eine rechnerische Vorstudie zur Ermittlung eines optimalen Prielkanalsystems ist jedoch äußerst wichtig und läßt sich auch mit Hilfe numerischer Modelle hinreichend realisieren.

Das hier skizzierte Konzept wurde am Kernkraftwerk Philippsburg, Block I, realisiert in Form einer Flachtasse mit einem Prielssystem (Bild 11). Im Bereich der Wasserscheide, wo die

mittleren Fließgeschwindigkeiten klein sind, ist die Wassertiefe noch so klein gehalten, daß die Beregnung mögliche Absetzerscheinungen zu verhindern vermag. In den Prielkanälen ist die mittlere Fließgeschwindigkeit im Bereich von Wassertiefen ( $y > 20$  cm) stets größer als 0,2 m/s, so daß auch hier keine Verschlamungsfahr besteht. Das Prielssystem wurde so gestaltet, daß keine absetzgefährdeten Totwasserräume entstehen und die Strömungsverluste minimal sind.

Beim Block II der gleichen Anlage, der infolge eines 50% höheren Kühlwasserdurchsatzes bei gleicher Kühltassenfläche eine höhere Berieselungsdichte besitzt, konnten die Ablaufflächen entsprechend vergrößert werden. Die Optimierung der hydraulischen Verhältnisse in der Tasse ergab hier eine Flachtasse mit einem Ring- und einem zentralen Stichkanal (Bild 12). Der Entwässerungskanal an der Peripherie der Kühltasse hat hier außerdem den Vorteil, daß im Falle des Winterbetriebs die erhöhte Beregnungsdichte in diesem Bereich der Tasse durch die größere Wassertiefe ohne Gefahr für die Zerstörung des Betons aufgefangen werden kann.

Obwohl das Wasservolumen der Tasse in beiden Fällen erheblich geringer ist als bei einer Tieftasse gleichen Durchmessers, ist es doch noch genügend groß im Vergleich zum Aufschwollvolumen im Entnahme- und Verteilerbauwerk, so daß auch im extremen Störfall des Ausfalls sämtlicher Pumpen der Wasserspiegel in der Tasse nur geringen Schwankungen unterworfen ist. Außerdem wirkt sich die Verringerung des effektiven Tassenvolumens günstig auf die Umschaltvorgänge aus, da die erforderliche Zeit zur Anhebung oder Absenkung des Wasserspiegels in der Kühltasse, die zur Abführung des Abschlämmwassers erforderlich ist, verkürzt wird.

### 5.4 Eisfreihaltung

Um eine Vereisung der Verrieselungsanlage zu verhindern, muß bei geringen Außentemperaturen vor Inbetriebnahme des Kühlturms für eine ausreichende Aufwärmung des Wassers in der Kühlturmtasse gesorgt werden. Dies kann durch Einleitung des warmen Wassers konzentriert über die Regner entlang der Peripherie der Tasse (Bild 11, 12) oder über einen Bypass bewerkstelligt werden (Bild 13). Im folgenden soll die letztere Methode anhand der Anlage KK Hamm näher dargestellt und gleichzeitig gezeigt werden, welche Vorteile kombinierte Modellversuche im Wasser- und Luftmodell bieten.

Das wesentlich kleinere und weniger aufwendige Luftmodell (Maßstab 1:75 im genannten Fall) diente zur raschen Ent-

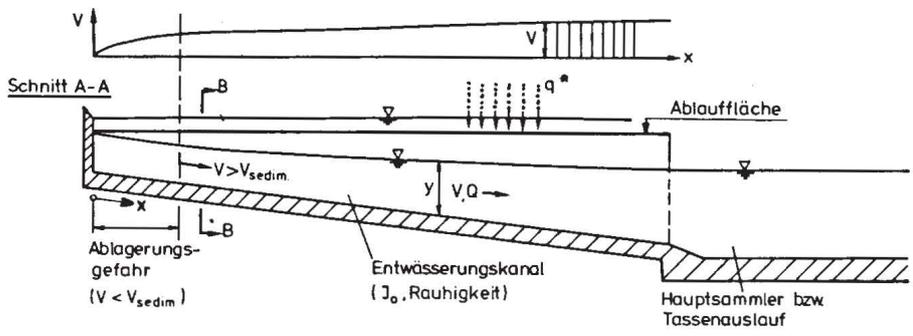
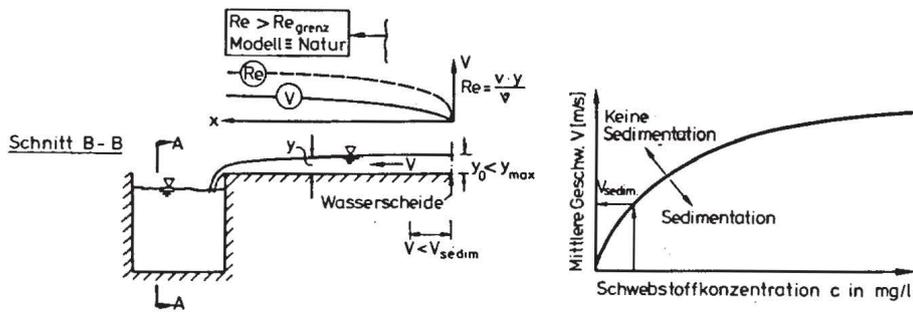


Bild 10: Sedimentation in Flachtassen

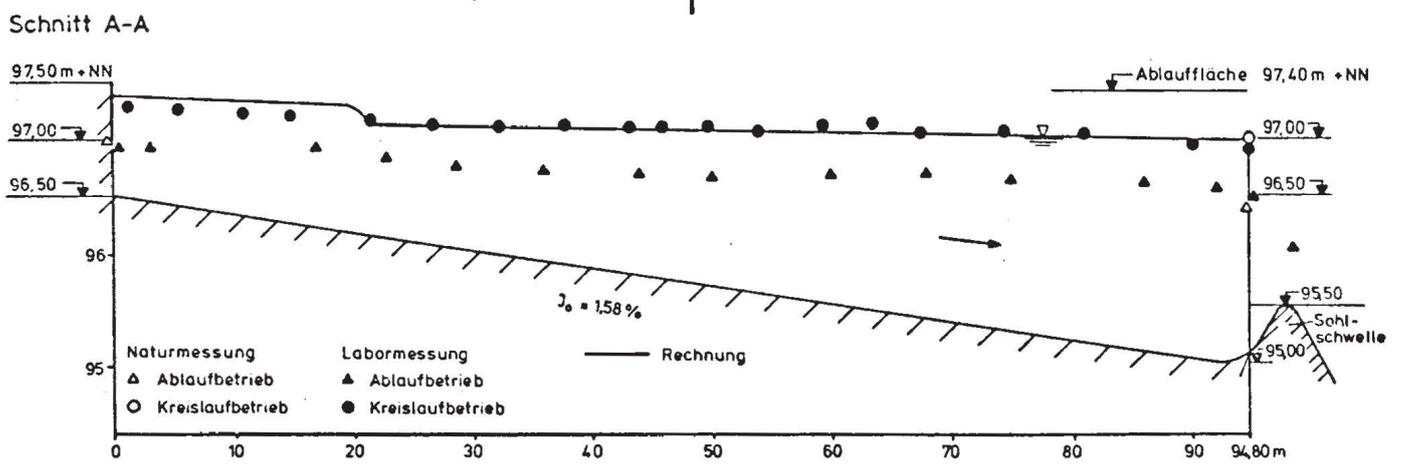
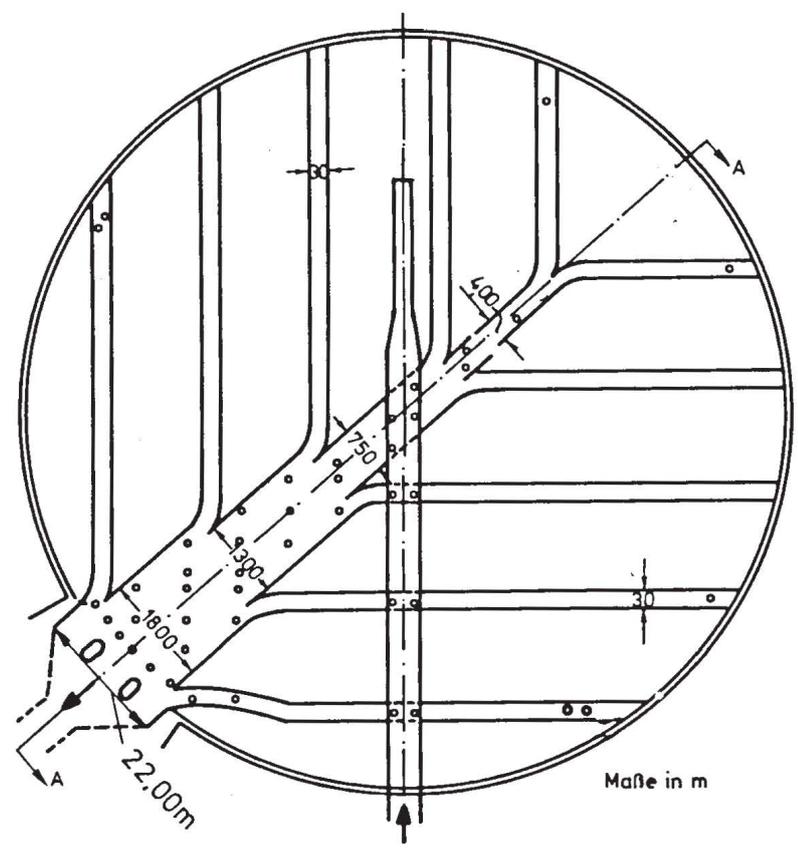


Bild 11: Gestaltung der Flachtasse des Kernkraftwerks Philippsburg, Block I

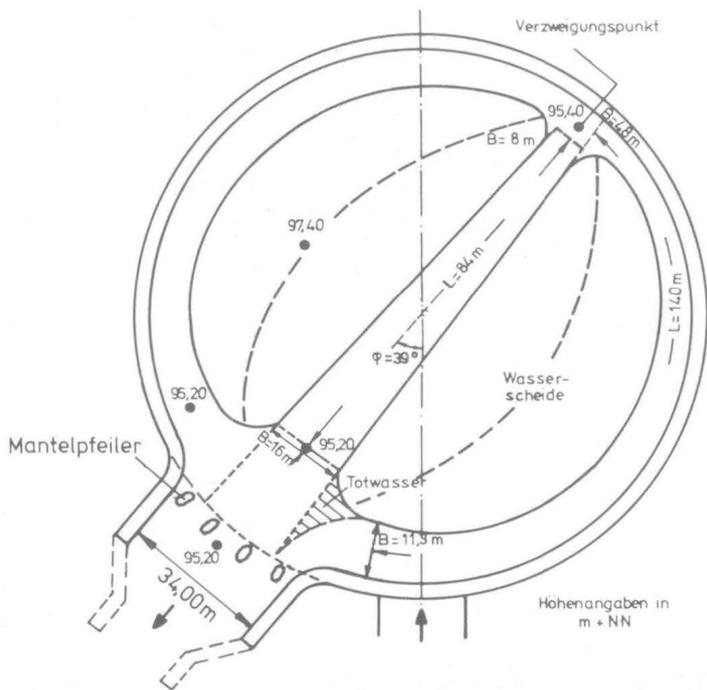


Bild 12: Gestaltung der Flachtasse des Kernkraftwerks Philippsburg, Block II

wicklung einer Bypasskonfiguration mit optimalen Durchmischungsverhältnissen in der Tasse. Im Wassermodell (Maßstab 1:20) wurden demgegenüber nur die Einhaltung der Freibordbedingung und die Strömungskräfte auf die Stützen in Bypassnähe untersucht, sowie die im Luftmodell nicht darstellbaren Auftriebs- und Welleneffekte beurteilt. Wesentlich für die Wahl des Luftmodells waren: (a) wegen der relativ kleinen Auftriebseffekte (d.h. großen densimetrischen Froudezahlen) konnten Schichtungseffekte und deren Einfluß auf den Durchmischungsvorgang ausgeschlossen werden; (b) eine ausreichend große Reynoldszahl zur Simulation der Zirkulationsströmung in der Tasse konnte realisiert werden (durch Kompressibilitätseffekte limitierte Einleitungsgeschwindigkeit bis zu 75 m/s im Modell); und (c) Strömungssichtbarmachung, Messungen und Umbauarbeiten ließen sich mit relativ geringem Aufwand durchführen. Zur möglichst vollständigen Simulation der vertikalen Geschwindigkeitsprofile wurde die halbe Kühlturmtasse im Luftmodell zwischen Glasscheiben im Abstand der doppelten Strömungstiefe ( $2 \times 1,8$  m Naturmaß) nachgebildet, so daß die Symmetrieebene dem freien Wasserspiegel entspricht.

Globale Aussagen über die Durchströmung des Beckens wurden aus der Abtragung einer Einkornschicht aus Feinsand gewonnen [6]. Da die Grenze der Sandbewegung einer bestimmten Geschwindigkeit zugeordnet ist, konnten durch schrittweise Erhöhung der Einleitungsgeschwindigkeit Bilder konstanter Sohlgeschwindigkeit ermittelt werden. Es ließ sich auf diese Weise sehr rasch zeigen, daß der ursprüngliche Bypassentwurf zu einem hydraulischen Kurzschluß führt (Bild 13a), während der Bypass nach dem Prinzip der Wandstrahleinleitung die Forderung nach möglichst rascher und vollständiger Beckendurchmischung nahezu ideal erfüllt (Bild 13b). Außerdem werden im letztgenannten Fall die von Frosteinwirkung besonders gefährdeten Gebiete nahe dem Tassenrand zuerst aufgewärmt. Die Stützen haben einen durchmischungsfördernden Einfluß (Bild 13c), schwächen aber den Warmwasserstrom entlang des Tassenrandes ab. Besonders kritisch erwies sich in dieser Beziehung die Lage und Form der Stützen unmittelbar unterstrom der Bypass-Einleitung. Auch wegen ihres Einflusses auf stehende Wellen und Wasserspiegelerhöhung am Tassenrand wurden deshalb die Stützen in diesem Bereich mit Kreisquerschnitt und kegelstumpfförmigem Sokkel zur Ausführung vorgeschlagen (vgl. Bild 7f).

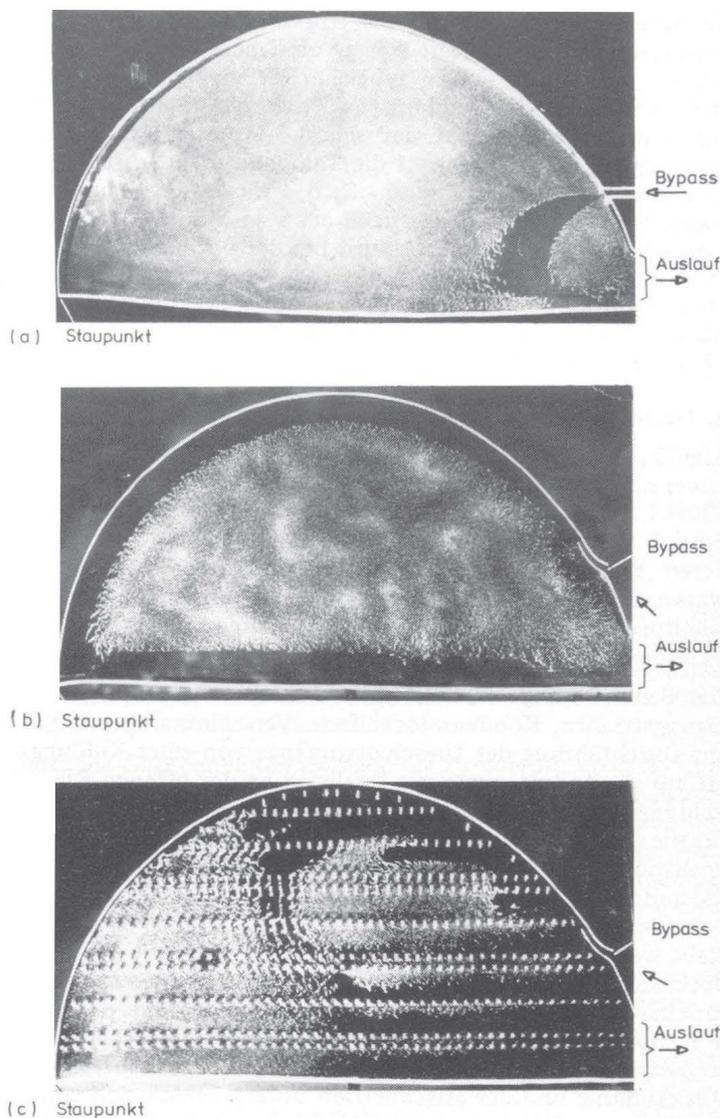


Bild 13: Strömungsverlauf am Beckenboden während Bypass-Betrieb, sichtbar gemacht durch Sand im Luftmodell. (a) Ursprünglich Entwurf; (b, c) Ausführungsvorschlag ohne und mit Stützen

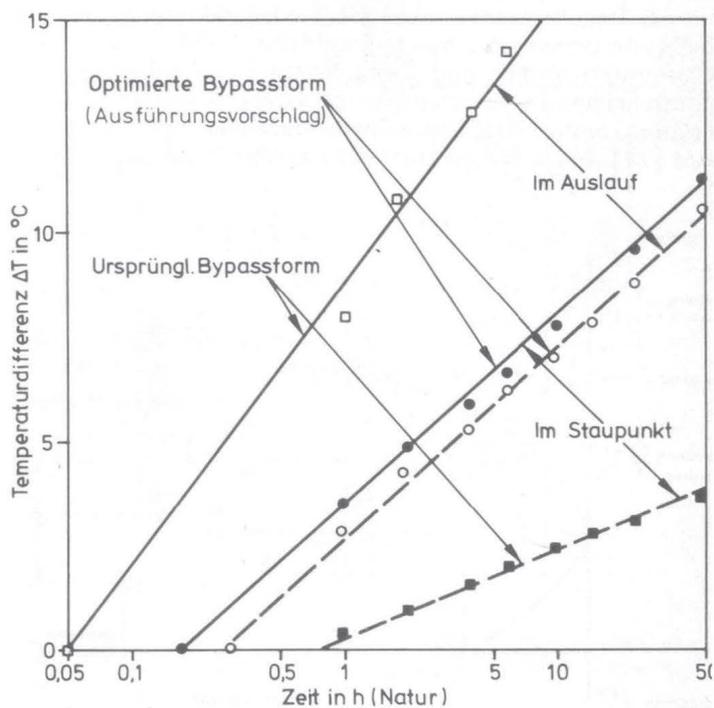


Bild 14: Zeitlicher Temperaturverlauf im Auslauf und Staupunkt der Kühlturmtasse bei Einleitung von Warmwasser über Bypass

Zur quantitativen Erfassung der Durchmischung wurden Hitzdraht-Tracermessungen mit Wärme als Tracer durchgeführt. Wie die Auftragung einiger typischer Meßergebnisse in *Bild 14* zeigt, wirkt sich der hydraulische Kurzschluß bei der ursprünglichen Bypassform so aus, daß schon 3 Minuten (Natur) nach Einbringung der Wärme front die Temperatur im Auslauf rasch zu wachsen beginnt, während sich das Wasser am Staupunkt gegenüber dem Auslauf erst nach etwa 45 Minuten zu erwärmen beginnt. Demgegenüber wird bei der optimalen Bypassform ein wesentlich besserer Massenaustausch erreicht, charakterisiert durch den späteren Anstieg der Wassertemperatur im Auslauf und den nahezu gleichen Temperaturanstieg an den zwei extremen Meßstellen im Strömungsfeld.

## 6 Durchflußsteuerung

Allgemein ist das Kühlsystem hydraulisch so ausgelegt und dimensioniert, daß bei den vorgesehenen Kühlungsarten bei 100% Leistungsabgabe und störungsfreiem Betrieb allein die Förderpumpen den Kühlwasserstrom kontrollieren. Bei Frischwasserkühlung stellen allein die Hauptkühlwasserpumpen und bei Ablauf- und Kreislaufkühlung auch die Kühlurmpumpen das entscheidende Element des hydraulischen Teils der Regelung des Kühlwasserdurchsatzes dar.

Zur Beherrschung von Störfällen (Ausfall von Pumpen, Reinigungsstraßen, Kondensatorhälften, Verschlußtafeln u.a.), zur Durchführung der Umschaltvorgänge von einer Kühlungsart auf die andere sowie zur Realisierung der offenen Rückkühlung und des Mischbetriebes müssen zusätzliche Regulierorgane (meist Rollenschütze oder Fischbauchklappen, *Bild 15*) vorhanden sein. Bei den Umschaltvorgängen müssen durch die zeitlich richtige Abfolge der Betätigung der betreffenden Schütze die Wasserspiegel- und Abflußverhältnisse so eingestellt werden, daß die Kühlwasserpumpen jederzeit den Soll-durchsatz ohne Unterschreitung des erforderlichen Zulaufdruckes fördern können. Hierbei werden die Förderpumpen je nach Typ durch Änderung von Drehzahl oder Schaufelradstellung in den neuen Betriebspunkt gefahren. Die offene Rückkühlung und der Mischbetrieb unterscheiden sich von den anderen Kühlungsarten im Hinblick auf die Durchflußsteuerung prinzipiell dadurch, daß der Wasserstand des Vorfluters als hydraulische Randbedingung die Abflußverhältnisse im Kühlsystem zusätzlich beeinflusst und daher als variabler Parameter in die Regelung des Kühlwasserstroms eingeht.

Für die Auswahl der Reguliereinheit ist die Abflußcharakteristik der Regulierorgane sowie die Stellcharakteristik des Antriebs von Bedeutung. Aus hydraulischer Sicht ist hier zwischen unterströmten und überströmten Regulierorganen zu unterscheiden. Im ersteren Fall ist darauf zu achten, daß die umströmte Unterseite schwingungssicher ausgebildet wird [24]. Bei größeren Durchtrittsgeschwindigkeiten müs-

sen außerdem die Strömungsberandungen im unmittelbaren Bereich des Schützes erosions- und kavitationssicher ausgepanzert werden. Die zur Positionierung der Verschlußorgane notwendigen Antriebsaggregate müssen auf die Regulierorgane so abgestimmt werden daß sich eine möglichst günstige Steuercharakteristik ergibt. Das heißt, die Sensitivität des Systems (Verhältnis von Stellgröße zur Meßgröße (z.B.  $\Delta s / \Delta Q$ ) soll genügend groß ausgelegt werden. Dies ist i.a. dann gewährleistet, wenn möglichst große Stellwege  $\Delta s$  (bzw. Stellzeiten) für eine neue Positionierung benötigt werden. Demnach ist ein überströmtes Steuerorgan (z.B. eine Fischbauchklappe, *Bild 15*) für kleinere Abflüsse, meist steuerungsfreundlicher als ein unterströmtes Steuerorgan (z.B. Rollenschütze), während es bei größeren Abflüssen umgekehrt ist.

## Schrifttum

- [ 1 ] Zimmermann, C., H. Kobus: Wärmebelastung und Wärmeabfuhrvermögen eines Flusses. *Energie*, Heft 7, 1973
- [ 2 ] Kinzelbach, W.: Numerische Untersuchungen über den optimalen Einsatz variabler Kühlsysteme einer Kraftwerkskette am Beispiel Oberrhein. *Mitteilungen Heft 44*, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1978
- [ 3 ] Naudascher, E., L. Fink, M. Schatzmann: Das Ausbreitungsverhalten von Abwärme- und Abwassereinleitung in Gewässer. E. Schmidt-Verlag, zur Veröffentlichung 1979 vorgesehen
- [ 4 ] Zielke, W.: Strömungsschwankungen in Kühlwasserkreisläufen und ihre numerische Simulation, *Wasserwirtschaft*, Heft 5, Mai 1979
- [ 5 ] Kobus, H.: Wasserbauliches Versuchswesen: *Mitteilungen des Deutschen Verbands für Wasserbau und Kulturbau (DVWK)*, Heft 39, 1978
- [ 6 ] Westrich, B.: Luftmodelle für Wasserbauliche Aufgaben, in: *Mitteilungen des Deutschen Verbands für Wasserbau und Kulturbau (DVWK)*, Heft 39, 1978
- [ 7 ] Westrich, B., H. Kobus: Untersuchungen am Luftmodell zur strömungstechnisch günstigen Gestaltung von Entnahmebauwerken an Flüssen. *GWF - Wasser/Abwasser*, Heft 7, Juli 1976
- [ 8 ] Mosonyi, E., E. Naudascher: Die wasserbaulichen Auswirkungen eines Kernkraftwerks der BASF auf den Rhein bei Ludwigshafen. *Gemeinsame Modelluntersuchungen am Theodor-Rehbock-Flußbaulaboratorium und am Institut für Hydromechanik*, Universität Karlsruhe (unveröffentlicht)
- [ 9 ] Hoerner, S.F.: *Fluid-Dynamic Drag*. Eigenverlag, 1965
- [ 10 ] Crandall, S.H., S. Vigander, P.A. March: Destructive Vibration of Trashracks due to Fluid-Structure Interaction. *J. of the Eng. Industry*, Trans. ASME, 1359-1365, Nov. 1975
- [ 11 ] Jain, A.K., K.G. Ranga Ratju, R.J. Garde: Vortex Formation at Vertical Pipe Intakes. *Proc. ASCE*, Hy 10, 1429-1445, 1978
- [ 12 ] Kobus, H.: Bemessungsgrundlagen und Anwendungen für Luftschleier im Wasserbau. Heft 7, *Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis*, Erich Schmidt Verlag 1973
- [ 13 ] Ven to Chow: *Open-Channel Hydraulics*, McGraw Hill Book Company, Inc. New York, Toronto, London, Tokyo, 1959
- [ 14 ] Wieselsberger, G.: *Der Widerstand von Zylindern. Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt Göttingen*, II. S. 23-28, 1923
- [ 15 ] Fage, A., J.H. Warsaw: The Effects of Turbulence and Surface Roughness on the Drag of a Circular Cylinder. *Aero. Research Council*, London 1929
- [ 16 ] Laneville, A., I.S. Gartshore, G.V. Parkinson: An Explanation of Some Effects of Turbulence on Bluff Bodies. *Proc. of the 4th International Conference of Wind Effects on Buildings and Structures*. Heathrow, 1975
- [ 17 ] Delany, N.K., N.E. Sorensen: *Low-Speed Drag of Cylinders of Various Shapes*. NACA, Techn. Note 3038, 1953
- [ 18 ] Richter, A.: *Strömungskräfte auf starre Kreiszyylinder zwischen parallelen Wänden*. Diss. Universität Karlsruhe, 1973
- [ 19 ] Hsieh, T.: *Resistance of Cylindrical Piers in Open-Channel Flow*. *Proc. ASCE*, Hy 1, 1964
- [ 20 ] Idel'chik, J.E.: *Handbook of Hydraulic Resistance*. Translated from Russian, Published by the Israel Program for Scientific Translation, No. 1505, 1966
- [ 21 ] Müller, D.S.: *International Flow Systems*. Published by BHRA Fluid Engineering, Vol. 5, 1978
- [ 22 ] Rössert, R.: *Hydraulik im Wasserbau*. Verlag R. Oldenburg, München, Wien, 1964
- [ 23 ] Kisisel, I.T., R.A. Rao, J.W. Delleur: *Turbulence in Shallow Water Flow under Rainfall*. *Proc. ASCE*, EM 1, 31-53, 1973
- [ 24 ] Naudascher, E.: *Entwurfskriterien für schwingungssichere Talsperrenverschlüsse*, *Wasserwirtschaft* Jg. 62, Heft 1, 1972

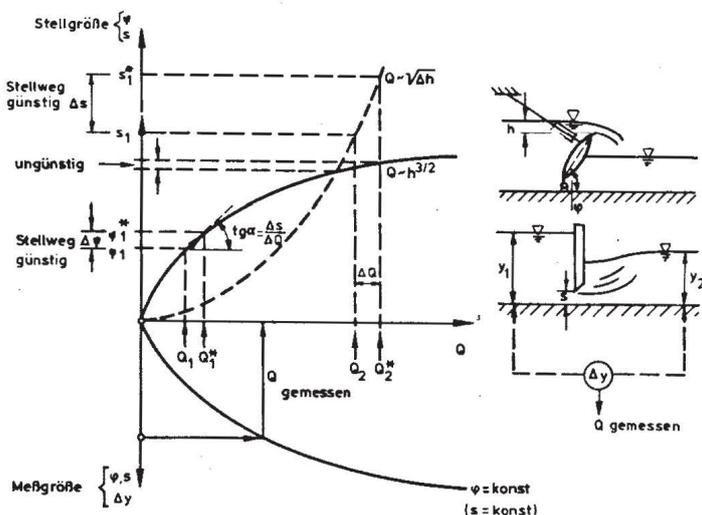


Bild 15: Steuercharakteristik von Regulierorganen

Anschriften der Verfasser: Prof. Dr. H. Kobus und Dr.-Ing. B. Westrich, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 61, 7 Stuttgart 80

Prof. Dr.-Ing. E. Naudascher und Dr.-Ing. A. Richter, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe, Kaiserstr. 12, 75 Karlsruhe 1