

Zeitschrift:	Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie
Herausgeber:	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band:	63 (1971)
Heft:	4
Artikel:	Die Kühlung von Kernkraftwerken mit Flusswasser : Untersuchungen der VAW über die Strömungsverhältnisse bei der Fassung und der Rückgabe
Autor:	Vischer, Daniel
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-921201

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 08.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die hier kurz gestreiften Probleme, die beim Eichen auftreten können, sind bei weitem nicht vollständig aufgezählt. Da von der industriellen Seite her für die Turbinen- und Pumpenabnahme immer genauere Messungen verlangt werden, müssen auch die Flügeleichungen stets verfeinert werden, was immer wieder neue Probleme aufwirft, so dass die Versuche nie abreissen werden.

Trotz den vielen Problemen wird die Flügelmessung bei Vergleichen mit andern Durchflussmessmethoden immer wieder als Basis benutzt. Das Vertrauen in die Flügelmessungen ist sicher gerechtfertigt, beweisen doch gerade diese Vergleichsversuche, wie genau mit diesen Instrumenten gemessen werden kann.

In den 75 Jahren seit Bestehen der ersten Eichanlage in Papiermühle wurden über 15 000 Eichungen durchgeführt. Der Jahresdurchschnitt der letzten 20 Jahre liegt bei etwas über 400 Eichungen, wobei im Jahre 1949 als Spitzenwert annähernd die doppelte Anzahl erreicht wurde. Auf unser Amt entfallen ca. 60 Prozent. Die restlichen 40 Prozent verteilen sich auf Kunden aus der Schweiz und auf Auftraggeber aus allen fünf Kontinenten.

Adresse des Verfassers:
M. Fischer, Sektionschef im Eidg. Amt
für Wasserwirtschaft, Bollwerk 27, 3011 Bern

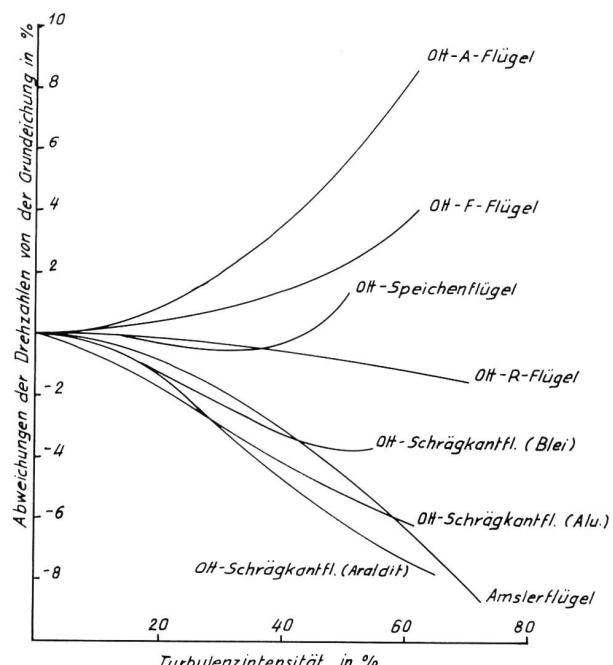


Bild 13

DIE KÜHLUNG VON KERNKRAFTWERKEN MIT FLUSSWASSER

Untersuchungen der VAW über die Strömungsverhältnisse bei der Fassung und der Rückgabe¹⁾)

Daniel Vischer

DK 628.3 : 621.039 : 621.311

Der ständig wachsende Bedarf an elektrischer Energie ruft zwangsläufig nach einer Bereitstellung neuer Kraftwerke. Diese Bereitstellung konnte in der Schweiz bisher durch den systematischen Ausbau der Wasserkräfte erfolgen. Da diese Möglichkeit jedoch heute nahezu ausgeschöpft ist, müssen nun andere Energiequellen herangezogen werden. Hierfür kommt praktisch nur die Nutzung von Bodenschätzen in thermischen Kraftwerken in Frage.

Bekanntlich wird bei den konventionellen Dampfkraftwerken der Wärmeinhalt von fossilen Brennstoffen (Kohle und Mineralöl) zur Erzeugung von Dampf verwendet, der die Dampfturbinen und die mit ihnen gekuppelten Generatoren antreibt. Dabei werden aber nur ungefähr 35 bis 40 % des Wärmeinhaltes in elektrische Energie umgewandelt, während die restlichen 60 bis 65 % als Abwärme anfallen. Davon gehen ungefähr 6 bis 10 % als Rauchgasabwärme direkt in die Atmosphäre, der verbleibende Rest muss abgeführt werden. Die ebenfalls als konventionell ansprechbaren Gasturbinenkraftwerke, bei denen die in einer Brennkammer erhitzten Gase die Turbinen antreiben, weisen noch geringere Anlagewirkungsgrade, nämlich etwa 20 bis 25 % auf.

Die erst in den letzten 20 Jahren entwickelten Kernkraftwerke sind ebenfalls Dampfkraftwerke. Sie erzeugen den Dampf jedoch mittels der Wärme, die bei der im Reaktor gesteuerten Kernspaltung (Spaltung von Uran) frei wird. Die Umwandlung der Wärmemenge in elektrische Energie gelingt dabei zu 30 bis 35 %, so dass die Abwärme mit entsprechend 65 bis 70 % leicht grösser ist

als bei den konventionellen thermischen Kraftwerken. Ueberdies entweicht bei den Kernkraftwerken keine Abwärme durch Rauchgase in die Atmosphäre.

Trotz des niedrigeren Anlagewirkungsgrades sind die Kernkraftwerke bei der Erzeugung von Grundlastenergie heute wirtschaftlich konkurrenzfähig. Es ist deshalb verständlich, wenn bei der Gegenüberstellung mit Projekten von konventionellen Kraftwerken die an Bedeutung zunehmenden Umweltprobleme ausschlaggebend sind. Jedenfalls haben diese in der Schweiz die Waage offensichtlich zu Gunsten der Kernkraftwerke gesenkt, weil es scheint, dass die Gefahr einer radioaktiven Verseuchung durch die Kernkraftwerke leichter zu bannen ist, als diejenige einer Luftverpestung durch die konventionellen Kraftwerke, während die Schwierigkeiten bei der Abführung der Abwärme bei beiden Kraftwerkstypen etwa die gleichen sind.

Aus diesen Erwägungen heraus wird nun in der Schweiz die Verwirklichung von Kernkraftwerken stark gefördert. So konnten die Nordostschweizerischen Kraftwerke bereits im Jahre 1969 als erste Anlage das Kernkraftwerk Beznau I in Betrieb nehmen, und sie planen für 1972 die Fertigstellung der Zwillingsanlage Beznau II. Vorher, das heisst 1971 (also in diesem Jahr), soll das von den Bernischen Kraftwerken gebaute Kraftwerk Mühleberg seine Produktion aufnehmen. Und die auch von anderen Energieversorgungsgruppen verfolgten Projekte für die Kernkraftwerke Kaiseraugst und Leibstadt sind bereits fast bis zur Ausführungsreife gediehen. Es ist ferner bekannt, dass noch einige weitere Projekte bearbeitet werden, wie Gösgen, Graben, Rheinklingen, Rüti, Verbois usw.

¹⁾ Einführungsvorlesung an der ETH Zürich vom 11. Februar 1971.

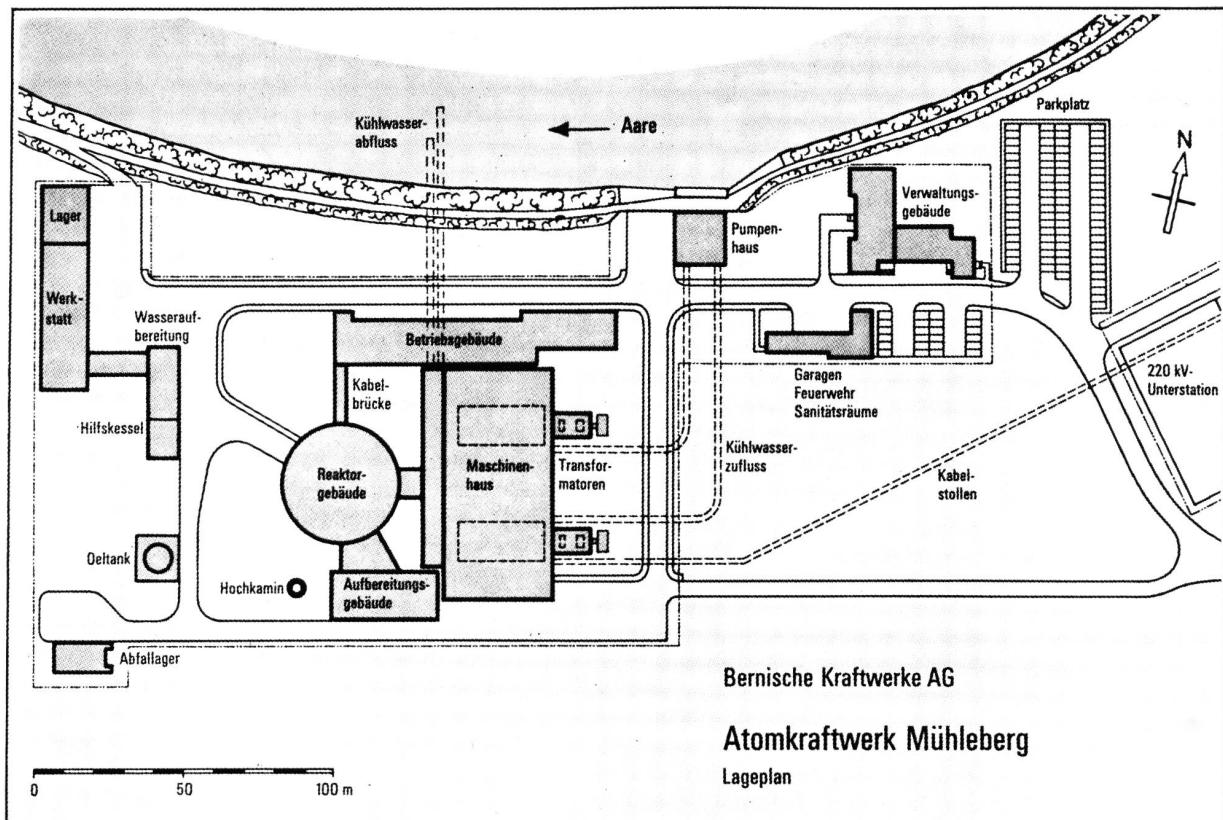


Bild 1 Lageplan des Kernkraftwerks Mühleberg (306 MW_e)

GRUNDSÄTZLICHE KÜHLPROBLEME

Was geschieht nun mit der Abwärme der genannten Kernkraftwerke?

Der grösste Teil der Abwärme fällt bei den Dampfkraftwerken in den Kondensatoren an. Diese haben die Aufgabe, den Dampf nach seinem Durchgang durch die Dampfturbinen mittels Wärmeentzug zu verflüssigen. Damit wird dort ein Unterdruck erzeugt, der die nutzbare Dampfdruckspanne und damit die Kraftwerksleistung erhöht. Als Kühlmedium dient Wasser, das bei Kernkraftwerken heute in Mengen von 150 bis 200 l/h und kW elektrischer Leistung durch die Kondensatoren geführt wird und sich dabei um 8 bis 10 Grad C erwärmt. Man unterscheidet die Kühlsysteme unter anderem danach, ob das Kühlwasser nur einmal im Durchlauf verwendet (Durchlaufkühlung) oder ob es mehrmals, sozusagen dauernd, im Umlauf benutzt wird (Umlaufkühlung). Bei der Durchlaufkühlung ist man also darauf angewiesen, das Kühlwasser einem Gewässer zu entnehmen und diesem nach Gebrauch wieder zurückzugeben. Bei der Umlaufkühlung muss man dagegen für eine Rückkühlung des erwärmten Wassers mittels Luft besorgt sein; der Wärmeaustausch geschieht dabei meistens in Kühlturnen (seltener mit Kühlteichen). Im ersten Fall wird die Abwärme also einem benachbarten Gewässer übertragen und im zweiten Fall der umgebenden Luft. Leider hat sich eine Nutzung der Abwärme, etwa zu Heizzwecken in angrenzenden Siedlungen, bei uns bis jetzt als unwirtschaftlich erwiesen.

Wie Variantenstudien zeigen, ist die Durchlaufkühlung im Vergleich zur Umlaufkühlung wesentlich billiger, sofern

das Kraftwerk unmittelbar am Ufer eines grösseren Gewässers erstellt wird. Es versteht sich jedoch von selbst, dass diesem Gewässer keine beliebige Wärmebelastung zugemutet werden kann. Zur Festlegung gewisser Grenzen setzte das Eidg. Departement des Innern deshalb eine Expertenkommission (Kommission Baldinger) ein, die ihre Untersuchungen anfangs 1968 in einem Bericht über «Gewässerschutztechnische Gesichtspunkte im Zusammenhang mit der Kühlwasserentnahme und -rückgabe bei konventionell- und nuklearthermischen Kraftwerken» festhielt. Dort werden für schwach verunreinigte (β -mesosaprobe) Flüsse und für angrenzende Grundwasservorkommen folgende Richtlinien formuliert:

1. Die Temperatur des gebrauchten Kühlwassers soll 30 Grad C, ausnahmsweise 35 Grad C, nicht überschreiten.
2. Nach jeweiliger Durchmischung des erwärmten Kühlwassers mit dem Flusswasser darf der Fluss an keiner Stelle um mehr als 3 Grad C aufgewärmt und nicht über 25 Grad C erwärmt werden.
3. Nutzbares Grundwasser darf durch Infiltration von erwärmtem Kühl- oder Flusswasser nicht über 15 Grad C erwärmt werden.

Die als zulässig erachtete Wärmebelastung wird also anhand von Grenztemperaturen festgelegt. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich das erwärmte Kühlwasser vollständig mit dem Flusswasser vermischts, was natürlich nur bei einer entsprechenden Mischströmung geschieht. Demzufolge muss das Rückgabebauwerk möglichst dort angeordnet werden, wo diesbezüglich günstige natürliche Bedingungen herrschen, und derart gestaltet sein, dass die erwünschte Mischströmung angeregt wird.

Daraus ergibt sich, dass die Durchlaufkühlung von thermischen Kraftwerken mit Flusswasser ein genaues Studium des Rückgabebauwerkes und der anschliessenden Flussstrecke erheischt. Die Einleitung einer bestimmten Abwärme stellt dabei aber nicht den einzigen Eingriff in das Flussregime dar. Denn zu der Diskontinuität der Wärmebelastung gesellt sich zwangsläufig noch eine Diskontinuität des Abflusses. Die letztere betrifft jedoch nicht nur die Rückgabe, sondern auch die Fassung, so dass auch das Fassungsbauwerk in das erwähnte Studium miteinzubeziehen ist. Gesamthaft gesehen stellen sich etwa folgende Fragen:

1. Wird die Fassung bei jedem Abfluss (HW, MW, NW) derart angeströmt, dass die erforderliche Kühlwassermenge gefasst werden kann, ohne dass zuviel Fremdstoffe (Treibzeug, Schwebstoffe, Geschiebe, Eis) eindringen?
2. Kann der unterhalb der Fassung verbleibende Abfluss die anfallenden Fremdstoffe bis zur Rückgabe weitertransportieren, so dass keine unerwünschten Ansammelungen (Auflandungen usw.) entstehen? Verhindert die entsprechende Strömung eine Rezirkulation des Kühlwassers?
3. Gewährleistet die Rückgabe bei jedem Abfluss die gewünschte Durchmischung und damit Verwirbelung des warmen Kühlwassers mit dem Flusswasser, ohne dass eine Erosion des Flussbettes auftritt?

Neben diesen mehr flussbaulichen Fragen sind natürlich auch die mannigfaltigen Probleme zu behandeln, die sich bei Interferenzen mit anderen Wassernutzungen, nämlich mit der Wasserversorgung, der Wasserkraftnutzung, der Schiffahrt, der Fischerei, mit dem Landschaftsschutz, usw. ergeben. Einen interessanten Einblick in diese Vielfältigkeit vermitteln die Versuche, welche die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) an der ETH-Zürich in den letzten Jahren für die Kernkraftwerke Mühleberg, Leibstadt, Beznau und Kaiseraugst durchgeführt hat.

DAS KERNKRAFTWERK MÜHLEBERG

Das von den Bernischen Kraftwerken AG (BKW) zur Zeit gebaute Kernkraftwerk von 306 MW elektrischer Leistung steht, wie Bild 1 zeigt, am Ufer der Aare und benötigt rund $11 \text{ m}^3/\text{s}$ Kühlwasser. Dies stellt bei Niederwasser etwa die Hälfte des dortigen Aareabflusses dar, was einen verhältnismässig hohen Anteil bedeutet. Dementsprechend standen bei der Projektierung der Kühlwasserfassung und der -rückgabe auch folgende zwei Fragen im Vordergrund:

1. Wie gross muss der Abstand zwischen der Fassung und der Rückgabe gewählt werden, damit selbst bei Niederwasser keine Rezirkulation entsteht?
2. Ist der Fremdstofftransport, insbesondere der Geschiebetransport, auf der Aarestrecke zwischen der Fassung und der Rückgabe bei allen geschiebeführenden Abflüssen gewährleistet?

Zur ersten Frage kann ergänzend bemerkt werden, dass eine Rezirkulation, also ein Rückströmen des gebrauchten Kühlwassers bis zur Fassung, dem Prinzip der Durchlaufkühlung zuwider laufen würde. Längs der kurzen Fließstrecke im Aarebett könnte sich ja das gebrauchte Kühlwasser praktisch nicht abkühlen und müsste folglich bei einer Wiederverwendung weiter erwärmt werden. Dadurch würde der — wie einleitend erwähnt — systembedingt schlechte Wirkungsgrad des Kernkraftwerkes noch weiter vermindert, und zudem würde die Grenztemperatur des

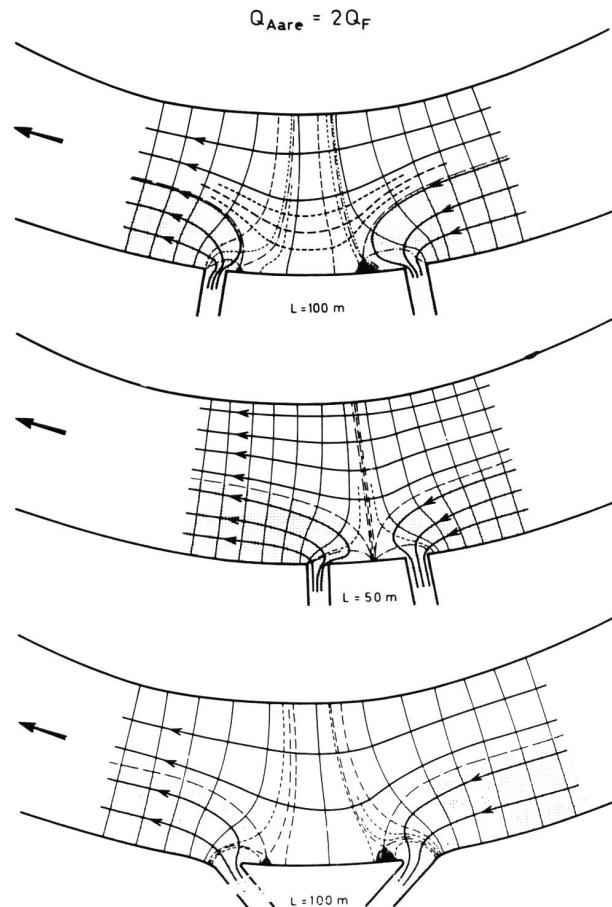


Bild 2 Kernkraftwerk Mühleberg: Potentialströmung im Bereich der Fassung und der Rückgabe. Abschätzung der Rezirkulationsgefahr für 3 Fälle

Kühlwassers gemäss den Richtlinien der Kommission Baldinger eher erreicht.

Aus dieser Sicht erteilten die BKW der VAW den Auftrag, den erforderlichen Abstand zwischen der Fassung und der Rückgabe anhand einer qualitativen Untersuchung der Strömungsverhältnisse abzuschätzen. Auf Grund einer Vorabklärung zeigte es sich nämlich, dass die bei Niederwasser sehr ruhige Aareströmung in erster Näherung als ebene Potentialströmung betrachtet und auf einem elektrischen Analogiegerät nachgebildet werden kann.

Dieses Analogiegerät wurde von der VAW zwar in einem anderen Zusammenhang entwickelt; es erlaubt aber grundsätzlich die Analyse eines Potentialfeldes in einem leitenden Papier (Graphitfolie) mit angeschlossenen Elektroden: das Papier weist jeweils im wesentlichen die Form des zu untersuchenden Gerinnes auf, und die Anschlüsse entsprechen den Zu- und Abflüssen. Das Potential der einzelnen Punkte lässt sich mittels einer Tastspitze abgreifen, wobei das Gerät so konstruiert ist, dass es einer einzelnen Potentiallinie automatisch folgt und diese mittels eines Pantographen auf einen Plan überträgt. Dort können die zugehörigen Stromlinien dann als orthogonale Trajektorien von Hand ergänzt werden. Auf Grund einer Reihe von Nachbildungen auf dem Analogiegerät (Bild 2) konnte festgestellt werden, dass die Gefahr einer Rezirkulation in Mühleberg gebannt ist, wenn der Abstand zwischen der Fassung und der Rückgabe mindestens 80 m beträgt. Den Unzulänglichkeiten der Methode wurde dabei mit einem angemessenen Zuschlag Rechnung getragen.

Zur Beantwortung der zweiten Frage musste zunächst der Zusammenhang zwischen der Aarewasserführung und dem Geschiebetrieb abgeklärt werden. Dabei konnte anhand von Geschiebeproben nachgewiesen werden, dass seit der Inbetriebnahme des oberliegenden Flusskraftwerkes mit seinem ausgedehnten Stausee (Wohlensee) keine nennenswerte Geschiebezufluss mehr stattfindet. Dementsprechend ist zwischen der Fassung und der Rückgabe auch keine besondere Auflandung zu erwarten. Die Aare neigt auf der ganzen Strecke eher zur Erosion.

DAS KERNKRAFTWERK LEIBSTADT

Die vom Studienkonsortium Kernkraftwerk Leibstadt geförderte Anlage ist am Rhein unmittelbar flussaufwärts des Stauwehrs und der Fassung der Wasserkraftanlage Albruck-Dogern geplant (Bild 3). Ihr Kühlwasser soll dem Rhein entnommen und etwas weiter flussabwärts zurückgegeben werden. Je nach der realisierbaren Ausbaugröße wurde ursprünglich mit einer Kühlwassermenge von 30 bis 120 m³/s gerechnet; die mittlere Rheinwasserführung erreicht im Vergleich dazu 1030 m³/s. Unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten stellten sich bei der Projektierung der Kühlwasserversorgung folgende Fragen:

1. Wie muss die Rückgabe angeordnet und gestaltet werden, damit keine Rezirkulation entsteht und eine möglichst gute Durchmischung des erwärmten Kühlwassers mit dem Rheinwasser gewährleistet wird?
2. Wie fällt diesbezüglich der Vergleich zwischen einer Rückgabe mittels Rohren in Flussmitte (Rohrlösung) und einer Rückgabe am Ufer aus? Uebt der Betrieb der Wasserkraftanlage (offenes Wehr, geschlossener Kanal und umgekehrt) einen Einfluss aus?
3. Mit welchen Lösungen kann einer allfälligen zukünftigen Flussschiffahrt Rechnung getragen werden?

Im Einvernehmen mit den zuständigen Behörden beauftragte das Studienkonsortium die VAW mit der Beantwortung. Diese schlug eine möglichst getreue Nachbildung der Verhältnisse in einem hydraulischen Modell vor. Es war von ihr aber zunächst abzuklären, unter welchen Voraussetzungen eine befriedigende Ähnlichkeit zwischen Modell- und Naturvorgängen herrscht.

Aus den zahlreichen Versuchen für andere wasserbauliche Projekte war bekannt, dass die turbulente Naturströmung nach dem Gesetz von Froude gut nachgebildet werden kann, sofern die Modellströmung ebenfalls turbulent ist. Hingegen stellt die Berücksichtigung der Wärmeausbreitung gewisse Probleme. Grundsätzlich kommt eine solche Wärmeausbreitung für

- a) das Flusswasser
- b) die Atmosphäre und
- c) das Flussbett (Sohle und Ufer)

in Frage. Für die kurze im Modell betrachtete Flussstrecke lässt sich aber, wie einige Abschätzungen ergaben, der Wärmeübergang vom Kühlwasser in die Atmosphäre und in das Flussbett vernachlässigen. Ferner zeigte es sich, dass bei der Wärmeübertragung vom Kühlwasser in das Flusswasser die turbulente Diffusion (erzwungene Konvektion) die Hauptrolle spielt und folglich als turbulenten Vorgang mit dem Gesetz von Froude gut nachgebildet werden kann. Die Wärmeübertragung infolge freier Konvektion, molekularer Diffusion und Wärmeleitung ist von untergeordneter Bedeutung und deshalb vernachlässigbar.

Auf Grund dieser Abklärung konnte also das Modell errichtet werden. Es wies den Massstab 1:70 auf, und seine Zuverlässigkeit hinsichtlich der Nachbildung der Strömungsverhältnisse wurde anhand der Messung einiger

Oberflächengeschwindigkeiten des Rheins bestätigt. Die turbulente Wärmediffusion wurde mittels Färbung des Kühlwassers sichtbar gemacht und vornehmlich visuell beurteilt.

Wie die Versuche zeigten, ist die Lösung mit Rückgabe am Ufer praktisch mit der Rohrlösung gleichwertig, wenn nur 30 m³/s an gebrauchtem Kühlwasser eingeleitet werden. Wenn hingegen 120 m³/s eingeleitet werden, ergibt die Rohrlösung eine wesentlich bessere Durchmischung, führt aber beinahe zu einer Rezirkulation (Bild 4). Diese bei Niederwasser im Rhein festgestellte Tatsache gilt im wesentlichen auch bei Rheinabflüssen bis zu 1020 m³/s, das heißt bis zu einem Abfluss, den die Wasserkraftanlage Albruck-Dogern noch verarbeiten kann. Bei grösseren Abflüssen muss deren Wehr entsprechend geöffnet werden, so dass geprüft werden musste, ob die Durchmischung dadurch wesentlich beeinflusst wird. Als kritisch wurde namentlich der Fall betrachtet, bei welchem nur eine geringe Menge an Überschusswasser durch das Wehr abgeleitet wird, weil befürchtet wurde, dieses unmittelbar bei der Rückgabe vorbestreichende Wasser könnte dort eine unzulässige Wärmebelastung erhalten. Die Versuche zeigten aber, dass die schon unmittelbar bei der Rückgabe erzwungene Mischung eine solche Belastung weitgehend ausschliesst.

Bekanntlich wird die betrachtete Rheinstrecke möglicherweise noch zu einer Wasserstrasse ausgebaut, weshalb die Belange der Binnenschifffahrt mitberücksichtigt werden mussten; wie aus Bild 3 hervorgeht, erfolgt die Wasserrückgabe des geplanten Kernkraftwerkes ja unmittelbar vor der Einfahrt zur vorgesehenen Schleuse (Projekt 1961). Durch eine entsprechende Anpassung der beiden Rückgabelösungen im Modell konnte zunächst verhindert werden, dass zuviel Kühlwasser in den oberen Vorhafen eindringt und diesen unzulässig erwärmt. Dann wurde auch nachgewiesen, dass die vorgesehenen Schiffseinheiten durch das in die Fassung dringende und bei der Rückgabe wieder aufquellende Kühlwasser in ihrer Steuerfähigkeit nicht beeinträchtigt werden und an genügend Stellen am Ufer anlegen können.

Bei der Rohrlösung hatte die VAW noch die hydraulische Ausbildung und geschiebetechnische Auswirkung der Rohre zu überprüfen. In einer Anzahl von Nebenversuchen wurde deshalb zunächst die Form der Rohraustrittsöffnungen ermittelt, wobei es namentlich darum ging, die optimale Verteilung und Vermischung des Kühlwassers schon unmittelbar beim Austritt sicherzustellen. Als zweckdienlich erwies sich hiefür schliesslich eine Lösung mit Austrittsgeschwindigkeiten in der Grössenordnung von 3 m/s. Dann musste am Hauptmodell untersucht werden, ob diese Austrittsgeschwindigkeiten zu einer unzulässigen Auskolkung der Flussohle führen. Tatsächlich zeigte es sich (Bild 5), dass sie ein beträchtliches Kolkloch mit anschliessender Düne erzeugen können, selbst wenn sie unter 30 Grad von der Sohle nach oben gerichtet sind. Zum Schutz des Rheinbettes musste deshalb ein umfangreicher Blockwurf empfohlen werden.

DAS KERNKRAFTWERK BEZNAY

Das aus den Anlagen Beznau I und II bestehende Kernkraftwerk der Nordostschweizerischen Kraftwerke AG (NOK) liegt auf einer Insel, die von der Aare und dem Oberwasserkanal der alten Wasserkraftanlage Beznau gebildet wird (Bild 6). Es weist eine elektrische Leistung von insgesamt 700 MW auf. Sein Kühlwasser von fast 40 m³/s wird dem erwähnten Oberwasserkanal entnommen und



Bild 4 Kernkraftwerk Leibstadt: Fassung und Rückgabe von $120 \text{ m}^3/\text{s}$ Kühlwasser bei einem Rheinniederwasser von $350 \text{ m}^3/\text{s}$. Untersuchung der Rohrlösung im hydraulischen Modell 1:70.

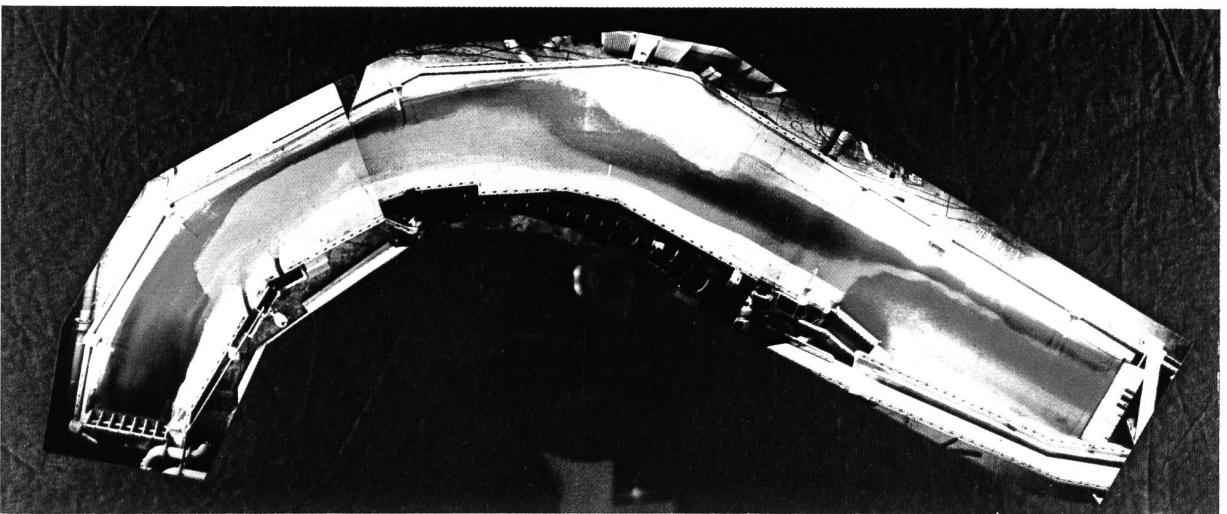


Bild 7 Kernkraftwerk Beznau: Rückgabe von $40 \text{ m}^3/\text{s}$ bei einem Restwasser von $10 \text{ m}^3/\text{s}$ und einem in der Wasserkraftanlage verarbeiteten Nutzwasser von $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Untersuchung der abschirmenden Wirkung des Restwassers am linken Ufer.

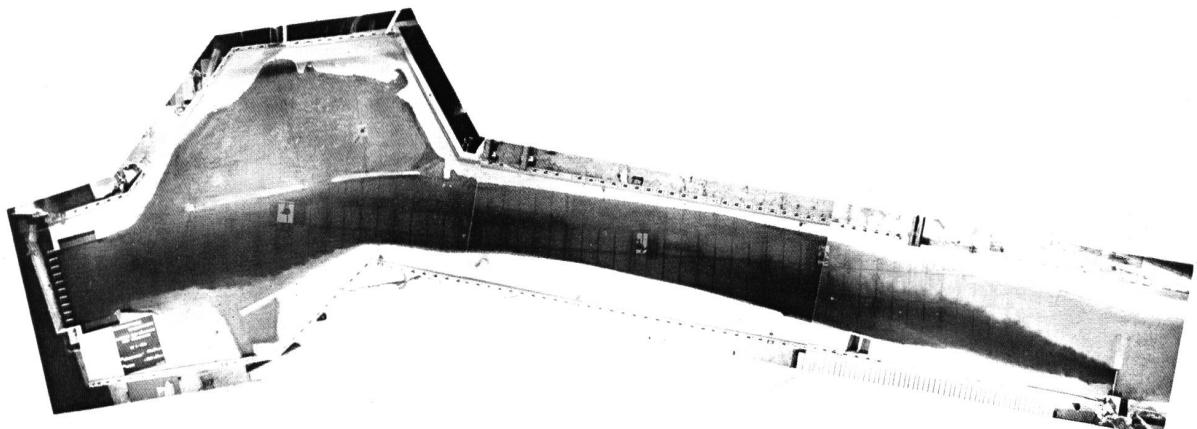


Bild 10 Kernkraftwerk Kaiseraugst: Fassung und Rückgabe von $40 \text{ m}^3/\text{s}$ Kühlwasser bei einem Rheinniederwasser von $350 \text{ m}^3/\text{s}$. Untersuchung der ganzen Mischstrecke im hydraulischen Modell 1:125.

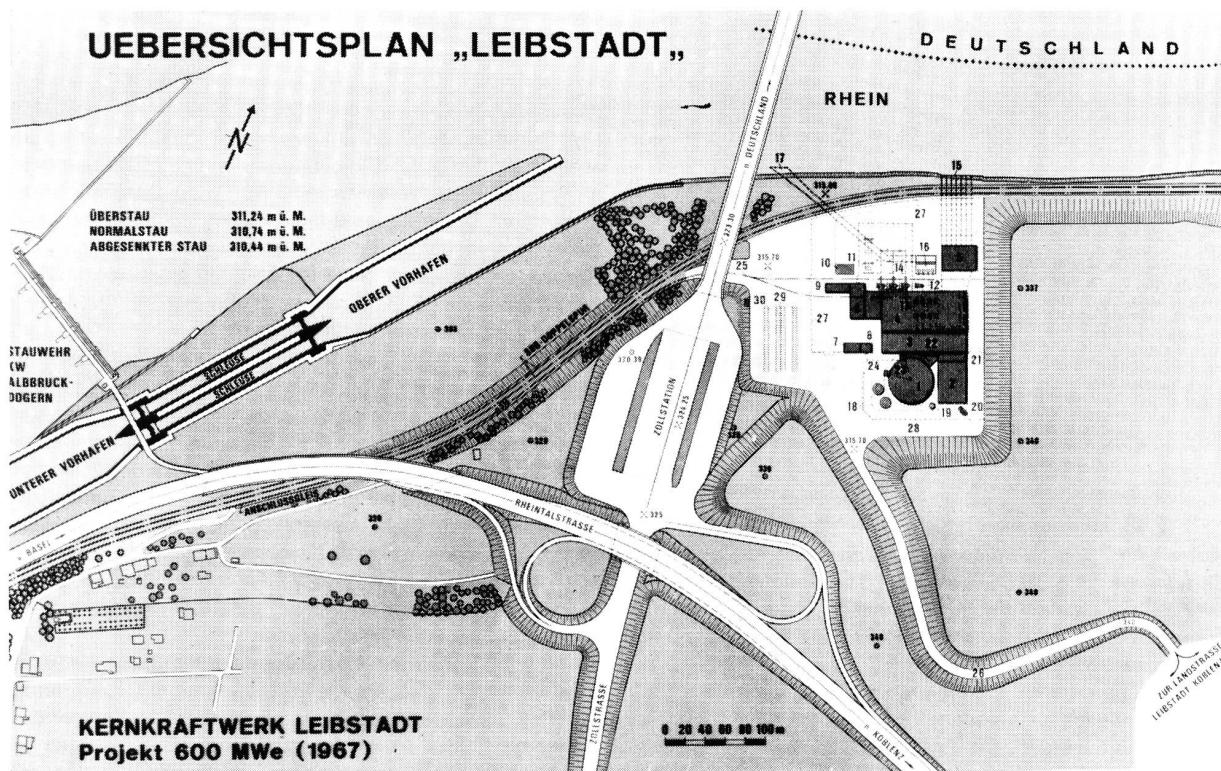


Bild 3 Lageplan des Kernkraftwerks Leibstadt (600 MW_e)

nach Gebrauch der Aare zugeführt. Dort vereinigt es sich zunächst nur mit dem durch das Stauwehr abgegebenen Restwasser und erst später, nämlich bei der Einmündung des Nutzwassers der Wasserkraftanlage, mit dem vollen Aareabfluss. Der mittlere Aareabfluss beläuft sich vergleichsweise auf 560 m³/s. Dank dieser Anordnung ist eine Rezirkulation natürlich ausgeschlossen. Hingegen wird zeitweise der Betrieb der Wasserkraftanlage beeinträchtigt. Denn diese ebenfalls den NOK gehörende Anlage nutzte früher an durchschnittlich 160 Tagen pro Jahr den gesamten Aareabfluss, während sie heute in der gleichen Zeit nur noch über den um das Kühl- und das Restwasser verminderten Aareabfluss verfügen kann. Ausserhalb dieser Zeit führt die Aare mehr Wasser, als die Wasserkraftanlage zu verarbeiten vermag, so dass dieser dann weniger oder gar kein Nutzwasser entzogen wird.

Es ist deshalb verständlich, dass die während der kritischen Zeit durch das Stauwehr abgelassene Restwassermenge sparsam bemessen wurde. Ihr Mindestwert musste aber selbstverständlich den Richtlinien der Kommission Baldinger genügen, wobei vor allem darauf zu achten war, dass unterhalb der Kühlwasserrückgabe am linken Aareufer (nordöstlich von Böttstein) ein nutzbares Grundwasser angrenzt, das nicht unzulässig erwärmt werden darf. Zum Schutze desselben boten sich grundsätzlich zwei Lösungen an, die zu folgenden Fragen führten:

1. Wie gross muss das Restwasser mindestens sein, damit es längs dem linken Ufer abfliesst und das Grundwasser vor einer Infiltration des am rechten Ufer eingeleiteten Kühlwassers schützt?
2. Oder, wie gross muss das Restwasser mindestens sein, wenn es sich vollständig mit dem in Flussmitte eingeleiteten Kühlwasser vermischt, so dass die Temperatur des Gemisches für das Grundwasser ungefährlich wird?
3. Wie ist bei der einen und der andern Lösung weiter flussabwärts, wo das Grundwasser nicht mehr angrenzt, eine gute Durchmischung des Kühl- und Restwassers mit dem Nutzwasser der Wasserkraftanlage zu gewährleisten?

Unter Berücksichtigung der von Leibstadt stark abweichenden örtlichen Verhältnisse drängte sich auch hier die Durchführung von hydraulischen Modellversuchen auf. Die VAW erstellte deshalb im Auftrag der NOK ein Modell im Massstab 1:60, wobei hinsichtlich der Modellähnlichkeit die gleichen Bemerkungen gelten wie für Leibstadt. Die turbulente Wärmediffusion wurde wiederum durch Färbung des Kühlwassers sichtbar gemacht. Ausser der rein visuellen Beurteilung wurden aber noch Farbkonzentrationsmessungen im Kolorimeter durchgeführt.

Die entsprechenden Wasserproben wurden mit einem Gerät entnommen, das die gleichzeitige Erfassung von

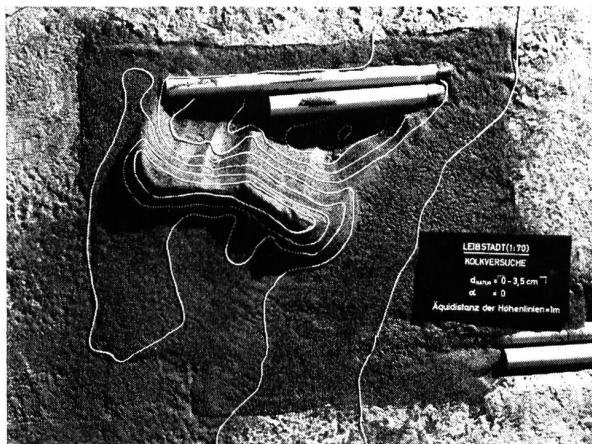


Bild 5 Kernkraftwerk Leibstadt: Rückgabe von 30 m³/s Kühlwasser. Untersuchung der Kolk- und Dünenbildung auf der Flussohle.

dieses dadurch dem linken Ufer entlang treibt und dort den Grundwasserträger wirksam vor Wärmeintrusionen abschirmt. Erst mit der Einmündung der in der Wasserkraftanlage genutzten Wassermenge wird eine Durchmischung erzwungen. Die nicht gefärbten Partien stellen Totwasserräume dar, in denen das Wasser erst nach längeren Zeiträumen ergänzt wird. Mit Stroboskopaufnahmen von Konfetti konnte die Oberflächenströmung an den kritischen Punkten genauer untersucht werden.

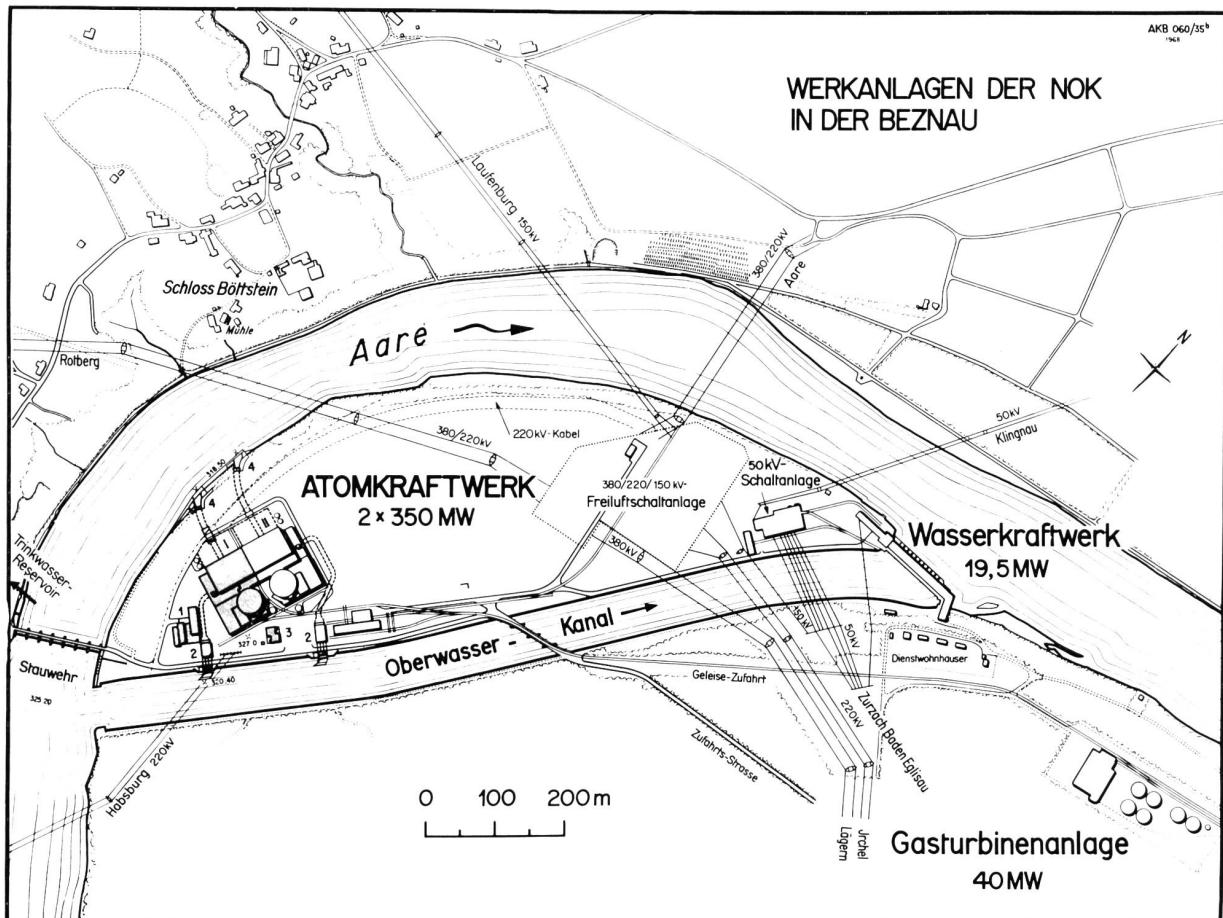
Neben der Versuchsreihe, bei der die Kühlwasserrückgabe durchwegs am Ufer erfolgte, wurde der Fragestellung entsprechend noch eine solche durchgeführt, bei der das Kühlwasser mittels gelochten Rohren in Flussmitte abgegeben wird. Es wurde dabei eine möglichst vollständige Durchmischung angestrebt. Bild 8 zeigt die Gegenüberstellung der mit Farbkonzentrationsmessungen ermittelten Temperaturverteilung zweier typischer Versuche. Schliesslich wurde noch untersucht, wie die Vermischung des Kühl- und Restwassers mit dem vom Wasserkraftwerk zurückgegebenen Nutzwasser erfolgt.

Zu erwähnen bleibt noch, dass die inzwischen erfolgte Inbetriebnahme der Anlage Beznau I eine Überprüfung der Versuchsergebnisse gestattet, indem die Temperaturverteilung in der Aare gemessen und mit derjenigen im Modell verglichen werden kann. Wie in der Situation von Bild 6 festgehalten, wird das erwärmte Kühlwasser am Ufer zurückgegeben.

20 bis 30 Messpunkten über einen Flussquerschnitt erlaubte. Aus dem Verhältnis der Farbkonzentration einer Einzelprobe und derjenigen des eingeleiteten Kühlwassers liess sich der jeweilige Vermischungsgrad (und damit die zu erwartende Mischtemperatur) genauer ermitteln als mit Thermometern.

Bild 7 zeigt, wie zur Verstärkung des optischen Eindruckes wiederum Versuche mit verschiedenen Farben durchgeführt wurden. Die Farbverteilung lässt bei diesem Beispiel den Schluss zu, dass bei einer am Ufer angeordneten Kühlwasserrückgabe zunächst keine nennenswerte Durchmischung mit dem Dotierwasser erfolgt und dass

Bild 6 Lageplan des Kernkraftwerks Beznau (700 MW_e)



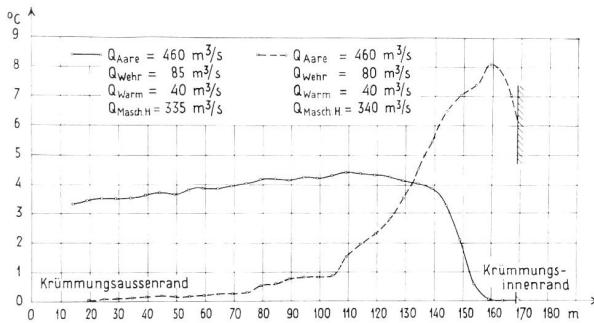


Bild 8 Kernkraftwerk Beznau: Im Modell gemessene Erwärmung des Aarewassers in einem Profil 600 m flussabwärts der Rückgabe.
Gestrichelte Kurve = Rückgabe am Ufer
Ausgezogene Kurve = Rückgabe mittels Rohren in Flussmitte

DAS KERNKRAFTWERK KAISERAUGST

Das Kernkraftwerk Kaiseraugst ist östlich der gleichnamigen Ortschaft am Rheinufer vorgesehen (Bild 9). Es wird vom Konsortium Kernkraftwerk Kaiseraugst mit einem Kühlwasserbedarf von rund 40 m³/s projektiert. Der Rhein ist im Bereich der Fassung und der Rückgabe durch das Flusskraftwerk Augst-Wyhlen aufgestaut und fliesst dementsprechend langsam, das heisst beispielsweise bei Niederrwasser mit 0,2 und bei Mittelwasser mit 0,7 m/s.

Die Hauptfragen, die das Konsortium der VAW stellte, lauteten ähnlich wie beim Projekt Leibstadt, wiesen aber eine etwas andere Gewichtung auf. So mass man der Verhinderung der Rezirkulation etwas weniger Bedeutung bei. Und aus verschiedenen Gründen kam auch nur eine Kühlwasserrückgabe mittels Rohren im Flussbett in Be-

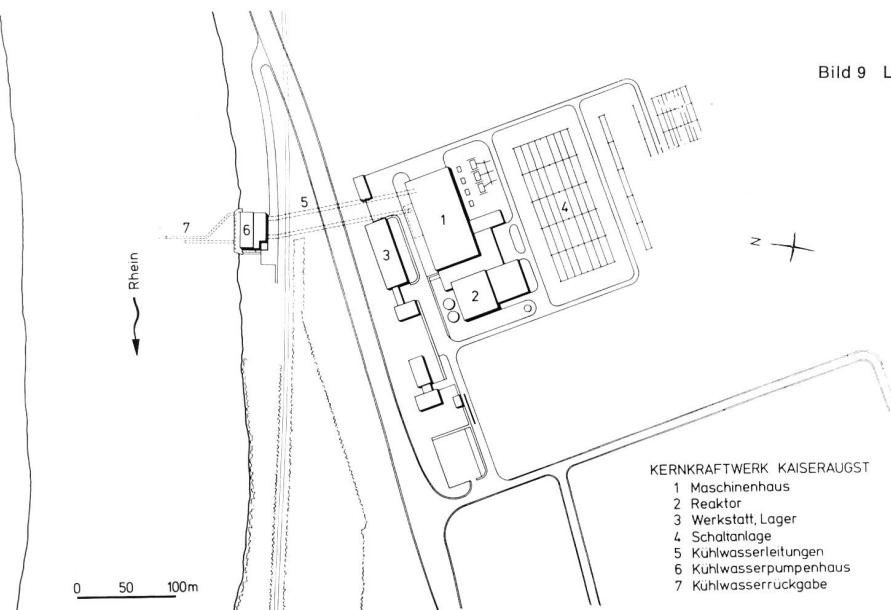


Bild 9 Lageplan des Kernkraftwerks Kaiseraugst

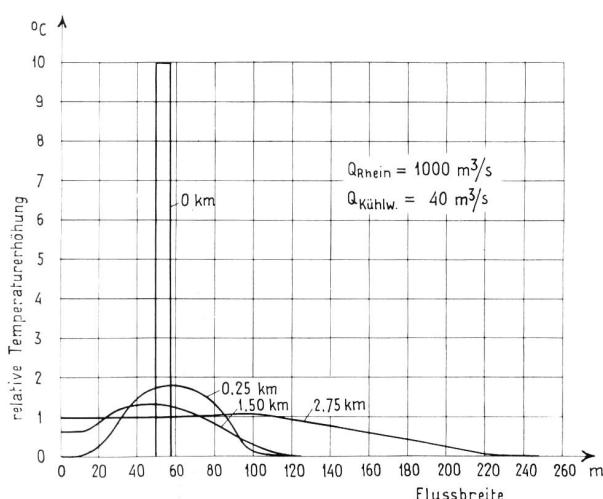


Bild 11 Kernkraftwerk Kaiseraugst: Im Modell gemessene Erwärmung des Rheinwassers unmittelbar bei der Rückgabe (0 km) und in einigen Querprofilen flussabwärts davon (0,25 bis 2,75 km)

tracht, so dass ein Vergleich mit einer Rückgabe am Ufer entfiel. Hingegen wurde eine besonders gute Durchmischung verlangt, indem die zuständigen Behörden die Mischstrecke grundsätzlich auf den Stauraum Augst-Wyhlen beschränkten. Ferner mussten die Belange der Schifffahrt gründlich geprüft werden, weil die betrachtete Rheinstrecke bereits heute als Wasserstrasse dient:

1. Wie muss die Rückgabe im Flussbett ausgebildet sein, damit sich das erwärmte Kühlwasser bereits im Stauraum Augst-Wyhlen vollständig mit dem übrigen Rheinwasser vermischt?
2. Wie kann die Steuerfähigkeit, die Anlegemöglichkeit und der Ankerwurf der heutigen und zukünftigen Schiffseinheiten gewährleistet werden?
3. Welches sind die minimal erforderlichen Massnahmen gegen Rezirkulation?

Diese Fragen waren grundsätzlich für zwei mögliche Kernkraftwerks-Standorte zu prüfen, die etwa 750 m längs des Rheins auseinanderlagen. Aus diesem Umstand und den modelltechnischen Erfordernissen ergab sich für Kaiseraugst ein Modellmaßstab von 1:125. In einem 32 m langen Modell wurde also eine Rheinstrecke von rund 4 km

nachgebildet und mit den bereits für Leibstadt und Beznau geschilderten Methoden untersucht.

Es galt hier vor allem, in einer Reihe von Versuchen die günstigste Ausbildung des Rückgaberothes im Hinblick auf die Fragestellung zu ermitteln. Dementsprechend wurden insgesamt neun sich hinsichtlich Länge, Austrittsöffnung und Austrittsrichtung unterscheidende Varianten geprüft. Für die beste Lösung resultierte ein verhältnismässig günstiges Bild (Bild 10); so konnte insbesondere die Bedingung einer vollständigen Durchmischung innerhalb des Stauraums Augst-Wyhlen für alle Rheinabflüsse erreicht werden. Die kolorimetrische Bestimmung des Mischungsgrades in Bild 11 bestätigt dies, indem der Abbau der im Kühlwasser enthaltenen Temperaturspitzen auf zulässige Werte fast unmittelbar nach dem Austritt aus dem Rückgaberoth erfolgt. Die dort bei Austrittsgeschwindigkeiten von 1,6 m/s angeregte Turbulenz ist für die Wärmediffusion also zweifellos von entscheidender Bedeutung!

Es konnte aber nachgewiesen werden, dass diese künstlich erzeugte Turbulenz für die Schiffahrt nicht prohibitiv ist. Die Schiffe bleiben steuerfähig und können längs des Ufers überall anlegen. Das Aufquellen des Kühlwassers erzeugt im Rhein einen Strudel, der im Verhältnis zu vielen natürlichen Wirbeln und Wellen eher als harmlos erscheint.

Schliesslich wurde noch die Möglichkeit der Rezirkulation untersucht. Entsprechend der Fragestellung wurde danach getrachtet, die Rückgabe möglichst nahe bei der Fassung anzutragen. Bei der zur Verwirklichung empfohlenen Lösung misst der Abstand zwischen der Fassung und der Rückgabe deshalb längs des Flusses bloss 14 m und quer dazu nur 33 m. Trotzdem konnte auch im ungünstigsten Fall, das heisst bei Niederwasser des Rheins (350 m³/s) und der vollen Kühlwasserentnahme (40 m³/s), keine nennenswerte Rückströmung in die Fassung beobachtet werden.

Adresse des Verfassers:

Prof. Dr. D. Vischer, Direktor der Versuchsanstalt
für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH,
Gloriastrasse 39, 8006 Zürich

SCHLUSSBEMERKUNGEN

Die vorstehenden Ausführungen lassen erkennen, dass die Durchlaufkühlung von Kernkraftwerken verschiedene Eingriffe in ein Flussregime bedingt. Eine ganze Reihe dieser Eingriffe kann aber vorausgesehen und gemildert werden, wenn sich die zuständigen Stellen frühzeitig auf ein entsprechendes Versuchsprogramm einigen. Wie die Beispiele der Anlagen Beznau und Mühleberg sowie der Projekte Kaiseraugst und Leibstadt zeigen, ist es möglich, die Kühlwasserfassung und die Rückgabe den örtlichen Verhältnissen optimal anzupassen. Als wertvolles Hilfsmittel erweisen dabei sowohl das elektrische Analogiemodell wie das hydraulische Modell gute Dienste, sofern die Übertragbarkeit der Ergebnisse sorgfältig abgeklärt wird und auch — wie hier — zwischen der Versuchsanstalt und ihren Auftraggebern ständig eine auf das Ganze ausgerichtete Zusammenarbeit besteht.

NACHWORT

An der Aussprache vom 5. März 1971 der Bundesräte Bonvin und Tschudi mit den Regierungsvertretern der Aare-Rheinkantone stellten die ersten fest, dass die Kühlkapazität der unteren Aare und des Hochrheins von den Kernkraftwerken Mühleberg und Beznau (I und II) bereits ausgeschöpft werde; weitere Kernkraftwerke seien deshalb mit anderen Kühlsystemen auszurüsten. Die beiden Bundesräte, deren allgemein überraschende Haltung inzwischen sogar vom Gesamtbundesrat bekräftigt worden ist, stützten sich dabei auf neue Erhebungen des Eidg. Amtes für Gewässerschutz, welche aufzeigen, dass die untere Aare und der Hochrhein heute stellenweise stärker verschmutzt sind, als bisher angenommen.

Unter dieser Voraussetzung können die geplanten Kernkraftwerke Leibstadt und Kaiseraugst also nicht in der beschriebenen Art mit Flusswasserkühlung verwirklicht werden. Angesichts des stetig wachsenden Strombedarfes bleibt wohl nichts anderes übrig, als beide Bauvorhaben so schnell wie möglich auf eine Umlaufkühlung mit Kühltürmen auszurichten.

Bildernachweis:

BKW: Bild 1, Elektro-Watt: Bild 3, NOK: Bild 6, Brügger/VAW: Bilder 2, 4, 5, 7/11

DAS VERHALTEN UNSERER GEWÄSSER IM JAHRE 1970 UND DER EINFLUSS DER SPEICHERBECKEN AUF DIE SOMMERHOCHWASSER

DK 551.482 : 213 : 627.8

Das Jahr 1970 weist insgesamt betrachtet sehr grosse Abflüsse unserer Gewässer auf und gehört zu den wasserreichsten Jahren dieses Jahrhunderts. Im Rhein bei Rheinfelden wurde zum Beispiel die mittlere jährliche Abflussmenge des Jahres 1970 seit 1900 nur etwa ein Dutzendmal annähernd erreicht und nur einmal, nämlich 1910, überschritten. Eine Ausnahme machten die Einzugsgebiete des Tessins, des Inn und der Rhone: die gesamte jährliche Abflussmenge aus den beiden zuerst genannten Gebieten lag unter dem Mittelwert und diejenige aus dem Gebiet der Rhone nur leicht darüber.

Die Verhältnisse im Laufe des Jahres waren jedoch recht verschieden. Im Januar 1970 lag zum Beispiel der durchschnittliche Abfluss des Rheins unter dem langjährigen Mittel, nachher ist er infolge ausgiebiger Niederschläge stark angestiegen. Im Gebirge hatten diese Niederschläge eine Ansammlung grosser Schneemengen zur Folge, deren Schmelzen im Zusammenwirken mit ergiebigen lokalen Regenfällen zu hohen Abflussmengen im Frühjahr

und Sommer führte. Infolgedessen wurden in zahlreichen Gewässern im Einzugsgebiet des Rheins, der Aare, der Reuss und der Limmat, im Februar, April und Mai, ja sogar im Juni und August die grössten Monatswerte der gesamten 30 oder mehr Jahre umfassenden Beobachtungsperiode festgestellt. Immerhin sind dabei die Hochwasserspitzen unter den bisher gemessenen Höchstwerten geblieben.

Im Herbst ging die Wasserführung bis zum Jahresende stark zurück als Folge der geringen Niederschläge. Für den Rhein bei Rheinfelden wurde zum Beispiel im Dezember eine Abflussmenge festgestellt, welche nur noch wenig über dem langjährigen Mittelwert dieses Monats liegt.

Das hervorstechendste Ereignis des Jahres 1970 waren ohne Zweifel die hohen Wasserstände, welche im Juni und Juli in verschiedenen Seen erreicht wurden, insbesondere im Bodensee, im Thuner-, Vierwaldstätter- und Genfersee.

Die Frage, wie sich die grossen, für die Wasserkraft-