



**Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt
Rapports de travail de l'Institut Suisse de Météorologie
Rapporti di lavoro dell'Istituto Svizzero di Meteorologia
Working Reports of the Swiss Meteorological Institute**

Zürich

No. 40

Wärmebelastung von Gewässern, ein teilweise meteorologisches
Problem

von

Walter Kuhn, Prof. ETHZ

Januar 1974

Angewandte Meteorologie

551. 526. 8 : 628. 1 : 621. 039. 534

Zusammenfassung :

Nach einer Einführung in die verschiedenen Aspekte der thermischen Gewässerverschmutzung werden Hinweise auf die Arbeiten mehrerer Expertengruppen gegeben. Dabei liegt der Ton auf den thermodynamischen Berechnungsmethoden und zahlenmässigen Ergebnissen.

La pollution thermique des eaux, un problème partiellement météorologique.

Résumé :

Après une introduction aux divers aspects de la pollution thermique des eaux, on donne un aperçu des travaux de plusieurs groupes d'experts en soulignant les méthodes thermodynamiques de calcul et les résultats numériques.

L'inquinamento termico delle acque, un problema parzialmente meteorologico.

Riassunto :

Dopo un'introduzione ai diversi aspetti dell'inquinamento termico delle acque, si accenna ai lavori di parecchi gruppi di esperti. Sono specialmente sottolineati i metodi termodinamici di calcolo ed i risultati numerici.

Thermal water pollution, a partially meteorological problem.

Summary :

After an introduction to different aspects of thermal water pollution, investigations carried out by several groups of experts are mentioned. Special emphasis is laid on thermodynamical computing methods and numerical results.

1. Einleitung: Thermischer Gewässerschutz

Seit etwa 10 Jahren müssen sich die Gewässerschutz - Fachleute nicht nur mit festen und flüssigen Abfallstoffen im Wasser, sondern auch mit künstlicher Erwärmung der Flüsse und Seen befassen. Diese thermische Form der Gewässerverschmutzung nahm durch die Einleitung von warmem Wasser aus den Kühlanlagen thermischer, insbesondere nuklear-thermischer Kraftwerke beunruhigende Ausmasse an.

Im Kleinen hat der Mensch den Wärmehaushalt der Gewässer schon lange beeinflusst, z. B. durch die Einleitung von häuslichen und industriellen Abwässern, durch den Bau von Staudämmen und auf andere Art. Alle diese Eingriffe üben aber auf die Temperatur grosser Gewässer eine geringe Wirkung aus, verglichen mit der Belastung durch die Rückgabe erwärmten Kühlwassers aus den Kondensatoren grosser thermischer Kraftwerke.

Kühlbedarf von
Kernkraftwerken

Um das zu verstehen, muss man sich die Kühlleistung solcher Anlagen vor Augen halten. Ein heutiges Grosskraftwerk erzeugt grössenordnungsmässig 1 GW (Gigawatt) = 1000 MW (Megawatt). Da es mit einem elektrischen Wirkungsgrad von ca. 35% arbeitet; fällt rund das Doppelte der Nutzleistung, genauer 1900 MW = 450 Mcal/s (Mega - Kalorien pro Sekunde) in Form von Wärme an; diese Abwärme muss abgeführt oder irgendwie verwertet werden.

Die Verwertung stösst in der Praxis auf mancherlei Hindernisse. Sollen die Kondensatoren nämlich mit gutem Wirkungsgrad arbeiten, darf das Kühlwasser am Ausfluss nicht wärmer als etwa 35° C sein. Wasser mit einer solchen Temperatur ist aber als Wärmelieferant für technische Zwecke höchst ungeeignet. Man könnte sich eine Verwendung in Schwimmbädern vorstellen. Nun werden aber Atomkraftwerke aus Sicherheitsgründen womöglich nicht in der Nähe grosser Siedlungen gebaut; zudem ist ihr Kühlbedarf im Sommer am grössten, in der Jahreszeit also, wo die Nachfrage nach

Kühlsysteme

warmem Badewasser am kleinsten ist ; vor allem aber könnte selbst ein grosses Schwimmbad nur einen kleinen Teil jener Kühlwassermenge aufnehmen, die ein mit Durchlaufkühlung ausgerüstetes Grosskraftwerk abgibt.

Es gibt jedoch Kühlverfahren, bei denen nur wenig oder gar keine Wärme in Gewässer abgeleitet wird ; sie setzen den Bau von Kühltürmen voraus. Bei den sogenannten " nassen " Kühltürmen zirkuliert das Kühlwasser in geschlossenem Kreislauf ; nur ein kleiner Teil des Kühlwassers wird zwecks Erneuerung in den Fluss zurückgeleitet. Der Hauptteil der Wärme geht in die Atmosphäre. Bei den " trockenen " Kühltürmen, die vorläufig nur für kleinere Anlagen in Betracht kommen, wird die Wärme direkt in die Atmosphäre abgegeben.

Folgen der
Erwärmung

Warum ist eigentlich die Erwärmung der Flüsse und Seen in den meisten Fällen unerwünscht, ja sogar schädlich ? Dafür gibt es verschiedene Gründe. Zunächst einmal ist das Wasser für Trinkzwecke umso geeigneter, je kühler es ist. Man muss sich vergegenwärtigen, dass ein grosser Teil des Trinkwassers in Europa direkt oder indirekt aus Flüssen und Seen stammt. (Direkt über Filteranlagen, indirekt durch Infiltration ins Grundwasser).

Ein weiteres Qualitätsmerkmal des Trinkwassers ist sein Sauerstoffgehalt. Der im Wasser gelöste Sauerstoff kann eine gewisse Sättigungs - Konzentration nicht übersteigen ; dieser Sättigungsgehalt ist temperaturabhängig, und zwar ist er umso kleiner, je höher die Temperatur des Wassers. Der wirkliche Sauerstoffgehalt liegt meist unter dem Sättigungswert, weil organische Abbauvorgänge Sauerstoff verbrauchen. Je mehr Algen und organische Schmutzstoffe sich im Wasser befinden, desto stärker ist die Sauerstoffzehrung, desto grösser wird das Sättigungsdefizit. Durch künstliche Belüftung kann das Sättigungsdefizit verkleinert werden, aber über die Sättigung hinaus kann man den Sauerstoff nicht anreichern. Erhöhte Temperatur führt überdies zu einer Beschleunigung der biochemischen Abbauvorgänge, also auch der Sauerstoffzehrung. Dies sind weitere Argumente gegen die künstliche Erhöhung der Wassertemperatur. Unter dem Gesichtspunkt des Sauer -

stoffhaushaltes erträgt schmutziges Wasser eine thermische Belastung schlechter als sauberes Wasser.

Die Auswirkung auf pflanzliche und tierische Organismen werden in hydrobiologischen Versuchsanstalten untersucht. Hier sei nur erwähnt, dass die Edelfische (z. B. Forelle und Lachs) zu jeder Jahreszeit, insbesondere auch im Frühjahr, kühles Wasser bevorzugen und empfindlich auf Temperaturerhöhungen reagieren. Nun gibt es im Rhein unterhalb der Aaremündung heute schon praktisch keine Edelfische mehr. Gewässerschutz - Fachleute halten aber eine Wiederbesetzung des Rheins mit Edelfischen für wünschbar ; sie setzt eine Verbesserung der biologischen Wasserqualität voraus. Eine weitere Erwärmung des Rheinwassers würde solche Sanierungsmassnahmen erschweren.

Wichtiger ist jedoch die Erhaltung und Verbesserung der Trinkwasserreserven. Hauptsächlich im Blick auf die Trinkwasserversorgung haben sowohl der schweizerische Bundesrat wie die deutsche Bundesregierung 1972 in ihren Ländern den Bau weiterer Atomkraftwerke mit Durchlaufkühlung vorläufig verboten. Diese Beschlüsse könnten rückgängig gemacht werden, wenn es gelänge, die Qualität des Rheinwassers erheblich zu verbessern.

Die Wärmebelastung der Gewässer verdient aber weiterhin intensives Studium. In sämtlichen Anliegerstaaten des Rheins und auch in anderen europäischen und aussereuropäischen Ländern widmen sich Experten diesem Problem ; zu seiner Abklärung werden zum Teil grosse finanzielle und technische Mittel eingesetzt.

Meteorologie

Der Wärmehaushalt der Gewässer hat eine bedeutende meteorologische Komponente, weil die Atmosphäre in diesem Wärmehaushalt der wichtigste Partner des Wassers ist. Der Wärmeaustausch zwischen Wasser und fester Unterlage tritt dem gegenüber völlig zurück. Umgekehrt ist allerdings der Einfluss der Gewässer auf den Wärmehaushalt der Atmosphäre in Binnenländern wegen der verhältnismässig geringen Oberfläche der Gewässer auf lokale Effekte beschränkt.

Gremien, die sich mit dem Wärmehaushalt der Gewässer befassen, sollten womöglich Meteorologen beiziehen. An die MZA erging 1966 die Aufforderung, einen mit thermodynamischen Problemen vertrauten Meteorologen in eine ad hoc gebildete Expertenkommission (" Kommission Baldinger ") abzuordnen. Der Unterzeichnete unterzog sich dieser Aufgabe mit grossem Interesse ; er durfte zuerst in dieser und dann in der " Kommission Wärmelastpläne " die ausschlaggebenden meteorologischen Fragen bearbeiten und ist gegenwärtig als Vorsitzender einer Fachgruppe der Internationalen Kommission zum Schutze des Rheins gegen Verunreinigung tätig.

Seen

In allen drei Gremien hatten wir uns vornehmlich mit der thermischen Belastung von Flüssen, weniger mit derjenigen von Seen zu befassen. Der Wärmehaushalt von Seen unterscheidet sich in mancher Beziehung von demjenigen der Flüsse, u. a. wegen der Bildung einer Sprungschicht (Thermokline) im Sommer. Die grosse Oberfläche würde die Seen, physikalisch betrachtet, als Vorfluter für erwärmtes Kühlwasser prädestinieren ; einer solchen Nutzung stehen jedoch hydrobiologische Bedenken entgegen, auf die ich hier nicht eintreten will. Im folgenden beschränke ich mich auf fliessende Gewässer, mit Ausnahme eines Abschnitts über die thermische Entkopplungswirkung der Seen.

2. Mitarbeit in eidgenössischen Expertenkommissionen

Der Delegierte des Bundesrates für Fragen der Atomenergie wandte sich 1965 an das damalige Eidg. Amt für Gewässerschutz mit der Bitte, " sich über die Möglichkeit zu äussern, Richtlinien festzulegen zum Problem der künstlichen Temperaturerhöhung von Fluss- und Seewasser und über deren praktische Auswirkung bei der Wahl der Standorte von Grossanlagen, die Abfallwärme ins Gewässer abgeben. " Das Amt für Gewässerschutz sah sich ausserstande, alle Aspekte dieses Fragenkomplexes selbst zu behandeln. Es gelangte

deshalb an das Eidg. Departement des Innern, das am 1. Juni 1966 hiefür eine Expertenkommission bestellte. In dieser Kommission waren vertreten

- der Direktor des Amtes für Gewässerschutz, als Präsident
- zwei wissenschaftliche Beamte des Gewässerschutzamtes
- zwei weitere Hydrobiologen (einer von der EAWAG, der andere von einem kantonalen Laboratorium)
- ein Chefbeamter des Amtes für Energiewirtschaft (Physiker)
- der Leiter eines kantonalen Gewässerschutzamtes
- ein Assistent des Institutes für thermische Turbomaschinen an der ETHZ
- ein Grundwassergeologe
- ein Meteorologe (der Verfasser)

Die Aufgabe dieser Kommission bestand zunächst in der Beschaffung von Unterlagen und Literatur über die hydrologischen, meteorologischen, physikalischen, technischen und biologischen Aspekte der thermischen Gewässerbelastung. Im meteorologischen Sektor war die Literatur nicht gerade einfach zu finden, weil Arbeiten über den Wärmeaustausch Wasser/Luft in Zeitschriften und Büchern verschiedener Fachrichtungen zerstreut waren. Das Amt für Gewässerschutz und Kollegen sowohl innerhalb wie ausserhalb der Expertenkommission waren mir bei der Literaturbeschaffung behilflich. Es zeigte sich, dass in Europa bis 1965 nur wenige, namentliche österreichische Meteorologen [7] gewässerthermische Fragen bearbeitet hatten. Die ergiebigsten Quellen fand ich in Berichten amerikanischer Forscher erdwissenschaftlicher Richtung [8, 9]. Immerhin sei erwähnt, dass die Beeinflussung der Flusstemperatur in der Schweiz doch schon einmal untersucht worden war [6], und zwar in einem Fall mit umgekehrtem Vorzeichen, nämlich aus Anlass des Projekts einer Wärmepumpenanlage, welche einem Fluss Wärme entzieht.

Wärmehaushalt
von Gewässern

Aus diesen und anderen Literaturbeiträgen schälte sich eine Theorie des Wärmehaushaltes von Oberflächengewässern heraus, auf die hier nicht im einzelnen eingegangen werden soll. Sie beschränkte sich zunächst auf stationäre Verhältnisse und bildete so die Grundlage zur Abschätzung mittlerer Zustände.

Es sei auf die Zusammenstellung in [11] verwiesen. Zum besseren Verständnis des folgenden sei jedoch an einige Grundtatsachen erinnert.

Die Temperatur einer fließenden oder stehenden Wassermasse ist im wesentlichen das Ergebnis des Zusammenwirkens verschiedener, die Wasseroberfläche durchsetzender Wärmeströme und der turbulenten Durchmischung. Folgende Komponenten des Wärmestromes sind auseinanderzuhalten :

- a) - Absorption kurzweiliger Strahlung von Sonne und Himmel (Globalstrahlung)
 - Absorption langweiliger Wärmestrahlung atmosphärischer Herkunft (" Gegenstrahlung ")
- b) - Ausstrahlung des Wassers selbst
 - Umsatz latenter Wärme durch Verdunstung oder (seltener) Kondensation an der Wasseroberfläche
 - direkter Uebergang fühlbarer Wärme zwischen Wasser und Luft
- c) - Bildung von Reibungswärme am Flussbett und im Innern des Gewässers
 - Wärmeaustausch mit dem Flussbett bzw. mit dem See - grund
 - Abkühlung durch atmosphärische Niederschläge

Diese teils positiven, teils negativen Wärmeströme heben sich im Endeffekt grossenteils auf ; der kleine Rest bewirkt auf dem Umweg über die turbulente Durchmischung zeitliche Temperaturänderungen der sich bewegenden Wassermasse.

Die in der Gruppe a) zusammengefassten Wärmeströme sind von der Wassertemperatur unabhängig, wogegen die unter b) genannten von der Wassertemperatur abhängen. Unter c) sind kleinere Wärmeumsätze aufgezählt, die man in der Regel vernachlässigen kann.

Der resultierende Wärmestrom $H (S, M, T_w)$ hängt vom momentanen Sonnenstand S , von meteorologischen Zustandgrössen M (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windstärke, Bewölkung) und von der Wassertemperatur T_w ab. Für manche Zwecke kann man sich mit Tagessummen begnügen und den momentanen Sonnenstand durch die Jahreszeit ersetzen. Bei vorgegebenen

solaren und meteorologischen Bedingungen gibt es eine Gleichgewichtstemperatur T_w^* des Wassers, bei welcher H verschwindet: $T_w^* = T_w^*(S, M)$, $H(S, M, T_w^*) = 0$. Diese Gleichgewichtstemperatur des Wasser ist übrigens nicht genau identisch mit der Lufttemperatur, obschon sie in der Regel nicht viel davon abweicht.

Die wirkliche Wassertemperatur fällt nur selten mit der Gleichgewichtstemperatur zusammen. Liegt sie über dem Gleichgewichtswert, kühlt sich das Wasser ab; im andern Fall erwärmt es sich. Der Ausgleichsvorgang erfolgt (bei konstanten solaren und meteorologischen Bedingungen) exponentiell in Funktion der Zeit, und zwar mit einer Geschwindigkeit, die vom sogenannten totalen Austauschkoeffizienten K abhängt. K ist die Änderung von H pro Grad Temperaturänderung des Wassers: $K = -\frac{\partial H}{\partial T_w}$. Nach dem oben gesagten haben die unter a) aufgeführten Einstrahlungsterme keinen Einfluss auf K . Es zeigt sich, dass K überhaupt nur von der Windstärke und von der Wassertemperatur abhängt. Auf Grund dieser Erkenntnis wurde die exponentielle Ausgleichszeit τ definiert als diejenige Zeitspanne, innerhalb welcher sich die Abweichung von der Gleichgewichtstemperatur auf den e -ten Teil, also auf 37% des Anfangswertes verringert. Man hätte auch die "Halbwertszeit" einführen können; sie beträgt das 0,693-fache der exponentiellen Ausgleichszeit. Die Theorie ergibt, dass τ zur Tiefe des Gewässers, genauer zur Tiefe der am turbulenten Wärmeaustausch beteiligten Wasserschicht, proportional ist. Im Fall unserer Flüsse ist dies die mittlere Tiefe des betrachteten Flussabschnitts, ausgenommen vielleicht in gewissen Staubereichen. Ueberraschend war die Grösse von τ . Eine Wasserschicht von 1 m Tiefe besitzt bei mittleren Bedingungen eine exponentielle Ausgleichszeit von 2 Tagen!

Tabelle 1: Exponentielle Ausgleichszeit (Relaxationszeit)
in Funktion der Wassertiefe bei mittleren Verhältnissen
(Windstärke $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in 2 m über Boden, Wassertemperatur
 10°C)

Tiefe	Ausgleichszeit
10 cm	5 h
1 m	2 d
10 m	20 d

Beispiel : Im Hochrhein zwischen Aaremündung und Basel liegt die mittlere Tiefe heute um 5 m ; die entsprechende Ausgleichszeit beträgt 10 Tage ; in dieser Zeitspanne legt die fließende Welle jedoch hunderte von km zurück. Das bedeutet aber, dass Abweichungen von der Gleichgewichtstempertur auf der betrachteten Rheinstrecke bei weitem nicht auf den e - ten Teil abgebaut werden ; die Reduktion der Temperaturerhöhungen beträgt auf der Strecke Waldshut - Basel nur etwa 7%.

Nimmt man an, die natürliche Temperatur entspreche gerade dem Gleichgewichtswert - im Mittel über alle Tages - und Jahreszeiten dürfte dies angenähert zutreffen - muss man erkennen, dass künstlich ins Flussnetz eingetragene Wärmemengen innerhalb der Schweiz nur zu einem kleinen Teil an die Atmosphäre abgegeben werden. Die Wirkungen mehrerer Wärmequellen verhalten sich also im wesentlichen kumulativ.

Diese Erkenntnis stützt sich vorderhand auf theoretische Ueberlegungen, da aussagekräftige Messungen bei der Kleinheit der erlaubten Temperaturerhöhungen äusserst schwierig beizubringen sind. Die oben skizzierte Theorie ist jedoch im Ausland unter anderen Bedingungen mehrfach durch Messungen erhärtet worden, so dass kaum an ihrer Gültigkeit gezweifelt werden kann. Einen indirekten Beweis für die thermische Trägheit tiefer Gewässer liefert der Tagesgang der Wassertemperaturen. In den grösseren Schweizer Flüssen beträgt die doppelte Tagesamplitude kaum mehr als 1°C , während

Tagesgang

diejenige der momentanen Gleichgewichtstemperatur (wie man auf Grund theoretischer Ueberlegungen zeigen kann [11]) an sonnigen Sommertagen bei 20° C liegt. Die effektive Wassertemperatur folgt also in solchen Gewässern den grossen Tagesauschlägen der Gleichgewichtstemperatur nur in sehr bescheidenem Umfang.

Jahresgang

Im Jahresgang bewirkt die Trägheit der Flusstemperatur eine gewisse Verzögerung gegenüber dem rascher auf Strahlungseinflüsse reagierenden System Boden/Atmosphäre.

Die Tatsache, dass künstliche Wärmequellen innerhalb der Schweiz in erster Näherung kumulativ wirken, stellt den Kern des meteorologischen Beitrages im Bericht der " Expertenkommission " [1] dar. In bezug auf die Zulässigkeit künstlicher Temperaturerhöhungen der Gewässer unter den Gesichtspunkten des Gewässerschutzes gelangte die Kommission zu einer Reihe von Empfehlungen, die seither vom Bundesrat als Richtlinien aufgefasst wurden. Wir wollen hier nur eine dieser Empfehlungen wiedergeben, weil im folgenden darauf bezug genommen wird :

Limite für die Temperaturerhöhung, Wassergüte

" Die aus verschiedenen Werken einzeln und gesamthaft in ein und dasselbe Flusssystem abzuleitenden Kühlwässer sollen dieses nach jeweiliger vollständiger Durchmischung... an keiner Stelle um mehr als 3 Grad Celsius aufwärmen. " An diese Toleranzgrenze wurde eine Bedingung hinsichtlich der Wasserqualität geknüpft : Die Güte des Wassers muss mindestens der β -mesosaproben Güteklasse entsprechen, damit eine 3 - grädige Erwärmung tragbar wird.

Biologisch - chemische Untersuchungen ergaben leider recht bald, dass diese Bedingung im Rhein zwischen Aaremündung und Basel nicht erfüllt ist. Gestützt auf diesen Befund verbot dann der Bundesrat den Bau weiterer Kernkraftwerke mit Durchlaufkühlung.

Mit der Herausgabe des Berichtes [1] im März 1968 war die Aufgabe der Expertenkommission (" Kommission Baldinger ") erfüllt. Im Mai 1969 nahm der Vorsteher des Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartementes die Schaffung von zwei neuen Expertenkommissionen in Aussicht. Die eine sollte sich unter dem Vorsitz des Eidg. Amtes für Gewässerschutz

Kommission
" Wärmelast -
pläne "

(das durch Bundesratsbeschluss 1971 in das neugeschaffene Amt für Umweltschutz integriert wurde) mit der Aufstellung konkreter " Wärmelastpläne " befassen ; die andere unter dem Vorsitz des Eidg. Amtes für Energiewirtschaft mit der Frage von Betriebsreglementen für thermische Kraftwerke im Hinblick auf die Einhaltung der vom Gewässerschutz geforderten Temperatur - Auflagen. Dem ersten, im folgenden kurz " Kommissio n Wärmelastpläne " genannten Gremium gehörte wiederum der Unterzeichnete an.

Diesmal ging es darum, ausgehend von den im " Kühlwasser - bericht " [1] niedergelegten Aufwärmungsgrenzen die Wärmekapazität des schweizerischen Rheinsystems zu ermitteln und gegebenenfalls auf die Kantone zu verteilen. Mit Rücksicht auf die Ergebnisse des Kühlwasserberichtes [1] und in Anbetracht der Tatsache, dass Wärmelastpläne ohnehin auf Näherungen angewiesen sind, wurde für den vorliegenden Zweck die atmosphärische Abkühlung des Wassers innerhalb der Schweiz vernachlässigt ; die einzelnen Wärmespenden wurden also kumulativ behandelt. Die örtlichen Aufwärmungen errechnen sich unter diesen Voraussetzungen aus der Summe der oberhalb des betrachteten Punktes ins Flussnetz eingeleiteten Wärmemengen, dividiert durch die Wasserführung am betrachteten Punkt.

Die Kommission " Wärmelastpläne " arbeitete während nahe zu 3 Jahren. Das Ergebnis ihrer Untersuchungen ist in einem Bericht des Eidg. Departements des Innern vom Februar 1972 [2] niedergelegt.

Trotz des hierin für die Schweiz angewandten kumulativen Prinzips beschäftigte ich mich eingehender als vorher mit dem Wärmeaustausch zwischen Gewässern und Atmosphäre. Zunächst mussten die zahlenmässigen Ergebnisse des " Kühlwasserberichtes " zugunsten der Kühlwassernutzung geändert werden, weil inzwischen aus der Literatur [9] höhere Verdunstungswerte bekannt geworden waren. Der totale Austauschkoefizient K musste gegenüber [1] um etwa 30% erhöht werden. Diese nachträgliche Korrektur ist übrigens in den oben mitgeteilten Zahlen bereits berücksichtigt.

Entkoppelung
durch Seen

Neben dieser quantitativen Verbesserung gelang eine Abschätzung der thermischen Entkoppelungswirkung von Seen auf Grund des Begriffes der " exponentiellen Ausgleichsfläche " (Relaxationsfläche). Dieser Begriff ist hydrologisch besser erfassbar als die Ausgleichszeit [2, 11]. Dabei ergab sich folgender Sachverhalt : Die Seen am Nordrand der Schweizer - alpen (Genfer-, Brienzer-, Thuner-, Vierwaldstätter-, Zuger-, Zürich-, Walen- und Bodensee) bewirken praktisch eine vollständige Entkoppelung zwischen Zu- und Abfluss ; oberhalb dieser Seen allenfalls eingeleitete Wärme wirkt sich im Gewässernetz unterhalb der Seen nicht mehr aus. Unter den Juraseen gilt dies nur vom Neuenburger- und Murtensee, nicht aber vom Bielersee, der wegen seiner- im Verhältnis zur Wasserführung der Aare- kleinen Oberfläche bloss etwa die Hälfte des durch den Hagneckkanal eingetragenen Wärmeüberschusses an die Atmosphäre weiterzugeben vermag. Stauseen und Staubecken wirken sich auf den Wärmehaushalt grosser Flüsse kaum aus.

Von den Ergebnissen wurde im Bericht [2] der " Kommission Wärmelastpläne " bei der Zuteilung thermischer Kapazität an die Anliegerkantone der Seen und Flüsse Gebrauch gemacht.

Von andern Mitgliedern der Kommission wurden die heute bestehenden Wärmelasten so genau wie möglich abgeschätzt.

Tabelle 2 : Wärmelasten im schweizerischen Einzugsgebiet
des Rheins (Stand 1972)

Wärme - Einleiter	Wärmemenge Mcal/s	Reduktionsfaktor für atmosphärischen Wärmeaustausch bis Basel	Restwärme in Basel Mcal/s
Kernkraftwerk Mühleberg (BE)	150	0.3	45
Kernkraftwerk Beznau (AG)	320	0.9	290
Industrielle Abwässer	170	0.8	135
Abwasser - Reinigungsanlagen *)	60	0.8	50
Hydraulische Kraftwerke	-150	0.9	-135
Totale Wärmelast in Basel			385

*) Jahresmittel

heutige
Wärmelast

Die häuslichen Abwässer sind im Winter wärmer, im Sommer etwas kühler als das Flusswasser ; im Jahresmittel bleibt ein bescheidener Wärmeeintrag übrig. Den hydraulischen Kraftwerken darf ein Abzug von der totalen Wärmelast gutgeschrieben werden ; ohne die Staustrecken würde sich am Flussbett und im Fluss zusätzliche Reibungswärme bilden ; man kann auf Grund hydraulischer Ueberlegungen zeigen, dass die so eingesparte Reibungswärme einem guten Teil der von der Laufkraftwerken produzierten elektrischen Energie gleichkommt.

Die gesamte Wärmelast in Basel (im Jahresmittel nahezu 400 Mcal/s) bewirkt bei mittlerer Wasserführung (1000 m³/s) eine Erwärmung um 0,4 Grad gegenüber dem " natürlichen " Zustand ; bei Niederwasser wirkt sich die gleiche Wärmelast stärker aus (1°C bei 400 m³/s).

3. Mitarbeit im Rahmen der Internationalen Kommission
zum Schutze des Rheins gegen Verunreinigung

Die thermische Belastung der Gewässer stellt natürlich nicht nur in der Schweiz ein ernstes Problem dar. Gerade der Rhein liefert uns ein Beispiel für die internationale Tragweite solcher Fragen. Er wird von seinen Anwohnern als Trinkwasservorrat, Energie-Erzeuger, Schiffahrtsweg, Lieferant von Kühlwasser und Vorfluter für häusliche und industrielle Abwässer genutzt ; diese verschiedenen Arten der Nutzung beeinträchtigen sich gegenseitig und schmälern die Nutzungsmöglichkeiten für den jeweiligen Unterlieger.

Tabelle 3 : Wärmeeinträge am Rhein von Basel bis zur deutsch/ niederländischen Grenze (Stand 1970), im Mittel über alle Tages- und Jahreszeiten

Wärmeeinleiter	Abschätzung durch	Wärmemenge in Mcal/s
Thermische Kraftwerke	(1)	1750
Industrie	(1)	250
Schiffahrt	(2)	400

Quellen : (1) Länder- Arbeitsgemeinschaft Wasser der BRD
(2) MOTOR - COLUMBUS A. G. , Ingenieur - Unternehmung, Baden (Schweiz)

Eine Bewirtschaftung muss heutzutage die Qualität des Wassers für Trinkzwecke und auch die Erholungsfunktionen einer Flusslandschaft stärker berücksichtigen, als dies früher getan wurde. Seit 1963 gibt es eine Internationale Kommission zum Schutze des Rheins gegen Verunreinigung, im folgenden kurz " Rheinkommission " genannt, die sich mit allen Formen der Verschmutzung, insbesondere auch mit der Wärmebelastung befasst. Ihr gehören auf Grund einer von den Regierungen abgeschlossenen Konvention Delegationen der Anliegerstaaten (Schweiz, Frankreich, Bundesrepublik Deutschland und Niederlande) sowie Luxemburgs an. Mit der thermischen

Fachgruppe "Kühlwasser" Belastung setzt sich die Arbeitsgruppe "T" (Temperatur) auseinander ; sie wird von einem Schweizer, nämlich vom stellvertretenden Direktor des Amtes für Umweltschutz, präsiert. Innerhalb der Arbeitsgruppe "T" wurde eine Untergruppe "Kühlwasser" geschaffen, die unter dem Vorsitz des Unterzeichneten Berechnungen über die Auswirkung künstlicher Wärmelasten auf die Temperatur des Rheins anzustellen hat.

Simulationsmodell Zur Lösung dieser Aufgaben wurden beträchlich grössere technische Hilfsmittel eingesetzt als jene, die den Eidgenössischen Expertenkommissionen zur Verfügung standen. Die deutschen und französischen Mitglieder der Fachgruppe stellten in gemeinsamer Arbeit ein mathematisches Modell zur Simulation des Temperaturverlaufs im Rhein auf, wobei sie sich auf umfangreiche Vorarbeiten in den beiden Ländern und die dabei gewonnenen Erfahrungen [3, 4, 5] stützen konnten. Dieses Modell ist ausdrücklich auf nicht-stationäre Zustände gemünzt. Es gestattet, die zeitliche Temperaturänderung der fliessenden Welle aus der durch meteorologische und hydrologische Parameter bestimmten Wärmebilanz zu berechnen ; künstliche Wärmequellen können nach Belieben in die Rechnung eingegeben oder aber unterdrückt werden, wodurch im Prinzip auch die heute nicht mehr direkt feststellbare " natürliche Temperatur " ermittelt werden kann. Vorläufig beschränken sich die Modellrechnungen auf die Rheinstrecke von der Aaremündung bis zur deutsch/niederländischen Grenze, weil der holländische Abschnitt infolge der Auffächerung in mehrere Arme und infolge von Tideeffekten zusätzliche Schwierigkeiten bietet. Für die Durchführung der Rechnungen steht die Computer-Anlage der " Electricité de France " in Chatou bei Paris zur Verfügung. Zum besseren Verständnis des Modells sei mitgeteilt, dass die genannte Rheinstrecke entsprechend den zur Verfügung stehenden Abflussmessungen in 26 Segmente unterteilt wurde. Die Ermittlung der Fliessgeschwindigkeiten und Flusstiefen für jeden vorkommenden Pegelstand bedingte umfangreiche hydrologische Voruntersuchungen. Die Tem -

peraturberechnungen beziehen sich wie gesagt auf fließende Wasserpakete ; sie beginnen immer neu in 3- stündigem Rhythmus entsprechend den meteorologischen Beobachtungs - terminen ; an den Grenzen der Segmente werden die errechneten Temperaturen für die synoptischen Termine interpoliert. Der Diffusion durch die Vermischung von Stromfäden verschiedener Geschwindigkeit wird Rechnung getragen.

So leistungsfähig ein solches Verfahren ist, muss ich doch auf einige prinzipielle Schwierigkeiten aufmerksam machen.

Schwierig -
keiten

- die Abhängigkeit der einzelnen Terme der Wärmebilanz von meteorologischen Parametern ist zum Teil noch zu wenig gesichert ; Messungen zur Ueberprüfung der meist empirischen Formeln sind unter natürlichen Verhältnissen, wenn überhaupt, nur äusserst schwierig beizubringen. Fast unmöglich sind Verdunstungsmessungen an Flüssen.
- meteorologische Daten : meist stehen nur Messungen von Stationen in einiger Entfernung vom Fluss zur Verfügung ; manchmal sind diese Daten in einer für den Fluss nicht repräsentativen Aufstellung gewonnen worden.
- die Globalstrahlung und die sogenannte Gegenstrahlung können zwar mit entsprechenden Geräten gemessen werden, doch gibt es wegen des grossen instrumentellen Aufwandes nur verschwindend wenig Messreihen, so dass man **gezwungen** ist, diese Terme durch " Parametrisierung " auf gewöhnliche meteorologische Variablen wie Bewölkung, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit zurückzuführen.
- nicht geringe Sorgen bereitet auch die Beschaffung der nötigen hydrologischen Daten ; zahlreich sind eigentlich nur die Abflussmessungen. Die zur Kontrolle so wichtigen Messungen der Wassertemperatur stehen an wenigen Punkten des Rheins und nur an 3 seiner grössten Zuflüsse zur Verfügung. Die Bestimmung der Fliessgeschwindigkeit und der mittleren Wassertiefe für jedes Segment in Abhängigkeit vom Pegelstand ist schwierig und zeitraubend.

Die Bearbeiter des Modelles waren sich dieser Schwierig -

" Eichung "

keiten voll bewusst. Sie haben sie durch ein nicht unbedenkliches " Anpassungsverfahren " zu überwinden gesucht. Das Modell

wurde in seiner ursprünglichen Form anhand der meteorologischen und hydrologischen Daten des Jahres 1970 getestet, indem die berechneten mit den gemessenen Wassertemperaturen verglichen wurden. Es ergaben sich gewisse Differenzen, besonders im Winter, wo die gemessenen Temperaturen meist höher waren als die berechneten. Nun wurden in zahlreichen Versuchen einzelne Koeffizienten in den empirischen Formeln der Wärmebilanz solange geändert, bis bestmögliche Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung erreicht war. Dieses Anpassungsverfahren wurde als "Eichung" des Modelles bezeichnet.

Gegen ein solches Verfahren lassen sich vom Standpunkt des Physikers Einwände erheben. Es scheint mir auf der Hand zu liegen, dass dadurch systematische Fehler in das Modell eingeführt werden, umso mehr, als unser Modell die in Wirklichkeit stattfindenden Vorgänge nur unvollkommen wiedergibt. So wird zum Beispiel der Wärmeeintrag durch die Schifffahrt, durch häusliche Abwässer und biologische Abbauprozesse vernachlässigt. Es ist durchaus denkbar, dass bei Anwendung auf ein anderes Testjahr andere Fehler auftreten, speziell dann, wenn die künstliche Wärmebelastung eine andere ist als 1970. Auf jeden Fall repräsentieren die einzelnen Terme des Modells nach einer derartigen Anpassung nicht mehr jene physikalischen Teilprozesse, die sie ursprünglich darstellen sollten. Ich habe deshalb meiner Gruppe vorgeschlagen, ein zweites Mal anders vorzugehen: Die ursprünglichen Werte der Koeffizienten beizubehalten und die im Testjahr auftretenden Fehler als Ergebnis der unberücksichtigten Einflüsse zu behandeln; je deutlicher der Jahresgang des Fehlers ausgeprägt ist, desto eher wird man die Abweichungen auf physikalische und nicht bloss zufällige Ursachen zurückführen dürfen; eine denkbare Lösung besteht dann in der Übertragung der aus dem Testjahr gewonnenen Fehlerkurve (Fehler in Funktion der Jahreszeit) auf andere Jahre mit anderen Wärmelasten. Diesem Vorschlag hat nun die Untergruppe im Sinne eines Versuches zugestimmt.

Aufgaben der Untergruppe "Kühlwasser" Welche Aufgaben hat die Untergruppe "Kühlwasser" der Rheinkommission zu lösen? Zunächst waren für jeden Tag des Jahres 1970 die "natürlichen" Temperaturen des Rheins an verschiedenen Orten zu bestimmen, was durch Weglassung der künstlichen Wärmequellen in der Modellrechnung erreicht wurde.

In der zweiten Phase war die Auswirkung der Kühlung bestimmter projektierte und im Bau befindlicher Kernkraftwerke auf die Temperaturen des Rheins zu berechnen, und zwar unter Annahme reiner Durchlaufkühlung. Dabei handelte es sich um folgende Kraftwerke :

Tabelle 4: Projektierte und im Bau befindliche Kernkraftwerke am Rhein

Standort	Elektrische Leistung bei Vollausbau MW	Wärmeabgabe im Falle reiner Durchflusskühlung Mcal/s
Fessenheim, 45 Rhein - km unter - halb Basel, am Grand Canal d'Alsace	1850	845
Philippsburg, am rechten Ufer zwischen Karlsruhe und Mannheim	860	400
Biblis, am rechten Ufer gegen- über Worms	1200	560

Hiezu ist allerdings zu bemerken, dass die Zentralen von Philippsburg und Biblis nach dem deutschen Kühlkonzept mit Kühltürmen ausgerüstet werden sollen und demnach den Rhein thermisch nicht im angeführten Ausmass belasten werden.

Weiterhin waren - immer unter der Voraussetzung reiner Durchlaufkühlung - die Produktionsverluste zu berechnen, die sich an den 3 Zentralen einstellen würden, wenn bestimmte Auflagen hinsichtlich der maximalen Aufwärmung

des Rheins eingehalten werden sollten. Diese Berechnungen wurden auf die hydrologischen und meteorologischen Daten eines 13-jährigen Zeitraumes (1958-1970) abgestützt, wobei aber die Zahl der meteorologischen Stationen gegenüber der ersten Aufgabe wesentlich reduziert wurde. Es hatte sich nämlich gezeigt, dass einerseits die Beschaffung der meteorologischen Ausgangsdaten in computergerechter Form unverhältnismässig viel Zeit beanspruchte und dass andererseits die regionale Differenzierung der meteorologischen Daten wenig Einfluss auf die Ergebnisse hatte.

Ergebnisse

Die materiellen Ergebnisse unserer bisherigen Rechnungen lassen sich folgendermassen zusammenfassen : Kritisch sind nicht etwa die Sommermonate, sondern die Zeiten mit kleiner Wasserführung (Herbst und Winter). Auf der nahezu 180 km langen Rheinstrecke von Fessenheim bis Biblis wird mehr überschüssige Wärme an die Atmosphäre abgegeben, als nach dem vorliegenden Projekt durch das Philippsburger Werk eingetragen würde. Die Rechnungen sind indessen noch nicht abgeschlossen, da uns die Arbeitsgruppe "T" die Durchrechnung verschiedener Varianten hinsichtlich der Temperaturauflagen bei den verschiedenen Zentralen auftrug.

Wärme -
kapazität

Im Anschluss an diese Rechnungen habe ich auf Grund der viel einfacheren, für stationäre Vorgänge geltenden Gleichgewichtstheorie die gesamte Wärmekapazität des Rheins unter der Voraussetzung, dass eine Erwärmung um 3 Grad zulässig wäre, abgeschätzt. Vom Standpunkt der Kühlwasser- verbraucher aus würde ein Fluss dann am besten ausgenützt, wenn er auf seiner ganzen Länge um die höchstzulässige Temperaturspanne aufgewärmt würde. Theoretisch würde dies eine kontinuierliche Anordnung der Wärmeeinspeisungen mit einer zur örtlichen Breite des Flusses proportionalen Längsdichte voraussetzen- eine technische nicht zu verwirklichende Bedingung. Beschränkt man dieses Rechenexempel auf die Rheinstrecke von der Aaremündung bis zur deutsch/holländischen Grenze, wäre am oberen Ende bei einer mittleren Wasserführung von $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ eine Anfangs-Wärmelast von 3000 Mcal/s ,

dh. rund 2600 Mcal/s mehr als heute, eintragbar.

Der totale Wärmeübergang Wasser / Luft auf der anschließenden Rheinstrecke betrüge unter den genannten Voraussetzungen

$$W = K \cdot F \cdot \Delta T,$$

wobei K den totalen Austauschkoefizienten, F die wirksame Oberfläche der gesamten Rheinstrecke und ΔT die Temperaturüberhöhung bedeuten. Setzt man, mittleren Verhältnissen entsprechend, $K = 7 \text{ Mcal/s. km}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, $F = 210 \text{ km}^2$ und $\Delta T = 3^\circ\text{C}$ ein, so ergibt sich für die an die Atmosphäre ableitbare zusätzliche Wärmemenge ein Betrag von 4400 Mcal /s, wovon etwa 2400 Mcal/s heute schon eingeleitet und 845 Mcal/s von Fessenheim beansprucht werden. Es muss aber nochmals betont werden, dass der gegenwärtige Zustand des Rheinwassers eine solche Aufwärmung gar nicht zulässt.

Zum Schluss sei noch eine Arbeit eines deutschen Gewässerkundlers [12] erwähnt, der u. a. den Einfluss thermischer Lasten auf Tidegewässer unter Bezugnahme auf [11] behandelt; sie zeigt erneut, dass man mit der Gleichgewichtstheorie auch verwickeltere Probleme angehen kann, sofern man sich mit der Abschätzung von Mittelwerten begnügt.

Literatur

(Auswahl)

a) Berichte eidgenössischer Expertenkommissionen

- [1] EIDG. DEPARTEMENT DES INNERN : Gewässerschutztechnische Gesichtspunkte im Zusammenhang mit der Kühlwasserentnahme und -rückgabe bei konventionell- und nuklearthermischen Kraftwerken. - 109 S., 19. März 1968.
- [2] EIDG. DEPARTEMENT DES INNERN : Bericht der Eidg. Expertenkommission zur Ausarbeitung von Wärmelastplänen im Zusammenhang mit der Ableitung von Kühlwasser an Aare und Rhein. - 107 S., 1. Februar 1972.

b) Deutsche und französische Expertenberichte

- [3] INNENMINISTERIUM BADEN-WUERTEMBERG : Studie über die thermische Belastbarkeit der fliessenden Oberflächengewässer. - 82 S., Stuttgart, September 1969.
- [4] LAENDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) : Grundlagen für die Beurteilung der Wärmebelastungen von Gewässern. - 88 S. + Anlagen, 1971.
- [5] GRAS, R. ; FLEURET, J. ; GILBERT, A. : Simulation du comportement thermique des cours d'eau : Courbes d'ajustement du modèle mathématique à diverses rivières de France. - Electricité de France, Direction des Etudes et Recherches, Division " Echanges Atmosphériques ", 7p., Chatou, 2 décembre 1971.

c) Andere Quellen (chronologisch geordnet)

- [6] GALAVICS, F. ; FEJER, G. : Der Temperatenausgleich in Flüssen im Zusammenhang mit Wärmepumpen- und Wärmekraftanlagen. - Schweiz. Archiv für angew. Wiss. u. Technik 11 (9) : 269-277 + 11 (10) : 302-311, 1945.
- [7] ECKEL, O. ; REUTER, H. : Zur Berechnung des sommerlichen Wärmeumsatzes in Flussläufen. - Geogr. Annaler, 1950 (3/4) : 188-209.
- [8] EDINGER, J. E. ; GEYER, J. C. : Heat exchange in the environment. - The Johns Hopkins University, Cooling Water Studies for Edison Electric Institute, Res. Proj. No. 49, 253 p., Baltimore, Maryland, USA 1965.
- [9] DINGMAN, S. L. ; WEEKS, W. F. ; YEN, Y. C. : The effects of thermal pollution on river ice conditions. - Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Res. Rep. 206, 33p., Hanover, New Hampshire, USA, 1967.
- [10] BOEGH, P. ; ZUEND, H. : THEDY - Ein Programm zur digitalen Simulierung des instationären Wärmehaushaltes von Flusssystemen. - Neue Technik 2, B. 1: 27-32, 1970.
- [11] KUHN, W. : Physikalisch-meteorologische Ueberlegungen zur Nutzung von Gewässern für Kühlzwecke. - Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. A, 21: 95-122, 1972.
- [12] GUENNEBERG, F. : Abwärme in Gewässern. - Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 17 (1) : 14-21, 1973.

