Betriebliche Vorkommnisse und Erfahrungen beim Eisgang vom Februar 1956 auf Aare und Rhein

Autor(en): **Achermann, K.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie**

Band (Jahr): **51 (1959)**

Heft 3

PDF erstellt am: **04.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-921271

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Betriebliche Vorkommnisse und Erfahrungen beim Eisgang vom Februar 1956 auf Aare und Rhein

K. Achermann, dipl. Ing., Langenthal[1]

Der kalte Februar 1956 darf wohl für die Schweiz als ein außerordentliches Naturereignis angesprochen werden, das auf dem Gebiete der hydraulischen Energieerzeugung zahlreiche Probleme aufwarf und das an Anlagen und Personal ebenso außerordentliche Anforderungen stellte. Es ist daher wohl begründet, die damaligen Ereignisse nochmals zu durchgehen und zusammenzufassen, Erfahrungen auszuwerten, festzuhalten und weiterzugeben. Die nachfolgenden Ausführungen behandeln das Gebiet der Aare vom Bielersee bis zur Mündung in den Rhein und das Gebiet des Rheins vom Bodensee bis Basel. Allen Werken, die zu diesen Unterlagen beitrugen, sei auch hier der beste Dank ausgesprochen.

A. Theorie der Eisbildung

Die Bildung des Eises ist nicht etwa ein Vorgang, der unter allen Umständen immer denselben Verlauf nimmt und uns entsprechend ein Produkt liefert, das stets unter den gleichen äußeren Erscheinungen auftritt. *Strauch* [1] unterscheidet folgende Eisarten:

1. Oberflächeneis
2. Grundeis
3. Schwebeis

Daß es daneben auch Zwischenformen gibt, die nach dem Aussehen frei benannt werden, wie z. B. Brucheis, Packeis usw., sei nur der Vollständigkeit halber gesagt. Die Kenntnis der drei von Strauch angeführten Eisarten fördert jedoch und erleichtert das Verständnis für die Eisabwehr, sodaß eine zusammengefaßte Schilderung der Entstehung dieses Eises allen anderen Ausführungen vorangestellt sei.

[1] Vortrag vom 27. Januar 1959 im Linth-Limmat-Verband, Zürich.
[1] Literaturhinweis, am Ende des Berichtes.

1. Oberflächeneis

Oberflächeneis bildet sich in stehenden oder langsam fließenden Gewässern. Die Fließgeschwindigkeit soll dabei nach *Lüscher* [2] kleiner oder höchstens gleich 1 m/s betragen ($v \leq 1$ m/s). Die Dichte des Wassers und des Eises spielen bei dieser Eisbildung eine ausschlaggebende Rolle. Die entsprechenden physikalischen Werte seien kurz in Erinnerung gerufen:

Dichte des reinen Wassers bei	+ 20° C	0,9983	kg/dm³
	+ 10° C	0,9997	„ „
	+ 4° C	1,0	„ „
	0° C	0,9999	„ „
Dichte des Eises bei	0° C	0,9167	„ „

Diese Anomalie des Wassers gegenüber andern Flüssigkeiten bewirkt in der kälteren Jahreszeit eine Umschichtung, bis das + 4° C warme Wasser zuunterst liegt. Von da an kann die Oberflächenschicht des Wassers durch die kalten Luftmassen weiter abgekühlt werden, bis eine geringe Unterkühlung dieser obersten Schicht unter 0° C erreicht ist. Mit Hilfe der in unsern Gewässern stets vorhandenen Schwebstoffe, die als Kondensationskerne wirken, beginnt die Eisbildung. Die dabei frei werdende Wärme von 79,4 kcal/kg muß durch die kältere Luft abgeführt werden. Die Unterkühlung darf bei der Bildung von Oberflächeneis allerdings nicht schneller als in 10 Stunden den Bereich zwischen + 0,1 bis 0° C durchlaufen. Sonst entsteht nach amerikanischen Messungen Schwebeis. Auch Lüscher weist darauf hin, daß bei steilem Temperaturgradienten sich Schwebeis, er nennt es Galerteis, bildet. Eine einmal gebildete Schicht aus Oberflächeneis schützt das darunter liegende Wasser vor weiterer Abkühlung, da die Wärmeleitfähigkeit des Eises sehr schlecht ist. Es sei an dieser Stelle schon kurz vorweggenommen, daß diese Eisart für die Kraftwerke weitaus die angenehmste ist und für den Betrieb praktisch keine Schwierigkeiten zeitigt.

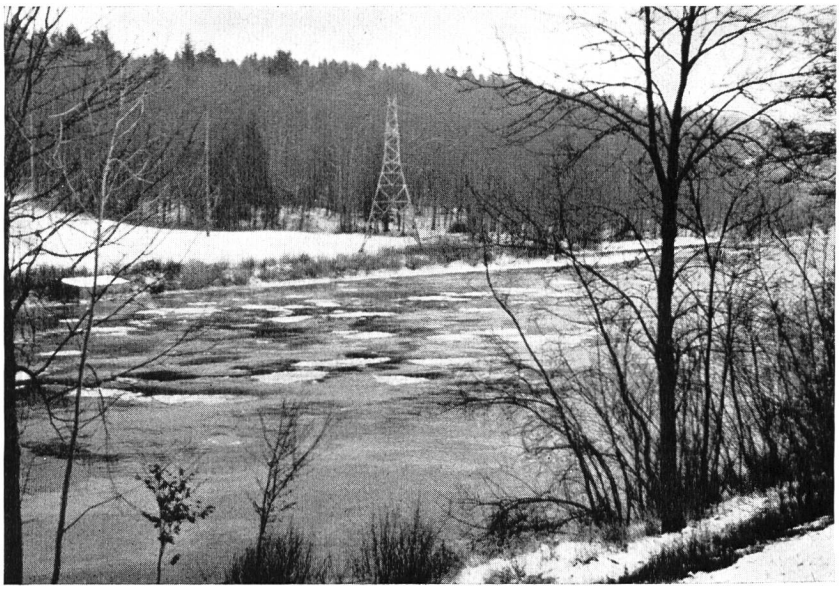


Bild 1 Schwebeis auf der Aare (Photo K. Achermann)

2. Grundeis

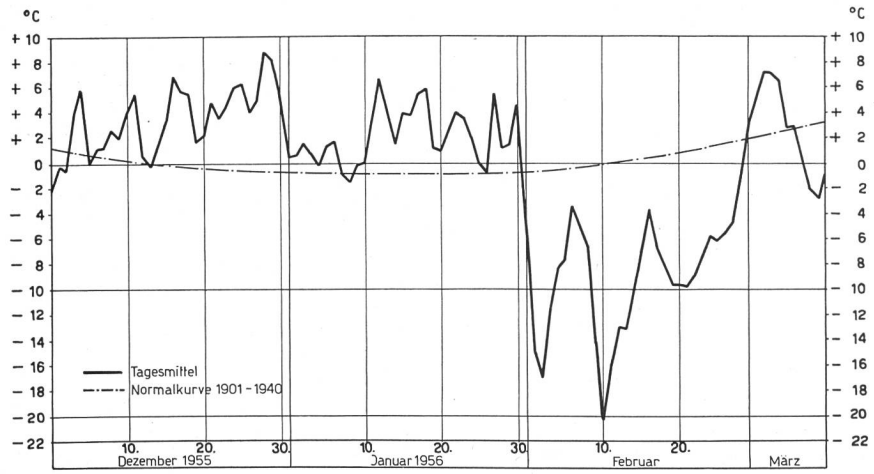
Grundeis bildet sich durchwegs in fließenden Gewässern. Da hier die Wasserteilchen ständig durcheinandergewirbelt werden, ist eine Schichtung des Wassers nach der Termperatur nicht mehr möglich. Damit werden die Dichte und die Temperatur des Wassers über den ganzen Flußquerschnitt verteilt, praktisch gleich. Die Frage nach der Entstehung des Grundeises hat sehr viele Forscher beschäftigt. Dementsprechend gibt es ganz verschiedene Theorien. Es kann sich hier aber nicht darum handeln, allen Erklärungen der letzten zwei Jahrhunderte nachzugehen. Ein Überblick sollte genügen.

Ursprünglich wurde versucht, das Grundeis auf untergetauchtes Oberflächeneis zurückzuführen. Die verschiedene Dichte von Wasser und Eis einerseits und genaue Beobachtungen der Grundeisbildung anderseits hielten dieser Theorie jedoch nicht stand. Eine andere Theorie wurde auf dem Gedanken der Sohlenunterkühlung aufgebaut. Es wurde angenommen, daß eine Wärmeableitung nach den Ufern zu eine Unterkühlung der Flußsohle herbeiführe und so eine Eiskristallisation einleite. Diese Auffassung der Wärmeabfuhr war aber wiederum nicht haltbar, da ja sonst auch bei stehenden Gewässern ein unterkühlter Grund mit Eisbildung auftreten müßte. Lüscher hat in einer Studie sowie in einer Dissertation das Problem des Grundeises eingehend behandelt. Er sieht die Einleitung dieser Eisbildung nicht auf dem Grunde. Ausgangspunkt ist das Oberflächeneis, in dem an ruhigen Stellen die Kristallisation des Wassers beginnt. Das fließende abgekühlte Gewässer enthält nach Lüscher nun solche im Entstehen begriffene Eiskristalle und ist mit diesen Gebilden je nach der Turbulenz des Wassers mehr oder weniger stark durchsetzt. Im ruhigen Wasser können sich die einzelnen Eiskristalle entsprechend ihren Molekularkräften zusammenfügen; im strömenden Wasser ist dies oft nicht mehr möglich. Solche schwimmende Eiskristalle helfen vorerst noch mit, das Wasser durch die aufgenommene Schmelzwärme abzukühlen. Auf dem rauhen Grund ist es nun möglich, daß diese Eiskristalle haften bleiben, sich ansammeln und zur Bildung von Grundeis führen. Je nach dem, ob sich die einzelnen Eiskristalle am Grunde infolge ihrer Molekularkräfte noch zu ordnen vermögen oder ob es infolge der Kräfte der Strömung nur zu einer mechanischen Anhäufung derselben kommt, unterscheidet Lüscher noch blättriges und körniges Grundeis.

Die neuesten Untersuchungen auf diesem Gebiete stammen von *Altberg* [3]. Sowohl Strauch als auch *Laszloffy* [4] weisen auf diesen Forscher hin und übernehmen dessen Ansichten. Gegenüber Lüscher besteht eigentlich nur der Unterschied, daß nach Altberg der Beginn der Bildung von Eiskristallen auf den ganzen unterkühlten Flußquerschnitt verteilt wird, während Lüscher die Einleitung dieses Naturereignisses vom Oberflächeneis herleitet. Heute darf als feststehend angenommen werden, daß zur Bildung von Grundeis Turbulenz und erhebliche Wärmeabfuhr notwendig sind, damit das fließende Gewässer nach und nach in seinem ganzen Querschnitt auf die Temperatur gesenkt wird, die eine Einleitung des Kristallisationsvorganges erlaubt. Dabei wirken der rauhe Untergrund und auch die vielen im Wasser schwebenden Teile als Kristallisationskerne. Die frei werdende Kristallisationswärme muß ständig abgeführt werden, was wiederum nur durch eine starke Turbulenz möglich ist. Diesen Vorgang nennt man oft die dynamische Eisbildung, während unter dem statischen Vorgang die Oberflächen-Eisbildung verstanden wird.

3. Schwebeis

Das Schwebeis ist die dritte von Strauch genannte Eisform. Die Bildung ist an eine rasche Unterkühlung der fließenden Wassermassen gebunden, d. h. es muß ein steiler negativer Temperaturgradient vorhanden sein. Es bilden sich wiederum mit Ausgangspunkten der Schweb- und Sinkstoffe als Kristallisationskerne rasch Eiskristalle in Form von dünnen Plättchen, die zuerst in fein verteilter Form auftreten, dann aber bald zu Eisklumpen zusammenwachsen (Bild 1). Sinkstoffreiches Wasser liefert mehr Schwebeis als reines. Diese Eisklumpen sammeln sich an Stauhaltungen an und können zu einem stark ineinander verschachtelten Eisfeld führen, dessen Erscheinung oft Packeis genannt wird. Es sei aber noch erwähnt, daß sogenanntes Schwebeis auch aufgestoßenes Grundeis sein kann. Ein Unterschied ist oft nur dadurch möglich, daß aufgestoßenes Grundeis meistens Bodenteile mit sich führt. Die aus dem Schwebeis gebildeten galertartigen Eisklumpen bedeuten für die Kraftwerke eine unliebsame



Temperaturverlauf bei der MZA in Zürich, Dez. 1955 - März 1956

Bild 2

Erscheinung. Sie sind im Stande, in kürzester Zeit die Turbineneinlaufrechen zu verstopfen und dadurch die Energieproduktion zu stören, ja sogar vorübergehend lahm zu legen.

B. Meteorologische Verhältnisse

Aus einem Bericht von Dr. *M. Schüepp* der Meteorologischen Zentralanstalt in Zürich ist folgendes zu entnehmen:

Nach einem recht warmen Dezember 1955 und Januar 1956 setzte am 31. Januar plötzlich der Winter mit aller Strenge ein. Ein Hoch über Skandinavien und ein kräftiges Tief über dem Mittelmeerraum sog in einer ausgesprochenen Bisenlage sehr kalte Luft von Rußland gegen die Schweiz. Diese Kaltluftzufuhr war außerordentlich stark, wurden doch zum Beispiel in Genf am 3. und 4. Februar mittlere Windgeschwindigkeiten von 75 km/h erreicht, wobei Spitzengeschwindigkeiten bis zu 130 km/h auftraten. Die Kaltluftschicht reichte weit hinauf. Der Temperaturverlauf (Tagesmittel) bei der MZA in Zürich ist aus Bild 2 ersichtlich. Das tiefste Tagesmittel wurde mit —20,3° C registriert. Die Kälteperiode dauerte 29 Tage, vom 31. Januar bis 28. Februar. Da diese Kälte praktisch genau mit einem Monat zusammenfiel, entstand ein tiefes Monatsmittel mit —9,3° C, welches im Februar, soweit die Messungen zurückgehen, noch nie erreicht wurde. Ein Vergleich mit dem gleichfalls kalten Februar 1929 mit einem Monatsmittel von —6,1° C zeigt eine gleich lange Kälteperiode von 29 Tagen. Damals traten allerdings trotz höheren Temperaturen gefrorene Seen auf. Dies dürfte 1929 einerseits auf den vorausgegangenen ebenfalls kalten Monat Januar zurückzuführen sein, anderseits ist wohl der Umstand wesentlich, daß 1956 die heftige Bise ruhige Seeoberflächen gar nicht zuließ und es daher ebenfalls vermehrter und längerer Kälteeinwirkung bedurft hätte, um im betrachteten Februar 1956 unsere größeren Seen in Eisfelder zu verwandeln.

C. Kälteeinwirkungen auf die Kraftwerkanlagen

Der Stoff zu diesem Kapitel ist ungemein reichhaltig. Es kann sich daher nur um eine Uebersicht handeln, um das Wesentliche darzustellen. Es ist auch nicht nötig, alle Kraftwerke aufzuführen, da es immerhin etliche Anlagen gab, bei denen der Betrieb auf keine Schwierigkeiten stieß. Wenn in der Aufzählung vor allem Kanalkraftwerke vorkommen, so liegt das in der Natur der Sache, indem diese Anlagen beim starken Zustrom von Schwebeis mit viel mehr Eisschwierigkeiten zu kämpfen hatten, als neuere Werke ohne Kanal.

1. Ältere Anlagen und Kanalkraftwerke

a) Kraftwerk Bannwil

Das Kraftwerk Bannwil ist ein Kanalwerk mit einer Ausbauwassermenge von 130 m^3/s und einer maximal möglichen Leistung ab Generator ohne Höherstau von 7300 kW. Das Stauwehr von 120 m Länge befindet sich bei Wangen. Es weist in der Mitte zwei Öffnungen zu je 37 m lichter Weite auf, die jede in acht Schützen unterteilt ist. Mit den sieben Doppelschützen von 3,8 m Höhe des auf der linken Seite liegenden Grundablasses hat das Wehr total 23 Schützen. Daneben besteht auf der rechten Seite noch eine 15 m breite Floßschleuse. Der Kanal ist 8,3 km lang; die normale Wassergeschwindigkeit liegt zwischen 1,2 bis 1,5 m/s. Die Wasserführung der Aare war derart, daß rund $^1/_3$ der Wassermenge durch das Stauwehr abfloß.

Im Gebiete des Stauwehrs konnte während den kritischen Kältetagen weder in der Aare noch im Kanal Eisbildung wahrgenommen werden. Dagegen bildete sich im Laufe des Kanals typisches Schwebeis. Die ersten Anzeichen solcher Eisbildung wurden am Freitag, 10. Februar, um 16 Uhr 30 bei der Zentrale im Oberwasser beobachtet. Vorher war zwischen 11 und 16 Uhr die Oberwasserkote beim Kraftwerk um 40 cm abgesenkt worden in der Meinung, daß durch eine erhöhte Wassergeschwindigkeit der Eisbildung wirksam entgegengetreten werden könne. Für die Bildung einer Oberflächeneisschicht war die Fließgeschwindigkeit ohnehin zu groß.

Das von 16 Uhr 30 an anfallende Schwebeis setzte sich rasch am Einlaufrechen der Turbinen fest, verstopfte diesen, sodaß um etwa 18 Uhr die gesamte Maschinenleistung auf Null zusammenbrach. Das Bemühen, wenigstens eine Turbinenöffnung frei zu halten, war vergebens. Das Zugseil der Schaufel der Rechenputzmaschine zerriß. Die gezogene Leerlaufschütze bei der Zentrale vermochte das anfallende Wasser nicht abzuführen und beim Stauwehr zeigten sich infolge Vereisung Schwierigkeiten, vermehrte Schützen zu öffnen.

Bild 3
Packeis vor dem Wehr bei den Kraftwerken Wynau
(Photo Achermann)

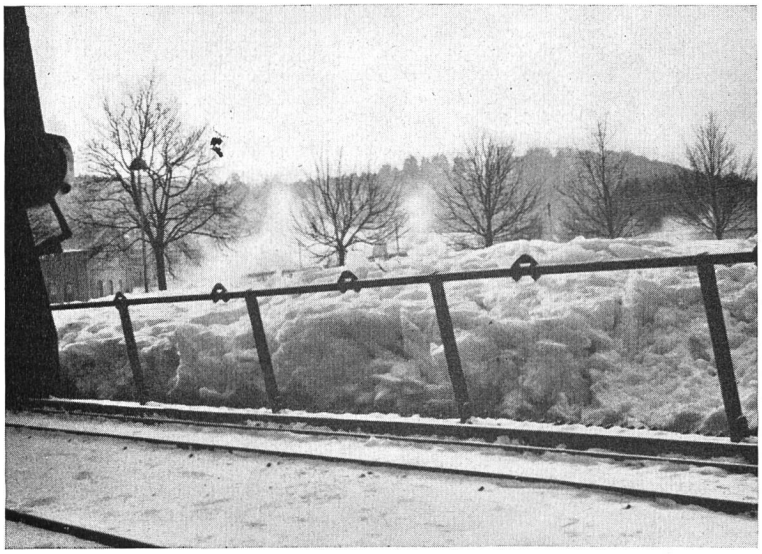


Bild 4 Eiswall vor dem Rechen des linksufrigen Werkes der Kraftwerke Wynau (Photo K. Achermann)

Das Oberwasser stieg daher bis Mitternacht um 87 cm und überragte so den normalen Wasserstand um 47 cm. Der Kanalüberlauf im Oberholz trat in Aktion. Durch die stark zurückgegangene Fließgeschwindigkeit bildete sich sodann auf eine Länge von 1,6 km eine Oberflächeneisschicht, die, — als das Wasser durch fortwährende Bemühungen bei dem Turbineneinlaufrechen seinen richtigen Weg langsam wiederfinden und dadurch auf den Normalstand zurückgeführt werden konnte, — eine weitere Abkühlung und damit eine fortschreitende Vereisung verhinderte. Das anfallende Brucheis beim Bersten der Oberflächeneisschicht bot keine besonderen Schwierigkeiten mehr bei dessen Entfernen mit Rechenreinigungsmaschine und Spülrinne. Am Sonntag, 10. Februar, um 04.00 Uhr war der Oberwasserkanal wieder eisfrei.

b) Kraftwerke Wynau

Die Kraftwerke Wynau teilen sich auf in ein rechtsufriges Werk mit anschließendem Stauwehr und in ein linksufriges Werk, dem ein 146 m langer Oberwasserkanal vorgelagert ist. Das Wehr selbst ist 126,8 m lang, hat zwei größere Öffnungen mit je zehn Schützen zu 4,6 m Breite und 3,4 m Höhe, ein mittlerer Grundablaß mit drei Schützen zu 3,3 m Breite und eine Floßgasse von 15 m lichter Weite. Die Schluckfähigkeit beträgt für beide Werke zusammen 380 m^3/s, die maximal mögliche Leistung ab Generator 11 000 kW.

Die ersten Schwebeisschollen machten sich im Oberwasser Freitag, 10. Februar nach 09.00 Uhr bemerkbar. Die Eisbildung muß sich vor allem im Aarebett zwischen dem Stauwehr in Wangen und dem Stauende von Wynau auf der Höhe des Kraftwerkes Bannwil vollzogen haben. Ein steiler Temperaturgradient und Turbulenz trugen hiezu bei. Der rasch stärker werdende und überraschende Eisanfall staute sich vor den beiden Kraftwerken und vor dem geschlossenen Wehr (Bild 3). Das Schwebeis wurde ineinandergeschachtelt, regelierte und bildete im Oberwasser bald eine ständig an Ausdehnung und Mächtigkeit zunehmende Packeisdecke, die am Samstag, 11. Februar, mittags schätzungsweise einen Inhalt von 150 000 m^3 Eis aufwies. Der Durchflußquerschnitt beider Rechen wurde noch vermindert, lag doch zum Beispiel vor dem Rechen des linksufrigen Werkes ein Eispfropfen mit einer Mächtigkeit von etwa 5,5 m, der 2,5 m über die normale Stauhöhe ragte und 3 m tief ins Wasser reichte (Bild 4).

Infolge des geschlossenen Wehres und des großen Eisstaues stieg die Oberwasserkote zusehends. Am Samstag, 11. Februar, war um 08.00 Uhr der Normalstau um 59 cm überschritten und die Rechenbrücke des rechtsufrigen Werkes um 49 cm überschwemmt (Bild 5). Mittags sank die Maschinenleistung der beiden Werke auf 6% der technisch möglichen. Eine Besserung der Lage setzte erst ein, als es gelang, nach und nach das vereiste und zugefrorene Wehr zu öffnen. Dabei mußten die Hubvorrichtungen wie Zahnstangen und Zahnräder mit Hilfe von Schneidbrennern sorgfältig erwärmt werden.

Zuerst konnte am 10. Februar ein Schleusenaufsatz von 1,4 m Höhe der Öffnung 20 gehoben werden. Endlich gelang es am 11. Februar um 9 Uhr Schütze Nr. 13 halb und um 15 Uhr ganz und weiter Schütze Nr. 14 um 15 Uhr 30 ganz zu öffnen. Damit waren von den 20 Wehrschützen total 2⅓ offen. Durch die entstandene Fließrinne wurde das zu Packeis zusammengepreßte Schwebeis zusehends mechanisch fortgetragen und vor allem auch durch den Wärmeinhalt des Wassers aufgelöst. Dazu kam der Rückgang der Bise und

Bild 5 Überschwemmte Rechenbrücke des rechtsufrigen Werkes der Kraftwerke Wynau (Photo K. Achermann)

Bild 6 Rechen-Enteisung beim Kraftwerk Ruppoldingen (Photo ATEL)

der leichte Temperaturanstieg des Aarewassers. Um 07.30 Uhr des 12. Februar waren ungefähr vier Fünftel der Eismasse verschwunden, und um 18 Uhr war das Oberwasser gänzlich eisfrei.

c) Kraftwerk Ruppoldingen

Das Kraftwerk Ruppoldingen ist ein Kanalkraftwerk mit einem Kanal von 760 m Länge, einer Ausbauwassermenge von 200 m^3/s und einer möglichen Leistung ab Generator von 5500 kW. Das erste Schwebeis wurde am Freitag, den 10. Februar morgens entdeckt. Mit stärker werdendem Eisanfall wurde am Abend eine Stauklappe des total sechs Öffnungen zu 17,5 m Breite aufweisenden Schleusenklappenwehres umgelegt und die 20 Kanaleinlaufschützen um 1 m unter schwieriger Auftauarbeit abgesenkt. Das Ziel war, die treibenden Eisschollen ins Aarebett abzudrängen. Leider konnte der Schiffsdurchlaß nicht abgeriegelt werden, sodaß trotzdem viel Schwebeis in den Kanal gelangte. Während der Nacht auf den Samstag sank denn auch die Generatorleistung von 4,5 auf 0,7 MW, weil der Rechen stark verstopft war (Bald 6).

Durch stetige Wühlarbeit im Eise vor dem Rechen wurden immerhin alle Turbinen im Lauf gelassen, damit nichts einfror. Durch die steigende Temperatur am Sonntag, 12. Februar, begann sich die Eisdecke im Oberwasserkanal aufzulösen und als die Leerlaufschleusen nach sorgfältiger Erwärmung ebenfalls geöffnet werden konnten, war es möglich, das gelockerte Eis im Kanal doch schubweise abzulassen. Am Abend des 12. Februar war der Kanal eisfrei.

d) Kraftwerk Beznau

Das Kraftwerk Beznau ist ein Kanalwerk, ausgebaut für 411 m^3/s mit einer maximal möglichen Leistung ab Generator von 19 500 kW. Das Stauwehr umfaßt sieben Öffnungen zu je 15 m lichter Weite. Die Stoneyschützen (Rollenwagen) mit Gegengewichten sind 7,75 m hoch. Die Windwerke sind auf einer rund 4 m breiten eisernen Wehrbrücke angebracht.

Der Zustrom von Schwebeis begann am Freitag, 10. Februar, vormittags. Vorerst gelang es, den Eisanfall mit Abschwemmen zu meistern. Am Nachmittag wurde das Eistreiben jedoch so stark, daß die Eisschollen nicht mehr über die Überlaufschützen weggebracht werden konnten. Der 1180 m lange und etwas über 40 m breite Kanal war Samstag morgens um 7 Uhr gänzlich mit Eis bedeckt. Das Eis lag vor dem Rechen etwa 3 m tief. Am Sonntagabend waren die Einläufe 4, 5 und 6 vollständig mit Eis verstopft. Eine Entlastung bei der Eiszufuhr wurde mit einem vermehrten Öffnen des Wehres versucht. Zuerst ließ sich Schütze 5 und später auch Schütze 3 bewegen. Als die öftern Hub- und Senkbewegungen wieder eingestellt wurden, froren auch diese zwei Schützen zu. Bei einem erneuten Versuch, Schütze Nr. 4 zu bewegen, riß am Sonntag um 02.00 Uhr ein Diagonalstab der Windwerkbrücke, was diese um 30 cm absenkte. Mit Koksöfen, die neben die Rollen der Schützenführungen gehängt wurden, konnten schließlich die Gleitbahnen der Schützen aufgetaut und die Wehrverschlüsse wieder in Bewegung gebracht werden. Das Heizen mit den Koksöfen zeigte jedoch auch Nachteile. Bei der Wehrverkleidung aus Kalksteinen wurden durch die örtliche Hitze Stücke weggesprengt. Der Oberwasserkanal war erst am Dienstag, 14. Februar, gegen Mittag wieder eisfrei.

e) Kraftwerk Rheinfelden

Beim Kraftwerk Rheinfelden liegt das Maschinenhaus auf der deutschen Seite. Oberwasserseitig besteht ein rund 600 m langer Kanal, worauf sich das Stauwehr zum Schweizerufer hinzieht. Ausgebaut ist das Werk für 614 m^3/s und die maximal mögliche Leistung der 20 Generatoren beträgt 20 500 kW.

Das Stauwehr selbst besteht aus verschiedenen Teilen. Wir haben das eigentliche Wehr von 198 m Länge mit 8 Schützen von je 1,85 m Höhe auf der Schweizerseite. Daran schließt sich die 20 m breite Floßgasse und der Grundablaß mit 3 Schützen von je 10 m lichter Weite und 5 m Höhe an. Das Wehrbauwerk leitet dann zum Kanal über.

Bis zum Freitag, 10. Februar, traten keine Eisschwierigkeiten auf. Beim Wehr waren sämtliche Schützen geschlossen. Es wurde nur mit den Grundablässen reguliert. Trotz viertelstündlicher Bewegung froren diese jedoch am Sonntag, 12. Februar, fest und zwar blieb der erste Grundablaß 1 m offen, der zweite war 30 cm offen und der dritte geschlossen. Am Montag, 13. Februar, brach gegen 8 Uhr die Wehrschütze Nr. 4. Durch diesen Defekt senkte sich das Wasser im Bereiche dieser Wehröffnung ab und kam in rascheres Fließen. Die auf der Schweizerseite gebildete Eisdecke barst und wurde weggeführt.

Auf der badischen Seite war die Oberflächeneisbildung nicht ausgeprägt. Die Fließgeschwindigkeit in Richtung Oberwasserkanal und Kraftwerk war dafür zu

groß. Dagegen begann das zuströmende Schwebeis den Feinrechen am 13. Februar zu verstopfen, sodaß von den total 20 Maschinen Nrn. 1 bis 6 für längere Zeit ganz und Nrn. 7 und 8 vorübergehend für einige Stunden abgestellt werden mußten. Die Leistung sank von 19 500 auf 12 600 kW oder um 35 %. Auch in den Turbinenkammern war Eisbildung festzustellen. Bis zum 15. Februar gelang es dann durch konzentrierten Personaleinsatz auf der Rechenbrücke das antreibende und festgesetzte Eis fortzuleiten. Am Donnerstag, 16. Februar, war der Betrieb annähernd wieder normal. Beim Stauwehr gelang es mit Hilfe von Koksöfen die Grundablässe am Freitag, 17. Februar, wieder zu schließen, sodaß von da an mit Ausnahme der Reparatur der Schütze 4 der Betrieb wieder normal war.

2. Neuere Anlagen

a) Kraftwerk Klingnau

Beim Kraftwerk Klingnau sind Wehr und Maschinenhaus in einer Achse angeordnet. Die Ausbauwassermenge beträgt 810 m^3/s und die maximal mögliche Leistung ab Generator 37 000 kW. Das Wehr hat vier Öffnungen zu 30 m lichter Weite, die mit Doppelsegmentschützen von total 7 m Höhe und mit Rollenlagerung ausgerüstet sind.

Bereits am Samstag, 11. Februar, war der ganze Stauraum von etwa 1,2 km^2 mit einer Oberflächeneisschicht von 4 bis 6 cm Stärke bedeckt. Damit waren die als günstig anzusehenden Verhältnisse vorhanden, um den Betrieb ohne Leistungsverluste oder andere Schwierigkeiten durchzuhalten. Dagegen genügten die normalen elektrischen Heizöfen zur Erwärmung der Rollenpartien der Schützen nicht. Sie froren ein und konnten nicht mehr betätigt werden.

Eine Störung in der 150 kV-Anlage am 13. Februar bewirkte eine Entlastung der beiden im Betriebe stehenden Maschinengruppen. Da das Wehr vereist war und die Schützen nicht bewegt werden konnten, stieg der Stau um volle 55 cm an, was rund 660 000 m^3 Wasser dem Abfluß entzog. Dank der telefonischen Verständigung der Unterlieger konnte Albbruck-Dogern mit der Schluchseestufe Waldshut den Sunk teilweise ausgleichen.

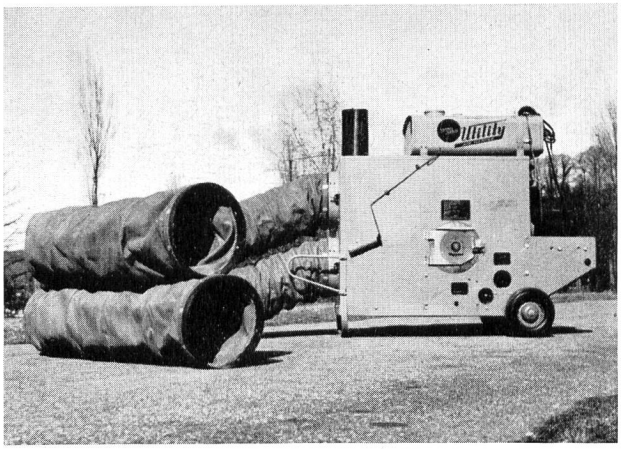


Bild 7 NELSON-Luftheizapparat (Photo Guyer, Klingnau)

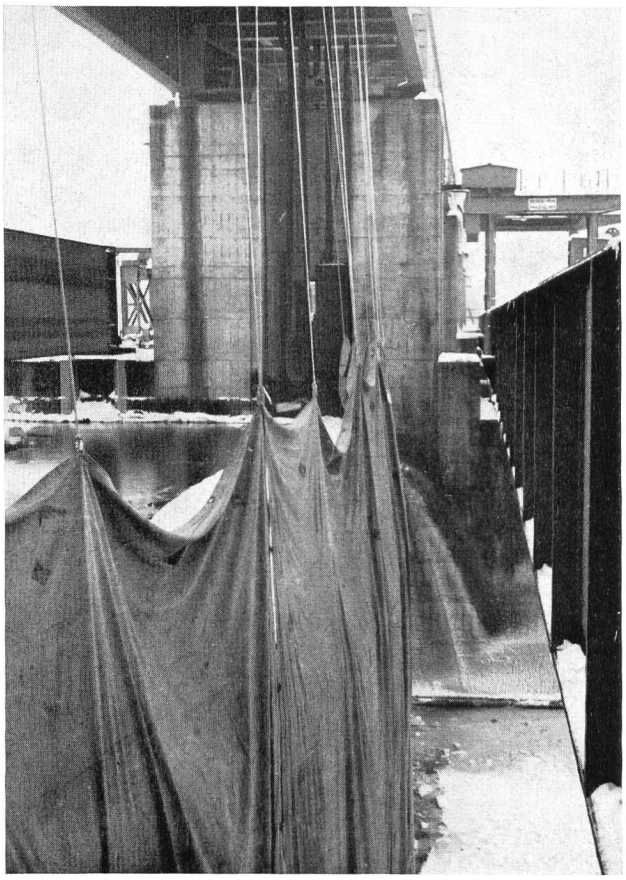


Bild 8 Wärmeschutz beim Wehr des Kraftwerkes Klingnau (Photo Guyer, Klingnau)

Dieses Vorkommnis verlangte für die Betriebsbereitschaft des Wehres Sofortmaßnahmen. Es wurden zwei NELSON-Luftheizapparate mit Ölbrennern für eine totale Wärmeabgabe von rund 200 000 kcal/h bei einem Warmluftausstoß von 80 m^3/min und 90° C entsprechend einer Heizleistung von rund 230 kW aufgestellt (Bild 7). Zusätzlich mußte die Unterwasserseite der Schützen mit Planen abgedeckt werden, um die großen Wärmeverluste zu vermindern (Bild 8). So war es möglich, die Wehrschütze 1 nach 24 Stunden ganz aufzutauen. Um diesen Zustand zu halten, war dann nur noch $^1/_3$ der Heizleistung nötig. Der Brennstoffverbrauch betrug bei voller Heizleistung pro Apparat ungefähr 12 Liter/h, wobei zuerst ein Benzingemisch und später Leichtheizöl verwendet wurde. Der Einbau einer festmontierten Heizung für solche Kälteperioden wird nun studiert.

b) Kraftwerk Reckingen

Das Flußkraftwerk Reckingen besteht aus dem rechtufrigen Maschinenhaus und dem linksufrigen, in der gleichen Achse anschließenden Wehr. Dieses hat drei Öffnungen von je 20 m lichter Weite mit Doppelschützen von je 6 m Höhe als Hakenschützen ausgebildet. Die Ausbauwassermenge beträgt 560 m^3/s und die maximal mögliche Leistung ab Generator 38 000 kW.

Auch beim Kraftwerk Reckingen bildete sich auf einer Strecke von rund 7,5 km wehraufwärts eine Eisfläche. Dadurch war der Betrieb mit den zwei Maschi-

neneinheiten stets ungestört möglich, da das Eis am Rechen keine Schwierigkeiten bot. Aus Sicherheitsgründen wurde während der größten Kälteperiode auf die Abstellung einer Maschinengruppe zu Revisionszwecken verzichtet. Die beiden Generatoren arbeiteten auf verschiedene Netze und beim Ausfall einer Maschine hätte die Last ohne weiteres von der andern Gruppe übernommen und das Wasser ohne Wehrbetätigung weggebracht werden können. Trotzdem galt die Aufmerksamkeit des Personals vor allem dem Wehr, um wenigstens bei einer Öffnung die Oberschütze betriebsbereit zu halten. Mit Koksöfen wurde versucht, die eingefrorenen Dichtungen sowie die Lauf- und Führungsrollen aufzutauen, was nach wenigen Tagen gelang. Auf der Oberwasserseite des Wehrs wurde mit gutem Erfolg durch ein 50 cm unter der Wasseroberfläche angeordnetes 1"-Gasrohr mit kleinen Bohrungen Druckluft geblasen (Bild 9). Auf diese Art konnte stets eine Rinne eisfrei gehalten werden. Schwierigkeiten boten noch die Getriebe der Windwerke. Solche in Ölbädern wurden beheizt, wobei auch Schmiermittel durch andere mit kleinerer Viscosität ausgewechselt wurden.

Bei einem Pegel mußte die 500 W-Heizung im Schwimmerschacht auf 1 kW erhöht werden. Reckingen kam aber doch praktisch ohne größere Schäden und ohne Störungen des Betriebes durch diese Kälteperiode. Die Heizung mit Koksöfen wird jedoch nicht empfohlen und einem Warmluftsystem für die Zukunft der Vorzug gegeben.

c) Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt

Die bauliche Anlage besteht aus dem rechtsufrigen Maschinenhaus und anschließendem Wehr mit vier Öffnungen zu je 24 m lichter Weite und 12 m totaler Schützenhöhe. Die Ausbauwassermenge beträgt 1200 m^3/s und die maximal mögliche Leistung ab Generator beträgt 108 000 kW.

Während der ersten Zeit der Kälteperiode bildete sich auf der Stauhaltung bis Wallbach eine geschlossene Eisdecke, wobei im Oberwasser vor dem Maschinenhaus zwei ungefähr 15 m breite Rinnen eisfrei blieben. Die vorübergehende Erwärmung zwischen dem 16. bis 18. Februar mit Schneefall löste die Eisdecke vom Kraftwerk an etwa 500 m flußaufwärts auf. Die nachfolgenden kälteren Tage vermochten keine geschlossene Eisschicht mehr zu bilden, sodaß sich dann am Rechen tagsüber geborstenes Oberflächeneis in Plattenform im Ausmaße von 50 × 100 m und 1 m Tiefe ansammelte. Ueber Nacht löste sich dieses Treibeis jeweils wieder auf. Als Maßnahme zur Sicherstellung der Abflußregulierung waren vom 11. Februar an im Werk alle Einheiten eingesetzt, teils nur mit kleiner Beaufschlagung, um im Störungsfalle das Wasser einer ausfallenden Maschine sofort mit einer andern Gruppe aufnehmen zu können.

Die Betriebsbereitschaft des Wehres verlangte jedoch große Anstrengungen. Der Versuch, die Absenkbereitschaft der Oberschützen herzustellen, mißlang, weil die Laufbahnen an der Oberwasserseite der Unterschützen zu stark vereist waren. Mit Hilfe von zwei tragbaren Petrolbrennern und zweier mobiler Luftheizapparate NELSON von je 30 000 kcal/h Wärmeleistung konnte schließlich die Beweglichkeit zweier Doppelschützen zum eventuell gleichzeitigen Hochziehen erreicht werden (Bild 10).

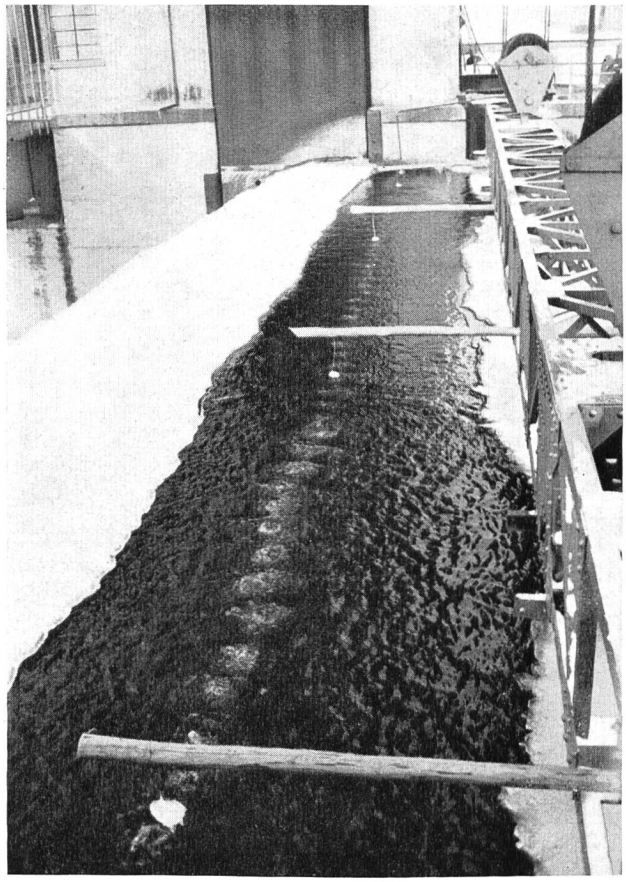


Bild 9 Enteisung des Oberwassers mit Druckluft (Photo Kraftwerk Reckingen)

Bild 10 Wärmezuführung zu den Gleitbahnen einer Schütze beim Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt (Photo G. Moll)

Die Kälteperiode vermochte den Betrieb nie zu stören; nennenswerte Schäden traten keine auf.

3. Zusammenfassung der Erfahrungen an Aare und Rhein

Eine Tatsache ist deutlich zu erkennen: Flußstrecken mit größeren Fließgeschwindigkeiten ($v > 1$ m/s), seien sie nun Stauhaltungen vorgelagert oder bei Kanälen anzutreffen, boten bei den damals herrschenden meteorologischen Verhältnissen Anlaß zu Schwebeisbildung. Diese Eisbildung bringt den Kraftwerken sehr viel Unannehmlichkeiten, sobald dieser Eiszustrom bis zu den Rechen gelangen kann. Zwei ganz typische Beispiele waren die Verhältnisse bei den Kraftwerken Wynau und beim Kraftwerk Eglisau (Bild 11) mit den oberwasserseitig langen offenen Flußstrecken. Anderseits bildete sich im betrachteten Zeitraum auf geschlossenen größeren Stauhaltungen mit Vorliebe Oberflächeneis. Diese Eisart war es denn auch, die verschiedenen Kraftwerken einen ungestörten Betrieb ermöglichte.

Fast alle Kraftwerke hatten dagegen erhebliche Sorgen mit dem Wehr (Bild 12). Gerade zu solchen Zeiten ist es besonders notwendig, daß die Beweglichkeit wenigstens eines Teiles der Wehrverschlüsse gewährleistet ist. Abfluß-Schwankungen können jederzeit durch Störungen in Schaltanlagen und dadurch bedingten Entlastungen oder z. B. durch plötzliche Bildung oder Bruch von Eisbarrieren auftreten. Eine saubere Betriebsführung verlangt regulierbare Wehrverschlüsse. Auch die Schiffahrt war in Mitleidenschaft gezogen. Beim Kraftwerk Birsfelden war die Durchfahrt für 13 Tage gesperrt (Bild 14).

Vorbeugend müssen bei den Wehrverschlüssen einwandfreie Dichtungen hergestellt werden. Wasserverluste und Spritzwasser sind es gerade, die eine arge Vereisung der Wehrpartien fördern. Eine einmal eingetretene Vereisung wurde mit verschiedenen Methoden bekämpft. Angebrachte Koksöfen auf der Unterwasserseite der Wehrabschlüsse, dazu Abdeckungen mit Planen, um die Wärmeverluste zu verkleinern, brachten Erfolge im Auftauen der Gleitbahnen und Rollenführungen. Nachteilig sind bei dieser Art die Abgase, die Eisenkonstruktionen angreifen. Eine andere gute Möglichkeit war das Anblasen der kritischen Stellen mit warmer Luft mit Hilfe von aufgestellten NELSON-Aggregaten.

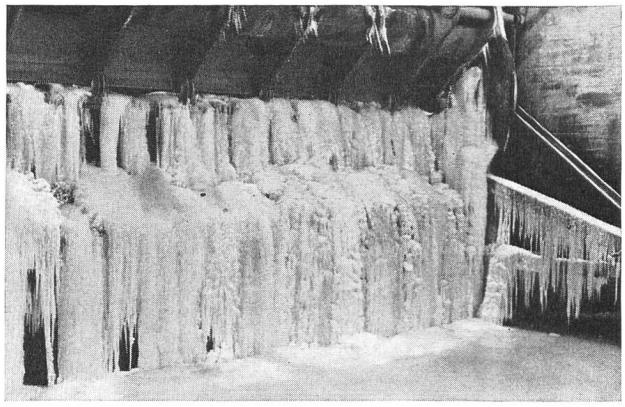


Bild 12 Vereistes Wehr des Kraftwerks Wildegg-Brugg (Photo W. Mischler)

Erwähnt sei auch die Anwendung von warmem Wasser bei der Electricité de France, das erfolgreich auf die Gleitbahnen gesprüht wurde. Eine sehr wirksame Maßnahme ist die Einführung von Druck- oder Warmluft auf der Oberwasserseite des Wehres. Verschiedene Werke erprobten diese Methode. Die Erfahrungen und Überlegungen zeigen, daß der Ort des Luftaustrittes mindestens auf die Tiefe der Horizontalabdichtung zwischen Ober- und Unterschütze verlegt sein oder dann an der Wehrschwelle angebracht werden soll. Dabei muß natürlich das in die Tiefe gehende Zuführungsrohr beheizt werden können.

Nicht zuletzt ist an einen gut eingespielten Meldedienst zwischen den Werken zu erinnern, der es ermöglicht, vor allem Abfluß-Schwankungen wirksam zu begegnen.

All diese Maßnahmen haben jedoch auch ihre wirtschaftliche Seite. Wo die Grenze der Wirtschaftlichkeit aber liegt, ist wohl schwer zu sagen, wenn man bedenkt, daß solch extreme Naturereignisse bei uns vielleicht nur alle 20 oder 25 Jahre einmal vorkommen. Die zusätzliche Belastung der Wehre und Anlagen durch den Eisdruck ist aber bei jeder Projektierung ernsthaft zu studieren und zu berücksichtigen.

Bild 11 Verschachtelte Eisschollen im Rhein bei Rüdlingen, im Stauraum des Kraftwerkes Eglisau (Photo KW Eglisau)

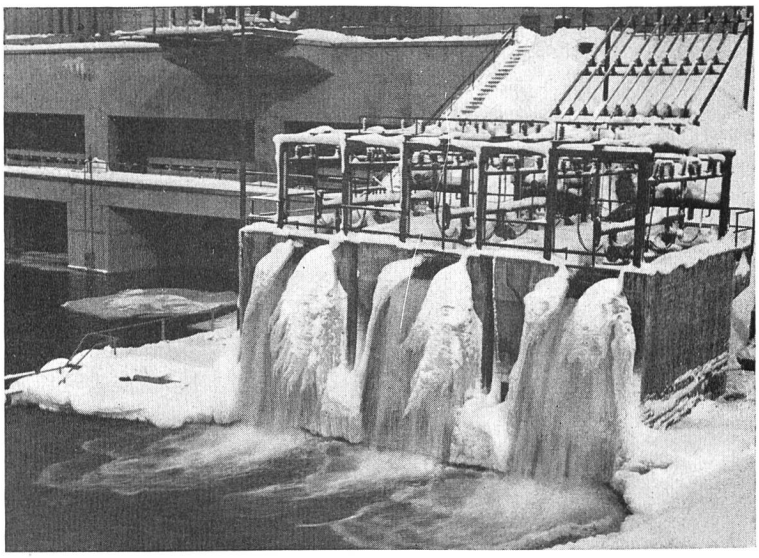


Bild 13 Durch Spritzwasser vereiste Überläufe der Wasserwiderstände beim Rheinkraftwerk Albbruck-Dogern (Photo R. Bach, Waldshut)

D. Erfahrungen im Ausland

Aus Österreich liegt ein Aufsatz «Neue Wege der Eisbekämpfung bei Staukraftwerken» von Dr. *Herbert Böck* [5] vor. Darin wird eine neue Methode der Eisabfuhr beim Donaukraftwerk Jochenstein beschrieben. Anstatt bei drei Wehrfeldern die Oberschütze ständig um 1,2 bis 1,5 m abzusenken und so das Treibeis abzuführen, wurde im Januar 1957 jeweils kurzzeitig, d. h. eine Stunde, ein Wehrfeld voll geöffnet.

Die Öffnungs- und Schließungszeit betrug zusätzlich noch rund eine halbe Stunde. So wurde ein großes Gefälle im Wehrbereich mit einer starken Erhöhung der Wassergeschwindigkeit erreicht. Vor dem Öffnen eines Wehrfeldes wurde der Stau um 20 cm angehoben, um das Eis etwas zu lockern. Über die zeitliche Folge solcher Schwemmversuche spricht sich der Bericht nicht aus. Aber das Resultat war ein voller Erfolg, indem für die Abtrift des Eises auf diese Weise nur rund ein Zehntel derjenigen Wassermenge benötigt wurde, die sonst bei abgesenkter Oberschütze abfloß. Der energiewirtschaftliche Wert lag in einer Einsparung von 80 bis 90 % des bei der bisher angewandten Methode im Durchschnitt auftretenden Energieverlustes von 8 Mio kWh je Winterperiode. Die Wasserbilanz sah wie folgt aus: der Abfluß durch das geöffnete Wehrfeld betrug rund 1 600 m^3/s, die Eigenbedarfsturbine verbrauchte 150 m^3/s und der Zufluß zum Stauraum war 800 m^3/s, sodaß die Entnahme aus dem Stau rund 950 m^3/s betrug.

Aus einer amerikanischen Veröffentlichung über «Eisverhütung durch Druckluft beim Grand Coulée» von *T. G. Owen* [6] ist zu entnehmen, daß ein oberwasserseitiger eisfreier Streifen entlang des Staudammes mit der Belüftungsmethode durch Druckluft erreicht wird. Dabei wurden am Standort des Grand Coulée Dam Temperaturen von — 33° C bei mehrtägiger Dauer festgestellt. Von vielen im Laboratorium untersuchten Methoden wurde die Belüftungsmethode vor allem wegen ihrer Einfachheit gewählt. Der Lufteintritt kann in verschiedenen Tiefen erfolgen. Der angewandte Druck beträgt rund 2,8 kg/cm^2 und die Querschnitte der Einblasrohre haben im Maximum einen Durchmesser von 1".

Eine weitere gute Veröffentlichung sei zum Schluße erwähnt. Es ist die von *K. J. Granbois* «Bekämpfung von Schwebeis in Wasserkraftanlagen» [7]. Der Autor geht darin auf die Grundlagen der Schwebeisbildung ein. Wie bereits eingangs dieses Aufsatzes erwähnt, haben hier Temperaturstudien am Susquehanna-Strom bei den Kraftwerken Safe Harbor und Holtwood gezeigt, daß sich Schwebeis stets dann bildet, wenn die Schnelligkeit der Abkühlung des Wassers 0,01° C/h übersteigt. Dieses Kriterium gilt aber ausschließlich im Bereich zwischen + 0,1 und 0° C. Ist der Gradient der Abkühlung in diesem Bereich zwischen + 0,1 und 0° C jedoch kleiner als 0,01° C/h, dann entsteht Oberflächeneis. Wenn einmal Oberflächeneis entstanden ist, dann bildet sich darunter nie Schwebeis. Es ist nun möglich, mit einem Präzisions-Widerstands-Thermometer an kritischen Tagen die Wassertemperatur laufend zu überwachen. Das ermöglicht, die Neigung zur allfälligen Schwebeisbildung zum Voraus zu sehen und die Gegenmaßnahmen bei den Kraftwerkanlagen rechtzeitig einzuleiten. Man kann diese Apparatur auch Frühwarngerät für die Eisbildung nennen. Nach diesen Versuchen ist beim Überschreiten des kritischen Abkühlungsgradienten zu erwarten, daß bereits eine Stunde nachdem

Bild 14 Zum Eisbrechen eingesetztes Motorschiff (Photo Kraftwerk Birsfelden)

Bild 15 Bedrängte Vogelwelt (Photo K. Achermann)

die Wassertemperatur von 0° C erreicht ist, die Rechen mit Schwebeis verstopft sind. Als wirksame Mittel zur Bekämpfung dieser Eisart werden genannt:

1. Entfernung des obersten Teiles des Rechens, damit das Schwebeis durch die Turbinen wegfließen kann.
2. Möglichkeit, Dampf durch die hohlen Leitungsschaufeln der Turbinen zu treiben, damit sich das Schwebeis an diesen Schaufeln nicht festsetzen kann, und
3. Elektrisch beheizte Rechenstäbe. Zum Beispiel hat Holtwood bei einer Turbine solche Rechenstäbe. Die Heizleistung beträgt 50 kW, d. h. spezifisch ausgedrückt rund 0,27 W/cm² Rechenfläche bei einer Wassereintrittsgeschwindigkeit von rund 0,6 m/s.

E. Schlußwort

Mit diesen Darlegungen wurde versucht, einen kurzen Überblick über die Ereignisse des kalten Februars 1956 bei den Kraftwerken an Aare und Rhein zu geben, wo die verantwortlichen Betriebsleute sorgenvolle Stunden durchmachten. Naturkräfte sind größer als Menschenkräfte. Dies erfuhren auch in tragischer Weise unsere gefiederten Freunde (Bild 15). Während jedoch die Vogelwelt solche Schicksale immer wieder unverändert hinnehmen muß, kann und soll der Mensch aus Erfahrungen lernen, diese Naturkräfte in vernünftige Bahnen zu lenken und sie in Schranken zu halten. Wenn diese Zusammenfassung in diesem Sinne anregt, hat sie ihren Zweck erfüllt.

Literaturnachweis

[1] Das Eisproblem bei Wasserkraftwerken, von *Theodor Strauch*. Die Wasserwirtschaft, 46 (1956) 4, S. 90, und Heft 5, S. 127.

[2] Die Entstehung des Grundeises, von *Gottlieb Lüscher*. Diss. Univ. Zürich 1906.

[3] Twenty years of work in the domain of underwater ice formation 1915—1935, von *W. J. Altberg*. Ass. Int. d'Hydrologie Scientifique Bull. Nr. 23, Riga 1938, pg. 373.

[4] Régime des glaces des rivières, von *M. W. Laszloffy*. La Houille blanche, 3 (1948) 6, Nov./Dez., pg. 469.

[5] Neue Wege der Eisbekämpfung bei Staukraftwerken, von *Herbert Böck*. Österreichische Wasserwirtschaft, 9 (1957) 5/6, S. 123.

[6] Ice Prevention by the Air-Lift System at Grand Coulee, von *T. G. Owen*. Transactions of The American Society of Mechanical Engineers, 64 (1942), April, pg. 201.

[7] Combatting Frazil Ice in Hydroelectric Stations, von *K. J. Granbois*. Transactions of The American Institute of Electrical Engineers, 72 (1953), April, pg. 111.

[8] Die Eisverhältnisse bei den Kraftwerken an Aare und Rhein vom Bielersee abwärts bis Basel im Februar/März 1929, von *A. Härry*. Schweiz. Wasser- und Energiewirtschaft, 22 (1930), Hefte 9, 10, 11, 12.

Seilflügelanlagen für die Vornahme von Wassermessungen

R. Pedroli, Dipl. Ing., Sektionschef im Eidg. Amt für Wasserwirtschaft

Im Verlauf der letzten Jahre zeigte sich bei unserem hydrographischen Dienst, daß die Durchführung von Schiffsmessungen infolge des zunehmenden Mangels an geeigneten Wasserfahrern immer schwieriger wurde. Es ist sogar zu erwarten, daß die Lage sich noch weiter verschlechtert.

Dieselben Schwierigkeiten sind auch in andern Ländern aufgetreten. Wir wußten, daß dort die Schiffsmessungen durch mobile oder permanente Seilflügelanlagen weitgehend ersetzt werden. Es war uns ferner bekannt, daß solche Meßinstallationen verschiedene Vorteile aufweisen: sie sind namentlich bei Hochwasser gefahrlos, sie beanspruchen wenig Personal und fordern vor allen bei ortsfesten Anlagen geringen Zeitaufwand für die Meßvorbereitungen, was bei kurzfristigen Anschwellungen von großer Bedeutung ist.

Aus obigen Gründen faßten wir gegen Ende 1955 den Entschluß, eine vollständige Seilflügelanlage zu beschaffen. Die erste Anlage wurde an der Aare bei Bern aufgestellt. Da dieses Meßverfahren zum ersten Mal in dieser Form bei uns eingeführt wurde, erachteten wir es als notwendig, dessen Ergebnisse mit den bestehenden erprobten Meßmethoden zu überprüfen.

Die mit der zur Verfügung stehenden Meßausrüstung erzielten Ergebnisse, sowie die Art und Weise, wie wir die damit gesammelten Erfahrungen verwerten konnten, werden in den nachfolgenden Ausführungen geschildert.

A. Die fabrikbezogene Seilflügelanlage

1. Sie bestand zur Hauptsache aus zwei Stützen (ungefähr 60 m voneinander entfernt), einem Tragseil, einem endlosen Transportseil, einem Aufhängekabel von 8 mm Durchmesser, welches zugleich als elektrischer Leiter (3-adrig) diente, einer Doppelwinde für die Horizontalverschiebung, das Heben und Senken des Flügelgewichtes, einem 50 kg schweren Flügelgewicht mit kreisrunder Querschnittsform und einem Meldegerät für die akustische Anzeige der Flügel- und Grundtasterkontakte.

   Der Meßvorgang (Punktmessungen) erfolgte in ähnlicher Weise wie bei den Stangenflügeln. Vor der Messung stellte man den Flügel auf eine bestimmte Anzahl Umdrehungen ein und das Zeitintervall zwischen zwei Signalen wurde an einer Stoppuhr abgelesen. Das Flügelgewicht war unten mit einem Grundtaster ausgestattet, welcher bei Sohlenberüh-