Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 86 (1994)

Heft: 5-6

Artikel: Einfluss der internen Sanierungsmassnahmen auf den Sauerstoffhaushalt im Hallwilersee

Autor: Scheidegger, Adrian / Stöckli, Arno / Wüest, Alfred

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940784

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: 07.01.2026

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

Einfluss der internen Sanierungsmassnahmen auf den Sauerstoffhaushalt im Hallwilersee

Adrian Scheidegger, Arno Stöckli und Alfred Wüest

Zusammenfassung

Die internen Massnahmen zur Sanierung des Hallwilersees (Zirkulationshilfe im Winter, Sauerstoffeintrag ins Tiefenwasser im Sommer) haben sich in vielfältiger Weise auf den Sauerstoffhaushalt ausgewirkt. So ist der Sauerstoffinhalt des Sees heute erwartungsgemäss deutlich höher als zu Beginn der 80er Jahre. Hingegen haben sich Gasaustauschgeschwindigkeit und Abbaurate organischen Materials nicht verändert, wohl aber die Art der mineralisierenden Prozesse. Wegen des erhöhten Sauerstoffgehalts im Tiefenwasser reichern sich heute dort keine reduzierten Substanzen mehr an.

Durch die internen Massnahmen ist es gelungen, dem See Sauerstoff in ausreichenden Mengen zuzuführen. Doch der Transport zu den tiefsten Stellen des Sees, wo ein wesentlicher Teil des Sauerstoffes gezehrt wird, ist zu wenig effizient, um auch im Herbst über dem Seegrund die gesetzlich geforderte Konzentration von 4 mg/l O_2 zu gewährleisten. Eine Möglichkeit, den Sauerstoffhaushalt dort zu verbessern, besteht darin, im Sommerhalbjahr den Gasdurchsatz der Diffusoren zu erhöhen und somit eine bessere Mischung des Tiefenwassers zu bewirken. Deshalb wird zurzeit im Frühjahr und Herbst mit Druckluft belüftet und im Sommer die erforderliche Menge reinen Sauerstoffs in kürzerer Zeit eingetragen.

1. Einleitung

Der Hallwilersee ist ein nacheiszeitlicher Moränensee des schweizerischen Mittellandes im Grenzgebiet der Kantone Aargau und Luzern. Er galt seit Jahrzehnten als hoch eutrophes Gewässer mit entsprechend geringem Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser [*Märki* und *Schmid,* 1983]. Neben der Überdüngung mit Nährstoffen, insbesondere Phosphor, tragen die hohe Verweilzeit des Wassers von durchschnittlich 3,8 Jahren und die im Vergleich zur maximalen Tiefe von 46,5 m windgeschützte Lage im Seetal zu der ungünstigen Sauerstoffsituation bei.

Nachdem die Anfang der 60er Jahre errichtete Gabelleitung zur Fernhaltung der aargauischen Abwässer vom Hallwilersee wegen der zunehmenden Phosphorbelastung aus dem oberliegenden Baldeggersee nur einen Teilerfolg brachte, wurden auch seeinterne Massnahmen zur Unterstützung des Gesundungsprozesses studiert [EAWAG, 1979]. Mit Hilfe von 6 Diffusoren wird seit dem Winter 1985/86 eine Zirkulationshilfe betrieben und seit dem Sommer 1987 Sauerstoff ins Tiefenwasser (System «Tanytarsus») eingetragen [*Stöckli* und *Schmid,* 1987].

Von November bis April werden die sauerstoffarmen Wasserschichten mit grobblasiger Druckluft aus der Tiefe herausgemischt. Dadurch wird der Sauerstoffgehalt im Oberflächenwasser reduziert und somit die Wiederbelüftung mit Sauerstoff aus der Atmosphäre verbessert. In der übrigen Zeit, wenn der See infolge des erwärmten Oberflächenwassers dichtegeschichtet ist, wird reiner Sauerstoff (heute zeitweise auch Druckluft) feinblasig über die 6 Diffusoren ins kalte und somit dichtere Tiefenwasser eingetragen. Damit wird dort der durch den Abbau des organischen Materials gezehrte Sauerstoff ersetzt.

Im Rahmen einer Diplomarbeit an der EAWAG wurde der Sauerstoffhaushalt des Hallwilersees detailliert untersucht [*Scheidegger,* 1992]. Die Arbeit konnte sich auf umfangreiches Datenmaterial des aargauischen Baudepartementes abstützen: langjährige Messreihe der Wasserqualität sowie 1985 bis 1987 gemessene Tiefenprofile von Temperatur, Sauerstoff und Leitfähigkeit in und um die Blasenschleier der Diffusoren und entlang der Längsachse des Sees. Da zum feinblasigen Eintrag von Sauerstoff mittels Druckluft noch keine Messungen vorlagen, wurden im Mai 1992 weitere Profile in den Blasenschleiern erhoben und die Einschichtung und Vermischung des Sauerstoffs durch einen Markierversuch mit Schwefelhexafluorid [*Schlatter* et al., 1990] nachgewiesen. Durch die Simulation der Blasenschleier mit einem Computermodell [*Wüest* et al., 1992] konnte der Sauerstofftransport im tiefen Teil des Sees quantifiziert werden.

Im vorliegenden Beitrag wird der Einfluss der seeinternen Massnahmen auf die Sauerstoffkonzentrationen, die Sauerstoffzehrung und auf die Mineralisation des organischen Materials sowie der Sauerstoffaustausch mit der Atmosphäre quantifiziert. Es wird veranschaulicht, wie die Verteilung des mit den Blasenschleiern eingetragenen Sauerstoffes im Tiefenwasser funktioniert. Das bessere Verständnis der Prozesse erlaubt es, die Betriebsweise zu optimieren.

2. Veränderung des Sauerstoffinhalts durch die internen Massnahmen

Die seeinternen Massnahmen verbesserten erwartungsgemäss die Sauerstoffsituation im Hallwilersee. Als Folge der Zirkulationshilfe erhöhte sich Ende Winter der maximale Sauerstoffinhalt des gesamten Sees von 2400 ± 400 t O_2 (vor 1986) auf 3400 ± 400 t O_2 nach 1986 (Bild 1a). Im Herbst konnte der minimale Sauerstoffinhalt des Tiefenwassers (unterhalb 13 m Tiefe) durch den Eintrag im Sommer von 400 bis 650 t O_2 (Bild 1b) nach 1987 von ca. 100 t O_2 auf 600 ± 200 t O_2 erhöht werden (Bild 1a). Die Schwankungen von Jahr zu Jahr waren vorwiegend auf unterschiedliche meteorologische Bedingungen zurückzu-

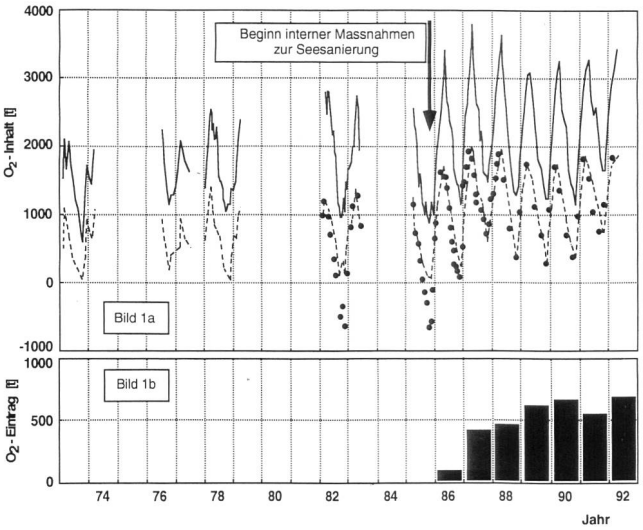

Bild 1. a) Sauerstoffinhalt des Hallwilersees in Tonnen im gesamten See (ausgezogene Linie) und im Tiefenwasser unterhalb 13 m Tiefe (durchbrochene Linie). Die Punkte bezeichnen den «theoretischen» Sauerstoffinhalt im Tiefenwasser nach Abzug des Sauerstoffbedarfs zur Oxidation von gelösten, reduzierten Substanzen. b) Die während des Sommers ins Tiefenwasser eingetragenen Sauerstoffmengen.

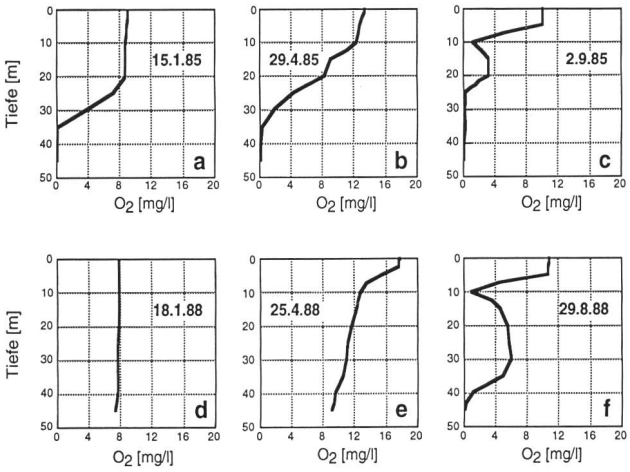

Bild 2. Exemplarische Sauerstoffprofile in der Seemitte: 1985 (vor Beginn der seeinternen Massnahmen; obere Reihe) und 1988 (nach einem Jahr vollumfänglichen Betriebs der Diffusoren; untere Reihe).

führen. Vor 1986 erfolgte Mischung bis zur maximalen Tiefe nur alle 5 bis 10 Jahre. Obwohl die Zirkulationshilfe das Seewasser im Winter weitgehend homogenisiert, kann eine frühzeitige Erwärmung der Seeoberfläche (Ende Winter) auch heute noch (z. B. 1989 und 1990) die Sauerstoffaufnahme aus der Atmosphäre verkleinern, so dass entsprechend der Sauerstoffinhalt im Frühjahr geringer ist.

Für die Beurteilung der seeinternen Massnahmen muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass vor 1986 im Sommer und Herbst der Sauerstoff in den tiefsten Zonen nicht nur vollständig aufgebraucht wurde, sondern sich jeweils eine beträchtliche «Sauerstoffschuld» in Form von gelösten reduzierten Substanzen (Schwefelwasserstoff, Methan, Ammonium, Nitrit, zweiwertiges Eisen und Mangan) anreicherte (Bild 1a). Den Sauerstoffbedarf, der zur Oxidation dieser reduzierten Substanzen notwendig ist, ziehen wir vom effektiv vorhandenen Sauerstoff des Tiefenwassers ab und bezeichnen den verbleibenden Rest als «theoretischen» Sauerstoffinhalt (auch als «Restsauerstoff» bezeichnet [*Bührer,* 1975]). Dieser lag in den Jahren 1982 und 1985 (vorher fehlten Messungen des Methans) bei minimal –700 t O_2. Im Herbst 1986, als mit der Belüftungseinrichtung erst ein Testbetrieb möglich war, lag der «theoretische» Sauerstoffinhalt noch um rund 200 t tiefer als der effektive Sauerstoffinhalt des Tiefenwassers. Ab 1987 traten keine nennenswerten Mengen von reduzierten Substanzen auf, somit waren effektiver und «theoretischer» Sauerstoffinhalt identisch.

Exemplarische Sauerstoffprofile in der Seemitte (1985: vor Beginn der seeinternen Massnahmen; 1988: nach einem Jahr vollumfänglichen Winter- und Sommerbetriebs) veranschaulichen die Verbesserungen in den verschiedenen Tiefenzonen (Bild 2). Im Gegensatz zu 1985, als Mitte Januar und Ende April der See unterhalb 35 m Tiefe sauerstofffrei war, wurden Mitte Januar 1988 in allen Tiefen bereits 8 mg/l O_2 gemessen. Bis Ende April 1988 erreichten die Sauerstoffgehalte im Tiefenwasser Werte von 9 bis 12 mg/l (Bild 2). Im Vergleich zu 1985, als Anfang September unterhalb 8 m Tiefe die gesetzlich geforderte Konzentration von 4 mg/l Sauerstoff noch nicht erreicht wurde und der See unterhalb von 25 m sauerstofffrei war, lagen Ende August 1988 im Tiefenwasser die Gehalte bis in 35 m Tiefe über 4 mg/l O_2. Nur in der Sprungschicht (um 10 m Tiefe) und knapp über Grund waren die Sauerstoffkonzentrationen noch ungenügend (Bild 2).

Die horizontale Verteilung des Sauerstoffs im Tiefenwasser vor Beginn der seeinternen Massnahmen ist aus Bild 3a ersichtlich. Wegen der Sauerstoffzehrung der Sedimente stiegen die O_2-Isolinien (Linien gleicher Sauerstoffkonzentration) an den beiden See-Enden annähernd parallel zum Sediment an. In 30 m Tiefe wurde daher zwischen Seemitte und Rand eine horizontale Konzentrationsdifferenz von immerhin 4 mg/l O_2 beobachtet. Ein Jahr später war bei Eintrag von 2,9 Tonnen Sauerstoff pro Tag am Seegrund nur noch wenig Wasser ohne Sauerstoff, und der in der Seemitte ins Tiefenwasser eingetragene Sauerstoff verteilte sich über die gesamte Länge des Hallwilersees (Bild 3b).

3. Zehrung und Mineralisation

Während im Verlaufe des Sommers der Sauerstoffgehalt des Oberflächenwassers wegen der Algenproduktion übersättigt wird, sinkt derjenige des Tiefenwassers aufgrund des Abbaus organischen Materials (Bild 2). Diese zeitliche Abnahme verläuft im Sommer und Herbst linear, falls — wie nach 1986 — im Tiefenwasser genügend Sauerstoff vorhanden ist (Bild 4: 1987). Vor 1986, als der Sauerstoff im Tiefenwasser im Verlaufe des Sommers zur Neige ging, nahm die Zehrungsrate des Sauerstoffs entsprechend ab (Bild 4: 1985), weil das sauerstoffhaltige Wasservolumen laufend kleiner wurde.

Will man eine Aussage über die Menge des gesamten abgebauten organischen Materials machen (Mineralisation), so genügt es nicht, den effektiven Sauerstoffinhalt allein zu betrachten, da die Biomasse auch ohne Sauerstoff abgebaut werden kann. Für die Berechnung der Mineralisation wird daher vom «theoretischen» Sauerstoffinhalt, der die reduzierten Substanzen mitberücksichtigt, ausgegangen. Im Gegensatz zur Sauerstoffzehrungsrate, die beispielsweise 1985 mit schwindendem Sauerstoff abnahm, blieb die Mineralisationsrate konstant (Bild 4: 1985). Durch die verbesserte Sauerstoffversorgung entstanden ab 1987 praktisch keine reduzierten Substanzen (Bild 4: 1987), und folglich waren Sauerstoffzehrung und Mineralisation innerhalb der Fehlergrenzen gleich gross (Tabelle 1).

Die Mineralisationsraten im Tiefenwasser lagen in den letzten 10 Jahren zwischen 8,5 und 10,6 t/d O_2 (Tabelle 1). Die Menge des abgebauten, organischen Materials hat sich durch die seeinternen Massnahmen nicht signifikant verändert: Die Rate der Mineralisation blieb im Mittel konstant bei ca. 9 t/d O_2 (Tabelle 1). Verändert haben sich jedoch die Mineralisationsprodukte: Die Oxidation des organischen Materials verläuft nun vollständig zu CO_2 (sowie Nitrat, Sulfat,...), weil reduzierte Substanzen im Wasser sofort oxidiert werden.

Die Analyse der Zehrungs- und Mineralisationsraten als Funktion der Tiefe zeigt ausserdem, dass rund zwei Drittel der Zehrung und Mineralisation am und im Sediment erfolgt [*Scheidegger,* 1992]. Unterhalb von 40 m Tiefe beträgt dieser Anteil sogar mehr als 90%, was der wannenartigen Beckenform des Hallwilersees zuzuschreiben ist. Deshalb ist es bisher nicht gelungen, die Sauerstoffkonzentration in den untersten Schichten dauernd auf mindestens 4 mg/l O_2 zu halten (Bild 3b).

4. Sauerstoffaufnahme aus der Atmosphäre

Aufgrund des Gasaustausches über die Seeoberfläche steigt der Sauerstoffinhalt im Laufe des Winters an (Bild 1). Der Sauerstofffluss $F(t)$ [g/(m²d)] von der Atmosphäre in den See ist proportional einerseits zur Differenz zwischen Sättigungskonzentration $C_S(t)$ [g/m³] und aktueller Oberflächen-

Tabelle 1. Sauerstoffzehrungs- und Mineralisationsraten im Tiefenwasser des Hallwilersees vor und nach Beginn der seeinternen Massnahmen. Der Unterschied zwischen Zehrung und Mineralisation im Jahre 1986 zeigt, dass mit Zirkulationshilfe allein nicht genügend Sauerstoff ins Tiefenwasser eingebracht wird.

	Sauerstoffzehrung [t/d O_2]	Mineralisation [t/d O_2]
1973	3,6 ± 0,5	
1978	5,2 ± 0,2	
1982	6,4 ± 0,2	9,5 ± 0,8
1985	5,0 ± 0,5	8,6 ± 0,4
Mittelwert vor Massnahmen *	5,5 ± 0,3	8,8 ± 0,5
1986	7,5 ± 0,4	8,5 ± 0,3
1987	9,5 ± 0,3	9,1 ± 0,4
1988	10,7 ± 0,3	10,4 ± 0,8
1989	8,9 ± 0,4	8,7 ± 0,2
1990	11,3 ± 0,5	10,6 ± 0,5
1991	8,7 ± 0,1	8,8 ± 0,3
Mittelwert nach Massnahmen *	9,0 ± 0,2	8,9 ± 0,3

* Mittelwert ± gemittelter Fehler

konzentration $C_O(t)$ [g/m³] und andererseits zur Gasaustauschgeschwindigkeit β [m/d]:

$$F(t) = \beta(t) \cdot [C_S(t) - C_O(t)]$$

β ist ein Mass dafür, wie effizient O_2-Moleküle durch die Luft/Wasser-Grenzschicht transportiert werden, und ist deshalb abhängig von der Turbulenz an der Oberfläche (Windgeschwindigkeit, Eisbedeckung).

Die Analyse aller verfügbaren Sauerstoffmessungen zeigt, dass die Gasaustauschgeschwindigkeit β durch die Zirkulationshilfe nicht messbar verändert wird (Tabelle 2). Die Schwankungen von β, die in erster Linie auf unterschiedliche Witterungsverhältnisse zurückgeführt werden, sind grösser als die Veränderung des mittleren β von 0,38 m/d (vor 1985) auf 0,40 m/d (nach 1985). Zwar ist zu erwarten, dass der Blasenschleier, der sehr viel kleiner als die Seefläche ist, die turbulenzabhängige Gasaustauschgeschwindigkeit nicht direkt beeinflussen kann. Denkbar wäre hingegen eine indirekte Wirkung auf β durch verminderte Eisbildung. Durch die winterliche Zirkulationshilfe wird sauerstoffreiches Oberflächenwasser durch sauerstoffarmes Tiefenwasser ersetzt. Da im sauerstoffärmeren Wasser das Sättigungsdefizit (Differenz zwischen Sättigungskonzentration und aktueller Konzentration) höher ist, ist der Sauerstofffluss $F(t)$ aus der Atmosphäre in den See in den Jahren mit Zirkulationshilfe deutlich höher als in den Wintern zuvor (Tabelle 2).

Die winterliche Zirkulationshilfe beeinflusst auch die biologischen Vorgänge im See: In den Jahren 1986, 1987, 1988 und 1990 wurde die Anlage jeweils erst zu Beginn des Monats Mai ausser Betrieb genommen. Dies führte (zumindest 1987 und 1988) dazu, dass die Dichteschichtung und die maximale Sauerstoffsättigung im Tiefenwasser später auftraten, als dies natürlicherweise der Fall gewesen wäre [*Scheidegger,* 1992]. Der Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser wurde dabei besonders hoch, weil der an der Seeoberfläche von den Algen produzierte Sauerstoff durch die Zirkulationshilfe in die Tiefe transportiert wurde. Dieser Vorteil ist jedoch vorsichtig zu werten, denn bei einer durch die Zirkulationshilfe saisonal verlängerten Vermischung werden Nährstoffe aus dem Tiefenwasser nachgeliefert, die die Algenproduktion ankurbeln und damit (zeitlich verzögert) die Sauerstoffzehrung erhöhen. Ebenso kann eine stark veränderte Dichteschichtung die Artenzusammensetzung der Algen verändern [*Bürgi* und *Stadelmann,* 1991]. Um die natürliche Dichteschichtung nicht zu behindern, wurde deshalb seit 1991 von der Zirkulationshilfe auf feinblasige Belüftung mit Druckluft umgestellt (Kapitel 6), sobald sich das Oberflächenwasser auf rund 7°C erwärmte. Dies ist jeweils Ende März bis Mitte April der Fall.

5. Sauerstoffeintrag ins Tiefenwasser

Der künstliche Eintrag verändert den Sauerstoffhaushalt vor allem im Tiefenwasser. Die eingetragenen Gasblasen erzeugen oberhalb des Diffusors einen aufsteigenden Blasenschleier. Bild 5 zeigt schematisch dessen Funktionsweise: Der sich über dem Diffusor bildende, aufwärtsgerichtete Wasserstrom wird mit zunehmender Höhe durch sich einmischendes Wasser breiter (Bild 5b) und langsamer. Nachdem der Blasenschleier die maximale Höhe erreicht hat (Obergrenze, Bild 5b), sinkt das nun blasenfreie und daher schwerere Wasser zurück und schichtet sich gemäss seiner Dichte ein (Einschichttiefe). Die Einschichttiefe wird im Fernfeld durch ein kleines lokales O_2-Maximum angezeigt (Bild 5a). Ausserhalb des Blasenschleiers bildet sich eine abwärts gerichtete Kompensationsströmung, deren Geschwindigkeit durch den Wasserstrom im Blasenschleier und durch die Querschnittsfläche des Sees bestimmt ist (Bild 5b). Aus vertikalen und zeitlichen Temperaturgradienten kann diese kompensierende Absenkung im Fernfeld und damit indirekt der aufwärts strömende Wasserfluss bestimmt werden [*Scheidegger,* 1992].

Die Obergrenze und die Einschichttiefe des Blasenschleiers sind vor allem vom Volumenfluss des zugeführten Gases, von der Blasengrösse und von der Dichteschichtung abhängig [*Wüest* et al., 1992]. Die Obergrenze des Blasenschleiers kann beispielsweise mittels eines Temperaturprofils im Zentrum des Blasenschleiers bestimmt werden: Der Blasenschleier enthält kaltes Wasser aus der Tie-

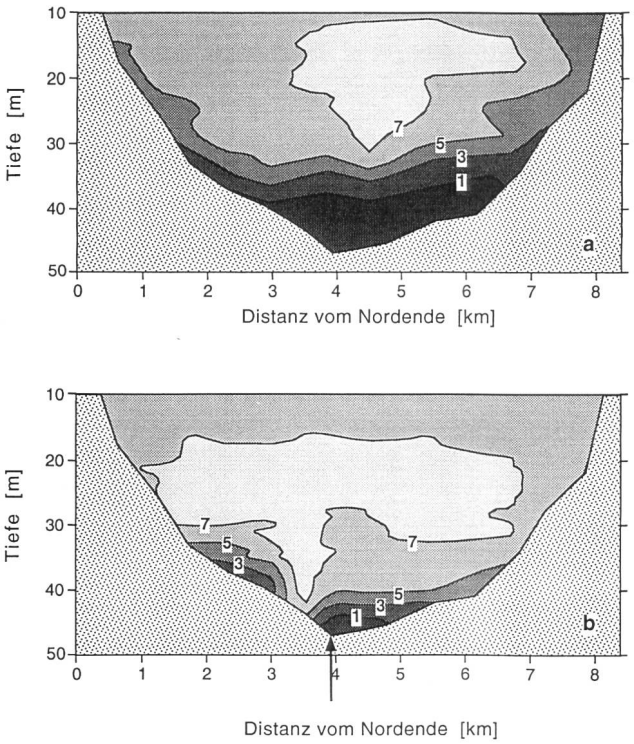

Bild 3. O_2-Isolinien im Nord-Süd-Transekt des Hallwilersees: a) Situation am 15. August 1986 (kein Eintrag von Sauerstoff), b) am 1. September 1987 mit Eintrag von 2,9 t reinen Sauerstoffs pro Tag. Der Pfeil zeigt die Position der 6 Diffusoren im Bereich der tiefsten Stelle.

Tabelle 2: Gasaustauschgeschwindigkeit β und Sauerstoffaufnahme aus der Atmosphäre im Winter: Ohne Zirkulationshilfe (oben) und mit Zirkulationshilfe (unten).

Ohne Zirkulationshilfe	1977	1978	1979	1983	Mittel
Beobachtungsbeginn	6.12.76	9.1.78	20.11.78	22.12.82	
Beobachtungsende	7.3.77	6.3.78	2.4.79	21.3.83	
Anzahl Messungen	4	3	6	4	
Gasaustauschgeschwindigkeit [m/d]	0,39	0,54	0,30	0,31	0,38
Sauerstoffaufnahme [t/d O_2]	12	21	13	14	15

Mit Zirkulationshilfe	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Mittel
Beobachtungsbeginn	6.1.86	15.12.86	14.12.87	23.11.88	4.12.89	10.12.90	9.12.91	
Beobachtungsende	1.4.86	16.3.87	15.2.88	30.1.89	19.2.90	18.2.91	17.2.92	
Anzahl Messungen	4	5	3	3	3	3	3	
Gasaustauschgeschwindigkeit [m/d]	0,31	0,49	0,39	0,35	0,36	0,43	0,46	0,40
Sauerstoffaufnahme [t/d O_2]	16	20	15	17	19	18	15	17

fe, das in das wärmere Umgebungswasser eindringt. Wie Bild 5c zeigt, ist die Temperaturdifferenz zwischen dem Blasenschleier und dem oben anschliessenden Umgebungswasser deutlich sichtbar.

Auswertungen der vorhandenen Messungen aus den Jahren 1986 und 1987 ergaben im Sommer bei einem Durchsatz von 20 kg/h O_2 pro Diffusor eine Tiefe der Obergrenze des Blasenschleiers von 22 ± 3 m. Die Einschichttiefe lag in demselben Zeitraum zwischen 25 und 33 m. Damit verbleibt der eingetragene Sauerstoff vollständig im Tiefenwasser, allerdings vorerst im oberen Teil. Der Transport des eingetragenen Sauerstoffes in die tiefste Zone des Sees erfolgt durch die oben beschriebene Absenkung im Fernfeld (Bild 5b).

Vor dem Betrieb der seeinternen Anlage wurde der Sauerstoff im Sommer nur durch turbulente Diffusion in die Tiefe transportiert: Der Fluss nach unten ist dabei proportional zum vertikalen turbulenten Diffusionskoeffizienten und zum Konzentrationsgradienten des Sauerstoffes (Bild 6a). Durch den Sauerstoffeintrag ins Tiefenwasser wird die Effizienz des vertikalen Transportes deutlich gesteigert: Nun wird das Wasser im Fernfeld advektiv nach unten transportiert. Der Fluss hängt damit von der aktuellen Sauerstoffkonzentration im Wasser und von der Geschwindigkeit der Absenkung im Fernfeld ab (Bild 6b). Bild 6a zeigt einen Vergleich der nach unten gerichteten Sauerstoffflüsse vor und nach Beginn des Sauerstoffeintrages. Die Transportleistung nimmt in beiden Fällen nach unten ab: Dies einerseits wegen der nach unten kleiner werdenden Querschnittfläche des Sees, andererseits wegen der in Sedimentnähe kleineren Konzentrationen bzw. Gradienten von Sauerstoff.

Durch Vergleich der vorhandenen Felddaten mit Rechnungen eines Blasenschleier-Modells [*Wüest* et al., 1992] konnte letzteres für den Hallwilersee besser geeicht werden [*Scheidegger,* 1992]. Es kann nun dazu verwendet werden, wie im folgenden ansatzweise diskutiert, den Betrieb zu optimieren.

6. Optimierung des Belüftungsbetriebs

Der Eintrag von reinem Sauerstoff ist kostspielig (rund 350 Franken pro Tonne). Deshalb wurde versucht, den Belüftungsbetrieb zu optimieren. Ziel war es, die gesetzlich geforderte minimale Konzentration von immer und überall mindestens 4 mg/l O_2 einzuhalten. Als Optimierungskriterien sind daher sowohl mengenmässig ausreichender Sauerstoffeintrag als auch eine möglichst gleichmässige Verteilung des Sauerstoffes im Tiefenwasser anzustreben. Wie aus Bild 2 und 3 ersichtlich ist, war der Sauerstofftransport im Bereich maximaler Tiefe noch zu wenig effizient, um den in Sedimentnähe gezehrten Sauerstoff genügend zu ersetzen.

Da die Absenkung im Fernfeld mit dem Wasserstrom des Blasenschleiers und somit indirekt mit der Rate des eingetragenen Gases zunimmt, wurde eine Erhöhung des Gasdurchsatzes angestrebt. Seit einigen Jahren wurde der Ein-

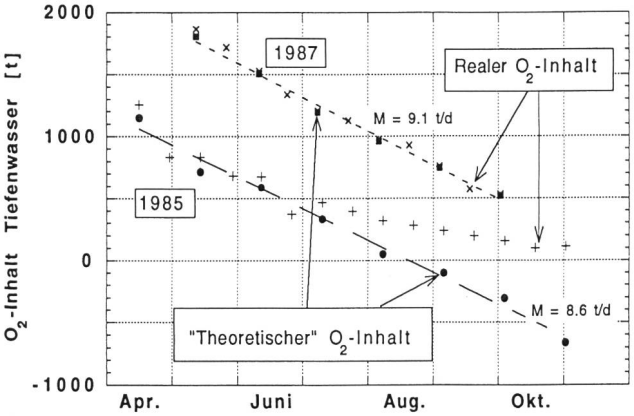

Bild 4. Veränderung des effektiven und des «theoretischen» Sauerstoffinhalts des Tiefenwassers unter aeroben (1987: mit Sauerstoffeintrag) und teilweise anaeroben (1985: ohne Sauerstoffeintrag) Bedingungen. Die Differenz zwischen dem effektiven und «theoretischen» Sauerstoffinhalt umfasst den Sauerstoffbedarf zur Oxidation der reduzierten Substanzen. Zur Berechnung der Mineralisation wurde 1987 der Sauerstoffeintrag ins Tiefenwasser abgezogen.

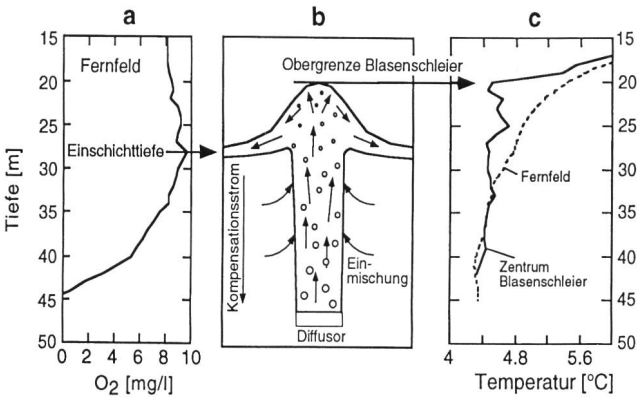

Bild 5. Schematische Darstellung eines Blasenschleiers vom 8. Juli 1987: Die Einmischung von Tiefenwasser, die sich auflösenden Blasen und die Dichteschichtung definieren die Obergrenze des Blasenschleiers (b). Diese kann aus der Temperaturdifferenz der Profile im Blasenschleier-Zentrum (ausgezogene Linie) und im Fernfeld (gestrichelte Linie) bestimmt werden (c). Das Maximum im O_2-Profil zeigt die Einschichtungstiefe an (a).

trag von reinem Sauerstoff von 2,9 t/d O_2 auf 3,5 bis 5,1 t/d O_2 erhöht und entsprechend die Eintragsperiode verkürzt. Dafür wurde von April bis Anfang Juni und im Oktober (falls im Tiefenwasser mengenmässig genügend Sauerstoff vorhanden war) mit 180 Nm^3/h Druckluft feinblasig belüftet, was einem Luft-Sauerstoff-Eintrag von 1,3 t/d O_2 entspricht. Die positive Wirkung des Druckluftbetriebs zeigt sich deutlich in Bild 7 aus dem Vergleich der Betriebsbedingungen im Sommer und Herbst.

Der Effekt des unterschiedlichen Betriebes sei anhand des kritischen Volumens unterhalb von 40 m Tiefe diskutiert. Beim feinblasigen Druckluftbetrieb im Oktober (Bild 7 unten) war die Nachlieferung von Sauerstoff in die Wasserschicht von 40 bis 46,5 m Tiefe durch die Absenkung im Fernfeld fast gleich gross wie beim Betrieb mit reinem Sauerstoff im Juli (Bild 7 oben). Dies obwohl im Herbst die Sauerstoffkonzentration im Fernfeld geringer ist. Der Grund liegt darin, dass durch den höheren Gasdurchsatz im Oktober auch ein grösserer Wasserstrom erzeugt wird. Damit war der Sauerstofftransport in die Wasserschicht unterhalb von 40 m (Prozesse 1 + 2, Bild 7) im Sommer 1,8mal und im Herbst 3,2mal grösser als der jeweilige Sauerstoffeintrag in den See über die Diffusoren (Prozess 3, Bild 7). Solange die mittlere Konzentration im Tiefenwasser hoch ist, kann durch den Eintrag von feinblasiger Druckluft ein grosser Sauerstofftransport in die kritische tiefste Zone erreicht werden.

Der Betrieb mit feinblasiger Druckluft muss jedoch Gewähr bieten, dass mit dem Blasenschleier nicht phosphorreiches Tiefenwasser, das die Algenproduktion steigern könnte, an die Oberfläche gelangt. Diese Gefahr besteht vor allem im Frühjahr, wenn der See noch wenig dichtegeschichtet ist. Gemäss den Messungen am 11. Mai 1992 stieg der Blasenschleier bis auf 5 m unter die Wasseroberfläche auf. Der Markierversuch mit Schwefelhexafluorid zeigte aber, dass das aufsteigende Tiefenwasser rasch absinkt und sich im Bereich zwischen 15 und 20 m, also deutlich unterhalb der produktiven Zone, einschichtete.

Die bisherige Erfahrung zeigt, dass durch den erzeugten Mischungseffekt die Sauerstoffkonzentration am Grund bis jeweils im Juni über 4 mg/l gehalten werden kann. Mit dem Eintrag von reinem Sauerstoff im Sommer wird der Rückgang der Sauerstoffkonzentration im Tiefenwasser zwar verlangsamt, am Grund allerdings sinkt die Sauerstoffkonzentration rasch unter 4 mg/l. Im Herbst kann mit dem Druckluftbetrieb der im Tiefenwasser in genügendem Ausmass vorhandene Sauerstoff effizienter in die tiefsten Schichten transportiert werden. Mit dem kombinierten Einsatz von reinem Sauerstoff und Druckluft kann somit der Sauerstoffeintrag dem von Jahr zu Jahr unterschiedlichen Bedarf des Tiefenwassers optimal angepasst werden. Damit können auch die Kosten für den Sauerstoffeintrag minimiert werden.

7. Ausblick

Bezüglich Siedlungsabwasser ist das Einzugsgebiet des Hallwiler- und Baldeggersees heute weitgehend saniert. Seit einigen Jahren wird auch im Bereich Landwirtschaft der Gewässerschutz mittels Kontrollen, Beratung und finanziellen Beiträgen gefördert. Die 1988 bis 1990 gemessene Nährstoffbelastung des Hallwilersees belegt, dass durch die verschiedenen Massnahmen im Einzugsgebiet der jährliche Phosphoreintrag seit Ende der 70er Jahre von 16 auf 6,4 Tonnen vermindert werden konnte [Baudepartement des Kantons Aargau, 1992]. Entsprechend nahm die mittlere Phosphorkonzentration im See von 250 auf heute

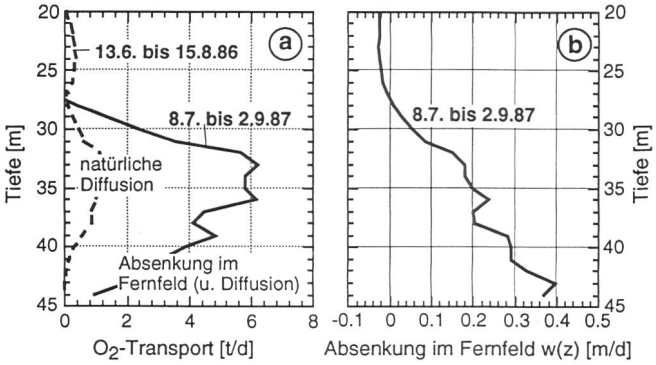

Bild 6. Die Absenkung im Fernfeld entspricht einer nach unten gerichteten Geschwindigkeit der Wasserschichten (b). Der dadurch verursachte Sauerstofftransport in die tiefsten Zonen wird mit dem Transport durch die natürliche, turbulente Diffusion (Situation vor Diffusorbetrieb) verglichen (a).

rund 80 mg/m^3 ab. Um das Sanierungsziel von rund 30 mg/m^3 zu erreichen, muss der jährliche Phosphoreintrag auf rund 3 Tonnen gesenkt werden. Hierzu sind noch weitere Anstrengungen, insbesondere im Bereich Landwirtschaft, erforderlich.

Der Phosphorinhalt des Hallwilersees hat noch nicht ein Niveau erreicht, das einen wesentlichen Rückgang der Algenproduktion und der Sauerstoffzehrung erwarten lässt. Die regelmässigen Untersuchungen der Bodenfauna *[Stössel,* 1992] zeigen aber, dass aufgrund der verbesserten Sauerstoffsituation Würmer und Zuckmückenlarven – als Bioindikatoren für die Sauerstoffversorgung der Sedimente – bereits weite Teile des Seegrundes wiederbesiedelt haben.

Ende 1995 wird der 1984 gesprochene Rahmenkredit des aargauischen Grossen Rats von 4,5 Millionen Franken für die seeinternen Massnahmen aufgebraucht sein. Das Baudepartement des Kantons Aargau und die EAWAG arbeiten gegenwärtig gemeinsam an einem Konzept zur Weiterführung der Sanierungsmassnahmen.

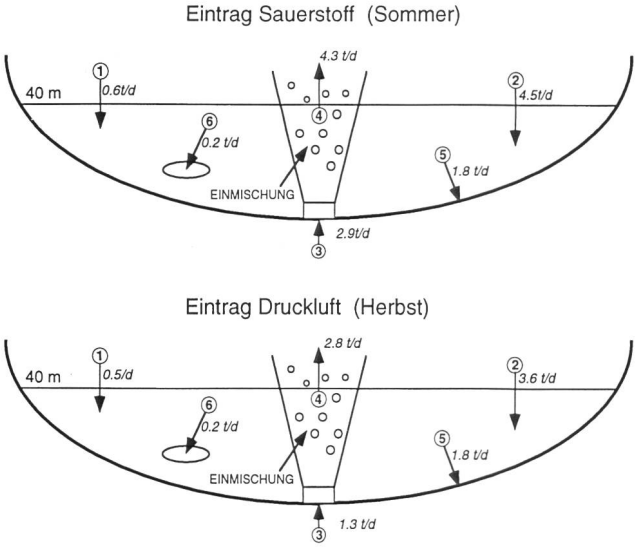

Bild 7. Quantifizierung der Sauerstoffflüsse in den untersten 6,5 m des Hallwilersees für die Situation am 8. Juli 1987 (oben) und am 14. Oktober 1991 (unten). Die Prozesse sind wie folgt bezeichnet (eingekreiste Nummern): 1: Turbulente Diffusion; 2: Import durch Absenkung im Fernfeld; 3: Eintrag durch Diffusoren; 4: Sauerstoffexport mit dem Blasenschleier; 5: Sauerstoffzehrung an der Sedimentfläche; 6: Sauerstoffzehrung im Wasservolumen (Erklärungen im Text). Bilanzierungsfehler ergeben sich aus mangelnder Genauigkeit bei der Berechnung einzelner Prozesse.

Verdankungen

Die Autoren danken *B. Wehrli* für die Mitbetreuung der Diplomarbeit, *D. Livingstone* für die Anregungen bei der Bestimmung der Gasaustauschgeschwindigkeit, *M. Hofer* für die Mitarbeit beim Markierversuch mit Schwefelhexafluorid und *H. Bührer* für die Bereitstellung der monatlichen Sauerstoffprofile.

Literatur

Baudepartement des Kantons Aargau (1992): Sanierung des Hallwilersees; Zuflussuntersuchung zur Nährstoffbelastung 1988/90 (Schlussbericht). «wasser, energie, Luft» *84* (3/4), 66 – 67.

Bührer, H. (1975): Computerprogramm zur Bekanntgabe aktueller Seedaten. «Schweiz. Z. Hydrol.» *37* (2), 332 – 346.

Bürgi, H. R. und *P. Stadelmann* (1991): Plankton succession in lake Sempach, lake Hallwil and lake Baldegg before and during internal restauration measures. «Verh. Internat. Verein. Limnol.» *24,* 931 – 936.

EAWAG (1979): Gutachten über die Sanierungsmöglichkeiten für den Baldegger- und Hallwilersee. Auftrag Nr. 4559, 110 Seiten.

Märki, E. und *M. Schmid* (1983): Der Zustand des Hallwilersees. «wasser, energie, luft» *75* (4), 105 – 112.

Scheidegger, A. (1992): Sauerstoffhaushalt im Hallwilersee: Eine Untersuchung des Einflusses der internen Massnahmen zur Seesanierung. Diplomarbeit ETHZ/EAWAG, 112 Seiten.

Schlatter, J., M. Hofer und *D. M. Imboden* (1990): Die Verwendung von Schwefelhexafluorid zum Studium von Transportprozessen in Seen. «Gas-Wasser-Abwasser» *70,* 36 – 42.

Stöckli, A. und *M. Schmid* (1987): Die Sanierung des Hallwilersees. Erste Erfahrungen mit Zwangszirkulation und Tiefenwasserbelüftung. «wasser, energie, luft» *79* (7/8), 143 – 149.

Stössel, F. (1992): Die Bodenfauna im Hallwilersee dringt vor. «Mitteilungen der EAWAG» *34,* 23 – 26.

Wüest, A., N. H. Brooks and *D. M. Imboden* (1992): Bubble Plume Modeling for Lake Restoration. «Water Resources Res». *28,* 3235 – 3250.

Adressen der Verfasser:

Adrian Scheidegger, INFRAS, Rieterstrasse 18, CH-8002 Zürich.

Dr. Arno Stöckli, Baudepartement des Kantons Aargau, Abt. Umweltschutz, Buchenhof, CH-5001 Aarau.

Dr. Alfred Wüest, EAWAG, Abt. Umweltphysik, CH-8600 Dübendorf.

Das Projekt einer regionalen Entsorgungsanlage

in Niedergösgen (Kanton Solothurn)

Dr. Erich Utzinger

Zusammenfassung

Die RENI-Anlage ermöglicht dank einem modernen Wirbelschichtofen die Verbrennung von Abfallstoffen aus der Papierproduktion, von Klärschlamm, Abfallholz, Geschwemmsel und ähnlichem. Die dabei freiwerdende Wärme dient der Erzeugung von Dampf, welcher für den Betrieb der Papiermaschine der Kartonfabrik Niedergösgen verwendet werden kann. Das Projekt ist nicht zuletzt eine Folge der heutigen Umweltschutzbestimmungen, insbesondere der 1991 in Kraft getretenen «Technischen Verordnung über Abfälle (TVA)». Das – wie bei solchen Projekten heutzutage übliche – langwierige Bewilligungsverfahren konnte Anfang 1994 abgeschlossen werden. Mitte März 1994 wurde mit dem Bau begonnen. Die Betriebsaufnahme ist für den Herbst 1995 vorgesehen.

1. Vorgeschichte

Bereits seit 1990 verfolgte ein Konsortium, dem die Kartonfabrik Niedergösgen (KANI) und die Aare-Tessin AG (Atel), welche die Federführung innehatte, angehörten, das Projekt einer regionalen Entsorgungsanlage in Niedergösgen. Ausgelöst wurden diese Bemühungen durch neue Umweltschutzvorschriften. War es nämlich bis anhin möglich, die bei der Herstellung von Papier aus Altpapier anfallenden Abfallstoffe in Deponien zu entsorgen, so ist dies nach der «Technischen Verordnung über Abfälle (TVA)» vom Dezember 1990 nicht mehr zulässig; solche Stoffe sind nun zwingend zu verbrennen. Die dabei freiwerdende Wärme kann zur Erzeugung von Dampf für den Betrieb der Papiermaschine verwendet werden.

In der Zwischenzeit zeigte es sich, dass es sinnvoll ist, dieses Projekt zusammen mit den drei Abwasserverbänden Olten, Schönenwerd und Aarau, welche in der geplanten Anlage ihren Klärschlamm verbrennen wollen, zu realisieren. Die Atel selbst kann in der RENI ihr Geschwemmsel aus Flusskraftwerken entsorgen.

2. Bewilligungsverfahren

Das RENI-Projekt hatte eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) zu bestehen. Als Basis dieses Verfahrens diente ein umfangreicher Umweltverträglichkeitsbericht. Er wurde im Rahmen eines Gestaltungsplanverfahrens im April 1992 in Niedergösgen öffentlich aufgelegt. Über 100 Einsprachen mussten behandelt werden, darunter auch eine des WWF. In der Folge wurde das Projekt einer sehr kritischen Begutachtung durch verschiedene Experten unterzogen. In dieser Phase zeigten sich die Qualitäten des Projektes: Es mussten nur kleine Projektänderungen vorgenommen werden. Anfang 1993 genehmigte der Gemeinderat Niedergösgen die Sonderbauvorschriften inkl. UVP. Gegen diese Bewilligung wurden beim Regierungsrat des Kantons Solothurn einige Beschwerden eingereicht, die schliesslich aber alle zurückgezogen wurden. Ende 1993 genehmigte der Regierungsrat die Sonderbauvorschriften und Anfang 1994 lag auch die rechtsgültige kommunale Baubewilligung vor.

3. Bauherrschaft

Nach dem Vorliegen der Baubewilligung wurde für den Bau und Betrieb der RENI eine Aktiengesellschaft mit Sitz in Niedergösgen gegründet. Aktionäre sind die Aare-Tessin AG (Atel) und die Kartonfabrik Niedergösgen AG (KANI) mit

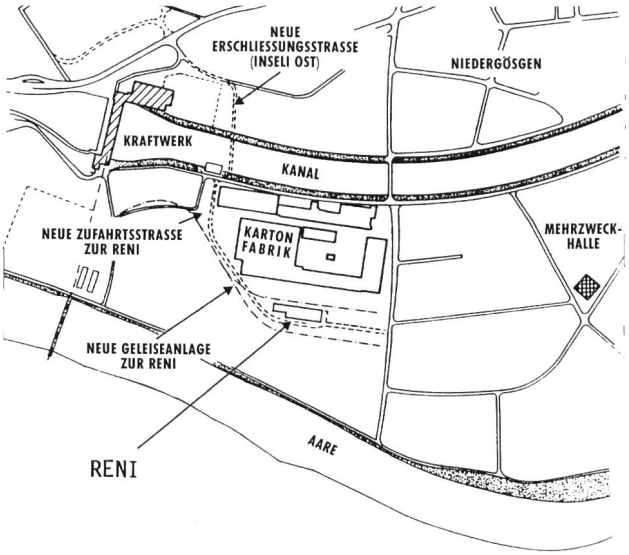

Bild 1. Niedergösgen: Lage der RENI südlich anschliessend an die Kartonfabrik. Auf dem Bild ist ebenfalls das Wasserkraftwerk Gösgen mit dem zugehörigen Kanal erkennbar.