

# Auswirkungen der Gewässerversauerung auf das Kiemengewebe von Fischen

Theresia Fischer-Scherl

## 1. Einleitung

Die Kiemen der Fische üben mehrere Funktionen aus, von denen einige bei den höheren Wirbeltieren von der Niere übernommen wurden. Ihre Aufgaben beinhalten den Gasaustausch, die Osmoregulation, die Ausscheidung von Stickstoffverbindungen und die Aufrechterhaltung des Säure-Basen-Gleichgewichtes. Wegen ihrer leicht zugänglichen oberflächlichen Lage und ihrer großen Oberfläche sind die Kiemen in der Regel ein Hauptangriffspunkt für schädigende Stoffe im Wasser. Vor allem bei akuten Geschehen stellen die Kiemen den ersten Angriffspunkt dar. Morphologische Veränderungen, d. h. Änderungen in der Struktur und deren Ausmaß können dann für die Bewertung schädigender Stoffe herangezogen werden.

Zahlreiche Experimente wurden im Zusammenhang mit der Gewässerversauerung und deren Einfluß auf den Fisch in der Vergangenheit durchgeführt. Bei den meisten davon handelte es sich um Laborversuche, in denen ein multifaktorielles Geschehen wie es im Freiland gegeben ist nicht nachvollzogen werden konnte. Dabei haben wir aber auch gerade von Vorrednern gehört, daß im Labor gewonnene Ergebnisse nicht zwangsläufig auf das Freiland übertragbar sind. Auf den pH-Wert bezogen, ermittelten MUNIZ und LEIVESTAD (1980 a), daß in natürlich versauerten Fließgewässern bereits höhere pH-Werte für den Fisch toxisch sind, als im Labor unter künstlichen Bedingungen ermittelte Werte.

Unsere Frage bei den Untersuchungen war, wie stellt sich die Kiemenmorphologie von Fischen im Freiland dar, wo eine Fülle von Faktoren auf die Kiemen einwirken. Wie reagieren die Kiemen bei akutem Versauerungsgeschehen und wie bei chronischer Versauerung.

## 2. Morphologie der normalen gesunden Kiemen

Zur Erfassung morphologischer Kriterien und Reaktionsmuster im Kiemengewebe, wurden Kiemen von Bachforellen (*Salmo trutta*) und Bachsaiblingen (*Salvelinus fontinalis*) bei verschiedenen Abflußgeschehen licht- und elektronenmikroskopisch untersucht. Als Kontrolle diente Kiemengewebe von Bachforellen und Bachsaiblingen aus einem mineralarmen, nicht versauerten Bach aus dem Bayerischen Wald.

Die Grundstruktur der Kiemen besteht aus den Kiemenbögen, auf denen jeweils zwei Reihen von sogenannten Primärlamellen sitzen. Diese Primärlamellen tragen wiederum zwei alternierende Reihen von Sekundärlamellen, die in allen Richtungen vom Medium Wasser umspült werden. Die Sekundärlamellen bestehen aus einem Netzwerk

von miteinander kommunizierenden Blutlakunen, die von den fingerartig verzahnten Stütz- (Pfeiler- oder Pillar-)zellen begrenzt werden. Eine deutliche Basalmembran trennt schließlich die Blutlakunen vom sogenannten respiratorischen Epithel, welches aus 2 Zellschichten besteht. Dieses respiratorische Epithel steht im Kontakt mit dem Medium Wasser, und in den dazugehörigen Zellen laufen die wichtigen Funktionen der Kiemen ab. Die 2 Zellschichten liegen eng aufeinander, so daß die Diffusionsstrecke für den Sauerstoff vom Medium Wasser ins Medium Blut in den Blutlakunen möglichst gering gehalten ist.

Neben den üblichen Epithelzellen finden sich auch spezialisierte Zellen im Kiemenepithel.

Vereinzelt sind ein oder zwei Schleimzellen in das respiratorische Epithel eingestreut. In geringen Mengen sezerniert, erfüllt das Sekret der Schleimzellen wichtige Funktionen. So dienen Schleimsubstanzen als Schutz gegen mechanische Abnutzung, Parasiten, Pilze und andere schädigende Agentien; daneben unterstützen sie aber auch die Diffusion der Atemgase und sind als Träger von Immunglobulin von Bedeutung.

Als weitere spezialisierte Zellen findet man die sogenannten Chloridzellen oder auch ionensezernierende Zellen genannt. Diese Zellen sind charakterisiert durch zahlreiche Mitochondrien und durch ihr ausgeprägtes endoplasmatisches Retikulum, das in Form eines reich verzweigten, dreidimensionalen Tubulussystems vorliegt. In den Chloridzellen sind Enzymsysteme lokalisiert, die u. a. den Austausch von Elektrolyten bewerkstelligen.

## 3. Untersuchungsergebnisse

Nach dieser Einführung in die Morphologie der normalen gesunden Kieme einer Forelle, sollen stellvertretend für die übrigen im Zusammenhang mit der Gewässerversauerung von uns befischten Gewässern Kiemen von Bachforellen und Bachsaiblingen aus einem versauertem bzw. versauerungsgefährdetem Bach im Bayer. Wald bei verschiedenen Abflußgeschehen dargestellt werden.

Zur Übersicht die wichtigsten Wasserparameter:

	VERSAUERTER BACH		KONTROLLBACH	
	April	September	April	September
pH	4.9	6.2-6.5	6.2	6.5
Ca (mg/l)	1.75	2.2-3.3	2.25	4.7
Mg (mg/l)	0.8	0.9-1.2	0.9	1.1
Al (mg/l)	0.8	0.1	0.01	0.01
Leitfähigkeit ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	41	34-36	31	38
Wassertemp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	5	5.0-8.5	5.5	8.2

### 3.1 Kiemenmorphologie der Kontrollfische

Die Kiemenmorphologie der Kontrollfische entspricht im wesentlichen zu beiden Abflußgeschehen sowohl im April bei Schneeschmelzwasserabfluß (pH 6.2, Al 0.01), als auch im Herbst bei Niedrigwasserabfluß (pH 6.5, Al 0.01) den eingangs beschriebenen gesunden Kiemen.

### 3.2 Kiemenmorphologie im April bei akutem Schneeschmelzabfluß

(akute Versauerung pH 4.9, Al 0.8 mg/l)

Bei der makroskopischen Betrachtung der Kiemen fällt bei einigen Fischen eine leicht schillernde Substanz an der Kiemenoberfläche auf. Die lichtmikroskopische Untersuchung der Kiemen zeigt, daß jeweils meist 3-4 einzelne Sekundärlamellen miteinander verklebt sind. Häufig sind die distalen Enden der Lamellen betroffen, vereinzelt erfolgt die Verklebung auch entlang der gesamten Lamellen. Bei stärkerer Vergrößerung wird sichtbar, daß sich auch das resp. Epithel von der Basalmembran gelöst hat, bei verklebten Lamellen, als auch bei freien.

Mit der PAS-Färbung, die speziell saure Mukopolysaccharide (Schleimschubstanzen) und damit auch die Schleimzellen darstellt, läßt sich klar erkennen, daß vermehrt Schleimzellen im respiratorischen Epithel vorhanden sind, und daß aus ihrer übermäßigen Schleimproduktion schließlich eine Verklebung der Sekundärlamellen resultierte. Außerdem wird erkennbar, daß vermehrt gebildete Schleimschubstanzen auch die Lamellen wie ein Band überdecken.

Bei der elektronenmikroskopischen Betrachtung wird deutlich, daß sich zwischen den Epithelzellen des resp. Epithels Spalten bilden und sich diese Zellen von der darunterliegenden Basalmembran ablösen.

In den Chloridzellen, die vereinzelt zwischen den Epithelzellen liegen, treten zahlreiche degenerierende Mitochondrien auf. Sie erscheinen deutlich dunkler und die Cristae mitochondriales aufgebrochen. Degenerierte Mitochondrien und dilatiertes endoplasmatisches Retikulum sowie elektronendichtes körniges Material liegen zusammengeballt, von einer Membran abgegrenzt, abgegrenzt von den übrigen Zellorganellen. Das Zytoplasma der Chloridzellen ist überdies stark vakuolisiert.

### 3.3 Kiemenmorphologie im September bei Niedrigwasserabfluß

(chronische Versauerung pH 6.2-6.5, Al 0.1 mg/l)

Die Morphologie der Kiemen von Fischen, die bei Niedrigwasserabfluß entnommen wurden, unterscheidet sich deutlich von jener im April.

Schleimzellen sind nur vereinzelt in den Sekundärlamellen anzutreffen und sie sind hauptsächlich auf das Epithel der Primärlamellen beschränkt. Die auffallendste morphologische Veränderung besteht in der hohen Anzahl von Chloridzellen im respiratorischen Epithel der Sekundärlamellen. Etwa 70 % der Zellen im respiratorischen Epithel werden von Chloridzellen gestellt. Aber nicht nur die Anzahl der Chloridzellen ist vermehrt, auch die Größe der Zellen und das Volumen. Durch die Hypertrophie der Chloridzellen kommt es in der Folge zu einer Annähe-

rung benachbarter Sekundärlamellen, z. T. mit engem Kontakt und Verklebung. Diese Kontakte werden entweder von Chloridzellen zweier benachbarter Sekundärlamellen gebildet oder von jeweils einer Chloridzelle und einer Epithelzelle. In Sekundärlamellen, die an diesen engen Kontakten beteiligt sind, treten ausgeweitete extrazelluläre Räume zwischen den Epithelzellagen auf. Lysosomale Strukturen, aufgeblähte Tubuli und Myelinfiguren – Strukturen, die auf eine Degeneration schließen lassen, werden vermehrt in diesen Zellen angetroffen, die an diesen engen Kontakten beteiligt sind. Der Großteil der Chloridzellen weist jedoch keine pathologischen Veränderungen auf.

## 4. Diskussion

Die dargestellten Veränderungen im Kiemengewebe der zu verschiedenen Abflußgeschehen untersuchten Fische, zeigen deutlich, daß das Kiemenepithel mit unterschiedlichen Mechanismen auf unterschiedliche Wasserparameter reagiert. Die Kiemenmorphologie zum Zeitpunkt der Schneeschmelze mit dem Bild der massiven Schleimproduktion, ist zurückzuführen auf eine synergistische Wirkung von niedrigem pH-Wert, d. h. erhöhte Protonenkonzentration, Anreicherung von Metallionen, insbesondere von Aluminium, und dem insgesamt niedrigen Ionengehalt im Wasser.

Das Auseinanderweichen der Epithellagen und die Ablösung des respiratorischen Epithels von der Basalmembran wird auch in Laborexperimenten mit Bachsaiblingen beobachtet, die Wasser mit einem pH-Wert von 5.2 ausgesetzt worden waren (DAYE und GARSIDE, 1976). Durch das Auseinanderweichen der Epithellagen wird die Diffusionsstrecke für Sauerstoff vom Medium Wasser zum Medium Blut in den Lakunen der Sekundärlamellen vergrößert. Damit wird aber auch der Austausch von Sauerstoff und die Abgabe von Ausscheidungsprodukten empfindlich behindert und gestört.

Die Hyperplasie der Schleimzellen und die daraus resultierende Anreicherung von Schleimschubstanzen ist eine weit verbreitete Reaktion der Kiemen auf verschiedenste schädigende Einflüsse, wie u. a. auch bei erhöhten Metallionen- und Protonenkonzentrationen (MALLAT, 1985). Die polyanionische Struktur des Schleims soll die Bindung von Kationen bewirken und so ihre Toxizität vermindern. Im vorliegenden Fall dürfte die erhöhte Aluminiumionenkonzentration den schädigenden Einfluß der vermehrten Protonenanzahl noch verstärkt und die übermäßige Schleimproduktion stimuliert haben. Neben der Schädigung des Kiemengewebes durch erhöhte Metallionengehalte im Wasser, ist jedoch auch die Akkumulation von Metallionen im Kiemengewebe nicht zu vernachlässigen (BUERGEL und SOLTERO, 1983; FISCHER-SCHERL et al. 1988). Mit der erhöhten Schleimproduktion versuchen sich die Kiemen gegen eine Noxe zu wehren. Ab einer bestimmten Dauer oder einer bestimmten Konzentration der Noxe schlägt die sonst positive Wirkung der Schleimschubstanzen ins Gegenteil um, und der Fisch droht an der überschießenden Schleimproduktion zu ersticken, wie im vorliegenden Fall ersichtlich wird.

DAOUST et al. (1984) beobachteten Verklebungen zwischen den Sekundärlamellen bei Regenbogenforellen, die letalen Konzentrationen eines Gemisches von anorganischem Kupfer und Quecksilber ausgesetzt waren. Sie führten dies auf eine Ladungsveränderung der Glykoproteine, die die Lamellen bedecken, zurück. Im vorliegenden Fall könnte die vermehrte Anwesenheit von Aluminiumionen und Protonen Ladungsveränderungen hervorgerufen haben.

Die Degenerationserscheinungen in den Chloridzellen, die beim Schmelzwasserabfluß beobachtet wurden, dürften ebenfalls auf die erhöhten Konzentrationen von Protonen und Aluminiumionen im Wasser und im Kiemengewebe zurückzuführen sein, wie auch Laborversuche zeigten (KARLSSON-NORRGREN et al., 1986; LEINO und McCORMICK, 1984). Chloridzellen reagieren sehr empfindlich auf Aluminium, da durch aluminiumreiches Wasser der aktive Aufnahmemechanismus von  $\text{Na}^+$ - und  $\text{Cl}^-$ -Ionen unterdrückt wird (STAURNES et al. 1984). Dieser Aufnahmemechanismus ist eng korreliert mit der Aktivität der Enzyme Carboanhydrase und  $\text{Na}^+\text{K}^+$ -ATPase (STAURNES et al., 1984). Das Enzym  $\text{Na}^+\text{K}^+$ -ATPase ist hauptsächlich am  $\text{Na}^+$  und  $\text{Cl}^-$ -Ionen Austausch beteiligt (LANGDON und THORPE, 1984). Ebenso findet sich in den Chloridzellen die Carboanhydrase, die wichtig für die  $\text{CO}_2$ -Exkretion ist (PERRY 1986).

Degenerative Vorgänge im Kiemenepithel lassen sich also als morphologisches Äquivalent für Imbalancen und Störungen im Elektrolythaushalt und Säure-Basengleichgewicht des Fisches betrachten.

Bei Niedrigwasserabfluß bei pH 6.2-6.5 und einer Al-Konzentration von 0.1 mg/l war im Vergleich zu den Kontrollkiemen und zu denen vom Schmelzwasserabfluß die Zunahme der Anzahl und der Größe der Chloridzellen auffallend. In Wasser mit neutralem pH-Wert, wird das Ionen-gleichgewicht über die aktiven Aufnahmemechanismen ausgeglichen. In versauertem Wasser dagegen wird eine Veränderung der Membranpermeabilität mit einem erhöhten Efflux an Ionen aus der Zelle beobachtet, während die aktive Aufnahme von Ionen oftmals gestört ist (MUNIZ, 1980b; McDONALD, 1983; ROSSELAND und SKOGHEIM, 1984). Durch Hypertrophie, also durch Vergrößerung der Zelle und durch Hyperplasie, der Vermehrung der Zellzahl, versuchen die Kiemen mit Hilfe der für den Elektrolytaustausch verantwortlichen Chloridzellen, den Verlust der Membranstabilität und damit den Verlust an Ionen auszugleichen.

Calcium-Ionen werden als Stabilisator für die Transportwege der Ionen angesehen (McWILLIAMS, 1983; HUNN, 1985). Wird Calcium vermehrt durch Antagonisten abgefangen, wozu z. B. Aluminium oder Protonen gerechnet werden, treten vermehrt Ionenverluste auf. Der Verlust an membrangebundenem Calcium wurde an Kiemen von Bachforellen aus saurem Wasser experimentell nachgewiesen (McWILLIAMS, 1983). In weichen Wasser tritt dabei ein verstärkter Verlust an Calciumionen auf. (McWILLIAMS, 1983). Dies erklärt also auch, warum Fische in weichem Wasser anfälliger gegenüber pH-Wertabsenkungen und erhöhten Metallionen-konzentrationen reagieren als in hartem Wasser.

BOLIS et al. (1984) haben zudem nachgewiesen, daß bei Säurestress (Bachforellen wurden einem pH von 4.0-4.5 ausgesetzt) erhebliche Veränderungen sowohl in der Zusammensetzung der Phospholipide und der Fettsäuren in den Kiememembranen der Fische auftreten, welche wiederum für Störungen in der Regulation des osmotischen Gleichgewichtes und des Gasaustausches mitverantwortlich gemacht werden können.

## 5. Zusammenfassung

Der Einfluß der Gewässerversauerung, d. h. erhöhte Protonen- und Metallionenkonzentrationen, auf das Kiemengewebe von Fischen läßt sich also folgendermaßen zusammenfassen:

Tritt eine Erhöhung von Protonen- und Metallionenkonzentrationen langsam und in geringem Maß auf, gelingt es den Kiemen sich durch verschiedene Mechanismen, wie z. B. der Vermehrung der Chloridzellen, an das veränderte Milieu anzupassen. Eine Schädigung der Zellorganellen bei über einen längeren Zeitraum vorliegenden subletalen Protonen- und Metallionenkonzentrationen im Wasser bzw. im Kiemengewebe kann jedoch nicht ausgeschlossen werden. Erfolgt ein rapider Anstieg in der Protonen- und Metallionenkonzentration, wie bei sogen. pH-Schocks, reagieren die Kiemen mit einer massiven Anbildung von Schleimzellen. Bei länger anhaltenden Vorgängen mit starken Konzentrationserhöhungen schlägt die ursprünglich als Schutz dienende Produktion von Schleimsubstanzen ins Gegenteil um, und die Fische ersticken letztendlich. Dazu kommt noch, daß auch andere Zellen des respiratorischen Epithels in ihrer Funktion gestört werden, woraus schließlich eine Störung oder gar ein Zusammenbruch des gesamten Elektrolyt- und Säure-Basenhaushaltes des Fisches resultiert.

## Literatur

- BUERGEL, P. M., SOLTERO, R. A. (1983): The distribution and accumulation of aluminium in rainbow trout following a whole - lake treatment. - J. Freshwat. Ecol. 2, 37-44.
- BOLIS, C. L., CAMBRIA, A., FAMA, M. (1984): Effect of acid stress on fish gills. In: Toxins, drugs and pollutants in marine animals. (eds. BOLIS, L., ZADUNAISKY, J., GILLES, R.); Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, p. 122-129.
- DAOUST, P. Y., WOBESER, G., NEWSTEAD, J. D. (1984): Acute pathological effects of inorganic mercury and copper in gills of rainbow trout. - Vet. Pathol. 21, 93-10.
- DAYE, P. G., GARSIDE, E. T. (1976): Histopathological findings in surficial tissues of brook trout, *Salvelinus fontinalis* (Mitchill), exposed to acute and chronic levels of pH. - Can. J. Zool. 54, 2140-2155.
- FISCHER-SCHERL, Th., HOFFMANN, R. W., KÜGEL, B., MERK, G., MILLER, H. HOFFMANN, H. J. (1988): Einfluß der Gewässerversauerung auf die Fischfauna; in: Gewässerversauerung im nord- und ostbayerischen Grundgebirge. - Bericht der Bayer. Landesanstalt für Wasserforschung, München, S. 281-385.
- HUNN, J. B. (1985): Role of calcium in gill function in freshwater fishes. - Comp. Biochem. Physiol. 82A, 543-547.

- KARLSSON-NORRGREN, L., DICKSON, W., LJUNGBERG, O., RUNN, P. (1986): Acid water and aluminium exposure: gill lesions and aluminium accumulation in farmed brown trout (*Salmo trutta*). – J. Fish Dis. 9, 1-9.
- LANGDON, J. S., THORPE, J. E. (1984): Response of the gill Na<sup>+</sup>-K<sup>+</sup>-ATPase activity, succinic dehydrogenase activity and chloride cells to saltwater adaption ion Atlantic salmon, *Salmo salar* L., parr and smolt. – J. Fisch Biol. 24, 323-251.
- LEINO, R. L., McCORMICK, J. H. (1984): Morphological and morphometrical changes in chloride cells of the gills of *Pimephales promelas* after chronic exposure to acid water. – Cell Tissue Res. 236, 121-128.
- MALLAT, J. (1985): Fish gill structural changes induced by toxicants and other irritants: a statistical review. – Can J. Fish. Aquat. Sci. 42, 630-648.
- McDONALD, D. G. (1983): The effects of H<sup>+</sup> upon the gills of freshwater fish. – Can. J. Zool. 61, 691-703.
- McWILLIAMS, P. G. (1983): An investigation of the loss of bound calcium from the gills of brown trout, *Salmo trutta*. – Comp. Biochem. Physiol. 74 A, 107-116
- MUNIZ, I. P., LEIVESTAD, H. (1980 a): Toxic effects of aluminium on the brown trout, *Salmo trutta* L.; in: DRABLOES, D., TOLLAN, A. (eds.) Proc. Int. Conf. Ecol. Impact Acid Precip.; Sandefjord, Norway, SNSF project, Oslo-As, p. 320-321.
- MUNIZ, I. P., LEIVESTAD, H. (1980 b): Acidification effects on freshwater fish; in: DRABLOES, D., TOLLAN, A. (eds.): Proc. Int. Conf. Ecol. Impact Acid Precip.; Sandefjord, Norway, SNSF project Oslo-As, p. 84-92.
- PERRY, S. F. (1986): Carbon dioxide excretion in fishes. – Can. J. Zool. 64, 565-572.
- ROSSELAND, B. O., SKOGHEIM, O. K. (1984): A comparative study on salmonid fish species in acid-aluminium-rich water. II. Physiological stress and mortality of one and two year old fish. – Inst. Freshwater Res. Drottingholm, Rep. No. 61, 186-194.
- STAURNES, M., SIGHOLT, T., REITE, O. B. (1984): Reduced carbonic anhydrase and Na-K-ATPase activity in gills of salmonids exposed to aluminium-containing acid water. – *Experientia* 40, 226-227.

**Anschrift des Verfassers:**

Dr. Theresia Fischer-Scherl  
 Institut für Zoologie und Hydrobiologie  
 der Ludw.-Max. Universität München  
 Kaulbachstr. 37  
 D – 8000 München 22

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Laufener Spezialbeiträge und Laufener Seminarbeiträge \(LSB\)](#)

Jahr/Year: 1990

Band/Volume: [4\\_1990](#)

Autor(en)/Author(s): Fischer-Scherl Theresia

Artikel/Article: [Auswirkungen der Gewässerversauerung auf das Kiemengewebe von Fischen 85-88](#)