

Dieter Adelung und Boris Culik, Meereszoologie, Institut für Meereskunde  
an der Universität Kiel

## Fluorid Turnover im Adéliepinguin (*Pygoscelis adeliae*) und künftige Untersuchungen an Adéliepinguinen\*

### I. Fluorid Turnover in Adéliepinguinen

Die Hauptnahrungsquelle der Adéliepinguine ist der antarktische Krill. Er weist eine geschätzte Biomasse von einigen Mio. Tonnen auf. Obwohl der Krill reich an hochwertigem Eiweiß ist, steht seiner Nutzung durch den Menschen u. a. der hohe Fluorgehalt seines Exoskellts entgegen. Im Ganztier wurden 300 - 500 ppm Fluor bezogen auf das Frischgewicht gemessen. Der von der FDA für menschliche Nahrung festgesetzte Höchstwert liegt jedoch nur bei 100 ppm.

Unsere Arbeitsgruppe hat sich lange mit dem Problem der Fluoranreicherung im Krill beschäftigt. Dabei konnten wir zeigen, daß sich im lebenden Krill nur minimale Mengen Fluorid im Muskelfleisch und anderen Weichgeweben anreichern und sich nahezu alles Fluorid im Exoskelett befindet (Adelung et al. 1986). Doch obwohl diese Erkenntnis für die industrielle Verwertung des Krill von Bedeutung sein mag, nützt sie Adéliepinguinen, die nur Ganzkrill aufnehmen können, wenig.

Eine sehr gute Bioverfügbarkeit von Fluor aus Krill konnte Siebert (1981) in Fütterungsversuchen an Ratten feststellen. Die Ratten zeigten Veränderungen an Zähnen, Nieren und Knochen, die auf eine toxische Wirkung des Fluors schließen ließen. Von Soevik und Braekkan (1981) mit Krill gefütterte Haushühner nahmen 12 % mehr Fluor auf als Hühner, die Natriumfluorid (NaF) erhielten. Auch unsere Untersuchungen an Stockenten ergaben, daß Fluor aus gefrostedem Krill zumindest ebensogut verfügbar ist wie aus NaF (Culik, 1986).

---

\* Unterstützt durch eine Sachbeihilfe der DFG (Ad 24/9)

In Untersuchungen an Menschen wurde die Toxizität von Fluor durch Eagers (1969) detailliert erforscht. Bereits 20 - 40 mg Fluor pro Tag führten bei Dauereinnahme zu Nierenschäden, zu einer Verminderung des Knochenmarks und einer Verringerung der Produktion von roten Blutkörperchen.

Der Adéliepinguin ernährt sich, wie schon erwähnt, zu 91 - 100 % von Krill. Die Küken erhalten ab der 4. Lebenswoche täglich 600 Gramm Krill und nehmen dabei ca. 240 mg Fluor auf. Unsere Frage war daher: Was befähigt Adéliepinguine, derart hohe Fluormengen offensichtlich unbeschadet aufzunehmen?

Zu diesem Zweck untersuchten wir freilebende Adéliepinguine sowie Küken, die wir von Hand aufgezogen hatten. Letztere erhielten als Basisnahrung fluorarmen (>5 ppm) Fisch sowie unterschiedliche Dosierungen NaF. Im Vergleich zu krillfressenden Freilandtieren ergab die Fütterung mit bekannten Mengen NaF:

1. Die Bioverfügbarkeit des Fluors aus frischem Krill ist für die Pinguine sehr viel geringer als dies die bisherigen Laborversuche mit anderen Organismen erwarten ließen. So wurden im Kot die höchsten Fluorkonzentrationen in den unverdaulichen Exoskelettresten des Krills gefunden. Obwohl Bestandteile aus dem Exoskelett herausgelöst werden, bleibt der Hauptteil des Fluors darin zurück. Aus diesem Grund ist nur ein kleiner Teil des Fluors aus dem Krill für die Pinguine überhaupt verfügbar. Dieser Unterschied zu den Laborversuchen läßt sich durch die drastische Autolyse des Krills nach seinem Tode und der daraus während der Lagerung resultierenden Freisetzung des Fluors aus der Krillschale in das Muskelfleisch hinein erklären (Christians und Leinemann, 1983). Fütterungsexperimente mit gelager-tem Frostkrill weisen deshalb eine bessere Bioverfügbarkeit des Krill-Fluorids auf als mit frischem Krill.

2. Bis zu einem bestimmten Sättigungsgrad wird das aus der Nahrung resorbierte Fluorid im Pinguin festgehalten und hier zu 99,5 % in den Knochen gespeichert. In freilebenden Tieren fanden wir im

Mittel 10 000 ppm Fluor im Skelett. Die Weichgewebe sind dagegen kaum belastet. Die Fluorgehalte liegen hier unter 10 ppm.

3. Anders verhält es sich bei Gabe von Fluorid, das in Form des sehr gut bioverfügbaren NaF der Nahrung zugesetzt worden ist. Hier ist die Resorptionsrate wesentlich höher, und bei sehr hoher Dosierung kommt es zu einer akuten Vergiftung und entsprechenden Belastung des Weichgewebes.

4. Die biologische Halbwertszeit des Fluors im Pinguinknochen beträgt nur 4 - 5 Wochen. Beim Menschen sind es dagegen bis zu 8 Jahre. Damit fällt den Pinguinknochen die Rolle eines Puffers für Fluorid zu, d. h. bei plötzlicher hoher Fluorzufuhr, z. B. nach längeren Hungerzeiten (Brutperiode, Mauser), kann zur Entlastung der Exkretionsorgane ein Teil des Fluorids kurzfristig im Skelett gespeichert werden.

5. Im Normalfall wird der größte Teil des resorbierten Fluorids von den Pinguinen schnell wieder exkretiert. Unsere Untersuchungen zur Fluorausscheidung ergaben, daß die nasalen Salzdrüsen der Pinguine, die eine große Rolle für den Na- und Cl-Haushalt spielen, Fluor nur in geringen Mengen aus dem Körper eliminieren. Die Relation Cl : F betrug in den Sekreten 1 000 zu 1. Der Hauptausscheidungsweg des resorbierten Fluors verläuft über die Nieren.

Die Bilanz der Fluoraufnahme über die Nahrung und der Exkretion über die Kloake ist ausgeglichen. Eine besondere Fluoranreicherung findet im Pinguin nicht statt. Schematisch sind die Wege des Fluorids aus der Nahrung durch den Pinguin in Abb. 1 dargestellt.

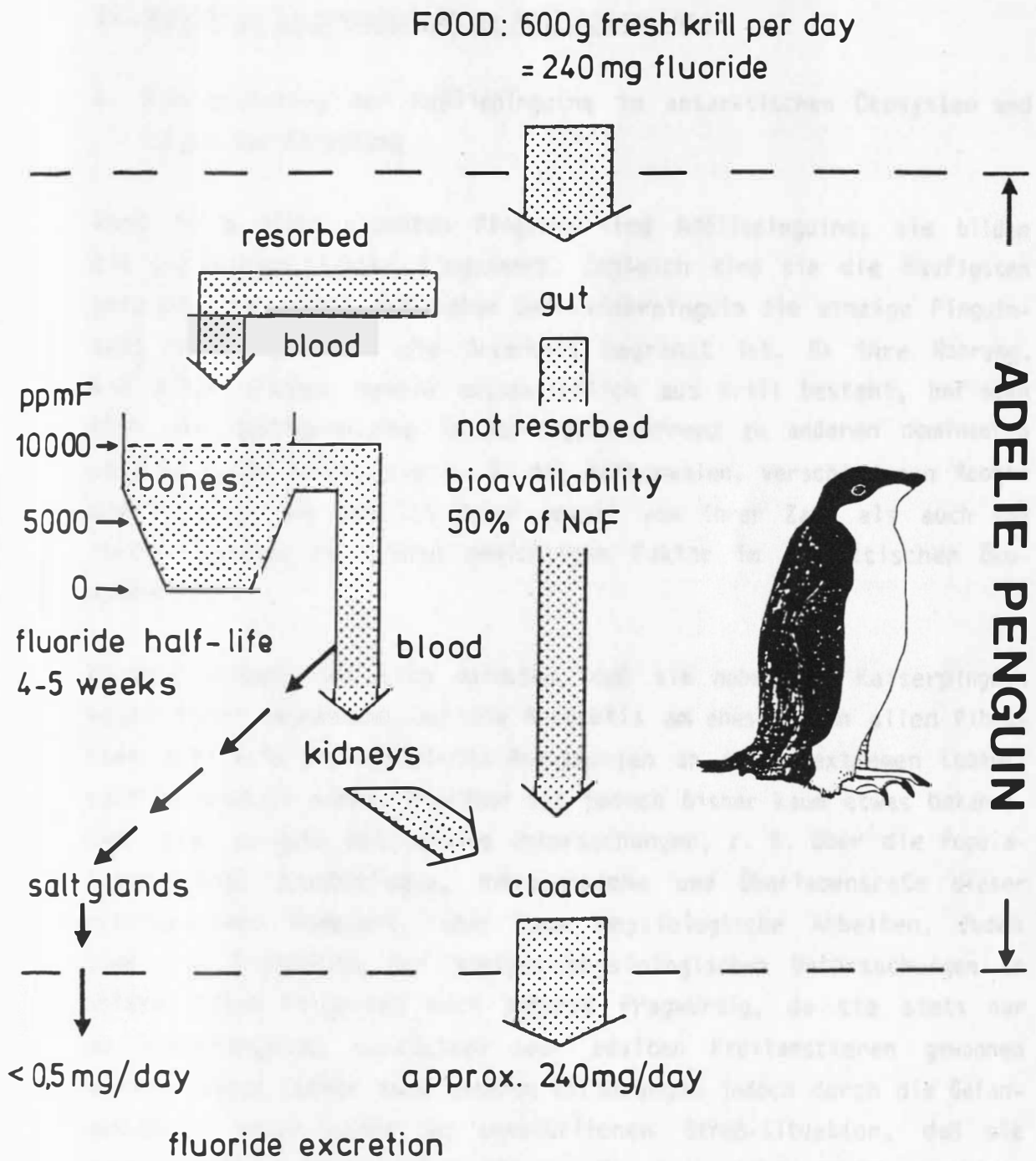


Abb. 1: Schematische Darstellung der Fluoridaufnahme und des Fluoridhaushalts beim Adéliepinguin (*Pygoscelis adeliae*).

## II. Künftige Untersuchungen an Adéliepinguinen

### 1. Die Bedeutung der Adéliepinguine im antarktischen Ökosystem und Stand der Forschung

Rund 25 % aller rezenten Pinguine sind Adéliepinguine; sie bilden die individuenreichste Pinguinart. Zugleich sind sie die häufigsten antarktischen Vögel und neben dem Kaiserpinguin die einzige Pinguinart, die allein auf die Antarktis begrenzt ist. Da ihre Nahrung, wie schon erwähnt nahezu ausschließlich aus Krill besteht, befinden sich die Adéliepinguine in Nahrungskonkurrenz zu anderen dominanten antarktischen Arten, wie z. B. den Bartenwalen, verschiedenen Robben und Fischen. Sie stellen daher sowohl von ihrer Zahl als auch von ihrer Biomasse her einen gewichtigen Faktor im antarktischen Ökosystem dar.

Darüber hinaus läßt sich vermuten, daß sie neben dem Kaiserpinguin wegen ihrer Begrenzung auf die Antarktis am ehesten von allen Pinguinen spezielle physiologische Anpassungen an diesen extremen Lebensraum entwickelt haben. Hierüber ist jedoch bisher kaum etwas bekannt. Zwar gibt es gute ökologische Untersuchungen, z. B. über die Populationsdichte, Brutbiologie, Nahrungssuche und Überlebensrate dieser erfolgreichen Vogelart, aber kaum physiologische Arbeiten. Zudem sind die Ergebnisse der wenigen physiologischen Untersuchungen an antarktischen Pinguinen noch äußerst fragwürdig, da sie stets nur an eingefangenen, subadulten oder adulten Freilandtieren gewonnen wurden. Diese stehen nach unseren Erfahrungen jedoch durch die Gefangenschaft unter einer so unnatürlichen Streß-Situation, daß sie daran sogar zugrunde gehen können. Man kann daher nicht erwarten, daß solche Tiere bei den Versuchen normale physiologische Reaktionen gezeigt haben.

### 2. Versuchsziele und Versuchsplanung

Ziel unserer jetzigen Arbeiten ist es deshalb, an streßfreien Tieren wichtige physiologische Daten zu gewinnen, um so umweltrelevante

physiologische Anpassungen, z. B. in bezug auf den Energiestoffwechsel, den Nahrungsbedarf, die Nahrungsverwertung oder die Tauchphysiologie, quantitativ beschreiben zu können. Für diese Untersuchung ist eine Laufzeit von 5 Jahren vorgesehen. Sie schließt zwei 3-monatige Antarktisexpeditionen ein. Das Projekt ist in 2 Stufen gegliedert:

a) In der ersten Phase steht die Arbeit mit Pinguinen im Vordergrund, die nach einer von uns entwickelten Methode unter Freilandbedingungen vom Kükenstadium an handaufgezogen werden. Diese Tiere sind mit dem Menschen vertraut und somit in bezug auf Menschen streßfrei. An diesen Pinguinen soll zunächst der Gasaustausch ( $O_2/CO_2$ ), die Atem- und Herzschlagfrequenz sowie die Körpertemperatur in Relation zu verschiedenen Aktivitätszuständen und Umweltbedingungen gemessen werden. Dies erfordert spezielle Gasanalysengeräte sowie implantierbare Sonden und Kleinsender zur telemetrischen Datenübertragung. Letztere werden von P. Butler und T. Woakes in Birmingham entwickelt und an Enten und Gänsen getestet. Die Daten werden dann von einem Computer aufgenommen und ausgewertet. Synchron werden die Aktivitätszustände der Versuchstiere kontinuierlich über Video aufgezeichnet, um sie dann mit den Meßdaten zu korrelieren. Außerdem soll der Nahrungsbedarf und die Nahrungsverwertung quantitativ bestimmt werden, um den Energie-Input zu erfassen. Die notwendigen Vorversuche und Geräteerprobungen werden an Stockenten durchgeführt, die sich bereits in früheren Vorversuchen als "Ersatzpinguine" bewährt haben.

b) In Stufe 1 sind, wie erwähnt, erste telemetrische Messungen mit von Hand aufgezogenen Tieren im Käfig vorgesehen. In der zweiten Phase soll die Telemetrie so ausgebaut und erweitert werden, daß schließlich auch von Freilandtieren nach einmaliger Implantation von Sendern/Speichern bei Wahrung der Bewegungsfreiheit physiologische Meßwerte der Tiere in ihrer natürlichen Umgebung erhalten werden können. Dies schließt auch Messungen in ihrem hauptsächlichen Lebensraum, dem Meer, ein. Da schwimmende Pinguine im freien Wasser sehr schwer zu beobachten sind, müssen ihre Aktivitäten dort mit Hilfe

von kleinen Registriergeräten aufgezeichnet werden. Prototypen und Geräte zur Bestimmung der Schwimgeschwindigkeit, Tauchtiefe und Tauchstrecke wurden von R. Wilson entwickelt, der sich als Gastforscher unserem Labor für längere Zeit anschließt. Um den Gesamtenergieverbrauch freilebender Tiere abschätzen zu können, wird das im Energiestoffwechsel produzierte Wasser mit Hilfe von schwerem Wasser  $D_2^{18}O$  nachgewiesen. Die dafür genommenen Blutproben werden in Groningen in Zusammenarbeit mit R. Drent analysiert. Aus diesen Werten soll dann anhand der in den vorausgegangenen Versuchen ermittelten Beziehungen der tatsächliche Energieverbrauch der Tiere im Freiland und ihre physiologischen Reaktionen beim Schwimmen, Tauchen, Brüten etc. ermittelt werden.

### 3. Methodische und logistische Probleme

Methodisch sind die vorgesehenen Untersuchungen recht anspruchsvoll und erfordern die Entwicklung neuer bzw. die Verbesserung vorhandener Geräte, um im Feldeinsatz unter den erschwerten Bedingungen in der Antarktis einwandfrei einsetzbar zu sein. Technisches Neuland ergibt sich bei dem Einsatz der Telemetrie in dem beschriebenen Umfang. Einfachere telemetrische Sender zur Lokalisation des Trägers im Freiland und zur Übertragung der Körpertemperatur oder Herzschlagfrequenz können über den Handel bezogen werden. Die von uns in dieser Studie benötigten multifunktionellen und dabei sehr kleinen Sender sind aber nicht erhältlich und werden von einer physiologischen Arbeitsgruppe um P. Butler in Birmingham eigens für unsere Zwecke hergestellt. Geräte zur Speicherung physiologischer Daten von Pinguinen im Freiland stehen noch nicht zur Verfügung. Für Entwicklungsarbeiten auf diesem Gebiet ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit sehr wünschenswert. Dies gilt auch für die Entwicklung von Aktivitätsmeßgeräten, die genaue Daten über Art und Dauer bestimmter Verhaltensweisen speichern, um später detaillierte Rückschlüsse über den Energieverbrauch zu ermöglichen.

Literatur:

- ADELUNG, D., F. BUCHHOLZ, B. CULIK, A. KECK: Fluoride in tissues of Krill Euphausia superba Dana and Meganyctiphanes norvegica M. Sars in relation to the moult cycle. Polar Biol. 7: 43-50 (1987)
- CHRISTIANS, O. u. M. LEINEMANN: Über die Fluorwanderung aus den Schalen in das Muskelfleisch bei gefriergelagertem antarktischen Krill (Euphausia superba Dana) in Abhängigkeit von der Lagertemperatur und Zeit. Arch. Fisch. 34 (1), 87-95 (1983)
- CULIK, B.: Fluoride turnover in adélie penguins (Pygoscelis adeliae) and other bird species. Polar Biol. 7 in press (1987)
- EAGERS, R. Y.: Toxic properties of inorganic fluoride compounds. Elsevier Pub. Co. Ltd. Amsterdam, London, New York 152 S. (1969)
- SIEBERT, G., GABRIEL, E., HANNOVER, R., HENSCHLER, D., KARLE, E. J., KASPER, H., MACK, M., ROMEN, W., SCHMAUCK, R., TRAUTNER, K.: Fütterungsstudie mit Krill an Ratten unter besonderer Berücksichtigung von Fluorid. In: H. Noelle (Ed.), Nahrung aus dem Meer Springer Verlag, Berlin, S. 99-118 (1981)
- SOEVIK, T., O. R. BRAEKKAN: A method for the determination of available fluoride from marine products using young chicks. J. Sci. Food. Agric., 32, (5) 467-474 (1981)