

## Wirkungen von „Rotschlamm“ auf Embryonen und Larven des Herings *Clupea harengus*

H. ROSENTHAL

*Biologische Anstalt Helgoland (Zentrale);  
Hamburg 50, Bundesrepublik Deutschland*

**ABSTRACT:** Effects of “red mud” on embryos and larvae of the herring *Clupea harengus* Bauxite, a hydrated alumina, has very great technological importance as raw material for aluminium production. In the process of dry decomposition, it is sintered at red heat with soda ash and quicklime. On subsequent treatment with water, the aluminium goes into solution, while the iron remains undissolved as ferric hydroxide (red mud). Using herring eggs and larvae from Baltic spring spawners, the biological effects of red mud (which is intended to be released into the North Sea in large quantities) have been tested (at  $14.0^\circ \pm 0.2^\circ$  C and salinity near 15 ‰). Eggs were artificially fertilized and incubated in 1 l aerated containers. The addition of red mud considerably reduced percentages of survival to about 40 to 50 ‰ (controls: 90 ‰), when the eggs were exposed to various concentrations of suspended red-mud particles (1, 2, 5 and 10 ml/l). The red-mud particles adhered to the eggshells, forming an almost regular layer, thereby possibly interfering with gaseous and other exchanges between eggs and surrounding medium. In addition, the effects of sedimentation of red-mud suspensions of various initial concentrations on herring eggs, spread out in one layer, were studied. In concentrations of 1.25, 2.50, 6.25 and 12.50 ml red-mud per litre sea water, percentage mortality to hatching increased to about 78, 88, 95 and 100 ‰ (controls 13 ‰). Speed of development was retarded and number of embryonic malformations increased with increasing concentrations; also the total length of hatched larvae decreased significantly more than in the controls. Many larvae took up red-mud particles, which blocked food intake.

### EINLEITUNG

Als Ausgangsmaterial zur elektrolytischen Gewinnung von Aluminium dient reines Aluminiumoxid ( $Al_2O_3$ , Tonerde), das durch nassen Aufschluß aus Bauxit gewonnen wird. Als Abfallprodukt fällt dabei ein pastöses Material an, dessen physikalische Eigenschaften denen des Schlicks ähnlich zu sein scheinen und das auf Grund seiner intensiv roten Färbung als „Rotschlamm“ bezeichnet wird.

Da in absehbarer Zeit an der Unterelbe auf dem Bützflether Sand im Landkreis Stade neben einem Aluminium-Elektrolyse-Werk auch eine Oxidfabrik aufgebaut werden soll, gilt es zu entscheiden, ob der anfallende Rotschlamm gefahrlos in die Deutsche Bucht verklappt werden kann oder auf Halde gehen muß. Die vorliegende Untersuchung ist Teil eines von mehreren Instituten gemeinsam geplanten und durchgeführten Forschungsprogrammes zur Feststellung des Schädlichkeitsgrades von Rotschlamm

(Eisenoxidhydrat). Erste Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens sind bereits veröffentlicht worden (HALSBAND 1971, PAFFENHÖFER 1971).

Da die Jugendstadien der meisten Organismen empfindlicher auf Störungen in ihrer Umwelt reagieren als adulte Tiere, befaßte sich diese Untersuchung mit der Einwirkung von Rotschlamm auf die Embryonen und Larven eines Nutzfisches. Die Wahl eines Substratlaichers als Versuchsobjekt schien angezeigt, da davon ausgegangen werden muß, daß die überwiegende Menge des Rotschlammes zu Boden sinkt.

## MATERIAL UND METHODEN

Es wurden zwei Erbrütungsversuche an Ostsee-Frühjahrslaichern des Herings durchgeführt (Befruchtung am 7. 4. 1971, ♀ = 27,0 cm Totallänge; Befruchtung am 14. 4. 1971, ♀ = 28,5 cm Totallänge). Die Durchführung der Befruchtung sowie der

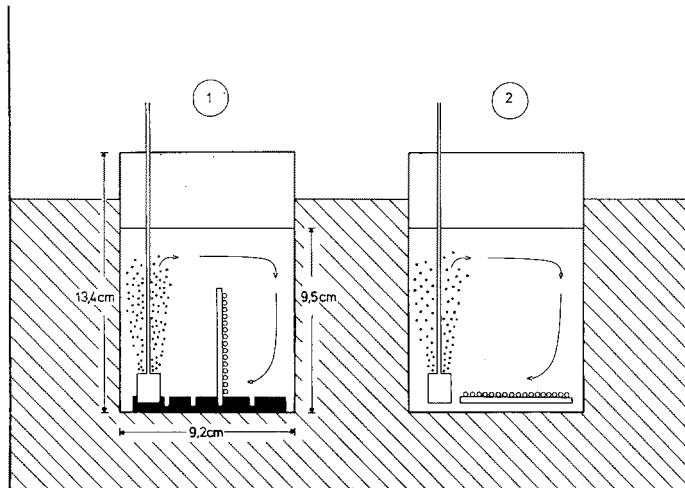


Abb. 1: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung und Abmessungen der Erbrütungsgefäße. Versuchsreihe 1 (links): Mattglasscheibe mit anhaftenden Heringseiern vertikal stehend. Versuchsreihe 2 (rechts): Mattglasscheibe mit anhaftenden Heringseiern flach auf dem Boden der Erbrütungsgefäße liegend; schraffiert: Temperierbad (weitere Erläuterungen siehe Text)

Transport der Eier vom Fangplatz zum Labor entsprach der bereits bei früheren Versuchen beschriebenen Methodik (ROSENTHAL 1968, PAFFENHÖFER & ROSENTHAL 1968, ROSENTHAL & STELZER 1970, STELZER et al. 1971). Die auf Mattglasscheiben haftenden Eier wurden unmittelbar nach dem Transport in stark belüftete Hälterungsgefäße überführt, die in einem Temperierbad bei  $14,0 \pm 0,2^\circ \text{C}$  gehalten wurden. Der Salzgehalt betrug etwa  $15 \text{ ‰}$ . Die Versuchsanordnung und die Abmessungen der Erbrütungsgefäße sind für beide Versuchsreihen in Abbildung 1 wiedergegeben. In der Versuchsreihe 1 wurden die Mattglasscheiben senkrecht aufgestellt, in Versuchsreihe 2 flach auf den Boden der Erbrütungsgläser gelegt.

Die Rotschlamm-Suspension wurde unmittelbar nach Überführung der Eier in die Erbrütungsgefäße gegeben. Da diese sehr zähflüssig ist und eine nicht unerhebliche Menge beim Überpipettieren an den Innenwänden der Pipetten hängenbleibt, wurden parallel dazu die Naß- und Trockengewichte der Pipetteninhalte bestimmt (Abb. 2). Nach Angabe des Herstellerwerkes (Vereinigte Aluminium-Werke AG) hat der Rotschlamm folgende Zusammensetzung, die je nach Herkunft des verwendeten Bauxits leicht variieren kann:

$\text{SiO}_2$	= 16,6 %	$\text{Al}_2\text{O}_3$	= 31,9 %
$\text{TiO}_2$	= 7,4 %	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	= 20,7 %
$\text{Na}_2\text{O (wl)}$	= 0,9 %	$\text{CaO}$	= 0,7 %
$\text{Na}_2\text{O (geb)}$	= 10,3 %	$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ (wl)}$	= 0,5 %
		Aschegehalt	= 11,0 %

(geb = gebunden, wl = wasserlöslich)

Etwa 50 % der festen Bestandteile haben eine Korngröße unter  $18 \mu$ , nur 0,5 % der Körnung erreicht einen Durchmesser über  $300 \mu$ .

Die Heringseier wurden täglich unter dem Binokular beobachtet und zu diesem Zweck mit Hilfe eines scharfen Wasserstrahls (Pipette) von der anhaftenden bzw. der sie bedeckenden Rotschlammsschicht befreit. Da die Eier besonders in den hohen Kon-

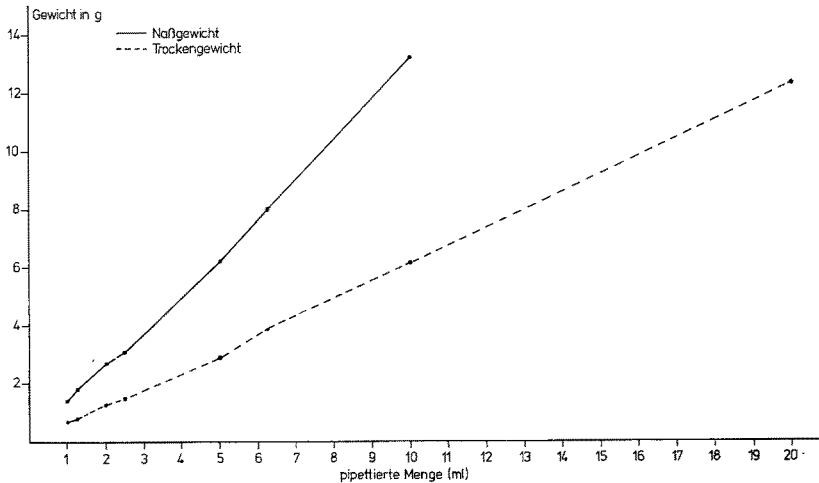


Abb. 2: Naß- und Trockengewichte der für die Versuchsreihen pipettierten Rotschlammengen. Mittelwerte aus jeweils 5 Bestimmungen

zentrationen auf diese Weise oft nicht hinreichend freigelegt werden konnten, wurden sie gelegentlich mit einem weichen Pinsel vorsichtig gesäubert. Nach der mikroskopischen Beobachtung wurde entweder das Versuchsmedium erneuert oder der im Erbrütungsgefäß abgesetzte Rotschlamm intensiv aufgerührt, um ein gleichmäßiges Absetzen desselben auf die zuvor freigelegten Eier zu erreichen.

Die Wirkung der einzelnen Rotschlammkonzentrationen auf die Embryonalentwicklung wurde an Hand von Messungen der Herzaktivität, der Mißbildungs- und Sterblichkeitsraten, der Schlupfzeit, der Totallängen der geschlüpften Larven sowie deren Dottersackgröße verfolgt. In Abbildung 3 ist die Lage der an den Larven gewonnenen Meßgrößen definiert.

## ERGEBNISSE

### Das Verhalten von Rotschlammpartikeln an der Eioberfläche

Wird Rotschlamm unmittelbar nach der Befruchtung der Eier dem Erbrütungsmedium zugegeben, so setzt sich ein Teil der Partikeln auf der noch sehr klebrigen Eimembran ab, wobei auch Aggregationen mehrerer Teilchen erfolgen können. Bei zusammenhängenden Eiteppichen werden die kleinen Hohlräume zwischen den sich berührenden kugeligen Eiern mit Rotschlammpartikeln allmählich aufgefüllt. Dies gilt auch für die Versuche mit niedrigen Rotschlammkonzentrationen. Anfangs noch flockig und locker, verdichten sich die in den Zwischenräumen abgesetzten Partikel innerhalb weniger Tage beträchtlich. Durch diesen Vorgang wird bei den zentral liegenden Eiern ein großer Teil der Oberfläche besonders stark am Gasaustausch mit dem umgebenden Medium behindert. In den Versuchen mit geringen Rotschlammengen waren daher peripher oder einzeln liegende Eier weniger betroffen. In hohen Konzentrationen waren freiliegende und zusammenhängende Eier gleichmäßig bedeckt.

Mit zunehmendem Alter der Eier läßt die Klebefähigkeit der Eimembran nach, insbesondere dann, wenn die Eioberfläche zur mikroskopischen Kontrolle mehrfach vom anhaftenden Partikelfilm befreit worden war. An den Eiern, die nicht gestört wurden, blieb jedoch der zu Beginn festgesetzte Rotschlamm während der gesamten Inkubationszeit mit gleicher Intensität haften.

### Einfluß auf Entwicklungsgeschwindigkeit, Mißbildungsrate und Sterblichkeit

In beiden Versuchsreihen war auf frühen Embryonalstadien bis zum Abschluß der Epibolie eine Verzögerung der Entwicklungsgeschwindigkeit nicht meßbar. Erst nach Einsetzen des Herzschlages zeigten sich in hohen Konzentrationen der Rotschlamm-suspension Unterschiede zu den Kontrollen. Abbildung 4 gibt den Verlauf der Herzschlagkurven für die Versuchsreihe 2 zwischen dem 3. und 7. Entwicklungstag wieder. Während bei einer Konzentration von 12,5 ml/l die Keime am 5. und 6. Entwicklungstag quantitativ abstarben, wurde in niederen Konzentrationen neben einer zunehmenden Sterblichkeit eine Entwicklungsverzögerung deutlich, die sich gegenüber den Kontrollen zunächst im Zurückbleiben der Herzschlagkurven zeigte, danach durch verspätetes Einsetzen der Augenpigmentierung auffiel und schließlich in eine erhöhte Mißbildungsrate mündete. Das Spektrum der erzielten Mißbildungen entsprach weitgehend

den Befunden früherer Untersuchungen (ROSENTHAL und STELZER 1970). Auffallend häufig wurden auch Deformationen des Dotters beobachtet, wie sie von KÜHNHOLD (1969) unter dem Einfluß von Rohöl-Fractionen beschrieben sind. Die Mißbildungsrate war in beiden Versuchsreihen beträchtlich höher als in den Kontrollen (Tab. 1 und 2).

Tabelle 1

*Clupea harengus*-Embryonen. Sterblichkeit und Mißbildungsrate bis zum Schlupfzeitpunkt unter dem Einfluß verschiedener Rotschlammkonzentrationen. Erbrütungsversuch mit stehenden Platten (Versuchsreihe 1, siehe Abb. 1), K = Kontrolle, n = Anzahl der kontrollierten Eier

Rotschlammkonzentration (ml/l)	n	Sterblichkeit (%)	Mißbildungsrate (%)
K	503	10,6	1,6
1	103	49,5	7,8
2	105	53,8	25,7
5	103	58,8	17,5
10	95	54,8	17,8

Tabelle 2

*Clupea harengus*-Embryonen. Sterblichkeit und Mißbildungsrate bis zum Schlupfzeitpunkt unter dem Einfluß verschiedener Rotschlammkonzentrationen. Erbrütungsversuch mit liegenden Platten (Versuchsreihe 2, siehe Abb. 1). K = Kontrolle, n = Anzahl der kontrollierten Eier

Rotschlammkonzentration (ml/l)	n	Sterblichkeit (%)	Mißbildungsrate (%)
K	784	13,5	3,9
1,25	185	72,3	22,1
2,50	198	88,4	34,3
6,25	172	95,2	36,1
12,50	185	100,0	—
25,00	135	100,0	—

In allen Rotschlammkonzentrationen trat eine erhebliche Sterblichkeit auf. Schon in der niedrigsten verwendeten Konzentration (Rotschlamm suspension 1 ml/l Seewasser) erreichten in Versuchsreihe 1 (stehende Platten) nur etwa 50 % der Embryonen ein schlupffähiges Stadium, von denen wiederum 7,8 % mißgebildet waren. In Versuchsreihe 2 (liegende Platten, Tab. 2) kamen in derselben Konzentration über 70 % der Embryonen nicht mehr zum Schlupf. Bei einer Konzentration von 12,5 ml/l starben alle Embryonen zum Zeitpunkt der Augenpigmentierung ab.

### Einfluß auf Larvengröße und Schlupfzeitpunkt

Die beobachtete Verzögerung der Entwicklungsgeschwindigkeit unter dem Einfluß von Rotschlamm mündet in Abhängigkeit von der Konzentration in eine verringerte

Larvengröße (Totallänge) zum Schlupfzeitpunkt. Die gleiche Tendenz gilt für die Kopflängen der geschlüpften Larven (Tab. 3 und 4). Hierbei fällt besonders ins Gewicht, daß zahlreiche Larven beim Schlupf einen noch zum Dotter hin gekrümmten Kopf aufweisen. Die relative Dottergröße (Dotterlänge  $\times$  Dotterhöhe, Abb. 3) verhält sich dagegen direkt proportional zur Konzentration der Rotschlamm suspension (Tab. 3 und 4).

Auch die Schlupfzeit wird im Vergleich zu den Kontrollversuchen unter dem Einfluß von Rotschlamm verändert. Während in den Kontrollen das Schlüpfen am 8. und 9. Inkubationstag nach etwa 36 h nahezu abgeschlossen war, erstreckte sich dieser Vorgang bei einem Rotschlammgehalt von 1,25 ml/l und 2,5 ml/l über mehr als 3 Tage.

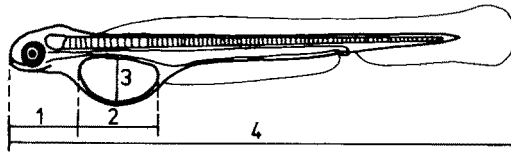


Abb. 3: *Clupea harengus*-Larve. Lage der gemessenen Körperabschnitte. 1 = Kopflänge, 2 = Dotterlänge, 3 = Dotterhöhe, 4 = Totallänge

Bei einer Konzentration von 6,5 ml/l kamen nur rund 5 % der befruchteten Eier bis zum Schlupf. Das Schlüpfen begann etwa 1 Tag früher als bei den Kontrolltieren. In Abbildung 5 sind die Beziehungen zwischen der Konzentration der Rotschlamm suspension, dem Schlupfzeitraum und der Larvengröße veranschaulicht. Die Ergebnisse entsprechen den von HAMDORF (1961) bei Forellenembryonen im O<sub>2</sub>-Mangelversuch erarbeiteten Befunden, wonach ein Sauerstoffdefizit auf spätembryonalem Stadium zur Verkürzung der Entwicklungszeit bis zum Schlupf führt und in Abhängigkeit von der Einwirkungszeit die Schlupfgröße bestimmt.

### Einfluß von Rotschlamm-Suspensionen auf Dottersacklarven

Unmittelbar nach dem Schlüpfen schwimmen Heringslarven überwiegend in der Vertikalen. Erst im Laufe der Dotterzehrung geht die Vertikal- in die Horizontalbewegung über (ROSENTHAL 1968). Infolge des Dottergewichts sinken die Larven während der Ruhepausen kopfüber ab und stoßen dabei mit dem Kopf häufig auf den Boden der Erbrütungsgefäße. Hierbei kommen sie mit dem teilweise am Boden abgesetzten Rotschlamm in Berührung, der massiv in das stets geöffnete Maul eindringt und dieses bis zum Schlund hin verstopft. Aber selbst wenn die Larven am Boden keinen Rotschlamm aufgenommen hatten, konnte in zahlreichen Fällen beobachtet werden, daß auch während des Schwimmens Rotschlammteilchen aus der Suspension herausfiltriert wurden und das Maul verklebten (Abb. 6). Der prozentuale Anteil der Larven mit verstopftem Maul und Schlund nahm mit steigender Konzentration der Rotschlamm suspension bei einer Einwirkungszeit von 3 bis 6 Stunden deutlich zu (Tab. 3 und 4). Wurden Larven mit Rotschlammteilchen im Maul in sauberem Seewasser



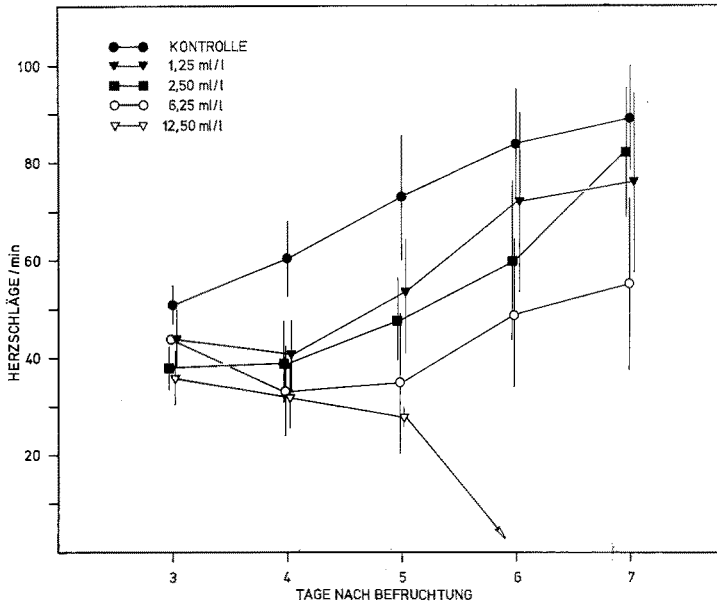


Abb. 4: *Clupea harengus*-Embryonen. Verlauf der Herzschlagkurven zwischen dem 3. und 7. Inkubationstag in Abhängigkeit von der Rotschlammkonzentration (Versuchsreihe 2, liegende Platten). Mittelwerte und Standardabweichungen aus jeweils 30 Messungen

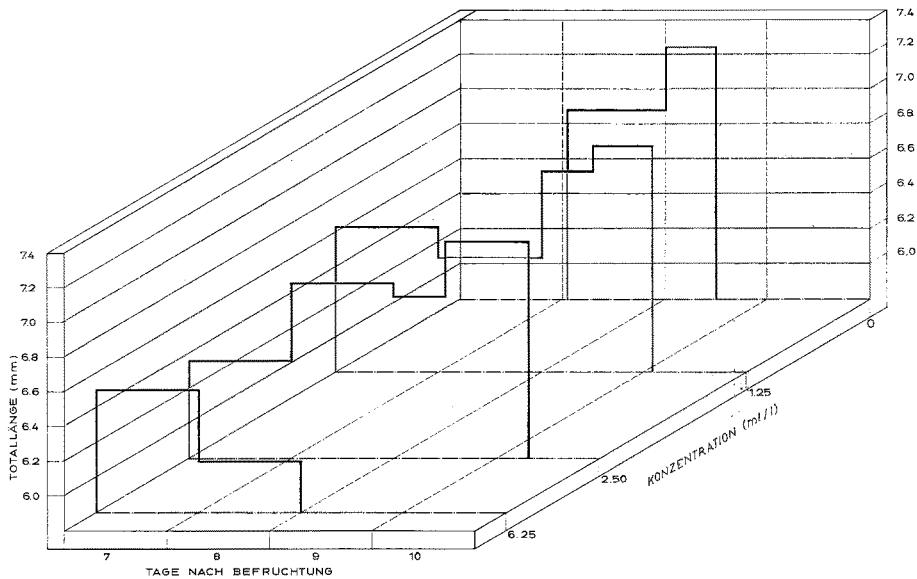


Abb. 5: *Clupea harengus*. Totallänge der Larven in Abhängigkeit vom Schlupfzeitpunkt (Tage nach Befruchtung) und von der Rotschlammkonzentration (Versuchsreihe 2, liegende Platten)



separat gehältert, so waren sie innerhalb von 48 Stunden nicht in der Lage, sich von diesen Fremdkörpern zu befreien. Man hatte vielmehr den Eindruck, als ob sich der Rotschlamm – möglicherweise infolge von Schluckbewegungen – vor dem Schlund pfropfartig verdichtete.

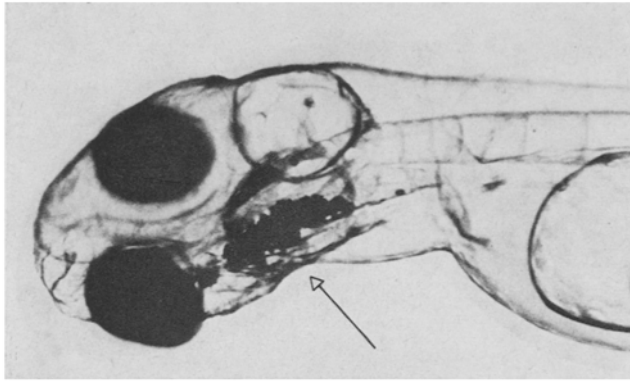


Abb. 6: *Clupea harengus*. Dottersacklarve (3 bis 6 h nach dem Schlupf). Maul und Schlund mit Rotschlammteilchen verstopft (Pfeil)

## DISKUSSION

Die vorliegenden Ergebnisse sind nicht ohne weiteres auf Freilandbedingungen übertragbar, obwohl in beiden Testreihen versucht wurde, das mögliche Verhalten von Rotschlamm-Suspensionen nach dem Verklappen in See in zweierlei Hinsicht zu verifizieren. Versuchsreihe 1 simuliert die Annahme, daß der Rotschlamm sich nicht sofort quantitativ am Boden absetzt, sondern für begrenzte Zeit teilweise suspendiert bleibt. Zunächst würde er dann mit den Strömungen verfrachtet werden können, wobei substratgebundene Fischeier nur durch Berührung mit vorbeischiebenden Rotschlammteilchen verkleben können. In Versuchsreihe 2 dagegen wird von der Annahme ausgegangen, daß der sich absetzende und verdichtende Rotschlamm die substratgebundenen Fischeier bedeckt.

Die beobachteten Schädigungen sind in erster Linie auf physikalische Wirkungen des Rotschlammes zurückzuführen. Je nach Stärke der aufliegenden Schicht wird der Gasaustausch zwischen den Eiern und dem umgebenden Medium behindert. Versuchsreihe 1 zeigt sowohl in den hohen wie auch niedrigen Konzentrationen vergleichbare Sterblichkeitsraten. Die Ursache hierfür ist wahrscheinlich darin begründet, daß Heringseier, die nicht direkt am Boden liegen und von einer sich absetzenden Rotschlamm-schicht bedeckt werden können, nur mit einem nahezu gleichmäßigen Teilchenfilm verkleben. Es scheint dabei in weiten Grenzen unerheblich zu sein, wie groß die Konzentration der Rotschlamm-Suspension ist.

Setzt sich der Rotschlamm auf die am Boden liegenden Eier ab (Versuchsreihe 2), so hängt die Beeinträchtigung der Überlebensrate überwiegend von der gebildeten

Schichtdicke ab. Geht man davon aus, daß sich die in den Erbrütungsgefäßen eingebrachte Rotschlammmenge von 1,25 ml/l gleichmäßig und quantitativ am Boden der Gefäße (Grundfläche etwa 60 cm<sup>2</sup>) abgesetzt hat, so würden bereits weniger als 0,02 ml/cm<sup>2</sup> (oder bezogen auf Naßgewicht 30 mg/cm<sup>2</sup>) zu letalen Folgen führen.

Als außerordentlich bedenklich muß der Befund gewertet werden, daß bei Heringslarven unmittelbar nach dem Schlupf Maul und Schlund durch Rotschlammartikel verstopft werden können. Vor allem besteht die Gefahr, daß die erste Nahrungsaufnahme verhindert wird, wenn die Verstopfung bis zum Ende der Dottersackphase anhält. Selbst dann, wenn Heringslarven in der Lage sein sollten, den propfartigen Rotschlammballen zu schlucken, muß offenbleiben, mit welchen Folgeschäden im Verdauungstrakt der Larven zu rechnen ist.

Die bei Heringsembryonen in Abhängigkeit von der Konzentration der Rotschlamm-Suspensionen gefundenen Sterblichkeitsraten sind mit den Befunden von HALSBAND (1971) und PAFFENHÖFER (1971) nicht vergleichbar. Die von beiden Autoren gewählten Organismen zeigen gegenüber dem Rotschlamm unterschiedliche Empfindlichkeiten, die zudem mit anderen Methoden auf andere Kriterien hin geprüft wurden.

#### ZUSAMMENFASSUNG

1. In 2 Versuchsreihen wurde der Einfluß verschiedener Rotschlamm-Suspensionen auf die Embryonalentwicklung des Herings geprüft.
2. In allen benutzten Rotschlammkonzentrationen traten im Vergleich zu den Kontrollen hohe Sterblichkeits- und Mißbildungsraten auf.
3. Mit steigender Konzentration der Rotschlamm-Suspension schlüpften kleinere Larven mit größerem Dotter und zunehmendem prozentualen Anteil an Verkrümmungen in der Kopffregion.
4. Blieben die geschlüpften Larven der Rotschlamm suspension ausgesetzt, so stieg der Anteil der Larven mit verstopften Mäulern in Abhängigkeit von der Konzentration und Einwirkungszeit an.

*Danksagung:* Für den intensiven Arbeitseinsatz bei der Durchführung der Versuche danke ich meinen Assistentinnen Frau G. FÜRSTENBERG und Fr. J. KLINCKMANN.

#### ZITIERTE LITERATUR

- HALSBAND, E. & HALSBAND, I., 1971. Physiologische Studien zur Ermittlung des Schädlichkeitsgrades von „Rotschlamm“ in Seewasser. *Wasser Luft Betrieb* **15** (7), 268–273.
- HAMDORF, K., 1961. Die Beeinflussung der Embryonal- und Larvalentwicklung der Regenbogenforelle (*Salmo irideus* GIBB.) durch die Umweltfaktoren, O<sub>2</sub>-Partialdruck und Temperatur. *Z. vergl. Physiol.* **44**, 523–549.
- KÜHNHOLD, W. W., 1969. Der Einfluß wasserlöslicher Bestandteile von Rohölen und Rohölfractionen auf die Entwicklung von Heringsbrut. *Ber. dt. wiss. Kommn Meeresforsch.* **20** (2), 165–171.

- PAFFENHÖFER, G.-A., 1971. Einfluß von „Rotschlamm“ auf Mortalität und Körpergewicht von Jugendstadien des marinen planktischen Copepoden *Calanus helgolandicus*. Naturwissenschaften **57** (im Druck).
- & ROSENTHAL, H., 1968. Trockengewicht und Kaloriengehalt sich entwickelnder Herings-  
eier. Helgoländer wiss. Meeresunters. **18**, 45–52.
- ROSENTHAL, H., 1968. Schwimmverhalten und Schwimmgeschwindigkeit bei den Larven des  
Herings *Clupea harengus*. Helgoländer wiss. Meeresunters. **18**, 453–486.
- & STELZER, R., 1970. Die Wirkung von 2,4- und 2,5-Dinitrophenol auf die Embryonal-  
entwicklung des Herings (*Clupea harengus*). Mar. Biol. **5**, 325–336.
- STELZER, R., ROSENTHAL, H. & SIEBERS, D., 1971. Einfluß von 2,4-Dinitrophenol auf die At-  
mung und die Konzentration einiger Metabolite von Embryonen des Herings, *Clupea*  
*harengus*. Mar. Biol. **11**, 369–378.

Anschrift des Autors: Dr. H. ROSENTHAL  
Biologische Anstalt Helgoland  
(Zentrale)  
2 Hamburg 50  
Palmaille 9  
Bundesrepublik Deutschland