

II.

VERGIFTUNGSVERSUCHE MIT KUPFERSULFAT.

Von H. Weber.

A. MATERIAL - METHODE.

Der Untersuchung über die Giftigkeit des Chlors schließt sich in Problemstellung, Material und Methode die Prüfung der Kupfersulfatwirkung an. Neben der Feststellung der tödlichen Dosis, was ja die praktische Bedeutung der unternommenen Versuche bedingt, sollten Beobachtungen über die Wirkungsweise des Giftes einhergehen.

In der Auswahl der Versuchstiere ließ ich mich ebenfalls von ökologischen Gesichtspunkten leiten, nach welcher folgende Darstellung gegliedert ist. Es kamen zur Beobachtung als Vertreter des

I. Litorals:

1. *Hydra vulgaris* Pall.
2. *Chaetogaster diaphanus* Ornith.
3. *Chironomus* sp.

II. Bachbewohner:

1. *Planaria gonocephala* Dnj.
2. *Gammarus pulex* L.

III. Planktontiere:

1. *Daphne longispina* Müll.
2. *Bythotrephes longimanus* Leydig.
3. *Cyclops strenuus* Fisch.

Die Tiere wurden jeweils in Schälchen von 60 cm³ Inhalt einzeln oder mehrere zugleich in die Lösung von bekannter Konzentration gesetzt und gleichzeitig einige Kontrollindividuen in gleichartigen Schalen mit reinem Seewasser aufgestellt.

Die Stammlösungen des wasserfreien Kupfersulfats in destilliertem Wasser bleiben nicht konstant, sondern fallen nach einigen Tagen gelbliche mikroskopische Kristalle von basischem Kupfersulfat ($\text{Cu}(\text{OH})\text{HSO}_4$) aus. Deshalb sinkt der Gehalt an jonisiertem Kupfer etwas. Es wurden infolgedessen die Stammlösungen von Zeit zu Zeit erneuert.

Noch weniger konstant sind Lösungen mit Seewasser, die ja für die Versuche allein in Frage kamen. Es fällt alsbald ein bläulicher, flockiger Niederschlag aus von basischem Kupfercarbonat, der den Boden der Gefäße mit feinem Überzug ver-

sieht. Dabei wird das Calciumcarbonat dem Seewasser entzogen. So bindet sich im fast unlöslichen Niederschlag ein weiterer Teil der freien Kupferjone. Bei einem Gramm auf 100 cm³ Lösung wog der Niederschlag 10 mg.

Um diesem Übelstande zu begegnen, wurden die Lösungen immer frisch für jeden Versuch mit Meßzylinder und Meßpipette bereitet. In einer dekadischen Serie, begonnen mit 10 % (100 g Kupfersulfat pro L), dann 1 % (10 g pro L), dann 0,1 % (1 g pro L) u. s. f. wurde die Stammlösung soweit verdünnt, bis der für die einzelnen Arten verschiedene wirkungslose Grad erreicht war.

Die Weitmaschigkeit dieser Methode läßt sich aus zwei Gründen rechtfertigen. Wie schon erwähnt, sinkt der Gehalt an jonisiertem Kupfer recht bald, bleibt aber noch innerhalb der gesetzten Grenzmarken der Versuchsreihen. Die individuellen Schwankungen der Widerstandskraft gegen Vergiftung sind sodann bei einzelnen Tierarten dermaßen groß, daß nur ganz ausgedehnte Versuchsserien eine auf den Durchschnitt berechnete, exaktere Einengung der Tötlichkeitsgrenzen erlaubten. Dieses schien aber praktisch nicht notwendig, und hätte auch die Kenntnisse vom Vergiftungsvorgang als solchem nicht wesentlich gefördert.

An den zoologischen Teil schließen sich einige botanische Versuche an.

B. ERGEBNISSE DER VERSUCHE.

I. Litoral.

1. *Hydra vulgaris*.

a) Darstellung der Experimente.

Es wurden jeweils eine größere Anzahl von Individuen, die sich teilweise in Knospung befanden, in Schälchen mit Seewasser gesetzt. Die Gefäße wurden vor Versuchsbeginn mit Salzsäure und destilliertem Wasser gründlich gesäubert. So hatten die Tiere Gelegenheit, sich an die Umgebung zu gewöhnen und gelangten in ausgestrecktem Zustand zur Beobachtung in den Versuchslösungen. Die nicht zum Versuch verwandten Individuen dienten als Kontrolle.

1. *Experiment Hydra 10*. Ein gut ausgestrecktes Individuum wurde in 10 % Kupfersulfatlösung verbracht. Momentan zucken die Längsmuskelfasern zusammen, finden jedoch nicht Zeit, den Körper in Kugelform zu zwingen. Die Tentakel sind

etwa auf einem Drittel ihrer Normallänge eingezogen. Der Körper des Tieres behält seine Form bei; auch nach 24 Stunden ist kein Zerfall bemerkbar. Die Nesselkapseln sind nicht ausgeschleudert und reagieren auch auf Essigsäure nicht mehr. Die Gewebe erscheinen fixiert, sodaß es möglich wäre, Schnittserien anzufertigen.

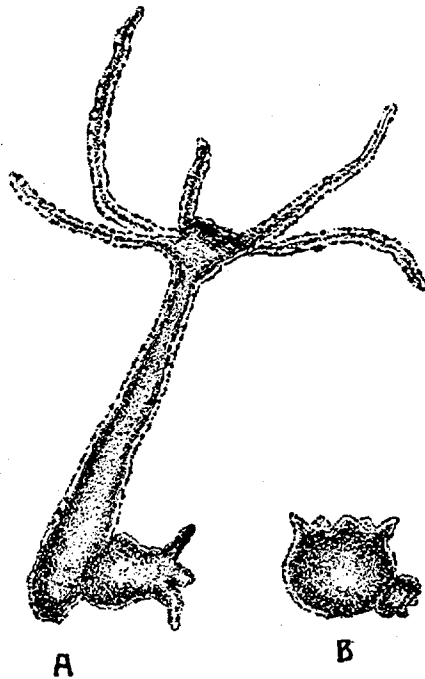


Fig. 1.

Hydra 20. A. Bei Versuchsbeginn. B. Nach 7 Min. Aufenthalt in 0,01 % Kupfersulfatlösung.

2. *Experiment Hydra 8.* Ein ebenso ausgestrecktes Individuum, das dicht mit Infusorien besetzt ist, stellt sich in der 0,8 % Lösung auf die Arme, kontrahiert und streckt sich abwechselnd. Die Infusorien, die in den Kontrollschalen auf den Hydren eifrig umhereilen, fallen augenblicklich ab und bilden einen dichten Belag um das Tier in der Sulfatlösung. Nach 10 Minuten sind alle Nesselfäden ausgeschleudert und keine Bewegung mehr feststellbar. Nach weiteren fünf Minuten treten angedaute Nahrungsreste aus, während ein leichtes Nachlassen der Kontraktion bemerkbar wird. Doch auch nach 24 Stunden treten keine zerstörten Zellen aus dem Verband aus. Auch da

wirkte das Sulfat als Fixierungsmittel. Eines der Kontrolltiere war nämlich andern Tags völlig aufgelöst, bloß die Nesselkapseln hatten ihre Form beibehalten.

3. *Experiment Hydra 20.* Bei den Versuchen mit schwächeren Konzentrationen, die durch dieses Experiment veranschaulicht werden, wurde von der üblichen Anordnung etwas abgewichen. Um die Wirkung des Kupfersulfates einwandfrei festzustellen, wurde eine Hydra mit Knospe in 45 ccm Seewasser gesetzt, wo sie sich nach 15 Minuten völlig beruhigt, ausgestreckt hatte (Fig. 11). In diesem Augenblick wurden 5 ccm Kupfersulfat von 0,1 % in möglichster Entfernung vom Tier dem Wasser beigelegt, so daß allmählich eine 0,01 % Lösung entstand. Noch während die Sulfatlösung einströmte, bewegten sich die Tentakel von der Strömung weg und kontrahierten sich. Nach zwei Minuten war das ganze Individuum derart kontrahiert, daß eine Krugform entstand (Fig. 1B). Nach 8 Minuten sind alle Nesselkapseln ausgeschleudert und die zerstörten Zellen treten aus dem Verband aus.

4. *Experiment Hydra 60.* Selbst ganz schwache Konzentrationen wirken in relativ kurzer Zeit tödlich, wie die Bewegungslosigkeit und der sofort eintretende Gewebszerfall anzeigen. Ein Individuum, das in einer Lösung mit 0,01 mg Kupfersulfat gesetzt wird, streckt sich vorerst aus, krümmt sich dann zu einer Schleife zusammen und kontrahiert die Tentakel. Nach 85 Minuten verharrt es in ziemlich stark kontrahiertem Zustand und verändert sich auch bei Zusatz von Essigsäure nicht mehr. Es tritt bald Zellzerfall ein, während die Kontrolltiere nach zwei Stunden mit Essigsäure geprüft, die Nesselfäden noch ausschleudern.

b) Diskussion der Ergebnisse.

Setzt man eine Hydra einer starken Kupfersulfatlösung aus, dann kontrahiert sie sich wenig und bleibt augenblicklich bewegungslos. Die Gewebe werden fixiert. Die Lösungen, welche 100 mg, 10 mg, oder 1 mg Kupfersulfat pro Liter enthalten, wirken annähernd gleichartig, abgesehen von der Lebensdauer, die in schwächeren Lösungen größer ist als in stärkeren. Die Hydra zieht sich maximal zur Krug- und Kugelform zusammen, welche alsbald sandig zerfällt. Im allgemeinen dauert es umso länger, bis der Tod eintritt, je geringer die angewandte Konzentration gewählt wird. Diese Verhältnisse

sind in einem Diagramm (Fig. 2) veranschaulicht. Auf der Abszisse sind die fallenden Konzentrationen in entsprechenden Abständen und auf der Ordinate die durchschnittliche Lebensdauer der Individuen eingetragen. So zeigt die Höhe der festen

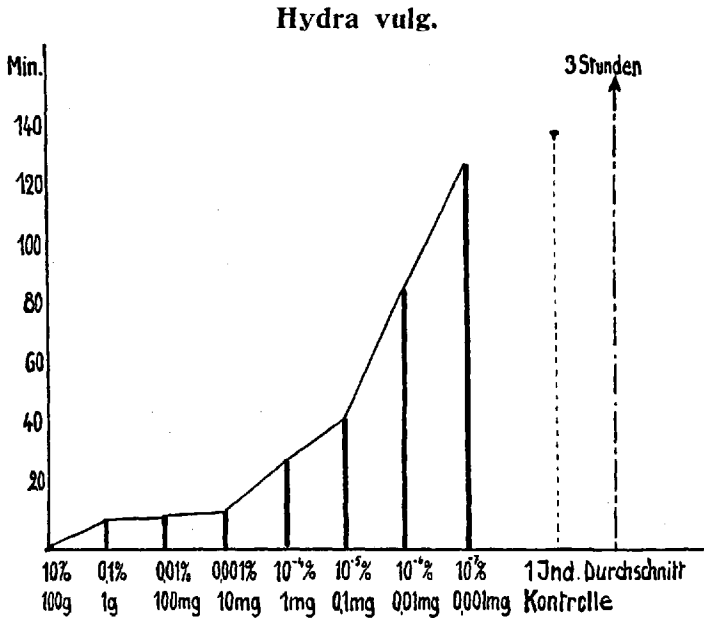


Fig. 2.

Striche an, wie lange die Individuen in einer bestimmten Lösung im Durchschnitt gelebt haben. Die punktierte Senkrechte zeigt, wann das erste Kontrollindividuum starb, während die strichpunktierte Senkrechte andeuten soll, wie lange die Kontrolltiere durchschnittlich gelebt haben. Durch Verbindung der Todespunkte erhält man eine zuerst scharf ansteigende, dann mehr flach verlaufende Kurve, die bei einer Konzentration von 0,1 mg pro Liter (10^{-5} %) oder einer 10-millionenfachen Verdünnung wieder stärker ansteigt. Selbst eine milliardenfache Verdünnung 0,001 mg pro Liter läßt noch eine deutliche Schädigung erkennen. Es starben nämlich die Individuen in dieser Lösung noch 10 Minuten vor dem 1. Kontrolltier und der Durchschnitt der letzteren lebte 50 Minuten länger als diese. Die ungeheure Giftigkeit des Kupfersulfats auf Hydra erinnert stark an die oligodynamische Wirkung des Kupfers auf Algen. Der allmähliche Anstieg der Todeskurve zeigt wohl, daß das Gift durch die äußerst zarten Ektoderm-Zellwände eindringt

und im Zellplasma gewisse tödliche Veränderungen hervorruft. Dabei sind die Stöße der Kupferionen gegen diese Wände naturgemäß weniger zahlreich bei starker Verdünnung und die betroffenen Zellen auch seltener, sodaß die Zerstörung längere Zeit in Anspruch nimmt. Dabei konnte nicht festgestellt werden, daß der Zerfall immer von einer bestimmten Körperregion ausgeht. Es zeigte sich, daß auf dem ganzen Mauerblatt und an der Proboscis gleichzeitig eine sandige Auflösung eintrat.

2. *Chaetogaster diaphanus*.

a) Darstellung der Experimente.

1. *Experiment Chaetogaster 11*. Eine Kette von zwei Individuen wurde in eine 1 % Kupfersulfatlösung gesetzt. Sofort kontrahierten sich die Längsmuskeln des Hautmuskelschlauches und des Pharynx. Nach 2 Minuten verharrten die krampfhaft verkürzten Längsmuskeln in ihrer Lage, nur der Pharynx vollführte gleichsam Schluckbewegungen. Nach einer weiteren Minute rollte sich der Wurm in Seitenlage ein und das erste Segment bewegte sich langsam. Schon 4 Minuten nach dem Einsetzen war jede Bewegung erloschen. Die Gewebe wurden fixiert, andern Tags war noch kein Zerfall bemerkbar.

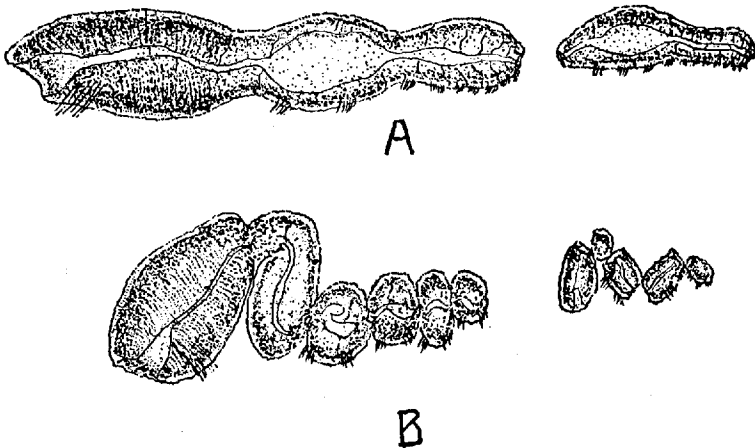


Fig. 3.

Chaetogaster 19 in 0,001 % Kupfersulfat. A. 5 Minuten. B. 10 Minuten nach dem Einsetzen.

2. *Experiment Chaetogaster 19*. In einer Lösung, die 10 mg Kupfersulfat pro Liter enthielt, wurde eine Kette von 2 Individuen verbracht. In den ersten 5 Minuten bemerkte man eine

starke Steigerung der Aktivität. Lebhaft suchend kroch die Kette umher, zugleich sich krampfartig kontrahierend. Plötzlich zerriß der Zusammenhang an der Sprossungszone (Fig. 3 A). Offenbar kontrahierten sich beide Individuen in entgegengesetzter Richtung. Möglicherweise ist auch die Sprossungszone durch besonders empfindliche Gewebe ausgezeichnet, die zuerst der Giftwirkung erliegen. Der Pharynx führte lebhaft Zuckungen aus. Das Zerreißen wurde in der 10. Minute weiter ausgedehnt auf die Segmente. So entstand eine Perlschnurform, deren Perlen aus kugelig zusammengezogenen Segmentgruppen bestanden (Fig. 3 B). Die Einschnürung bei bestimmten Dissepimenten riß schließlich ganz durch und die Tierkette bestand noch aus einem Haufen zerbrochener Abschnitte, wovon der Kopf den größten Teil bildete. In der 15. Minute hörte jede Bewegung auf.

b) Diskussion der Ergebnisse.

Die Vergiftungserscheinungen bei der Naidide *Chaetogaster* sind in vielen Zügen jenen für die *Hydra* beschriebenen

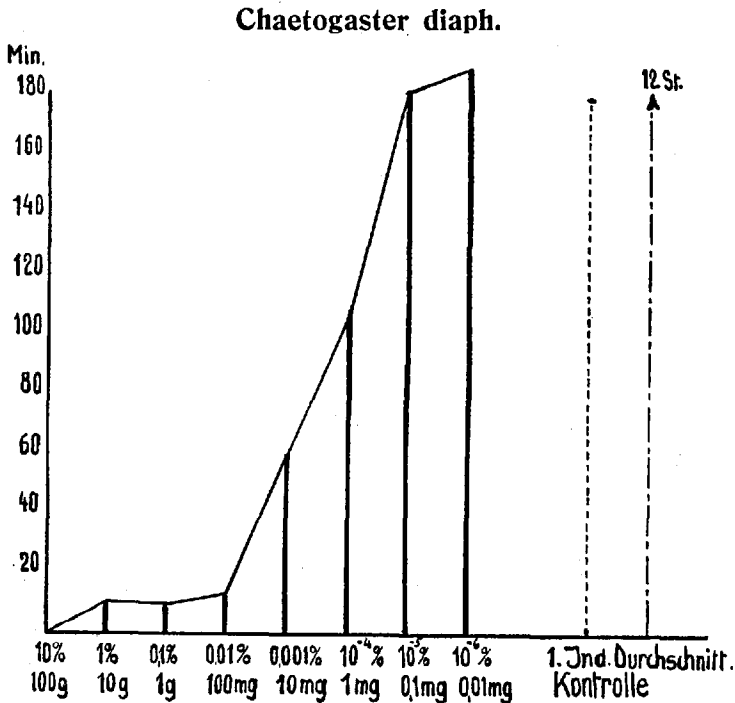


Fig. 4.

ähnlich. Auch hier wirken starke Konzentrationen fixierend. Noch 1 g pro Liter konserviert die Gewebe für längere Zeit. In schwächeren Lösungen zerfällt der Körper unmittelbar nach dem Tode in eine weiße wolkige Masse. Wie aus dem Diagramm (Fig. 4) ersichtlich ist, nimmt die Todeskurve einen ähnlichen Verlauf wie bei Hydra, wenn sie auch etwas nach vorn verschoben ist. Dies deutet auf eine geringere Empfindlichkeit. Immerhin wird *Chaetogaster* noch bei 100-millionenfacher Verdünnung (0,01 mg pro Liter) deutlich geschädigt. Wenn auch eines der Kontrollindividuen schon nach 3 Stunden starb, so bleibt der Durchschnittswert der Lebensdauer in besagter Lösung fast 9 Stunden hinter der durchschnittlichen Lebensdauer der Kontrolltiere zurück. Trotzdem mußte 0,1 mg Kupfersulfat pro Liter als eben noch tödliche Dosis angenommen werden, da bei dieser Versuchsordnung nicht mehr deutlich wird, ob die Tiere infolge der Kupfervergiftung oder aus anderen Ursachen, die auch auf die Kontrollen wirken, zugrunde gehen.

3. *Chironomus*.

a) Darstellung der Experimente.

1. *Experiment Chironomus 10*. Eine neun mm lange Mückenlarve wird in 10 % Kupfersulfatlösung versetzt. Sofort bemerkt man lebhaftere Fluchtbewegungen. Infolge des erhöhten spezifischen Gewichts der Flüssigkeit wird die Larve an die Oberfläche getrieben. Die Scheinfüßchen halten aber das Vorderende am Glasboden fest, während der Körper wie Tubifex bei Sauerstoffnot schwingende Bewegungen ausübt. Nach 20 Minuten wird diese Haltung aufgegeben und in heftigen Stößen schwimmt die Larve, während die Kiefer sich beständig kauend bewegen. In der folgenden Minute verringert sich die Aktivität so stark, daß nur noch die Scheinfüßchen ein- und ausgestülpt werden und der Hinterleib leicht zuckt. Nach weiteren 5 Minuten hört jede Bewegung auf.

2. *Experiment Chironomus 9*. Ein 18 mm langes tiefrotes Individuum, das in 20 % Kupfersulfatlösung gesetzt wurde, verhielt sich ähnlich wie die vorher beschriebene Larve. Die Schwimmbewegungen waren jedoch noch etwas lebhafter und die Zuckungen sehr intensiv. Der Tod trat aber erst nach 2 Stunden 45 Minuten ein.

3. *Experiment Chironomus 20*. In einer 0,01 % Lösung, die also 100 mg Kupfersulfat pro Liter enthält, verbrachte eine

15 mm lange dicke Larve unbeschädigt 7 Tage. Am Abend des 1. Tages war der Boden des Schälchens mit stark blauem Niederschlag des Kupferkarbonates bedeckt. Am 2. Tag war die Fluchtreaktion auf mechanische Reizung unvermindert, ebenso am folgenden Tage. Der 7. Tag zeigte keine Verminderung der Reaktionsfähigkeit; der blaue Niederschlag im Schälchen war noch immer vorhanden. Da eine Schädigung nicht mehr erwartet wurde, konnte der Versuch abgebrochen werden.

4. *Experiment Chironomus 24.* Wie sehr die Lebensfähigkeit von der Körpergröße und dem Zustand der Chitinbedekung abhängt, zeigt eine Larve die in 0,001 % (10 mg pro Liter) Lösung drei Tage lebte. Das Individuum war nur 5 mm lang und recht dünn. Es hatte wohl vorher eine Häutung überstanden. Am 2. Tage bewegte es sich nur noch auf Reizung und am 3. Tage erstarrte es in leicht eingekrümmter Seitenlage.

b) Diskussion der Ergebnisse.

Obwohl unter gleichen ökologischen Bedingungen lebend, wie die vorherbesprochenen Gattungen, erscheint *Chironomus* bedeutend widerstandsfähiger gegen die Giftwirkung. Selbst konzentrierte Lösungen töten nicht unmittelbar, gewisse Individuen leben bis zu 3 Stunden darin, ja können sogar nach einem halbstündigen Aufenthalt in gesättigter Lösung unbeschadet in reinem Seewasser weiterleben. Jüngere Individuen unter 10 mm Länge und solche, die sich frisch gehäutet haben, sterben bedeutend rascher als ältere Larven. Da mir nicht genügend gleichaltrige und gleichartige Tiere zur Verfügung standen, schwanken die errechneten Durchschnittswerte sehr stark und bedingen die unausgeglichene Kurve in Fig. 5. Um dieselbe auf den gleichen Raum zu bringen wie die übrigen, wurde die Lebensdauer in Stunden und Tagen angegeben. Die tödliche Dosis liegt zwischen 10 mg und 1 mg pro Liter. Doch können unter Umständen, wie das 3. Experiment zeigt, sogar 100 mg vertragen werden. Durch diese Beobachtungen wird erwiesen, daß die schädigende Wirkung des Kupfersulfats von der Beschaffenheit des Integumentes abhängt. Vergleicht man die *Chironomus*-kurve mit jener von *Hydra* oder von *Chaetogaster*, dann fällt neben der Höhe der tödlichen Dosis hauptsächlich die lange Lebensdauer in starken Konzentrationen auf. Dies kann am einfachsten erklärt werden, wenn man an-

nimmt, daß die Chitinhülle die Kupferjoneu kaum durchläßt. Die Beeinflussung des Verlaufs der Todeskurve durch die Beschaffenheit der Körperbedeckung wird in den folgenden Fällen noch deutlicher.

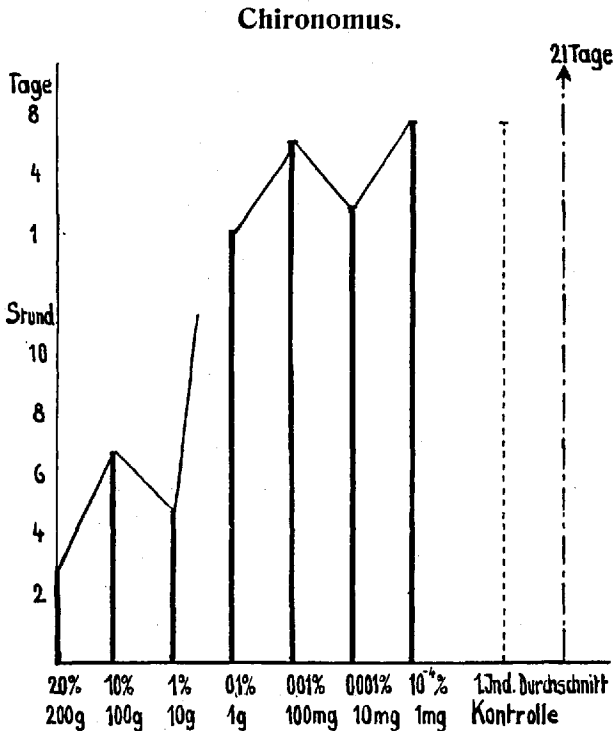


Fig. 5.

II. Bachfauna.

1. *Planaria gonocephala*.

a) Darstellung der Experimente.

1. *Experiment Planaria 10*. Ein Individuum, das tags zuvor mit Chironomuslarven gefüttert war, wurde einer 10 % Kupfersulfatlösung ausgesetzt. Nach zwei Zuckungen erstarrte es in voller Bewegung zu einer merkwürdig langgestreckten Schlangenform (Fig. 6). Das Kupfersulfat wirkte wie ein Fixierungsmittel. Zur Kontrolle wurde ein Exemplar mit Sublimat-Salpetersäure übergossen, das ebenfalls nach kurzer Zuckung erstarrte; im Gegensatz zum ersteren aber nicht die langgestreckte Form erhielt, und sich dicht mit Schleim überzog. Nach

Überbringung beider Individuen in Wasser zerfielen sie nicht, sondern behielten ihre Form bei.



Fig. 6.

Planaria in 10 % Kupfersulfatlösung.

2. *Experiment Planaria 12.* Mit den merkwürdigsten Körperverrenkungen, die eine großartige Fähigkeit der Formveränderung eines Hautmuskelschlauches veranschaulichen, begann ein Individuum das in 0,01 % Kupfersulfatlösung gesetzt wurde. Die schon beschriebene Schlangenform wurde unter lebhaftem Umherkriechen 40 Minuten aufrecht erhalten, dann entspannten sich die queren und diagonalen Muskelzüge. Es entstand eine breite Flunderform (Fig. 7 B), die bald wieder in die Schlangenform verwandelt wurde (Fig. 7 A). Nach 5 Minu-

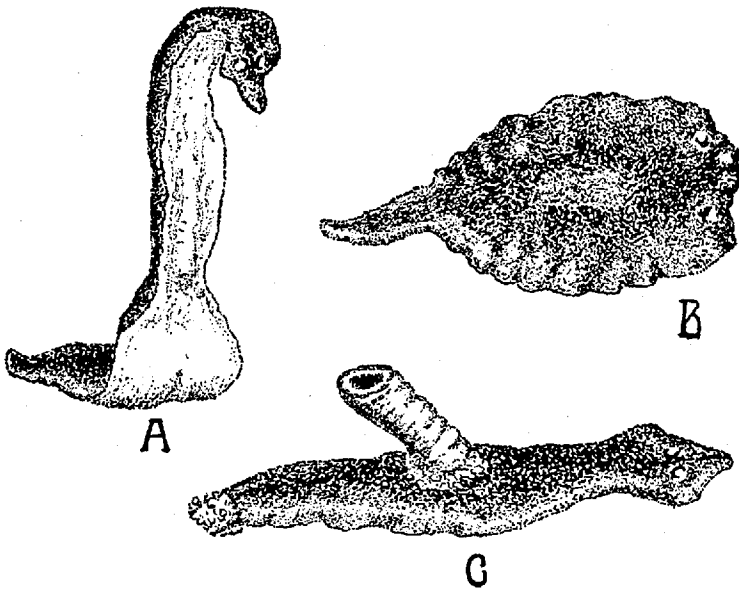


Fig. 7.

Planaria 12. In 0,01 % Kupfersulfatlösung. A sich aufrichtend in Schlangenform. B nach 40 Minuten in Flunderform. C Durchbruch des Pharynx.

ten platze plötzlich der Rücken und durch die Wand der Rüsseltasche kam der Pharynx in lebhaft suchender und schnappender Bewegung zum Vorschein (Fig. 7 C). Gleichzeitig zerfiel auch das Hinterende und in weiteren 5 Minuten war vom ganzen Plattwurm nur noch der Rüssel kenntlich, der seine Suchbewegungen losgelöst vom Körper noch einige Minuten fortsetzte.

3. *Experiment Planaria 22.* In einer millionenfachen Verdünnung (1 mg pro Liter) waren anfänglich keine Veränderungen der Körperform feststellbar. Die Planarie bewegte sich am Boden suchend umher, während den 5 Stunden, die sie unter Beobachtung stand. In der 5. Stunde begann sie große Mengen Schleim abzusondern. Am andern Tag befand sich der Körper in völliger Auflösung, nur der Rüssel war noch ganz geblieben. Ein Kontrolltier in reinem Seewasser wurde 21 Tage beobachtet. Es hatte unterdessen einen Kopf regeneriert.

b) Diskussion der Ergebnisse.

Werden Planarien in starke Sulfatlösungen gesetzt, dann erhalten sie eine eigentümliche Schlangenform und erstarren

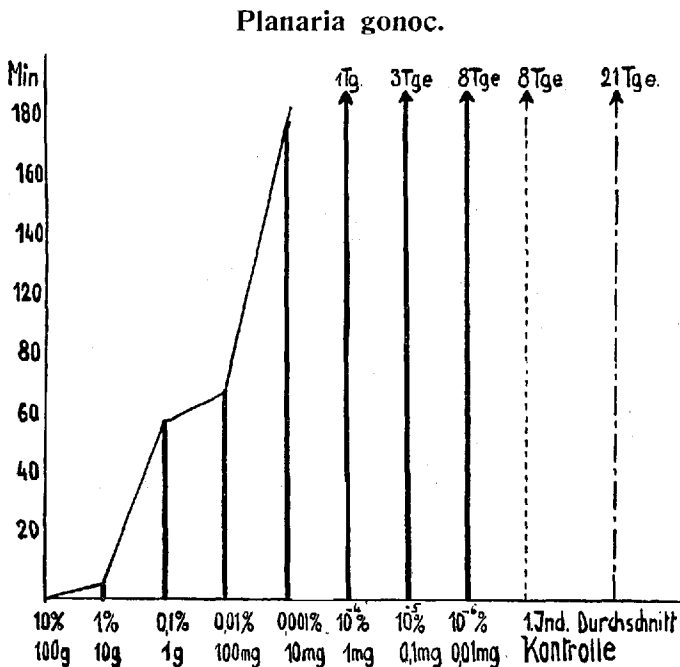


Fig. 8.

in kurzer Zeit darin. In schwächeren Lösungen entstehen merkwürdig verkrampfte Formen, die manchmal wie in peristaltischer Bewegung breite mit langgestreckten Gestalten wechseln lassen. Die Sterblichkeitskurve (Fig. 8) hat große Ähnlichkeit mit jener der Hydra. Auch hier ein langsamer Anstieg entsprechend dem langsameren Eindringen des Giftes bei schwächeren Lösungen. Doch ein bedeutender Gegensatz besteht darin, daß Planarie stärkere Lösungen erträgt, als Hydra. Es ist denkbar, daß bei geringeren Konzentrationen als 1 mg pro Liter die starke Schleimschicht das schädliche Gift am Eindringen verhindert. Die tödliche Dosis liegt zwischen 0,1 und 0,01 mg pro Liter. Deutlich zeigt sich eine spezifische Wirkung des Kupfers auf die Muskelfasern. Die krampfhaften Zustände werden so übersteigert, daß der Rüssel in seiner Tasche keinen Platz mehr findet und dank seines festeren Gewebes die Rückenmuskulatur und Haut durchreißt. In seinem Reizzustand führt er auch losgelöst vom Körper Bewegungen aus, die ihm das Ansehen eines Individuums geben.

2. *Gammarus pulex*.

a) Darstellung der Experimente.

1. *Experiment Gammarus 11*. Ein mittelgroßes, lebhaftes Individuum wurde einer 10 % Lösung ausgesetzt, in welcher es einige Stöße mit dem Hinterleib ausführte, um dann bald ruhig liegen zu bleiben. Nach 10 Minuten zitterten die Antennen noch leicht, sonst war keine Bewegung mehr zu erzielen, auch nicht bei Reizung. Nach 14 Minuten schien das Tier ganz bewegungslos. Zur Prüfung wurde es in reines Wasser zurückversetzt, wo es noch einmal durch das Zittern der Antennen Leben verriet. Nach dem Zurückversetzen in die Sulfatlösung streckte es sich in der 15. Minute aus und stellte jede Bewegung ein.

2. *Experiment Gammarus 13*. In einer 0,001 % (10 mg pro Liter) Lösung schwamm ein mittelgroßes, graues Exemplar lebhaft umher und zeigte noch keine Ermüdung, als die Beobachtung nach zwei Stunden unterbrochen werden mußte. Am andern Tags lag es bewegungslos ausgestreckt in der Schale. Die Kiemensäcke waren zum größten Teil aufgequollen und mit einer schwarzen Flüssigkeit erfüllt. Bei der mikroskopischen Untersuchung stellte sich heraus, daß die Kiemen völlig vom Suctorium *Dendrocometes paradoxus* durchsetzt waren.

b) Diskussion der Ergebnisse.

Die Todeskurve (Fig. 9) gleicht in einem Zuge jener der Chironomiden. Sie steigt nicht zuerst rasch an, sondern beginnt in einer ziemlichen Höhe. Das bedeutet, daß starke

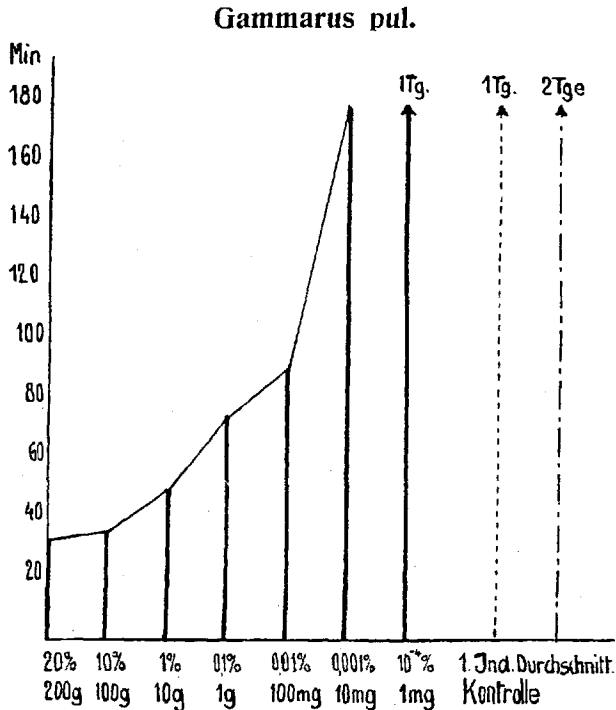


Fig. 9.

Lösungen nicht unmittelbar fixieren; sie brauchen infolge der guten Körperdeckung längere Zeit zur Auswirkung. Dennoch ist die Empfindlichkeit recht beträchtlich, und bedeutend größer als bei Chironomus. Die tödliche Dosis beträgt ungefähr 1 mg pro Liter. Die Kiemensäcke bieten offenbar für das Gift starke Angriffsflächen dar, sie werden wohl infolge ihrer Zartheit zuerst zerstört und bedingen den Untergang des Tieres. Die schwarzgeschwollenen Kiemensäcke, die fast regelmäßig beobachtet wurden, ließen eine deutlich spezifische Wirkung des Kupfersulfats vermuten. In der Folge traten solche Geschwulste auch bei toten Kontrolltieren auf, sodaß man annehmen muß, es handle sich um eine allgemeine Erscheinung, die höchstens mit dem Parasiten *Dendrocometes paradoxus*, der massenhaft vertreten war, in Verbindung gebracht werden könnte.

III. Planktontiere.

1. *Daphne longispina*.

a) Darstellung der Experimente.

1. *Experiment Daphne 12*. In einer 1 % Lösung schwamm ein Individuum zuerst an der Oberfläche rasch umher und sank dann ab. Die Schalen klappten auf und zu, die Antennen zuckten. Der trübe Kupferkarbonat-Niederschlag bildete sich alsbald. *Daphne* streckte den Hinterleib ausschlagend zwischen den Schalen hervor. Nach 5 Minuten lag sie am Boden und begab sich nur noch bei mechanischer Reizung langsam auf die Flucht. Schließlich zitterte nur noch ein Antennenast und nach 25 Minuten waren auch diese Zuckungen vorbei.

2. *Experiment Daphne 19*. Mehrere *Daphnien*, zum Teil mit Eiern im Brutraum, wurden in eine 0,02 % (20 mg pro Liter) Lösung verbracht. Nach 50 Minuten waren alle *Daphnien*, mit Ausnahme von 2 Exemplaren tot. Die Schalen der toten Tiere klafften auf. Nach 2 Stunden waren die beiden letzten *Daphnien* auch bewegungslos. Ein Exemplar mit einem Ei wird zur Prüfung in eine Schale mit frischem Wasser zurückversetzt und verhielt sich dort ebenfalls ohne Bewegung. Nach 5 Tagen zeigte es sich, daß das Ei nicht abgetötet worden war, es entschlüpfte der Schale ein Embryo mit gegabelten Ruderantennen und seitlichen Schalen.

3. *Experiment Daphne 20*. In einer Lösung von 1 mg pro Liter, bei der ein Sulfatgehalt gerade noch durch den Geschmacksinn feststellbar ist, befanden sich anfänglich 17 Individuen. Schon nach 60 Minuten wurden 10 tote Tiere entfernt. Die schwach lebenden 7 restlichen wiesen keine Fluchtreaktion mehr auf. Nach weiteren 40 Minuten war keine lebende *Daphne* mehr vorhanden, während von 20 Kontrollindividuen erst eines eingegangen war.

b) Diskussion der Ergebnisse.

Werden *Daphnien* einer Sulfatlösung ausgesetzt, dann zeigen sie immer wieder das gleiche Verhalten. Sie schwimmen anfänglich lebhafter umher, ermatten bald, schlagen mit den Antennen noch einige Zeit. Die Schalen klaffen auf und der Hinterleib tritt aus denselben. In konzentrierten Lösungen dauert der Todeskampf noch relativ lang. Wie aus dem Kurvenbild (Fig. 10) hervorgeht, braucht eine 10 % Lösung

noch 10 Minuten zur Abtötung. Ein mg pro Liter wirkt unbedingt tödlich. Die Tiere schwimmen zumeist infolge eingeschlossener Luftblasen in den Schalen an der Wasseroberfläche

Daphne long.

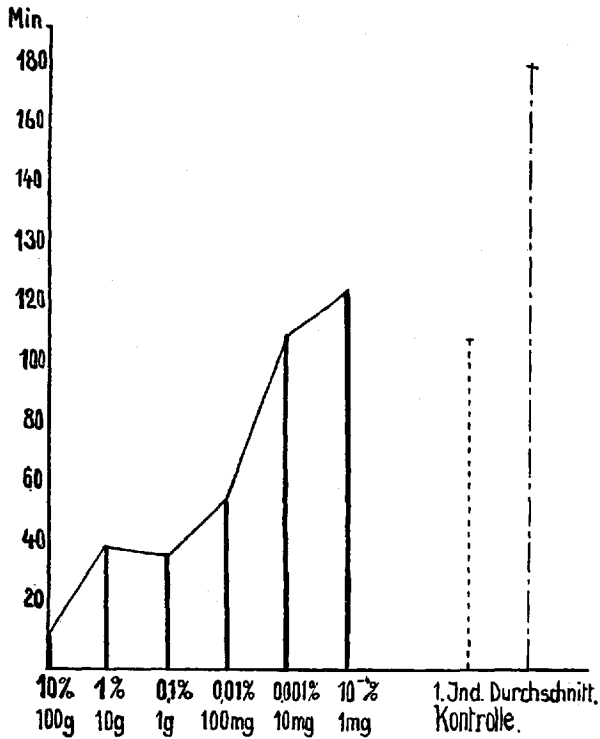


Fig. 10.

und erschweren so die Beurteilung. Einzelne Embryonen können länger leben als die Muttertiere. Dieser Umstand zeigt deutlich, daß das Gift auf der gesamten Körperoberfläche eindringt und zur Wirkung kommt. Da die Embryonen doppelt gegen das Gift geschützt sind, dauert es länger, bis auch in ihnen das Zerstörungswerk beginnt.

2. *Bytotrephes longimanus*.

a) Darstellung der Experimente.

1. *Experiment Bytotrephes 22*. Ein Individuum mit 4 Embryonen im Brutraum wurde in eine 80 mg enthaltende Lösung verbracht. In dieser schwamm es anfänglich lebhaft umher. Nach 4 Minuten hatte es sich soweit beruhigt, daß der Herz-

schlag unter dem Binocular beobachtet werden konnte. Er zeigte eine Steigerung der Frequenz gegenüber den gleichzeitig eingesetzten Kontrollen. Doch schon nach 6 Minuten verlangsamten sich die Herzkontraktionen deutlich und die Antennen und Ruderfüße lagen still. Der Puls der Embryonen dagegen hatte noch keine Schwächung erfahren. Nach weiteren 6 Minuten traten Exkreme aus dem Darm und die Herzschläge der Embryonen verlangsamten sich nun. Es dauerte noch 8 Minuten, bis das Herz des Muttertieres völlig still stand; bei den Embryonen schlug es langsam noch 26 Minuten lang. Sie wurden aus dem Brutraum entfernt, zeigten aber keine Bewegung der Körperanhänge mehr. Das Herz setzte nach weitem 10 Minuten ebenfalls aus.

Bythotrephes long.

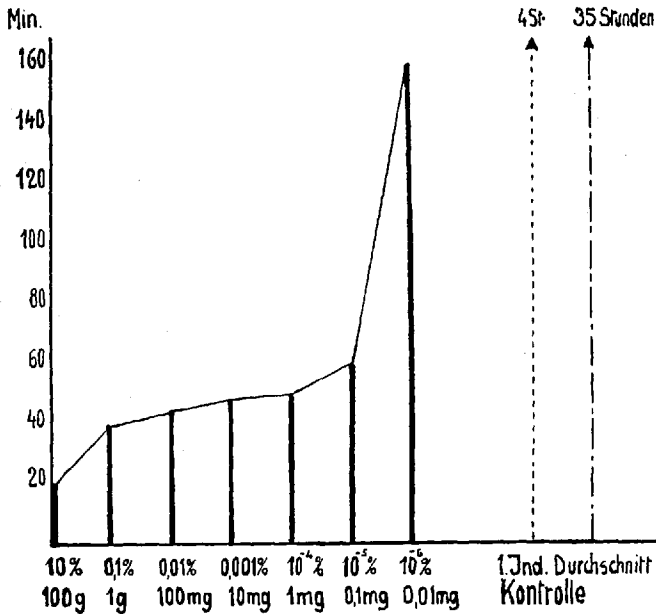


Fig. 11.

2. *Experiment Bythotrephes 24.* In einer Lösung, die 0,8 mg Kupfersulfat pro Liter enthielt, lebte ein Individuum mit Winteriern 70 Minuten. Zuerst zeigte sich wiederum eine Steigerung der Aktivität, wie sich auch in einem Zittern der Körperanhänge äußerte. Nach einer halben Stunde wurde das Umherschwimmen eingestellt und die Herzschläge verlangsamten sich. In der nächsten halben Stunde lebte das Individuum ruck-

artig auf, vollführte kraftlose Ruderschläge. Doch nach 10 Minuten verhartete es bewegungslos. Das Herz stellte seine langsamen Kontraktionen ein.

b) Diskussion der Ergebnisse.

Bytotrephes ist bedeutend empfindlicher als Daphne, wenn auch die Kurven in ihrem Verlauf ziemlich übereinstimmen (Fig. 11). Die Empfindlichkeit erinnert an jene der Hydra, wirkt doch eine 100-millionenfache Verdünnung noch tödlich und eine Verdünnung von 1:10 Millionen führt den Tod in durchschnittlich 50 Minuten herbei. Die Beurteilung ist dadurch erleichtert, daß der Herzschlag dauernd unter dem Binokular beobachtet werden kann. Er erfuhr anfänglich eine Steigerung der Frequenz. Das Kupfersulfat kann also stimulierend wirken. Doch erlahmte die Herztätigkeit rasch. Erst einige Zeit nach der Bewegungslosigkeit der Körperanhänge setzte auch das Herz aus. Die Embryonen im Brutraum lebten länger als die Muttertiere. Dies bestätigt von neuem die Ansicht von der osmotischen Wirksamkeit des Giftes. Noch deutlicher wird dies bei der letzten noch zu besprechenden Planktongattung.

3. *Cyclops strenuus*.

Darstellung der Experimente.

1. *Experiment Cyclops 10*. In einer 10 % Lösung schwamm ein Cyclops mit zwei Eipaketen anfänglich lebhaft umher, wurde aber infolge des starken Auftriebs mehr an die Oberfläche gedrängt und am Vorwärtskommen behindert. Nach 50 Minuten hörten die Schwimmbewegungen auf und nach einigen kurzen Zuckungen mit den Gliedmaßen trat der Tod ein. Die Eipakete wurden von den Hinterbeinen entfernt und zur Reinigung zweimal hintereinander in verschiedene Schalen mit frischem Seewasser verbracht. Nach 7 Tagen hatten sich aus den Eipaketen 7 Nauplii, die lebhaft umherschwammen, entwickelt. Sie wurden noch weitere 8 Tage beobachtet und zeigten keine Entwicklungsschäden.

2. *Experiment Cyclops 5*. Eine 0,01 % Lösung tötete ein Weibchen mit Eiern in 24 Stunden. Nach den ersten zwei Stunden seines Aufenthaltes war es besetzt mit blauem Kupferkarbonat, zeigte aber noch gute Fluchtreaktion. Andern Tags war der Niederschlag noch dichter. Das Weibchen reagierte nicht mehr. Die Eier wurden wieder in gleicher Weise in

Frischwasser gesetzt. Nach 6 Tagen hatten sich eine Anzahl Nauplii entwickelt.

3. *Experiment Cyclops-Nauplius 15.* Zwei Nauplii, die sich aus den Eiern der Kontrolltiere entwickelt hatten, wurden einer Lösung ausgesetzt, die 8 mg pro Liter enthielt. Es war kein Kupferkarbonatniederschlag bemerkbar. Nach 60 Minuten konnte noch keine Verzögerung der Fluchtreaktion bemerkt werden, ebenso am folgenden Tage. Erst am 3. Tag zeigte ein Individuum Ermattungen nach zwei Ruderstößen. Es geriet in Rückenlage und ging ein, während das andere Individuum noch einige Minuten lebte. Die Nauplii der Kontrolle wurden 30 Tage lang beobachtet, auch jene, die sich aus den Eiern der vergifteten Tiere entwickelt hatten.

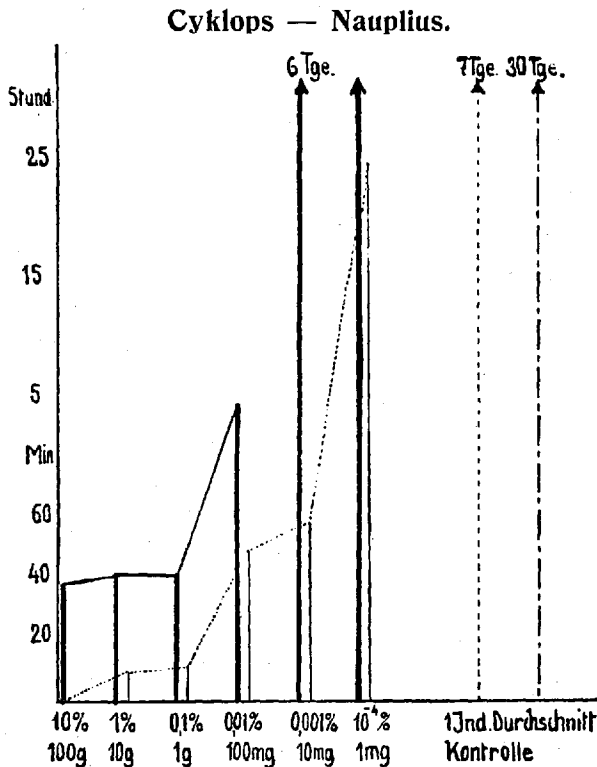


Fig. 12.

4. *Experiment Cyclops 16.* Ein jüngeres Individuum, das keine Eipakete besaß, wurde in eine Lösung mit 10 mg pro Liter gesetzt. Des andern Tages bewegte es sich noch lebhaft

umher und wurde noch weitere 5 Tage unbeschadet im Schälchen gehalten. Ein Kontrolltier in reinem Seewasser war nach 6 Tagen eingegangen. Der Versuch wurde abgebrochen.

b) Diskussion der Ergebnisse.

Die Empfindlichkeit von Cyclops gegenüber Kupfersulfat gleicht in manchen Zügen jener von Chironomus (Fig. 12). Im Vergleich zu Daphne oder Bythotrephes verträgt Cyclops eine viel stärkere Dosis. Zehn mg pro Liter wirken nicht mehr unbedingt tödlich. Doch sind die Nauplien empfindlicher, sterben sie doch noch in einer Lösung, die 8 mg enthält, innerhalb zwei Tagen. Auch in starken Konzentrationen zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Larven und alten Individuen. Auf die Nauplien wirkt eine 10 % Lösung fast unmittelbar fixierend, während ausgewachsene Weibchen darin noch 40 Minuten leben können. Außergewöhnlich widerstandsfähig sind die Eier. Die Hüllen lassen die schädlichen Kupferjonen nicht eindringen. Eipakete, die 24 Stunden in gesättigter, oder 10 % Lösung gelegen hatten, entwickelten sich in reinem Seewasser ungestört weiter. Es wurde keine schädigende Wirkung auf die Entwicklung der Nauplien festgestellt.

C. ZUSAMMENFASSUNG.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Empfindlichkeit gegen CuSO_4 der meisten niedern Wassertiere bedeutend größer ist, als allgemein angenommen wurde. Wenn also die biologische Selbstreinigung eines Gewässers gewünscht wird, darf es nicht durch Vitriol verunreinigt werden.

Das Gift wirkt unabhängig von ökologischen Faktoren. Beim Litoral, bei rheophilen und planktonischen Tieren gibt es empfindlichere und weniger empfindliche Arten. Die jungen Individuen sterben bei geringerer Dosis als die alten der gleichen Spezies. Unterschiede in der Empfindlichkeit und in der Schnelligkeit der Wirkung besonders der starken Lösungen, beruhen einzig auf Unterschieden in der Körperbedeckung. Je schneller das Gift das lebendige Plasma durch Osmose erreichen kann, um so schneller tritt der Tod ein. Histologische Untersuchungen konnten noch nicht unternommen werden.

VERSUCHE MIT PLANKTON EINES NETZFANGES.

Ein Vertikalnetzzug ergab am 18. und 25. Februar 1932 eine Hauptvegetation von *Fragilaria crotonensis*. Daneben waren nicht selten *Tabellaria fenestrata*, *Asterionella gracillima*, *Mallomonas helvetica*, *Cymatopleura ovata* und *Solea*. Daneben wurden noch berücksichtigt: *Dinobryon divergens*, *Glenodinium neglectum*, *Nephrocytium Aghardianum*, *Gloeococcus Schroeteri* *Cyclotella*, *Cryptomonas* und *Vorticella* auf *Anabaena flos aquae*, sowie das Rotator *Notholca*.

1. Versuch. 25. Februar. 100 ccm Plankton enthaltendes Seewasser mit Kupfersulfat 0,2 mg. Am 3. März waren fast völlig entfärbt und tot: *Tabellaria*, *Fragilaria*, *Cyclotella*, *Asterionella*, *Gloeococcus*, *Botryococcus*, *Nephrocytium*. *Glenodinium* war tot.

In der nämlichen Planktonprobe ohne Kupfersulfat waren am 3. März die vorerwähnten Plankter mit frischen Chromatophoren und gut lebend.

2. Versuch. Planktonprobe und Kupfersulfat im nämlichen Verhältnis 0,2 mg : 100 ccm. In 25 Minuten zeigte *Vorticella* auf *Anabaena* keine Wimperbewegungen mehr. *Fragilaria* ist beschädigt.

3. Versuch. Anordnung wie oben. In 17 Minuten sind alle *Mallomonaszellen* tot. In 25 Minuten stirbt *Vorticella*.

4. Versuch. Planktonprobe mit Kupfersulfat im Verhältnis 1 mg : 150 ccm. Innerhalb 15 Minuten zeigen *Fragilaria*, *Talaria*, *Asterionella*, *Cyclotella* zerstückelte Chromatophoren. Tot sind *Cymatopleura*, *Mallomonas*, *Glenodinium*, *Vorticella*, *Cosmarium*, in 40 Minuten *Notholca*.

5. Versuch. Eine Versuchsordnung wie oben Nr. 1 erhielt nach einer Woche filtriertes Seewasser zugesetzt, um zu sehen, ob noch einige Plankter wieder aufleben. Nach 2 Monaten ist noch alles tot. In einer Kontrollprobe ohne Kupfersulfat waren nach 2 Wochen noch die meisten Plankter am Leben. Nach 2 Monaten waren die hauptsächlichlichen Plankter tot aber an ihrer Stelle hatten sich Protococcoideen und *Stigeoclonium* entwickelt.

6. Versuch. 100 ccm Planktonprobe wurden mit Kupfersulfat im Verhältnis 0,02 mg : 100 ccm beschickt. Nach 56

Tagen waren die Plankter freilich abgestorben, wie dies auch bei den Proben ohne Kupfersulfat der Fall ist. Dagegen hatten sich andere Algen sehr reichlich entwickelt. Die frisch grüne Farbe erhält die Probe durch *Protococcoideen*, *Chlamydomonas*, *Scendesmus*, *Ankistrodesmus*, *Oocystis*.

H. Bachmann.

Inhaltsverzeichnis.

Vorwort	63
I. Aktives Chlor und seine Einwirkung auf niedere Wasserorganismen	64
Einleitung	64
1. Allgemein Methodisches	65
2. Das Verhalten des Chlors im Wasser und seine Wirkungsweise	66
3. Tierversuche	69
A. Einwirkung von freiem Chlor auf Planktonkrustazeen des Vierwaldstättersees	69
Vergleiche zwischen den Planktonkrustazeen und ihrem Verhalten zu aktivem Chlor	74
B. Rotatorien	76
C. Tiere aus ephemeren Tümpeln und aus Kulturen	80
D. Vertreter der Bachfauna	86
Diskussion der Ergebnisse der Tierversuche unter Berücksichtigung des einschlägigen Schrifttums	89
4. Versuche mit Algen	92
A. Phytoplankton	92
B. Spirogyra	93
C. Steinbelag	96
5. Chlorwasser und Dauerstadien	100
6. Zusammenfassung einzelner Beobachtungen	102
Literaturangaben	103
II. Vergiftungsversuche mit Kupfersulfat	105
A. Material-Methode	105
B. Ergebnis der Versuche	106
I. Litoral	106
II. Bachfauna	114
III. Planktontiere	119
C. Zusammenfassung	124
Versuche mit Plankton eines Netzfanges	125
