

7 Zusammenfassung

Vielfältige trophische Interaktionen kennzeichnen das Räuber-Beute-Verhältnis von Copepoden und Ciliaten. Ciliaten liegen sowohl durch ihre räumliche und zeitliche Verfügbarkeit als auch durch ihre Größe im Beutespektrum vieler Copepoden. Vulnerabilität und nahrungsbedingte biochemische Zusammensetzung der Ciliaten sollten Einfluss auf die Qualität als Beuteorganismen für die Copepoden haben.

Zur Beantwortung der Frage, ob Ciliaten eine adäquate Nahrung für Copepoden darstellen (Hypothese I), wurden Experimente zur Copepodidentwicklung und zur Reproduktion sowohl mit calanoiden als auch mit cyclopoiden Copepoden durchgeführt. In verschiedenen Räuber-Beute-Kombinationen wurden mehrere Ciliatenspezies, die sich in ihrem trophischen Modus (Algivorie *versus* Bakterivorie), ihrer Größe, aber auch durch ihre Oberflächenstruktur unterscheiden, als Beuteorganismen für Copepoden im Vergleich zu *Cryptomonas*, die aus der Literatur als Beuteorganismus mit guter Nahrungsqualität bekannt ist, bzw. im Vergleich zu Hungeransätze ohne Nahrungszugabe getestet. Die Ergebnisse zeigten große räuber- und auch beutespezifische Unterschiede in der Umsetzbarkeit in Entwicklungs- und Reproduktionsraten der Copepoden.

Der kleine prostomatide algivore Ciliat *Urotricha farcta* zeigte sich als adäquate Nahrungsressource für die signifikant schnellste Copepodidentwicklung der calanoiden *Eudiaptomus gracilis*, *E. graciloides*, aber auch für die cyclopoiden *Cyclops vicinus*, *C. abyssorum* sowie für *Mesocyclops leuckarti*. *Thermocyclops oithonoides* konnte dagegen keine Copepodidentwicklung bei Fütterung mit diesem Ciliaten realisieren, sondern zeigte eine hohe Mortalität der jungen Copepodidstadien in den Versuchsansätzen. Aber auch *M. leuckarti* zeigte in den *Urotricha*-Ansätzen trotz schneller Copepodidentwicklungsgeschwindigkeit eine signifikant höhere Mortalität als in den *Cryptomonas*-Ansätzen. Es gab keine signifikanten Unterschiede der Mortalitätsraten zwischen den *Urotricha*-, *Cyclidium*- und Hungeransätzen.

Bei der Reproduktion sorgte *Urotricha* für die signifikant höchsten Eibildungsraten von *E. gracilis* und *M. leuckarti* im Vergleich zu den getesteten bakterivoren Ciliaten und zu *Cryptomonas*. Die Mortalitätsraten der Copepoden in diesen Experimenten waren gegenüber den anderen Beuteansätzen nicht erhöht. Für *E. gracilis*, *E. graciloides*, *M. leuckarti*, aber auch für *C. vicinus* wurde Hypothese II, nach der algivore Ciliaten eine bessere Nahrungsqualität darstellen als bakterivore Ciliaten, bestätigt.

Der etwas größere, ebenfalls zu den Prostomatida zählende algivore *Coleps* sp. weist eine Panzerung in Form von Kalkplättchen mit vielfachen Dornenfortsätzen auf und wurde in seiner Eignung als Nahrung für die Reproduktion von *E. graciloides* getestet. *Coleps* konnte mit hohen Raten ingestiert werden, ergab aber nur halb so große Reproduktionsraten wie *Cryptomonas*. Diese Unterschiede waren signifikant.

Der bakterivore Ciliat *Tetrahymena pyriformis* weist im Vergleich zu *Coleps* keinen schützenden zellulären Panzer auf, wurde aber signifikant schlechter von *E. graciloides* ingestiert und konnte keinerlei Reproduktionsleistung von *E. graciloides* unterstützen. Die Überlebenszeit von *E. graciloides* in den *Tetrahymena*-Ansätzen war gegenüber den *Coleps*- und *Cryptomonas*-Ansätzen signifikant herabgesetzt.

Der ähnlich große, ebenfalls bakterivore Ciliat *Colpidium campylum* wurde von allen getesteten Copepoden in hohen Raten dezimiert und konnte bei hohen angebotenen Beutekonzentrationen sowohl die Copepodidentwicklung der beiden calanoiden *E. gracilis* und *E. graciloides* wie auch der cyclopoiden *C. vicinus* und *C. abyssorum* unterstützen. *Colpidium* konnte nachweislich von den beiden *Eudiaptomus*-Arten und von *C. vicinus* für die Eibildung umgesetzt werden. In keinem der getesteten Versuchsansätze mit *Colpidium* wurde eine erhöhte Mortalität der Copepoden festgestellt.

Bei Fütterung mit dem deutlich kleineren bakterivoren Ciliaten *Cyclidium* sp. konnte sowohl *M. leuckarti* als auch *T. oithonoides* die Copepodidentwicklung bis zum Erreichen der Geschlechtsreife realisieren, wobei die Entwicklungsgeschwindigkeiten von *M. leuckarti* in den Ansätzen mit *Urotricha* und die von *T. oithonoides* in den Ansätzen mit *Cryptomonas* signifikant schneller waren. Die Eibildungsrate von *M. leuckarti* bei Fütterung mit *Cyclidium* war signifikant niedriger als bei Fütterung mit *Urotricha* und signifikant höher als bei Fütterung mit *Cryptomonas*. *Cyclidium* war für keine der untersuchten Copepodenarten die bestgeeignete Nahrung, konnte aber als Beute in der Copepodidentwicklung und in Reproduktionsleistung umgesetzt werden.

Der in allen Versuchsansätzen zur Copepodidentwicklung und zur Reproduktion getestete Phytoflagellat *Cryptomonas* konnte von allen Copepoden sowohl für die Erreichung der Geschlechtsreife als auch in Reproduktionsleistung umgesetzt werden. *T. oithonoides* zeigte sich als rein algivorer Copepode und erreichte die signifikant höchsten Entwicklungsgeschwindigkeiten in den *Cryptomonas*-Ansätzen. Aber auch *M. leuckarti* konnte bei Fütterung mit *Cryptomonas* eine vollständige Copepodidentwicklung bis zur Geschlechtsreife zumindest der Männchen realisieren.

Für *E. graciloides* wurden bei Fütterung mit dem Phytoflagellaten die signifikant höchsten Eibildungsraten im Vergleich zu *Coleps*, *Tetrahymena* und den Hungeransätzen festgestellt.

Zusammenfassend ist zu den *in situ*-Fraßexperimenten im DCM zu sagen, dass die Ciliaten von allen getesteten Mesozooplanktern außer von *T. oithonoides* dezimiert wurden. Sie wurden darüber hinaus sogar von allen Fraßfeinden positiv selektiert. Die einzige Ausnahme bildete *T. oithonoides*, der keine Ciliaten ingestierte, sondern sich wie schon in den Laborexperimenten als überwiegend algivor bestätigte. Die ermittelten Selektionsindizes nach Jacobs (1974) aus den Freilandexperimenten ergaben aber in keinem Falle eine Selektion der algivoren Ciliaten gegenüber den bakterivoren Ciliaten. Die positiven Selektionsindizes waren vielmehr positiv mit der Zellgröße der Ciliaten korreliert.

Fast alle getesteten Mesozooplankter mit Ausnahme der Rotatorien konnten widersprüchlich zur Hypothese III die langen Cyanobakterienfilamente dezimieren. Der höchste negative Einfluss sowohl auf die Ciliaten als auch auf die Cyanobakterienfilamente wurde von den adulten Weibchen von *E. graciloides* ausgeübt. Eine hohe Dichte der Cyanobakterienfilamente verbunden mit einem Vorkommen sehr langer Filamente beeinträchtigte einen negativen Effekt durch cyclopoide Copepodide, aber weniger von *E. graciloides*.

Aus den Fraßexperimenten im Labor mit *E. graciloides* bei unterschiedlichen O₂-Konzentrationen ergab sich keine Beeinträchtigung der Ingestion von Ciliaten bis zu einer unteren Grenze der O₂-Sättigung von 5 %. Bei Werten von 2%iger Sauerstoffsättigung starben alle Copepoden innerhalb einer Stunde. *E. graciloides* könnte zu Beginn der DCM-Etablierung noch in der Lage sein, das DCM als Nahrungsressource zu nutzen, wenn die Sauerstoffsättigung mehr als 2 % beträgt. Später im Jahr ist dagegen nur noch eine sehr eingeschränkte Nutzung vom oberen sauerstoffreicheren Bereich aus möglich, mit kurzen Aufenthalten im mikroaeroben Bereich des DCM. Die mikrobielle Lebensgemeinschaft im DCM ist somit durch die geringen O₂-Konzentrationen weitgehend vor dem Fraß durch *E. graciloides* geschützt.

Die langkettigen Cyanobakterienfilamente sind bei höheren Konzentrationen weitgehend vor der Ingestion durch cyclopoide Copepodide geschützt. Die sauerstoffmangeltoleranteren cyclopoiden Copepodide und Rotatorien, die sich längerfristig im DCM aufhalten, haben aber einen negativen Effekt auf die Ciliaten und Flagellaten.

Die sehr abundanten großen Schwefelpurpurbakterien *Chromatium* können sowohl von den adulten *E. graciloides*, *T. oithonoides*, als auch von den cyclopoiden Copepodiden ingestiert werden. Die deutlichsten direkten Wirkungen der getesteten Mesozooplankter wurden auf die Ciliaten, den Chl a-Gehalt sowie auf die Cryptomonaden und heterotrophen Flagellaten des DCM gefunden. Die Wirkungen auf das autotrophe Pikoplankton und die Bakterien waren – mit Ausnahme auf die großen Schwefelpurpurbakterien *Chromatium* sp. – eher indirekt.

Ciliaten werden von Copepoden nicht nur mit hohem Fraßdruck belegt und positiv gegenüber Algen selektiert, sondern bieten, wie ich in meiner Arbeit zeigen konnte, für eine Reihe von Copepoden eine gute Nahrungsqualität, die bei artspezifischen Unterschieden besser sein kann als die von Cryptomonaden. Es sind Unterschiede in der Qualität zwischen algivoren und bakterivoren Ciliaten nachweisbar, wobei keine eindeutige Bewertung auf Grund des trophischen Modus der Ciliaten möglich ist, weil weitere Attribute der Ciliaten, wie Fluchtverhalten, evtl. chemische induzierte Abwehrmechanismen oder auch die Fähigkeit zur Synthese essentieller organischer Moleküle (z. B. mehrfach ungesättigter Fettsäuren), die Nahrungsqualität bestimmen und sich gegenseitig verstärken oder überlagern können.

Diese Qualitätsunterschiede können unterschiedlich auf die Fitnessparameter Entwicklungs-, Eibildungs- und Überlebensrate wirken. Wie für *T. oithonoides* gezeigt werden konnte, können Ciliaten für explizit algivore Copepoden keine alternative Nahrung darstellen.

Tiefenchlorophyllmaxima in stabil stratifizierten Seen mit assoziierten hohen Ciliatenkonzentration sind eine attraktive Nahrungsressource für Copepoden, sind aber durch für Copepoden ungünstige Umweltbedingungen vor einer ungebremsten Ausbeutung geschützt.