

3.22 Klimaereignisse und Auswirkungen auf die Tiefsee - Das »biologische Gedächtnis« des östlichen Mittelmeeres

ROLF KOPPELMANN

*Effects of climate events in the deep-sea - the »biological memory« of the eastern Mediterranean Sea: Probably climatic induced changes in hydrography have caused a massive outflow of Aegean-Water into the Levantine Basin. This process is called the »Eastern Mediterranean Transient (EMT)«. A mass occurrence of the copepods *Eucalanus monachus* and *Calanus helgolandicus* in the bathypelagic deep-sea of the Levantine Basin occurred concomitantly with the change in hydrography. This has also caused an intensive supply of food into the deep-sea which was used by the opportunistic deep-sea copepod *Lucicutia longiserrata* and the standing stock of this copepod was enhanced. The enhancement is still visible several years after the EMT; the effect of the EMT is stored in the biological memory of the deep-sea.*

Die Weltmeere bedecken 70,8% der Erdoberfläche. Der Freiwasserraum, das Pelagial, bildet das größte zusammenhängende und durch Strömungen verbundene Ökosystem auf der Erde. Der Bereich bis in 200 m Tiefe wird Epipelagial oder auch euphotische Zone genannt (Abb. 3.22-1). Bis in diese Tiefe ist im klaren Wasser eine positive Nettoprimärproduktion möglich; d.h., die Produktion durch Photosynthese ist höher als der Energieverbrauch durch die Atmung der Pflanzen. Unterhalb von 200 m bis in etwa 1.000 m befindet sich das Mesopelagial oder auch die Dämmerungszone. Bis in diese Tiefe dringt noch Licht ein, es reicht aber nicht mehr für eine positive Nettoprimärproduktion aus. Die Organismen, die in dieser Zone leben, sind auf herabsinkende Nahrungspartikel angewiesen oder sie wandern tagesperiodisch oder in bestimmten Entwicklungsperioden (sog. ontogenetische Wanderungen) ins Epipelagial. Unterhalb von 1.000 m Tiefe beginnt das Bathypelagial, die eigentliche Tiefsee. Das ist der Lebensraum, der in ständiger Dunkelheit liegt und der in dieser Arbeit schwerpunktmäßig behandelt wird.

Bis vor einigen Jahren sind die meisten Wissenschaftler davon ausgegangen, dass dieser Tiefsee-Lebensraum keine saisonalen Veränderungen zeigt. Es gibt keine Tageslichtschwankungen und keine jahreszeitlichen Temperaturveränderungen. Außer im Bereich von Hydrothermalquellen sind die Organismen in diesen Tiefen, wie im Mesopelagial, im Wesentlichen auf den herabsinkenden Partikelregen von der Oberfläche als Nahrung angewiesen. Allerdings kann es durch Phytoplanktonblüten saisonal zu qualitativen und quantitativen Veränderungen in den Partikelfläüssen kommen, die dann auch saisonale Reproduktionszyklen im Bathypelagial initiieren können. Solche Prozesse wurden für die Bodenlebewesen, das Benthos, schon am Ende des vorletzten Jahrhunderts angenommen (MOSELEY 1880), aber erst in den 1980er Jahren nachgewiesen (BILLETT et al. 1983, LAMPITT 1985). So konnte für die bathypelagische Zooplanktongemeinschaft im temperierten NO-Atlantik in den 1990er Jahren eine direkte Kopplung zwischen der Primärproduktion an der Oberfläche und dem tieflebenden Zooplankton aufgezeigt werden (KOPPELMANN 1994).

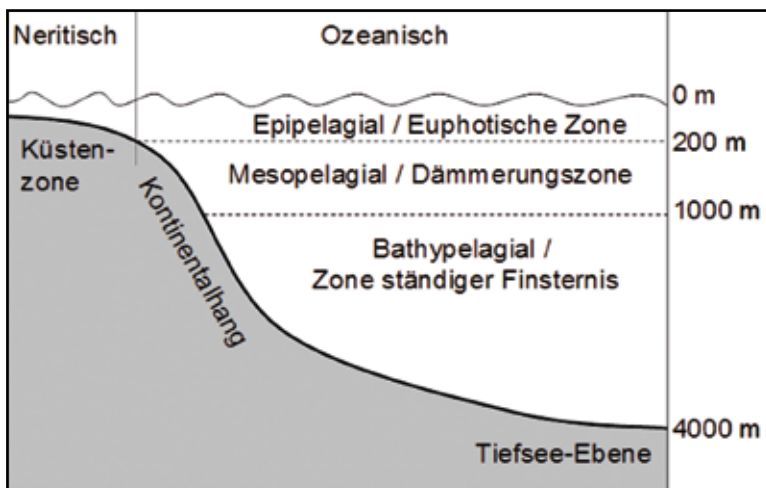


Abb. 3.22-1: Zonierungen im Ozean. Die Grenzen variieren mit Sonneneinstrahlung und Wassertiefe.

Besonderheiten des östlichen Mittelmeeres

Die Tiefsee im östlichen Mittelmeer (Abb. 3.22-2) bildet einen ganz besonderen Lebensraum. Das Europäische Mittelmeer ist ein halbgeschlossenes Meeresgebiet, das nur durch die Straße von Gibraltar mit dem offenen Ozean verbunden ist. Es liegt überwiegend in einer ariden Klimazone, in der die Verdunstungsraten höher sind als die Süßwassereinträge. Aufgrund der vorherrschenden hydrographischen Verhältnisse ist das Tiefenwasser bis in über 4.000 m Tiefe im östlichen Teil mit ca. 14 °C deutlich wärmer als die ozeanische Tiefsee, die Temperaturen von unter 4 °C aufweist. Auch der Salzgehalt ist durch die hohen Verdunstungsraten in diesem ariden Meer mit 38,7 PSU deutlich höher als im offenen Ozean (35 PSU). Die Nährstoffversorgung ist sehr gering und es handelt sich um eine der oligotrophsten Meeresregionen weltweit mit einer Abnahme der Produktion von der Straße von Gibraltar bis zur Küste von Kleinasien (TURLEY 1999). Die Artenvielfalt und Abundanz der Planktonfauna ist deutlich niedriger als im offenen Ozean (SCOTTO DI CARLO et al. 1991). Bedingt durch die geologische Entstehungsgeschichte ist die Tiefseefauna im gesamten Mittelmeer und besonders im östlichen Teil extrem verarmt.

Vor ca. 6–5 Mio. Jahren war das Mittelmeer während der messinischen Salinitätskrise vollständig ausgetrocknet. Es hat sich dann wieder gefüllt. Dieses Ereignis ist als messinische Megaflut bekannt. Während der letzten Eiszeit vor etwa 115.000–11.700 Jahren lag der Meeresspiegel bis zu 120 m tiefer und der Austausch

mit dem Atlantik war stark reduziert. Diese Ereignisse haben zu einem Absterben der Tiefseefauna im Mittelmeer geführt. Eine Wiederbesiedelung vom Atlantik wird durch die Straßen von Gibraltar und bei Sizilien stark behindert. Erschwerend kommen noch die für die Tiefsee hohen Temperaturen und Salzgehalte hinzu. Daher gibt es im Plankton des östlichen Mittelmeeres kaum echte Tiefseearten. Bei den dort lebenden Arten handelt es sich hauptsächlich um eingewanderte Arten aus dem Epi- und Mesopelagial (SCOTTO DI CARLO et al. 1984).

Veränderungen im physikalischen Antrieb

In der obersten Schicht der Wassersäule findet ein Einstrom atlantischen Wassers statt, der die Verdunstung ausgleicht. Der Wasserkörper bewegt sich zyklonal durch das Becken und versorgt auch die Nebenbecken Ägäis und Adria (Abb. 3.22-2). Das Tiefenwasser im östlichen Mittelmeer wird im Wesentlichen durch Wasser aus der südlichen Adria gespeist mit Umwälzzeiten von ca. 125 Jahren unterhalb von 1.200 m Tiefe (ROETHER & SCHLITZER 1991). Ende der 1980er, Anfang der 1990er Jahre traten zeitgleich so genannte »Regime Shifts« auf der Nordhalbkugel auf (siehe KOPPELMANN et al. 2009, CONVERSI et al. 2010). Regime Shifts sind schnelle Wechsel in der Struktur von Ökosystemen von einem stabilen Zustand in einen anderen ebenso stabilen Zustand, der viele Jahre oder Dekaden andauern kann. In der Region um das östliche Mittelmeer traten zwischen 1988 und 1993 drastische hydroklimatische Veränderungen auf. In der Ägäis hatte sich salzreiches

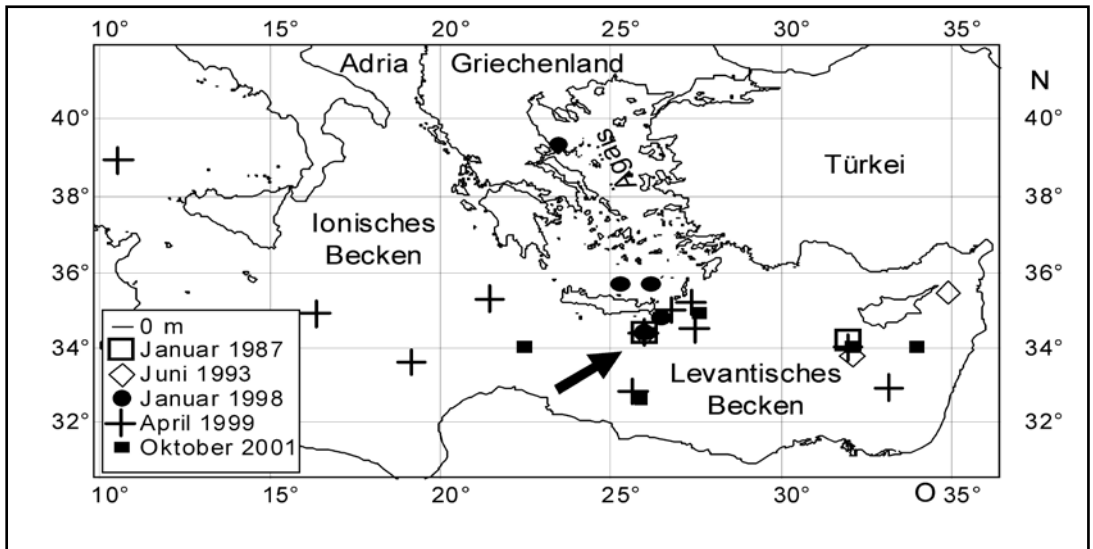


Abb. 3.22-2: Beprobungsstationen im östlichen Mittelmeer. Der Pfeil zeigt das 4250 m tiefe Hauptuntersuchungsgebiet südlich von Kreta.

und kaltes Wasser gebildet. Dieses schwere Wasser ist nach unten gesunken, hatte dann das Becken nördlich von Kreta gefüllt und ist anschließend rechts und links an Kreta vorbei in das Levantische Becken ausgeströmt (Abb. 3.22-3). Dabei verdrängte es das Levantinische Tiefenwasser, welches normalerweise aus der Adria einströmt. Durch diesen massiven Einstrom mit einer durchschnittlichen Rate von einem Sverdrup (1 Mio. m³ pro Sekunde) wurden zwischen 1988 und 1995 etwa $\frac{3}{4}$ des Levantischen Tiefenwassers ersetzt. Insgesamt sind etwa $2,3 \times 10^{14}$ m³ Wasser ausgeflossen (ROETHER et al. 2007). Dieses Ereignis ist als »Eastern Mediterranean Transient (EMT)« in die Literatur eingegangen (ROETHER et al. 1996). Als mögliche Ursachen werden geringere Süßwasserzuflüsse diskutiert, die zu einer Zunahme des Salzgehalts geführt haben (BOSCOLA & BRYDEN 2001), genauso wie der Einfluss extremer Wetterereignisse wie geringe Niederschläge im Sommer und sehr kalte Winter (vor allem 1991/92 und 1992/93 mit mittleren Temperaturen, die um 2 °C unter dem langjährigen Mittel lagen (THEOCHARIS et al. 1999). Aber auch eine Veränderung in der nordatlantischen Oszillation (NAO), die Klimaschaukel zwischen Azoren-Hoch und Island-Tief, darf genauso wie ein genereller Wechsel im Windfeld (JACOBET & DÜNKELOH 2005) nicht außer Acht gelassen werden.

Anders als die hydrographischen Änderungen im östlichen Mittelmeer, die 1964 durch die Inbetriebnahme des Assuan-Staudamms hervorgerufen wurden, war beim EMT das Tiefenwasser des gesamten Levantischen Beckens und z.T. auch die Ionische See betroffen. Durch den Assuan-Staudamm wurde der Süßwas-

sereinstrom des Nils in das östliche Mittelmeer stark reduziert, wodurch die hydrographischen Bedingungen und die Sedimentationsraten auf dem afrikanischen Schelf beeinflusst wurden. Auswirkungen außerhalb des Schelfs, in der ozeanischen Region, konnten jedoch kaum beobachtet werden (SHARAF EL DIN 1977).

Auswirkungen auf die biologische Gemeinschaft

Während mehrerer Expeditionen mit dem Forschungsschiff »Meteor« wurde das Zooplankton an diversen Lokationen (Abb. 3.22-2) im östlichen Mittelmeer mit Hilfe eines MOCNESS (Multiple Opening/Closing Net and Environmental Sensings System; WIEBE et al. 1985; Abb. 3.22-4) beprobt, und zwar vor (1987), während (1993) und nach (1988, 1999, 2001) dem EMT. Das Gerät ist mit mehreren Netzen mit einer Öffnung von 1 m² ausgestattet und erlaubt die Beprobung in fein stratifizierten Fangintervallen. Es wurde bis in über 4.000 m Tiefe eingesetzt (siehe auch KOPPELMANN & WEIKERT 2007). Mit der verwendeten Maschenweite von 333 µm wird das Mesozooplankton bis zur Größe von etwa 2 cm quantitativ erfasst. Das Zooplankton im östlichen Mittelmeer weist eine charakteristische vertikale Zonierung auf, wie am Beispiel des Hauptbeprobungsgebietes südlich von Kreta gezeigt werden konnte (Abb. 3.22-5). 1987 dominierte *Haloptilus longicornis* (Copepoda Calanoida: Augaptilidae) das epipelagische Zooplankton. Im Mesopelagial folgte *Eucalanus monachus* (Copepoda Calanoida: Eucalanidae) und im Bathypelagial dominierte *Lucicutia longiserrata* (Copepoda

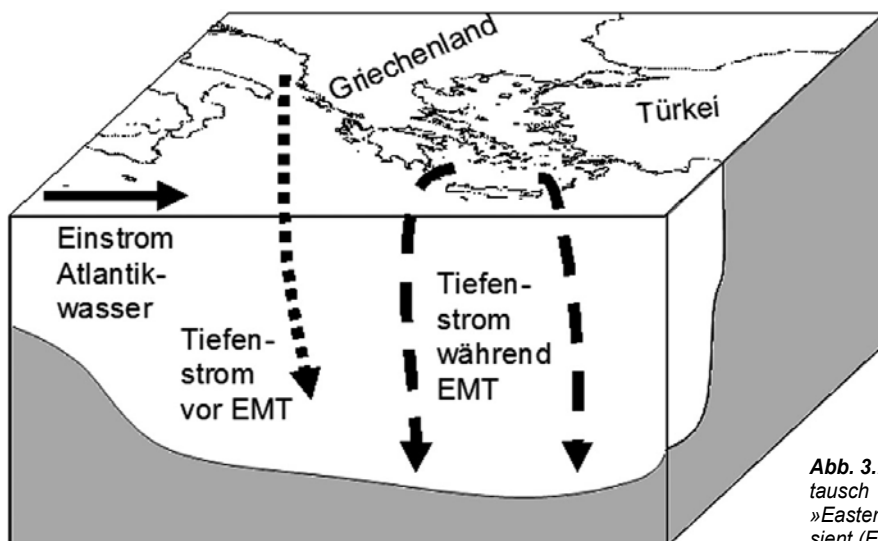


Abb. 3.22-3: Tiefenwasseraustausch vor und während des »Eastern Mediterranean Transient (EMT)«.

Calanoida: Lucicutiidae), eine der wenigen »echten« Tiefseearten im östlichen Mittelmeer.

Während des EMT (1993) war die Verteilung deutlich anders (Abb. 3.22-5): *H. longicornis* war immer noch im Epipelagial zu finden, allerdings lag das Verteilungszentrum etwas tiefer und es wurden auch einzelne Vertreter im Bathypelagial gefunden. *E. monachus* hatte seinen Verteilungsschwerpunkt weiterhin im Mesopelagial, trat aber auch in hohen Abundanzen im Bathypelagial auf. *L. longiserrata* wurde nur in geringer Anzahl im Bathypelagial nachgewiesen. In großen Abundanzen trat 1993 auch *Calanus helgolandicus* auf; ein Copepode, der vor diesem Ereignis nur vereinzelt im Gebiet nachgewiesen wurde.

Es existieren drei Theorien zur Erklärung dieses untypischen Verteilungsmusters.

- Die beiden Arten, die das Zooplankton während des EMT dominierten, kamen schon immer in dem Gebiet vor. Durch die Unterschichtung mit schweren Ägäiswasser und einer folgenden Anhebung der darüberliegenden Wassermassen wurde die Nutrikline (eine Grenzschicht zwischen nährstoffarmen und nährstoffreichen Wasser, die gewöhnlich unterhalb der euphotischen Zone liegt) in die euphotische Zone gehoben. Dieses hat lokal intensive Primärproduktionszellen hervorgerufen und *E. monachus* und *C. helgolandicus* konnten als erfolgreiche Filtrierer die Nahrung nutzen und sich vermehren. Bei diesen Arten handelt es sich um ontogenetische Vertikalwanderer, d.h. sie überwintern als fast-adulte Tiere in ca. 1.000 m Tiefe bei gewöhnlich geringen Temperaturen um etwa 4 °C. Für diese Hypothese spricht, dass es sich bei den gefundenen Tieren im Wesentlichen um Jugendstadi-

en (CV-Copepodite) handelte, die viele Speicherlipide eingelagert hatten (WEIKERT et al. 2001). Im östlichen Mittelmeer kommen diese niedrigen Tiefenwassertemperaturen nicht vor und die Organismen hatten sich im gesamten Bathypelagial verteilt.

- Einige Tiere sind mit dem Wasser aus der Ägäis in das östliche Mittelmeer verdriftet worden, haben dort durch die stattfindende EMT günstige Bedingungen vorgefunden, sich vermehrt und sich zur Überwinterung in größere Tiefen zurückgezogen.
- Die gesamte im Tiefenwasser gefundene Population wurde mit dem Ausstrom aus der Ägäis in die Levantische See eingetragen und hat sich passiv im Bathypelagial verteilt.

Wie auch immer diese Tiere in das östliche Mittelmeer gelangt sind, es ist festzustellen, dass mit dem EMT große Mengen an ontogenetisch vertikal wandernden Organismen in die bathypelagische Tiefsee des östlichen Mittelmeeres eingetragen wurden. Diese Tiere benötigen ihre Speicherlipide als Energiereserve, um die Überwinterungszeit zu überdauern. Aufgrund der hohen Tiefenwassertemperaturen ist aber zu vermuten, dass die Lipidreserven für eine Überwinterung nicht ausreichten (eine 10 °C höhere Temperatur führt in der Regel zu einer Verdopplung der Stoffwechselaktivität), was zu einer Verendung der meisten Organismen führte. Diese Kadaver wurden bakteriell abgebaut und konnten von anderen Tieren gefressen werden. Somit hat ein erheblicher Nahrungseintrag in die Levantische Tiefsee stattgefunden, der von der dort lebenden Fauna direkt oder indirekt über die mikrobielle Schleife genutzt werden konnte.



Abb. 3.22-4: Das 1 m² MOCNESS (Multiple Opening and Closing Net and Environmental Sensing Unit) kommt zurück an Deck.

Einige Jahre nach dem EMT (1998, 1999 und 2001) zeigte sich dann wieder die »typische« Verteilung im östlichen Mittelmeer (Abb. 3.22- 5). *H. longicornis* und *E. monachus* waren wieder im Epi- und Mesopelagial zu finden. *C. helgolandicus* trat nur noch vereinzelt auf,

aber *L. longiserrata* wurde jetzt in größeren Mengen als vor dem EMT im gesamten Bathypelagial gefunden. Die Bestände hatten sich gegenüber der Zeit vor dem EMT (1987) etwa vervielfacht. Es ist zu vermuten, dass diese opportunistische Tiefseeart den Nahrungs-

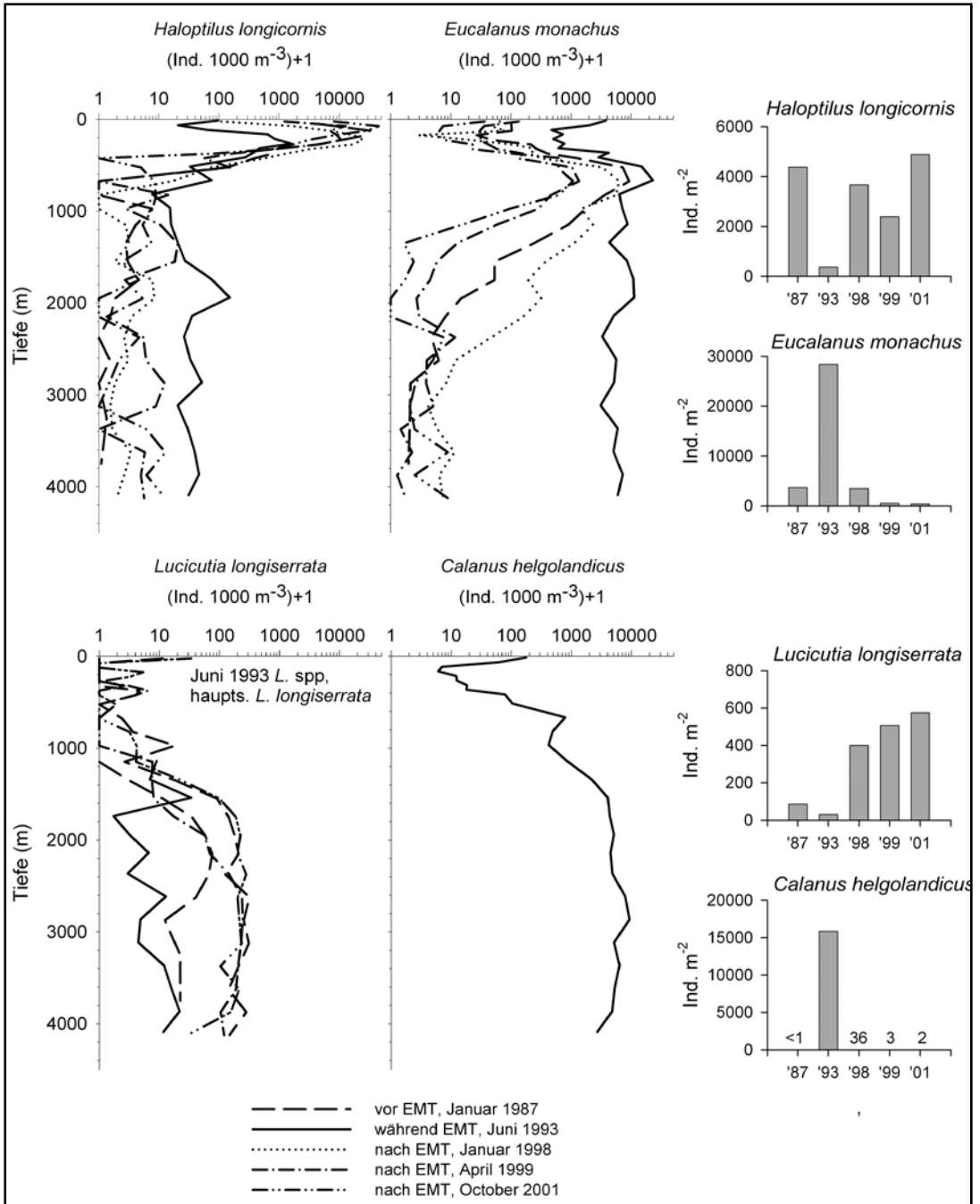


Abb. 3.22-5: Vertikalverteilungen und Bestände der vier dominanten Zooplanktontaxa (*Haloptilus longicornis*, *Eucalanus monachus*, *Lucicutia longiserrata*, *Calanus helgolandicus*) (Links: N/1000 m³; Rechts: N/m²) vor während und nach dem »Eastern Mediterranean Transient (EMT)«. Verändert nach KOPPELMANN & FROST (2008).

eintrag während der EMT zur Reproduktion genutzt hatte. Interessanterweise waren die Bestände auch 5–6 Jahre nach dem EMT sehr hoch. Das kann zum einen daran liegen, dass die Tiefseeorganismen langlebiger sind als vergleichbare Arten im Epipelagial, zum anderen kann es sein, dass der Anteil an suspendierter Nahrung durch die Zersetzung der eingetragenen Organismen (*E. monachus* und *C. helgolandicus*) immer noch erhöht ist. KOPPELMANN et al. (2009) konnten mit Hilfe der Messung stabiler Isotope zeigen, dass *L. longiserrata* suspendierte Partikel konsumiert.

Schlussbetrachtungen

Ob es sich um klimatische Änderungen oder nur um lang andauernde Wetterphänomene handelt, die zur Veränderung der Strömungsverhältnisse geführt haben, ist nicht klar. Es zeigt sich aber, dass halbgeschlossene Meeresgebiete mit »relativ einfach« strukturierter Tiefseefauna, wie das östliche Mittelmeer, besonders gut geeignet sind, um mögliche klimatisch induzierte Änderungen und ihre Auswirkungen auf die Biologie zu dokumentieren. Die besonderen hydrographischen Bedingungen erlauben nur wenigen toleranten oder angepassten Arten dort zu leben. Diese Organismen reagieren schnell und nachhaltig auf Veränderungen in ihrer Umwelt. Da Prozesse in diesen Tiefen langsam ablaufen, konnte der zusätzliche Nahrungseintrag über viele Jahre genutzt werden. Das Ereignis war quasi im biologischen »Tiefsee-Gedächtnis« gespeichert und ließ sich auch noch viele Jahre nach dem »Eastern Mediterranean Transient« nachweisen.

Literatur

BILLETT D.S.M., LAMPITT R.S., RICE A.L. & MANTOURA R.F.C. (1983): Seasonal sedimentation of phytoplankton to the deep-sea benthos. *Nature* 302, 520-522.

BOSCOLO R. & BRYDEN H. (2001): Causes of long-term changes in the Aegean Sea deep water. *Oceanologica Acta* 24, 519-527.

CONVERSI A., UMANI S.F., PELUSO T., MOLINERO J.C., SANTOJANNI A. & EDWARDS, M. (2010): The Mediterranean Sea regime shift at the end of the 1980s, and intriguing parallels with other European Basins. *PLoS ONE* 5, 1-15.

JACOBET J. & DÜNKELOH A. (2005): The Eastern Mediterranean Transient in relation to atmospheric circulation dynamics. *Hydrogeologie und Umwelt* 33, 1-8.

KOPPELMANN R. (1994): Saisonale Veränderungen in bathypelagischen Zooplanktonbeständen des Nordostatlantiks. Diss. Fachber. Biol. Univ. Hamburg. 130 pp.

KOPPELMANN R. & FROST J. (2008): The ecological role of zooplankton in the twilight and dark zones of the ocean. In: Mertens L.P. (Ed.), *Biological Oceanography Research Trends*. Nova Science Publishers, Inc., New York. 67-130.

KOPPELMANN R. & WEIKERT H. (2007): Spatial and

temporal distribution patterns of deep-sea mesozooplankton in the eastern Mediterranean - indications of a climatically induced shift? *Marine Ecology* 28, 259-275.

KOPPELMANN R., BÖTTGER-SCHNACK R., MÖBIUS J. & WEIKERT H. (2009): Trophic relationships of zooplankton in the eastern Mediterranean based on stable isotope measurements. *Journal of Plankton Research* 31, 669-686.

LAMPITT R.S. (1985): Evidence for the seasonal deposition of detritus to the deep-sea floor and its subsequent resuspension. *Deep-Sea Research I* 32, 885-897.

MOSELEY H.N. (1880): Deep-sea dredging and life in the deep sea. *Nature* 21, 543-547//569-572//591-593.

ROETHER, W. & SCHLITZER, R. (1991): Eastern Mediterranean deep water renewal on the basis of chlorofluoromethane and tritium data. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 15, 333-354.

ROETHER W., KLEIN B., BEITZEL V., MANCA B.B., KOVACEVIC V., BREGANT D., LUCHETTA A. & GEORGOPOULOS D. (1996): Recent changes in Eastern Mediterranean deep waters. *Science* 271, 333-335.

ROETHER W., KLEIN B., MANCA B.B., THEOCHARIS A. & KIROGLOU S. (2007): Transient Eastern Mediterranean deep waters in response to the massive dense-water output of the Aegean Sea in the 1990s. *Progress in Oceanography* 74, 540-571.

SCOTTO DI CARLO B., IANORA A., FRESI E., HURE J. (1984): Vertical zonation patterns for Mediterranean copepods from the surface to 3000 m at a fixed station in the Tyrrhenian Sea. *Journal of Plankton Research* 6, 1031-1056.

SCOTTO DI CARLO, B., IANORA, A., MAZZOCHI, M.G. & SCARDI M. (1991): Atlantis II Cruise: uniformity of deep copepod assemblages in the Mediterranean Sea. *Journal of Plankton Research* 13, 263-277.

SHARAF EL DIN S.H. (1977): Effect of the Aswan High Dam on the Nile flood and on the estuarine and coastal circulation pattern along the mediterranean egyptian coast. *Limnology and Oceanography* 22, 194-207.

THEOCHARIS A., NITTIS, K., KONTOYIANNIS, H., PAPAGEORGIOU, E. & BALPOULOS E. (1999): Climatic changes in the Aegean Sea influence the Eastern Mediterranean thermohaline circulation (1986-1997). *Geophysical Research Letters* 26, 1617-1620.

TURLEY C.M. (1999): The changing Mediterranean Sea - a sensitive ecosystem? *Progress in Oceanography* 44, 387-400.

WEIKERT H., KOPPELMANN R. & WIEGRATZ S. (2001): Evidence of episodic changes in deep-sea zooplankton abundance and composition in the Levantine Sea (Eastern Mediterranean). *Journal of Marine Systems* 30, 221-239.

WIEBE P.H., MORTON, A.W., BRADLEY, A.M., BACKUS, R.H., CRADDOCK, J.E., BARBER, V., COWLES, T.J., FLIERL & G.R. (1985): New developments in the MOCNESS, an apparatus for sampling zooplankton and micronekton. *Marine Biology* 87, 313-323.

Dr. Rolf Koppelman
 Universität Hamburg
 Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaft
 Große Elbstraße 133 - 22767 Hamburg
 koppelman@uni-hamburg.de