

Die Ostsee

Kleines Meer
mit großen Problemen

5., völlig neu
bearbeitete
Auflage

Peter
Hupfer

Borntraeger

Die Ostsee
– kleines Meer
mit großen Problemen

*Für die Förderung der Drucklegung dieses
Buches danken Verlag und Autor:*



Nord Stream
The new gas supply route for Europe

der **Nord Stream** AG, Zug / Schweiz



der Gesellschaft **Fisch und Umwelt**
Mecklenburg-Vorpommern e.V.,
Rostock / Germany



der **Gesellschaft zu Rettung des Störs**,
Rostock / Germany

DIE OSTSEE

– kleines Meer mit großen Problemen

Eine allgemeinverständliche Einführung

5., vollständig neu bearbeitete Auflage

Peter Hupfer

Mit 125 Abbildungen und 42 Tabellen



Gebrüder Borntraeger 2010

Anschrift des Autors: Prof. Dr. Peter Hupfer, Teterower Ring 43, 12619 Berlin

Foto auf dem Umschlag: Die Veröffentlichung erfolgt mit freundlicher Genehmigung von Frau Kathleen Glenz

Informationen zu diesem Buch auf unserer Webseite:

www.borntraeger-cramer.de/9783443010683

www.schweizerbart.de

mail@schweizerbart.de

ISBN ebook (pdf) 978-3-443-01120-8

ISBN 978-3-443-01068-3

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© 2010 E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart

© Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier nach ISO 9706-1994

Verlag: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Johannesstr. 3A, D-70176 Stuttgart

Satz: Medienwerkstatt Frank Erdrich, Stuttgart

Druck: Gulde Druck GmbH, Tübingen

Printed in Germany

Vorwort

Bei der Neubearbeitung des schon in den 1980er Jahren in vier Auflagen bei Teubner in Leipzig erschienenen Buches war zu überlegen, ob auch heute noch – im Vergleich zu der Zeit, in der der menschliche Einfluss auf die Ostsee im Wesentlichen noch ungehemmt vonstatten ging – von „großen Problemen“ der Ostsee gesprochen werden kann. Ostseeforscher werden darin übereinstimmen, dass für dieses europäische Meer auch heute noch schwerwiegende Probleme bestehen. Zum einen bleibt die naturgegebene Problematik der Gefährdung der tiefen Schichten des Meeres durch Stagnation bestehen. Zum anderen gibt es immer noch vielfältige, von der menschlichen Tätigkeit herrührende Einflüsse vor allem aus dem großen Einzugsgebiet auf das kleine Meer. Daher ist es durchaus gerechtfertigt, die Neubearbeitung des Buches unter dem alten Titel auf den Markt zu bringen. Das Wissen über die Ostsee ist in den letzten Jahrzehnten stark gewachsen. In diesem populärwissenschaftlichen Buch kann daher nicht annähernd Vollständigkeit in der Wiedergabe der bestehenden Kenntnisse beabsichtigt sein. Wohl aber kommt es darauf an, die wesentlichen Tatsachen über das Meer und das Wesen der bestehenden Probleme den Lesern deutlich zu machen.

Dieses Buch ist für all die Menschen geschrieben, die sich für die Ostsee interessieren und Näheres über deren Natur wissen wollen. Es ist natürlich auch als Strandkorblektüre geeignet. Im Besonderen wendet sich das Buch an Studenten solcher Studiengänge wie Geographie, Geo- und Umweltwissenschaften, Ozeanographie, Meteorologie, Biologie u. a., die einen gut fundierten Überblick über die Ostsee und ihre Probleme gebrauchen können. Das gilt auch für Lehrer, ältere Schüler und alle, die an Fragen des Umweltschutzes über die engere Heimat hinaus interessiert sind.

Mein erster und besonderer Dank gilt Dr. Michael Hupfer, der mir bei der technischen Gestaltung des Manuskripts sehr geholfen hat. Für die kritische Durchsicht des Gesamtmanuskripts danke ich herzlich Dr. Michael Börngen und Dr. Birger Tinz. Teile des Buches haben dankenswerterweise Dr. Henning Baudler, Ulrich Berth, Dr. Andreas Kleeberg und Dr. Sylvin Müller-Navarra gelesen und Verbesserungen vorgeschlagen. Mein Dank gilt weiterhin meinen Kolleginnen und Kollegen, die die Arbeit durch Überlassung von Daten, Abbildungen und durch Hinweise unterstützt haben, neben den schon Genannten Prof. Dr. Hans-Dietrich Birr, Dr. Mathias Deutsch, Prof. Dr. Lothar Eißmann, Kathleen Glenz, Dr. Barbara Hentzsch, Dr. Jacobus Hofstede, Prof. Dr. Reinhard Lampe, Dr. Wolfgang Matthäus, Ines Perlet, Wolf-Peter Polzin, Dr. Lutz Postel, Gudrun Rosenhagen, Dr. Gerhard Schmager, Dr. Natalija Schmelzer, Dr. Klaus Schwarzer und Dr. Christopher Zimmermann sowie dem Sekretariat des Kuratoriums für Forschungen im Küsteningenieurwesen (KFKI).

Ich habe mich gefreut, dass die Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart (vereinigt mit Gebr. Borntraeger) sich des Titels angenommen hat, und ich möchte die gute Zusammenarbeit würdigen.

Ein besonderer Dank gilt auch den Sponsoren, deren Förderung wesentlich zur angestrebten Verbreitung des Buches beiträgt.

Peter Hupfer, April 2010

Inhalt

1 Vom Eis geformt: der Ostseeraum	11
Ein Meer stellt sich vor	11
Vom Werden des jungen Meeres	16
Vielfalt der Küstenformen	26
Auslotung der Ostsee und ihre Ergebnisse	31
Näheres über den Sedimentteppich	35
2 Salz- und Süßwasser im Wechselspiel	39
Wassergewinn \approx Wasserverlust	39
Schwankungen des Meeresspiegels	45
Der ozeanographische Grundzustand	52
Lebenselixier Salzwassereintrüche	56
3 Ostseeklima und Wassertemperaturen	65
Zwischen maritim und kontinental	65
Von oben geheizt und gekühlt	73
Turbulenz kontra Schichtung	76
Beständige Unruhe	80
Der Eisbericht meldet	82
Produziert die Ostsee Wetter?	86
4 Überall und immer in Bewegung	88
Ruheloses Meer	88
Wo die Ostseewellen	90
Gezeiten und andere lange Wellen	93
Beständig unbeständige Strömungen	96
Vom bewegten Innenleben	100
5 Mit Blickpunkt Küste	102
Zwischen Land und Meer	102
Wellenenergie wird frei	104
Sturmfluten, Seebären und Niedrigwasser	108
Materialströme längs der Küste	116
Küstenschutz und Küstenmanagement	119
Strandklima voller Reize	122
Wassertemperatur und Auftrieb von Tiefenwasser	125
Eiswinter werden seltener	127

6 Stille Wasser sind nicht immer tief	130
Bodden und Haffs	131
Entstehung	132
Beachtliche Dynamik	133
Sommerwarm und winterkalt	137
Salzgehalt ist die Leitgröße	139
Zuviel Nährstoffe: Eutrophierung	142
Nutzung und Naturschutz	144
7 Einflüsse des Menschen auf das Meer	146
Das immer aktuelle Ostseeproblem	146
Ständige Nährstoffzufuhr	148
Eutrophierungsgefahr.....	152
Stagnation und Sauerstoffschwund	154
Schadstoffe erreichen das Meer	160
Was nun?	167
8 Vom Leben in der Ostsee	169
Was hängt an der Meeresnahrungskette?	169
Artenarmut im Brackwasser	171
Bioproduzent Ostsee	174
Vom Phytoplankton bis zum Fisch	176
Fremdlinge aller Art	186
Säugetiere	187
Vögel	187
9 Ein Meer steht Modell	190
Alles kann modelliert werden – nur wie?	190
Dreidimensionale dynamische Modelle sind das Herzstück	191
Einige Anwendungen	194
Ohne Modellierung geht es nicht mehr	201
10 Die Ostsee im Klimawandel	202
Durch Klimawandel entstanden	202
Kurze Aufklärung: Moderne Klimaforschung	203
Entscheidend: Veränderungen der Windverhältnisse	204
Die Lufttemperatur steigt	206
.... und auch die Wassertemperatur	210
Milde Winter – wenig Meereis	214
Der Wasserstand steigt	214
Mehr oder weniger Sturmfluten?	216

Der Wasserhaushalt in Bewegung	218
Wasseraustausch und Salzgehalt	219
Wirkungen auf Umwelt und Ökosysteme	222
Maßnahmen werden ergriffen	223
Palmen an der Ostseeküste?	224
11 Nutzung der Ostsee	225
Seeverkehr	225
Lebende Schätze des Meeres	229
Lagerstätten im Ostseebereich	234
Urlaub am Meer	237
Wind, Wasser, Pipelines und anderes	240
12 Ostseeforschung	244
Frühe Kenntnisse	244
Anfänge der Ostseeforschung	246
Meeresverunreinigungen werden Schwerpunkt	248
Die Helsinki-Kommission	250
Ostseeforschung in Deutschland	251
Küstenforschung	253
Ergänzende deutschsprachige Literatur	256
Sachwortverzeichnis	258

1 Vom Eis geformt: der Ostseeraum

Der Ozean und seine Meere füllen Vertiefungen der Erdoberfläche, deren Struktur äußerst unterschiedlich ist, mit Wasser. Sehr tiefe Becken, steile Kontinentalabhänge, Schelfbereiche mit flacher Böschung und andere Formen wechseln einander ab. Ihre Lage bestimmt die ozeanographischen Eigenschaften mit, insbesondere die Dynamik der Wassermassen. Für die kleine Ostsee gilt das prinzipiell ebenso. Jegliche Meeresforschung beginnt daher mit der Erkundung des Meeresraumes. Das ist der Gegenstand des ersten Kapitels.

Ein Meer stellt sich vor

Ein Blick auf die Karte Europas genügt für die Feststellung, dass sich die Ostsee tief in den Kontinent hinein erstreckt und mit dem mehr als 70% der Erdoberfläche einnehmenden Weltmeer nur im Bereich der dänischen Inseln durch die außerordentlich schmalen Zugänge zur Nordsee in Verbindung steht. Ein Nebenmeer dieses Typs bezeichnen wir als intrakontinentales Mittelmeer im Gegensatz zu den interkontinentalen Mittelmeeren, die Kontinente oder Teilkontinente trennen. Ähnliche Nebenmeere wie die Ostsee sind in verschiedenen Klimazonen der Erde anzutreffen, so das Schwarze Meer, die Hudson Bay, das Rote Meer, der Persische Golf und weitere (Tab. 1.1). Das ebenfalls innerhalb des Kontinents gelegene Kaspische Meer dagegen ist ein reines Binnenmeer ohne Verbindung mit dem Weltmeer.

Länggestreckt und in erster Näherung in nordöstlicher Erstreckung verlaufend, besteht zwischen dem nördlichsten Punkt der Ostsee bei etwa 65°40' nördl.

Tab. 1.1. Hauptdaten für die Ostsee im Vergleich zu anderen Meeren

Meere	Fläche in Tausend km ²	Volumen in Tausend km ³	Mittlere Tiefe in m	Maximale Tiefe in m
Ostsee einschließlich Übergangsgebiet	415,12	21.631	52	459 *)
Mittelmeer	2.500	4.300	1.720	5.267
Schwarzes Meer	424	539	1.271	2.244
Persischer Golf	235	≈ 6	25	1.023
Atlantik ohne Nebenmeere und Nordpolarmeer	82.442	323.613	3.926	9.218
Ostsee/Atlantik in %	0,5	0,007	1,3	5,0

*) nach russischen Quellen 470 m

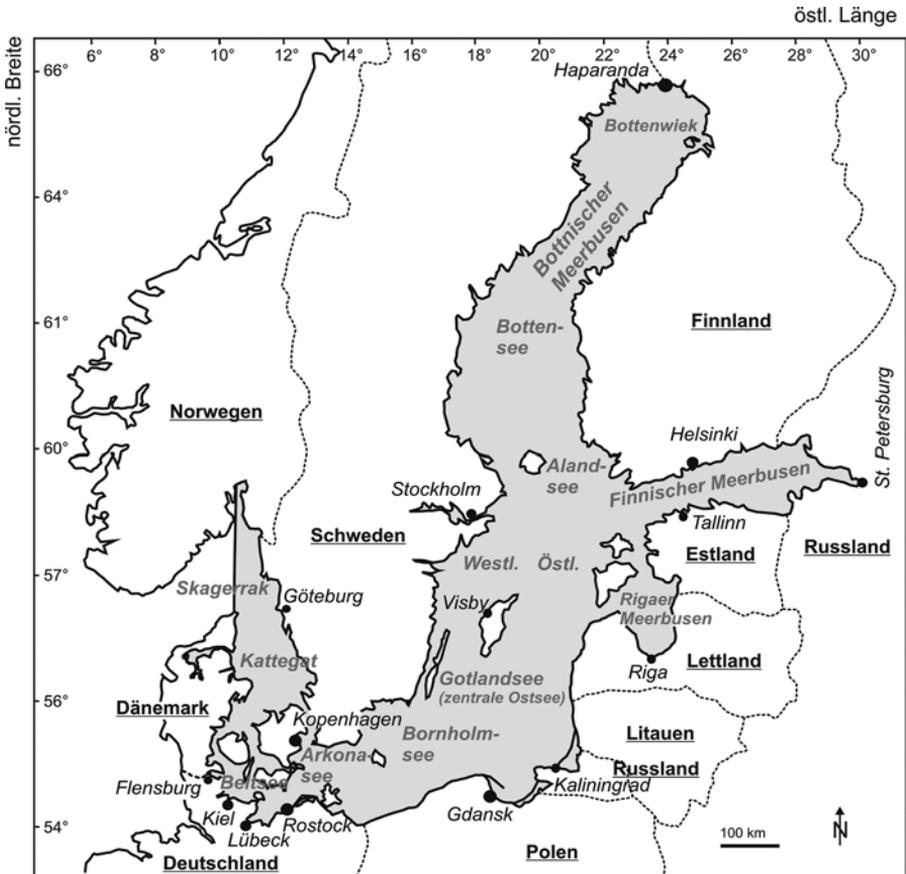


Abb. 1.1: Übersichtskarte mit den Ostsee-Anliegerländern, wichtigen Städten und den hauptsächlich Teilgebieten des Meeres

Breite in der Nähe des Polarkreises und dem südlichsten Punkt bei Wismar (etwa $53^{\circ}45'$ nördl. Breite) ein Breitenunterschied von 12° , während der Längendifferenz zwischen dem westlichsten Punkt bei Flensburg (etwa $9^{\circ}10'$ östl. Länge) und dem östlichsten Punkt bei St. Petersburg (etwa $30^{\circ}01'$ östl. Länge) etwa 21° beträgt. Es darf daher mit Recht erwartet werden, dass die Teilgebiete der Ostsee in unterschiedlichen geologischen wie auch klimatischen Gebieten liegen, was wiederum für die ozeanographischen Verhältnisse von großer Bedeutung ist.

Vom Oberflächenbild her gesehen, ist der Raum des Baltischen Meeres, wie die Ostsee auch genannt wird, reich gegliedert. Als natürliche Teilgebiete lassen einfach das Kattegat (ab der Linie Skagen bis Göteborg) und die Gewässer um die vielen dänischen Inseln (Beltsee) als Übergangsgebiet zwischen Nord- und Ostsee abgrenzen, während sich im Anschluss an den Hauptwasserkörper der Ostsee der Bottnische Meerbusen im Norden sowie der Finnische und Rigaische Meerbusen im Osten hervorheben (Abb. 1.1).

Die Fläche der Ostsee einschließlich des Übergangsgebietes ist mit ca. 415.000 km² etwa mit der von Schweden vergleichbar. Ihre Oberflächenausdehnung ist von der gleichen Größenordnung wie einige andere Nebenmeere. Hinsichtlich der Wassermenge jedoch ist die Ostsee ein sehr kleines Meer, im Vergleich zum Atlantik ist sie sogar verschwindend klein. Diesem Umstand ist es zusammen mit den charakteristischen ozeanographischen Prozessen zu verdanken, dass die Ostsee auf vom Menschen ausgehende Einflüsse besonders empfindlich reagiert. Aus dem äußeren Bild können wir weiter entnehmen, dass die Ostsee eine lange Küste hat. Wenn man den Küstenverlauf generalisiert, beträgt die Länge etwa 7.000 km (Abb. 1.2).

Berücksichtigt man den exakten Küstenverlauf und die vielen Inseln, so kommt man auf mehr als 22.000 km! Die deutsche Ostseeküste ist mit 2.347 km (Schleswig-Holstein 402 km einschl. Fehmarn und ohne Berücksichtigung der Schlei, Mecklenburg-Vorpommern 1.945 km) beteiligt, davon entfallen 779 km auf die Außenküste (402 und 377 km) und 1.568 km auf die Bodden- und Haffküsten Mecklenburg-Vorpommerns. Insgesamt liegen in der Ostsee viele tausend Inseln, von denen die meisten jedoch sehr klein sind. Zu den größten zählen Seeland (dänisch) mit 7.016, Gotland (schwedisch) mit 3.001, Fünen (dänisch) mit 2.976, Saaremaa (estnisch) mit 2.714, Ålands-Inseln (finnisch) mit 1.505, Öland (schwedisch) mit 1.281, Lolland (dänisch) mit 989, Hiiumaa (estnisch) mit 965, Rügen (deutsch) mit 926, Bornholm (dänisch) mit 588, Falster (dänisch) mit 514, Usedom (deutsch 354, polnisch 91) mit 445, Langeland (dänisch) mit 284, Møen (dänisch) mit 217, Muhu (estnisch) mit 204 und Fehmarn (deutsch) mit 185 km².

Für die Beurteilung der allgemeinen wirtschaftlichen Bedeutung des Meeres wie auch der potenziellen Möglichkeiten einer anthropogenen Beeinflussung der marinen Umwelt sind die neun Anliegerstaaten der Ostsee (Tab. 1.2) von ausschlaggebender Bedeutung.

Im Gegensatz zu den Anliegern anderer, mit der Ostsee vergleichbarer Nebenmeere handelt es sich hier um industrialisierte Länder, die ihre Import- und Exportgüter zu einem erheblichen Teil über See ein- und ausführen sowie das Meer in vielfältiger und zunehmender Weise wirtschaftlich nutzen (Kap. 11). An den Gestaden unseres Meeres liegen sich teilweise rasch erwei-

ternde Hauptstädte und Metropolen wie Kopenhagen, Stockholm, Helsinki, St. Petersburg, Tallinn (früher Reval), Riga, Kaliningrad (früher Königsberg. i. Pr.), die Dreistadt Gdynia (früher Gdingen) – Sopot (früher Zoppot) – Gdańsk (früher Danzig), Szczecin (früher Stettin), Rostock, Lübeck, Kiel und Göteborg,

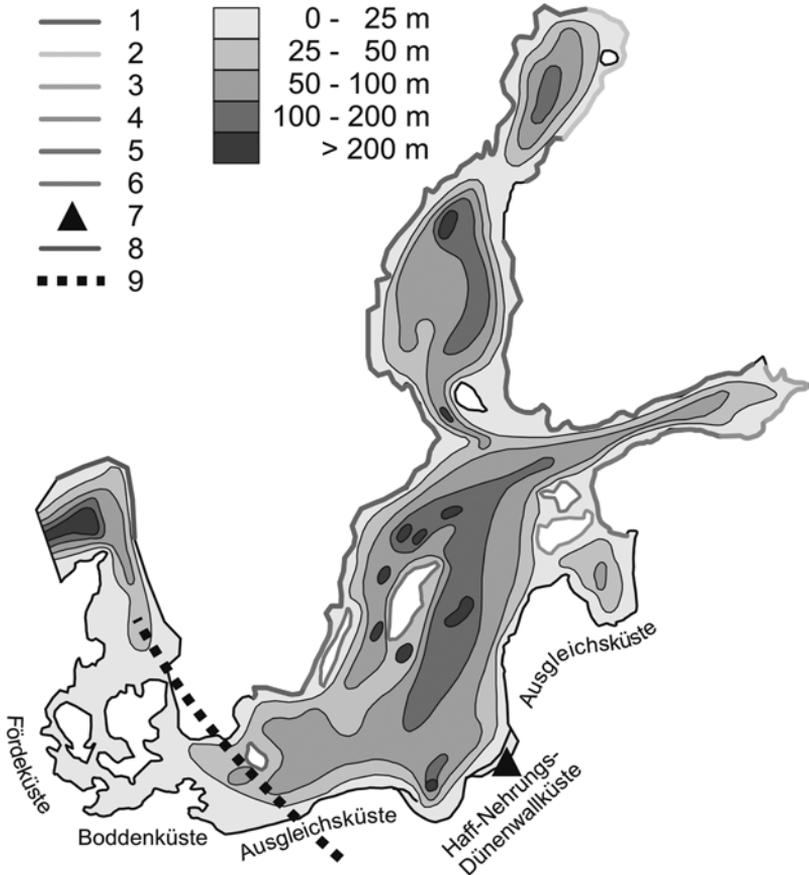


Abb. 1.2: Grundzüge der Tiefenverteilung sowie Angaben zu den Küstenformen.

- 1 Fjördschärenküste; 2 Fjördschärenküste als Hebungsküste;
- 3 Hebungsküste aus Ostseeabsätzen und Glazialschutt. Felskliffreihenküsten;
- 4 Steilkiff am Rand der Russischen Tafel; 5 Wechsel von Fels und Glazialschutt;
- 6 Schärenküste; 7 Kliff mit Tertiärgesteinen (Bernsteinerde) an der Glazialschuttküste;
- 8 Fjördküste; 9 tektonische Bruchzone (Tornquist-Linie). Küstenabschnitte ohne Markierung: Glazialschuttküsten

Tab. 1.2. Anliegerländer der Ostsee

Land	Fläche in Tausend km ²	Einwohner in Mio. (gerundet)	Generalisierte Küstenlänge in km	Anteil am Einzugs- gebiet in Tausend km ²
1. Schweden	449,9	9	2.460	440,0
2. Finnland	338,1	5	1.230	301,3
3. Russland				314,8
a) St. Petersburger Gebiet	85,9	6	350	
b) Kaliningrader Gebiet	25,1	1	145	
4. Estland	44,7	2	680	45,1
5. Lettland	64,6	3	475	64,6
6. Litauen	65,2	4	75	65,3
7. Polen	312,7	39	534	311,9
8. Deutschland			779*)	28,6
a) Mecklenburg -Vorpommern	23,6	2	377*)	
b) Schleswig-Holstein	15,7	3	402*)	
9. Dänemark	43,1	5	800	31,1
Summe	1.468,6,1	≈ 80		1.602,7
Anteile am Ostsee-Einzugsgebiet:				
			Weißrussland	83,8
			Ukraine	11,2
			Tschechien	7,2
			Slowakei	1,9
			Norwegen	13,4
Gesamtfläche des Einzugsgebietes:				1.720,2

*) Außenküste

um nur die wichtigsten zu nennen. In den genannten Städten leben gegenwärtig schon knapp 11 Millionen Menschen. Um den Meeresraum der Ostsee näher kennen zu lernen und in seinem Werden zu verstehen, wollen wir nun einen Blick auf die Geologie dieses Gebietes und damit auf die Entstehungsgeschichte des Baltischen Meeres werfen.

Vom Werden des jungen Meeres

Im Gegensatz zu vielen Zonen des Weltmeeres sind die Ostsee und ihr tieferer Untergrund in geologisch-geotektonischer Hinsicht als schon gut erforscht anzusehen. Das hängt vor allem mit der geringen Größe und der kontinentalen Lage des Meeres zusammen, das zudem in seinen nördlichen und mittleren Teilen von geologisch gleichartigen Zonen umsäumt wird. Im Gebiet der heutigen Ostsee treffen wir drei geotektonische Einheiten an, die mit einer entsprechenden geologischen Gliederung verbunden sind.

Im Präkambrium, d. h. vor mehr als 600–1.000 Millionen Jahren, kam es im Verlauf mehrerer Gebirgsbildungen zum Entstehen einer kristallinen Kontinentalscholle, die als Osteuropäische Plattform bezeichnet wird. Ein Ausläufer dieses „Urkontinents“ ist im Laufe der Entwicklung entlang einer von NW nach SO verlaufenden Linie zerbrochen. Das etwa 2.000 km lange Bruchsystem (seit ca. 100 Mio. Jahren) wird als Tornquist-Zone bezeichnet. Der südwestliche Teil der Scholle ist seit dem Erdaltertum (vor 240–600 Mio. Jahren) bis heute um mehrere tausend Meter tief abgesunken und im Laufe der Zeit mit einer mächtigen Sedimentdecke aus den verschiedenen geologischen Epochen bedeckt worden. Dieser Teil gehört heute als Mitteleuropäische Senke zur tektonisch relativ instabilen Westeuropäischen Plattform.

Unter den Ablagerungen dominieren vor allem solche aus der Kreidezeit (vor ca. 137–67 Mio. Jahren) und aus dem Tertiär (vor ca. 67–1,5 Mio. Jahren). Die im Einzelnen recht kompliziert aufgebaute Tornquist-Zone ist in ihrem Verlauf von Nordjütland, Kattegat und Schonen (Südschweden) über die Insel Bornholm bis zur polnischen Küste im Bereich der Ostsee nachweisbar (s. Abb. 1.2). Ihre Ausläufer reichen bis in das Gebiet des Schwarzen Meeres.

Die nordöstlich gelegene, stark geneigte Osteuropäische Plattform hat sich ebenfalls im Laufe der Zeit verändert. Hier kann man wiederum einen südöstlichen Teil unterscheiden, der eine lang anhaltende, aber wiederholt unterbrochene und im resultierenden Betrag geringe Senkung aufweist. Die Sedimentdecke, die hier das ursprüngliche Grundgebirge bedeckt, ist bei weitem nicht so mächtig wie die der Mitteleuropäischen Senke. Diese geotektonische Einheit wird als Russische Tafel bezeichnet. Auf ihrem nordwestlichen Teil liegen die zentralen Seegebiete der Ostsee. Ein weiterer, im NW gelegener Teil des „Urkontinents“ befindet sich schon seit dem Erdaltertum in einer schwachen, aber offenbar permanenten Hebung. Von geringen Resten abgesehen, findet man hier nur die sehr jungen Sedimente, die von den letzten Kaltzeiten herrühren. Für das Meer heißt das, dass in seinen nördlichen Teilen das ursprüngliche Grundgebirge weitgehend bloß liegt oder nur von pleistozänen (eiszeitlichen) Lockermassen überzogen ist. Dieser ganze Teil der nordöstlichen Hochscholle, der ein

flaches schildförmiges Hebungsgebiet darstellt, trägt den Namen „Baltischer Schild“, in den die mittleren und nördlichen Teile der Ostsee eingebettet sind. Die Insel Bornholm bildet den südlichsten sichtbaren Teil dieser tektonischen Einheit.

Die hier nur in den Grundzügen geschilderten geotektonischen Verhältnisse der südlichen, mittleren und nördlichen Ostsee wirken sich u. a. auf die Verteilung von Bodenschätzen im Meeresbereich aus (vgl. Kap. 11). Die wichtigsten mineralischen Rohstoffanreicherungen sind im Nordteil des kristallinen Grundgebirges zu erwarten, in den übrigen Teilen in den Stockwerken des darüber befindlichen Felsgesteins. Dagegen bilden die jungen Lockergesteine am Meeresboden bereits wirtschaftlich genutzte Baustoffressourcen.

Lage, Höhe und Neigung der Plattformen und ihrer Grenzzonen bestimmten die Bahnen des in den Kaltzeiten nach Süden vorstoßenden bzw. nach Norden zurückweichenden Eises und damit schließlich die schon entsprechend vorgeprägte, aber entscheidend modifizierte Morphologie der heutigen Ostsee. In hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung wurden ehemalige Eisrandlagen am Meeresboden und im küstennahen Bereich kartiert.

Zu den als gesichert geltenden Forschungsergebnissen gehört die Erkenntnis, dass das Ostseegebiet schon im Erdaltertum (600–550 Mio. Jahre v. h./ = vor heute/), darin vom Kambrium bis zum Silur (vor 500–440 Mio. Jahren beginnend) und in den jüngeren geologischen Perioden auch die südlicher gelegenen Teile, von Meeren wiederholt überflutet gewesen sind. Von einer Ostsee im heutigen Sinne kann man aber im Hinblick auf diese Meere nicht sprechen; der heutige Meeresraum hat sich erst im Laufe des Quartärs (seit etwa 1,5 Mio. Jahren) mit Uferlinien, die den heutigen ähnlich sind, herausgebildet. Die alten Meere im Ostseeraum, die besonders den Südtteil umfassten und stets im Gefolge von Einsenkungen mit nachfolgender Überflutung erschienen, können vor allem durch die zurückgelassenen Ablagerungen von Sand, Kreide- und Tonschlamm identifiziert und datiert werden. Unter die direkten Vorläufer der heutigen Ostsee rechnet man erst die Meere, die sich im gegenwärtigen quartären Eiszeitalter entwickelten. Zu einem ersten Meeresvorstoß innerhalb dieser Periode kam es in der Warmzeit (Holstein-Warmzeit, 230.000–200.000 Jahre v. h.) zwischen der Elster- und Saalevereisung. Es handelt sich dabei um das Holsteinmeer, das sich im Osten wahrscheinlich bis in die Gegend von Rügen erstreckte. Ein weiterer Ostseevorläufer wurde in der Eem-Warmzeit (130.000 bis 95.000 Jahre v. h.) zwischen der Saale- und Weichselvereisung festgestellt. Dieses „Eem-Meer“ hat dem Anschein nach fast den ganzen Bereich der Ostsee um den Baltischen Schild herum erfasst und war wie sein Vorgänger am besten in den südlichen Teilen ausgebildet. Es kann angenommen werden, dass in dieser Phase über den Finnischen Meerbusen eine Verbindung mit dem Weißen Meer bestand.

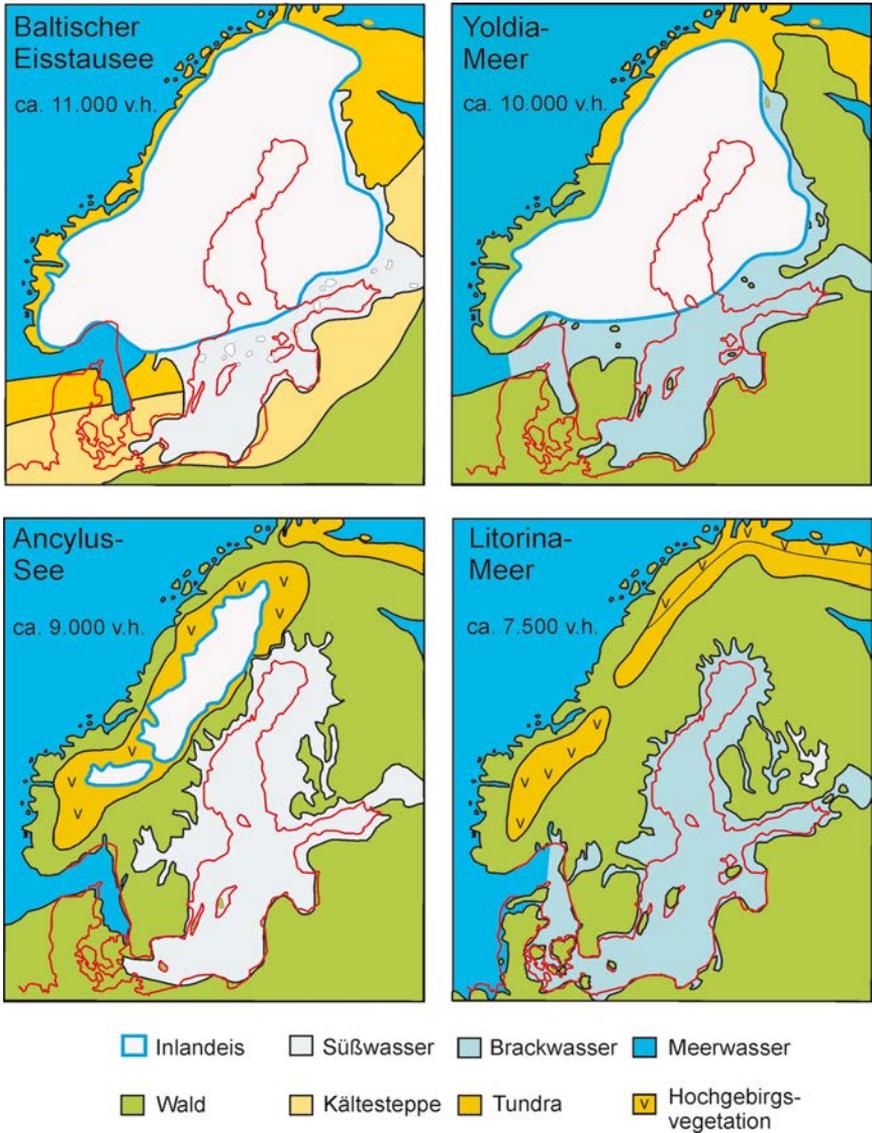


Abb. 1.3: Die Hauptphasen der nacheiszeitlichen Entwicklung der Ostsee: Baltischer Eisstausee, Yoldia-Meer, Ancylussee und Litorinameer (s. a. Tab. 1.3) mit Angaben zur Vegetation (in Anlehnung an Sauramo, modifiziert von Demel)

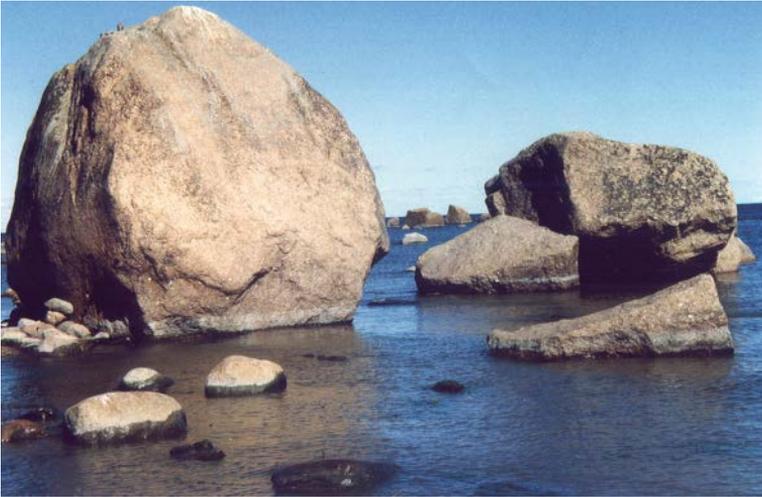


Abb. 1.4: Vom Eis eingeschleppt und liegen gelassen. Gewaltiger Findling an der estnischen Küste am Finnischen Meerbusen (Foto: L. Eißmann)

Die eigentliche Geschichte unserer heutigen Ostsee aber beginnt erst mit dem endgültigen Rückzug des Inlandeises (letztes glaziales Maximum etwa 25.000 bis 18.000 Jahre v. h.). Die inzwischen von Wissenschaftlergenerationen aus allen Ostseeländern weitgehend auch in Einzelheiten aufgeklärte Entwicklung seit dieser Zeit ist vor allem die Folge der Wechselwirkung zwischen einer langsamen Senkung der Erdkruste und dem entgegengesetzten Prozess der Auffüllung der vom Eis ausgeschürften Ostseesenke mit Glazialschutt, den die nach Norden zurückweichenden Gletscher liegen ließen. Dabei überwog in den mittleren und nördlichen Teilen der Ostsee der Ausschürfungseffekt gegenüber der Auffüllung mit Glazialschutt. Dort resultiert also eine Einsenkung, und wir finden in der Tat in diesen Teilen der Ostsee auch heute die größten Wassertiefen. Als während der Kaltzeit ein erheblicher Teil des Wassers in Form von Eis gebunden war, war der allgemeine Wasserspiegel des Weltmeeres wesentlich niedriger (um 80–100 m) als in der Gegenwart. Immerhin hatte das Eis im Mecklenburgischen Raum schon eine Mächtigkeit von einigen hundert Metern gehabt, aber auf den Gebieten der heutigen nördlichen Ostsee war die Eislast 2.000 m und mehr mächtig! Mit dem Abschmelzen dieses Eises kam es daher zu einem lange anhaltenden Anstieg des mittleren Wasserspiegels des Weltmeeres (eustatischer Anstieg). Dieser betrug unter Schwankungen einige Dezimeter je

Jahrhundert; in der Gegenwart ist immer noch ein Anstieg von etwas mehr als 1 mm/Jahr zu beobachten (infolge der globalen Erwärmung wieder zunehmend). Vor etwa 4.000 Jahren war der entscheidende Teil des Meeresspiegelanstiegs erfolgt. Während bei vorhandener Eisbelastung die Erdkruste zunächst durch das Eis niedergedrückt wurde, kam es mit der zunehmenden Entlastung beim Rückzug der Gletscher zu einer Ausgleichbewegung. Dieser „isostatische Ausgleich“ ist gegenüber dem Zeitpunkt der Entlastung jedoch wegen der Reibung der Krustenschollen stark verzögert. Daher hält im Norden der Ostsee die Landhebung auch heute noch an, und es gibt Schätzungen, dass in etwa 2.500 Jahren der Botttnische Meerbusen weitgehend verschwunden sein könnte.

Meeresspiegelanstieg und Landhebung – das sind die Vorgänge, die sich entscheidend auf die charakteristischen Entwicklungsstadien der Ostsee von der jüngeren Weichseleiszeit (etwa 90.000 bis 10.000 Jahre v. h.) an im jüngsten Abschnitt des Quartärs, im Holozän, ausgewirkt haben. Die tatsächliche Küstenlinienverschiebung ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Meeresspiegelanstieg, der zur Ausbreitung des Meeres tendiert, und der Landhebung, die auf die Verkleinerung des Meeres hinzielt.

Es kann angenommen werden, dass der Eisrand letztmalig vor etwa 13.500–13.000 Jahren bis Mittelschweden und Südfinnland zurückgewichen war (zwischen 14.000 und 11.000 v. h. erreichte der Abschmelzprozess seine stärkste Intensität). Das südliche Ostseebecken war da schon länger inlandsisfrei. Die Schmelzwässer sowie das Flusswasser hatten sich in den vorgeformten Senken südlich des zurückweichenden Inlandeises gesammelt. Es bildeten sich mit driftenden Eisbergen bedeckte Schmelzwasserseen unterschiedlicher Größe, die sich nach und nach zu einem großen Süßwasserbecken vereinigten. Diese Seen hinterließen u. a. Bändertone, die im Bereich der südwestlichen Ostsee in den Beckenbereichen der Mecklenburger Bucht und des Arkonabeckens ebenso wie auf der Darßer Schwelle nachgewiesen worden sind (s. Tab. 1.6). Diese erste Phase der Ostsee wird als Baltischer Eisstausee bezeichnet (14.000–10.200 v. h. für den südlichen und westlichen Bereich, Abb. 1.3), der maximal die mittlere und östliche Ostsee erfasste. In dieser Zeit lag der Meeresspiegel des Ozeans etwa 40 bis 50 m tiefer als heute, so dass die Schwellen von Belten und Sund damals als gewaltige Staudämme fungierten. Infolge der Landhebung kann dieses Vorläuferstadium der Ostsee auf dem heutigen Festland Skandinaviens erforscht werden. Der Baltische Eisstausee hatte durch Schmelz- und Flusswasser eine positive Wasserbilanz. Der Wasserstand stieg vorübergehend bis 13 m unter NN an, so dass sich das überschüssige Wasser im Laufe der Zeit im Bereich von Öresund und Kattegat zur Nordsee ergoss. Ein weiterer Abfluss zum Weltmeer entstand später (etwa um 11.200) über die mittelschwedische Senke (Billingen-Pforte), wodurch der Wasserstand wieder um einige zehn Meter absank (die in der Literatur mitgeteilten Werte schwanken allerdings stark).

Dem Wasser des Eissees fehlte aber noch das charakteristische Attribut eines Meeres: die Salzigkeit.

Der Spiegelausgleich zwischen Ozean und Eisstausee vor etwa 10.200 Jahren führte nach einer kurzen Brackwasserphase im westlichen Teil um 10.400 v. h. zum Eindringen von salzigem Meerwasser in die sich entwickelnde Ostsee. Damit wanderten aber auch marine Arten in den bisher salzfreien Eissee ein, der zudem im Hinblick auf die niedrigen Temperaturen kaum eine Lebensentwicklung zuließ. Nun kam es in dem weiterhin noch kühlen Meer zu einer ersten Besiedelung. Als entsprechende Leitform wurde die Muschel *Portlandia arctica* gewählt, deren früherer Gattungsname *Yoldia* dieser Phase der Ostsee den Namen gab (Abb. 1.3).

Es ist wahrscheinlich, dass durch den raschen Meeresspiegelanstieg in dieser bis etwa 9.450 v. h. anhaltenden Phase eine zeitweise Verbindung mit dem Weißen Meer über die finnische Seenplatte bestand, denn in diesen Seen haben sich Reliktformen aus der damaligen Zeit bis heute erhalten. Weitere Belege für das Eindringen von salzhaltigem Wasser über das südliche Mittelschweden gibt es für die Zeit ab 10.000 v. h. Spuren des Salzwassereinflusses in dieser Zeit lassen sich besonders entlang der schwedischen Ostküste belegen. Das *Yoldia*-Meer erstreckte sich vor allem über die heutigen mittleren und nordöstlichen Teile des Meeres. Der südliche Teil blieb trocken und war von Wäldern bedeckt.

Im Zuge der weiteren Entwicklung dominierte die Landhebung gegenüber der Wirkung des Meeresspiegelanstiegs: es kam zu einer erneuten Trennung der Ostsee vom Ozean. In der klimagünstigen Zeit des Boreals (etwa vor 8.000–10.000 Jahren) trat die Ostsee erst in ihre Echeneisphase (auch Echineisphase, *Echinoidea* = *Seeigel*, „Rhazzeit“) ein, als es in der südlichen Ostsee zunächst zu einer Transgression (Wasserstandsanstieg) als Folge des isostatischen Effekts kam. Danach bildete sich unter Aussüßung der Ancylussee (etwa 9.450 bis 8.350 v. h., Abb. 1.3). Eine solche Abschnürung vom Weltmeer konnte nicht ohne Folgen für die biologischen Verhältnisse bleiben. Es breiteten sich Süßwasserformen aus, unter ihnen die zur Leitform erhobene Napfschnecke *Ancylus fluviatilis*. Nachdem die Meereszugänge über Mittelschweden und im Norden zum Weißen Meer hin unterbrochen waren, blieb in dieser Zeit, in der der Wasserspiegel der Ostsee wieder zeitweise erheblich über dem damaligen Ozeanspiegel lag (8 bis über 10 m unter NN), nur eine schmale Verbindung über die heutige Beltsee zum Weltozean (etwa ab 8.700 v. h.). Vor ungefähr 9.200 Jahren setzte nochmals ein starker Rückgang des Wasserspiegels ein. Durch zahlreiche Befunde belegt ist eine schnelle Absenkung des etwa 10 m über dem damaligen Ozean liegenden Ancylussees in Form eines gewaltigen Überlaufes über die Darßer Schwelle. Damit übereinstimmend haben Bohrungsdaten aus SO-Rügen und Usedom einen Höchststand des Ancylussees von 12 m unter dem jetzigen mittleren Wasserstand ergeben. Das Aufstauen des Ancylussees hatte

Tab. 1.3. Entwicklung der Ostsee (Angaben nach Björck, Duphorn, Janke, Kliewe u. a.).
v.h. = Jahre vor heute

Stadium	Klimaperiode	Salzgehalt	Leitform
Jüngere Weichsel(Würm-)kaltzeit 90.000–10.000 v. h. Maximale Eisausdehnung ca. 20.000 13.000–8.800 zunehmende Eisfreiheit Anfänge des Baltischen Eisstausees etwa 14.000–12.700 v. h.	Kaltzeit, unter- brochen von wärmeren Perioden (Inter- stadialen) Übergang in Holozän, Erwärmung	Ohne	Ohne
Baltischer Eisstausee 12.700–10.200 v.h. Um 10.400 kurze Brackwasserphase	Dryas Kalt und trocken	Süß, zeitweise gering salzig	Ohne
Yoldiameer 10.200–9.450 v. h.	Präboreal Warm und trocken	Salzig	Muschel <i>Portlandia</i> (= <i>Yoldia</i>)
Ancylussee 9.450–8.350 v. h. Die ersten ca. 300 Jahre bilden die Echneisphase (Transgression im westlichen Teil)	Boreal Warm und trocken	Weit- gehend ausgesüßt	Schnecke <i>Ancylus</i> <i>fluviatilis</i>
Mastogloja-Phase 8.350–8.000 v.h. Überflutung der Beltsee Übergangsphase zum Litorinameer	Atlantikum (ca. 8.000–5.000 v. h.)	Gelegent- liche Salz- intrusionen	
Litorinameer 8.000–2.000 v.h. s. Tab. 1.4	Feucht und warm Klimaoptimum	Salzig- brackig	Strand- schnecke <i>Litorina</i> <i>littorea</i>
Limnaeameer 2.000–500 v. h.	Subboreal Warm und trocken	Brackig	Schnecke <i>Limnaea</i> <i>ovata</i>
Mya-Meer ab 500 v. h., gegenwärtiges Stadium	Subatlantikum Kühl und feucht, Kleine Eiszeit Moderne Warmzeit	Brackig	Sandmuschel <i>Mya arenaria</i>

räumlich sehr unterschiedliche Folgen. Während der nördliche Ostseeraum infolge des weiter gehenden isostatischen Aufsteigens nur eine geringe Wasserstands Zunahme erfuhr, wurde der südliche, isostatisch viel weniger aktive Teil zunehmend überflutet. Die Grenze zwischen Wasserspiegelanstieg und -abfall verlief etwa südwestlich-nordöstlich zwischen dem Vänersee in Schweden und einem Gebiet nördlich der finnischen Südküste. Besonders dramatisch dürfte der Wasserspiegelanstieg wiederum im südlichen Gebiet vor sich gegangen sein. Es wurden Anstiegswerte des Wasserspiegels von 5–10 m in 100 Jahren berechnet. Dies führte zu einer erneuten starken Veränderung der Küstenlinien in diesem Bereich. Beispielsweise dürfte Bornholm zu diesem Zeitpunkt wieder vom Festland isoliert gewesen sein.

Der Wasserspiegel sank nach dieser Zeit erneut stark ab, so dass große Teile des südwestlichen Ostseebereiches wieder trocken fielen. Nach dieser kurzen Zwischenphase (Tab. 1.3) in der jüngsten Entwicklung der Ostsee trat die Landhebung in den südlichen Randgebieten Skandinaviens wieder etwas zurück, und es kam zu einer erneuten Dominanz des Meeresspiegelanstiegs, der auch im Zusammenhang mit dem Klimaoptimum vor 5.000 bis 8.000 Jahren (Atlantikum, Jahresmittel der Lufttemperatur 1–2 Grad höher als heute) gesehen werden muss. Erste Anzeichen für marine Einflüsse zeigten sich in der Mecklenburger Bucht um 8.000 v. h. Sie repräsentieren den Übergang von limnisch-terrestrischen zu brackisch-marinen Bedingungen und gehören schon zur Mastogloia-Phase, welche dem Litorina-Meer vorausgeht.

Es folgte die Überflutung der Beltsee (Mastogloia-Phase, 8.350–8.000 v. h.) und die Umbildung des Ancylussees in das Litorinameer (8.000–2.000 v. h.). Der Salzgehalt stieg an, und es konnten wieder marine Arten in das Meer einwandern.

Neue Leitform wurde nunmehr die Schnecke *Litorina littorea*, die auch heute noch bis in die Gewässer bei Rügen und Bornholm anzutreffen ist. Während der Litorina-Transgression, die in Stufen unterteilt werden kann (Tab. 1.3 und 1.4), war der Salzgehalt höher als in der Gegenwart. In dieser Zeit (Abb. 1.3) wurde die heutige Gestalt der Ostsee nach und nach erreicht. Der ursprünglich außerordentlich starke Meeresspiegelanstieg (>2 m/100 Jahre) wurde geringer. Stagnations- und Umkehrphasen wurden für verschiedene Gebiete nachgewiesen. Abb. 1.5 enthält ein Ergebnis der Forschungen zur Entwicklung des Wasserstandes im Bereich der Arkonasee. Der auffällige, relativ kurzzeitige Rückgang vor mehr als 11.000 Jahren wird schon dem Yoldiameer zugeordnet.

Der größte Teil des Inlandeises war inzwischen geschmolzen und das Schmelzwasser zum Abfluss gekommen. Überall bleiben große Findlinge zurück (Abb. 1.4). In der nördlichen Ostsee wurde infolge der anhaltenden Landhebung das Meer zurückgedrängt: dort kann man jetzt die Uferlinien des Ancylus- wie auch des Litorinameeres bequem auf dem Land studieren! In dieser Zeit

begann die Umformung der Küsten durch die wind- und strömungsbedingten Küstenausgleichsprozesse, die aus Abrasion (Abtragung), Transport und Akkumulation (Anschwemmung) bestehen. Die Zeit der tiefgreifenden Veränderungen im Ostseegebiet war vorbei.

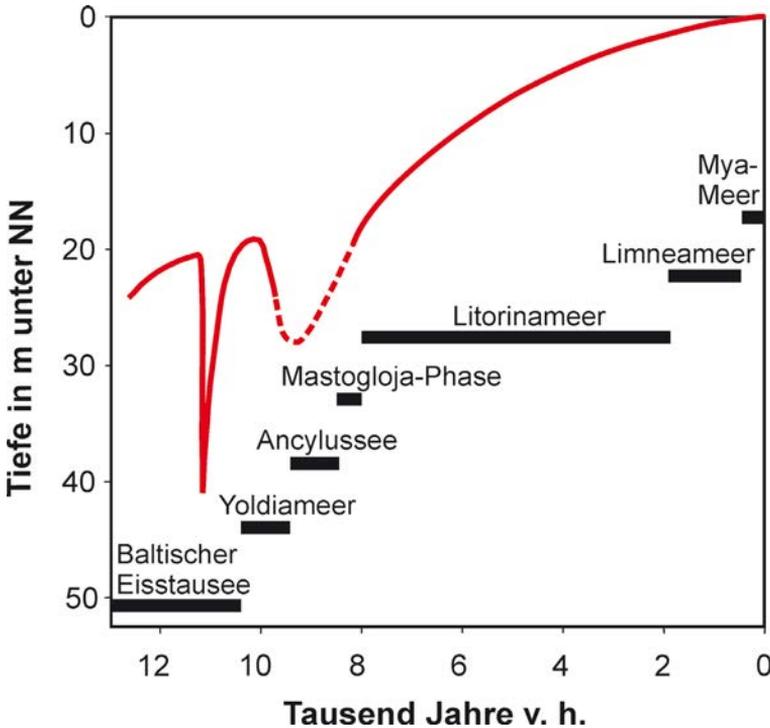


Abb. 1.5: Wasserfüllung der Ostsee (Arkonasee) im Zuge ihrer Entwicklung, ausgedrückt durch den relativen Anstieg des Meeresspiegels (nach Bennike und Jesen sowie Lampe, vereinfacht)

Infolge von Resthebungen im Übergangsbereich zur Nordsee und dem weiteren Nachlassen des Meeresspiegelanstiegs verflachten sich in der Folgezeit die Pforten zur Nordsee, sie wurden enger. Dadurch nahm der Salzgehalt wegen des nunmehr geringeren Einstroms salzreichen Wassers wieder etwas ab. Die Folge war eine gewisse Verarmung des marinen Faunenbestandes auf der einen Seite

und das weitere Vordringen von zahlreichen Süßwasserarten auf der anderen. Mit der Ausbreitung der Süßwasserschnecke *Limnaea ovata* ging die Ostsee in ihr *Limnaea*-Stadium (etwa zwischen 2.000–500 v. h.) über. Marine Arten, die während der *Litorina*-Zeit die westlichen Teile der Ostsee besiedelten, zogen sich nunmehr in die Nordsee zurück.

Die rezenten Veränderungen der Ostsee sind weniger aus geologischen Tatbeständen als vielmehr aus biologischen Veränderungen nachweisbar. Die jüngste Entwicklung ist durch die neotektonische und glazial-isostatische Entwicklung beiderseits der Tornquist-Linie sowie durch den eustatischen Meeresspiegelanstieg gleichermaßen bestimmt. Wegen des leichten Salzgehaltsrückganges wurde das Einwandern weiterer Süßwasserarten möglich. Dieses noch heute anhaltende Stadium der Ostsee wird nach der Sandklaffmuschel *Mya arenaria* als Myameer (seit etwa 500 Jahren) bezeichnet.

Für die ozeanographischen Verhältnisse der gegenwärtigen Ostsee sind die langsamen isostatischen Bewegungen (etwa 40 cm/100 Jahre Hebung in der nördlichen zentralen Ostsee und geringe Senkung westlich der Tornquist-Linie) zu beachten. Dadurch können sich die Strömungsquerschnitte langsam verändern, was infolge der Senkung im Bereich der Beltsee eine damit in Verbindung stehende tendenzielle leichte Erhöhung des Salzgehaltes nach sich zieht. Messungen seit ca. 100 Jahren deuten darauf hin, dass der Effekt real ist.

Tab. 1.4: *Phasen des Steigens (transgressive) und des Fallens (regressive) des Wasserstandes des Litorinameeres im Vorpommerschen Küstenraum (nach Kliewe und Janke)*

Zeit in Jahren v. h.	Phasen der Litorina-Transgression
3.000–2.000	Dritte litorine Hauptphase
3.900–3.000	Spätlitorine Verharrungs- bis Regressionsphase
5.300–3.900	Zweite litorine Hauptphase
5.700–5.300	Hochlitorine Regressionsphase
7.000–5.700	Erste litorine Hauptphase (Optimum)
7.300–7.000	Frühlitorine Retardation
7.900–7.300	Erste litorine Hauptphase (initialer Abschnitt)

Jeder Abschnitt der hier skizzierten Entwicklung war mit einem Wechsel der Ablagerungen am Meeresboden und auf dem heutigen Festland sowie den Inseln verbunden. Die Untersuchung der Sedimente, insbesondere der darin eingelagerten Pollen und Sporen sowie der Schalen von Kieselalgen (Diatomeen), aber auch die Erfassung des Feinreliefs ermöglichen es den Meeresgeologen,

die Entwicklung genau zu datieren. So konnten die zahlreichen Eisvorstöße und Eisrückzüge räumlich und zeitlich nach ihren quartärigen Merkmalen kartiert werden, wodurch immer mehr Einzelheiten der holozänen Ostseeentwicklung offenbar geworden sind. Auch hinsichtlich des Füllungsprozesses der Ostsee werden immer mehr Details bekannt. So konnte beispielsweise von Greifswalder Forschern die Strandlinienverschiebungskurve für Nordostrügen ermittelt werden, die den phasenhaften Anstieg des Meeresspiegels dokumentiert (nicht weniger als zehn Transgressionsphasen seit 8.400 Jahren). Besonders ausgeprägte Anstiege wie auch vorübergehende Rückgänge der Strandlinie sind eng mit den Klimafluktuationen im Holozän verbunden.

Vielfalt der Küstenformen

Die Grenze zwischen festem Land und Meer, die Küste, ist wohl die markanteste und wichtigste Naturgrenze der Erde. Hier berühren sich Hydrosphäre, Lithosphäre und Atmosphäre und durchdringen sich gegenseitig. An der Küste gehen die beiden Hauptgrenzflächen des Ozeans, die obere Wasser-Luft-Grenzfläche und die untere, die Wasser-Sediment-Grenzfläche, ineinander über. Diese allgemeinen Feststellungen gelten auch für das Ostseegebiet, wo entlang der viele tausend Kilometer langen Küste sehr abwechslungsreiche Formen bestehen und wo man ständig die umgestaltende Wirkung des Meeres beobachten kann. Wie wir schon kennen gelernt haben, ist die Verteilung von Land und Meer im Fall des Ostseegebietes von den geotektonisch-geologischen Verhältnissen und insbesondere durch die Wirkungen der Kaltzeiten im Quartär bestimmt gewesen. Das drückt sich auch in den beiden Grundformen der Küste aus, die wir an der Ostsee antreffen. Es handelt sich einmal um den Typ der Felsflachlandküste in dem Teil, wo das Urgebirge teilweise offen liegt, und zum anderen um den Typ der Glazialschuttküste in den übrigen Teilen der Ostsee. Beide Grundtypen können allgemein den Flachlandküsten zugeordnet werden.

Im Einzelnen werden die Küstenformen durch die Verwitterung der Gesteine und vor allem durch die ständige Einwirkung des Meeres geprägt. Besonders seit der Litorina-Phase der Ostsee befinden sich die aus weicherem Material geformten Küsten in einem ständigen Ausgleichsprozess, der die Vorsprünge und Buchten ebenso wie die Höhenunterschiede zu nivellieren sucht. Dazu kommt die Wirkung der glazial-isostatischen Landbewegung. Abgesehen von der Insel Bornholm, wo wir eine reine Felsküste finden, ist der Grundtyp der Felsflachlandküste als Fjärdschärenküste ausgebildet, das ist vor allem dort, wo das vom Eis überschiffene Grundgebirge allmählich in das Wasser übergeht. Unter einem Fjård verstehen wir einen tief ins Land eingreifenden Meeresarm, der