

**Räumliche und zeitliche Veränderungen der Gebiete mit
Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoff
im Tiefenwasser der Ostsee**

123 Seiten, 73 Abbildungen und 22 Tabellen

Der vorliegende Band entspricht im wesentlichen der von der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald im Jahre 2000 angenommenen gleichlautenden Dissertation

GREIFSWALD 2001

Impressum

ISBN 3-860006-166-6

Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald

Redaktion: Susanne Unverzagt, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald,
Geographisches Institut

Satz: Susanne Unverzagt

Grafiken: Susanne Unverzagt, Brigitta Lintzen

Herstellung: Vervielfältigungsstelle der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald
KIEBU-Druck Greifswald

Für den Inhalt ist die Autorin verantwortlich.

Prof. Dr. Klaus-Dieter Aurada zum 60. Geburtstag gewidmet

Die Beschäftigung mit Sauerstoffmangelgebieten in der Ostsee war für mich eine Möglichkeit, das analytische Denken und die statistischen Methoden eines Mathematikers zur Untersuchung von Prozessen in der Ostsee anzuwenden. In diese Arbeit fließen Daten und Erkenntnisse der Ozeanographie, räumliche Denkweisen der Geographie und Methoden der Statistik und Geostatistik ein. Ich habe mich bemüht, die Arbeit so zu schreiben, daß die wesentlichen Ergebnisse von Lesern dieser Fachgebiete verstanden und genutzt werden können.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich beim Schreiben dieser Arbeit ermutigten und unterstützten. Danke für eure Geduld – HENRIK, MALTE UND MIA.

Die Idee für diese Arbeit stammt von Herrn PROF. DR. K. D. AURADA (Geographisches Institut, Universität Greifswald), der mir als Mathematikerin die Möglichkeit bot, ein geowissenschaftliches Thema zu bearbeiten und der mir stets mit Ratschlägen und Ideen zur Seite stand. Von mathematischer Seite konnte ich mich mit allen Problemen an Herrn PROF. DR. C. BANDT (Institut für Mathematik und Informatik, Universität Greifswald) wenden.

Die ersten meereswissenschaftlichen Meßwerte erhielt ich von Herrn PROF. DR. D. NEHRING und Herrn PROF. DR. W. MATTHÄUS vom Institut für Ostseeforschung in Warnemünde. Später konnte ich meine Datenbasis um die in der schwedischen Baltic Environmental Database gespeicherten Daten aller Ostseeanrainerstaaten erweitern. Mein besonderer Dank gilt hier Herrn PROF. DR. J. HARFF (Institut für Ostseeforschung, Warnemünde) und Herrn PROF. DR. F. WULFF (Institut für Systemökologie, Stockholm), die mich in der Beschaffung der Daten unterstützten sowie Herrn DR. M. R. MEDINA (Institut für Systemökologie, Stockholm), der meine Fragen zur Verarbeitung der Datenmengen immer sehr schnell beantwortete.

Weitere Daten erhielt ich vom Dänischen Umweltforschungsinstitut in Roskilde, dem Institut für Meereskunde in Kiel, dem Ozeanographischen Dienst des SMHI, dem Institut für Systemökologie in Stockholm, dem Stockholmer Meereswissenschaftlichen Zentrum der Universität Stockholm, dem Finnischen Institut für Meeresforschung in Helsinki, dem Finnischen Umweltforschungsinstitut in Helsinki, dem Institut für Meteorologie und Wasser-Management in Gdynia und dem Institut für Wasserökologie der Universität Riga. Meine ersten Erfahrungen in der Geostatistik verdanke ich einem Seminarvortrag von Herrn PROF. DR. R. OLEA (Kansas Geological Survey), von dem ich später noch wertvolle Vorschläge zur Verbesserung meines Modells bekam. Mein Wissen konnte ich in einem Kurs zu "Mathematischen Methoden in den Geowissenschaften" im Frühjahr 1999 an der FU Berlin erweitern. Besonderen Dank schulde ich Frau PROF. DR. M. TH. SCHAFMEISTER (Geologisches Institut, Universität Greifswald), die sich immer wieder bereit erklärte, geostatistische Ideen mit mir zu diskutieren.

JENS KNÖCHEL (G.E.I.S.T. bR) unterwies mich mit viel Geduld in der Programmiersprache Delphi, RAIMUND RÖDEL half mir bei vielen kleinen und größeren Problemen mit dem Computer und Frau B. LINTZEN wirkte bei der Gestaltung vieler Grafiken mit. Im Rahmen eines Kurses "Marine System Analysis" erwarb ich Kenntnisse zur Vernetzung der Sauerstoffverhältnisse mit der bodennahen Tierwelt und der Sedimentlagerung in der Ostsee. Aus den Diskussionen mit Herrn ARI O. LAINE entstand das 5. Kapitel dieser Arbeit. Und dann vielen Dank an alle, mit denen ich zusammen studierte und lange Diskussionen führte – CARSTEN, HEIKO, SVEN, EVI, CATHRIN, DAGNY, EKKEHARD und allen anderen.

Susanne Unverzagt

INHALTSVERZEICHNIS

0	Einleitung.....	1
1	Die Ostsee – Daten und Fakten im Überblick.....	4
1.1	Entwicklungsgeschichte der Ostsee	5
1.2	Beckenstruktur und Hydrologie	6
1.3	Ostseespezifische Besonderheiten des Wasserhaushaltes	7
1.4	Das Sauerstoffregime	9
1.5	Veränderungen durch den Menschen	11
2	Methoden.....	13
2.1	Methodik der Probenahme	13
2.2	Datensammlung und Datenbank.....	14
2.3	Kartenprojektionen	19
2.4	Geostatistische Verfahren	20
2.4.1	Voraussetzungen geostatistischer Betrachtungen	21
2.4.2	Räumliche Strukturanalyse - Variographie.....	22
2.4.3	Räumliche Schätzung – Kriging	25
2.4.4	Kreuzvalidation	27
2.4.5	Bestimmung von Gebietsgrenzen - Indikator-Kriging	27
3	Modellierung der Bereiche mit geringen Sauerstoffkonzentrationen für den Zeitraum 1969-1999.....	29
3.1	Mathematische Modellbildung.....	29
3.1.1	Stadien der Modellentwicklung.....	30
3.1.2	Modellidee.....	32
3.2	Beschreibung der Tiefenveränderungen an den Meßpunkten	34
3.2.1	Bestimmung einer Modellfunktion	35
3.2.2	Berechnung der Grenztiefen.....	38
3.3	Die flächenhafte Analyse der Grenztiefen	40
3.3.1	Veränderung der Grenztiefen in Raum und Zeit.....	40
3.3.2	Räumliche Strukturanalyse der Grenztiefen einer Saison	46
3.3.3	Schätzung der Grenzbereiche.....	50
3.4	Kartenberechnung.....	52
3.4.1	Schätzung der flächenhaften Ausprägung der Grenztiefen.....	53
3.4.2	Fehleranalyse.....	64
3.5	Schätzung von Flächen und Volumen der Bereiche mit geringen Sauerstoffkonzentrationen	66
4	Räumliche Auswirkungen der zeitlich variierenden Sauerstoffkonzentrationen.....	71
4.1	Flächenhafte Quantifizierung des Auftretens von Mangelzuständen	71
4.2	Räumliche Auswirkungen auf die Entstehung laminierter Sedimente	74
5	Die Ostsee als selbstregulierendes System – eine Synthese.....	79
5.1	Systemanalyse	79
5.2	Definition von Zustandsklassen im Tiefenwasser	81
5.3	Zusammenfassende Darstellung der Veränderungen in der Zeit	84
6	Zusammenfassung.....	87
7	Literatur.....	90

8	ANHANG	101
	A. Liste der Symbole und Abkürzungen	101
	B. Tabellen und Diagramme	103

0 EINLEITUNG

Das Auftreten von Sauerstoffmangelsituationen und Schwefelwasserstoff ist heute eines der gravierendsten Umweltprobleme in der Ostsee (NEHRING & AERTEBJERG 1996). Bedingt werden diese Mangelsituationen durch zwei vom Menschen beeinflusste Prozesse: Zum einen ist die Nährstoffzufuhr in den letzten 100 Jahren angestiegen, so daß große Mengen von Nährstoffen für das pflanzliche und tierische Wachstum zur Verfügung stehen. Ein Teil der Organismen sinkt nach dem Absterben in die tieferen Wasserschichten und wird dort unter Sauerstoffverbrauch abgebaut. Sauerstoff gelangt in diese Bereiche nur während sogenannter Salzwassereinbrüche, die immer seltener beobachtet werden. Mögliche Gründe dafür könnten erste Auswirkungen einer Klimaänderung (SCHINKE 1996; SCHINKE & MATTHÄUS 1998), aber auch Talsperrenbauten im Einzugsgebiet der in die Ostsee mündenden Flüsse sein (CARLSSON & SANNER 1994; SCHINKE & MATTHÄUS 1998). Bei weiter abnehmender Häufigkeit der Salzwassereinbrüche könnte Schwefelwasserstoff typisch für das Tiefenwasser der Ostsee werden — ein Zustand, in dem sich das Schwarze Meer seit Jahrtausenden befindet (GERLACH 1988b).

Diese Arbeit dient der detaillierten Beschreibung der Bereiche mit geringen Sauerstoffkonzentrationen und Schwefelwasserstoff in einem Zeitraum, in dem sich das Verhältnis der Menschen in den Ostseeanrainerstaaten zur Ostsee stark verändert hat. Im Jahr 1969 wuchsen die der Ostsee zugeführten Nährstoffmengen durch den verstärkten Einsatz von Düngemitteln im Einzugsgebiet (FAO 1952-1993). Währenddessen sind die ökologischen Probleme der Ostsee stärker in das Bewußtsein der in ihrem Einzugsgebiet lebenden 85 Millionen Menschen gerückt und die Maßnahmen zur Reduzierung der Düngemittelzufuhr zeigten bereits erste Erfolge (HELCOM 1991 & 1997).

Um so interessanter scheint es, die Reaktion des Geosystems Ostsee darzustellen und die regionalen Häufigkeiten des Auftretens von Mangelzuständen abzuschätzen. Ziel dieser Arbeit ist die Beschreibung der flächenhaften Ausdehnung der Bereiche mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung in den Jahren 1969 bis 1998, die Abschätzung ihrer regionalen Häufigkeit und deren Auswirkung auf die Sedimentbildung sowie die Klassifizierung und Beschreibung ihrer zeitlichen Veränderungen.

Ich hoffe, damit zum Verständnis der oft erwähnten Mangelercheinungen beizutragen und einen Beitrag dafür leisten zu können, daß Mittel zur Sanierung der Ostsee bereitgestellt und sinnvoll eingesetzt werden - und das weitere Veränderungen im Einzugsgebiet und den Austauschgebieten zwischen Nord- und Ostsee genau durchdacht werden.

Wissenschaftliche Untersuchungen zu den Sauerstoffverhältnissen in der Ostsee gibt es viele. Hier erwähnt werden sollen die ausführlichen jährlichen Zustandsbeschreibungen von Nehring (1981 & 1990), NEHRING & FRANKE (1971, 1981a, 1981b, 1982, 1983a, 1983b, 1985a, 1985b, 1987a, 1987b & 1988), NEHRING & MATTHÄUS (1992), NEHRING et al. (1993, 1994, 1995a & 1995b) und MATTHÄUS et al. (1997 & 1998) für die Jahre 1969-1997. ANDERSIN & SANDLER (1988) faßten alle verfügbaren Daten der Jahre 1963 bis 1987 zur Darstellung der maximalen jährlichen Ausdehnung von Gebieten mit geringen Sauerstoffkonzentrationen und Schwefelwasserstoff zusammen. Ein erstes biogeochemisches Modell wurde von STIGEBRANDT & WULFF (1987) vorgestellt und in Zusammenarbeit zwischen einem schwedischen Forschungsprogramm zu großflächigen Folgen der Eutrophierung (WULFF 1991) und dem russischen "Project Baltica" (DAVIDIAN et al. 1983 & 1990; SAVCHUK 1986; SAVCHUK et al. 1988) weiterentwickelt. In dieses Modell gehen geschätzte Parameter zu biogeochemischen Austauschprozessen im Wasser und im Sediment ein, die durch ein System partieller Differentialgleichungen mit dem Finiten Differenzen-Verfahren (SOKOLOV et al. 1997) verbunden sind.

Neu an dieser Arbeit ist die detailliert geschilderte, nachvollziehbare Methodik, mit der die vierdimensional vorliegenden Datenreihen (Bild 0.1) zusammengefaßt und Karten und Vo-

lumen der sich verändernden Bereiche mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung berechnet werden. Für diese Volumenangaben können aufgrund der geostatistischen Methodik Sicherheitsintervalle angegeben werden. Neu ist auch die Zusammenfassung der regionalen Häufigkeit von Sauerstoffmangelzuständen und der Vergleich dieser Häufigkeiten mit Karten zur Ausbreitung laminiertes Sedimente. Diese Widerspiegelung der zeitlichen Veränderungen in den Sedimenten macht deutlich, wie detailliert sich die Entstehungsgeschichte aus den entstandenen Strukturen ablesen läßt. Die Sauerstoffbedingungen im Tiefenwasser beeinflussen die in Bodennähe siedelnden Pflanzen und Tiere, so daß ein aus der Meeresbiologie stammendes Schema zur Klassifizierung der zeitlichen Veränderungen genutzt werden konnte: Die Beobachtungsjahre konnten den Zuständen "Nach einem Einstromereignis", der "Frühen Stagnation" und "Späten Stagnation" zugeordnet werden. Wechsel zwischen diesen Zustandsklassen sind Folge charakteristischer Veränderungen. Deren Eintrittswahrscheinlichkeiten und die Verweildauern in den Zuständen bieten eine interessante Zusammenfassung der im Untersuchungszeitraum beobachteten Veränderungen in der Zeit.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in 5 Kapitel.

Kapitel 1 dient der Einführung in das Untersuchungsgebiet. Vorgestellt werden die wichtigsten für das Verständnis des Sauerstoffregimes notwendigen Fakten.

Im **Kapitel 2** wird ein Überblick über die Datenbasis und die Methoden zur Datensammlung, -ordnung, -projektion und -darstellung der insgesamt 381607 Datensätze gegeben.

Das **Kapitel 3** ist der detaillierten mathematischen Modellbildung und -umsetzung gewidmet. In der Natur innerhalb von 30 Jahren ablaufende Veränderungen können im Rechner durch aufeinanderfolgende Karten umrissen werden, wobei die Datensätze zu den vier Untersuchungsperioden Winter (Monate Januar bis März), Frühjahr (Monate April bis Juni), Sommer (Monate Juli bis September) und Herbst (Monate Oktober bis Dezember) eines Jahres zusammengefaßt werden. Die Modellbildung basiert auf geostatistischen Methoden, so daß ausschließlich Informationen aus den Meßdaten und deren räumlichen Beziehungen untereinander genutzt wurden. Die berechneten Karten liefern gute Anfangsbedingungen für numerische Simulationsmodelle zur Schätzung von Sauerstoffzehrungsraten.

Zur Einschätzung der Umweltbedingungen interessant ist die Abschätzung raumgebundener Häufigkeiten: Wie häufig tritt an einem bestimmten Punkt des Untersuchungsgebietes (z.B. im Bornholmbecken) Sauerstoffmangel oder Schwefelwasserstoffbildung auf? Und wie weit dehnen sich die Gebiete aus? Sauerstoff nimmt im Tiefenwasser eine Schlüsselstellung ein. Sein Auftreten beeinflußt über die am Boden lebenden Tiere die Sedimentbildung (KOOP et al. 1990). Häufige Sauerstoffmangelsituationen können zu einer Herausbildung bestimmter räumlicher Muster in den Sedimenten führen (AURADA 1992). Auf die Archivierung der zeitlichen Variabilität in Sedimentationsmustern als Kontrollmöglichkeit der berechneten Karten wird im **Kapitel 4** dieser Arbeit eingegangen.

Abschließend wurden die zeitlichen Variationen der Flächen und Volumen nach ihren Ursachen untersucht. Bestimmen die diskontinuierlich auftretenden, von MATTHÄUS und FRANCK (1992) nach ihrer Dauer und Intensität quantifizierten Einstromereignisse die Sauerstoffverhältnisse? Ist das Tiefenwasser nur ein reagierendes System - oder schafft es selbst Bedingungen zu seiner Sauerstoffversorgung? Und lassen sich die Veränderungen im Tiefenwasser zusammenfassend darstellen? - Das sind Fragen, auf die im **Kapitel 5** dieser Arbeit eingegangen werden soll.

Den Abschluß der Arbeit bilden die Zusammenfassung und das Literaturverzeichnis. Im Anhang sind die Bedingungen aller Untersuchungsperioden dokumentiert. Es können für jedes Quartal die räumliche Verteilung aller beprobten Stationen, der Meßpunkte mit geringen Sauerstoffkonzentrationen und Schwefelwasserstoff und Untersuchungen zu den Grenztiefen, an denen erstmals Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l oder Schwefelwasserstoff auftraten, nachgeschlagen werden.

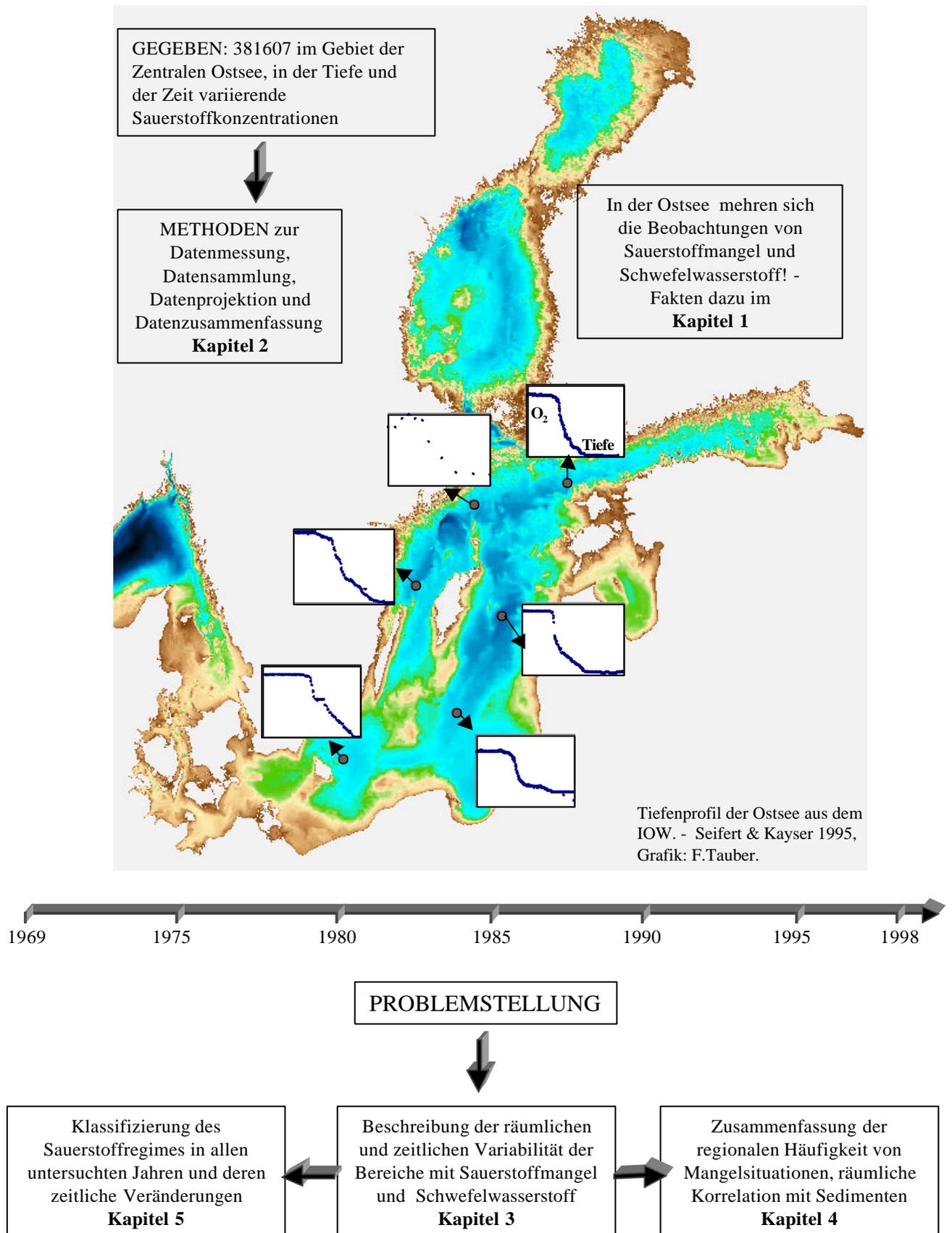


Bild 0.1: Darstellung der in den einzelnen Kapiteln behandelten Themen.

1 DIE OSTSEE – DATEN UND FAKTEN IM ÜBERBLICK

Die Ostsee gehört zu den größten Brackwassermeeren der Erde. Die geologischen Strukturen im Untergrund und die Gletscherdynamik der letzten Eiszeit ließen eine Reihe von Schwellen und Becken entstehen. Ihr Wasserhaushalt wird im wesentlichen durch die sehr schmalen Dänischen Meerengen und flachen Schwellen im Übergangsbereich zur Nordsee bestimmt. In diesem vorgegebenen Rahmen (Bild 1.1) steuern die in das System gelangenden Eingangsgrößen die Sauerstoffbedingungen in den verschiedenen Tiefenschichten. Die heute beobachteten Veränderungen des Sauerstoffregimes durch die 85 Millionen Menschen im Einzugsgebiet der Ostsee werden diskutiert.

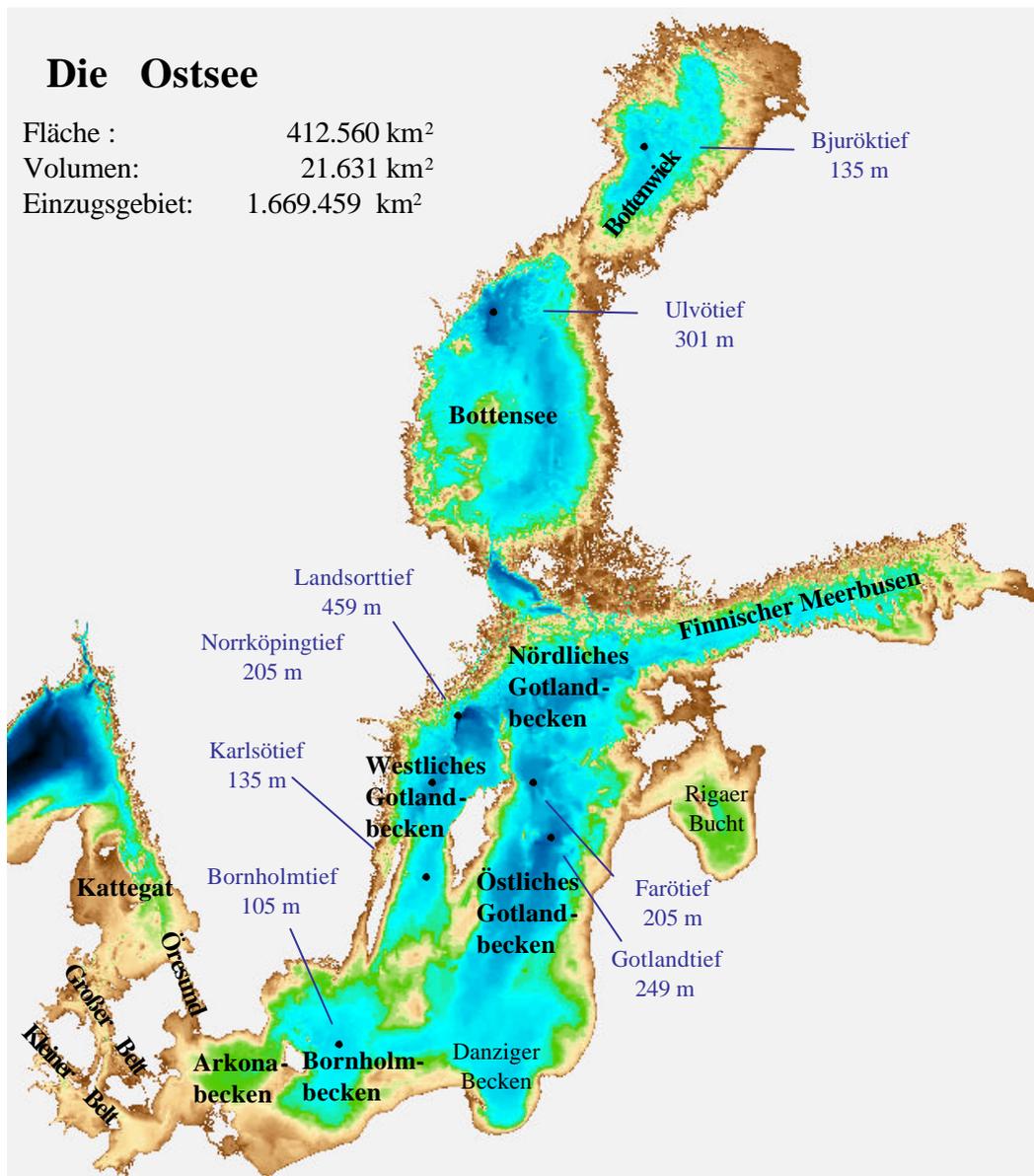


Bild 1.1: Die Bodentopographie (SEIFERT & KAYSER 1995) der Ostsee, Beckeneinteilung nach WATTENBERG (1949), Daten aus HELCOM (1990 & 1996) und Tiefenangaben nach HUPFER (1984).

1.1 Entwicklungsgeschichte der Ostsee

Als Beginn der nacheiszeitlichen Entwicklung kann man den Höhepunkt der Weichseleiszeit vor ca. 20000 Jahren betrachten. Es entwickelten sich räumliche Strukturen, die den Rahmen für die heute ablaufenden Prozesse bilden. So entstand im Wechselspiel von eustatischem Meeresspiegelanstieg und isostatischem Landhebungsprozess die heutige Ostsee als Brackwassermeer.

Der Süd- und Südwestteil der Ostsee (Kattegat, Beltsee, Arkonasee) liegt auf der Westeuropäischen Plattform, die in der kaledonischen Gebirgsbildung entstand und in späteren Gebirgsbildungen wieder zerbrach. Die mittleren, östlichen und nördlichen Bereiche (Bornholmsee, Gotlandsee, Bottensee, Bottenwieck und Finnischer Meerbusen) gehören zur Osteuropäischen Plattform. Sie sind tektonisch weitgehend stabil und durch regionale Bruchstörungen gekennzeichnet (NIEDERMEYER 1996).

Das weichselzeitliche Inlandeis erreichte mit dem Brandenburger Stadium vor ca. 20000 Jahren seine Maximalausdehnung. Während des Eisvorstoßes schufen die in geologisch vorgegebenen Bruchzonen vorrückenden Gletscher die tiefen Becken im Norden und Osten: das Arkona- und Bornholmbecken und das Gotlandbecken mit dem Gotland-, Farö- und Landsorttief. In den südlichen Bereichen sammelte sich der Glazialschutt (NIEDERMEYER 1996). Die tiefen Becken sind durch Schwellenbereiche wie die Darßer-, Stolper- und Åland-Schwelle voneinander getrennt.

Mit dem Abschmelzen und Zurückweichen des Inlandeises entstanden zwischen dem Eiskörper und dem damaligen Festlandsbereich erste, sich ständig vergrößernde Süßwasserseen. Das Tauwasser sammelte sich zuerst in isolierten Eisstauseen, aus denen sich der Baltische Eisstausee (12500-10000 BP¹) entwickelte. Die holozänen Entwicklungsstadien der Ostsee umfassen mehrere Süß- und Salzwasserstadien. Mit dem Schrumpfen der Gletscher drang salziges Wasser über die Mittelschwedische Senke in das Ostseebecken ein – es entstand das Yoldiameer² (10000-9250 BP). Die Erdkruste hob sich als Folge der Eisentlastung und schnitt die "Ostsee" von den Ozeanen ab. Das Wasser süßte zum Ancylussee³ (9250-7100 BP) aus. Später hob sich der Meeresspiegel und Nordseewasser konnte erneut einströmen - diesmal über Kattegat und die Beltsee (Litorinameer⁴ 7100-4000 BP). In den letzten 4000 Jahren setzte eine leichte Aussüßung ein, die Leitformen wechselten zum Limneameer⁵ (4000-1500 BP) und heutigen Myameer⁶ (1500 BP bis zur Gegenwart) (KÖSTER 1995). Mit dem Abschmelzen des Inlandeiskörpers erhöhte sich weltweit der Wasserspiegel der Meere. Gleichzeitig bewirkte die Entlastung der Erdkruste Ausgleichsbewegungen mit Landhebungen in den nördlichen Bereichen und einer Verschiebung der Ostsee Richtung Süden.

Die geologischen Prozesse, die zur Bildung der Ostsee geführt haben, sind bis heute nicht abgeschlossen: im Bereich des Bottnischen Meerbusens werden Landhebungsbeträge von 9 cm in 100 Jahren beobachtet (EKMAN 1988, zit. in JANKE 1996). Im südlichen Ostseeraum tritt eine leichte Landsenkung auf (ROSSITER 1967, zit. in KÖSTER 1995). Diese isostatischen Ausgleichsbewegungen der Erdkruste im Ostseeraum und der für die Zukunft zu erwartende Meeresspiegelanstieg (nach einer Prognose des "Wissenschaftlichen Beirates der Bundesregierung" vom Juni 1993 um 35-65 cm im kommenden Jahrhundert) führen zu Verschiebungen der Küstenlinien.

Die in der Geschichte der Ostsee entstandenen Sedimente geben Auskunft über phasenhafte Veränderungen des Klimas, der Vegetation, der Landoberfläche, aber auch ozeanographischer Merkmale wie der Salinität und des Sauerstoffgehaltes. In den Schlickgebieten entste-

¹ Before Present

² benannt nach der Salzwasser-Muschel *Portlandia (Yoldia) arctica*

³ benannt nach der Süßwasser-Schnecke *Ancylus fluviatilis*

⁴ benannt nach der Strandschnecke *Littorina littorea*

⁵ benannt nach der Brackwasserschnecke *Limnea ovata*

⁶ benannt nach der Sandklaffmuschel *Mya arenaria*

hen in Stagnationsphasen, in denen die Sauerstoffkonzentrationen zurückgehen, nach dem Absterben der Bodenfauna durch innerhalb eines Jahres wechselnde Sedimentationszusammensetzungen Feinschichtungen (Laminierungen) in den Sedimenten. Aus diesen lassen sich, da sie über längere Zeit kaum Umlagerungsprozessen ausgesetzt waren, Schlüsse auf die Entstehungsgeschichte der Ostsee ziehen. Sauerstoffbedingungen früherer Jahrzehnte und Jahrhunderte können so rekonstruiert werden. Im Kapitel 4 soll am Beispiel laminierter Sedimente gezeigt werden, inwieweit über längere Zeiträume wirkende Sauerstoffbedingungen spezielle räumliche Muster in der Sedimentation bedingen.

1.2 Beckenstruktur und Hydrologie

Die Ostsee ist ein Nebenmeer des Atlantischen Ozeans. Mit einer Fläche von 413000 km², einem Wasservolumen von 21600 km³ und einer mittleren Wassertiefe von 52 m ist sie das größte Brackwassermeer der Erde. Ihr Einzugsgebiet ist etwa viermal so groß.

Der Wasseraustausch zwischen Ostsee und Nordsee vollzieht sich ausschließlich über drei Meerengen: den Kleinen (9%) und Großen Belt (64%) und den Öresund (27%) (GERLACH 1994, S. 134). Die flachsten Stellen des Übergangsbereiches sind die Darßer Schwelle zwischen der Halbinsel Fischland-Darß-Zingst und der dänischen Insel Falster mit 18 m und die Dogden Schwelle zwischen Dänemark und Schweden mit 7 m Satteltiefe. Der Wasseraustausch mit der Nordsee verläuft über einen Querschnitt von nur 0.4 km². Folgen dieses eingeschränkten Wasseraustausches sind lange Verweilzeiten, die im Mittel 35 Jahre betragen (KULLENBERG & JAKOBSEN 1981; BERGSTRÖM & CARLSSON 1994).

Das untermeerische Relief ist durch die Existenz mehrerer Becken geprägt, welche durch Schwellen voneinander getrennt sind (Bilder 1.1 und 1.2). Wassertiefen von mehr als 200 m sind auf eng begrenzte Bereiche beschränkt. Das Teilbecken mit der größten mittleren Wassertiefe ist das östliche Gotlandbecken. Die tiefste Stelle liegt südlich von Stockholm im Landsorttief bei 459 m.

Wichtig für das Gesamtsystem sind die die Becken trennenden Schwellen und deren maximale Tiefen, welche den Wasseraustausch und damit eine Vielzahl von physikalischen und chemischen Prozessen regeln. Diese Satteltiefen stellen die tiefsten Verbindungen zwischen benachbarten Becken dar - die wichtigsten sind in Bild 1.2 gegeben.

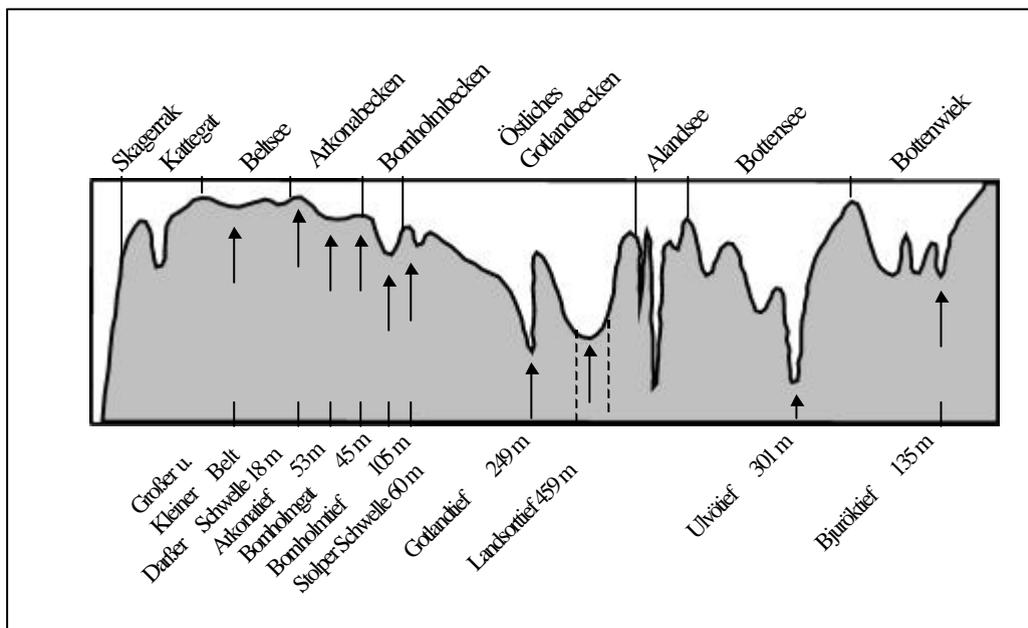


Bild 1.2: Bodenprofil durch die tiefen Becken der Ostsee (DIETRICH & KÖSTER 1974).

In dieser Arbeit werden die folgenden Teilbereiche untersucht, die gewöhnlich als Zentrale Ostsee (englisch "the Baltic Proper") bezeichnet werden. Diese umfaßt 210000 km² mit 13000 km³ Wasser:

- ?? das 53 m tiefe Arkonabecken mit der Beltsee,
- ?? das muldenförmige, 102 m tiefe Bornholmbecken und die Stolper Schwelle,
- ?? das östliches Gotlandbecken mit dem Danziger Becken (110 m), dem Gotlandtief (249 m), dem Farötief (205 m) und dem Rigaer Meerbusen,
- ?? das westliches Gotlandbecken mit dem Norrköpingtief (205 m), dem Karlsötief (110 m) und dem tiefsten Becken der Ostsee, dem Landsorttief (459 m) und
- ?? das Gebiet nördlich der Insel Gotland mit dem nördlichen Zentralbecken (220 m) und dem Übergang zum Finnischen Meerbusen.

1.3 Ostseespezifische Besonderheiten des Wasserhaushaltes

Temperatur und Salzgehalt werden in der Ostsee durch den hohen Flußwasserzustrom und den stark eingeschränkten Wasseraustausch mit der Nordsee bestimmt. Der Flußwasserüberschuß bewirkt eine ganzjährig Richtung Nordsee orientierte Strömung von salzärmerem Wasser in der Oberwasserschicht. Die Druckunterschiede zwischen Ostsee und Nordsee bedingen eine salzreiche Gegenströmung im Tiefenwasser. Da sich Ober- und Tiefenwasser auch in ihren Temperaturen unterscheiden, entsteht eine ganzjährige thermohaline Schichtung. Eine Salzgehaltssprungschicht oder Halokline trennt das spezifisch leichtere, salzärmere Oberwasser und das salzreiche, schwerere Tiefenwasser und verhindert einen Austausch zwischen den Wasserschichten. Die Wasserbilanz der Ostsee wird in Bild 1.3 zusammengefaßt.

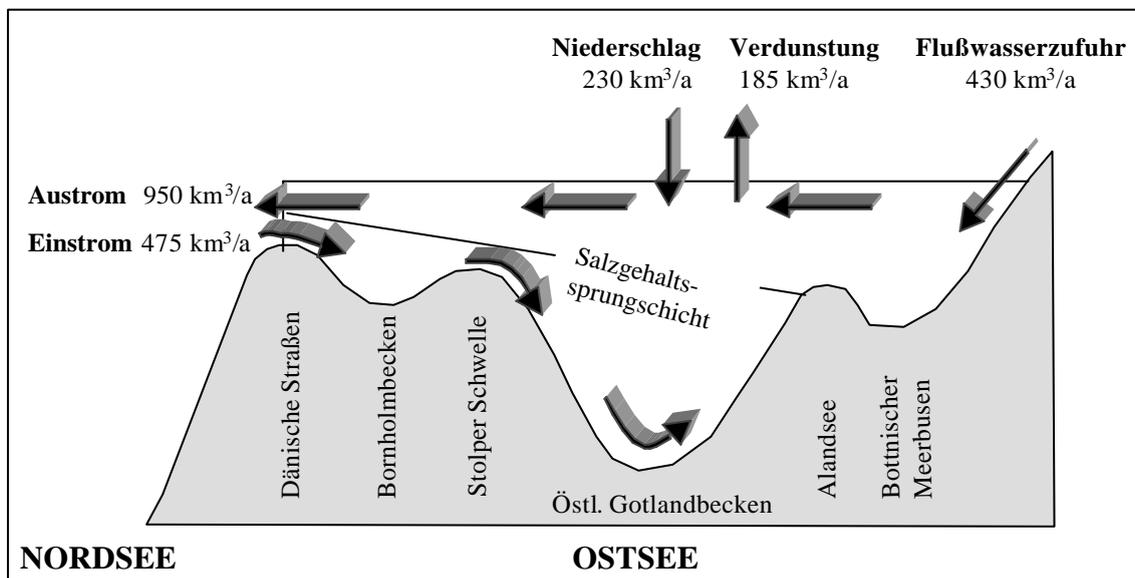


Bild 1.3: Wasseraustausch und Schichtung der Ostsee (v.BODUNGEN 1999, bearbeitet)

Das Oberwasser ist meist gut durchmischt. Der Salzgehalt des Brackwassermeeres nimmt von Westen nach Osten ab. Er sinkt von 25-15 PSU⁷ in den Belten, im Sund und in der Beltsee auf 8-6 PSU in der zentralen Ostsee und ca. 2 PSU im Finnischen und Bottnischen Meerbusen. Mit den abnehmenden Salzgehalten in der gesamten Wasserschicht sinkt auch die

⁷ Practical Salinity Unit - 1PSU entspricht einem Salzgehalt von 1 ‰.

Schichtungsstabilität, so daß ein Austausch über die Sprungschicht in den nordöstlichen Bereichen möglich wird.⁸

Das Oberflächenwasser weist charakteristische Jahresgänge von Temperatur, Salz- und Sauerstoffgehalt auf, die vorrangig von meteorologischen und biologischen Faktoren bestimmt werden (MATTHÄUS 1976). Tiefgreifende Veränderungen im Tiefenwasser sind nur durch einen Austausch in Wasserschichten vergleichbarer Dichte (und damit auch Tiefe) möglich. Diese Horizontalzirkulation wird jedoch durch die flachen Schwellen zwischen den Becken behindert. Kleinere Mengen einströmenden Nordseewassers werden meist vor dem Bornholmgat oder der Stolper Schwelle gestoppt.

In den tiefen Becken kommt es zu Stagnationsperioden, in denen Salz- und Sauerstoffkonzentrationen abnehmen. Diese können nur durch den Einstrom größerer Mengen von salzreichem Wasser aus der Nordsee unterbrochen werden, die als Salzwassereinträge bezeichnet werden. Das einströmende Tiefenwasser breitet sich seiner Dichte entsprechend in den tieferen Wasserschichten aus: es folgt zunächst dem Talweg in die Ostsee durch das Arkona- und Bornholmbecken, erreicht das Danziger und östliche Gotlandbecken und umrundet die Insel Gotland über die nördlichen Zentralbereiche bis in die westlichen Becken. Bei sehr intensiven Einströmen gelangt eine Menge von über 100 km³ salzreichen Wassers (Salzgehalt > 17 PSU) in das Tiefenwasser der Ostsee (MATTHÄUS 1996). Dies kann zu einer Erneuerung des Tiefenwassers führen, wenn die eindringenden salzreicheren und damit schwereren Wassermassen die alten und stagnierenden anheben. Die Intensität dieser Strömung nimmt mit zunehmender Entfernung von den Ostseezugängen ab und wird durch die kaskadenförmig angeordnete Beckenstruktur behindert. Bild 1.4 zeigt die seit 1897 beobachteten Salzwassereinträge mit ihren Intensitätsindizes (MATTHÄUS & FRANCK 1992).

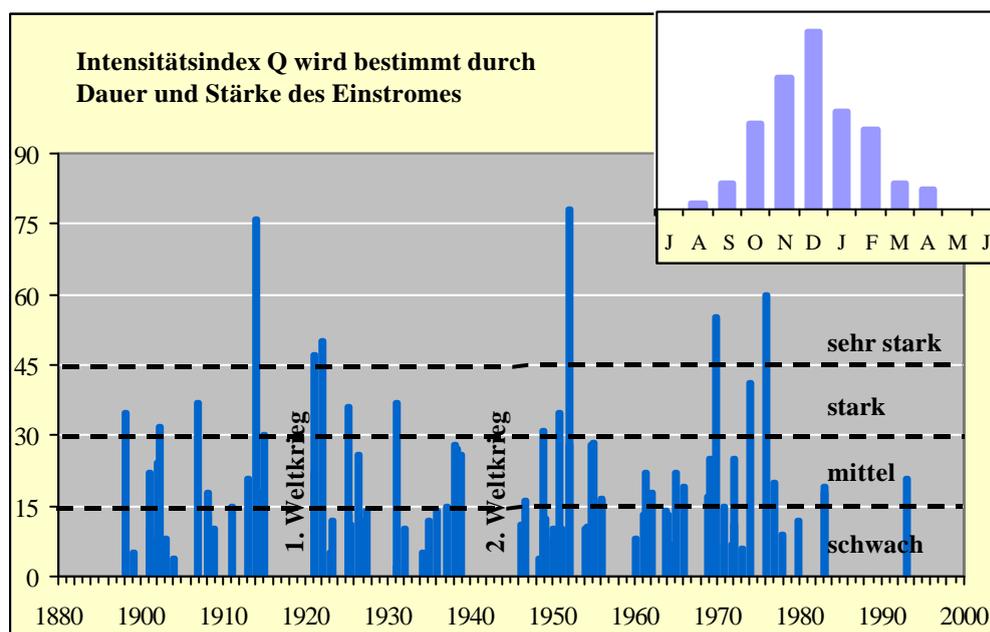


Bild 1.4: Zeitliche Verteilung und Intensität der Salzwassereinträge im Zeitraum 1897-1998 und jahreszeitliche Verteilung der Einstromereignisse in der Einstromsaison.⁹ (nach MATTHÄUS & SCHINKE 1999).

⁸ Es wird vermutet, daß die thermische Konvektion, windbedingte Durchmischungen und Bodenströmungen aus der nördlichen Ostsee das Tiefenwasser im Landsortbecken und westlichen Gotlandbecken unter der Halokline beeinflussen (NEHRING & FRANCKE 1981a; MATTHÄUS 1978a).

⁹ Alle Einstromereignisse fanden zwischen Ende August und Ende April statt. Dieser Zeitraum wird häufig als Einstromsaison bezeichnet (MATTHÄUS & SCHINKE 1999).

Bis Mitte der 70er Jahre traten Salzwassereinströme relativ häufig auf. Es ist möglich, ihr Auftreten bis in das letzte Jahrhundert zurückzuverfolgen. Seitdem ist ihre Häufigkeit zurückgegangen und zwischen 1983 und 1992 hat es kein derartiges Ereignis gegeben (MATTHÄUS & LASS 1995). Nach dieser Stagnationsperiode wurde nur ein Einstrom von salz- und sauerstoffreichem Wasser in das Tiefenwasser im Januar 1993 beobachtet (MATTHÄUS & LASS 1995; SCHINKE & MATTHÄUS 1998).

Eine Darstellung des Gesamtsystems Ostsee wird in MAGAARD & RHEINHEIMER (1974), HUPFER (1984), VOIPIO (1981) und RHEINHEIMER (1996) gegeben. Einen Überblick über aktuelle Veränderungen geben 90 Autoren in einem von LOZAN, LAMPE, MATTHÄUS et al. (1996) herausgegebenen Sammelwerk.

1.4 Das Sauerstoffregime

In der Oberwasserschicht werden die Sauerstoffverhältnisse vom Jahresgang des Salzgehaltes und der Temperatur bestimmt. Maximale Sauerstoffkonzentrationen treten während der Frühjahrsblüte des Phytoplanktons auf. Große Mengen assimilierten Sauerstoffs werden an das Wasser abgegeben und nur allmählich mit der Atmosphäre ausgetauscht. Das Phytoplankton (Phyto = Pflanze, Plankton = das Treibende) umfaßt mit den mikroskopisch kleinen, im Oberflächenwasser schwebenden Algen die wichtigsten Produzenten von organischem Material im Meer (SMETACEK 1991). Der Assimilationsprozeß ist auf die lichtdurchflutete (euphotische) Schicht begrenzt, die je nach Klarheit des Wassers 4-8 m in Küstengewässern und 20-30 m in der offenen Ostsee erreichen kann (NAUSCH & LOCHTE 1999). In windarmen Witterungsperioden können Sauerstoffsättigungswerte von 150%, in den Küstenzonen sogar von über 200% auftreten (NEHRING 1995a). Der mikrobielle Abbau der organischen Substanz findet in der gesamten Wassersäule statt. Die Primärproduktion wird auf jährlich über 150 g C/m² geschätzt, von der 25-30% teilweise abgebaut den Meeresboden erreichen (ELMGREN 1984). Dort dient das abgelagerte Material den Bakterien und bodenlebenden Tieren als Nahrung. Sie benötigen für ihre Atmung Sauerstoff. Ihr Sauerstoffbedarf steigt mit der Menge des vorhandenen organischen Materials.

Die tiefen Becken stellen eine Senke für Nährstoffe und organische Stoffe dar. In ihnen übersteigt der Verbrauch an Sauerstoff dessen Nachschub, denn die Sauerstoffzufuhr ist durch eine thermohaline Sprungschicht und die flachen Schwellen eingeschränkt. Diese Verhältnisse sind für die tiefen Becken der zentralen Ostsee - das Arkona- und Bornholmbecken, das Danziger Becken, das östliche, nördliche und westliche Gotlandbecken typisch. Auch in einigen flachen Teilgebieten der Ostsee wie der Mecklenburger und Kieler Bucht kann es bei ausgeprägten spätsommerlichen Hochdrucklagen zu niedrigen Sauerstoffkonzentrationen und zur Bildung von Schwefelwasserstoff kommen (EHRHARDT & WENCK 1984; HORSTMANN 1996). In diesen Gebieten erreichen die temperaturbedingten vertikalen Durchmischungen im Herbst den Meeresboden und die bodennahen Wasserschichten werden mit Sauerstoff versorgt.

In die tiefen zentralen Becken gelangt nur während der Salzwassereinströme eine ausreichende Menge an sauerstoffreichem Wasser. In den Stagnationsperioden zwischen den Einstromereignissen wird durch die biologischen Aktivitäten der vorhandene Sauerstoff oft vollständig aufgezehrt. Dann verschiebt sich die Grenze zwischen oxischen und anoxischen Verhältnissen im Sediment nach oben und erreicht die Sedimentoberfläche. Sauerstoffmangel tritt dann auch im Wasser über dem Sediment auf. Höhere Tiere können den Sauerstoffmangel nur kurze Zeit tolerieren und sterben ab oder wandern aus. Viele Gruppen von Bakterien sind auf ein Leben ohne Sauerstoff eingerichtet, so daß Bakteriengemeinschaften entstehen, die am Meeresboden dichte, durch eingelagerten Schwefel weiß gefärbte Matten bilden (NAUSCH & LOCHTE 1999). Bei geringen Sauerstoffkonzentrationen kommt es zuerst zur Denitrifizierung: Nitrat und Nitrit übernehmen die Rolle des Oxidationsmittels bei mikrobiellen Abbauvorgängen und es entsteht molekularer Stickstoff. Weitere Sauerstoffdonatoren,

die im Meerwasser den Sauerstoff liefern können, sind Sulfat und Kohlendioxid, in Sedimentnähe auch die Oxide von Eisen und Mangan (NEHRING 1995a). Durch die mikrobielle Reduktion von Sulfat entsteht Schwefelwasserstoff (H_2S), der für Tiere toxisch ist (Bild 1.5).

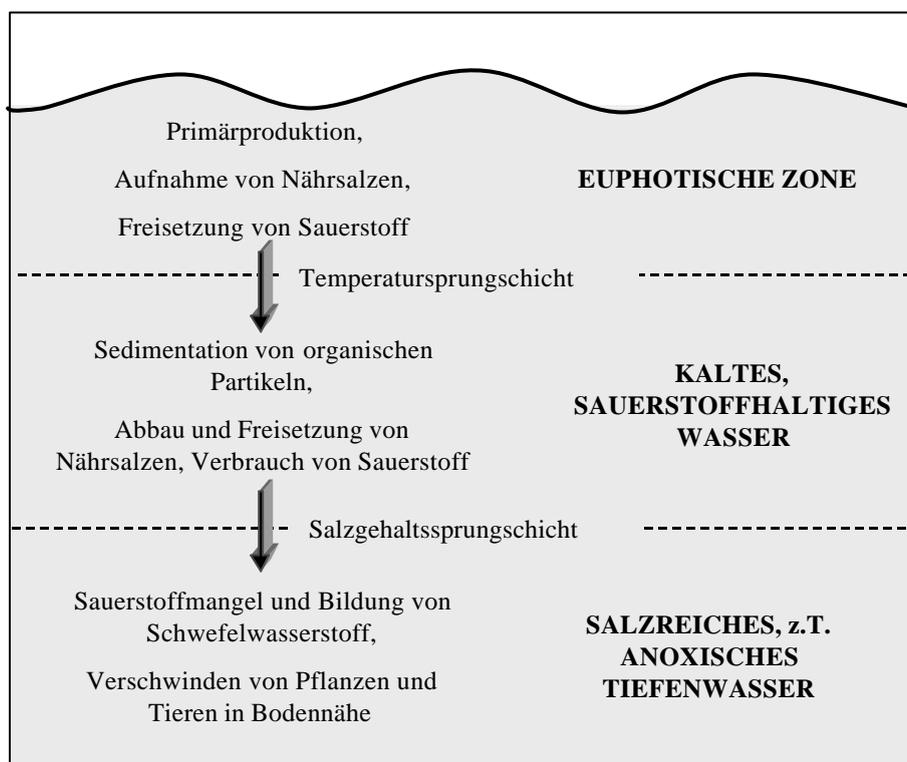
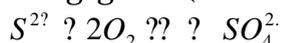


Bild 1.5: Entstehung von Sauerstoffmangel im Tiefenwasser der Ostsee (nach NAUSCH & LOCHTE 1999, bearbeitet).

Sauerstoff nimmt im Tiefenwasser der zentralen Ostsee eine Schlüsselstellung ein. Die Sauerstoffbedingungen beeinflussen das Benthische Ökosystem (ANDERSIN et al. 1978; ANDERSIN & SANDLER 1991; LAINE et al. 1997), die Nährstoffverhältnisse (NEHRING 1987 & 1989), den Abbau organischer Substanz und damit die Sedimentbildung und -ablagerung. (EMELJANOV 1988; KOOP et al. 1990; GLASBY et al. 1997). Sauerstoffmangel im Tiefenwasser schränkt die Reproduktionsmöglichkeiten mancher Fischarten ein. Die Laichgebiete des Dorschs, dessen Eier bei Sauerstoffkonzentrationen unter 2.3 ml/l und Salzgehalten über 10.5-11 PSU absterben, liegen in den tiefen Becken der zentralen Ostsee (BLAGGE et al. 1994). Mittels Korrelationsanalysen wurde die Abhängigkeit der Reproduktionsraten von den beobachteten Sauerstoffkonzentrationen (BERNER et al. 1988 & 1989) und der Größe des Reproduktionsgebietes mit günstigen Sauerstoff- und Salzkonzentrationen (PLIKHS et al. 1993) untersucht. Sauerstoff und Schwefelwasserstoff kommen nur kurzzeitig nebeneinander vor. Die Halbwertszeiten liegen laut MILLERO (1986) bei 0.5 bis 2 Stunden. Unter natürlichen Bedingungen kann daher das gleichzeitige Auftreten beider Gase ausgeschlossen werden. In dieser Arbeit werden Schwefelwasserstoffkonzentrationen entsprechend der Redoxgleichung in negativen Sauerstoffäquivalenten angegeben (NEHRING 1995b).



Da zusätzlich auch andere Oxydationsprozesse ablaufen, sollten die Sauerstoffäquivalente nur als Näherungswert des tatsächlichen Sauerstoffbedarfs angesehen werden.

1.5 Veränderungen durch den Menschen

Der Mensch greift heute in die Prozesse ein, die die Sauerstoffversorgung des Tiefenwassers regeln - aber es ist schwierig, zwischen den Folgen natürlicher Fluktuationen und menschlicher Aktivitäten zu unterscheiden (MATTHÄUS 1995).

In den letzten Jahren mehren sich die Hinweise darauf, daß die durch die Flußregulierungen bedingte jahreszeitliche Verschiebung der Flußwasserzufuhr die Bedingungen für einen intensiven Einstrom von Salzwasser verschlechtert (CARLSSON & SANNER 1994; SCHINKE 1996; SCHINKE & MATTHÄUS 1998; GUSTAFSSON 2000; MATTHÄUS & SCHINKE 1999). Die durch den anthropogenen Klimawandel bedingten Veränderungen können gegenwärtig noch nicht abgeschätzt werden. Eine verstärkte atmosphärische Zirkulation transportierte in den letzten Jahren verstärkt feuchte Luftmassen vom Nordatlantik nach Mitteleuropa und führte damit zu erhöhten Niederschlägen über der Ostsee-Region. Der Zeitraum zwischen 1981 und 1990 wird als feuchtester seit 1920 angesehen (BERGSTRÖM & CARLSSON 1994).

Seit der Jahrhundertwende entwickelte sich die Ostsee von einem oligophen in ein mesotrophes Meer (LARSSON et al. 1985). Ursache der Eutrophierung (griechisch eu- = gut, trophe = die Ernährung) ist eine zunehmende Versorgung mit Stickstoff- und Phosphatverbindungen. Die Phosphatfracht erhöhte sich in den letzten hundert Jahren um den Faktor acht, die Stickstofffracht um den Faktor vier (LARSSON et al. 1985). Dies bewirkte ein gesteigertes Algenwachstum im Oberwasser und wachsende Mineralisierungsraten mit erhöhtem Sauerstoffbedarf im Tiefenwasser (Bild 1.6).

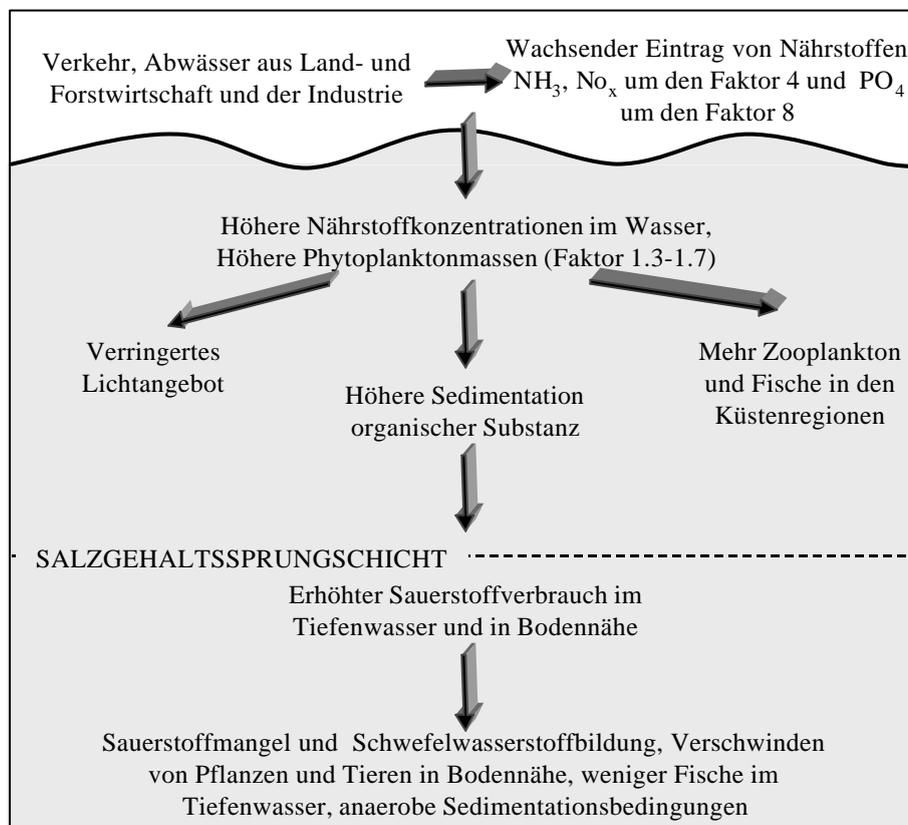


Bild 1.6: Zusammenfassung der Auswirkung von Eutrophierung auf das marine Ökosystem (v. BODUNGEN 1999), quantitative Angaben nach LARSSON et al. (1985), ELMGREN (1989) und CEDERWALL & ELMGREN (1980).

Der zunehmende Einsatz von Düngemitteln in den 60er Jahren spiegelte sich mit einem zeitlichen Verzug von 5 bis 10 Jahren in erhöhten winterlichen Nährstoffkonzentrationen wider (NAUSCH & LOCHTE 1999). Erfolge der seit Beginn der 90er Jahre abnehmenden Nährstoffeinträge werden ebenfalls zeitlich verzögert erwartet. Erstmals 1997 zeigten die Winterkonzentrationen des Phosphats eine abnehmende Tendenz (MATTHÄUS et al. 1998). Der Bau moderner Abwasserbehandlungsanlagen führte zu einer schnellen Abnahme der Phosphat-einleitungen, die zum großen Teil aus punktuellen Quellen stammen.

Die Primärproduktion der Ostsee ist jedoch mit Ausnahme des Bottnischen Meerbusens nitratlimitiert und wird vorrangig durch zusätzliche Stickstoffeinträge beeinflusst. Stickstoff wird dem Meer aus diffusen anthropogenen Quellen wie der Landwirtschaft und dem Verkehr zugeführt. Verbesserungen sind nur durch drastische Maßnahmen in der Tierhaltung und insbesondere in der Güllelagerung, -ausbreitung und -entsorgung möglich. Dieses gilt

sowohl für das Flußwassereinzugsgebiet als auch für den viel größeren atmosphärischen Einzugsbereich, zu dem auch Länder gehören, die nicht unmittelbar an die Ostsee angrenzen (HORSTMANN 1996). Eine zweite Quelle der Belastung ist der Kraftverkehr. Stickoxide aus den Abgasen verwandeln sich durch Reaktion mit der Luftfeuchtigkeit zu Nitraten und gelangen mit dem Niederschlag in die Ostsee (LOZAN et al. 1996).

Infolge der langen Verweilzeiten des eingeströmten Wassers ist der Stoffaustrag aus der Ostsee äußerst gering. Viele Stoffe werden in das Tiefenwasser und die Sedimente verlagert und reichern sich dort an. Ist dort Sauerstoff vorhanden, wird Eisenphosphat ausgefällt und sedimentiert. Bei erneut einsetzendem Sauerstoffmangel können die sedimentierten Substanzen wieder gelöst werden und so lange im Tiefenwasser verbleiben.

Besorgniserregend ist, wie schnell nach dem Einstromereignis 1993 und weiteren geringen Zuströmen im Jahr 1994 die Sauerstoffkonzentrationen in den tiefen Becken zurückgingen. Bereits 1995 war der Meeresboden in weiten Bereichen der tiefen Becken wieder von Schwefelbakterien überdeckt. Dies läßt vermuten, daß eine früher vorhandene Pufferkapazität des Systems aufgebraucht ist. Es ist zu befürchten, daß sich die Bedingungen in der Ostsee denen im Schwarzen Meer annähern, in dem ständig Schwefelwasserstoff im Tiefenwasser vorhanden ist (GERLACH 1988b).

Wachsende Nährstoffzufuhr führt auch in anderen landumschlossenen Meeresgebieten wie der Deutschen Bucht (SCHÄFER 2000), dem Golf von Mexiko (RABALAIS 1999) und der Chesapeake-Bucht (ULANOWICZ & WULFF 1991) zum Auftreten von Schwefelwasserstoff in den tieferen Wasserschichten. "Schwarze Flecken" mit Schwefelwasserstoff als Folge der Eutrophierung wurden auch im Wattenmeer der Nordsee beobachtet (WILKE 2000).

2 METHODEN

In diesem Kapitel werden die methodischen Aspekte dieser Arbeit diskutiert. Die Probenahme und Messung erfolgte auf Forschungsschiffen der Ostseeanrainer. Diese Daten wurden in der Baltic Environmental Database (BED-Datenbank) gesammelt. Aus der Datenbank konnte ich Sauerstoffdaten entnehmen, eine Datenbank aufbauen und diese für die Auswertungen und Berechnungen nutzen. Die hier beschriebene Koordinatentransformation und die geostatistischen Verfahren bilden die theoretischen Grundlagen der flächenhaften Darstellung der Sauerstoffbedingungen im Kapitel 3.

2.1 Methodik der Probenahme

Ozeanographische Beobachtungsdaten werden im allgemeinen an Forschungsschiffen oder Bojenstationen erhoben. Im Baltic Monitoring Programm der Helsinki-Kommission (HELCOM) sind Stationen und Standardtiefen festgelegt, die von den Anrainerstaaten regelmäßig beprobt werden. Zusätzlich werden im Rahmen von Forschungsprogrammen weitere Proben genommen. Ein Großteil der Daten stammt aus Standardtiefen in 0 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, 30 m, 40 m, 50 m, 60 m, 70 m, 80 m, 90 m, 100 m, 125 m, 150 m, 200 m, 250 m, 300 m, 350 m und 400 m Tiefe.

Der Sauerstoffgehalt wird allgemein in Milliliter Sauerstoff pro Liter Meerwasser bei einer Wassertemperatur von 20°C angegeben. Die klassische Methode zur Sauerstoffbestimmung basiert auf dem **Winckler-Verfahren** (WINCKLER 1888). Die Sauerstoffproben werden direkt nach der Probenahme aus dem Wasserschöpfer abgefüllt und mit Mangan-II-hydroxid und alkalischer Jodlösung versetzt (Bild 2.1).



Bild 2.1: Die Wasserproben werden nach der Probenahme mit Nansen Wasserschöpfern für die Laboruntersuchungen abgefüllt (Fotografie A.O. LAINE, Forschungsschiff Aranda).

Der Sauerstoffgehalt der Wasserprobe wird in dem nun stark alkalischen Medium durch das Mangan-II-hydroxid gebunden und es entsteht Mangan-III-hydroxid. Nachdem der Sauerstoff vollständig gebunden ist und sich ein Niederschlag gebildet hat, wird die Probe auf einen pH-Wert zwischen 2.5 und 1 angesäuert. Der Niederschlag löst sich auf und es werden Mangan-III-Ionen freigesetzt. Diese oxidieren eine dem Sauerstoffgehalt der Probe äquivalente Menge Jodid zu elementarem Jod. Zuletzt erfolgt eine tropfenweise Zugabe von Thiosulfat, wobei Jod zu Jodid reduziert und Thiosulfat zu Tetrathionat oxidiert wird. Der Endpunkt der Redox titration kann durch den Farbumschlag eines Stärkeindikator angezeigt oder mit einem Potentiometer bestimmt werden. Der Sauerstoffgehalt wird anschließend aus dem Verbrauch an Thiosulfatlösung bis zum Farbumschlag berechnet (NAUSCH 2000). Die in den Forschungsinstituten des Ostseeraums angewendeten chemischen Methoden und Verfahren zeigen eine gute Vergleichbarkeit, so daß die Analyseergebnisse verschiedener Labore gemeinsam verwendet werden können (NEHRING 1966 & GRASSHOFF 1966, zit. in

MATTHÄUS 1976). Die Standardabweichungen der nach der Winckler-Methode bestimmten Sauerstoffkonzentrationen liegen bei sorgfältiger Messung unter 0.04 ml/l (MATTHÄUS 1976).

2.2 Datensammlung und Datenbank

Forschungsschiffe aus neun Anrainerstaaten proben im Rahmen des Beobachtungsprogrammes der HELCOM (Helsinki Commission) und eigener Forschungsprogramme in der Ostsee. Diese ist heute eines der am intensivsten überwachten und erforschten Meere mit einer großen Anzahl und Vielfalt von Forschungsinstituten. Die Daten der verschiedenen Forschungsprojekte und Monitoring-Programme werden regelmäßig zusammengestellt und in der ICES (International Council of Exploration of the Sea) - Datenbank gesammelt. In den letzten Jahren wurde es durch Weiterentwicklung von Hardware und benutzerfreundlicher Software möglich, große Datenmengen auf Personalcomputern zu bearbeiten. Das Institut für Systemökologie in Stockholm stellte ein im Rahmen des Projektes "Large scale environmental effects and ecological processes in the Baltic Sea" entwickeltes, öffentlich zugängliches System zur Sammlung, flächenhaften Darstellung und Simulation ozeanographischer Daten der Ostsee zu Verfügung. Das Data Assimilation System (SOKOLOV et al. 1997) ermöglicht die Darstellung und Nutzung der in der Baltic Environmental Database (BED) (WULFF & RAHM 1991) gespeicherten Daten. Es kann mit einem dreidimensionalen hydrodynamischen Modell (ANDREJEV & SOKOLOV 1989) zur Interpolation und flächenhaften Darstellung der Daten gekoppelt werden. Die BED-Datenbank wird ständig durch Monitoringdaten der Ostseeanrainerstaaten aktualisiert.

Die Datensätze vom 1. Januar 1969 bis zum 31. Dezember 1999 des Gebietes der zentralen Ostsee konnten aus der BED-Datenbank als Paradox-Files geladen werden. Um ein plötzliches Abschneiden an den Rändern des Untersuchungsgebietes zu umgehen, wurden Daten eines größeren Gebietes (11°00' bis 26°00' östlicher Länge und 53° 00'-61°00' nördlicher Breite) in die Datenbank aufgenommen. In die Untersuchungen gingen die Sauerstoffkonzentrationen mit ihren Zeit- (Datum der Probenahme) und Raumkoordinaten (Länge, Breite- und Tiefenangaben) ein. Salzgehalte und Temperaturen sind in der Datenbank ebenfalls enthalten, gingen aber nicht in die Modellierung ein.

Die Datensätze sind in Zeit und Raum ungleichmäßig verteilt. Im Umkreis der 20, von der Helsinki-Kommission (HELCOM) festgelegten Monitoring-Stationen, und in Oberflächennähe ist eine Häufung von Messungen zu beobachten. Eine sehr hohe Probedichte liegt im Kattegat, der Beltsee, im Arkonabecken und abgeschwächt im Bornholmbecken vor. Die östlichen Küstenabschnitte, die nördlichen Bereiche und flachere Schwellengebiete des Gotlandbeckens sind in der BED-Datenbank nur schwach repräsentiert.

Für den Zeitraum 1970-1990 konnten alle Daten der BED- Datenbank in die Untersuchungen einbezogen werden. Zur Nutzung der aktuelleren Daten für die Jahre 1991-1998 und das Jahres 1969 stellte ein große Zahl der in der Ostsee probenden Institute ihre Daten zur Verfügung. ¹ Nach Abschluß der Arbeit erhielt ich umfangreiche Daten für die Jahre 1998 und 1999 vom Ozeanographischen Dienst des SMHI und dem Finnischen Institut für Meeresforschung in Helsinki. Diese Daten wurden ausschließlich in die Berechnung der Karten und Diagramme zur Ausbreitung der Sauerstoffmangelgebiete des Kapitels 3 einbezogen.

¹ Die Daten aus den folgenden Instituten wurden ausgewertet: Dänisches Umweltforschungsinstitut in Roskilde (Danish Environmental Research Institute), Institut für Ostseeforschung in Warnemünde, Institut für Meereskunde in Kiel, Ozeanographischer Dienst des SMHI, Institut für Systemökologie und Stockholmer Meereswissenschaftliches Zentrum der Universität Stockholm (Department of System Ecology and Stockholm Marine Science Center), Finnisches Institut für Meeresforschung in Helsinki (Finnish Institute of Marine Research), Finnisches Umweltforschungsinstitut in Helsinki (Finnish Environmental Institute), Institut für Meteorologie und Wasser Management in Gdynia (Institute of Meteorology and Water Management) und des Institutes für Wasserökologie der Universität Riga (Institute of Aquatic Ecology).

Für das Jahr 1998 konnten nur die Daten in die Untersuchung einbezogen werden, die bis zum 30.04.2000 in der BED-Datenbank gespeichert wurden. Zur Verwaltung der Datensätze wurde mit einem unter Delphi geschriebenen Programm (Umodell.dpr) aus den Paradox-Tabellen der schwedischen BED-Daten und den dBase-Tabellen des Instituts für Meereskunde in Warnemünde eine relationale Datenbank unter dBase aufgebaut. In einem Unterprogramm zum Datenbankaufbau (Udatenbank.pas) wird jeder neu einzutragende Meßwert darauf überprüft, ob er im Bereich der zentralen Ostsee liegt (11° E-26° E, 54° N-61° N), eine exakte Angabe zur Sauerstoffkonzentration enthält und noch nicht in der Datenbank vorhanden ist. Sind diese Bedingungen erfüllt, wird die Messung in die Datenbank aufgenommen und in die drei dBase-Tabellen Meßpunkte.dbf, Tiefenwerte.dbf und Schiffe.dbf eingetragen.

Die **Meßpunkt-Tabelle** (Tabelle 2.1) enthält Informationen zu den beprobten Stationen, zu ihrer Lage (in Länge-/Breite- und UTM-Koordinaten), zur Beckenzugehörigkeit und zur maximalen Probenahmetiefe, die an vielen Stationen der Tiefe des Meeresbodens entspricht. Diese Tabelle enthält Informationen zu insgesamt 5022 beprobten Stationen, die in den Untersuchungsperioden mit sehr verschiedenen Häufigkeiten angefahren wurden.

SpaltenName	Spaltenformat ²	Inhalte
ID	Numerisch (20,4)	Eine eindeutige, fortlaufend nummerierte Zahl zum Erkennen der Station.
Laenge	Numerisch (20,4)	Geographische Länge in Dezimalschreibweise in Grad östlicher Länge
Breite	Numerisch(20,4)	Geographische Breite in Dezimalschreibweise in Grad nördlicher Breite
UTMLong	Numerisch (20,4)	Geographische Länge auf dem 33. Meridianstreifen in UTM-Koordinaten
UTMLat	Numerisch(20,4)	Geographische Breite auf dem 33. Meridianstreifen in UTM-Koordinaten (entspricht der Entfernung zum Äquator in Meter)
MaxTiefe	Numerisch (20,4)	Maximale an der Station beprobte Tiefe
GruppeID	Numerisch (6,0)	Beschreibt die Lage der Stationen in den Becken: 1 (Arkonabecken und Beltsee), 2 (Bornholmbecken), 3 (östliches Gotlandbecken, Danziger Becken und Rigaer Meerbusen), 4 (westliches Gotlandbecken), 5 (nördliches Gotlandbecken), 0 (keine Zuordnung - Randbereiche, Übergang zum Kattegat und zum Finnischen und Bottnischen Meerbusen).

Tabelle 2.1: Grundaufbau der Meßpunkt-Tabelle

Die Beckeneinteilung der Stationen wurde in Anlehnung an die in Bild 1.1. dargestellten natürlichen Gliederung nach WATTENBERG (1949) entworfen und erfolgte aus den Länge- und Breitenkoordinaten nach folgendem Algorithmus :

```

GruppeID:=0; {Anfangswert}
if (54 ≤ Breite ≤ 55 and 11 ≤ Laenge ≤ 15) or (55 ≤ Breite ≤ 56 and 11 ≤ Laenge ≤ 15-Breite+55) then
GruppeID:=1; {Arkonabecken und Beltsee}
if (54 ≤ Breite ≤ 55 and 15 ≤ Laenge ≤ 18) or (55 ≤ Breite ≤ 56.2 and Breite+55 ≤ Laenge ≤ 18) then
GruppeID:=2; {Bornholmbecken}
if (54 ≤ Breite ≤ 57 and 18 ≤ Laenge ≤ 26) or (57 ≤ Breite ≤ 58.5 and 18+Breite-57 ≤ Laenge ≤ 26) then
GruppeID:=3; {östliches Gotlandbecken, Danziger Becken und Rigaer Meerbusen}

```

² Eine Spalte mit dem Format Numerisch (20,4) kann Zahlen bis zu einer Länge von 20 Ziffern mit maximal 4 Dezimalziffern, im Format Numerisch (6,0) können nur ganze Zahlen mit bis zu 6 Ziffern gespeichert werden.

if ($56 \leq \text{Breite} \leq 57$ **and** $16 \leq \text{Laenge} \leq 18$) **or** ($57 \leq \text{Breite} \leq 58.5$ **and** $16 \leq \text{Laenge} \leq 18 + \text{Breite} - 57$) **or** ($58.5 \leq \text{Breite} \leq 60$ **and** $16 \leq \text{Laenge} \leq 19.5 - \text{Breite} + 57$) **then** $\text{GruppeID} := 4$; {westliches Gotlandbecken}
if ($58.5 \leq \text{Breite} \leq 60$ **and** $19.5 - \text{Breite} + 57 \leq \text{Laenge} \leq 26$) **then** $\text{GruppeID} := 5$; {nördliches Gotlandbecken}
 Dabei entsprechen die Variablen *Laenge*, *Breite* und *GruppeID* den Größen aus Tabelle 2.1.
 Die **Hydrologische Tabelle** (Tabelle 2.2) enthält alle an den Meßstationen erhobenen Werte (Sauerstoff, Salzgehalt und Temperatur) und Informationen zur Qualität, zur Tiefenlage und zum Zeitpunkt der Messung. Aus den Paradox-Tabellen wurden nur Sauerstoffwerte der höchsten Qualitätsstufe (keine ungenauen oder manuell interpolierten Werte) aufgenommen. Die Tabelle *Tiefenwerte.dbf* enthält insgesamt Daten von 381607 Messungen.

SpaltenName	Spaltenformat ³	Inhalte
ID	Numerisch (20,4)	Eine eindeutige, fortlaufend nummerierte Zahl der Messung.
ORTID	Numerisch (20,4)	Die ID der beprobten Station.
Tiefe	Numerisch (20,4)	Tiefe der Beobachtung [m]
O2Wert	Numerisch (20,4)	Sauerstoff [ml/l]
QO2Wert ⁴	Numerisch (6,0)	Qualitätscode
Temp	Numerisch (20,4)	Temperatur [°Celsius]
QTemp	Numerisch (6,0)	Qualitätscode
Salz	Numerisch (20,4)	Salzgehalt [PSU]
QSalz	Numerisch (6,0)	Qualitätscode
Randwert	Boolean	Liegt ein Randwert vor?
Zeitpunkt	Date	Datum der Messung
SchiffID	Numerisch (6,0)	Eine eindeutige Zahl des beprobten Schiffes.

Tabelle 2.2: Grundaufbau der hydrologischen Tabelle

Die Datei **Schiff-Tabelle** (Tabelle 2.3) enthält Informationen zu den insgesamt 158 beprobenden Schiffen.

SpaltenName	Spaltenformat ⁵	Inhalte
ID	Numerisch (6,0)	Eine eindeutige, fortlaufend nummerierte Zahl des Schiffes.
Schiffname	String (30)	Name des Schiffes

Tabelle 2.3: Grundaufbau der Schiff-Tabellen

Die Werte in den Tabellen *Meßpunkte*, *Tiefenwerte* und *Schiffe* können nach bestimmten, mit Indizes versehenen Spalten sortiert und mit dem SQL-Befehl nach bestimmten Kriterien ausgewählt werden (Bild 2.2).

³ Eine Spalte mit dem Format Boolean enthält Wahrheitswerte Wahr/Falsch, das Format Date dient zum Speichern von Datumswerten.

⁴ Im Qualitätscode sind folgende Informationen verschlüsselt: 1 – Meßwerte der BED-Datenbank, 10 – berechnete Werte, 12 – Randwerte. Aus der BED-Datenbank wurden nur einwandfreie Meßwerte mit dem Qualitätscode 1 übernommen, die Codes 10 und 12 wurden im Verlauf der Untersuchungen vergeben.

⁵ Im Spaltenformat String (30) können beliebige Folgen aus Ziffer, Zeichen und Buchstaben mit bis zu 30 Zeichen gespeichert werden.

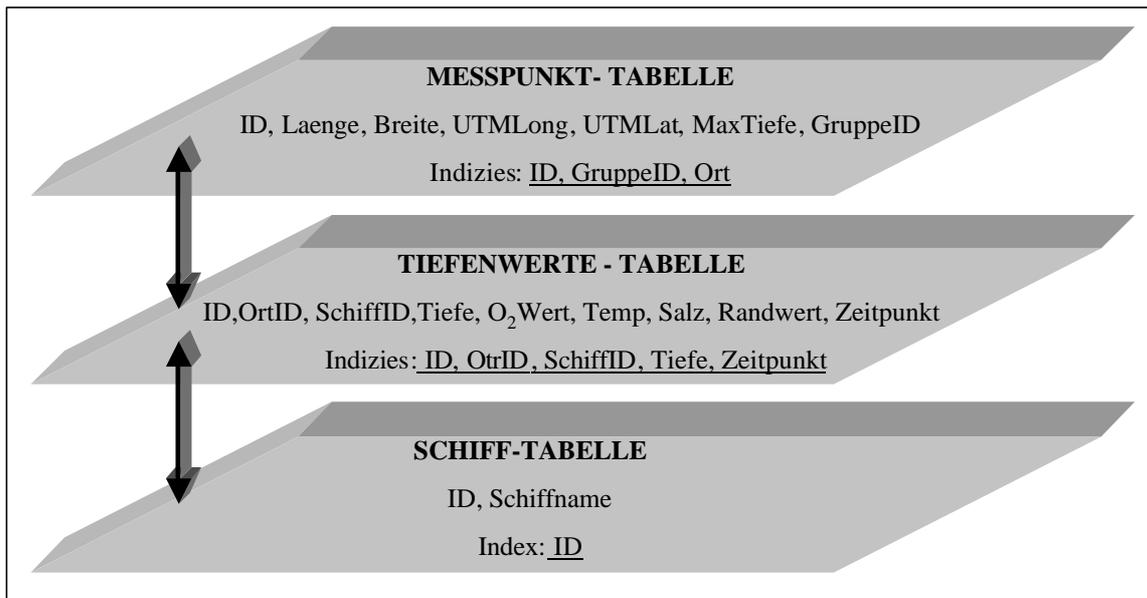


Bild 2.2: Struktur der Datenbank

In der Meßpunkt-Tabelle ist es möglich, bestimmte Stationen nach ihrer ID, ihrer Beckenzugehörigkeit (GruppeID) und einer Ortsvariablen (Ort:=Laenge*Breite) auszuwählen. Dies ermöglicht einen schnellen Überblick über alle an einer Station, in einem durch bestimmte Länge- und Breitekoordinaten begrenzten Gebiet oder einem Teilbecken vorhandenen Daten. In der Tabelle der Meßwerte können Informationen nach der tabelleninternen ID, dem Ort, der Tiefe und dem Zeitpunkt der Messung (OrtID, Tiefe und Zeitpunkt) und den probennehmenden Schiffen (SchiffID) ausgewählt werden. Die Schiffstabelle bietet eine Auswahlmöglichkeit nach den ID-Nummern. Durch die die Tabellen verbindenden Indizes OrtID und SchiffID ist es möglich, Informationen aus den verschiedenen Tabellen zu verknüpfen. Die folgende SQL-Anweisung ermöglicht die Auswahl aller an einer Station erhobenen Meßwerte im Zeitraum Anfang bis Ende und die Sortierung der durch Datumsangaben und Probenahmetiefen festgelegten Meßwerte.

```
Select Tiefenwerte.Tiefe, Tiefenwerte.O2Wert, Tiefenwerte.qO2Wert, Tiefenwerte.Zeitpunkt, Tiefenwerte.SchiffID
from Tiefenwerte
where (Tiefenwerte.OrtID=aktID) and (Tiefenwerte.Zeitpunkt>=Anfang) and (Tiefenwerte.Zeitpunkt<=CEnde)
order by Tiefenwerte.Zeitpunkt, Tiefenwerte.Tiefe.
```

Mit der Select-Anweisung können die Daten nach den indizierten Feldern aus der Datenbank ausgewählt werden. Dieser Befehl war zur Ordnung der Daten in die Untersuchungsperioden zwischen CAnfang (z.B. 1.10.1992) und CEnde (z.B. 31.12.1992) notwendig.

Für die Jahre 1969-1998 wurden in den fünf Teilbecken (Arkonabecken und Beltsee, Bornholmbecken, östliches, westliches und nördliches Gotlandbecken) je Jahr ca. 300 Stationen beprobt und etwa 10000 Meßwerte analysiert (Bild 2.3.1).

Nur für die Jahre 1990 und 1995 standen weniger als 6000 Meßwerte zur Verfügung. Höchste Probedichten liegen für die Monate Juli 1981, April 1986 und Januar/Februar 1997 vor.

Bei der Zusammenfassung aller in den verschiedenen Monaten der 30 untersuchten Jahre gewonnenen Daten fallen hohe Probenahmezahlen in den Wintermonaten (Januar/Februar) und im April, Mai und Juni mit über 25000 Meßwerten auf. Deutlich weniger Daten stammen aus dem Monat Juli und den Herbstmonaten September bis Dezember.

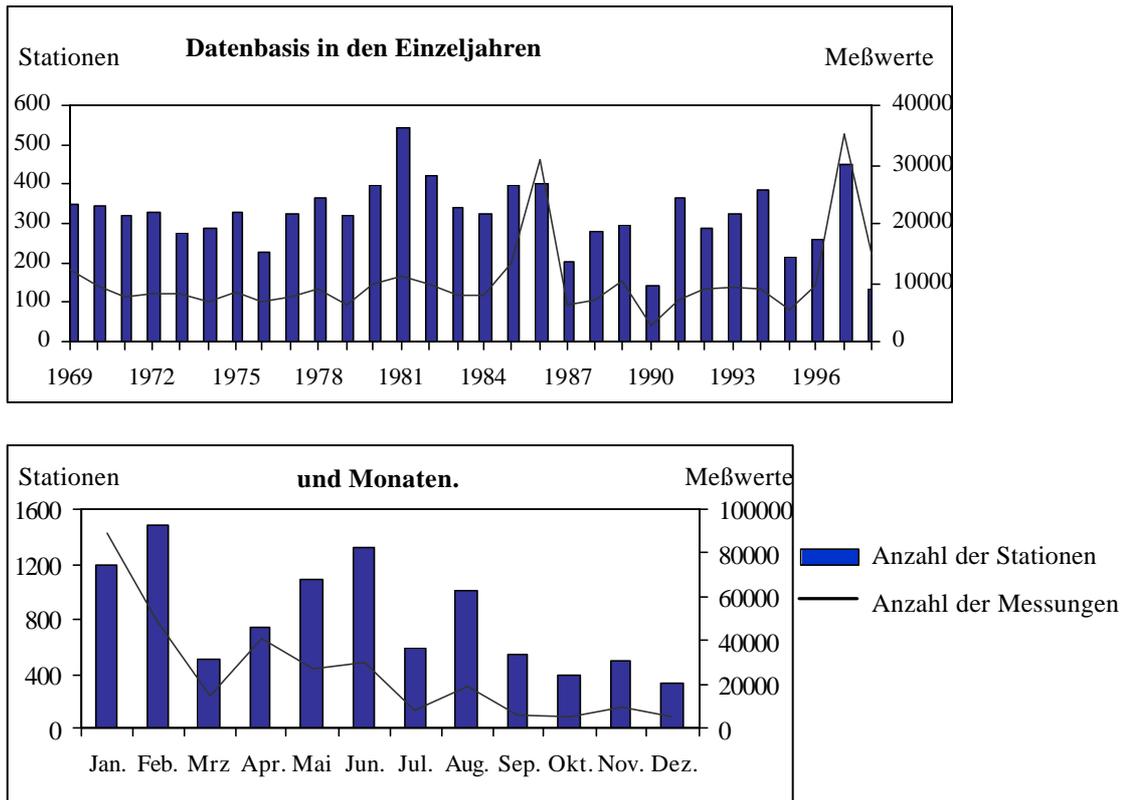
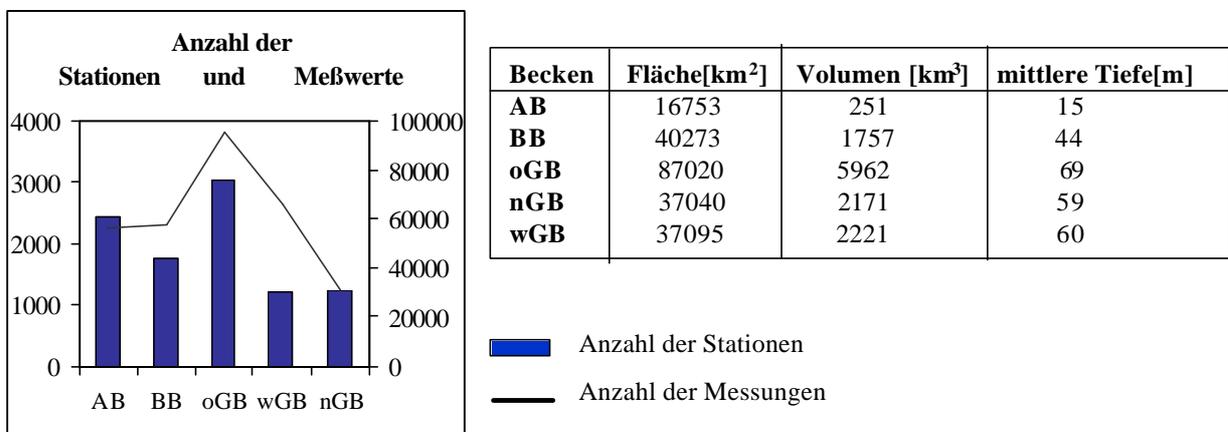


Bild 2.3.1: Zeitliche Verteilung der Meßwerthäufigkeiten (Tabellen 1 und 2 im Anhang B)

Die Daten eines Jahres wurden nach dem Zeitpunkt der Probenahme in vier Klassen geordnet: Winter (Januar - März), Frühjahr (April - Juni), Sommer (Juli - September) und Herbst (Oktober - Dezember). Aus statistischer Sicht ist dies aufgrund der geringen Probenahmedichte die kleinstmögliche Klasseneinteilung.

Eine hohe Meßpunktdichte ist für die südlichen Becken typisch. Das Arkonabecken und die Beltsee, das Bornholmbecken, die Stolper Schwelle und das Danziger Becken wurden in den meisten Jahren sehr intensiv beprobt (Bild 2.3.2). Die Probenahmedichte nimmt nach Norden ab. Die meisten Proben stammen hier aus den Zentren der tiefen Becken, in denen auch die meisten im Rahmen der HELCOM festgelegten Stationen liegen. In Küstennähe wurden nur in der Nähe großer Städte mit eigenen Forschungsschiffen (Helsinki, Stockholm) eine größere Anzahl Proben genommen.



Becken	Fläche[km ²]	Volumen [km ³]	mittlere Tiefe[m]
AB	16753	251	15
BB	40273	1757	44
oGB	87020	5962	69
nGB	37040	2171	59
wGB	37095	2221	60

Bild 2.3.2: räumliche Verteilung der beprobten Stationen und Meßwerte im Raum (Tabelle 3 im Anhang B).

Zum Vergleich der Probenahmedichten wurden für alle Teilbecken die Flächen- und Volumenmaße berechnet. Die Meßwertdichten geben die Anzahl der Stationen auf einer Fläche von 1000x1000 m an, die in den untersuchten 30 Jahren beprobt wurden. Zusätzlich wird die Anzahl der Meßwerte in Wasserschichten mit einer Höhe von 10 m angegeben, da an den Stationen Daten in mehreren Tiefen erhoben wurden. Die sehr hohe Probenahmedichte im Arkonabecken wird bei der Angabe der Meßwertdichte je Volumeneinheit (bei einer Fläche von 1000x1000 m und einer Tiefenaufösung von 10 m) deutlich (Bild 2.3.3).

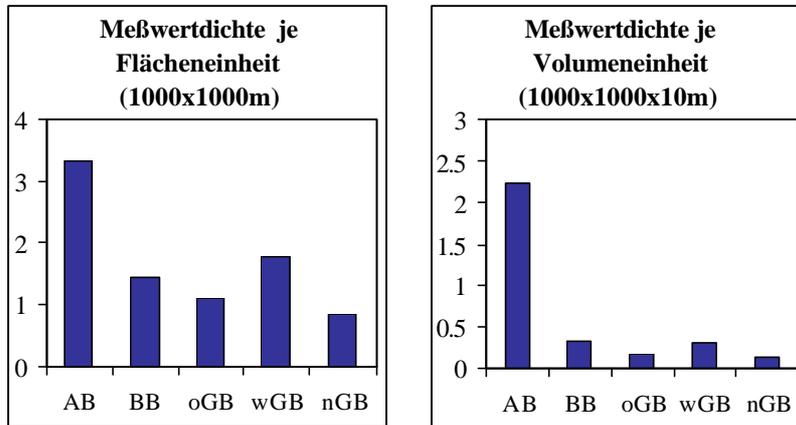


Bild 2.3.3: Meßpunktdichten in den fünf Teilbecken (Tabelle 3 im Anhang B).

2.3 Kartenprojektionen

Zur geostatistischen Modellbildung sind Länge- und Breitekoordinaten notwendig, die zueinander orthogonal liegen und längentreu sind. Die Meßpunkte wurden vom Schiff mittels GPS (Geographical position system) in Länge-Breite-Koordinaten lokalisiert. Die geographischen Koordinaten Länge und Breite ergeben sich aus Winkeln vom Zentrum der Erde aus. Während die Länge eines Eingradabschnittes in Längensrichtung auf einem Breitengrad konstant ist, verringert sich ein Eingrad-Breitenabschnitt vom Äquator polwärts und wird an den Polen Null. Für die Erzeugung einer längentreuen Grundlage wurde die **Universal Mercator Projection** (UTM-Projektion) gewählt⁶. Das Gebiet der zentralen Ostsee konnte mit einem im Internet nutzbaren Programm des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung (JACOBS 1999) auf die 33. UTM-Zone des World Geographic System (WGS 84) um den 15°. Längengrad -Meridianstreifen transformiert werden. Daraus ergibt sich eine Verkleinerung um 0.9996 am 15. Meridianstreifen und eine Längentreue bei 180 km beiderseits des Mittelmeridians. Die Längenverzerrungen erhöhen sich mit wachsender Entfernung vom Mittelmeridian. Diese liegen an den Grenzmeridianen der 33. Zone (bei 12° E und 18° E) bei 1.00015 (Angaben nach HAKE & GRÜNREICH 1994). Höchste Verzerrungen sind im Finnischen Meerbusen bei 23° E-25° E zu erwarten.

Die Meßstationen der Jahre 1969-1998 liegen im Gebiet 11° E - 26° E und 54° N - 61° N. Die Ostkoordinate schwankt zwischen 5 980 077 und 6 706 056 und die Nordkoordinate zwischen 33 240 361 und 34 093 452 Dies entspricht Entfernungen zum Äquator zwischen 5980 und 6706 km. Das Untersuchungsgebiet (12° E - 25° E und 54° N - 60° N) (Bild 2.4) weist eine

⁶ Die Universal Mercator Projection überdeckt die Erde vom 80. südlichen bis zum 84. nördlichen Breitengrad mit 60 Meridianstreifen von je 6 Längengraden. Die Erde wird durch das 1924 von HAYFORD berechnete Ellipsoid (große Halbachse $a=6378.388$ km, kleine Halbachse $b=6356.912$ km) angenähert und auf einen senkrecht zum Äquator liegenden Schnittzylinder abgebildet. Dieser durchdringt das Ellipsoid in zwei Schnittparallelen, die längentreu abgebildet werden (HAKE & GRÜNREICH 1994). Durch die Wahl eines Schnittzylinders können die Verzerrungen zu den Grenzmeridianen klein gehalten werden.

maximale Ost-West-Ausdehnung von ca. 850 km, eine maximale Nord-Süd-Ausdehnung von ca. 660 km und maximale Entfernungen zwischen Probenahmepunkten von ca. 1030 km auf. Zur flächenhaften Interpolation war es notwendig, im UTM-transformierten Gebiet ein rechteckiges Schema zu finden. Stationaritätsüberlegungen führten zu einer Verkleinerung des Untersuchungsgebietes auf die Bereiche westlich der Insel Rügen und östlich der Rigaer Bucht.

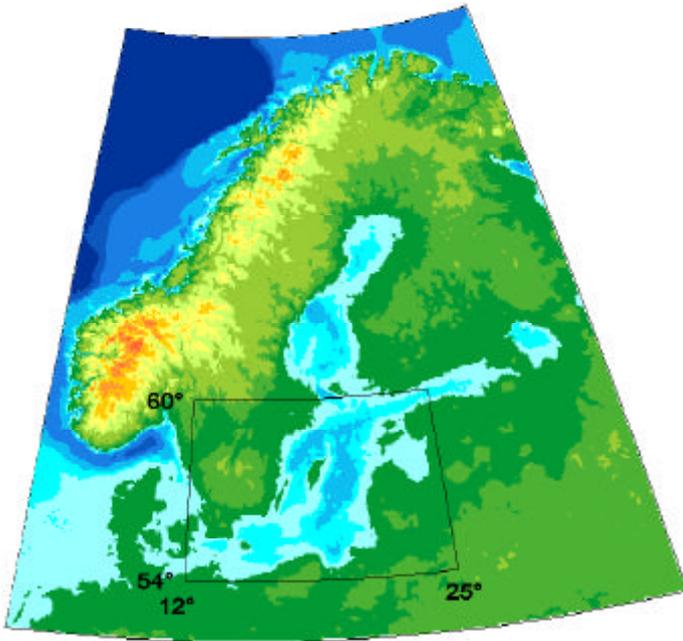


Bild 2.4: Lage des auf den 33. UTM-Streifen transformierten Untersuchungsgebietes in der Zentralen Ostsee (Kartengestaltung M.MEYER, Geologisches Institut, Universität Greifswald)

2.4 Geostatistische Verfahren

Die Anwendung geostatistischer Verfahren war in dieser Arbeit notwendig, um aus den unregelmäßig im Raum verteilten Meßpunkten Werte an nichtbeprobten Punkten zu schätzen. Gute Schätzergebnisse konnten bei den unregelmäßig im Raum verteilten wenigen Meßwerten nur dann erreicht werden, wenn räumliche Beziehungen zwischen den Messungen in die Schätzung einbezogen werden. Die Geostatistik beschäftigt sich mit dem Studium von sich in Raum und Zeit verändernden Prozessen (OLEA 1991). Sie bietet mit dem Variogramm die Möglichkeit, die mit wachsendem Abstand zunehmende Variabilität zwischen den Messungen abzuschätzen. Das Variogramm speichert wichtige Informationen zur Schätzung von Werten zwischen den Meßpunkten. Die flächenhafte Schätzung von Meßwerten war zur kartographischen Darstellung der Sauerstoffverhältnisse in den untersuchten Perioden notwendig.

Die Geostatistik basiert auf der Anwendung der Theorien von Zufallsfunktionen zur Analyse und Vorhersage räumlicher Prozesse. Erste Überlegungen gehen auf den südafrikanischen Bergbauingenieur KRIGE (1951 & 1952) zurück, der sich Anfang der 50er Jahre mit der Vorhersage der Förderungsmengen der Goldlagerstätte Witwatersrand beschäftigte. Viele natürliche Prozesse verursachen bestimmte Verteilungsmuster von meßbaren Größen im Raum, den ortsabhängigen (regionalisierten) Variablen. Zur Charakterisierung der Eigenschaften dieser Variablen schufen der französische Mathematiker MATHERON und seine Mitarbeiter am Centre de Geostatistique Fontainebleau, Kriges Ideen aufgreifend, die Theorie der ortsabhängigen Variablen (MATHERON 1963 & 1971). In den letzten Jahren wurden in verschiedenen mit raumbezogenen Größen arbeitenden Wissenschaften geostatistische Methoden eingesetzt:

- zur Darstellung der Ausbreitung von Seegrass (SCARDI, FRESI & ARDIZZONE 1989),
- zum Aufbau einer Tiefenkarte des Tyrrhenischen Meeres (GAMBOLATI & GALEATI 1990),

- zur räumlichen Differenzierung der Klimaelemente Niederschlag und Temperatur in den EU-Staaten (HEINRICH 1994a),
- zur Darstellung der Raum-Zeit-Verteilung des Ozongehaltes in Nordwestdeutschland (NEUTZE 1995),
- zur Untersuchung der Verunreinigungen einer Muschelfarm an der französischen Atlantikküste (BELIAEFF & COCHARD 1995),
- zur Darstellung der dreidimensionalen Verteilung von Salzgehalten, Temperatur und Nährstoffen in der Zentralen Ostsee (TOOMPUU & WULFF 1996).

Zum Studium der theoretischen Grundlagen und praktischen Anwendung der Geostatistik gingen folgende, meist geologisch geprägte Standardwerke in diese Arbeit ein: JOURNEL & HUIJBREGTS (1978), CLARK (1979), AKIN & SIEMENS (1988), ISAAKS & SRIVASTAVA (1989), JOURNEL (1989), OLEA (1991), WACKERNAGEL (1995), GOOVAERTS (1997) und SCHAFMEISTER (1999). Die geostatistischen Untersuchungen dieser Arbeit basieren auf den Programmen der Softwarepakete GeoEas (ENGLUND & SPARKS 1991), GSLIB (DEUTSCH & JOURNEL 1998), Vari-oWin (PANNATIER 1996) und SURFER.

2.4.1 Voraussetzungen geostatistischer Betrachtungen

Ziel der geostatistischen Untersuchungen ist es, einen räumlich-statistischen Zusammenhang in den Variablen zu erkennen und mathematisch zu formulieren.

Als Ergebnis einer Messung liegen n Meßwerte z_1, z_2, \dots, z_n in einem Untersuchungsgebiet G vor (Bild 2.5). An jedem Ort $x \in G$ existiert ein unbekannter Merkmalswert $Z(x)$, der als *Zufallsvariable* Z charakterisiert wird. Im Rahmen einer Meßkampagne wurden die ortsabhängigen (oder *regionalisierten*) Variablen beprobt, die als *Zufallsfunktion* bezeichnet werden. Die Merkmalswerte $Z(x)$ weisen für benachbarte Punkte x_i räumliche Korrelationen auf.

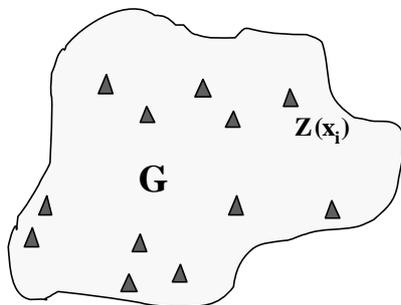


Bild 2.5: Verteilung der Zufallsvariablen $Z(x_i)$, $i=1, 2, \dots, n$ im Untersuchungsgebiet G .

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zufallsfunktion Z bringt die Ungewißheit über den unbekanntem (zu schätzenden) Wert im Untersuchungsgebiet zum Ausdruck. Die hier vorgestellten Methoden können zur Schätzung von Werteverteilungen in ein-, zwei und dreidimensionalen Untersuchungsgebieten wie Flüssen, Wasserflächen- und -körpern oder zeitlichen Veränderungen auf Flächen herangezogen werden.

Stationaritätsuntersuchungen stellen eine Voraussetzung für Untersuchungen im Raum dar. Messungen an unterschiedlichen Punkten müssen zur Berechnung statistischer Kennwerte wie Erwartungswerten, Varianz und dem Variogramm zusammengefaßt werden, da meist nur eine Messung der räumlich verteilten Variablen an einem Punkt vorliegt⁷. Zeigt die zu untersuchende Variable in einem bestimmten Gebiet ein homogenes Verhalten, können zwei an verschiedenen Orten im Untersuchungsgebiet erhobene Meßwerte als Ergebnisse derselben Zufallsfunktion $Z(x)$ betrachtet werden.

⁷ Stationarität ist hier eine Eigenschaft des Modells und nicht des Prozesses. Skalenveränderungen und detailliertere Meßprogramme können die Stationaritätseigenschaften der Daten verändern (DEUTSCH & JOURNEL 1998).

Eine Zufallsvariable ist dann *stationär*, wenn ihre Wahrscheinlichkeitsverteilung ortsunabhängig und damit translationsinvariant ist. Eine *Stationarität 2. Ordnung* (schwache Stationarität) beschränkt die Forderung der Ortsunabhängigkeit auf die ersten zwei Momente, aber auch diese Grundannahme muß oft abgeschwächt werden. Oft kann nur von einer Stationarität 2. Ordnung der Differenzen zweier Zufallsvariablen mit einem Abstandsvektor \mathbf{h} ausgegangen werden (*intrinsische Hypothese*).⁸

Stationarität 2. Ordnung beinhaltet die Bedingungen (2.1)-(2.3):

- Der Erwartungswert der Zufallsfunktion $E[Z(\mathbf{x})]$ ist im gesamten Untersuchungsgebiet G konstant und entspricht dem Mittelwert m der Zufallsvariablen im Untersuchungsgebiet. Es darf kein Trend vorliegen.

$$E[Z(\mathbf{x})]=m(\mathbf{x}) =m \quad \text{für alle } \mathbf{x} \in G \quad (2.1)$$

$$E[Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})-Z(\mathbf{x})]=0 \quad \text{für alle } \mathbf{x}, \mathbf{x}+\mathbf{h} \in G \quad (2.2)$$

- Die Varianz (Var) der Differenzen zweier Zufallsvariablen hängt nur von ihrem Abstandsvektor \mathbf{h} ab und entspricht dem zweifachen Variogramm $\gamma(\mathbf{h})$.

$$\text{Var}(Z(\mathbf{x})-Z(\mathbf{x}+\mathbf{h}))=2\gamma(\mathbf{h}) \quad (2.3)$$

2.4.2 Räumliche Strukturanalyse - Variographie

Das *Variogramm* ist das Instrument der Geostatistik zur Bestimmung der räumlichen Erhaltungstendenz. Es mißt die mittlere Unähnlichkeit zwischen zwei Zufallszahlen, die durch den Abstandsvektor \mathbf{h} getrennt sind. Gilt die intrinsische Hypothese, so hängt das Variogramm nur vom Abstandsvektor \mathbf{h} ab und nimmt mit wachsendem Abstand zwischen den Punkten i.a. zu.

$$\gamma(Z(\mathbf{x}_1), Z(\mathbf{x}_2))=0.5 \cdot [Z(\mathbf{x}_1) - Z(\mathbf{x}_2)]^2 \quad (2.4)$$

Zur Schätzung wird aus den Meßwerten $z(\mathbf{x}_i)$, $i=1, 2, \dots, n$ das *experimentelle Variogramm* $\gamma^*(\mathbf{h})$ berechnet (MATHERON 1963):

$$\mathbf{g}^*(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} (z(x_i) - z(x_i + h))^2 \quad (2.5)$$

Dabei ist $n(h)$ die Menge aller Punkte in der Abstandsklasse h . Die Abstände aller Punktepaare der Meßwerte $z(\mathbf{x}_i)$, $i=1, 2, \dots, n$ werden berechnet und so in Abstandsklassen eingeteilt, daß in jeder Klasse mindestens 30-50 Abstände liegen und die Schätzung nur für Abstände bis zur halben Größe des Untersuchungsgebietes erfolgt. Die grafische Darstellung der mittleren Abstände der Abstandsklassen und der errechneten Variogrammwerte ergibt ein Abbild der räumlichen Variabilität der zu untersuchenden Variablen. Der Graph steigt meist im Ursprung steil an und flacht ab einer bestimmten Entfernung ab. Der Abstand, bei dem das Variogramm asymptotisch den Schwellenwert erreicht, gibt die *Reichweite* räumlicher Korrelationen wieder. Ist die intrinsische Hypothese erfüllt, so entspricht der *Schwellenwert* der Gesamtvarianz der zu untersuchenden Variablen. Viele geowissenschaftliche Größen zeigen schon bei sehr geringen Entfernungen vom Ursprung eine relativ große Varianz, der als *Nuggeteffekt* bezeichnet wird. In dieser Arbeit entsteht er durch die Zusammenfassung der Werte dreier Monate und die durch die geringe Probenahmedichte vorgegebene Vernachlässigung kleinskaliger räumlicher Variabilitäten. Zu beachten ist dabei auch, daß allein durch die Messung der Wasserkörper durch die Bewegung des Wasserschöpfers dahingehend ver-

⁸ Auf die meisten praktischen Anwendungen zeigt diese Einschränkung keine Auswirkungen. Eine detaillierte Diskussion zu Stationaritätsproblemen wird in ISAAKS & Srivastava (1989) und JOURNAL & ROSSI (1989) gegeben.

ändert wird, daß auch am selben Ort bei geringsten Zeitabständen der Messungen keine gleichen Werte zu erwarten sind. Variogrammwerte mit mehreren Schwellenwerten werden durch räumliche Prozesse unterschiedlicher Reichweiten geprägt.

Das experimentelle Variogramm liefert für jede Abstandsklasse einen Variogrammwert. Zur Bestimmung von Schätzwerten zur räumlichen Interpolation ist zu jedem möglichen Abstand zwischen dem zu schätzenden Wert und den gegebenen Punkten ein Variogrammwert erforderlich. Deshalb ist es notwendig, eine stetige mathematische Funktion zu finden, die das Verhalten des experimentellen Variogramms hinreichend gut widerspiegelt⁹ (Bild 2.6).

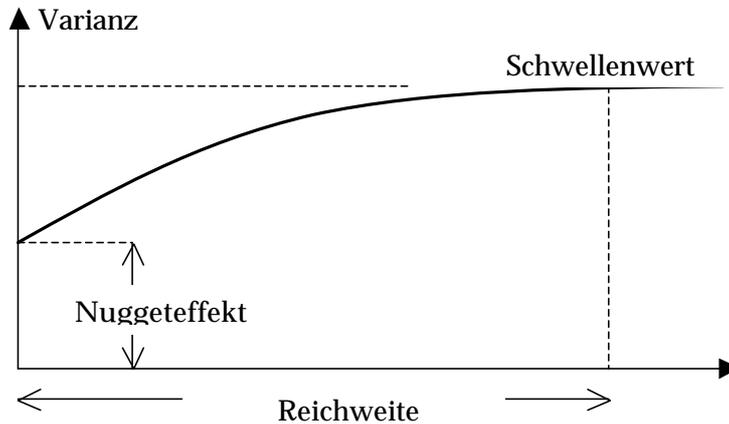


Bild 2.6: Prinzipielles Verhalten eines Variogramms (SCHULZ 1986, zit. in HEINRICH 1992)

Hier sollen drei **Modellfunktionen** vorgestellt werden, die die räumliche Struktur der Grenzbereiche zwischen Wasserkörpern mit unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen am besten beschreiben (Bild 2.7). Alle drei Modelle zeigen einen stetigen Anstieg über eine bestimmte Reichweite und erreichen dann einen endlichen Schwellenwert. Es werden die üblichen Abkürzungen der Variogrammparameter verwendet:

a	-	Reichweite (range)
C	-	Schwellenwert (sill)
C ₀	-	Nuggeteffekt

Das am häufigsten verwendete *Sphärische Modell* zeigt einen linearen Anstieg im Ursprung.

$$g(h) = C_0 + \begin{cases} C \cdot \frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} & \text{für } h \leq a \\ C & \text{für } h > a \end{cases} \quad (2.6)$$

Das *Gauß'sche Modell* steigt bis zu einem Wendepunkt sehr flach an. Es wird zur Beschreibung sehr stetiger räumlicher Veränderungen verwendet¹⁰.

$$g(h) = C_0 + C \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right] \quad (2.7)$$

Das *Exponentielle Modell* folgt einer Exponentialfunktion und steigt sehr langsam an.

⁹ Mathematisch formuliert soll aus einer Stichprobe (dem experimentellen Variogramm) das Variogramm des Prozesses ermittelt werden.

¹⁰ Zu beachten ist, daß das Gauß'sche Modell einen hinreichend großen Nugget enthalten muß, um numerisch stabile Schätzwerte zu berechnen (Posa 1989 & WACKERNAGEL 1995, zit. in GOOVAERTS 1997) und sehr empfindlich auf kleine Veränderungen der Variogrammparameter reagiert (STEIN 1989 & WARNES 1986, zit. in HEINRICH 1992).

$$g(h) = C_0 + C \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right] \quad (2.8)$$

Die Modelle nähern sich asymptotisch einem Schwellenwert. Die Reichweite wird auf die Entfernung festgelegt, bei dem 95% des Schwellenwertes erreicht sind. Zu beachten sind unterschiedliche Modelle in den verschiedenen Geostatistikprogrammen¹¹.

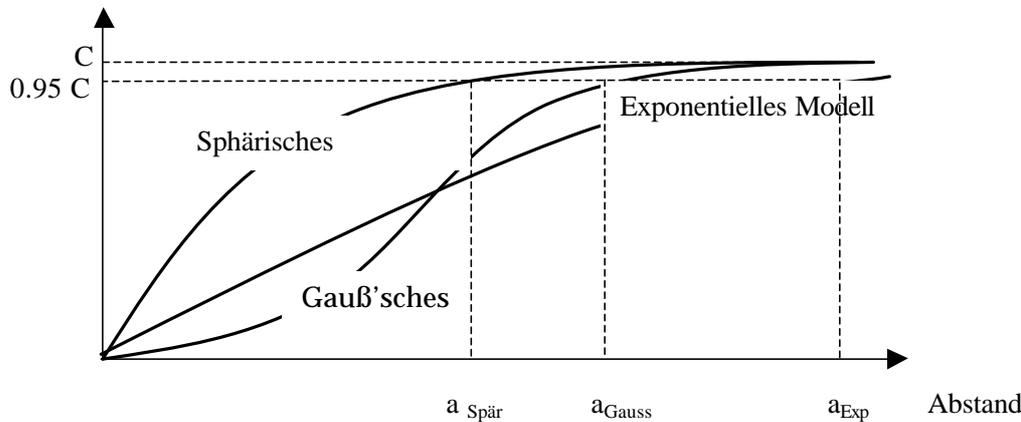


Bild 2.7: Verlauf der Sphärischen, Gauß'schen und Exponentiellen Modellfunktion mit gleichem Schwellenwert C (nach AKIN & SIEMENS 1988, S.45 geändert)

Eine vollautomatische Anpassung der experimentellen Variogramme an die Modellfunktion wird von den meisten Autoren, da sie nicht mehr der Plausibilitätskontrolle des Anwenders unterliegt, abgelehnt (DEUTSCH & JOURNAL 1998, S. 61). Bei einer sehr guten Datengrundlage und einem experimentellen Variogramm, welches nicht mehr durch Extremwerte verzerrt wird, kann laut WEBSTER (1985, zit. in HEINRICH 1992) ein automatisches Anpassungsverfahren verwendet werden, nicht aber bei den wenigen in einem Meergebiet zur Verfügung stehenden Proben. Aus diesem Grund wurde eine graphische interaktive Anpassung der experimentellen Variogramme zur Beschreibung der räumlichen Korrelationsstrukturen mit dem Programm Variowin (PANNATIER 1996) vorgenommen. Die graphische Anpassung unterliegt subjektiven Entscheidungen, aber die meisten Krigingverfahren zeigen eine gewisse Robustheit gegenüber geringen Änderungen der Variogrammparameter (DIAMOND & ARMSTRONG 1984; KRIGE 1981 & STEIN 1989, zit. in HEINRICH 1992).

Die zu beschreibende räumliche Struktur zeigt eine *Richtungsabhängigkeit (Anisotropie)*, wenn das experimentelle Variogramm in unterschiedlichen Raumrichtungen einen deutlich unterschiedlichen Verlauf aufweist. Solche Anisotropien können erkannt werden, indem experimentelle Variogramme in verschiedene Raumrichtungen mit kleinen Öffnungswinkeln berechnet werden.

Ist die intrinsische Hypothese nicht erfüllt und der Erwartungswert der Zufallsvariablen hängt vom Ort der Messung ab, so liegt bei kleinen Abständen h eine *lokale Drift* und bei großen Abständen ein *Trend* vor und es gilt:

$$E[Z(x)] = m(x) \neq m(x+h) = E[Z(x+h)]$$

Für das Variogramm folgt daraus:

$$\begin{aligned} 2 \cdot \gamma(h) &= \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] \\ &= E [((Z(x) - Z(x+h)) - E[(Z(x) - Z(x+h))])^2] \end{aligned}$$

¹¹ Eine unter VarioWin ermittelte Reichweite muß zur Interpolation mit GSLIB bei einem Gauß'schen Variogramm mit $\sqrt{3}$ und bei einem Exponentiellen Variogramm mit 3 multipliziert werden (MUELLER 2000).

$$= E [(Z(x)-Z(x+h))^2] - (E[Z(x)-Z(x+h)])^2$$

Nach dem Ersetzen des Erwartungswertes der Differenzen durch den unter Stationaritätsannahmen geschätzten Variogrammwert $2\cdot\gamma^*(h)$ gilt (BURGER et al. 1999):

$$2\cdot\gamma(h) = 2\cdot\gamma^*(h) - (m(x)-m(x+h))^2 \quad (2.9)$$

Das experimentelle Variogramm berechnet bei Vernachlässigung des Trends stets einen um die quadratische Differenz der Erwartungswerte verschobenen Schätzwert des wahren Variogramms. Ist diese Differenz auf eine lokale Drift zurückzuführen, wird von SCHAFMEISTER (1999) die Berechnung der Drift d nach (2.10) und die Auswertung eines Residuenvariogramms γ_{res} (2.11) empfohlen.

$$d(h) = |m^+(h) - m^-(h)| \quad (2.10)$$

$$\mathbf{g}_{res}(h) = \mathbf{g}^*(h) - 0.5 \cdot d^2(h) \quad (2.11)$$

Dabei stellt $m^+(h)$ den Mittelwert der Startpunkte und $m^-(h)$ den Mittelpunkt der Endpunkte aller Paare in der Abstandsklasse h dar. Diese Variogramme wurden in einigen gut beprobten Jahren, in denen eine Drift vermutet wurde, mit den einfachen Variogrammen verglichen. Es konnten jedoch erst Trends ab Entfernungen von ca. 100 km festgestellt werden. Solche großräumigen Veränderungen an den Punkten $x=(x_1, x_2)$ können häufig durch eine Polynomfunktion ersten (2.12) oder zweiten Grades (2.13) beschrieben werden und die trendbereinigten Residuenwerte werden dann einer Variogrammanalyse unterzogen.

$$f(x) = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (2.12)$$

$$f(x) = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_1 x_2 + a_4 x_1^2 + a_5 x_2^2 \quad (2.13)$$

Dieses Vorgehen ist aber, da aus den Meßpunkten neben den Parametern des Variogramms auch die drei bzw. sechs Parameter a_i der Polynomfunktion berechnet werden müssen, nur dann sinnvoll, wenn der Trend schon bei geringen Entfernungen auftritt, sinnvoll begründet werden kann und eine genügende Anzahl von Meßpunkten vorliegt. Zur Beschreibung der Sauerstoffbedingungen erscheint eine Anpassung an eine Trendfunktion aufgrund der geringen Datengrundlage von max. 60 Punkten je Saison nicht sinnvoll. Im Untersuchungsgebiet unterscheiden sich die Becken aufgrund ihrer Entfernung zur Nordsee in der Lage der Salzgehaltssprungschicht und damit auch in der Tiefe, in der mit geringen Sauerstoffkonzentrationen zu rechnen ist. Dieses Problem konnte durch eine Begrenzung des Suchradius gelöst werden, so daß zur Schätzung von Punkten nur Meßwerte mit gleichem Erwartungswert herangezogen wurden. Die intrinsische Hypothese kann angenommen werden, so daß innerhalb eines Suchradius die räumliche Variabilität durch das Variogramm beschrieben werden kann.

2.4.3 Räumliche Schätzung – Kriging

Unter dem Begriff Kriging werden eine Reihe von geostatistischen Schätzverfahren zusammengefaßt, die Variablen an nicht beprobten Punkten als gewichtete räumliche Mittelwerte der Meßwerte berechnen. Alle Methoden beziehen die in der Variogrammanalyse erworbenen Kenntnisse zur räumlichen Struktur der Variablen in die Schätzung ein und berechnen zu jedem Schätzwert einen Fehlerwert.

Es sollen hier nur die in dieser Arbeit genutzten Verfahren vorgestellt werden.

Das *Ordinary-Kriging-Verfahren* stellt die Grundform der Krigetechnik dar und wurde zur Schätzung der Grenzflächen zwischen Wasserschichten mit unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen verwendet.

Mit dem *Indikator-Kriging-Verfahren* konnten die Grenzbereiche zwischen den Wasserkörpern mit unterschiedlicher Sauerstoffversorgung genauer festgelegt werden.

Gegeben seien n Messungen $z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_n)$. Der unbekannte Wert z^* am Punkt x_0 wird aus einer Linearkombination der Meßwerte mit den Gewichten λ_i geschätzt (Bild 2.8).

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \tag{2.14}$$

Die Gewichte sind so zu bestimmen, daß der Schätzwert $z^*(x_0)$ des unbekanntes Wertes $z(x_0)$ die folgenden Bedingungen erfüllt (BURGER et al. 1999):

- (1) $z^*(x_0)$ sei erwartungstreu ohne systematischen Fehler, d.h. $E [z^*(x_0) - z(x_0)] = 0$.
- (2) Der mittlere quadratische Fehler $E [(z^*(x_0) - z(x_0))^2]$ der geschätzten Werte sei minimal.

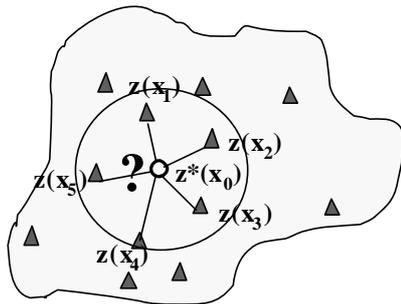


Bild 2.8: Schätzung eines nicht beprobten Wertes $z^*(x_0)$ aus den innerhalb eines Suchradius liegenden Meßwerten $z(x_1), \dots, z(x_5)$

Bei stationären Variablen entsprechen die Erwartungswerte der gemessenen und geschätzten Werte dem Mittelwert m . Das Einsetzen von (2.14) in Bedingung (1) liefert die erste Randbedingung für das Kriging - Gleichungssystem:

$$E \left[\sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) - z(x_0) \right] = \sum_{i=1}^n \lambda_i m - m = m \cdot \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right) = 0 \tag{2.15}$$

Die Summe aller Gewichte λ_i muß 1 ergeben. Aus der Bedingung (2) kann unter Nutzung von Methoden der Differentialrechnung ein n - dimensionales lineares Gleichungssystem hergeleitet werden (HEINRICH 1992 u. 1994; SCHAFMEISTER 1999). Zur Sicherstellung der Bedingung (1) wird ein Lagrange-Multiplikator η eingeführt, so daß das *lineare Kriging-Gleichungssystem* zur Bestimmung der Schätzwerte λ_i aus $(n+1)$ Gleichungen besteht (BURGER et al. 1999).

$$\begin{pmatrix} \mathbf{g}_{11} & \mathbf{g}_{12} & \dots & \mathbf{g}_{1n} & 1 \\ \mathbf{g}_{21} & \mathbf{g}_{22} & \dots & \mathbf{g}_{2n} & 1 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \mathbf{g}_{i1} & \mathbf{g}_{i2} & \mathbf{g}_{ij} & \mathbf{g}_{in} & 1 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ \mathbf{g}_{n1} & \mathbf{g}_{n2} & \dots & \mathbf{g}_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdot \\ \lambda_i \\ \cdot \\ \lambda_n \\ \mathbf{h} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{g}_{10} \\ \mathbf{g}_{20} \\ \cdot \\ \mathbf{g}_{i0} \\ \cdot \\ \mathbf{g}_{n0} \\ 1 \end{pmatrix} \tag{2.16}$$

Dabei entsprechen die Werte $\gamma_{ij} = \gamma(x_i - x_j)$ den Variogrammwerten der Abstände zwischen den Punkten x_i und x_j . In die Berechnung der Gewichte λ_i gehen die Meßwerte nur über die Variogrammwerte ein. Die folgenden Eigenschaften des Kriging-Schätzers sind für die flächenhafte Interpolation interessant:

- Das Kriging-Gleichungssystem (2.16) ist nur lösbar, wenn die Determinante der Matrix ungleich Null ist. Deshalb darf kein Meßpunkt doppelt auftreten. Mehrmessungen an einem Meßpunkt gehen mit ihrem gemeinsamen Mittelwert in die Berechnung ein.

- Kriging ist ein exakter Interpolator. An den beprobten Punkten stimmen Meß- und Schätzwerte überein, die Schätzvarianz ist Null.
- Die geschätzte Oberfläche ist, da das Kriging-Verfahren die wahrscheinlichste mittlere Datenverteilung liefert, glatter als die reale Oberfläche. Hohe Werte werden unterschätzt und geringe überschätzt.
- Mit zunehmendem Nuggeteffekt verlieren nahegelegene Meßwerte an Bedeutung, die weiter entfernten erhalten höhere Gewichte. Bei einem reinen Nuggeteffekt ($\gamma(h) = C_0$) sind die Meßwerte räumlich unkorreliert und der Schätzwert ergibt sich aus dem ungewichteten Mittelwert aller Meßwerte.

In der Berechnung wurden, um eine weitgehende Trendfreiheit zu erreichen, nur Punkte innerhalb eines *Suchradius* um den zu schätzenden Punkt einbezogen, der im Rahmen der räumlichen Strukturanalyse aus dem experimentellen Variogramm geschätzt wurde.

Die *Krigevarianz* σ_K^2 kann für jeden zu schätzenden Punkt aus den Gewichten und den Kovarianzwerten $Cov(h)^{12}$ berechnet werden (GOOVAERTS 1997)¹³.

$$s_K^2(x_0) = Var(z^*(x_0) - z(x_0)) = Cov(0) - \sum_{i=1}^n I_i(x_0) Cov(x_0 - x_i) - m(x_0) \quad (2.17)$$

2.4.4 Kreuzvalidation

Die *Kreuzvalidation* wendet ein Schätzverfahren auf die gemessenen Daten $z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_n)$ an und vergleicht geschätzte und gemessene Werte. Es werden nacheinander immer ein Probepunkt aus dem Datensatz entfernt und mit den restlichen Datenwerten geschätzt. Gemessene Werte $z(x_i)$ und die geschätzten Werte $z^*(x_i)$ können so direkt miteinander verglichen werden. Zur Abschätzung der Güte der Schätzergebnisse werden die Differenzen zwischen gemessenen und geschätzten Werten betrachtet. Bei guten Schätzungen schwanken die Differenzen $z(x_i) - z^*(x_i)$ um den Wert Null und ihre Varianz ist gering (BURGER et al. 1999):

$$E(z(x_i) - z^*(x_i)) = 0 \quad (2.18)$$

$$Var(z(x_i) - z^*(x_i)) = \min! \quad (2.19)$$

Das Kriging-Verfahren schätzt die wahrscheinlichste Verteilung der Meßwerte, so daß die höchsten Differenzen bei hohen und geringen gemessenen Werten auftraten.

2.4.5 Bestimmung von Gebietsgrenzen - Indikator-Kriging

Die genauen Grenzen der zu schätzenden Gebiete sind oft durch Mangel an Informationen mit Unsicherheiten verbunden. Das *Indikator-Verfahren* bietet durch die Einbeziehung von Kenntnissen über Punkte, die außerhalb des zu untersuchenden Gebietes liegen, eine Möglichkeit, Gebietsgrenzen sinnvoll zu definieren. Dieses Verfahren wurde nach einer Idee von PAWLOWSKY et al. (1993) auf die räumliche Beschreibung der Bereiche mit geringen Sauerstoffkonzentrationen angewendet.

Tritt an einem Ort x ein bestimmter Zustand (wie Sauerstoffkonzentrationen unter 2ml/l) auf, wird einer *Indikatorvariablen* der Wert 1 zugewiesen, ansonsten erhält sie den Wert 0. Zur Beschreibung der Grenzbereiche der Gebiete mit geringen Sauerstoffkonzentrationen wird die folgende Kodierung vorgeschlagen:

¹² Im stationären Fall können Maße der Ähnlichkeit (Kovarianz) und der Unähnlichkeit (Variogramm) ersetzt werden nach $\gamma(h) = Cov(0) - Cov(h)$. Zur Lösung von (2.16) ergeben sich bei Nutzung der Kovarianzen numerisch stabilere Matrizen (BURGER et al. 1999).

¹³ Die Krigevarianz wird vom Variogramm und der Verteilung der Daten beeinflusst. Sie bezieht nur die Geometrie der Daten, nicht aber die gemessenen Werte ein (DEUTSCH & JOURNAL 1998; GOOVAERTS 1997).

$$I(x, z_c) = \begin{cases} 1 & \text{wenn am Ort } x \text{ Sauerstoffkonzentrationen kleiner } z_c \text{ vorliegen} \\ 0 & \text{wenn am Ort } x \text{ höhere Sauerstoffkonzentrationen vorliegen} \end{cases} \quad (2.20)$$

In dieser Arbeit nimmt die Variable z_c die Werte 0 ml/l und 2 ml/l an. Der Wert der Indikatorvariablen an einem Punkt x_0 (2.21) ergibt ein Wahrscheinlichkeitsmaß zwischen 0 und 1. Dieses besagt, ob der Punkt x_0 zu einem Gebiet G_c mit Sauerstoffkonzentrationen kleiner z_c gehört oder mit höheren Konzentrationen zu rechnen sind. Die vorhandenen Informationen reichen nicht aus, um die Grenze zwischen Gebieten mit unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen exakt zu bestimmen. Es ist aber möglich, das Untersuchungsgebiet G in drei disjunkte Teilgebiete zu zerlegen (Bild 2.9):

- (a) Das Gebiet G_1 als konvexe Hülle aller Punkte mit Indikatorwerten 1,
- (b) das Gebiet G_3 , welches alle Punkte mit Indikatorwerten 0 enthält, und
- (c) das Gebiet G_2 , über welches keine Informationen vorhanden sind.

Es gilt $G = G_1 \cup G_2 \cup G_3$ mit $G_1 \cap G_2 = \emptyset$, $G_1 \cap G_3 = \emptyset$, $G_2 \cap G_3 = \emptyset$ und $G_1 \subseteq G_c$ und $G_3 \not\subseteq G_c$.

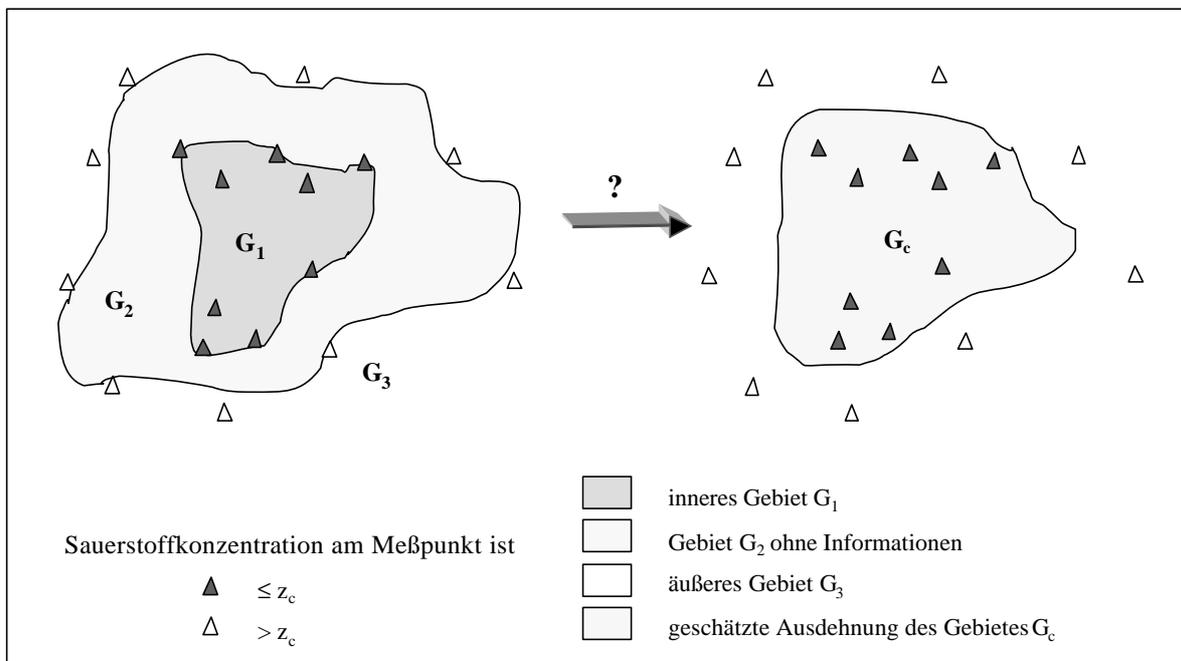


Bild 2.9: Zerlegung des Gebietes G in die Gebiete G_1 , G_2 und G_3 und Schätzung des Gebietes G_c durch die Isolinie der 0.5-Indikatorwerte.

Das *Indikator-Kriging-Verfahren* ist ein geostatistisches Verfahren zur Schätzung lokaler Unsicherheiten (JOURNEL 1989). Der lineare Schätzer

$$I^*(x_o, z_c) = \sum_{i=1}^n I_i I(x_i, z_c) \quad (2.21),$$

dessen Ergebnisse im allgemeinen im Intervall $[0,1]$ liegen, wird genutzt, um das Gebiet G_2 näher zu untersuchen¹⁴. Die 0.5-Linie trennt die Gebiete mit Indikatorwerten größer und kleiner 0.5 voneinander. Schätzwerte größer oder gleich 0.5 sprechen für eine hohe Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu G_c , kleinere Schätzwerte dagegen. Das Gebiet G_2 wird durch die berechneten Indikatorwerte aufgeteilt.

¹⁴ Zur Bestimmung der Gewichte ist eine Modellfunktion an das experimentelles Indikatorvariogramm anzupassen. Das experimentelle Indikatorvariogramm gibt für den Abstand h die relative Häufigkeit des Wechsels zwischen G_1 und G_3 an (GOOVAERTS 1997, S. 35).

3 MODELLIERUNG DER BEREICHE MIT GERINGEN SAUERSTOFFKONZENTRATIONEN FÜR DEN ZEITRAUM 1969-1999

Ziel dieses Kapitels ist die Entwicklung und Umsetzung eines mathematischen Modells zur Beschreibung der räumlichen und zeitlichen Variationen der Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser der Zentralen Ostsee. Dieses Modell ermöglicht es, das Auftreten und die Ausbreitung der Bereiche mit Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l und Schwefelwasserstoff durch Karten und ihre wechselnden Flächen- und Volumenanteile für 124 Zeitabschnitte der Jahre 1969-1999 darzustellen.

Die im Kapitel 3.1 vorgestellten Methoden zur Schätzung von Sauerstoffverhältnissen in der Zentralen Ostsee basieren auf der Reduktion des an sich vierdimensionalen Problems der Beschreibung von Veränderungen in Raum und Zeit auf Flächen- und Volumenschätzungen in 120 Untersuchungsperioden. Die Veränderungen in jeweils drei Monaten wurden zusammengefaßt, so daß die mittlere Ausdehnung der Sauerstoffdefizitgebiete der Winter- (Januar bis März), Frühjahres- (April bis Juni), Sommer- (Juli bis September) und Herbstmonate (Oktober bis Dezember) jedes Jahres beschrieben werden.

In der Modellierung mußten typische ozeanographische Eigenschaften der Daten wie deren vertikale, horizontale und saisonale Variabilität, extreme kleinräumige und kurzzeitliche Schwankungen, Unterschiede in der Beprobungshäufigkeit in Raum und Zeit und räumliche Abhängigkeiten zwischen den Meßpunkten berücksichtigt werden.

Die Methode basiert auf der Feststellung, daß die Sauerstoffkonzentrationen in den tieferen Wasserschichten mit wachsender Tiefe nach einem festen Muster abnehmen. An jedem Punkt des Untersuchungsgebietes wird mit zunehmender Tiefe eine Grenztiefe gefunden, an der erstmals Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l bzw. 0 ml/l auftreten und unterhalb derer die Sauerstoffgehalte weiter abnehmen. Diese Tiefen sollen als 2 ml/l- bzw. 0 ml/l-Grenztiefen bezeichnet werden¹.

Der Entwicklung der Grundidee ist das Kapitel 3.1 gewidmet. Im Kapitel 3.2 wurden die Tiefenlagen dieser Grenztiefen aus den vorliegenden Datenreihen an allen beprobten Stationen geschätzt. Die Kapitel 3.3 und 3.4 enthalten die typischen Schritte einer geostatistischen Analyse und flächenhaften Darstellung der Grenztiefen. Alle Arbeitsschritte werden an einem Datensatz aus dem Herbst 1992 erläutert. Im Kapitel 3.5 können dann aus dem Verlauf der Grenztiefen und der Kenntnis des Meeresbodens Flächen und Volumen mit geringen Sauerstoffkonzentrationen (unter 2 ml/l) und Schwefelwasserstoff ermittelt werden.

3.1 Mathematische Modellbildung

Ziel dieses Kapitels ist es zu beschreiben, wie nach verschiedenen Versuchen, die räumliche und zeitliche Variation der Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser der Zentralen Ostsee zu erfassen (Kapitel 3.1.1) ein Modell entstand, in das einige der vorher entwickelten Ideen neu geordnet eingefügt werden konnten. Dieses unter 3.1.2 beschriebene Modell ermöglicht es, die Flächen- und Volumenveränderungen der Bereiche mit geringen Sauerstoffkonzentrationen für die 30jährige Untersuchungsperiode zu ermitteln.

Die Entwicklung eines mathematischen Modells wird als schrittweise Annäherung an eine optimale Möglichkeit verstanden, die eine hinreichend gute Beschreibung der räumlichen Prozesse gewährleistet und eine weitgehende Einschätzung der Schätzgenauigkeiten erlaubt. Die Fehlerquellen wurden im Verlauf der Modellentwicklung eingeschränkt, so daß die resultierende Grundidee des Modells zur Erfassung der flächen- und volumenmäßigen Variabilität der Sauerstoffmangelgebiete sehr einfach erscheint.

¹ Die 0 ml/l-Grenztiefe entspricht der Grenzschicht zum schwefelwasserstoffhaltigen Tiefenwasser und wird in der meereswissenschaftlichen Literatur üblicherweise als *Chemokline* bezeichnet (GERLACH 1994, S.147).

In allen Modellen wird eine Zeitdiskretisierung vorausgesetzt. Ziel ist es, Karten zur Beschreibung der Veränderung innerhalb einer Saison zu berechnen. Eine Möglichkeit, die Untersuchungen für alle Daten zusammen durchzuführen und aus dem dann vierdimensionalen Modell Karten für beliebige Zeitschnitte zu erstellen, wird am Ende des Kapitels 3.3 diskutiert werden.

3.1.1 Stadien der Modellentwicklung

Die anfangs entwickelte Modellidee geht von einer Schätzung der flächenhaften Verteilung der Sauerstoffkonzentrationen in mehreren festen Tiefenhorizonten aus. Die entstandenen Sauerstoffkarten werden dann übereinandergelegt und an jedem Gitterpunkt werden die mit wachsender Tiefe abnehmenden Sauerstoffkonzentrationen an eine geeignete Funktion angepaßt. Diese ermöglicht dann die Schätzung der Sauerstoffkonzentrationen in Bodennähe und die Schätzung der Tiefen, an der erstmals Sauerstoffkonzentrationen von 2 bzw. 0 ml/l unterschritten wurden. Das Modell, dessen Umsetzung und Ergebnisse werden in UNVERZAGT (1996 & 1999) ausführlich erläutert und sollen hier nur kurz umrissen werden.

Die Modellierung basierte auf einer weiteren Dimensionsreduktion des dreidimensionalen Problems: In einem ersten Schritt wurden in mehreren festen Tiefenhorizonten um die 0m, 20 m, 25 m, 30 m, 40 m, 50 m, 60 m, 70 m, 80 m, 90 m, 100 m, 125 m, 150 m und 300 m Iso-bathen die flächenhafte Verteilung der Sauerstoffkonzentrationen geschätzt. Randwerte für küstennahe Gebiete ergeben sich in Oberflächennähe aus den höchsten in dieser Wassersicht gemessenen Sauerstoffkonzentrationen und unterhalb der euphotischen Schicht aus den geringsten in den jeweiligen Schichten gemessenen Konzentrationen².

Eine Trendfreiheit der Sauerstoffkonzentrationen über das gesamte Gebiet der zentralen Ostsee kann aufgrund der mit steigender Entfernung zu den Eingangspforten zur Nordsee fortschreitenden Aussüßung nicht in allen Tiefenhorizonten vorausgesetzt werden, ist aber zur Anwendung räumlicher Interpolationsverfahren notwendig. Es wurden mehrere Möglichkeiten entwickelt, dieses **Stationaritätsproblem** zu lösen.

Die Sauerstoffverteilungen können in fünf als trendfrei angenommenen Becken, dem Arkonabecken, dem Bornholmbecken, dem östlichen, nördlichen und westlichen Gotlandbecken berechnet werden. Im sich weit von Süden nach Norden erstreckenden östlichen Gotlandbecken kann eine Trendfreiheit auch nach dieser Einschränkung nur näherungsweise angenommen werden. Die geringe Flächendeckung der ozeanographischen Daten, die an die Beprobungsrouten der Forschungsschiffe gebunden sind, läßt eine weitere Datenaufspaltung ungünstig erscheinen

Eine zweite Möglichkeit wurde in einer Trendgleichung mit Polynomfunktionen gesehen. Polynome 1. Grad erzeugen gleichmäßig geneigte Flächen. Diese konnten die trendbedingten Veränderungen nicht hinreichend gut beschreiben. Das einströmende salzreiche Wasser umfließt unter ständiger Aussüßung die Insel Gotland, so daß man nicht von einer linearen Abnahme der Sauerstoffkonzentrationen in einer bestimmten Richtung ausgehen kann. Bei Versuchen mit Polynomen zweiten Grades nahmen diese in den wenig beprobten Küsterräumen extrem hohe, nicht interpretierbare Werte an.

Eine weitere Möglichkeit zur Eliminierung des trendbedingten Anteils, auf die hier ausführlicher eingegangen werden soll, ist die Schätzung des Trends t an allen Punkten x_i des Untersuchungsgebietes aus einer Linearkombination des durch Salzwasserzuströme gesteuerten Anteils $t_1(x)$ und des jahreszeitlichen Anteils $t_2(x)$:

$$t(x) := a_1 t_1(x) + a_2 t_2(x) \quad \text{für alle } x_i \in G \quad (3.1).$$

² Küstennahe Flachwassergebiete der Bodden und Förden (SCHIEWER & GLOCKE 1995) zeichnen sich durch hohe Primärproduktionsraten und dementsprechend hohe Konzentrationen des in der Photosynthese gebildeten Sauerstoffs aus. Das absinkende organische Material führt zu hohen Zehrungsraten und geringen Sauerstoffkonzentrationen unterhalb der Temperatursprungschicht.

Der Salzgehaltstrend $t_1(x)$ wurde für zwei Situationen getrennt berechnet. Einmal faßt er alle Datensätzen im Tiefenhorizont für Einstromjahre zusammen, in denen im letzten Jahr ein Salzwasserzufluß beobachtet wurde. Die zweite mögliche Situation umfaßt alle Datensätze des Tiefenhorizontes aus ruhigen Jahren ohne Salzwassereinstrom. Die Jahreszeitentrends $t_2(x)$ ergeben sich aus den Meßwerten im Tiefenhorizont für die vier Jahreszeiten Winter (Monate Januar bis März), Frühjahr (Monate April bis Juni), Sommer (Monate Juli bis September) und Herbst (Monate Oktober bis Dezember). Der allgemeine Trend $t(x)$ berechnete sich aus dem Mittelwert aller im Tiefenhorizont während der 30jährigen Untersuchungsperiode gemessenen Werte.

Die Anteilsparameter der beiden Trendanteile a_1 und a_2 wurden durch die Minimierung der quadratischen Differenzen der Terme in (3.1) ermittelt (3.2). Das Minimierungsproblem kann durch das Nullsetzen der partiellen Ableitungen nach a_1 und a_2 gelöst werden.

$$D = \sum_i (t(x_i) - a_1 \cdot t_1(x_i) - a_2 \cdot t_2(x_i))^2 = \min! \quad (3.2)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial D}{\partial a_1} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial D}{\partial a_2} = 0$$

Die Parameter a_1 und a_2 jeder Untersuchungsperiode geben an, welchen Beitrag die beiden Trendanteile zum beobachteten Trend leisten. Sie können durch folgende Formeln ermittelt werden:

$$a_1 = \frac{\sum_i t(x_i) \cdot t_1(x_i) - a_2 \cdot \sum_i t_1(x_i) \cdot t_2(x_i)}{\sum_i t_1^2(x_i)} \quad (\text{aus 3.2})$$

$$\text{und} \quad \Leftrightarrow \quad a_2 = \frac{\sum_i t_1^2(x_i) \cdot \sum_i t(x_i) \cdot t_2(x_i) - \sum_i t(x_i) \cdot t_1(x_i) \cdot \sum_i t_1(x_i) \cdot t_2(x_i)}{\sum_i t_1^2(x_i) \cdot \sum_i t_2^2(x_i) - \sum_i t_1(x_i) \cdot t_2(x_i)^2}$$

In geringen Tiefen (ab 20 m Tiefe) bis in den Bereich der Halokline ist ein starker jahreszeitlicher Einfluß mit sinkenden Sauerstoffkonzentrationen bis zum Ende des Sommers zu beobachten. In Oberflächennähe (0 m-Tiefenschicht) konnte kein Trend festgestellt werden. Das Absinken der Halokline von den Eingangsbereichen mit wachsender Tiefe des Meeresbodens und sinkender Schichtungsstabilität spiegelt sich in allen Tiefenhorizonten in relativ geringen Sauerstoffkonzentrationen für die südlichen und westlichen Becken (Arkona- und Bornholmbecken) wider. Der Einstrom von Salzwasser führt zu einem Anstieg der Sauerstoffkonzentrationen in hohen Tiefen. Im Zwischenwasser des östlichen Gotlandbeckens waren in 80-100 m Wassertiefe relativ geringe Sauerstoffkonzentrationen Folge der Einstromereignisse. Wasserschichten mit geringen Sauerstoffkonzentrationen wurden vom einströmenden Salzwasser in die Zwischenwasserschicht verdrängt, in dem die Sauerstoffkonzentrationen zurückgingen.

Die flächenhafte Schätzung des nicht trendbedingten Anteils der Sauerstoffkonzentrationen erfolgte unter Anwendung des inversen Distanz-Verfahrens. Geostatistische Verfahren konnten nicht genutzt werden, da Variogrammanalysen für 30 Jahre mit jeweils 4 Untersuchungsperioden, 5 Becken und ca. 10 Tiefenhorizonten aufgrund der großen Anzahl der zu berechnenden und per Hand anzupassenden Variogramme nicht möglich erschien. Eine Zusammenfassung der Becken und eine Trendschätzung in den Tiefenhorizonten mit den oben beschriebenen Verfahren reduzierte die Anzahl der zu untersuchenden Fälle, diese blieb aber sehr hoch.

Zur Beschreibung der Tiefenveränderungen der Sauerstoffkonzentrationen wurden Versuche mit zwei Wachstumsfunktionen (der Logistischen und der Gompertz-Funktion) und

verschiedenen Spline-Funktionen mit dem Programm MATHEMATICA (KOFLER 1995) durchgeführt. Die freien Parameter der Wachstumsfunktionen konnten nach einer logarithmischen Transformation mit Methoden der linearen Regression geschätzt werden. Die Gompertz-Funktion konnte den starken Abfall der Sauerstoffkonzentrationen im Bereich der Halokline nicht ausreichend annähern. Die Anpassung der Tiefenveränderungen an eine Logistische Funktion führte zu guten Ergebnissen. Spline-Interpolationen wurden verworfen, da diese zwar durch alle Meßpunkte verlaufen, in den nicht untersuchten Tiefen aber sehr stark schwanken können.

In jedem Gitterpunkt wurden Bodenwerte und die Tiefe der Grenzschichten auf einem regelmäßigen Gitter durch eine Tiefenanpassung geschätzt (Bild 3.1). Aus der Lage der Grenzschichten konnten Flächen und Volumina mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung berechnet werden.

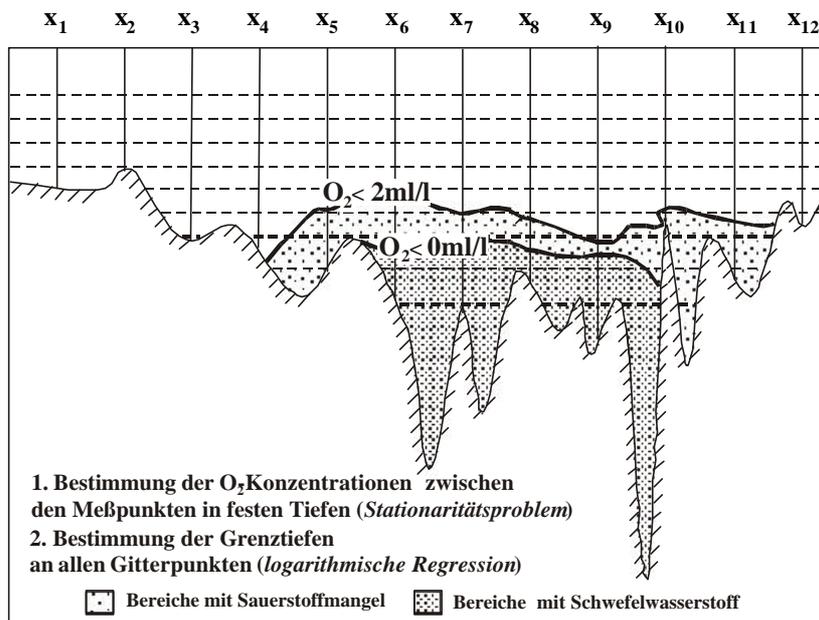


Bild 3.1: Berechnung der Bereiche mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung nach der ersten Modellidee, Darstellung im Profilschnitt.

Eine Angabe von Sicherheitsintervallen ist bei diesem Verfahren nicht möglich. Es existieren mehrere Fehlerquellen und es werden Methoden der räumlichen Interpolation verwendet, die eine Fehlerabschätzung verhindern. Gleich zu Beginn der Modellierung werden die in verschiedenen Tiefen gemessenen Werte zu den Tiefenhorizonten um die 0 m, 20 m, 25 m, 30 m, 40 m, 50 m, 60 m, 70 m, 80 m, 90 m, 100 m, 125 m, 150 m und 300 m Isobathen zusammengefaßt. Es wird damit eine Homogenität in den Tiefenschichten geschaffen, die nicht der Realität entspricht und Schwankungen innerhalb dieser Schichten gehen in das Modell nicht ein. Die hohe Anzahl der zu untersuchenden Tiefenhorizonte führt zu einer geringen Datenbasis für die räumlichen Interpolationen in den einzelnen Tiefenschichten und verhindert die Anwendung geostatistischer Verfahren und die Abschätzung des Schätzfehlers. Es erscheint weiterhin ungünstig, eine Tiefenanpassung an den unabhängig voneinander interpolierten Werten der verschiedenen Horizonte vorzunehmen - also zwei Modellierungsschritte so miteinander zu koppeln, daß das Verfahren mit den größeren Ungenauigkeiten zuerst erfolgt.

3.1.2 Modellidee

In der in dieser Arbeit umgesetzten Modellidee werden einige Grundideen der Modellentwicklung genutzt, neu geordnet, und ergeben eine aus zwei Schritten bestehende Methode, die es ermöglicht, Veränderungen der Sauerstoffverhältnisse im Zwei- und Dreidimensionalen zu fassen und Schätzungen zur Genauigkeit anzugeben. Das Modell (Bild 3.2) basiert auf der Kopplung der Anpassung der Tiefenveränderung an eine Logistische Funktion mit der

Anwendung geostatistischer Verfahren. Informationen zu den Sauerstoffkonzentrationen an allen beprobten Stationen und die räumlichen Beziehungen zwischen den Meßwerten werden in die Betrachtung einbezogen.

In einem ersten Schritt erfolgte an allen beprobten Stationen x_i die Anpassung der mit wachsender Tiefe tendenziell abnehmenden Sauerstoffkonzentrationen an eine Logistische Funktion. Mit dieser wurden die Tiefen geschätzt, an denen erstmals Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l bzw. 0 ml/l auftraten. Unterhalb der 2 ml/l-Grenztiefen erstrecken sich die Gebiete mit Sauerstoffmangel und unterhalb der 0 ml/l-Grenztiefe die Gebiete mit Schwefelwasserstoffbildung. Zur Schätzung des flächenhaften Verlaufes der Grenztiefen wurden Methoden der Geostatistik herangezogen, die aus den Werten der Grenztiefen an den beprobten Stationen den wahrscheinlichsten mittleren Verlauf der Grenztiefen ermitteln. Zu jeder geschätzten Grenztiefe wird eine Varianz des möglichen Fehlers ermittelt. Informationen zur Verteilung der Stationen mit ausreichender Sauerstoffversorgung konnten zur verbesserten Lokalisierung der Grenzbereiche der Gebiete mit Sauerstoffdefiziten genutzt werden.

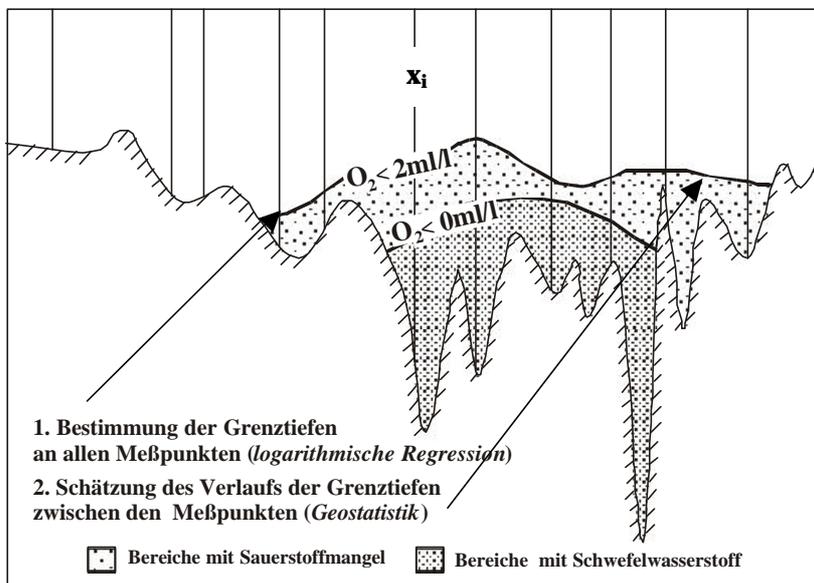


Bild 3.2: Berechnung der Bereiche mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung nach der umgesetzten Modellidee, Darstellung im Profilschnitt.

Die Gebiete mit geringen Sauerstoffkonzentrationen werden einerseits durch die Tiefenlage des Meeresbodens³ und andererseits durch die Fläche der 2 ml/l bzw. 0 ml/l-Grenztiefen begrenzt, so daß Flächen- und Volumenberechnungen der Gebiete unterhalb der Grenztiefen möglich werden. Die Schätzvarianzen ermöglichen eine zusätzliche Abschätzung der Genauigkeiten dieser Werte: von jeder geschätzten Grenztiefe wurde zum einen - zur Berechnung einer unteren Grenze die Schätzvarianz subtrahiert - und zur Berechnung eines oberen möglichen Volumens addiert (Bild 3.3). Innerhalb dieses Bereiches liegen 68.3% aller möglichen Volumina. Die Berechnung eines 95%-Konfidenzintervalls durch Addition und Subtraktion der zweifachen Schätzvarianz wurde verworfen, da diese Intervalle sehr groß wurden. Eine Gesamtaussage, daß die Gebiete mit geringen Sauerstoffkonzentrationen zwischen Salzgehaltssprungschicht und Meeresboden liegen, ist bekannt und enthält keine neuen Informationen. Das zur Flächeninterpolation verwendete Kriging-Verfahren schätzt ohne systematischen Fehler. Der wahre Wert liegt also nicht prinzipiell im unteren oder oberen Bereich des 95%-Konfidenzintervalls jedes Punktes (was einer Unter- bzw. Überschätzung entsprechen würde). Bei der Zusammenfassung der Informationen aller Punkte kann eine mittlere Verteilung der wahren Tiefen angenommen werden. Ein Volumen innerhalb der in Bild 3.3. dargestellten Bereiche ist daher mit einer Häufigkeit über 68.3% zu erwarten.

³ Nach einem im Institut für Meereskunde in Warnemünde entwickelten Tiefenprofil von SEIFERT & KAYSER (1995).

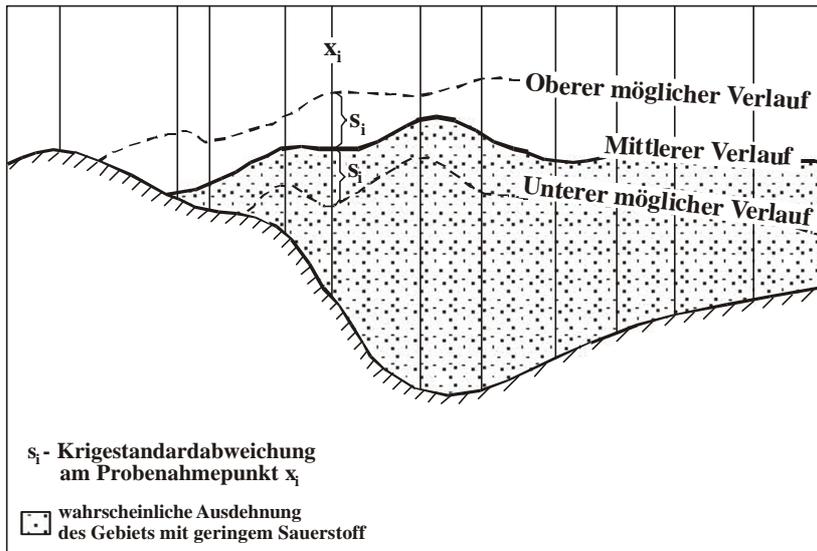


Bild 3.3: Berechnung des größten und kleinsten möglichen Volumens als Bereich unterhalb der oberen bzw. unteren Schranke der Grenztiefen.

Das Ergebnis der Modellierung ist die Beschreibung der Gebiete mit Sauerstoffkonzentrationen unter 2 bzw. 0 ml/l durch Flächen- und Volumenangaben und Karten für jede Untersuchungsperiode.

3.2 Beschreibung der Tiefenveränderungen an den Meßpunkten

Typisch für die Oberwasserschicht bis zur Salzgehaltssprungschicht (Halokline) sind langsam abnehmende Sauerstoffkonzentrationen. Diese Wasserschicht wird über die Grenze Wasser/Luft mit Sauerstoff versorgt. Infolge regelmäßiger Durchmischung durch den Wind und die jahreszeitlich bedingten Durchmischungen im Frühjahr und Herbst kann die gesamte obere Wasserschicht als ausreichend mit Sauerstoff versorgt angesehen werden. Die Salzgehaltssprungschicht trennt dieses salzarme und sauerstoffreiche Wasser vom Tiefenwasser mit höheren Salzgehalten (Bild 3.4).

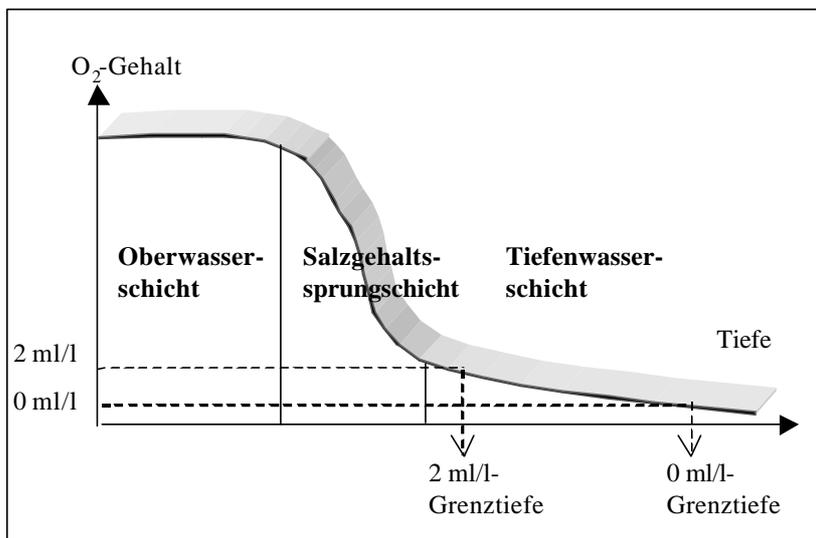


Bild 3.4: Veränderungen des Sauerstoffgehaltes in der Wassersäule

Diese Schichtung ist sehr stabil, so daß nur eine sehr geringe advective Durchmischung der beiden Wasserschichten möglich ist. Daraus folgend nimmt der Sauerstoffgehalt in der Halokline sehr stark ab. Für das Tiefenwasser sind geringfügig weiterhin abnehmende, sehr geringe Sauerstoffkonzentrationen typisch (NEHRING 1981 & 1995a).

3.2.1 Bestimmung einer Modellfunktion

Die Abnahme der Sauerstoffkonzentrationen Y_i mit zunehmender Tiefe t_i von einem maximalen Wert Y_{\max} in Oberflächennähe zu einem minimalen Wert Y_{\min} im Tiefenwasser soll an allen Meßstellen mit Hilfe einer an den Schwankungsbereich der Sauerstoffkonzentrationen angepaßten *Logistischen Funktion* dargestellt werden:

$$Y(t) = (Y_{\max} + eps) - \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{1 + e^{a-bt}} \quad (3.3.)$$

Dabei entsprechen Y_{\max} und Y_{\min} dem größten bzw. kleinsten in der Wassersäule des zu untersuchenden Meßpunktes beobachteten Sauerstoffwert. Zur Schätzung der freien Parameter a und b aus den Sauerstoff- und Tiefenangaben Y_i wird das Logit-Modell herangezogen.

$$\text{Sei} \quad p = \frac{e^{a-bt_i}}{1 + e^{a-bt_i}} = \frac{Y_i - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}}$$

$$\text{Dann gilt} \quad \ln\left(\frac{p}{p-1}\right) = a-bt_i \quad (3.4.)$$

Die Parameter a und b ergeben sich dann durch die Minimierung der Summe aller quadrierten Differenzen zwischen den Termen auf beiden Seiten der Gleichung (3.4). Probleme entstehen durch die Einführung des Logarithmus. Die logarithmische Funktion nimmt bei Funktionswerten in der Nähe von Y_{\max} sehr große Werte an, ist Null für den Wert $0.5 \cdot (Y_{\max} + Y_{\min})$ und strebt in der Nähe von Y_{\min} gegen minus Unendlich:

$$\text{Es gilt:} \quad \frac{p}{p-1} \rightarrow \infty \quad \text{für } p \rightarrow 1 \quad \text{und } Y_i \rightarrow Y_{\max}$$

$$\text{und} \quad \frac{p}{p-1} \rightarrow -\infty \quad \text{für } p \rightarrow 0 \quad \text{und } Y_i \rightarrow Y_{\min}.$$

Schlechte Anpassungen werden gerade im mittleren Wertebereich erreicht, da Y_i^* den Wert 0 für $Y_i^* = 0.5 \cdot (Y_{\max} + Y_{\min})$ annimmt:

$$\ln\left(\frac{p}{p-1}\right) = 0 \quad \text{für } \frac{p}{p-1} = 1 \quad \text{und } Y_i^* = 0.5 \cdot (Y_{\max} + Y_{\min}).$$

Es war eine Wichtung der logarithmierten Werte notwendig, um gute Anpassungen im mittleren Wertebereich zu erhalten. Hohe Gewichte erhielten die Werte im Bereich der Halokline um den Wert $0.5 \cdot (Y_{\max} + Y_{\min})$ und geringere Gewichte in der Oberwasser- und Tiefenwasserschicht. Die Wichtungswerte q ($i = 1, 2, \dots, n$) ergeben sich aus einem Faktor, welcher im Bereich der für die Salzgehaltssprungschicht typischen hohen Gradienten groß wird und einem zweiten Faktor, der eine gute Anpassung im Wertebereich [0 ml/l, 2 ml/l] erzwingt und die zu berechnende Kurve an die Funktionswerte heranzieht.

Die Wichtungswerte werden nach der folgenden Funktion aus den Meßwerten berechnet:

$$c_1 = \frac{1}{n^2} \quad \text{und} \quad c_i = \frac{1}{n^2} + a \cdot \frac{y_i - y_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \cdot \frac{1}{t_i - t_G - eps} \quad \text{für } i = 2, \dots, n \quad (3.5)$$

Dabei werde α so gewählt, daß $\sum_{i=1}^n c_i = 1$ gilt. Der Parameter t_G garantiert eine gute Anpassung der Logistischen Funktion für Sauerstoffkonzentrationen nahe von 2 ml/l und 0 ml/l. Er nimmt die Tiefe des Meßwertes an, der der zu berechnenden 2 ml/l-Grenztiefe am nächsten liegt oder ergibt sich aus der mittleren Tiefe der den 2 ml/l- und 0 ml/l-Grenztiefen benachbarten Meßtiefen.

In der gewichteten Regression ergeben sich die freien Parameter a und b aus der Lösung des Optimierungsproblems

$$\sum_{i=1}^n c_i \cdot (Y^* - a - bt_i) = \min! \quad (3.6)$$

Das Ergebnis der Tiefenanpassungen an eine Logistische Funktion mittels einer einfachen linearen Regression der logarithmierten Werte und einer gewichteten Regression dieser Werte sowie die Verteilung der Gewichte wird an drei Beispielen in den Bildern 3.5.1. bis 3.5.3. dargestellt.

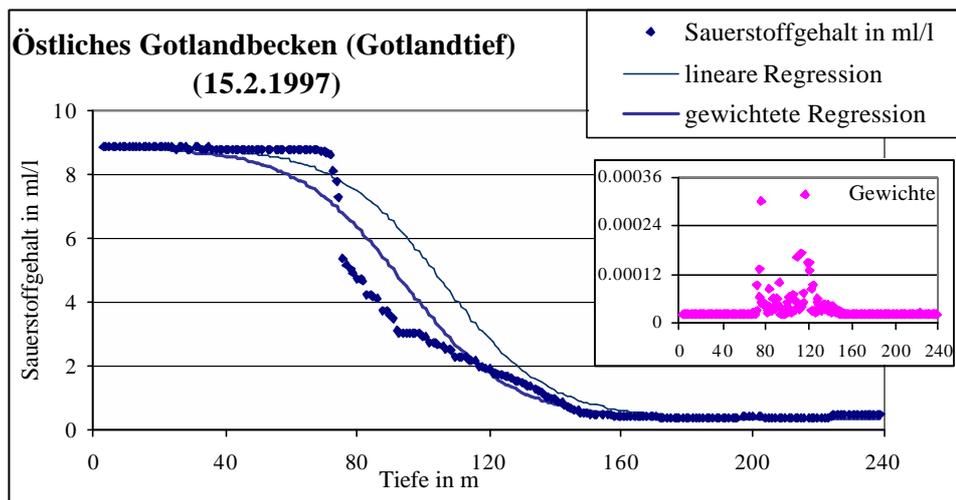


Bild 3.5.1: Anpassung der Veränderungen mit zunehmender Tiefe und Verteilung der Gewichte der gewichteten Regression an ausgewählten Stationen: Beispiel Gotlandtief.

Im östlichen Gotlandbecken (Bild 3.5.1) standen für den 15.2.1997 insgesamt 234 Messungen zur Anpassung der abnehmenden Sauerstoffkonzentrationen über 240 Tiefenmeter zur Verfügung. An dieser sorgfältig beprobten Station wurde für alle Sauerstoffkonzentrationen eine logarithmische Transformation nach (3.4) durchgeführt ($Y_{\max} = 8.89$ ml/l, $Y_{\min} = 0.35$ ml/l). Die Veränderungen der logarithmierten Werte wurden durch eine lineare Funktion $a+bt$ in Abhängigkeit von den Tiefenwerten t beschrieben. Die Parameter der linearen Regression sind $a = 6.669$ und $b = -0.0628$ bei einem Bestimmtheitsmaß von $B = 0.899$. Die gewichtete Regression führte zu einer Berechnung geringerer logarithmierter Werte in Oberflächennähe ($a = 5.794$) und zu einer geringeren Abnahme der Werte mit zunehmender Wassertiefe ($b = -0.615$). Das Bestimmtheitsmaß liegt bei $B = 0.873$. Hohe Gewichte wurden im Tiefenbereich von 80-120 m vergeben, so daß in diesem Intervall eine deutliche Verbesserung der Anpassung erreicht werden konnte. Sauerstoffkonzentrationen von 2 ml/l wurden an dieser Station in 117.3 m Tiefe gemessen. Die lineare Regression berechnete Sauerstoffkonzentrationen von 3.19 ml/l und die gewichtete Regression von 2.01 ml/l in dieser Tiefe.

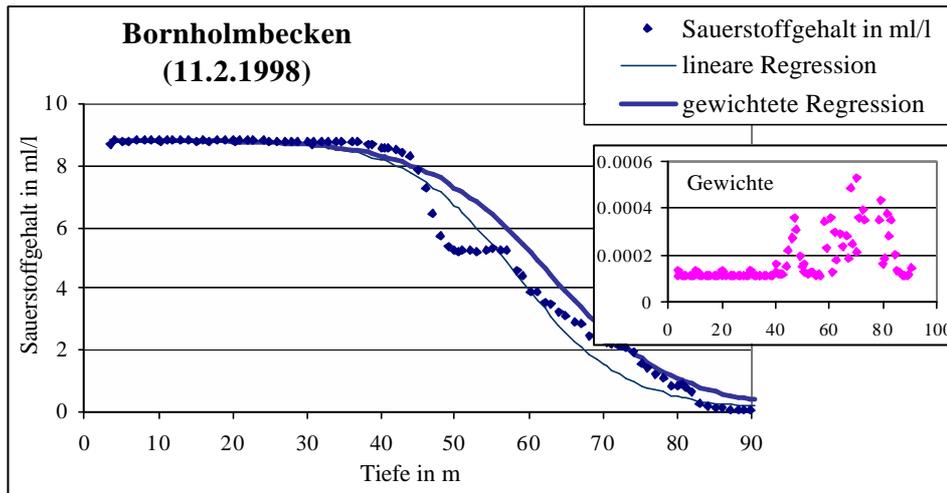


Bild 3.5.2: Anpassung der Veränderungen mit zunehmender Tiefe und Verteilung der Gewichte der gewichteten Regression an ausgewählten Stationen: Beispiel Bornholmbecken.

Im Bornholmbecken (Bild 3.5.2) lieferte die beschriebene Methode für 96 Messungen bei Anwendung der einfachen linearen Regression die Parameter $a = 7.981$, $b = -0.137$ und $B = 0.891$. Die gewichtete Regression führte zu einer langsameren Abnahme der logarithmierten Werte ($b = -0.119$) und zu einer Verringerung der Schätzwerte in Oberflächennähe ($a = 7.487$). Das Bestimmtheitsmaß stieg auf 0.903. Hohe Gewichte wurden in Bereichen hoher Gradienten (40-70 m) und in der Nähe der 2 ml/l-Grenztiefen (70-80 m) vergeben. Eine verbesserte Anpassung war in der Nähe der 2 ml/l-Grenztiefen möglich. Diese lag in der Meßreihe zwischen 72.9 m und 74.1 m. Das Ergebnis der gewichteten Schätzung stimmt mit den Meßwerten überein, die einfache lineare Regression schätzte die Tiefe der 2 ml/l-Grenztiefen auf 67.5 m.

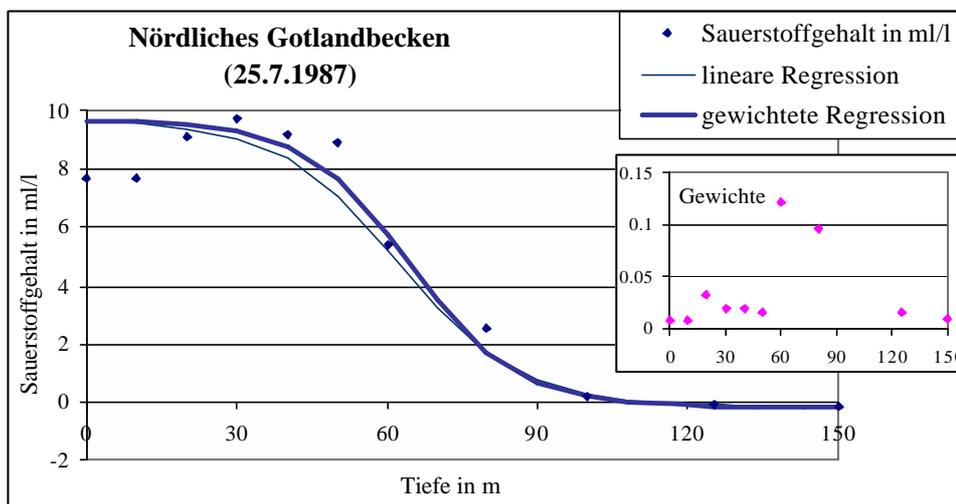


Bild 3.5.3: Anpassung der Veränderungen mit zunehmender Tiefe und Verteilung der Gewichte der gewichteten Regression an ausgewählten Stationen: Beispiel Nördliches Gotlandbecken.

Im nördlichen Gotlandbecken (Bild 3.5.3) bestand die Meßreihe am 25.7.1987 aus nur 11 Werten. Die Messungen wurden ausschließlich in Standardtiefen von 0 m, 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m, 60 m, 80 m, 100 m, 125 m und 150 m Tiefe durchgeführt. Diese Meßwertverteilung legt häufig vor. Der steile Abfall der Kurve der gewichteten Regression beginnt etwas später und verläuft dafür steiler ($b = -0.0925$ statt $b = -0.0823$). Im Bereich der 2 ml/l-Grenztiefen liegen beide Schätzkurven übereinander und unterschätzen den nächstliegenden

Meßpunkt trotz hoher Gewichte. Die Abstände zwischen den Meßpunkten und der logistischen Funktion bleiben in allen Fällen unter 2 m.

Tiefenanpassungen an weiteren Stationen werden im Anhang B dargestellt. Eine Anpassung der Tiefenveränderungen liefert mit den Methoden der Regression gute Ergebnisse in der Nähe der 2 ml/l- und 0 ml/l-Grenztiefen. Die Anwendung der gewichteten Regression verbessert die Anpassung in Bereichen starker Gradienten und im Bereich der zu schätzenden Grenztiefen. Bessere Ergebnisse können nur mit Iterationsverfahren der nichtlinearen Regression erzielt werden. Diese Verfahren benötigen jedoch Anfangswerte a^* und b^* zur Schätzung der Werte a und b und verhalten sich nur in einem kleinen Intervall um die Anfangswerte herum stabil. Aufgrund der großen Zahl von Meßpunkten wurde in dieser Arbeit mit den Ergebnissen der gewichteten Regression gearbeitet.

3.2.2 Berechnung der Grenztiefen

Die Anpassung der Sauerstoffveränderungen mit zunehmender Tiefe an allen im Untersuchungszeitraum beprobten Stationen und die Berechnung der Tiefen, an denen Sauerstoffkonzentrationen von 2 ml/l bzw. 0 ml/l erstmals unterschritten wurden (2 ml/l- und 0 ml/l-Grenztiefen), basieren auf den Berechnungen eines DELPHI-Programmes. Dieses greift auf alle in der Tiefenwerte-Datei gespeicherten Meßpunktfolgen zu, ermittelt durch Minimierung von (3.6) optimale Parameter a und b und berechnet die Grenztiefen an Stationen mit geringen Sauerstoffkonzentrationen und Randwerte an den übrigen beprobten Stationen.

Wurde eine Station im Untersuchungszeitraum mehrfach beprobt, ergab sich die Lage der Grenztiefen aus dem Mittelwert aller zur Verfügung stehenden Reihen. Lag die Genauigkeit der Schätzung der Grenztiefen unter der einer linearen Interpolation oder standen weniger als vier Messungen an einer Station zur Verfügung, wurde die Lage der Grenztiefen aus den beiden nächstgelegenen Meßwerten der Reihe linear interpoliert. Die Genauigkeit der Anpassung liegt damit über der einer stückweisen Linearisierung. Ziel der Untersuchungen ist die Beschreibung der mittleren Sauerstoffverhältnisse. Hohe kleinräumige Schwankungen können nicht beschrieben werden, und so flossen kleinskalige Veränderungen mit Sauerstoffdifferenzen von mehr als 5 ml/l auf 10 m Tiefe nicht in die Tiefenanpassung ein. Da für die Sauerstoffveränderungen in Bodennähe hohe Gradienten typisch sind, wurden hier Gradienten bis zu 3 ml/l auf 1 m Tiefenzunahme akzeptiert.

Zur geostatistischen Auswertung wurde eine dBase-Tabelle *geostat.dbf* aufgebaut, welche die berechneten Grenztiefen und Randwerte an allen Stationen mit Sauerstoffmangelsituationen, Informationen zur Berechnung der Grenzsichten, die größte beprobte Tiefe und den zugehörigen Sauerstoffwert enthält (Tabelle 3.1).

SpaltenName	Spaltenformat ⁴	Inhalte
ID	Numerisch (20,4)	Eine eindeutige, fortlaufend nummerierte Zahl des berechneten Tiefenwertes.
OrtID	Numerisch (6,0)	Eine eindeutige Zahl der Station.
Laenge	Numerisch (20,4)	Geographische Länge (dezimal) in Grad östlicher Länge
Breite	Numerisch (20,4)	Geographische Breite (dezimal) in Grad nördlicher Breite
UTMLon	Numerisch (20,4)	Geographische Länge auf dem 33. Meridianstreifen in UTM-Koordinaten
UTMLat	Numerisch (20,4)	Geographische Breite auf dem 33. Meridianstreifen in UTM-Koordinaten (entspricht der Entfernung zum

⁴ Eine Spalte mit dem Spaltenformat Numerisch (20,4) kann Zahlen mit einer Folge von maximal 20 Ziffern mit maximal 4 Nachkommastellen speichern. Eine Spalte mit dem Format Boolean enthält Wahrheitswerte (Wahr oder Falsch), das Format Date dient der Speicherung von Datumswerten.

SpaltenName	Spaltenformat ⁴	Inhalte
Becken	Numerisch (4,0)	Äquator in Meter)
Datum	Date	Lage der Station in den 5 Teilbecken
Tiefe2ml	Numerisch (20,4)	Datum der Messung
Tiefe0ml	Numerisch (20,4)	Tiefenlage der 2 ml/l-Grenzschicht
ConstA	Numerisch (20,4)	Tiefenlage der 0 ml/l-Grenzschicht
ConstB	Numerisch (20,4)	Konstante a der logistischen Funktion
Randwert2	Boolean	Konstante b der logistischen Funktion
Randwert0	Boolean	Ist wahr, wenn Tiefe2ml ein Randwert ist.
MaxTief	Numerisch (20,4)	Ist wahr, wenn Tiefe0ml ein Randwert ist.
Boden	Numerisch (20,4)	Speichert die maximale beprobte Tiefe an.
		Speichert den Sauerstoffwert der maximalen beprobten Tiefe.

Tabelle 3.1: Grundaufbau der geostatistischen Tabelle

Auswahlen und Sortierungen sind nach den indizierten Spalten ID, OrtID und Datum möglich. Die Einführung von Randwerten war zur geostatistischen Flächenschätzung notwendig, um die Grenzen der Mangelgebiete gut annähern zu können.

An Stationen ohne Mangelzustände wurden **Randwerte** vergeben. Die 2ml/l- und 0 ml/l-Grenztiefen erhielten einen Randwert von 20 m bzw. 30 m unter dem Meeresboden zugewiesen (Bild 3.6).

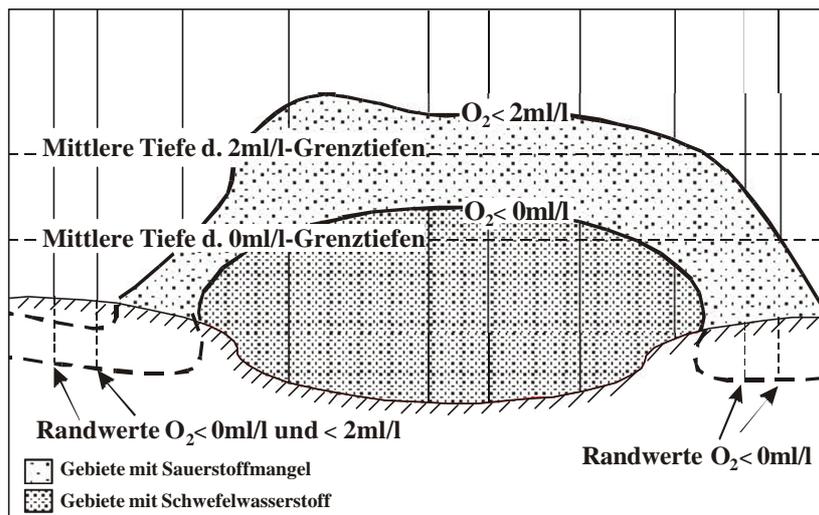


Bild 3.6: Definition von Randwerten in den Übergangsregionen der Sauerstoffdefizitgebiete vom Tiefenwasser ins Sediment.

Im Sediment tritt schon in wenigen Zentimetern Tiefe kein Sauerstoff mehr auf. Die Grenzwerte wurden in größere Tiefen unter den Meeresboden gesetzt, damit kleinräumige Schwankungen die Lage der Grenztiefen nicht über der Sedimentoberfläche schätzen. Der Nuggeteffekt, der die quadratische Summe der kleinskaligen Variabilitäten beschreibt, bleibt bei den 2ml/l-Grenztiefen meist unter 80 m^2 und erreicht maximale Werte von 150 m^2 . In die Analyse der 0ml/l-Grenztiefen mußten die Randwerte aufgrund der wenigen Messungen in die Strukturanalyse einbezogen werden⁵, so daß der Nugget hier Werte bis zu 800 m^2 erreichte, jedoch meist kleiner 300 m^2 war. Randwerte wenig über der Wurzel dieses Nuggets bei 10 m bzw. 20 m unter der Sedimentoberfläche hätten die Datenlage besser wiedergegeben. Schätzfehler können entstehen, wenn eine Auflösung über der Dichte des Interpolationsgitters mit einem Gitterabstand von 18 km gewählt wird. Auf dem Interpolationsgitter entsteht kein Fehler, da für die Größe der Mangelgebiete nur interessant ist, ob die Grenztiefen über oder unter dem Meeresboden liegen. Der Gradient des Abtauchens der Grenztiefen unter das Sediment ist zu steil, wenn höhere Auflösungen gewählt werden. An einer Bei-

⁵ Dieses Verfahren wird im Kapitel 3.3.2 bei der Analyse der 0 ml/l-Grenztiefen erläutert.

spieldatei im Herbst 1992 wird die Größe des Schätzfehlers an einem Beispiel erläutert (Tabelle 3.5 in Kapitel 3.5).

Die Variablen Randwert2 und Randwert0 speichern die Informationen, ob es sich bei dem Grenztiefenwert um Randwerte oder echte interpolierte Werte handelt. Die Lagebeziehungen zwischen den Randwert-Punkten und den Meßpunkten mit Mangelsituationen gehen durch Anwendung des Indikator-Kriging-Verfahrens in das Modell ein.

Aus der geostatistischen Tabelle wurden Dateien für insgesamt 120 Untersuchungsperioden (4 Quartale der Jahre 1969-1999) ausgewählt und zur Bearbeitung in den geostatistischen Programmen (VARIOWIN, GSLIB) im geeigneten Format gespeichert. Zur geostatistischen Analyse waren Informationen zu den Lagekoordinaten (UTM-Koordinaten), zur Tiefenlage der 2 ml/l- und 0 ml/l-Grenztiefen und Randwertinformationen notwendig.

3.3 Die flächenhafte Analyse der Grenztiefen

3.3.1 Veränderung der Grenztiefen in Raum und Zeit

"The first order of business in any data analysis is to become familiar with the data set."
(ENGLUND & SPARKS 1991)

Genauere Untersuchungen der berechneten 2 ml/l- und 0 ml/l-Grenztiefen waren notwendig, um den unter 3.2. beschriebenen Algorithmus verbessern, die Vollständigkeit der Datenbank kontrollieren und die passenden Interpolationsverfahren zur Schätzung der Grenzebenen herausfinden zu können.

Die statistische Modellbildung basiert auf Informationen zu den mittleren und extremen Werten und zum Schwankungsverhalten der zu untersuchenden Größen in Raum und Zeit. Die explorativen Untersuchungen und Visualisierungen der Grenztiefen und ihrer Veränderungen im Raum und in der Zeit dienen dazu, wichtige Datenstrukturen zu erkennen. Informationen über Ausreißerwerte außerhalb der 3σ -Umgebung, Nicht-Stationaritäten und Meß- oder Berechnungsfehler sind zum Erkennen räumlicher Muster und Beziehungen sowie zur Schätzung weiterer Werte notwendig.

In der explorativen Datenanalyse wurden Meßpunkte im Bereich von 11° E - 26° E und 54° N - 61° N unter Nutzung der Statistik - Programme SPSS und EXCEL und des Kartenbearbeitungsprogrammes SURFER untersucht. Das Untersuchungsgebiet wurde später aus Stationaritätsgründen eingeschränkt.

Innerjährliche Variabilitäten in den Teilbecken

Ausführlich wird auf die innerjährliche Variabilität im Sauerstoffgehalt in MATTHÄUS (1976 & 1978b) eingegangen. Die Ausdehnung der Wasserkörper mit geringen Sauerstoffkonzentrationen ändert sich mit der Tiefenlage der Grenztiefen, welche im Arkona- und Bornhombekken sowie im westlichen und nördlichen Gotlandbecken starke innerjährliche Variationen (Bild 3.7) zeigen.

Im **Arkonabecken und im Übergangsgebiet zur Nordsee** wurden in den Winter- und Frühjahresmonaten nur sehr selten Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l beobachtet. Im Spätsommer (Monate August bis September) verlagerten sich die 2 ml/l-Grenztiefen in geringere Tiefen. Schwefelwasserstoff wurde nur im Frühherbst (Monate September/Okttober) der Jahre 1981 und 1983 in der Mecklenburger Bucht gemessen.

Im Arkonabecken existiert ganzjährlich eine Sprungschicht im Sauerstoffgehalt, welche im zeitigen Frühjahr mit der maximalen Ausdehnung der Oberwasserschicht kurz über dem Boden liegt (MATTHÄUS 1976). Im Frühjahr bildet sich mit der Erwärmung der oberen Wasserschichten eine kalte Zwischenwasserschicht heraus. Vor der seegangsbedingten Auflösung der Termischen Schichtung gelangen nur geringe Sauerstoffmengen in Wassertiefen unterhalb 20 m, so daß sich aufgrund der hohen Zehrungsraten zum Abbau organischen

Materials die 2 ml/l-Grenztiefen in den Sommermonaten in das Zwischenwasser in 20-40 m Tiefe verlagern können. Die Sauerstoffversorgung im Tiefenwasser in 40-45 m Tiefe basiert auf Zuströmen von sauerstoffreichem Beltseewasser in die bodennahen Schichten der Arkonasee im Winterhalbjahr (MATTHÄUS 1976 & 1978b).

Im **Bornholmbecken** geht die Amplitude der innerjährlichen Schwankungen bereits deutlich zurück, geringe Sauerstoffkonzentrationen und Schwefelwasserstoff wurden häufiger und in größeren Tiefen gemessen. Es sind noch deutliche Unterschiede in der Tiefenlage der 2 ml/l-Grenztiefen mit geringen Tiefen in den Monaten September bis November und höheren im März bis Juni zu beobachten. Auch bei der Menge der Beobachtungen von Schwefelwasserstoffbildung zeigt sich eine ähnliche Tendenz: häufiges Auftreten schon in geringen Tiefen in den Monaten August bis November und seltene Messungen in hohen Tiefen in den Winter- und Frühjahrsmonaten. Die herbstliche Wasserumschichtung zeigt im Bornholmbecken kaum Auswirkungen auf die Lage der Grenztiefen.

Zuströme aus dem Arkonabecken transportieren im Sommerhalbjahr große Mengen abgestorbener Planktonorganismen in die Zwischenschicht (MATTHÄUS 1976). Der Abbau dieser organischen Substanz in den relativ warmen Wasserschichten führt im Herbst zu hohen Sauerstoffzehrungsraten in mittleren Tiefen. Die Tiefenwasserbereiche werden erst im Winter durch Intrusionen aus dem Arkonabecken wieder mit Sauerstoff versorgt (MATTHÄUS 1976).

Schwefelwasserstoffbildung wurde im Bornholmbecken in den Jahren 1971, 1975, 1978/79, 1981/82, 1984-1989 und 1995/96 festgestellt. Ganzjährig herrschten 1982, 1988/89 und 1996 anoxische Verhältnisse.

Im **östlichen Gotlandbecken** konnte eine innerjährliche Variation in den tiefen Bereichen nicht festgestellt werden. Das östliche Gotlandbecken war vom Winter 1970 bis zum Frühjahr 1971 und vom Winter 1977 bis zum Winter 1978 frei von Schwefelwasserstoff. Kürzere schwefelwasserstofffreie Perioden traten in den Jahren 1971, 1973, 1974, 1978, 1994 und 1995 auf. Für den Winter 1988, den Herbst 1990 und das Frühjahr und Sommer 1998 ist die Datendichte nicht ausreichend.

Im **westlichen Gotlandbecken** ist eine Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse durch Zuströme von sehr kaltem sauerstoffreichem Wasser aus dem Bottnischen Meerbusen, Termische Konvektionen und seegangsbedingte Durchmischungen im Herbst und Winter (NEHRING & FRANCKE 1971; MATTHÄUS 1978a) typisch, so daß ein deutlicher Jahresgang existiert. Hohe Tiefenlagen der Bereiche mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung treten charakteristisch in den Winter- und Frühjahrsmonaten auf, geringere Tiefen sind typisch für die Herbstmonate. Die Tiefenlage der Grenztiefen zeigte ihre geringsten Werte vor der schwedischen Küste. Das westliche Gotlandbecken war in den Jahren 1969, 1971, 1973, 1976-78, 1981, 1991/92 und 1997 frei von Schwefelwasserstoff. Die längste Periode mit günstigen Sauerstoffverhältnissen dauerte vom Frühjahr 1994 bis zum Frühjahr 1996. In den Jahren 1987, 1990 und 1998 fehlen Daten zu den Verhältnissen im westlichen Gotlandbecken.

Als **nördliches Gotlandbecken** wird hier das Gebiet nördlich vom Farötief und östlich vom Landsorttief bis zu den Eingangsbereichen des Finnischen Meerbusen bezeichnet. Die 2 ml/l- und 0 ml/l-Grenztiefen waren hier, aufgrund der geringen Tiefen im Finnischen Meerbusen und der Küstennähe, in relativ geringen Tiefen zu finden. Der Jahresgang zeigt ein ähnliches Verhalten wie im westlichen Gotlandbecken: hohe Tiefen in den Wintermonaten ab November und den ersten Frühjahrsmonaten, geringe Tiefenlagen in den Monaten Juni bis Oktober. Hier wird die Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse im Winterhalbjahr auf Diffusionsprozesse (MATTHÄUS 1984) zurückgeführt. Kürzere Perioden ohne Schwefelwasserstoffbildung treten in vielen Jahren auf (1970-80, 1982, 1984/85, 1991). Die längste Periode ohne Schwefelwasserstoff begann im Frühjahr 1991 und dauerte bis zum Herbst 1998. In diesem Zeitraum trat nur im Herbst 1991, 1993 und 1998 kurzzeitig an einem Meßpunkt in

Bodennähe Schwefelwasserstoff auf. In den Jahren 1987/88, 1990 und 1998 lassen sich die Sauerstoffbedingungen im nördlichen Gotlandbecken aufgrund der geringen Datenbasis nur schlecht beurteilen.

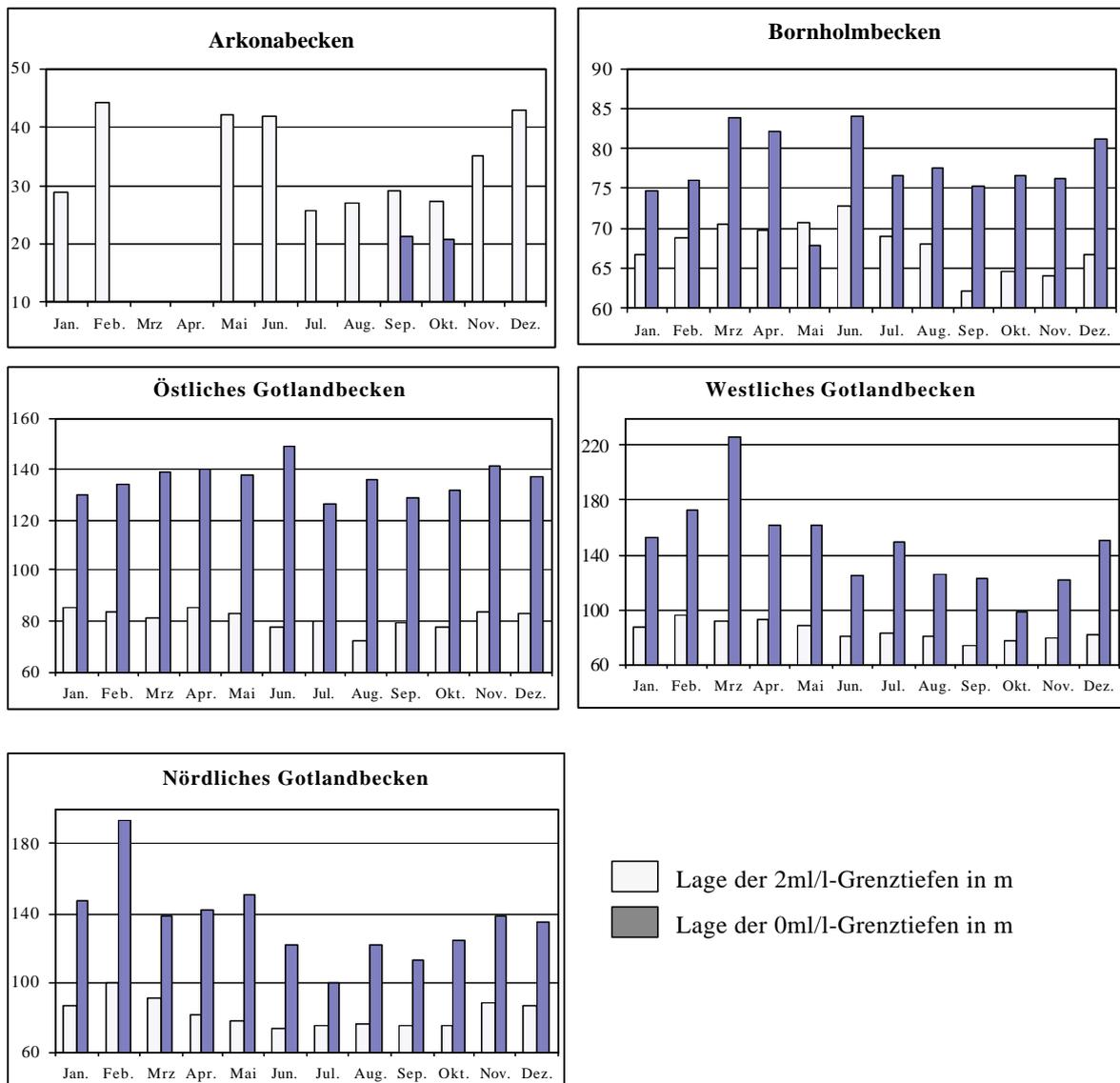


Bild 3.7: Mittlere innerjährliche Veränderungen der Lage der 2 ml/l- und 0 ml/l-Grenztiefen in den Teilbecken.

Charakterisierung der Untersuchungsperioden

Im Rahmen einer ersten Datenanalyse wurden für alle Untersuchungsperioden sowohl die räumliche Verteilung der in die Analyse eingehenden Meßpunkte durch Karten als auch die Werteverteilung der 2 ml/l und 0 ml/l-Grenztiefen durch Häufigkeitsdiagramme und wichtige Parameter für jede Untersuchungsperiode dargestellt. Die Untersuchungen beschränkten sich auf die zur Variogrammschätzung und räumlichen Interpolation notwendigen Prozeduren. Aus den Meßwerten wurden ihre Anzahl, die Mittelwerte, Minima, Maxima und Varianzen bestimmt.

Im Anhang C sind für die 120 Untersuchungsperioden Winter (Monate Januar bis März), Frühjahr (Monate April bis Juni), Sommer (Monate Juli bis September) und Herbst (Monate Oktober bis Dezember) der Jahre 1969-1999 Karten zur Verteilung der Meßwerte vorhanden. Diese zeigen, an welchen Meßpunkten geringe Sauerstoffkonzentrationen gemessen wurden,

und an welchen Punkten die Sauerstoffversorgung auch noch in Bodennähe als ausreichend beschrieben werden kann. Zusätzlich wurden hohe (H) und geringe (T) Tiefen der Grenztiefen gekennzeichnet. In den flachen Bereichen der Beltsee, des Arkonabeckens, der Rigaer Bucht und der Küstenregionen liegen die Grenztiefen zwischen 10 und 45 m. Typisch ist eine Zunahme ihrer Tiefenlage Richtung Norden und zu den Zentren der Becken. Die tiefsten Werte wurden mit über 200 m im Landsorttief ermittelt, in dem ein Sauerstoffaustausch in der Wassersäule häufig in den Wintermonaten beobachtet wird (NEHRING & FRANCKE 1981; MATTHÄUS 1978a). Diese Tiefenzunahme entspricht der Lage der Salzgehaltssprungschicht, die sich mit wachsender Entfernung von der Nordsee in größere Tiefen verlagert (GLASBY et al. 1997).

Diese Stationaritätsmerkmale werden auch in den Häufigkeitsdarstellungen der Grenztiefen deutlich: diese sind oft zweigipflig, mit einer Spitze zur Charakterisierung der flacheren und einer Spitze für die tieferen Becken. Die Höhe der einzelnen Spitzen hängt von der Beprobungsdichte und der Situation in den flachen Becken ab. Die südlichen und küstennahen Teilgebiete (Kattegat, Beltsee, Arkonabecken, aber auch die Rigaer Bucht) sind meistens dichter beprobt, weisen aber nur im Spätsommer und Herbst vor der Wasserumschichtung geringe Sauerstoffkonzentrationen auf. Insgesamt liegen die meisten berechneten Grenztiefen in die tieferen, küstenfernen Gebieten und bilden die Hauptspitze der Darstellung. Da dieses auf einer recht geringen Datenmenge basiert, kann die Menge der in den verschiedenen tieferen Becken (Bornholmbecken, Danziger Becken und tiefe Becken um die Insel Gotland) gemessenen Werte als normalverteilt angesehen werden, so daß eine Variogrammschätzung mit diesen Werten möglich ist.

Die Minima und Maxima der berechneten Werte zeigen die oft weite Spanne der Werteverteilung. Zur Variogrammschätzung wurde auf extreme Werte verzichtet. In die flächenhafte Interpolation wurden sie einbezogen (SCHAFMEISTER 1999, S.23; HEINRICH 1992, S. 26). Bild 3.8. gibt die mittleren, minimalen und maximalen Tiefen der 2 ml/l- und 0 ml/l-Grenztiefen im Untersuchungszeitraum 1969 – 1999 wieder.

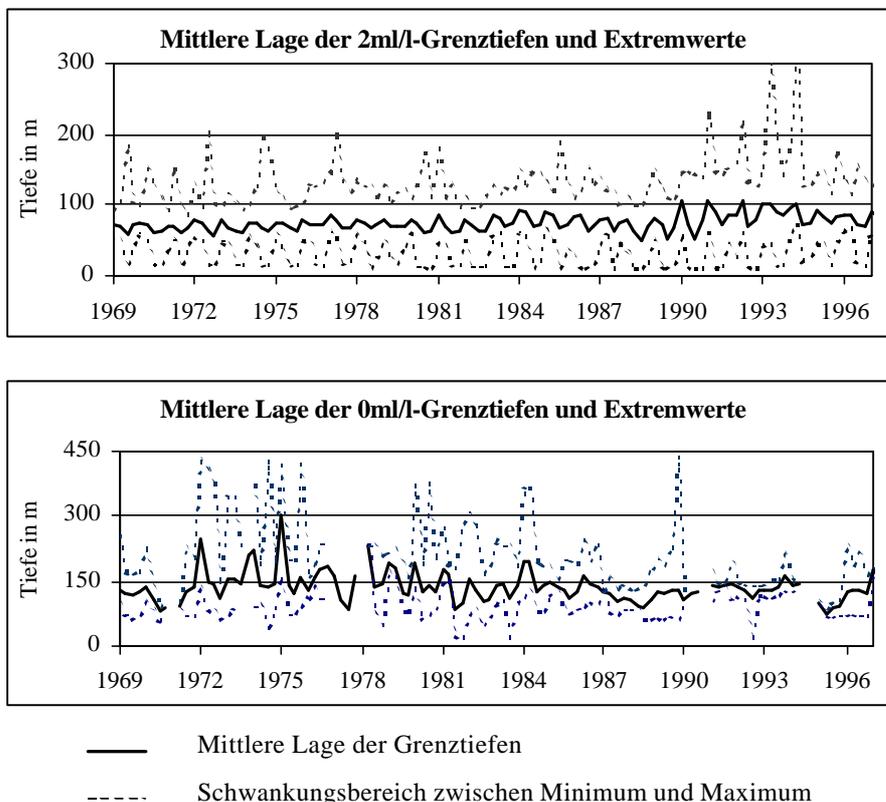


Bild 3.8: Darstellung des Schwankungsbereichs und der Mittelwerte aller Grenztiefen im Untersuchungszeitraum.

Bei den 2 ml/l-Grenztiefen ist eine Tiefenzunahme um 0.6 m/Jahr zu beobachten, die durch ein allgemeines Absinken der Halokline bedingt wird (MATTHÄUS 1990). Die Lage der 0 ml/l-Grenztiefen zeigt bis zur Mitte der 70er Jahre, bedingt durch eine hohe Häufigkeit von Einstromereignissen und seltene Messungen von Schwefelwasserstoff, eine hohe Variabilität. Mitte der 80er Jahre bis 1992 wurde an vielen Meßpunkten in relativ geringen Tiefen Schwefelwasserstoff festgestellt. Die geringen Tiefenlagen der 0 ml/l-Grenztiefen seit Mitte der 90er Jahre sind auf das Auftreten von Schwefelwasserstoff in den flachen westlichen Becken zurückzuführen.

Datenanalyse – Beispiel Herbst 1992

Der Herbst 1992 liegt am Ende der längsten bisher in der Zentralen Ostsee beobachteten Stagnationsperiode und spiegelt die Bedingungen vor den Einstromereignissen der Jahre 1993 und 1994 wider. Anhand der für die Monate Oktober bis Dezember 1992 berechneten Grenztiefen sollen die geostatistischen Arbeitsschritte der Datenanalyse, räumlichen Strukturanalyse, der Grenzbereichsschätzung, flächenhaften Interpolation und Flächen- und Volumenberechnung beispielhaft für die 120 untersuchten Zeitschnitte dargestellt werden. Für alle anderen Untersuchungsperioden sind diese Untersuchungen im Anhang C und D der Arbeit zu finden.

Bild 3.9. zeigt die Verteilung der Stationen mit Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l (schwarze Dreiecke) und der Stationen mit höheren Sauerstoffkonzentrationen in Bodennähe, die als Randwerte in die Interpolation gingen (weiße Dreiecke).

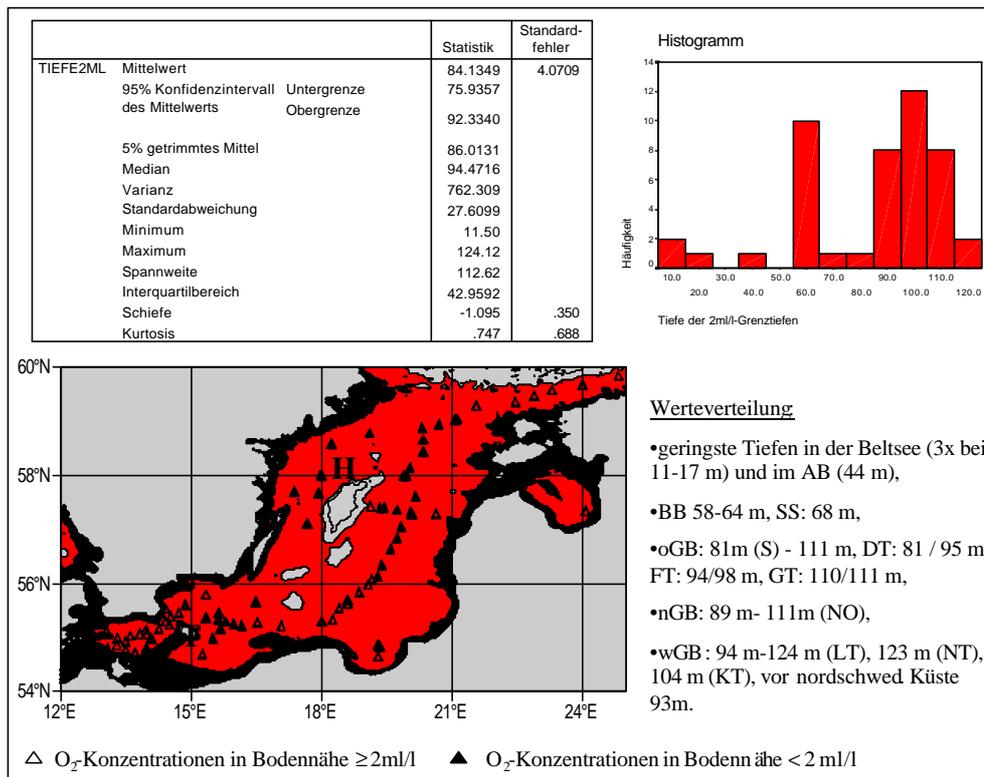


Bild 3.9: Statistische Kennwerte und Werteverteilung der 2 ml/l-Grenztiefen in den Monaten Oktober bis Dezember 1992 und räumliche Verteilung der Stationen mit Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l und über 2 ml/l.

Sauerstoffmangelsituationen traten in der Beltsee in Tiefen zwischen 11 und 17 m, im Arkonabecken an einem Meßpunkt in Bodennähe bei 44 m Tiefe, im Bornholmbecken in 58-64 m Tiefe und im Gotlandbecken in Tiefen zwischen 80 m und 125 m auf. Sehr hohe Tiefenlagen

wurden im westlichen Gotlandbecken im Landsorttief (124 m), im Norrköpingtief (123 m) und im Karlsötief (104 m) berechnet.

Die Häufigkeitsverteilung zeigt mehrere Spitzen für die Grenztiefen der unterschiedlichen Teilbecken: eine erste, kleine Spitze der Werte in der Beltsee, eine weitere Spitze im Bornholmbecken und eine größere für das Gotlandbecken. Die Verteilungen im Bornholm- und gesamten Gotlandbecken können als normalverteilt um Tiefen von 60 bzw. 100 m angesehen werden. Der arithmetische Mittelwert über die Werte des gesamten Untersuchungsgebietes liegt bei 84 m und repräsentiert damit die gut beprobten Bereiche im Gotlandbecken, die Standardabweichung mit 27.6 m zeigt die starken Schwankungen um den Mittelwert. Im strengen Sinne ist hier die Homogenitätsannahme verletzt, da nicht davon ausgegangen werden kann, daß das Häufigkeitsdiagramm der 2ml/l-Grenztiefen ein zuverlässiges Modell der Verteilungsfunktion der Zufallsgrößen in jedem Punkt des Untersuchungsgebietes ist.

Schwefelwasserstoff wurde nur an 12 der 95 Stationen in relativ geringen Tiefen in der Umgebung des Gotlandtiefs beobachtet (Bild 3.10).

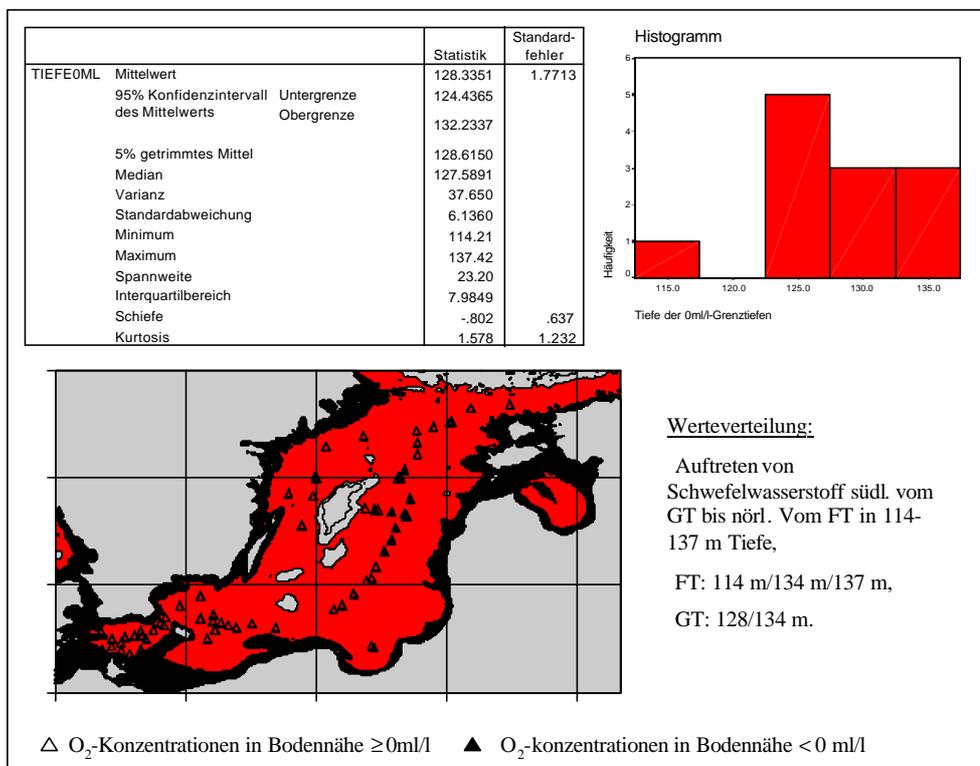


Bild 3.10: Statistische Kennwerte und Werteerteilung der 0 ml/l-Grenztiefen in den Monaten Oktober bis Dezember 1992 und räumliche Verteilung der Stationen mit und ohne Schwefelwasserstoffbildung.

Die tieferen Becken der zentralen Ostsee wurden alle beprobt, so daß man davon ausgehen kann, daß alle anderen Becken frei von Schwefelwasserstoff waren. Der Mittelwert der 0 ml/l-Grenztiefen liegt bei 127.6 m, die Standardabweichung ist mit 6.1 m relativ gering. Ein Trend konnte in dem relativ kleinen Gebiet nicht festgestellt werden und das Häufigkeitsdiagramm kann bei den wenigen Meßpunkten als hinreichend normalverteilt angesehen werden.

Bei mehrfacher Probenahme werden hohe Kurzfrist-Schwankungen deutlich. In den drei untersuchten Monaten liegen zwei Messungen im Gotlandtief vor, in denen die Grenztiefen zu den anoxischen Gebieten bei 123 m und 134 m liegen. Das Farötief wurde dreimal beprobt. Die 0 ml/l-Grenztiefen liegen hier bei 114 m, 134 m und 137 m Tiefe. Ziel dieser Un-

tersuchungen ist die Beschreibung des mittleren Verlaufes der Grenztiefen, so daß diese Mehrfachbeprobungen mit ihrem Mittelwert in die flächenhafte Interpolation eingehen.

3.3.2 Räumliche Strukturanalyse der Grenztiefen einer Saison

Die Bereiche mit geringen Sauerstoffkonzentrationen erstrecken sich unterhalb der Halokline und verlagern sich mit dieser von West nach Ost in größere Tiefen von durchschnittlich 30-40 m im Arkonabecken über 40-50 m im Bornholmbecken und 60-70 m im Gotlandbecken auf 80 m im Landsortbecken (GLASBY et al. 1997). Von einer Stationarität des Erwartungswertes über das gesamte Untersuchungsgebiet kann deshalb nicht ausgegangen werden. Untersuchungen zur räumlichen Variabilität ergaben jedoch, daß die Differenzen zwischen den Meßwerten innerhalb eines bestimmten Umkreises als konstant angesehen werden können, so daß eine Variogrammanalyse möglich und sinnvoll war. Der Radius dieses Umkreises geht als Suchradius in die räumlichen Interpolationen ein und beschreibt das Gebiet, welches in die Schätzung eines nichtbeprobten Punktes eingeht. Innerhalb dieses Suchradius ist die intrinsische Hypothese erfüllt.

Die experimentellen Variogramme erreichen oft in Entfernungen von 100-200 km einen ersten Schwellenwert, der häufig unter der Gesamtvarianz der Grenztiefen liegt. Bis zu diesem Schwellenwert erfolgte eine Modellanpassung. Als Suchradius wurde der Abstand gewählt, bis zu dem das Variogramm den ersten Schwellenwert nicht übersteigt und die Meßpunkte miteinander räumlich korrelieren. Räumliche Variabilitäten größerer Reichweite werden durch die Variogrammfunktion nicht beschrieben und sind häufig durch trendbehaftete Schwankungen bedingt. War eine Anpassung an das Variogramm aller Meßwerte nicht möglich, wurden Extremwerte aus der Analyse herausgenommen, da sie die räumlichen Variabilitäten verzerren⁶. Die Grenztiefen der flachen Bereiche der Beltsee und des Rigaer Meerbusens mußten aus diesem Grund sehr oft aus der Variogrammanpassung ausgeschlossen werden. Geringe Sauerstoffkonzentrationen treten in diesen Gebieten nur kurzfristig im Sommer und Frühherbst auf und die räumliche Korrelationsstruktur unterscheidet sich von der der zentralen Ostsee. Es wurde als sinnvoll erachtet, diese Gebiete nicht in die flächenhafte Interpolation einzubeziehen.

Die typische hohe kleinskalige zeitliche Variabilität wurde an den häufig beprobten HELCOM - Stationen wie dem Gotland-, Farötief und Landsorttief deutlich, in denen innerhalb weniger Tage sehr verschiedene Tiefenlagen der Grenzsichten berechnet wurden.

Die räumlich kontinuierlichen Veränderungen der Lage der Grenztiefen konnten in den meisten Fällen an ein Sphärisches Modell angepaßt werden. Für sehr langsame Veränderungen wurden auch Gauß'sche Modelle genutzt.

Lagen bei günstiger Sauerstoffversorgung der tiefen Bereiche oder geringen Probenahmedichten nur wenige berechnete Grenztiefen vor, so wurden auch solche Meßwerte in die Analyse einbezogen, in denen sich die Grenztiefen unter das Sediment verlagern. Diese Randwerten liegen, wie in Bild 3.6 dargestellt, 20 bzw. 30 m unter den Sedimentoberfläche. Eine Einbeziehung dieser Tiefen führte zu gut anpassbaren experimentellen Variogrammen. Diese weisen, da die Randwerte der Schwellen- und Beckenstruktur des Meeresbodens folgen, hohe räumliche Varianzen (bis zu Schwellenwerten von 3880 m² im Variogramm der 0 ml/l-Grenztiefen im Herbst 1995) auf. Die Krigevarianzen der interpolierten Werte sind in diesen Fällen sehr hoch, bleiben jedoch in den Gebieten mit geringen Sauerstoffkonzentrationen deutlich unter der Summe aus Nugget und Schwellenwert. Bei der Interpolation der 0 ml/l-Grenztiefen traten in Gebieten mit Schwefelwasserstoffbildung maximale Krigevari-

⁶ Diese Vorgehensweise kann dadurch gerechtfertigt werden, daß Extremwerte das Variogramm stark verzerren können. Sie beeinflussen damit die gesamte Schätzung. Falsche Schätzungen der räumlichen Korrelationsstruktur in der Umgebung von Extremwerten zeigen nur dort Auswirkungen (HEINRICH 1992, S.26).

anzen von 1950 m² auf. Die Karten zur Verteilung der Gebiete mit geringen Sauerstoffkonzentrationen und Schwefelwasserstoff spiegeln die realen Verhältnisse sehr gut wider. Die beschriebene Methode zur Flächeninterpolation mit Randwerten wurde zur Schätzung des Verlaufes der 2 ml/l-Grenztiefen nur dann notwendig, wenn nur wenige beprobte Stationen vorlagen oder keine Funktion zur Anpassung der 2 ml/l-Grenztiefen gefunden werden konnte. In insgesamt 9 der 120 untersuchten Quartale wurden die Randwerte in die Variogrammschätzung der 2 ml/l-Grenztiefen einbezogen.

Analyse der 2 ml/l-Grenztiefen

Der Nahbereich des Variogramms zeigt häufig eine Diskontinuität für sehr kleine Entfernungen. Diese Diskontinuität wird durch kleinräumige und kurzzeitige Variabilitäten verursacht, die unterhalb der Beprobungsdichte liegen. Die zeitlichen Variabilitäten entstehen durch die Untersuchung des mittleren Zustandes dreier Monate. Die kleinräumigen Schwankungen treten bei Punktabständen unter 10 Seemeilen (ca. 18 Kilometer) auf. Dieses Schwankungsverhalten wird durch das Variogramm nicht näher beschrieben, geht aber als Grundvariabilität in die Berechnungen ein. Der Nuggeteffekt bleibt in den meisten Fällen unter 20% der Gesamtvarianz, kann aber bis zu 60% der Gesamtvarianz ansteigen. Eine Gesamtübersicht wird in Tabelle 4 im Anhang B gegeben. Dieser recht geringe Nugget und die meist über 100 km liegenden Reichweiten sprechen für eine starke räumliche Erhaltungsneigung im Untersuchungsgebiet.

Bei der Beschreibung der räumlichen Veränderungen der Sauerstoffkonzentrationen wurde vermutet, daß entlang der Hauptströmungsrichtung (SW-NO - Richtung) gemessene Werte einander ähnlicher sind als in SO-NW - Richtung gemessene. Ein Vergleich der Richtungsvariogramme erwies sich als schwierig, da die meisten Forschungsschiffe ihre Beprobung entlang der Hauptströmungsrichtung durchführten und in der Gegenrichtung nur selten Transsekte durch die Becken gefahren wurden. Die Unterschiede waren jedoch geringer als erwartet (Beispiel Herbst 1992 im Bild 3.13).

Analyse der 0 ml/l-Grenztiefen

Zur Beschreibung der räumlichen Korrelationsstruktur der 0ml/l-Grenztiefen war die Datenbasis nur im Winter 1991 und 1992 ausreichend. In allen anderen Fällen wurde anfangs das inverse Distanzverfahren unter Surfer zur räumlichen Interpolation genutzt. Die so entstandenen Karten zeigten jedoch eine im Vergleich mit der Verteilung der Meßpunkte mit und ohne Schwefelwasserstoff unrealistisch große Ausdehnung der sauerstofffreien Gebiete. Die Schätzwerte der Grenztiefen lagen in der Größenordnung der Mittelwerte der Grenztiefen, so daß die wahren Tiefen in den flachen Becken über- und in den tiefen Becken unterschätzt wurden.

Lagen nur wenige Messungen von Schwefelwasserstoff vor, wurde nur dann der Verlauf der Grenztiefen geschätzt, wenn alle Messungen aus einem Becken stammten und die Bedingungen in diesem Becken gut beschrieben. Ein typischer Fall ist die Messung von Schwefelwasserstoff ab 200 m Tiefe im Gotlandtief. Ein Vergleich der Ergebniskarten mit den Punktverteilungen der Punkte mit und ohne Schwefelwasserstoff weist auf eine gute Anpassung hin.

Die Suchradien wurden hier kleiner gehalten, da die Gebiete mit Schwefelwasserstoff nicht ineinander übergehen und es nicht sinnvoll erschien, bei den oft disjunkten Teilbecken Informationen anderer Teilbecken in die Flächenschätzung einzubeziehen.

Die Variogrammfunktion zeigt, wenn an Meßpunkten tiefer Becken kein Schwefelwasserstoff festgestellt wurde, oft sehr hohe Werte, die aus den räumlichen Varianzen zwischen den hohen Randwerten und den berechneten Grenztiefen folgen. Diese Extremvarianzen konnten dann in der Variogrammanalyse oft nicht angepaßt werden. Der Nuggeteffekt liegt in den meisten Fällen unter 20%, kann jedoch bis zu 60% der Gesamtvarianz einnehmen.

In der Tabelle 5 im Anhang B wird in der letzten Spalte angegeben, in welchen Teilbecken Schwefelwasserstoff gemessen wurde und welche Besonderheiten in der Anpassung auftraten. Dazu gehören die Angaben der Varianzbreite der Grenztiefen, Informationen zur Einbeziehung von Randwerten und die Angabe der in die Variogrammanalyse einbezogenen Tiefenbereiche.

Räumliche Strukturanalyse – Herbst 1992

Im experimentellen Variogramm wird ein trendbehaftetes Verhalten erst bei Entfernungen über 250 km deutlich (Bild 3.11).

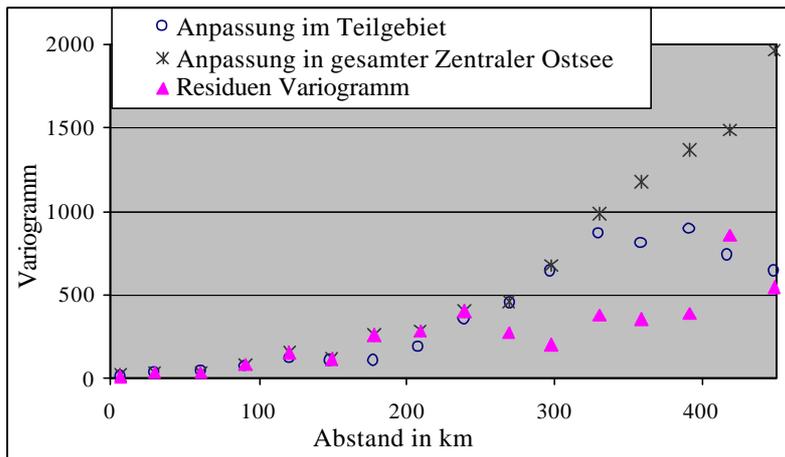


Bild 3.11: Darstellung der experimentellen Variogramme bei Einbeziehung aller 2 ml/l-Grenztiefen, bei Einschränkung auf das Teilgebiet des Bornholm- und Gotlandbeckens und Darstellung des Residuenvariogramms bei einer Driftberechnung in West-Ost-Richtung.

Die Werte aus der Beltsee und die eine Beobachtung des Arkonabeckens wurden aus der Analyse ausgeschlossen, da sie mit 11-17 m und 44 m Tiefe deutlich unter den mittleren Grenztiefenwerten von 84 m liegen und die Beltsee nicht zum Interpolationsgebiet zählt. Die Variogrammschätzung basiert auf den Werten des Bornholmbeckens und der Gotlandsee.

Das nach der Bestimmung einer Drift mit einem Öffnungswinkel von 89° berechnete Residuenvariogramm zeigt Unterschiede der Anfangs- und Endpunkte bei großen Entfernungen. Die kleineren Grenztiefen liegen in den westlichen, die größeren in den östlichen Bereichen. Bei Abständen der Punkte von 250 km liegt deren mittlere Tiefendifferenz bei 20 m, bei 450 km Entfernung bei 50 Tiefenmetern.

Ein Vergleich der Driftbeträge bei experimentellen Variogrammen in W-O-Richtung (0°), SW-NO-Richtung (45°), S-N-Richtung (90°) und SO-NW-Richtung (135°) bei einem Öffnungswinkel von 45° zeigt eine deutliche Zunahme der Tiefenwerte Richtung Norden, Nordosten und Osten und keine auffälligen Veränderungen in nordwestlicher Richtung. Alle Driften zeigen sich erst in Entfernungen ab 200 km (Bild 3.12).

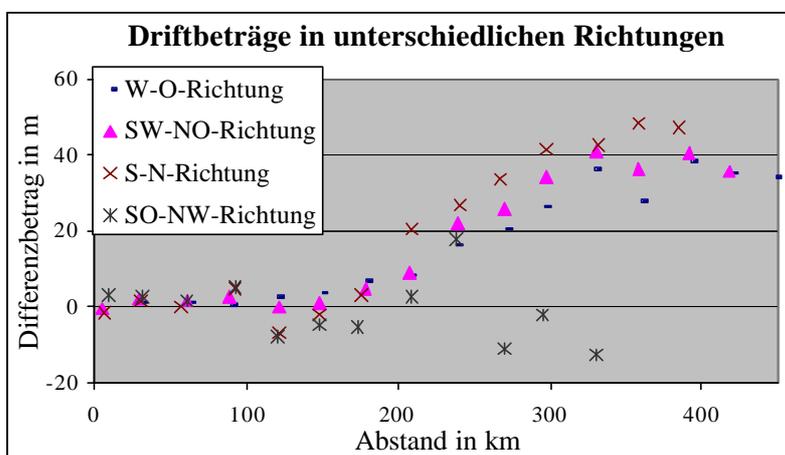


Bild 3.12: Residuenvariogramme bei Driftberechnungen in verschiedenen Richtungen.

Die Richtungsvariogramme (Bild 3.13.) wurden für Schrittweiten von 30 km berechnet. Zur Berechnung der experimentellen Variogramme in den unterschiedlichen Richtungen stehen in den meisten Fällen noch Mindestanzahlen von 20 Punktepaaren je Entfernungsklasse zur Verfügung. Die Variogramme weisen keine systematischen Abweichungen vom richtungsunabhängigen Variogramm auf. Die zunehmende Unähnlichkeit kann durch ein gemeinsames richtungsunabhängiges (isotropes) Modell für Veränderungen in alle Richtungen angepaßt werden.

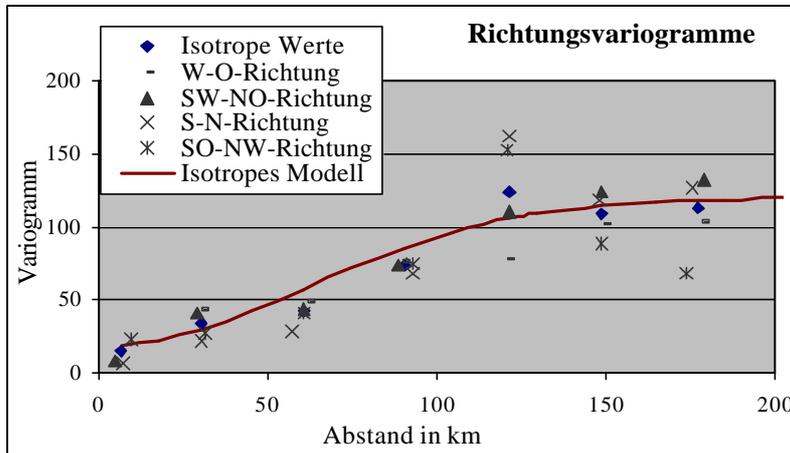


Bild 3.13: Darstellung der experimentellen Richtungsvariogramme der 2 ml/l-Grenztiefen bei 30 km Schrittweite und Anpassung der richtungsunabhängigen Werte mit dem Modell $18+102$ Gauss (150). Der Suchradius liegt bei 180 km.

Kleinräumige oder Kurzzeitschwankungen haben im Herbst 1992 keine große Bedeutung, der Nuggeteffekt beinhaltet nur 18% der Gesamtvarianz. Das Modell erklärt räumliche Veränderungen bis zu Entfernungen von ca. 200 km. Zur räumlichen Interpolation wurde ein Suchradius von 180 km festgelegt.

Die Anpassung der räumlichen Veränderungen der 0 ml/l-Grenztiefen basiert auf der Einbeziehung von Grenzwerten an schwefelwasserstofffreien Stationen, da nur an 12 Stationen Messungen von Schwefelwasserstoff vorlagen. Es wurden keine richtungsabhängigen Variogramme berechnet, da diese durch die Randwerte dominiert werden und die Struktur des Meeresbodens beschreiben. Zur Berechnung des experimentellen Variogramms konnte eine Schrittweite von 10 km gewählt werden. Der Suchradius wurde, da Schwefelwasserstoff nur in einem relativ kleinen Gebiet um das Gotland- und Farötief auftrat, auf 90 km festgelegt. Die auftretenden relativ hohen Varianzen entstehen durch die wechselnden Tiefen des Meeresbodens. Das Variogramm kann hier nur als Hilfsmittel zur flächenhaften Interpolation betrachtet werden, mit dem gute Interpolationsergebnisse erreicht wurden, und nicht als Möglichkeit, Merkmale der flächenhaften Verteilung zu analysieren.

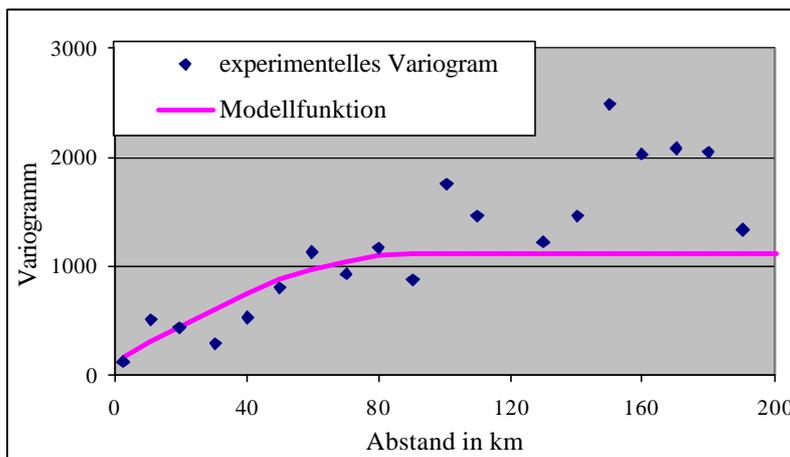


Bild 3.14: Darstellung des experimentellen Variogramms der 0 ml/l-Grenztiefen bei 10 km Schrittweite und Anpassung mit dem Modell $120+1000$ Sphär (90). Der Suchradius liegt bei 90 km.

3.3.3 Schätzung der Grenzbereiche

Die räumliche Interpolation berücksichtigte die Lage von Meßpunkten mit höheren Sauerstoffkonzentrationen bisher über die Zuweisung von Randwerten und bei einer geringen Datenbasis der 0 ml/l-Grenztiefen.

Die Lagebeziehungen zu Meßpunkten, an denen die Sauerstoffkonzentrationen auch in Bodennähe größer 2 ml/l bzw. 0 ml/l blieben, gingen durch die Einbeziehung der unter 2.4.5. vorgestellten Methoden des Indikator-Kriging-Verfahren in das Modell ein. Die Grenztiefen dieser Punkte werden deutlich unter den Meeresboden gesetzt (20 m bzw. 30 m), damit trotz der im Nugget zusammengefaßten kurzfristigen oder kleinräumigen Schwankungen auch Bereiche der näheren Umgebung dieser Punkte nicht zu den Mangelgebieten gerechnet wurden. Die bisher durch die Schnittflächen der Grenzebenen mit dem Meeresboden begrenzten Sauerstoffmangelgebiete konnten häufig durch Informationen über Punkte ohne Mangelerscheinungen eingeschränkt werden.

An allen beprobten Meßpunkten einer Saison werden zwei **Indikatorvariablen** $I(x_i,2)$ und $I(x_i,0)$ definiert:

$$I(x_i,2) = \begin{cases} 1 & \text{wenn in } x_i \text{ Sauerstoffkonzentrationen } \leq 2 \text{ ml/l vorliegen} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

und

$$I(x_i,0) = \begin{cases} 1 & \text{wenn in } x_i \text{ Sauerstoffkonzentrationen } \leq 0 \text{ ml/l vorliegen} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Die räumliche Verteilung dieser Indikatorwerte wurde einer Strukturanalyse zur Schätzung der Indikatorvariogramme unterzogen. Die Schätzung der Indikatorvariogramme der 2 ml/l- und 0 ml/l-Grenztiefen basiert auf allen im Untersuchungsgebiet beprobten Punkten (Tabelle 6 und Bilder im Anhang D). Die auftretenden Varianzen sind sehr klein⁷.

Zur Beschreibung der Sauerstoffverhältnisse standen in den meisten Untersuchungsperioden viele Meßpunkte mit Sauerstoffkonzentrationen über 2 ml/l bzw. 0 ml/l in Bodennähe zur Verfügung, die den Indikatorwert Null zugewiesen bekamen. Die auftretenden Varianzen der Indikatorwerte wurden mit der abnehmenden Anzahl von Meßpunkten mit geringen Sauerstoffkonzentrationen und Schwefelwasserstoff kleiner. Die kleinsten räumlichen Varianzen traten bei den 0 ml/l-Grenztiefen auf, da Schwefelwasserstoff seltener als Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l auftraten. Die Höhe kleinräumiger und kurzfristiger Schwankungen spiegelt sich im Verhältnis von Schwellenwert und Nugget wider (C/C_0).

Zur Anpassung wurden nur Sphärische Variogramme verwendet, das Gauß'sches Variogramm gilt als nicht geeignet (OLEA 1999, pers. Mitteilung). Die Parameter der Indikatorvariogramme beider Grenztiefen und die in die Interpolation einzubeziehenden Suchradien sind im Anhang B in Tabelle 6 zusammengefaßt.

Unter Nutzung der Variogramme und berechneten Reichweiten kann die räumliche Verteilung der Indikatorvariablen mit dem Kriging-Verfahren geschätzt werden. Die geschätzten Indikatorwerte geben ein Wahrscheinlichkeitsmaß für die Zugehörigkeit eines Punktes zu einem Mangelgebiet. Punkte mit Indikatorwerten ab 0,5 gehören mit hoher Wahrscheinlichkeit zum Mangelgebiet. Bei kleineren Indikatorwerten wurden den Grenztiefen auf dem Interpolationsgitter Randwerte unter dem Meeresboden zugewiesen. In Gebieten, in denen die Sauerstoffverhältnisse bei relativ geringen Distanzen wechselten, wurden die Sauerstoffmangelgebiete mit diesem Verfahren stark eingeschränkt (Tabelle 9 im Anhang B).

⁷ Das Indikatorvariogramm zählt die relative Häufigkeit des Wechsels von Indikatorwerten beim Abstand h (GOOVAERTS 1997). Diese Häufigkeit erreicht höchstens 0,5 (bei einer gleichmäßigen Verteilung der Indikatorwerte 0 und 1), so daß der quadrierte Wert immer kleiner 0,25 bleibt.

Berechnung der Grenzvariogramme – Herbst 1992

Zur Berechnung der Grenzvariogramme wurden zwei Indikatorvariablen eingeführt, deren räumliche Variabilität durch die in den Bildern 3.15 und 3.16 gegebenen Modellfunktionen beschrieben wird.

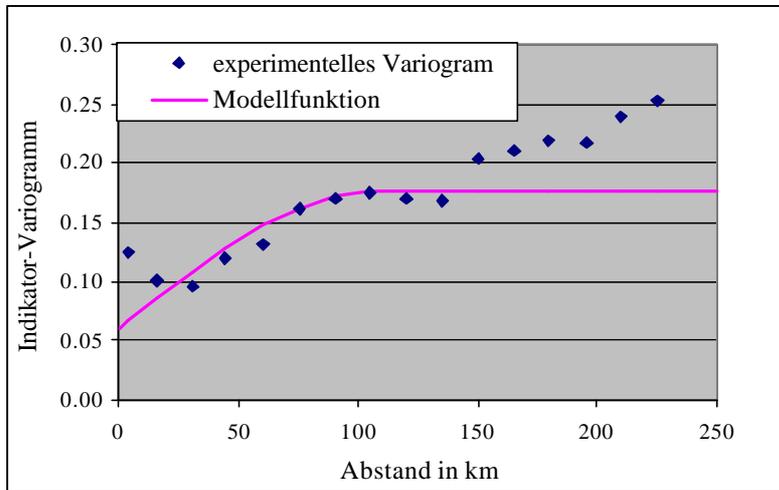


Bild 3.15: Darstellung des experimentellen Indikatorvariogrammes der 2 ml/l-Grenztiefen im Herbst 1992 bei 15 km Schrittweite und Anpassung mit der sphärischen Funktion $0.06+0.117 \text{ Sphär}(108)$. Der Suchradius liegt bei 90 km (Herbst 1992).

Die Suchradien und Reichweiten beider Variogramme liegen mit 100 km unter den Werten der räumlichen Strukturanalyse. Die Varianzen sind erwartungsgemäß bei den Indikatorvariogrammen der 2 ml/l-Grenztiefen höher, da hier die Anzahlen der Meßpunkte mit Sauerstoffmangel (46 Werte) und ohne Sauerstoffmangel (62 Werte) sehr ähnlich sind. Zur Beschreibung der Gebiete mit Schwefelwasserstoffbildung lagen 83 Meßpunkte ohne und 12 Meßpunkte mit Schwefelwasserstoff vor. Der durch den Nugget repräsentierte Anteil kleinräumiger Schwankungen liegt für die weit gestreuten Punkte mit Sauerstoffmangel bei 33%. Im Süden des östlichen Gotlandbeckens und in den Randbereichen treten Veränderungen des Sauerstoffregimes innerhalb kurzer Entfernungen auf, so daß eine Vorhersage der Grenzbereiche mit hohen Unsicherheiten belastet sind.

Punkte mit Schwefelwasserstoffbildung liegen in der Umgebung des Gotland- und Farötiefs. Kleinräumige Veränderungen treten nur in Randbereichen auf und der Anteil kleinskaliger Schwankungen beträgt bei den Indikatorvariogrammen nur 8% der Gesamtvarianz.

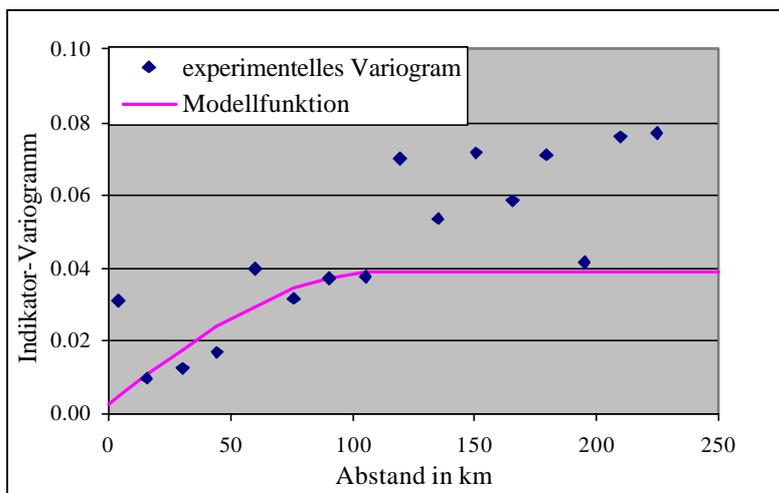


Bild 3.16: Darstellung des experimentellen Indikatorvariogrammes der 0 ml/l-Grenztiefen im Herbst 1992 bei 15 km Schrittweite und Anpassung mit der sphärischen Funktion $0.003+0.036 \text{ Sphär}(110)$. Der Suchradius liegt bei 100 km (Herbst 1992).

Zur Festlegung der Grenzbereiche der Sauerstoffmangel- und Schwefelwasserstoffgebiete wurde die Indikator-Kriging-Technik genutzt. In die Festlegung dieser Grenzen geht ausschließlich die Verteilung der Punkte mit echten Grenztiefen und Randwerten ein. Bild 3.17

zeigt den Verlauf der 0.5-Linien. Sie geben die Linien maximaler Unsicherheiten wieder, an denen die Wahrscheinlichkeiten, zu einem Gebiet mit geringen Sauerstoffkonzentrationen zu gehören und außerhalb des Gebietes zu liegen, einander entsprechen. In Bild 3.17 sind die Gebiete, in denen die berechneten Indikatorwerte der 2 ml/l-Grenztiefen über 0.5 lagen, der Verlauf der 0.5-Linie sowie die Verteilung der Meßpunkte dargestellt.

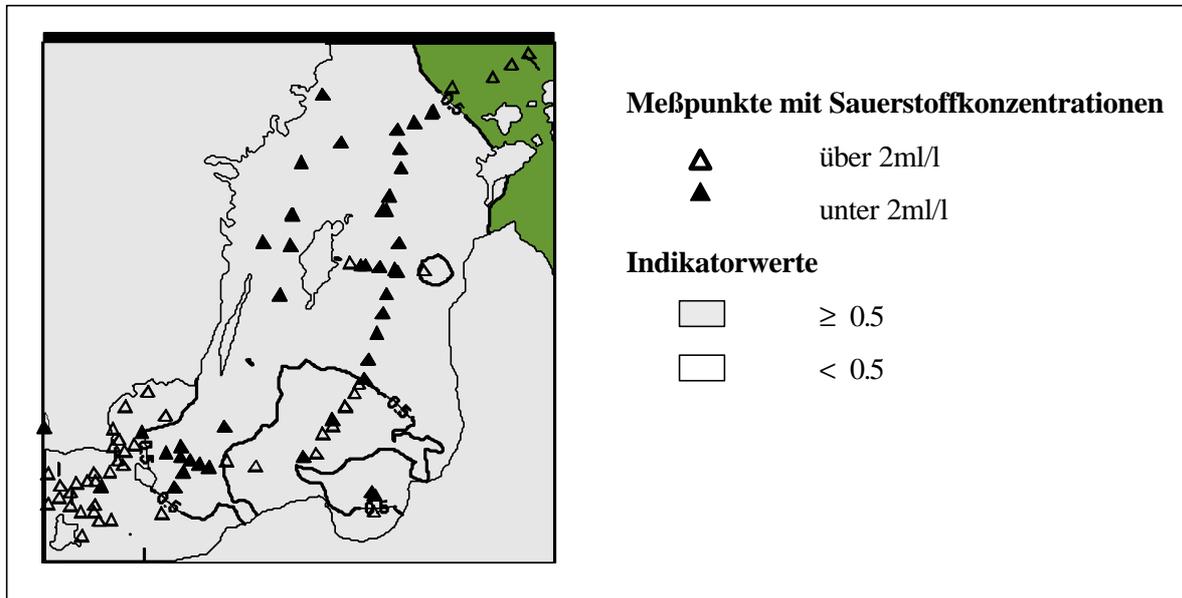


Bild 3.17: Verteilung der Meßstationen mit Sauerstoffkonzentrationen über und unter 2 ml/l und Verlauf der 0.5-Indikatorlinie (Herbst 1992).

3.4 Kartenberechnung

Zur Berechnung der flächenhaften Verteilung der 2 ml/l- und 0 ml/l-Grenztiefen wurde ein durch konstante UTM 33-Koordinaten begrenztes Gebiet innerhalb der zentralen Ostsee definiert. Dieses erstreckt sich vom Arkonabecken östlich der Insel Rügen bis zu den Eingangsbereichen der Rigaer Bucht sowie des Finnischen und Bottnischen Meerbusens und liegt vollständig in dem durch die Länge- und Breitenkoordinaten (12° E - 54° N), (25° E - 60° N) definierten Gebiet (Bild 3.18).

Das Gebiet weist eine maximale Ost-West-Ausdehnung von 630 km und eine Nord-Süd-Ausdehnung von 648 km auf. Höchste Entfernungen treten zwischen Punkten des Arkonabeckens und des Finnischen Meerbusens auf und können bis zu 900 km betragen. Es wurden Grenztiefen auf den Punkten eines Schätzgitters mit 36 x 37 Gitterpunkten im Abstand von 18 Kilometern (ca. 10 Seemeilen) geschätzt. Insgesamt waren Werte der Grenztiefen an 1332 Punkten zu schätzen, von denen über die Hälfte in Landgebieten oder küstennahen Flachwassergebieten lagen, in denen keine Schätzung möglich und sinnvoll war. Der Gitterabstand entspricht dem mittleren Abstand der Probenahmepunkte über den gesamten Untersuchungszeitraum und orientiert sich am in Länge-Breite-Koordinaten vorliegendem Tiefenprofil der Ostsee (SEYFERT & KAYSER 1995), welches Tiefenwerte im Abstand von einem Breitengrad in Nord-Süd-Richtung und zwei Längengraden in Ost-West-Richtung enthält. Der Abstand zwischen den Gitterpunkten liegt bei SEIFERT & KAYSER bei einer Seemeile. Da je Untersuchungsaison zwischen 30 und 120 Messungen vorlagen, wurde das Interpolationsgitter so gewählt, so daß aus ca. 40 Meßpunkten und den Randwertinformationen etwa 500 Gitterpunkte in den tiefen Gebieten berechnet wurden.

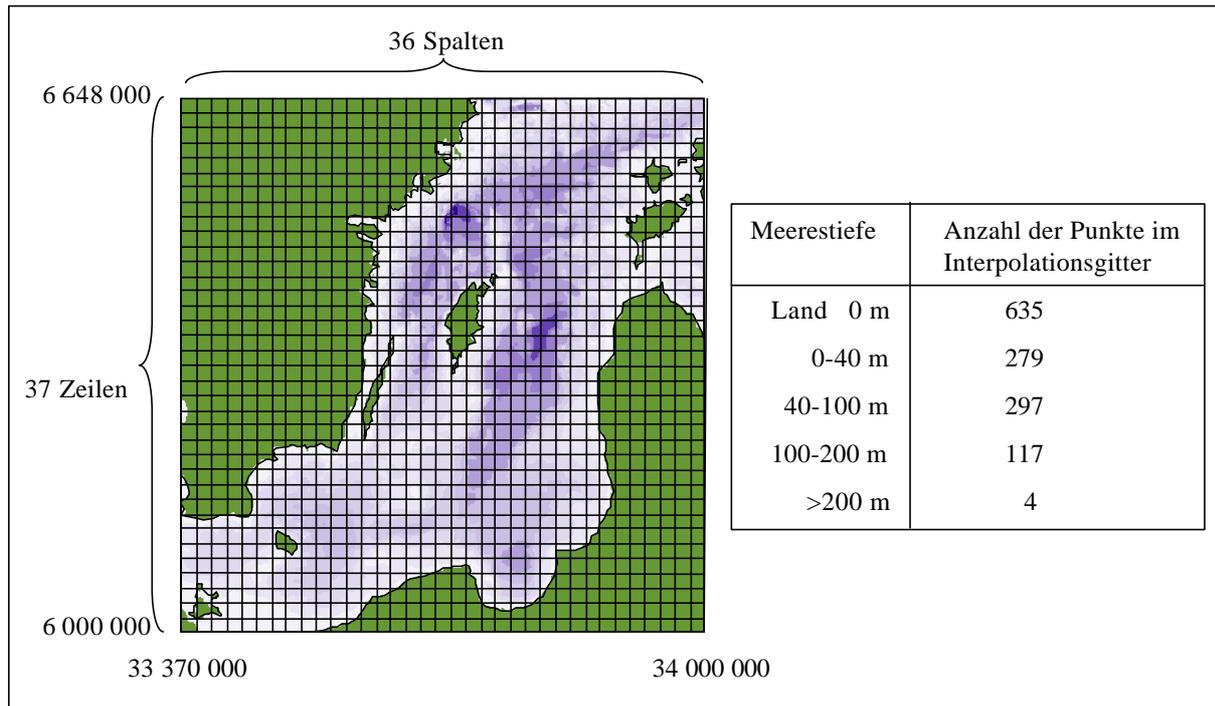


Bild 3.18: Lage und Dichte des Interpolationsgitters für die flächenhafte Interpolation

3.4.1 Schätzung der flächenhaften Ausprägung der Grenztiefen

Zur flächenhaften Interpolation mit dem Ordinary-Kriging-Verfahren konnte das Programm kb2d der Geostatistical Software Library⁸ genutzt werden. Informationen zu den zu interpolierenden Daten, zur Konfiguration des Interpolationsgitters, zum Variogramm (Tabellen 4 und 5 im Anhang B) und zum Suchradius waren als Eingangsparameter in ein Parameterfile einzutragen, um dann aus den Variogrammwerten das Kriging-Gleichungssystem (2.16) zur Berechnung der Schätzwerte λ_i aufzustellen. Die Schätzwerte ergaben sich aus dem mit den Werten λ_i gewichteten Mittel der im Suchradius liegenden Grenztiefen. Zu jedem Schätzwert wurde ein Varianzwert nach (2.17) berechnet, der die Güte der Schätzung an den Gitterpunkten angibt.

Aus den interpolierten Werten und den Krigestandardabweichungen konnten an allen Gitterpunkten Sicherheitsintervalle zum Verlauf der Grenztiefen berechnet werden (Bild 3.3). Dies ermöglicht eine Abschätzung der Interpolationsgenauigkeit.

Die Schätzung der Randbereiche, in denen sich die Grenztiefen unter den Meeresboden verlagern, erfolgte aus den Indikatorvariablen und dem Indikatorvariogramm (Tabelle 6 im Anhang B) auf dem in Bild 3.18. beschriebenen Interpolationsgitter. Die geschätzten Indikatorwerte wurden mit den Grenztiefen kombiniert. Alle Gitterpunkte mit Indikatorwerten unter 0.5 gehören nicht zu den Defizitgebieten und bekamen Randwerte unter dem Meeresboden zugewiesen (Bild 3.19). Gitterpunkte mit Indikatorwerten über 0.5 wurden nicht verändert.

⁸ Die Geostatistical Software Library (GSLIB) wurde an der Stanford-Universität in Kalifornien über einen Zeitraum von 12 Jahren entwickelt (DEUTSCH & JOURNAL 1998).

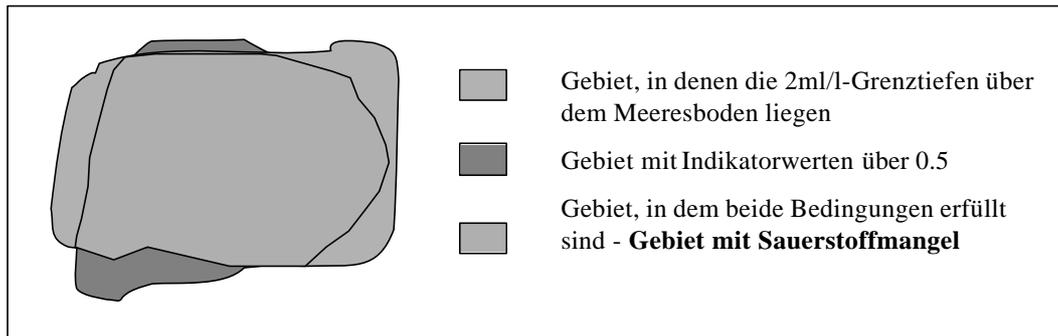


Bild 3.19: Kombination der Informationen der flächenhaft interpolierten Grenztiefen und der Verteilung der Indikatorwerte zur Festlegung der Mangelgebiete.

Räumliche Interpolation und Berechnung der Karten im Herbst 1992

Zur Berechnung der Karte der Sauerstoffverhältnisse im Herbst 1992 waren vier räumliche Interpolationen notwendig:

- zur Schätzung der Tiefenwerte der 2 ml/l- und 0 ml/-Grenztiefen und
- zur Schätzung der Indikatorwerte beider Grenztiefen.

Die Schätzung erfolgte bei allen Karten mit dem Ordinary-Kriging-Verfahren unter Annahme der räumlichen Richtungsunabhängigkeit und Stationarität. Zur Schätzung des Verlaufes der 2 ml/l-Grenztiefen wurden nur die in der Wassersäule liegenden 2 ml/l-Grenztiefen genutzt, während in die Schätzung der 0 ml/l-Grenztiefen und der Indikatorwerte Randwerte einbezogen wurden. In der räumlichen Strukturanalyse gewonnene Informationen wurden in spezielle Parameterdateien (Bild 3.20) zur Kartenberechnung in GSLIB eingetragen.

Parameters for KB2D

START OF PARAMETERS:

```

C:/susanne/geostat/daten/herbst92.dat   \Datei mit Ausgangsdaten
1 2 3                                   \Spalten der Ortskoordinaten (x,y) und der zu schätzenden Variablen
-1.0e21 1.0e21                          \obere und untere Grenzwerte der zu schätzenden Variablen
3                                         \Level für die Datei der Zwischenergebnisse
c:/susanne/geostat/out92.dbg            \Name der Datei der Zwischenergebnisse
c:/susanne/geostat/out92.out            \Name der Ausgabe-Datei
36 33370000 18000.0                     \Spaltenanzahl des Schätzgitters, erster Punkt, Gitterabstand in m
37 6000000 18000.0                      \Zeilenanzahl des Schätzgitters, erster Punkt, Gitterabstand in m
1 1                                       \Punkt- (1 1) oder Blockkriging (Größe der Blöcke eingeben)
2 8                                       \minimale und maximale Datenanzahl zur Interpolation
312000                                  \maximaler Suchradius in m
1 2.302                                  \0=Simple Kriging, 1=Ordinary Kriging, Mittelwert für SK
1 18                                     \Anzahl der Strukturen, Nuggeteffekt
    
```

Bild 3.20: Parameterdatei für den Herbst 1992 und die richtungsunabhängige Gauß'sche Modellfunktion mit dem Nugget 18, dem Schwellenwert 102, einer Reichweite von 150000 m und einem Suchradius von 180000 m⁹.

⁹ Die unter VarioWin ermittelten Parameter Reichweite und Schwellenwert mußten zur Interpolation unter GSLIB mit $\sqrt{3}$ multipliziert werden (MUELLER 2000).

Tabelle 3.2. faßt wichtige Parameter der interpolierten Werte zusammen. Es können nur dann Werte geschätzt werden, wenn im Umkreis des zu interpolierenden Punktes mindestens zwei Meßwerte gegeben sind. Die maximale Anzahl der in die Interpolation eines Gitterpunktes einzubeziehenden Meßwerte wurde auf 8 Werte begrenzt (Bild 3.20). So wird die Anzahl der geschätzten Gitterpunkte durch Anzahl und Verteilung der Meßpunkte und den Suchradius bestimmt. Bei fehlenden Meßwerten wird von einer ausreichenden Sauerstoffversorgung an den Gitterpunkten ausgegangen.

Die Varianz der interpolierten Werte des gesamten Untersuchungsgebietes ist größer als die durch das Variogramm beschriebene lokale Varianz. Die Schätzstandardabweichungen geben eine Möglichkeit, die Genauigkeit der Berechnungen abzuschätzen. Es werden hier nur Standardabweichungen für Gitterpunkte berücksichtigt, deren Indikatorwert größer 0.5 ist. Da die Krigevarianzen an allen Gitterpunkten immer unterhalb der Summe aus Nugget und Schwellenwert des Variogramms bleiben, liegen die zugehörigen Standardabweichungen der 2 ml/l-Grenztiefen deutlich unter denen der 0 ml/l-Grenztiefen. Die Krigestandardabweichungen der Indikatorwerte werden in der Modellierung nicht berücksichtigt – und deshalb auch in Tabelle 3.2. nicht angegeben.

Parameter	Interpolation der 2 ml/l- Grenztiefen	Interpolation der 0 ml/l- Grenztiefen	Indikatorkriging der 2 ml/l- Grenztiefen	Indikatorkriging der 0 ml/l- Grenztiefen
Anzahl	1321	713	1052	837
Mittelwerte	86.3	152.3	0.5353	0.0945
Varianz	564.1	5423.6	0.1057	0.0491
Min. Standardabw.	4.31	16.70		
Max. Standardabw.	6.75	33.44		
Mitt. Standardabw.	5.14	22.42		

Tabelle 3.2: Übersicht über die Ergebnisse der in den vier Interpolationsverfahren des Kriging und Indikatorkriging ermittelten Werte.

Die Durchschnittsbildung zwischen den Grenzebenen und den Gebieten mit Indikatorwerten über 0.5 bezieht Informationen von Meßpunkten mit höheren Sauerstoffkonzentrationen in die Untersuchung ein. Bei den 2 ml/l-Grenztiefen wurden 91 Verbesserungen vorgenommen, bei den 0 ml/l-Grenztiefen 59. An diesen Gitterpunkten wurden den Grenztiefen anstelle der interpolierten Werte Tiefen unter dem Sediment zugeordnet. Dabei konnten auch solche Grenztiefen mit Werten belegt werden, die mit dem Ordinary-Kriging-Verfahren aufgrund fehlender Messungen nicht geschätzt wurden.

Im Übergangsbereich zwischen dem Bornholmbecken, in dem die berechneten 2 ml/l-Grenztiefen in 58 bis 64 m Tiefe liegen und dem östlichen Gotlandbecken mit Tiefen ab 81 m können die Interpolationsergebnisse durch Einbeziehung von Meßpunkten, die auch in höheren Tiefen noch ausreichend mit Sauerstoff versorgt sind, verbessert werden (Bild 3.21). In dieser Übergangsregion werden die Grenztiefen tendenziell zu klein geschätzt, da Punkte des Bornholmbeckens im Suchradius liegen.

Große Bereiche im Süden des östlichen Gotlandbeckens, in Randlagen des Bornholmbeckens und im Arkonabecken werden aufgrund ihrer geringen Indikatorwerte als ausreichend mit Sauerstoff versorgt angesehen. Ein Vergleich mit der Verteilung der Meßpunkte rechtfertigt diese Entscheidung. Die Meßpunkte mit Schwefelwasserstoffbildung liegen in einem eng begrenzten Gebiet und zeigen in den 0 ml/l-Grenztiefen keinen Trend. Hier wird die Ausdehnung der Bereiche mit Schwefelwasserstoffbildung durch die Durchschnittsbildung kaum verändert.

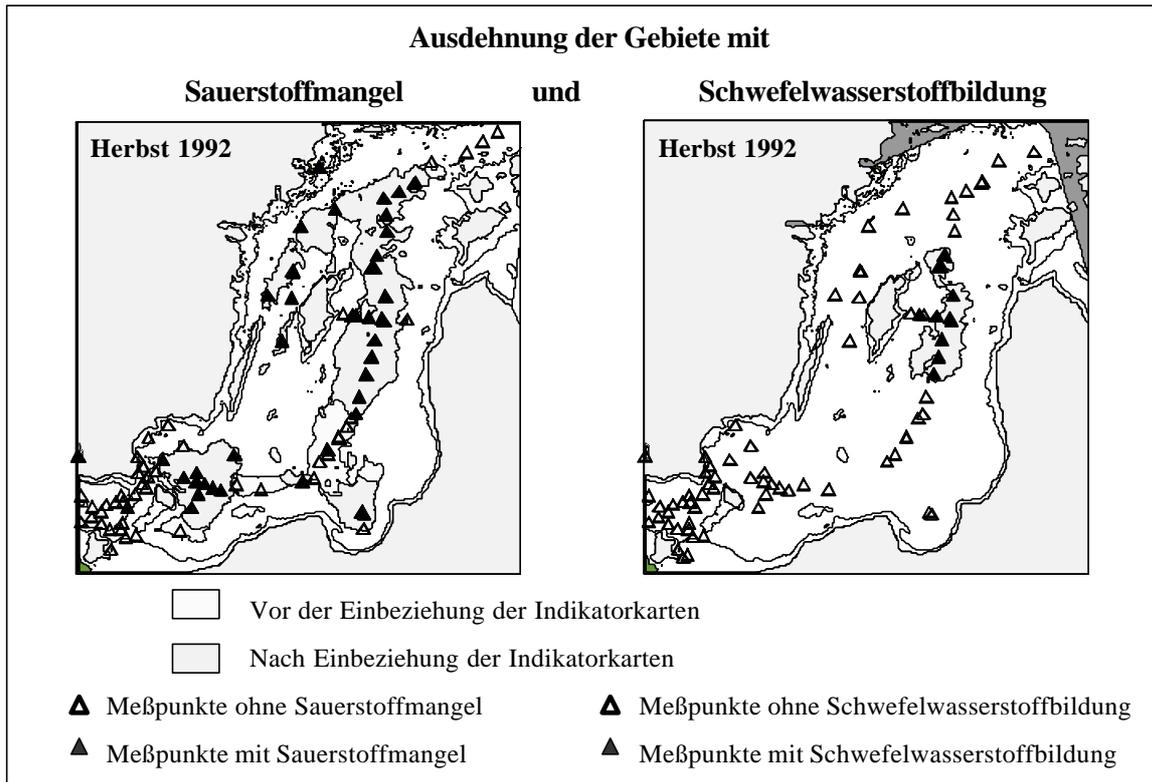


Bild 3.21: Ausdehnung der Gebiete mit Sauerstoffmangel (links) und Schwefelwasserstoffbildung (rechts) vor und nach Einbeziehung der Indikatorwerte

Zu den geschätzten Tiefenwerten der 2ml/l bzw. 0ml/l-Grenztiefen wurden an allen Gitterpunkten die dazugehörigen Krigestandardabweichungen addiert und subtrahiert, um die möglichen Abweichungen von der wahrscheinlichsten (mittleren) Ausprägung der Mangelbereiche abschätzen zu können. Berechnet wurden die minimale, mittlere und maximale Ausdehnung der Gebiete mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung. Dabei wird das minimale Gebiet in seiner Vertikalausdehnung durch die Differenz aus der Lage der Grenztiefen und der Krigestandardabweichung begrenzt und das maximale Gebiet durch die Summe aus Grenztiefen und Standardabweichungen. Diese Abschätzungen für die Sauerstoffmangel- und Schwefelwasserstoffbereiche verliefen unabhängig voneinander.

Die Gebiete mit geringen Sauerstoffkonzentrationen konnten mit hohen Genauigkeiten berechnet werden. Die Krigestandardabweichungen der Grenztiefen, die über dem Meeresboden und innerhalb der durch die Indikatorwerte begrenzten Gebiete liegen, nehmen Werte zwischen 4.3 m und 6.8 m (Tabelle 3.2) an. Größere Abweichungen zwischen der minimalen und maximalen Ausdehnung der Gebiete treten im südöstlichen Teil des Gotlandbeckens auf. Eine flächenhafte Darstellung zeigt nur geringe Unterschiede in der Ausdehnung der Minimal- und Maximalvariante (Bild 3.22).

Die Abschätzung der Gebiete mit Schwefelwasserstoffbildung basiert auf nur 12 Meßpunkten und den Randwerten, an denen kein Schwefelwasserstoff festgestellt wurde. Aus den hohen Varianzwerten der räumlichen Strukturanalyse ergeben sich in der Interpolation hohe Krigestandardabweichungen, die zwischen 16.7 m und 33.4 m schwanken. Dementsprechend groß sind die Unterschiede zwischen den Bereichen minimaler und maximaler Ausdehnung der schwefelwasserstoffbelasteten Gebiete.

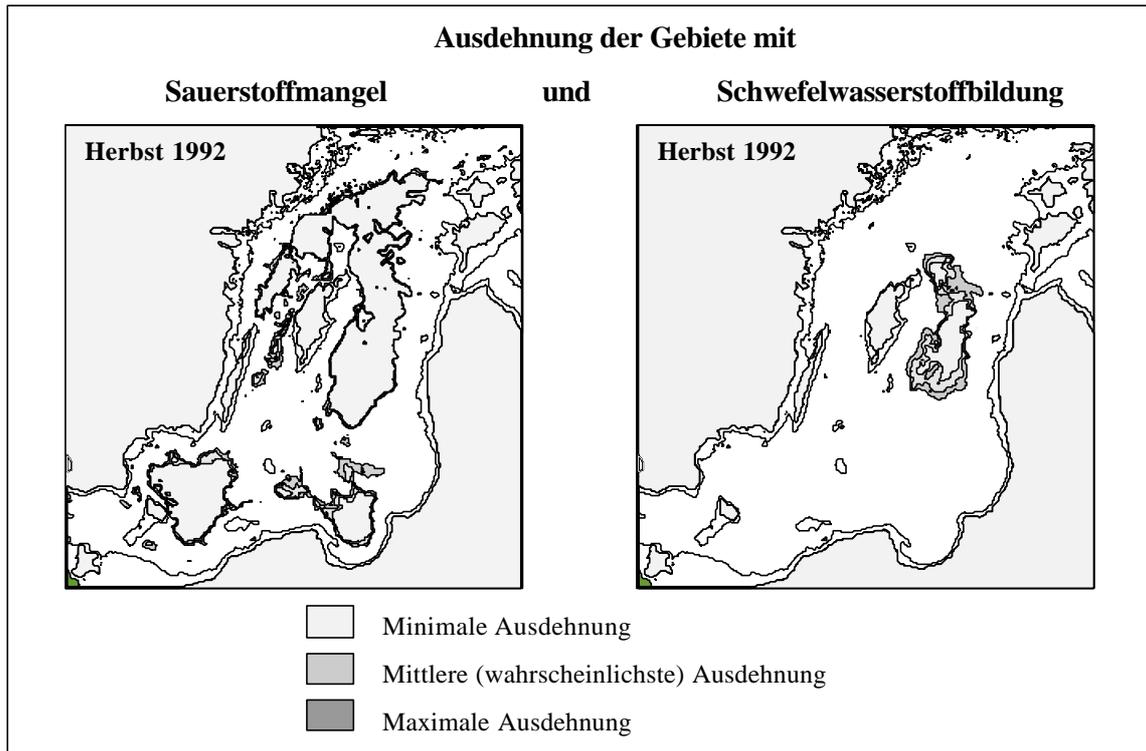


Bild 3.22: Darstellung der Ausdehnung der Bereiche mit Sauerstoffmangel (links) und Schwefelwasserstoffbildung (rechts) und ihrer minimalen und maximalen Ausdehnung.

Karten zur Ausdehnung der Mangelbereiche in den Jahren 1969 bis 1999

Die Veränderungen der räumlichen Ausdehnung der Bereiche mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung im Zeitraum 1969-1999 konnte in einer Serie von Karten dargestellt werden. Diese stellen die mittleren Sauerstoffverhältnisse der Winter-, Frühjahres-, Sommer- und Herbstsaison der untersuchten Jahre dar (Bilder 3.23-3.29).

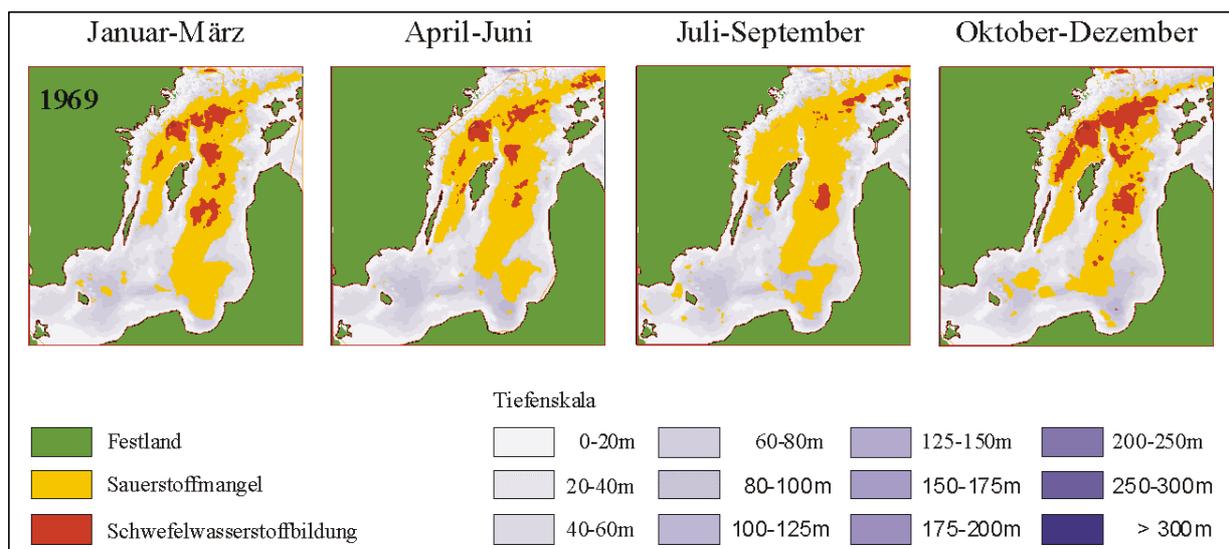


Bild 3.23: Ausdehnung der Gebiete mit Sauerstoffmangel (gelb) und Schwefelwasserstoffbildung (orange) im Jahr 1969.



Bild 3.24: Ausdehnung der Gebiete mit Sauerstoffmangel (gelb) und Schwefelwasserstoffbildung (orange) in den Jahren 1970-1974.



Bild 3.25: Ausdehnung der Gebiete mit Sauerstoffmangel (gelb) und Schwefelwasserstoffbildung (orange) in den Jahren 1975-1979.

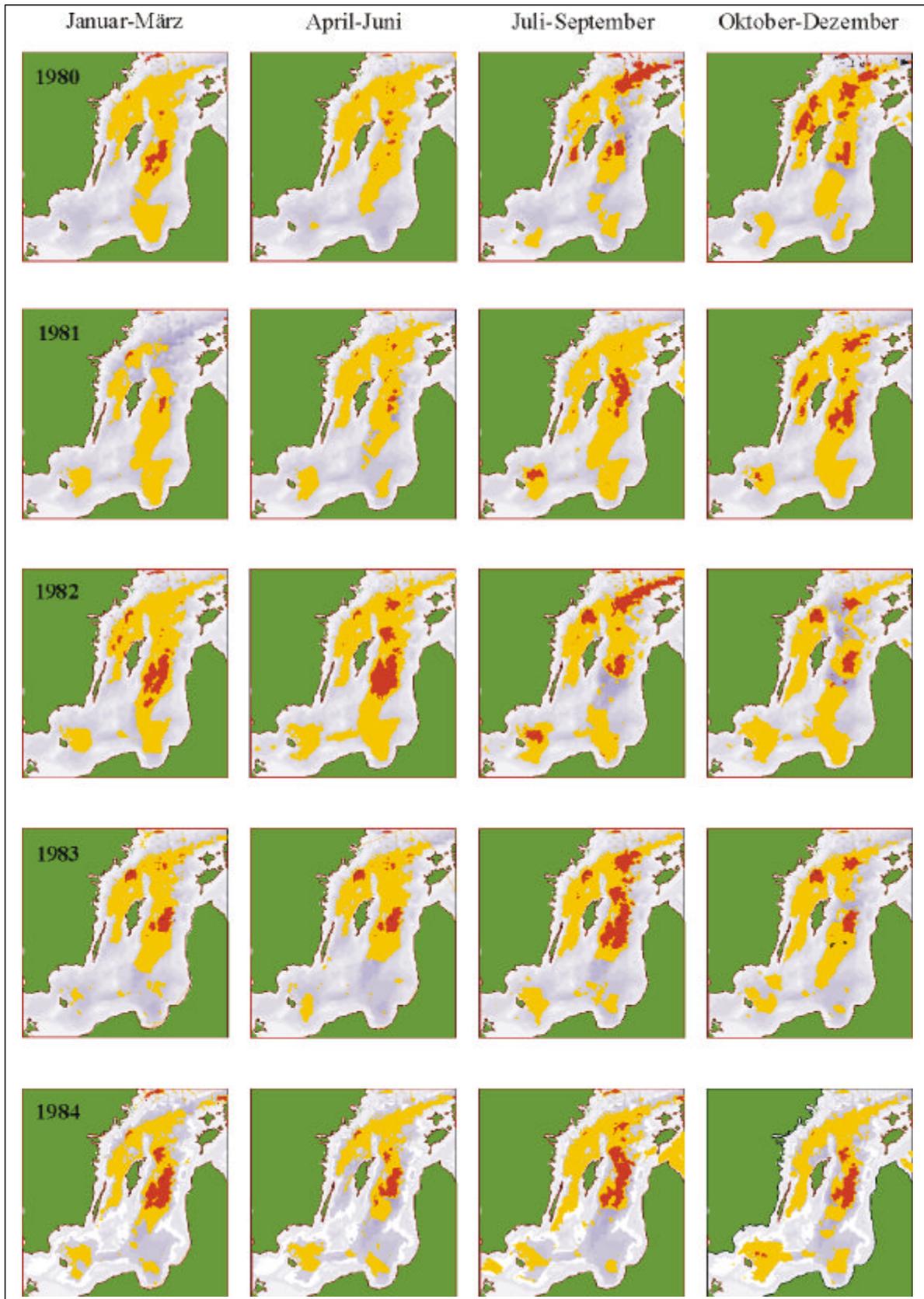


Bild 3.26: Ausdehnung der Gebiete mit Sauerstoffmangel (gelb) und Schwefelwasserstoffbildung (orange) in den Jahren 1980-1984.

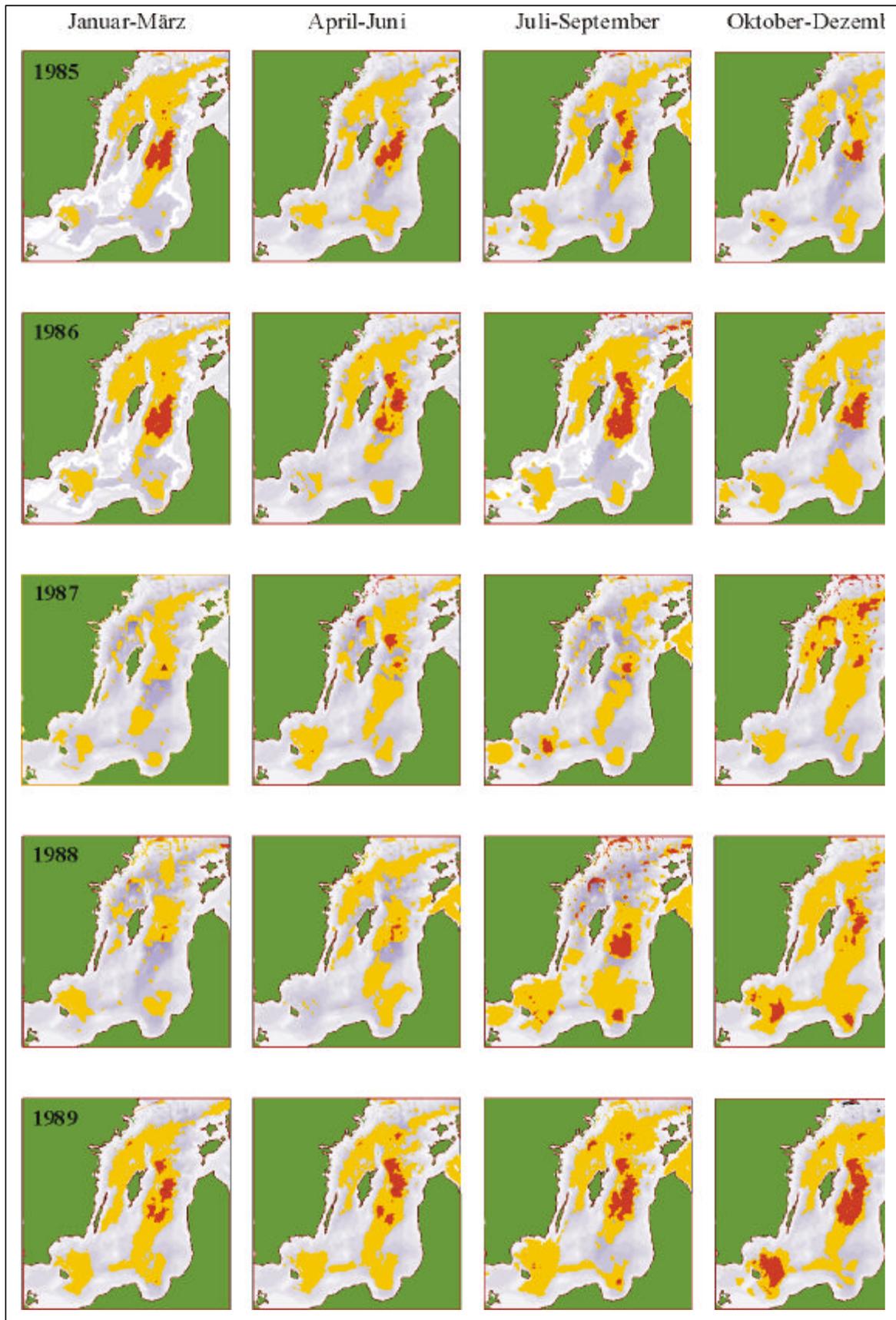


Bild 3.27: Ausdehnung der Gebiete mit Sauerstoffmangel (gelb) und Schwefelwasserstoffbildung (orange) in den Jahren 1985-1989.

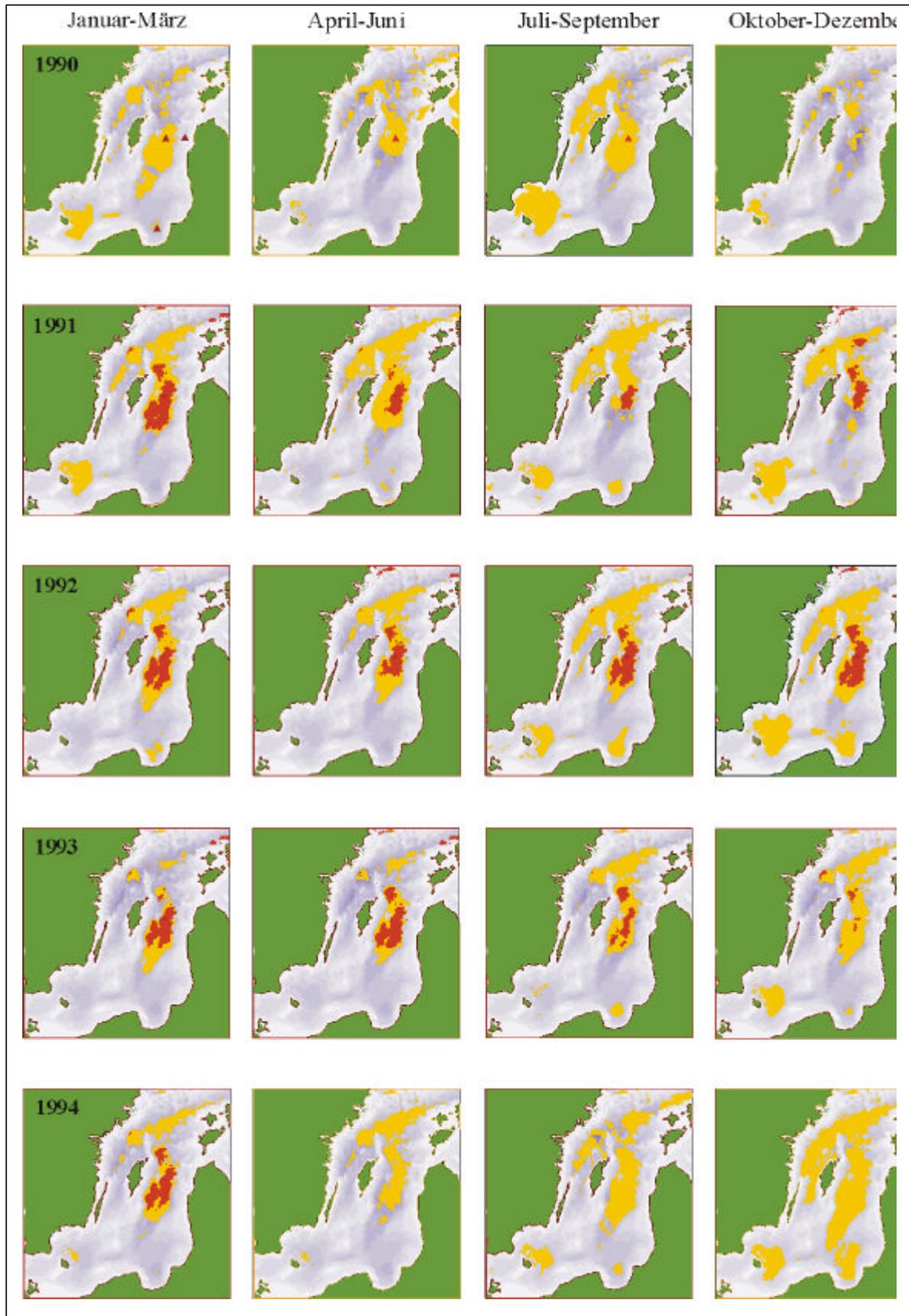


Bild 3.28: Ausdehnung der Gebiete mit Sauerstoffmangel (gelb) und Schwefelwasserstoffbildung (orange) in den Jahren 1990-1994.

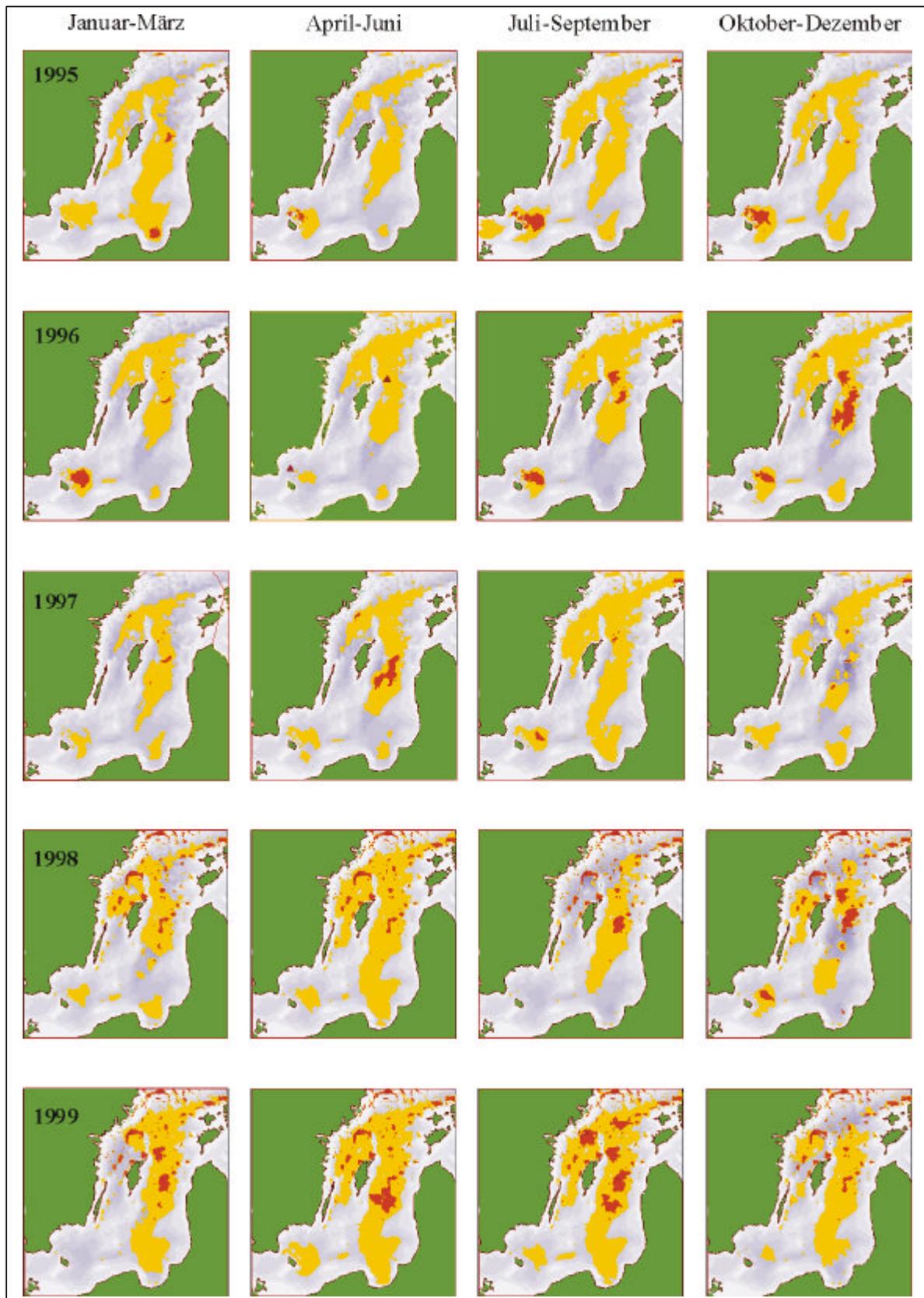


Bild 3.29: Ausdehnung der Gebiete mit Sauerstoffmangel (gelb) und Schwefelwasserstoffbildung (orange) in den Jahren 1995-1999.

Es wäre günstig, in Abhängigkeit von der Datenlage Karten eines Jahres oder einer Periode mit ähnlichen Bedingungen zusammenzufassen. Dies ist durch ein Übereinanderlegen der Karten und der Berechnung der mittleren Bedingungen an jedem Gitterpunkt möglich. Eine weitere Möglichkeit ergibt sich aus einer gemeinsamen Raum-Zeit-Analyse aller Grenztiefen. Dann könnten Veränderungen der Lage der Grenztiefen in Abhängigkeit von zwei Raum- und einer Zeitkoordinate auf einem dreidimensionalen Gitter dargestellt werden (Bild 3.30).

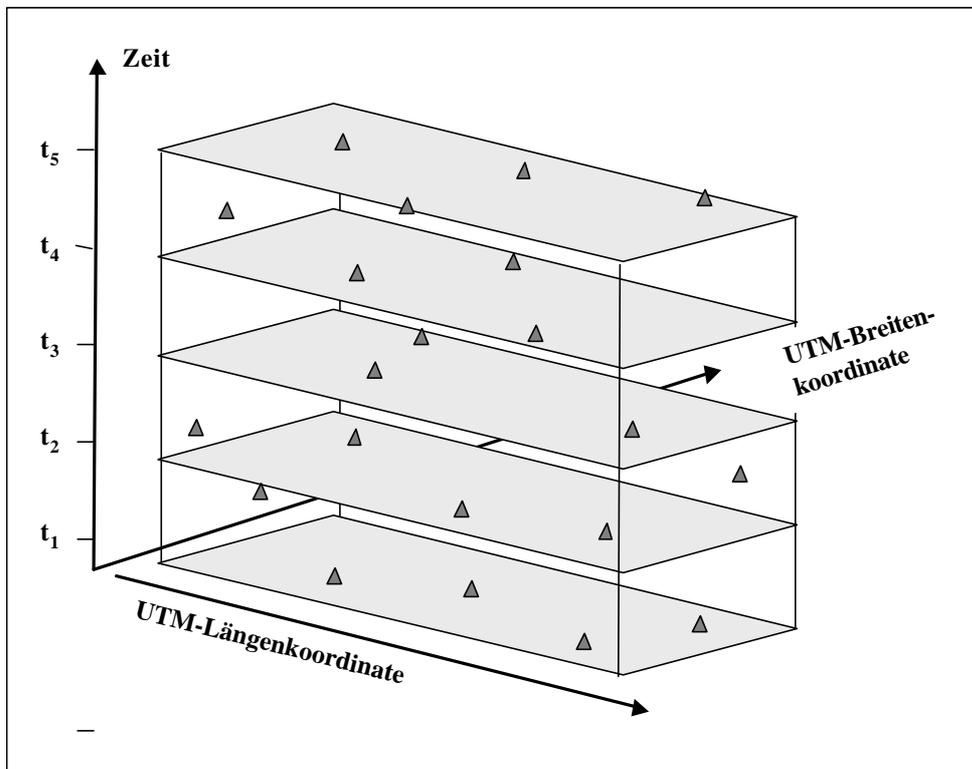


Bild 3.30: Veränderung der Lage der Grenztiefen in Raum und Zeit und Berechnung auf einem 3D-Gitter (nach einer Idee von NEUTZE 1995).

3.4.2 Fehleranalyse

Einen Einblick in die Genauigkeiten der interpolierten Werte bildet die Analyse der berechneten Krige- (oder Fehler-) Varianzen und der daraus abgeleiteten Krigestandardabweichungen. Die Fehlervarianzen der interpolierten Werte liegen immer unter der Summe aus Nugget und Schwellenwert. Da die lokalen Varianzen der 0 ml/l-Grenztiefen aufgrund der in die Rechnung eingehenden Randwerte deutlich höher sind als die der 2 ml/l-Grenztiefen, ergaben sich für die 0 ml/l-Grenztiefen höhere Krigevarianzen.

In die Untersuchung wurden alle die Gitterwerte einbezogen, die über dem Meeresgrund liegen und Indikatorwerte über 0.5 aufwiesen. Berechnet wurde der prozentuale Anteil der 2 ml/l-Grenztiefen mit Krigestandardabweichungen unter 5 m bzw. 8 m und der 0 ml/l-Grenztiefen mit Standardabweichungen unter 15 m bzw. 25 m.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen liegen für die 120 Untersuchungsperioden in Tabelle 10 in Anhang B vor. Bei den 2 ml/l-Grenztiefen blieben in 6 der 118 Untersuchungsperioden alle Krigestandardabweichungen unter 5 m und in 52 Perioden lagen die Krigestandardabweichungen an allen Gitterpunkten unter 8 m. Die flächenhafte Ausdehnung der 0 ml/l-Grenztiefen wurden für 103 Untersuchungsperioden mit mindestens zwei Messungen mit Schwefelwasserstoffbildung berechnet. In 8 bzw. 46 Perioden blieben die Krigestandardabweichungen aller Schätzwerte unter 15 m und 25 m.

Hohe Standardabweichungen sind charakteristisch für Untersuchungsperioden mit hohen kleinräumigen und kurzzeitigen Variabilitäten, die durch einen hohen Nugget und ein schnell ansteigendes Variogramm beschrieben wurden (Sommer 1981, Winter 1991, Winter und Sommer 1997 u. a.). Für Untersuchungsperioden, in denen neben den Meßwerten auch

Randwerte genutzt werden, folgen die Eingabewerte dem Profil des Meeresbodens. Die Varianzen nehmen dann infolge der hohen Schwellenwerte und Nuggets des Variogramms hohe Werte an. Die Variogrammanpassung erfolgte bei mehreren Schwellenwerten nur bis zum ersten Schwellenwert, um durch die Einschränkung des Suchradius hohe Berechnungsgenauigkeiten zu erzielen. Die Krigestandardabweichung ist an allen Gitterpunkten größer als die Wurzel aus dem Nuggeteffekt.

Extremschwankungen werden in den Karten aufgrund der glättenden Wirkung des Kriging-Verfahrens nicht wiedergegeben. Auch in den Ergebnissen der Kreuzvalidation wird deutlich, daß hohe Werte durch die Interpolation unterschätzt und geringe überschätzt werden. Die Ergebnisse der Kreuzvalidation können in den Tabellen 4 und 5 im Anhang B für die 2 ml/l-Grenztiefen und 0 ml/l-Grenztiefen verfolgt werden. Höchste Abweichungen zwischen den gemessenen und in der Kreuzvalidation geschätzten Werten traten dort auf, wo die Meßwerte stark um den lokalen Mittelwert schwankten.

Berechnungen im Herbst 1992

Für den Herbst 1992 wurden insgesamt 1321 Gitterpunkte der 2 ml/l-Grenztiefen berechnet. An 187 Gitterpunkten lagen diese über dem Meeresboden. Die Einschränkung durch die Indikatorwerte ergab 136 Punkte mit Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l in Bodennähe. Die Krigestandardabweichung blieb an allen Punkten unter 8 m und schwankte mit einer sehr geringen Standardabweichung um den Wert 4.6 m. An insgesamt 22 der interpolierten Punkte wurde Schwefelwasserstoff über dem Meeresboden berechnet. Die Tiefenlage der 0 ml/l-Grenztiefen konnte in 86% dieser Punkte mit Krigestandardabweichungen unter 25 m geschätzt werden, die mittlere Krigestandardabweichung der 22 Punkte liegt bei 22.1 m (Tabelle 3.3).

Parameter	Interpolation der 2 ml/l-Grenztiefen	Interpolation der 0 ml/l-Grenztiefen
Anzahl der geschätzten Punkte	1321	713
Geschätzte Tiefen liegen über dem Meeresboden	187	136
Geschätzte Tiefen liegen über dem Meeresboden und ihr Indikatorwert ist größer 0.5	136	22
Krigestandardabweichung < 5 m	97%	0%
Krigestandardabweichung < 8 m	100%	0%
Krigestandardabweichung < 15 m	100%	0%
Krigestandardabweichung < 25 m	100%	86%
Mittlere Krigingstandardabweichung	4.64 m	22.1 m
Standardabw. der Krigestandardabweichungen	0.186 m	3.1 m

Tabelle 3.3: Krigestandardabweichungen der Schätzwerte der 2 ml/l- und 0 ml/l-Grenztiefen im Herbst 1992.

Die Ergebnisse der Kreuzvalidation (Tabelle 3.4) geben gerade bei der Schätzung der 0 ml/l-Grenztiefen bessere Auskunft über die Schätzgenauigkeiten, da hier die Randwerte nicht einfließen. Die Kreuzvalidation zeigte bei den 2 ml/l-Grenztiefen die größten Abweichungen dort, wo sehr unterschiedliche Grenztiefen nahe beieinander gemessen wurden. Im Norden des westlichen Gotlandbeckens wurde eine 2 ml/l-Grenztiefe in Küstennähe in der Nähe des Landsorttiefs um 19 m überschätzt und die Grenztiefe im Norrköpingtief um 16 m unterschätzt. Hohe Abweichungen treten auch bei den stark schwankenden Werten im Danziger Becken und im Südteil des östlichen Gotlandbeckens auf.

Die höchsten Abweichungen bei den 0 ml/l-Grenztiefen traten bei hohen kleinräumigen Schwankungen auf. In der Umgebung des Farötiefs wurden die Grenztiefen in 134 m und 137 m Tiefe um 11 m bzw. 12 m unterschätzt und die Grenztiefe in 114 m Tiefe um 20 m überschätzt. Insgesamt zeigt die Kreuzvalidation gute Ergebnisse: der mittlere Fehler liegt bei

der Schätzung beider Grenztiefen nahe Null und seine Standardabweichung bleibt bei den Grenztiefen deutlich unter der mittleren Krigestandardabweichung. Die erreichten Genauigkeiten geben bei den 0 ml/l-Grenztiefen einen besseren Einblick in die Güte der Berechnungen als die Größenordnung der Krigestandardabweichungen. Die Meßwerte werden in der Kreuzvalidation um maximal 12.9 m unter- und 20.9 m überschätzt.

Parameter	Interpolation der 2 ml/l-Grenztiefen	Interpolation der 0 ml/l-Grenztiefen
Mittlerer Fehler über alle Proben ¹⁰	0.37 m	-0.13 m
Standardabweichung des mittleren Fehlers	7.6 m	9.2 m
Mittlerer normierter Fehler	.036	-0.014
Standardabweichung des mittleren normierten Fehlers	1.22	0.602
Höchste Unterschätzung um	18.6 m	12.9 m
Höchste Überschätzung um	15.8 m	20.9 m

Tabelle 3.4: Ergebnisse der Kreuzvalidation für die Variogrammodelle und Suchradien der 2 ml/l- und 0 ml/l-Grenztiefen.

3.5 Schätzung von Flächen und Volumen der Bereiche mit geringen Sauerstoffkonzentrationen

Die Gebiete mit geringen Sauerstoffkonzentrationen sind einerseits durch den Meeresboden und andererseits durch die 2 ml/l bzw. 0 ml/l-Grenztiefen begrenzt. Die Interpolation erfolgte auf dem in Bild 3.18 gegebenen Interpolationsgitter mit Gitterabständen von 18 Kilometer (ca. 10 Seemeilen). Zur Glättung der berechneten Tiefenwerte wurde zwischen den geschätzten Werten noch einmal mit einem linearen Triangulationsverfahren interpoliert. Die Ergebniskarten enthalten in 351 Spalten und 362 Zeilen alle 1800 m einen Gitterpunkt mit einer Schätzung der Grenztiefen. Damit lagen die Grenztiefen auf einem Gitter vor, daß in seiner Auflösung dem von SEIFERT & KAYSER (1995)¹¹ in geographischen Koordinaten entwickelten Tiefenprofil der Ostsee entspricht. Das Gebiet zwischen Meeresboden und Grenztiefen ergab sich durch die Subtraktion der Grenztiefengebiete von den Meeresbodentiefen (Bild 3.31).

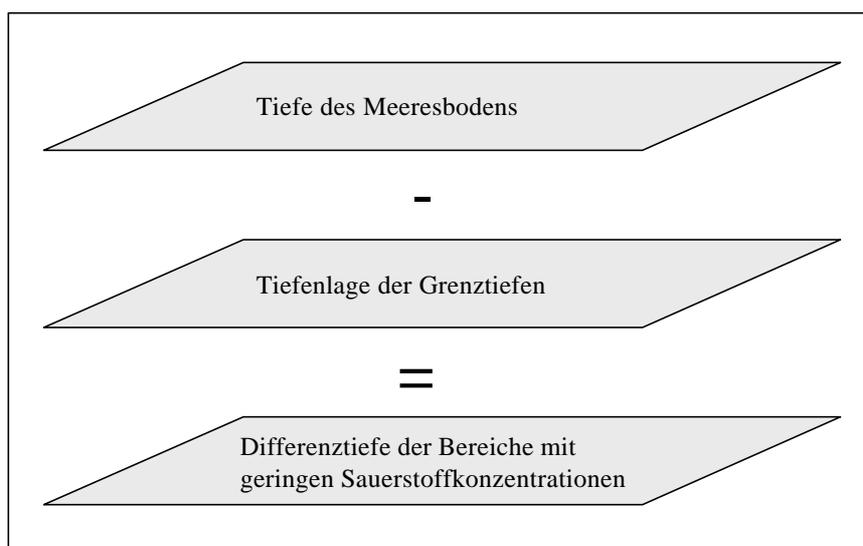


Bild 3.31: Berechnung der Gebiete mit Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l und 0 ml/l.

¹⁰ Der Fehler ergibt sich aus der Differenz aus wahren und geschätzten Wert. Zur Berechnung des normierten Fehlers wird der wahre Wert durch die Krigestandardabweichung geteilt (PAWLOWSKY 1986).

¹¹ Institut für Meereskunde Warnemünde

Es entstehen positive Differenziefen, wenn die Grenztiefen über dem Meeresboden und negative Differenziefen, wenn sie unter dem Meeresboden liegen. Für die Flächen- und Volumenberechnung sind nur Meergebiete mit positiven Differenziefen interessant. Das Volumen ergibt sich aus der Summation über die Produkte aus Flächen und Höhen an den Gitterpunkten mit positiven Differenziefen. Die Berechnung basiert auf der Trapezregel.

Zur Bildung der Differenzen und anschließenden Berechnungen der Volumen- und Flächen für die 120 Untersuchungsperioden wurde ein Makro mit dem Programm Surfer geschrieben. In den Tabellen 7 und 8 im Anhang B sind die Flächen- und Volumenwerte der Gebiete mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung der Jahre 1969-1999 und ihre Minimal- und Maximalausdehnungen gegeben. Die Verringerung der Gebiete durch Nutzung der Informationen der Randwerte im Indikator-Kriging-Verfahren und die anschließende Durchschnittsbildung kann in Tabelle 9 im Anhang B verfolgt werden. Die Berechnungen wurden alle unter Nutzung des Surfer-Makros durchgeführt und werden für den Herbst 1992 ausführlich diskutiert.

Die Bilder 3.32 und 3.33 zeigen die Flächen- und Volumenänderungen der Gebiete mit geringen Sauerstoffkonzentrationen und Schwefelwasserstoff für die Jahre 1969-1999. Die Flächen und Volumen werden quartalsweise mit Fehlerintervallen gegeben, deren Extremwerte aus den Minimal- und Maximalszenarien stammen.

Die **Gebiete mit Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l** wiesen im Winter 1993 mit 14911 km² ihre minimale und mit 76873 km² im Sommer 1970 ihre maximale Ausdehnung auf (Bild 3.32). Damit nehmen sie zwischen 6.9% und 35.5% der Gesamtwasserfläche des Untersuchungsgebietes ein. In den Jahren 1969-1975, 1977/78 und 1988/89 waren mehr als 30% des Untersuchungsgebietes von Sauerstoffmangel betroffen, während sich die Flächen in den 90er Jahren auf 15% der Gesamtfläche reduzierten. Auffällig ist eine sprunghafte Abnahme der Flächen mit geringen Sauerstoffkonzentrationen von hohen Werten in den 70er und 80er Jahren (62506 km² im Herbst 1989) auf deutlich geringere in den frühen 90er Jahren (23556 km² im Winter 1990). Diese Veränderungen sollen im Kapitel 5 ausführlich diskutiert werden.

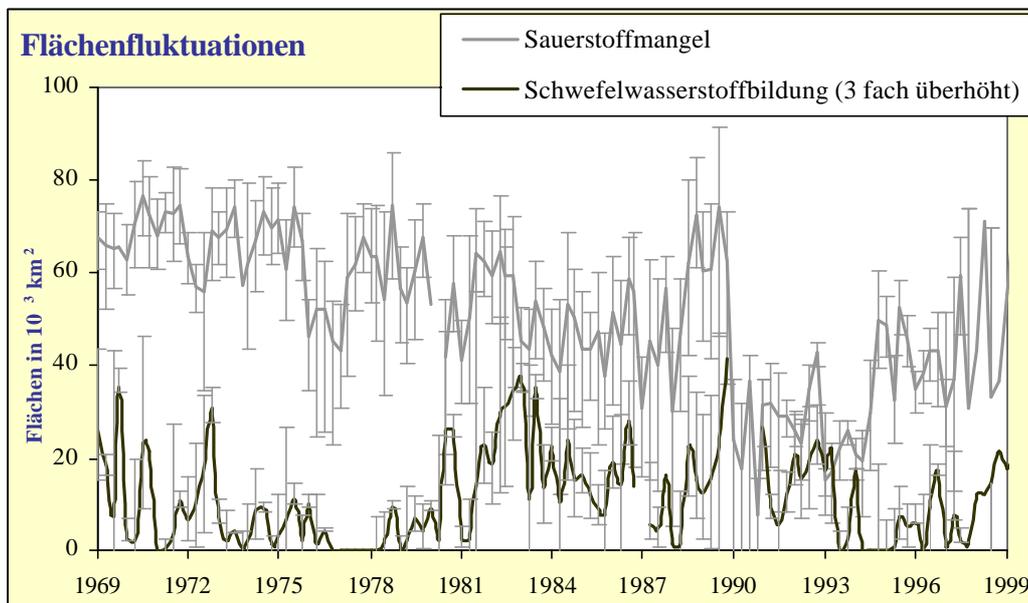


Bild 3.32: Flächenveränderung und Angabe der minimalen und maximalen Ausdehnungen der Bereiche mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung im Zeitraum 1969-1999.

Die **Flächen mit Schwefelwasserstoffbildung** schwankten zwischen 0 km² und 13739 km² (6.35% der Gesamtwasserfläche). In den Jahren 1971, 1978 und 1994 war das Untersuchungsgebiet zeitweise frei von Schwefelwasserstoff. Für die Jahre 1977, 1987 und 1998 wurde

Schwefelwasserstoff ausschließlich an einem Meßpunkt in Bodennähe gemessen, so daß auch in diesen Untersuchungsperioden die Flächen sehr klein waren. In den 70er Jahren wechselten die Bedingungen sehr schnell, während in der großen Stagnationsperiode von 1977-1993 ständig große Gebiete durch Schwefelwasserstoffbildung beeinträchtigt wurden. Die Variabilität der Volumen zeigt ein ähnliches Bild (Bild 3.33): hohe Volumen der Sauerstoffmangelgebiete in den 70ern und 80ern, die durch ein allgemeines Absinken der Salzgehaltssprungschicht und zunehmende Tiefen der Grenztiefen bedingt werden und sehr geringe Volumenwerte in den 90er Jahren. So treten die höchsten Volumenwerte am Beginn der Untersuchungsperiode im Sommer 1969 mit 2724 km³ und die geringsten im Winter 1999 mit 458 km³ auf.

Die höchsten Volumenwerte der Schwefelwasserstoffgebiete wurden für die Jahre 1982 und 1983 (356 km³ im Winter 1983) beobachtet, danach verbesserten sich die Verhältnisse zeitweilig, um Ende der 80er Jahre wieder anzusteigen. Bis zum Einstromereignis im Januar 1993 enthielten große Gebiete, vor allem in den tiefen Becken des östlichen Gotlandbeckens, Schwefelwasserstoff.

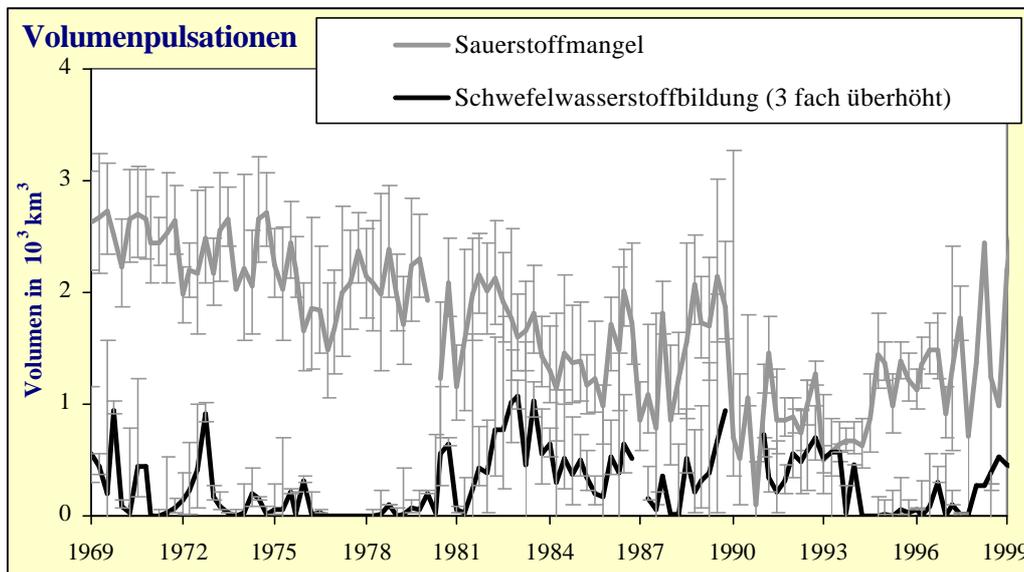


Bild 3.33: Volumenveränderung und Angabe der minimalen und maximalen Ausdehnungen der Bereiche mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung im Zeitraum 1969-1999.

Die von ANDERSIN & SANDLER (1988) veröffentlichten Karten und Flächen der Gebiete mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung fassen alle Messungen eines Jahres zusammen. Zur Methodik der Kartenberechnung konnten nur wenige Hinweise gefunden werden. Da diese Karten zur Untersuchung der Lebensbedingungen der Benthosorganismen erstellt wurden, welche bei geringen Sauerstoffkonzentrationen absterben oder abwandern, wird vermutet, daß die Karten die ungünstigsten Bedingungen mit der höchsten Ausdehnung der Mangelgebiete darstellen.

Die Flächen mit Schwefelwasserstoffbildung liegen mit einem Mittelwert von 18500 km² deutlich über den in dieser Arbeit berechneten Werten (Mittelwert 3700 km²). Ähnlich hohe Werte von ca. 70000 km² werden zur Beschreibung der Gebiete mit Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l angegeben. Die in dieser Arbeit berechneten Werte liegen bei 51000 km². Gründe für diese Abweichungen können darin gesehen werden, daß in ANDERSIN & SANDLER die größte Ausdehnung der Defizitgebiete innerhalb eines Jahres und nicht deren mittlere Ausdehnung dargestellt wird. Zum zweiten fällt auf, daß in den von ANDERSIN & SANDLER gezeichneten Karten die Defizitgebiete zusammenhängen. Die in diese Arbeit eingehenden Meßwerte zeigen jedoch häufig eine Durchmischung von Meßpunkten mit Sauerstoffdefiziten und solchen ohne Defizite. Eine Einbeziehung der Punkte ohne Mangelsituationen im Indikator-Kriging-Verfahren führte zu einer Reduzierung der Gebiete um ca. 15%.

Die Flächen- und Volumenmaße zeigen eine deutliche jahreszeitliche Variabilität mit Amplituden von 8000 km² bei den Sauerstoffmangelgebieten und 2100 km² bei den Gebieten mit Schwefelwasserstoffbildung (Bild 3.34).

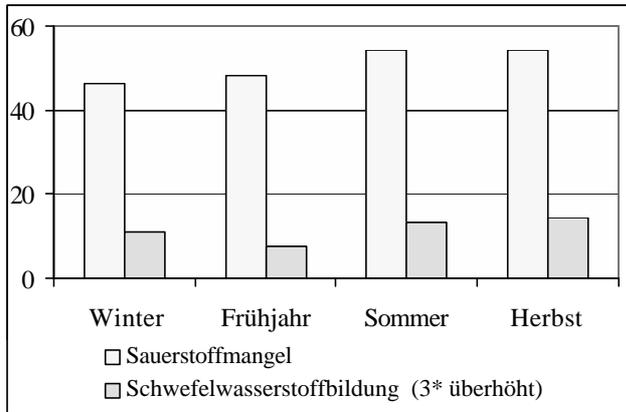


Bild 3.34: Innerjährliche Flächenvariabilität der Bereiche mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung

Die Gebiete sind im Mittel im Winter und Frühjahr kleiner als im Sommer und Herbst. Im Winterhalbjahr treten die Einstromereignisse aus der Nordsee auf, die Situation im Bornholmbecken verbessert sich häufig durch Intrusionen aus dem

Arkonabecken. In den nördlichen Bereichen kann es zum Austausch über die Sprungschicht kommen (NEHRING & FRANCKE 1981; MATTHÄUS 1976 & 1978b). Dagegen werden im Sommer die größten Mengen Sauerstoff verbraucht, was zu Sauerstoffmangel unterhalb der Temperatursprungschicht führen kann.

Volumen- und Flächenberechnung – Herbst 1992

Die Flächen- und Volumen der Mangelgebiete wurden einmal für die mit dem Ordinary-Kriging-Verfahren berechneten Grenztiefen und dann für die mit dem Indikator-Kriging-Verfahren korrigierten Werte berechnet.

Die in Bild 3.20 sichtbare Verringerung der Gebiete mit Sauerstoffmangel in der Umgebung von Meßpunkten mit höheren bodennahen Sauerstoffkonzentrationen wird in der Abnahme der Flächen mit Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l um ca. 26% deutlich (Tabelle 3.5). Die Höhe der Bereiche mit Sauerstoffmangel über dem Meeresboden war in den Grenzbereichen mit geringen Indikatorwerten relativ gering, so daß die Einschränkung bei den Volumenbeträgen eine Verringerung von nur 11% bewirkt.

Eine Einschätzung der Güte der Flächen- und Volumenangaben ist mit Hilfe der Minimal- und Maximalszenarien möglich. Die Varianzen waren bei der Schätzung der 2 ml/l-Grenztiefen relativ klein, die Minimal- und Maximalvarianten liegen bei den Flächenberechnungen bei 88% und 116% des wahrscheinlichsten mittleren Wertes und bei den Volumenwerten bei 84% und 117%. Diese Genauigkeit konnte bei den hohen, aus der Variogramm-analyse folgenden Krigevarianzen der Schwefelwasserstoff-Grenztiefen nicht erwartet werden.

Die Zwischenergebnisse zur Berechnung der mittleren Volumenwerte werden in Tabelle 3.4 wiedergegeben. Die berechneten Volumen beziehen sich auf die Grenztiefen, die über dem Meeresboden liegen. Negative Volumen entstehen durch die Definition der Randwerte unter dem Meeresboden. Die Ergebnisse der drei Volumenberechnungen mit der Trapez-Regel, der Simpson-Regel und der Simpson'schen 3/8-Regel unterscheiden sich nur minimal. Das Ergebnis der Volumenberechnung liegt bei beiden Rechnungen weniger als 1% unter dem gemeinsamen Mittelwert. Aus der Flächenberechnung wurden die Land- und Inselgebiete herausgenommen.

Im Herbst 1992 herrschten in 19.7% der Gesamtwasserfläche des Untersuchungsgebietes Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l und in 3.66% der Gesamtwasserfläche Schwefelwasserstoffbildung.

Die durch die ungünstigen Randwerte entstandene Unterschätzung der Flächen- und Volumen wird in der Zeile Randwertverbesserung angegeben. Geringere Randwerte von 10 m bzw. 20 m statt 20 m und 30 m unter der Sedimentoberfläche führen zu einer Vergrößerung der Mangelgebiete. Diese Differenz entsteht, da zusätzlich zum Interpolationsgitter des Kriging-Verfahrens weitere Gitterpunkte mit dem Triangulationsverfahren erzeugt wurden. Diese erzeugten glattere Oberflächen bei den entstehenden Karten, sind jedoch nicht durch die Datenlage gerechtfertigt. Da die Unterschiede zwischen beiden Ergebnissen sehr gering sind und nur durch die zusätzlichen Gitterpunkte entstehen, wurde auf eine Verbesserung der Ergebnisse aufgrund des hohen Arbeitsaufwandes verzichtet.

	Gebiete mit Sauerstoffmangel		Gebiete mit Schwefelwasserstoffbildung	
	Fläche in km² / Volumen in km³			
Ohne Indikatorwerte	57233	1435	7585	223
Mit Indikatorwerten	42599	1273	7531	223
Minimalszenario	37542	1087	4453	117
Maximalszenario	49569	1487	11832	442
Randwertverbesserung	43763	1279	7542	223
Zwischenergebnisse der Volumenberechnung				
Positives Volumen		1273		223
Negatives Volumen		-8104		-20284
Summe der Volumen		-6831		-20601
Ergebnisse aus der Trapez-Regel				
Simson'sche-Regel		1435		223
Simpson'sche 3/8-Regel		1447		223
Zwischergebnisse der Flächenberechnung				
Positives planares Gebiet	42599		7585	
Negatives planares Gebiet	173712		199218	
Landgebiete	191928		191928	
Positive Oberfläche	42601		7585	
Negative Oberfläche	173714		199221	

Tabelle 3.5: Berechnung der Flächen und Volumen mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung im Herbst 1992.

4 RÄUMLICHE AUSWIRKUNGEN DER ZEITLICH VARIIERENDEN SAUERSTOFFKONZENTRATIONEN

Aus den das wechselnde Sauerstoffregime in den Jahren 1969 bis 1998 kennzeichnenden Karten wird die Eintrittswahrscheinlichkeit der Zustände "Sauerstoffmangel" und "Schwefelwasserstoffbildung" im Tiefenwasser der zentralen Ostsee geschätzt. Am Beispiel der Entstehung von Feinschichtungen in den Sedimenten wird der Einfluß der wechselnden Oxidations- / Reduktionsverhältnisse auf das submarine Sedimentationsmilieu diskutiert.

4.1 Flächenhafte Quantifizierung des Auftretens von Mangelzuständen

Die jahreszeitlich variierenden, durch den kontinuierlichen Stoffeintrag und den periodisch auftretenden Salzwassereinstrom gesteuerten Veränderungen des Sauerstoffregimes in der Zentralen Ostsee wurden im letzten Kapitel für die Jahre 1969 bis 1999 dargestellt. Die Bereiche mit Sauerstoffmangel (Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l) erreichen Ausdehnungen zwischen 15000 und 77000 km² mit 460 bis 2700 km³ Wasser, die Gebiete mit Schwefelwasserstoff zwischen 0 und 14000 km² mit bis zu 360 km³ Wasser.

Die zonale Variabilität dieser Gebiete kann durch die Berechnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten der Zustände "Sauerstoffmangel" und "Schwefelwasserstoffbildung" in ihrem räumlichen Auftreten beschrieben werden. An allen im Bild 3.18. dargestellten Punkten des Interpolationsgitters wurde die Lage der Grenztiefen in 118 Untersuchungsperioden berechnet. Diese enthalten die Information darüber, wie oft die Sauerstoffkonzentrationen in Bodennähe in den untersuchten 30 Jahren unter 2 ml/l bzw. 0 ml/l sanken.

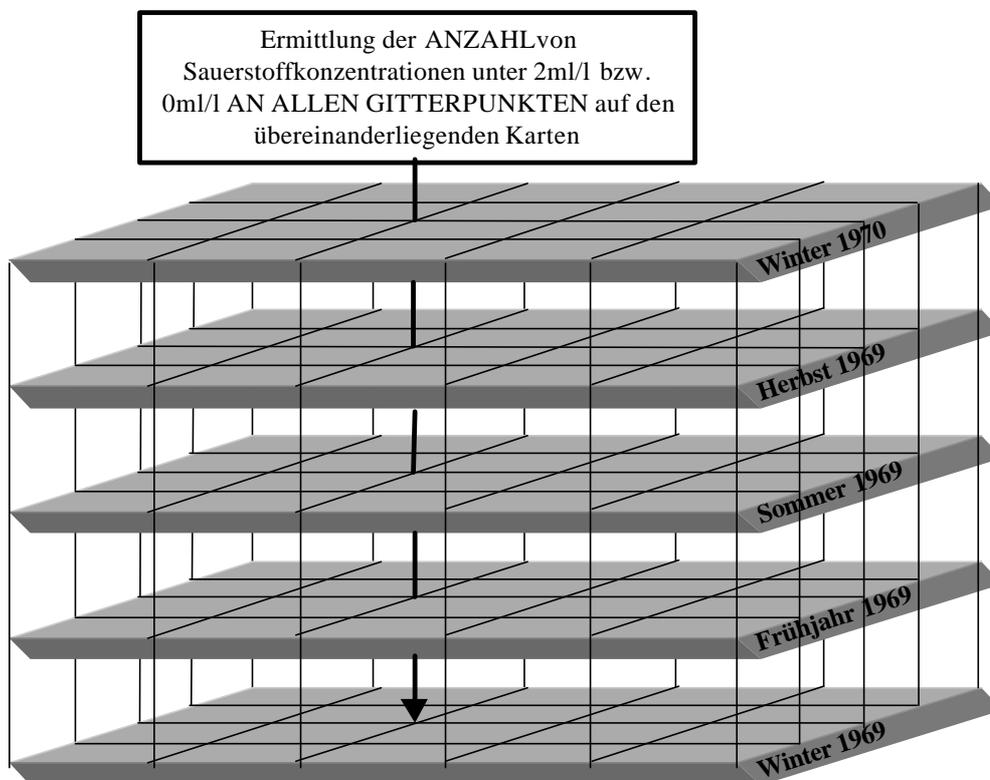


Bild 4.1: Berechnung der absoluten Häufigkeiten der Zustände Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoff auf allen Gitterpunkten der Karten.

Für alle Gitterpunkte kann die absolute Häufigkeit der Zustände "Sauerstoffmangel" und "Schwefelwasserstoffbildung" ausgezählt werden. Die relativen Häufigkeiten¹ dienen als Schätzwert für die räumlich variierenden *Eintrittswahrscheinlichkeiten* beider Zustände. Tabelle 4.1. gibt eine Zusammenfassung der Sauerstoffbedingungen auf den 697 zur Wasserfläche gehörenden Gitterpunkten. Die Gebiete mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten von Mangelsituationen wurden sechs **Häufigkeitsklassen** zugeordnet:

- In der Häufigkeitsklasse "**Nie**" liegen alle Gebiete, in denen in keinem der untersuchten Jahre Mangelsituationen auftraten.
- Zur Klasse "**Selten**" werden alle die Gebiete gezählt, in der Mangelsituationen in weniger als 10% der Untersuchungsperioden festgestellt wurden.
- Beim Auftreten von Mangelsituationen in 10 bis 25% der Untersuchungsperioden gehört das Gebiet zur Häufigkeitsklasse "**Gelegentlich**".
- Gebiete mit Eintrittswahrscheinlichkeiten zwischen 25 und 50% werden in der Klasse "**Häufig**" zusammengefaßt.
- "**Meistens**" beinhaltet das Auftreten von Mangelsituationen in 50-90% der Untersuchungsperioden und
- die Gebiete gehören zur Häufigkeitsklasse "**Fast immer**", in denen die aus den Häufigkeiten geschätzte Eintrittswahrscheinlichkeit für Mangelsituationen bei über 90% liegt.

Häufigkeitsklassen	Anzahl der Gitterpunkte mit Sauerstoffmangel (in %)	Tiefe der Gitterpunkte (in m)		
		Mittelwert	Min.	Max.
Nie (0%)	46	26	0.05	65
Selten (<10%)	16	48	6.2	75
Gelegentlich (10-25%)	6	70	39	113
Häufig (25-50%)	8	83	70	97
Meistens (50-90%)	20	114	75	118
Fast immer (>90%)	4	156	197	230

Tabelle 4.1: Einordnung und genauere Beschreibung der Gitterpunkte, die in Gebieten mit unterschiedlicher Eintrittswahrscheinlichkeit von Sauerstoffmangelsituationen liegen.

Die Gebiete der unterschiedlichen Häufigkeitsklassen können über ihre flächenhafte Ausdehnung näher beschrieben werden. Dementsprechend wurden die Flächen der Gebiete berechnet, in den Sauerstoffmangelsituationen mit bestimmten Häufigkeiten auftraten. Zusätzlich wird angegeben, auf wieviel Quadratkilometern die Häufigkeit von Sauerstoffmangelzuständen bei 0 % und über 0 %, 10 %, 25 %, 50 % und 90 % lag (Tabelle 4.2).

Die Fläche, in der mindestens einmal "**Sauerstoffmangel**" berechnet wurde, liegt mit 140150 km² deutlich über der maximalen berechneten Flächenausdehnung der Sauerstoffmangelgebiete von 77000 km² im Sommer 1970. Dieser Unterschied ergibt sich aus der hohen Variabilität der Oxydationsverhältnisse in den Flachwassergebieten. Mangelsituationen treten hier im Spätsommer und Frühherbst zwischen der Temperatur- und Salzgehaltssprungschicht auf.

Eintrittswahrscheinlichkeit	0%	>0%	>10%	>25%	>50%	>90%
Flächenäquivalente in km ²	76200	140150	96100	75000	48300	4700

Tabelle 4.2: Angabe der Flächen, in denen die Eintrittswahrscheinlichkeit für "Sauerstoffmangel" über den Schwellenwerten von 0%, 10%, 25%, 50% und 90% liegen.

¹ Relative Häufigkeiten entsprechen dem prozentualen Anteil von Sauerstoffmangelsituationen an der Gesamtanzahl der Untersuchungsperioden. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Zustände "Sauerstoffmangel" und "Schwefelwasserstoffbildung" werden aus ihren relativen Häufigkeiten geschätzt.

Tabelle 4.1. zeigt parallel verlaufende Veränderungen zwischen der maximalen Wassertiefe an den Gitterpunkten und der Häufigkeit des Auftretens von Sauerstoffmangel an diesen Punkten. Die Zunahme der Grenztiefen mit wachsender Entfernung von der Nordsee bewirkt eine Verschiebung der Häufigkeitsklassen in höhere Wassertiefen, so daß der von den minimalen und maximalen Wassertiefen aufgespannte Wertebereich bis zu 75 m umfassen kann.

Einen Überblick über die Lage der Gebiete mit den verschiedenen Eintrittswahrscheinlichkeiten des Zustandes "Sauerstoffmangel" gibt Bild 4.2.

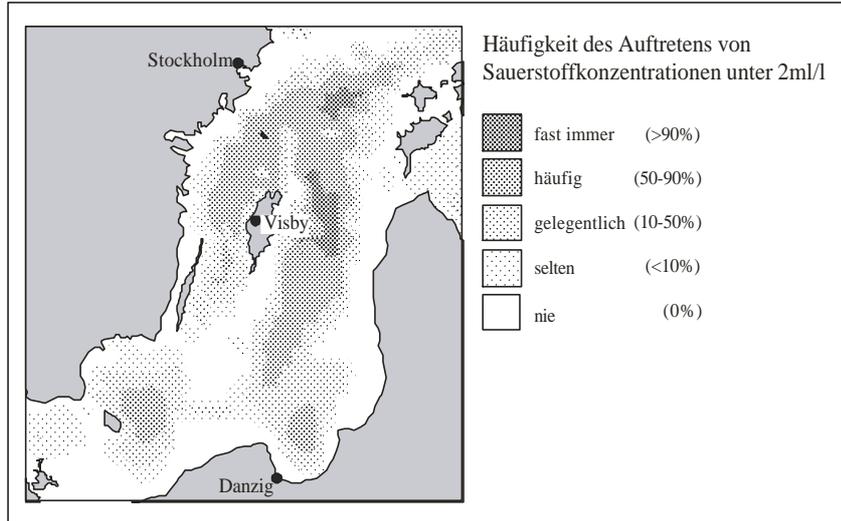


Bild 4.2: Darstellung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von geringen Sauerstoffkonzentrationen (<2 ml/l) für das Gebiet der Zentralen Ostsee.

"Schwefelwasserstoffbildung" als extremerer Zustand von Sauerstoffmangel wurde insgesamt seltener beobachtet (Tabelle 4.3). Auch hier existiert ein Zusammenhang zwischen der Häufigkeit anaerober Zustände und der Wassertiefe an den untersuchten Gitterpunkten. An nur einem Punkt des Untersuchungsgebietes wurde in über 50% aller Fälle Schwefelwasserstoffbildung in Bodennähe berechnet. Im Gotlandtief trat in 60 der 118 Untersuchungsperioden Schwefelwasserstoff auf.

Häufigkeitsklassen	Anzahl der Gitterpunkte mit Sauerstoffmangel (in %)	Tiefe der Gitterpunkte (in m)		
		Mittelwert	Min.	Max.
Nie (0%)	82	45	0.05	123
Selten (<10%)	14	111	65	182
Gelegentlich (10-25%)	2.3	155	133	220
Häufig (25-50%)	1.6	180	160	210
Meistens (50-90%)	0.1	230	230	230
Fast immer (>90%)	0			

Tabelle 4.3: Einordnung und genauere Beschreibung der Gitterpunkte, die in Gebieten mit unterschiedlicher Eintrittswahrscheinlichkeit für Schwefelwasserstoff liegen.

Die Gebiete mit Schwefelwasserstoffbildung zeigen eine noch stärkere räumliche Variabilität in der Häufigkeitsklasse "Selten". Die maximale Ausdehnung dieser Gebiete nimmt mit 14000 km² im Herbst 1989 gerade ein Drittel der Fläche ein, in der mindestens einmal Schwefelwasserstoff beobachtet wurde (Tabelle 4.4).

Eintrittswahrscheinlichkeit	0%	>0%	>10%	>25%	>50%	>90%
Flächenäquivalente in km ²	169026	47290	9190	2580	1.2	0

Tabelle 4.4: Angabe der Flächen, in denen die Eintrittswahrscheinlichkeit für "Sauerstoffmangel" über den Schwellenwerten von 0%, 10%, 25%, 50% und 90% liegen.

Im Bornholm- und Danziger Becken, in den größten Teilen des westlichen und nördlichen Gotlandbeckens und in den Randlagen des östlichen Gotlandbeckens liegt die Häufigkeit des Auftretens von Schwefelwasserstoff unter 10%. Im Landsorttief und den tiefsten Bereichen des nördlichen Gotlandbeckens traten anaerobe Verhältnisse in bis zu 25% aller Jahre auf und nur in den eng begrenzten Bereichen um das Gotland- und Farötief überstieg ihre Häufigkeit 25% (Bild 4.3).

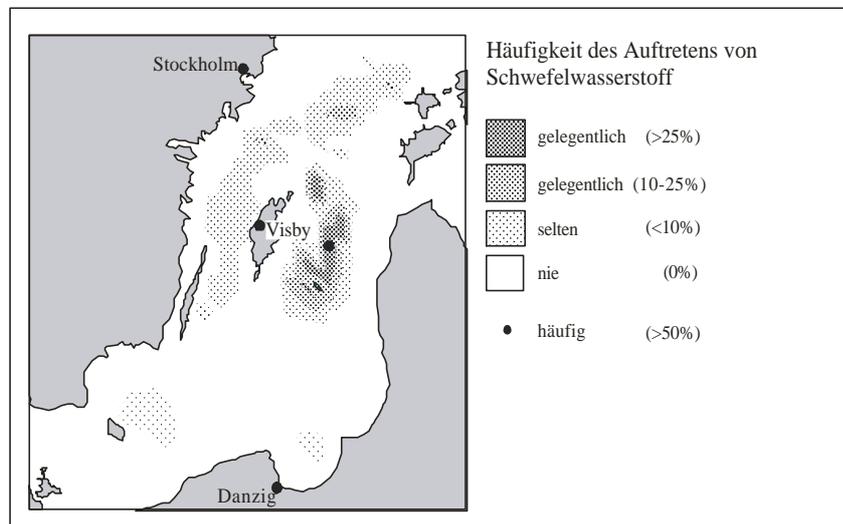


Bild 4.3: Darstellung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Schwefelwasserstoff für das Gebiet der Zentralen Ostsee.

4.2 Räumliche Auswirkungen auf die Entstehung laminiertes Sedimente

Sedimentationstypen entstehen aus dem Zusammenwirken von Transportprozessen im Meer und dem verfügbaren Material. Hauptausgangsmaterial der Sedimentneubildung ist der eiszeitliche Geschiebemergel mit einem großen Korngrößenspektrum. Im Küstenraum bestimmen Wellen im Brandungsbereich Erosion und Transportvorgänge. Diese verlieren jedoch mit zunehmender Wassertiefe an Bedeutung. Seewärts wirken vor allem windgetriebene und durch Wasserkörper unterschiedlicher Herkunft und Dichte erzeugte Ausgleichsströmungen. Feinkörniges Material, welches von Flüssen herantransportiert und im Küstenbereich erodiert wurde, wird weit in die Ostsee hinein verlagert. In den flacheren Meeresgebieten an den Beckenrändern und in Küstennähe werden durch die Wirkung von Wellen und Strömungen die leicht erodierbaren Bestandteile des Geschiebelehms ausgewaschen und forttransportiert. Zurück bleiben marine Sande als grobe Bestandteile des Geschiebemergels, die eine weitere Erosion erschweren. In den tieferen, strömungsarmen Becken dehnen sich die Akkumulationsgebiete aus, in denen ständig feinkörniges Material (Schlick) abgelagert wird (HÅKANSON & JANSSON 1983). Der Gehalt an organischem Kohlenstoff beträgt hier im Mittel 10%. Der Tongehalt des Schlickes nimmt mit zunehmender Ausdehnung und Tiefe der Ostseebecken zu. Die wichtigste Quelle für die organische Substanz im Schlick ist das Plankton, wobei die jährliche Frühjahresblüte den Haupteintrag verursacht. Die durchschnittliche Sedimentationsrate liegt bei 1-1.5 mm/Jahr (NIEDERMEYER 1996).

Laminierungen (Feinschichtungen) entstehen im Sediment durch jahreszeitliche Schwankungen in der Sedimentationsrate und Stoffzusammensetzung. Am Meeresboden lebende Tiere durchmischen die abgelagerten Sedimente (Bioturbation) - Bild 4.4, linkes Foto. Eine Feinschichtung wie im rechten Foto kann nur dann entstehen, wenn die Sauerstoffkonzentrationen unter die Überlebensgrenze der Organismen sinken (ANDERSIN et al. 1978; LAINE et al. 1997).



Bild 4.4: Sedimentproben im oxischen Milieu in 84 m Tiefe im Finnischen Meerbusen (linkes Foto) und anoxischem Milieu in 170 m Tiefe östlichen Gotlandbecken (rechtes Foto), Fotografie A.O. LAINE.

Oxische Sedimente sind durch helle braune oder graue Sedimentlagen gekennzeichnet, anoxische Sedimente durch eine Feinschichtung mit dünnen schwarzen Sedimentlagen, die reduzierte schwefelwasserstoffhaltige Substanzen enthalten.

Feinschichtungen können zeitliche Variationen in Nährstoff- und Schadstoffkonzentrationen speichern (SCHULZ-BULL et al. 1996). Lange Sedimentkerne (Bild 4.5) zeigen, daß natürliche laminierte Sedimente in den zentralen Gebieten der tiefen Becken jahrhundertlang gebildet worden sind (IGNATIUS 1958). Diese Schichtungen sind von besonderem wissenschaftlichem Interesse. Sie waren über längere Zeit kaum Umlagerungsprozessen ausgesetzt und speichern hydrographische, biologische und geochemische Eigenschaften früherer ökologischer Zustände. Untersuchungen an den Bohrkernen ermöglichen einen Überblick über Umweltbedingungen früherer Jahrzehnte, Jahrhunderte und Jahrtausende (NIEDERMEYER 1996).

JONSSON et al. (1990) untersuchten Sedimentkerne in der zentralen Ostsee und fanden Laminierungen an nahezu allen im Akkumulationsgebiet liegenden Stationen. Eine Karte zur Verteilung der laminierten Sedimente basiert auf den Probenahmen an 69 Stationen und einer Flächendynamik-Karte des Meeresbodens von EMEYANOV (1988). Insgesamt 48 der 50 im Akkumulationsgebiet gelegenen Proben wiesen Laminierungen auf.

Während in den tiefen Becken der Zentralen Ostsee (Bornholm-, Gotland-, Farö- und Norrköping-Tief) auch schon seit Jahrhunderten Sauerstoffmangelsituationen auftraten, kam es seit den 40er Jahren im gesamten Akkumulationsgebiet unter 75 m Tiefe zur verstärkten Bildung laminiertes Sedimente (JONSSON et al. 1990).



Bild 4.5: Feinschichtungen im Gotlandtief, Fotografie PROF. W. SCHWARZACHER (1998)

Bild 4.5 zeigt die aus der Auszählung von Schichten folgende Zunahme der Gebiete mit laminierten Sedimenten in diesem Jahrhundert von ca. 17000 auf 70000 km². Die Darstellung basiert auf der Annahme einer jährlichen Feinschichtung und einer gleichmäßigen Flächenrepräsentivität der laminierten Proben. Es wird eine hohe Flächenausdehnung zwischen den 40er und 80er Jahren deutlich. Eine weitere Ausdehnung der Gebiete ist nicht möglich. Laminierungen sind an länger andauernde Sauerstoffmangelsituationen gebunden, die

nur unterhalb der Salzgehaltssprungschicht entstehen. In den Akkumulationsgebieten unterhalb der Sprungschicht wurden heute bereits Laminierungen festgestellt.

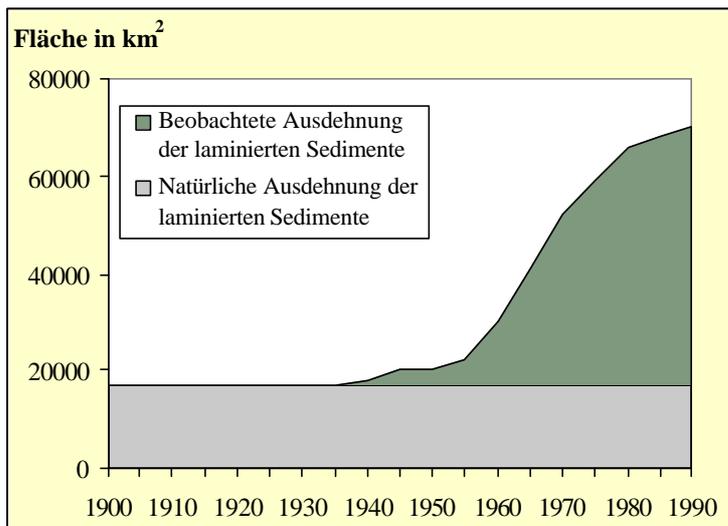
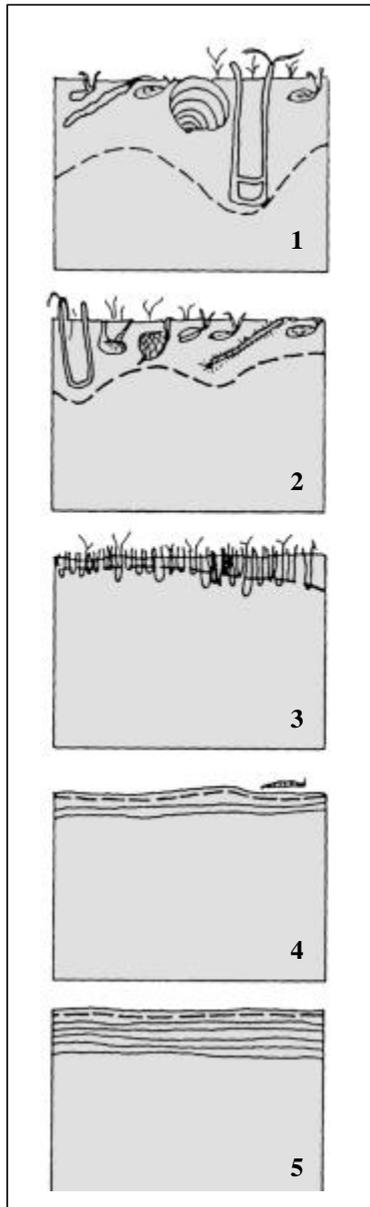


Bild 4.6: Schematische Darstellung der zunehmenden Ausdehnung laminierten Sedimente in diesem Jahrhundert nach JONSSON et al. 1990.

Diese Entwicklung stimmt mit den Beobachtungen vom Verschwinden der Bodenfauna und der abnehmenden Sauerstoffkonzentrationen in Bodennähe überein (ANDERSIN et al. 1978; ANDERSIN & SANDLER

1991; LAINE et al. 1997; MELVASALO 1981). Die in Bild 4.6 dargestellte Flächenzunahme der Gebiete mit Laminierungen wird in einem Modell von RUMOHR (1996) zu den Veränderungen der Umweltbedingungen am Meeresboden erklärt. Dieses Modell basiert auf Veränderungen in der Artenzusammensetzung der am Boden lebenden Organismen, dem Redoxzustand und den Sedimentstrukturen (Bild 4.6).

Ein Vergleich mit historischen Daten ergab eine Verschlechterung der ökologischen Bedingungen im Bereich der südlichen und zentralen Ostsee um mindestens eine Stufe. Kattegat und Beltsee werden dem Stadium 1, das Arkonabecken dem Stadium 1-2, das Bornholm- und Danziger Becken dem Stadium 3, das Gotlandtief den Stadien 4 und 5 und das Landstättief dem Stadium 5 zugeordnet.



- Stadium 1 stellt eine stabile Gemeinschaft tief siedelnder langlebiger Arten im wohldurchmischten, oxischen Sediment dar, das heute kaum noch anzutreffen ist.
- Stadium 2 ist eine von Muscheln und anderen langlebigen Organismen dominierte, starken Fluktuationen unterworfenene Gemeinschaft mit erhöhter Biomasse.
- Stadium 3 umfaßt eine biomassearme Gemeinschaft mit starken Schwankungen der Populationsparameter, die zeitweise durch Sauerstoffmangel ausgelöscht wird. Die Grenzschicht zum sauerstofffreien Sediment liegt einige Millimeter unter der Sedimentoberfläche.
- Im Stadium 4 ist keine Makrofauna vorhanden, es erfolgt eine Besiedlung mit Schwefelbakterien an der Grenzschicht zwischen Schwefelwasserstoff im Sediment und geringen Sauerstoffgehalten im Wasser. Vereinzelt treten noch Organismen in Bodennähe auf und es bilden sich erste Feinschichtungen.
- Das Stadium 5 zeigt ein langfristig tierfreies Sediment mit laminiertes Feinschichtung.

Bild 4.7: Ostsee - Sukzessionsmodell aus der gemeinsamen Betrachtung von Sauerstoffverhältnissen in Bodennähe, Benthofauna und Sedimentstrukturen.

Dies stimmt mit den Ergebnissen von MATTHÄUS (1995) überein, der bei Untersuchungen von Langzeitveränderungen im Tiefenwasser der zentralen Ostsee einen sich seit 1952 verstärkenden Rückgang des Sauerstoffgehaltes in diesem Jahrhundert feststellte. In den 60er und 70er Jahren kam es in jedem zweiten Jahr zu einem Absterben der Bodenfauna in einem Gebiet von ca. 2000 km² (JONSSON 1992). Im Gotlandtief wurden 1992 die höchsten bisher in der Ostsee erreichten Schwefelwasserstoffkonzentrationen von 5.1 ml/l gemessen (NEHRING et al. 1993). Im nördlichen und westlichen Gotlandbecken wurden seit Ende der 80er Jahre aufgrund der abnehmenden Dichtestabilität der Sprungschicht Verbesserungen in der Sauerstoffversorgung des Tiefenwassers beobachtet. Für eine Trendwende wäre eine dauerhafte ausreichende Sauerstoffversorgung des Tiefenwassers und eine Verringerung der Nährstoffzufuhr notwendig. Es gibt erste Anzeichen für eine Verbesserung des Sauerstoffregimes in den 90er Jahren. In den Jahren 1993 und 1994 verbesserten sich die Sauerstoffbedingungen bis in Bodennähe und die Nährstoffeinträge im Flußwassereinzugsgebiet gingen erstmals zurück (FAO 1952-1993). Die Nährstoffkonzentrationen in der Ostsee befinden sich jedoch gegenwärtig auf einem so hohes Niveau, daß zukünftig nicht mit einem Rückgang der Sauerstoffmangelgebiete zu rechnen ist (LOZAN et al. 1996).

Die Verschlechterung der Sauerstoffverhältnisse in den tiefen Becken fällt in einen Zeitabschnitt, in der sich die Gebiete mit laminierten Sedimenten auszudehnen begannen. JONSSON et al. (1990) wiesen auf die geringen Korrelationen zwischen der Wassertiefe und der Anzahl der Laminierungen und die hohe Differenzierung der Sauerstoffbedingungen in Bodennähe auch innerhalb der tiefen Becken hin. Diese räumliche Differenzierung des Sauerstoffregimes in den tiefen Becken ging in die Berechnung der Häufigkeitskarten ein.

Es zeigt sich, daß eine **räumliche Korrelation** zwischen dem häufigem Auftreten von Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l in Bodennähe und der Entstehung von Feinschichtungen besteht (Bild 4.7).

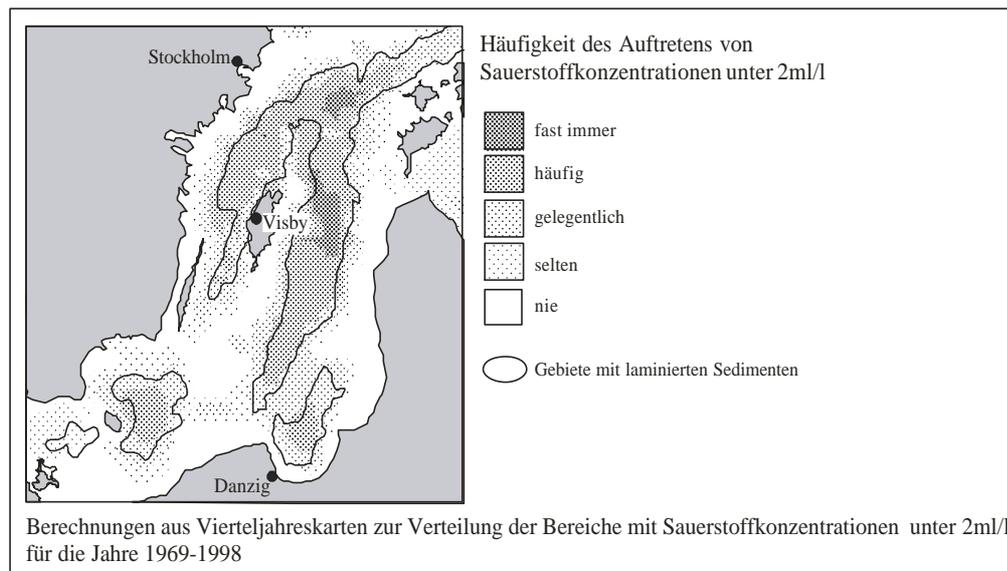


Bild 4.8: Gemeinsame Darstellung der Ausdehnung laminiertes Sedimente (JONSSON et al. 1990) und der Häufigkeit von Sauerstoffmangelsituationen in der Zentralen Ostsee.

Demzufolge stimmen die Verbreitungsgrenzen laminiertes Sedimente gut mit den Gebieten überein, in denen häufig Sauerstoffmangel beobachtet wurde. Dies wird auch beim Vergleich der Flächenausdehnungen deutlich: JONSSON et al. (1990) schätzen die heutige Verbreitung laminiertes Sedimente auf ca. 70000 km² in der Zentralen Ostsee. Aufgrund der vorgestellten Berechnungen treten geringe Sauerstoffkonzentrationen häufig (mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von über 25%) in einem Gebiet von 75000 km² auf. Die zeitlich stark variierenden Randbereiche der Becken mit kleineren Eintrittswahrscheinlichkeiten für Sauerstoffmangel zeigen keine Laminierungen. Pflanzen und Tiere können niedrige Sauerstoffkonzentrationen über eine gewisse Zeit tolerieren bzw. die Randbereiche werden bei einer Verbesserung der Sauerstoffbedingungen schnell wiederbesiedelt und die Feinschichtung wird zerstört.

Die Reaktion des Geosystems Ostsee auf die Nährstoffzufuhr und die Zustromverhältnisse führt über die regional verschiedenen Häufigkeiten des Auftretens von geringen Sauerstoffkonzentrationen zu Veränderungen der Sedimentstruktur. Die heute beobachtete und in Bild 4.7 dargestellte Verbreitung laminiertes Sedimente ist ein Ergebnis der im Ostsee-Sukzessionsmodell nach RUMOHR (1996) beschriebenen Veränderungen in der Besiedlung des Meeresbodens. Das Auftreten von Feinschichtungen kann als Beispiel einer Zeit-Raum-Abbildung (AURADA 1992 & 1993) der zeitlich variierenden Bereiche mit Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l auf die Bildung von Laminierungen im Ostseeraum angesehen werden.

5 DIE OSTSEE ALS SELBSTREGULIERENDES SYSTEM – EINE SYNTHESE

Ausgehend von den Flächenfluktuationen und Volumenpulsationen der Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser soll untersucht werden, ob deren räumliche Variabilität ausschließlich als Antwort des Systems Ostsee auf externe Faktoren (Nährstoffzufuhr, Salzwassereinstrom) angesehen werden kann, oder ob interne Regulationsmechanismen existieren, die das Systemverhalten mitbestimmen. Es werden mögliche Systemreaktionen in Abhängigkeit von den herrschenden ozeanographischen Bedingungen dargestellt.

5.1 Systemanalyse

Ein System kann durch die Analyse und Synthese seiner Eingangs- und Ausgangssignale beschrieben werden. Die ozeanographischen und hypsometrischen Eigenschaften des Geosystems Ostsee wandeln den kontinuierlichen, anthropogen beeinflussten Nährstoffeintrag aus den Flüssen und der Atmosphäre und die periodisch auftretenden Einstrome salz- und sauerstoffreicher Wassermassen aus der Nordsee in räumliche Muster der Verteilung der Sauerstoffdefizitgebiete im Tiefenwasser um. Die heutige Rechner-technologie ermöglicht die Darstellung der im Ökosystem sehr langsam ablaufenden zonalen Veränderungen der Gebiete mit geringen Sauerstoffkonzentrationen und Schwefelwasserstoff, deren Geschwindigkeit sonst außerhalb des menschlichen Erfahrungshorizontes liegt. Die Modellbildung und Nutzung des Computers stellen damit für die Beschreibungsmöglichkeit von Ökosystemen eine ähnliche Erweiterung der menschlichen Sinne um zeitliche Dimensionen dar, wie es Fernrohr und Mikroskop bei der Erforschung des Raumes taten (HAUHS et al. 2000). Die Veränderungen der Sauerstoffverhältnisse konnten in Karten für die Winter-, Frühjahr-, Sommer- und Herbstverhältnisse der 30jährigen Untersuchungsperiode (Bilder 3.23-3.29) und in Diagrammen wie in Bild 5.1 zusammengefaßt werden. Aus der dargestellten räumlichen Variabilität kann auf die sie bedingenden Prozesse geschlossen werden (AURADA 1998).

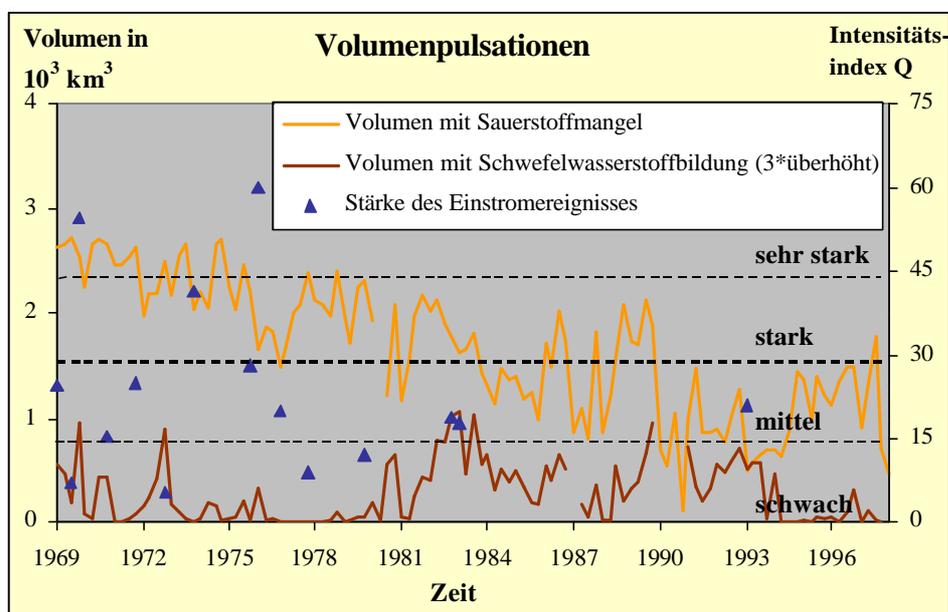


Bild 5.1: Variabilität der Sauerstoffverhältnisse im Zeitraum 1969-1997 und Vergleich mit der Stärke der Einstromereignisse.

Zur Quantifizierung der Einstromereignisse wurde ein Intensitätsindex Q definiert, der aus der Dauer (Anzahl der Tage) und dem mittleren Salzgehalt des über die Darßer Schwelle strömenden Nordseewassers berechnet wird (MATTHÄUS & FRANCK 1992). In den 30 untersuchten Jahren sind 15 Einstromereignisse dokumentiert, von denen 4 als schwache ($Q < 15$), 8 als mittlere ($Q: 15-30$) und 3 als starke bzw. sehr starke Intrusionen ($Q > 30$) klassifiziert wurden.

Ein Vergleich von Intensität und Auswirkungen unterschiedlich starker Einstromereignisse auf die Ausdehnung der Gebiete mit geringen Sauerstoffkonzentrationen und Schwefelwasserstoff zeigt deutlich, daß die Veränderung der Gebiete mit Sauerstoffdefiziten nicht immer mit den Intensitätsindizes korreliert. Auch Einstromereignisse geringer Intensität können zu einer weitreichenden Verbesserung der Sauerstoffbedingungen führen, falls die hydrologischen Verhältnisse günstig sind und das einströmende Wasser bis ins Gotlandbecken fließen kann (MATTHÄUS & LASS 1995). Abnehmende Defizitbereiche wurden auch in Zeitabschnitten festgestellt, in denen zuvor kein nennenswerter Einstrom im Tiefenwasser wie in den Jahren 1987 und 1990 oder eine Serie von Zuströmen geringer Intensität wie 1984 und 1993/94 beobachtet wurden. Die starken Zuströme in den ersten Jahren des Untersuchungszeitraumes bis in die Mitte der 70er Jahre beeinflussten das System in einem Zustand, in dem sie nicht zu einer adäquaten Verbesserung der Sauerstoffverhältnisse führen konnten, da der Salzgehalt im Tiefenwasser sehr hoch, die Dichteschichtung entsprechend stabil und die Salzgehaltssprungschicht (Halokline) sich in geringen Tiefen befand (MATTHÄUS 1995).

Bis zur Mitte der 70er Jahre schwankten Salzgehalt und Sauerstoffkonzentrationen im Tiefenwasser um einen nahezu konstanten Wert und in der seit dem Winter 1976/77 andauernden Stagnationsperiode gingen die Salz- und Sauerstoffkonzentrationen stark zurück (MATTHÄUS 1983, 1986 & 1990). In den 80er und zu Beginn der 90er Jahre wurden Teile des östlichen Gotlandbeckens bis in 100 m Tiefe und der gesamte Finnische Meerbusen wiederbesiedelt (LAINE et al. 1997) - eine Folge der sich aufgrund der instabilen Schichtung verbessernden Sauerstoffverhältnisse. Die Abnahme des Salzgehaltes in der gesamten Wassersäule wurde durch hohe Niederschläge und entsprechend hohen Einstromraten in den 80er Jahren intensiviert (BERGSTRÖM & CARLSSON 1994; DAHLSTRÖM 1994) und das Zentrum der Salzgehaltssprungschicht im östlichen Gotlandbecken verlagerte sich von 69 m Tiefe im Jahr 1977 auf 77 m Tiefe im Jahr 1987 (MATTHÄUS 1990). Die zunehmende Tiefe der Sprungschicht spiegelt sich in den mittleren Tiefen der 2 ml/l-Grenztiefen wider (Bild 5.2).

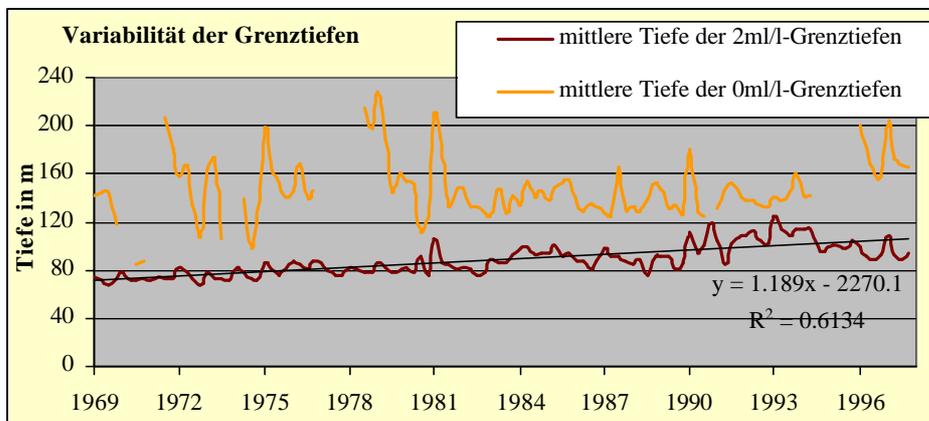


Bild 5.2: Variabilität der Grenztiefen

Die Gebiete mit Sauerstoffmangel erstrecken sich unterhalb der Halokline. Eine Tiefenzunahme der Sprungschicht äußert sich damit über die Tiefenzunahme der 2 ml/l-Grenztiefen in einer Volumenabnahme der Bereiche mit geringen Sauerstoffkonzentrationen. Eine Regressionsanalyse ergab eine Zunahme der mittleren Tiefenlage der 2 ml/l-Grenztiefen im Untersuchungszeitraum um ca. 1.2 m je Jahr. Die Tiefe der 0 ml/l-Grenztiefen zeigte keine signifikanten Veränderungen in den untersuchten 30 Jahren.

Die Einstromereignisse sind für das Sauerstoffregime des Tiefenwassers das stärkste Eingangssignal. Es kann jedoch nur noch näherungsweise von unveränderlichen Einflußgrößen ausgegangen werden. LARSSON et al. (1985) schätzen eine anthropogene Erhöhung der Stickstoffzufuhr in diesem Jahrhundert um das Vierfache und der Phosphatzufuhr um das Achtfache. Die Primärproduktion ist laut ELMGREN (1989) um 30-70% gestiegen und die Sedimentationsraten von organischem Kohlenstoff um 70-190%. Die in den tiefen Becken vorhandene

nen Sauerstoffkonzentrationen gehen aufgrund des sich in den tiefen Becken akkumulierenden organischen Materials schneller zurück als zu Beginn des 20. Jahrhunderts, so daß Stagnationserscheinungen nach einem Einstromereignis schneller wieder auftreten (HELCOM 1990; MATTHÄUS 1995).

Mit der Definition dreier ozeanographischer Zustandsklassen soll versucht werden, die unterschiedlichen Systemreaktionen des Tiefenwasserkörpers in diesen Zuständen als Selbstregulationsprozess zu deuten. Mit wachsendem Abstand zum letzten Einstromereignis und der parallel verlaufenden Abnahme der Salz- und Sauerstoffkonzentrationen entstehen durch die verminderte Schichtungsstabilität in den tiefen Becken gute Voraussetzungen für eine Wassererneuerung auch bei Zuströmen geringer Intensität. Dabei ist zu beachten, daß die Beschreibung auf einer nur 30jährigen Reihe basiert, die Anteile dreier Stagnationsperioden enthält (1969-1975, 1977-1993, 1994-1998).

5.2 Definition von Zustandsklassen im Tiefenwasser

In einer finnischen Arbeit zur Abhängigkeit langfristiger Veränderungen im Auftreten und der Zusammensetzung am Meeresboden lebender Tiere (Zoobenthos) von den herrschenden ozeanographischen Bedingungen (LAINE et al. 1997) wurden drei Zustandstypen definiert: der Zustand "**Nach einem intensiven Einstromereignis**", der Zustand der "**Frühen Stagnation**" und der Zustand der "**Späten Stagnation**" (Bild 5.3).

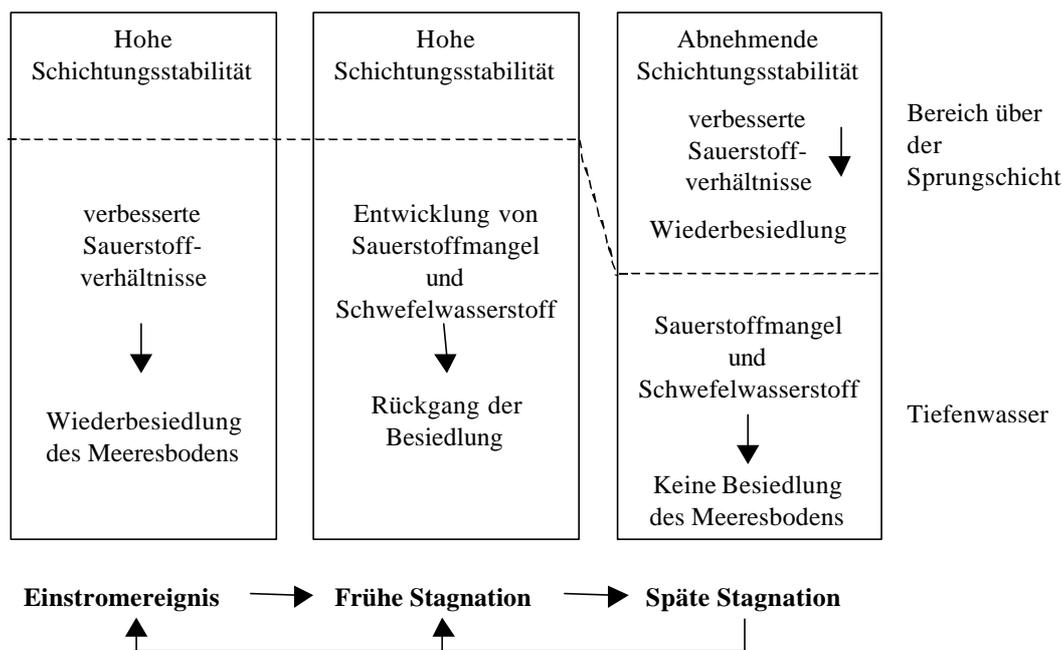


Bild 5.3: Auswirkungen von starken Einstromereignissen auf die Sauerstoffbedingungen und Entwicklung der Benthosgemeinschaften unterhalb der Salzgehaltssprungschicht (nach LAINE et al. 1997).

Infolge eines Einstromes von salz- und sauerstoffreichem Wasser wird das Tiefenwasser mit Sauerstoff versorgt und es erfolgt eine Wiederbesiedlung des Meeresbodens bis in große Tiefen. Im Verlauf des folgenden Zeitraums ohne Sauerstoffzufuhr kommt es unterhalb der Salzgehaltssprungschicht zu einer Abnahme der Sauerstoffkonzentrationen bis zur Bildung von Schwefelwasserstoff und zum Verschwinden des Zoobenthos in den tiefen Becken. Mit fortgesetzter Stagnation nimmt die Stabilität der Schichtung ab. Einströme aus der Nordsee und dem Finnischen und Bottnischen Meerbusen können in der Zwischenwasserschicht vordringen und die Bereiche in 70-100 m Tiefe mit Sauerstoff versorgen, so daß eine erneute Besiedelung möglich wird. Diese Grenzgebiete nehmen im Gotlandbecken und dem Golf von Finnland etwa 26000 km² und damit 19% der Gesamtfläche ein (LAINE et al. 1997).

Da die Umweltbedingungen durch die Verfügbarkeit von Sauerstoff gesteuert werden, wurden die drei Zustandsklassen zur Klassifizierung der Sauerstoffverhältnisse genutzt. Für die Jahre 1969 bis 1998 konnten die mittleren Volumina mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung aus den Winter-, Frühjahr-, Sommer- und Herbstwerten in ein zeitliches Schema der Volumenveränderungen eingetragen werden (Bild 5.4). Die 70er Jahre sind durch große Bereiche mit Sauerstoffdefiziten ($>2000 \text{ km}^3$) und kleine Bereiche mit Schwefelwasserstoff ($<50 \text{ km}^3$) gekennzeichnet. In den 80er Jahren nehmen, bedingt durch ein Absinken der Halokline in größere Tiefen, die Volumina mit Sauerstoffmangel ab und die Volumina mit Schwefelwasserstoffbildung dehnen sich aufgrund der 1977 anhaltenden Stagnation auf bis zu 250 km^3 aus. Zu Beginn der 90er Jahre umfassen die von Sauerstoffmangel beeinträchtigten Volumen weniger als 600 km^3 . Das Volumen mit Schwefelwasserstoffbildung sinkt nach den Salzwassereinströmen in den Jahren 1993 und 1994 auf unter 50 km^3 im Jahresdurchschnitt.

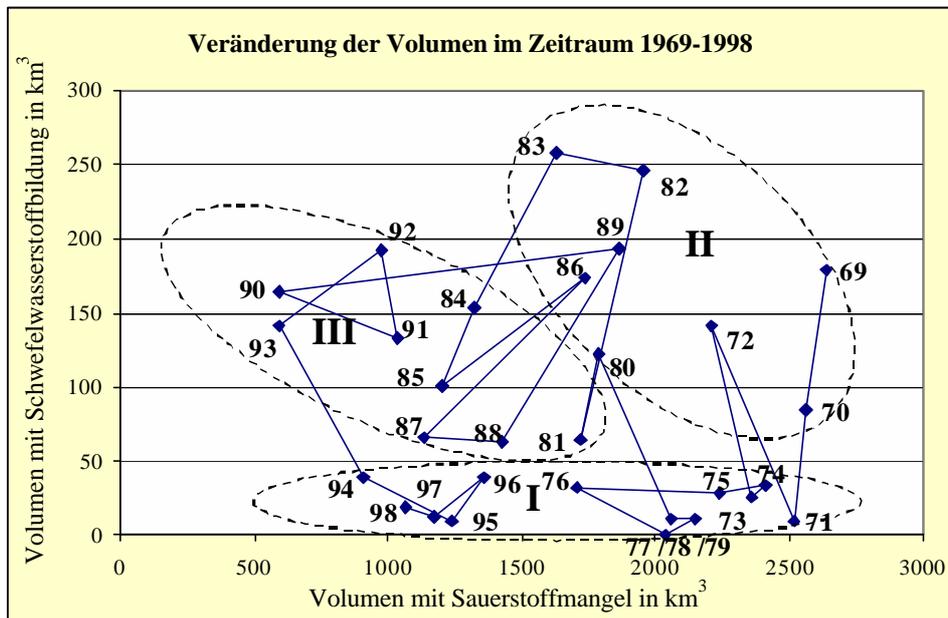


Bild 5.4: Zeitliche Veränderungen der Volumina mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung im Zeitraum 1969-1998 und Einordnung in die Zustandsklassen "Nach dem Einstromereignis" (I), "Frühe Stagnation" (II) und "Späte Stagnation" (III).

Aus den in 5.4. zusammengefaßten Veränderungen werden unter Anwendung der in 5.3. dargestellten Gedanken die folgenden Zustandsklassen des Tiefenwassers formuliert:

- Im Zustand **I** – "Nach einem Einstromereignis" – wurden die Sauerstoffverhältnisse bis in Bodennähe durch einen intensiven Salzwassereinstrom verbessert. Es sind nur kleinere Bereiche (unter 50 km^3) von Schwefelwasserstoff beeinträchtigt. Die Größe der Bereiche mit Sauerstoffmangel hängt von der Lage der Halokline ab. In den Jahren 1971 und 1973-79 tritt Sauerstoffmangel in deutlich größeren Gebieten als in den Jahren 1994-1998 auf. Die Stabilität dieses Zustandes hängt von der Menge des im Tiefenwasserkörper gelösten Sauerstoffs ab. Sind die Sauerstoffreserven in weiten Teilen des Beckens aufgebraucht, geht das System in den Zustand II über.
- Der Zustand **II** – "Frühe Stagnation" – ist dadurch gekennzeichnet, daß die Sauerstoffreserven im Tiefenwasser durch Atmung und Abbau organischer Substanzen zurückgehen und die Sauerstoffkonzentrationen in großen Gebieten unter 2 ml/l sinken. Sind auch diese Reserven aufgebraucht, bildet sich zuerst in Bodennähe in großen Teilen der Becken Schwefelwasserstoff. Im Beobachtungszeitraum wird dieser Prozeß durch ein Absinken der Halokline überlagert, so daß die Gebiete mit Sauerstoffmangel tendenziell abnehmen. Die diesem Zustand zugeordneten Jahre sind durch eine drastische Zunahme der Gebiete mit Schwefelwasserstoffbildung gekennzeichnet.

Große Gebiete mit Schwefelwasserstoffbildung wurden in den Jahren 1969/70, 1972, 1980, 1982/83, 1986 und 1989 festgestellt. Der Zustand II ist sehr instabil. Er schafft durch die ständige Aussüßung gute Voraussetzungen für ein Einstromereignis oder einen Einstrom in die Zwischenschicht, so daß die Wahrscheinlichkeit eines Übergangs in die Zustände I und III steigt.

- Charakteristisch für den Zustand **III** - "**Späte Stagnation**" – sind Verringerungen der Gebiete mit Schwefelwasserstoffbildung und relativ kleine Gebiete mit Sauerstoffmangel, in denen jedoch hohe Schwefelwasserstoffkonzentrationen auftreten können. Die Verringerung der Defizitbereiche kann Folge von Einstömen in die Zwischenschicht oder Diffusionsprozessen über die instabileren Schichtungsverhältnisse sein. Dem Zustand III werden die Jahre 1981, 1984/85, 1987/88 und 1990-93 des Beobachtungszeitraumes zugeordnet. Der Zustand III verbessert die Voraussetzungen für ein Einstromereignis, mit fortschreitenden Aussüßungserscheinungen wird ein Übergang in den Zustand II auch bei fehlenden Einstömen immer unwahrscheinlicher.



Bild 5.5: Darstellung der räumlichen Ausprägungen der Zustandsklassen "Nach dem Einstromereignis" (I), der "Frühen Stagnation" (II) und "Späten Stagnation" (III) anhand von Beispielkarten

In Bild 5.5 werden Beispielkarten und nähere Charakteristiken zur Ausdehnung der Bereiche mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoff gegeben. Aufgrund der unterschiedlichen Bedingungen nach den Einstromereignissen in den 70er und 90er Jahren erfolgt die Auswertung der Volumenverhältnisse und Grenzsichttiefen hier getrennt (Ia und Ib).

Das **Einstromereignis im Januar 1993** und kleinere Einströme in den Jahren 1993 und 1994 führten zu einer vollständigen Wassererneuerung in den tiefen Becken. In den Becken der zentralen Ostsee wurde im Sommer und Herbst 1994 kein Schwefelwasserstoff festgestellt, in den folgenden Jahren trat Schwefelwasserstoff vereinzelt in den tiefen Becken auf. Sauerstoffmangelgebiete beschränkten sich auf Gebiete mit Tiefen über 100 m. Die **Einstromereignisse in den 70er Jahren** zeigten, trotzdem größere Mengen salzreichen Nordseewassers in die Ostsee gelangten, geringere Auswirkungen. In den Jahren 1977 bis zum Frühjahr 1978 war die Ostsee frei von Schwefelwasserstoff und auch in den anderen Jahren traten anoxische Bedingungen nur in kleinen zentral liegenden Gebieten auf. Geringe Sauerstoffkonzentrationen waren ab 80 m Tiefe in deutlich größeren Gebieten anzutreffen.

Die Bereiche mit Sauerstoffmangel nehmen parallel zur zunehmenden mittleren Tiefe der 2 ml/l-Grenztiefen, ausgehend von den sehr hohen Werten in den 70er Jahren bis zur Phase der späten Stagnation Anfang der 90er Jahre ab (Bild 5.6). Die Grenztiefen zwischen dem Wasserkörper mit ausreichenden Sauerstoffkonzentrationen und dem Wasserkörper mit Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l verlagern sich beim Übergang vom Zustand II in III aufgrund der verbesserten Sauerstoffversorgung der Zwischenschicht um mittlere 18 m in Richtung Meeresboden. Dies bewirkt eine Abnahme der Sauerstoffdefizitgebiete um 20000 km² und 940 km³. Die Bereiche mit Schwefelwasserstoffbildung verkleinern sich um 2300 km² und 50 km³. Die 0 ml/l-Grenztiefen reichen in Phase II bis in 132 m Tiefe, beim Übergang zu I oder III sind sie erst in mittleren Tiefen von 162 m bzw. 144 m Tiefe anzutreffen.

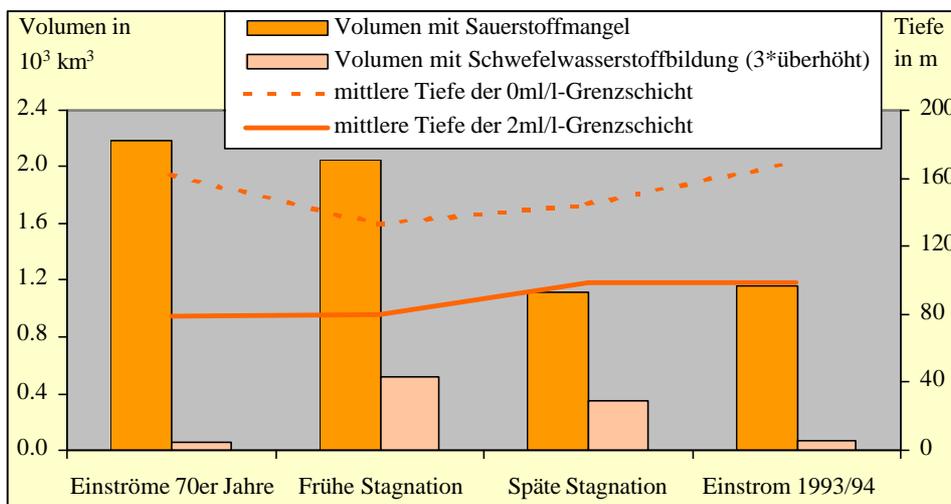


Bild 5.6: Eigenschaften der Zustandsklassen Ia und Ib (Einströme in 90er und 70er Jahren), II ("Frühe Stagnation") und III ("Späte Stagnation").

5.3 Zusammenfassende Darstellung der Veränderungen in der Zeit

In jedem der dokumentierten Jahre befindet sich das System in einem der drei Zustandsklassen und die folgende Entwicklung hängt von den in diesem Jahr herrschenden Bedingungen ab. Die zeitliche Variabilität kann damit als eine Aufeinanderfolge von Zuständen betrachtet und jeder Zustand als Ergebnis vorhergehender Prozesse aufgefaßt werden (AURADA 1988). Das mathematische Modell der **Markov-Prozesse** beschreibt Übergänge zwischen mehreren Zuständen Z_i , wenn der gegenwärtig beobachtete Zustand vom Zustand im vorhergehenden Zeitschritt abhängig ist. Diese auch als Markov-Eigenschaft bezeichnete Bedingung stellt eine Idealisierung dar, die es erlaubt, einen Prozeß mit nur wenigen Bestimmungsgrößen zu

definieren. Prozesse in der Natur lassen sich dann als Markov'sche Prozesse beschreiben, wenn der Einfluß von der Vorgeschichte fast vollständig verschwindet und die gesamte für die Zukunft relevante Information in der Gegenwart enthalten ist (HONERKAMP 1990, S.68). Ein Modell, in dem eine größere Anzahl von Zuständen der Vergangenheit in die Vorhersage einfließen würde, erscheint aufgrund der Kürze der Zeitreihe (30 Jahre) und der begrenzten Zahl an Zustandswechseln nicht sinnvoll.

Zur Vorhersage des Systemwechsels zwischen zwei Zuständen werden *Übergangswahrscheinlichkeiten* p_{ij} berechnet, die aus der Beobachtungsreihe schätzen, mit welcher Wahrscheinlichkeit das System vom Zustand i in den Zustand j wechselt:

$$p_{ij} = P(Z_t=i, Z_{t+1}=j) \tag{5.1}$$

Zur Abschätzung der Stabilität der verschiedenen Zustände ist es interessant, *Verweilzeiten* L_i für die verschiedenen Zustände zu kennen : Wie lange verharrt das System in den Zuständen Z_i ?

$$P(L_i=n) = P(Z_{m+t} = i \text{ für } 0 \leq t \leq n-1, Z_{m+n} \neq i, Z_{m-1} \neq i) \tag{5.2}$$

Für Markovketten folgt diese Problemstellung einer geometrischen Verteilung mit dem Erwartungswert

$$E(L_i) = 1/(1-p_{ii}) \tag{5.3}$$

Dabei entspricht n einer Verweilzeit und p_{ii} ist die Übergangswahrscheinlichkeit von Zustand i zum Zustand i (SPEKAT et al. 1983).

In den 30 beobachteten Jahren befand sich die Ostsee dreizehnmal im Zustand "Nach einem Einstromereignis", achtmal im Zustand der "Frühen Stagnation" und neunmal im Zustand der "Späten Stagnation" (Tabelle 5.1). Die Übergangswahrscheinlichkeiten p_{ij} wurden aus den Häufigkeiten des Übergangs n_{ij} und der Häufigkeit des Auftretens der Zustände n_i geschätzt. Gezählt wurde nur die Häufigkeit, in der ein Zustand i verlassen wurde, so daß der Zustand des letzten Jahres der Untersuchungsperiode nicht in der Häufigkeitsauszählung auftaucht. Die Schätzung der Übergangswahrscheinlichkeit erfolgte nach der Methode der Maximum-Likelihood-Schätzung (STORCH & ZWIERS 1997).

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad \text{für } n_i > 0 \text{ und} \tag{5.4}$$

$$n_i = \sum_{j=1}^m n_{ij} \quad \text{für } m \text{ Zustände.} \tag{5.5}$$

Zustände i \ j	Häufigkeiten der Zustände und Übergänge				Übergangswahrscheinlichkeiten p_{ij} von i nach j			Verweildauer L_i (in Jahren)
	I	II	III	S	I	II	III	
I	10	2	0	12	0.833	0.167	0	6
II	2	2	4	8	0.25	0.25	0.5	1.33
III	1	3	6	9	0.111	0.333	0.556	2.25

Tabelle 5.1: Häufigkeiten, Übergangswahrscheinlichkeiten und mittlere Verweildauern der Zustände I ("Nach dem Einstromereignis"), II ("Frühe Stagnation") und III ("Späte Stagnation").

Die Übergangswahrscheinlichkeiten weichen auffällig von den Wahrscheinlichkeiten eines unregelmäßigen Übergangs ab (0.333), so daß die Anwendung eines Markov-Modells sinnvoll erscheint. Die mittleren Verweildauern geben Auskunft über die Stabilität der Zustände und wurden aus den Hauptdiagonalelementen der Übergangsmatrix nach (5.3) berechnet.

Tabelle 5.1. zeigt eine auffällige Persistenz des Systems in den Zuständen I und III, während der Zustand II eine große Entwicklungsneigung zu den Zuständen III und I aufweist. Ein häufiger Wechsel zwischen den Zuständen II und III ist für die ersten Jahre einer Stagnationsperiode typisch, in der Zuströme in die Zwischenschicht einen Zustandswechsel von II zu III bedingen. In den 80er Jahren sanken bei ausbleibenden Zuströmen und einer relativ stabilen Sprungschicht die Sauerstoffkonzentrationen der Zwischenschicht wieder unter 2 ml/l und das System wechselte vom Zustand III zum Zustand II. Bei weiterer Ausdünnung der Sprungschicht nimmt die Stabilität des Zustandes III zu und ein Wechsel in den Zustand der frühen Stagnation wird immer unwahrscheinlicher. Diese Entwicklung läßt sich als Markov-Prozeß nicht darstellen, bewirkt jedoch die relativ hohe Verweildauer im Zustand III. Die unterschiedlichen Stabilitäten in den Zuständen spiegeln sich auch in den Verweildauern wieder. Die höchste Verweildauer weist Zustand I auf, gefolgt von den Zuständen II und III. Ein Wechsel vom Zustand I in den Zustand III wurde nicht beobachtet und auch der Definition der späten Stagnation widersprechen. Die möglichen Systemreaktionen sind zusammen mit den Verweildauern und Übergangswahrscheinlichkeiten in Bild 5.7. dargestellt.

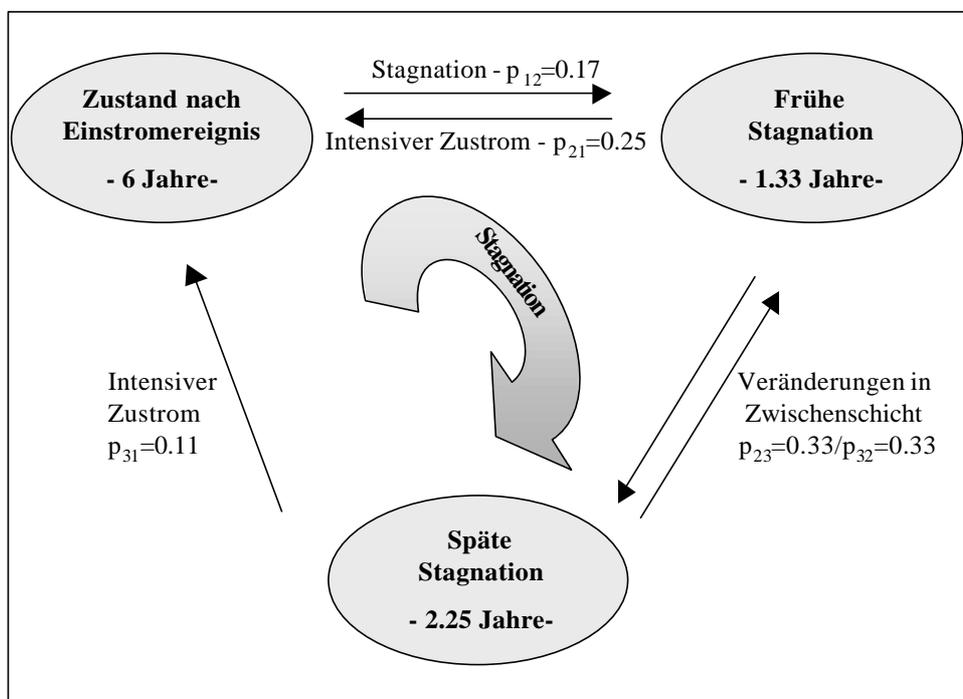


Bild 5.7: Gründe für Systementwicklungen zwischen den Zuständen nach einem Einstromereignis und während der Stagnation.

Die Umweltbedingungen im Tiefenwasser beeinflussen die Auswirkungen und Reichweite des einströmenden Wassers. Sehr starke Einstromereignisse verstärken die Stabilität der Schichtung und isolieren damit das Wasser unterhalb der Sprungschicht, so daß weitere Einstromereignisse geringere Auswirkungen zeigen (70er Jahre), während weniger intensive Ereignisse zu einer Wassererneuerung in den flacheren Becken (Arkona- und Bornholmbecken) führen und gute Voraussetzungen dafür schaffen, daß das einströmende Wasser weiterer Einstromereignisse in die zentralen Becken fließen kann (1993/94). Während der Stagnationsperiode verbessern sich infolge der Ausdünnung der Sprungschicht die Bedingungen für eine Wasserumwälzung in den Becken, die dann als Folge auch kleinerer Einstromereignisse erfolgen kann. Die dargestellten Prozesse der Selbstregulation (Bild 5.7) spiegeln sich in der zonalen Variabilität der Bereiche mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung wider (AURADA 1988, 1992, 1993, 1997, 1998), werden aber teilweise durch die anthropogen verursachten Nährstoffeinträge überlagert.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Ausgangspunkt dieser Arbeit waren Aussagen zu sich in den letzten Jahren mehrenden Beobachtungen von Sauerstoffmangel, in denen die Sauerstoffkonzentrationen unter 2 ml/l sinken, und zunehmend auch von Schwefelwasserstoff (H_2S) in den tiefen Becken der zentralen Ostsee (GERLACH 1994). Diese Mangelgebiete wurden in Karten (NEHRING et al. 1971-1995; MATTHÄUS et al. 1997 & 1998; ANDERSIN & SANDLER 1988) festgehalten. Es fehlte jedoch eine einheitliche Methodik zur Kartendarstellung, die eine zusammenfassende und vergleichende Darstellung der Sauerstoffbedingungen im Tiefenwasser der Zentralen Ostsee und eine Abschätzung der Berechnungsgenauigkeiten erlaubt.

Im Tiefenwasser der zentralen Ostsee entstehen Mangelsituationen, wenn mehr Sauerstoff verbraucht wird als nachgeliefert werden kann. Die Nährstoffeinträge vervielfachten sich in den letzten Jahren und führten über die Eutrophierung zu einem erhöhten Algenwachstum in den oberen lichtdurchfluteten Wasserschichten. Das herabsinkende organische Material wird unter Sauerstoffverbrauch abgebaut, bis die Sauerstoffreserven im Tiefenwasser erschöpft sind. Dann wird das im Meerwasser vorhandene Sulfat von sulfatreduzierenden Bakterien zu Schwefelwasserstoff reduziert. Die ganzjährig bestehende Schichtung verhindert weitgehend einen Austausch zwischen dem ausreichend mit Sauerstoff versorgtem, salzarmen Oberwasser und dem schwereren, salzreichen und sauerstoffarmen Tiefenwasser. In die tiefen Becken um die Insel Gotland kann nur dann Sauerstoff gelangen, wenn während sogenannter Salzwassereinbrüche große Mengen salz- und sauerstoffreicher Wassermassen aus dem Kattegat in die tiefen Becken einströmen.

Ziel dieser Arbeit war es, die räumliche und zeitliche Variabilität der Bereiche mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung in den Jahren 1969 bis 1998 zu beschreiben (I), räumliche Verteilungsmuster in den Sedimenten zu finden, die durch das wechselnde Sauerstoffregime geprägt wurden (II) und die verschiedenen Sauerstoffzustände zu klassifizieren (III). Problemstellung und Lösungsschritte werden in Bild 6.1 zusammenfassend dargestellt. Das Problem ist vierdimensional, da die Sauerstoffbedingungen sich in der Ostsee sowohl in der Fläche (in Längen- und Breitenrichtung), mit zunehmender Tiefe und in der Zeit verändern. Die zeitlichen Veränderungen innerhalb dreier Monate wurden zusammengefaßt, so daß die berechneten Karten die mittlere Ausdehnung der Bereiche mit geringen Sauerstoffkonzentrationen innerhalb der Winter-, Frühjahr-, Sommer- und Herbstmonate aller zu untersuchender Jahre beschreiben. Veränderungen in kleineren Zeitskalen wurden weitgehend vernachlässigt und gehen nur in den geostatistischen Teil der Arbeit als Fehlergröße ein.

Die Modellbildung zur Aufgabe I im Kapitel 3 basiert auf der Feststellung, daß die Sauerstoffkonzentrationen in den tieferen Wasserschichten mit wachsender Tiefe nach einem bestimmten Muster abnehmen. Eine Logistische Funktion schien die wechselnden Gradienten der abnehmenden Sauerstoffkonzentrationen gut zu beschreiben: nahezu konstante Werte in der Oberwasserschicht, schnell abnehmende Konzentrationen im Bereich der Sprungschicht und langsam weiter sinkende Werte im Tiefenwasser. Sanken die Sauerstoffkonzentrationen in den tiefen Becken unter 2 ml/l oder 0 ml/l, so konnten die Tiefen ermittelt werden, an denen diese Konzentrationen erstmals auftreten und unterhalb derer weiter abnehmen.

Die Berechnung dieser Grenztiefen erfolgte entlang der Beprobungsrouten aus den Probe-reihen punktuell an den Meßpunkten. Ihre flächenhafte Darstellung basiert auf Methoden der Geostatistik, in der Eigenschaften der unregelmäßig im Raum verteilten Grenztiefen untersucht und zur Schätzung ihrer Werte an nichtbeprobten (unbekannten) Punkten herangezogen wurden. Auch die Meßpunkte mit ausreichender Sauerstoffversorgung in Bodennähe gingen als Randwerte, die außerhalb der Defizitgebiete liegen, in die Untersuchungen ein. Ergebnis dieses ersten Arbeitsschrittes sind 118 Karten zur Darstellung der mittleren räumlichen Ausdehnung der Gebiete mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung je-

weils dreier Monate. Aus diesen Karten konnten Flächen- und Volumina der Defizitgebiete berechnet werden.

Die 118 Karten der Winter-, Frühjahr-, Sommer- und Herbstverhältnisse der Jahre 1969-1998 ergeben ein räumliches Bild der variierenden Häufigkeit des Auftretens von Mangelsituationen. Auf allen Gitterpunkten der digitalen Karten wurde ausgezählt, wie häufig Sauerstoffmangel oder Schwefelwasserstoffbildung im Meerwasser auftrat. Diese so entstandenen zwei Häufigkeitskarten beschreiben jetzt, an welchen Punkten mit hoher Wahrscheinlichkeit mit Sauerstoffmangel oder Schwefelwasserstoffbildung gerechnet werden muß.

Eine Aufgabe der Geographie besteht darin, "heutige Strukturen aus Vorgängen der Vergangenheit und heutige Vorgänge aus den derzeit vorhandenen Strukturen zu erklären" (SCHMITHÜSEN 1976, S. 159). Das häufige Auftreten von Sauerstoffmangel manifestiert sich in räumlichen Strukturen, deren Verbreitung mit den Häufigkeitskarten verglichen wurden (**II**).

Laminierte Sedimente entstehen, wenn am Meeresboden siedelnde Organismen aufgrund geringer Sauerstoffkonzentrationen abwandern oder absterben. Die jahreszeitlich variierenden Sedimente können sich dann in einer Feinschichtung ungestört ablagern, ohne das Organismen diese Schichtung wieder zerstören. Das von JONSSON et al. (1990) dargestellte Auftreten laminiertes Sedimente in der Ostsee stimmt mit den Gebieten überein, in denen häufig Sauerstoffmangel auftritt.

Die Klassifizierung des Sauerstoffregimes und ihrer zeitlicher Veränderungen (**III**) basiert auf drei zur Beschreibung der in Bodennähe lebenden Tiere (LAINE et al. 1997) entwickelten Zustandsklassen der Umweltbedingungen. Die durch die berechneten Ausdehnungen der Bereiche mit Sauerstoffmangel und Schwefelwasserstoffbildung gekennzeichneten 30 untersuchten Jahre konnten in die Zustandsklassen "Nach dem Einstromereignis", der "Frühen Stagnation" und "Späten Stagnation" eingeordnet werden. Wechsel zwischen den Zustandsklassen sind an Einstromereignisse in die unterschiedlichen Wasserschichten und Stagnationserscheinungen im Wasserkörper gebunden. Ihre Häufigkeit und die Stabilität der Zustände konnte durch Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den Zuständen und Verweildauern in den Zuständen beschrieben werden.

Auf die Festlegung von festen Zeitschnitten kann bei Nutzung dreidimensionaler Verfahren zur Schätzung von Flächenveränderungen in der Zeit verzichtet werden. Die gleichzeitige Betrachtung aller Daten würde die Darstellung der mittleren Sauerstoffverhältnisse innerhalb beliebiger Zeitskalen (Jahre, Stagnations- und Einstromperioden) und die Wahl von Zeitskalen in Abhängigkeit von der Datenlage und der Dauer der ablaufenden Veränderungen ermöglichen und das bestehende Modell verbessern.

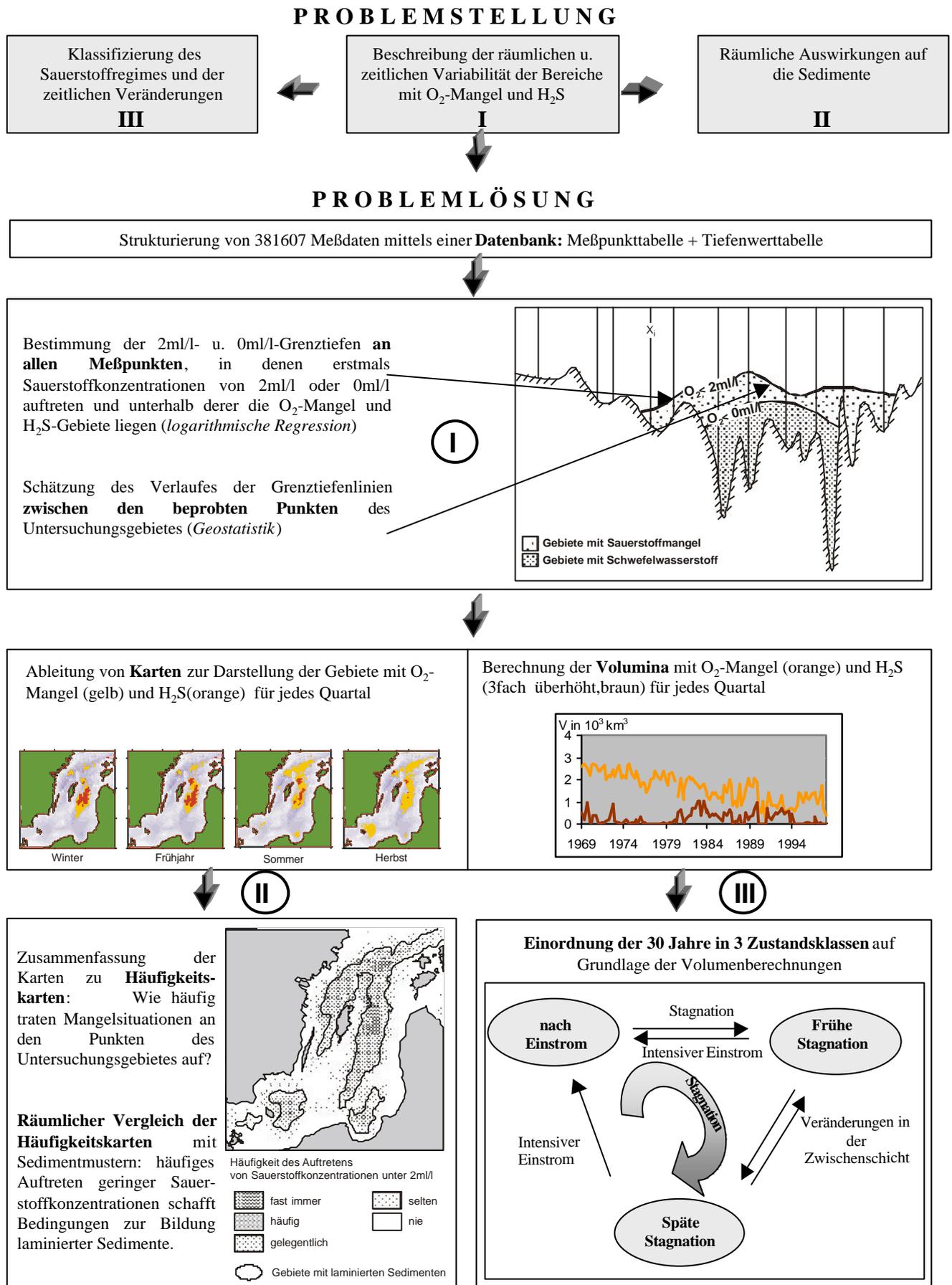


Bild 6.1: Zusammenfassende Darstellung der Untersuchungsziele und -schritte.

7 LITERATUR

- AKIN, H. & SIEMENS, H. (1988): *Praktische Geostatistik – eine Einführung für den Bergbau und die Geowissenschaften.* – Springer- Verlag Berlin u.a., 304 S..
- ANDERSIN, A.-B., LASSIG, J., PARKKONEN, L. & SANDLER, H. (1978): The decline of macrofauna in the deeper parts of the Baltic proper and in the Gulf of Finland. – *Kieler Meeresforschungen* 4: 23-52.
- ANDERSIN, A.-B. & SANDLER, H. (1988): Occurance of hydrogen sulphide and low oxygen concentrations in the Baltic deep basins. – CBO 16th conference of the Baltic oceanographers Kiel, *Proceedings Vol. 1:* 102-111.
- ANDERSIN, A.-B. & SANDLER, H. (1991): Macrobenthic fauna and oxygen deficiency in the Gulf of Finland. – *Memoranda Soc. Fauna Flora Fennica* 67 (3): 3-10.
- ANDREJEV, O. & SOKOLOV, A. (1989): Numerical modelling of water dynamics and passive pollutant transport in the Neva inlet. - *Meteorologia i hydrologia* 12: 78-85 (russisch).
- AURADA, K.D. (1988): Raum- und Zeitphänomene im Ostseeraum. – *Petermanns Geographische Mitteilungen* 132 (1): 1-14.
- AURADA, K.D. (1992): Prolegemenon einer Öko-Logistik Angewandter Geographie. - *Petermanns Geographische Mitteilungen* 136 (2-3): 81-91.
- AURADA, K.D. (1993): Logik und Logistik der Naturwissenschaftlichen Geographie. – *Klagenfurter Geographische Schriften* 11: 63-79.
- AURADA, K.D. (1997): Evolvierendes und respondierendes Geosystem: Ostseeraum.- *Petermanns Geographische Mitteilungen* 141 (5-6): 307-321.
- AURADA, K.D. (1998): Komplementäres Geosystem Ostsee. – *Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd.* 112: 1-27.
- BELIAEFF, B., COCHARD, M.-L. (1995): Applying geostatistics to identification of spatial patterns of fecal contamination in a mussel farming area (Havre de la vanlee, France). – *Water Resources* 26 (6): 1541-1548.
- BERGSTRÖM, S. & CARLSSON, B. (1994): Hydrology of the Baltic basins. Inflow of fresh water from rivers and land for the period 1950-1990. - *SMHI Rep. Hydrol.* 7: 1-21.
- BERNER, M., MÜLLER, H., NEHRING, D. & SCHULZ, S. (1988): Zum Einfluß von Umwelt- und Bestandsparametern auf die Rekrutierung des Dorschbestandes östlich von Bornholm. – *Fischerei-Forschung*, 26 (2): 37-43.
- BERNER, M., MÜLLER, H. & NEHRING, D. (1989): The influence of environmental and stock parameters on the recruitment of cod stocks to the east and west of Bornholm, described by regression equations. – *Rapp. P.-v. Reun. Cons.inr. Explor.Mer* 190: 142-146.
- BLAGGE, O., THUROW, F., STEFFENSEN, E. & BAY, J. (1994): The Baltic cod. – *Dana* 10: 1-28.
- BODUNGEN, V.B. (1999): How to do a system-wide analysis in a regional sea? – EU Advanced Study Course "Marine System Analysis". International Academy for Nature Conservation, Island of Vilm.
- BURGER, H., PAWLOWSKY-GLAHN, V. & SCHAFMEISTER, M.-TH. (1999): Grundbegriffe der Geostatistik. Eine Einführung in die geostatistische Modellierung im Rahmen des Weiterbildenden Studiums Mathematische Methoden und Modelle in den Geowissenschaften. – FU Berlin, FR Geoinformatik, 61S..

- CARLSSON, B. & SANNER, H. (1990): Influence of river regulation on runoff to the Gulf of Bothnia. - SMHI Reports Hydrology 9, 30 S..
- CEDERWALL, H. & ELMGREN, R., (1980): Biomass increase of benthic macrofauna demonstrates eutrophication of the Baltic Sea. - *Ophelia*, Suppl. 1: 287-304.
- CLARK, I. (1979): Practical Geostatistics. - Applied Science Publishers London, 129 S..
- DAHLSTRÖM, B. (1994): Short term fluctuations of temperature and precipitation in Western Europe. - HEINO, R. (Hrsg.): Climate variations in Europe. Publications of Academy of Finland 3 (94): 30-38.
- DAVIDIAN, I.N., AITSAM, A.M., ANDREJEV, O.A., ANDRUSHAITIS, G.P., ANTONOV, A.E., JANKOVSKY, H.I., JÄRVEKULG, A., KALEIS, M.V., LÄÄNE, A.A., PUNNING, J.-M., SAVCHUK, O.P. & USANOV, B.P. (1990): Main results of the USSR National Project "Baltica". - XVII Conference of the Baltic Oceanographers. Norrköping, Sweden.
- DAVIDIAN, I.N., AITSAM, A.M., SAVCHUK, O.P. & SUSTAVOV, Y.V. (1983): National project "Baltica" - some preliminary results of investigations. - Ecological Investigations of Baltic Sea Environment. Riga: 255-264.
- DEUTSCH, C.V. & JOURNAL, A.G. (1998): GSLIB, Geostatistical Software Library and User's Guide. - Oxford University Press New York u.a., 361 S..
- DIAMOND, P. & ARMSTRONG, M. (1984): Robustness of Variograms and Conditioning of Kriging Matrices. - *Mathematical Geology*, 16 (8): 809-822.
- DIETRICH, G. & KÖSTER, R. (1974): Bodengestalt und Bodenbedeckung. - MAAGARD, L. & RHEINHEIMER, G. (Hrsg.): Meereskunde der Ostsee: 33-42.
- EKMAN, M. (1988): The impact of geodynamic phenomena on systems for height and gravity. - National land survey, Professional papers, Gävle 26: 1-59.
- ELMGREN, R. (1984): Trophic dynamics in the enclosed, brackish Baltic Sea. - *Rapp. P.-v.-Reun. Cons. Int. Explor. Mer.* 183: 152-169.
- ELMGREN, R. (1989): Man's impact on the ecosystem of the Baltic Sea: energy flows today and at the turn of the century. - *Ambio* 18: 326-332.
- EHRHARDT, M., WENCK, A. (1984): Wind pattern and hydrogen sulphide in shallow waters of the Western Baltic Sea, a cause and effect relationship? - *Meeresforschung* 30: 101-110.
- EMEL'YANOV, E.M. (1988): Biogenic Sedimentation in the Baltic Sea and its consequences. - WINTERHALTER, B. (Hrsg.): The Baltic Sea. Geological Survey of Finland. Special Paper 6: 127-135.
- ENGLUND, E. & SPARKS, A. (1991): Geo-Eas 1.2.1.: geostatistical environmental assessment software; user's Guide. - Las Vegas EPA Environmental Monitoring Systems Laboratory, 130 S..
- FAO (1952-1993): FAO yearbooks fertilizer. - FAO Statistic Series 1952-1993.
- FRANK, H., MATTHÄUS, W. & SAMMLER, R. (1987): Major inflows of saline waters into the Baltic Sea during the present century. - *Gerlands Beitr. Geophysik.*, 96(6): 517-531.
- GAMBOLATI, G. & GALEATI, G. (1990): Optimal Bathymetry of Tyrrhenian Sea by stochastic Interpolation. - *Water resources Bulletin* 26 (4): 677-685.
- GERLACH, S.A. (1988a): Stirbt die Ostsee? Schadstoffe und Nährstoffe in der Ostsee und die Veränderungen der Lebensbedingungen in den letzten vierzig Jahren, Teil I. - *Wasser und Boden* 8: 406—410.

- GERLACH, S.A. (1988b): Stirbt die Ostsee? Schadstoffe und Nährstoffe in der Ostsee und die Veränderungen der Lebensbedingungen in den letzten vierzig Jahren, Teil II. – Wasser und Boden 11: 639–644.
- GERLACH, S.A. (1994): Marine Systeme. Spezielle Ökologie. – Springer-Verlag Berlin u.a., 226 S..
- GERLACH, S.A. (1996): Ökologische Veränderungen in der Kieler Bucht. – LOZAN, J.L., LAMPE, R., MATTHÄUS, W., RACHOR, E., RUMOHR, H. & WESTERNHAGEN, H.V. (Hrsg.): Warnsignale aus der Ostsee: 259-265.
- GLASBY, G.P., EMELYANOV, P.M., ZHAMOIDA, V.A., BATURIN, G.N., LEIPE, T., BAHLO, R. & BONACKER, P. (1997): Environment of ferromanganese concretions in the Baltic Sea: a critical review. – NICHOLSON, K., HEIN, J.R., BÜHN, B. & DASGUPTA, S. (Hrsg.): Manganese Mineralisation: Geochemistry and Mineralogy of terrestrial and marine deposits. - Geological Society Special Publication 119: 213-237.
- GOOVAERTS, P. (1997): Geostatistics for Natural Resources Evaluation. - JOURNAL, A.G. (Hrsg.): Applied Geostatistics Series, Oxford University Press New York u.a., 483 S..
- GRASSHOFF, K. (1966): General conclusions of the intercalibration measurements. Report on intercalibration measurements. – UNESCO Techn. Papers in Marine Science 9: 111-114.
- GUSTAFSSON, B.G. (2000): Time-Dependent Modeling of the Baltic entrance area. Part 2: Water and salt exchange of the Baltic Sea Estuaries. – Estuaries 23 (2) 4: 253-266.
- HÅKANSON, L. & JANSSON, M. (1983): Principles of Lake sedimentology. - Springer-Verlag Berlin, 316 S..
- HAKE, G. & GRÜNREICH, D. (1994): Kartographie.- Walter de Gruyter Verlag Berlin, 599 S..
- HAUHS, M., LANGE, H. & KASTNER-MARESCH, A. (2000): Die Modellierung ökologischer Systeme – wissenschaftliche Computerspiele oder theoretische Alchemie? – Petermanns Geographische Mitteilungen 144 (2): 52-57.
- HEINRICH, U. (1992): Zur Methodik der räumlichen Interpolation mit geostatistischen Verfahren. – Dt. Univ. Verlag Wiesbaden, 126 S..
- HEINRICH, U. (1994): Flächenschätzung mit geostatistischen Verfahren - Variogrammanalyse und Kriging. - SCHROEDER, S., VETTER, L. & FRÄNZLE, O. (Hrsg.): Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie: 145-164.
- HEINRICH, U. (1994a): Variogrammanalytische Überprüfung flächenbezogener Meßnetze und Kriging-Interpolation. - SCHROEDER, S., VETTER, L. & FRÄNZLE, O. (Hrsg.): Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie.: 283-296.
- HELCOM (1990): Second periodic assessment of the state of the marine environment of the Baltic Sea, 1984-1988; General conclusions. - Baltic Sea Environ. Proc. 35 A: 1-32.
- HELCOM (1991): Airborne pollution load to the Baltic Sea 1986-1990. – Baltic Sea Environ. Proc. 45.
- HELCOM (1993): The Baltic Sea joint comprehensive environmental action programme. - Baltic Sea Environ. Proc. 48.
- HELCOM (1996):): Third periodic assessment of the state of the marine environment of the Baltic Sea, 1989-1993 - Background document. Baltic Sea Environ. Proc. 64 A.
- HELCOM (1997): Airborne pollution load to the Baltic Sea 1991-1995. - Baltic Sea Environ. Proc. 70.

- HONERKAMP, J. (1990): Stochastische dynamische Systeme. Konzepte, numerische Methoden, Datenanalysen. – VCA Verlagsgesellschaft mbH Weinheim, 340 S..
- HORSTMANN, U. (1996): Der Einfluß der Landwirtschaft auf die Eutrophierung. - LOZAN, J.L., LAMPE, R., MATTHÄUS, W., RACHOR, E., RUMOHR, H. & WESTERHAGEN, H.V. (1996) (Hrsg.): Warnsignale aus der Ostsee. Wissenschaftliche Fakten : 80-82.
- HUPFER, P. (1984): Die Ostsee - kleines Meer mit großen Problemen . – Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig, 152 S..
- IGNATIUS, I. (1958): On the sedimentation in the Baltic Sea. – Bulletin de la Commission geologique de Finlande 180: 135-145.
- ISSAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. (1988): Spatial continuity measures for probabilistic and deterministic geostatistics. – Mathematical Geology 20 (4): 313-341.
- ISSAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. (1989): Applied Geostatistics. – Oxford University Press New York u.a. , 561 S..
- JACOBS, H. (1999): Koordinatentransformation im www. - <http://ipfr.bau-verm.uni-karlsruhe.de/Ipfbinary/trafo.tcl>.
- JANKE, W. (1996): Eustasie und Isostasie und ihre Auswirkungen auf den Meeresspiegel. - LOZAN, J.L., LAMPE, R., MATTHÄUS, W., RACHOR, E., RUMOHR, H. & WESTERHAGEN, H.V. (1996) (Hrsg.): Warnsignale aus der Ostsee. Wissenschaftliche Fakten : 24-29.
- JONSSON, P. (1992): Large scale changes of contaminants in Baltic Sea sediments during the twentieth century. - Doctoral thesis, Uppsala University, 227 S..
- JONSSON, P., CARMAN, R. & WULFF, F. (1990): Laminated sediments in the Baltic – a tool for evaluating nutrient mass balances. – Ambio 19 (3): 152-158.
- JOURNAL, A.G. (1989): Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons. Short Course in Geology. - Vol. 8, Washington D.C., 40 S..
- JOURNAL, A.G. & HUIJBRIGTS, CH. (1978): Mining Geostatistics. – Academic Press London, 600 S..
- JOURNAL, A.G. & ROSSI, M. (1989): When do we need a trend model in kriging? - Mathematical Geology 21 (7): 715-739.
- KOFLER, M. (1995): Mathematica: Einführung und Leitfaden für den Praktiker, 2. Auflage zu Version 2.2, MathLink und MathSource. – Addison Wesley Publishing Company Bonn u.a., 523 S..
- KOOP, K., BOYNTON, W.R., WULFF, F. & CARMAN, R. (1990): Sediment-water oxygen and nutrient exchanges along a depth gradient in the Baltic Sea. – Marine Ecology Progress Series, Vol. 63: 65-77.
- KÖSTER, R. (1995): Die Entstehung der Ostsee. – RHEINHEIMER, G. (Hrsg.): Meerskunde der Ostsee: 12-16.
- KRIGE, D.G. (1951): A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. - Journal of the Chemical Metallurgical Mineralogical Society South Africa, 52(6): 119-139.
- KRIGE, D.G. (1952): A statistical analysis of some of the borehole values in the Orange Free State Goldfield. – J. Chem. Metall. Min. Soc. South Africa 53: 47-70.
- KRIGE, D.G. (1981): Lognormal- the Wiener Geostatistics for ore evaluation (Geostatistics 1). – Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy: 1-51.

- KULLENBERG, G. & JACOBSEN, T.S. (1981): The Baltic Sea: an outline of its physical oceanography. – *Mar. Poll. Bull.* 12: 183-186.
- LAINE, A.O., SANDLER, H., NENDERSIN, A.-B. & STIGZELIUS, J. (1997): Long-term changes of macrozoobenthos in the Eastern Gotland Basin and the Gulf of Finland (Baltic Sea) in relation to the hydrological regime. – *Journal of Sea Research* 38: 135-159.
- LARSSON, U., ELMGREN, R. & WULFF, F. (1985): Eutrophication and the Baltic Sea: causes and consequences. – *Ambio* 14: 9-14.
- LOZAN, J.L., LAMPE, R., MATTHÄUS, W., RACHOR, E., RUMOHR, H. & WESTERHAGEN, H.V. (1996) (Hrsg.): Warnsignale aus der Ostsee. Wissenschaftliche Fakten. – Parey Buchverlag Berlin, 385 S..
- MAAGARD, L. & RHEINHEIMER, G. (Hrsg.): Meereskunde der Ostsee. – Springer-Verlag Berlin u.a., 269 S..
- MATHERON, G. (1963): Principles of geostatistics. – *Economic Geology* 58: 1246-1266.
- MATHERON, G. (1971): The Theory of Regionalized Variables and its Application. – *Les Cahier du Centre de Morphologie Mathematique de Fontainebleau* 5.
- MATTHÄUS, W. (1976): Mittlere jährliche und langzeitige Veränderlichkeit der Temperatur-, Salzgehalts- und Sauerstoffverhältnisse in der zentralen Ostsee – eine Analyse langjähriger nichtäquidistanter Zeitreihen aus dem küstenfernen Seegebiet. – Dissertation, Warnemünde, 342 S..
- MATTHÄUS, W. (1978): Allgemeine Entwicklungstendenzen im Sauerstoffregime des Tiefenwassers der Ostsee. – *Fischerei-Forschung* 16: 7-13.
- MATTHÄUS, W. (1978a): Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit im Sauerstoffgehalt der offenen Ostsee. *Beiträge zur Meereskunde* 41: 61-94.
- MATTHÄUS, W. (1983): Zur Variation der vertikalen Stabilität der thermohalinen Schichtung im Gotlandtief. – *Beiträge zur Meereskunde* 48: 57-71.
- MATTHÄUS, W. (1984): Climatic and seasonal variability of oceanological parameters in the Baltic Sea. – *Beiträge zur Meereskunde* 51: 29-49.
- MATTHÄUS, W. (1986): Charakteristische Eigenschaften von Stagnationsperioden in der Ostsee. – *Beiträge zur Meereskunde* 55: 39-53.
- MATTHÄUS, W. (1990): Mixing across the primary Baltic halocline. – *Beiträge zur Meereskunde* 61: 21-31.
- MATTHÄUS, W. (1992): Der Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee. – *Geographische Rundschau* 44 (11): 626-631.
- MATTHÄUS, W. (1995): Natural variability and human impacts reflected in longterm changes in the Baltic deep water conditions – a brief review. – *Deutsche Hydrographische Zeitung* 47 (1): 47-65.
- MATTHÄUS, W. (1996): Lebensraum Ostsee - Ozeanographische Besonderheiten. - LOZAN, J.L., LAMPE, R., MATTHÄUS, W., RACHOR, E., RUMOHR, H. & WESTERHAGEN, H.V. (Hrsg.): Warnsignale aus der Ostsee. Wissenschaftliche Fakten: 17-23.
- MATTHÄUS, W. & FRANCK, H. (1992): Characteristics of major Baltic inflows - a statistical analysis. – *Cont. Shelf Res.* 12: 1375-1400.
- MATTHÄUS, W. & LASS, H.U. (1995): The recent salt inflow into the Baltic Sea. – *J. Phys. Oceanogr.* 25: 280-286.

- MATTHÄUS,W., NEHRING,D., LASS,H.U., NAUSCH,G., NAGEL,K. & SIEGEL,H. (1997): Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1996. - Meereswissenschaftliche Berichte 24, Warnemünde, 49 S..
- MATTHÄUS,W., NAUSCH,G., LASS,H.U., NAGEL,K. & SIEGEL,H. (1998): The Baltic Sea in 1997 – Impacts of the Extremely Warm Summer and of the Exceptional Oder Flood. – Deutsche Hydrographische Zeitschrift 50 (1): 47-69.
- MATTHÄUS,W. & SCHINKE,H. (1994): Mean atmospheric circulation patterns associated with major inflows. – Deutsche Hydrographische Zeitschrift 46: 321-339.
- MATTHÄUS,W. & SCHINKE,H. (1999): The influence of runoff on deep water conditions of the Baltic Sea. – Hydrobiologia 393: 1-10.
- METZLER,P. & NICKEL,B. (1986): Zeitreihen- und Verlaufsanalysen. Eine Einführung mit Beispielen aus der Neurologie, Psychiatrie und klinischen Psychologie. – Hirzel-Verlag Leipzig, 248 S..
- MELVASALO, T.(Hrsg.) (1981): Assessment of the effects on pollution on the natural resources of the Baltic Sea. – Baltic Sea Environment Proceedings 5B, 426 S..
- MILERO, F.J. (1986): The Thermodynamics and kinetics of H₂S. – Proceed. of the Chemical and Physical Oceanography of the Black Sea. Göteborg, Sweden, June 2-4.
- MUELLER,T. (2000): A summary of some Software Conventions. - http://curie.ei.jrc.it/software/soft_convention.htm.
- NAUSCH,G. (2000): Bestimmung des gelösten Sauerstoffs. – Detaillierte Hausvorschrift des Instituts für Meereskunde, Warnemünde, 6 S..
- NAUSCH,G. & LOCHTE,K. (1999): Der Stoffhaushalt der Ostsee – natürliche und anthropogene Einflüsse. – Geographie und Schule 21 (120): 12-20.
- NEHRING,D. (1966): The results of the oxygen intercalibration measurements. – Report on intercalibration measurement. UNESCO Techn. Papers in Marine Science 9: 19-23.
- NEHRING,D. (1981): Hydrologisch - chemische Untersuchungen in der Ostsee von 1969-1978. II. Die chemischen Bedingungen und ihre Veränderungen unter besonderer Berücksichtigung des Nährstoffregimes. - Geodätische und geophysikalische Veröffentlichungen IV (25): 39-220.
- NEHRING,D. (1987): Temporal variations of phosphate and inorganic nitrogen compounds in central Baltic deep waters. – Limnol. Oceanogr. 32: 494-499.
- NEHRING,D. (1989): Phosphate and nitrate trends and the ratio oxygen consumption to phosphate accumulation in central Baltic deep waters with alternating oxic and anoxic conditions. – Beiträge zur Meereskunde 59: 47-58.
- NEHRING,D. (1990): Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee von 1979-1988 - ein Vergleich. - Meereswissenschaftliche Berichte 2: 1-46, Warnemünde.
- NEHRING,D. (1995a): Gase. - RHEINHEIMER,G. (Hrsg.): Meereskunde der Ostsee: 91-97.
- NEHRING,D. (1995b): Chemische Labor Ostsee. – Ringvorlesung "Die Ostsee – unser Lebensraum." Universität Rostock, Sommersemester 1995.
- NEHRING,D. & AERTEBJERG,G. (1996): Anthropogene Einflüsse und Störfaktoren – Verteilungsmuster und Bilanzen anorganischer Nährstoffe sowie Eutrophierung. - LOZAN,J.L., LAMPE,R., MATTHÄUS,W., RACHOR,E., RUMOHR,H. & WESTERHAGEN,H.V. (Hrsg.): Warnsignale aus der Ostsee. Wissenschaftliche Fakten: 61-69.

- NEHRING,D. & FRANCKE,E. (1971): Hydrographisch-chemische Veränderungen in der Ostsee seit Beginn dieses Jahrhunderts und während des Internationalen Ostseejahres 1969/70. – Fischerei Forschung 9: 35-42.
- NEHRING,D. & FRANCKE,E. (1981a): Hydrographisch-chemische Untersuchungen in der Ostsee von 1969-1978. I. Die hydrographischen Bedingungen und ihre Veränderungen. - Geodätische und geophysikalische Veröffentlichungen IV (35): 1-38.
- NEHRING,D. & FRANCKE,E. (1981b): Hydrographisch - chemische Veränderungen in der Ostsee nach dem extremen Eiswinter 1978/79. - Fischerei-Forschung 19(1): 7-17.
- NEHRING,D. & FRANCKE,E. (1982): Hydrographisch - chemische Bedingungen in der Ostsee im Jahre 1980. - Fischerei-Forschung 20(2): 69-77.
- NEHRING,D. & FRANCKE,E. (1983a): Hydrographisch - chemische Bedingungen in der Ostsee im Jahre 1981. - Fischerei-Forschung 21(4): 45-55.
- NEHRING,D. & FRANCKE,E. (1983b): Hydrographisch - chemische Bedingungen in der Ostsee im Jahre 1982. - Fischerei-Forschung 21(4): 56-65.
- NEHRING,D. & FRANCKE,E. (1985a): Hydrographisch - chemische Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1983. - Fischerei-Forschung 23(4): 7-17.
- NEHRING,D. & FRANCKE,E. (1985b): Hydrographisch - chemische Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1984. - Fischerei-Forschung 23(4): 18-27.
- NEHRING,D. & FRANCKE,E. (1987a): Hydrographisch - chemische Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1985. - Fischerei-Forschung 25(2): 7-16.
- NEHRING,D. & FRANCKE,E. (1987b): Hydrographisch - chemische Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1986. - Fischerei-Forschung 25(4): 68-79.
- NEHRING,D. & FRANCKE,E. (1988): Hydrographisch - chemische Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1987. - Fischerei-Forschung 26(3): 43-52.
- NEHRING,D. & MATTHÄUS,W. (1992): Hydrographisch - chemische Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1991. - Deutsche Hydrographische Zeitschrift 44: 217-237.
- NEHRING,D., MATTHÄUS,W. & LASS,H.U. (1993): Die hydrographisch - chemische Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1992. - Deutsche Hydrographische Zeitschrift 45 (5): 281-301.
- NEHRING,D., MATTHÄUS,W., LASS,H.U. & NAUSCH,G. (1994): Hydrographisch - chemische Zustandseinschätzung der Ostsee 1993. - Meereswissenschaftliche Berichte 7: 1-97, Warnemünde.
- NEHRING,D., MATTHÄUS,W., LASS,H.U., NAUSCH,G. & NAGEL,K. (1995a): Consequences of the hot summer and inflow events. - Deutsche Hydrographische Zeitschrift 47 (2): 131-143.
- NEHRING,D., MATTHÄUS,W., LASS,H.U., NAUSCH,G. & NAGEL,K. (1995b): The Baltic Sea 1995 - beginning of a new stagnation period in its central deep waters and decreasing nutrient load in its surface layer. - Deutsche Hydrographische Zeitschrift 47: 319-327.
- NEUTZE,A. (1995): Ein Beitrag zur geostatistischen Raum-Zeit-Prognose. Anwendungsbeispiel bodennahes Ozon. – Berliner Geowiss. Abh. , Reihe D 10, 199 S..
- NIEDERMEYER,R.O. (1996): Lebensraum Ostsee – Geologische Entwicklung, Meeresbodenrelief und Sedimente. – LOZAN,J.L., LAMPE,R., MATTHÄUS,W., RACHOR,E., RUMOHR,H., WESTERNHAGEN,H.V. (Hrsg.): Warnsignale aus der Ostsee. Wissenschaftliche Fakten: 11-17.

- OLEA, R.A. (1991): Geostatistical glossary and multilingual dictionary. – Oxford University Press Oxford u.a., 177S..
- PANNATIER, Y. (1996): VarioWin: Software for spatial data analysis in 2D. – Statistics and Computing. Springer Verlag New York u.a., 91 S..
- PAWLOWSKY, V. (1986): Räumliche Strukturanalyse und Schätzung ortsabhängiger Kompositionen mit Anwendungsbeispielen aus der Geologie. – Dissertation FU Berlin, 170 S..
- PAWLOWSKY, V., OLEA, R.A. & DAVIS, J.C. (1993): Boundary Assessment under uncertainty: a case study. – Mathematical Geology 25 (2): 125-144.
- PLIKHS, M., KALEIS, M. & GRAUMAN, G. (1993): The influence of environmental conditions and spawning stock size on the year-class strength of the eastern Baltic cod. – ICES, Baltic Fish Committee/Ref. Session V.
- POSA, D. 1989: Conditioning of the stationary kriging matrices for some well-known covariance models. – Mathematical Geology, 21 (7): 755-765.
- RABALAIS, N. (1999): "Dead Zone" Choking Gulf of Mexico's life. – National Geographic 8: 136.
- RHEINHEIMER, G. (1996) (Hrsg.): Meereskunde der Ostsee. Springer Verlag Berlin u.a., 338 S..
- ROSENBERG, R., ELMGREN, R., FLEISCHER, S., JONSSON, P., PERSSON, G. & DAHLIN, H. (1990): Marine eutrophication case studies in Sweden. – Ambio 19: 102-108.
- ROSSITER, J.R. (1967): An analysis of annual sea level variations in European waters. – Geophys. J. Roy. astron. Soc. 12: 259-299.
- RUMOHR, H. (1996): Veränderungen und regionale Besonderheiten in Lebensgemeinschaften – Veränderungen des Lebens am Meeresboden. – LOZAN, J.L., LAMOE, R., MATTHÄUS, W., RACHOR, E., RUMOHR, H., WESTERNHAGEN, H.V. (Hrsg.): Warnsignale aus der Ostsee. Wissenschaftliche Fakten: 162-167.
- SAVCHUK, O. (1986): The study of the Baltic Sea eutrophication problems with the aid of simulation models. – Baltic Sea Monitoring Symposium. Tallinn. The Helsinki Commission. Baltic Sea Environ. Proc. 19: 51-61.
- SAVCHUK, O., KOLODOCHKA, A.A. & GUTSABBATH, E.S. (1988): Simulation of the matter cycle in the Baltic Sea ecosystem. – 16th Conference of Baltic Oceanographers, Kiel: 921-931.
- SCARDI, M., FRESI, E. & ARDIZZONE, G.D. (1989): Cartographic representation of sea-grass beds: application of a stochastic interpolation technique (Kriging). – BOUDOURESQUE, C.F., MEINESZ, A., FRESI, E. & GRAVEZ, V. (Hrsg.): International Workshop on Posidonia Beds 2: 19-27.
- SCHAFMEISTER-SPIERING, M.TH. (1990): Geostatistische Simulationstechniken als Grundlage der Modellierung von Grundwasserströmung und Stofftransport in heterogenen Aquifersystemen. – Dissertation FU Berlin, 143 S..
- SCHAFMEISTER, M.TH. (1999): Geostatistik für die hydrologische Praxis. Springer-Verlag Berlin u.a., 172 S..
- SCHÄFER, U. (2000): Ökologie des Wattenmeeres. – http://www.uni-kiel.de/forum-erdkunde/hintergr/sh1995/03_watt.htm, Forum Erdkunde.
- SCHINKE, H. (1996): Zu den Ursachen von Salzwassereintrüben in die Ostsee. – Meereswissenschaftliche Berichte 12, Warnemünde, 138 S..
- SCHINKE, H. & MATTHÄUS, W., 1998: On the causes of major Baltic inflows - an analysis of long time series. – Continental Shelf Research 18: 67-97.

- SCHIEWER, U. & GLOCKE, K. (1995): Ökologie der Bodden und Förden. – RHEINHEIMER, G. (Hrsg.): Meereskunde der Ostsee: 216-221.
- SCHMITHÜSEN, J. (1976): Allgemeine Geosynergetik. Grundlagen der Landschaftskunde. De Gruyter Verlag Berlin u.a., 349 S..
- SCHULZ, H.D. (1986): Regionalisierung von Daten zur Grundwasserbeschaffenheit. – DVWK Schriftenreihe 78: 99-113.
- SCHULZ-BULL, D., DUINKER, J.C. & JONSSON, P. (1996): Quellen und regionale Verteilung organischer Schadstoffe im Wasser und Sediment. – LOZAN, J.L., LAMPE, R., MATTHÄUS, W., RACHOR, E., RUMOHR, H. & WESTERHAGEN, H.V. (Hrsg.): Warnsignale aus der Ostsee. Wissenschaftliche Fakten: 69-73.
- SEIFERT, T. & KAYSER, B. (1995): A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea. – NEHRING, D. : Hydrographisch-chemische Zustandseinschätzung der Ostsee, Institut für Ostseeforschung, Warnemünde.
- SMETACEK, V. (1991): Die Primärproduktion der marinen Plankton-Algen. – Biologie der Meere. Spektrum-Verlag: 34-44.
- SOKOLOV, A., ANDREJEV, O., WULFF, F. & MEDINA, M.R. (1997): The Data Assimilation System for data analysis in the Baltic Sea. --Systems ecology contributions 3, Stockholm University, 66 S..
- SPEKAT, A., HELLER-SCHULZE, B. & LUTZ, M. (1983): Über Großwetter und Markovketten. – Meteorologische Rundschau 36: 243-248.
- STEIN, M. (1989): The loss of efficiency in kriging prediction caused by certain misspecifications of the covariance structure. Third Geostatistics Congress Avignon, 5.-9. Sept. 1988. - ARMSTRONG, M: Geostatistics (Band 1). Kluwer Academic Publishers Dordrecht 2: 24-33.
- STIGEBRANDT, A. (1991): Computations of oxygen fluxes through the sea surface and the net production of organic matter with application to the Baltic and adjacent seas. – Limnol. Oceanogr. 36 (3): 444-454.
- STIGEBRANDT, A. & WULFF, F. (1987): A model for the dynamics of nutrients and oxygen in the Baltic Proper. – J. Mar. Res. 45: 729-759.
- VON STORCH, H. & ZWIERS, F. (1997): Statistical analysis in climate research. - Cambridge University Press Cambridge, 484 S..
- TOOMPUU, A. & WULFF, F. (1996): Optimum spatial analysis of monitoring data on temperature, salinity and nutrient concentrations in the Baltic Proper. - Environmental Monitoring and Assessment 43: 283-308.
- ULANOWICZ, R.E. & WULFF, F. (1991): Comparing ecosystem structures: The Chesapeake Bay and the Baltic Sea. – COLE, J., LOVETT, G. & FINDLAY, S. (Hrsg.): Comparative Analysis of Ecosystems. – Springer Verlag New York u.a. : 140-166.
- UNVERZAGT, S. (1996): Untersuchungen zur räumlichen Abbildung aperiodisch oszillierender Sauerstoffverhältnisse in der zentralen Ostsee. - Greifswalder Geowissenschaftliche Beiträge 3: 139-150.
- UNVERZAGT, S. (1999): Investigations on the Changing Volumes of Aperiodic Oscillating Oxygen Conditions in the Basins of the Baltic Proper. – Mathematische Geologie 4: 103-113.
- VOIPIO, A. (1981) (Hrsg.): The Baltic Sea. – Elsevier Scientific Company Amsterdam u.a., 418S..

- WACKERNAGEL, H. (1995): *Multivariate Geostatistics. – An introduction with applications.* – Springer-Verlag Berlin, 256 S..
- WARNES, J.W. (1986): A sensitivity analysis for universal kriging. – *Mathematical Geology* 18 (7): 653-676.
- WATTENBERG, H. (1949): Entwurf einer natürlichen Einteilung der Ostsee. - *Kieler Meeresforschung* 6: 10-15.
- WEBSTER, R. (1985): Quantitative spatial analysis of soil in the field. – *Advances in Soil Science* 3: 1-70.
- WILKE, T. (2000): http://www.schutzstation-wattenmeer.de/flecken.htm#schwarze_flecken. – Naturschutzgesellschaft Schutzstation Wattenmeer e.V., Rendsburg.
- WINKLER, L.W. (1888): *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft* 21: 2843-2855
- WULFF, F. (1991): Large-scale environmental effects and ecological processes in the Baltic Sea. Research programme for the period 1990-1995 and background documents. – Swedish Environmental Protection Agency Report 3856, 226 S..
- WULFF, F. & RAHM, L. (1991): A database and its tools. – WULFF, F. (Hrsg.): Large scale environmental effects and ecological processes in the Baltic Sea. Research programme for the period 1990-1995 and background documents. - SNV Report 3856: 217-225.

8 ANHANG

A. Liste der Symbole und Abkürzungen

Schätzwerte werden in dieser Arbeit durch Sterne gekennzeichnet und Vektoren im **Fett**druck dargestellt.

Kürzel	Erläuterung
ε / eps	Fehlerwert
$\gamma(h)$	(Semi-) Variogramm
$\gamma^*(h)$	Experimentelles Variogramm
γ_{ij}	Wert der Variogrammfunktion für den Abstand der Punkte x_i und x_j
η	Lagrange - Multiplikator
λ_i	Kriging - Schätzwert
μ	Mittelwert einer Grundgesamtheit
σ	Varianz einer Grundgesamtheit
σ_K^2	Kriging - Schätzvarianz
a	Range, Reichweite des Variogramms
a_i	Polynomparameter
a, b	Parameter
a^*, b^*	Schätzwerte für die Parameter a, b
c_i	Wichtungswerte für die Tiefenanpassung
C	Sill, Schwellenwert des Variogramms
C_0	Nugget des Variogramms
Cov	Kovarianz
d	Drift
E	Erwartungswert
Exp	Exponentielle Modellfunktion für das Variogramm
$f(x)$	Polynomfunktion der Punkte in der Ebene
$Gauss$	Gauß'sche Modellfunktion für das Variogramm
G	Untersuchungsgebiet
G_i	Teilgebiete
G_c	Gebiet mit Sauerstoffkonzentrationen unter z_c
h	Abstand zweier Punkte
\mathbf{h}	Abstandsvektor zweier Punkte
$I(x_i, z_c)$	Indikatorvariable am Ort x_i für den Sauerstoffgrenzwert z_c
$I^*(x_i, z_c)$	Schätzwert für die Indikatorvariable
m	Mittelwert einer Stichprobe
$m(x)$	Ortsabhängiger Mittelwert
$m^+(h)$	Mittelwert der Endpunkte der Variogrammklasse für den Abstand h
$m^-(h)$	Mittelwert der Anfangspunkte der Variogrammklasse für den Abstand h
n	Anzahl der Meßwerte
$n(h)$	Anzahl der Meßpunkte in der Abstandsklasse h
$Sphär$	Sphärische Modellfunktion für das Variogramm
t_i	Tiefe des i -ten Meßwertes in der Wassersäule
$s(x_i)^2$	Varianz am Punkt x_i
$t(x)$	Räumlicher Trend im Punkt x
$t_1(x)$	Salzgehaltstrend in Punkt x
$t_2(x)$	Jahreszeitentrend in Punkt x
Var	Varianz
x_i	Ortsvektor (hier meist zweidimensional) des i -ten Punktes
$Y(t)$	Sauerstoffkonzentrationen in der Tiefe t
Y_i	Sauerstoffkonzentration in der Tiefe t_i
Y_i^*	Hilfsgröße zur Anpassung der Sauerstoffkonzentrationen in der Tiefe t_i

Y_{\max}	max. Sauerstoffkonzentrationen in der Wassersäule
Y_{\min}	min. Sauerstoffkonzentrationen in der Wassersäule
$z(x_0)$	unbekannter (wahrer Wert) am Punkt x_0
$z^*(x_0)$	geschätzter Wert am Punkt x_0
$z(x_i)$	Meßwert im Punkt x_i
z_c	Sauerstoffgrenzwert
$Z(x_i)$	Ortsabhängige Zufallsvariable
Z_i	Zufallsfunktion im Punkt x_i

In Tabellen, Diagrammen und v.a. im Anhang werden Ortsbeschreibungen zur Lage von Meßpunkten in der zentralen Ostsee oft durch die folgenden Kürzel ersetzt.

Kürzel	Erläuterung
AB	Arkonabecken
BB	Bornholmbecken
DB	Danziger Becken
oGB	Östliches Gotlandbecken
wGB	Westliches Gotlandbecken
nGB	Nördliches Gotlandbecken
RB	Rigaer Becken
BS	Bornholmschwelle
NO	Nordosten (Finnischer Meerbusen östlich des 21. Längengrades)
S, N	Lagebeschreibung Süd und Nord
O, W	Lagebeschreibung Ost und West
Z	Lagebeschreibung Zentrum
GT	Gotlandtief (57°18' N, 20° 05'E)
FT	Farötief (58° 00' N, 19°54'E)
LT	Landsorttief (58°35'N, 18°14'E)
NT	Norrköping-Tief (58°00'N, 18°00'E)
KT	Karlsö-Tief (57°43'N, 17°22'E)
DT	Danziger Tief (54°50'N, 19°20'E)
BT	Bornholm-Tief (55°30'N, 16°00'E)

B. Tabellen und Diagramme

Jahr	Anzahl der beprobten Stationen	Anzahl der Meßwerte
1969	349	12145
1970	346	9589
1971	318	7479
1972	332	8295
1973	275	8213
1974	290	6889
1975	331	8382
1976	229	6671
1977	327	7387
1978	368	8833
1979	319	6040
1980	399	9854
1981	546	11251
1982	423	9943
1983	342	7878
1984	325	7805
1985	399	13117
1986	401	30927
1987	203	6194
1988	281	7242
1989	293	10080
1990	141	2569
1991	365	7205
1992	289	8920
1993	324	9241
1994	388	8845
1995	213	5539
1996	259	9388
1997	451	35373
1998	132	14885

Tabelle 1: Anzahl der Datensätze und beprobten Stationen in den Jahren 1969-1998.

Monat	Anzahl der beprobten Stationen	Anzahl der Meßwerte
Januar	1196	88868
Februar	1479	49452
März	515	14583
April	738	40865
Mai	1096	27379
Juni	1320	30312
Juli	577	7863
August	997	19359
September	531	6156
Oktober	386	5891
November	494	9937
Dezember	329	5514

Tabelle 2: Gesamtanzahl der Datensätze und beprobten Stationen in den Monaten der Probenahme

Becken	Anzahl der Stationen	Anzahl der Meßwerte	Fläche in km ²	Volumen in km ³	mittlere Tiefe in m	Stationen / km ²	Meßwerte je 1000x1000m	Meßwerte je 1000x1000x 10m
AB	2454	55762	16753	251	15.0	0.15	3.33	2.22
BB	1746	57944	40273	1757	43.6	0.04	1.44	0.33
oGB	3018	95395	87020	5962	68.5	0.03	1.09	0.16
wGB	1193	66195	37040	2171	58.6	0.03	1.79	0.30
nGB	1247	30883	37095	2221	59.9	0.03	0.83	0.14

Tabelle 3: Anzahl und Dichte der Datensätze und beprobten Stationen in den fünf Teilbecken Arkonabecken (AB), Bornholmbecken (BB), östliches Gotlandbecken (oGB), westliches Gotlandbecken (wGB) und nördliches Gotlandbecken (nGB).

Zeitraum	Varianz in m ²	Variogrammodell der 2 ml/l-Grenztiefen ¹	Suchradius in km	Besonderheiten ²	Standardabw. bei Kreuz-validation ³ in m
1.1.69-31.3.69	50.9	13.5+19 Sphär (50)	140		5.7
1.4.69-30.6.69	81.8	19+48 Sphär (66)	60		6.9
1.7.69-30.9.69	371.2	40+38 Sphär(66)	180	40-120 m (AB, Küstennähe im nGB u. nGB (182 m)	16.9
1.10-31.12.69	119.1	20+36 Sphär (100)	100	<100 m	12.2
1.1.-31.3.70	63.6	208 Sphär (60)	200	Randwerte (kein Modell gefunden)	8.0
1.4.-30.6.70	94.5	8+40 Sphär (66)	90	<110 m (ein Meßpunkt im GT bei 114 m)	8.6
1.7.-30.9.70	145.0	6+48 Sphär (72)	60	<100 m (nördl. v. GT-107 m)	7.5
1.10-31.12.70	231.2	23+20 Sphär (160)	150	45-90 m(Kattegat, AB und hohe Werte im DB)	7.2
1.1.-31.3.71	95.8	1.6+100 Sphär (125)	200	>50 m (geringe Tiefen vor Öland)	8.0
1.4.-30.6.71	60.2	20+20 Sphär (155)	150		6.2
1.7.-30.8.71	68.5	6+25 Gauss (85)	150	55-90 m (AB u. hohe Werte im nGB u. oGB)	7.4
1.10.-31.12.71	122.6	27+29 Sphär (100)	180	>55 m (Beltsee u. AB)	11.9
1.1.72-31.3.72	86.7	80 Sphär (160)	250		4.8
1.4.-30.6.72	37.9	14.8+12 Sphär (160)	160	>62 m (Randlage BB)	5.8
1.7.-30.9.72	414.6	7.5+27 Sphär (120)	100	50-100 m (AB u. hohe Werte im oGB u. DB)	20.4
1.10.-31.12.72	287.4	122 Sphär (60)	150		12.7
1.1.-31.3.73	114.0	29+21 Sphär (130)	200	>60 m (schwed. Küste u. Randlage BB)	10.4
1.4.-30.6.73	43.6	7.25+13 Sphär (43)	130	>65 m (AB)	6.3
1.7.-30.9.73	100.7	3+42 Sphär (16.4)	70	<100 m (Meßpunkt im Süden des oGB)	7.6
1.10-31.12.73	71.9	60 Sphär (88)	70		6.4

¹ Die Modellfunktion 13.5+19 Sphär (50) beschreibt ein Sphärisches Variogramm mit einem Nugget von 13.5 ml/l², einem Schwellenwert von 19 ml/l² und einer Reichweite von 50 km. Die Anpassung erfolgte mit VarioWin (PANNATIER 1996). Die Modellfunktion Gauss steht für das Gauß'sche Variogramm.

² Die verwendeten Abkürzungen für Ortsbezeichnungen wurden in der Liste der Symbole und Abkürzungen im Anhang erklärt. Angegeben werden Beschränkungen des Wertebereiches der Grenztiefen, Informationen zu Extremwerten, die aus der Analyse ausgeschlossen werden (in Klammern) und die Information, ob Randwerte in die Variogrammanalyse einbezogen wurden.

³ Angegeben wird die mittlere Standardabweichung zwischen den Meßwerten $z(x_i)$ und ihren Schätzwerten $z^*(x_i)$.

Zeitraum	Varianz in m ²	Variogrammodell der 2 ml/-Grenztiefen ¹	Suchradius in km	Besonderheiten ²	Standardabw. bei Kreuz-validation ³ in m
1.1.-31.3.74	61.4	116+270 Sphär (110)	130	<200 m (Randwert im FT), Randwerte (kein Modell gefunden)	6.6
1.4.-30.6.74	222.3	80+90 Sphär (120)	120		13.5
1.7.-30.9.74	380.0	195 Sphär (205)	180	<120 m (nGB bis 172 m)	19.1
1.10-31.12.74	408.6	8+56 Sphär (84)	100	60-100 m (kleine Werte gut verteilt, hohe im nGB)	17.5
1.1.-31.3.75	92.0	58 Sphär (120)	220		11.5
1.4.-30.6.75	101.0	12+27 Sphär (90)	140	45-105 m (Küstennähe bei Gotland und ein Meßpunkt im GT)	7.7
1.7.-30.9.75	147.9	20+69 Sphär (120)	180		8.8
1.10-31.12.75	110.3	12+56 Sphär (200)	200	>50 m (BS bei 47 m)	7.1
1.1.-31.3.76	123.4	18+50 Sphär (230)	200	70-100 m (BB u. ein Meßpunkt im oGB)	6.2
1.4.-30.6.76	127.7	30+48 Sphär (110)	300	<100 m (GT)	9.7
1.7.-30.9.76	658.3	50+470 Sphär (300)	250		11.4
1.10-31.12.76	521.9	490 Sphär (240)	200		11.3
1.1.-31.3.77	209.2	250 Sphär (105)	300	Randwerte (wenige Daten)	31.1
1.4.-30.6.77	336.5	29+90 Sphär (120)	110	<130 m (Nähe GT)	18.5
1.7.-30.9.77	321.1	40+242 Sphär (160)	160	<110 m (zwei Werte um GT)	10.2
1.10-31.12.77	128.9	7+69 Sphär (84)	200	<110 m (südl.vom GT)	14.1
1.1.-31.3.78	118.3	85 Sphär (165)	130	>60 m (geringer Wert in Randlage DB)	16.5
1.4.-30.6.78	113.4	15+84 Sphär (160)	160		16.8
1.7.-30.9.78	240.4	45+140 Sphär (210)	200	>45 m (AB)	10.6
1.10-31.12.78	302.6	52+107 Sphär (75)	120	>35 m (Kattegat, RB, schwed. Küste)	11.0
1.1.-31.3.79	215.2	185 Sphär (120)	160		12.6
1.4.-30.6.79	90.4	18+40 Sphär (84)	100		13
1.7.-30.9.79	134.5	110 Sphär (120)	250	Randwerte (kein Modell gefunden)	8.7
1.10-31.12.79	173.8	30+90 Sphär (150)	240		13.2
1.1.-31.3.80	162.6	20+40 Sphär (79)	180	>30 m (nichtinterpretier- barer Wert im oGB)	14.3
1.4.-30.6.80	193.6	25+58 Sphär (24)	80	55-110 m (RB, NO, hohe Werte im oGB)	11.5
1.7.-30.9.80	932.0	60+72 Sphär (70)	180	30-110 m (RB, zwei Messungen im GT)	18.8
1.10-31.12.80	354.9	44+210 Sphär (170)	210		13.8
1.1.-31.3.81	833.6	35+135 Gauss (195)	210	40-110 m (Randbereich oGB, hohe Werte im LT u. nGB)	25.8
1.4.-30.6.81	229.7	40+19 Sphär (210)	240	>50 m (AB)	9.8
1.7.-30.9.81	545.8	94+86 Sphär (155)	240	>30 m (Randlage im oGB)	15.4
1.10-31.12.81	301.6	30+75 Sphär (200)	300	>30 m (Kattegat)	15.0
1.1.-31.3.82	126.4	30+57 Sphär (160)	180		8.7
1.4.-30.6.82	185.3	38+22 Sphär (150)	130	>50 m (Kattegat u. AB)	10.0
1.7.-30.9.82	251.1	50+130 Gauss (111)	140	>20 m (Randbereich oGB)	13.3
1.10-31.12.82	417.3	40+132 Gauss (150)	150	>25 m (Randbereich oGB)	12.9
1.1.-31.3.83	229.6	90+130 Sphär (34)	100		16.6
1.4.-30.6.83	172.2	30+85 Sphär (70)	90	>60 m (BB), geringe Datenbasis	13.6
1.7.-30.9.83	391.8	48+240 Gauss (240)	180		14.2
1.10-31.12.83	518.1	50+360 Gauss (200)	200	>30 m (Randlage BB)	15.0
1.1.-31.3.84	233.1	18+62 Sphär (64)	80	Hoher Gradient zum LT	11.3
1.4.-30.6.84	341.5	68+112 Gauss (150)	200		11.9
1.7.-30.9.84	1144.3	27+104 Sphär (37)	100	>30 m (Kattegat, RB) starker Gradient RB-GT	10.8
1.10-31.12.84	554.2	45+350 Sphär (230)	150		12.4

Zeitraum	Varianz in m ²	Variogrammodell der 2 ml/-Grenztiefen ¹	Suchradius in km	Besonderheiten ²	Standardabw. bei Kreuzvalidation ³ in m
1.1.-31.3.85	289.8	230 Sphär (105)	210	<120 m (eine Messung im FT: 124 m, GT:132 m)	15.2
1.4.-30.6.85	424.9	25+310 Sphär (210)	200	<130km (132 m im oGB)	12.5
1.7.-30.9.85	1089.0	20+600 Gauss (185)	180	<140km (152 m östl.v. GT)	15.4
1.10-31.12.85	678.9	90+355 Gauss (150)	120	Hoher Gradient zum GT und LT	16.3
1.1.-31.3.86	258.7	47+85 Gauss (100)	300	>30 m (nördl. FT- 28 m)	13.8
1.4.-30.6.86	141.9	15+120 Sphär(10.5)	110		9.2
1.7.-30.9.86	953.6	40+200 Sphär (130)	120		13.9
1.10-31.12.86	525.9	30+120 Gauss (150)	160		12.7
1.1.-31.3.87	393.4	125+140 Sphär (70)	240	Geringe Datenbasis	14.0
1.4.-30.6.87	222.6	100 Sphär (120)	160	<100 m (ein Meßpunkt im GT mit 123 m)	10.6
1.7.-30.9.87	1025.8	50+190 Sphär (120)	120		12.6
1.10-31.12.87	245.9	30+300 Sphär	300	Randwerte (geringe Datenbasis)	14.2
1.1.-31.3.88	297.7	265 Sphär (320)	200		13.1
1.4.-30.6.88	1223.0	102+190 Sphär(108)	70	Randwerte (geringe Datenbasis), Anpassung ohne RB (ab 40 m)	3.6
1.7.-30.9.88	649.1	19+500 Gauss (210)	180		17.1
1.10-31.12.88	445.1	34+235 Sphär(210)	210		17.1
1.1.-31.3.89	357.9	13+50 Sphär (67)	100	<110 m (NO – 148 m)	13.5
1.4.-30.6.89	832.3	34+230 Gauss (320)	260	>25 m (ohne RB und Kattegat)	14.3
1.7.-30.9.89	1246.0	2+108 Sphär (90)	160	>35 m (ohne Kattegat, RB u. Randbereiche im nGB u. BB)	19.4
1.10-31.12.89	794.4	600 Sphär (210)	240		16.4
1.1.-31.3.90	717.8	190 +185 Sphär (180)	150	Randwerte (geringe Datenbasis)	14.4
1.4.-30.6.90	1659.3	2130 Sphär (90)	200	Randwerte (geringe Datenbasis)	16.2
1.7.-30.9.90	699.1	20+295 Sphär (135)	300	Randwerte (geringe Datenbasis), >40 m (Kattegat)	11.9
1.10-31.12.90	2502.1	30+560 Sphär (32)	300	Randwerte (geringe Datenbasis)	35
1.1.-31.3.91	665.5	95+190 Sphär (140)	200	<200 m (229 m im NO)	19.8
1.4.-30.6.91	574.4	12+206 Sphär (150)	200	>20 m (Küstennähe DB)	22.1
1.7.-30.9.91	1312.2	55+800 Gauss (250)	270		15.8
1.10-31.12.91	767.7	8+310 Sphär (150)	220		14.0
1.1.-31.3.92	526.5	41+92 Gauss (220)	220	80-150 m (ohne Randlagen im DB, hohe Werte i m wGB)	13.4
1.4.-30.6.92	473.6	38+90 Gauss (140)	150	>65 m (Randlage BB)	11.9
1.7.-30.9.92	1368.4	15+465 Gauss (190)	200	<120 m (süd-östl. GB)	10.2
1.10-31.12.92	762.3	18+102 Gauss (150)	180	>50 m (Beltsee u. AB)	7.6
1.1.-31.3.93	992.5	30+800 Gauss (250)	220		17.9
1.4.-30.6.93	1492.2	50+275 Gauss (270)	280	<200 m (eine Messung im LT)	10.5
1.7.-30.9.93	887.5	55+210 Sphär (120)	210	<150 m (LT)	15.8
1.10-31.12.93	547.2	45+175 Gauss (200)	250	50-140 m (AB und LT)	10.7
1.1.-31.3.94	276.8	20+94 Gauss (185)	270	<140 m (LT)	10.7
1.4.-30.6.94	506.5	39+120 Sphär (145)	300	<150 m (NT)	16.9
1.7.-30.9.94	709.9	40+250 Gauss (299)	250	>20 m (Beltsee)	9.7
1.10-31.12.94	276.7	42+115 Sphär (300)	250	>30 m (Beltsee)	10.2
1.1.-31.3.95	380.1	42+250 Gauss (300)	300	<130 m (LT)	11.2
1.4.-30.6.95	218.6	25+55 Gauss (150)	250	>50 m (AB)	8.5
1.7.-30.9.95	905.3	15+520 Gauss (300)	220	>50 m (AB)	9.0
1.10-31.12.95	618.1	7+280 Gauss (300)	300	<150 m (GT)	23

Zeitraum	Varianz in m ²	Variogrammodell der 2 ml/l-Grenztiefen ¹	Suchradius in km	Besonderheiten ²	Standardabw. bei Kreuzvalidation ³ in m
1.1.-31.3.96	164.5	28+110 Gauss (300)	250		9.0
1.4.-30.6.96	169.7	15+145 Gauss (160)	240		6.6
1.7.-30.9.96	329.3	24+170 Gauss (180)	240	<130 m (Meßpunkt im GT)	10.4
1.10-31.12.96	384.4	27+260 Gauss (160)	220	50-105 m (RB u. BS, GT: 102-119 m)	12.2
1.1.-31.3.97	281.9	85+170 Gauss (230)	250		11.5
1.4.-30.6.97	113.5	27+34 Spär (160)	240	BB (61 m) u. GT(123 m)	8.4
1.7.-30.9.97	791.1	72+510 Sphär (220)	250		17.1
1.10-31.12.97	284.8	35+47 Sphär (84)	160	> 45 m (schwed. Küste)	13.5
1.1.-31.3.98	128.6	50+50 Sphär (100)	80	e	
1.4.-30.6.98	60.6	27+33 Sphär(60)	60		
1.7.-30.9.98	130.4	10+150 Sphär (60)	70		
1.10-31.12.98	81.2	10+45 Sphär (75)	80		
1.1.-31.3.99	35.6	18+28 Sphär (180)	150		
1.4.-30.6.99	34.9	2+25 Sphär (140)	80		
1.7.-30.9.99	19.2	3+13 Shhär (120)	110		
1.10-31.12.99	34.7	3+15 Sphär (35)	120		

Tabelle 4: Globale Varianzen, Variogrammodelle, Suchradien und Ergebnisse der Kreuzvalidation für die 2 ml/l-Grenztiefen aller Untersuchungsperioden.

Zeitraum	Anz. der Werte	Globale Varianz in m ²	Variogrammodell der 0 ml/l-Grenztiefen ⁴	Suchradius in km	Besonderheiten/Vorkommen ⁵	Standardabw. bei Kreuzvalidation ⁶ in m
1.1.69-31.3.69	14	809.2	140+1200 Sphär (170)	200	oGB, wGB, nGB, NO, sehr hohe Stabilität	33.6
1.4.69-30.6.69	17	805.5	300+1200 Sphär (210)	150	oGB, wGB, nGB, NO	21.1
1.7.69-30.9.69	9	1482.0	30+800 Sphär (200)	100	oGB u. NO	12.2
1.10-31.12.69	14	881.0	3000 Sphär (170)	150	oGB, wGB, nGB, NO	21.8
1.1.-31.3.70	4		200+2500 Sphär (180)	150	oGB (104, 105, 109 m), 223 m (LT)	
1.4.-30.6.70	7	279.2	460+1900 Sphär (46)	90	NO u. wGB	26.4
1.7.-30.9.70	10	68.4	3150 Sphär (185)	150	NO u. wGB	10.3
1.10-31.12.70	9	219.8	2800 Sphär (120)	90	NO u. wGB	5.6
1.1.-31.3.71	0					
1.4.-30.6.71	2		190+480 Sphär (40)	90	wGB (84/100 m)	
1.7.-30.8.71	11	4216.6	900 Sphär (73)	100	BB, oGB, Süden des wGB	8.2
1.10.-31.12.71	14	2180.3	360+1150 Sphär (150)	150	BB, DB, oGB, NO	15.4
1.1.72-31.3.72	4		1500 Sphär (70)	90	GT u. Umgebung: 153/134 m, NT: 170 m, LT 431 m,	
1.4.-30.6.72	19	4275.2	450+900 Sphär (160)	150	oGB, wGB, nGB, NO	67.4

⁴ Die Modellfunktion 13.5+19 Sphär (50) beschreibt ein Sphärisches Variogramm mit einem Nugget von 13.5 ml/l², einem Schwellenwert von 19 ml/l² und einer Reichweite von 50 km. Die Anpassung erfolgte mit VarioWin (PANNATIER 1996).

⁵ Die verwendeten Abkürzungen für Ortsbezeichnungen wurden am Anfang dieser Arbeit in der Liste der Symbole und Abkürzungen erklärt. Angegeben wird, in welchen Becken (und Tiefen) Schwefelwasserstoff festgestellt wurde.

⁶ Angegeben wird die mittlere Standardabweichung zwischen den Meßwerten $z(x_i)$ und ihren Schätzwerten $z^*(x_i)$.

Zeitraum	Anz. der Werte	Globale Varianz in m ²	Variogrammmodell der 0 ml/l-Grenztiefen ⁴	Suchradius in km	Besonderheiten/Vorkommen ⁵	Standard-abw. bei Kreuz-validation ⁶ in m
1.7.-30.9.72	15	2199.2	350+1300 Sphär (170)	150	wGB, nGB, FT, NO	57.9
1.10.-31.12.72	9	599.1	200+1000 Gauss (140)	150	Randwert im GT, nGB, wGB	27.4
1.1.-31.3.73	8	2577.1	180+880 Gauss (160)	150	nGB, NO, wGB	43.9
1.4.-30.6.73	4		1000 Sphär (40)	100	wGB 96, 102, 136 m (NT) u. 239 m (LT)	
1.7.-30.9.73	10	1998.4	1150 Sphär (89)	90	GT, wGB, nGB, NO	18.5
1.10.-31.12.73	1		350+1000 Spär (190)	100	GT (208 m)	
1.1.-31.3.74	3		1900 Sphär (150)	150	wGB bei 94, 147 u. 327 m (LT)	
1.4.-30.6.74	8	1335.4	1000 Sphär (80)	100	wGB u. oGB	39.3
1.7.-30.9.74	11	10897.1	2550 Sphär (170)	150	GT, nGB, NO, wGB	111.6
1.10.-31.12.74	6	1233.1	1750 Sphär (170)	150	GT, NT, nGB, NO	49.1
1.1.-31.3.75	2		1250 Sphär (55)	90	GT(182 m), LT (417 m)	
1.4.-30.6.75	10	2081.9	450+520 Sphär (40)	50	BB u. oGB	12.9
1.7.-30.9.75	19	1002.3	680+1550 Sphär (90)	70	BB, oGB, wGB, nGB, NO	31.9
1.10.-31.12.75	8	11712.2	1050 Sphär (120)	150	BB, wGB, oGB	132.4
1.1.-31.3.76	3		850 Sphär (80)	90	Umgebung v. GT(113/133 m), FT (144 m)	
1.4.-30.6.76	3		1470 Sphär (120)	150	Umgebung v. GT (153/190 m), FT (133 m)	
1.7.-30.9.76	3		1650 Sphär (120)	120	NO(152 m), FT(196m) u. GT(237 m)	
1.10.-31.12.76	2		1050 Sphär (120)	150	NO(112 m), 236 m (GT)	
1.1.-31.3.77	1				NO in Bodennähe (162 m)	
1.4.-30.6.77	1				S wGB, Bodennähe (107 m)	
1.7.-30.9.77	1				S wGB, Bodennähe (85 m)	
1.10.-31.12.77	1				NO (Bodennähe)	
1.1.-31.3.78	0					
1.4.-30.6.78	1				GT (232 m)	
1.7.-30.9.78	13	3056.7	250+1200 Sphär (130)	130	BB, oGB, wGB	16.4
1.10.-31.12.78	12	3766.1	200+1150 Sphär (130)	160	wGB, oGB, NO	24.9
1.1.-31.3.79	2		70+1200 Sphär (120)	150	NT (171 m), GT (213 m)	
1.4.-30.6.79	6	497.6	580+2300 Sphär (120)	110	Umgebung v. GT, FT u. NT	32.0
1.7.-30.9.79	10	1349.7	3200 Sphär (58)	100	BT, oGB, NO, wGB	31.0
1.10.-31.12.79	10	1032.3	1180 Sphär (125)	150	BB, wGB, oGB, NO	26.2
1.1.-31.3.80	6	8789.8	100+1400 Sphär (100)	90	LT (372 m) , oGB	15.2
1.4.-30.6.80	15	1168.3	800+1680 Sphär (140)	90	oGB, nGB, NO, viele Messungen ohne H ₂ S	19.8
1.7.-30.9.80	18	5683.9	30+1950 Sphär (190)	150	Anpassung ab 60 m Tiefe, NO, wGB, oGB	50.2
1.10.-31.12.80	17	1335.8	2000 Sphär (200)	150	oGB, nGB, NO, wGB	35.2
1.1.-31.3.81	6	2086.9	250+880 Gauss (150)	150	LT (242 m), oGB	11.0
1.4.-30.6.81	11	1389.6	120+1820 Sphär (186)	150	oGB, Kattgat	14.1
1.7.-30.9.81	25	1480.8	360+940 Sphär (180)	150	BB,DB, oGB, wGB, NO	33.4
1.10.-31.12.81	19	2773.1	700+1330 Sphär (140)	150	BB, oGB, wGB, nGB, NO	55.1
1.1.-31.3.82	13	4496.9	230+920 Gauss (190)	150	BB, oGB, LT	20.9
1.4.-30.6.82	24	1328.5	200+950 Sphär (120)	140	Hohe kleinräumige Varianz im NO, BB, oGB, wGB, NO	34.5
1.7.-30.9.82	30	605.9	300+550 Sphär (130)	150	Randwert im oGB, BB, oGB, nGB, wGB, NO	14.7

Zeitraum	Anz. der Werte	Globale Varianz in m ²	Variogrammmodell der 0 ml/l-Grenztiefen ⁴	Suchradius in km	Besonderheiten/Vorkommen ⁵	Standard-abw. bei Kreuz-validation ⁶ in m
1.10-31.12.82	30	1014.4	320+400 Sphär (160)	140	BB, SS, DB, oGB, nGB, wGB, NO	27.4
1.1.-31.3.83	7	3000.2	100+1100 Gauss (160)	100	nGB, OGB	54.8
1.4.-30.6.83	7	648.7	100+1140 Sphär (13.6)	150	nGB, NO, GT	23.7
1.7.-30.9.83	18	1203.8	1350 Sphär (100)	150	NO, nGB, oGB	33.2
1.10-31.12.83	10	635.1	900 Sphär (190)	150	oGB, wGB, nGB, NO	33.3
1.1.-31.3.84	7	4792.1	50+700 Sphär (140)	90	wGB, oGB	16.1
1.4.-30.6.84	9	5384.2	150+1100 Gauss (160)	150		81.6
1.7.-30.9.84	18	870.8	200+820 Sphär (76)	150		28.0
1.10-31.12.84	10	1164.6	200+1750 Sphär (120)	150	Hohe Varianz im Variogramm	19.1
1.1.-31.3.85	10	338.4	1450 Sphär (110)	150		22.3
1.4.-30.6.85	7	97.6	1050 Sphär (150)	150	Südl. v. GT bis FT	15.0
1.7.-30.9.85	18	728.8	135+875 Sphär (70)	100		24.2
1.10-31.12.85	9	1779.1	100+825 Sphär (140)	120		26.7
1.1.-31.3.86	8	1030.9	650+2600 Sphär (120)	120	Wenige Meßpunkte weit verteilt	17.4
1.4.-30.6.86	12	1417.9	1500 Sphär (130)	150	oGB, NW	36.6
1.7.-30.9.86	10	643.1	400+1200 Sphär (77)	100	oGB, NO	26.6
1.10-31.12.86	7	1952.2	250+850 Sphär (150)	150	oGB, NO, NW	36.9
1.1.-31.3.87	1				GT (127 m), geringe Datendichte, keine Messung im wGB	
1.4.-30.6.87	4		400+750 Sphär (90)	100	Geringe Datendichte	
1.7.-30.9.87	6	514.4	700+680 Sphär (100)	150	Geringe Datendichte	12.6
1.10-31.12.87	3		750 Sphär (85)	50	Geringe Datendichte, NO u. BB, Großer Gradient zum LT ohne H ₂ S	
1.1.-31.3.88	2		100+1000 Gauss (170)	130	Geringe Datendichte, BB u. GT	
1.4.-30.6.88	3		400+1500 Sphär (130)	200	Geringe Datendichte, BB, DB, GT	
1.7.-30.9.88	7	543.1	800+960 Sphär (66)	150	Keine Messungen im nGB / wGB, Messungen im BB, DB u. oGB	32.9
1.10-31.12.88	10	1241.4	100+800 Sphär (80)	150	Geringe. Datenbasis, BB, DB u. oGB	34.7
1.1.-31.3.89	15	1216.9	200+800 Sphär (45)	120		24.4
1.4.-30.6.89	13	1000.7	350+1540 Sphär (80)	150	BB u. oGB	15.9
1.7.-30.9.89	15	1957.1	340+1230 Sphär (56)	150	BB, oGB, NO, LT	26.7
1.10-31.12.89	25	5411.8	300+1150 Sphär (150)	150	BB, oGB, DB, NO, FT	61.7
1.1.-31.3.90	2		800+3900 Sphär (150)	150	DB (104 m) u. GT (111 m), keine Messungen im südl. oGB, FT u. wGB, hohe Variationsbreite	
1.4.-30.6.90	1				GT (129 m), keine Messungen im BT, DB, nGB, wGB u. südl. oGB.	
1.7.-30.9.90	1				GT (124 m), keine Messung im BT, DB, südl. oGB, nGB u. wGB	
1.10-31.12.90	0				Keine Informationen aus BB, südl. oGB, nGB u. wGB (außer LT)	

Zeitraum	Anz. der Werte	Globale Varianz in m ²	Variogrammodell der 0 ml/l-Grenztiefen ⁴	Suchradius in km	Besonderheiten/Vorkommen ⁵	Standard-abw. bei Kreuzvalidation ⁶ in m
1.1.-31.3.91	22	192.9	68+66 Sphär (45)	100	oGB u. NO, Anpassung ohne Randwerte	11.6
1.4.-30.6.91	6	45.6	390+2200 Sphär (175)	150	oGB, hoher Gradient zum Randwert im LT	10.4
1.7.-30.9.91	2		750+3800 Sphär (150)	150	Umgebung GT(132/147 m)	
1.10-31.12.91	8	692.5	250+1600 Sphär (90)	90	oGB u.NO	39.3
1.1.-31.3.92	18	30.0	6.6+21 Sphär (80)	80	oGB, Anpassung ohne Randwerte	5.5
1.4.-30.6.92	6	65.6	150+750 Sphär (66)	90	Gebiet zw. GT u. FT	11.2
1.7.-30.9.92	5	11.3	140+980 Sphär (180)	150	Gebiet zw. GT u. FT	
1.10-31.12.92	12	37.6	120+1000 Sphär (90)	90	Gebiet zw. GT u. FT	9.2
1.1.-31.3.93	6	19.5	160+1020 Gauss (150)	150	Gebiet zw. GT u. FT	7.6
1.4.-30.6.93	8	73.6	200+800 Sphär (100)	100	Gebiet zw. GT u. FT	9.8
1.7.-30.9.93	8	138.6	360+1400 Gauss (150)	150	Südl. v. GT bis FT	5.5
1.10-31.12.93	8	831.3	650+800 Gauss (160)	140	oGB u. NO	34.3
1.1.-31.3.94	9	102.5	100+1350 Sphär (150)	120	oGB, gr. Gradient zum LT	8.4
1.4.-30.6.94	2				FT (131/154 m)	
1.7.-30.9.94	0					
1.10-31.12.94	0					
1.1.-31.3.95	2		2300 Sphär (150)	150	DB (90 u. 98 m)	
1.4.-30.6.95	2		2600 Sphär (64)	180	BB (69, 82 m)	
1.7.-30.9.95	6	99.7	2500 Sphär (160)	160	DB u. BB	6.8
1.10-31.12.95	4		880+3000 Sphär (150)	200	DB u. BB	
1.1.-31.3.96	12	3042.4	1100 Sphär (84)	100	BB, DB, GT, FT	14.8
1.4.-30.6.96	3		300+640 Gauss (80)	120	BS (74 m) u. FT (181/184 m)	
1.7.-30.9.96	13	2423.3	180+1100 Sphär (100)	120	BB u. oGB	22.2
1.10-31.12.96	13	1429.6	50+1000 Sphär (70)	200	BB u. oGB	10.0
1.1.-31.3.97	2		430+700 Sphär (100)	100	FT(168 m), GT(182 m)	
1.4.-30.6.97	5	393.1	500+1450 Sphär (150)	150	Umgebung v. GT	
1.7.-30.9.97	2		1900 Sphär (160)	160	BB (55 m) u. FT (151 m)	
1.10-31.12.97	7	318.6	420+1140 Sphär (98)	110	oGB	19.1
1.1.-31.3.98	5		300+1100 Sphär 100	100		
1.4.-30.6.98	10	2820	200+1500 Sphär 100	100		
1.7.-30.9.98	8	10700	200+400 Sphär 60	100		
1.10-31.12.98	19	2983	400+900 Sphär 80	100		10.2
1.1.-31.3.99	5		250+400 Sphär 30	30		
1.4.-30.6.99	30	760	80+300 Sphär 60	120		
1.7.-30.9.99	9	9918	300+200 Sphär 60	80		
1.10-31.12.99	18	1038	250+1000 Sphär 50	40		

Tabelle 5: Globale Varianzen, Variogrammodelle, Suchradien und Ergebnisse der Kreuzvalidation für die 0 ml/l-Grenztiefen aller Untersuchungsperioden.

Zeitraum	Grenzvariogramm der 2 ml/l-Grenztiefen	Suchradius der 2 ml/l-Grenztiefen in km	Grenzvariogramm der 0ml/l-Grenztiefen	Suchradius der 0 ml/l-Grenztiefen in km
1.1.69-31.3.69	0.036+0.064 Sphär(170)	200	0.006+0.053 Sphär (150)	150
1.4.69-30.6.69	0.04+0.044 Sphär (65)	150	0.06 Sphär (56)	55
1.7.69-30.9.69	0.04+0.116 Sphär (64)	64	0.004+0.035 Sphär (240)	280
1.10-31.12.69	0.03+0.14 Sphär (90)	90	0.008+0.06 Sphär (90)	90

Zeitraum	Grenzvariogramm der 2 ml/l-Grenztiefen	Suchradius der 2 ml/l-Grenztiefen in km	Grenzvariogramm der 0ml/l-Grenztiefen	Suchradius der 0 ml/l-Grenztiefen in km
1.1.-31.3.70	0.035+0.145 Sphär (55)	200	0.045 Sphär (60)	90
1.4.-30.6.70	0.02+0.1 Sphär (90)	100	0.005+0.066 Sphär (60)	100
1.7.-30.9.70	0.096+0.13 Sphär (99)	100	0.025 Sphär (54)	70
1.10-31.12.70	0.02+0.156 Sphär (60)	150	0.02 Sphär (63)	70
1.1.-31.3.71	0.039 Sphär (54)	55	Keine Messung	
1.4.-30.6.71	0.013+0.153Sphär (132)	140	0.016 Sphär (80)	140
1.7.-30.8.71	0.07+0.14 Sphär (102)	140	0.05+0.044 Sphär (48)	55
1.10.-31.12.71	0.12 Sphär (100)	130	0.102 Sphär (70)	130
1.1.72-31.3.72	0.066+0.144 Sphär (30)	160	0.06 Sphär (30)	90
1.4.-30.6.72	0.03+0.045 Sphär (50)	150	0.004+0.038 Sphär (40)	100
1.7.-30.9.72	0.025+0.075 Sphär (62)	150	0.05 Sphär (110)	160
1.10-31.12.72	0.04+0.125 Sphär (50)	160	0.02 Sphär (75)	120
1.1.-31.3.73	0.014+0.135 Sphär (145)	130	0.02 Sphär (86)	86
1.4.-30.6.73	0.012+0.116 Sphär (70)	150	0.0135 Sphär (60)	90
1.7.-30.9.73	0.08+0.133 Sphär (133)	150	0.029 Sphär (45)	100
1.10-31.12.73	0.105 Sphär (100)	150	Nur eine Messung	
1.1.-31.3.74	0.012+0.17 Sphär(95)	150	0.049 Sphär (100)	100
1.4.-30.6.74	0.03+0.152 Sphär (60)	150	0.029 Sphär (70)	120
1.7.-30.9.74	0.08+0.128 Sphär (58)	120	0.003+0.046 Sphär (70)	130
1.10-31.12.74	0.006 +0.14 Sphär (48)	100	0.039 Sphär (60)	120
1.1.-31.3.75	0.06+0.12 Sphär (150)	160	0.0225 Sphär (80)	100
1.4.-30.6.75	0.053+0.127 Sphär (92)	90	0.036+0.04 Sphär (94)	70
1.7.-30.9.75	0.075+0.115 Sphär (56)	90	0.05+0.084 Sphär (85)	80
1.10-31.12.75	0.015+0.166 Sphär (116)	150	0.015+0.018 Sphär (50)	80
1.1.-31.3.76	0.052 Sphär (80)	70	0.016 Sphär (108)	100
1.4.-30.6.76	0.03 Sphär(8.2)	80	0.0134 Sphär (55)	110
1.7.-30.9.76	0.015+0.078 Sphär (18.8)	120	0.036 Sphär (180)	160
1.10-31.12.76	0.03+0.087 Sphär (60)	140	0.053 Sphär (100)	150
1.1.-31.3.77	0.016 Sphär (90)	120	Nur eine Messung	
1.4.-30.6.77	0.035+0.103 Sphär (65)	60	Nur eine Messung	
1.7.-30.9.77	0.112+0.122 Sphär (80)	80	Nur eine Messung	
1.10-31.12.77	0.006+0.15 Sphär (150)	150	Nur eine Messung	
1.1.-31.3.78	0.009+0.094 Sphär (100)	100	Keine Messung	
1.4.-30.6.78	0.172 Sphär (120)	110	Nur eine Messung	
1.7.-30.9.78	0.1+0.094 Sphär (33)	90	0.033 +0.047 Sphär (150)	130
1.10-31.12.78	0.166 Sphär (130)	150	0.01+0.038 Sphär (60)	120
1.1.-31.3.79	0.15 Sphär (100)	200	0.014 Sphär (100)	130
1.4.-30.6.79	0.093+0.116 Sphär (16.5)	100	0.01+0.09 Sphär (60)	70
1.7.-30.9.79	0.103+0.13 Sphär (60)	80	0.012 +0.087 Sphär (42)	90
1.10-31.12.79	0.055+0.135 Sphär (140)	200	0.01+0.04 Sphär (120)	120
1.1.-31.3.80	0.06+0.035 Sphär(21)	120		120
1.4.-30.6.80	0.097+0.06 Sphär (80)	90	0.036+0.035 Sphär (60)	60
1.7.-30.9.80	0.012+0.16 Exp(54)	200	0.01+0.11 Sphär (200)	270
1.10-31.12.80	0.078+0.12 Sphär (90)	60	0.023+0.06 Sphär (170)	160
1.1.-31.3.81	0.063+0.152 Sphär (95)	100	0.036 Sphär (210)	150
1.4.-30.6.81	0.12+0.08 Sphär (39)	120		150
1.7.-30.9.81	0.137+0.09 Sphär (52)	80		150
1.10-31.12.81	0.082+0.146 Sphär (75)	90	0.1+0.034 Sphär (85)	80
1.1.-31.3.82	0.065+0.116 Sphär (78)	100	0.041 Sphär (52)	60
1.4.-30.6.82	0.126+0.088 Sphär (60)	100	0.026+0.072 Sphär (65)	120
1.7.-30.9.82	0.073+0.12 Sphär (21)	50	0.063+0.084 Sphär (50)	50
1.10-31.12.82	0.115+0.068 Sphär (36)	50	0.096+0.042 Sphär (100)	100
1.1.-31.3.83	0.13+0.031 Sphär (90)	90	0.02 Sphär (100)	110
1.4.-30.6.83	0.095+0.115 Sphär (250)	300	0.07 Sphär (150)	150
1.7.-30.9.83	0.103+0.11 Sphär (72)	120	0.1 Sphär (41)	130
1.10-31.12.83	0.09+0.1 Sphär (53)	120	0.002+0.0038 Sphär (70)	120
1.1.-31.3.84	0.145 Sphär (40)	75	0.0285 Sphär (150)	140
1.4.-30.6.84	0.06+0.14 Sphär (77)	80	0.006+0.02 Sphär (120)	110
1.7.-30.9.84	0.105+0.07 Sphär (62)	90	0.012+0.064 Sphär (180)	150
1.10-31.12.84	0.096+0.08 Sphär (33.6)	50	0.1+0.042 Sphär (100)	120

Zeitraum	Grenzvariogramm der 2 ml/l-Grenztiefen	Suchradius der 2 ml/l-Grenztiefen in km	Grenzvariogramm der 0 ml/l-Grenztiefen	Suchradius der 0 ml/l-Grenztiefen in km
1.1.-31.3.85	0.12 Sphär (120)	150	0.05 Sphär (145)	130
1.4.-30.6.85	0.055+0.135 Sphär (22)	70	0.036 Sphär (75)	120
1.7.-30.9.85	0.05+0.188 Sphär (52)	45	0.004+0.078 Sphär (125)	150
1.10-31.12.85	0.08+0.094 Sphär (39)	50	0.0215+0.026 Sphär (36)	120
1.1.-31.3.86	0.012+0.154 Sphär (105)	150	0.06+0.022 Sphär (120)	120
1.4.-30.6.86	0.165+0.038 Sphär (9)	15		70
1.7.-30.9.86	0.073+0.146 Sphär (55.5)	60	0.014+0.028 Sphär (140)	120
1.10-31.12.86	0.1+0.11 Sphär (49)	70	0.03+0.02 Sphär (150)	150
1.1.-31.3.87	0.017 + 0.064 Sphär (75)	75	Nur eine Messung	
1.4.-30.6.87	0.025+0.18 Sphär (65)	80	0.01+0.029 Sphär (80)	120
1.7.-30.9.87	0.025+0.18 Sphär (65)	50	0.063 Sphär (120)	120
1.10-31.12.87	0.01+0.05 Sphär (120)	200	0.03+0.032 Sphär (120)	120
1.1.-31.3.88	0.098+0.05 Sphär (80)	90	0.007+0.011 Sphär (100)	90
1.4.-30.6.88	0.028+0.172 Sphär (49)	130	0.025+0.028 Sphär (65)	150
1.7.-30.9.88	0.04+0.154 Sphär (80)	80	0.01+0.051 Sphär (60)	120
1.10-31.12.88	0.147 +0.07 Sphär (150)	150	0.055+0.055 Sphär (100)	150
1.1.-31.3.89	0.003+0.183 Sphär (185)	180	0.04+0.042 Sphär (37)	100
1.4.-30.6.89	0.126+0.065 Sphär (190)	180	0.013+0.073 Sphär (160)	150
1.7.-30.9.89	0.07+0.09 Sphär (90)	80	0.015+0.048 Sphär (80)	110
1.10-31.12.89	0.03+0.12 Sphär (15)	100	0.04+0.108 Sphär (150)	120
1.1.-31.3.90	0.234 Sphär (60)	100	0.007+0.063 Sphär (60)	120
1.4.-30.6.90	0.153 Sphär (110)	120		
1.7.-30.9.90	0.16 Sphär (200)	200		
1.10-31.12.90	0.12 Sphär (100)	140		
1.1.-31.3.91	0.15 Sphär (51)	150	0.09+0.1 Sphär (54)	120
1.4.-30.6.91	0.132+0.086 Sphär (136)	200	0.08 Sphär (90)	90
1.7.-30.9.91	0.194 Sphär (110)	120	0.03 Sphär (130)	150
1.10-31.12.91	0.036 +0.133 Sphär (66)	120	0.005+0.04 Sphär (60)	100
1.1.-31.3.92	0.02+0.075 Sphär (18)	150	0.025+0.062 Sphär (62)	150
1.4.-30.6.92	0.014+0.074 Sphär (126)	200	0.037 Sphär (210)	200
1.7.-30.9.92	0.16 + 0.08 Sphär (63)	150	0.014 Sphär (44)	140
1.10-31.12.92	0.06+0.117 Sphär (108)	140	0.003+0.036 Sphär (110)	100
1.1.-31.3.93	0.052 Sphär (194)	180	0.003 Sphär (80)	80
1.4.-30.6.93	0.04+0.076 Sphär (135)	200	0.021 Sphär (125)	100
1.7.-30.9.93	0.112+0.036 Sphär (165)	150	0.019+0.0135 Sphär (120)	150
1.10-31.12.93	0.069+0.04 Sphär (32)	50	0.02+0.02 Sphär (150)	150
1.1.-31.3.94	0.04+0.15 Sphär (83)	200	0.098 Sphär (50)	100
1.4.-30.6.94	0.09+0.124 Sphär (88)	200		
1.7.-30.9.94	0.26 Sphär (45)	60		
1.10-31.12.94	0.154 Sphär (110)	160		
1.1.-31.3.95	0.16 +0.06 Sphär (150)	200	0.024+0.009 Sphär (150)	150
1.4.-30.6.95	0.14+0.104 Sphär (75)	150	0.0244 Sphär (49)	150
1.7.-30.9.95	0.05+0.16 Sphär (40)	180	0.068+0.03 Sphär (90)	120
1.10-31.12.95	0.09+0.06 Sphär (120)	220	0.09+0.024 Sphär (100)	220
1.1.-31.3.96	0.015+0.16 Sphär (110)	180	0.019+0.063 Sphär (95)	150
1.4.-30.6.96	0.042+0.08 Sphär (96)	120		
1.7.-30.9.96	0.05+0.127 Sphär (90)	120	0.041+0.051 Sphär (120)	120
1.10-31.12.96	0.062+0.113 Sphär (112)	120	0.048+0.017 Sphär (60)	120
1.1.-31.3.97	0.045+0.075 Sphär (99)	120		
1.4.-30.6.97	0.161 Sphär (27)	100		
1.7.-30.9.97	0.02+0.22 Sphär (30)	160		
1.10-31.12.97	0.08+0.061 Sphär (55)	120	0.01+0.03 Sphär (40)	70
1.1.-31.3.98	0.134 Sphär (200)	150		
1.4.-30.6.98				
1.7.-30.9.98				
1.10-31.12.98	0.09 Sphär (120)	160	0.1 Sphär (120)	120

Tabelle 6: Indikatorvariogramme und Suchradien für das Indikator-Krigingverfahren der 2 ml/l und 0 ml/l—Grenztiefen aller Untersuchungsperioden.

Jahr	Saison	Fläche mit Sauerstoffmangel in 1000 km ²			Volumen mit Sauerstoffmangel in 1000 km ³		
		Fläche	Minimum ⁷	Maximum	Volumen	Minimum	Maximum
1969	Januar-März	67.490	61.567	74.765	2.620	2.273	3.002
	April-Juni	66.082	60.182	72.922	2.673	2.249	3.142
	Juli-September	65.215	56.44	78.950	2.724	2.230	3.307
	Oktober-Dezember	65.521	58.049	74.442	2.525	2.146	2.953
1970	Januar-März	63.001	47.612	77.779	2.241	1.634	3.025
	April-Juni	70.663	63.548	78.430	2.663	2.293	3.076
	Juli-September	76.873	67.829	86.124	2.700	2.310	3.141
	Oktober-Dezember	72.417	65.333	81.080	2.661	2.277	3.089
1971	Januar-März	68.226	60.167	79.458	2.455	2.093	2.901
	April-Juni	73.137	65.522	80.669	2.454	2.095	2.854
	Juli-September	72.758	68.550	77.368	2.538	2.335	2.754
	Oktober-Dezember	74.558	64.658	84.953	2.637	2.181	3.162
1972	Januar-März	63.390	55.489	71.752	1.977	1.687	2.313
	April-Juni	57.099	52.146	62.940	2.191	1.952	2.455
	Juli-September	55.846	51.281	61.599	2.187	1.959	2.437
	Oktober-Dezember	68.827	56.004	89.983	2.488	1.918	3.219
1973	Januar-März	67.606	58.108	78.400	2.177	1.776	2.644
	April-Juni	69.478	63.885	75.646	2.551	2.275	2.852
	Juli-September	74.128	65.247	84.673	2.664	2.214	3.176
	Oktober-Dezember	57.132	51.171	63.454	2.039	1.784	2.327
1974	Januar-März	61.684	43.613	87.882	2.214	1.404	3.357
	April-Juni	66.599	49.048	84.853	2.053	1.405	2.899
	Juli-September	73.173	64.169	83.706	2.663	2.230	3.163
	Oktober-Dezember	69.908	62.371	79.202	2.714	2.318	3.267
1975	Januar-März	71.534	63.152	79.769	2.250	1.940	2.603
	April-Juni	60.801	53.128	68.318	2.042	1.759	2.364
	Juli-September	74.223	63.593	85.491	2.451	1.978	3.002
	Oktober-Dezember	66.645	58.037	75.466	2.210	1.880	2.587
1976	Januar-März	45.956	39.951	54.349	1.659	1.416	1.945
	April-Juni	51.985	43.647	63.272	1.866	1.513	2.291
	Juli-September	51.986	38.904	79.394	1.834	1.287	2.642
	Oktober-Dezember	45.444	34.794	72.009	1.483	1.111	2.063
1977	Januar-März	42.984	34.454	65.544	1.684	1.263	2.291
	April-Juni	58.922	48.761	71.364	2.002	1.585	2.509
	Juli-September	61.572	47.512	83.199	2.083	1.506	2.853
	Oktober-Dezember	67.606	57.295	77.424	2.378	1.975	2.852
1978	Januar-März	63.503	56.03	71.247	2.138	1.848	2.473
	April-Juni	63.309	53.088	73.322	2.084	1.714	2.524
	Juli-September	54.380	43.182	72.469	1.988	1.566	2.542
	Oktober-Dezember	74.626	55.730	95.190	2.398	1.707	3.306
1979	Januar-März	56.655	45.471	72.506	1.968	1.539	2.527
	April-Juni	53.303	44.271	65.028	1.715	1.408	2.091
	Juli-September	60.532	52.584	73.261	2.245	1.887	2.681
	Oktober-Dezember	67.635	56.744	82.329	2.305	1.814	2.899
1980	Januar-März	52.829	45.606	61.323	1.920	1.580	2.305
	April-Juni	50.556	49.369	66.847	1.921	1.678	2.567
	Juli-September	41.892	28.736	61.694	1.224	0.858	1.760
	Oktober-Dezember	57.580	44.961	78.814	2.081	1.560	2.771
1981	Januar-März	40.962	30.580	51.180	1.162	0.859	1.555
	April-Juni	50.297	41.790	59.359	1.568	1.260	1.934

⁷ Die minimalen und maximalen Flächen und Volumen entstehen durch Subtraktion und Addition der Krigestandardabweichungen zu den Schätzwerten an jedem Gitterpunkt (Kapitel 3.4).

Jahr	Saison	Fläche mit Sauerstoffmangel in 1000 km ²			Volumen mit Sauerstoffmangel in 1000 km ³		
		Fläche	Minimum ⁷	Maximum	Volumen	Minimum	Maximum
1982	Juli-September	64.380	46.373	82.911	1.989	1.373	2.809
	Oktober-Dezember	62.572	53.157	70.774	2.162	1.738	2.651
	Januar-März	59.557	50.917	67.360	2.012	1.679	2.392
	April-Juni	64.533	55.093	74.791	2.130	1.750	2.569
1983	Juli-September	59.621	47.639	74.897	1.912	1.498	2.428
	Oktober-Dezember	59.318	49.567	73.449	1.769	1.404	2.213
	Januar-März	45.395	32.849	69.519	1.610	1.064	2.415
	April-Juni	43.531	36.383	54.255	1.663	1.360	2.031
1984	Juli-September	53.687	45.200	68.327	1.818	1.453	2.269
	Oktober-Dezember	48.482	39.549	60.689	1.437	1.084	1.869
	Januar-März	42.352	34.306	54.383	1.310	1.039	1.655
	April-Juni	38.716	29.030	53.902	1.138	0.849	1.533
1985	Juli-September	52.844	37.447	79.657	1.462	1.002	2.141
	Oktober-Dezember	50.317	34.805	77.050	1.372	0.908	2.072
	Januar-März	43.482	32.967	63.514	1.393	1.041	1.917
	April-Juni	43.454	30.995	60.282	1.178	0.818	1.691
1986	Juli-September	47.465	39.63	58.541	1.241	0.973	1.510
	Oktober-Dezember	37.609	25.071	62.119	0.989	0.670	1.491
	Januar-März	51.332	42.146	62.641	1.720	1.382	2.123
	April-Juni	44.347	32.402	64.215	1.480	1.066	1.722
1987	Juli-September	58.779	44.954	84.525	2.020	1.478	2.776
	Oktober-Dezember	56.207	47.516	68.278	1.724	1.409	2.101
	Januar-März	30.800	18.349	68.729	0.850	0.477	1.564
	April-Juni	45.102	34.281	60.020	1.093	0.834	1.445
1988	Juli-September	39.914	22.185	69.983	0.791	0.448	1.412
	Oktober-Dezember	56.438	37.614	83.283	1.822	1.133	2.847
	Januar-März	30.359	23.649	44.296	0.861	0.669	1.140
	April-Juni	46.828	29.542	71.942	1.227	0.826	1.903
1989	Juli-September	62.106	50.131	78.847	1.558	1.239	1.967
	Oktober-Dezember	72.370	54.258	92.244	2.074	1.396	2.963
	Januar-März	60.143	47.777	71.458	1.732	1.376	2.174
	April-Juni	60.965	48.011	75.941	1.697	1.367	2.113
1990	Juli-September	73.997	60.082	93.398	2.134	1.653	2.760
	Oktober-Dezember	62.506	45.044	90.564	1.883	1.311	2.759
	Januar-März	23.556	12.752	50.497	0.693	0.401	1.280
	April-Juni	17.657	4.281	118.646	0.526	0.182	3.100
1991	Juli-September	36.484	22.218	64.054	1.057	0.646	1.799
	Oktober-Dezember	7.862	1.907	61.38	0.114	0.048	0.857
	Januar-März	31.258	23.424	43.398	0.982	0.712	1.352
	April-Juni	31.922	25.922	46.038	1.468	1.187	1.848
1992	Juli-September	29.065	20.626	42.924	0.850	0.631	1.167
	Oktober-Dezember	29.059	19.893	49.869	0.865	0.572	1.334
	Januar-März	25.836	22.494	30.254	0.889	0.732	1.069
	April-Juni	23.174	19.588	26.633	0.755	0.613	0.920
1993	Juli-September	34.843	29.411	42.808	1.004	0.839	1.203
	Oktober-Dezember	42.599	37.542	49.569	1.273	1.087	1.487
	Januar-März	14.911	12.891	17.680	0.497	0.401	0.609
	April-Juni	16.652	13.863	19.870	0.568	0.456	0.702
1994	Juli-September	22.143	15.602	32.674	0.643	0.432	0.946
	Oktober-Dezember	25.835	20.113	33.046	0.681	0.522	0.885
	Januar-März	20.703	18.412	23.825	0.680	0.587	0.785
	April-Juni	19.303	15.812	24.707	0.621	0.498	0.778
	Juli-September	29.690	23.008	41.504	0.881	0.695	1.134
	Oktober-Dezember	49.771	38.656	62.018	1.448	1.140	1.841

Jahr	Saison	Fläche mit Sauerstoffmangel in 1000 km ²			Volumen mit Sauerstoffmangel in 1000 km ³		
		Fläche	Minimum ⁷	Maximum	Volumen	Minimum	Maximum
1995	Januar-März	48.741	37.977	59.116	1.367	1.063	1.744
	April-Juni	32.451	26.658	39.322	0.986	0.830	1.176
	Juli-September	52.745	42.808	61.812	1.390	1.151	1.674
	Oktober-Dezember	45.799	40.379	52.155	1.213	1.064	1.384
1996	Januar-März	34.789	29.532	41.148	1.132	0.958	1.377
	April-Juni	38.189	34.029	43.107	1.358	1.188	1.548
	Juli-September	42.933	37.806	49.248	1.482	1.261	1.735
	Oktober-Dezember	42.933	37.806	49.248	1.482	1.261	1.735
1997	Januar-März	30.916	22.486	42.713	0.906	0.659	1.248
	April-Juni	37.119	30.826	45.746	1.317	1.109	1.574
	Juli-September	59.284	37.384	83.649	1.767	1.038	2.861
	Oktober-Dezember	30.770	22.310	43.622	0.714	0.512	1.003
1998	Januar-März	43.020			1.371		
	April-Juni	71.192			2.449		
	Juli-September	33.282			1.256		
	Oktober-Dezember	36.630			0.978		
1999	Januar-März	55.526			2.200		
	April-Juni	75.152			2.753		
	Juli-September	71.765			2.528		
	Oktober-Dezember	47.538			1.707		

Tabelle 7: Flächen und Volumen mit Sauerstoffmangel in den Untersuchungsperioden der Jahre 1969-1999⁸.

Jahr	Saison	Flächen mit Schwefelwasserstoffbildung in 1000 km ²			Volumen mit Schwefelwasserstoffbildung in 1000 km ³		
		Fläche	Minimum ⁹	Maximum	Volumen	Minimum	Maximum
1969	Januar-März	8.561	3.469	15.883	0.185	0.070	0.428
	April-Juni	6.134	2.562	12.154	0.150	0.064	0.349
	Juli-September	2.588	1.935	3.401	0.064	0.042	0.096
	Oktober-Dezember	11.752	4.491	23.508	0.317	0.131	0.776
1970	Januar-März	0.798	0.349	2.155	0.027	0.016	0.054
	April-Juni	0.753	0.666	2.305	0.015	0.014	0.036
	Juli-September	7.792	2.465	13.72	0.149	0.042	0.396
	Oktober-Dezember	7.156	2.356	14.677	0.149	0.058	0.411
1971	Januar-März						
	April-Juni	0.167	0.167	0.167	0.002	0.002	0.002
	Juli-September	1.179	0.370	1.900	0.010	0.003	0.024
	Oktober-Dezember	3.587	0.200	11.469	0.027	0.002	0.197
1972	Januar-März	2.197	1.719	2.909	0.048	0.036	0.073
	April-Juni	3.470	1.922	6.614	0.079	0.036	0.164
	Juli-September	6.060	2.944	10.331	0.137	0.063	0.278
	Oktober-Dezember	10.174	5.397	15.297	0.301	0.185	0.496
1973	Januar-März	2.426	1.507	3.966	0.060	0.042	0.096
	April-Juni	0.770	0.401	2.151	0.030	0.018	0.060
	Juli-September	1.453	0.267	3.552	0.011	0.001	0.053
	Oktober-Dezember	0.162			0.002		
1974	Januar-März	0.702	0.520	1.919	0.011	0.008	0.028
	April-Juni	2.915	1.428	5.447	0.064	0.028	0.149

⁸ Bei fehlenden Angaben war die Datenbasis zur Berechnung nicht gegeben.

⁹ Die Berechnung der minimalen und maximalen Flächen und Volumen werden in Kapitel 3.4 erläutert.

Jahr	Saison	Flächen mit Schwefelwasserstoffbildung in 1000 km ²			Volumen mit Schwefelwasserstoffbildung in 1000 km ³		
		Fläche	Minimum ⁹	Maximum	Volumen	Minimum	Maximum
1975	Juli-September	2.979	0.966	5.967	0.052	0.020	0.133
	Oktober-Dezember	0.427	0.189	0.876	0.005	0.002	0.012
	Januar-März	1.029	0.525	1.639	0.016	0.006	0.039
	April-Juni	2.111	0.865	5.121	0.019	0.012	0.096
1976	Juli-September	3.789	1.348	10.545	0.072	0.022	0.283
	Oktober-Dezember	0.747	0.315	1.827	0.008	0.003	0.022
	Januar-März	3.294	2.217	5.170	0.107	0.069	0.173
	April-Juni	0.433	0.287	1.174	0.006	0.003	0.016
1977	Juli-September	1.468	0.245	5.074	0.014	0.001	0.079
	Oktober-Dezember	0.019	0.0032	0.150	0.000	0	0.001
	Januar-März	0			0		
	April-Juni	0			0		
1978	Juli-September	0			0		
	Oktober-Dezember	0			0		
	Januar-März	0			0		
	April-Juni	0			0		
1979	Juli-September	0.589	0.368	3.098	0.007	0.004	0.027
	Oktober-Dezember	3.121	0.986	5.323	0.034	0.007	0.105
	Januar-März	0.072	0.018	0.533	0.000	0	0.004
	April-Juni	0.698	0.386	1.686	0.006	0.003	0.027
1980	Juli-September	2.338	0.202	6.289	0.021	0.002	0.159
	Oktober-Dezember	1.486	0.619	2.982	0.018	0.008	0.045
	Januar-März	3.070	1.774	4.869	0.065	0.034	0.127
	April-Juni	0.830	0.611	1.370	0.009	0.007	0.019
1981	Juli-September	8.628	4.249	16.176	0.187	0.085	0.419
	Oktober-Dezember	8.679	4.74	15.791	0.216	0.121	0.415
	Januar-März	0.823	0.402	1.897	0.018	0.010	0.036
	April-Juni	0.900	0.414	1.771	0.010	0.005	0.024
1982	Juli-September	4.531	2.171	7.433	0.085	0.039	0.189
	Oktober-Dezember	7.614	1.806	21.813	0.145	0.023	0.599
	Januar-März	6.209	3.463	10.433	0.133	0.075	0.253
	April-Juni	9.946	7.083	12.247	0.258	0.139	0.412
1983	Juli-September	10.342	4.537	17.161	0.253	0.116	0.533
	Oktober-Dezember	11.476	5.744	22.983	0.339	0.167	0.682
	Januar-März	12.293	8.775	15.499	0.356	0.237	0.513
	April-Juni	3.803	2.884	4.965	0.153	0.117	0.203
1984	Juli-September	11.738	6.164	21.245	0.343	0.158	0.706
	Oktober-Dezember	4.558	3.676	5.500	0.183	0.139	0.238
	Januar-März	7.484	4.922	10.494	0.214	0.126	0.351
	April-Juni	3.504	2.509	4.999	0.103	0.069	0.152
1985	Juli-September	7.953	2.795	15.317	0.171	0.067	0.443
	Oktober-Dezember	5.082	2.179	10.461	0.126	0.040	0.332
	Januar-März	5.492	2.798	9.866	0.168	0.077	0.340
	April-Juni	3.972	2.583	5.751	0.112	0.063	0.186
1986	Juli-September	2.976	1.305	5.977	0.064	0.029	0.151
	Oktober-Dezember	2.609	1.466	4.438	0.059	0.030	0.115
	Januar-März	6.322	1.566	9.503	0.179	0.030	0.510
	April-Juni	4.695	2.813	7.996	0.131	0.078	0.235
1987	Juli-September	9.397	3.554	14.484	0.214	0.049	0.574
	Oktober-Dezember	4.601	2.813	7.443	0.172	0.086	0.320
	Januar-März						
	April-Juni	1.936	1.697	2.114	0.056	0.046	0.069
	Juli-September	1.547	0.541	5.880	0.020	0.009	0.114

Jahr	Saison	Flächen mit Schwefelwasserstoffbildung in 1000 km ²			Volumen mit Schwefelwasserstoffbildung in 1000 km ³		
		Fläche	Minimum ⁹	Maximum	Volumen	Minimum	Maximum
1988	Oktober-Dezember	5.388	4.154	7.043	0.122	0.095	0.175
	Januar-März	0.368	0.368	0.368	0.003	0.003	0.003
	April-Juni	0.360	0.360	0.360	0.003	0.003	0.003
	Juli-September	7.472	3.640	11.454	0.175	0.080	0.387
1989	Oktober-Dezember	5.076	1.555	10.079	0.071	0.024	0.215
	Januar-März	4.154	1.379	10.397	0.105	0.044	0.293
	April-Juni	5.118	1.805	10.752	0.130	0.047	0.352
	Juli-September	7.493	2.566	13.577	0.225	0.080	0.552
1990	Oktober-Dezember	13.739	4.502	21.918	0.317	0.104	0.755
	Januar-März						
	April-Juni						
	Juli-September						
1991	Oktober-Dezember						
	Januar-März	8.943	6.952	11.181	0.243	0.174	0.331
	April-Juni	3.158	1.642	6.522	0.116	0.050	0.244
	Juli-September	1.897	1.018	2.821	0.071	0.025	0.157
1992	Oktober-Dezember	4.078	1.826	7.948	0.105	0.045	0.257
	Januar-März	6.899	5.566	8.369	0.185	0.145	0.235
	April-Juni	5.109	2.942	8.276	0.158	0.086	0.296
	Juli-September	6.411	3.672	10.313	0.195	0.101	0.361
1993	Oktober-Dezember	7.909	4.453	11.832	0.234	0.117	0.442
	Januar-März	5.761	4.085	8.351	0.170	0.105	0.266
	April-Juni	7.144	4.01	11.228	0.188	0.081	0.383
	Juli-September	0	0	0	0.192	0	0
1994	Oktober-Dezember	0.818	0.363	2.304	0.014	0.012	0.037
	Januar-März	5.903	4.531	8.228	0.154	0.098	0.231
	April-Juni	0.0325			0.000		
	Juli-September	0			0		
1995	Oktober-Dezember	0			0		
	Januar-März	0	0.012	6.214	0.006	0	0.068
	April-Juni	0.345	0.001	2.506	0.001	0	0.045
	Juli-September	2.422	0.373	5.112	0.018	0.002	0.094
1996	Oktober-Dezember	1.708	0.163	3.816	0.012	0.001	0.110
	Januar-März	2.027	0.677	3.676	0.019	0.003	0.057
	April-Juni	0	0.050	1.276	0.003	0.001	0.010
	Juli-September	3.115	0.506	7.113	0.030	0.003	0.132
1997	Oktober-Dezember	5.682	2.064	10.183	0.103	0.032	0.259
	Januar-März	0.256	0.010	0.726	0.002	0.000	0.048
	April-Juni	2.547	0.297	19.348	0.038	0.003	0.220
	Juli-September	0.676	0.238	5.290	0.004	0.002	0.046
1998	Oktober-Dezember	0.435	0.380	1.288	0.003	0.003	0.012
	Januar-März	4.085			0.089		
	April-Juni	4.003			0.088		
	Juli-September	4.874			0.129		
1999	Oktober-Dezember	7.222			0.177		
	Januar-März	5.890			0.155		
	April-Juni	6.976			0.143		
	Juli-September	10.361			0.305		
1999	Oktober-Dezember	4.003			0.088		

Tabelle 8: Flächen und Volumen mit Schwefelwasserstoffbildung in den Untersuchungsperioden der Jahre 1969-1999.

Jahr	Saison	Gebiete mit Sauerstoffmangel				Gebiete mit Schwefelwasserstoffbildung			
		Fläche in 1000 km ²		Volumen in 1000 km ³		Fläche in 1000 km ²		Volumen in 1000 km ³	
		Vor	Nach	Vor	Nach	Vor	Nach	Vor	Nach
		der Korrektur ¹⁰				der Korrektur			
1969	Januar-März	75.866	67.490	2.715	2.620	8.779	8.561	0.188	0.185
	April-Juni	70.925	66.082	2.732	2.673	6.892	6.134	0.160	0.150
	Juli-September	89.555	65.215	3.164	2.724	3.632	2.588	0.085	0.065
	Oktober-Dezember	74.974	65.521	2.683	2.525	12.269	11.752	0.325	0.317
1970	Januar-März	63.636	63.001	2.247	2.241	1.017	0.798	0.031	0.027
	April-Juni	78.529	70.663	2.811	2.663	0.753	0.753	0.015	0.015
	Juli-September	81.908	76.873	2.759	2.700	8.264	7.792	0.165	0.149
	Oktober-Dezember	85.325	72.417	2.839	2.661	7.283	7.156	0.149	0.149
1971	Januar-März	81.868	68.226	2.881	2.455	0.000	0.000	0.000	0.000
	April-Juni	77.714	73.137	2.683	2.454	0.291	0.167	0.003	0.002
	Juli-September	80.774	72.758	2.793	2.538	2.296	1.179	0.017	0.010
	Oktober-Dezember	76.271	74.558	2.671	2.637	3.587	3.587	0.027	0.027
1972	Januar-März	63.390	63.390	2.310	1.977	2.197	2.197	0.049	0.049
	April-Juni	73.697	57.099	2.430	2.191	3.884	3.470	0.085	0.079
	Juli-September	72.792	55.846	2.567	2.187	6.060	6.060	0.137	0.137
	Oktober-Dezember	91.123	68.827	3.174	2.488	10.457	10.174	0.304	0.301
1973	Januar-März	71.611	67.606	2.503	2.177	2.426	2.426	0.060	0.060
	April-Juni	76.627	69.478	2.732	2.551	0.885	0.770	0.032	0.030
	Juli-September	75.361	74.128	2.646	2.664	1.453	1.453	0.011	0.011
	Oktober-Dezember	77.185	57.132	2.853	2.039	0.162	0.162	0.002	0.002
1974	Januar-März	60.677	61.684	2.197	2.214	0.702	0.702	0.007	0.007
	April-Juni	73.843	66.599	2.295	2.053	2.915	2.915	0.064	0.064
	Juli-September	81.417	73.173	2.734	2.663	4.296	2.979	0.065	0.052
	Oktober-Dezember	79.226	69.908	2.857	2.714	0.473	0.427	0.005	0.005
1975	Januar-März	74.348	71.534	2.275	2.250	1.029	1.029	0.012	0.012
	April-Juni	62.518	60.801	2.095	2.042	2.120	2.111	0.020	0.020
	Juli-September	78.283	74.223	2.504	2.451	4.202	3.789	0.120	0.072
	Oktober-Dezember	73.759	66.645	2.283	2.210	1.901	0.747	0.024	0.008
1976	Januar-März	68.196	45.956	2.014	1.659	3.294	3.294	0.102	0.102
	April-Juni	64.547	51.985	1.973	1.866	0.570	0.433	0.009	0.006
	Juli-September	62.717	51.986	1.935	1.834	1.514	1.468	0.015	0.014
	Oktober-Dezember	55.680	45.444	1.566	1.483	0.020	0.020	0.000	0.000
1977	Januar-März	64.461	42.984	2.028	1.684	0.000	0.000	0.000	0.000
	April-Juni	68.409	58.922	2.144	2.002	0.000	0.000	0.000	0.000
	Juli-September	70.919	61.572	2.269	2.083	0.000	0.000	0.000	0.000
	Oktober-Dezember	69.054	67.606	2.390	2.378	0.000	0.000	0.000	0.000
1978	Januar-März	70.658	63.503	2.242	2.138	0.000	0.000	0.000	0.000
	April-Juni	71.474	63.309	2.198	2.084	0.000	0.000	0.000	0.000
	Juli-September	67.493	54.380	2.282	1.988	2.807	0.589	0.021	0.007
	Oktober-Dezember	79.553	74.626	2.561	2.398	3.331	3.121	0.039	0.035
1979	Januar-März	63.119	56.655	2.025	1.968	0.124	0.072	0.001	0.000
	April-Juni	60.359	53.303	1.960	1.715	0.545	0.545	0.004	0.004
	Juli-September	74.316	60.532	2.407	2.245	2.338	2.338	0.021	0.021
	Oktober-Dezember	76.588	67.635	2.413	2.305	2.036	1.486	0.026	0.018
1980	Januar-März	54.518	52.829	1.933	1.920	3.751	3.070	0.071	0.065
	April-Juni	50.556	0.000	1.921	0.000	2.111	0.830	0.023	0.009
	Juli-September	45.199	41.892	1.268	1.224	10.400	8.628	0.210	0.187
	Oktober-Dezember	64.241	57.580	2.367	2.081	11.440	8.679	0.256	0.216

¹⁰ Die Korrektur bezieht sich auf die Einbeziehung der Informationen des Indikator-Kriging-Verfahrens (Kapitel 3.4).

Jahr	Saison	Gebiete mit Sauerstoffmangel				Gebiete mit Schwefelwasserstoffbildung			
		Fläche in 1000 km ²		Volumen in 1000 km ³		Fläche in 1000 km ²		Volumen in 1000 km ³	
		Vor	Nach	Vor	Nach	Vor	Nach	Vor	Nach
		der Korrektur ¹⁰				der Korrektur			
1981	Januar-März	42.306	40.962	1.210	1.162	0.849	0.823	0.018	0.018
	April-Juni	53.910	50.297	1.747	1.568	1.289	0.900	0.018	0.010
	Juli-September	64.649	64.380	1.991	1.989	6.571	4.531	0.110	0.085
	Oktober-Dezember	63.085	62.572	2.195	2.162	8.531	7.614	0.150	0.145
1982	Januar-März	68.639	59.557	2.120	2.012	6.209	6.209	0.132	0.133
	April-Juni	69.763	64.533	2.182	2.130	10.270	9.946	0.270	0.258
	Juli-September	78.939	59.621	2.559	1.912	14.823	10.342	0.312	0.253
	Oktober-Dezember	80.373	59.318	2.538	1.769	19.483	11.476	0.512	0.339
1983	Januar-März	55.729	45.395	1.714	1.610	12.293	12.293	0.375	0.356
	April-Juni	53.544	43.531	1.784	1.663	5.757	3.803	0.195	0.153
	Juli-September	67.131	53.687	2.014	1.818	11.738	11.738	0.343	0.343
	Oktober-Dezember	62.398	48.482	1.677	1.437	7.141	4.558	0.226	0.183
1984	Januar-März	50.037	42.352	1.406	1.310	7.589	7.484	0.215	0.214
	April-Juni	49.741	38.716	1.313	1.138	4.106	3.504	0.108	0.103
	Juli-September	72.289	52.844	1.703	1.462	7.953	7.953	0.166	0.171
	Oktober-Dezember	65.332	50.317	1.638	1.372	5.474	5.082	0.132	0.126
1985	Januar-März	53.746	43.482	1.486	1.393	5.492	5.492	0.168	0.168
	April-Juni	60.999	43.454	1.528	1.178	4.202	3.972	0.116	0.112
	Juli-September	76.530	47.465	1.871	1.241	2.976	2.976	0.064	0.064
	Oktober-Dezember	63.540	37.609	1.596	0.989	4.012	2.609	0.087	0.060
1986	Januar-März	55.326	51.332	1.781	1.720	6.829	6.322	0.183	0.179
	April-Juni	58.219	44.347	1.781	1.480	6.394	4.695	0.155	0.131
	Juli-September	80.204	58.779	2.341	2.020	9.397	9.397	0.214	0.214
	Oktober-Dezember	82.275	56.207	2.257	1.724	8.056	4.601	0.226	0.172
1987	Januar-März	61.633	30.800	1.719	0.850	0.000	0.000	0.000	0.000
	April-Juni	60.383	45.102	1.739	1.093	2.044	1.936	0.044	0.057
	Juli-September	78.172	39.914	1.952	0.791	2.188	1.547	0.041	0.020
	Oktober-Dezember	58.086	56.438	1.835	1.822	8.315	5.388	0.188	0.122
1988	Januar-März	69.115	30.359	2.118	0.861	0.450	0.368	0.004	0.003
	April-Juni	52.450	46.828	1.695	1.227	2.932	0.360	0.072	0.003
	Juli-September	102.741	62.106	2.982	1.558	11.082	7.472	0.176	0.175
	Oktober-Dezember	76.158	72.370	2.089	2.074	6.226	5.076	0.081	0.071
1989	Januar-März	62.658	60.143	1.765	1.732	4.369	4.154	0.109	0.105
	April-Juni	63.595	60.965	1.748	1.697	5.261	5.118	0.134	0.130
	Juli-September	86.302	73.997	2.285	2.134	8.493	7.493	0.225	0.225
	Oktober-Dezember	71.745	62.506	1.994	1.883	14.203	13.739	0.320	0.317
1990	Januar-März	32.796	23.556	0.912	0.693				
	April-Juni	39.153	17.657	1.265	0.526				
	Juli-September	46.390	36.484	1.304	1.057				
	Oktober-Dezember	29.833	7.862	0.827	0.114				
1991	Januar-März	32.745	31.258	0.997	0.982	9.294	8.943	0.245	0.243
	April-Juni	45.054	31.922	1.636	1.468	3.392	3.158	0.118	0.116
	Juli-September	34.521	29.065	0.967	0.850	2.514	1.897	0.081	0.071
	Oktober-Dezember	50.223	29.059	1.388	0.865	4.078	4.078	0.105	0.105
1992	Januar-März	30.641	25.836	0.944	0.889	7.331	6.899	0.203	0.185
	April-Juni	23.360	23.174	0.758	0.755	5.109	5.109	0.158	0.158
	Juli-September	35.360	34.843	1.005	1.004	6.633	6.411	0.200	0.195
	Oktober-Dezember	57.233	42.599	1.435	1.273	7.909	7.909	0.234	0.234
1993	Januar-März	15.252	14.911	0.498	0.497	5.761	5.761	0.170	0.170
	April-Juni	16.652	16.652	0.568	0.568	7.144	7.144	0.188	0.188
	Juli-September	22.143	22.143	0.643	0.643	12.723	12.723	0.192	0.192
	Oktober-Dezember	26.637	25.835	0.706	0.681	1.400	0.818	0.025	0.014

Jahr	Saison	Gebiete mit Sauerstoffmangel				Gebiete mit Schwefelwasserstoffbildung			
		Fläche in 1000 km ²		Volumen in 1000 km ³		Fläche in 1000 km ²		Volumen in 1000 km ³	
		Vor	Nach	Vor	Nach	Vor	Nach	Vor	Nach
		der Korrektur ¹⁰				der Korrektur			
1994	Januar-März	22.828	20.703	0.715	0.680	5.976	5.903	0.157	0.154
	April-Juni	21.632	19.303	0.673	0.621	0.033	0.033	0.000	0.000
	Juli-September	38.755	29.690	1.240	0.881	0.000	0.000	0.000	0.000
	Oktober-Dezember	51.326	49.771	1.488	1.448	0.000	0.000	0.000	0.000
1995	Januar-März	56.619	48.741	1.529	1.367	0.968	0.000	0.006	0.006
	April-Juni	32.451	32.451	0.986	0.986	0.662	0.345	0.003	0.001
	Juli-September	52.993	52.745	1.392	1.390	3.002	2.422	0.019	0.018
	Oktober-Dezember	45.799	45.799	1.213	1.213	2.427	1.708	0.017	0.012
1996	Januar-März	35.268	34.789	1.133	1.132	3.217	2.027	0.024	0.019
	April-Juni	40.509	38.189	1.384	1.358	0.120	0.000	0.003	0.003
	Juli-September	43.523	42.933	1.488	1.482	3.115	3.115	0.030	0.030
	Oktober-Dezember	44.848	42.933	1.372	1.482	6.206	5.682	0.106	0.103
1997	Januar-März	32.388	30.916	0.922	0.906	0.256	0.256	0.002	0.002
	April-Juni	42.093	37.119	1.410	1.317	2.712	2.547	0.039	0.038
	Juli-September	59.600	59.284	1.771	1.767	0.969	0.676	0.007	0.004
	Oktober-Dezember	37.365	30.770	0.819	0.714	0.920	0.435	0.006	0.003
1998	Januar-März		43.020		1.371		4.085		0.089
	April-Juni		71.192		2.449		4.003		0.088
	Juli-September		33.282		1.256		4.874		0.129
	Oktober-Dezember		36.630		0.978		7.222		0.177
1999	Januar-März		55.526		2.200		5.890		0.155
	April-Juni		75.152		2.753		6.976		0.143
	Juli-September		71.765		2.528		10.361		0.305
	Oktober-Dezember		47.538		1.707		4.003		0.088

Tabelle 9: Vergleich der berechneten Flächen und Volumeneinheiten der Bereiche mit geringen Sauerstoffkonzentrationen und Schwefelwasserstoffbildung in den Untersuchungsperioden der Jahre 1969-1999 vor und nach Einführung des Indikator-Kriging-Verfahrens.

Jahr	Saison	Anteil der Krigestandardabweichungen ¹¹ (in Prozent), die bei der Berechnung der 2 ml/l-Grenztiefen				0 ml/l-Grenztiefen unter	
		<5m	<8m	<15m	<25m blieben.		
1969	Januar-März	23.4	100.0	0.0	96.0		
	April-Juni	45.5	98.8	0.0	66.7		
	Juli-September	0.0	41.0	42.9	100.0		
	Oktober-Dezember	0.5	100.0	9.8	48.8		
1970	Januar-März	3.5	11.5	0.0	100.0		
	April-Juni	34.2	100.0				
	Juli-September	53.5	100.0	16.7	62.5		
	Oktober-Dezember	0.0	100.0	20.0	35.0		
1971	Januar-März	29.3	97.1				
	April-Juni	20.6	100.0				
	Juli-September	100.0	100.0	100.0	100.0		
	Oktober-Dezember	0.0	100.0	0.0	66.7		
1972	Januar-März	55.2	97.9	0.0	100.0		
	April-Juni	100.0	100.0	0.0	100.0		
	Juli-September	92.2	100.0	0.0	100.0		
	Oktober-Dezember	7.6	24.2	0.0	100.0		

¹¹ Angegeben wird der Anteil der Gitterpunkte, deren Krigestandardabweichungen unterhalb der Schwellenwerte 5 m, 8 m, 15 m und 25 m liegen. In die Auswertung werden nur die Gitterpunkte mit Sauerstoffmangel bzw. Schwefelwasserstoffbildung über dem Meeresboden einbezogen.

Jahr	Saison	Anteil der Krigestandardabweichungen ¹¹ (in Prozent), die bei der Berechnung der			
		2 ml/l-Grenztiefen		0 ml/l-Grenztiefen unter	
		<5m	<8m	<15m	<25m blieben.
1973	Januar-März	0.0	100.0	71.4	100.0
	April-Juni	100.0	100.0	50.0	50.0
	Juli-September	32.5	100.0	25.0	100.0
	Oktober-Dezember	56.3	100.0		
1974	Januar-März	7.2	7.2		
	April-Juni	5.1	5.1	9.1	81.8
	Juli-September	22.6	83.0	33.3	91.7
	Oktober-Dezember	18.2	100.0	100.0	100.0
1975	Januar-März	61.2	100.0	0.0	50.0
	April-Juni	55.3	100.0	0.0	0.0
	Juli-September	0.0	96.1	0.0	0.0
	Oktober-Dezember	33.2	100.0	50.0	100.0
1976	Januar-März	1.4	100.0	14.3	100.0
	April-Juni	0.0	90.7	0.0	100.0
	Juli-September	0.0	0.0	20.0	80.0
	Oktober-Dezember	5.5	24.0	0.0	100.0
1977	Januar-März	2.2	9.0		
	April-Juni	3.6	71.4		
	Juli-September	0.0	1.5		
	Oktober-Dezember	12.0	93.5		
1978	Januar-März	52.3	100.0		
	April-Juni	3.0	97.0		
	Juli-September	0.0	12.9	0.0	100.0
	Oktober-Dezember	9.2	9.2	0.0	71.4
1979	Januar-März	10.9	39.1	0.0	100.0
	April-Juni	1.9	100.0	0.0	0.0
	Juli-September	20.2	83.4	10.0	20.0
	Oktober-Dezember	0.0	57.4	25.0	100.0
1980	Januar-März	0.0	100.0	0.0	62.5
	April-Juni	8.0	22.6	0.0	0.0
	Juli-September	0.0	0.0	16.0	96.0
	Oktober-Dezember	0.0	0.6	21.2	100.0
1981	Januar-März	0.0	31.8	0.0	100.0
	April-Juni	0.0	100.0	0.0	100.0
	Juli-September	0.0	0.0	0.0	81.8
	Oktober-Dezember	0.0	91.7	0.0	0.0
1982	Januar-März	0.0	100.0	0.0	100.0
	April-Juni	0.0	100.0	0.0	100.0
	Juli-September	0.0	92.2	0.0	100.0
	Oktober-Dezember	0.0	100.0	0.0	100.0
1983	Januar-März	1.4	1.4	100.0	100.0
	April-Juni	51.2	84.5	88.9	100.0
	Juli-September	1.2	97.6	15.8	68.4
	Oktober-Dezember	0.0	51.0	83.3	100.0
1984	Januar-März	0.0	66.9	25.0	100.0
	April-Juni	0.0	0.0	100.0	100.0
	Juli-September	0.6	4.7	0.0	47.4
	Oktober-Dezember	0.0	0.0	0.0	25.0
1985	Januar-März	5.1	22.6	13.3	53.3
	April-Juni	0.0	16.2	58.3	100.0
	Juli-September	18.5	100.0	0.0	100.0
	Oktober-Dezember	0.0	0.0	14.3	100.0
1986	Januar-März	21.8	100.0	0.0	0.0
	April-Juni	0.8	7.3	26.7	100.0

Jahr	Saison	Anteil der Krigestandardabweichungen ¹¹ (in Prozent), die bei der Berechnung der			
		2 ml/l-Grenztiefen		0 ml/l-Grenztiefen unter	
		<5m	<8m	<15m	<25m blieben.
1987	Juli-September	0.0	0.6	0.0	3.8
	Oktober-Dezember	0.0	100.0	0.0	42.9
	Januar-März	0.0	0.0		
	April-Juni	21.7	82.2	100.0	100.0
1988	Juli-September	0.0	0.0	0.0	0.0
	Oktober-Dezember	0.0	0.6	33.3	100.0
	Januar-März	28.0	61.3		
	April-Juni	67.6	67.6		
1989	Juli-September	11.3	100.0	0.0	0.0
	Oktober-Dezember	0.0	2.6	6.7	86.7
	Januar-März	15.9	100.0	0.0	28.6
	April-Juni	0.0	100.0	0.0	7.1
1990	Juli-September	11.7	65.2	0.0	0.0
	Oktober-Dezember	2.5	13.8	0.0	52.3
	Januar-März	0.0	0.0	0.0	0.0
	April-Juni	0.0	0.0		
1991	Juli-September	0.0	1.8		
	Oktober-Dezember	0.0	0.0		
	Januar-März	0.0	0.0	100.0	100.0
	April-Juni	4.9	19.4	0.0	0.0
1992	Juli-September	0.0	0.0	0.0	0.0
	Oktober-Dezember	18.3	20.0	0.0	18.2
	Januar-März	0.0	100.0	100.0	100.0
	April-Juni	0.0	100.0	0.0	90.9
1993	Juli-September	34.2	100.0	0.0	100.0
	Oktober-Dezember	97.1	100.0	0.0	86.4
	Januar-März	0.0	100.0	64.7	100.0
	April-Juni	0.0	100.0	0.0	80.0
1994	Juli-September	71.8	71.8	0.0	100.0
	Oktober-Dezember	0.0	100.0	0.0	0.0
	Januar-März	100.0	100.0	100.0	100.0
	April-Juni	0.0	98.3		
1995	Juli-September	0.0	100.0		
	Oktober-Dezember	0.0	100.0		
	Januar-März	0.0	100.0		
	April-Juni	0.0	100.0	0.0	0.0
1996	Juli-September	48.3	100.0	14.3	100.0
	Oktober-Dezember	100.0	100.0	0.0	0.0
	Januar-März	0.0	100.0	50.0	100.0
	April-Juni	95.0	100.0		
1997	Juli-September	1.4	100.0	0.0	100.0
	Oktober-Dezember	0.0	100.0	22.2	77.8
	Januar-März	0.0	0.0		
	April-Juni	0.0	100.0	0.0	0.0
1998	Juli-September	0.0	0.0	25.0	100.0
	Oktober-Dezember	31.4	78.6		
	Januar-März	69.0	69.0		
	April-Juni				
	Juli-September				
	Oktober-Dezember	100.0	100.0	0.0	100.0

Tabelle 10: Angabe des Prozentsatzes der Gitterpunkte mit Sauerstoffmangel bzw. Schwefelwasserstoffbildung über dem Meeresboden, in dem die Krigestandardabweichung unter 5 m / 8 m (bei den 2 ml/l-Grenztiefen) bzw. 15 m / 25 m (bei den 0 ml/l-Grenztiefen) lag.

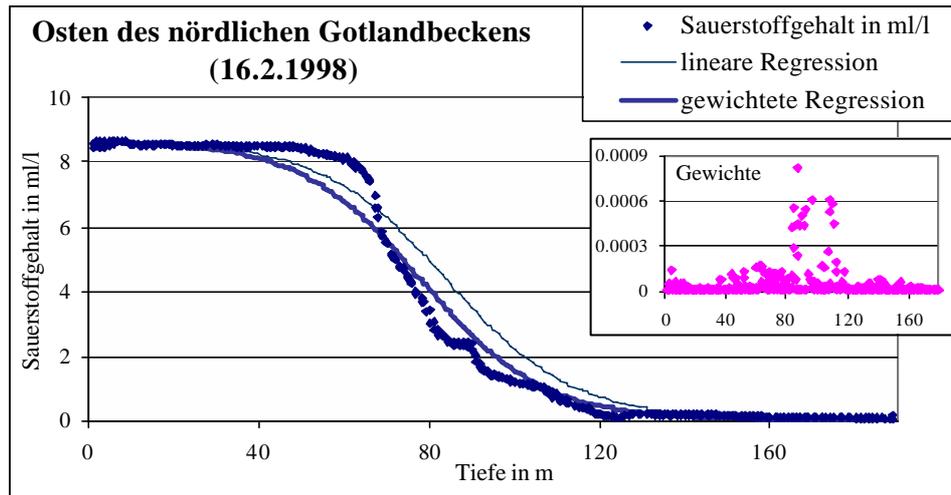


Bild 1: Anpassung der Veränderungen mit zunehmender Tiefe und Verteilung der Gewichte der gewichteten Regression. Beispiel: Osten des östlichen Gotlandbeckens.

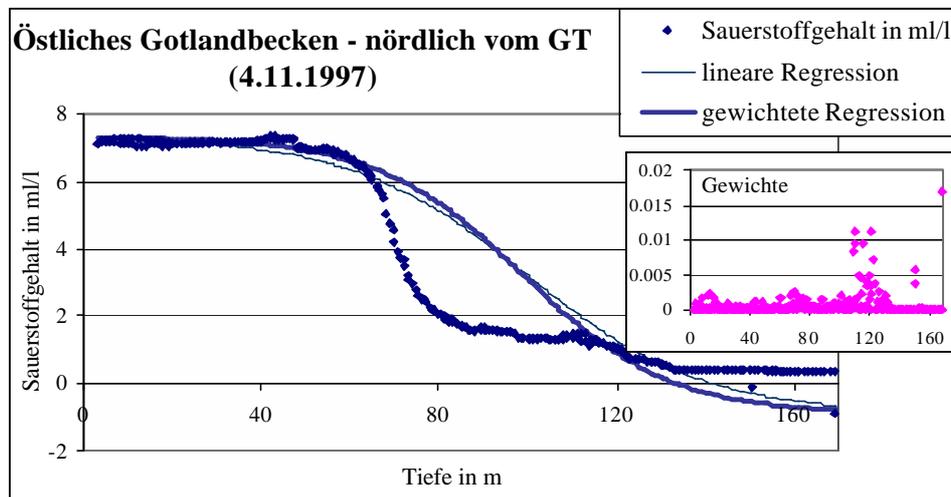


Bild 2: Anpassung der Veränderungen mit zunehmender Tiefe und Verteilung der Gewichte der gewichteten Regression. Beispiel: Östlichen Gotlandbeckens – nördlich vom Gotlandtief.

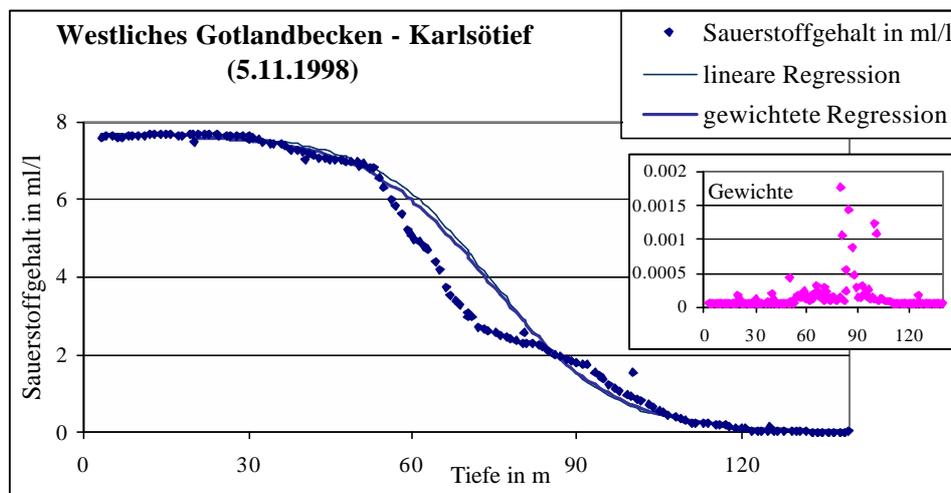


Bild 3: Anpassung der Veränderungen mit zunehmender Tiefe und Verteilung der Gewichte der gewichteten Regression. Beispiel: Östlichen Gotlandbeckens – nördlich vom Gotlandtief.