Erste Ergebnisse zur Untersuchung der Grundwasserverhältnisse im Naturschutzgebiet „Heiliges Meer“ (Kreis Steinfurt)

Jürgen Pust, Recke

Inhaltsverzeichnis

I. Einleitung 6

II. Material und Methode 7
1 Lage des Untersuchungsgebietes 7
2 Geologische und synökologische Gegebenheiten des Gebietes 8
3 Positionierung und technische Voraussetzungen der Grundwassermeßstellen 11
4 Angewandte Beprobungs- und Analyseverfahren 14

III. Ergebnisse 14
1 Grundwasserstände 15
2 Temperatur 17
3 Sauerstoff 20
4 Nitrat 22
5 Nitrit 24
6 Ammonium 24
7 Phosphat 28
8 organische Substanzen 28
9 Wasserstoffionenkonzentration 31
10 Leitfähigkeit 34
11 Sulfat 34
12 Chlorid 37
13 Natrium 39
14 Kalium 39
15 Kalzium 42
16 Magnesium 42
17 Gesamthärte 42
18 freies CO_2 47
19 gebundenes CO_2 47
20 Karbonathärte 50
21 Nichtkarbonathärte 50
22 Eisen 53
23 Mangan 55
24 Aluminium 55
25 Zink 59
26 Kupfer 61
27 Blei 63
28 Kadmium 65
29 Pestizide 65

IV. Diskussion 67
1 Grundwasserbelastende Faktoren aus der Umgebung 67
2 Beziehungen der Seen zum Grundwasser 71
3 Bisher erfolgte Schutzmaßnahmen und Zielvorgaben zu ihrer wirkungsvollen Ergänzung 74

V. Zusammenfassung 77

VI. Literatur 79

I. Einleitung

Negative Veränderungen der Umwelt durch Eingriffe des Menschen, insbesondere die Gefährdung der Trinkwasserversorgung durch Schadstoffe im Oberflächen- und Grundwasser und deren anhaltende Zunahme, führten zu einem Problembewußtsein innerhalb der Öffentlichkeit und rückten bestimmte Verursacher wie Landwirtschaft und Industrie ins Blickfeld. Maßnahmen zum Schutz des Wassers, die sich zur Nutzungssicherung zunächst im wesentlichen auf lokale Bereiche beschränkten und zur vermehrten Ausweisung von Wasserschutzgebieten führten, stehen heute weitgefaßte allgemeine Verordnungen zum Schutz des Grundwassers zur Seite (Wasserhaushaltsgesetz, WHO). Diese schreiben eine Rücksichtnahme auf die geologische und hydrologische Beschaffenheit des Standortes vor und betonen die Bedeutung und Schutzwürdigkeit des Grundwasservorkommens (SALZWEDEL 1992).

Durch die gezielte Anwendung von Verordnungen und die großräumige Durchführung von Sanierungsmaßnahmen ließen sich Verbesserungen der Wasserqualität und eine Zunahme der Artendiversität für viele oberirdische Fließ-Gewässer erreichen. Für das Grundwasser kann aber eine entsprechende Trendwende derzeit noch nicht festgestellt werden. Im Gegenteil, längerfristig durchgeführte Grundwasseruntersuchungen weisen darauf hin, daß auch im Fall einer sofortigen Beendigung jeglichen Schadstoffeintrages mit einer weiter zunehmenden Verschlechterung der Grundwasserqualität und einer Ausdehnung bereits belasteter Regionen über Jahrzehnte hinaus zu rechnen ist (BRECKLE 1988).

Eine ebenfalls negative Entwicklung erfahren bislang auch nährstoffarme Gewässer mit ihren an die besonderen Standortbedingungen angepaßten Tier- und Pflanzenarten. In vielen Naturschutzgebieten führte die Einflußnahme des Menschen auf die Natur bereits zu negativen Veränderungen des Lebensraumes (RUNGE 1978). In der Vegetation können der Rückgang und die Auslöschung seltener Arten mit der Zunahme verbreiteter Arten verbunden sein, ohne daß zunächst eine Abnahme der Gesamtartenzahl zu beobachten ist (RUNGE 1957). In den letzten Jahrzehnten wurden in mehreren Naturschutzgebieten Westfalens in Bereichen bislang nährstoffarmer Böden und an oligotrophen und mesotrophen Gewässern Veränderungen in der Ausprägung von Pflanzengesellschaften festgestellt, die auf einen erhöhten Nährstoffeintrag von außen schließen lassen (POTT 1983). Eutrophierungen nährstoffarmer Standorte erfolgen hauptsächlich durch den Eintrag von Stickstoff- und Phosphorverbindungen und können den Rückgang und das Verschwinden standorttypischer Pflanzen- und Tierarten zur Folge haben.

Im Zuge der Gewässer-Eutrophierung sind auch im NSG „Heiliges Meer" (Kreis Steinfurt) bereits pflanzensoziologische Veränderungen festzustellen (RUNGE 1957, 1967). Seit zwei Jahren sind z.B die *Myriophyllum*-Bestände im mesotrophen Großen Heiligen Meer stark zurückgegangen; erhöhte Ammoniumwerte im Epilimnion und

bisher nicht beobachtete Wasserblüten von Blaualgen der Gattung *Anabaena* weisen auf einen ansteigenden Nährstoffgehalt des Wassers hin.

Besonders in jüngeren Gewässern wie dem Erdfallsee und in kleinen Gewässern (dystrophe Tümpel und Kolke in seiner Umgebung) sind zunehmend größere Instabilitäten des Wasserchemismus und Abundanzschwankungen ihrer Besiedler festzustellen. So ist z. B. die Wasserspleiße (*Lobelia dortmanna*) am Heideweiher verschwunden und am Erdfallsee im Bestand stark zurückgegangen (DIERSSEN 1972); sie kommt heute nur noch in wenigen Exemplaren vor. *Cladium mariscus* (Schneide) wird nicht mehr am Erdfallsee beobachtet, während Eutrophieanzeiger wie *Phragmites australis* (Schilf) und *Schoenoplectus* (*Scirpus*) *lacustris* (Teichbinse) sich ausbreiten. Auch innerhalb der Heidegesellschaften (*Ericetum tetralicis*, *Genisto-Callunetum*, *Genistro Callunetum empetretosum*) sind Veränderungen festzustellen, insbesondere eine erhöhte Ausbreitung des Pfeifengrases (*Molinia caerulea*), die möglicherweise auf ein Absinken des Wasserspiegels zurückgeht (RUNGE 1991). Jahreszeitliche Schwankungen des Sauerstoffgehaltes durch sommerliche Sauerstoffzehrungen und Schwankungen der Phytoplanktonmasse in den kleineren dystrophen Erdfallkolken haben stark zugenommen (FUNKE 1992).

Ab Ende der 60er Jahre kam es im Zuge von Flurbereinigungen und durch intensivierte Landwirtschaft zum Fortfall ehemaliger Pufferzonen zwischen dem Schutzgebiet und landwirtschaftlichen Anbauflächen, z. B. durch Umwandlung von Wiesen und Weiden in Getreide- und Maisäcker mit erhöhtem Düngemittelaustrag. Im vermehrten Nährstoffaustrag auf den Ackerflächen, insbesondere in der Gülleverrieselung, werden Gefahren für das Grundwasser durch Eutrophierung und eine Ursache für die fortschreitende negative Entwicklung im Pflanzenbestand des Naturschutzgebietes „Heiliges Meer" gesehen. In diesem Zusammenhang wird auch die Wirkung von Pflanzenschutzmitteln diskutiert, die auf den benachbarten landwirtschaftlichen Nutzflächen ausgebracht werden.

Am Beispiel des Naturschutzgebietes „Heiliges Meer" sollen nun durch chemisch-physikalische Untersuchungen anthropogene Veränderungen des Grundwassers erforscht und ihre Auswirkungen aufgezeigt werden.

Erste Ergebnisse von Grundwasseruntersuchungen aus dem Gebiet wurden von KRIEGSMANN (1937, 1938) veröffentlicht. Weitere Daten zum Wasserchemismus von BUDDE (1942 a und b) und EHLERS (1965), aus Analysen im Rahmen von Diplom- oder Staatsarbeiten sowie aus limnologischen Kursen in der Biologischen Station „Heiliges Meer" (ANT 1974) beschränken sich weitgehend auf oberirdische Gewässer. Da aktuelle Kenntnisse über die Grundwasserbeschaffenheit fehlen, wurde im Schutzgebiet ein Grundwassermeßstellennetz eingerichtet und dadurch die technische Voraussetzung für regelmäßige Grundwasseruntersuchungen geschaffen, mit denen 1992 begonnen werden konnte. Erste Ergebnisse liefern Hinweise auf eine Gefährdung des nährstoffarmen Lebensraumes und belegen bereits erfolgte Grundwasserschäden im Schutzgebiet.

II. Material und Methode

II.1 Lage des Untersuchungsgebietes

Das heute 90 ha umfassende Naturschutzgebiet (NSG) „Heiliges Meer" liegt am Nordrande des Teutoburger Waldes an der Landstraße L 504 zwischen Ibbenbüren und Hopsten im Kreis Steinfurt (Abb. 1).

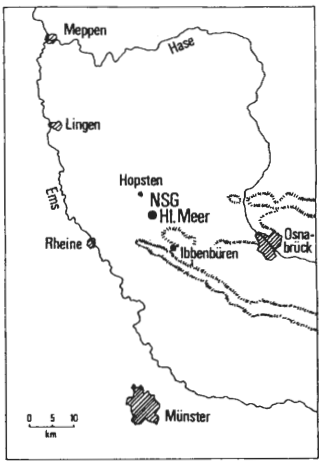


Abb. 1A: Lage des NSG "Heiliges Meer"

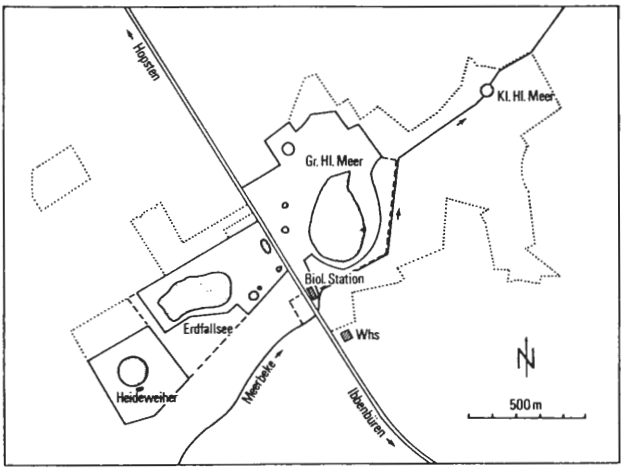


Abb. 1B: Grenzen des NSG "Heiliges Meer":
Ausgezogene Linie: bis 1962,
gestrichelte Linie: bis 1988,
punktierte Linie: seit 1988.

Das von Natur aus nährstoffarme, reich strukturierte Gebiet wird heute vollständig von landwirtschaftlichen Nutzflächen umgeben (Abb. 2), die seit den in den 60er Jahren durchgeführten Flurbereinigungen im Kontrast zum Kerngebiet (NSG) ein strukturmäßig weitgehend homogenes Umfeld mit einer anthropogen erhöhten Kalk-, Kalium- und Stickstoffracht des Grundwassers infolge von Getreide- und Maisanbau (Mineraldünger- und Gülleaustrag) darstellen.

II.2 Geologische und synökologische Gegebenheiten des Gebietes

Im Untersuchungsgebiet „Heiliges Meer" (Abb. 3) haben geologische Besonderheiten zu zahlreichen Erdfällen geführt, die in unterschiedlicher Größe und Tiefe in Erscheinung treten (LOTZE 1956, LOHMANN 1962) und die lokale Landschaftsstruktur nachhaltig prägen. Ihre Entstehung geht auf Ablaugung der bis zu 130m mächtigen Salz- und Gipslagerstätten des Münder-Mergels (Malm, Jura) und dem Nachbrechen der überlagernden Deckschichten zurück, die von bis zu 100 m mächtigen Schichten quartärer Sande bedeckt sind (SCHUSTER 1971; Abb. 3). Die große Dichte der Erdfälle innerhalb des ca. 5 km langen und 2,5 km breiten Streifens dieser Senkungszone hängt unmittelbar mit dem Ausstrich karstgünstiger Gesteine an der Basis der quartären Ablagerungen zusammen, wobei die Ablaugung an Sprüngen des Deckgebirges und an Kreuzungspunkten der Quer- und Längssprünge wesentlich begünstigt wird (THIERMANN 1975).

Die meisten Erdfälle unterschreiten den Grundwasserspiegel und treten als Seen, Weiher oder Kolke in Erscheinung. Der Erdfallsee und das Große Heilige Meer kommunizieren mit dem Grundwasser, während der Heideweiher heute meist oberhalb des Grundwasserspiegels liegt und vorzugsweise von Regenwasser gespeist wird (LOTZE 1951). Einige Erdfälle sind heute nur noch rudimentär vorhanden: Sie wurden entweder im Verlauf der Erosion abgeflacht und mit Flugsand verfüllt oder von Torfmoosen bewachsen und dann in früherer Zeit als Naß- und Moorwiesen in Nutzung genommen.

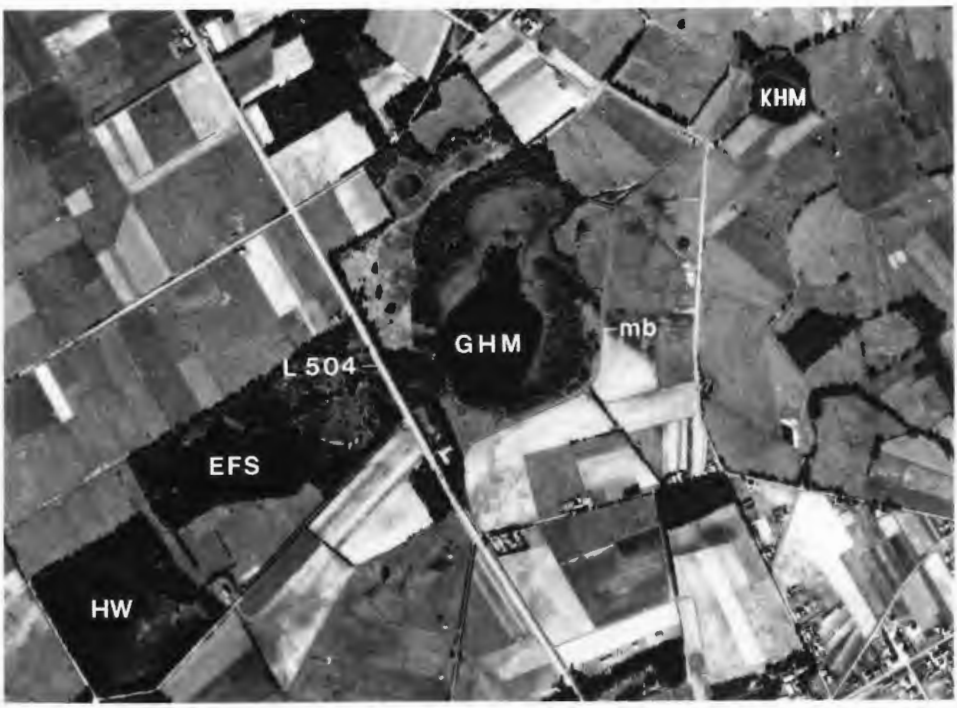


Abb. 2: Lage des NSG "Heiliges Meer" (Luftbild) inmitten landwirtschaftlicher Nutzflächen. Das Gebiet war bis in die 60er Jahre hauptsächlich von Weideflächen umgeben, die durch Flurbereinigungen in Ackerflächen umgewandelt wurden. Heute werden im Süden und im Norden vorwiegend Mais und Getreide angebaut; die Ackerflächen grenzen teilweise direkt an das Naturschutzgebiet.

EFS: Erdfallsee HW: Heideweiher mb: Meerbecke GHM: Großes Heiliges Meer KHM: Kleines Heiliges Meer L 504: Landstraße 504 zwischen Ibbenbüren und Hopsten

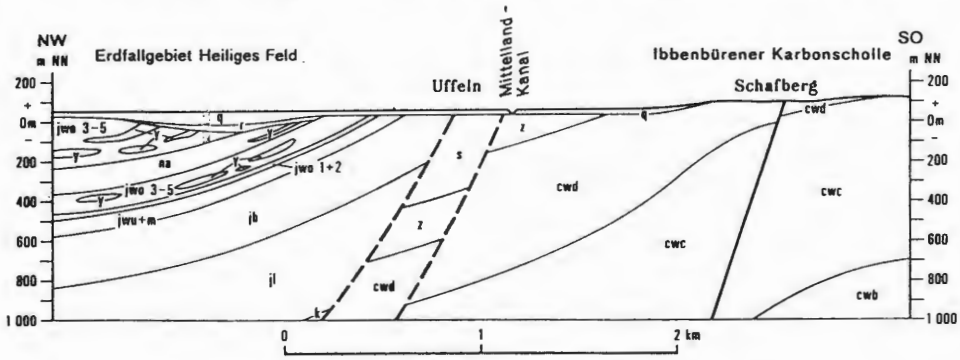


Abb. 3: Geologischer Schnitt durch die Heilig-Meer-Zone
(nach THIERMANN 1975)

q	:	Quartär	jwo 1+2	:	Gigas-Schichten und Elmbeckhäuser Plattenkalk	s	: Buntsandstein
r	:	Residualbildungen				z	: Zechstein
y	:	Gips und Anhydrit	jwu +m	:	Unter- und Mittelmalm	cwd	: Westfal D
na	:	Steinsalz	jb	:	Dogger	cwc	: Westfal C
jwo 3-5	:	Münder-Mergel	jl	:	Lias	cwb	: Westfal B
			k	:	Keuper		

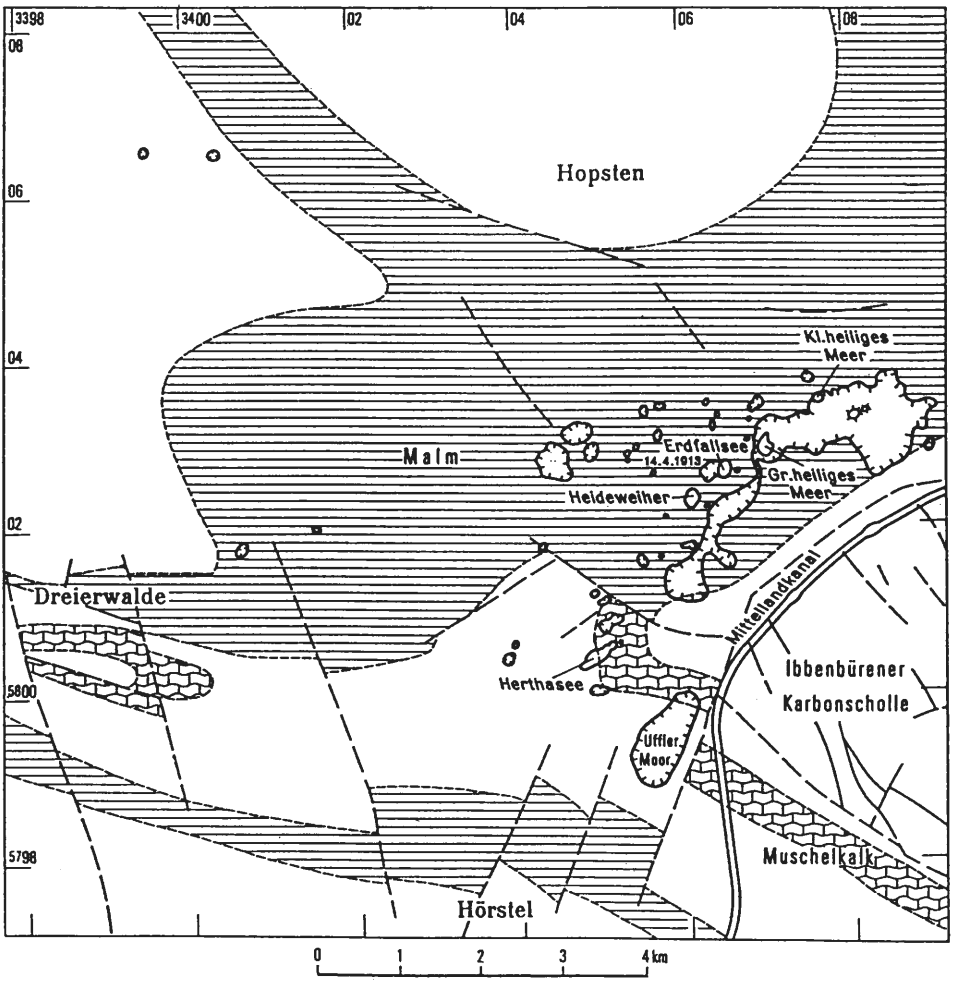


Abb. 4: Lage und Verteilung der Erdfälle im Senkungsgebiet "Heiliges Meer" mit den Seen "Kleines Heiliges Meer", "Großes Heiliges Meer", "Erdfallsee" und "Heideweiher" (nach THIERMANN 1975; vgl. auch Abb. 2).

Der größte Einbruch im Naturschutzgebiet, das Große Heilige Meer, wird auf 600 – 800 n. Chr. datiert (SCHROEDER 1956); der letzte größere Erdfall ereignete sich am 14. April 1913 (TIETZE 1914, WEGNER 1913, POELMANN 1934). Dies zeigt, daß die an der Entstehung der Senkungszone beteiligten geologischen Prozesse auch heute noch weiter voranschreiten.

Das landwirtschaftlich nicht genutzte Kerngebiet der Untersuchungsfläche wird durch eine große Diversität der Gelände- und Grundwasserstrukturen charakterisiert. Die durch Erdfälle entstandenen oberirdischen Gewässer unterscheiden sich hinsichtlich Alter, Ausdehnung und Wasserchemismus. Die Sukzessionsstadien ihrer Verlandung, die unterschiedlichen Trophiestufen und Bodentypen hängen vom Alter der Gewässer ab, welche heute eine entsprechende Vielzahl von Pflanzengesellschaften aufweisen

(GRAEBNER 1930, 1931; RUNGE 1991). Diese Besonderheiten der Landschaftsstruktur nehmen auf die Beschaffenheit des Grundwassers entscheidenden Einfluß.

Lokal unterschiedliche Durchlässigkeit und Durchlüftung des Grundwasserleiters führen zu einer lokal sehr unterschiedlichen Grundwasserbeschaffenheit sowie zu lokal unterschiedlichen Um- und Abbauvorgängen nicht-konservativer Inhaltsstoffe (III.3-III.8). Porengrundwasser in sandigen bis feinsandigen Ablagerungen weist meist nur eine geringe Strömungsgeschwindigkeit auf (wenige cm/d), die hinsichtlich ihrer Konvektion und Dispersion lokal durch lückenhafte Podsolschichten und zwischengelagerte Torfschichten beeinflußt wird. Die unterschiedlichen Oberflächenstrukturen wie Seen, Kolke, Bruchwald, Heide und Niedermoorreste beeinflussen ebenfalls die Durchlässigkeit des Grundwasserleiters und seine adsorptiven Eigenschaften und sind daher für die kleinräumige Strukturierung der Grundwasserbeschaffenheit im Schutzgebiet verantwortlich.

Das Untersuchungsgebiet ist natürlicherweise kalk- und nährstoffarm. Bei neu entstandenen Erdfällen besteht der Untergrund im wesentlichen aus Quarzsand, wie z. B. noch heute der Spülsaum am Südufer des Erdfallsees. In statu nascendi füllten sich die Erdfälle mit nährstoffarmem, nur schwach gepuffertem, schwach saurem Grundwasser, waren daher zunächst oligotroph und wurden von oligotraphenten, heute oft seltenen Arten besiedelt. Die autochthone Nährstoffzunahme vollzog sich in langen Zeiträumen (Jahrhunderte) und führte z. B. beim Großen Heiligen Meer in einer fortlaufenden Sukzession zu einer Besiedlung durch mesotraphente, beim Kleinen Heiligen Meer sogar durch eutraphente Arten. Größere Senken, Tümpel und kleinere Kolke – vorwiegend auf Niedermoorresten und mit Torfmoosbeständen bewachsen, vorzugsweise im Südwesten des NSG gelegen – bildeten eine dys- bis mesotrophe Phase aus (z. B. Heideweiher und kleinere Kolke am Erdfallsee). Dabei stehen die potentiellen Trophiestufen jeweils in einem direkten Zusammenhang mit dem Alter der Gewässer.

Heute umfaßt das NSG „Heiliges Meer" eng benachbart Gewässer der Stufen oligo-, meso-, eu- und dystroph mit vielfachen Übergängen, die sich sowohl in ihrer Besiedlung als auch in ihrem Stoffhaushalt deutlich voneinander unterscheiden. Die Veränderungen der Trophiestufen und die Zunahme der Primärproduktion (des Phytoplanktons) einiger Gewässer unterliegen heute einer anthropogenen, zeitlich verkürzten Sukzession, bedingt durch eine weitgehend allochthone Nährstoffzunahme durch Mineralsalz- und Stickstoffeinträge.

II.3 Positionierung und technische Voraussetzungen der Grundwassermeßstellen

Anfang 1991 wurde mit der Beprobung verschiedener Oberflächengewässer und des Grundwassers im Schutzgebiet und der näheren Umgebung begonnen, um eine grobe Orientierung für die Positionierung der Grundwasserbeprobungsstellen zu erhalten (Abb. 5). Von den größeren stehenden Gewässern wurden das Große Heilige Meer (GHM) und der Erdfallsee (EFS), von den Kleingewässern ein am Weg zum Erdfallsee eingezäunter Tümpel (G0) sowie Umlaufgräben am Großen Heiligen Meer (UGHM) und Erdfallsee (UEFS) und an verschiedenen Abschnitten die Meerbecke (MB) physikochemisch untersucht, ferner ein mit Holz abgedeckter Brunnen (BRA) und zwei Peilrohre (BRE u. BRF).

Im Dezember 1991 wurde mit der Errichtung eines Grundwassermeßstellennetzes aus insgesamt 20 Brunnen begonnen (im Folgenden mit 1-20 bezeichnet), die von Januar bis Oktober 1992 in monatlichen Abständen beprobt wurden. Zur Erfassung von Schadstoff-

einträgen über das Grundwasser wurden die Grundwasserentnahmestellen zunächst bevorzugt innerhalb der Randbereiche des Schutzgebietes errichtet (Abb. 5). Im Oktober 1992 erfolgte eine Ergänzung dieses Meßstellennetzes durch drei weitere Brunnen (zwei Brunnen westlich vom GHM und ein Brunnen am Südrand des EFS; Abb. 5) um weiterführende Untersuchungen zu ermöglichen, die näheren Aufschluß über den Eintrag und den Transport von Stickstoffverbindungen innerhalb des Kerngebietes erbringen sollen.

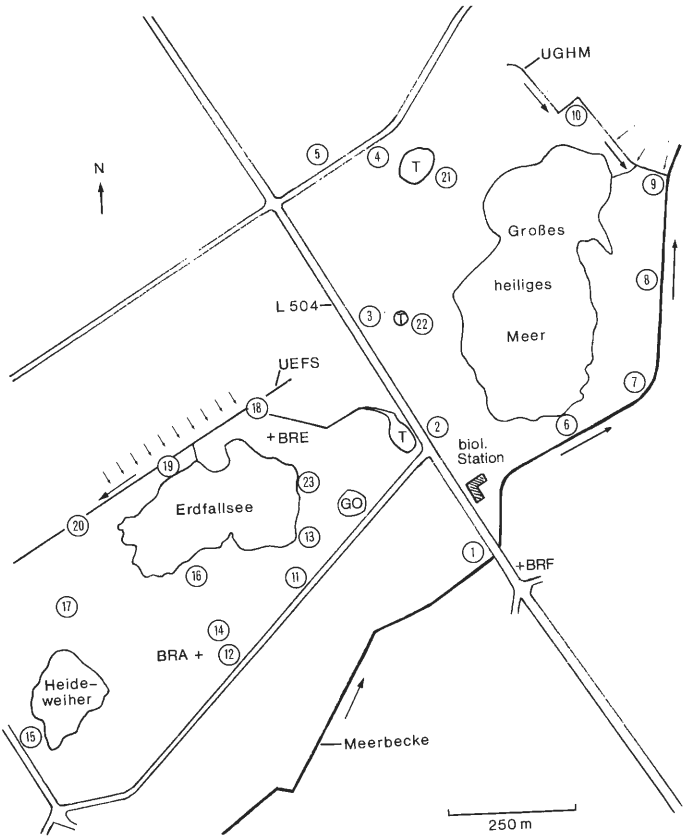


Abb. 5: Lage der Grundwassermeßstellen im NSG "Heiliges Meer"
Die im Dezember 1991 errichteten Meßstellen (1-20) wurden bevorzugt an den Randzonen des Gebietes angelegt; drei weitere Meßstellen (21-23) wurden im Oktober 1992 im Kerngebiet angelegt. An der L 504 befinden sich heute die Meßstellen 1-3, an der Meerbecke 6-9, direkt an landwirtschaftliche Nutzflächen angrenzend 4, 5, 10, 11, 12, 15, 18-20 und inmitten des Kerngebietes 13, 16, 17, 21-23. 1991 wurde vor der Errichtung dieses Grundwassermeßstellennetzes Wasser aus Seen und Kolken (Großes Heiliges Meer, Erdfallsee und Gewässer GO), aus Umlaufgräben am Großen Heiligen Meer (UGHM) und Erdfallsee (UEFS), aus einem gemauerten Brunnen südlich des Erdfallsees (BRA) und Grundwasserpeilrohren (BRE u. BRF) analysiert.

Die Meßstellen lassen sich in zwei Gruppen einteilen: Stellen im Bereich des Großen Heiligen Meeres (1-10, 21 u. 22), und im Bereich des Erdfallsee-Heideweihers (11-20, 23). 1, 2 und 3 sind im unmittelbaren Bereich der Landstraße L 504 positioniert, 6, 7, 8 und 9 an der südöstlichen Grenze im unmittelbaren Bereich der Meerbecke; 4, 5 und 10

liegen am Nordrande des Gebietes unmittelbar an landwirtschaftlichen Nutzflächen. An der südlichen Grenze des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes befinden sich 11, 12 und 15, an der nördlichen Grenze 18, 19 und 20; sie liegen allesamt nahe landwirtschaftlicher Nutzflächen (Acker- und Weideland). Im Inneren des Kerngebietes sind weitere Meßstellen eingerichtet, und zwar 21 und 22 im Bereich des Großen Heiligen Meeres, 13-16 und 23 im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet (Abb. 5).

Zur Entnahme des Grundwassers mittels einer batteriebetriebenen Niedervolt-Tauchpumpe (s. u.) wurden an den genannten Stellen Trockenkernbohrungen (Durchmesser: 165mm) auf 10m Tiefe gebracht und mit PVC-Rohren (Durchmesser: 2 Zoll) versehen. Die Pegelerstellung wurde von der Fa. H. REEKER, Hopsten durchgeführt. Zur routinemäßigen Grundwasserentnahme aus verschiedenen Horizonten sind die in einer Kiesschüttung stehenden Rohre mit Schlitzen versehen; die Kiesschüttung weist zwischen den Horizonten und zur Oberfläche jeweils Tondichtungen auf. Den oberen Abschluß der Brunnen bildet eine Verschlußkappe mit Schutzrohr (Abb. 6).

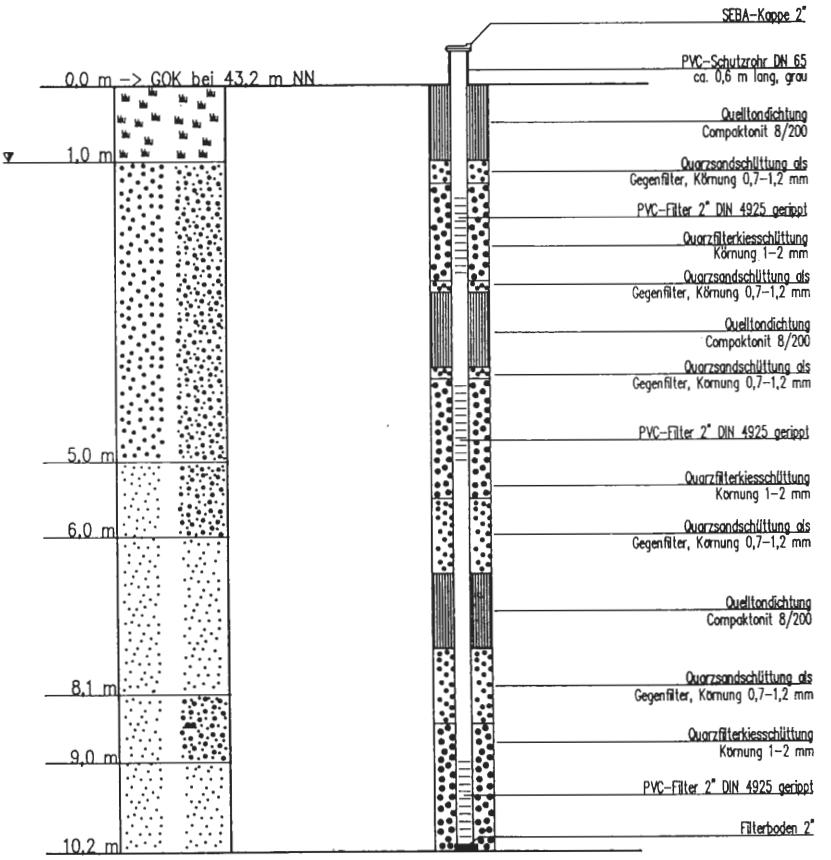


Abb. 13: Meßstellennetz "Meerbecke"
Der Bachlauf 3-1-2 führt Drainagewasser von landwirtschaftlichen Flächen und Abwässer aus dem Uffelner Raum an 3; der Teil 14-13-12-11-10 führt durch Grubenwässer kontaminiertes Grundwasser, das periodisch aus dem Steinbruch "Westermann" eingeleitet wird. An 4 treten beide Zweige in die Meerbecke, die an 5 das NSG "Heiliges Meer" passiert und nördlich von 6 in die Recker Aa mündet.

II.4 Angewandte Beprobungs- und Analyseverfahren

Zur Bestimmung der Wassertemperatur, des Leitwertes und des Sauerstoffgehaltes aus verschiedenen Grundwasser-Tiefen erfolgte die Probeentnahme über eine 2-Zoll-Tauchpumpe (Typ COMET-COMBI 2/12) zunächst in einen thermisch isolierten Behälter von 10 l Volumen. Nach Erreichen von Temperaturkonstanz wurden die Werte für Temperatur und Leitwert registriert. Sauerstoffproben nach WINKLER wurden aus 2.5 und 9.0m Tiefe entnommen und fixiert. Beprobungen fanden an folgenden Terminen statt: 27.-30. Januar, 25.-27. Februar und 12.-13. Mai 1992.

Für die monatlich durchgeführten Untersuchungen (Januar bis Juli) wurden weitere Proben aus 2.5m und 9m Tiefe entnommen. Analytisch bestimmt wurden folgende Parameter: Temperatur [°C], Leitwert [µS/cm], pH-Wert [-lgH^+], Sauerstoff [mg/l] und Sauerstoffsättigung [%], Säure- und Basenverbrauch als m- und p-Wert [mmol/l] (nur am 11.3. u. 09.04.1992), Nitrat [mg/l], Nitrit [mg/l], Ammonium [mg/l], Phosphat-gesamt [mg/l], organische Substanzen als Kaliumpermanganatverbrauch [mg/l], Sulfat [mg/l], Chlorid [mg/l], Natrium [mg/l], Kalium [mg/l], Kalzium [mg/l], Magnesium [mg/l], Aluminium [mg/l], Eisen [mg/l], Mangan [mg/l], Kupfer [mg/l], Zink [mg/l], Blei [mg/l] und Kadmium [mg/l].

Rechnerisch bestimmt wurden die Gesamthärte aus der Kalium-, Kalzium- und Magnesiumhärte [°dH], gelöstes CO_2 und gebundenes CO_2 [mg/l] aus den m- und p-Werten, die Karbonathärte [°dH] aus dem gebundenen CO_2 und die Nichtkarbonathärte [°dH] aus der Differenz von Gesamthärte und Karbonathärte (HÜTTER 1992).

Für die Untersuchungen wurden folgende Geräte benutzt: Temperatur- und Leitfähigkeitsmeßgerät der Fa. WTW (Grundgerät: LF 91; Meßfühler: KLE 1/T)), pH-Meter der Fa. KNICK (Elektrode: E 56 der Fa. WTW); Photometer der Fa. MERCK (XQ 115), Atomabsorptionsspektrometer der Fa. VARIAN-TECHTRON (AA6) des Landesuntersuchungsamtes in Münster. Die Analysemethoden wurden geeicht mit Standardlösungen der Fa. MERCK.

Die Bestimmung der Pestizide: Triazine (Desethylatrazin, Desisopropylatrazin, Desethyltherbutylazin, Atraton, Prometon, Simazin, Atrazin, Terbutylazin, Desmetryn, Metribuzin, Ametryn, Prometryn, Terbutryn), Phenylharnstoffe (Chlortoluron, Isoproturon, Methabenzthiazuron, Linuron, Monuron) und Carbonsäuren (MCPA, 2,4-D, Mecoprop, Dichlorprop) wurde von dem Umweltlabor ACB in Münster aus Grundwasser- (1-20) und Oberflächenwasser-Proben (Meerbecke, Großes Heiliges Meer, Umlaufgraben am Erdfallsee, Umlaufgraben am Großen Heiligen Meer, Kolk am Erdfallsee) durchgeführt. Die Beprobungen erfolgten im August und September 1992.

III. Ergebnisse

Die dargestellten Analysenergebnisse wurden vorwiegend im Jahr 1992 an den Meßstellen 1-20 gewonnen. Die Wahl der physikochemischen Parameter und die Reihenfolge ihrer Darstellung richten sich nach ihrer Bedeutung, die sich aus der geologisch-hydrologischen Geländebeschaffenheit, den natürlichen und den anthropogenen Veränderungen des Grundwasserleiters im Untersuchungsgebiet und den zu erwartenden Stoffeinträgen in das Grundwasser durch unterschiedliche Landschaftsnutzer, wie z. B. durch Landwirtschaft, Industrie und Straßenverkehr ergeben.

In der Kopfzeile der einzelnen Kapitel wird i. d. R. dem Parameter folgend die zulässige Höchstkonzentration bzw. Richtzahl entsprechend der EG-Richtlinie vom 15. 7. 1980 aus HÖLL (1986) angegeben.

III.1 Grundwasserstände

Die Grundwasserstände weisen im Gebiet nur geringe Differenzen zwischen den einzelnen Meßstellen auf (i. d. R < 1 m); auch die zeitliche Schwankungsbreite ist verhältnismäßig niedrig (Tab. 1).

Lokale Unterschiede in den Abständen zwischen Erdoberfläche und Grundwasserspiegel (Mächtigkeit der Sickerwasserzone: 0.062-1.974m; vgl. Tab. 2) haben großen Einfluß auf den vertikalen Stofftransport.

Entlang der Meerbecke (1, 6-9; Abb. 5) und der Umlaufgräben am Großen Heiligen Meer (9+10) und Erdfallsee (19 u. 20) besteht in Fließrichtung der Gewässer eine Absenkung des Grundwasserspiegels (Tab. 1). Bei 18 besteht zeitweise ein ungewöhnlich steiles Gefälle, welches erheblichen Einfluß auf die Grundwasserströmung haben dürfte (z. B. 1.398 m Differenz zwischen 17 und 18 am 12. 5. 1992).

Im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet (Abb. 5) hat der Grundwasserspiegel im wesentlichen ein von Süd nach Nord verlaufendes Gefälle; ein schwaches zusätzliches Gefälle von West nach Ost ist im nördlichen Bereich am Umlaufgraben des Erdfallsees (19 u. 20) gestört. Am Großen Heiligen Meer tritt eine Störung des beschriebenen Süd-Nord-Gefälles auf: Die Meerbecke bewirkt als Vorflut eine nicht unerhebliche Grundwasserabsenkung und ein Gefälle des Grundwasserspiegels von Nord nach Südost (bis zu 0.468 m zwischen 4 u. 5 und 6-9) (Tab. 2).

Im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet tritt an 18 Sauerstoff- und Nitrat-armes Grundwasser mit hohen Ammoniumkonzentrationen und mit für das Erdfallseewasser typischen nied-

Tab. 1: Grundwasserstände im NSG "Heiliges Meer"

			GW-Stände		
			Datum		
Pegel-Nr.	Pegeloberkante m. ü. NN	Erdoberfläche m. ü. NN	07.04.1992 m. ü. NN	12.05.1992 m. ü. NN	02.10.1992 m. ü. NN
01	44.182	43.9	43.082	43.152	42.910
02	43.677	43.2	42.857	42.877	42.540
03	44.604	44.2	43.014	42.984	42.620
04	44.707	44.4	42.807	42.717	42.630
05	44.146	43.9	42.916	42.896	42.580
06	43.438	43.1	42.608	42.668	42.420
07	43.896	43.4	42.596	42.686	42.445
08	42.608	42.4	42.258	42.338	42.210
09	42.681	42.5	42.111	42.191	42.115
10	43.912	43.6	42.432	42.442	42.270
11	44.636	44.2	43.186	43.226	42.865
12	45.239	44.8	43.449	43.479	43.140
13	44.511	44.1	42.971	43.001	42.725
14	44.674	44.1	43.284	43.354	43.025
15	44.686	43.8	43.316	43.326	43.035
16	43.587	43.2	42.947	43.007	42.715
17	44.287	43.9	43.027	43.077	42.765
18	43.429	43.1	41.719	41.679	42.510
19	43.920	43.2	42.710	42.760	42.510
20	43.992	43.6	42.672	42.752	42.500

Tab. 2: Mächtigkeit der Sickerwasserzone im NSG "Heiliges Meer"

Pegel-Nr.	Pegeloberkante m. ü. NN	Erdoberfläche m. ü. NN	GW-Stände Datum 07.04.1992 m.ü. Erdoberfl.	12.05.1992 m.ü. Erdoberfl.	02.10.1992 m.ü. Erdoberfl.
01	44.182	43.9	0.818	0.748	0.990
02	43.677	43.2	0.343	0.323	0.660
03	44.604	44.2	1.186	1.216	1.580
04	44.707	44.4	1.593	1.683	1.770
05	44.146	43.9	0.984	1.004	1.320
06	43.438	43.1	0.492	0.432	0.680
07	43.896	43.4	0.804	0.714	0.955
08	42.608	42.4	0.142	0.062	0.190
09	42.681	42.5	0.389	0.309	0.385
10	43.912	43.6	1.168	1.158	1.330
11	44.636	44.2	1.014	1.974	1.335
12	45.239	44.8	1.351	1.321	1.660
13	44.511	44.1	1.129	1.099	1.375
14	44.674	44.1	0.816	0.746	1.075
15	44.686	43.8	0.484	0.474	0.765
16	43.587	43.2	0.253	0.193	0.485
17	44.287	43.9	0.873	0.823	1.135
18	43.429	43.1	1.381	1.421	0.590
19	43.920	43.2	0.490	0.440	0.690
20	43.992	43.6	0.928	0.848	1.100

rigen Leitwerten von 133-148 µS/cm auf (III.10). Es dürfte sich hier um Grundwasser mit einem hohen Anteil von versickerndem Wasser des Erdfallsees handeln. Das Gefälle des Grundwasserspiegels zwischen 18 und dem Bereich 13-16 (bis zu 1.325 m) läßt zumindest zeitweise eine grundwasservermittelte Drift des Wassers am Erdfallsee von Süd nach Nord erwarten (eintretendes Grundwassser von Süden, austretendes Erdfallseewasser nach Norden).

Die Strömungsrichtungen des Grundwassers sind somit für das Große Heilige Meer-Gebiet und das Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet anthropogen unterschiedlich: Das Gebiet des großen Heiligen Meeres dürfte bevorzugt Grundwasser aus nord-westlicher Richtung erhalten, das Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet vorwiegend aus südlicher Richtung.

Die aus den Pegelmessungen vorläufig abgeleiteten Grundwasserströmungsrichtungen werden durch die Analyseergebnisse verschiedener chemischer Parameter bestätigt, wie z. B. das Eindringen von Nitrat (vgl. III.4) über das Grundwasser in das Große Heilige Meer-Gebiet aus nördlicher und für das Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet aus südlicher Richtung.

Temperatur (III.2), Redoxpotential und Transporteigenschaften des Grundwassers, insbesondere für Nitrat, werden wesentlich von der Mächtigkeit der Sickerwasserzonen beeinflußt. Bei mächtiger Sickerwasserzone ist z. B. die Sauerstoffaufnahme aus der Raumluft begünstigt. Niedrige Temperaturen erhöhen die Löslichkeit des Sauerstoffs im oberflächennahen Grundwasser und lassen die besonders im Frühjahr kalten sauerstoffreichen Sickerwässer rasch bis in tiefere Grundwasserhorizonte gelangen. Oxidierende Milieubedingungen charakterisieren daher Bereiche mit mächtigen Sickerwasserzonen.

Anthropogen bedingte Änderungen der Vorflut in Verbindung mit Grundwasserabsenkungen sind nicht nur Ursache für eventuelle Änderungen der Vegetation durch Austrocknung und für Änderungen der Grundwasserströmungen, sie sind auch verantwortlich für eine Erhöhung der Mächtigkeit von Sickerwasserzonen und den hiermit verbundenen, weitreichenden Auswirkungen auf die Grundwasserbeschaffenheit, z. B. für Änderungen der Redox-Verhältnisse, Nitrateintrag und -transport, hohe Sulfatkonzentrationen und Versauerung des oberflächennahen Grundwassers.

Im Norden des Großen Heiligen Meer-Gebietes und im Süden des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes treten besonders mächtige Sickerwasserzonen auf; sie liegen hauptsächlich innerhalb landwirtschaftlich genutzter Bereiche (4: 1.593-1.770 m; 12: 1.351-1.660 m; vgl. Tab. 2). Aber auch für das Schutzgebiet neu hinzugewonnene, ehemals landwirtschaftlich genutzte Flächen, die heute als Pufferzonen dienen, führen durch anthropogen erhöhte Sickerwasserzonen zu Veränderungen der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit des Gebietes (z. B. an 17; vgl. III.3, III.4, III.8, III.9, III.11, III.22, III.24, III.25, III.27, III.28).

Im Bereich der Meerbecke im Großen Heiligen Meer-Gebiet (6-9), aber auch am Südrand des Heideweihers (15) und des Erdfallsees (16) sowie innerhalb der Bruchwaldzone am Erdfallsee (19) ist die Sickerwasserzone meist weniger als 0.5m mächtig (Tab. 2). Ausnahmslos sind hier Milieubedingungen gegeben, die erhöhte Nitratgehalte (III.4) im Grundwasser verhindern bzw. den mikrobiellen Nitratabbau fördern, und zwar wegen der geringen Sauerstoffkonzentrationen (III.3), die zu reduzierenden Bedingungen führen.

III.2 Temperatur

Bei der überwiegenden Zahl der Meßstellen liegen die mittleren Temperaturen des Grundwassers in der Nähe der Jahresdurchschnittswerte der Lufttemperatur bzw. wenig niedriger (zwischen 9-10 °C; vgl. Abb. 7). Bereiche in unmittelbarer Nähe zu größeren Oberflächengewässern, besonders Stellen mit gering-mächtiger Sickerwasserzone (Meerbecke und Großes Heiliges Meer: 6-9, Erdfallsee: 16, 19), weisen ausgeglichene mittlere Temperaturen mit einer geringen Schwankungsbreite auf (z. B. 8: 9.6-10.7 °C in 2.5 m bzw. 10.0-10.3 °C in 9 m Tiefe). Die Schwankungsbreite der Temperatur nimmt hier rasch mit zunehmender Grundwassertiefe ab; die innerhalb der oberflächennahen Schichten zunächst steil verlaufenden Temperaturgradienten flachen sich nach wenigen Metern rasch ab und erreichen keine große Tiefe (Abb. 8).

Lokal wurden jedoch deutliche Abweichungen der mittleren Temperaturen von denen ihrer näheren Umgebung festgestellt, z. B. deutlich niedrigere Werte im oberflächennahen Grundwasser (8.5-9.2 °C) und erhöhte Schwankungsbreiten im unmittelbaren Bereich von Äckern, wo die Mächtigkeit der Sickerwasserzone erhöht ist (4, 5, 10, 11, 12: von 7.6-11.6 °C bis 6.0-14.1 °C). Temperaturgradienten lassen sich an jenen Stellen bis in eine Tiefe von mindestens 10m beobachten (Abb. 8). Aber auch lokal im Inneren des Schutzgebietes treten Temperatur-Erniedrigungen mit erhöhten -Schwankungen auf (17: im Mittel 8.5-9.1 °C; max. Schwankungsbreite: 7.6-11.0 °C).

Vergleiche mit anderen Parametern – z. B. mit den Grundwasserständen (III.1) und dem Sauerstoffgehalt (III.3) – weisen darauf hin, daß es sich dort um Stellen mit einer verbesserten Durchlässigkeit des Grundwasserleiters und einer erhöhten Grundwasserneubildungsrate handelt. Vertikale Transportvorgänge sind hier durch größere Sickerwasserbereiche offensichtlich erleichtert. Besonders das im Frühjahr anfallende Schmelzwasser führt zu einer drastischen Temperaturabnahme im oberflächennahen Grundwasserleiter und zum erleichterten Eintritt von Sauerstoff, insbesondere innerhalb

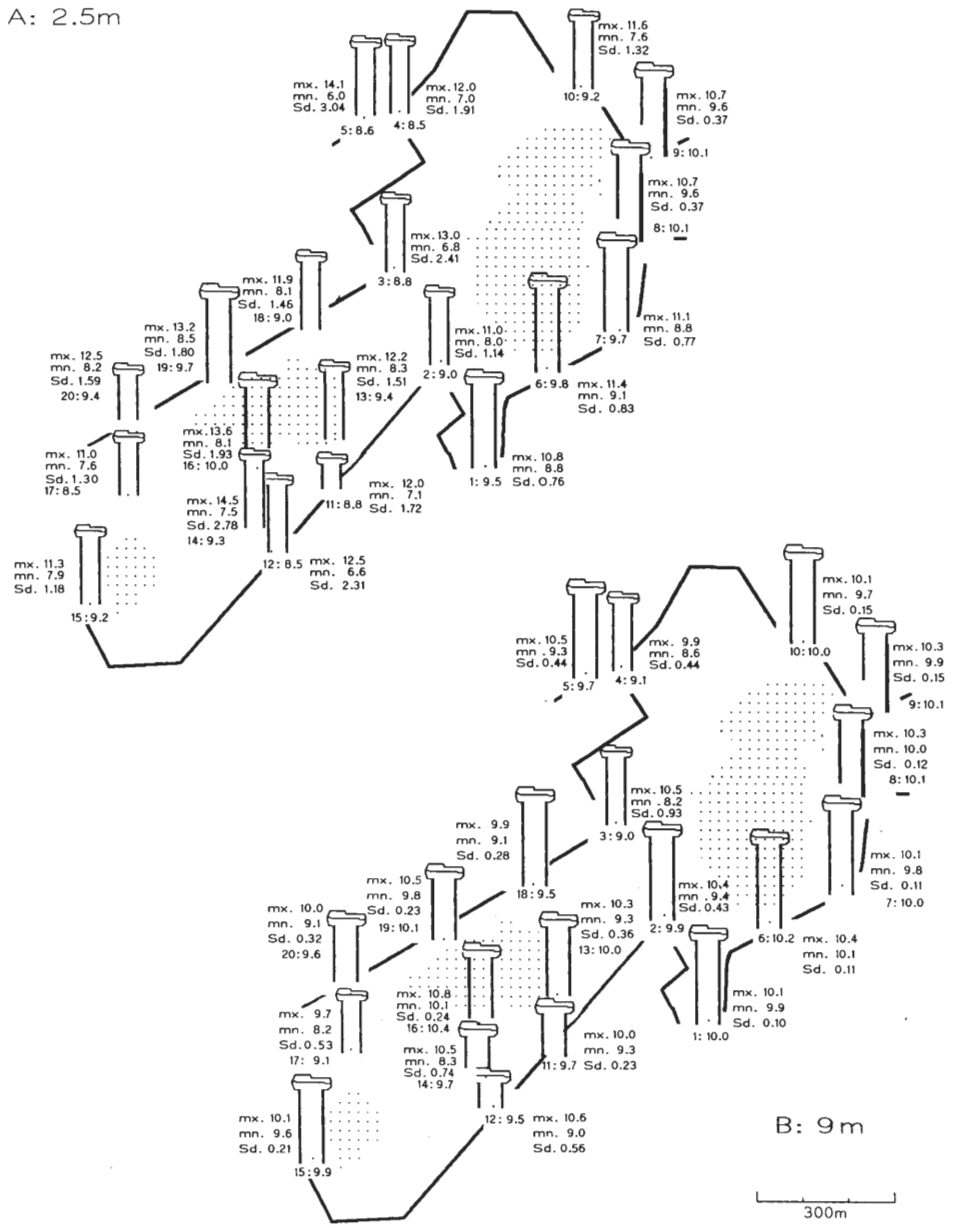


Abb. 7: Mittlere Temperatur [C] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

der Sickerwasserzone. Die mechanische Auflockerung der oberflächennahen Bodenschichten von Äckern erhöht ebenfalls den Raumluftanteil der Sickerwasserzone und führt zu einer stärkeren Durchlüftung dieser Zone. Im Zusammenhang mit erhöhten Sauerstoffkonzentrationen weist das Grundwasser hier i. d. R. einen deutlich erhöhten Nitratgehalt (III.4) und erniedrigte pH-Werte (III.9) auf.

Hohe Grundwassertemperaturen liegen in der Regel nur an Stellen mit kleiner Sickerwasserzone vor (III.1). Im Bereich der Meerbecke (6, 7, 8 und 9), aber auch im Vorflutbereich zum Erdfallsee (16), werden die höchsten mittleren Grundwasser-Temperaturen mit niedriger Schwankungsbreite und äußerst niedrige Sauerstoffkonzentrationen festgestellt (Abb. 7 und 8). Daher herrschen dort reduzierende Bedingungen. Hier können erhöhte

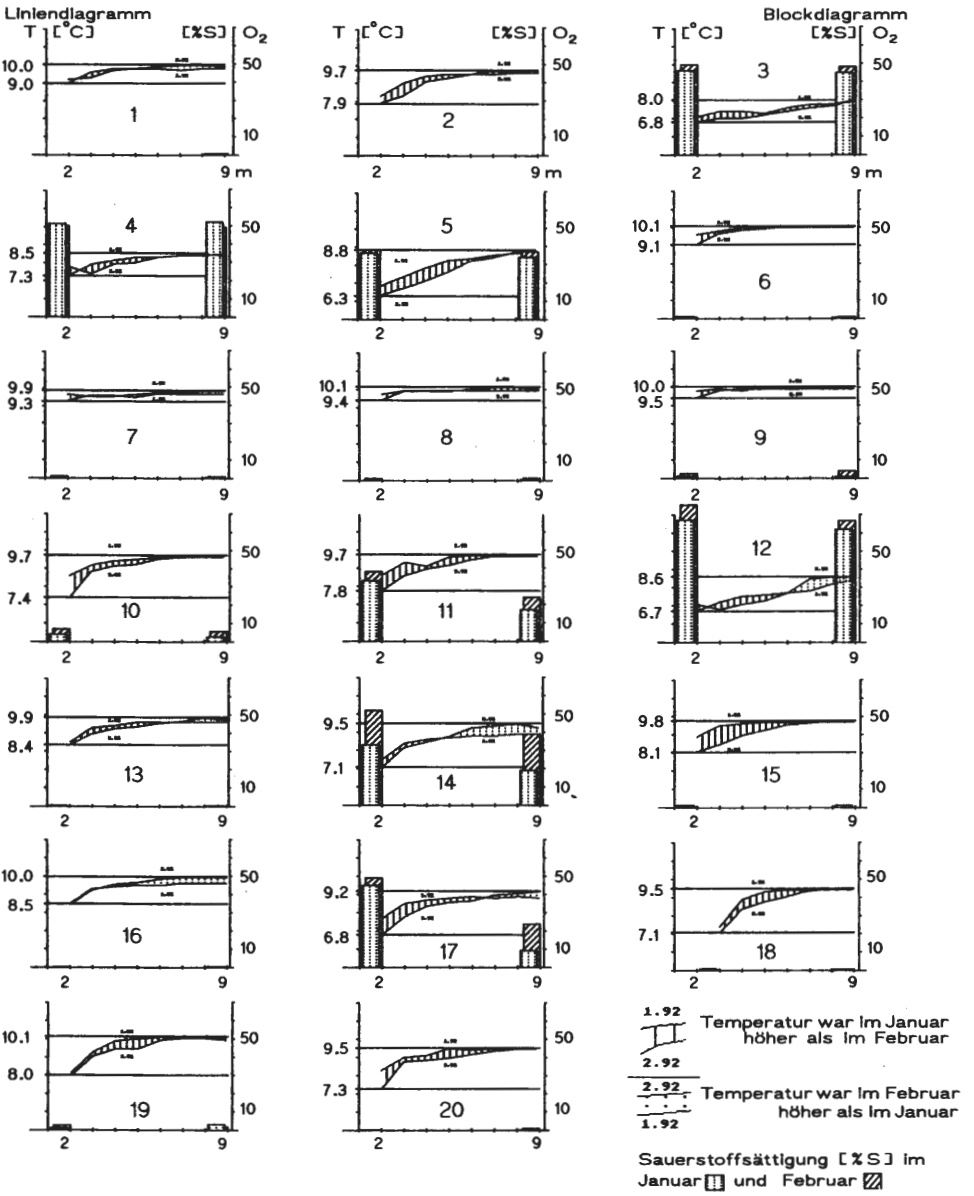


Abb. 8: Tiefenprofile der Grundwassertemperatur und des Sauerstoffgehaltes im Grundwassers des NSG "Heiliges Meer" im Frühjahr 1992. Der Darstellung liegen Messungen vom 27.-30. Januar und 25.-27. Februar zugrunde.

Ammoniumkonzentrationen auftreten, die den Hauptanteil der Stickstoffverbindungen ausmachen (III.6); der pH-Wert ist hier gegenüber der Umgebung erhöht (III.9).

III.3 Sauerstoff

Wie bereits in Kap. III.2 erläutert, sind mit der Größe der Sickerwasserzone und – wie unten dargestellt – mit Temperaturerniedrigungen des oberflächennahen Grundwassers Erhöhungen der Sauerstoff-Konzentration positiv korreliert. Der Sauerstoff gelangt einerseits mit dem Niederschlagswasser – besonders mit kalten sauerstoffreichen Schmelzwässern im Frühjahr – in die oberflächennahe Grundwasserschicht, andererseits bei guter Durchlüftung der Sickerwasserzone auch über die Grundluft in das Grundwasser und erreicht dann durch Diffusion, Strömungsdispersion und andere Vorgänge auch größere Tiefen (MATTHES 1990). Im Untersuchungsgebiet verhindern jedoch bei geringen Grundwasserströmungen sauerstoffzehrende Prozesse eine großräumige Ausbreitung des Sauerstoffs durch Konvektion.

Erhöhte Durchlässigkeit des Grundwasserleiters und die damit verbundenen permeabilitätsabhängigen Änderungen der chemischen Eigenschaften, insbesondere Transporteigenschaften des Grundwassers für andere gelöste Stoffe, sind im unmittelbaren Bereich von Ackerflächen (4-5, 11-12, 14), aber auch lokal unter ehemals landwirtschaftlich genutzten und heute stillgelegten Flächen des Kerngebietes (17) gegeben. An solchen Stellen ist der vertikale Stofftransport erleichtert, die vertikale Temperaturverteilung im Frühjahr hat meist einen gleichmäßig verlaufenden Gradienten ohne scharfen Knick innerhalb der oberflächennahen Horizonte (Abb. 8). Sauerstoffsättigungswerte von über 50% können lokal noch in 10 m Tiefe festgestellt werden (im Großen Heiligen Meer liegt während der Sommerstagnation die Kompensationsebene meist zwischen 5 und 7m). Erhöhter Sauerstoffgehalt und Versauerungen des Grundwassers verhindern lokal weitgehend die Denitrifizierung und ermöglichen den Nitrat-Transport über weite Strecken, besonders im Bereich von Mais- und Getreideäckern (z. B. an 4, 5 und 11).

An den meisten Untersuchungsstellen herrschen jedoch reduzierende Bedingungen, oft in Verbindung mit reduzierter Permeabilität des oberflächennahen Grundwasserleiters (geringer Vertikal-Transport und rasch abknickende Temperaturkurve; Abb. 8). Gelöster Sauerstoff ist dort bereits im oberflächennahen Grundwasser oftmals nur noch in Spuren nachweisbar. Obwohl reduzierende Grundwässer in oberen Schichten oft die Folge anthropogener Belastungen sind, treten vergleichbare Verhältnisse natürlicherweise in quartären und tertiären Porengrundwasserleitern bei Kontakt mit Torf u. a. organischen Substanzen auf, vor allem unter abdichtenden Schichten (DVWK-Fachausschuß „Grundwasserbiologie“ 1988).

Für den Sauerstoffeintrag ins Grundwasser bzw. dessen Verminderung können neben der Ausdehnung der Sickerwasserzone und den Struktureigenschaften des Grundwasserleiters auch Grundwasser-stauende Schichten im Bereich oberflächennaher Grundwasserhorizonte verantwortlich sein, z. B. eine geschlossene Podsolschicht unterhalb von Weide- und Heideflächen. Andererseits können Detritusteilchen, ausgehend von oberirdischen Gewässern, in das Sandlückensystem gelangen und lokal den Grundwasserleiter in seiner Durchlässigkeit beeinträchtigen, so daß Niederschlagswasser vermehrt oberirdisch abfließt und die Grundwasserneubildung, der Vertikaltransport und der Sauerstoffeintrag ins Grundwasser reduziert werden.

In Folge aeroben mikrobiellen Abbaus organischer Substanzen kann es bereits im oberflächennahen Grundwasser zu erhöhter biologischer Sauerstoffzehrung, durch reduzierte Verbindungen (z. B. Metallsulfide) zu chemischer Sauerstoffzehrung und zum Sauer-

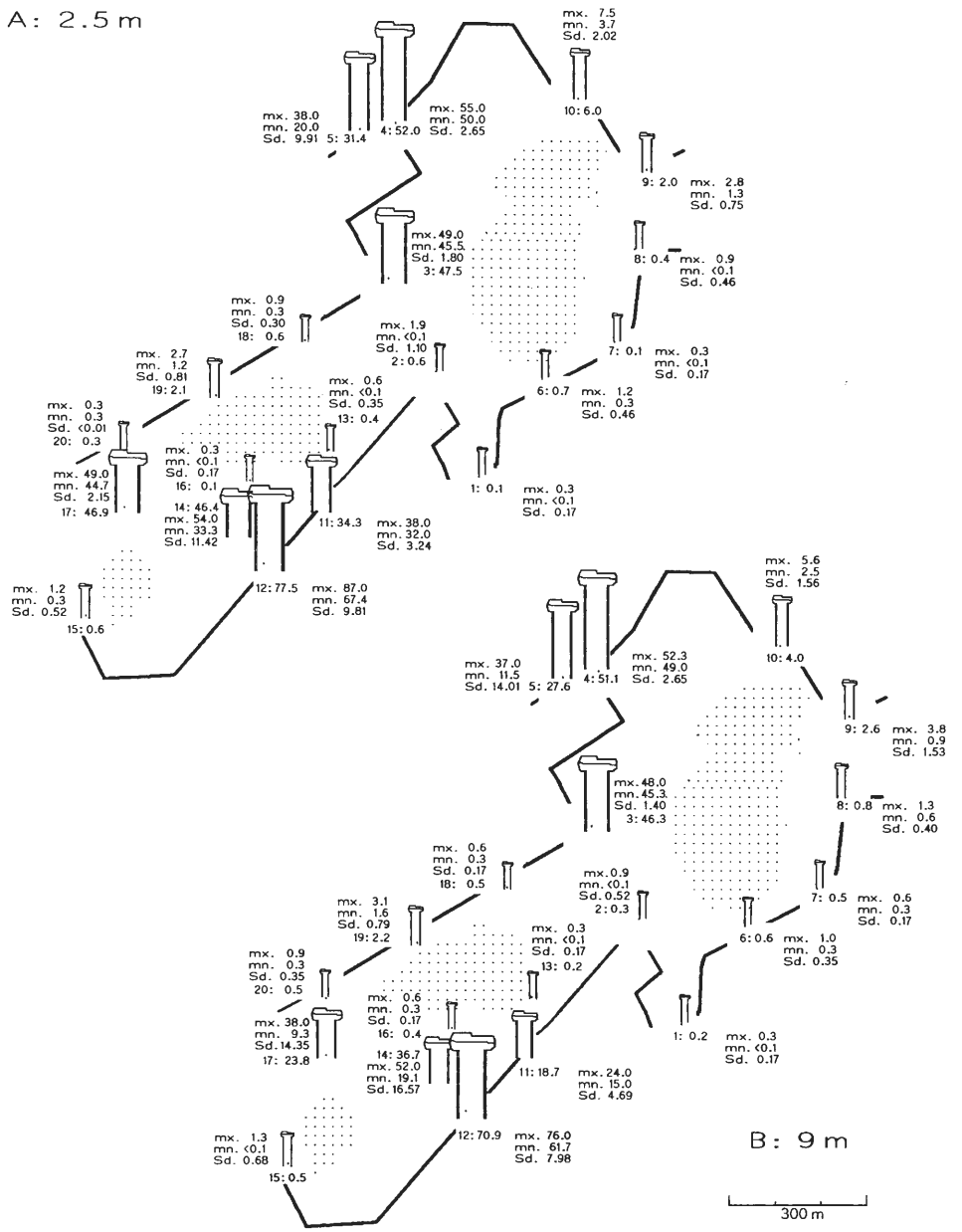


Abb. 9 : Mittlere Sauerstoffkonzentration [%-Sättigung] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Mai 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

stoffschwund kommen. Vorwiegend reduzierende Bedingungen durch einen geringen Sauerstoffgehalt des Grundwassers in Verbindung mit gering-mächtigen Sickerwasserzonen dürften charakteristisch für die natürliche Grundwasserbeschaffenheit des Gebietes sein (Abb. 9).

Reduzierende Milieubedingungen durch Sauerstoffschwund, verbunden mit Denitrifizierung, Ammonium- (III.6) und Schwefelwasserstoffbildung (III.11) treten von den Randzonen bis ins Kerngebiet auf. Diese Milieubedingungen wirken sich auch durch Erniedrigung des Redoxpotentials positiv auf den Gehalt des Grundwassers an Metallionen aus: In Zonen mit reduzierenden Bedingungen, besonders aber im Bereich der Meerbecke und des Erdfallsees, können z. B. Eisen- (III.22), Mangan- (III.23) und andere Metallionen auch anthropogen bedingt in erhöhten Konzentrationen auftreten.

III.4 Nitrat

Zulässige Höchstkonzentration: 50 mg/l; Richtzahl: 25 mg/l

Nitrat gilt neben Phosphat (III.7) als bedeutsamer Eutrophierungsparameter und ist an nährstoffarmen Standorten für die Phytomasseproduktion der Gewässer ein limitierender Faktor. Zum Erhalt der nährstoffarmen Ökosysteme der Gewässer des Gebietes ist eine Begrenzung der Nitratkonzentrationen auf Werte erforderlich, die weit unterhalb der Grenzwerte der EG-Richtlinie liegen (s. o.). Pott (1983) gibt Richtwerte von 0.01-0.7 mg/l Nitrat für oligotrophe Standorte (Erdfallsee) und 1.2-2.2 mg/l Nitrat für mesotrophe Standorte an; Nitratwerte über 8 mg/l charakterisieren bereits hypertrophe Gewässer, die als extrem nährstoffreich und artenarm (nur noch Einart-Gesellschaften euryöker Spezies, POTT 1983) einzustufen sind.

Von den oberirdischen Gewässern des Schutzgebietes weist nur die Meerbecke einen erhöhten Nitratgehalt auf (4.0-18.4 mg/l); das Wasser der größeren Seen enthält meist weniger als 1 mg/l Nitrat. Dies gilt mit wenigen Ausnahmen weitgehend auch für das Grundwasser in unmittelbarer Nähe von Meerbecke, Großem Heiligen Meer, Erdfallsee und Heideweiher (Abb. 10). Am Heideweiher (15) und am Erdfallsee (13) kann es aber auch zeitweise zu einem Anstieg des Nitratgehaltes im Grundwasser kommen.

In den Kapiteln III.1-III.3 wurde auf die Bedeutung vertikaler Transportvorgänge für den Nitratgehalt des Grundwassers hingewiesen. Nitratgehalte von zeitweise mehr als 200 mg/l wurden am Nordrande des Schutzgebietes (Mittelwert von 4: 146.0 mg/l) und bis zu 80 mg/l am Südrand des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes (Mittelwert an 11: 60.7 mg/l) festgestellt. Auch unter heute stillgelegten Nutzflächen im Kerngebiet (Pufferzonen) ist in Verbindung mit Sauerstoffeintrag der Nitrattransport gewährleistet. Im Grundwasser sinkt der Sauerstoffgehalt von 12 am Südrand des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes bis 14 im Mittel von 8.0 auf 4.1 mg/l. Auf dieser Strecke ist jedoch kein Nitratabbau feststellbar (12: im Mittel 39.9 mg/l, 14: im Mittel 40.4 mg/l; Abb. 10a). Auch am Südufer des Erdfallsees (13: bis 2.6 mg/l) und am Heideweiher (17: bis 10.0 mg/l) können gegenüber der Umgebung (15: bis 1.1 mg/l; 16: bis 0.4 mg/l) bereits deutlich erhöhte Nitratkonzentrationen im Grundwasser festgestellt werden (Abb. 10).

Mit zunehmendem Abstand zu den landwirtschaftlichen Nutzflächen, besonders aber bei Sauerstoffschwund, nimmt der Nitratgehalt im Grundwasser drastisch ab, während der Gehalt an Ammonium (III.4.6) lokal stark ansteigen kann. Dies gilt besonders für die Bruchwaldzone am Erdfallsee (18-20: im Mittel 0.63-0.32 mg/l NO_3) und dem Großen Heiligen Meer (6-9: 0.35-0.12 mg/l NO_{3-})

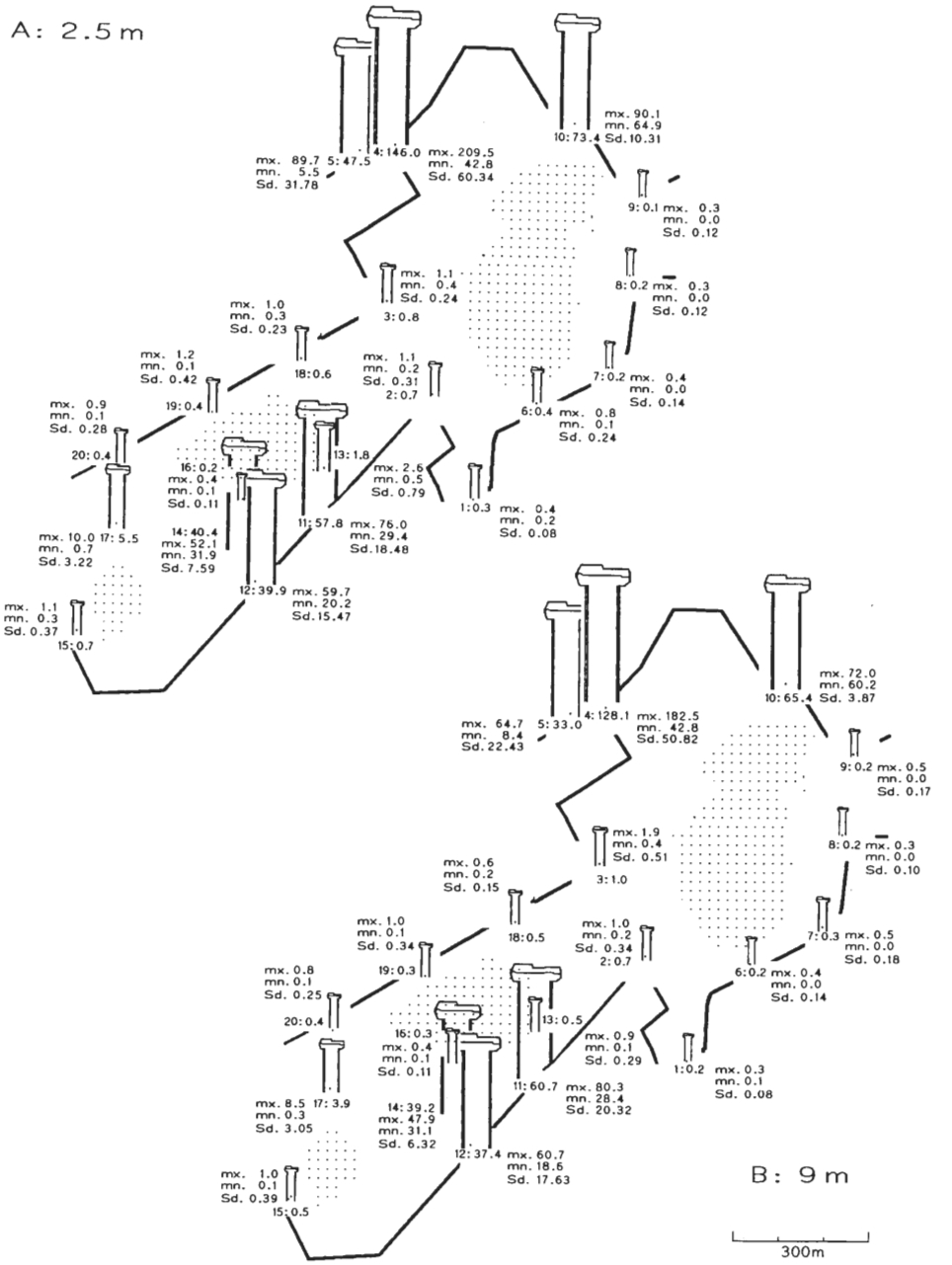


Abb. 10 : Mittlere Nitratkonzentration [mg/l] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

III.5 Nitrit

Zulässige Höchstkonzentration: 0.1 mg/l (= 100 µg/l)

Die Anwesenheit von Nitrit ist stets ein Hinweis auf Verschmutzung, denn in unverschmutztem Wasser ist Nitrit höchstens in Spuren vorhanden (HÜTTER 1992).

Die Meerbecke weist stets eine erhöhte Nitritkonzentration auf, die Ausdruck anhaltender organischer Verunreinigungen ist (50.6-103.3 µg/l). Auch im Grundwasser dieser Zone (6-9) treten zeitweise erhöhte Nitritgehalte auf (z. B. 8: bis zu 35.7 µg/l).

Auffällig hohe und stark schwankende Werte werden in unmittelbarer Nähe landwirtschaftlicher Nutzflächen am nördlichen Rand des Großen Heiligen Meer-Gebietes (4 u. 5) und am südlichen Rand des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes (11 u. 12) festgestellt (Abb. 11). So wurde in tieferen Grundwasserschichten (bei 9 m) Nitrit an 5 bis zu 526 µg/l und an 12 bis zu 94.8 µg/l nachgewiesen; im oberflächennahen Grundwasser (bei 2.5 m) liegen die entsprechenden Werte an diesen Probestellen vergleichsweise niedrig (5: 0.8-47.5 µg/l; 12: < 0.5-11.2 µg/l). Der Anstieg der Nitritkonzentration in tieferen Grundwasserschichten unterhalb von landwirtschaftlichen Nutzflächen, verbunden mit hohen Nitratgehalten, ist mit großer Wahrscheinlichkeit die Folge organotroph-dissimilatorischer NO_3^--Reduktion (Nitratatmung; OBERMANN 1982). Im Grundwasser des Schutzgebietes treten Belastungen mit Nitrit jedoch meist nur kurzzeitig und räumlich begrenzt auf. Nur die Meerbecke besitzt stets eine erhöhte Nitritfracht als deutlichen Hinweis auf anhaltende anthropogene Störungen (neben Ammonium [III.6] ist Nitrit der wichtigste Indikator für Verunreinigungen; HÖLL 1986).

III.6 Ammonium

Zulässige Höchstkonzentration: 0.5 mg/l; Richtzahl: 0.05 mg/l

Im Schutzgebiet existieren ausgedehnte Bereiche, die stets (8, 9, 16, 18, 19 u. 20) oder überwiegend (1, 2, 6, 13 u. 15) eine erhöhte Ammoniumkonzentration im Grundwasser aufweisen (Abb. 12). Besonders hohe Werte wurden innerhalb der an landwirtschaftliche Nutzflächen angrenzenden Bruchwaldzonen nördlich des Großen Heiligen Meeres (9: im Mittel 1.15 mg/l) und des Erdfallsees (18: 1.52 mg/l) gemessen; an Stellen mit alten Torfresten ließen sich im oberflächennahen Grundwasser ebenfalls erhöhte Ammoniumwerte nachweisen (7: bis 0.09 mg/l; 8: bis 0.50 mg/l), jedoch wurden die mittleren Ammonium-Konzentrationen der Bruchwaldzonen von den Maximumwerten an 7 und 8 nicht erreicht.

Unter Berücksichtigung des anthropogen erhöhten Nitrateintrages und -transportes an mehreren Randzonen des Gebietes (4, 5, 10, 11 u. 12) und in Anbetracht der weitgehend reduzierenden Bedingungen im Grundwasser des Kerngebietes stellen die erhöhten Ammoniumkonzentrationen zweifellos nicht die natürlichen Stickstoffverhältnisse des Grundwassers im Schutzgebiet dar, sondern können Folge erhöhten Nitratabbaus durch Mikroorganismen sein (z. B. durch Nitratammonifikation).

Fast ausnahmslos liegen an Stellen mit niedrigen Ammoniumkonzentrationen erhöhte Nitratbelastungen vor (III.4). Mittelwerte von weniger als 0.1 mg/l NH_4^+ wurden nur an 3 (an der L 504), 4, 5 und 10 (nördliche Randzone an landwirtschaftlichen Nutzflächen), 7 (Meerbecke) und 11, 12 und 14 (südliche Randzone an landwirtschaftlichen Nutzflächen) gemessen, also innerhalb von Bereichen, die anthropogene Störungen aufweisen.

Auch in Grundwässern mit zeitweisem Nitratanstieg (2, 11, 13, 14, 15 u. 17) können deutlich erhöhte Ammoniumkonzentrationen und -schwankungen auftreten. Besonders

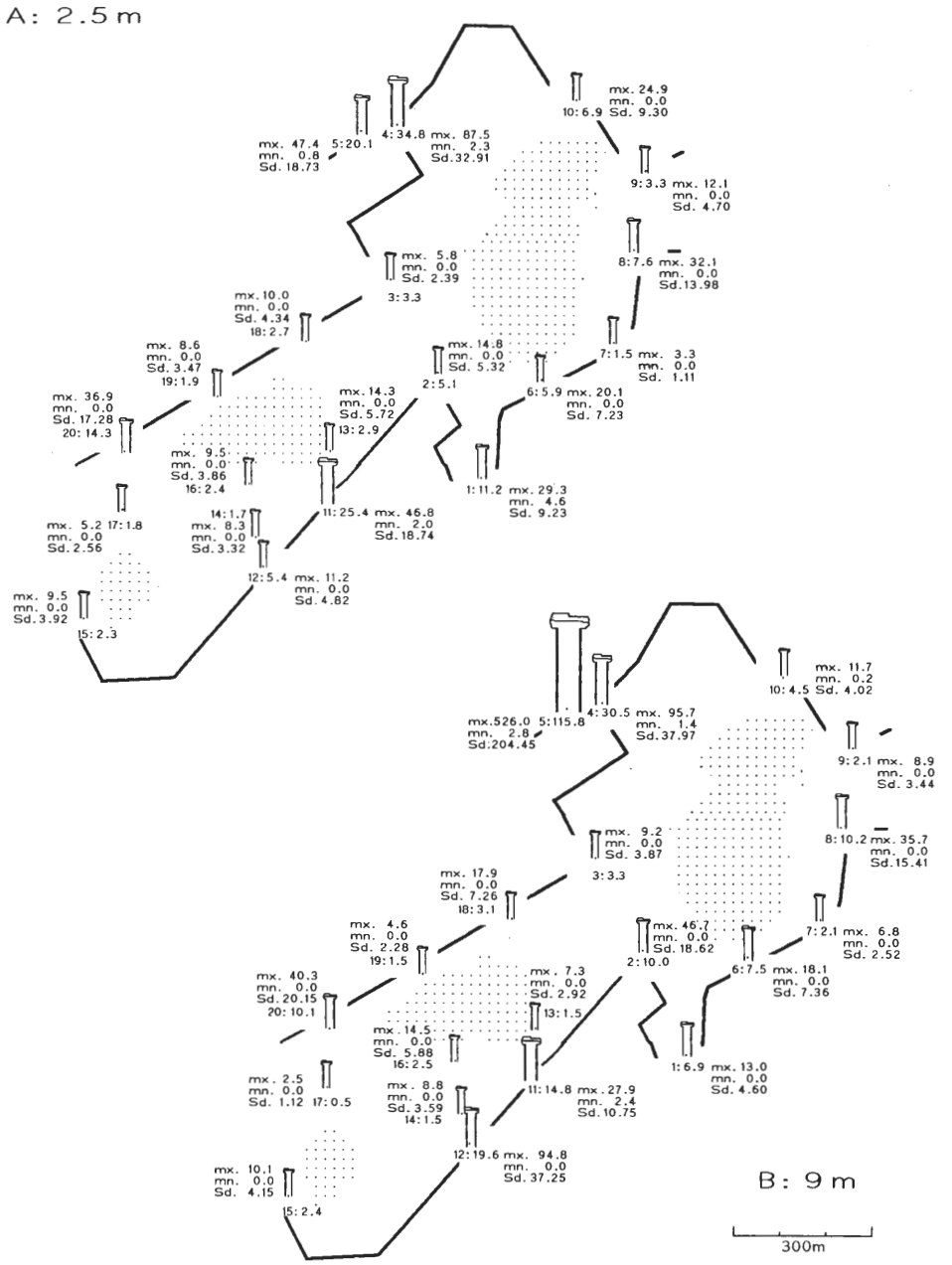


Abb. 11: Mittlere Nitritkonzentration [µg/l] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

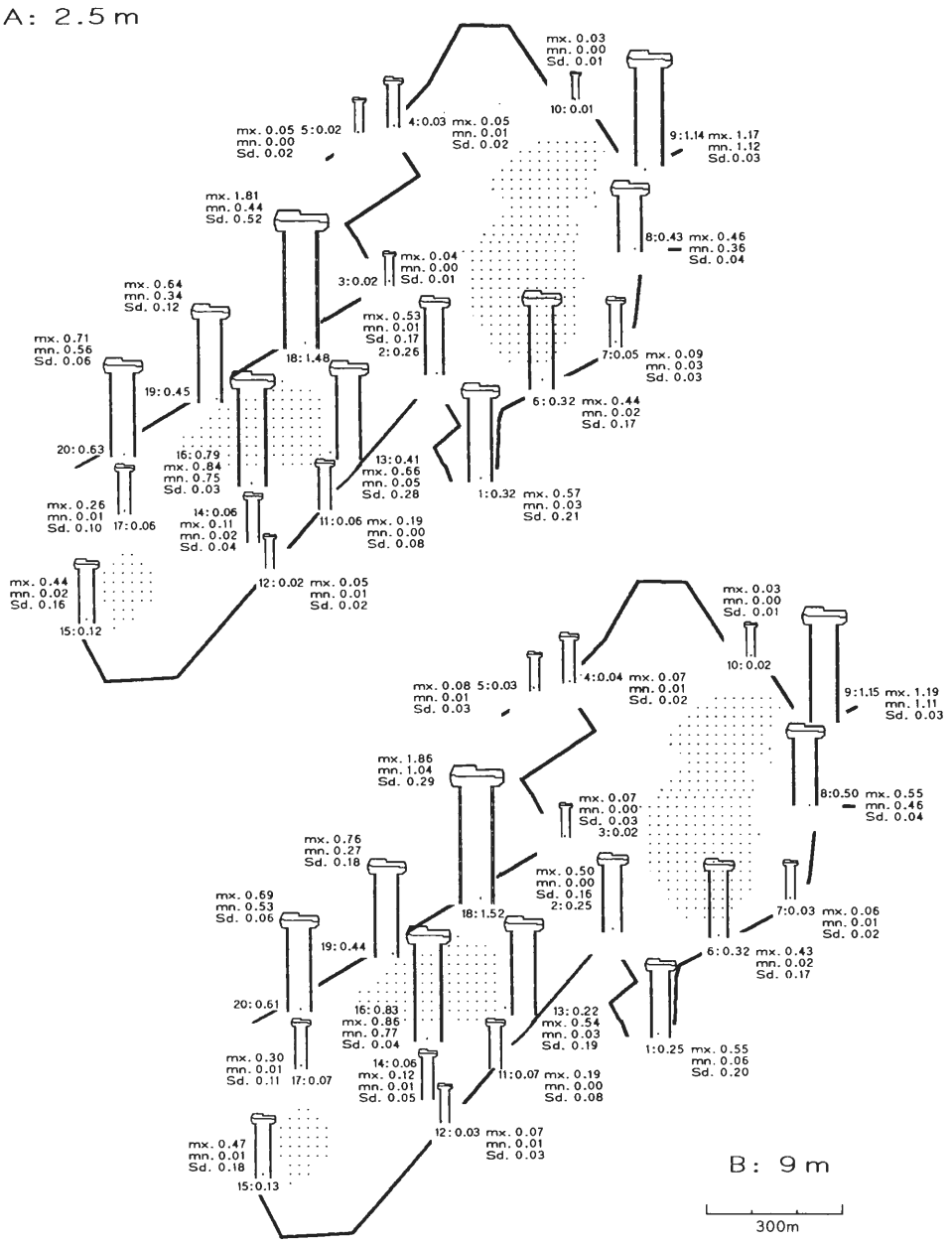


Abb. 12: Mittlere Ammoniumkonzentration [mg/l] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

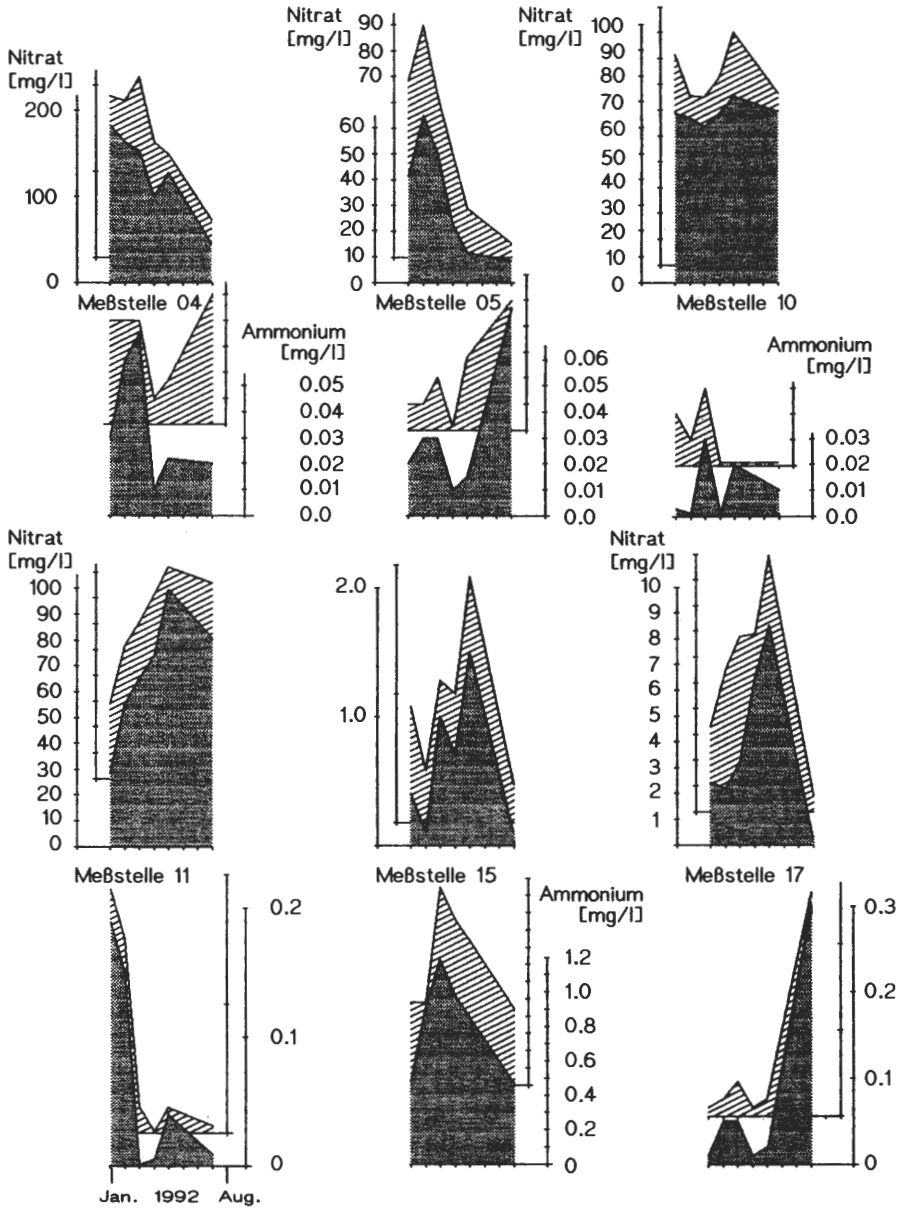


Abb. 13: Nitrat- und Ammoniumkonzentrationen und ihre zeitlichen Änderungen an ausgewählten Grundwasserstellen des NSG "Heiliges Meer"

an 11, 14 und 17 sind Nitrat- und Ammoniumkonzentrationen zeitlich antagonistisch feststellbar und werden offensichtlich über die Verfügbarkeit von Sauerstoff durch Redox-Reaktionen beeinflußt (Abb. 13).

III.7 Phosphat

Zulässige Höchstkonzentration: 5000 µg/l P_2O_5 (= 3.35 mg/l PO_4); Richtzahl: 400 µg/l

Als essentieller Nährstoff kommt Phosphat an nährstoffarmen Standorten in nur geringen Konzentrationen vor und gilt daher als wichtiger Eutrophierungsparameter. Die EG-Richtlinien haben bezüglich des hohen Grenzwertes für Phosphat gewässerökologisch keine Relevanz (vgl. auch III.4). In oligotrophen Seen (Erdfallsee) treten Phosphatkonzentrationen von <0.01-0.2 mg/l, in mesotrophen Seen von 0.2-0.8 mg/l auf (Pott 1983). Der Gehalt des Grundwassers an gelöstem Phosphat ist sowohl im Großen Heiligen Meer-Gebiet (1, 6-9; Abb. 14) als auch im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet (15, 16, 18-20) stark erhöht. Hohe Phosphatwerte treten im Grundwasser des Gebietes stets mit erhöhten Konzentrationen von Eisen (Fe^{2+}-Ionen; III.22) und Mangan (Mn^{2+}-Ionen; III.23) an Stellen mit reduzierenden Milieubedingungen auf. Dies ist wohl auch der Grund dafür, daß hauptsächlich in den tieferen Grundwasserschichten bei 9m höhere Phosphatkonzentrationen gefunden wurden als bei 2.5m (Abb. 14). Bei pH-Werten (III.9) zwischen 7.5 und 4.5 liegt die gelöste Phosphat-Spezies hauptsächlich als $H_2PO_4^-$ vor (MATTHES 1990).

Besonders hohe Phosphatwerte wurden am Erdfallsee (16: 1.55 mg/l) und am Heideweiher (15: 1.30 mg/l) festgestellt sowie am Ostrand des Gebietes (6: 1.15 mg/l; 8: 0.79 mg/l). Eine große Schwankungsbreite der Phosphatkonzentration im Grundwasser weist auf anthropogene Störungen hin (HÖLL 1986); an 6 (Grundwasser im Bereich der Meerbekke; Abb. 14) wurden Werte zwischen 0.13-1.15 mg/l festgestellt.

Bei oxidierenden Milieubedingungen liegen die Phosphatkonzentrationen vergleichsweise niedrig, weil Phosphat komplex an Eisenhydroxid u. a. Metallhydroxide, aber auch an Sedimentpartikel (z. B. Tonminerale, MATTHES 1990) gebunden wird. Wie bereits in Kap. III.3 erwähnt, herrschen oxidierende Milieubedingungen hauptsächlich im Norden des Großen Heiligen Meer-Gebietes (4, 5 u. 10) und im Süden des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes (11, 12, u. 14). Hier liegen vergleichbar niedrige Phosphatkonzentrationen von < 0.01-0.09 mg/l vor, die jedoch zeitweise leichte Erhöhungen erkennen lassen. Die verhältnismäßig große Schwankungsbreite weist aber auch hier auf anthropogene Belastungen hin, z. B. auf Gülleverrieselung und Auswaschung phosphathaltiger Mineraldünger.

Im Grundwasserbereich der Landstraße L 504 kommt an Meßstelle 2 unter weitgehend reduzierenden Bedingungen nur ein leicht erhöhter Phosphatgehalt vor (0.01-0.05 mg/l) während an 1 im Meerbeckebereich – ebenfalls an der L 504 gelegen – Werte von 0.10-0.61 mg/l gemessen wurden. Die Meerbecke, deren Wasser zeitweise deutlich erhöhte Phosphatgehalte aufweist (< 0.01-0.17 mg/l), ist neben den landwirtschaftlichen Nutzflächen des unmittelbaren Umfeldes als weitere, das Grundwasser des Schutzgebietes belastende Phosphatquelle einzustufen.

III.8 Organische Substanzen

Zulässige Höchstkonzentration: 5 mg/l O_2 (=19.8 mg/l $KMnO_4$); Richtzahl: 2 mg/l O_2

Erhöhte und besonders stark schwankende Mengen organischer Substanzen können ein deutlicher Hinweis auf Gewässerverunreinigungen sein.

Bestimmt wurden die organischen Substanzen als Kaliumpermanganatverbrauch in saurer Lösung [mg/l]. Die teils beträchtlich erhöhten Werte im gut durchlüfteten Grundwasserleiter im Bereich landwirtschaftlicher Nutzflächen (4 u. 5: 73.9-171.9 mg/l; 12:

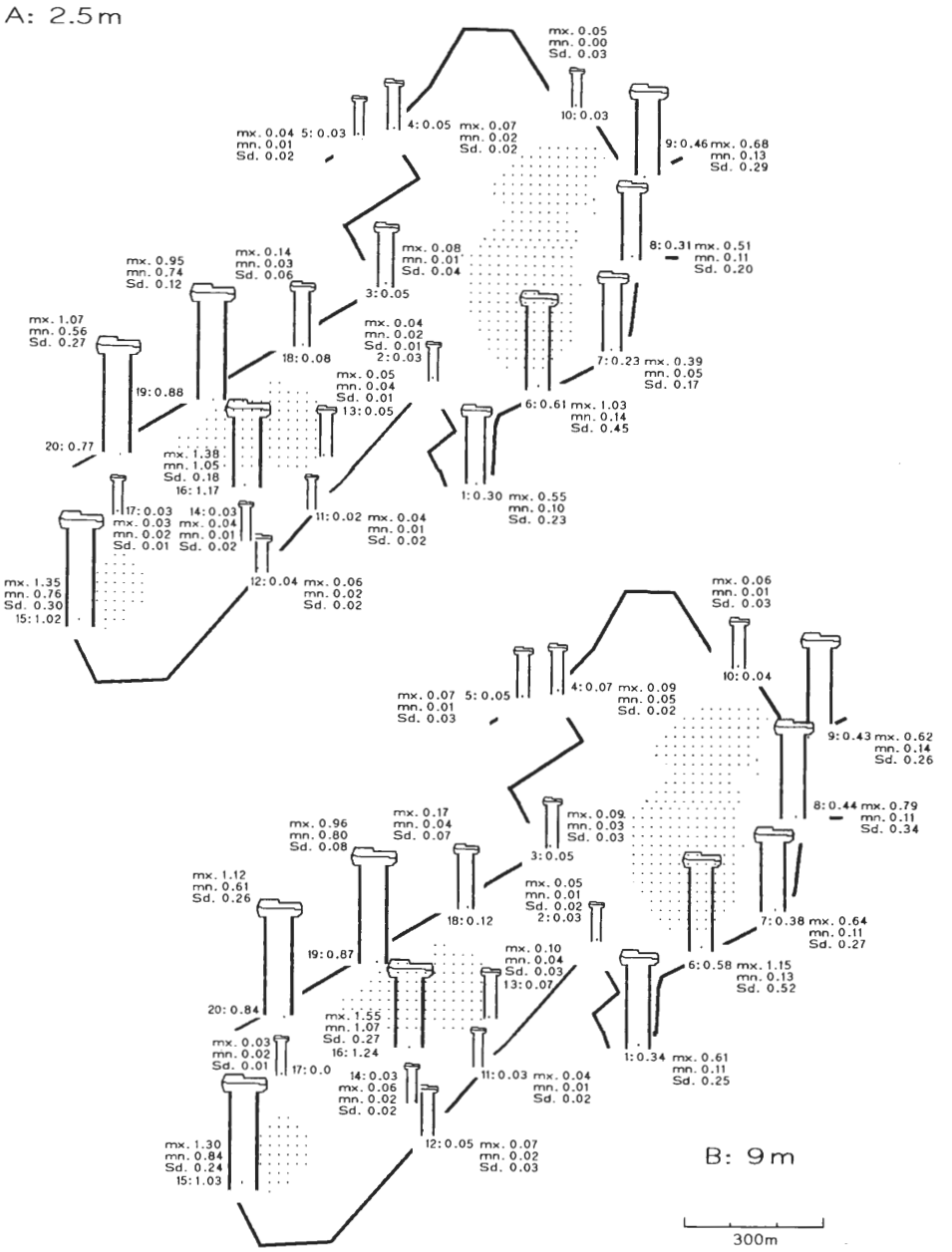


Abb. 14: Phosphatkonzentration [mg/l] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

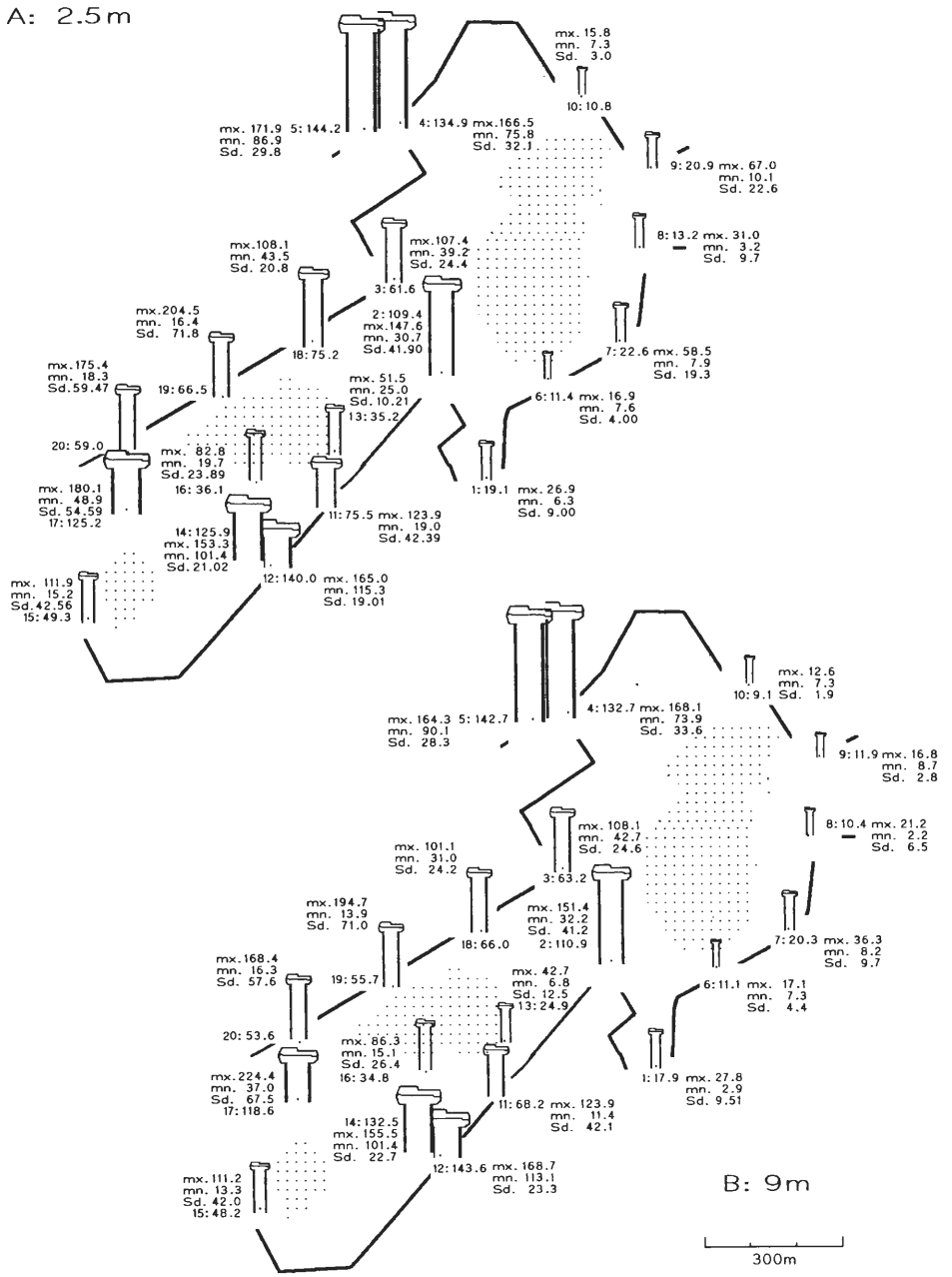


Abb. 15: Konzentration der organischen Substanzen [mg/l] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

113.1-168.7 mg/l) sprechen für anthropogen bedingte Verunreinigungen, die im Zusammenhang mit anderen, das Grundwasser belastenden Faktoren stehen (III.3 u. III.7). Die Konzentrationen verringern sich meist mit zunehmendem Abstand zu den Eintragsquellen (10: 7.3-15.8 mg/l; 16: 15.1-86.3 mg/l; Abb. 15).

Die Mineralisation, d.h. der oxidative Abbau organischer Substanzen, ist unter reduzierenden Bedingungen stark eingeschränkt, so daß auch natürlicherweise, z. B. am Erdfallsee an 16, zeitweise erhöhte Konzentrationen organischer Substanzen auftreten können. Aber auch an anderen Stellen des Kerngebietes wurden z. T. extrem hohe Konzentrationen, z. B. in Form von Huminsäuren, festgestellt (17: bis 224.4 mg/l). Erwartungsgemäß wurden sehr hohe Konzentrationen im Grundwasser mit reduzierenden Bedingungen auch in unmittelbarer Nähe zu landwirtschaftlichen Nutzflächen, z. B. im Norden des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes, festgestellt (19: bis 204.5 mg/l; 20: bis 194.7 mg/l).

Im Bereich der Meerbecke treten hingegen vergleichsweise niedrige Konzentrationen auf (z. B. 6: 7.6-17.1 mg/l), obwohl dort reduzierende Bedingungen herrschen. Erhöhte Abbauraten durch nitrat- bzw. sulfatatmende Mikroorganismen können auch unter reduzierenden Bedingungen zum Abbau organischer Substanzen führen; der für die Oxidation benötigte Sauerstoff wird zunächst von den Nitrationen, nach deren vollständiger Reduktion von den Sulfationen geliefert, die im Wasser der Meerbecke besonders an 6 in sehr hoher Konzentration vorliegen (III.11). Auch das Wasser der Meerbecke besitzt eine erhöhte Fracht an organischen Substanzen (22.8-59.1 mg/l) und liefert ständig Material nach, sodaß es hierdurch lokal auch zu Belastungen im Grundwasser kommen kann (z. B. im oberflächennahen Grundwasser an 7 mit bis zu 58.5 mg/l in 2.5 m, mit bis zu 36.3 mg/l in 9.5 m Tiefe).

Stark erhöhte Gehalte an organischen Verbindungen treten in moorigen Gewässern natürlicherweise oft zusammen mit Eisen unter Humatbildung auf und führen damit zu hohen Kaliumpermanganat-Verbrauchswerten (bis 350 mg/l); Huminsäuren können mit weiteren Metallionen (Fe, Mn, Cu, Zn, Ca u. a.) Chelatkomplexe bilden, die für den Transport der Metallionen im Grundwasser eine große Rolle spielen können (HÜTTER 1992). Bereiche mit Torfresten im Untergrund treten an 17 und 18 im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet, aber auch im Bereich der Meerbecke an 7, 8 und 9 auf, so daß dort neben anthropogenen Quellen auch natürliche Ursachen für einen erhöhten Gehalt organischer Substanzen im Grundwasser möglich sind.

III.9 Wasserstoffionenkonzentration (pH-Wert)

Richtzahl: 6.5 pH < 8.5

Im Grundwasser des Gebietes kommen pH-Werte zwischen 4.3 und 7.7 vor. Diese große Spanne von mehr als 3 pH-Einheiten ist in den unteren Bereichen anthropogen bedingt; sie wird begünstigt durch die geringe Pufferkapazität des Grundwassers (kalkarmer Untergrund) und unterliegt einer kleinräumlichen Gliederung (Abb. 16).

Nahezu neutrale bis schwach alkalische Verhältnisse werden an der Ostgrenze des Großen Heiligen Meer-Gebietes im reduzierenden Grundwasser angetroffen (6: pH 6.8-7.2; 8: pH 7.0-7.5; 9: pH 7.4-7.7); nur an 7 lagen die Werte im sauren Bereich und zeigten eine leicht erhöhte Schwankungsbreite (pH 5.8-6.6).

Größere pH-Wert-Schwankungen mit einer Tendenz zum Sauren treten lokal häufiger im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet auf; hier ist die Pufferkapazität des Grundwassers durch einen besonders niedrigen Gehalt an Erdalkaliionen (III.15 und III.16) geringer als im Großen Heiligen Meer-Gebiet (15: pH 6.2-7.5, 18-20: pH 5.3-7.5; Abb. 16).

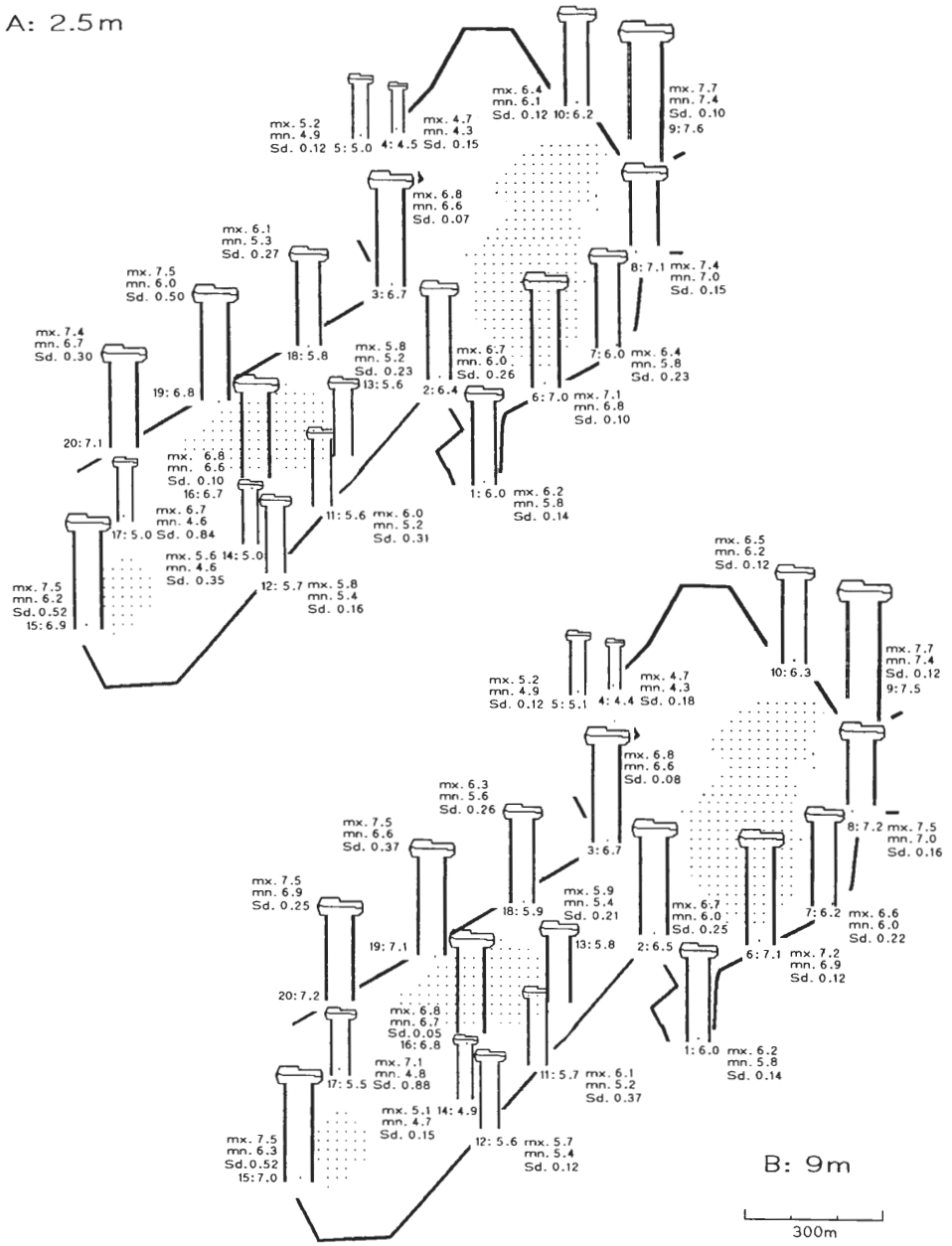


Abb. 16: Mittlerer pH-Wert [$-\lg(H^+)$] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

An 17 wurden pH-Werte von 4.6-7.1 mit einem Mittelwert von pH 5.0 in 2.5m Tiefe und von 5.5 in 9m Tiefe festgestellt. Der plötzliche Wechsel des pH-Wertes an 17 von sauer nach neutral im Juli 1992 war von einer drastischen Abnahme des Leitwertes (III.10) und dem nahezu vollständigen Verschwinden von Nitrat- und Sulfationen (III.11) begleitet. Ein Milieuwechsel von oxidierenden zu reduzierenden Bedingungen dürfte eine fast vollständige Reduktion von Nitrat und Sulfat und einen erhöhten Verbrauch von H^+-Ionen bewirkt haben (vgl. Abb. 33; III.24). Die durch oxidierende Bedingungen hervorgerufenen pH-Werterniedrigungen auch in anderen, z. B. durch die Landwirtschaft beeinflußten Grundwasserbereichen des Gebietes (4, 5, 11, 12 u. 14), gehen offensichtlich auf die mikrobielle Oxidation der Stickstoff- und Schwefelspezies zurück.

Aber auch eine erhöhte organische Fracht (III.8) des Grundwassers kann bei Anwesenheit von Sauerstoff infolge biologischen Abbaus organischer Substanzen zu erhöhten CO_2-Konzentrationen und zur Kohlensäurebildung führen und nicht unerhebliche pH-Wert-Erniedrigungen bewirken. An den pH-Wert-Absenkungen sind hier aber offensichtlich neben der Kohlensäure organische und in anthropogen belasteten Bereichen dominant anorganische Säuren beteiligt (vgl. III.18).

Als Beispiel für die Auswirkung der Redoxverhältnisse auf den pH-Wert und die Beteiligung von Nitrat- und Sulfationen wurde bereits die Meßstelle 17 angeführt. Redox-Reaktionen können ebenfalls für pH-Wert-Absenkungen und -Schwankungen verantwortlich sein, wobei unter oxidierenden Bedingungen z. B. aus reduzierten Schwefelverbindungen (z. B. H_2S) von Bakterien der Gattung *Thiobacillus* Schwefelsäure (H_2SO_4) gebildet (HÜTTER 1992) und eine erhöhte H^+-Ionenkonzentration im Grundwasser bewirkt wird. Auch Gülleverrieselung und die hiermit verbundenen Ammoniumeinträge in sauerstoffreiches Grundwasser führen rasch zur Nitratbildung durch Mikroorganismen unter Freisetzung von H^+-Ionen (HÜTTER 1992), d.h., daß in schwach gepufferten Grundwässern über die Ammoniumoxidation ebenfalls drastische pH-Wert-Erniedrigungen verursacht werden können. Niedrige pH-Werte wirken sich hemmend auf den mikrobiellen Nitratabbau aus (OBERMANN 1982) und fördern daher den Nitrattransport.

Auffallend saure Milieubedingungen treten in den Grundwasserbereichen auf, die unmittelbar an landwirtschaftliche Nutzflächen angrenzen bzw. von ihnen durch erhöhte Sauerstoffkonzentrationen beeinflußt werden. Für das Große Heilige Meer-Gebiet ist in diesem Zusammenhang die nördliche Randzone mit 4 (pH 4.3-4.7) und 5 (pH 4.9-5.2), für das Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet die südliche Randzone mit 12 (pH 5.4-5.7) und 14 (pH 4.6-5.6) zu nennen.

Diese Redox-Vorgänge werden außer durch anthropogene Strukturveränderungen des oberflächennahen Grundwasserleiters und erhöhte Einträge von Stickstoffverbindungen durch die landwirtschaftliche Nutzung des Umfeldes auch durch industrielle Abwässer bewirkt, die über die Meerbecke in das Gebiet gelangen. So weisen sämtliche Grundwasserbereiche mit erhöhtem Sauerstoffgehalt und niedrigem pH-Wert hohe Sulfatkonzentrationen auf (4, 5, 10, 11, 12, 14 u. 17). Das Grundwasser in unmittelbarer Nähe zu landwirtschaftlichen Nutzflächen an der Meerbecke im Norden des Großen Heiligen Meer-Gebietes weist besonders starke Versauerungen auf (Abb. 16); dies ist ein Hinweis darauf, daß sich die anthropogene Einflußnahme von Landwirtschaft und Industrie gegenseitig verstärkt.

In moorigen und nährstoffarmen Gebieten treten niedrige pH-Werte auch natürlicherweise (Huminsäuren) oder anthropogen bedingt durch saure Niederschläge (Regen, Schnee) auf (HÜTTER 1992). Häufig ist mit pH-Wert-Erniedrigungen eine Mobilisierung von Metallionen verbunden, im Untersuchungsgebiet mit erhöhten Konzentrationen von Aluminium- (III.24) und Zinkionen (III.25).

III.10 Leitfähigkeit [µS/cm] bei 25 °C

Zulässige Höchstkonzentration: 400 µS/cm bei 20 °C (= 446.5 µS/cm bei 25 °C)

Niedrige Leitfähigkeiten um 100 µS/cm, wie sie für salz- und nährstoffarme Standorte charakteristisch sind (Erdfallsee: 135 µS/cm, POTT 1983), können im Grundwasser des Gebietes nur an wenigen Stellen zeitweise oberflächennah (bei 2.5m) festgestellt werden (5: 113-330 µS/cm; 18: 108-150 µS/cm; Abb. 17a). Auch 1992 besaß nur der bislang noch als oligotroph eingestufte Erdfallsee eine vergleichbar niedrige Leitfähigkeit von im Mittel 146 µS/cm. Das Große Heilige Meer wies bereits eine deutlich erhöhte Leitfähigkeit von 240-360 µS/cm auf, die Meerbecke von zeitweise > 1000 µS/cm.

Lokal treten im Gebiet bemerkenswerte Unterschiede in der Leitfähigkeiten des Grundwassers auf. So kommen im Großen Heiligen Meer-Gebiet im Mittel beträchtlich höhere Leitfähigkeitswerte vor (236-1315 µS/cm) als im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet (133-398 µS/cm). Diese Unterschiede ergeben sich hauptsächlich durch die Lage und Nähe zu den Eintragsquellen stark ionenhaltiger Wässer (Meerbecke und Sickerwässer an der L 504, Abb. 17) bzw. durch Austauschprozesse zwischen dem Grundwasser und nährstoffarmen Oberflächengewässern (Erdfallsee). Obwohl der Belastungsschwerpunkt der Ionenfracht des Grundwassers im Großen Heiligen Meer-Gebiet liegt, müssen auch die Leitfähigkeiten des Grundwassers im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet bereits für weite Bereiche als überhöht eingestuft werden. Neben den schon genannten Eintragsquellen ist aus angrenzenden landwirtschaftlichen Nutzflächen ein zusätzlicher allochthoner Nährstoffeintrag an der Zunahme der Leitfähigkeit des Grundwassers im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet beteiligt.

Im Bereich der Meerbecke (1, 6-9) verursachen vor allem Sulfat- (III.11) und Chloridionen (III.12) Leitfähigkeitserhöhungen im Grundwasser. Sie gelangen über Industrieabwässer in den Bachlauf und erfahren aufgrund ihrer konservativen Eigenschaften auch innerhalb des Grundwasserstroms nur geringfügige Veränderungen, d.h., sie werden bis in das Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet transportiert und wirken sich dort aus. Im Großen Heiligen Meer-Gebiet stellen Sulfat- und Chloridionen heute bereits den Hauptionenanteil im Grundwasser. Messungen, die seit den 70er Jahren im Rahmen von Kursen durchgeführt wurden, belegen, daß das Wasser der Meerbecke bis 1987 im Mittel eine Leitfähigkeit von ca. 300 µS/cm aufwies, welche dann bis 1992 mit starken Schwankungen kontinuierlich auf 908 µS/cm zunahm (vgl. IV.).

Im Bereich der L 504 (1-3) bedingen lokal vor allem Chlorid- (III.12) und Natriumionen (III.13) zusätzlich z. T. extreme Leitfähigkeitserhöhungen (2: bis 2050 µS/cm). Am Nordrand des Großen Heiligen Meer-Gebietes und im Süden des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes werden durch die Landwirtschaft erhöhte Kalium- (III.14) und Kalzium-Einträge (III.15) durch erhöhte Leitfähigkeitswerte angezeigt (4: 393-665 µS/cm; 11: 301-455 µS/cm).

III.11 Sulfat

Zulässige Höchstkonzentration: 250 mg/l; Richtzahl: 25 mg/l

Wie bereits in Kap. III.10 erwähnt, belegen Leitfähigkeitsmessungen im Zusammenhang mit weiteren Grundwasseranalysen, daß ein erhöhter Sulfateintrag über die Meerbecke in das Grundwasser des Untersuchungsgebietes erfolgt (für oligotrophe Gewässer, z. B. dem Erdfallsee werden normale Sulfatkonzentrationen von 0.05-2.0 mg/l angegeben, Pott 1983). Heute ist die Sulfatkonzentration im Grundwasser des Gebietes über große Bereiche dauerhaft stark erhöht. Besonders hohe Werte treten im Grundwasserbereich

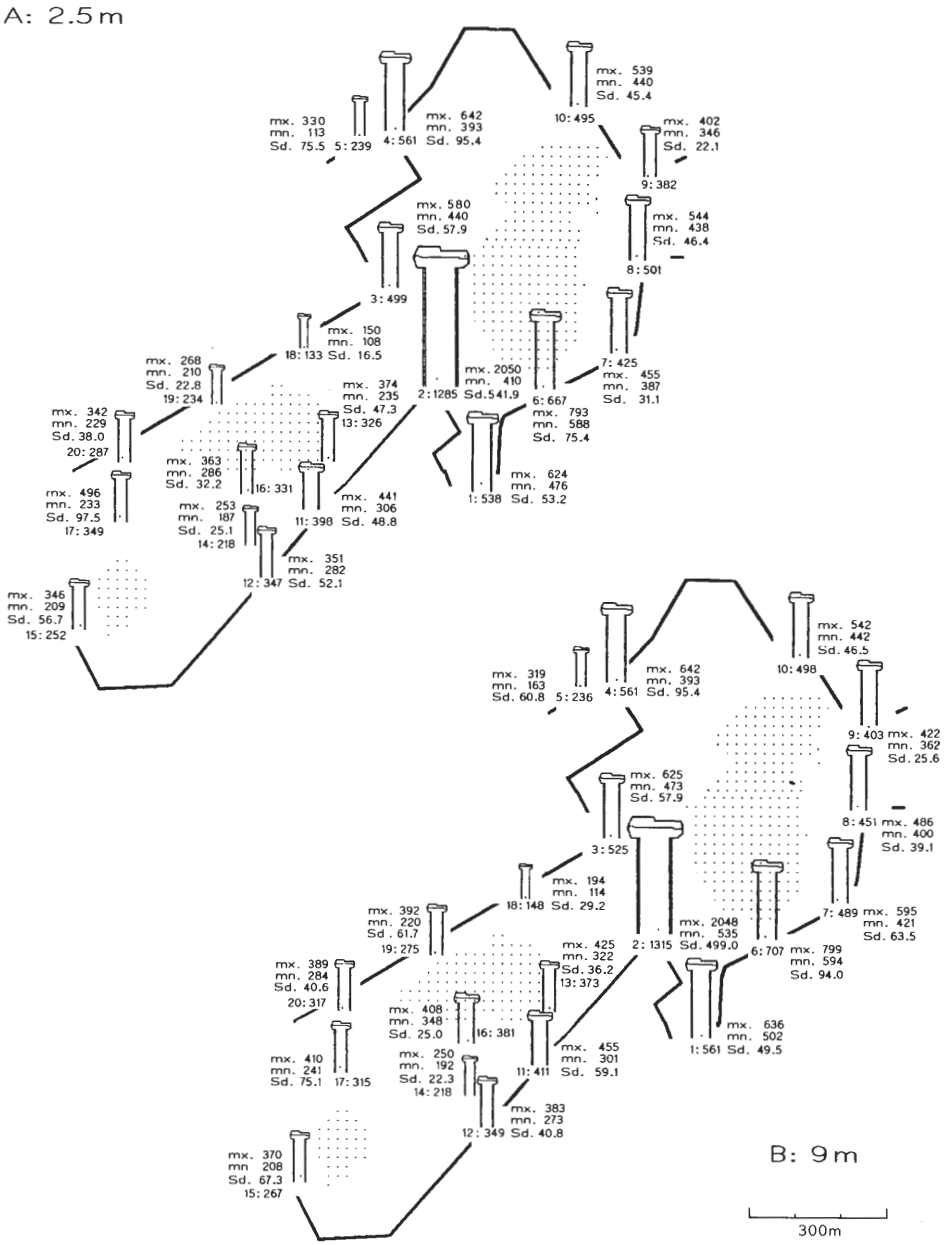


Abb. 17: Mittlere Leitfähigkeit [µS/cm] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

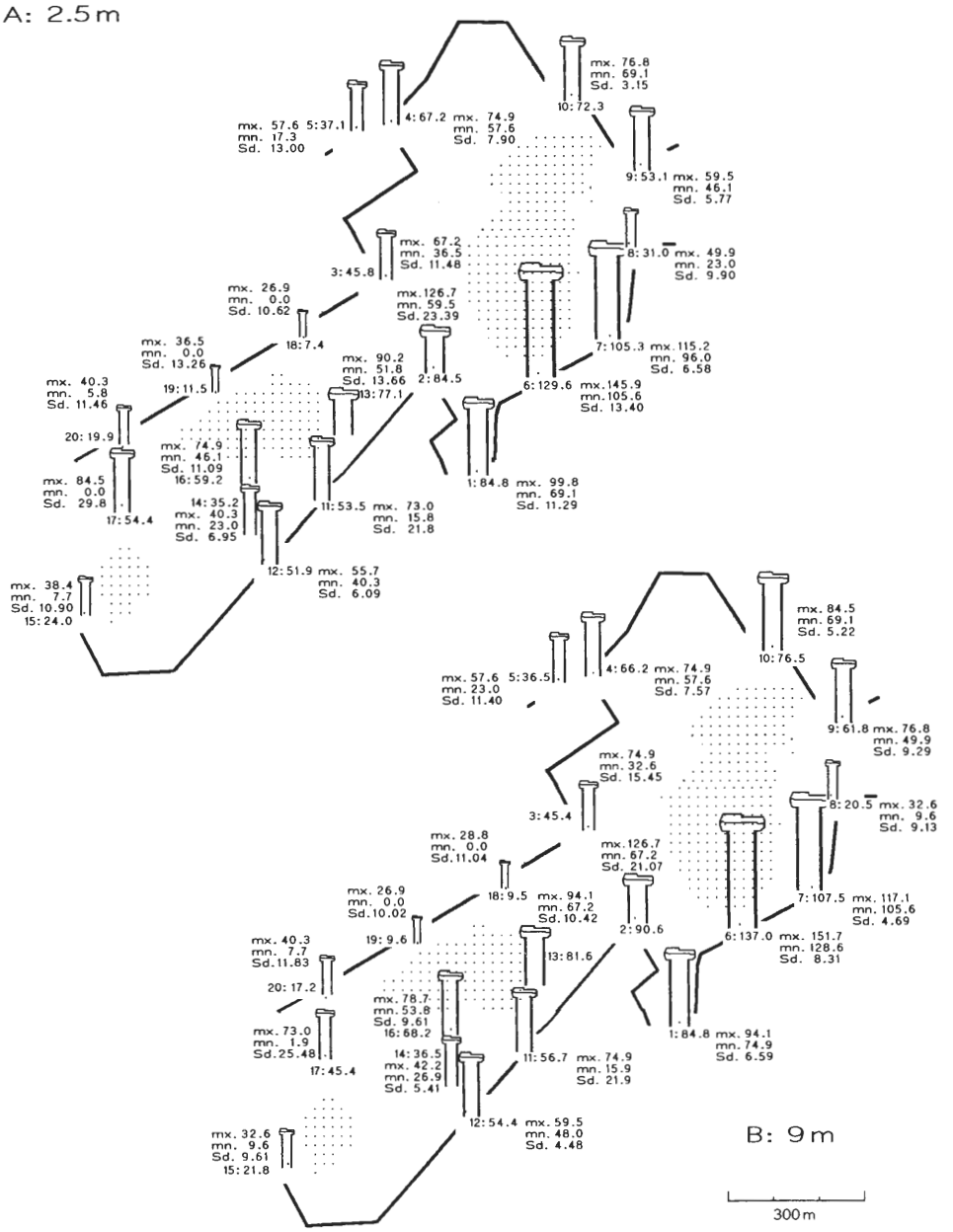


Abb. 18: Mittlere Sulfatkonzentration [mg/l] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

der Meerbecke auf (6: 105.6-151.7 mg/l; Abb. 18). Im Norden des Großen Heiligen Meer-Gebietes liegt die Sulfatkonzentration im Grundwasser geringfügig niedriger (4: 57.6-74.9 mg/l; 5: 17.3-57.6 mg/l); eine erhöhte Schwankungsbreite weist aber darauf hin, daß auch hier bereits keine natürlichen Bedingungen bezüglich der Sulfationen mehr vorliegen.

Lokal lassen sich heute schon Milieuänderungen des Grundwassers durch Schwefelverbindungen erkennen, die Veränderungen weiterer Parameter hervorrufen (z. B. pH-Wert, organische Substanzen) und sich in fortschreitender Entwicklung auch auf den Nitrattransport auswirken (Zunahme des Sulfatangebotes und Erschöpfung der C-Quellen; Kap. IV).

Die vergleichbar niedrigen Konzentrationen organischer Substanzen im reduzierenden Grundwasser des Meerbeckebereiches können durch sulfatatmende Mikroorganismen verursacht sein, die in Folge des hohen Sulfatangebotes gute Wachstumsbedingungen erhalten. Ein weiterer Schwund des C-Angebotes im Grundwasser könnte ihr Wachstum vermindern und zur Abschwächung der reduzierenden Bedingungen und zum Durchbruch von Nitrationen führen.

Normale bis niedrige Sulfatwerte konnten im Grundwasser nur lokal im Norden des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes festgestellt werden (18-20: im Mittel 7.4-17.2 mg/l; Abb. 18). Nur an 17, 18 und 19 kommt es zeitweise zur vollständigen Reduktion des Sulfates, während an den sonstigen Meßstellen unter reduzierenden Bedingungen Schwefelwasserstoff und Sulfat nebeneinander existieren. Am Südrand des Erdfallsees liegen bereits stark erhöhte Werte vor, mit einer Zunahmetendenz in Richtung Meerbekke (16: 46.1-78.7 mg/l; 13: 51.8-94.1 mg/l; vgl. Abb. 18); diese Bereiche weisen für das Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet sogar Höchstwerte auf. Am Westrand des Heideweihers treten Sulfationen im Grundwasser in normalen bis zeitweilig leicht erhöhten Konzentrationen auf (15: 7.7-38.4 mg/l).

III.12 Chlorid

Richtzahl: 250 mg/l

Chlorid besitzt stark komplexbildende Eigenschaften, die zur Erhöhung der Schwermetallkonzentration im Wasser führen können (HÜTTER 1992). Auch hinsichtlich des Chloridgehaltes treten im Grundwasser des Gebietes überwiegend erhöhte bis stark erhöhte Werte auf (Normalwerte: 10-30 mg/l, HÖLL 1986; für oligotrophe Standorte liegen typische Werte bei 2.3-6.2 mg/l, Pott 1983). Obwohl auch über die Meerbecke ein ständiger Chlorideintrag in das Grundwasser erfolgt (Meerbecke: 115.6-190.8 mg/l; Grundwasser an 6: 58.9-66.7 mg/l), liegen die Spitzenbelastungen jedoch an der L 504 (z. B. 2: 36.9-624.1 mg/l; Abb. 19). Charakteristisch für die hohe Salzfracht in diesem Bereich ist auch die große Schwankungsbreite der Chloridkonzentration an Meßpunkt 2, welche auf anthropogene Ursachen hinweist. Da auch entsprechend hohe Konzentrationen und Schwankungen des Natriumgehaltes (III.13) auftreten, dürften von der L 504 ausgehende Kontaminationen durch Auftausalze für die hohe Salzfracht des Grundwassers verantwortlich sein, welche sich nicht nur lokal, sondern durch das konservative Verhalten ihrer Ionen in weiten Bereichen des Grundwassers auswirken. Heute sind ausgedehnte Grundwasser-Bereiche des Großen Heiligen Meer- und des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes durch Chloridionen belastet (Abb. 19).

Neben Kontaminationen durch Auftausalze gelangen Chloridionen auch über das Meerbeckewasser und von landwirtschaftlichen Nutzflächen, insbesondere durch Gülleverrieselung, ins Grundwasser. Schwerpunkte des landwirtschaftlich bedingten Chlorid-

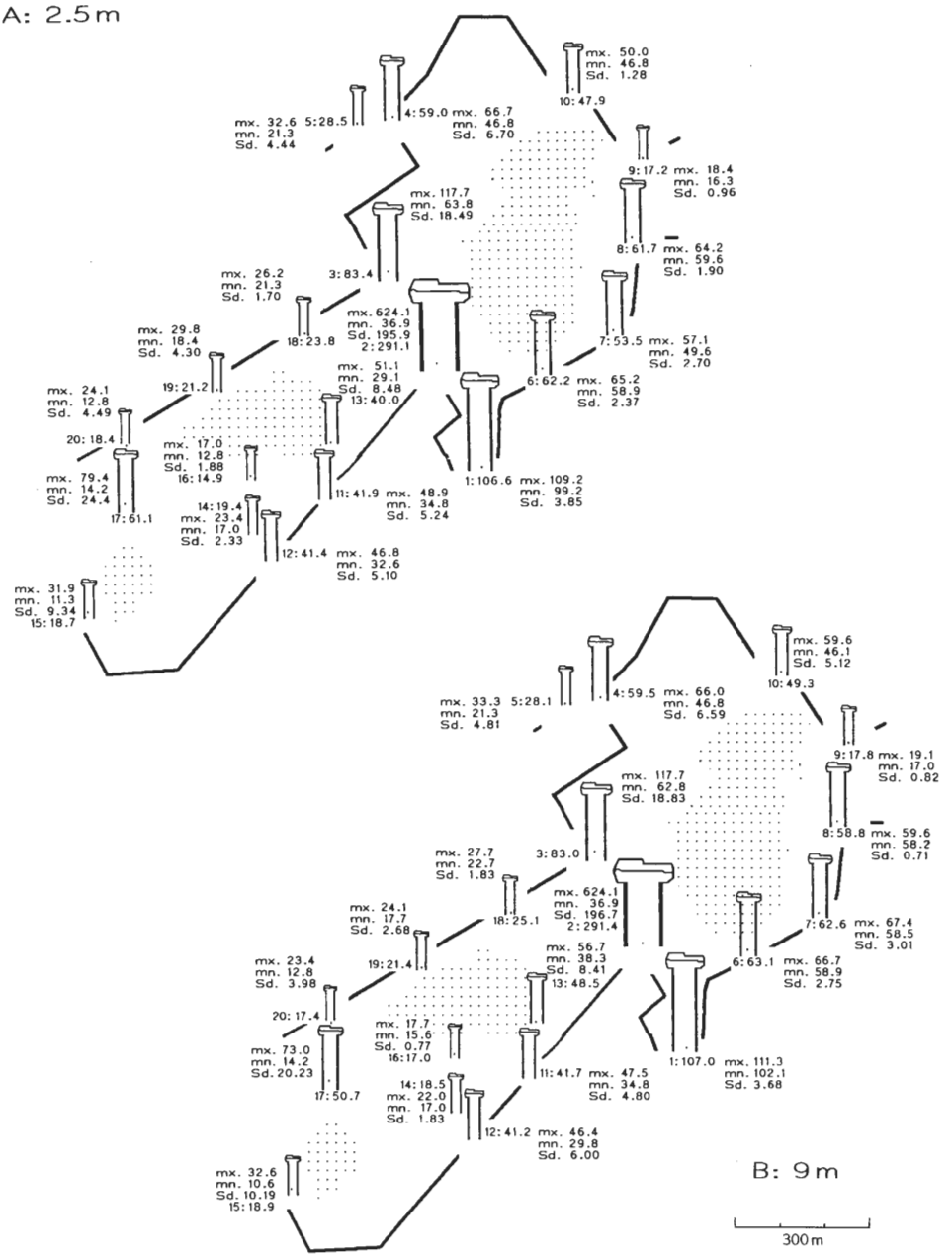


Abb. 19: Mittlere Chloridkonzentration [mg/l] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

eintrages liegen im Norden des Großen Heiligen Meer-Gebietes (4: 46.8-66.7 mg/l; 10: 46.1-59.6 mg/l) und im Süden des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes (11: 34.8-48.9 mg/l; 12: 29.8-46.8 mg/l).

Im westlichen Bereich des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes ist eine deutliche Abnahme der Chloridkonzentrationen festzustellen (15: 10.6-32.6 mg/l; 16: 12.8-17.7 mg/l; 18-20: 12.8-29.8 mg/l), ebenso im Großen Heiligen Meer-Gebiet lokal an 9 (16.3-19.1 mg/l), einem vom Großen Heiligen Meer beeinflußten Grundwasserbereich.

III.13 Natrium

Zulässige Höchstkonzentration: 175 mg/l; Richtzahl: 20 mg/l

Eine ähnliche räumliche Verteilung wie die Konzentrationen der Chloridionen weist auch die der Natriumionen auf; stellenweise stimmt die festgestellte mittlere Chloridionenäquivalenzzahl [mval/l] mit der mittleren Natriumionenäquivalenzzahl gut überein.

Das Alkaliion Natrium gelangt demnach im wesentlichen durch den Eintrag von Natriumchlorid in das Grundwasser und weist Konzentrationsschwerpunkte an der L 504, an der Meerbecke sowie in direkter Nähe zu landwirtschaftlichen Nutzflächen im Norden des Großen Heiligen Meer-Gebietes und im Süden des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes auf (Abb. 20). Die Herkunft der Natriumionen dürfte – wie für die Chloridionen bereits gesagt – in Abtausalzen an der L 504 und Gülleverrieselungen durch die Landwirtschaft zu suchen sein.

III.14 Kalium

Zulässige Höchstkonzentration: 12 mg/l; Richtzahl: 10 mg/l

Wie Nitrat und Phosphat stellt auch Kalium einen wichtigen Pflanzennährstoff dar. Aufgrund seiner geringen Beweglichkeit und seines Entzuges aus dem Wasserkreislauf durch Aufnahme über die Wurzeln der Pflanzen und Bindung in der Phytomasse kommt Kalium deutlich weniger im Grundwasser vor als Natrium (MATTHES 1990).

Im Grundwasser des Untersuchungsraumes liegt Kalium an den meisten Stellen nur in niedrigen Konzentrationen vor, im Großen Heiligen Meer-Gebiet im Mittel zwischen 0.8-5.9 mg/l (1-3, 6-9), im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet zwischen 0.7-1.4 mg/l (16, 18-20). Leichte Konzentrationserhöhungen sind im Bereich der L 504 festzustellen (1: 1.8-8.6 mg/l; 2: 3.2-13.0 mg/l). Auch über die Meerbecke, deren Wasser eine leicht erhöhte Kaliumfracht von im Mittel 12.5 mg/l aufweist, erfolgt ein geringfügiger Kaliumeintrag in das Grundwasser (6-8: 1.1-5.5 mg/l). Die niedrigere Kaliumfracht im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet könnte durch die größere Entfernung zur Meerbecke begründet sein.

Starke Belastungen durch Kaliumionen treten jedoch zusammen mit Nitratbelastungen (III.4) im Norden des Großen Heiligen Meer-Gebietes und im Süden des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes innerhalb von Grundwasserbereichen auf, die unmittelbar durch landwirtschaftliche Nutzflächen beeinflußt werden (Abb. 21; vgl. III.4). Die lokal erhöhte Kaliumfracht (4: 39.0- 44.8 mg/l) muß daher auf anthropogene Störungen durch Auswaschung Kalium-haltiger Mineraldünger und auf Gülleverrieselung zurückgeführt werden; hier wurden bislang auch die höchsten Nitratkonzentrationen (bis über 200 mg/l; vgl. III.4) festgestellt. Im Grundwasser des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes liegen die Belastungen durch Kaliumionen im Bereich landwirtschaftlicher Nutzflächen nied-

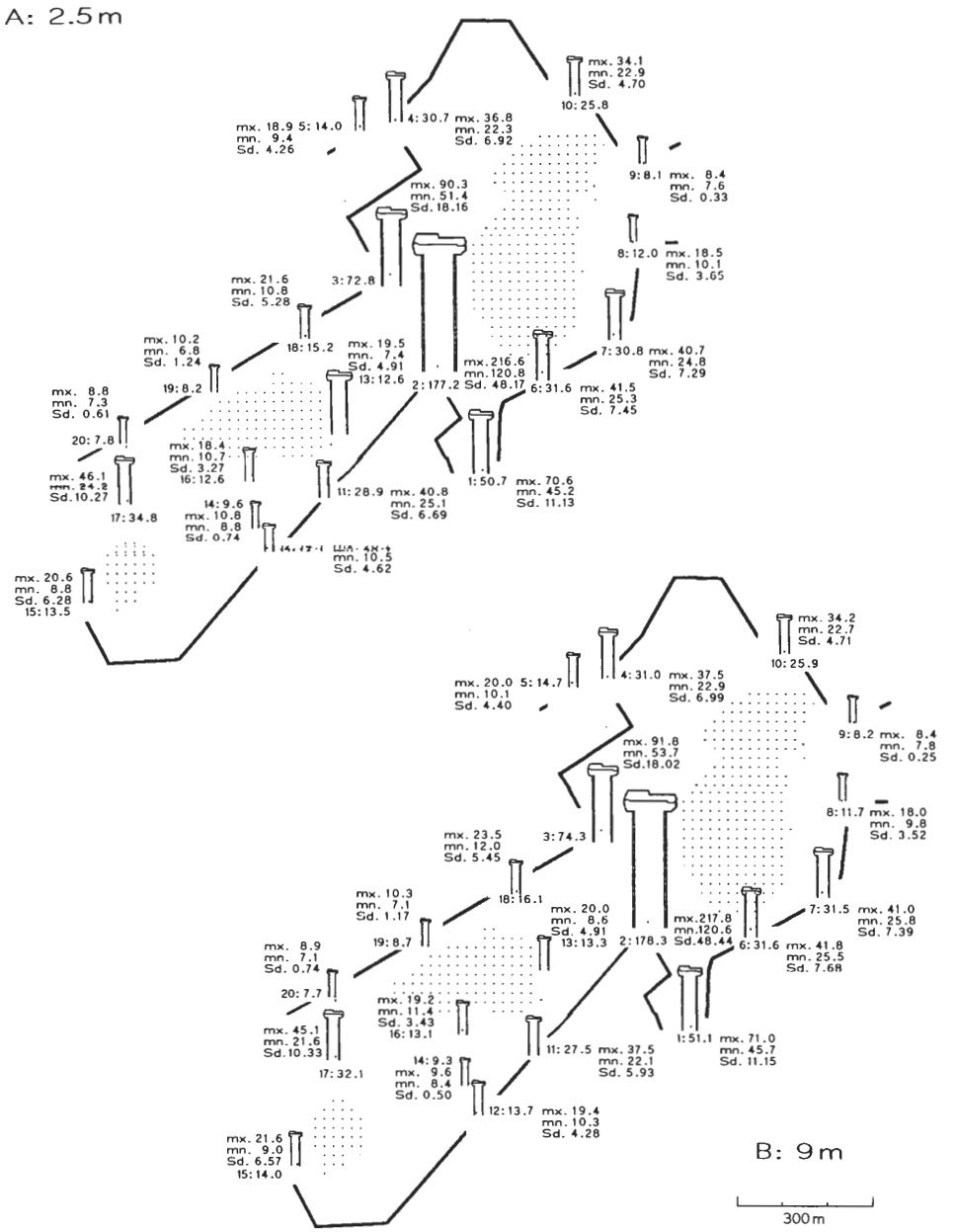


Abb. 20: Mittlere Natriumkonzentration [mg/l] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer" Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

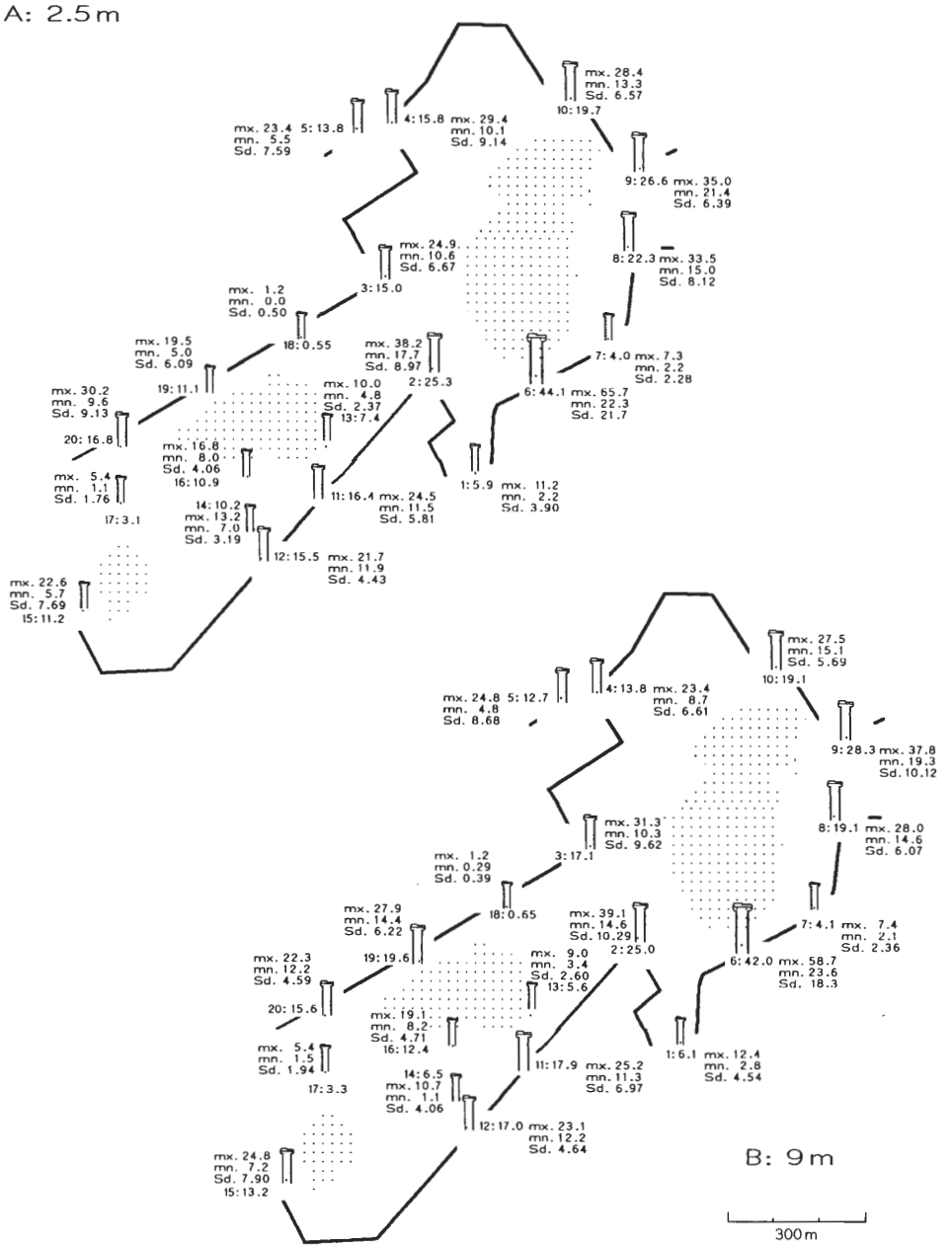


Abb. 21: Mittlere Kaliumkonzentration [mg/l] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer"
Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

riger (12: 7.9-13.6 mg/l), überschreiten zeitweise jedoch auch hier den von der EG-Richtlinie vorgegebenen Grenzwert (III.1).

III.15 Kalzium

Richtzahl: 100 mg/l

Das Grundwasser innerhalb der quartären Sande des Untersuchungsgebietes ist natürlicherweise arm an Erdalkaliionen. Das Kalziumion (Ca^{2+}) stellt meist den dominierenden Anteil dar, während Magnesiumionen (III.16) den geringeren Anteil ausmachen. Der Quotient Ca/Mg beträgt in nicht verunreinigten Wässern etwa 4-5; ein gestörtes Ca/Mg-Verhältnis (III.16) kann in Verbindung mit einer erhöhten Wasserhärte (III.17) ein Hinweis auf Verunreinigungen sein (HÜTTER 1992)

Erwartungsgemäß weist das Grundwasser des Gebietes nur niedrige, lokal leicht erhöhte Kalziumkonzentrationen auf; sie liegen i. d. R. im Mittel bei 4.0-19.6 mg/l. Im Großen Heiligen Meer-Gebiet kommen lokal leicht erhöhte Werte im Bereich der Meerbecke (6: 22.3-65.7 mg/l; Meerbecke: 18.8-38.5 mg/l), im Bereich der L 504 (2+3: 10.3-39.1 mg/l) und im Norden an landwirtschaftlichen Nutzflächen vor (4+5: 4.8-29.4 mg/l). Im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet liegen die Konzentrationen für Kalzium durchweg niedriger; lokal sind sie aber auch hier leicht erhöht: Im Süden des Gebietes an landwirtschaftlichen Nutzflächen (11-12: 11.3-25.2 mg/l), am Heideweiher (15: 5.7-24.8 mg/l) und nördlich vom Erdfallsee (19-20: 5.0-30.2 mg/l; Abb. 22).

III.16 Magnesium

Zulässige Höchstkonzentration: 50 mg/l; Richtzahl: 30 mg/l

Bis auf wenige Ausnahmen liegen im Grundwasser des Gebietes niedrige Magnesium-Konzentrationen vor. Insgesamt ist aber der Quotient des Ca/Mg-Verhältnisses gegenüber Normalwerten (Hütter 1992; vgl. III.15) z. T. deutlich erniedrigt, und zwar durch im Verhältnis relativ hohe Magnesiumanteile an der Gesamt-Konzentration der Erdalkaliionen (Abb. 23).

Wie für die Verteilung der Kalziumionen bereits angegeben (III.15), liegen im Großen Heiligen Meer-Gebiet bezüglich der Mg^{2+}-Ionen ebenfalls etwas höhere Konzentrationen als im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet vor. Erhöhte Werte konnten besonders im Grundwasserbereich der L 504 (1 u. 2: 2.4-17.1 mg/l), im Grundwasserbereich der Meerbecke (6-9: 4.7-9.5 mg/l) und im Norden des Großen Heiligen Meer-Gebietes an landwirtschaftlichen Nutzflächen (4: 5.5-10.8 mg/l) festgestellt werden. Im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet treten im Süden lokal an landwirtschaftlichen Nutzflächen und am Erdfallsee im Verhältnis zum Großen Heiligen Meer-Gebiet in geringerem Maße erhöhte Magnesiumkonzentrationen auf (11 u. 12: 1.2-6.9; 13: 2.3-5.4). Die insgesamt niedrigsten Werte wurden im Grundwasser des nördlichen Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes ermittelt (18-20: 0.1-3.8 mg/l).

III.17 Gesamthärte

Die Gesamthärte des Grundwassers wird aus der Konzentration der Erdalkaliionen bestimmt. Sie weist innerhalb des untersuchten Gebietes eine ähnliche Verteilung wie die

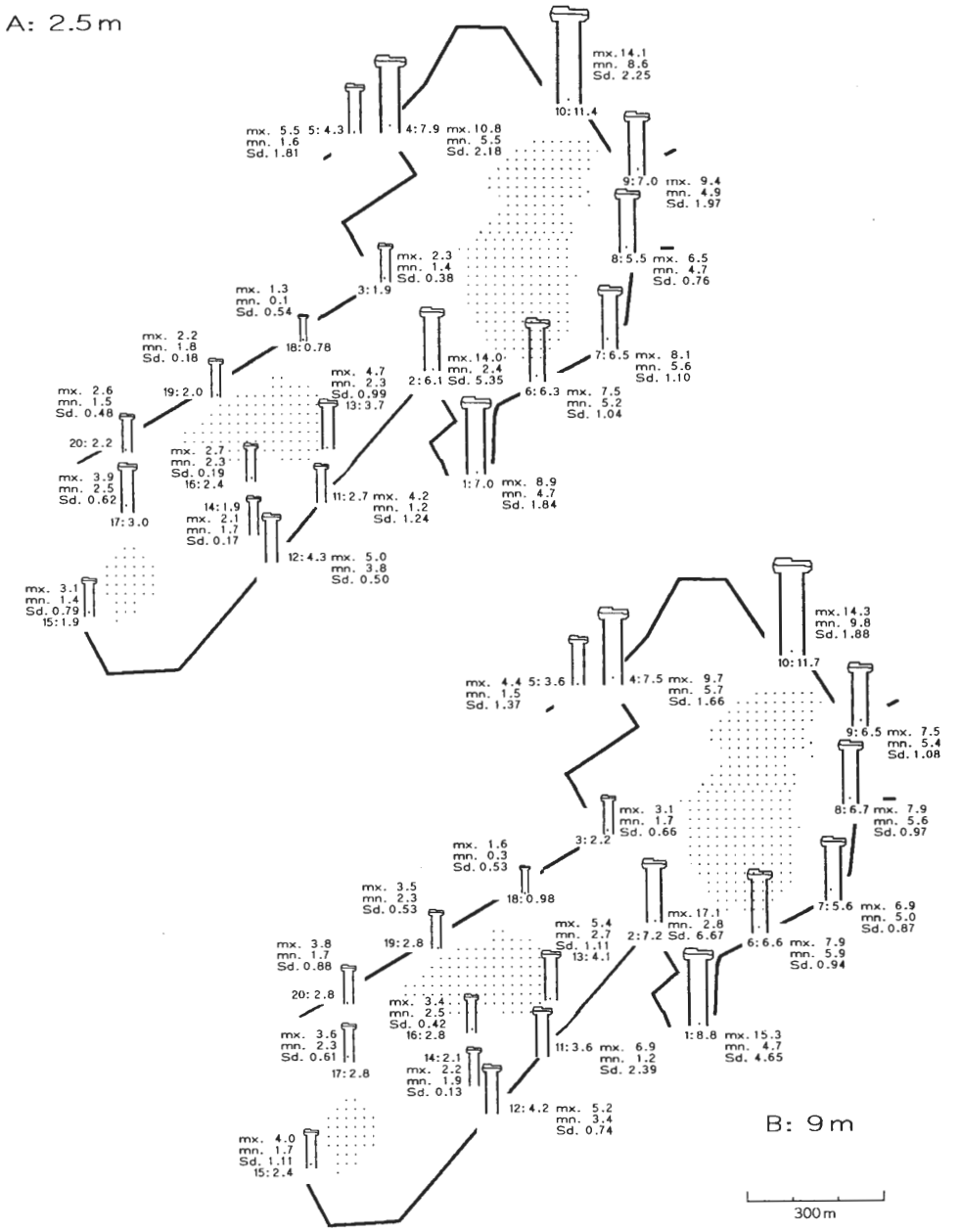


Abb. 22: Mittlere Calciumkonzentration [mg/l] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

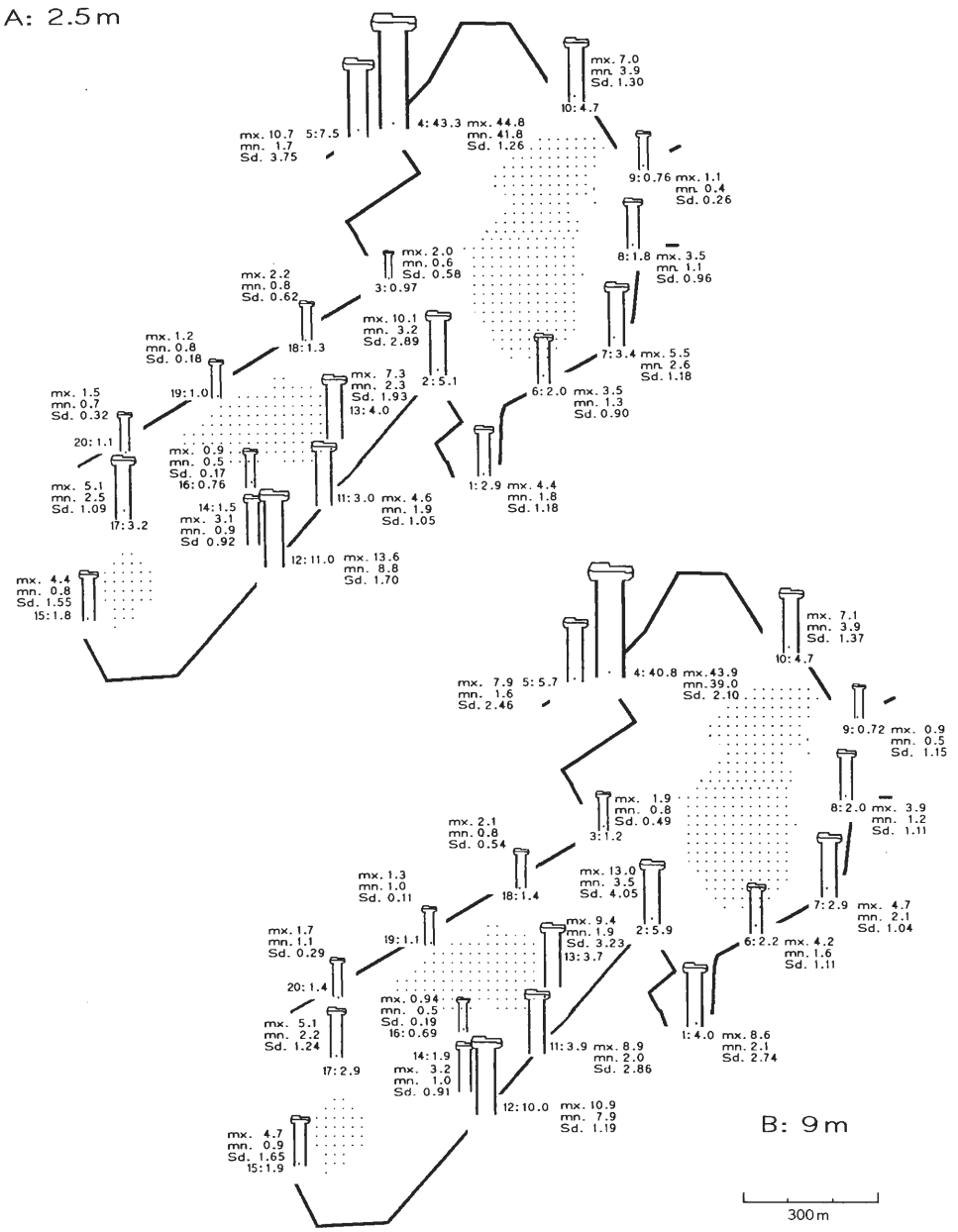


Abb. 23: Mittlere Magnesiumkonzentration [mg/l] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

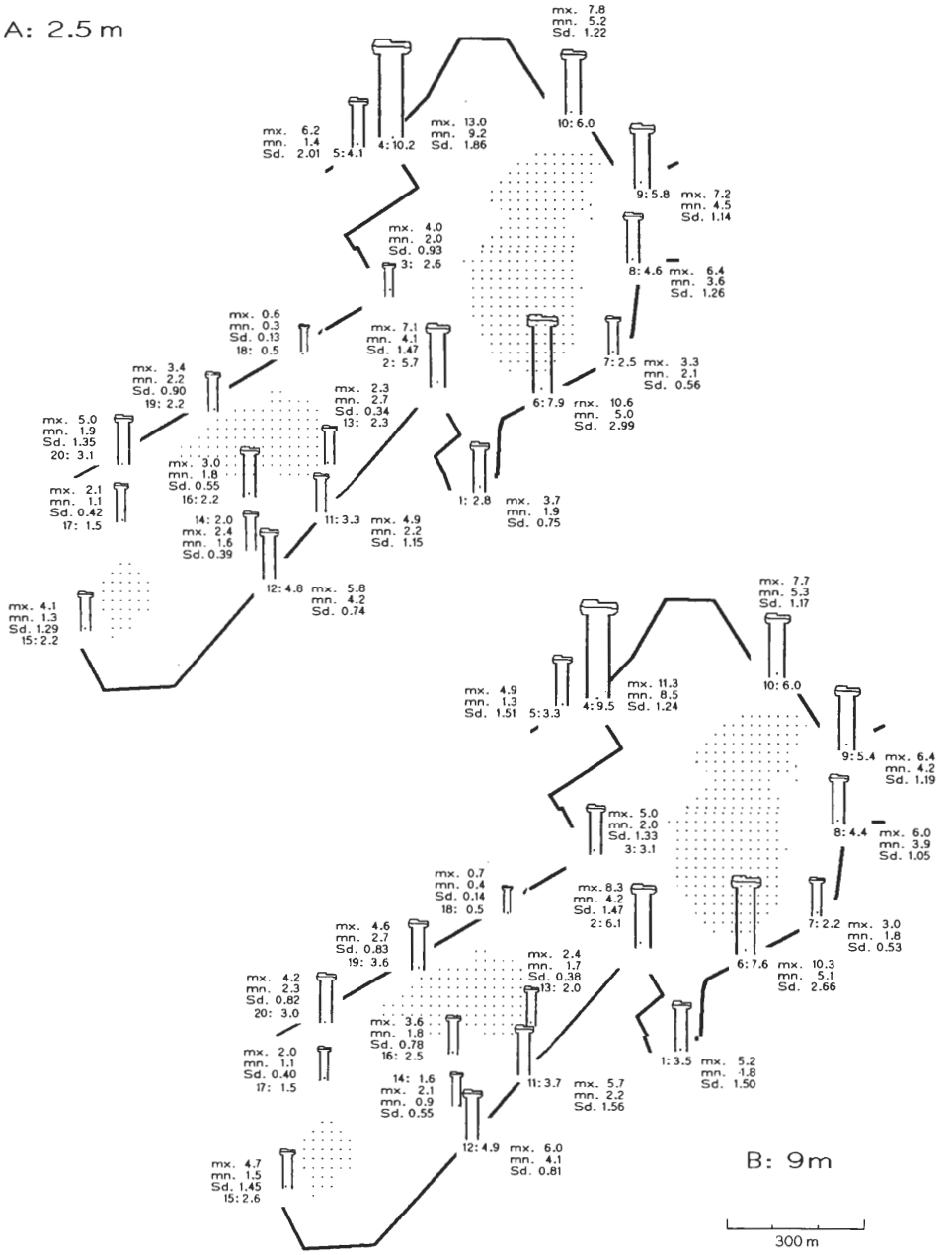


Abb. 24: Mittlere Gesamthärte [°dH] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen der Kalzium-, Magnesium- und Kaliumkonzentrationen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

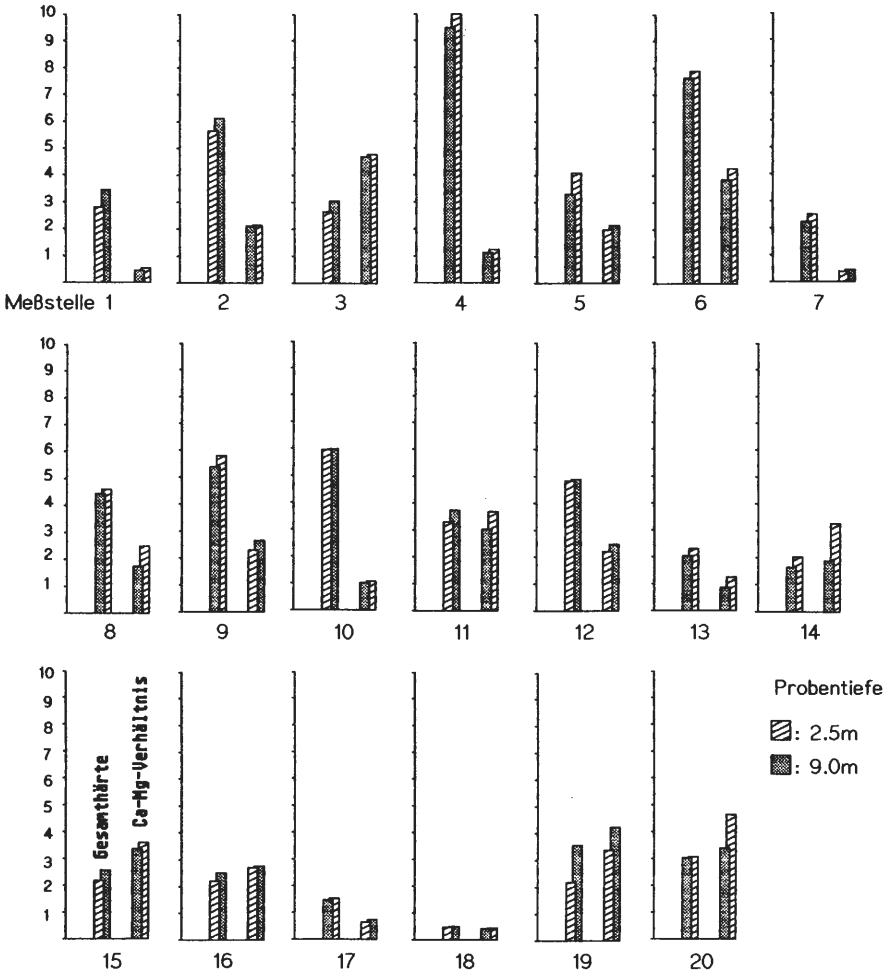


Abb. 25: Gesamthärte [°dH] und Ca-Mg-Verhältnis im Grundwasser des NSG "Heiliges Meer". Eine hohe Gesamthärte in Verbindung mit einem niedrigen Kalzium-Magnesiumverhältnis weist auf Verunreinigungen im Grundwasser hin (1, 2, 4, 5, 10); natürlicherweise liegt das Ca-Mg-Verhältnis im Grundwasser zwischen 4 und 5 (HUTTER 1992). In Verbindung mit niedrigen Gesamthärten treten Ca-Mg-Verhältnisse nahe 4 nur an den Meßstellen 15, 19 und 20 auf.

Kalzium- und Magnesiumionen auf (Abb. 24). Im Großen Heiligen Meer-Gebiet liegt die Gesamthärte, von lokalen Störungen abgesehen, im Mittel zwischen 2.8-5.8 °dH; im weitgehend ungestörten Grundwasser des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes liegt sie entsprechend niedriger, zwischen 0.5-3.6 °dH.

Lokale Anstiege der Gesamthärte, die auf bereits genannte Störungen zurückzuführen sind (vgl. III.15; III.16), treten an landwirtschaftlichen Nutzflächen im Norden des Großen Heiligen Meer-Gebietes (4: 8.5-13.0 °dH; 10: 5.2-7.8 °dH), an der L 504 (2: 4.1-8.3 °dH) und an der Meerbecke (6: 5.0-10.6° dH) sowie im Süden des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes (12: 4.1-6.0 °dH) auf.

Hinweise auf Wasserverunreinigungen liefern lokal erhöhte Gesamthärten in Verbindung mit gestörten Ca/Mg-Verhältnissen (Hütter 1992; vgl. III.15). Sämtliche Grundwasserbereiche nahe landwirtschaftlicher Nutzflächen (4, 5, 10, 11, 12), lokale Bereiche an der L 504 (1, 2) und Grundwasserbereiche an der Meerbecke (1, 7, 8, 9) sind daher als anthropogen belastet anzusehen (Abb. 25).

III.18 Freies CO_2

Die Bestimmung des freien und gebundenen CO_2 (III.19), der Karbonathärte (III.20) und der Nichtkarbonathärte (III.21) wurde aus den m- und p-Werten unter der Voraussetzung durchgeführt, daß die Kohlensäure die einzige im Wasser enthaltene Säure ist und daß der gemessene pH-Wert mit dem aus dem relativen m-Wert ermittelten pH-Wert auf 0.4 Einheiten übereinstimmt (Hütter 1992). Die oben genannten Bedingungen sind für folgende Grundwasserstellen nicht gegeben: 2, 4, 5, 11, 12, 14 und 17. An diesen Stellen dominieren im Grundwasser organische bzw. anorganische Säuren (III.8; III.9; III.11), so daß eine genaue CO_2-Bestimmung mit Hilfe der m- und p-Werte nicht möglich war. Es handelt sich hier um gestörte Grundwasserbereiche, die i. d. R. anthropogen erhöhte Sauerstoffkonzentrationen und oxidierende Bedingungen aufweisen (III.1-III.3). Die an diesen Stellen gemessenen pH-Werte liegen meist deutlich niedriger als die aus den relativen m-Werten ermittelten pH-Werte; dies zeigt, daß die Kohlensäure an der pH-Wert-Erniedrigung dort nur unwesentlich beteiligt ist und der pH-Wert von stärkeren Säuren bestimmt wird (III.9). Vergleichbare Abweichungen zwischen gemessenen und aus den relativen m-Werten ermittelten pH-Werten traten zeitweise auch im Meerbecke-nahen Grundwasser (1, 6-8) auf. Daher werden auch für diese Stellen über die CO_2-Verhältnisse keine Angaben gemacht.

Lokal treten im Grundwasser des Gebietes erhöhte Konzentrationen von freiem CO_2 ohne hohe Hydrogenkarbonatkonzentrationen (III.19) auf. Im Großen Heiligen Meer-Gebiet kann dies im Norden des Großen Heiligen Meeres an 10 (29.0-30.8 mg/l), im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet am Süd- (13: 99.4 -116.2 mg/l) und Nordufer (18: 48.4 – 51.9 mg/l) des Erdfallsees beobachtet werden (Abb. 26). An diesen Stellen kann es durch den erhöhten Kohlensäureanteil zu entsprechenden pH-Wert-Absenkungen kommen (III.9). An drastischen pH-Wert-Absenkungen, wie sie in der Nähe von landwirtschaftlichen Nutzflächen auftreten, besitzt der Kohlensäureanteil des Grundwassers nur eine untergeordnete Bedeutung (s. o.).

In Abflußrichtung der größeren Seen ist der Gehalt des Grundwassers an freiem CO_2 meist gering (Großes Heiliges Meer, 9: 8.8-9.2 mg/l; Erdfallsee, 19: 11.4-24.6 mg/l). Erhöhte Konzentrationen werden i. d. R. von erhöhten HCO_3-Werten begleitet (III.19); insgesamt kommen im Grundwasser des Großen Heiligen Meer-Gebietes niedrigere CO_2-Konzentrationen vor (8.8-30.8 mg/l) als im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet (11.4-116.2 mg/l; Abb. 26).

III.19 Gebundenes CO_2

Das gebundene CO_2 wurde nur an folgenden Meßstellen bestimmt: 3, 9, 10, 13, 15, 16, 18, 19 und 20 (vgl. III.18). Lokal konnte am Erdfallsee (13 und 18) kein gebundenes CO_2 festgestellt werden.

Bis auf wenige Ausnahmen liegt der Gehalt des Grundwassers an gebundenem CO_2 deutlich über dem Gehalt an freiem CO_2. Im Großen Heiligen Meer-Gebiet treten jedoch niedrige Konzentrationen nördlich des Großen Heiligen Meeres (10: 6.2-21.1 mg/l), im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet am Süd- und Nordufer des Erdfallsees auf (s. o.). Deutlich erhöhte Werte charakterisieren Grundwasserbereiche an der L 504 (3: 52.8-96.8 mg/

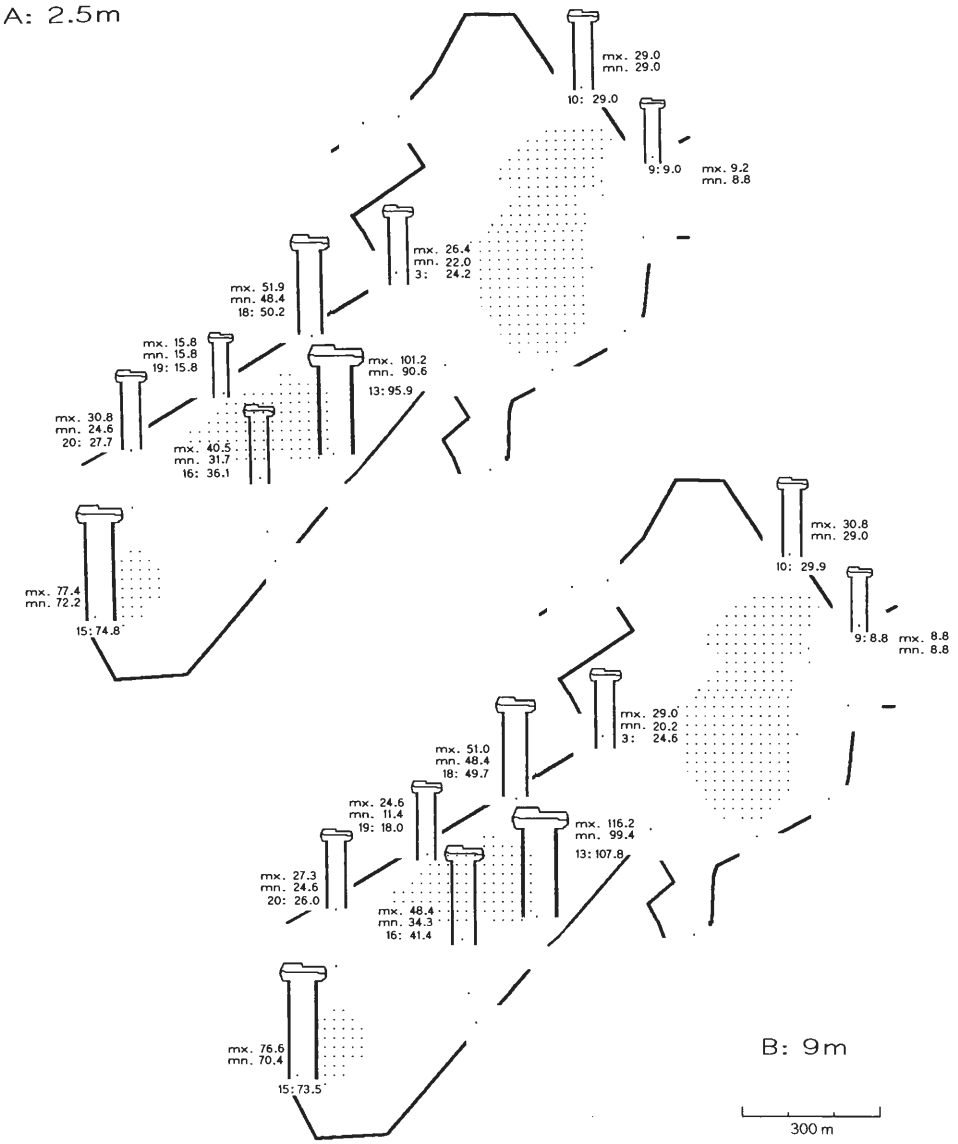


Abb. 26: Konzentration des freien CO_2 [mg/l] im Grundwasser des NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen vom 12.03. und 09.04.1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum

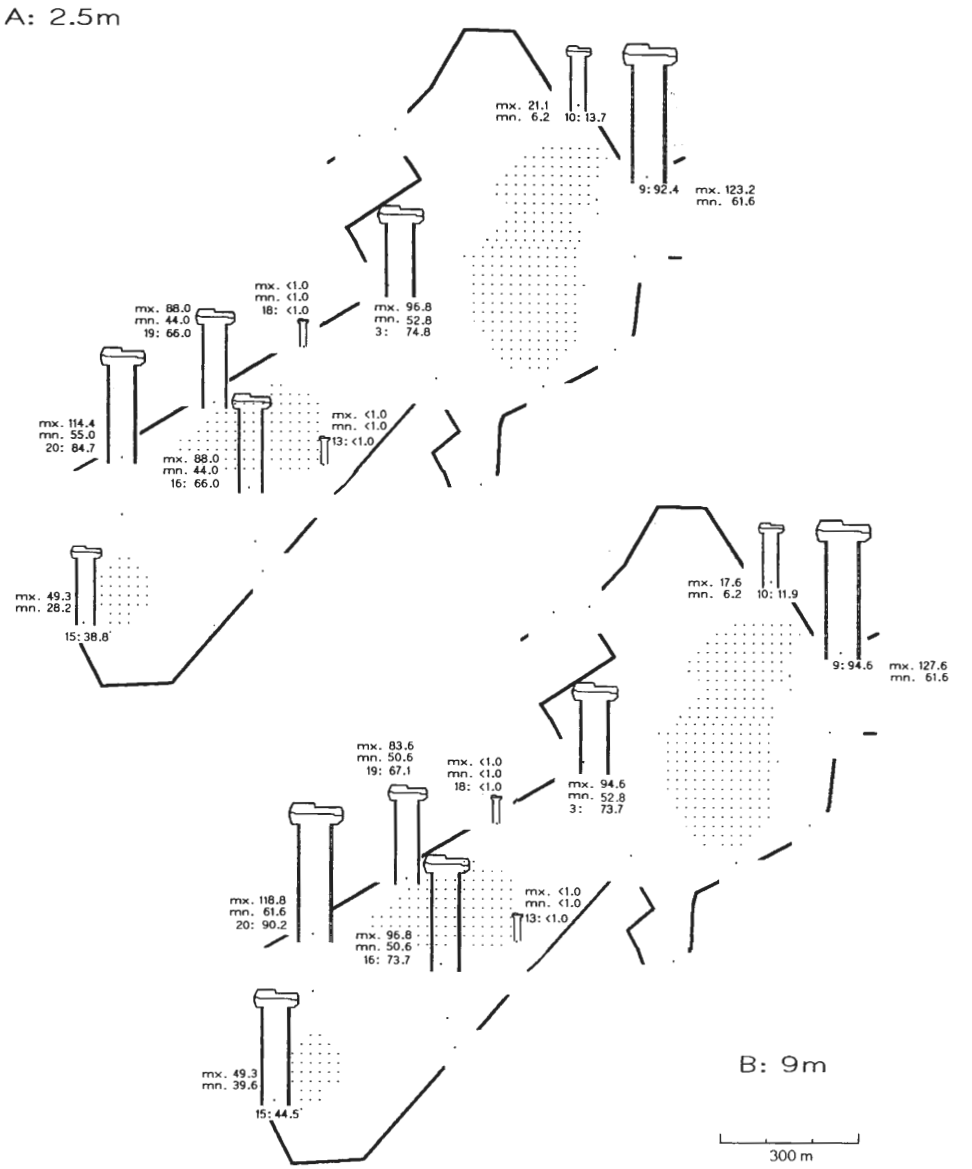


Abb. 27: **Konzentration des gebundenen CO_2 [mg/l] im Grundwasser des NSG "Heiliges Meer".** Der Darstellung **liegen Messungen vom 12.03.** und 09.04.1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule **graphisch dargestellt;** numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum

l), am Abfluß des Großen Heiligen Meeres (9: 61.6-127.6 mg/l) und am Abfluß des Erdfallsees (19: 44.0-88.0 mg/l; 20: 55.0-118.8 mg/l). Im Mittel liegen die Konzentrationen an gebundenem CO_2 im Grundwasser des Großen Heiligen Meer-Gebietes etwas höher als im Grundwasser des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes (Abb. 27); die Verteilung der Hydrogenkarbonationen entspricht damit der räumlichen Verteilung der Gesamthärte (III.17) und den verschiedenen Trophiestufen beider Gebiete mit meso- bis eutrophen Oberflächengewässern im Osten (Großes Heiliges Meer-Gebiet) und oligo-, dys- und mesotrophen Seen und Kolken im Westen (Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet).

III.20 Karbonathärte

Die Karbonathärte ergibt sich rechnerisch aus dem Gehalt an Hydrogenkarbonationen (HÜTTER 1992). Im Grundwasser des Gebietes entsprechen die Unterschiede in der Karbonathärte der räumlichen Verteilung von gebundenem CO_2 und Hydrogenkarbonationen (III.19). Zur Veranschaulichung seien hier einige Beispiele angeführt (vgl. auch Abb. 28): Großes Heiliges Meer-Gebiet: 3: 3.4-6.2 °dH; 9: 3.9-8.1 °dH; 10: 0.4-1.3 °dH. Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet: 13: < 0.1 °dH; 15: 1.8-3.1 °dH; 16: 2.8-6.2 °dH; 18: < 0.1 °dH; 19: 2.8-5.6 °dH; 20: 3.5-7.6 °dH.

III.21 Nichtkarbonathärte

Wie bereits beschrieben, verhält sich die Gesamthärte (III.17) des Grundwassers im Bereich anthropogen bedingter Störungen, z. B. in der Nähe von landwirtschaftlichen Nutzflächen, nicht äquivalent zur Karbonathärte; neben dem Hydrogenkarbonat sind dort besonders Sulfat- und Nitrationen an dem Erhalt des Kationen-Anionen-Gleichgewichtes beteiligt (III.18).

Der Anteil der Nichtkarbonathärte an der Gesamthärte ist lokal im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet in wenig gestörten Grundwasserbereichen sehr gering, besonders am südlichen und nördlichen Erdfallseeufer (16: 0.2-0.4 °dH; 18: 0.3-0.4 °dH; 19: 0.6-1.4 °dH; 20: 0.3-1.5 °dH). Am Heideweiher lassen sich leicht erhöhte Werte feststellen (15: 2.2-2.3 °dH). Im Großen Heiligen Meer-Gebiet treten fast ausnahmslos erhöhte Werte auf, besonders in der Nähe von Meerbecke und landwirtschaftlichen Nutzflächen; an der L 504 sind sie nur niedrig bis leicht erhöht (3: 0.6-1.6 °dH; 9: 2.5-3.3 °dH; 10: 7.3-7.4 °dH; vgl. Abb. 29).

An Stellen, wo keine Karbonathärte feststellbar ist (III.20), entspricht die Gesamthärte der Nichtkarbonathärte. Dabei handelt es sich ausnahmslos um Grundwasserbereiche mit anthropogenen Störungen, die im wesentlichen in der Nähe von landwirtschaftlichen Nutzflächen liegen (vgl. III.18). Erwartungsgemäß kommen hier die höchsten Werte der Nichtkarbonathärte vor (Abb. 29).

Auch für die gestörten Grundwasserbereiche gilt, daß im Großen Heiligen Meer-Gebiet deutlich höhere Werte der Nichtkarbonathärte festzustellen sind als in entsprechenden Bereichen des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes. Besonders im Norden des Großen Heiligen Meeres an landwirtschaftlichen Nutzflächen treten lokal extrem hohe Werte auf (4: 11.2-12.9 °dH), die durch eine hohe Kaliumfracht des Grundwassers verursacht werden (III.14). Vergleichbar hohe Nichtkarbonathärten kommen nur im Süden des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes vor (12: 5.0-5.4 °dH).

Da von Natur aus erhöhte Nichtkarbonathärten im Untersuchungsgebiet selten sind, gestörte Bereiche jedoch hohe Werte aufweisen, lassen sich durch die Bestimmung der

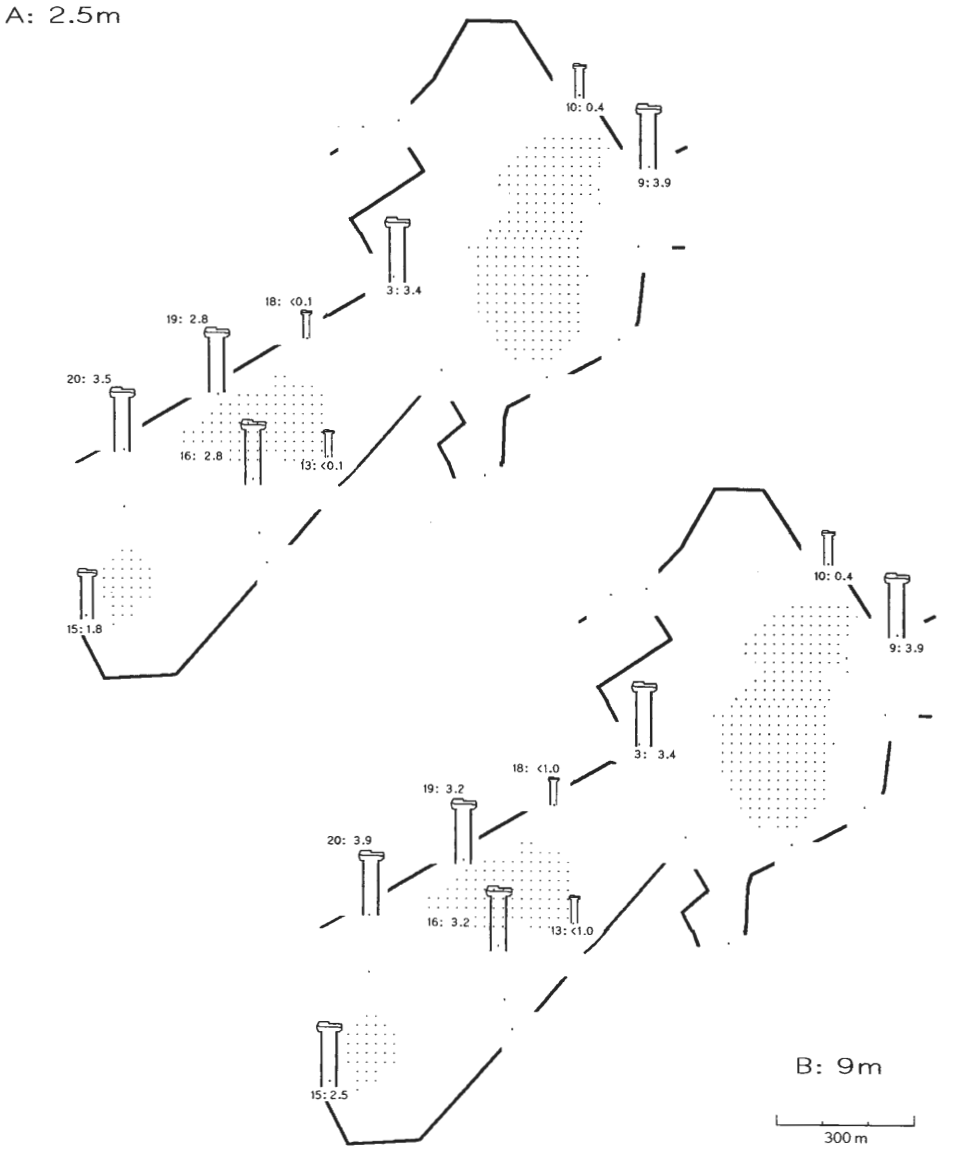


Abb. 28: **Karbonathärte [°dH] im Grundwasser des NSG "Heiliges Meer".** Der Darstellung liegen Messungen **vom 12.03.1992 zugrunde.** Der errechnete Wert ist als Säule graphisch dargestellt.

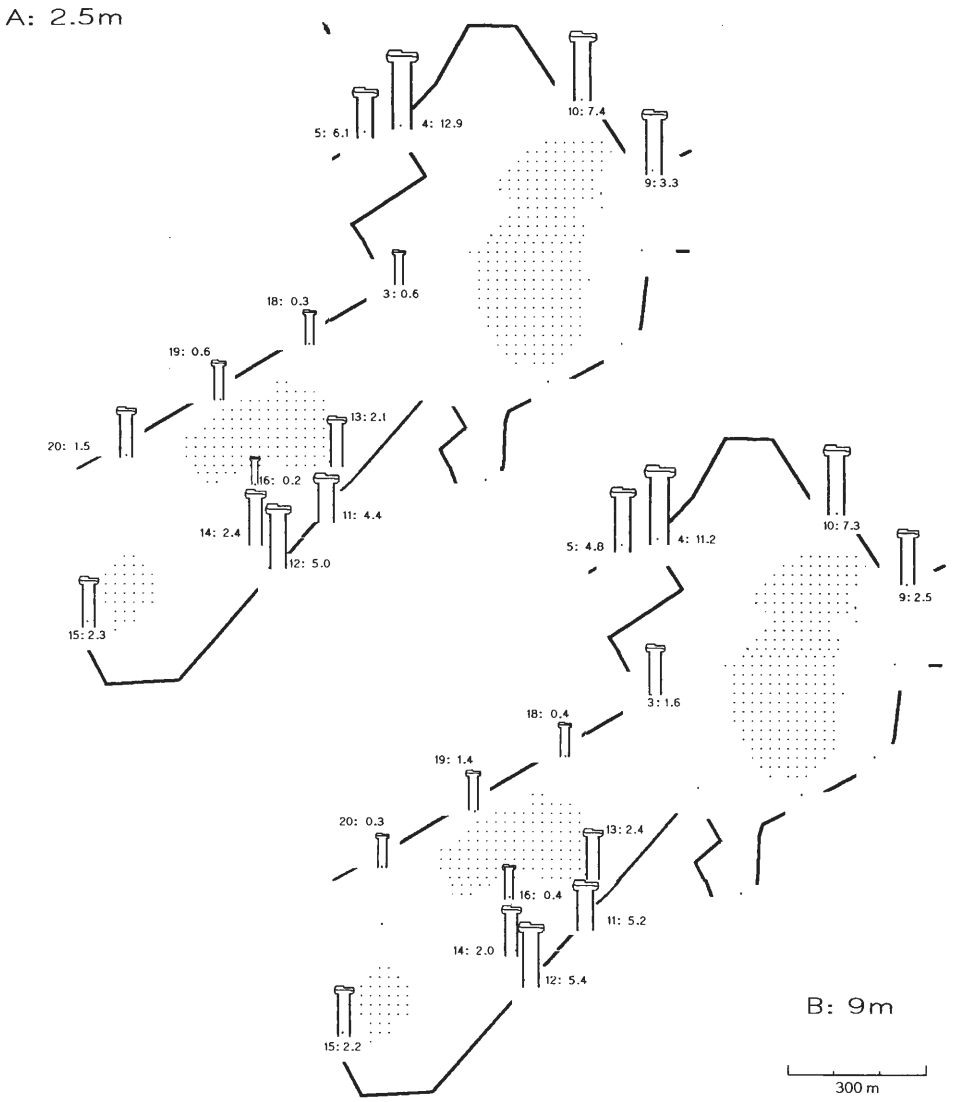


Abb. 29 : Nichtkarbonathärte [°dH] im Grundwasser des NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen vom 11.03.1992 Tiefe zugrunde. Der errechnete Wert ist als Säule graphisch dargestellt.

Nichtkarbonathärte aussagekräftige Hinweise auf anthropogene Belastungen des Grundwassers finden.

III.22 Eisen

Zulässige Höchstkonzentration: 200 µg/l (= 0.20 mg/l); Richtzahl: 50 µg/l

Von den im Grundwasser des Gebietes vorkommenden Schwermetallionen liegen vor allem Eisen (bis 20.0 mg/l) und Mangan (bis 3.59 mg/l; III.23) in erhöhten Konzentrationen vor und weisen im Meerbecke-nahen Grundwasser Konzentrationsschwerpunkte auf. Die weiteren untersuchten Schwermetalle (Zink: III.25, Kupfer: III.26, Blei: III.27 und Kadmium: III.28) kommen ebenfalls, z. T. nur lokal, in erhöhten Konzentrationen vor. Schwerpunkte für Schwermetallbelastungen bilden die Grundwasserbereiche an der Meerbecke und der L 504.

Auf die Herkunft der Schadstoffracht im Meerbeckewasser wurde bereits eingegangen (vgl. III.10 u. III.11). An dieser Stelle bleibt aber zu ergänzen, daß an der Einleitungsstelle von schwefelsauren Grubenwässern im Wasser der Meerbecke bei niedrigen pH-Werten (bis 3.2) sämtliche von mir untersuchten Schwermetalle (s. o.) in erhöhten Konzentrationen vorliegen und nur wenig entlang der Fließstrecke bis zum Untersuchungsgebiet abnehmen. Auch im Meerbeckewasser weisen Eisen- und Manganionen die höchsten Konzentrationen auf (bis 5.3 mg/l gelöstes Eisen in der Nähe des Stationsgebäudes).

Da unter Sauerstoffeinwirkung die im Grundwasser gelösten Fe^{2+}-Ionen rasch zu Eisen(III)-Oxidhydrat oxidiert und festgelegt werden (HÜTTER 1992), treten erhöhte Eisenkonzentrationen und Eisentransport hauptsächlich in reduzierenden Grundwässern des Gebietes auf. Im Bereich der Meerbecke wurden – wie bereits gesagt – die höchsten Eisenkonzentrationen im Grundwasser festgestellt (1: 15.6-19.5 mg/l; 6+7: 11.9-18.8 mg/l). In Bereichen mit moorigem Untergrund kann es unter Eisenhumatbildung zu erheblichen Eisenanreicherungen kommen (8: 15.8-20.0 mg/l).

Erwartungsgemäß treten im Großen Heiligen Meer-Gebiet aufgrund der Nähe zur Meerbecke deutlich höhere Eisenkonzentrationen im Grundwasser auf als im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet, wo allerdings am Südostufer des Erdfallsees ebenso hohe (13: 2.36-19.6 mg/l) und am Nordufer noch deutlich erhöhte Werte (18-20: 0.48-11.7 mg/l) erreicht werden. Auch am Heideweiher kommen erhöhte Eisenkonzentrationen (15: 0.41-15.4 mg/l) im Grundwasser vor. Hohe Werte sind im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet vor allem im tieferen Grundwasser (bei 9m) festzustellen. Im Großen Heiligen Meer-Gebiet fallen die Konzentrationsunterschiede zwischen Proben aus 2.5 und 9.0m Tiefe geringer aus, sind aber auch dort vorhanden (Abb. 30).

Die erhöhten Eisenkonzentrationen im tieferen Grundwasser weisen auf den bevorzugten Eisentransport in reduzierenden Grundwässern hin; auch wird deutlich, daß die Meerbecke als Eintragsquelle für Schwermetallionen anzusprechen ist, da dort im oberflächennahen Grundwasser bei 2.5 m oft höhere Konzentrationen an Eisen und anderen Schwermetallen auftreten als im 9m-Horizont.

Innerhalb sauerstoffangereicherter Grundwasserzonen gehen die Eisenkonzentrationen sprunghaft zurück, besonders im nördlichen Teil des Großen Heiligen Meer-Gebietes (4, 5 u. 10: < 0.01-0.34 mg/l) und südlich des Erdfallsees (12 u. 14: < 0.01-0.48 mg/l) im Einflußbereich landwirtschaftlicher Nutzflächen. Aber auch an der L 504 (3: < 0.01-0.23 mg/l), am Umlaufgraben des Großen Heiligen Meeres (9: 0.31-1.30 mg/l) und nördlich des Heideweihers (17: 0.01-2.77 mg/l) wird die Konzentration der Fe^{2+}-Ionen bei Sauer-

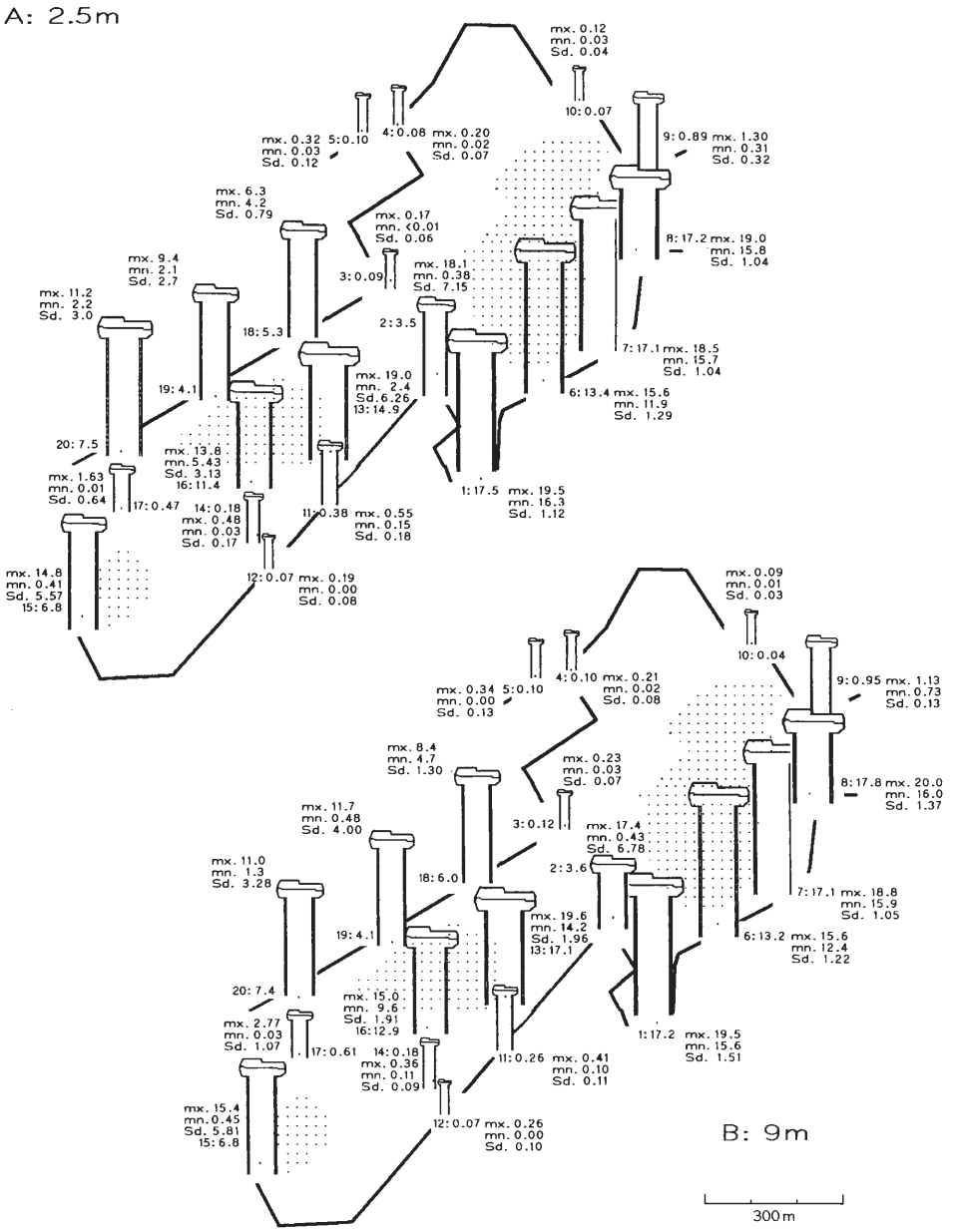


Abb. 30: Mittlere Eisenkonzentration [mg/l] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

stoffzutritt erniedrigt. Wie bereits erläutert, kommt es dort unter Hydroxidbildung zur Umwandlung von Fe^{2+} in Fe^{3+}.

III.23 Mangan

Zulässige Höchstkonzentration: 50 µg/l (= 0.05 mg/l); Richtzahl: 20 µg/l

Im Grundwasser kommt Mangan i.A. nur in Spuren vor; auch unter reduzierenden Bedingungen sind Konzentrationen über 1 mg/l verhältnismäßig selten, während sehr hohe Konzentrationen in sauren Grubenwässern auftreten können (MATTHES 1990).

Mangankonzentrationen bis zu 3.10 mg/l im Meerbeckewasser bewirken auch im Meerbecke-nahen Grundwasser z. T. beträchtlich erhöhte Mangangehalte (1: 0.60-3.59 mg/l; 6-8: 0.27-0.92 mg/l; vgl III.22). Mit zunehmendem Abstand zu Meerbecke, vom Großen Heiligen Meer-Gebiet nach Westen hin, nimmt der Mangangehalt im Grundwasser ab (Abb. 31; vgl. III.22).

Im reduzierenden Grundwasser des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes kommen ebenfalls, z. T. jedoch nur zeitweise, erhöhte Mangankonzentrationen vor, besonders am Südufer des Erdfallsees (13: 0.10-0.90 mg/l; 16: 0.44-0.77 mg/l). Bis zum Heideweiher ist eine weitere Abnahme des Mangangehaltes feststellbar (15: 0.20-0.47 mg/l; 17: 0.16-0.31 mg/l). Wie beim Eisen liegt ein weiterer Konzentrationsschwerpunkt im reduzierenden Grundwasser nördlich des Erdfallsees; die Werte sind aber geringer als am Erdfallsee-Südufer und und zeigen steigende Tendenz in Richtung Westen (18-20: 0.09-0.62 mg/l; Abb. 31).

Mn^{2+}-Ionen sind gegenüber Sauerstoffzutritt wesentlich stabiler als Fe^{2+}-Ionen (MATTHES 1990). Dies wird auch im Grundwasser des Gebietes deutlich, da auch in Meerbecke-Nähe an Stellen mit zeitweiligem Sauerstoffzutritt eine drastische Abnahme der Mangankonzentrationen nicht zu beobachten ist und erhöhte Werte auftreten können (9: 0.13-0.94 mg/l; 10: 0.63-0.80 mg/l).

Im stark durchlüfteten Grundwasserleiter, wie in unmittelbarer Nähe zu landwirtschaftlichen Nutzflächen im Norden des Großen Heiligen Meer-Gebietes und im Süden des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes, gehen durch ständig oxidierende Bedingungen auch die Mangankonzentrationen im Grundwasser zurück (4-5: 0.07-0.23 mg/l; 11-12: < 0.01-0.16 mg/l; vgl Abb. 31).

III.24 Aluminium

Zulässige Höchstkonzentration: 0.2 mg/l; Richtzahl: 0.05 mg/l

Aluminiumionen werden unter sauren Milieubedingungen aus den Bodenmineralien und Sedimentgesteinen freigesetzt und gelangen dann vermehrt in das Grundwasser; sie bilden Komplexe mit Fluorid-, Sulfat- und Phosphationen sowie Chelatkomplexe mit organischen Substanzen; ihre Löslichkeit steigt mit sinkendem pH-Wert (in wässrigen Lösungen bei pH <4.0 als Al^{3+}, MATTHES 1990). Aluminium besitzt eine starke phytotoxische Wirkung infolge von Schädigungen des Wurzelsystems; Konzentrationen von 0.1 mg/l sind bereits für Fische stark toxisch, führen zur Abtötung des Phytoplanktons und zur Gewässerverödung (HÜTTER 1992). Die Vorgabe des Aluminium-Grenzwertes von 0.2 mg/l entsprechend der EG-Richtlinie ist aus ökologischer Sicht ohne Relevanz, da bereits deutlich geringere Konzentrationen erhebliche ökologische Schäden an Gewässern verursachen.

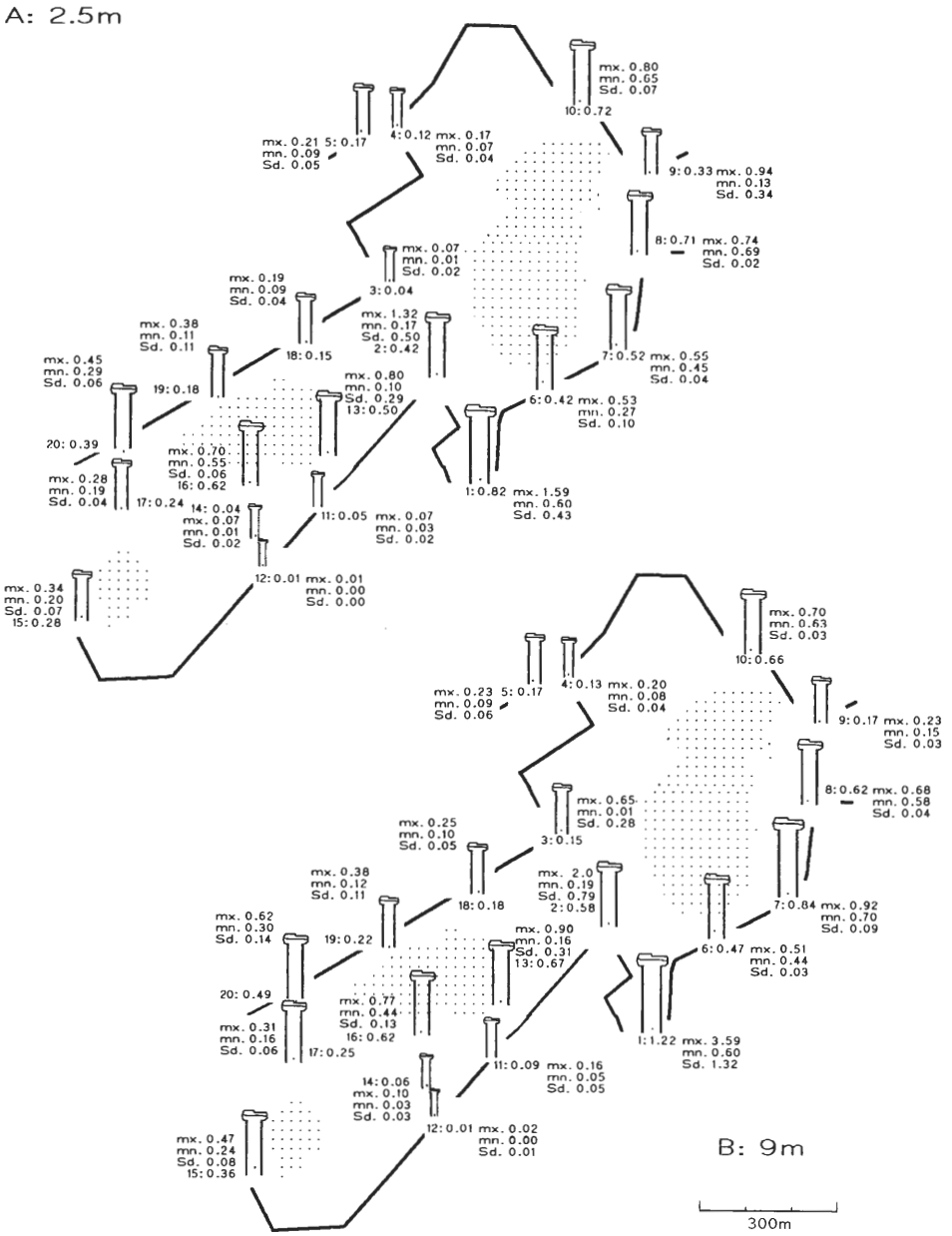


Abb. 31: Mangankonzentration [mg/l] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

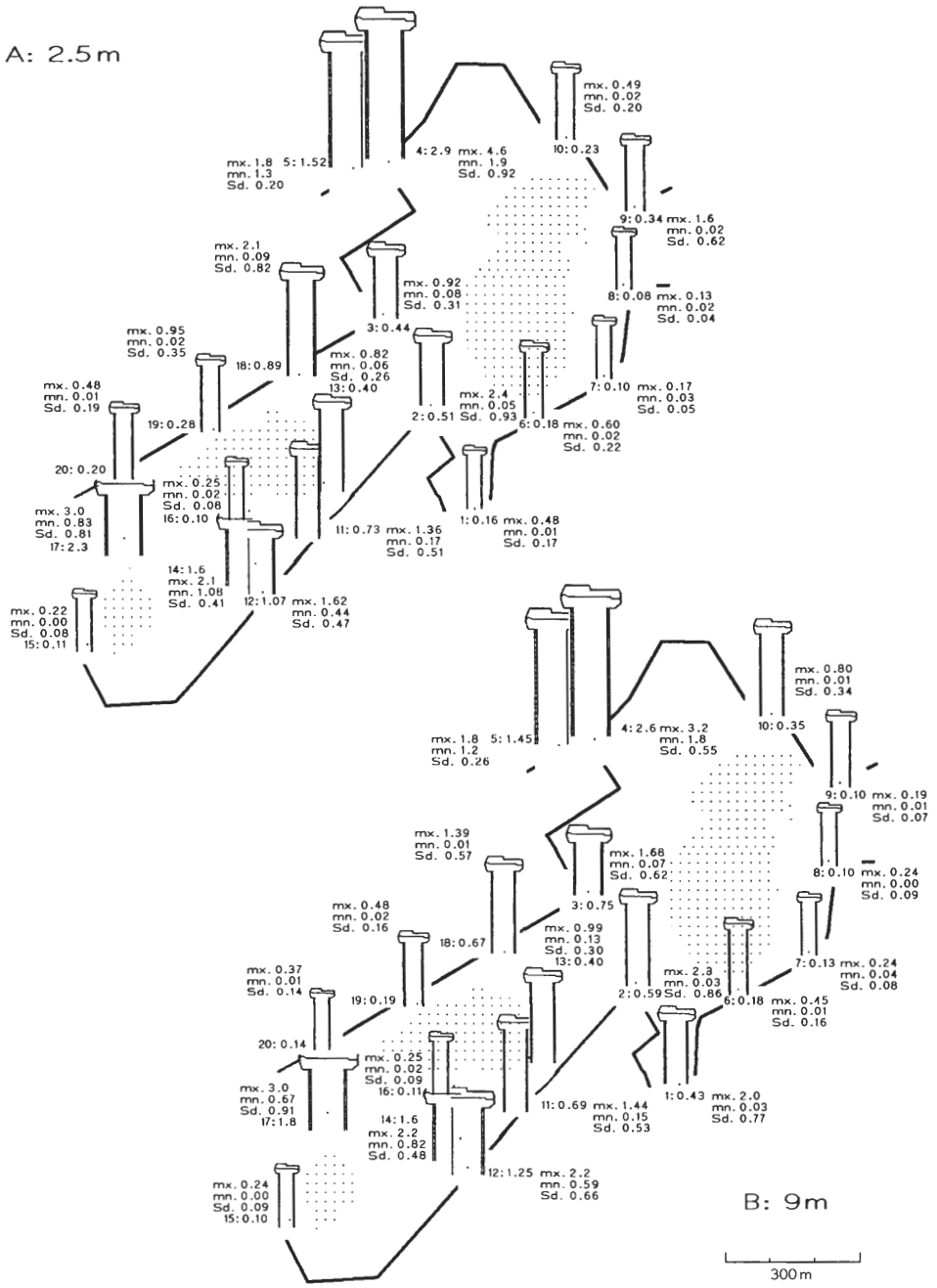


Abb. 32: **Mittlere Aluminiumkonzentration [mg/l] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer".** Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

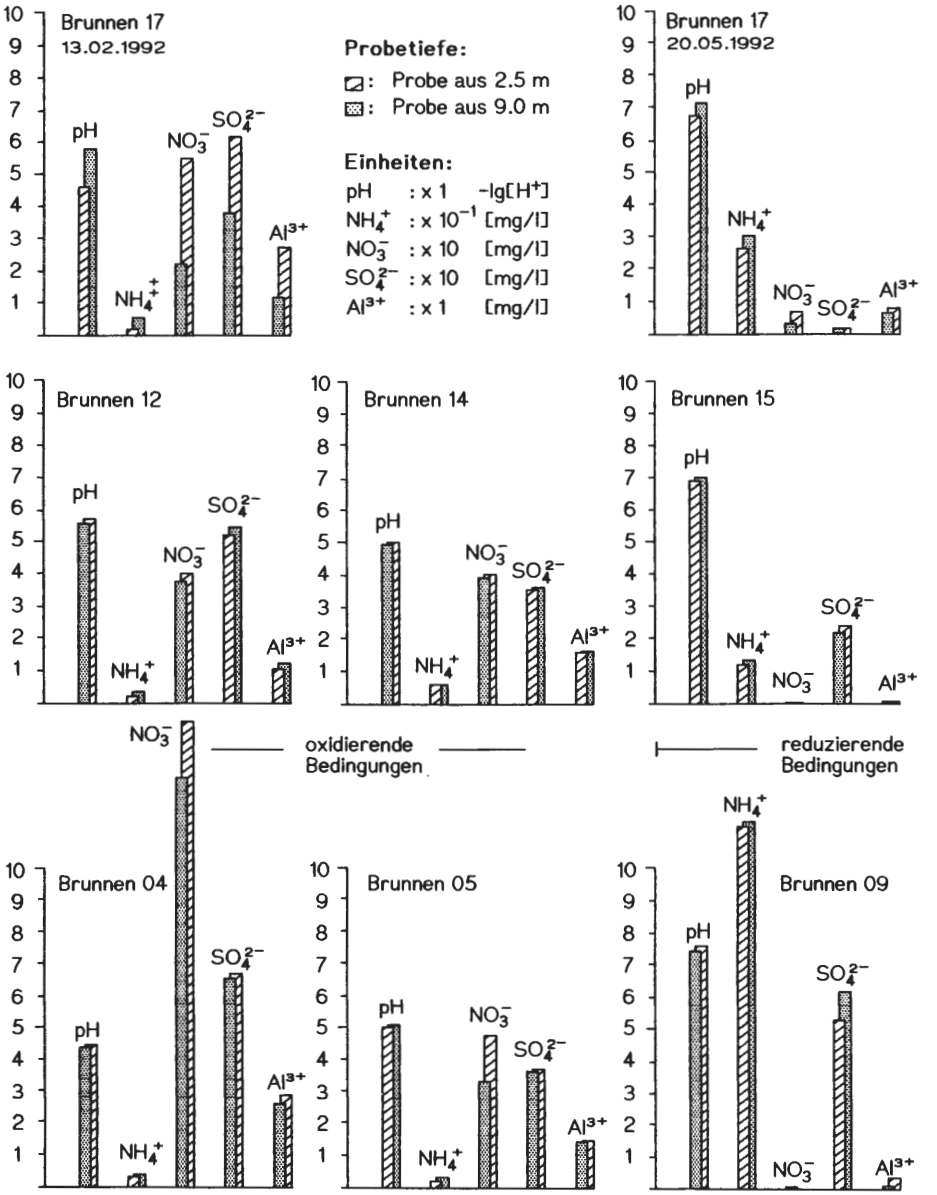


Abb. 33: pH-Wert, Ammonium-, Nitrat-, Sulfat- und Aluminiumkonzentrationen von ausgewählten Grundwasserbereichen des NSG "Heiliges Meer.

Die Brunnen 12, 14, 04 und 5 liegen in unmittelbarer Nähe zu landwirtschaftlichen Nutzflächen, der Brunnen 17 im Kerngebiet; die natürlichen Grundwasserverhältnisse werden dort anthropogen durch erhöhte Sauerstoffkonzentrationen gestört mit den Folgeerscheinungen der Versauerung und erhöhter Schadstoffbelastungen. Reduzierende Bedingungen liegen im Grundwasser an 09 und 15 vor; nur im Bereich der Meerbecke (an 9) ist die Sulfatkonzentration dort noch stark erhöht.

In Verbindung mit niedrigen pH-Werten treten hohe bis sehr hohe Aluminiumkonzentrationen in unmittelbarer Nähe zu landwirtschaftlichen Nutzflächen auf (Abb. 32). Im Großen Heiligen Meer-Gebiet ist besonders die Waldregion an 4 im Norden des Gebietes durch eine sehr hohe Aluminiumfracht des Grundwassers betroffen. Hier wurden Konzentrationen von 1.8-4.6 mg/l festgestellt. Auch die benachbarte Grundwasserregion an 5 weist stets hohe Aluminiumkonzentrationen auf (1.2-1.8 mg/l).

Vergleichbar hohe Werte kommen auch im Süden des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes vor (11: 0.15-1.44 mg/l; 12: 0.44-2.2 mg/l; 14: 0.82-2.2 mg/l), zeitweise auch nördlich des Erdfallsees (18: 0.01-2.1 mg/l; 19: 0.02-0.95 mg/l; 20: 0.01-0.48 mg/l). Diese Grundwasserbereiche liegen in unmittelbarer Nähe zu landwirtschaftlichen Nutzflächen. Auch im Grundwasserbereich der L 504 treten zeitweise hohe bis sehr hohe Aluminiumkonzentrationen auf (1:0.01-2.0 mg/l; 2: 0.03-2.4 mg/l; 3: 0.07-1.68 mg/l). Wie im Einflußbereich landwirtschaftlicher Nutzflächen ist auch hier eine Abhängigkeit der Aluminiumkonzentration des Grundwassers vom Ausmaß der pH-Wert-Absenkungen feststellbar (III.9; vgl. Abb. 16).

In Grundwasserbereichen mit vorwiegend neutralem pH-Wert und geringen pH-Wert-Schwankungen liegen i. d. R. deutlich geringere Konzentrationen vor, an der Meerbecke (6: 0.01-0.60 mg/l; 7: 0.03-0.24 mg/l; 8: < 0.01-0.24 mg/l) und in Bereichen am Südufer des Erdfallsees und des Heideweihers (15: < 0.01-0.24 mg/l; 16: 0.02-0.25 mg/l). Innerhalb von Mischungszonen, insbesondere an Stellen mit hohen Umwandlungsraten von organischen Substanzen, kann es jedoch zeitweise zu einem sprunghaften Ansteigen der Aluminiumkonzentrationen kommen (9: 0.01-1.6 mg/l).

Ebenfalls hohe Werte mit 3.0 mg/l wurden nördlich des Heideweihers an 17 festgestellt (Abb. 32), wo das Grundwasser von zahlreichen anthropogen bedingten Störfaktoren beeinflußt wird.

Der Zusammenhang von Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit durch die Landwirtschaft und durch Salzeintrag, insbesondere von Sulfationen über die Meerbekke, tritt an der Meßstelle 17 besonders deutlich in Erscheinung. Der Einfluß dieser Störfaktoren auf die Mobilisierung von Aluminiumionen erklärt sich folgendermaßen: Durch den zeitlich variablen Gehalt an Sauerstoff (III.3) und organischen Substanzen (III.8) treten hier besonders starke Schwankungen des Redox-Potentials auf. Diese stehen im engen Zusammenhang mit der erheblichen Schwankungsbreite des Sulfatgehaltes (III.11) und der pH-Wert-Absenkungen (III.9) durch Schwefelsäurebildung bei oxidierenden Bedingungen (Abb. 33). Dieser zeitliche Wechsel zwischen vorwiegend oxidierenden bzw. reduzierenden Reaktionen im Grundwasser ist über oxidative pH-Werterniedrigungen und durch erhöhte Abbauraten organischer Substanzen für die Freisetzung von Aluminiumionen und die daraus resultierenden, zeitweise sehr hohen Aluminiumkonzentrationen verantwortlich.

III.25 Zink

Richtzahl: 100 µg/l (= 0.10 mg/l)

Zink ist bei erniedrigtem pH-Wert, vor allem bei Anwesenheit von Chlorid-, Sulfat- und Nitrationen gut löslich (HÖLL 1986) und wirkt in Mengen über 1 mg/l toxisch auf die Gewässerfauna (HERBST 1967). Zink wirkt reduzierend, so daß es in nitrathaltigen Wässern zur Bildung von Nitrit kommen kann (HÜTTER 1992). Bei pH $\leq$ 7 liegt Zink als Zn^{2+}-Ion vor; es gibt Hinweise, daß Zink Komplexe mit organischen Substanzen bildet und an Tonminerale, Mangan- oder Eisenoxiden und -hydroxiden sorbiert wird (MATTHES 1990). Anthropogene Verunreinigungen mit Zink können z. B. durch Gruben-

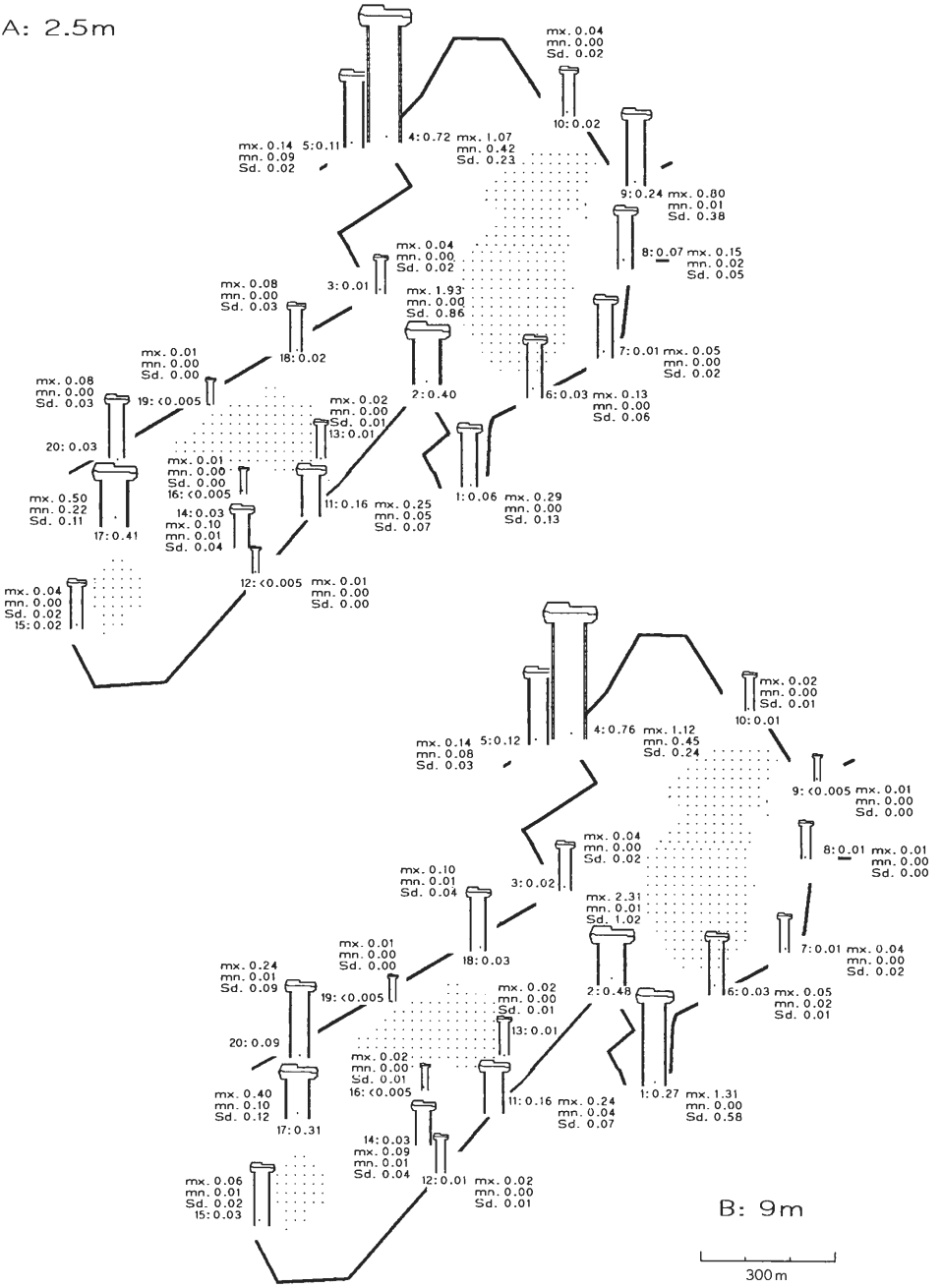


Abb. 34: **Mittlere Zinkkonzentration [mg/l] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer".** Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli **1992 zugrunde.** Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

wässer, aber auch durch den Straßenverkehr auftreten, von dem auch weitere Schwermetallkontaminationen mit Kupfer (III.26), Blei (III.27), Kadmium (III.28), Nickel, Chrom, Kobalt, Vanadium und Molybdaen durch Abrieb von Reifen und Bremsbelägen sowie durch Korrosion und Verbrennungsrückstände ausgehen können (MATTHES 1990).

Im Grundwasser des Gebietes kommt Zink in erhöhten Konzentrationen lokal an landwirtschaftlichen Nutzflächen, an der L 504 und am Heideweiher (17) vor. Der Belastungsschwerpunkt liegt im Großen Heiligen Meer-Gebiet, bedingt durch die relative Nähe zu Störfaktoren wie Ackerflächen, Meerbecke und L 504 (Abb. 34).

Die höchsten Zinkkonzentrationen wurden im Grundwasser an der L 504 gemessen (1: < 0.005-1.31 mg/l; 2: < 0.005-2.31 mg/l). In 2.5 m Tiefe wurden hier stets geringere Zinkkonzentrationen (2: bis 1.93 mg/l) als in 9 m Tiefe (2: bis 2.31 mg/l) festgestellt. Die hohen Werte weisen zusammen mit ihren großen Schwankungsbreiten auf lokale Verunreinigungen (Straßenverkehr) und wechselhafte Eintrags- und Aufschlußbedingungen hin.

Geringere Schwankungen, aber stets erhöhte Zink-Konzentrationen wurden lokal im Norden des Großen Heiligen Meer-Gebietes an landwirtschaftlichen Nutzflächen gemessen (4: 0.42-1.12 mg/l; 5: 0.08-0.14 mg/l). Auch an diesen Stellen kommen im Mittel bei 2.5m Tiefe niedrigere Zinkkonzentrationen vor als bei 9m (Abb. 34). Im Grundwasser des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes ist die Zinkkonzentration nahe landwirtschaftlicher Nutzflächen lokal an 11 (0.04-0.25 mg/l) erhöht; ein tiefenabhängiger Unterschied im Zinkgehalt konnte hier nicht festgestellt werden. Nördlich des Heideweihers an 17 treten im oberflächennahen Grundwasser bei 2.5 m sogar höhere Zinkkonzentrationen (0.22-0.50 mg/l) auf als bei 9m Tiefe (0.10-0.40 mg/l); für die Mobilisierung der Zinkionen dürften hier die bereits für die Freisetzung von Aluminiumionen genannten Prozesse (III.24) verantwortlich sein.

Obwohl die Meerbecke eine nur zeitweise erhöhte Zinkfracht aufweist (0.03-0.22 mg/l), dürften über ihr Wasser nicht unerhebliche Mengen an Zinkionen in das Grundwasser des Gebietes gelangen, die zunächst durch Sorptionseffekte an Eisen- und Manganokkern angereichert werden und dann in Phasen von pH-Wert-Erniedrigungen (während periodischer Abwassereinleitung) in das Grundwasser übertreten. Im gesamten Meerbecke-nahen Grundwasserbereich sind im Verhältnis zu Zink-unbelasten Bereichen des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes (z. B. 16: < 0.005-0.02 mg/l) zeitweise leicht bis deutlich erhöhte Zinkkonzentrationen feststellbar. Erhöhte Werte kommen hier besonders im oberflächennahen Grundwasser bei 2.5m Tiefe mit deutlich erhöhter Schwankungsbreite vor (6: < 0.005-0.13 mg/l; 7: < 0.005-0.05 mg/l; 8: 0.02-0.15 mg/l; 9: 0.01-0.80 mg/l). Im tieferen Grundwasser bei 9m liegen die Zinkkonzentrationen teilweise erheblich niedriger und weisen geringere Schwankungen auf (6: 0.02-0.05 mg/l; 7: < 0.005-0.04 mg/l; 8: < 0 .005-0.01 mg/l; 9: < 0.005-0.01 mg/l; Abb. 34).

Erhöhte Zinkkonzentrationen im Grundwasser des Gebietes sind demnach auf direkten Eintrag über das Meerbeckewasser, pH-Wertabsenkungen und Änderungen der Redoxverhältnisse als Auswirkung landwirtschaftlicher Nutzflächen zurückzuführen. Im Bereich der L 504 ist der Eintrag von Zink in partikulärer Form und ein erhöhter Aufschluß in tieferen Grundwasserhorizonten denkbar.

III.26 Kupfer

Richtzahl: 100 µg/l (= 0.10 mg/l)

Kupferionen (Cu^{2+}) wirken auf Wasserorganismen bereits in geringen Konzentrationen toxisch (0.05 mg/l, HÜTTER 1992; vgl. hierzu EG-Richtlinie). In natürlichen Gewässern

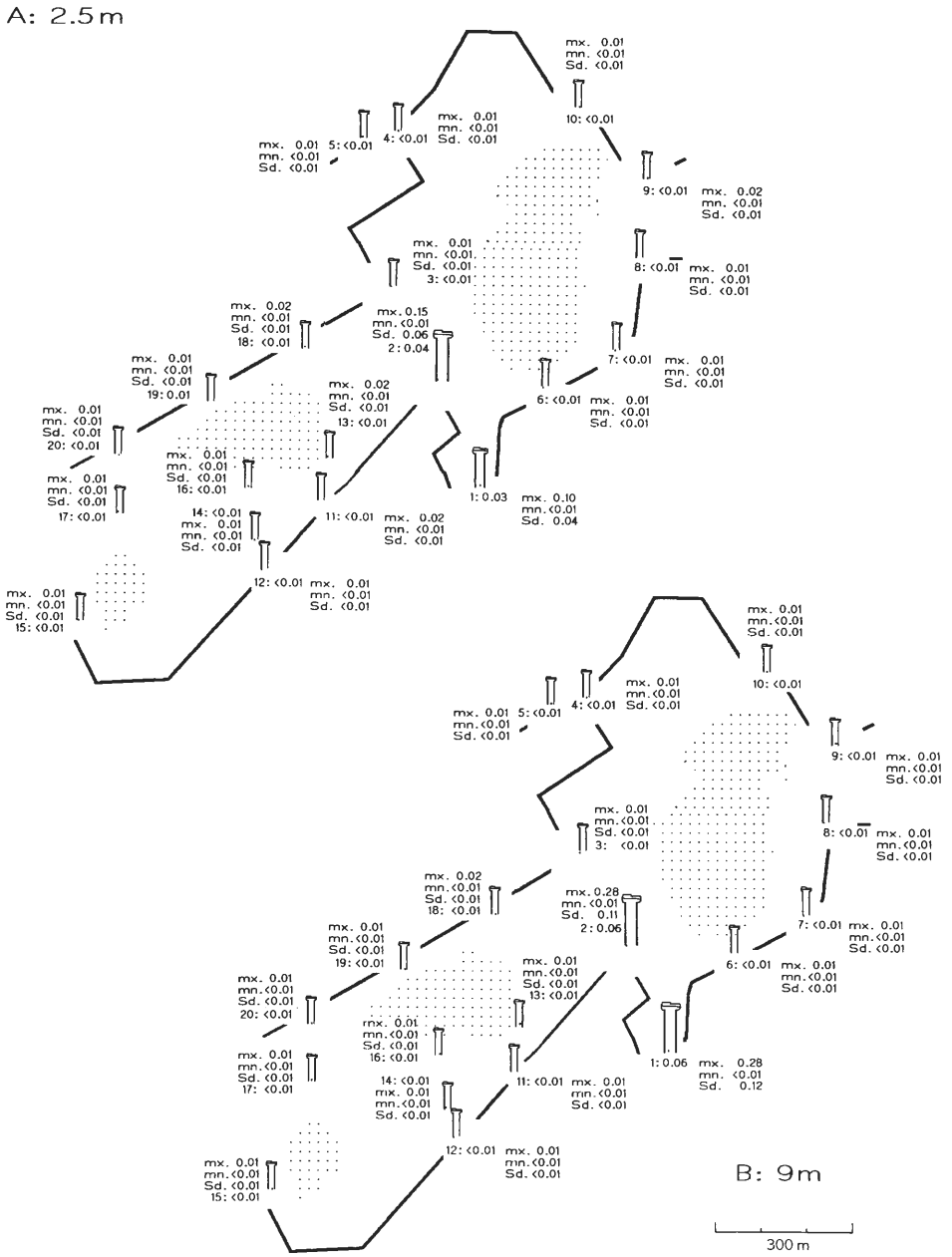


Abb. 35: Mittlere Kupferkonzentration [mg/l] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

kommt Kupfer bei uns praktisch nicht vor; in metallischer Form wird Kupfer aber von sauerstoffreichen und stark aggressiven Wässern angegriffen und gelöst (HÖLL 1986). Unter oxidierenden Bedingungen geht Kupfer aus Sulfid-Erzen als Sulfat in Lösung; in reduzierendem Milieu ist in Gegenwart reduzierender Schwefelspezies die Löslichkeit sehr gering; höhere Konzentrationen treten im Bereich von Kupfererzvorkommen, in Grubenwässern und in Abläufen von Halden oder Aufbereitungsrückständen auf; Cu-Kontaminationen können auch auf die Folgen des Straßenverkehrs zurückgehen (MATTHES 1990).

Im Grundwasser des Gebietes kommen Kupferionen weitgehend in geringen Konzentrationen vor; im Mittel liegen sie bei < 0.005 mg/l (Abb. 35). Lokal kommt es zeitweise zu erhöhten Kupfergehalten (1+2: < 0.005-0.28 mg/l, im Mittel 0.03-0.06 mg/l). Sie liegen im Cu-belasteten Grundwasser bei 9 m Tiefe deutlich höher (1 u. 2: bis 0.28 mg/l) als im oberflächennahen Bereich bei 2.5 m Tiefe (1: bis 0.10 mg/l; 2: bis 0.15 mg/l). Auch die Meerbecke weist zeitweise einen erhöhten Kupfergehalt auf (bis 0.24 mg/l); im Meerbecke-nahen Grundwasser konnte bisher aber keine signifikante Erhöhung der Kupferkonzentration gegenüber der Umgebung festgestellt werden (6-9: < 0.005-0.01 mg/l, im Mittel < 0.005 mg/l). Im Grundwasser des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes liegen die Kupferkonzentrationen mit Ausnahme von 18 (< 0.005-0.02 mg/l, im Mittel 0.01 mg/l) meist bei < 0.005 mg/l.

Der Schwerpunkt erhöhter Kupferkonzentrationen im Grundwasser des Gebietes liegt im Bereich der L 504. Nach MATTHES (1990) können hierfür Belastungen durch den Straßenverkehr (Rückstände aus Abrieben von Reifen- und Bremsbelägen sowie Korrosion an Karosserieteilen) verantwortlich sein.

III.27 Blei

Zulässige Höchstkonzentration: 50 µg/l (= 0.05 mg/l)

Blei ist ein starkes Fischgift, insbesondere in weichen Wässern; es wirkt enzymschädigend, beeinträchtigt das Nervensystem und führt zur Blockierung des Selens im Organismus. In unbelasteten Oberflächengewässern liegt der Bleigehalt (Pb^{2+}) bei < 0.2-3 mg/l (HÜTTER 1992). In natürlichen Grundwässern ist Blei selten und tritt meist nur bei Berührung mit Bleierzlagern auf (HÖLL 1986). Anthropogene Bleiverunreinigungen gehen vor allem auf Bergbautätigkeit, Hüttenbetrieb und Autoabgase zurück (MATTHES 1990).

Im Grundwasser des Gebietes werden deutlich erhöhte Bleikonzentrationen im Bereich der L 504 mit einer bereits für Zink (III.25) und Kupfer (III.26) beschriebenen Vertikalverteilung beobachtet (Abb. 36). Mittlere Konzentrationen von 0.07 mg/l in 2.5 m Tiefe und 0.11 mg/l in 9m Tiefe wurden an 1 (< 0.005-0.41 mg/l) und von 0.07 mg/l (< 0.005-0.29 mg/l) an 2 festgestellt. Auch die Meerbecke weist zeitweise einen erhöhten Bleigehalt auf (0.01-0.14 mg/l), ebenso wie das Meerbecke-nahe Grundwasser (6-9: <0.005-0.11 mg/l; Mittelwerte: 0.01-0.04 mg/l).

Im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet kommen i. d. R. nur mittlere Bleikonzentrationen unter 0.01 mg/l vor; lokal können aber im tieferen Grundwasser bei 9m zeitweise deutlich erhöhte Werte auftreten (14: <0.005-0.23 mg/l, Mittelwert: 0.05; 17: <0.005-0.25 mg/l, Mittelwert: 0.06 mg/l; 18: <0.005-0.13 mg/l, Mittelwert: 0.04 mg/l). Im oberflächennahen Grundwasser bei 2.5m liegen die Bleikonzentrationen auch an diesen Stellen erheblich niedriger (Abb. 36).

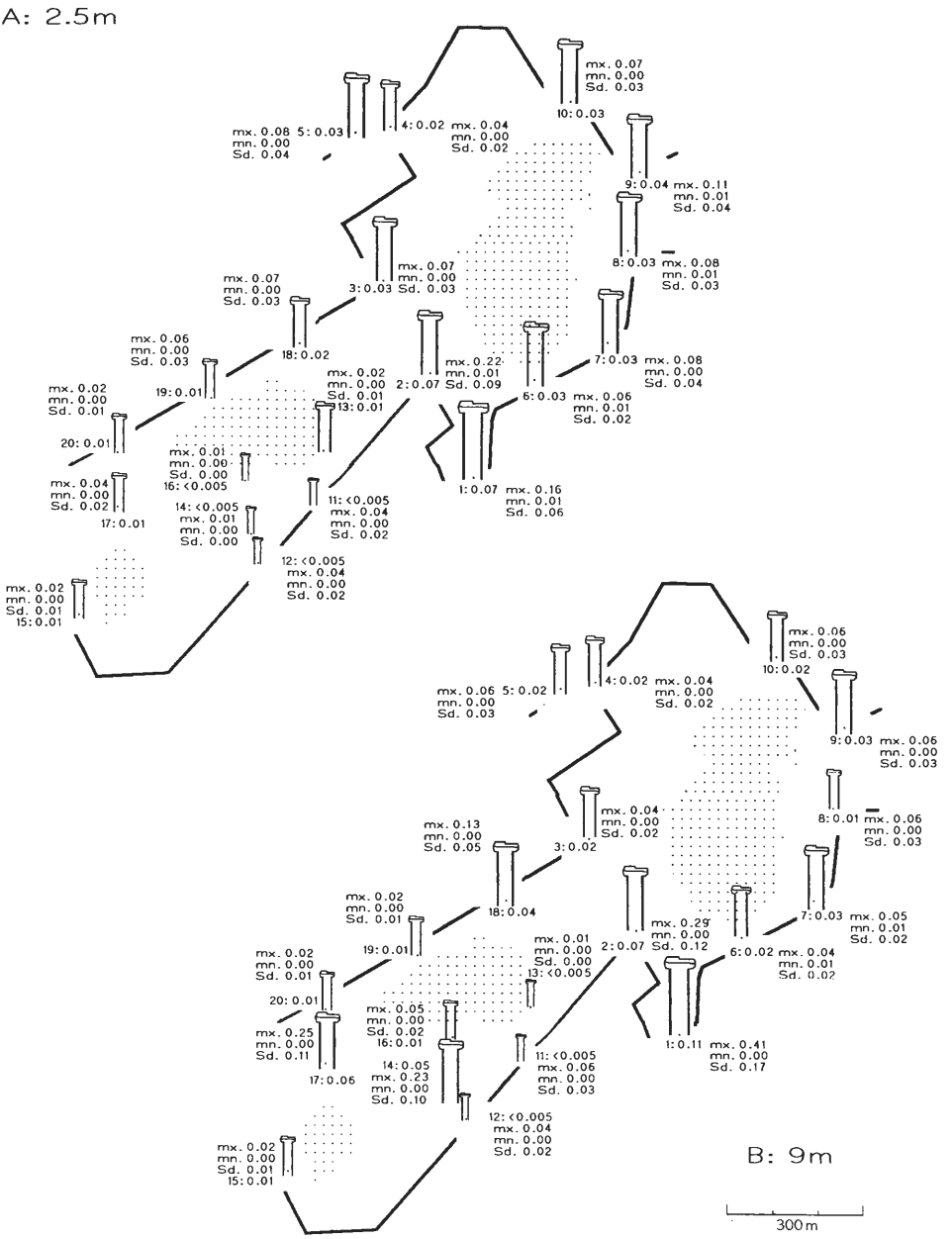


Abb. 36: Mittlere Bleikonzentration [mg/l] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

III.28 Kadmium

Zulässige Höchstkonzentration: 5 µg/l (= 0.005 mg/l)

Kadmium tritt zusammen mit Blei- und Zinkerzen auf, ist geochemisch selten und liegt bei pH <8 als Cd^{2+} vor (MATTHES 1990). Kadmium ist stark toxisch, es blockiert Selen, verdrängt Zink aus Enzymkomplexen und ist als eines der wirksamsten Metalle bei der Erzeugung von Sarcomen bekannt (HÜTTER 1992). Als Fischgift ist Kadmium für Forellen bereits in Konzentrationen von 0.01 mg/l schädlich (HÖLL 1986). Kadmium gewinnt als Umweltgift über industrielle Abwässer zunehmende Bedeutung (HÖLL 1986); ferner können Kontaminationen bei der Metallverarbeitung und der Verbrennung fossiler Brennstoffe über die Atmosphäre als nasse oder auch als trockene Deposition an der Erdoberfläche entstehen (z. B. über Stäube und Korrosionslösungen durch Kraftfahrzeuge; MATTHES 1990). Kadmium hat gute Sorptionseigenschaften und reichert sich in den Flußsedimenten bis zum 30.000-fachen des Gehaltes im Wasser an (HÜTTER 1992).

Im Grundwasser des Gebietes treten erhöhte Kadmiumkonzentrationen mit Schwerpunkt an der L 504 auf (1: im Mittel 0.007-0.009 mg/l; 2: im Mittel 0.007 mg/l; 3: im Mittel 0.005-0.009 mg/l; Abb. 37). Obwohl im Wasser der Meerbecke deutlich erhöhte Kadmiumgehalte (< 0.005-0.026 mg/l) mit im Mittel 0.013 mg/l vorkommen, lassen sich im Meerbecke-nahen Grundwasser nur geringfügig erhöhte Konzentrationen feststellen (6-9: im Mittel 0.004-0.006 mg/l). Offensichtlich wird ein erhöhter Kadmiumeintrag vom Meerbeckewasser in das Grundwasser durch Sorptionseffekte zwischen den Cd^{2+}-Ionen und den Eisen- und Manganocker-haltigen Meerbeckesedimenten z. Z. weitgehend verhindert.

Auch im Grundwasser des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes liegen die Kadmiumkonzentrationen mit wenigen Ausnahmen vergleichsweise niedrig und im Mittel meist unterhalb von 0.005 mg/l. Erhöhte Konzentrationen treten im tieferen Grundwasser bei 9m an 14 (im Mittel 0.008 mg/l) und 17 (im Mittel 0.010 mg/l) auf.

Die erhöhten Kadmiumkonzentrationen, die lokal im Grundwasser der L 504 nachzuweisen sind, dürften auf Straßenverkehr-bedingte Kontaminationen zurückgehen.

III.29 Pestizide

Zulässige Höchstkonzentration: 0.1 µg/l (= 0.0001 mg/l) als Einzelsubstanz; 0.5 µg/l (= 0.0005 mg/l) insgesamt

Pestizide (Pflanzenbehandlungs- und Schädlingsbekämpfungsmittel) gehören zur Gruppe der Umweltchemikalien und sind für Warmblütler häufig bereits im µg/kg-Bereich toxisch; sie besitzen ein hohes Wassergefährdungspotential (HÜTTER 1992).

Die Grundwasseruntersuchungen auf Herbizide während dreier Beprobungen verliefen negativ. Bei den Oberflächengewässern wurden nur in der Meerbecke Triazine in geringen Konzentrationen festgestellt (Desethylatrazin: 0.02 µg/l; Atrazin: 0.04 µg/l; Terbutylazin: 0.03 µg/l).

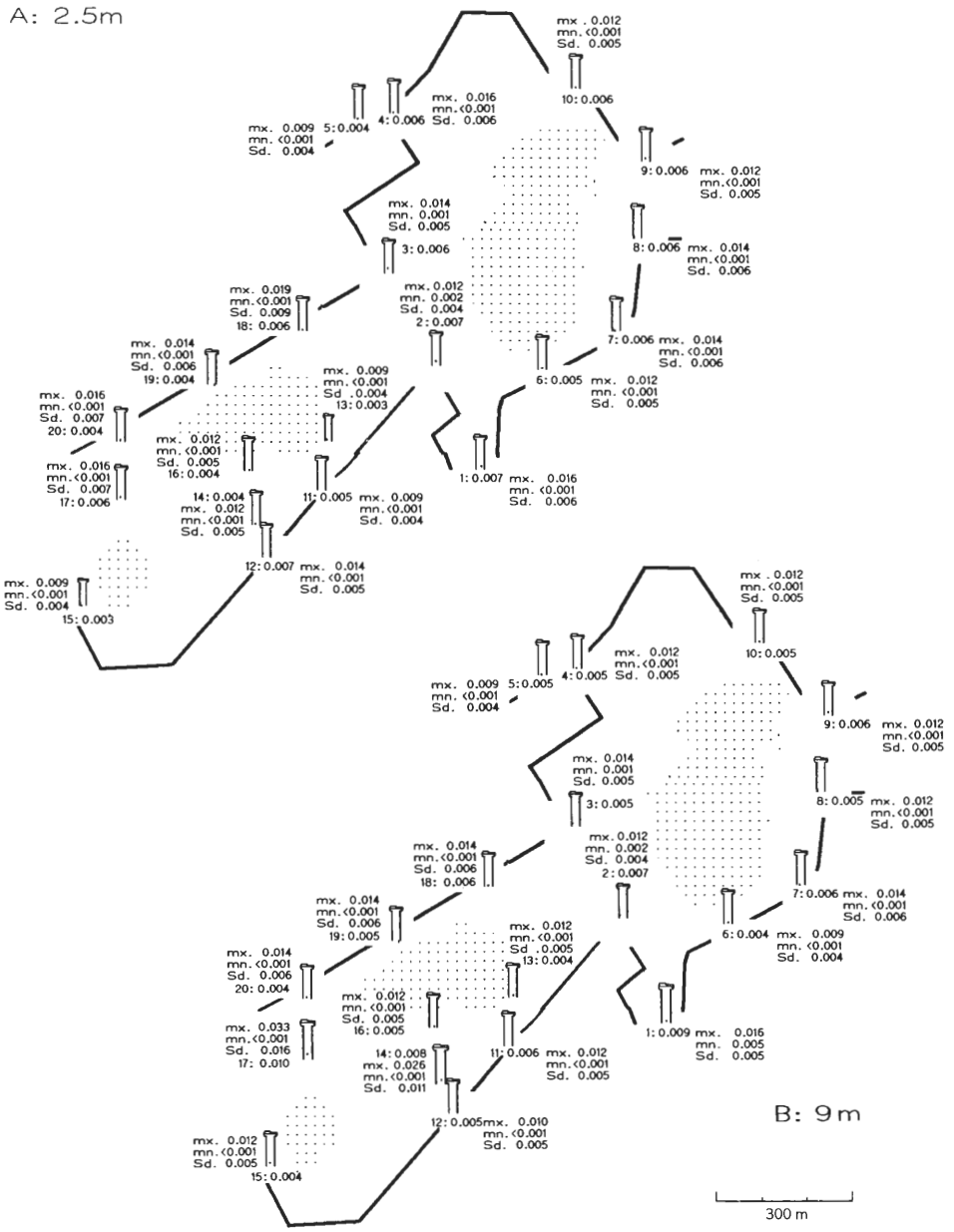


Abb. 37: Mittlere Kadmiumkonzentration [mg/l] des Grundwassers im NSG "Heiliges Meer". Der Darstellung liegen Messungen von Januar bis Juli 1992 zugrunde. Der Mittelwert ist als Säule graphisch dargestellt; numerische Angaben erfolgen als: Brunnennr.: Mittelwert; mx. = Maximum; mn. = Minimum; Sd. = Standardabweichung

IV. Diskussion

IV.1 Grundwasserbelastende Faktoren aus der Umgebung

Stichprobenartige Grundwasseruntersuchungen aus Hausbrunnen, Quellen und Grubenwässern der näheren Umgebung des NSG „Heiliges Meer" ergaben, daß von den untersuchten physikochemischen Parametern erhöhte Nitratkonzentrationen im gesamten Untersuchungsraum der dominierende grundwasserbelastende Faktor sind. In sämtlichen Grundwasserproben aus den Bereichen Hopsten, Recke, Obersteinbeck, Hollebergshügel und Laggenbeck wurden ausnahmslos erhöhte Nitratgehalte festgestellt; von 7 Grundwasserstellen enthielten 6 Stellen mehr als 50 mg/l, 3 Stellen enthielten über 100 mg/l Nitrat (Tab. 3).

Tab. 3: Physikochemische Analysedaten von ausgewählten Grund-, Gruben- und Quellwässern aus der näheren Umgebung des NSG "Heiliges Meer".

Abkürzungen: HO1: Hausbrunnen in Hopsten
RE1, RE2,RE3 und RE4: Hausbrunnen in Recke
OS1: Hausbrunnen in Obersteinbeck
HH: Quelle in Hollebergshügel
PE1: Grubenwasser des Permer Stollen bei Laggenbeck
E: Einheiten

Parameter	HO1	RE1	RE2	RE3	RE4	OS1	HH	PE1	[E]
Nitrat	68.4	131.6	134.5	17.8	109.9	70.0	82.7	55.9	mg/l
Nitrit	22.0	75.0	19.0	7.0	3.0	235.0	1.0	3.0	µg/l
Ammonium	0.08	0.12	0.14	0.01	0.02	0.85	<0.005	0.01	mg/l
Phosphat	0.18	0.43	0.15	0.31	0.10	0.06	0.03	0.10	mg/l
Eisen	0.20	0.51	0.33	0.36	0.13	0.65	0.03	0.07	mg/l
Chlorid	21.3	82.3	45.7	22.7	56.0	101.4	56.7	41.3	mg/l
Leitwert	335	742	570	284	568	620	412	621	µS/cm
pH-Wert	4.7	5.1	4.7	4.3	4.3	4.7	5.5	7.7	$-\lg H^+$

Diese 1991 durchgeführten Untersuchungen vervollständigen das Bild von einer durch die landwirtschaftliche Nutzung geprägten Grundwasserlandschaft mit den hierfür charakteristischen, von natürlichen Verhältnissen weit entfernten Milieubedingungen (NEHRKORN et al. 1973). Das NSG „Heiliges Meer" stellt gleichsam eine Insel mit heute noch weitgehend gering Nitrat-belastetem Grundwasser dar, die inmitten einer anthropogen geprägten Agrarlandschaft eingebettet ist. Wie bereits gesagt, erfährt das Schutzgebiet an mehreren Stellen heute erhöhte Nitrateinträge über das Grundwasser, weshalb ohne entsprechende Gegenmaßnahmen eine Angleichung der Milieubedingungen im Grundwasser des Gebietes als wahrscheinlich und der Erhalt des heutigen Zustandes als fraglich erscheinen muß. Nitratkonzentrationen von mehr als 200 mg/l wurden 1992 im Norden des Schutzgebietes festgestellt; entsprechend hohe Werte wurden an keiner anderen Stelle in der näheren Umgebung des Schutzgebietes während dieser Untersuchung vorgefunden.

Neben großräumigen Nitratbelastungen konnten an den meisten Stellen auch erhöhte Phosphatkonzentrationen im Grundwasser festgestellt werden. Wie Nitrat ist auch

Phosphat als Eutrophierungsparameter von wesentlicher Bedeutung und wird zur Erhöhung des Nährstoffangebotes auf Äckern ausgebracht. Das der Nitratbelastung weitgehend äquivalente Vorkommen erhöhter Phosphatkonzentrationen im Grundwasser der Umgebung wird aus der landwirtschaftlichen Nutzung verständlich. Auch Phosphat tritt heute bereits innerhalb des Schutzgebietes an mehreren Stellen im Grundwasser in erhöhter Konzentration in Erscheinung und stellt eine Gefahr für den Erhalt nährstoffarmer Lebensräume im Gebiet dar, der nur mit wirksamen Maßnahmen zu begegnen ist, die z. B. die landwirtschaftlichen Nutzungsformen für ein größeres Umfeld regeln.

Wie innerhalb des Kerngebietes, so wurden auch im Grundwasser der näheren Umgebung deutlich erhöhte Eisenkonzentrationen festgestellt, die aber typisch für die dortige Grundwasserbeschaffenheit sein dürften. Im Kerngebiet tritt Eisen zusammen mit Mangan besonders dort in erhöhter Konzentration im Grundwasser auf, wo die Wirkungen anthropogener Störungen durch die Landwirtschaft gering sind (III.22), d.h., wo reduzierende Bedingungen herrschen.

Im Gegensatz zum natürlichen Eisengehalt des Grundwassers gehen Salz- und Schwermetallbelastungen auf lokale Grundwasserverunreinigungen zurück. Neben Belastungen durch Straßen sind in diesem Zusammenhang auch solche durch Industrieabwässer zu nennen, die über die Meerbecke herbeigeführt werden und zu erhöhten Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser führen.

Durch die Beobachtung erhöhter und stark schwankender Leitfähigkeitswerte des Meerbeckewassers angeregt, wurde entlang des Bachlaufes ein Meßstellennetz einge-

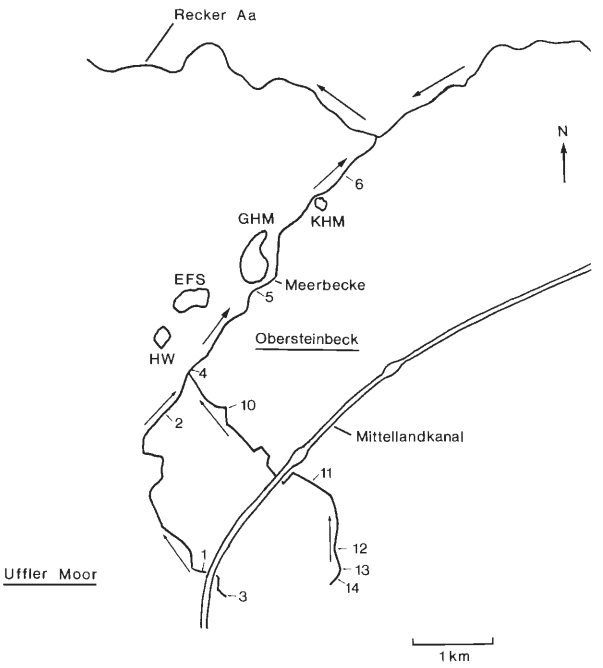


Abb. 38: Meßstellennetz "Meerbecke"
Der Bachlauf 3-1-2 führt Drainagewasser von landwirtschaftlichen Flächen und Abwässer aus dem Uffelner Raum an 3; der Teil 14-13-12-11-10 führt durch Grubenwässer kontaminiertes Grundwasser, das periodisch aus dem Steinbruch "Westermann" eingeleitet wird. An 4 treten beide Zweige in die Meerbecke, die an 5 das NSG "Heiliges Meer" passiert und nördlich von 6 in die Recker Aa mündet.

richtet, mit dessen Hilfe der Verursacher der Belastungen ermittelt werden konnte. Hiernach werden schwefelsaure Grubenwässer aus dem Uffelner Raum in die Meerbekke eingeleitet (Meßstellen 13 u. 14 in Abb. 38), die die Leitfähigkeit des Bachwassers auf über 2000 µS/cm ansteigen lassen. Da ein erhöhtes Auftreten von Sulfat in Gebieten mit bergbaulicher Tätigkeit keine Seltenheit darstellt (MATTHES 1966), dürften Grundwasserbelastungen durch Sulfationen im Bereich der Ibbenbürener Karbonscholle ein zunehmendes Problem darstellen. Von 1974 bis 1987 betrug die mittlere Leitfähigkeit des Meerbeckewassers ca. 300 µS/cm (Abb. 39A). Von 1988 bis heute erfolgte eine ständige Zunahme der Leitfähigkeit, begleitet von einer enormen Schwankungsbreite (Abb. 39B).

Diese erhöhte Schwankungsbreite der Ionenfracht ergibt sich aus der nur zeitweise erfolgenden Schadstoffeinleitung und der damit verbundenen erhöhten Belastung; während der Zwischenzeit erhält die Meerbecke bevorzugt Drainagewasser von landwirtschaftlichen Nutzflächen, welches deutlich ionenärmer ist als das Grubenwasser.

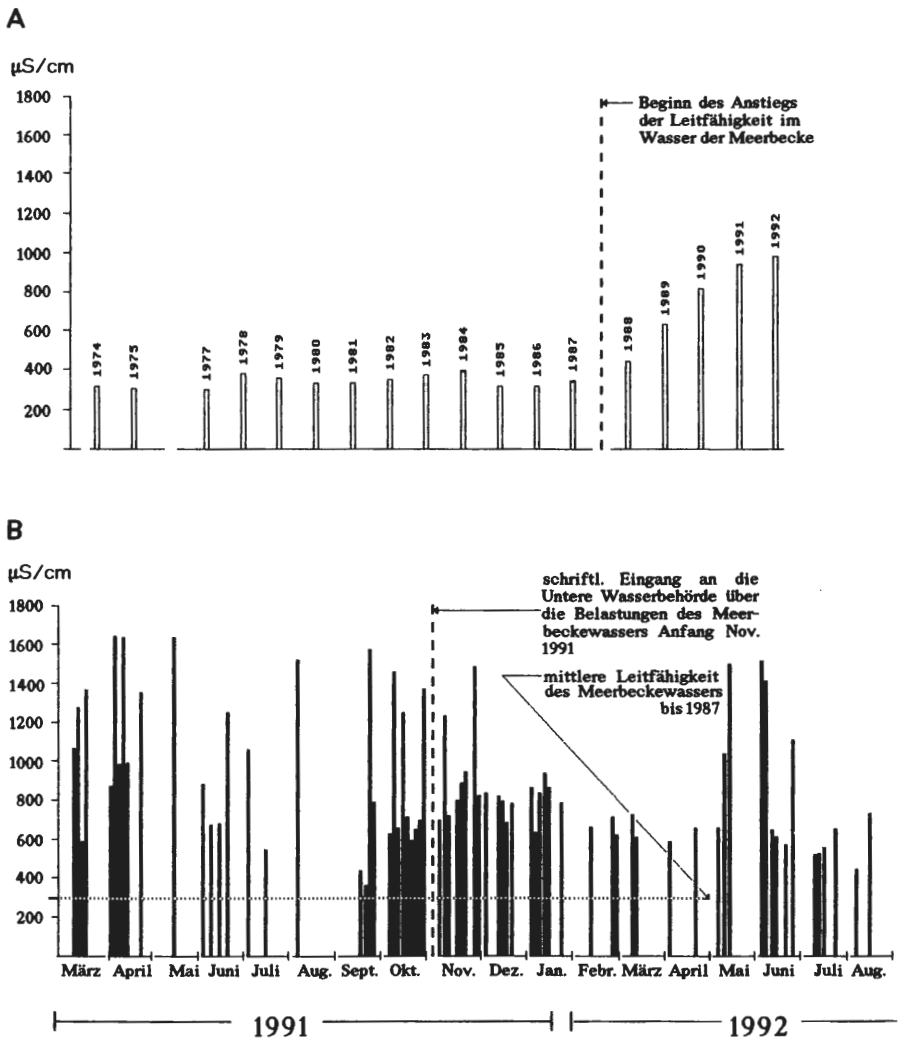
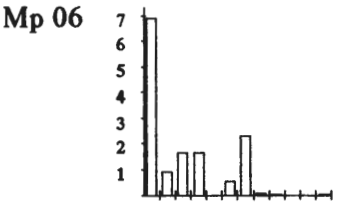
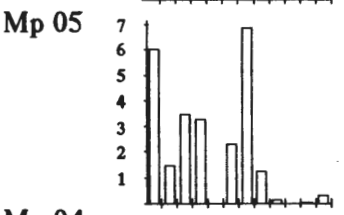
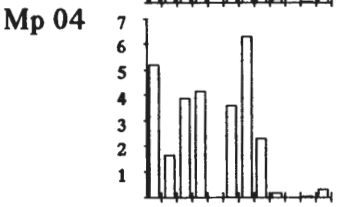
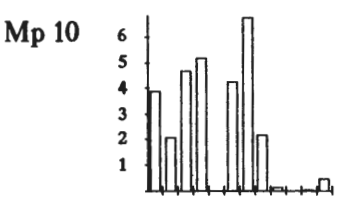


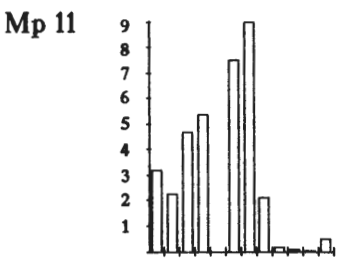
Abb. 39: Leitfähigkeit [µS/cm] der Meerbecke an der Grenze zum NSG "Heiliges Meer"
A: Jahresmittelwerte von 1974 bis 1992; B: Einzelwerte von 1991 bis 1992

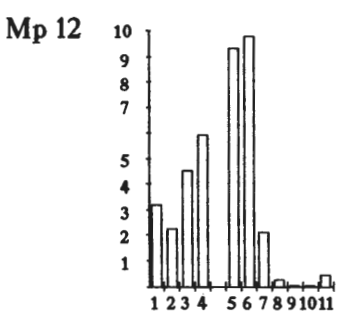


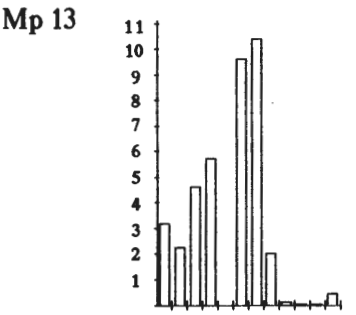


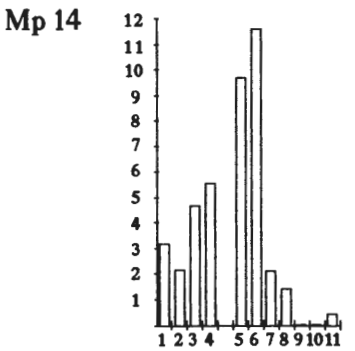












Säulen	Einheiten
1. pH-Wert	$(-\lg[H^+])$ × 1
2. Leitwert	(µS/cm) × 10^3
3. Chlorid	(mg/l) × 10^2
4. Sulfat	(mg/l) × 10^2
5. Eisen	(mg/l) × 1
6. Mangan	(mg/l) × 1
7. Aluminium	(mg/l) × 10^{-1}
8. Kupfer	(mg/l) × 10^{-1}
9. Blei	(mg/l) × 10^{-1}
10. Kadmium	(mg/l) × 10^{-1}
11. Zink	(mg/l) × 10^{-1}

Zur Lage der Meßstellen vgl. Abb. 38

Abb. 40: Salz- und Metallionenfracht der Meerbecke und Nebenbäche am 09.10.1991.

Charakteristische Werte verschiedener physikochemischer Parameter des Meerbeckewassers während der Belastungsphase sind in Abb. 40 dargestellt. An den Einleitungsstellen 13 und 14 liegt am 09.10.1991 der pH-Wert bei 3.2 und erfährt bis zur Probenstelle 10 nur eine schwache Erhöhung auf 3.9. An Stelle 4 fließt Drainagewasser zu, das einen sprunghaften pH-Anstieg auf 5 bewirkt. Entlang der Fließstrecke bis zum NSG „Heiliges Meer" verbleiben die pH-Werte des Meerbeckewassers im sauren Bereich (pH 6) und erreichen erst an Stelle 6 nahe der Einmündung in die Recker Aa den neutralen Bereich (pH 7). Entsprechend werden die Salzfracht (Sulfate und Chloride), der Gehalt an Schwermetallionen (Eisen, Mangan und Zink) und Aluminium von den Einleitungsstellen 13 und 14 bis zum Schutzgebiet nur unwesentlich reduziert; die sauren Milieubedingungen sorgen für eine große Mobilität der Metallionen im Meerbeckewasser. Erst nach Erreichen eines neutralen pH-Wertes kommt es zwischen den Probestellen 5 und 6 zu einer drastischen Reduzierung der Metallionenfracht (Abb. 40).

Obwohl der Einfluß der Meerbecke auf das Grundwasser nur lokal in Erscheinung tritt, geht von ihm für das Schutzgebiet eine erhebliche Belastung aus. Besonders die wechselnden Milieubedingungen im Meerbeckewasser führen wechselweise zur Deposition von Schadstoffen im Sediment oder zur plötzlichen Freisetzung. Diese Freisetzung der über längere Zeit abgelagerten Schadstoffe während saurer Milieubedingungen kann im Grundwasser zu unvorhersehbaren Spitzenbelastungen führen, die die Schadstoff-Konzentrationen des Meerbeckewassers weit übertreffen.

IV.2 Beziehungen der Seen zum Grundwasser

Wie in Kap. II dargestellt, handelt es sich bei den größeren, durch Erdfall entstandenen Seen um in statu nascendi grundwassergespeiste Gewässer. Auch die meisten kleineren flachen Tümpel und Kolke werden grundwassergespeist. Je nach Alter der Seen und entsprechend ihrem Verlandungsstadium bedecken mehr oder weniger mächtige Schlammablagerungen den Grund der Gewässer. Im Großen Heiligen Meer sind die Ablagerungen z. B. bis zu 8m mächtig und vermindern daher Wechselwirkungen zwischen dem See- und dem Grundwasser. Jüngere Seen, wie z. B. der Erdfallsee, sollten aufgrund ihrer weniger mächtigen Ablagerungsschichten stärker an Wechselwirkungen mit dem Grundwasser beteiligt sein. Eine Untersuchung von Tiefenprofilen beider Seen liefert Hinweise für eindringendes oberflächennahes Grundwasser (Abb. 41-43).

Bisher fehlen vergleichende systematische Untersuchungen von Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächengewässern des Schutzgebietes, die – besonders unter Berücksichtigung der reich strukturierten Vegetationsverhältnisse – wertvolle Kenntnisse über die Auswirkung grundwasservermittelter Schadstoffeinträge und ihre Eingrenzung durch gezielte Veränderungen am Vegetationsbestand und der Geländestruktur liefern können; nach derzeitigem Kenntnisstand wird das Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet in besonderem Maß durch nitratbelastetes Grundwasser in seinem nährstoffarmen Zustand gefährdet.

Während der Untersuchung physikochemischer Parameter des Wassers der beiden großen Seen des Schutzgebietes (Mai 1992) konnte für den Erdfallsee noch keine abgeschlossene Sommerstagnation festgestellt werden, obwohl das oberflächennahe Wasser beider Seen (Großes Heiliges Meer und Erdfallsee; Abb. 2) nahezu identische Temperaturen von ca. 12 °C aufwies. Im Wasser des Erdfallsees war bis in eine Tiefe von 10m noch Sauerstoff nachweisbar (Abb. 43), und das Temperaturprofil zeigte dort erhebliche Abweichungen von dem sigmoiden Verlauf im Gegensatz zum Temperaturprofil des

Großen Heiligen Meeres (Abb. 41). Beim Erdfallsee ergeben erhöhte CO_2- und Phosphat-Konzentrationen in geringer Wassertiefe Hinweise auf eindringendes oberflächennahes Grundwasser, welches am Nord- und Südufer ebenfalls erhöhte Phosphat- und Ammoniumfrachten aufweist (Abb. 12 u. 14). Der pH-Wert des oberflächennahen Erdfallseewassers (pH 6.7; Abb. 42) entspricht dem mittleren pH-Wert des Grundwassers an Probestelle 16 in 2.5m Tiefe (Abb. 16A). Auch die erhöhten Ammoniumkonzentrationen in den oberen Wasserschichten des Erdfallsees, die beim Großen Heiligen Meer zu diesem Zeitpunkt nicht feststellbar waren, deuten auf das Eindringen von stickstoffbelastetem Grundwasser hin (Abb. 41). Der Hinweis auf eine grundwasservermittelte Drift des Erdfallseewassers wird durch die Leitfähigkeitsverhältnisse im See- und Grundwasser unterstützt: Die Leitfähigkeitserhöhung im Erdfallseewasser von 148 µS/cm (POTT 1983) auf 169 µS/cm bei dieser Untersuchung kann durch eintretendes Grundwasser erklärt werden, unter der Annahme, daß der Leitwert des Grundwassers sich durch Ioneneinträge aus der Umgebung sukkzessive erhöht. Auch die Absenkung der Leitfähigkeit auf 133 µS/cm im Grundwasser am Nordufer des Erdfallsees gegenüber dem deutlich erhöhten Leitwert von 331 µS/cm am Südufer spricht für eine Grundwasserströmung von Süd nach Nord und für einen erhöhten Grundwassereinfluß am Südufer des Erdfallsees (vgl. III.10).

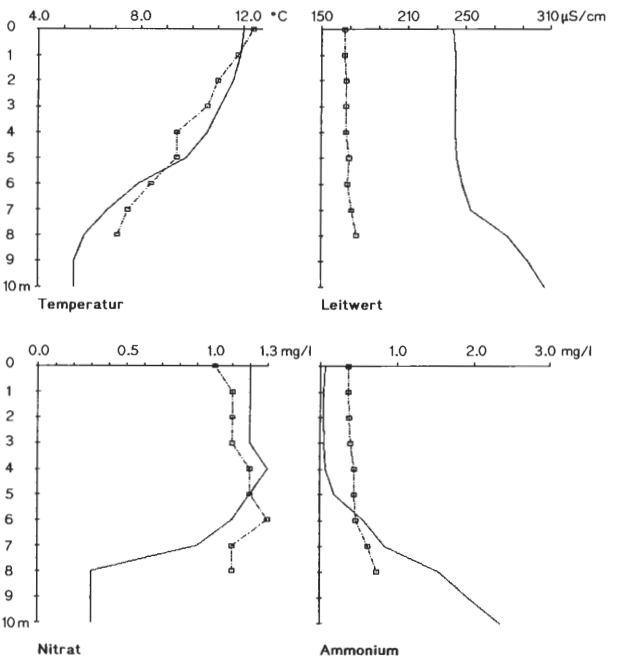


Abb. 41: Physikochemische Parameter in Abhängigkeit von der Wassertiefe

Erdfallsee am 08.05.1992 / Großes Heiliges Meer am 07.05.1992

Auf weitere Hinweise für einen Grundwasserzutritt in die Seen des Schutzgebietes soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden; eine ausführliche Darstellung der 1991 durchgeführten Untersuchungen oberirdischer Gewässer des Schutzgebietes (Erdfallsee, Kolk am Erdfallsee, Großes Heiliges Meer, Umlaufgräben) ist in einem unveröffentlichten Bericht enthalten, der beim Westfälischen Museum für Naturkunde in Münster und der Außenstelle „Heiliges Meer" vorliegt.

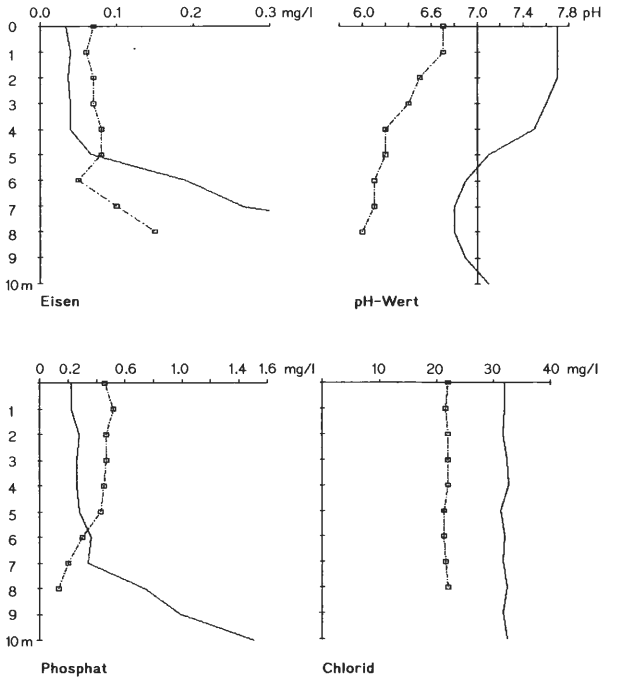


Abb. 42: Physikochemische Parameter in Abhängigkeit von der Wassertiefe

Erdfallsee am 08.05.1992 / Großes Heiliges Meer am 07.05.1992

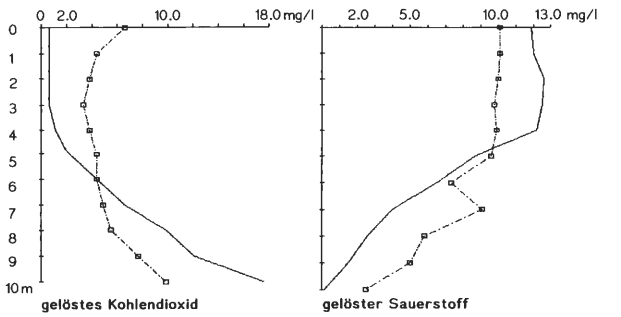


Abb. 43: Physikochemische Parameter in Abhängigkeit von der Wassertiefe

Erdfallsee am 08.05.1992 / Großes Heiliges Meer am 02.05.1992

IV.3 Bisher erfolgte Schutzmaßnahmen und Zielvorgabe zu ihrer wirkungsvollen Ergänzung

In Voraussicht einer heute schon eingetretenen negativen Entwicklung oligotropher Lebensräume im Schutzgebiet wurde bereits 1965 der Erwerb von Umlandflächen, die bis 1990 ca. 20 ha umfaßten, vorangetrieben, um durch Schaffung geeigneter, nicht bewirtschafteter Pufferzonen den weiteren Nährstoffeintrag in das heute 90 ha große Schutzgebiet zu reduzieren und dem Bestandsrückgang oligotraphenter Arten entgegenzuwirken. Hierbei lag das Hauptaugenmerk auf Beeinträchtigungen durch landwirtschaftlich bedingte Eutrophierung. Die vor den Flurbereinigungen in das Große Heilige Meer einmündende, heute erheblich mit Schadstoffen belastete Meerbecke wurde bereits Ende der 60er Jahre an die Südostgrenze des NSG verlegt und fließt seitdem direkt in die Recker Aa. Umfanggräben in den Bruchwaldregionen von Großem Heiligen Meer und Erdfallsee liegen im Abflußbereich der beiden Seen und fangen das von den bewirtschafteten Flächen anfallende Spülwasser sowie oberflächennahes Grundwasser auf, so daß der Einfluß des Umfeldes auf das Schutzgebiet durch oberirdisches Wasser vermindert wird (BEYER 1969).

Außerdem finden neben landwirtschaftlich bedingten Stoffeinträgen über den Luftweg auch grundwasservermittelte Einträge von Stickstoff-, Phosphor- und Schwefelverbindungen, Erdalkali- und Metallionen in das Schutzgebiet statt. Auch über die Meerbecke sowie von der das NSG durchschneidenden Landstraße L 504 erfolgen heute vermehrt Schadstoffeinträge in das Grundwasser (Schwermetalle und Salze); sie sind zusammen mit den Stickstoffeinträgen aus der Landwirtschaft lokal im Untersuchungsgebiet ökologisch wirksam (NOWACK 1980) und auch mit einfachen Methoden analytisch nachweisbar. Die im Rahmen gewässerkundlicher Kurse an der Biologischen Station (Außenstelle „Heiliges Meer") durchgeführten Untersuchungen weisen auf diese an Bedeutung zunehmenden Gefahrenquellen für das Grundwasser des Schutzgebietes hin. So erfolgte während eines Zeitraumes von nur 4 Jahren (1987 bis 1991) im Wasser der Meerbecke eine kontinuierliche Zunahme des Leitwertes um über 300% durch Einleiten saurer sulfathaltiger und mit Schwermetallen kontaminierter Abwässer (vgl. IV.1).

Die Grundwasserbeschaffenheit befindet sich im NSG „Heiliges Meer" über ausgedehnte Bereiche bis weit in das Kerngebiet hinein heute nicht mehr in einem natürlichen Zustand. Im Norden und Süden lassen sich bereits von den Randzonen ausgehende Grundwasserschäden erheblichen Umfangs feststellen. Ihre weitere Entwicklung ist z. Z. nicht absehbar. Sie gefährden den Erhalt des bislang nährstoffarmen Gebietes ernsthaft und haben vermutlich schon Schädigungen an den Lebensräumen der Seen, Bruchwaldzonen und Heidelandschaften hervorgerufen.

Die z. T. erhebliche Überschreitung von Grenzwerten der EG-Richtlinien (vgl. Kap. III) ist für mehrere chemische Parameter im Grundwasser des Gebietes gegeben. Sie geht auf drei wesentliche Verursacher zurück, auf welche die Maßnahmen zur Verbesserung der jetzigen Grundwassersituation und der Entwicklung des Pflanzen- und Tierbestandes im Schutzgebiet Bezug nehmen müssen:

– An erster Stelle muß die landwirtschaftliche Nutzung des Umfeldes mit ihren z. T. direkt an das Schutzgebiet angrenzenden Getreide- und Maisäckern genannt werden. Von ihr gehen erhöhte Mengen an Stickstoff-, Phosphor-, Alkali- und Erdalkaliverbindungen durch Auswaschung in das Grundwasser über. Eingriffe in die natürlichen Verhältnisse der Grundwasserdynamik (z. B. Entwässerung der Nutzflächen, Anlegung von Entwässerungsgräben, Änderungen von Vorflut, Grundwasserströmungen und Mächtigkeit der Sickerwasserzonen) bewirken durch veränderte Redox-Verhältnisse sekundäre Belastungen durch Aluminium und Schwermetalle. Diese Eingriffe haben

dazu geführt, daß sowohl Nitrateinträge über die Luft und über Auswaschungen als auch Sauerstoff-, Sulfat- und Nitrat-Transport sowie Bodenversauerungen im Schutzgebiet heute ein ernstzunehmendes Problem darstellen. Nitratgehalte im Grundwasser des Schutzgebietes von über 200 mg/l, Kaliumkonzentrationen von über 40 mg/l, pH-Werte von 4.3 und Aluminiumkonzentrationen von zeitweise mehr als 4 mg/l gehen ursächlich auf o.g. anthropogene Veränderungen zurück und müssen als nicht zu tolerierende Grundwasserschäden gewertet werden.

– Durch bergbauliche Tätigkeit im benachbarten Umfeld ausgelöste Verunreinigungen der Meerbecke, besonders mit Sulfaten und Schwermetallen, die erst ab 1987 stark zugenommen haben, belasten das Grundwasser des Schutzgebietes heute bereits erheblich und sind in ihren Auswirkungen nicht mehr lokal auf das unmittelbare Gebiet der Meerbecke begrenzt. Ursächlich auf den Einfluß der Meerbecke zurückzuführende Sulfatbelastungen lassen sich bis in das Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet nachweisen. Sie nehmen teil an Wechselwirkungen mit landwirtschaftlich bedingten Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit, indem sie an Kontaktzonen zwischen reduzierendem und oxidierendem Milieu im Grundwasser verstärkend auf die Bodenversauerung wirken und zu einer erhöhten Mobilisierung von Metallionen führen. Dies trifft besonders für den Norden des Großen Heiligen Meer-Gebietes zu. Außer industriellen Abwässern erhält die Meerbecke Drainagewasser von landwirtshaftlichen Nutzflächen, das den Eintrag weiterer Schadstoffe in das Schutzgebiet erhöht; dabei ist vor allem an Phosphor- und Stickstoffspezies, aber auch an Pflanzenschutzmitteln wie Atrazin und seine Derivate zu denken (III.29), die im Wasser der Meerbecke bereits nachgewiesen wurden.

- Die von Ibbenbüren nach Hopsten führende Landstraße L 504 durchschneidet das Schutzgebiet zwischen Erdfallsee und Großem Heiligen Meer; beide durch die Straße getrennten Teilgebiete erhalten durch die zunehmende Straßenbelastung gleichermaßen erhöhte Schadstoffeinträge, insbesondere von Abtausalzen und Schwermetallen. Veränderungen des Pflanzenbestandes und die Einflußnahme straßenbedingter Kontaminationen auf das Grundwassers sind belegt (GOLWER 1973, NOWACK 1980). Neben ausgedehnten Belastungen des Grundwassers durch NaCl sind lokale Schwermetallbelastungen besonders durch Blei, Kadmium, Kupfer und Zink bereits im tieferen Grundwasser des Schutzgebietes nachweisbar. Als Quelle langlebiger Kontaminationen muß heute der L 504 besondere Beachtung und Voraussicht bei der Planung von Schutz- und Pflegemaßnahmen geschenkt werden, da die von ihr ausgehenden Schwermetalleinträge an Bodenbestandteile adsorbiert und ständig angereichert werden. In den nächsten Jahren ist mit einer weiteren Zunahme des Straßenverkehrs und damit auch mit einer Zunahme der verkehrsbedingten Kontaminationen zu rechnen. Das Ausbringen von Auftausalzen in der unmittelbaren Umgebung des Schutzgebietes ist nicht zu tolerieren und hat bereits zu erheblichen Grundwasserbelastungen geführt (III.12 u. III.13). Die Salzfracht des Grundwassers ist nicht abbaubar und kann nur verdünnt werden, d.h., es kann nur eine Konzentrationsabnahme durch Ausweitung des Kontaminationsherdes erfolgen, die eine sukzessive Involvierung bislang unbelaster Grundwasserbereiche nach sich ziehen wird. Heute weisen bereits nahezu das gesamte Grundwasser des Großen Heiligen Meer-Gebietes und die östlichen Bereiche des Erdfallsee-Heideweihers deutlich erhöhte Na- und Cl-Konzentrationen mit einem Belastungsschwerpunkt an der L 504 auf.

Nach der ersten Feststellung von Grundwasserschäden im Jahr 1991 wurde die Untere Wasserbehörde des Kreises Steinfurt davon in Kenntnis gesetzt. Sie unternahm Maßnahmen zur Abstellung weiterer Einleitungen von Schadstoffen in die Meerbecke. 1992 wurden zur Erörterung der Grundwasserschäden im NSG „Heiliges Meer“ mehrere Ortstermine einberufen, an denen Vertreter des Landschaftsverbandes Westfalen-Lippe als Eigner, des Staatl. Amtes f. Wasser- u. Abfallwirtschaft Münster, der Unteren Land-

schaftsbehörde des Kreises Steinfurt, des Amtes für Agrarordnung, der Landesanstalt für Ökologie und der Höheren Landschaftsbehörde teilnahmen. In diesem Rahmen wurde die Dringlichkeit von Gegenmaßnahmen von allen Teilnehmern festgestellt und erste Vorschläge für ein Sanierungskonzept formuliert, welches die drei Hauptquellen der Grundwasserbelastungen im Schutzgebiet betreffen: 1. landwirtschaftliche Nutzung des Umfeldes, 2. Meerbeckebelastung und 3. Schadstoffeintrag über die Landstraße L 504.

Noch im Dezember 1991 wurden 200 Bodenproben, im Oktober 1992 weitere 22 Bodenproben während der Errichtung von bis heute insgesamt 23 Grundwassermeßstellen im Schutzgebiet als Tiefenprofil in jeweils 2m-Abständen aus jeweils bis zu 10m Tiefe gewonnen. Diese Proben sollen näheren Aufschluß über die Größe und Ausdehnung von Kontaminationen innerhalb der Sedimentablagerungen liefern. Die Kenntnis der Kontaminationsverhältnisse des Bodens sind für Konzeption und Durchführung geplanter Sanierungsmaßnahmen neben Kenntnissen der Grundwasserbeschaffenheit im Schutzgebiet unerläßlich.

Bei der Durchführung von Sanierungsmaßnahmen muß jedoch Vorsorge getroffen werden, daß keine zusätzliche Gefährdung oder gar Schädigungen des Schutzgebietes erfolgt, z. B. durch die Mobilisierung von Schadstoffen, die über den mechanischen Aufschluß bei Erdbewegungen hervorgerufen werden kann. Die Untersuchung und Auswertung der bereits vorliegenden Bodenproben und eine fortlaufende Aufzeichnung des Verlaufs weiterer Schadstoffeinträge, der Schadstoffentwicklung im Grundwasser des Schutzgebietes und der Umgebung können hierzu wertvolle Orientierungsdaten liefern und Risiken während der erforderlichen Maßnahmen minimieren.

Für die ökologische Beurteilung der Grundwasserbeschaffenheit ist die Orientierung an Grenzwerten der EG-Richtlinie fragwürdig, da für die meisten Parameter bereits erheblich niedrigere Werte zu Veränderungen des Tier- und Pflanzenbestandes bis hin zur Verödung des Lebensraumes führen können. Ziel von sogenannten Sanierungsmaßnahmen kann daher nicht die Einhaltung von Grenzwerten gemäß der EG-Richtlinie sein, sondern nur die Rückführung der anthropogen gestörten Grundwasserbezirke auf natürliche Verhältnisse.

Reaktionen des Lebensraumes auf Änderungen einzelner Parameter sind sowohl standort- als auch artspezifisch. So reagieren natürlicherweise nähstoffarme Standorte, z. B. pleistozäner Sandlandschaften, wie sie sich im NSG „Heiliges Meer“ mit ihren an die nährstoffarmen Verhältnisse angepaßten Tier- und Pflanzenarten charakteristisch darstellen, wesentlich empfindlicher auf bereits geringfügige Erhöhungen des Nährstoffangebotes als nährstoffreiche Lebensräume, z. B. eutrophe flache Weiher, die sich in ihren Pflanzengesellschaften von denen nährstoffarmer Seen völlig unterscheiden. Der Rückgang standorttypischer oligotraphenter Arten und ihr Austausch durch nährstoffliebende Generalisten ist heute im Gebiet zunehmend feststellbar. Jüngste Veränderungen der Ausprägung von Pflanzengesellschaften im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet, insbesondere der in den letzten Jahren erfolgte drastische Rückgang von *Lobelia dortmanna* am Südufer des Erdfallsees, weisen auf eine zunehmende Eutrophierung hin. Parallel zu dieser Entwicklung kommen im Grundwasser südlich des Erdfallsees über weite Bereiche stark erhöhte Nitratkonzentrationen vor (III.4), wie sie am Großen Heiligen Meer heute nur lokal am Nordrand des Gebietes festzustellen sind. Vergleiche der physikochemischen Verhältnisse zwischen dem Großen Heiligen Meer und dem Erdfallsee geben Hinweise auf einen erhöhten Grundwassereintritt innerhalb der Uferregionen des vergleichbar jungen Erdfallsees (IV.2), so daß möglicherweise erhöhte Wechselwirkungen zwischen dem Erdfallsee und dem oberflächennahen Grundwasser sich heute schon ökologisch auswirken und ihrerseits ein erhöhtes Gefährdungspotential für Pflanzen und Tiere darstellen.

Das Beispiel zeigt, daß die Beurteilung anthropogen bedingter Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit und die hierdurch mögliche Gefährdung oberirdischer Lebensräume nur in Kenntnis der geologischen Beschaffenheit des Standortes und der jeweils sehr unterschiedlich zu charakterisierenden Ansprüche der Tier- und Pflanzenwelt erfolgen kann. Dabei darf nicht nur von einzelnen Arten ausgegangen werden, sondern auch Lebensgemeinschaften müssen in Kenntnis ihrer Wechselwirkungen untereinander und ihrer Einflußnahme auf den Lebensraum berücksichtigt werden.

Der Erdfallsee und sein Bestand an heute seltenen oligotraphenten, leider auch hier bereits von Auslöschung bedrohten Pflanzengesellschaften ist aufgrund seines oligotrophen Charakters und seiner Exposition zu bereits nährstoffbelasteten Grundwasserbezirken akuter durch Nitrateintrag gefährdet als z. B. das Große Heilige Meer, obwohl im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet insgesamt niedrigere Nitratgehalte im Grundwasser festgestellt wurden als im Großen Heiligen Meer-Gebiet.

Neben der direkten Einflußnahme des Grundwassers auf den Nährstoffhaushalt grundwassergespeister Gewässer muß bei der Beurteilung der Eutrophierung des Gebietes der zunehmende Nährstoffeintrag aus der Luft, insbesondere durch Massentierhaltung und Gülleverrieselung, Berücksichtigung finden. Heute grenzen Ackerflächen teilweise unmittelbar an das Schutzgebiet; durch Gülleverrieselung, die oftmals bereits im Frühjahr ab März auf den Maisäckern erfolgt, sind nicht-vernachlässigbare Wirkungen auf den Nährstoffhaushalt des Schutzgebietes zu erwarten; der verstärkte Einsatz von Pflanzenschutzmitteln im Bereich von Ackerflächen kann ebenfalls, sowohl über das Grundwasser als auch über den Eintrag aus der Luft, zu Gefährdungen des Pflanzen- und Tierbestandes im Schutzgebiet „Heiliges Meer“ führen.

V. Zusammenfassung

Im Untersuchungsgebiet kommt das Grundwasser hauptsächlich als Porengrundwasser innerhalb von quartären Sandschichten vor, die bis 100 m Mächtigkeit besitzen und in denen im Verhältnis zum Kluftgrundwasser nur geringe Grundwasserströmungen auf grundwasserstauenden Horizonten geringer Neigung auftreten; sie betragen oft nur wenige Zentimeter pro Tag. Adsorptions- und Abbauvorgänge wirken sich beim Stofftransport im Grundwasser des Gebietes bereits auf kleinem Raum aus.

Charakterisierend für die natürliche Beschaffenheit des Grundwassers im NSG „Heiliges Meer“ sind weitgehend gleichmäßige bis z. T. dicht an die Bodenoberkante angrenzende Grundwasserstände (vgl. III.1) und steile Gradienten oberflächenbeeinflußter Parameter wie Temperatur (vgl. III.2) und Sauerstoffabnahme innerhalb der obersten Grundwasserschichten (vgl. III.3). Im Bereich landwirtschaftlicher Nutzflächen sind die natürlichen Verhältnisse anthropogen gestört. Die Absenkung des Grundwasserspiegels und das Vorhandensein von Sauerstoff auch in tieferen Grundwasserbereichen nimmt auf den Stickstoffgehalt und dessen Transport in Form von Nitrat (III.4) großen Einfluß. Neben N-Einträgen durch Auswaschung im Bereich der Ackerflächen sind besonders Störungen grundwasserdynamischer Prozesse, z. B. Grundwasserabsenkung, Änderung von Vorflut und Grundwasserströmungen, erhöhte Grundwasserneubildungsrate unter Ackerflächen, als wesentliche Ursachen der heute im Naturschutzgebiet bereits eingetretenen Grundwasserschäden durch Nitratbelastungen zu nennen. Unter reduzierenden Bedingungen stellen im Kerngebiet erhöhte Ammoniumwerte (III.6), oft begleitet von Eisen- (III.22), Mangan- (III.23) und Phosphationen (III.7), weitere Belastungen dar. Nitrit (III.5) ist als anthropogener Störfaktor im Wasser der Meerbecke stets, im Grundwasser des Schutzgebietes in der Nähe von Ackerflächen zeitweise lokal erhöht.

In Bereichen dystropher Gewässer und alter Niedermoorreste sind saure reduzierende Bedingungen charakteristisch und entsprechen den natürlichen Verhältnissen; hier führt die unvollständig ablaufende Mineralisation oft zu einer Anreicherung oxidierbarer organischer Substanzen z. B. in Form von Huminstoffen (III.8).

Im Grundwasser des Schutzgebietes treten Änderungen des pH-Wertes (III.9) besonders durch Redox-Reaktionen auf, z.B durch oxidativ entstehende Säuren (z. B. HNO_3 aus NH_4^+, H_2SO_4 aus H_2S), während reduzierende Bedingungen zu H^+-verbrauchenden Reaktionen und zu einer Erhöhung des pH-Wertes führen können. Der Abpufferung und Stabilisierung des pH-Wertes sind durch den natürlichen Mangel an Kalzium- (III.15) und Magnesiumionen (III.16) enge Grenzen gesetzt; Störungen treten hier im Bereich landwirtschaftlicher Nutzflächen auf, wo neben Kalzium- und Magnesiumionen auch erhöhte Konzentrationen von Kalium (III.14) festzustellen sind. Lokal kommen durch oxidative Säurebildung (HNO_3 durch Gülleverrieselung, H_2SO_4 durch erhöhte Konzentrationen reduzierter Schwefelspezies) pH-Werte unter 5 vor, die zur Versauerung des Grundwassers führen und ausnahmslos auf anthropogene Ursachen zurückgehen; es werden im Schutzgebiet bereits vermehrt Aluminiumionen aus dem Boden freigesetzt, deren Konzentrationen weit im toxischen Bereich liegen (III.24).

Die natürliche Salzfracht des Grundwassers quartärer Sande ist im Gebiet gering; Störungen hinsichtlich des Natrium-Chloridgehaltes (III.12 u. III.13) werden im Bereich der L 504 durch Auftausalze und im Bereich der Meerbecke zusammen mit erhöhten Sulfatkonzentrationen (III.11) beobachtet. Hier kann es durch Ionenaustauscheffekte auch zu erhöhten Schwermetallbelastungen kommen. Die Meerbecke wird durch Einleitung saurer, stark sulfat-haltiger Grubenwässer seit 1987 stark belastet. Im Grundwasser des Schutzgebietes treten in ihrem Einflußbereich neben Sulfat leicht erhöhte Schwermetallkonzentrationen auf, ebenso an der L 504 (III.25 – III.28).

Leitfähigkeiten (III.10) unter 100 µS/cm sind im Grundwasser des Schutzgebietes nicht mehr feststellbar. Bei Störungen nimmt die Leitfähigkeit als Zeichen starker Verunreinigungen sehr hohe Werte an (über 1.000 µS/cm), insbesondere durch die Salzfracht des Grundwassers in Meerbecke- und Straßennähe.

Besonders innerhalb der Kontaktzonen zu anthropogen gestörten Grundwasserbereichen sind heute gravierende Grundwasserschäden festzustellen. Bezüglich des Nitratgehaltes lassen sich lokal im Grundwasser des Schutzgebietes deutlich höhere Konzentrationen feststellen als im benachbarten Grundwasser außerhalb des Gebietes. Es gibt Hinweise, daß die Nitratlast im Kontaktbereich von reduzierenden und oxidierenden Milieubedingungen erheblich höher ist als unterhalb der Ackerflächen. Eine solche belastete Zone südlich des Erdfallsees reicht z. B. bis weit in das Schutzgebiet hinein und läßt sich nicht auf eine schmale Pufferzone begrenzen. Auch der Norden des großen Heiligen Meeres weist sehr hohe Nitratkonzentrationen im Grundwasser auf (III.4).

Die heute das NSG „Heiliges Meer" umgebenden Pufferzonen reichen in ihrer räumlichen Dimensionierung und Geländestruktur nicht aus, um Grundwasserschäden durch Schadstoffeinträge aus dem Umland und eine Gefährdung des empfindlichen Lebensraumes der Seen-, Bruchwald- und Heidelandschaft zu verhindern. Eine Trendwende der Schadensentwicklung ist nur mit Hilfe konsequenter Durchführung eines langfristigen Sanierungskonzeptes möglich, daß neben der Schließung von Lücken innerhalb der Pufferzonen und der flächenmäßigen Erweiterung arrondierender Schutzzonen sowohl eine großräumige Einschränkung der bisherigen landwirtschaftlichen und wasserwirtschaftlichen Nutzung des Umfeldes als auch die Rückführung des Gebietes auf natürliche grundwasserdynamische Verhältnisse zum Ziel hat. Zum Erhalt des Lebensraums sind Sanierungsmaßnahmen nur in Kenntnis der wirksamen Belastungsfaktoren erfolgversprechend; neben grundwasserbedingten Schadstoffeinträgen sind in diesem Zusam-

menhang auch Einträge aus der Luft regelmäßig zu untersuchen und deren Entwicklung innerhalb des Gebietes dokumentarisch festzuhalten.

VI. Literatur

ANT, H. (1974): Die biologische Station „Heiliges Meer" bei Hopsten (Westfalen) als Forschungs- und Lehrstätte. – Natur und Landschaft **49** (5): 134-138, Bonn-Bad Godesberg.

BEYER, H. (1969): Die Gewässer des Naturschutzgebietes „Heiliges Meer", ihre Entstehung und Erhaltung. – Naturkunde in Westfalen **5**: 123-126, Hamm.

BRECKLE, S.-W. (1988): Untersuchungen zur Nitratbelastung des Grundwassers in der Senne (im Süden Bielefelds). – Ber. Naturwiss. Verein Bielefeld u. Umgegend **29**: 1-21.

BUDDE, H. (1942a): Die benthale Algenflora, die Entwicklungsgeschichte der Gewässer und die Seentypen im Naturschutzgebiet „Heiliges Meer". – Archiv für Hydrobiologie **39**: 189-293.

–,– (1942b): Die Algenflora Westfalens und der angrenzenden Gebiete. – Decheniana **101 AB**: 131-214.

DIERSSEN, K. (1972): Die Erhaltung westdeutscher Heidegewässer – ein Beitrag zur regionalen Naturschutzplanung. – Natur und Landschaft **47** (6): 166-167, Stuttgart.

DVWK-Fachausschuß Grundwasserbiologie (1988): Bedeutung biologischer Vorgänge für die Beschaffenheit des Grundwassers. – Hrg.: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK). Parey, Hamburg, Berlin.

EHLERS, H. (1965): Über das Plankton des Großen Heiligen Meeres und des Erdfallsees bei Hopsten (Westf.). – Abh. Landesmus. f. Naturkde. **27** (3): 3-20, Münster.

FUNKE, B. (1992): Hydrobiologische Untersuchungen an ausgewählten Gewässern im Naturschutzgebiet „Heiliges Meer" bei Hopsten. – 1. Staatsprüfung f. Lehramt d. Primarstufe, Münster.

GOLWER, A. (1973): Beeinflussung des Grundwassers durch Straßen.- Z. deutsch. geol. Ges. **124** (2): 435-446.

GRAEBNER, P. (1930): Die Pflanzengesellschaften des Naturschutzgebietes „Heiliges Meer" bei Hopsten. – Abh. Westf. Provinzial-Mus. Naturkde. **1**: 137-150, Münster.

–,– (1934): Die Pflanzenwelt des Naturschutzgebietes. – Natur und Heimat **1** (Sonderheft: Führer durch das Naturschutzgebiet Heiliges Meer): 11-14.

HERBST, H. V. (1967): Experimentelle Untersuchungen zur Toxizität des Zinks. – Gewässer und Abwässer **44/45**: 37-47, Krefeld.

HÖLL, K. (1986): Wasser. – 7. Aufl., Walter de Gruyter Berlin New York: 592 S.

HÜTTER, L. A. (1992): Wasser und Wasseruntersuchung. – Laborbücher Chemie. 5. Aufl., Salle und Sauerländer.

KRIEGSMANN, K. F. (1937): Das „freie Wasser" unserer Seen. Ein Beitrag zur Seentypenlehre. – Natur und Heimat **4** (1): 1-5.

–,– (1938): Produktionsbiologische Untersuchung des Pelagials des Großen Heiligen Meeres unter besonderer Berücksichtigung seines Eisenhaushalts. – Abh. Landesmus. der Provinz Westfalen, Museum für Naturkde. **9** (2): 1-106, Münster

LOHMANN, H. H. (1962): Zur Formenentwicklung von Salzauslaugungstrichtern. – Notizbl. hess. Landesamt f. Bodenforsch. **90**: 319-326, Wiesbaden.

LOTZE, F. (1951): Die Grundwasserverhältnisse in den Naturschutzgebieten am Heiligen Meere. – Natur und Heimat **11** (Beiheft): 97-99.

–,– (1956): Zur Geologie der Senkungszone des Heiligen Meeres (Kreis Tecklenburg). – Abh. Landesmus. f. Naturkde. **18** (1): 36 S., Münster.

MATTHES, G. (1966): Die Herkunft der Sulfat-Ionen im Grundwasser. – Abh. hess. Landesamtes f. Bodenforsch. **35**: 1-85.

–,– (1990): Die Beschaffenheit des Grundwassers. – in: Matthes, G.: Lehrbuch der Hydrogeologie Band 2, 2. Aufl., Borntraeger Berlin Stuttgart, 498 S.

NEHRKORN, A., Müller, L., Pollkötter, B. (1973): Langfristige chemische Veränderungen des Grundwassers einiger Wasserwerke am Münsterländer Kiessandrücken. – Z. Deutsch. Geol. Ges. **124** (Teil 2):635-643.

NOWACK, R. (1980): Abnormitäten einiger Grasarten am Rande der Landstraße L 504 im Bereich des NSG „Heiliges Meer". – Natur und Heimat **40** (3): 90-91.

OBERMANN, P. (1982): Hydrochemische/hydromechanische Untersuchungen zum Stoffgehalt von Grundwasser bei landwirtschaftlicher Nutzung. – Bes. Mitt. Deutsch Gewässerkundl. Jb. **42** (2. Aufl.): 1-217. Herausgeb.: Vereinigung Deutscher Gewässerschutz e.V. Bonn.

POELMANN, H. (1934): Geologisches vom Naturschutzgebiet „Heiliges Meer". – Natur und Heimat **1** (Sonderheft: Führer durch das Naturschutzgebiet Heiliges Meer): 6-10.

POTT, R. (1983): Die Vegetationsabfolgen unterschiedlicher Gewässertypen Nordwestdeutschlands und ihre Abhängigkeit vom Nährstoffgehalt des Wassers. – Phytocoenologia **11** (3): 407-430.

RUNGE, F. (1957): Die Flora des Naturschutzgebietes „Heiliges Meer" bei Hopsten und ihre Änderungen in den letzten 60 Jahre. – Natur und Heimat **17** (3): 74-96.

–,– (1967): Weitere Änderungen der Flora des Naturschutzgebietes „Heiliges Meer" bei Hopsten. – Natur und Heimat **27** (3): 129-135.

–,– (1978): Änderungen in den Naturschutzgebieten Westfalens und des Regierungsbezirkes Osnabrück in den letzten 20 Jahren. – Mitt. Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung NRW **3** (10): 271-276.

–,– (1991): Die Pflanzengesellschaften des Naturschutzgebietes „Heiliges Meer" und ihre Änderungen in den letzten 90 Jahren. – Natur und Heimat **51** (Beiheft): 1-89.

SALZWEDEL, J. (1992): Ausweisung von Wasserschutzgebieten und verwaltungsgerichtliche Nachprüfung – Zur Funktion besonderer Schutzanordnungen vor dem Hintergrund verschärfter flächendeckender Anforderungen an den Gewässerschutz. – Zeitschrift für Wasserrecht **1992** (3): 397-468.

SCHROEDER, F. G. (1956): Zur Vegetationsgeschichte des Heiligen Meeres bei Hopsten (Westf.). – Abh. Landesmus. f. Naturkde. **18** (2): 3-38, Münster.

SCHUSTER, A. (1971): Die westliche und südwestliche Umrandung der Ibbenbürener Karbonscholle. – Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf. **18**: 293-352, Krefeld.

THIERMANN, A. (1975): Zur Geologie der Erdfälle des „Heiligen Feldes" im Tecklenburger Land/ Westfalen. – Mitt. Geol.-Paläont. Instit. Univ. Hamburg **44**: 517-530.

TIETZE, O. (1914): Der Erdfall vom 14. April 1913 in der Gemeinde Hopsten (Kreis Tecklenburg). – Jahrb. d. Preuß. Geol. Landesanstalt **34** (1): 648-657, Berlin.

WEGNER, P. (1913): Der Erdfall von Hopsten. – Naturwiss. Wochenschrift, **12** (21): 332-333, G. Fischer, Jena.

Anschrift des Verfassers: Dr. Jürgen Pust
Westfälisches Museum für Naturkunde
Außenstelle „Heiliges Meer"
Heiliges Meer 1
4534 Recke

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Abhandlungen aus dem Westfälischen Provinzial-Museum für Naturkunde

Jahr/Year: 1993

Band/Volume: 55_2_1993

Autor(en)/Author(s): Pust Jürgen

Artikel/Article: Erste Ergebnisse zur Untersuchung der Grundwasserverhältnisse im Naturschutzgebiet „Heiliges Meer" (Kreis Steinfurt) 5-80