

Abhandlungen
aus dem
Westfälischen Museum
für Naturkunde

58. Jahrgang · 1996 · Heft 2

Richard Pott, Jürgen Pust und Klaus Hofmann

Trophiedifferenzierungen von Stillgewässern im
Naturschutzgebiet „Heiliges Meer“ und deren
Auswirkungen auf die Vegetation
- erste Ergebnisse

Westfälisches Museum für Naturkunde Münster



Landschaftsverband
Westfalen-Lippe

Hinweise für Autoren

In der Zeitschrift **Abhandlungen aus dem Westfälischen Museum für Naturkunde** werden naturwissenschaftliche Beiträge veröffentlicht, die den Raum Westfalen betreffen.

Druckfertige Manuskripte sind an die Schriftleitung zu senden.

Aufbau und Form des Manuskriptes

1. Das Manuskript soll folgenden Aufbau haben: Überschrift, darunter Name (ausgeschrieben) und Wohnort des Autors, Inhaltsverzeichnis, kurze Zusammenfassung in deutscher Sprache, klar gegliederter Hauptteil, Literaturverzeichnis (Autoren alphabetisch geordnet), Anschrift des Verfassers.
2. Manuskriptblätter einseitig und weitzeilig in Maschinenschrift.
3. Die Literaturzitate sollen enthalten: Autor, Erscheinungsjahr, Titel der Arbeit, Name der Zeitschrift in den üblichen Kürzeln, Band, Seiten; bei Büchern sind Verlag und Erscheinungsort anzugeben.

Beispiele:

KRAMER H. (1962): Zum Vorkommen des Fischreihers in der Bundesrepublik Deutschland. – J. Orn. **103**: 401-417.

RUNGE, F. (19B2): Die Naturschutzgebiete Westfalens und des früheren Regierungsbezirks Osnabrück. 4. Aufl. – Aschendorff, Münster. Bei mehreren Autoren sind die Namen wie folgt zu nennen:

MEYER, H., A. HUBER & F. BAUER (1984): . . .

4. Schrifttypen im Text:

einfach unterstrichen = **Fettdruck**

unterstrichelt oder gesperrt = **Sperrdruck**

wissenschaftliche Art- und Gattungsnamen sowie Namen von Pflanzengesellschaften untersträngeln = *Kursivdruck*

Autorennamen in GROSSBUCHSTABEN / KAPITÄLCHEN

Abschnitte, die in Kleindruck gebracht werden können, an linken Rand mit „petit“ kennzeichnen.

Abbildungsvorlagen

5. Die Abbildungsvorlagen (Fotos, Zeichnungen, grafische Darstellungen) müssen bei Verkleinerung auf Satzspiegelgröße (12,6 x 19,7 cm) gut lesbar sein. Größere Abbildungen (z. B. Vegetationskarten) können nur in Ausnahmefällen nach Rücksprache mit der Schriftleitung gedruckt werden.
6. Fotos sind in schwarzweißen Hochglanzabzügen vorzulegen.
7. Die Beschriftung der Abbildungsvorlagen muß in Anreibebuchstaben auf dem Original oder sonst auf einem transparenten Deckblatt erfolgen.
8. Die Unterschriften zu den Abbildungen sind nach Nummern geordnet (Abb. 1, Abb. 2 . . .) auf einem separaten Blatt beizufügen.

Korrekturen

9. Korrekturfahnen werden dem Autor einmalig zugestellt. Korrekturen gegen das Manuskript gehen auf Rechnung des Autors.

Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren allein verantwortlich.

Jeder/s Autor/Autorenteam erhält 50 Freixemplare/Sonderdrucke seiner Arbeit. Liegen die Herstellungskosten (incl. Mehrwertsteuer) pro Exemplar über 30,- DM, so verringert sich die Anzahl der Freixemplare auf 30 Stück, bei Produktionskosten über 50,- DM auf 20 Stück.

Schriftleitung Abhandlungen:

Dr. Brunhild Gries

Westfälisches Museum für Naturkunde

Sentruper Straße 285

48161 Münster

Abhandlungen
aus dem
Westfälischen Museum
für Naturkunde

58. Jahrgang · 1996 · Heft 2

Richard Pott, Jürgen Pust und Klaus Hofmann

Trophiedifferenzierungen von Stillgewässern im
Naturschutzgebiet „Heiliges Meer“ und deren
Auswirkungen auf die Vegetation
- erste Ergebnisse

Westfälisches Museum für Naturkunde
Landschaftsverband Westfalen-Lippe
Münster 1996

Impressum

Abhandlungen aus dem Westfälischen Museum für Naturkunde

Herausgeber: Dr. Alfred Hendricks
Landschaftsverband Westfalen-Lippe
Westfälisches Museum für Naturkunde
Sentruper Str. 285, 48161 Münster
Telefon: 02 51/ 5 91-05, Telefax: 02 51/ 5 91 60 98

Druck: Druckhaus Cramer, Greven

Schriftleitung: Dr. Brunhild Gries

© 1996 Landschaftsverband Westfalen-Lippe

ISSN 0175-3495

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form ohne schriftliche Genehmigung des Landschaftsverbandes Westfalen-Lippe reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Trophiedifferenzierungen von Stillgewässern im Naturschutzgebiet „Heiliges Meer“ und deren Auswirkungen auf die Vegetation – erste Ergebnisse.

Richard Pott, Jürgen Pust und Klaus Hofmann, Hannover

Wir danken der Volkswagen-Stiftung, Hannover, für die Unterstützung mit Personal- und Sachmitteln sowie der Nordrhein-Westfalen-Stiftung für die Bereitstellung mehrerer Klimameßstationen.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Trophiebedingungen der größeren Stillgewässer	10
3. Heideweiher und Heidekolke	28
4. Einfluß allochthoner Nährstoffe auf die Trophie der Seen	44
5. Die Grundwasserverhältnisse und ihre Wechselbeziehungen zu den Seen	47
6. Milieustabilisierende Puffersysteme und Nährstoffhaushalt	55
7. Zusammenfassung	57
8. Literatur	59

1. Einleitung

Überall ist die Konzentration von Nitrat im Grund- und Oberflächenwasser stark angestiegen, besonders in Gebieten, in denen intensive Landwirtschaft betrieben wird (NEHRKORN et al. 1973). Im Grundwasser kann in diesen Gebieten eine Zunahme von Nitrat zwischen 0,5-3 mg/l pro Jahr festgestellt werden. Der zunehmende Einsatz von Mineraldünger, dichte Viehbestände auf Weideflächen und das Ausbringen von Gülle sind die wesentlichen Ursachen. Auch im Niederschlag werden zunehmende Stickstoffkonzentrationen gemessen, die aus Stickoxiden von Autoabgasen und aus Ammoniak von Massentierhaltungen resultieren. Der Maisanbau auf sandigen Böden ist auf erhöhte Düngemiteleinträge angewiesen und führt zu besonders hohen Nährstoffeinträgen in das Grundwasser (Stickstoff- und Phosphorverbindungen, Erdalkali- und Alkaliionen). Der luftbürtige Stickstoffeintrag in Oberflächengewässer weist selbst in nichtlandwirtschaftlich genutzten Gebieten bereits hohe Werte auf und liegt im Durchschnitt bei 20 kgN pro ha Wasseroberfläche u. Jahr. Im landwirtschaftlich genutzten Raum der Nordwestdeutschen Tiefebene, insbesondere im deutsch-niederländischen Grenzbereich, betragen die luftbürtigen Stickstoffdepositionen derzeit etwa 50-60 kgN pro Hektar und Jahr und können lokal auf 60-80 kgN pro Hektar und Jahr ansteigen (vgl. u.a. ELLENBERG 1989, MILDE 1993, SCHÖNBORN 1995).

Das Naturschutzgebiet „Heiliges Meer“ liegt inmitten einer solchen Agrarlandschaft mit vornehmlichem Maisanbau, der in den letzten Jahrzehnten innerhalb der Nordwestdeutschen Tiefebene stark zugenommen hat und das Bild dieser Agrarlandschaft charakteri-

siert. Diese Bewirtschaftungsform steht im engen Zusammenhang mit Massentierhaltung und Gülleverieselung sowie mit den schon beschriebenen Belastungen im Grundwasser, z.B. mit bis über 200 mg/l NO_3^- im Norden des NSG „Heiliges Meer“ (PUST 1993). Neben direkten Nährstoffeinträgen in das Grundwasser und der Verfrachtung dieser Stoffe über den Grundwasserpfad in Oberflächengewässer kommt auch hier dem Luftpfad als Verursacher von Eutrophierungen eine bedeutende Rolle zu. Das Überangebot an Stickstoff aus der landwirtschaftlichen Düngung und der Luftdeposition beträgt in der Regel mehr als das Doppelte als die Pflanzen aufnehmen können. Der überwiegende Rest gelangt über den Boden vornehmlich als Nitrat zum Grundwasser. Innerhalb der Bodenhorizonte und im Grundwasser kommt es zu Umwandlungen der Stickstoffspezies unter Beteiligung verschiedenster anderer Wasserinhaltsstoffe; bei der mikrobiellen Nitratreduktion nimmt der Schwefel eine besondere Stellung ein (vgl. BÖTTCHER et. al. 1985, 1992; TERLUTTER 1995).

Das NSG „Heiliges Meer“ steht demnach nicht isoliert da, was Eutrophierungserscheinungen innerhalb aquatischer Ökosysteme durch allochthone Nährstoffeinträge im Zusammenhang mit landwirtschaftlichen Nutzungsformen angeht. Dieses Gebiet mit seinen vielfältig strukturierten Lebensräumen aus Eichenbirkenwald-, Bruchwald- und Heideflächen sowie verschiedensten Stillgewässern unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Größe ist ein typisches, weitgehend natürliches Landschaftselement der Nordwestdeutschen Tiefebene. Für die Untersuchung von anthropogenen Einflüssen, insbesondere von Eutrophierungsphänomenen, ist hier ein besonders geeignetes Referenzgebiet gegeben. Ein neues interdisziplinäres Forschungsprojekt, das sich aus den Fachrichtungen Geobotanik, Geologie, Bioökologie und Landschaftspflege zusammensetzt, wurde Anfang 1996 begonnen und erhält finanzielle und personelle Unterstützung von der Volkswagen-Stiftung. Ziel unserer Untersuchungen soll sein, die Stickstoff-Belastungen im Grundwasser sowie Schadstoffeinträge über feuchte und trockene Deposition und deren Folgen für aquatische, semiaquatische und terrestrische Ökosysteme in pleistozänen Sandlandschaften modellhaft am Beispiel des NSG „Heiliges Meer“ zu erfassen. Dabei ist beabsichtigt, methodische Fragen zur Erfassung und Begegnung von Umweltbelastung durch Stickstoff im Zusammenwirken mit anderen Stoffen (z.B. Alkali- und Erdalkalitionen, Phosphor- und Schwefelverbindungen) zu klären. Die Stickstoffeutrophierung und der N-Transport in Sandböden bei unterschiedlicher landwirtschaftlicher Nutzung und deren Auswirkungen auf natürliche und anthropogene Ökosysteme sollen in einer ersten Phase untersucht werden. Seit 1995 werden mit Hilfe von Klimameßstationen der Nordrhein-Westfalen-Stiftung klimatische Daten erfaßt und luftbürtige Stickstoff-, Phosphat-, Erdalkali- und Alkaliioneneinträge im NSG „Heiliges Meer“ gemessen, über deren Ergebnisse an späterer Stelle berichtet werden soll.

Parallel dazu soll ein landschaftspflegerisches Konzept für die räumliche Zonierung der Kerngebiete, der Pufferflächen und der angrenzenden Kulturlandschaft erarbeitet werden, so wie es auch JEDICKE (1990) und KAISER (1994) propagieren. Für die unterschiedlichen Flächen des Naturschutzgebietes sollen danach Pflege- und Entwicklungsmaßnahmen mit dem Hauptziel konzipiert werden, die Belastung der Kernbereiche durch Stoffeinträge zu verringern. Flankierend soll mit einem Konzept zur Besucherlenkung die Chance genutzt werden, Beeinträchtigungen der empfindlichen Bereiche durch zunehmenden Besucherdruck zu minimieren, ohne die Zugänglichkeit des Gebietes stärker als notwendig einzuschränken. Die frühzeitige Umsetzung landschaftspflegerischer Maßnahmen schafft dabei über eine Verzahnung mit den gewässerökologischen Untersuchungen die Möglichkeit, in einer sich anschließenden Projektphase ihre Effizienz modellhaft zu prüfen, zu optimieren und unerwünschten Entwicklungen entgegenzusteuern (vgl. auch MAHN et al. 1989, WÖBSE 1991).

Das Forschungsvorhaben des Institutes für Geobotanik (Leitung und Gesamtkoordination des Projektes sowie gewässer- und vegetationsökologische Erfassungen, Prof. Dr. Richard

Pott, Dr. Jürgen Pust, Hannover) erfolgt in Zusammenarbeit mit dem Institut für Landschaftspflege und Naturschutz der Universität Hannover (Entwicklung und Umsetzung landespflegerischer Konzepte, Prof. Dr. Ingo Kowarik, Hannover), dem Institut für Ökologie der Universität Osnabrück (u.a. gewässerökologische Grundlagenuntersuchungen, Prof. Dr. Anselm Kratochwil, Dr. Dominique Remy, Dipl.-Biol. Uwe Menzel, Osnabrück), dem Geologisch-Paläontologischen Institut und Museum der Universität Münster (Untersuchungen zur Grundwasserhydraulik und zur Untergrundbeschaffenheit, Prof. Dr. Eckehard Löhner, Münster, Frau Dipl.-Geol. Mareike Weinert, Nottuln) und mit dem Landschaftsverband Westfalen-Lippe (u.a. Gebietseigentümer, planerische Konzepte, Raumordnungskonzepte, Dr. Alfred Hendricks, Münster).

Der Landschaftsverband Westfalen-Lippe besitzt als Außenstelle des Westfälischen Museums für Naturkunde, Münster (Direktor Dipl. Geol. Dr. rer. nat. Alfred Hendricks) eine Biologische Station im NSG „Heiliges Meer“ (Leiter Heinz-Otto Rehage, Recke) mit einem sich über das gesamte Gebiet erstreckenden Grundwassermeßstellennetz und mehreren Klimameßstationen, so daß besonders günstige Voraussetzungen für die Gewinnung von Untersuchungsmaterial sowie für die analytischen Arbeiten vor Ort und im Labor gegeben sind (vgl. Abb. 1-3).

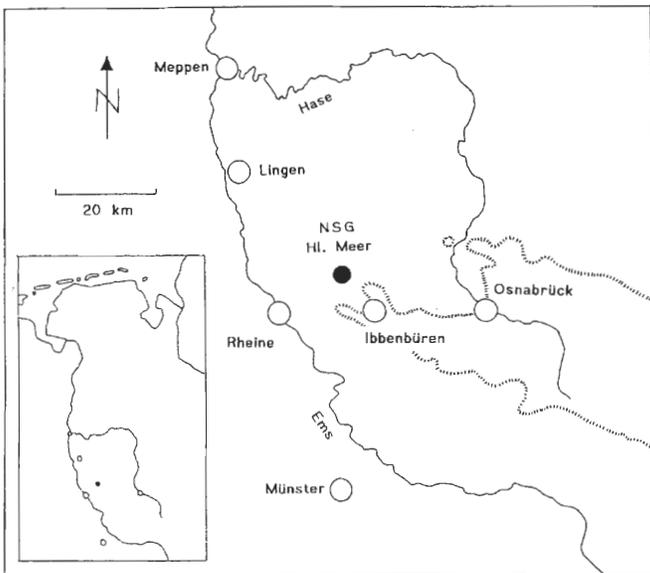


Abb. 1: Lage des Naturschutzgebietes „Heiliges Meer“

Der Landschaftsverband Westfalen-Lippe hat bereits vor wenigen Jahren Pilotuntersuchungen im Oberflächenwasser und im Grundwasser des Naturschutzgebietes „Heiliges Meer“ durchführen lassen, um erstes Datenmaterial über den Gewässerzustand zu erhalten. Im Rahmen dieser ersten Untersuchungsphase wurde das oben erwähnte Grundwassermeßstellennetz, bestehend aus derzeit 23 Brunnen, errichtet und das Grundwasser zusammen mit ausgewählten Oberflächengewässern auf Stoffeinträge von außen untersucht. Die Brunnen wurden hierzu z.T. an die Peripherie des Gebietes, z.T. aber auch im Kerngebiet positioniert (Abb. 4), um vordringlich zu Kenntnissen über die Nährstofffracht des Grundwassers im unmittelbaren Bereich der landwirtschaftlichen Nutzflächen zu gelangen. Des weiteren wollen wir auch Kenntnisse über die Verteilung dieser Nährstoffe nach Eintritt des

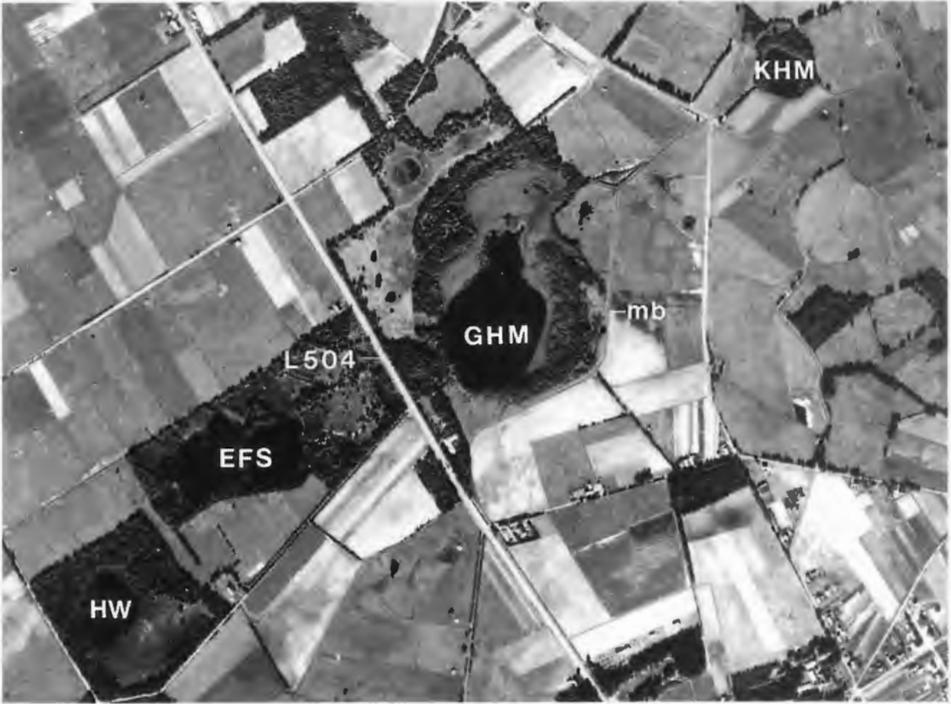


Abb. 2: Luftbild vom Naturschutzgebiet „Heiliges Meer“ mit den größeren Stillgewässern „Heideweiher“ (HW), „Erdfallsee“ (EFS), „Großes Heiliges Meer“ (GHM) und „Kleines Heiliges Meer“ (KHM). Das Gebiet wird von landwirtschaftlichen Nutzflächen umgeben, die heute vorwiegend als Mais- und Getreideäcker im Süden und im Norden direkt an das Naturschutzgebiet angrenzen. Eine zwischen Ibbenbüren und Hopsten verlaufende Landstraße (L 504) trennt das nichtbewirtschaftete Kerngebiet in den Erdfallsee-Heideweiher-Bereich und den Bereich des Großen Heiligen Meeres, an dessen Südostgrenze ein Feldbach, die Meerbecke (mb) über Entwässerungsgräben die Vorflut des Gebietes bildet.

Grundwassers in die gegenüber Nährstoffeinträgen sensiblen dystrophen und z.T. noch oligotrophen Bereiche des Naturschutzgebietes erzielen.

Nitratkonzentrationen von mehr als 200 mg/l im Grundwasser des Naturschutzgebietes in unmittelbarer Nähe zu Maisäckern, die in breiter Front im Süden und lokal auch im Norden an das Naturschutzgebiet angrenzen und dessen Nährstofffrachten heute z.T. bis unmittelbar an die Uferregionen der nährstoffarmen Stillgewässer heranreichen, bestätigen unsere Befürchtung, daß die gegenüber Nährstoffeinträgen empfindlichen Elemente des Naturschutzgebietes durch die intensive Landwirtschaft des Umfeldes heute ernsthaft in ihrem Bestand gefährdet sind. Neben der Gefährdung durch Nährstoffe aus der Landwirtschaft gesellen sich weitere Gefahren für die aquatischen Lebensräume des Naturschutzgebietes aus salz- und schwermetallbelastetem Grundwasser, das zum einen aus Streusalzeinträgen von der Landstraße L 504 stammt, die das Gebiet in nordsüdlicher Richtung zentral durchschneidet (vgl. Abb. 2), zum anderen, daß Schadstoffe, vor allem Schwermetalle und Sulfat aus im Süden des Naturschutzgebietes vorkommenden Tagebauanlagen in einen Feldbach, in die Meerbecke (vgl. Abb. 2, 3 u. 5), eingeleitet werden und an der Ostgrenze des Naturschutzgebietes in das Grundwasser gelangen. Seit Ende der 80er Jahre hat die Meerbecke

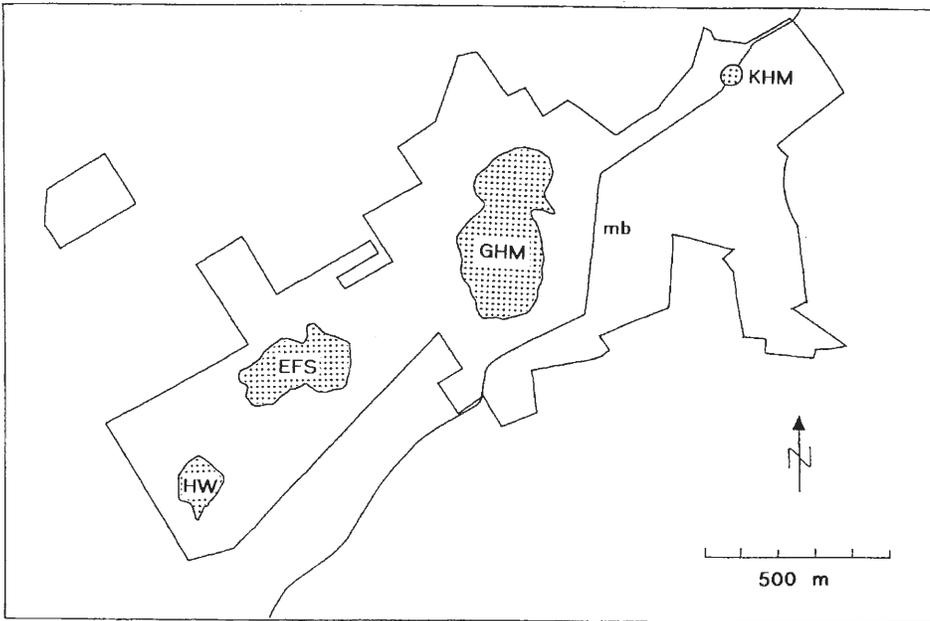


Abb. 3: Gebietsgrenzen des NSG „Heiliges Meer“ mit den Gewässern „Heideweiher“, „Erdfallsee“, „Großes Heiliges Meer“, „Kleines Heiliges Meer“ und „Meerbecke“.

eine Zunahme der Leitfähigkeit von ca. 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf zeitweise bis zu 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ erfahren (PUST 1993).

Überraschend ist, daß im Grundwasser des Naturschutzgebietes die physikochemischen Parameter sehr kleinräumig differenziert sind und daß besonders die REDOX-Bedingungen eine Abhängigkeit von der Vegetation aufweisen. So können z.B. sauerstoffreiche Grundwasserbezirke mit hohen Nitratgehalten von Acker- und Weideflächen scharf von sauerstoffarmen bis -freien Grundwasserbezirken unterhalb von Wald abgegrenzt werden, innerhalb derer der Stickstoff weitgehend reduziert ist. Möglicherweise hängt es vom Vegetationstyp bzw. von der Art der Vegetation ab, ob und wie reduzierendes Grundwasser auftritt, und einigen Vegetationstypen (vor allem Waldgesellschaften) ist es zu verdanken, daß ein ungehinderter Nitratreintrag über das Grundwasser aus der Landwirtschaft in die Stillgewässer des Naturschutzgebietes bis jetzt weitgehend verhindert wurde und die anthropogene Eutrophierung nicht in dem Maße abläuft, wie zunächst befürchtet. An dieser Stelle muß aber festgestellt werden, daß dieser Korridor aus reduzierendem Grundwasser besonders am Erdfallsee größere Lücken aufweist. Obwohl nahezu nitratfrei, enthält das reduzierte Grundwasser sowohl am Großen Heiligen Meer als auch am Erdfallsee z.T. stark erhöhte Ammonium- und Phosphatgehalte von mehreren mg/l , so daß es zweifelhaft erscheint, daß allein durch die Ausdehnung jener für reduzierte Grundwasserbereiche günstigen Vegetationskomplexe eine grundwasservermittelte Eutrophierung der aquatischen Lebensräume des Naturschutzgebietes „Heiliges Meer“ verhindert werden kann. Nahezu oligotrophe Grundwasserbereiche befinden sich jedoch unter im zentralen Bereich des Naturschutzgebietes gelegenen Heideflächen mit Nitratgehalten von wenigen mg/l und äußerst geringen Ammonium- und Phosphatgehalten. Möglicherweise lassen sich aus einer sinnvollen räumlichen Anordnung verschiedener Vegetationskomplexe (z.B. Heide- und Waldbereiche) beide Eutrophierungsparameter (Nitrat und Phosphat zusammen mit Ammonium) minimieren, indem ein kleinräumiger Wechsel von reduzierenden und oxidieren-

Brunnenaufbau

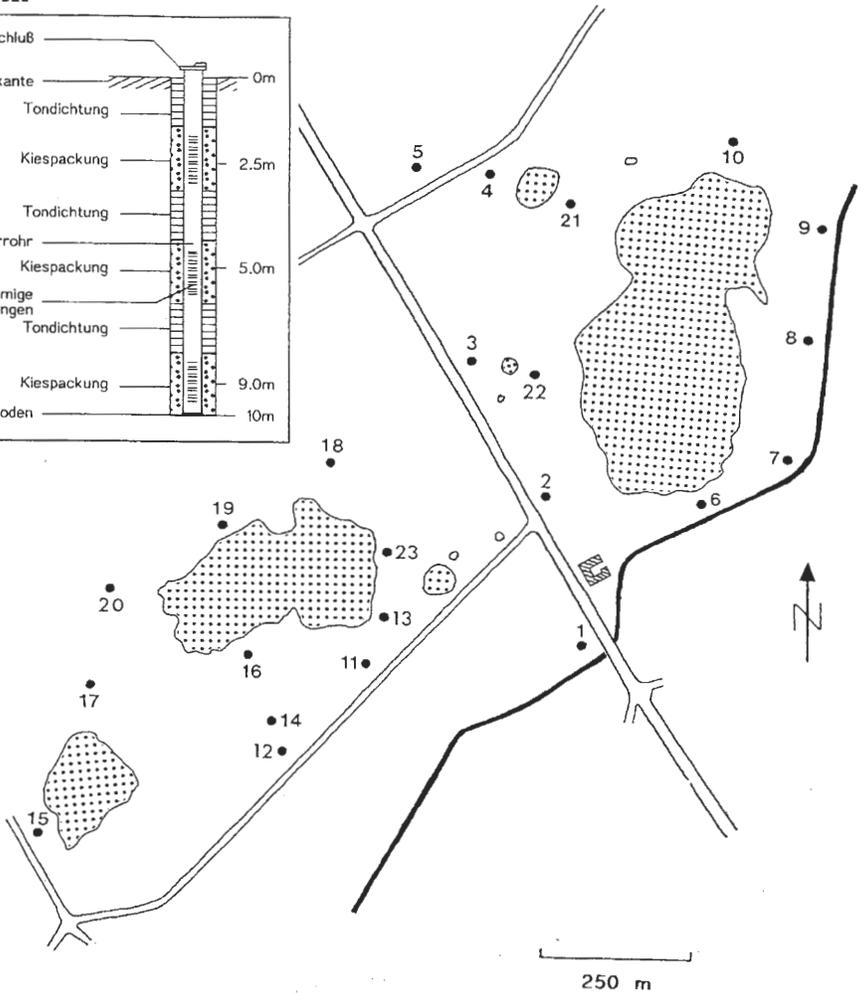
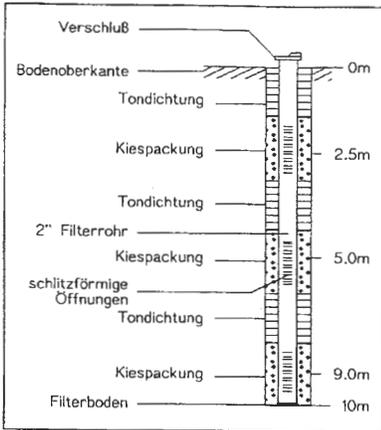


Abb. 4: Das Grundwassermeßstellennetz im Naturschutzgebiet „Heiliges Meer“, dargestellt sind die Lage der Brunnen (von 1 bis 23) und ihre Konstruktion.

den Milieubedingungen im Grundwasser die Festlegung von Phosphat im oxidierenden Milieu begünstigt und im reduzierenden Milieu den Nitratabbau fördert, der auch die luftbürtige Stickstofffracht erfäßt.

Die Ergebnisse von PUST (1993) dienen uns als Basis für das Forschungsprojekt und geben uns Hinweise auf erfolgversprechende zukünftige Untersuchungen zur Klärung der oben angeschnittenen Fragen. Außerdem haben uns die ersten Ergebnisse dazu veranlaßt, von 1993 bis zum Start des jetzigen Forschungsvorhabens, weitere ergänzende Untersuchungen zum Biotop- und Ökosystemschutz der pleistozänen Sandlandschaften und ihrer Gewässer im Rahmen von Diplom- und Staatsexamensarbeiten im Naturschutzgebiet „Heiliges Meer“ durchzuführen, von deren Ergebnissen an dieser Stelle berichtet werden soll. In diesem Rahmen wurden untersucht: Der Heideweiher von 1993-1994 von HASSE (1994), ausgewählte Kleingewässer aus den Heidekolken von HOFMANN (1995). Weitere Untersuchungen zum Großen Heiligen Meer, zum Erdfallsee und zum Grundwasser werden folgen.

Es wurden sowohl das Pelagial als auch das Litoral der größeren Stillgewässer (Großes Heiliges Meer und Erdfallsee) in monatlichen Abständen physikochemisch analysiert. Um die räumliche Verteilung der im Wasser gelösten Stoffe und deren zeitlich auftretende Schichtung zu erfassen, wurden jeweils Vertikalprofile der Stoffkonzentrationen und der Temperaturen an am Seegrund verankerten Bojen erstellt. Die Bojenfelder (vgl. Abb. 6) werden aus einer zentralen, über der tiefsten See-Stelle verankerten Boje und aus 4 am Nord-, Süd-, Ost- und Westufer im tiefen Seeteil positionierten Bojen gebildet. Parallel hierzu wurden aus dem flachen Teil der Seen (Litoralzone) ebenfalls Wasserproben untersucht. Mit Hilfe der beiden Bojenfelder lassen sich je nach Wassertiefe am Großen Heiligen Meer und am Erdfallsee Vertikalprofile von 6 bis 10m Gesamtausdehnung erstellen.



Abb. 5: Die Meerbecke am Ostrand des Naturschutzgebietes. Der Bach erhält über Drainageanlagen sein Wasser von den landwirtschaftlichen Nutzflächen und von Tagebauanlagen aus einem südlich des Naturschutzgebietes gelegenen Industriegebiet. Direkt sichtbar sind die Ockerbildungen, die die Gewässersohle und die submersen Vegetationsteile der Pflanzen bedecken. Sie gehen aus den Schwermetallfrachten, vorwiegend Eisen, Mangan und Zink, hervor.

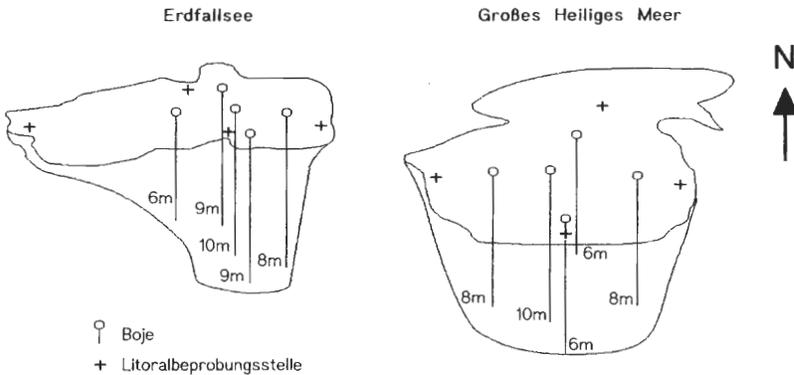


Abb. 6: Lage der Bojen und der Litoralbeprobungsstellen am Erdfallsee und am Großen Heiligen Meer. Unterhalb der Bojen ist jeweils die Wassertiefe in Metern angegeben.

2. Die Trophiebedingungen der größeren Stillgewässer

Pflanzen benötigen als wichtige Nährstoffe in größeren Mengen Stickstoff- und Phosphorverbindungen, die, wenn sie in nicht ausreichendem Maße zur Verfügung stehen, das Pflanzenwachstum limitieren. Liegen die Nährstoffe im Überschuß vor, kommt es zu einer Eutrophierung des Standortes; die Konzentrationen von Nitrat, Ammonium und Phosphat bilden daher klassische Eutrophierungsparameter nährstoffarmer Standorte. Diese werden von Natur aus nur von Pflanzenarten besiedelt, welche bei einem geringen Nährstoffangebot wachsen können. Solche oligotraphenten Pflanzenarten weisen nur eine geringe Biomassenproduktion pro Zeiteinheit auf und sind im Fall einer Standorteutrophierung der Konkurrenz schnell wachsender eutraphenter Arten unterlegen. Standorteutrophierungen, wie sie heute besonders durch die intensive Landwirtschaft hervorgerufen werden, gefährden daher die natürlichen Pflanzenbestände oligotropher Standorte. Neben den klassischen Eutrophierungsparametern wie Stickstoff und Phosphat sind innerhalb der pleistozänen Sandlandschaften weitere mineralische Nährstoffe nur gering verfügbar, d.h. für viele Pflanzenarten wachstumslimitierend; hierzu zählen das Kalium, das Kalzium und das Magnesium. Auch sie müssen innerhalb dieser Gebiete zu den Eutrophierungsparametern gerechnet werden.

Während die Anteile an Alkali- und Erdalkaliionen im Jahresgang nur wenig schwanken, können die klassischen Eutrophierungsparameter während der Vegetationsperiode durch die Phytomasse je nach Trophie Veränderungen erfahren. Besonders die eutrophen Seen unterliegen bei uns nach Ende der Frühjahrsholomixis einer deutlichen Abnahme des Stickstoffangebotes (vgl. Abb. 8), das nicht nur aufgrund erhöhter Nährstoffaufnahme durch die Phytomasse, sondern auch durch Reduktion von Nitrat zum molekularen Stickstoff im sauerstofffreien Hypolimnion abnimmt. Oligotrophen Seen fehlt aufgrund des Vorhandenseins molekularen Sauerstoffs im Hypolimnion diese Form des Verlustes pflanzenverfügbaren Stickstoffs durch Reduktion; der organische Bestandsabfall wird hier vollständig oxidativ mineralisiert. Den unterschiedlichen Zeitspannen eines ausreichenden Nährstoffangebotes zwischen oligotrophen und eutrophen Stillgewässern entsprechend sind unterschiedliche Entwicklungs- und Wachstumsstrategien der Vegetation von Vorteil: Langsam wachsende, nur gering regenerationsfähige Formen gedeihen innerhalb oligotropher Seen und schnell wachsende, stark regenerationsfähige Formen finden sich bei eutrophen Seen.

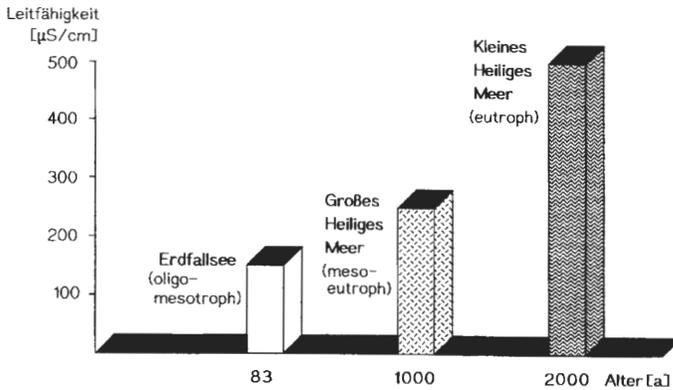


Abb. 7: Abhängigkeit der Trophie und der Leitfähigkeit des Wassers vom Alter am Beispiel von Erdfallsee, Großem Heiligem Meer und Kleinem Heiligem Meer.

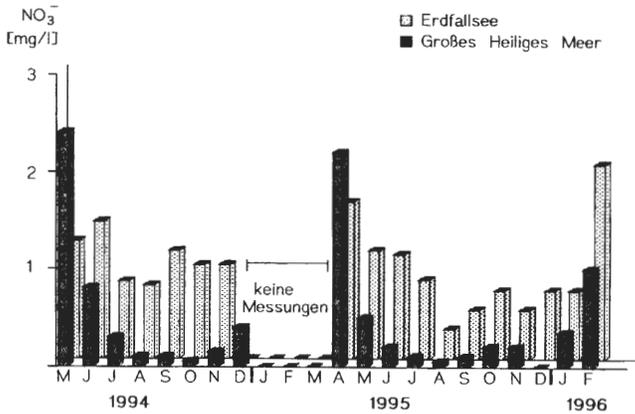


Abb. 8: Jahresperiodische Schwankungen des Nitratgehaltes im Epilimnion des Großen Heiligen Meeres und des Erdfallsees auf Seemitte.

Natürliche Stillgewässer pleistozäner Sandlandschaften weisen im Zuge einer natürlicherweise nur langsam voranschreitenden Nährstoffzunahme je nach Alter deutliche Unterschiede in der Trophie auf. Mit zunehmendem Alter ist im allgemeinen eine Abfolge von oligotrophen bis zu eutrophen Zuständen mit mesotrophen Übergangsformen zu beobachten, die sich in Gewässern pleistozäner Sandlandschaften allgemein auch in einer Zunahme der Leitfähigkeit äußert, die hier auch als Summenparameter für die Trophie herangezogen werden kann (vgl. Abb. 7). Davon ist die Artenzusammensetzung der Ufervegetation abhängig (Porr 1981, 1983). Im NSG „Heiliges Meer“ sind diese Unterschiede zwischen dem weitgehend eutrophen Großen Heiligen Meer und dem in Teilbereichen noch oligotrophen Erdfallsee besonders deutlich.

Innerhalb der oligotrophen Erdfallsee-Abschnitte auf Protopedon am Nord- und Nordostufer (Abb. 9 u. 10) befinden sich *Littorella*-Rasen, die auf flachen Sandbänken z.T. ausgedehnte Bestände bilden (Tab. 1), an die sich landeinwärts Kleinseggen Sümpfe mit *Eleo-*



Abb. 9: Erdeinbruch am 14.04.1913 (heute „Erdfallsee“). Unter Verdrängung des Grundwassers und Anhebung des Grundwasserspiegels erfolgte die Absenkung der Erdoberfläche langsam und gleichmäßig. Nach TIETZE (1914) erfolgte der ca. 10m tiefe und etwas über 100m im Durchmesser betragende Einbruch gegen 18-19⁰⁰ Uhr ohne fühlbare Erschütterung oder Geräusch. Um 19⁰⁰ Uhr trat in der näheren Umgebung des Erdalles an mehreren Punkten der Erdoberfläche Wasser aus, eine Erscheinung, die bald wieder verschwand (THIERMANN 1975). Nach TIETZE (1914) füllte sich der Erdfall nach dem Einbruch schnell mit Wasser; es war dies aus der Böschung austretendes Grundwasser und auch Wasser aus einem anschließenden Tümpel, das den Erdfall schließlich bis nahe an die allgemeine Oberkante auffüllte. Dabei rutschten die Böschungen ab und wurden insgesamt flacher (THIERMANN 1975).

charis multicaulis (Tab. 2) und Gehölzformationen mit *Myrica gale* anschließen (Tab. 3, Abb. 11 u. 12). In der *Littorella uniflora*-Gesellschaft gibt es sporadisch vereinzelte Lobelien-Vorkommen, die aufgrund ihrer Seltenheit in Westfalen eine Besonderheit darstellen (POTT 1982). Beide Arten, *Littorella uniflora* und *Lobelia dortmanna*, zeigen Nährstoffarmut des Standortes an und verdeutlichen mit ihrem niedrigwüchsigen, sukkulenten Habitus die extremen Standortbedingungen (vgl. C3- und CAM-Metabolismus bei wechselndem Wasserstand, s. POTT 1995, 1996). Eine Schwimmblattzone ist innerhalb der oligotrophen Bereiche des Erdfallsees nicht ausgebildet (Abb. 13). Große Teile der Ufervegetation sind durch ausgedehnte *Myrica gale*-Gebüsche beherrscht (Abb. 12).



Abb. 10: Heutiges Nordostufer des Erdfallsees mit ausgedehnten Protopedon-Bereichen. Diese oligotrophen Bereiche bilden den Standort für den Strandling *Littorella uniflora* und die Wasserspleiße *Lobelia dortmanna*.

Laufende Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8
Aufnahmefläche (m ²)	1	6	2	8	8	8	8	1
Krautschicht, Deckung	50	75	30	75	75	80	60	60
Moosschicht, Deckung	30	-	-	-	-	-	-	-
Artenzahl	6	4	3	2	5	3	5	3
Aufnahmemonat	9	9	9	9	9	9	9	9
Exposition	S	S	NE	NE	N	NW	NW	N
Wassertiefe (cm)	20	25	35	40	35	35	35	35
D.-Gesellschaft von <i>Littorella uniflora</i> <i>Lobelia dortmanna</i>	4	4	3	5	5	4	3	3
	.	.	+
KC-VC								
<i>Juncus bulbosus</i>	1	.	2	.	.	.	.	.
<i>Eleocharis multicaulis</i>	.	.	.	.	+	2	.	1
<i>Hypericum elodes</i>	3	+	.	.	.	.	+	.
Begleiter:								
<i>Ranunculus reptans</i>	+	.	.	.	.	.	.	.
<i>Fontinalis antipyretica</i>	2	.	.	.	.	.	.	.
<i>Sphagnum auriculatum</i>	2	.	.	.	.	.	.	.
<i>Phragmites communis</i>	.	+	.	1	+	.	1	1
<i>Carex lasiocarpa</i>	.	1	.	.	+	1	1	.
<i>Carex oederi</i>	.	.	.	.	+	.	.	.
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	.	.	.	.	.	.	+	.

Tab. 1: *Littorella uniflora*-Gesellschaft am Erdfallsee (EFS).

Tab. 2: *Eleocharitetum multicaulis* am Heideweiher (HW) und am Erdfallsee (EFS, HEFS).

Nr. 1-5: Subass. von *Sphagnum auriculatum* Dierßen 1972

Nr. 6-9: Subass. von *Hypericum elodes* Dierßen 1972

Nr. 10-16: *Hypericum elodes* - Dominanzgesellschaft.

Laufende Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Aufnahmefläche (m ²)	6	8	5	4	4	2	2	6	2	6	6	1	4	2	9	2
Krautschicht, Deckung(%)	70	50	60	50	60	40	40	45	75	85	85	90	90	85	90	70
Moosschicht, Deckung (%)	100	90	90	90	60	-	-	-	-	-	40	-	-	50	-	-
Artenzahl	5	5	7	5	7	5	4	3	3	5	6	5	7	4	7	5
Aufnahmemonat	7	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Gewässer	HW	HW	HW	HW	HW	EFS	EFS	EFS	EFS	EFS	EFS	EFS	EFS	EFS	EFS	EFS
Exposition	SW	S	S	NE	NE	E	S	SO	S	S	S	NE	NE	E	E	E
Wassertiefe (cm)	15	10	10	15	5	25	20	25	25	30	20	>35	25	35	25	25
AC																
<i>Eleocharis multicaulis</i>	3	3	2	3	3	3	3	3	1	2	1	1	1	.	.	.
D.-Subass. von <i>Sphagnum cuspidatum</i> fo. <i>plumosum</i>	3	4	3	2	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Sphagnum auriculatum</i> fo. <i>obesum</i>	3	3	3	4	4	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
D.-Subass. von <i>Hypericum elodes</i>	.	.	.	.	.	+	1	1	4	5	5	5	5	5	5	4
KC-VC																
<i>Juncus bulbosus</i>	2	2	3	+	+	+	.	.	.	1	+	1	1	.	1	.
<i>Liittorella uniflora</i>	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Begleiter																
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	1	2	2	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	+
<i>Eleocharis palustris</i>	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Molinia caerulea</i>	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Lysimachia vulgaris</i>	.	.	.	.	3	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+	+
<i>Myrica gale</i> , Klg.	.	.	.	.	2	.	+	.	.	.	+	+	.	.	.	.
<i>Carex oederi</i>	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Comarum palustre</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	1	1	.
<i>Carex lasiocarpa</i>	.	.	.	.	.	.	1	2	+	+	+	.	1	1	.	.
<i>Lycopus europaeus</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Fontinalis antipyretica</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	4	.
<i>Phragmites communis</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	+
<i>Glyceria fluitans</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.
Fernor in Nr. 12: <i>Sphagnum auriculatum</i> (3), in Nr. 14 u. 16: <i>Juncus effusus</i> (1) u. (2), In Nr. 17: <i>Equisetum fluviatile</i> (+).																

Tab. 3: *Myricetum galis* am Heideweiher (HW) und Erdfallsee (EFS).

Laufende Nummer	1	2	3	4	5	6
Aufnahmefläche (m ²)	10	10	20	20	50	50
Strauchschicht, Deckung (%)	90	60	85	80	90	80
Krautschicht, Deckung (%)	10	40	10	30	85	10
Moosschicht, Deckung (%)	30	90	15	50	-	10
Artenzahl	3	8	8	9	7	6
Aufnahmemonat	9	8	7	7	9	9
Gewässer	HW	HW	HW	HW	EFS	EFS
Exposition	NE	S	N	E	NW	S
Wassertiefe (cm)	-	-	-	-	20	10
AC						
<i>Myrica gale</i>	5	4	5	5	5	5
Begleiter						
<i>Juncus bulbosus</i>	3	2	.	+	.	.
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	2	2	1	2	+	.
<i>Sphagnum cuspidatum</i>	.	3	2	2	.	.
<i>Sphagnum auriculatum</i>	.	3	2	2	.	.
<i>Eleocharis multicaulis</i>	.	2	.	.	.	.
<i>Molinia caerulea</i>	.	2	+	1	.	2
<i>Agrostis canina</i>	.	1	.	.	.	.
<i>Eleocharis palustris</i>	.	.	1	.	.	.
<i>Juncus effusus</i>	.	.	1	+	.	.
<i>Lysimachia vulgaris</i>	.	.	+	+	1	+
<i>Calamagrostis canescens</i>	.	.	.	+	.	.
<i>Phragmites communis</i>	.	.	.	.	1	.
<i>Hypericum elodes</i>	.	.	.	.	1	.
<i>Comarum palustre</i>	.	.	.	.	1	.
<i>Carex lasiocarpa</i>	.	.	.	.	+	.
<i>Frangula alnus</i> , Str.	.	.	.	.	.	+
<i>Betula pubescens</i> , Klg. u. Str.	.	.	.	.	.	1
<i>Sphagnum papillosum</i>	.	.	.	.	.	1

Einen völlig anderen Aspekt bieten die meterhohen, ausgedehnten Röhrichte am Ost- und Nordufer des meso- bis eutrophen Großen Heiligen Meeres, die mit dominierenden Vorkommen von *Schoenoplectus lacustris*, *Phragmites australis*, *Typha angustifolia* und *T. latifolia* artenreiche Aspekte des *Scirpo-Phragmitetum* bilden (Abb. 14 u. 15, Tab. 4). Hier finden sich Bereiche mit z.T. reinen *Phragmites australis*-Beständen neben Röhrichtfragmenten aus eutraphenten Hochstaudenanteilen, in denen besonders *Iris pseudacorus*, *Ranunculus lingua*, *Lycopus europaeus*, *Rumex hydrolapathum* und *Peucedanum palustre* auffallen. Das sich anschließende Weiden-Faulbaum-Gebüsch vom Typ des *Frangulo-Salicetum* mit *Salix cinerea* und *S. aurita* dringt zusammen mit dem Erlenbruch des *Carici elongatae-Alnetum* mosaikartig weit in die Röhrichtzonen vor (Abb. 16). In den Großsegengesellschaften dominieren die besonders hochwüchsigen Bestände aus *Carex elata*, *C. paniculata*, *C. gracilis* und *C. vesicaria*. Das *Myriophyllo-Nupharetum* (Tab. 5) mit *Myriophyllum verticillatum*, *Eleocharis acicularis*, *Polygonum amphibium* mod. *natans*, *Nymphaea alba* und *Nuphar lutea* bildet die Schwimmblattzone bei größeren Wassertiefen (Abb. 17 u. 18, s. auch POTT 1983, RUNGE 1991; pflanzensoziologische Benennung nach POTT 1995).

Die großen *Myriophyllum*-Bestände am Ostufer des Großen Heiligen Meeres sind Ende der 80er bis Anfang der 90er Jahre nahezu vollständig verschwunden; ab 1995 treten am Nordwestufer zusammen mit *Eleocharis acicularis* erstmals größere, vitale neue *Myrio-*



Abb. 11: Torfkolk im Nordosten des Erdfallsees. Hier befinden sich landeinwärts Kleinseggenstümpfe mit *Eleocharis multicaulis*, *Juncus bulbosus* und *Carex lasiocarpa*.

Abb. 12: Ostufer des Erdfallsees. Hier befinden sich ausgedehnte flache Sandbänke mit *Littorella uniflora* und *Lobelia dortmanna*, an die sich landeinwärts größere Bestände von *Myrica gale*, dem Gagelstrauch, anschließen.



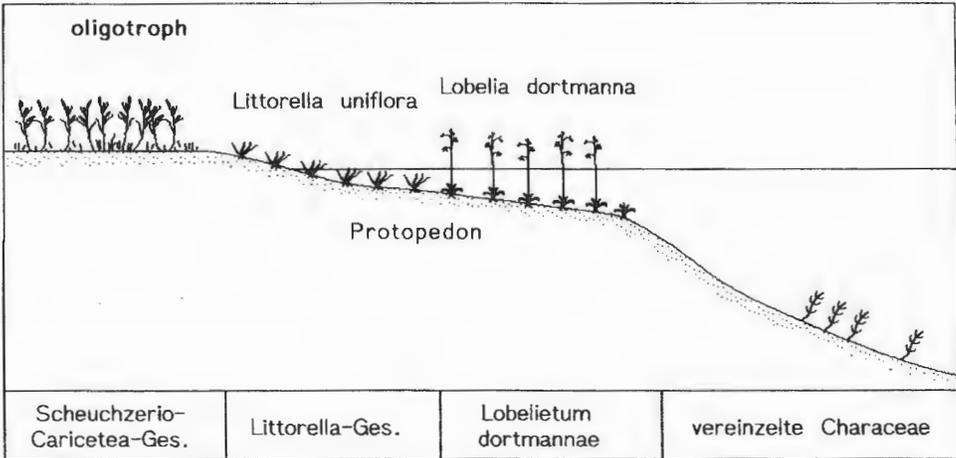


Abb. 13: Vegetationszonierung des Erdfallsee-Südufers im NSG „Heiliges Meer“ bei Hopsten in Westfalen aus dem Jahr 1981, nach POTT (1983).

Abb. 14: Großes Heiliges Meer. Blick vom Westufer auf das Röhricht-reiche Nordufer des Sees mit den sich landeinwärts anschließenden Formationen des Weiden-Faulbaumgebüschs und des Erlenbruchwalds.



Tab. 4: *Scirpo-Phragmitetum* am Großen Heiligen Meer.

Scirpo-Phragmitetum	typische Ausbil-		Phragmites-Fazies							
	dung		1	2	3	4	5	6	7	8
Laufende Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8		
Aufnahmefläche (m ²)	12	30	10	20	8	4	10	9		
Deckungsgrad (%)	100	97	100	93	97	70	30	60		
BS (%)	0	15	0	0	0	0	0	0		
SS (%)	<5	0	0	0	0	0	0	25		
KS (%)	100	97	100	93	97	70	27	30		
MS (%)	0	<5	<5	0	0	0	0	<5		
Artenzahl	23	29	17	8	18	4	6	16		
KS										
AC Scirpo-Phragmitetum:										
<i>Phragmites australis</i>	4	3	5	5	4	4	2	1		
<i>Typha angustifolia</i>	4	1	.	.	.	.	.	.
<i>Ranunculus lingua</i>	+	1	.	.	.	.	.	.	+
<i>Schoenoplectus lacustris</i>	.	.	.	.	.	+	.	.	.
OC-KC:										
<i>Sparganium erectum</i>	2	1	+	1	1	+	1	+		
<i>Lycopus europaeus</i>	2	1	1	.	1	.	.	.		
<i>Mentha aquatica</i> agg.	2	+	1	.	3	.	.	.		
<i>Potentilla palustris</i>	.	1	1	1	.	.	.	.
<i>Epilobium palustre</i>	+	1	.	.	1	.	.	.		
<i>Galkum palustre</i>	.	1	.	.	.	.	.	1		
<i>Iris pseudacorus</i>	.	1	.	.	1	.	.	.		
<i>Carex pseudocyperus</i>	1	.	.	.	.	.	.	+
<i>Eleocharis palustris</i>	+	.	.	1	.	.	.	.
<i>Alisma plantago-aquatica</i>	.	1	.	.	.	.	.	.
<i>Equisetum fluviatile</i>	.	.	+	.	.	.	.	.
<i>Menyanthes trifoliata</i>	.	+	.	.	.	.	.	.
Elemente d. Alnetalia glutinosae:										
<i>Solanum dulcamara</i>	2	2	2	+	2	.	+	2		
<i>Alnus glutinosa</i>	1	.	2	.	.	.	.	1		
<i>Salix cinerea</i>	2	.	+	.	+	.	.	.		
Begleiter:										
<i>Lysimachia thyrsoflora</i>	2	2	.	1	2	1	.	1		
<i>Peucedanum palustre</i>	1	2	+	.	1	.	.	+		
<i>Carex rostrata</i> agg.	.	3	1	2	.	.	+	2		
<i>Myosotis palustris</i>	+	1	2	.	1	.	+	.		
<i>Lemna minor</i>	1	1	1	.	+	.	.	1		
<i>Cardamine pratensis</i>	+	1	1	.	+	.	.	+		
<i>Scutellaria galericulata</i>	1	1	1	.	1	.	.	.		
<i>Lysimachia vulgaris</i>	.	.	2	.	.	.	1	.		
<i>Eleocharis acicularis</i>	.	.	.	1	1	.	.	.		
<i>Carex curta</i>	.	2	.	.	.	.	.	.
<i>Agrostis stolonifera</i>	+	.	.	.	.	.	.	1		
<i>Bidens tripartita</i>	1	+	.	.	.	.	.	.
<i>Hottonia palustris</i> (Kümmerform)	+	.	+	.	.	.	.	.
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	.	1	.	.	.	.	.	.
BS										
Elemente d. Alnetum glutinosae:										
<i>Alnus glutinosa</i>	.	2	.	.	.	.	.	.
SS										
Elemente d. Alnetalia glutinosae:										
<i>Salix cinerea</i>	.	.	.	.	.	.	.	2		
<i>Alnus glutinosa</i>	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Betula pubescens</i>	.	+	.	.	.	.	.	.
MS										
<i>Mnium hornum</i>	.	1	.	.	.	.	.	1		
<i>Riccia fluitans</i>	.	1	1	.	.	.	.	.
Ferner je 1x: <i>Caltha palustre</i> Nr 2 (1); <i>Hydrocotyle vulgaris</i> Nr. 2 (1); <i>Juncus effusus</i> Nr. 2 (+); <i>Tussilago farfara</i> Nr. 1 (+); <i>Phalaris arundinacea</i> Nr. 1 (+)										



Abb. 15: Übergang der Schwimmblattzone mit *Nuphar lutea* und *Nymphaea alba* zur Röhrichtzone am Nordufer des Großen Heiligen Meeres. Hier befinden sich neben reinen *Phragmites australis*-Beständen eutraphente Hochstaudenanteile.



Abb. 16: Ostufer des Großen Heiligen Meeres mit dem sich landeinwärts anschließenden Erlenbruchwald vom Typ des *Carici elongatae-Alnetum*. Zusammen mit dem Weiden-Faulbaum-Gebüsch des *Frangulo-Salicetum* mit *Salix cinerea* und *S. aurita* dringt der Erlenbruchwald mosaikartig bis weit in die Röhrichtzone vor.

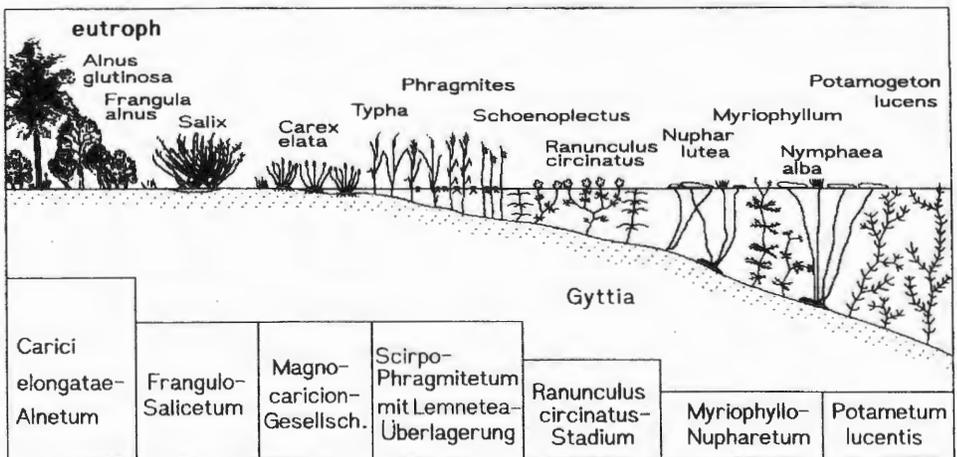
Tab. 5: *Myriophyllo-Nupharetum luteae* am Großen Heiligen Meer.

Myriophyllo-Nupharetum luteae	Fazies v. Nuphar										Fazies v. Nymph.		Mischbestände v. Nuphar u. Nymphaea										Mischbestände von Nuphar und Polygonum					Fazies von Polygonum																						
Laufende Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43							
Aufnahmefläche (m ²)	6	25	15	80	24	20	10	20	15	70	25	20	50	35	50	25	20	50	50	50	20	35	20	50	50	25	40	20	8	16	25	12	16	18	6	8	12	18	27	15	20	20	20							
Wassertiefe (cm)	48	43	75	77	60	67	59	80	50	48	74	130	63	58	60	75	60	64	70	70	60	60	60	57	60	72	51	67	100	90	83	58	70	120	140	70	70	190	120	230	100	142	45							
Gesamtdeckung (%)	80	85	75	70	60	30	50	43	15	95	90	93	95	95	95	95	97	95	85	85	87	85	90	98	85	93	85	95	87	95	95	60	60	90	90	80	80	80	80	95	90	60	55	25						
Artenzahl	5	5	5	1	6	7	7	3	7	5	2	4	7	7	5	5	7	6	6	6	7	4	5	4	7	6	5	3	4	2	2	6	4	2	2	3	2	1	1	1	7	3	5							
AC Myriophyllo-Nupharetum:																																																		
<i>Nuphar lutea</i>	5	4	4	4	3	3	3	3	2	+	.	2	2	2	2	2	2	4	4	4	3	2	2	3	5	3	1	2	5	5	4	3	3	3	2	+						
<i>Myriophyllum spicatum</i>	+					
D. Fazies:																																																		
<i>Nymphaea alba</i> (VC)	5	5	5	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2			
<i>Polygonum amphibium f. natans</i>	+				
Elemente d. Nymphaeion:																																																		
<i>Nymphaea alba</i> var. <i>minor</i>	2	2	+	1	1	+	2	+	+	1	+	2	+	+	+	+	2	1			
<i>Ranunculus circinatus</i>	.	.	1	.	.	+	1	.	.	+			
KC-OC-Potamogetonetea:																																																		
<i>Potamogeton obtusifolius</i>	.	.	+	.	+	1	+	+	1	+	+	1			
<i>Potamogeton berchtoldii</i>		
<i>Myriophyllum alterniflorum</i>	.	.	.	+		
<i>Elodea canadensis</i>	
<i>Potamogeton crispus</i>
Begleiter:																																																		
<i>Eleocharis acicularis</i>	1	1	1	.	2	+	2	1	2	1	
<i>Baldellia ranunculoides</i>	+	1	.	1	.	1	1	1	
<i>Schoenoplectus lacustris</i>	1	+	.	.	[+]	1	.	[+]
<i>Phragmites australis</i>	.	1	.	1	.	1	.	1	1
<i>Chara fragilis</i>	+	.	+
<i>Chara aspera</i>	+	.	+
Ferner je 1x: <i>Iris pseudacorus</i> , Nr. 2 (+), <i>Sparganium erectum</i> , Nr. 17 (+), <i>Lysimachia vulgaris</i> , Nr. 17 (+).																																																		



Abb. 17: *Nymphaea alba* aus der Schwimmblattzone am Ostufer des Großen Heiligen Meeres. Die ehemals ausgedehnten *Myriophyllum*-Bestände des *Myriophyllo-Nupharetum* sind hier seit dem Ende der 80er Jahre verschwunden.

Abb. 18: Vegetationszonierung des Südwestufers des Großen Heiligen Meeres im NSG „Heiliges Meer“ bei Hopsten in Westfalen aus dem Jahr 1982, nach POTT (1983).



phyllum-Bestände auf (in den pflanzensoz. Tabellen noch nicht erfaßt), während jene am Ostufer sich noch nicht erholt haben. Die Ursache für die weitgehende Auslöschung der *Myriophyllum*-Bestände am Ostufer läßt sich nicht eindeutig belegen; geringe Mengen von Atrazin-Derivaten im Meerbeckewasser (PUST 1993), die nahe Lage zu Maisäckern und zeitweises Eindringen von Meerbeckewasser am Ostufer bringen jedoch Belastungen mit sich, die am Nordwestufer fehlen, wo die *Myriophyllum*-Bestände heute stark zunehmen.

Der große Biomassenunterschied zwischen der Ufervegetation des nährstoffarmen Erdfallsees und des nährstoffreichen Großen Heiligen Meeres verdeutlicht die Trophiedifferenzen beider Seen recht anschaulich; die hydrochemisch-physikalischen Meßergebnisse zeigen, daß die Konzentrationen von Nitrat- und Phosphationen während der Vegetationsperiode in beiden Seen stark variieren können (vgl. Abb. 19). Die Konzentrationen der Erdalkalitionen zeigen während der gesamten Vegetationsperiode jedoch nur geringe Schwankungen, aber es treten deutliche Konzentrationsunterschiede dieser Ionen zwischen beiden Seen auf. Das Wasser des Erdfallsees enthält etwa die Hälfte an Kalzium und Magnesium gegenüber dem Wasser im Großen Heiligen Meer (Abb. 20). Auch die Natriumkonzentrationen sind im Wasser des Erdfallsees etwa halb so hoch wie im Großen Heiligen Meer, während die Differenz der Kaliumkonzentrationen in beiden Seen etwas geringer ausfällt (Abb. 21).

Im Verlauf einer Vegetationsperiode nehmen die Stickstoffkonzentrationen im Großen Heiligen Meer sowie im Erdfallsee innerhalb des Pelagials, insbesondere im Epilimnion,

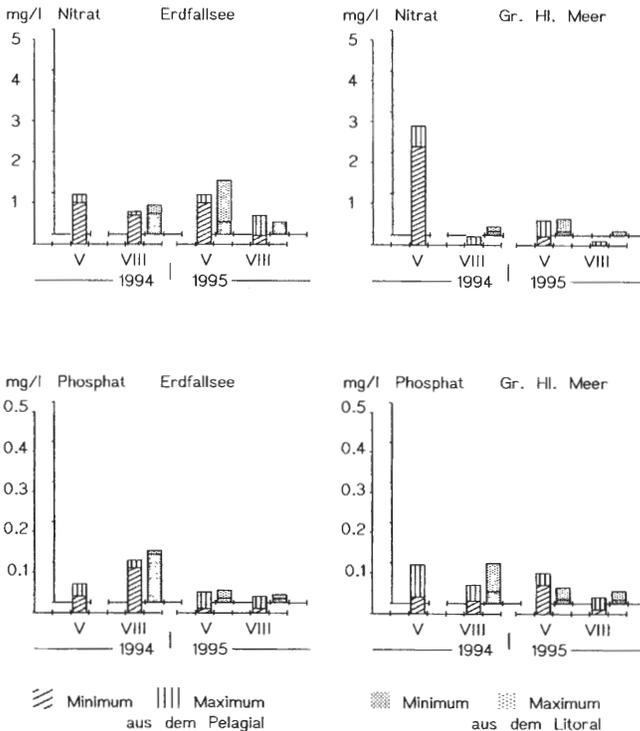


Abb. 19: Nitrat- und Phosphatkonzentrationen im Erdfallsee und im Großen Heiligen Meer. Dargestellt sind die Minima und Maxima aus dem Pelagial an allen 5 Bojen aus 0-3m Wassertiefe (Epilimnion) und aus dem Litoral vom Süd-, Nord-, Ost- und Westufer für die Monate Mai (V) und August (VIII).

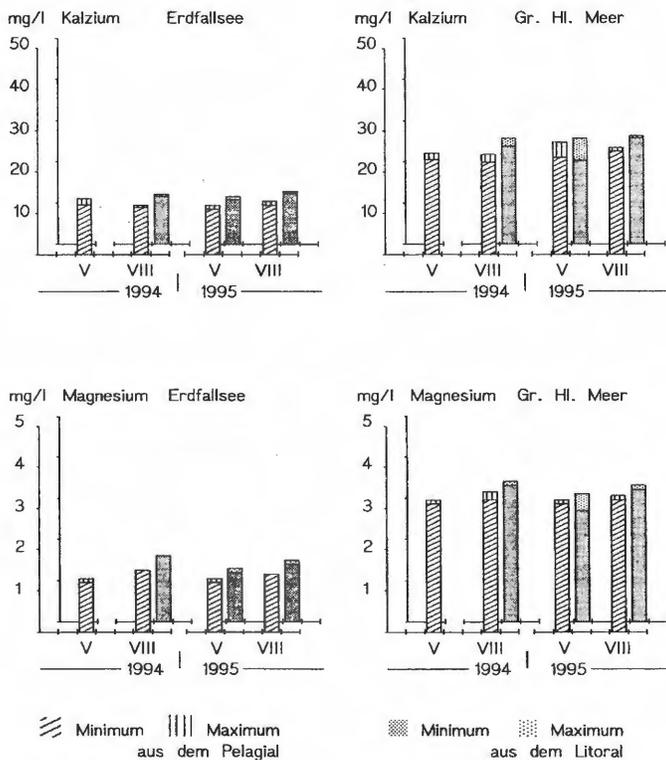


Abb. 20: Konzentrationen der Erdalkalitionen im Erdfallsee und im Großen Heiligen Meer. Dargestellt sind die Minima und Maxima aus dem Pelagial an allen 5 Bojen aus 0-3m Wassertiefe (Epilimnion) und aus dem Litoral vom Süd-, Nord-, Ost- und Westufer für die Monate Mai (V) und August (VIII).

deutlich ab; die Konzentrationen von Alkali- und Erdalkalitionen bleiben jedoch unverändert. Phosphat zeigt besonders innerhalb der Litoralzone Konzentrationsschwankungen, z.B. eine Konzentrationsabnahme bei sonniger Wetterlage und im Hochsommer durch die Phosphataufnahme der Phytomasse und erhöhte Konzentrationen nach Regenfällen. Große Schwankungen des Phosphatgehaltes treten besonders im Wasser des Erdfallsees auf (vgl. Abb. 19).

Bemerkenswert ist, daß eine sommerliche Abnahme des Stickstoffgehaltes im Pelagial des eutrophen Großen Heiligen Meeres rascher erfolgen kann als im oligo- bis mesotrophen Erdfallsee (vgl. Abb. 22). Dies ist möglicherweise auf die höhere Rate der Nährstoffaufnahme durch die größere Phytomasse im Großen Heiligen Meer zurückzuführen, an der besonders das Phytoplankton des Pelagials einen großen Anteil haben dürfte. Die Ammoniumkonzentrationen liegen im Epilimnion des Großen Heiligen Meeres relativ niedrig zwischen 0.00-0.03 mg/l; im Litoral können sie lokal auf 0.05 mg/l ansteigen. Im Erdfallsee hingegen treten stets erhöhte Ammoniumwerte auf (Abb. 23), die zeitweise bei 0.5 mg/l liegen, im August 95 lag das Minimum zwischen 0.03-0.09 mg/l, um dann im September auf über 0.1 mg/l anzusteigen. Von den meisten aquatisch lebenden Pflanzen wird Ammonium gegenüber Nitrat bevorzugt aufgenommen; das Stickstoffangebot stellt im Erdfallsee daher keinen Minimumfaktor für das Pflanzenwachstum dar.

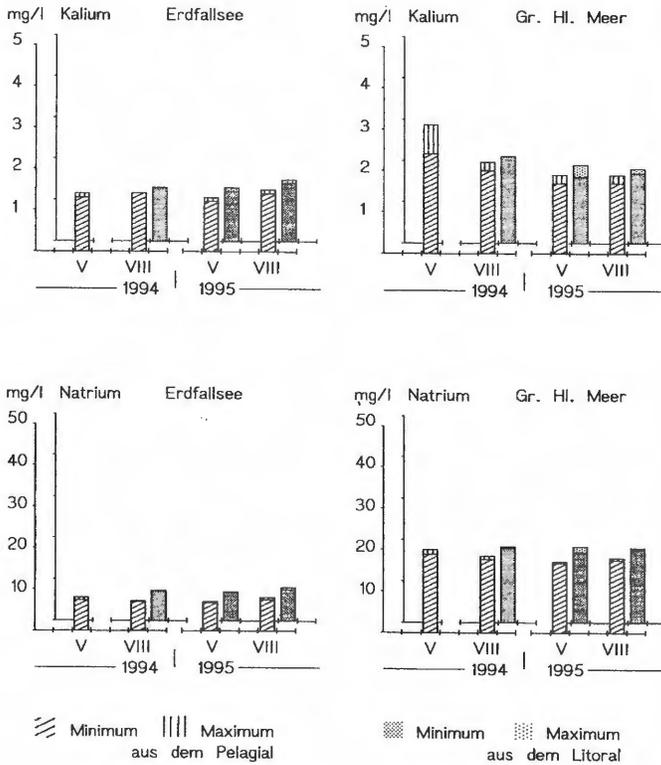


Abb. 21: Konzentrationen der Alkaliionen im Erdfallsee und im Großen Heiligen Meer. Dargestellt sind die Minima und Maxima aus dem Pelagial an allen 5 Bojen aus 0-3m Wassertiefe (Epilimnion) und aus dem Litoral vom Süd-, Nord-, Ost- und Westufer für die Monate Mai (V) und August (VIII).

Die Ursache für den deutlich erhöhten Ammoniumgehalt des Erdfallsees, der in der Regel bei niedrigen Sauerstoffkonzentrationen zu erwarten ist, hier jedoch auch bei Sauerstoffsättigungswerten um 100% und bei Übersättigung auftritt, ist nicht nur aufgrund der geringeren Nährstoffaufnahme durch die geringere Phytomasse, sondern möglicherweise auch in Grund- und Sickerwasserzuströmen zu suchen. Dabei dürfte von Süden einströmendes reduziertes und ammoniumreiches Grundwasser ausschlaggebend sein. Auch zeitweise erhöhte Phosphat- und Eisenkonzentrationen im sauerstoffreichen Epilimnion des Erdfallsees sind durch Grundwassereinstrom zu erklären. Eine solche Grundwasserzone liegt am Südufer des Erdfallsees (bei Brunnen 16, vgl. Abb. 4), wo stets hohe Ammoniumkonzentrationen von im Mittel 0.8 mg/l, Phosphatkonzentrationen von ca. 1.5 mg/l und Eisenkonzentrationen von ca. 10 mg/l festgestellt werden. Hierbei ist zu beachten, daß bereits von LOTZE (1951) für das NSG „Heiliges Meer“ ein nordwärts gerichtetes Gefälle des Grundwasserspiegels angegeben wird, so daß die südlich des Erdfallsees gelegenen Grundwasserbezirke für eine Beeinflussung des Seewassers entscheidend sein dürften.

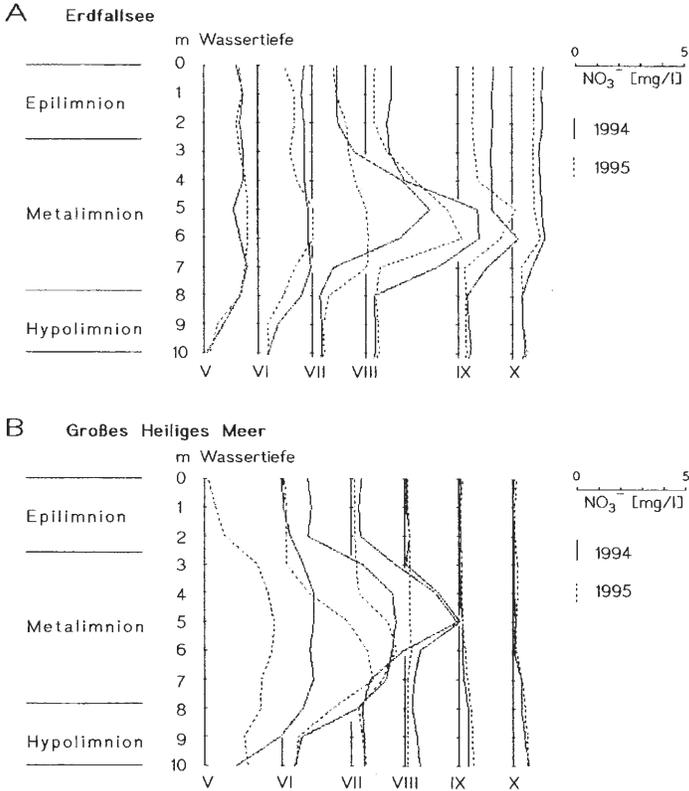


Abb. 22: Vertikale Verteilung und Zehrung des Nitrats von Mai (V) bis Oktober (X) in den Jahren 1994 und 1995 an den zentralen Bojen im Erdfallsee (A) und Großen Heiligen Meer (B). Die Nitratabnahme im Pelagial des Erdfallsees erfolgt in geringerem Maße als im Großen Heiligen Meer. Besonders im Epilimnion des Erdfallsees bleibt der Nitratgehalt gegenüber dem Großen Heiligen Meer erhöht. Auch der Abbau des metalimnischen Nitrats erfolgt im Großen Heiligen Meer ca. einen Monat früher (September) als im Erdfallsee. Im Gegensatz zum Großen Heiligen Meer wird der Abbau des Nitrats von Juli bis Oktober von einer Nitratzunahme im Epilimnion begleitet.

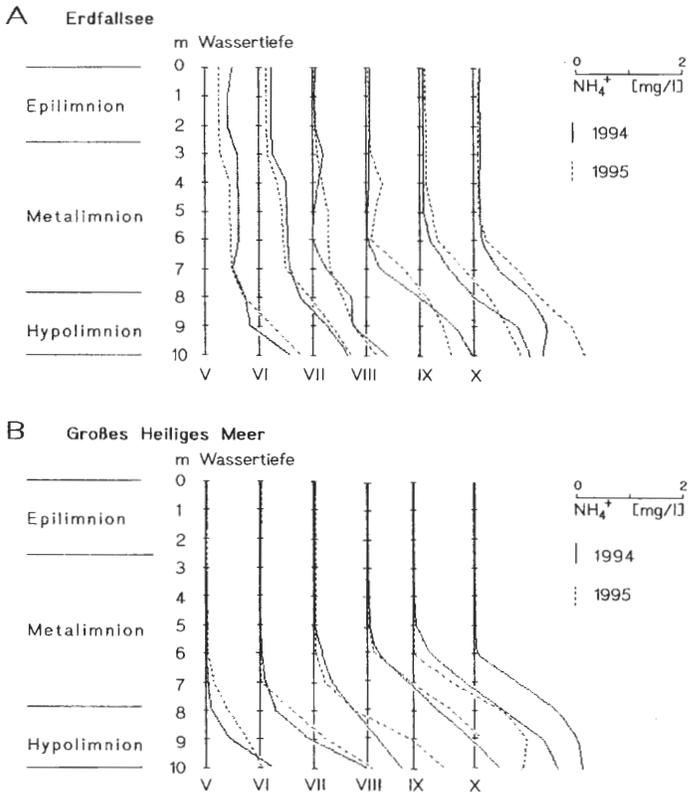


Abb. 23: Vertikale Verteilung und Zehrung des Ammoniums von Mai (V) bis Oktober(X) in den Jahren 1994 und 1995 an den zentralen Bojen im Erdfallsee (A) und Großen Heiligen Meer (B). Die Ammoniumabnahme im Pelagial des Erdfallsees erfolgt wie beim Nitrat in geringerem Maße als im Großen Heiligen Meer. Besonders im Epi- und Metalimnion des Erdfallsees bleibt auch der Ammoniumgehalt gegenüber dem des Großen Heiligen Meeres erhöht. Der Abbau des epilimnischen und metalimnischen Ammoniums erfolgt im Erdfallsee nur unvollständig, im Großen Heiligen Meer nahezu vollständig.

3. Heideweier und Heidekolke

Unter den Gewässern des NSG „Heiliges Meer“ stellt der Heideweier im Westen des Gebietes (vgl. Abb. 2 u. 3) nicht nur wegen seiner Größe im Verhältnis zu den wesentlich kleineren Heidekolken eine Besonderheit dar. Bereits hinsichtlich seiner Entstehung bestehen unterschiedliche Vorstellungen. So geht GRAEBNER (1930) von einem Erdfallereignis aus, das zur Bildung eines zunächst oligotrophen Sees von ca. 2 ha Gesamtfläche führte; seine Entstehung ist aber auch durch die Bildung einer nacheiszeitlichen Deflationswanne denkbar. LOTZE (1956) ordnet den Heideweier den Flachsenken zu, die allmählich durch langfristige Bodensenkungen entstanden sind, und von denen es weitere Formen kleinerer Dimension östlich des Erdfallsees und auf der Heidefläche westlich des Großen Heiligen Meeres gibt (Abb. 24). Der Heideweier unterscheidet sich von diesen jedoch durch seine Lage oberhalb des Grundwasserspiegels und stellt eine Ansammlung von Regenwasser über stauenden Bodenhorizonten auf undurchlässigem Flachmoortorf dar (LOTZE 1951).

Bis in die Mitte dieses Jahrhunderts wird der Heideweier als oligotrophes Gewässer beschrieben mit den heute zu den Seltenheiten zählenden Arten *Lobelia dortmanna* und *Lit-*

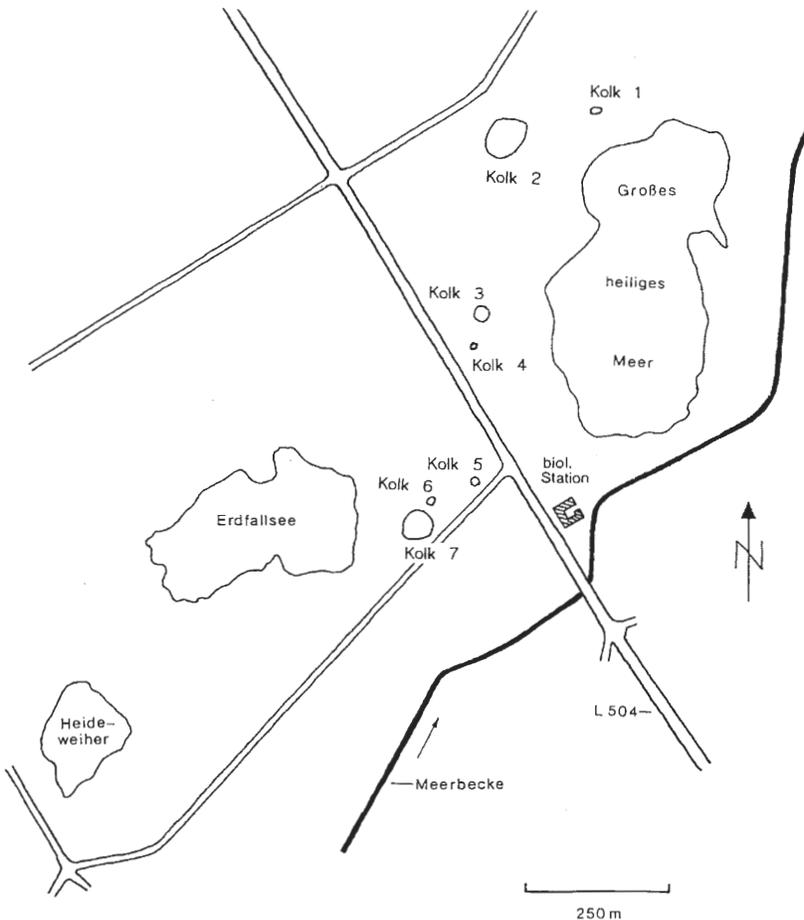


Abb. 24: Lage der Heidekolke 1-4 im Großen-Heiligen-Meer-Gebiet und der Heidekolke 5-7 im Erdfallsee-Heideweier-Gebiet.



Abb. 25: Individuenreiches Vorkommen von *Lobelia dortmanna* am Heideweier. Aufnahme vom 24.7.1928 (Archiv Westf. Museum f. Naturkunde). Heute sind hier die oligotraphenten Arten verschwunden; es dominieren dys- bis mesotraphente Arten.

torella uniflora, die den Heideweier in mehreren hundert Exemplaren besiedelten (Abb. 25) und die heute nur noch vereinzelt im Erdfallsee in der Litoralzone zu finden sind. Das gleichzeitige Vorkommen eutraphenter Arten wie *Bidens tripartita*, *Caltha palustris*, *Equisetum fluviatile*, *Mentha aquatica* und *Schoenoplectus lacustris* sowie mesotraphenter Arten wie *Menyanthes trifoliata* und ein mehrere Meter breiter *Sphagnum*-Gürtel lassen jedoch ein differenzierteres Bild von der Trophie des Heideweihers bis Mitte dieses Jahrhunderts entstehen, das zu einem wesentlichen Teil durch anthropogene Faktoren geprägt wird. So wurde der Heideweier bis in die 60er Jahre dieses Jahrhunderts als Vorfluter für Drainanlagen benachbarter Weideflächen genutzt und stand über Verbindungsgräben mit dem Erdfallsee und dem Großen Heiligen Meer in Kontakt, das schließlich in die Meerbecke entwässert. Der wechselnde Zustrom von Drainwasser, Wasserstandsschwankungen und ein zeitweiliges Trockenfallen des Heideweihers verhinderten die Ausbildung einer stabilen dystrophen Phase und führten zu einer trophisch heterogenen Staffelung des Litoralbereiches mit oligotrophen, schwach dys-, meso- und eutrophen Teilbereichen. Die frühere Beschreibung der Wasserfarbe als klar bis schwach gelb zeigt, daß trotz ausgedehnter *Sphagnum*-Bestände Anreicherungen organischer Säuren am Heideweier lange Zeit unterblieben, anders, als wir dies heute beobachten, und die gegenwärtig zu einer deutlichen Braunfärbung des Wassers geführt haben.

Im Zuge von Flurbereinigungen der 60er Jahre wurden die Verbindungsgräben zwischen Heideweier, Erdfallsee und Großem Heiligen Meer zurückgebaut und dann auch direkte Einleitungen von Drainwasser aus den benachbarten landwirtschaftlichen Nutzflächen unterbunden. Der Wasserhaushalt des Heideweihers wurde durch diese Maßnahmen stabilisiert; ein vollständiges Austrocknen tritt nur noch äußerst selten auf; direkte Einträge von Nährstoffen über Entwässerungsgräben und eine Ausdünnung der organischen Säuren unterblieben fortan, so daß die Ausbildung einer stabilen dystrophen Phase begünstigt wurde. Diese ist aber, wie aus den folgenden pflanzensoziologischen Befunden hervorgeht, noch nicht vollständig abgeschlossen.

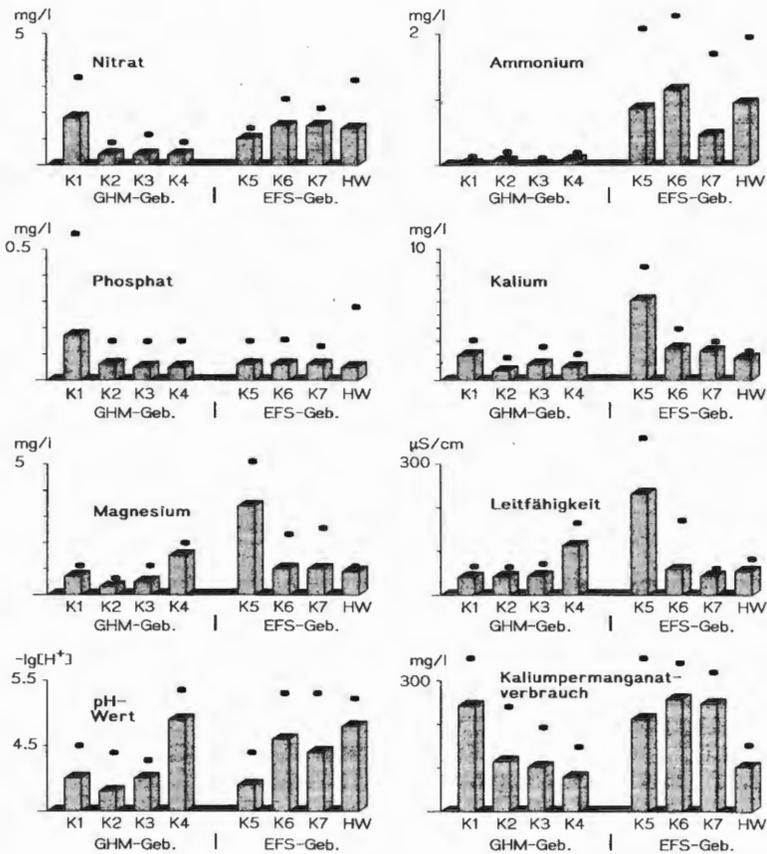


Abb. 26: Physikochemische Parameter der Heidekolke (K1-K7) und des Heideweiher (HW) im NSG „Heiliges Meer“ aus dem Jahr 1994. Aus dem „Großen-Heiligen-Meer-Gebiet“ (GHM-Geb.) und aus dem „Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet“ (EFS-Geb.) sind die Mittelwerte als Säulen und die Maxima als Punkte dargestellt.

Die auflagenfreien Protopedonbereiche mit ihrer *Lobelia*- und *Littorella*-Vegetation sind heute mächtigen Torfmoosablagerungen gewichen; der pH-Wert des Wassers kann innerhalb des Litorals zeitweise unter 4 absinken. Diese Entwicklung hat zu einer grundsätzlichen Abnahme der Anzahl der Pflanzenarten im Heideweiher geführt: Sowohl die oligotraphenten als auch ein Großteil der eutraphenten Arten sind heute verschwunden und wurden im Litoral durch säuretolerante Arten der *Utricularietea intermedio-minoris* vor allem mit *Sphagnum auriculatum*, *S. cuspidatum*, *S. fallax* und *Juncus bulbosus* ersetzt (Abb. 28, Tab. 6 u. 7). Am Erdfallsee hat die mesotraphente Ausprägung des *Eleocharitetum multicaulis* mit *Eleocharis multicaulis* und *Hypericum elodes* zugenommen (Abb. 29, Tab. 2). Reste der ehemals verbreiteten Bestände des *Scirpetum fluitantis* werden durch Bestände von *Juncus effusus* und *Eleocharis palustris* zunehmend zurückgedrängt (Tab. 8). Neu hinzugekommen ist die Schwimmblattgesellschaft des *Nymphaeetum albo-minoris* mit



Abb. 27: Der Heideweiher mit ausgedehnten Beständen von *Nymphaea alba* mod. *minor*. Die terrestrischen Uferabschnitte werden von *Myrica gale* eingenommen.

Tab. 6: *Sphagnetum cuspidato-obesi* am Heideweiher.

Laufende Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Aufnahmefläche (m ²)	10	6	6	2	2	10	5	8	5	6	20	9	6	4	2	6	6	6
Krautschicht, Deckung (%)	-	20	30	-	10	60	35	25	50	5	50	65	50	15	10	15	15	15
Moosschicht, Deckung (%)	90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	50	90	100	100	100	90	70
Artenzahl	2	3	4	2	5	4	4	6	7	4	7	7	7	6	5	7	7	6
Aufnahmemonat	7	7	7	9	9	7	7	7	7	7	7	7	8	9	9	9	9	9
Exposition	O	O	O	NO	NO	O	O	N	N	W	SW	SW	S	NE	NE	NE	NE	NE
Wassertiefe (cm)	25	20	15	30	25	10	5	5	5	30	10	5	5	20	25	20	20	10
AC																		
<i>Sphagnetum cuspidatum</i>	5	5	4	4	4	4	4	3	3	3	4	2	4	4	4	3	3	2
fo. <i>plumosum</i>																		
<i>Sphagnetum auriculatum</i>	2	2	4	3	3	4	4	3	3	3	4	3	2	4	3	4	3	3
fo. <i>obesum</i>																		
Begleiter																		
<i>Juncus bulbosus</i>	.	.	+	.	+	2	2	2	2	2	3	4	3	2	+	1	1	2
<i>Eleocharis palustris</i>	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	+	.	.	1	1	.
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	.	.	1	.	1	2	2	2	2	.	1	1	1	1	1	1	1	.
<i>Juncus effusus</i>	.	.	.	.	.	.	.	2	2	.	.	.	.	.	1	1	1	.
<i>Lysimachia vulgaris</i>	.	.	.	.	.	.	.	+	3	.	1	.	.	.	.	.	.	1
<i>Comarum palustre</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	1	.	.	.	.	.	.	.
<i>Eleocharis multicaulis</i>	.	.	.	.	1	.	.	.	.	1	.	1	1	1	1	1	+	1
<i>Agrostis canina</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	1	.	.	.	.	.
<i>Molinia caerulea</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.
<i>Isolepis fluitans</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.
<i>Myrica gale</i> , Klg.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+



Abb. 28: Die aquatischen Uferabschnitte des Heideweiher werden vorwiegend von einer dystrophen Ausbildung des *Eleocharitetum multicaulis* mit Arten des *Sphagnetum cuspidatobesi* eingenommen. Es dominieren die Arten *Sphagnum auriculatum*, *S. cuspidatum*, *S. fallax* und *Juncus bulbosus*.



Abb. 29: Mesotrophe Ausbildung des *Eleocharitetum multicaulis* mit *Hypericum elodes* am Nordufer des Erdfallsees.

Tab. 7: *Scirpetum fluitantis* am Heideweiher (HW) und am Erdfallsee (HEFS).

Laufende Nummer	1	2	3	4	5	6
Aufnahmefläche (m ²)	6	4	10	4	6	5
Krautschicht, Deckung (%)	10	40	15	90	90	80
Moosschicht, Deckung (%)	90	100	100	-	-	-
Artenzahl	3	5	8	2	4	3
Aufnahmemonat	7	7	7	9	9	9
Gewässer	HW	HW	HW	EFS	EFS	EFS
Exposition	NW	NW	NW	N	NE	NE
Wassertiefe (cm)	25	20	20	50	50	50
AC <i>Isolepis fluitans</i>	2	3	3	5	4	5
KC <i>Juncus bulbosus</i>	.	1	2	.	2	.
<i>Eleocharis multicaulis</i>	.	+	1	1	2	2
Begleiter <i>Sphagnum cuspidatum</i> fo. <i>plumosum</i>	5	4	5	.	.	.
<i>Sphagnum auriculatum</i> fo. <i>obesum</i>	2	3	3	.	.	.
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	.	.	2	.	.	.
<i>Juncus effusus</i>	.	.	1	.	.	.
<i>Agrostis canina</i>	.	.	1	.	.	.
<i>Nymphaea alba</i> var. <i>minor</i>	.	.	.	.	1	1

Nymphaea alba mod. *minor* als mesotraphente Standortvariante von *Nymphaea alba*, welche die zentralen, tiefsten Stellen des Heideweiher in größeren Beständen einnimmt (Abb. 27, 30 u. 31, Tab. 9).

Tab. 8: *Sphagnum cuspidatum*-*Eriophorum angustifolium*-Gesellschaft am Heideweiher.

Laufende Nummer	1	2	3
Aufnahmefläche (m ²)	10	6	12
Krautschicht, Deckung (%)	70	65	80
Moosschicht, Deckung (%)	50	50	30
Artenzahl	8	7	4
Aufnahmemonat	7	7	7
Gewässer	HW	HW	HW
Exposition	SW	SW	SW
Wassertiefe (cm)	5	<5	.
AC			
<i>Eriophorum angustifolium</i>	3	3	3
<i>Sphagnum cuspidatum</i>	2	2	2
Begleiter			
<i>Sphagnum auriculatum</i>	2	2	2
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	1	.	.
<i>Juncus bulbosus</i>	3	2	.
<i>Agrostis canina</i>	1	+	.
<i>Juncus effusus</i>	1	1	.
<i>Comarum palustre</i>	+	+	4

Tab. 9: *Nymphaeetum albo-minoris* am Heideweiher.

Laufende Nummer	1	2	3
Aufnahmefläche (m ²)	6	5	50
Krautschicht, Deckung (%)	50	80	75
Moosschicht, Deckung (%)	100	70	60
Artenzahl	6	3	3
Aufnahmemonat	7	7	7
Gewässer	HW	HW	HW
Exposition	NW	N	W
Wassertiefe (cm)	25	30	25
AC			
<i>Nymphaea alba</i> var. <i>minor</i>	3	5	5
D. - Subass. von			
<i>Juncus bulbosus</i>	1	.	.
Begleiter			
<i>Sphagnum cuspidatum</i> fo. <i>plumosum</i>	4	4	3
<i>Sphagnum auriculatum</i> fo. <i>obesum</i>	3	3	3
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	1	.	.
<i>Eleocharis multicaulis</i>	2	.	.

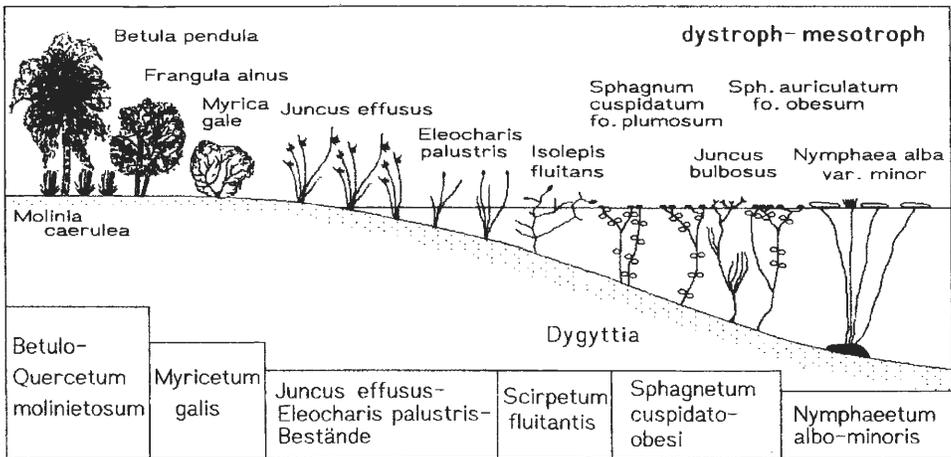


Abb. 30: Vegetationszonierung am West- und Nordwestufer des Heideweiher im NSG „Heiliges Meer“ bei Hopsten in Westfalen aus dem Jahr 1993, nach HASSE (1994).

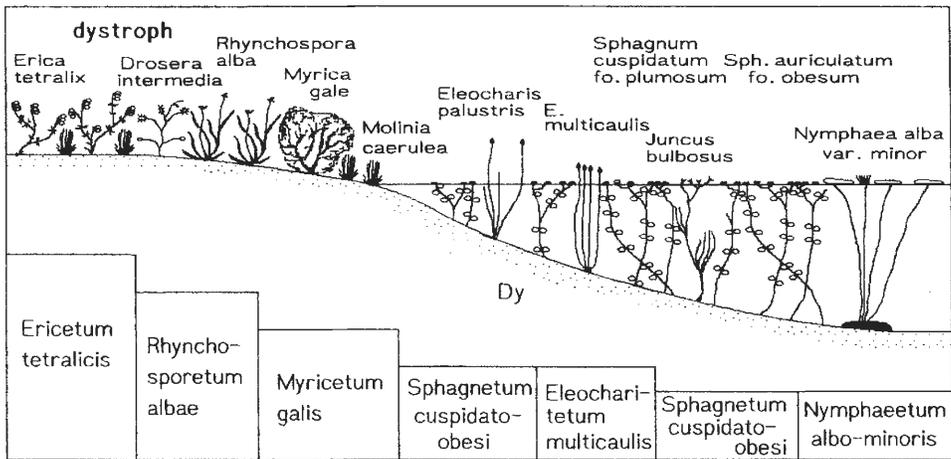


Abb. 31: Vegetationszonierung am Südufer des Heideweiher im NSG „Heiliges Meer“ bei Hopsten in Westfalen aus dem Jahr 1993, nach HASSE (1994).

Eine weitere Gruppe von Stillgewässern, die innerhalb des Naturschutzgebietes meist nur Kleinformen darstellt, ist weitgehend dem dystrophen Gewässertyp zuzuordnen. Der Begriff Dystrophie drückt aus, daß es sich um äußerst nährstoffarme Gewässer handelt, die im Gegensatz zu den oligotrophen Klarwasserseen als dystrophe Braunwasserseen durch oft hohe Anteile organischer Säuren, wie Humin- und Fulvosäuren, gekennzeichnet sind. Diese stabilisieren als Puffersystem den pH-Wert im sauren Bereich und sind für den Entzug von Alkali- und vor allem von Erdalkalitionen durch Bildung von Chelatkomplexen verantwortlich. Ein Großteil der von der Vegetation aufgenommenen Nährstoffe wird dabei wegen der verminderten Mineralisation im sauren, nährstoffarmen Milieu mit dem

Bestandsabfall in den limnischen Sedimenten (Dy) festgelegt, weshalb dystrophe Stillgewässer oftmals eine noch niedrigere Leitfähigkeit als oligotrophe Seen besitzen (gelegentlich bis zu $<50 \mu\text{S}/\text{cm}$). Der Mangel an vielen Kationen, insbesondere an Erdalkalitionen, ist nicht nur für das geringe Nährstoffangebot in dystrophen Gewässern verantwortlich, auch wird entscheidend die Wirksamkeit des Kalziumhydrogenkarbonatpuffersystems geschwächt. Neben der Beeinflussung des pH-Wertes durch organische Säuren führt die Chelatkomplexbildung mit Kationen zu einer Freisetzung von H^+ -Ionen aus dem Wasser, die die zurückbleibenden Anionen absättigen und ebenfalls zu pH-Wert-Absenkungen führen. Nur wenige aquatisch lebende Pflanzen sind in der Lage, unter diesen extremen Bedingungen, die sich aus der schlechten Lichtversorgung (Braunwassersee), der Nährstoffarmut (Entzug vieler Kationen) und den niedrigen pH-Werten ergeben, zu wachsen. Torfmoose der Gattung *Sphagnum* können aber unter Ionenaustausch mit H^+ -Ionen das geringe Erdalkalitionenangebot nutzen. Durch diesen ständigen Ionenaustausch und die Abgabe von H^+ -Ionen aus den *Sphagnum*-Beständen kommt es zu einer zusätzlichen kontinuierlichen Versauerung des Standortes. Somit wirken biotische und abiotische Standortfaktoren gemeinsam natürlich stabilisierend auf die Eigenschaften dystropher Gewässer.

Die Mineralisierung des Bestandsabfalls kann bei den sauren Milieubedingungen nur langsam ablaufen, und sie ist oftmals unvollständig (Cellulosereste bleiben weitgehend unzeretzt). Daher unterliegen die dystrophen Stillgewässer trotz geringer Primärproduktion oft einer raschen Verlandung, und die autochthone Nährstofffreisetzung fällt nur äußerst gering aus. Die aus Dy bestehenden sedimentären Böden beeinflussen im Zuge der Verlandung mit ihrem hohen Anteil an organischen Säuren nicht nur den aquatischen Gewässerbereich, sondern auch die semiaquatische und die angrenzende semiterrestrische Zone sowie das benachbarte Grundwasser. Dieses kann ebenfalls dystrophen Charakter haben, wobei auch dort ein saures Milieu mit einem hohen Anteil organischer Säuren und niedrigen Gehalten an Alkali- und Erdalkalitionen gepaart ist. Ist der Pool an Erdalkalitionen durch Komplexierung und Festlegung erst einmal aufgebraucht, so bilden die dystrophen Gewässerkomplexe milieumäßig sehr stabile Landschaftsteile; derartige charakteristische Ausbildungen finden wir in Hochmooren, wo es neben teilweise tiefen Stillgewässern auch dystrophe Fließwasserformen gibt.

Trockenlegungen, die im Zuge der landwirtschaftlichen Nutzung im Bereich von Landschaften mit dystrophen Gewässern zu beobachten sind, können das charakteristische saure Milieu aufheben und zu einer rasanten Mineralisierung der Sedimente führen, womit eine irreversible Eutrophierung eingeleitet wird. Gesteigert werden diese Prozesse durch eine erhöhte allochthone Zufuhr kalkhaltiger Mineralstoffe sowie durch Phosphat- und Nitrateinträge über den Luft-, Sickerwasser- und Grundwasserpfad. Dystrophe Gewässerkomplexe, die nicht auf Hochmoor vorkommen, sondern teilweise noch im Kontakt mit dem Grundwasser stehen, gehören deshalb, wie die oligotrophen Seen, heute bereits zu den Seltenheiten der pleistozänen Sandlandschaften und sind durch Eutrophierung in ihrem Bestand stark gefährdet (vgl. u. a. Zusammenstellung bei POTT 1996).

Auch die kleineren Heidekolke des Gebietes weisen während der letzten 50 Jahre z.T. beträchtliche Veränderungen des Wasserchemismus auf, die von Änderungen des Grundwasserregimes einerseits und der Nährstoffversorgung andererseits begleitet werden. Beide Faktorenkomplexe liegen lokal in unterschiedlicher Ausprägung vor. Auf dem nordwestlichen Teil der Heidefläche am Großen Heiligen Meer führten grundwasserabsenkende Maßnahmen durch Drainagierung der im Norden des Gebietes befindlichen landwirtschaftlichen Nutzflächen zu gravierenden Veränderungen der Wasserhaltung dortiger Heidekolke. An Heidekolk 2 (s. Abb. 24) konnte eine über Jahre fortschreitende Absenkung des Wasserstandes beobachtet werden. Im Erdfallseegebiet treten besonders Nährstoffeinträge in Erscheinung, die aus den im Süden des Gebietes liegenden Ackerflächen stammen und sehr wahrscheinlich grundwasservermittelt auftreten, möglicherweise aber auch über den Luft-

pfad durch N- und P-Depositionen erfolgen. Ein im Südwesten des Großen Heiligen Meeres gelegener Heidekolk (Heidekolk 4) weist erhöhte Salzfrachten auf, welche mit großer Wahrscheinlichkeit durch die Nähe zur Landstraße L 504 bedingt sind und auf Oberflächenwasser zurückgehen, das vom Straßenrand direkt in das Gewässer fließt.

Neben dem pH-Wert und dem Kaliumpermanganatverbrauch, die im allgemeinen als Maß für den Gehalt an organischen Säuren und den Dystrophiegrad angesehen werden können, sind weiterhin die Konzentrationen der Phosphor- und Stickstoffverbindungen, der Alkali- und Erdalkaliionen sowie die Leitfähigkeit als Parameter zur Beurteilung der Trophie und ihrer Stabilität von Bedeutung (s. POTT 1980, 1983). Die Kleingewässer des Teilgebietes um das Große Heilige Meer (Heidekolke 1-4) unterscheiden sich deutlich von jenen aus dem Teilgebiet des Erdfallsees und Heideweiher (Heidekolke 5-7 und Heideweiher) in ihrem Stickstoffangebot und ihrem Gehalt an organischen Säuren. So liegen z.B. die Ammoniumkonzentrationen in den Heidekolken des Großen-Heiligen-Meer-Gebietes im Mittel unter 0,1 mg/l; in jenen des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes einschließlich des Heideweiher werden jedoch im Mittel 1 mg/l Ammonium erreicht und z.T. sogar überschritten (vgl. Abb. 26). Auch der Gehalt an organischen Säuren liegt in den Kleingewässern des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes deutlich höher als in jenen des Großen Heiligen Meer-Gebietes. Die Konzentrationen beider Parameter weisen erhebliche Schwankungen auf.

Besonders auffällig ist die bis zu einer Zehnerpotenz höhere Stickstofffracht in nahezu allen kleineren Stillgewässern des Erdfallseegebietes einschließlich des Heideweiher. Diese Gewässer liegen allesamt an der südlichen Grenze des Naturschutzgebietes in der Nähe landwirtschaftlicher Nutzflächen und sind dem aus Süden einströmenden stickstoffreichen Grundwasser in stärkerem Maße ausgesetzt als die von landwirtschaftlichen Nutzflächen entfernter liegenden Heidekolke am Großen Heiligen Meer (vgl. Abb. 2 u. 24). Zu Zeiten ergiebiger Niederschläge können z.B. innerhalb des Heidekolkes 5 durch einströmendes ionenarmes Sickerwasser von der Heide und durch aus Süden einströmendes nährstoffreiches Grundwasser von den Ackerfluren Leitfähigkeitsgradienten von über 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf wenige Meter Distanz auftreten, so daß am Nordostufer des Heidekolkes Leitfähigkeiten um 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und am Südwestufer von über 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ gemessen werden können. Dieses Beispiel verdeutlicht die Beeinflussung der physikochemischen Parameter durch sicker- und grundwasservermittelte Stoffeinträge aus der Umgebung; sie ist bei den Kleingewässern besonders wirksam, sie läßt sich aber auch bereits am Erdfallsee belegen (vgl. Kap. 2).

Neben Grundwassereinflüssen und den aus den Sedimenten freigesetzten organischen Säuren sind für die Parameterschwankungen sowohl saisonale allochthone Depositionen aus der peripheren Gehölzvegetation (Laubfall) als auch Schwankungen der Wasserführung verantwortlich. Neben Verdunstungseffekten und den damit verbundenen Erhöhungen der gelösten Stoffspezies wirken sich auch vermehrt die Einträge von huminsäurereichen Sickerwässern aus den Uferbereichen in die abgesenkten Heidekolke aus und führen so zu gravierenden Erhöhungen des organischen Anteils im Wasser. Das sind Prozesse, die auch ohne das Zutun des Menschen von Natur aus ablaufen. Es stellt sich in diesem Zusammenhang jedoch die Frage, ob die im Erdfallseegebiet gegenüber den am Großen Heiligen Meer erhöht auftretenden organischen Substanzen möglicherweise anthropogen durch eine höhere Biomassenproduktion dystropher Arten im Zusammenwirken mit erhöhten Stickstoff-, Kalium- und Erdalkaliionenfrachten auftreten.

Bisher haben aufgrund der lokal unterschiedlichen abiotischen Standortfaktoren die größeren Heidekolke fast ausnahmslos eine Entwicklung von der oligotrophen zur dystrophen Stufe erfahren, während die kleineren Kolke bereits vor 50 Jahren einen überwiegend dystrophen Charakter aufwiesen (BUDE 1942). Heute hat eine Eutrophierung der Kleingewässer im Erdfallsee-Gebiet besonders durch erhöhte Einträge von Nitrat- und Ammoniumstickstoff sowie von Alkali- und Erdalkaliionen die mesotrophen Anteile der Heidekolk-Vegetation erhöht, und es kündigt sich trotz der z.T. hohen Huminsäuregehalte

(KMnO₄-Verbrauch bis über 400 mg/l, vgl. Tab. 1) eine Destabilisierung der dystrophen Verhältnisse an, die sich hydrochemisch (z.B. durch erhöhte Leitfähigkeiten und Konzentrationen der Erdalkalitionen), aber auch pflanzensoziologisch manifestiert. Die dystrophen Vegetationskomplexe des *Sphagnetum cuspidato-obesi* und der *Eriophorum angustifolium*-Gesellschaft werden zurückgedrängt und zunehmend durch *Juncus effusus*-Bestände ersetzt (Tab. 10). Sie werden begleitet von *Eleocharis palustris* und von *Molinia*-Bulten innerhalb der amphibischen Zone sowie vom *Nymphaeetum albo-minoris* innerhalb der aquatischen Zone (vgl. Abb. 32 u. 33).

Tab. 10: *Sphagnetum cuspidatum*-*Eriophorum angustifolium*-Gesellschaft am Heidekolk 7 (vgl. Abb. 24).

Laufende Nummer	1	2	3	4
Aufnahmefläche (m ²)	6	5	2	6
Wassertiefe (cm)	20	0	10	0
Gesamtdeckung (%)	60	40	20	40
Krautschicht (%)	60	40	20	30
Moosschicht (%)	5	<5	<5	10
Artenzahl	6	6	6	4
C: <i>Eriophorum angustifolium</i>	3	3	2	3
KC: <i>Carex nigra</i>	2	1	.	.
D.-Arten typ. Ausbildung: <i>Sphagnetum cuspidatum</i> fo. <i>plumosum</i>	2	.	.	.
<i>Sphagnetum fimbriatum</i>	.	1	1	.
<i>Sphagnetum fallax</i>	.	.	.	2
Störzeiger: <i>Juncus effusus</i>	+	1	1	+
<i>Eleocharis palustris</i>	+	.	.	.
Begleiter: <i>Molinia caerulea</i>	2	2	1	+
<i>Juncus bulbosus</i>	.	.	+	.
<i>Eleocharis multicaulis</i>	.	.	+	.
<i>Erica tetralix</i>	.	+	.	.

Weitere deutliche Hinweise auf eine zunehmende Eutrophierung liefern die in den kleineren Stillgewässern des Erdfallseegebietes insgesamt erhöhten Konzentrationen an Kalium-, Kalzium- und Magnesiumionen. Sie bestimmen wesentlich die elektrolytische Leitfähigkeit, die besonders bei Kolk 5 mit seinen ausgedehnten *Juncus effusus*-Beständen mit bis zu 383 µS/cm stark erhöht ist. Der seitens des Wasserregimes sehr instabile aquatische Bereich wird vorzugsweise von *Molinia*-Bulten eingenommen. Der von der L 504 beeinflusste Heidekolk 4 weist ebenfalls eine deutlich erhöhte Leitfähigkeit von meist über 100 µS/cm auf - die Vegetation wird hier weitgehend von Grünalgen (z.B. *Oedogonium* sp.) gebildet - weshalb beide Gewässer nicht mehr als dystroph einzustufen sind. Auch der Heideweiher kann aufgrund seiner erhöhten Stickstoffwerte in Verbindung mit relativ nied-

rigen Konzentrationen an organischen Substanzen nicht als streng dystroph bewertet werden; die pflanzensoziologischen Befunde stehen im Einklang mit den vorgefundenen chemischen Milieubedingungen.



Abb. 32: Dominanzbestände von *Juncus effusus* an einem Heidekolk südöstlich des Erdfallsees. Die dystraphenten Vegetationskomplexe des *Sphagnetum cuspidato-obesi* und der *Eriophorum angustifolium*-Gesellschaft werden zunehmend von *Juncus effusus*-Beständen ersetzt, in denen sich nur noch *Eleocharis palustris* behaupten kann.

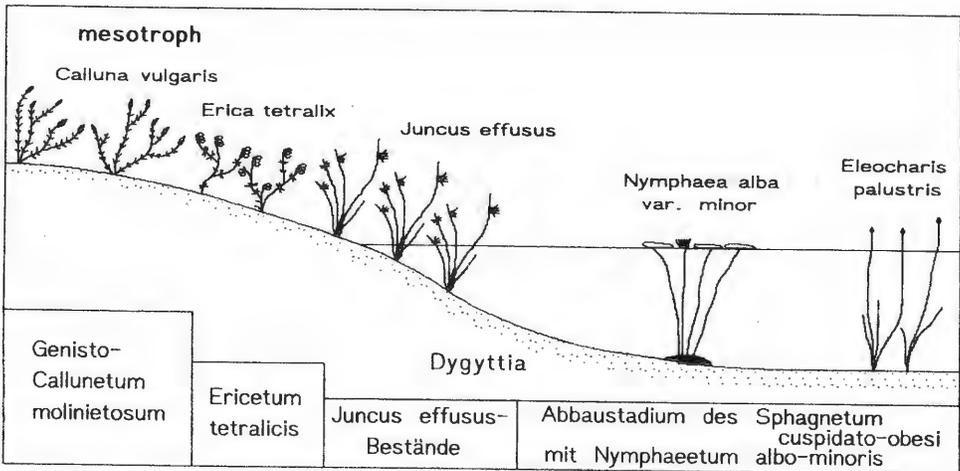


Abb. 33: Vegetationszonierung am Heidekolk 7 im NSG „Heiliges Meer“ bei Hopsten in Westfalen aus dem Jahr 1994.

Auch ein im Nordwesten des Großen Heiligen Meeres gelegener Heidekolk (Kolk 1 in Abb. 24) muß aufgrund seines instabilen Wasserregimes ebenfalls einer gesonderten Betrachtung unterzogen werden. Hier kommt es zu Zeiten der Austrocknung (tiefer Grundwasserstand) zu erhöhten Mineralisationsraten, die einen sprunghaften Anstieg der Nährstoffe (NO_3^- ; PO_4^{3-}) bewirken. Der über längere Zeiträume trockenfallende Gewässerboden besitzt keine eigenständige Vegetation und wird von *Molinia*-Beständen eingenommen. Nur wenige Heidekolke des Gebietes, z.B. Heidekolk 2, 3 und 6 (vgl. Abb. 24, 34 u. 35), sind heute noch als dystroph zu bezeichnen (vgl. Tab. 11-14).

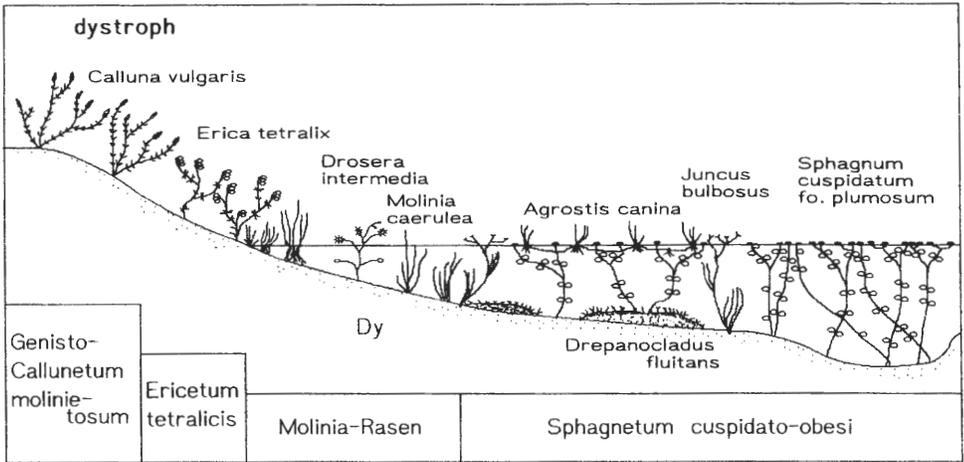
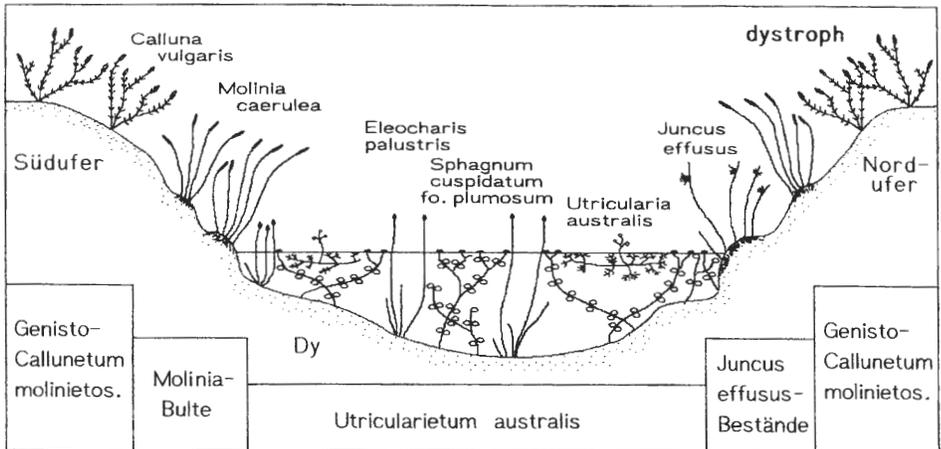


Abb. 34: Vegetationszonierung am Heidekolk 2 im NSG „Heiliges Meer“ bei Hopsten in Westfalen aus dem Jahr 1994.

Abb. 35: Vegetationszonierung am Heidekolk 6 im NSG „Heiliges Meer“ bei Hopsten in Westfalen aus dem Jahr 1994.



Tab. 11: *Utricularietum australis* am Heidekolk 6 (vgl. Abb. 24).

Laufende Nummer	1	2	3
Aufnahmefläche (m ²)	3	3	2
Wassertiefe (cm)	5	0	30
Gesamtdeckung (%)	100	80	80
Krautschicht (%)	30	70	20
Moosschicht (%)	100	20	40
Artenzahl	5	5	2
AC <i>Utricularia australis</i>	2	4	2
Störzeiger <i>Eleocharis palustris</i>	2	2	.
<i>Juncus effusus</i>	+	+	.
Begleiter <i>Sphagnum cuspidatum</i> fo. <i>plumosum</i>	5	2	4
<i>Sphagnum fimbriatum</i>	1	1	.



Abb. 36: Westufer des Großen Heiligen Meeres. Das *Myriophyllo-Nupharetum* besitzt im südlichen Bereich des Westufers größere Bestände von *Polygonum amphibium* in der Form *natans* und geht landeinwärts in ein *Carici canescentis-Agrostietum caninae* über, das reich an *Potentilla palustris* ist. Sphagnumreiche, meso- bis dystrophe Bereiche mit *Drosera intermedia*, *Rhynchospora alba*, *R. fusca*, *Juncus bulbosus* und *Eriophorum angustifolium* ziehen hier weit landeinwärts und werden von *Myrica gale*-Beständen umrahmt.

42 Tab. 12: *Sphagnetum cuspidato-obesi* an den Heidekolken 2, 3, 4 u. 7 (vgl. Abb. 24).

Laufende Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
Aufnahmefläche (m ²)	15	8	15	15	18	30	9	20	30	15	20	25	4	2	2	2	6	25	30	30	30	30	3	3	5	20	16	3	3	5	9		
Wassertiefe (cm)	0	5	15	5	5	20	5	20	20	20	20	30	25	5	5	0	5	30	30	30	25	25	60	50	40	50	40	40	5	5	10		
Gesamtdeckung (%)	95	90	100	95	80	95	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	20	15	20	30	40	70	100	
Krautschicht (%)	70	50	5	70	60	60	40	30	90	40	50	40	20	30	70	30	30	10	30	70	20	20	-	-	20	15	20	30	30	70	-		
Moosschicht (%)	40	70	100	40	40	90	70	100	70	100	100	100	100	90	60	90	80	100	100	100	100	100	100	100	-	-	-	-	20	-			
Gewässer	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	7	7	7	7	4	4	
Artenzahl	6	7	6	6	6	6	4	6	6	4	5	5	4	5	5	5	5	4	4	4	4	4	3	2	2	2	1	1	2	3	5	1	
AC																																	
<i>Sphagnum cuspidatum</i>	3	4	5	3	3	5	4	5	4	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5								
fo. <i>plumosum</i>														2				2	2														
<i>Sphagnum auriculatum</i> fo. <i>obesum</i>																																	
D.-Arten der Eulitoral-Ausbildung:																																	
<i>Molinia caerulea</i>	1	3	1	1	1		2	2	1	1					1		1																1
<i>Drosera intermedia</i>	2	2		2	2	1	2	+	2		1	1																					
<i>Carex nigra</i>	3	1		3	4	2							1			+																	
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>														1	1	1	1														+		+
<i>Juncus bulbosus</i>	1	1	1	1	1	3	1	2	3	3	2	2	2	3	2	3	3	2	1	2	2	2								2	3		
D.-Arten des Abbaustadiums																																	
<i>Eleocharis palustris</i>																											2	2	2	3			
<i>Oedogonium spec.</i>																															2	1	5
Begleiter																																	
<i>Agrostis canina</i>			+			2		+	4		3	2			4	1	1			1	+									2	3		
<i>Drepanocladus fluitans</i>	2	1	5		1	2		4	1	1	3	3	2					1	1	2	2	2	2	2									
<i>Eleocharis multicaulis</i>														1																			
<i>Gymnocolea inflata</i>			+																														
<i>Rhynchospora alba</i>		1		+																													
<i>Carex lasiocarpa</i>																										1							
Nr. 1-24: <i>Sphagnetum cuspidato-obesi</i> , typische Ausbildung																																	
Nr. 1-22: <i>Sphagnetum cuspidato-obesi</i> , Ausbildung des Eulitorals																																	
Nr. 1-17: <i>Sphagnetum cuspidato-obesi</i> , Ausbildung des oberen Eulitorals																																	
Nr. 18-22: <i>Sphagnetum cuspidato-obesi</i> , Ausbildung des unteren Eulitorals																																	
Nr. 23-24: <i>Sphagnetum cuspidato-obesi</i> , Ausbildung des Sublitorals ohne <i>Juncus bulbosus</i>																																	
Nr. 25-31: Abbaustadium des <i>Sphagnetum cuspidato-obesi</i>																																	
Nr. 25-28: Abbaustadium des <i>Sphagnetum cuspidato-obesi</i> mit <i>Eleocharis palustris</i>																																	
Nr. 29-31: Abbaustadium des <i>Sphagnetum cuspidato-obesi</i> mit <i>Oedogonium spec.</i>																																	

Tab. 14: *Juncus effusus*-Dominanzbestände an den Heidekolken 5 u. 7 (vgl. Abb. 24).

Laufende Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8
Aufnahmefläche (m ²)	16	7	14	6	10	4	20	7
Wassertiefe (cm)	20	10	0	20	5	0	0	10
Gesamtdeckung (%)	90	90	70	60	70	60	60	40
Krautschicht (%)	90	90	70	60	70	60	50	40
Moosschicht (%)	5	<5	<5	<5	-	<5	20	<5
Gewässer	7	7	7	7	7	7	5	7
Artenzahl	2	2	2	4	4	6	7	5
AC:								
<i>Juncus effusus</i>	5	5	4	4	4	2	3	3
artenarme Ausbildung mit:								
<i>Sphagnum fimbriatum</i>	2	1	+	+	.	.	.	.
artenreiche Ausbildung mit:								
<i>Molinia caerulea</i>	.	.	.	.	.	2	2	1
<i>Eriophorum angustifolium</i>	.	.	.	.	.	.	.	2
<i>Sphagnum cuspidatum</i> fo. <i>plumosum</i>	.	.	.	.	.	.	.	1
<i>Sphagnum papillosum</i>	.	.	.	.	.	.	1	.
Begleiter								
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	.	.	.	+	2	3	.	.
<i>Myrica gale</i>	.	.	.	.	.	.	2	.
<i>Sphagnum fallax</i>	.	.	.	.	.	.	1	.
<i>Odontoschisma sphagni</i>	.	.	.	.	.	.	+	.
<i>Polytrichum commune</i>	.	.	.	.	.	.	1	.
<i>Quercus robur</i> (Str.)	.	.	.	.	1	.	.	.
<i>Betula pubescens</i> (Str.)	.	.	.	.	1	.	.	.
<i>Carex nigra</i>	.	.	.	.	.	.	+	.
<i>Dryopteris carthusiana</i>	.	.	.	.	.	.	+	.
<i>Hypnum jutlandicum</i>	.	.	.	.	.	1	.	.
<i>Solanum dulcamara</i>	.	.	.	.	.	.	.	1
<i>Sphagnum palustre</i> fo. <i>squarrosum</i>	.	.	.	+	.	.	.	.
Nr. 1-5: <i>Juncus effusus</i> -Dominanz -Bestände, artenarme Ausbildung								
Nr. 6-8: <i>Juncus effusus</i> -Dominanz-Bestände, artenreiche Ausbildung								

Tab. 13: *Eleocharitetum multicaulis* an den Heidekolken 5 u. 7 (vgl. Abb. 24).

Laufende Nummer	1	2	3	4	5
Aufnahmefläche (m ²)	3	2	6	3	4
Wassertiefe (cm)	10	10	10	25	20
Gesamtdeckung (%)	70	70	50	40	20
Krautschicht (%)	60	60	40	40	20
Moosschicht (%)	20	20	10	<5	<5
Gewässer	5	5	7	7	7
Artenzahl	4	4	5	6	3
AC					
<i>Eleocharis multicaulis</i>	4	4	2	3	1
D.-Arten sphagnetosum:					
<i>Sphagnum cuspidatum</i> fo. <i>plumosum</i>	2	2	2	1	1
<i>Sphagnum auriculatum</i> fo. <i>obesum</i>	+	.	.	.	.
<i>Molinia caerulea</i>	.	.	2	.	.
<i>Eriophorum angustifolium</i>	.	+	.	1	.
Begleiter					
<i>Solanum dulcamara</i>	+	+	.	.	.
<i>Carex nigra</i>	.	.	3	1	2
<i>Juncus effusus</i>	.	.	+	1	.
<i>Eleocharis palustris</i>	.	.	.	1	.

4. Einfluß allochthoner Nährstoffe auf die Trophie der Seen

Legt man den Zeitraum der letzten Erdfallereignisse bis heute für die Sukzession der größeren Stillgewässer zugrunde - Erdfallsee ca. 100 Jahre (vgl. auch Abb. 9), Großes Heiliges Meer ca. 1000 Jahre und Kleines Heiliges Meer ca. 2000 Jahre - so läßt sich in dieser Reihenfolge eine ständige Zunahme der Ionenkonzentrationen anhand der elektrolytischen Leitfähigkeit beobachten: Der Erdfallsee besitzt heute ca. 145 $\mu\text{S}/\text{cm}$, das Große Heilige Meer ca. 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und das Kleine Heilige Meer ca. 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Abb. 7). Diese Zunahme der Leitfähigkeit mit zunehmendem Alter der Seen läßt auf eine natürliche Nährstoffzunahme durch Gewässeralterung schließen (POTT 1980, 1983).

Seit 1994 werden im Pelagial und Litoral des Großen Heiligen Meeres und des Erdfallsees monatliche Bestimmungen der im Wasser gelösten Ionen durchgeführt und mit den zeitgleich erfolgenden Grundwasseranalysen verglichen. Aus den ersten Ergebnissen kann fest-

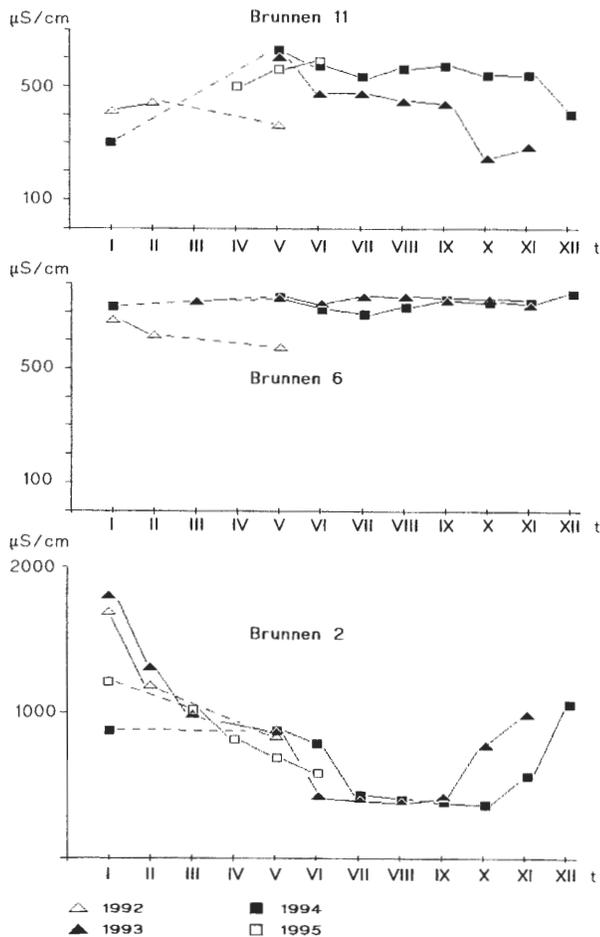


Abb. 37: Elektrolytische Leitfähigkeit ($\mu\text{S}/\text{cm}$) im oberflächennahen Grundwasser (bei 2,5m) an landwirtschaftlichen Nutzflächen (Brunnen 11), an der Meerbecke (Brunnen 6) und an der Landstraße 504 (Brunnen 2).

gestellt werden, daß auch das Grundwasser im Umfeld des Großen Heiligen Meeres insgesamt ionenreicher als jenes im Umfeld des Erdfallsees ist, weshalb man an Wechselwirkungen zwischen dem Wasser der größeren Seen und dem benachbarten Grundwasser denken kann (Pust 1993). Leitfähigkeitswerten des Grundwassers von zeitweise über 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im Bereich des Großen Heiligen Meeres stehen Werte von bis zu 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im Süden des Erdfallsees gegenüber. Die Leitfähigkeit des Grundwassers liegt demnach deutlich höher als jene der Seen. Zu den Zonen mit erhöhter Leitfähigkeit gehören jedoch besonders solche Grundwasserbereiche, die allochthone Stoffeinträge z.B. von Stickstoff- und Phosphorverbindungen, aber auch von Kalium-, Kalzium- und Magnesiumionen aus landwirtschaftlichen Nutzflächen (bis 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$), Schwefel- und Schwermetallverbindungen der Industrie über die Meerbecke (bis 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) und Schwermetall- und Salzfrachten von der Landstraße L 504 (bis 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) erfahren (Abb. 37).

Wesentlich höher als diese Leitfähigkeitsunterschiede fallen jedoch kleinräumige Differenzierungen der Ionenkonzentrationen im Grundwasser innerhalb der einzelnen Teilgebiete aus. So können zeitgleich im Grundwasser an beiden Seen Leitfähigkeitswerte von nur ca. 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ festgestellt werden (Abb. 38), während nur wenige Meter entfernt bereits eine Erhöhung um mehrere 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ erfolgt. Niedrige Werte der Leitfähigkeit kommen im Grundwasser besonders unter Heideflächen vor, im Westen des Großen Heiligen Mee-

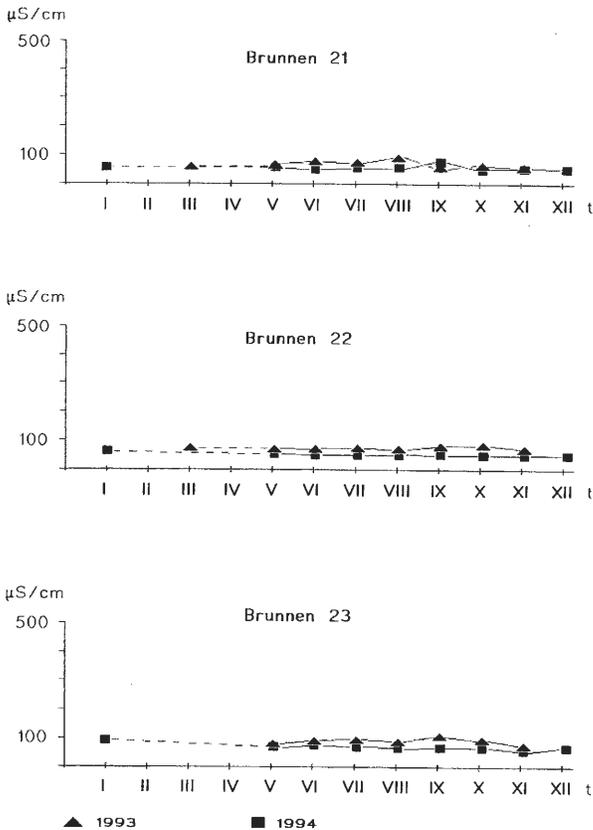


Abb. 38: Elektrolytische Leitfähigkeit ($\mu\text{S}/\text{cm}$) im oberflächennahen Grundwasser (bei 2,5m) unter der Heide am Westufer des Großen Heiligen Meeres (Brunnen 21 und 22) und am Südostufer des Erdfallsees (Brunnen 23).

res und im Osten des Erdfallsees; sie repräsentieren Grundwasser der oligotrophen Stufe, da das Grundwasser hier weitgehend von Regenwasser gespeist wird. Aber auch unter Weideland, z.B. im Süden des Erdfallsees, lassen sich ionenarme Grundwasserbezirke finden, deren Leitfähigkeit meist unter 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ liegt.

Neben den für beide Seen typischen Unterschieden in den Ionenkonzentrationen des Pelagials (vgl. Abb. 19-23) lassen sich auch kleinräumige Differenzierungen innerhalb der Litoralzonen an beiden Seen feststellen, die im Bereich des Pelagials jedoch bisher nicht feststellbar waren. Die Unterschiede treten nur zeitweise, besonders auffallend im Herbst, zwischen dem West- und Ostufer des Großen Heiligen Meeres in Erscheinung. Jene Uferbereiche, die unmittelbar an Bruchwaldregionen angrenzen und die im Bereich ionenreichen Grundwassers stehen, zeigen zeitweise Erhöhungen der Alkali- und Erdalkaliionen zusammen mit niedrigeren Sauerstoffkonzentrationen, hohen CO_2 -, Eisen- und Manganwerten gegenüber den anderen Uferbereichen und dem Pelagial. Hierdurch ergeben sich Hinweise auf einen Einstrom von reduzierendem, ionenreichen Sicker- und Grundwasser aus der Bruchwaldregion, das ebenfalls reich an CO_2 , Eisen und Mangan ist. Diese Schwankungen treten besonders im Herbst ab September auf, so daß hier eine vegetationsabhängige Größe als Ursache vermutet werden kann, z.B. der zusätzliche Eintrag organischen Materials durch Laubfall in das Sicker- und Grundwasser. Litoralzonen mit zeitweisen Erniedrigungen der Leitfähigkeit können an solchen Stellen beobachtet werden, die an Heidelandschaft angrenzen und an denen ionenarmes Grundwasser ansteht. So war im Dezember 1994 die Leitfähigkeit am Westufer des Großen Heiligen Meeres (angrenzende Heide) mit 274 $\mu\text{S}/\text{cm}$ deutlich erniedrigt und am Südufer (angrenzender Erlenbruchwald) mit 338 $\mu\text{S}/\text{cm}$ deutlich erhöht gegenüber dem Pelagial mit 283 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ähnliche Bedingungen konnten auch am 26. Oktober 1995 festgestellt werden; zu diesem Termin lag die Leitfähigkeit am Westufer des Großen Heiligen Meeres bei 245 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und am Ostufer bei 310 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Solche Phänomene bedürfen künftig einer längerfristigen Überprüfung, da sie Litoralbereiche kennzeichnen, an denen ein intensiver Stoffaustausch mit der Umgebung erfolgt und wo die Wahrscheinlichkeit allochthoner Stoffeinträge besonders groß ist. Dies sind aber gerade die Stellen, von denen allochthone Eutrophierungsprozesse ausgehen können.

Differenzierungen treten auch an den Uferbereichen des Erdfallsees auf; besonders auffallend sind Leitfähigkeitserhöhungen von 170 $\mu\text{S}/\text{cm}$ am Südwestufer gegenüber 146 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im Pelagial, während die Verhältnisse am Ost- und Südostufer, im Bereich angrenzender Heideflächen, sich nur unwesentlich von den Verhältnissen des Pelagials unterscheiden. Auch hier müssen künftige Untersuchungen ansetzen.

Wie beim Großen Heiligen Meer, so sind auch beim Erdfallsee an den Unterschieden der Leitfähigkeit im Litoral maßgeblich Erdalkaliionen beteiligt, insbesondere Kalziumionen; aber auch erhöhte Konzentrationen von Stickstoff in Form von Ammonium geben in Verbindung mit reduzierten Sauerstoffgehalten und erhöhten CO_2 -Werten Hinweise auf Sicker- und Grundwassereinflüsse innerhalb jener Litoralbereiche, an denen die Leitfähigkeit deutlich erhöht ist. Eine Abnahme der Leitfähigkeit durch den Einfluß einströmenden ionenarmen Grundwassers ließ sich mit Sicherheit bisher nur am Westufer des Großen Heiligen Meeres nachweisen (vgl. Abb. 36).

Neben der Nährstoffakkumulation durch die Phytomasse des Pelagials lassen sich bei den Stillgewässern des NSG „Heiliges Meer“ demnach auch allochthone Stoffzunahmen über die Litoralzone beobachten, die vor allem aus Sickerwasser und oberflächennahem Grundwasser vermittelt werden. Da der überwiegende Anteil des die Seen umgebenden Grundwassers erhöhte Ionenfrachten aus anthropogenen Quellen erhält, die weit oberhalb der z.Z. im Wasser der Seen gemessenen Werte liegen, kann besonders der Zufluß von Grundwasser in die Seen des Schutzgebietes eine erhebliche allochthone Nährstofferrhöhung be-

wirken und damit zu einer anthropogenen Beschleunigung der von Natur aus nur langsam ablaufenden Eutrophierung führen. Eine anthropogene Beschleunigung der Nährstoffzunahme findet besonders am Erdfallsee, der sich noch in der Anfangsphase der Sukzession befindet und natürlicherweise nährstoffarm ist, durch aus südlicher Richtung einströmendes und durch Nährstoffe von Maisäckern belastetes Grundwasser statt. Derzeit scheint besonders das Südwestufer des Erdfallsees von grundwasservermittelten Nährstoffeinträgen betroffen zu sein. Neben den klassischen Eutrophierungsparametern wie Stickstoff- und Phosphorverbindungen spielt aber auch die anthropogene Zunahme von Alkali- und Erdalkalitionen innerhalb der heute bereits selten gewordenen oligotrophen Gewässer der pleistozänen Sandlandschaften eine große Rolle. Das Forschungsprojekt wird hier Klarheit schaffen.

Auffallend ist das von Uferlokalitäten weitgehend unabhängige Milieu innerhalb des Pelagials, das statistisch absicherbare Differenzierungen nur im Vertikalprofil während der Stagnationsphasen zeigt (vgl. Abb. 22 u. 23); Differenzierungen der Ionengehalte in Abhängigkeit von verschiedenen Lokalitäten, wie innerhalb der Litoralzonen gegeben, ist im Pelagial auch während der Sommerstagnation nicht möglich. Dieser Befund liefert Hinweise dafür, daß an allochthonen Stoffeinträgen Tiefen-Grundwasser im Bereich der Profundalzone, wenn überhaupt, nur wenig beteiligt ist, und daß der überwiegende Teil durch Oberflächenwasser, Sickerwasser und oberflächennahes Grundwasser über die Litoralzone in das oberflächennahe Epilimnion eingetragen wird, wo aufgrund der auch im Sommer wirksamen Zirkulation (Teilzirkulation innerhalb des Epilimnions) die von außen eindringenden Stoffe bereits innerhalb der oberflächennahen Wasserschichten gründlich verteilt werden, so daß keine uferbezogenen signifikanten Unterschiede im Pelagial feststellbar sind.

Als Ursache für die vorgefundenen Bedingungen sind z.B. die bis 8m mächtigen Sedimente am Seegrund des Großen Heiligen Meeres denkbar, die für das Grundwasser im Bereich des Profundals als Barriere wirken könnten. Während der Sommermonate ist ein auf die Litoralzone beschränkter Grundwassereinstrom aber auch ohne diese Annahme zu erwarten, da das oft bis über 20° C erwärmte Wasser des Epilimnions leichter als das relativ schwerere ca. 8-10° C warme oberflächennahe Grundwasser ist und durch den Dichtegradient gerade hier der Grundwassereinstrom begünstigt wird. Im Hypolimnion liegt im Sommer in beiden Seen die Wassertemperatur bei 10° C, nahe der Grundwassertemperatur, weshalb sich hier ein grundwassereintrittsbegünstigender Dichtegradient nicht einstellt. Dies erklärt auch besser die Verhältnisse am sedimentarmen Erdfallsee, wo bisher ebenfalls nur Hinweise auf den Einstrom von oberflächennahem Grundwasser gewonnen werden konnten, als die Annahme einer Barriere für den Einstrom von Tiefengrundwasser durch mächtige Schlammablagerungen. Auch hierzu wird das Projekt weitere Informationen liefern, insbesondere interessiert die Frage, ob ein von der Jahreszeit abhängiger Grundwassereinfluß besteht.

5. Die Grundwasserverhältnisse und ihre Wechselbeziehungen zu den Seen

Innerhalb der flachen pleistozänen Sandlandschaften Nordwestdeutschlands liegen natürlicherweise hohe Grundwasserstände mit geringmächtigen Sickerwasserzonen vor. Diese Verhältnisse sind im NSG „Heiliges Meer“ durch die Lage innerhalb einer Senkungszone (vgl. THIERMANN 1975) besonders ausgeprägt. Bis in das späte Frühjahr und in den Sommer hinein kann es hier zu wasserübersättigten Böden kommen. Gleichmäßige, hochanstehen-

de Grundwässer mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten, gering schwankende Temperaturen (Abb. 39) und geringe Stoffeinträge von der Oberfläche (z.B. von Sauerstoff, Stickstoff, Orthophosphat, Alkali- und Erdalkalitionen) charakterisieren die natürlichen Bedingungen dieser Zone, die daher von Natur aus sauerstoffarmes, meist reduzierendes oligotrophes Grundwasser enthält. Da unter diesen Bedingungen bereits innerhalb der Bodenhorizonte die Mineralisierung stark verlangsamt abläuft, sind diese pleistozänen Sandlandschaften bei hohem Grundwasserstand normalerweise nährstoffarm (geringe Stickstoff- und Phosphor-, Erdalkali- und Alkaliionengehalte des sandigen Untergrundes) und begünstigen innerhalb der Senken bei typischerweise hohem Grundwasserstand die Niedermoorbildung. Eichenbirkenwälder vom Typ des *Betulo-Quercetum* auf trockenem Boden bzw. mit Moorbirkenbrüchen oder Erlenbrüchen mit an oligotrophe Stillgewässer angrenzen-

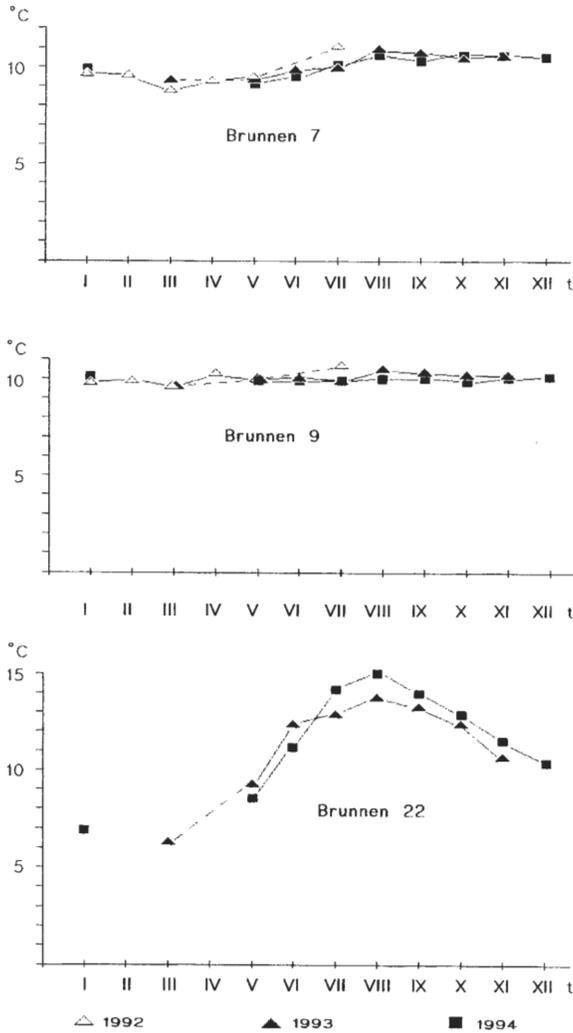


Abb. 39: Wassertemperatur (°C) im oberflächennahen Grundwasser (bei 2,5m) unter Bruchwald im Nordosten (Brunnen 7 und 9) und unter Heide im Westen des Großen Heiligen Meeres (Brunnen 22).

den Ausbildungen eines *Betuletum pubescentis* bzw. eines *Carici elongatae-Alnetum betulosum pubescentis* an älteren mesotrophen Seen würden sich an ungestörten Standorten einfinden.

Bereits die mittelalterliche Weidewirtschaft hat zu gravierenden Veränderungen innerhalb der Vegetation, der Böden und des Grundwassers geführt. Großflächige Waldrodungen und die Anlage von Entwässerungsgräben mit nun größeren Sickerwasserzonen führten zu einer Begünstigung des Sauerstoffzutritts in die oberen Bodenschichten und damit zu einer Erhöhung der Mineralisierung organischen Materials. Die Mineralisation des organischen Stickstoffs und die Bildung von Orthophosphat konnte nun auch vermehrt im Sicker- und Grundwasser ablaufen; die Phosphorspezies wurde aber weitgehend in Form von Ortstein (hier vor allem FePO_4) innerhalb oberflächennaher, sauerstoffreicher Horizonte festgelegt (vgl. SCHACHTSCHABEL et. al. 1992). Erst die moderne Landwirtschaft hat in der letzten Hälfte dieses Jahrhunderts die Kultivierung dieser Naßgebiete über Absenkungen des Grundwasserspiegels durch Drainageanlagen und durch Umwandlung kleinerer Weideflächen in ausgedehnte Äcker derart forciert, daß bereits im zeitigen Frühjahr eine maschinelle Bear-

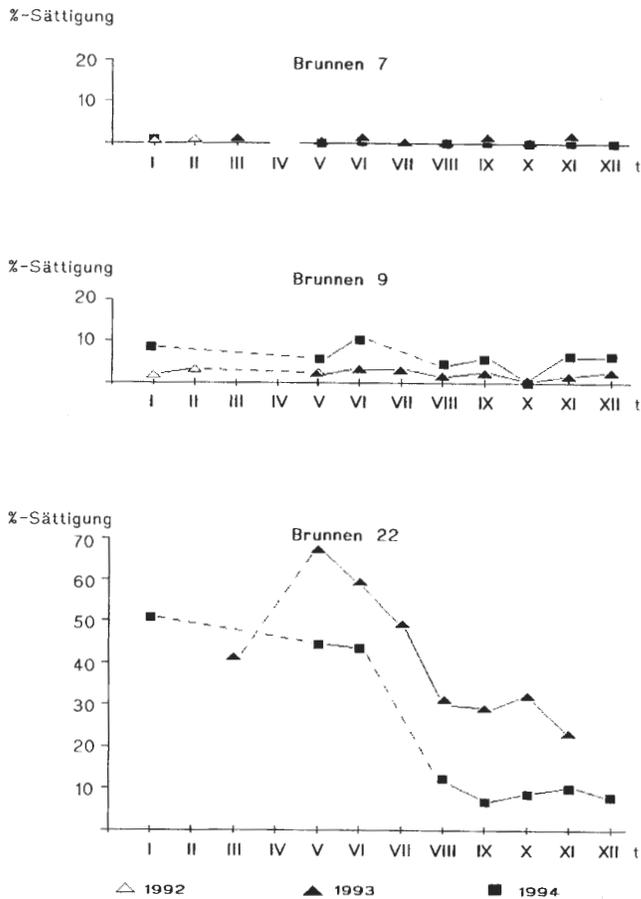


Abb. 40: Sauerstoffsättigung (%) im oberflächennahen Grundwasser (bei 2,5m) unter Bruchwald im Nordosten (Brunnen 7 und 9) und unter Heide im Westen des Großen Heiligen Meeres (Brunnen 22).

beitung der heute meist als Maisäcker genutzten Flächen möglich ist. Die teilweise mächtigen Ortsteinschichten der alten Weidekulturen wurden untergepflügt, aber auch großflächige Niedermoorgebiete fielen dem Ackerbau zum Opfer. Im Zuge dieser Entwicklung entstanden stark anthropogen geprägte Landschaftsstrukturen, die sich in der Natur ohne Einwirkung des Menschen nirgendwo ausgebildet haben (vgl. HABER et al. 1992) und deshalb als naturfremde Landschaftselemente, vergleichbar mit Industrieanlagen, zu werten sind. Das Wirkungsspektrum dieser Landschaften (z.B. Nivellierung ökologisch wirksamer Parameter) bleibt nicht lokal beschränkt: Erhöhte Nährstoffeinträge aus Düngemittelgaben und Gülleverrieselung über den Luft-, Grund- und Sickerwasserpfad, aber auch die erhöhte Mineralisierung natürlich abgelagerter organischer Sedimente (z.B. durch Sauerstoffeinträge und pH-Wert-Stabilisierung im neutralen Bereich durch Kalken) führen heute großflächig zu fortschreitenden Veränderungen des Nährstoffhaushaltes terrestrischer und aquatischer Ökosysteme, auch und besonders innerhalb des nicht bewirtschafteten Naturschutzgebietes „Heiliges Meer“.

Auch das kleinräumige Nebeneinander von natürlichen sauerstoffarmen, heute aber phosphat- und ammoniumstickstoffhaltigen Grundwasserbereichen mit hohen Grundwasserständen im unmittelbaren Kontakt zu den Bruchwaldregionen der größeren Stillgewässer (Großes Heiliges Meer, Erdfallsee) und von sauerstoff- und nitratreichen Grundwässern

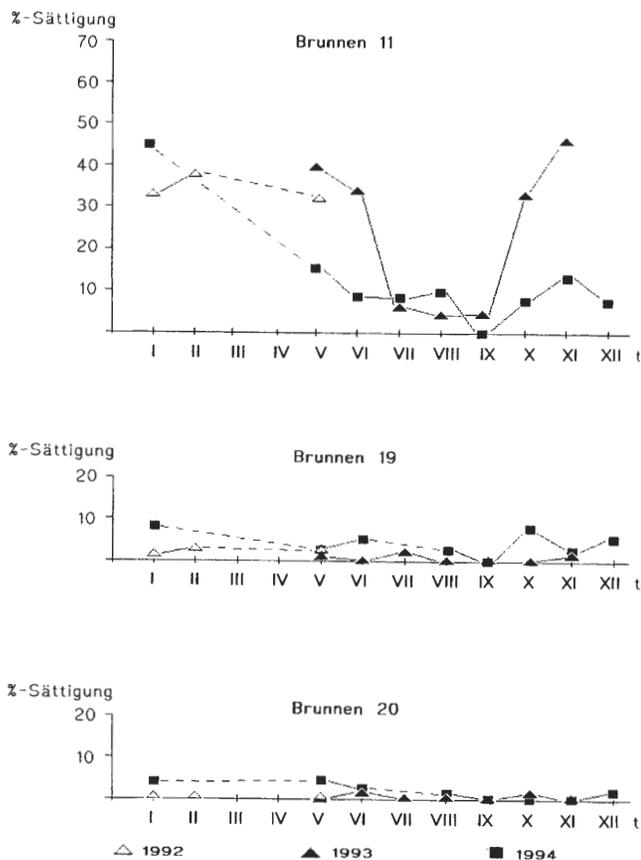


Abb. 41: Sauerstoffsättigung (%) im oberflächennahen Grundwasser (bei 2,5m) an einem Maisacker (Brunnen 11) und unter Bruchwald im Norden des Erdfallsees (Brunnen 19 und 20).

aus der Landwirtschaft (z.B. südöstlich vom Erdfallsee; (vgl. auch Abb. 39-43) führt zu erheblichen Eutrophierungsproblemen, die besonders innerhalb der Senkungszone des Naturschutzgebietes gegeben sind. Phosphatgehalte von bis zu 2 mg/l im reduzierenden Grundwasser innerhalb der Bruchwaldregionen und Nitratgehalte bis über 200 mg/l im oxidierenden Grundwasser der landwirtschaftlichen Nutzflächen veranschaulichen das hohe Nährstoffangebot, das besonders durch die enge Verzahnung beider Grundwasserkompartimente an den Uferregionen der Stillgewässer als stark wirksamer eutrophierender Faktor hervorgeht.

Die Heideflächen westlich des Großen Heiligen Meeres und östlich des Erdfallsees nehmen innerhalb dieser Betrachtung eine Sonderstellung ein. Sie stellen als altes Kulturland sowohl hinsichtlich der Vegetation als auch der Grundwasserverhältnisse ein anthropogen geprägtes Umfeld dar - das Grundwasser besitzt dort zeitweise bis in 10m Tiefe einen erhöhten Sauerstoffgehalt mit bis zu 50% Sättigung – doch entbehrt es weitgehend jene Nährstofffrachten, die im unmittelbaren Umfeld der Ackerflächen auftreten. Leitfähigkeiten von meist unter 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und entsprechend geringe Gehalte an Alkali- und Erdalkalitionen sind typisch; Phosphat ist in nur niedrigen Konzentrationen, meist unter 0,05 mg/l, feststellbar; die Stickstoffspezies Nitrat kann jedoch zeitweise Konzentrationen von 10 mg/l erreichen. Hier sollen künftige Messungen im Niederschlagswasser Auskunft darüber geben, inwieweit sich Stickstoffdepositionen aus der Luft im Grundwasser auswirken

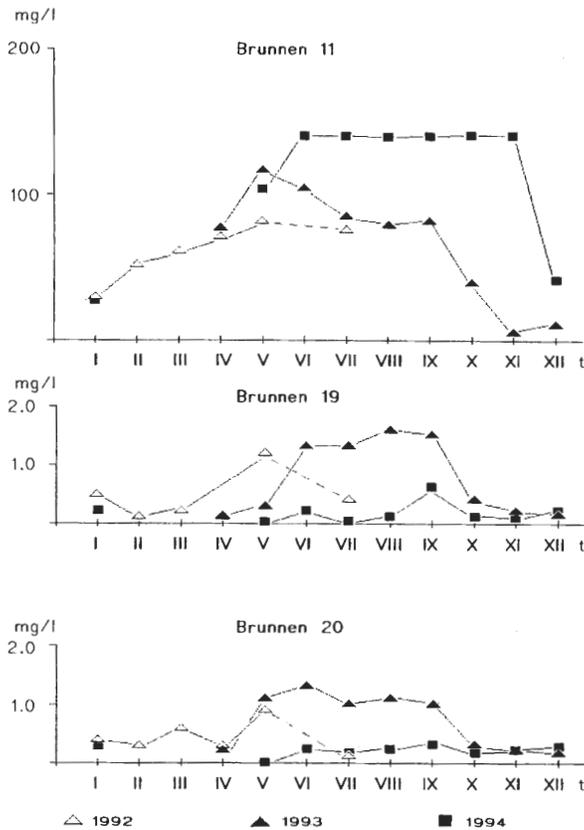


Abb. 42: Nitratgehalt (mg/l) im oberflächennahen Grundwasser (bei 2,5m) im Süden (Brunnen 11) und Norden des Erdfallsees (Brunnen 19 und 20).

Tab. 15: *Drosera intermedia*-Fragmentgesellschaft des *Rhynchosporium albae* am Westufer des Großen Heiligen Meeres (mesotrophe Stelle).

Laufende Nr.	1	2	3
Aufnahmefläche (m ²)	1	1	1
Gesamtdeckung (%)	100	100	50
KS (%)	85	60	50
MS (%)	20	95	2
Artenzahl	11	17	5
KS			
AC <i>Drosera</i>-Fragmentgesellschaft:			
<i>Drosera intermedia</i>	4	3	3
Elemente d. Scheuchzerio-Caricetea:			
<i>Eriophorum angustifolium</i>	+	1	+
<i>Agrostis canina</i>	1	2	.
<i>Juncus bulbosus</i>	.	1	2
<i>Hypericum elodes</i>	+	+	.
<i>Carex lasiocarpa</i>	+	.	.
Elemente d. Phragmitetea:			
<i>Lysimachia vulgaris</i>	+	+	.
<i>Carex rostrata</i>	.	.	1
<i>Peucedanum palustre</i>	.	+	.
<i>Potentilla palustris</i>	.	+	.
Begleiter			
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	1	1	.
<i>Viola palustris</i>	1	1	.
<i>Molinia caerulea</i>	+	1	.
<i>Myrica gale</i>	.	+	.
Moose			
Elemente d. Scheuchzerio-Caricetea:			
<i>Sphagnum auriculatum</i> agg.	2	3	.
<i>Sphagnum auriculatum</i> f. <i>obesum</i>	.	2	+
Begleiter:			
<i>Drepanocladus aduncus</i>	1	2	.
<i>Sphagnum palustre</i>	.	1	.
<i>Sphagnum squarrosum</i>	.	1	.

Laufende Nummer	1
Aufnahmefläche (m ²)	1
Gesamtdeckung (%)	75
KS (%)	70
MS (%)	30
Artenzahl	16
AC	
<i>Agrostis canina</i>	+
D.-Fazies v. <i>Potentilla palustris</i>:	
<i>Potentilla palustris</i>	4
Begleiter	
<i>Carex pseudocyperus</i>	2
<i>Carex lasiocarpa</i>	1
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	1
<i>Juncus bulbosus</i>	1
<i>Lysimachia vulgaris</i>	1
<i>Cardamine pratensis</i>	+
<i>Carex rostrata</i>	+
<i>Iris pseudacorus</i>	+
<i>Lycopus europaeus</i>	+
<i>Peucedanum palustre</i>	+
<i>Ranunculus lingua</i>	+
<i>Sparganium erectum</i>	+
Moose	
<i>Calliergonella cuspidata</i>	1
<i>Sphagnum squarrosum</i>	1

Tab. 16: *Carici canescentis*-*Agrostietum caninae* am Westufer des Großen Heiligen Meeres (mesotrophe Stelle).

und von hier neben dem direkten Eintrag grundwasservermittelt von den Heideflächen in die Stillgewässer gelangen. Auch grundwasserhydraulische Besonderheiten ergeben sich unterhalb der Heideflächen aus der im Vergleich zu Waldstrukturen verminderten Interzeption, die zu einer relativ höheren Grundwasserneubildungsrate und zu einer weitgehend von peripheren Einträgen unbeeinflussten und gegenüber der Umgebung erhöhten Grundwasserlinse im Bereich der Heide führen. Solches Heidegrundwasser kann einen Korridor zwischen Seekörper und dem Grundwasser unterhalb der Ackerflächen schaffen, der den Eintrag von Nährstoffen über den Grundwasserpfad in erheblicher Weise zu reduzieren vermag (vgl. Abb. 44: Grundwassermodell).

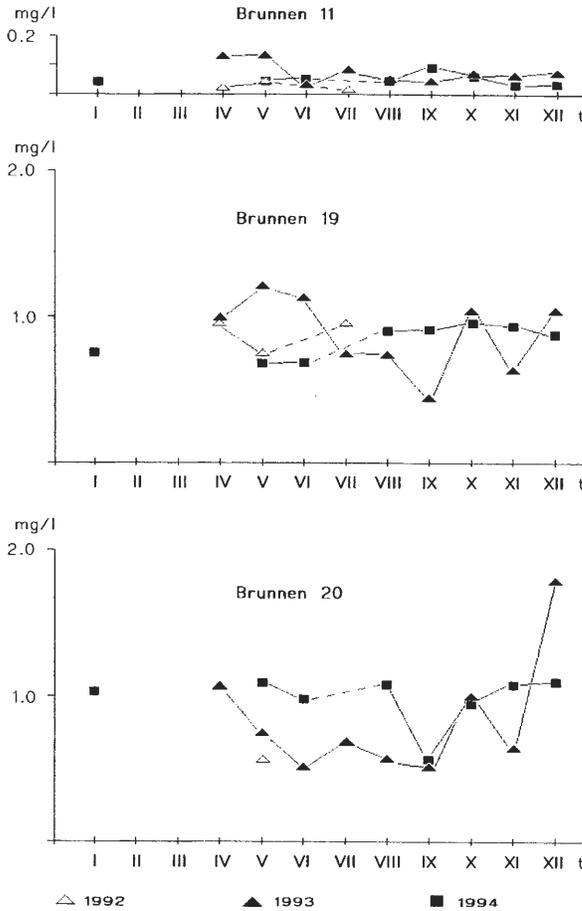


Abb. 43: Phosphatgehalt (mg/l) im oberflächennahen Grundwasser (bei 2,5m) im Süden (Brunnen 11) und Norden des Erdfallsees (Brunnen 19 und 20).

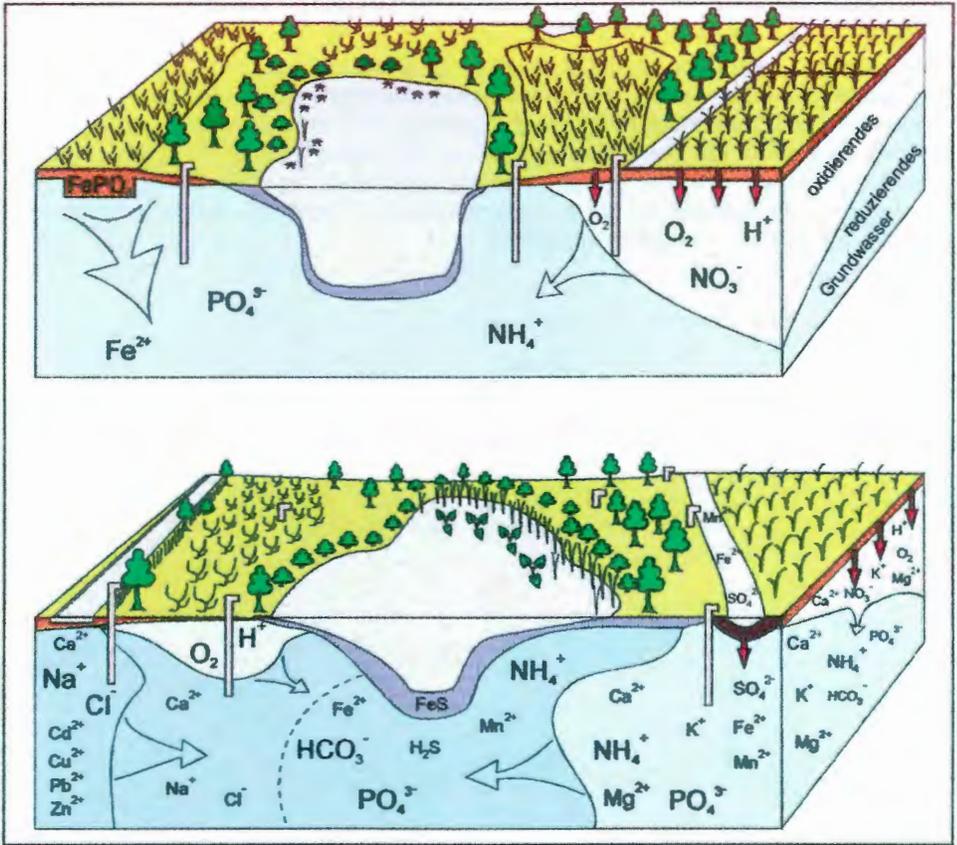


Abb. 44: Grundwasserverhältnisse am Erdfallsee (obere Darstellung) und am Großen Heiligen Meer (untere Darstellung). Von Süden gelangt von Maisackerfluren kommend sauerstoff- und nitratreiches Grundwasser in das Erdfallseegebiet. Ein nur schmaler Gehölzstreifen an der Südgrenze des Gebietes und eine sich anschließende Weidefläche lassen dieses nährstoffreiche Grundwasser ungehindert bis unmittelbar an das Erdfallseeufer vordringen. Erst im unmittelbaren Bereich des Erdfallseeufers kommt es zur Reduktion des Nitratstickstoffs zu Ammonium und unter Reduktion des Fe^{3+} zu Fe^{2+} zur Freisetzung von Phosphat aus Eisenphosphat. Am gegenüberliegenden Ufer kommen auf breiter Front reduzierende Bedingungen im Grundwasser mit hohen Ammonium- und Phosphatgehalten vor. Beide Eutrophierungsparameter (Stickstoff u. Phosphat) liegen mit Ausnahme des Ostufers am gesamten Erdfallsee im Grundwasser in erhöhten Konzentrationen vor. Neben dem Erdfallsee sind besonders die im Südosten gelegenen Heidekolke dieses Teilgebietes von Eutrophierungen betroffen.

Die Grundwasserverhältnisse am Großen Heiligen Meer unterscheiden sich von jenen am Erdfallsee deutlich. Zwischen den Maisackerfluren und der Meerbecke im Südosten und dem Großen Heiligen Meer liegen breite Erlenbruchwald-Gürtel, die zu einer effektiven Reduktion des Nitratstickstoffs führen. Es liegen hier jedoch erhöhte Konzentrationen von Düngemitteln von den Ackerfluren, insbes. von Ammonium und Phosphat sowie von Schwermetallen und Sulfationen aus der Meerbecke vor. Sauerstoffreiches Grundwasser kommt nur am gegenüberliegenden Westufer unter ausgedehnten Heideflächen vor. Diese Heideflächen führen aufgrund der verminderten Interzeption zu einer erhöhten Grundwas-

serneubildungsrate; das Grundwasser bildet hier einen Korridor zu den benachbarten Grundwasserkompartimenten, z.B. zu jenen an der Landstraße L 504, über die durch den Straßenverkehr und durch Streusalz erhöhte Schwermetall- und Salzbelastungen im Grundwasser auftreten. Das Grundwasser unter der Heide ist daher elektrolytarm und auch relativ nährstoffarm, da sich hier nur Nährstoffeinträge aus der Luftdeposition auswirken. Eine entsprechende Differenzierung der Ufervegetation mit erhöhten eutraphenten Anteilen am Ostufer und meso- bis dystraphenten Anteilen am Westufer ist am Großen Heiligen Meer festzustellen. Die größeren Heidekolke dieses Teilgebietes (Heidekolk 2 u. 4; vgl. Abb 24) liegen innerhalb dieser nährstoff- und elektrolytarmen Grundwasserzone und weisen kaum Eutrophierungserscheinungen auf.

6. Milieustabilisierende Puffersysteme und Nährstoffhaushalt

Entsprechend den unterschiedlichen Trophieverhältnissen am Erdfallsee und am Großen Heiligen Meer, wie sie bereits anhand der Leitfähigkeit darstellt wurden, können Unterschiede auch hinsichtlich des pH-Wertes, des gelösten CO_2 und des Hydrogenkarbonates festgestellt werden. Trophie, pH-Wert, CO_2 - und Hydrogenkarbonatkonzentration sind innerhalb der basenarmen Sandlandschaften Nordwestdeutschlands zusammen mit dem Auftreten von Erdalkaliionen eng an das Puffersystem gekoppelt, das den pH-Wert im neutralen Bereich stabilisiert.

Im Wasser des Erdfallsees sind aufgrund der geringen Konzentration an Erdalkaliionen sowohl der Gehalt an Hydrogenkarbonat (ca. 20 mg/l) als auch die Wirksamkeit des pH-Wert-stabilisierenden Puffersystems geringer als im Großen Heiligen Meer, wo ein nahezu doppelter Gehalt an Erdalkaliionen vorliegt (vgl. Abb. 20) und wo die Konzentration des Hydrogenkarbonates bei 60 mg/l liegt. Bei gleichen Konzentrationen des gelösten CO_2 (ca. 2 mg/l) und leicht erhöhten Konzentrationen organischer Säuren (mittlerer KMnO_4 -Verbrauch ca. 30 mg/l im Erdfallsee und ca. 25 mg/l im Großen Heiligen Meer) liegt der pH-Wert im Wasser des Erdfallsees während der gesamten Vegetationsperiode deutlich unter 7, meist bei 6.6, während er im Wasser des Großen Heiligen Meeres oberhalb von 7 liegt, meist bei 7.5. Saisonabhängige Schwankungen des pH-Wertes treten besonders im Epilimnion des eutrophen Großen Heiligen Meeres auf. Sie können zu Werten bis pH 9 führen; im Erdfallsee wird der Neutralpunkt (pH 7) jedoch fast nie überschritten. Lediglich im oberen Abschnitt des Metalimnions wird zeitweise in 3m Tiefe ein pH-Wert von 7.3 festgestellt; im Uferbereich bleiben die pH-Werte jedoch deutlich unter 7 (pH 6.3-6.8), während sie im Litoral des Großen Heiligen Meeres bis auf 7.9 ansteigen.

Die allgemein feststellbaren Schwankungen des pH-Wertes gehen offensichtlich von der Pelagialvegetation aus (Phytoplankton-bedingte CO_2 -Zehrung) und führen im Sommer (Mai-August) besonders im oberen Metalimnion zu pH-Wert-Maxima, die beim Großen Heiligen Meer durch den zuweilen vollständigen Verbrauch des gelösten CO_2 verursacht werden. Die Litoralzone ist von diesen Schwankungen in geringerem Maße betroffen (Abnahme des CO_2 von 3.5 auf 0.4 mg/l). Im Litoral des Erdfallsees ist während der Sommermonate kaum eine Abnahme des gelösten CO_2 feststellbar (ca. 2.5 mg/l CO_2).

Kleinräumige Differenzierungen der CO_2 -Konzentrationen und der pH-Werte lassen sich in der Litoralzone an beiden Seen beobachten. Auch hier lassen sich an Bruchwald angrenzende Uferzonen mit im Herbst erniedrigten pH-Werten von solchen unterscheiden, die nahe an Heideflächen gelegen sind und die während dieser Zeit geringere pH-Wertabsen-

kungen gegenüber dem Pelagial erfahren. Für das Große Heilige Meer kann auch innerhalb der Litoralzone eine Kopplung der Parameter gelöstes CO_2 , Hydrogencarbonat und pH-Wert gefunden werden. Am Erdfallsee wird der pH-Wert zusätzlich vom Gehalt an organischen Säuren beeinflusst, die zeitweise und lokal im Nordosten des Sees in erhöhter Konzentration auftreten (bis über 80 mg/l KMnO_4 -Verbrauch). Ein hoher Anteil an dystraphenten Arten (vgl. Abb. 11, Tab. 2) kann an diesen Stellen beobachtet werden. Der pH-Wert ist hier weitgehend vom CO_2 -Hydrogencarbonatpuffersystem abgekoppelt und wird vom Gehalt an organischen Säuren bestimmt. Er kann im Sommer im Verhältnis zu den übrigen Litoralstellen (pH 6.8) auf pH 6 und tiefer absinken. Dystrophe Verhältnisse mit pH-Werten unter 5 wurden jedoch im Erdfallsee bisher nicht festgestellt.

Oligotrophe Seen reagieren empfindlich auf allochthone Nährstoffeinträge. Dies gilt besonders für die Ufervegetation schwach gepufferter silikat-oligotropher Standorte, in der die niederwüchsigen oligotraphenten Arten der Klasse *Littorelletea uniflorae* aufgrund ihrer engen ökologischen Amplitude (großes Lichtbedürfnis, Nutzung des gelösten CO_2 oft als fakultative CAM-Pflanzen und hohe Sauerstoffansprüche) durch euryöke Arten verdrängt werden und die ihrerseits auf Milieüänderungen des Standortes weniger empfindlich reagieren (Nutzung mehrerer CO_2 -Quellen, z.B. des Karbonates und Hydrogencarbonates und Unempfindlichkeit gegenüber alkalischen Milieubedingungen, s. POTT 1995, 1996). Die geringproduktive Ufervegetation, aber auch die geringdichte Phytoplanktonmasse bewirken eine im Verhältnis zu eutrophen Seen nur geringe Nährstoffzehrung, so daß im Wasser allochthone Nährstoffeinträge länger wirksam und analytisch leicht feststellbar sind. Im Wasser des Erdfallsees bleibt innerhalb des Metalimnions z.B. der Nitratsstickstoff etwa 2 Monate länger in höheren Konzentrationen erhalten (ca. 2 mg/l NO_3^- bis September) als im Großen Heiligen Meer (vergleichbare Konzentration nur bis Juli). Der in oligotrophen Seen auftretende Bestandsabfall wird aufgrund des bis zum Gewässergrund (Protopedon) reichenden Sauerstoffs weitgehend mineralisiert; eine spürbare Denitrifizierung des Nitrats, die im eutrophen See innerhalb des Hypolimnions während der Stagnationsphasen zu einer Limitierung des pflanzenverfügbaren Stickstoffs führt, findet im oligotrophen See nicht statt. Auch die mit den Nährstoffeinträgen erfolgende Zunahme von Hydrogencarbonat kann die Ansiedlung meso- bis eutraphenter Arten begünstigen und eine Verdrängung der sandoligotraphenten Arten zur Folge haben. Eutrophierungseffekte wirken sich deshalb stärker in nährstoffarmen als in nährstoffreichen Seen aus. Im tiefen Teil des Erdfallsees treten innerhalb des Hypolimnions im Sommer deutliche Sauerstoffzehrungen mit Nitratreduktion in Erscheinung (vgl. Abb. 22); der See kann daher nicht mehr in allen Teilen als oligotroph eingestuft werden.

Dystrophe Standorte zeigen von oligotrophen Standorten abweichende Verhältnisse. Sie scheinen nicht so empfindlich auf allochthone Nährstoffeinträge zu reagieren wie oligotrophe Standorte. Untersuchungen an den Heidekolken von 1994 geben Hinweise darauf, daß trotz zum Teil erheblicher allochthoner Einträge von Nährstoffen, besonders auch von Erdalkalitionen, die sauren Milieubedingungen nicht abnehmen, sondern eher sogar zusammen mit dem Anteil organischer Säuren zunehmen, weshalb in der Regel der für dystrophe Standorte charakteristische abiotische Faktor des niedrigen pH-Wertes unberührt bleibt. Der Vergleich der von allochthonen Nährstoffeinträgen besonders betroffenen Südhälfte des Erdfallsee-Heideweiher-Gebietes zu der von Nährstoffeinträgen weniger betroffenen Heidefläche im Westen des Großen Heiligen Meeres macht dies deutlich. Auch besitzt das Wasser des Erdfallsees heute bereits eine wesentlich höhere Konzentration an Erdalkalitionen bei relativ niedrigen Stickstoff- und Phosphatgehalten als die Heidekolke und der Heideweiher des Gebietes. Letztere weisen im Erdfallsee-Heideweiher-Gebiet z.T. jedoch sehr hohe Stickstoffkonzentrationen (NH_4^+ bis über 2 mg/l) auf, die die erhöhten Nährstoffeinträge im Süden des Erdfallsees verdeutlichen und die im Großen Heiligen Meer-Gebiet nicht in diesem Maß zu beobachten sind.

Änderungen der Wasserführung, z.B. durch Absenken des Grundwasserspiegels, haben offensichtlich großen Einfluß auf dystrophe Standorte. Die Ursache liegt möglicherweise in der erhöhten Mineralisierung organischen Materials während der Trockenphasen, das an dystrophen Standorten durch den erhöhten autochthonen Bestandsabfall reichlich anfällt. Die dann aus der Mineralisierung freigesetzten Nährstoffmengen übertreffen möglicherweise die Wirkung luft- und grundwasservermittelter Nährstoffeinträge aus der Umgebung. Der insgesamt nicht sehr produktionsstarke und phytoplanktonarme dystrophe Gewässertyp besitzt einen Schwerpunkt der Bestandsabfallbildung im Litoralbereich, so daß hier auch die größten Mineralisierungsraten während der Trockenperioden zu erwarten sind. Auf den trockengefallenen Litoralbereichen kommt es zu einer Destabilisierung der dystrophen Milieubedingungen, so daß nun die Nährstoffe auch von nicht-dystraphenten Pflanzenarten, z.B. von *Juncus effusus*, genutzt werden können. Dies erklärt auch, warum das pflanzensoziologische Bild besonders an dystrophen Kleingewässern mit instabiler Wasserführung gestört ist.

Juncus effusus-Dominanzbestände (Tab. 14) nehmen besonders Litoralzonen der Heidekolke im Erdfallseegebiet ein und bilden Komplexe mit dem *Molinia*-Bultenstadium des *Ericetum tetralicis*. Ausgehend vom Heidekolk 5 (Abb. 24) hat sich *Juncus effusus* heute bis zum Erdfallsee nach Westen ausgebreitet. Untersuchungen im Zwillbrocker Venn von BURRICHTER (1969) zeigen eine entsprechende Entwicklung von eindringenden mesotraphenten Störzeigern hin zu *Juncus effusus*-Reinbeständen im Zusammenwirken mit Guanotrophierung von *Molinia*-Bulten des *Ericetum tetralicis* durch Wasservögel. Dort wurde bei längeren Trockenphasen der Torfschlammböden eine explosionsartige Besiedlung durch *Juncus effusus* beobachtet.

Neben grundwasservermittelten Nährstoffeinträgen ist daher für zukünftige Untersuchungen dem Nährstoffeintrag über den Luftweg und durch Guanotrophierung besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

7. Zusammenfassung

Neben den klassischen Eutrophierungsparametern wie Stickstoff und Phosphor (NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-}) weisen Erdalkali- und Alkaliionen (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) innerhalb der Gewässer pleistozäner Sandlandschaften Konzentrationsdifferenzen in Abhängigkeit von der Ufervegetation auf. Mit zunehmendem Alter der Stillgewässer nehmen die Konzentrationen vieler Ionen bei natürlicher Sukzession allmählich zu. Dieses äußert sich in einer Änderung des die Trophie kennzeichnenden Summenparameters, in einer Erhöhung der Leitfähigkeit. Hieran beteiligt ist die Zunahme von Phosphor- und Stickstoffverbindungen, besonders aber auch die von Alkali- und Erdalkaliionen sowie von Hydrogencarbonat. Mit den Trophiebedingungen gekoppelt treten Differenzierungen der pH-Werte und der Konfiguration des pflanzenverfügbaren CO_2 in Erscheinung, die zu schwach sauren Milieubedingungen mit vorwiegend gelöstem CO_2 bei oligotrophen und zu neutralen bis schwach alkalischen Milieubedingungen mit einem erhöhten Anteil an Hydrogencarbonaten bei eutrophen Verhältnissen führen.

Gewässer mit dystropher Ausprägung nehmen durch ihren hohen Anteil an Humin- und Fulvosäuren eine Sonderstellung hinsichtlich der Trophie ein. Neben der oftmals deutlichen Eigenfärbung des Wassers (Braunwasserseen) mit einer entsprechend verringerten Primärproduktion gegenüber oligotrophen Seen (Klarwasserseen) sind die stets sauren Milieubedingungen dystropher Seen charakteristisch. Der oft hohe Anteil organischer Säuren (Humin- und Fulvosäuren) führt durch die Bildung von Chelatkomplexen mit Kationen zu

einer Verknappung der Alkali- und Erdalkalitionen, weshalb die Leitfähigkeit des Wassers stets sehr niedrig, meist unter 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ liegt. Die sauren Milieubedingungen, die sich aus den organischen Säureanteilen und durch die Chelatisierung von Kalzium- und Magnesiumionen ergeben, werden durch die H^+ -Abgabe aus den *Sphagnum*-Beständen der Litoralzone verstärkt und verhindern eine rasche Mineralisierung des Bestandsabfalls. Die autochthone Nährstofffreisetzung wird hierdurch effizient limitiert.

Trophieändernde und -stabilisierende Parameter werden nicht allein durch die im freien Wasserkörper eines Sees vorhandenen Stoffspezies bestimmt, sondern sie unterliegen Wechselwirkungen mit dem Sicker- und Grundwasser. In diesem Zusammenhang gewinnen nicht nur die Stickstoff- und Phosphorfrachten an Bedeutung, auch der Gehalt an Alkali- und Erdalkalitionen sowie Hydrogencarbonationen beeinflussen die Trophie der Seen; ein erhöhter Gehalt an Humin- und Fulvosäuren wirkt stabilisierend auf die Trophie der darin eingebetteten dystrophen Stillgewässer.

Anthropogene Stoffeinträge aus unterschiedlichen Quellen, insbesondere aber aus der Landwirtschaft, haben zu einer rasanten Beschleunigung der Nährstoffzunahme besonders innerhalb jener Gewässer geführt, die sich noch in der Anfangsphase der Sukzession befinden und von Natur aus nährstoffarm sind. Von den größeren Stillgewässern scheint besonders der Nährstoffhaushalt des Erdfallsees von aus südlicher Richtung einströmendem Grundwasser beeinflusst zu werden. Im Sicker- und Grundwasser sind Stabilität und Mobilität der Stickstoff- und Phosphorspezies von den Sauerstoffkonzentrationen, d.h. von den REDOX-Verhältnissen abhängig. Sie werden beeinflusst von der Vegetationsbedeckung und den Bodeneigenschaften. Auch im Grundwasser lassen sich oligotrophe, eutrophe und dystrophe Areale differenzieren.

Eutrophe oxidierende Grundwasserbereiche bestehen in der Nähe landwirtschaftlicher Nutzflächen, insbesondere an Maisäckern. Hohe Nitratgehalte sowie hohe Konzentrationen von Kalium, Kalzium und Magnesium sind für diese Zonen typisch. Hingegen bewirken erhöhte Sauerstoffgehalte die Festlegung von Phosphat an 3-wertigem Eisen, so daß die Phosphatfrachten relativ gering sind. Ausgedehnte eutrophe Grundwasserbereiche wurden im Süden des Erdfallsees und im Norden des Großen Heiligen Meeres festgestellt. Reduzierte Grundwasserbereiche werden durch Nitratabbau und erhöhte Ammoniumkonzentrationen zusammen mit Phosphatfreisetzung aus Eisenphosphat charakterisiert. Sie erscheinen unterhalb bewaldeter Flächen, insbesondere unter Bruchwald, z.B. im Nordosten des Großen Heiligen Meeres sowie im Norden und Nordwesten des Erdfallsees.

Besonders günstige Eutrophierungsbedingungen sind gegeben, wenn NO_3^- und PO_4^{3-} als entscheidende Eutrophierungsparameter gemeinsam über das Grundwasser in die Stillgewässer gelangen. Im sauerstoffreichen Epi- und Metalimnion liegt Nitrat als stabile Stickstoffspezies bis weit in die Sommermonate vor, so daß hauptsächlich Phosphat limitierend wirkt und allochthone Einträge über das Grundwasser zu Trophiezunahmen innerhalb der Litoralzone führen. Zur Zeit ist von solchen grundwasservermittelten Phosphateinträgen im Norden, begleitet von Nitratinträgen im Süden, besonders der Erdfallsee betroffen. Die meisten kleineren Kolke dieses Teilgebietes und auch der Heideweiher liegen innerhalb dystropher bis eutropher Grundwasserzonen.

Interzeptionsabhängige Unterschiede in der Grundwasserneubildungsrate, unterschiedliche Durchlässigkeiten verschiedener Böden und temperaturabhängige, im Jahresgang wechselnde Dichtegradienten zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser wirken modifizierend auf den seeseitigen Grundwassereinfluß.

Der milieuhängige Mangel an Alkali- und Erdalkalitionen innerhalb dystropher Gewässer vermag auch der Eutrophierung durch allochthone Stoffeinträge, z.B. von Phosphor- und Stickstoffverbindungen, wirkungsvoll zu begegnen; dies ist in oligotrophen Gewässern mit geringeren organischen Säuregehalten weniger gut möglich. Bei der Bestimmung

der Trophiestufe führen die Beurteilung der Ufervegetation und die der Pelagialbesiedler (hauptsächlich das Phytoplankton) zu unterschiedlichen Ergebnissen. Meist ergibt die Beurteilung der Litoralvegetation eine höhere Trophiestufe als die des Pelagials. Der überwiegend über oberflächennahe Zonen des Ufers erfolgende allochthone Nährstoffzuström und die Retention der Nährstoffe innerhalb der Uferregion sind Hauptursache dieser Erscheinung.

In Abhängigkeit von der Lage der Nährstoffquellen beeinflusst die Grundwasserströmungsrichtung die Areale mit erhöhten allochthonen Nährstoffzuwachsen. Auch Depositionen aus der Luft gelangen z.T. direkt in die Gewässer, z.T. werden sie zunächst von der Blattoberfläche litoralständiger Pflanzen und vom Boden festgehalten und mit Niederschlägen ausgewaschen. Sie gelangen so entweder direkt von den Pflanzen oder über das Sickerwasser in die Gewässer.

Auch die Nährstoffeinträge über das Grundwasser erfolgen meist nur innerhalb der oberflächennahen Zone. Die Nährstoffe werden nach der Litoralpassage bereits innerhalb der oberflächennahen Wasserschichten der Stillgewässer verteilt, z.B. während der Teilzirkulation innerhalb des Epilimnions; im Pelagial kleinerer Stillgewässer tritt daher auch während der Sommerstagnation keine den Litoralverhältnissen homologe topologische Differenzierung der Trophieverhältnisse auf.

8. Literatur

- BICK, H. (1993): Ökologie - Grundlagen - terrestrische und aquatische Ökosysteme - angewandte Aspekte. - Fischer Verlag.
- BÖTTCHER, J., O. STREBEL, H. WILHELMUS & M. DUYNISFELD (1985): Vertikale Stoffkonzentrationsprofile im Grundwasser eines Lockergesteins-Aquifers und deren Interpretation (Beispiel Fuhrberger Feld). - Z. dt. geol. Ges. **136**: 543-552.
- BÖTTCHER, J., O. STREBEL & W. KÖLLE (1992): Redox Conditions and Microbial Sulfur Reactions in the Fuhrberger Feld Sandy Aquifer. - in: MATTHESS et. al.: Progress in Hydrogeochemistry. Springer-Verlag.
- BOHLE, H.W. (1995): Spezielle Ökologie - Limnische Systeme. - Springer-Verlag.
- BURRICHTER, E. (1969): Das Zwillbrocker Venn, Westmünsterland, in moor- und vegetationskundlicher Sicht. - Abh. Westf. Mus. Naturkunde Münster **31**(1): 1-60.
- ELLENBERG, H. (1989): Eutrophierung - das gravierenste Problem im Naturschutz? Zur Einführung. - NNA-Berichte 2/1: 4-13.
- GRAEBNER, P. (1930): Die Pflanzengesellschaften des Naturschutzgebietes Heiliges Meer bei Hopsten. - Abh. Westf. Prov. Mus. Naturkunde **1**: 137-150.
- HABER, W. & J. SALZWEDEL (1992): Umweltprobleme der Landwirtschaft. Sachbuch der Ökologie. - Rat von Sachverständigen für Umweltfragen. Metzler-Poeschel, Stuttgart.
- HASSE, F. (1994): Gewässerökologische und vegetationskundliche Untersuchungen zur Eutrophierung des Grund- und Oberflächenwassers von pleistozänen Sandlandschaften - Beispiel NSG Heiliges Meer. - Diplomarbeit aus dem Institut für Geobotanik der Universität Hannover.
- HOFMANN, K. (1995): Pflanzensoziologische und hydrochemische Untersuchungen der Heidekolke des NSG „Heiliges Meer“ unter Berücksichtigung der Trophie des oberflächennahen Grundwassers. - Diplomarbeit aus dem Institut für Geobotanik der Universität Hannover.
- JEDICKE, E. (1990): Biotopverbund: Grundlagen und Maßnahmen einer neuen Naturschutzstrategie. - Ulmer, Stuttgart.

- KAISER, Th. (1994): Der Landschaftswandel im Kreis Celle. Zur Bedeutung der historischen Landschaftsanalyse für Landschaftsplanung und Naturschutz. - Beitr. Räuml. Planung **38**: 418.
- LOTZE, F. (1951): Die Grundwasserverhältnisse in den Naturschutzgebieten am Heiligen Meere. - Natur und Heimat **11** (Beiheft): 97-99.
- LOTZE, F. (1956): Zur Geologie der Senkungszone des Heiligen Meeres (Kreis Tecklenburg). - Abh. Landesmus. Naturkunde Münster **18**(1): 1-36.
- MAHN, D. & A. FISCHER (1989): Die Bedeutung der biologischen Landwirtschaft für den Naturschutz im Grünland. - Ber. ANL **13**: 261-275.
- MILDE, G. (1993): Gedanken zur Entwicklung eines modernen Grundwasserschutzes. - in: LESCHBER et. al. (1993): Boden- und Grundwasserverunreinigungen aus Punkt- und Flächenquellen. - Schr.-Reihe Verein WaBoLu **90**: 145-158. Fischer Verlag, Stuttgart.
- NEHRKORN, A., L. MÖLLER & B. POHLKÖTTER (1973): Langfristige chemische Veränderungen des Grundwassers einiger Wasserwerke am Münsterländer Kiessandrücken. - Z. Deutsch. Geol. Ges. **124** (Teil 2): 635-643.
- POTT, R. (1980): Die Wasser- und Sumpflvegetation eutropher Gewässer in der westfälischen Bucht - pflanzensoziologische und hydrochemische Untersuchungen. - Abh. Landesmus. Naturkunde Münster **42**(2): 1-156.
- POTT, R. (1981): Ökologie und Indikatorwert von Wasserpflanzengesellschaften. - Mitt. Landesanst. Ökologie, Landschaftsentwicklung u. Forstplanung NW **6**: 57-64. Recklinghausen.
- POTT, R. (1982): *Littorelletea*-Gesellschaften in der Westfälischen Bucht. - Tuexenia **2**: 31-45.
- POTT, R. (1983): Die Vegetationsabfolgen unterschiedlicher Gewässertypen Nordwestdeutschlands und ihre Abhängigkeit vom Nährstoffgehalt des Wassers. - Phytocoenologia **11**(3): 407-430.
- POTT, R. (1995): Die Pflanzengesellschaften Deutschlands. - 2. Auflage, Ulmer Verlag, Stuttgart.
- POTT, R. (1996): Biotoptypen. Seltene und schützenswerte Biotoptypen Deutschlands und angrenzender Regionen. - Ulmer Verlag, Stuttgart.
- PUST, J. (1993): Erste Ergebnisse zur Untersuchung der Grundwasserverhältnisse im Naturschutzgebiet „Heiliges Meer“ (Kreis Steinfurt). - Abh. Westf. Mus. Naturkunde Münster **55**(2): 1-80.
- RUNGE, F. (1991): Die Pflanzengesellschaften des Naturschutzgebietes „Heiliges Meer“ und ihre Änderungen in den letzten 90 Jahren. - Natur u. Heimat **51** (Beiheft): 89 S.
- RUTTNER, F. (1940): Grundriß der Limnologie (Hydrobiologie des Süßwassers). - Walter de Gruiter & Co., Berlin.
- SCHACHTSCHABEL, P., H.-P. BLUME, G. BRÖMMER, K.-H. HARTGE & U. SCHWERTMANN (1992): Lehrbuch der Bodenkunde. - 13. Aufl. Enke Verlag, Stuttgart. 420 S.
- SCHÖNBORN, W. (1995): Gewässerökologie.- in: STEUBING et. al. (1995): Natur- und Umweltschutz - ökologische Grundlagen, Methoden, Umsetzung. - Fischer Verlag, Jena: 45-68.
- TERLUTTER, H. (1995): Das Naturschutzgebiet Heiliges Meer. - Westf. Mus. Naturkunde, Landschaftsverband Westfalen-Lippe, Münster. 144 S.
- THIERMANN, A. (1975): Zur Geologie der Erdfälle des „Heiligen Feldes“ im Tecklenburger Land/ Westfalen. - Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg **44**: 517-530.
- TIETZE, O. (1914): Der Erdfall vom 14. April 1913 in der Gemeinde Hopsten (Kreis Tecklenburg). - Jb. kgl. preuß. geol. L.-Anst. Berlin **34**(1): 648-657.
- WÖBSE, H.H. (1991): Landschaftsästhetik und ihre Operationalisierungsmöglichkeiten bei der Anwendung des §8 Bundesnaturschutzgesetz.- in: BFANL (Hrsg.): Landschaftsbild - Eingriff - Ausgleich: 31-35.

Anschrift der Verfasser: Prof. Dr. Richard Pott, Dr. Jürgen Pust, Dipl. Biol. Klaus Hofmann, Institut für Geobotanik der Univ. Hannover, Nienburger Straße 17, D-30167 Hannover

