

Abschlußbericht BMBF-Forschungsvorhaben Projekt-Nr. 03KIS024

**KÜSTENBRUNNEN: INSTALLATION, AUSBAU UND BETRIEB EINES SUBMARINEN
BRUNNENS UND UNTERSUCHUNG EINES GRUNDWASSERAUSTRITTES IN DER
ECKERNFÖRDER BUCHT**

Durchführung:

Nilmini Silva-Send, Andreas Dahmke, Sibylle Grandel, CAU Kiel
Peter Hempel, Geologisches Büro Dr. Hempel

Projektleitung:

Prof. Dr. Andreas Dahmke

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Inst. für Geowissenschaften, Angewandte Geologie,
Ludewig-Meyn-Str. 10, 24118 Kiel

Juli 2002

1. Aufgabenstellung

Die Qualität und Zusammensetzung des Oberflächenwassers ist sowohl ein wichtiger ökologischer Faktor wie auch ein entscheidender Standortfaktor für die Entwicklung, Bewirtschaftung und Nutzung der meerseitigen und landseitigen Küstengebiete. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang beispielsweise die traditionellen Wirtschaftszweige, wie die Fischerei und insbesondere natürlich die Tourismusbranche. In den vergangenen Jahren wurden aus diesen Gründen in zahlreichen Forschungsprojekten die Hauptbelastungsquellen und Belastungspfade für die Nord- und Ostsee ausführlich untersucht, deren Ergebnisse zum Teil bereits die Basis für gesetzgeberische sowie technologische Gegenmaßnahmen, wie den Bau von Kläranlagen im Bereich der Einzugsgebiete der Flüsse erbrachten. Andere Belastungspfade und Belastungsquellen, wie z.B. der atmosphärische Eintrag von Schadstoffen, die Freisetzung von Schadstoffen an der Sediment/Wasser-Grenzfläche oder auch der direkte Eintrag durch die Schifffahrt sind schwerer zu quantifizieren, jedoch existieren auch hierzu verschiedene Untersuchungsprogramme, die eine Abschätzung und gegebenenfalls auch entsprechende Gegenmaßnahmen erlauben.

Bisher wurde hingegen kaum der Eintrag von Stoffen aus submarinen Quellen untersucht, die entweder diffus und großflächig verteilt, sog. seeps, oder aber als deutlich wahrnehmbare Grundwasseraustritte, sog. vents, in den küstennahen marinen Sedimenten auftreten können. Zwar sind diese Grundwasserzutritte seit geraumer Zeit bekannt, doch wurde bisher davon ausgegangen, dass der Massenfluss vernachlässigbar gegenüber den anderen Belastungspfaden ist. Neuere Untersuchungen deuten jedoch daraufhin (CHURCH, 1996; MOORE, 1996), dass bis zu 40 % Prozent des Süßwassereintrags in bestimmten küstennahen Abschnitten durch derartige submarine Quellen erfolgt. Falls sich diese Zahlen für weitere Regionen bestätigen, stellt dies möglicherweise auch einen relevanten Nähr- und Schadstoffpfad in die küstennahen Meeresgebiete dar. In Untersuchungen konnte so z.B. der Eintrag von Pestiziden und NO_3^- in die Chesapeake-Bay nachgewiesen werden (GALLAGHER et al., 1996). Zum Schutz der Wasserqualität ist in derartigen Gebieten nicht nur eine Kontrolle und gegebenenfalls Behandlung der Vorflut notwendig, sondern

möglicherweise auch ein vorsorgendes Bewirtschaftungskonzept der Grundwassereinzugsgebiete, die den submarinen Grundwasseraustritt speisen.

Neben den landseitig beeinflussten Einträgen eluieren durch advective Stoffströme weitere Substanzen aus den marinen Ablagerungen und transportieren diese in die offene Wassersäule. Ein gut untersuchtes Beispiel ist hierfür der CH_4 -Ausstrag an Grundwasseraustritten in der Eckernförder Bucht, die einen bedeutenden Eintragspfad für die Ostsee darstellen (BUSSMANN et al., 1994). Insgesamt sind die geochemischen Wechselwirkungen bei der Passage des Grundwassers durch marine Sedimente jedoch relativ wenig untersucht.

Neben diesen weithin quantitativ unbekanntem Effekten der submarinen Grundwasseraustritte auf die Qualität des Küstenwassers müssen zudem mögliche Qualitätsveränderungen des Grundwassers bei modifizierten hydrogeologischen Randbedingungen in Betracht gezogen werden. So kann aufgrund einer zu hohen Grundwasserentnahme oder bei Meeresspiegelveränderungen infolge von Sturmfluten oder als Folge klimatischer Veränderungen der seewärtsgerichtete hydraulische Gradient umgekehrt werden, so dass an "vent"-Regionen Meerwasser in den Grundwasserleiter eintreten kann. Die Verschiebung der Süß-/Salzwassergrenze bei derartigen Randbedingungen ist seit langer Zeit ein bekanntes und gefürchtetes Phänomen, das aufgrund seiner großen wirtschaftlichen Bedeutung schon Gegenstand großer Forschungsprojekte war und ist (DE BREUCK, 1991). Behandelt wurde in diesen Studien und numerischen Strömungs- und Transportmodellen jedoch vornehmlich eine großräumige Verschiebung der Salz-/Süßwassergrenze, während das punktuelle Eindringen von Meerwasser über bevorzugte Transportwege bisher kaum berücksichtigt wurde, aber bedeutende Beeinträchtigungen der Grundwasserqualität bedingen kann.

Ein weiterer bisher wenig beachteter Punkt ist der "Verlust" von Grundwasser durch den submarinen Abstrom. Wahrscheinlich sind für großflächige Wasserhaushaltsbetrachtungen die submarinen GW-Flüsse nicht bedeutend, in kleineren Einzugsgebieten können diese Abflüsse im Hinblick auf das Grundwasserdargebot aber wichtig sein.

Ein Großteil der in der Problemstellung definierten Fragestellungen wurde bereits von mehreren Arbeitsgruppen im Rahmen des EU-Projektes SUB-Gate (SAUTER, 2002)

innerhalb der Eckernförder-Bucht bearbeitet. Ziel des SUB-Gate-Projektes war dabei die multidisziplinäre Untersuchung der Rolle submariner Süßwassereinträge in Küstengebiete unter Einbeziehung der Fachrichtungen Hydrogeologie, Grundwasser Fließmodellierung, Porenwassergeochemie und Biologie/Biogeochemie. In diesem Projekt wurde allein die Installation und Erprobung eines submarinen Brunnens zum Monitoring von submarinen Grundwasser-Austritten bearbeitet, besonders der damit verbundene technologische Aspekt. Dabei sollen sowohl Fragen nach der technischen Umsetzung und der Funktionstüchtigkeit derartiger submariner Brunnen behandelt wie auch die ersten hydraulischen und geochemischen Ergebnisse vorgestellt werden. Das Projekt ist somit als notwendige Ergänzung zu SUB-Gate zu verstehen.

2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Ein Großteil der in der Problemstellung definierten Fragestellungen wurde von mehreren Arbeitsgruppen im Rahmen des EU-Projektes SUB-Gate bearbeitet. Im Rahmen dieses Projektes war die Installation eines Brunnens vorgesehen, die jedoch aufgrund der zu geringen finanziellen Mittel nicht realisiert wurde. Die Zielsetzung dieses Projektes war somit die Installation und Erprobung eines submarinen Brunnens zum Monitoring von submarinen Grundwasser-Austritten, die als notwendige Ergänzung zur Bearbeitung der Fragestellungen im Rahmen des SUB-Gate Projektes anzusehen ist. Der Schwerpunkt dieses Projektes liegt auf der Technologieentwicklung und der praxisorientierten Anwendung der Technologie im Zusammenhang mit dem Bau und Betrieb eines submarinen Brunnens.

Die Projektdurchführung erfolgte unter Beteiligung der bereits in SUB-Gate involvierten Partner, wobei im Rahmen dieses vergleichsweise kleinen Projektes nur die Universität Kiel, das GEOMAR und als Co-Antragsteller das Geologische Büro Dr. Hempel beteiligt waren. Die an dem Projekt beteiligten Partner waren durch Ihre Tätigkeiten innerhalb des SUB-Gate Projektes bereits hervorragend mit dem Standort und der wissenschaftlichen Thematik vertraut.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen der Projektplanung waren für die Aufgabengebiete Standortauswahl, Entwicklung des Brunnens (z.B. Probenahmeports) und Beprobung des Brunnens die Universität Kiel und das GEOMAR verantwortlich, während die Beauftragung, Überwachung und Abnahme des Brunnenbaus Aufgabe des Geologischen Büros Dr. Hempel war. Um eine langfristige Nutzung des submarinen Beobachtungsbrunnens zu gewährleisten, wurde bei der Planung besonders auf Eignung der Baumaterialien geachtet. Die Arbeiten erfolgten in Abstimmung und Kooperation mit der Projektleitung von SUB-Gate (Prof. Dr. M. Schlüter, Dr. E. Sauter, AWI) sowie der Arbeitsgruppe am GEOMAR (Dr. P. Linke).

Der zeitliche Ablauf des Projektes gliedert sich in eine zweimonatige Standorterkundungs-, Vorbereitungs- und Planungsphase. Der Brunnenbau erfolgte am 21.11.2000, er wurde in 24,5 m Wassertiefe von einem Schwimmponton aus im Trockenbohrverfahren bis zu einer Teufe von ca. 8 m niedergebracht. Nach Abschluss des Brunnenbaus erfolgte in den verbleibenden 8 Monaten der Projektlaufzeit in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum GEOMAR eine regelmäßige Beprobung des Brunnens im 2-monatigen Turnus (12.12.2000, 26.2.2001, 4.4.2001, 17.6.2001, 6.9.2001), gefolgt von einer kurzen Auswertungsphase.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

Im Rahmen des Großprojektes SUB-Gate erfolgte eine landseitige Untersuchung des oberflächlichen Einzugsgebietes der Eckernförder Bucht, dazu wurden Daten aus ca. 700 Bohrungen, meteorologische Daten, Pegelstände, Pumpversuchsergebnisse und geochemische Untersuchungsbefunde der Grundwasserleiter sowie Rohwasseranalysen dieses Gebietes zusammengetragen und ausgewertet. Grundsätzlich können drei unterschiedliche Aquifertypen im Untersuchungsgebiet voneinander unterschieden werden, die voneinander durch bindigen Geschiebemergel getrennt sind. Die oberen Braunkohlesande werden zudem weiträumig von einer geringmächtigen Ablagerung des oberen miozänen Glimmertones überlagert. Lokal stehen die Aquifere im hydraulischen Kontakt zueinander. Großräumig kann davon ausgegangen werden, dass das Wasser sowohl in den pleistozänen Wasserleitern wie auch in den oberen Abschnitten der Braunkohlesande der Eckernförder Bucht zufließt.

Die meeresseitigen Untersuchungen zur Hydrologie, Hydrochemie und der Struktur des Meeresbodens innerhalb der Eckerförder Bucht wurden im Rahmen von SUB-Gate intensiv mit Side Scan Sonar, Video und seismischen Methoden untersucht (JENSEN, 2001). Neben den bereits bekannten Grundwasseraustrittsstellen am Mittelgrund (KHANDRICHE & Werner, 1994; WEVER, 1994; WEVER & FIEDLER, 1995) wurden dabei weitere Lokationen nahe der Küstenlinie beobachtet. Untersuchungen zu submarinen Grundwasserflüssen in die Ostsee wurden bisher vornehmlich im meeresseitigen Küstengebiet durch Messung der Flussraten an der Sedimentoberfläche und Erfassung der stofflichen Zusammensetzung der austretenden Wässer durchgeführt (BUSSMANN et al., 1994). Die Ergebnisse zeigten, dass von einer relativ starken Variabilität der Quellschüttungsraten und des Stoffbestands auszugehen ist, die eine permanente Aufnahme dieser Parameter nötig macht. Weiterhin zeigten diese Untersuchungen, dass die Schüttungsraten und der Chemismus der austretenden Wässer nur im Kontext zu den landseitigen hydrogeologischen und meteorologischen Randbedingungen zu verstehen sind. Zur Messung dieser Parameter, wie z.B. der Variabilität des hydraulischen Gradienten, fehlten bisher jedoch weitgehend die technologischen Voraussetzungen, die eine Erfassung und ein Monitoring dieser Stoffflüsse möglich machen.

Eine vielversprechende Pockmark an der Südküste der Eckernförder Bucht wurde im Hinblick auf die oben genannten Fragestellungen genauer untersucht, da sie einen potenziellen Platz für die Errichtung eines submarinen Brunnens bzw. eines Brunnentestfeldes darstellt (siehe Abb. 1). Hinsichtlich des Brunnenbaus wurde auf die technischen Erfahrungen eines erfahrenen Bohrunternehmens zurückgegriffen, das auch im küstennahen offshore-Bereich tätig ist. Die Brunnenkonzeption erfolgte in enger Zusammenarbeit des Bohrunternehmens und der Universität Kiel. Die Antragsteller können durch die Bearbeitung von hydrogeologisch und ingenieurgeologisch orientierten Projekten entsprechende Erfahrungen vorweisen.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen der Installation und des Betriebs des submarinen Brunnens erfolgte eine Kooperation sowie ein Erfahrungsaustausch im Rahmen folgender Projekte bzw. mit folgenden Stellen:

SUB-Gate: Dr. P. Linke (GEOMAR, Kiel)

Forschungstaucher der CAU Kiel

6. Ergebnisse

6. 1. Brunneneigenschaften und Installation

Um eine langfristige Nutzung eines submarinen Beobachtungsbrunnens gewährleisten zu können, musste besonderer Wert auf die Brunneneigenschaften und Installation gelegt werden. Als Planungsgrundlage für die Bestimmung der Gesamtlänge des Brunnens und der Lage der Filterstrecke dienten ganz wesentlich die Erkenntnisse über den oberflächennahen Aufbau des Meeresbodens im Einsatzgebiet aus zahlreichen Echolot- und Subbottom-Profileraufzeichnungen und einer Reihe von Sedimentkernen.

Standort

Besonderes Augenmerk wurde bei den Voruntersuchungen zur Lage des Brunnenstandortes auf die Pockmark-Strukturen in diesem Seegebiet gelegt. Als geeigneter Brunnenstandort wurde ein Pockmark im Bereich der militärischen Sperrgebietstonnen 6b und 7b am Ausgang der Eckernförder Bucht ausgemacht (Abb. 1). Die exakte Position des Brunnenstandortes wurde auf 59°29.009' N und 10°01.159' E festgelegt, bei einer Wassertiefe von 24,50 m. Das seismische Profil zeigt eine morphologische Depression von etwa 1 m Tiefe mit einer Ausdehnung von ca. 133 m. Chloriduntersuchungen an Sedimenten in diesem Bereich ergaben eine starke Abnahme der Konzentrationen mit fortschreitender Sedimenttiefe, so dass davon ausgegangen werden konnte, dass hier mit großer Wahrscheinlichkeit ein Grundwasseraustrittsgebiet vorliegt.

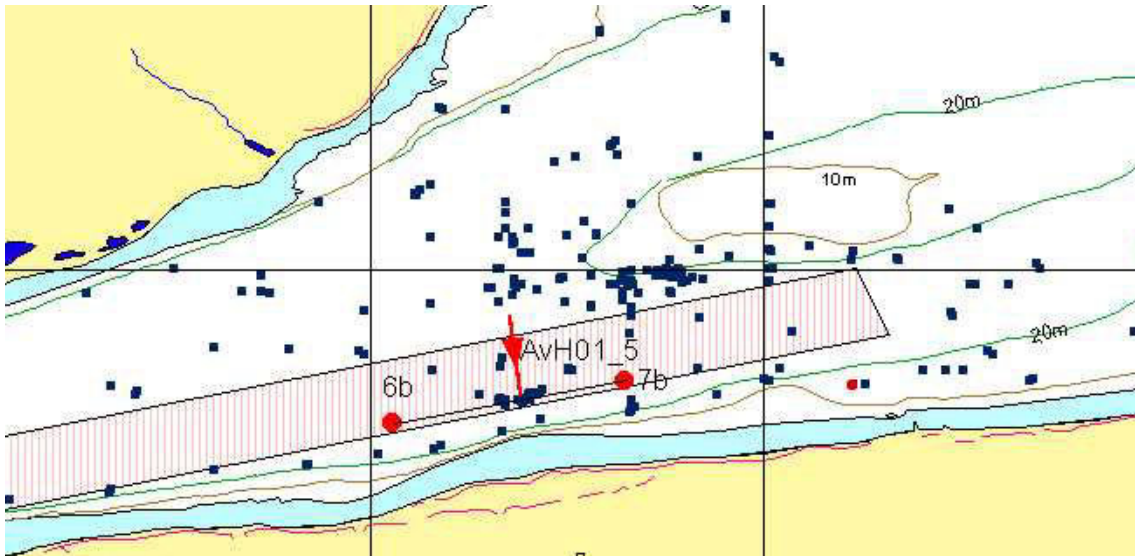


Abbildung 1: Standort des submarinen Brunnens in der Eckerförder Bucht

Am geplanten Brunnenstandort wurde im Mai 2000 von Bord der FS „A. v. Humboldt“ ein Sedimentkern (ECK05) gewonnen, der folgende Sedimentabfolge aufwies (SAUTER et al., 2001):

- 0,00 - 0,90 m Gytia, dunkelgrau
- 0,90 - 1,47 m Schluff, tonig, grau
- 1,47 - 1,62 m Mittelsand, schwach feinkiesig, kalkhaltig, grau
- 1,62 - 3,49 m Kies, stark sandig, Steine, kalkhaltig, grau
- 3,49 - 4,00 m Mittelsand, kalkhaltig, grau

Installation

Entsprechend der oben genannten Sedimentabfolge wurde die Brunnenbohrung und der maximale Brunnenausbau auf 8,0 m mit einer 1 m langen Filterstrecke veranschlagt (Abb. 2). Aufgrund der Korngrößenverteilung im zu verfilternden Bereich unterhalb von 1,47 m unter der Sedimentoberfläche wurde ein Filter mit einer Schlitzweite von 0,5 mm und die Umschüttung des Brunnens mit Filterkies einer Körnung von 0,7 bis 1,2 mm eingebaut. Zur Verhinderung einer hydraulischen Umläufigkeit im Ringraum wurde im Bereich des Aufsatzrohres das Schütten einer Tonsperre vorgesehen.

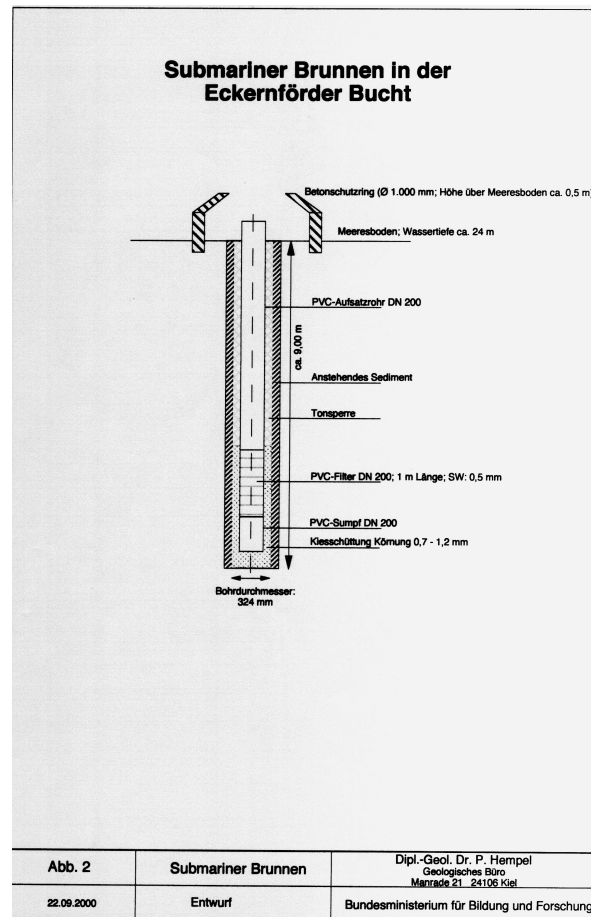


Abbildung 2: Entwurfszeichnung für den Brunnenausbau

Die exakte Lage der Filterstrecke im Brunnenausbau wurde im Verlauf des Bohrfortschrittes festgelegt, in dem die Aufsatz- und Filterrohre in überwiegend 1- und 2 m Längen geliefert und bedarfsgerecht aneinandergesetzt werden sollten. Geplant war, dass der Brunnenkopf etwa 0,5 m über den Meeresboden hinausragen sollte und zum Schutz gegen Bodenfischerei mit einem Betonring mit einem Durchmesser von 1,0 m umgeben werden sollte (Abb. 3).

Die Brunnenbohrarbeiten und die Installation des Brunnens wurden am 21. November 2000 durchgeführt. Die Baugrößen der Sonden und der Unterwasserpumpe machte einen Brunnenausbau in DN 200 mit einer Wandstärke von 13 mm (SBF; Material PVC-U trinkwassertauglich mit Gewindemuffen) erforderlich. Die Brunnenbohrung wurde auf 324 mm im Durchmesser festgelegt, damit der Brunnenausbau noch mit einer ausreichend dimensionierten Filterkiesschüttung und Tonsperre versehen werden konnte.



Abbildung 3: Betonring als Schutzmantel des Brunnens

Technische Ausstattung des Brunnens

Das Kernstück der Brunneninstrumentierung stellt eine Micro-CAT SBE 37-SM Speichersonde der Fa. SeaBird Electronics Inc. dar, die kontinuierlich die elektrische Leitfähigkeit, die Temperatur und den Druck zusammen mit der Zeit aufzeichnen und intern speichern kann (Abb. 4). Diese Sonde wurde an einem Drahtseil etwa 3,0 m tief in den Brunnen gehängt und kann zum Auslesen der Daten von Tauchern an die Wasseroberfläche geholt werden. Die Aufhängung des Drahtseils am Brunnenkopf erfolgt über einen Edelstahlring, der auf der obersten Muffe im Brunnen ruht (Abb. 5).

Für die Strömungssonde wurde eine Öffnung im Brunnendeckel eingelassen. Die Strömungsrate aus dem Brunnen ins Meer wurde mit einer separaten Steuer- und Batterie-Einheit gespeichert. Zum Auslesen der Daten musste diese Einheit ebenfalls von Tauchern geborgen werden. Um einen sicheren und für die Taucher einfach zu handhabenden Ein- und Ausbau der Komponenten zu gewährleisten, wurde der Brunnendeckel mit der

Strömungssonde verbunden. Die Verbindung zum Brunnenaufsatzrohr besteht aus einem Schutzbügel und Schnellspanverschlüssen (Abb. 6). Die vormontierten Komponenten, wie die Microcat-Speichersonde und die im Brunnendeckel angeordnete Strömungsmesseinheit wurden durch die Forschungstaucher in den Brunnen eingebaut. Da der Betonschutzring bis zur Oberkante im Meeresboden versunken war, musste die Steuer- und Batterieeinheit am Schutzbügel befestigt werden. Die Speicherkapazität der Sonden ließ für den zunächst vorgesehenen Messzeitraum von etwa 4 Wochen ein Messintervall von 1 Minute zu.

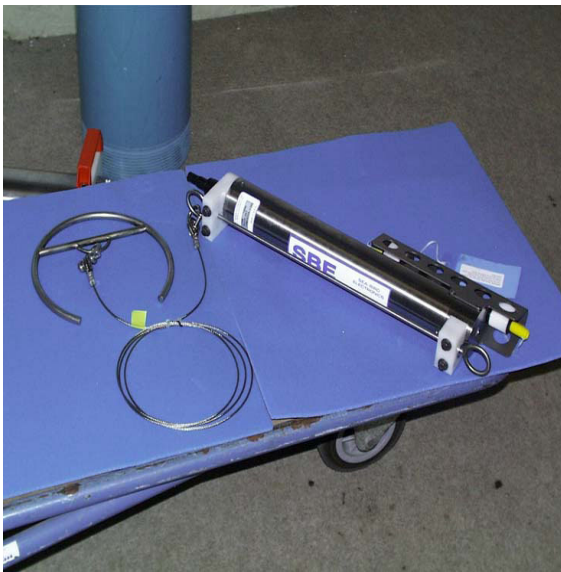


Abbildung 4: CTD-Speichersonde am Drahtseil und Ring zum Einhängen in den Brunnen
Abbildung 5: Einhängen der CTD-Speichersonde in den Brunnen

Zur Beprobung des Grundwassers im Brunnen wurde eine 2“-Unterwasserpumpe vom Typ MP-1 der Fa. Grundfos eingesetzt, die Brunnenwasser durch einen Schlauch an die Wasseroberfläche zum Abfüllen in Probenahmegefäße fördert.

Für den Fall des Verlustes der ersten Markierungsboje wurde in einem Abstand von wenigen Metern vom Brunnen mit Hilfe von Verankerungsgewichten zusätzlich eine weitere Boje ausgebracht. Zudem wurde die Öffentlichkeit durch einen Artikel in den „Kieler Nachrichten“ und durch einen Beitrag im Norddeutschen Fernsehen (N3) im Nov. 2000 über dieses Projekt informiert.



Abbildung 6: Unterwasseraufnahme vom Brunnenkopf mit der Strömungssonde, der Steuer-/Batterie-Einheit am Sicherungsbügel

6.2. Probennahme

Im Projektzeitraum wurden 5 Beprobungen (18 Dezember 2000, 26 Februar 2001, 4 April 2001, 17 Juli 2001 und 6 September 2001) durchgeführt. Die Beprobung des Brunnens gliedert sich dabei in die folgenden Schritte: Bergung der Microcat SBE37 an Bord des Schiffes FS Polarfuchs, Auslesen der Daten, Grundwasserbeprobung und Wiedereinbau des Microcat SBE37.

Im ersten Tauchgang wurde dabei das Messgerät durch Forschungstaucher an Bord des Schiffes geholt und die Daten ausgelesen. Im zweiten Tauchgang erfolgte die Grundwasserbeprobung aus dem Brunnen. Dazu wurde ein ca. 30 m langes PVC-Rohr, das mit der Unterwasserpumpe verbunden war, von den Tauchern zum Brunnen geschleppt und dort eingebracht. Die über einen regelbaren Frequenzumwandler an Bord des Schiffes angetriebene Pumpe samt Stromkabel wurden ungefähr 4 m in das Brunnenrohr eingebracht.

Das Wasser wurde in vorbereiteten Behältern gesammelt und mit Ausnahme der Beprobung im Dezember 2000 (Städtisches Labor) im Labor Angewandte Geologie, Universität Kiel, analysiert. Anfänglich (Dezember und Februar 2001 Beprobung) war der Salzgehalt höher im

Vergleich zu den Werten aus der Beprobung eines temporären Brunnens (während der SUB-Gate Kampagne im Mai 2000, SAUTER et al. (2001)). Wahrscheinlich führte eine zu hohe Pumprate zu Salzwasserintrusionen, ab Mai 2001 wurden die Pumpraten entsprechend niedrig gestellt. Trotzdem kam es in der Beprobung von Juli 2001 zu einer Salzwasserintrusion, was auf eine absinkende Grundwasserfließrate zurückgeführt wird. Diese Vermutung deckt sich auch mit Daten, die anhand der kontinuierlichen Messungen mit der Mikrocat-Sonde erhoben wurden (pers. Komm. P. Linke, GEOMAR).

Material und Methodik

An den Wasserproben wurden Anionen- (Sulfate, Chlorid, Nitrat, Bikarbonat), und Kationengehalte (Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Si, Al) mittels ICP-AES und Ionenchromatographie gemessen. Druck, elektrische Leitfähigkeit und Temperatur wurden in situ mittels der Mikrocat-Sonde SBE37 gemessen.

Die Ladungsbilanz in den Proben lag generell im Bereich zwischen 0.03% bis 3.6%. Zur Abschätzung des beprobungsbedingten Ausmaßes der Salzwasserintrusion wurde der Anteil des Meeresswassers an der Gesamtprobe mit folgender Gleichung berechnet (BALKE et al. 2000):

$$C(\text{gw}) = \frac{C(\text{mix}) - \frac{x}{100} * C(\text{bw})}{1 - \frac{x}{100}},$$

mit x = Fraktion des Salzwassers in der kontaminierten Probe,

C(mix) = Chlorid Konzentration in der kontaminierten Probe

Cl(gw) = Grundwasser Chlorid Konzentration,

Cl(bw) = Ostseewasser Chlorid Konzentration.

Der Referenzwert C(gw) wurde anhand von Daten bestimmt, die aus Messungen im temporären Brunnen (GEOMAR, SUB-Gate) und des im Rahmen dieses Projektes installierten Brunnens (CAU Kiel) stammen. Analysen des Bodenwassers dienten als Referenz für die Ostseewasser Komposition, dabei wurde auf Datenmaterial aus dem SUB-

gate Projekt zurückgegriffen, das ungefähr aus dem gleichen Zeitraum wie die Brunnenbeprobung stammt. Leider wurde in diesen Proben kein Bikarbonat bestimmt, so dass die Daten durch Messungen der CAU Kiel aus anderen Zeiträumen ergänzt wurden. Der berechnete Anteil des Meereswassers in der Grundwasserprobe liegt bei 1,1-1,3%.

6.3. Ergebnisse der Feld- und Laboranalysen

Die Ergebnisse der Feld- und Laboranalysen sind in Tab. 1 dargestellt. Zudem wurden Ergebnisse aus einem naheliegenden landseitigen Brunnen zum Vergleich herangezogen, da es sich bei dem Brunnenwasser höchstwahrscheinlich um Wasser aus dem gleichen Aquifer, nur anstromig, handelt. Abb. 7 zeigt die hydrochemische Zusammensetzung der Proben aus dem submarinen Brunnen, dem temporären Brunnen und der Ostsee im Bereich der Eckernförder Bucht in Form eines Piper-Diagramms. Wie erwartet, sind die Ostseewasserproben in der Cl - Na/K- Ecke des Diagramms vertreten und repräsentieren eine typische Meereswasserkomposition. Die kontaminierte Probe wird dagegen auf einer Linie zwischen Süß- und Ostseewasser vertreten, welche einen gemischten Charakter zeigt. Die Grundwasserprobe aus dem temporären Brunnen und die gerechneten Süßwässer aus dem permanenten Brunnen sind alle in der $\text{HCO}_3\text{-Ca/Fe}$ Ecke angesiedelt, was auf einen Anteil an stark reduziertem Süßwasser bzw. auf ein Wasser aus einem pleistozänen Aquifer hindeutet. Die chemische Komposition dieser Proben stimmt allerdings besser mit Wässern aus dem Miozänaquifer überein (siehe SUB-Gate Bericht). Dies deutet darauf hin, dass diese Gewässer so weit vom Grundwasserneubildungsgebiet entfernt sind, dass sie nur noch eine gewisse Menge an miozänem Wasser enthalten und Grundwasser aus einem anderen Aquifer infiltriert wird. Dieser Befund ist aus den geologischen Untersuchungen des SUB-Gate Projektes bestätigt worden, wo geologische Untersuchungen gezeigt haben, dass eine mögliche Verbindung zwischen den Tertiär und jüngeren Quartär Aquiferen besteht (Jensen, 2001).

Tabelle 1: Grundwasseranalysen (mg/l) aller verfügbaren Brunnen im Untersuchungsgebiet.

Die Klammerangaben beziehen sich auf das jeweilige Labor, in dem die Analysen durchgeführt wurden.

Ort	PH	Cl	o-PO4	SO4	HCO3	NO ₃	Na	K	Ca	Mg	Fe (tot)	Mn	Al (µg/l)	Si	Li	CH ₄
Landseitiger Brunnen 17.01.00 (städtisches Labor)	7,26	26,0 [■]	0,28	36,0	347,7	-	18,3	3,0	112,0	11,5	2,3	0,17	-	-	-	-
Temporär submariner Brunnen 13.5.00 (städtisches Labor)	7,3 (11,8 ⁰ C)	20,0	0,30	4,0	329,4	<0,1	18,1	3,4	90,4	10,1	1,1	0,17	84	14,3	-	0,1
submariner Brunnen 19.12.00 (städtisches Labor)	7,3 (8,9 ⁰ C)	135,0	0,30	18,0	311,1	<0,1	85,0	5,0	91,8	17,3	1,8	0,19	15	14,3	-	-
submariner Brunnen 26.2.01 (Labor Angewandte Geologie)	6,3 (4,2 ⁰ C)	163,0	-	20,3	-	0,4	82,0	4,2	84,0	15,7	1,5	0,15	-	13,9	-	-
submariner Brunnen 4.5.01(Labor Angewandte Geologie)	7,5 (8,9 ⁰ C)	20,7	-	2,3	290	<0,1	13,4	2,3	88,0	8,3	1,2	0,17	14,0	14,0	<0,1	-
submariner Brunnen 17.7.01(Labor Angewandte Geologie)	7,6 (18 ⁰ C)	39,0	-	20,0	-	<2,0	15,4	2,5	89,5	8,6	0,95	0,16	12,0	13,6	<0,1	-
submariner Brunnen 6.09.01 (Labor Angewandte Geologie)	7,5	49,0	-	6,3	-	<0,2	29,8	3,0	87,3	10,1	0,82	0,18	7	13,8	-	<0,1

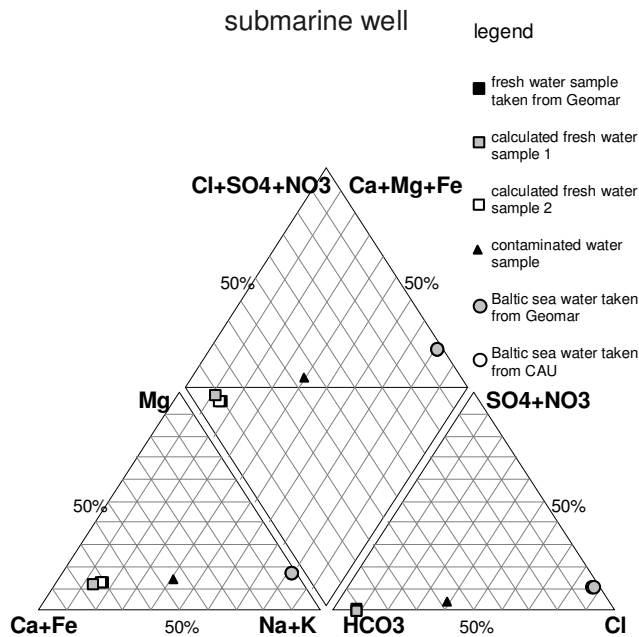


Abbildung 7: Piper Diagramm zur Beschreibung der Wasserproben aus der Ostsee und dem submarinen Brunnen.

Unterschiede zwischen Grundwasser aus dem meerseitigen bzw. landseitigen Brunnen existieren insbesondere im Sulfatgehalt. Die Sulfatgehalte in Wasserproben aus dem meerseitigen Brunnen (Abb. 8a, Tabelle 2) sind dabei deutlich niedriger als in dem landseitigen Brunnenwasser (Tabelle 2). Im Dezember 2000, Feb 2001, Juli und September 2001 kam es zu Salzwasserintrusion in unterschiedlichen Mengen, die Sulfatkonzentrationen wurden nach der oben beschriebenen Methode entsprechend korrigiert. Die Sulfatgehalte variieren stärker als erwartet (5-36 mg/l), die konsistent niedrigeren Werte im Vergleich zum landseitigen Brunnenwasser deuten auf eine Reduktion des Wassers entlang des Fließpfades hin. Diese Hypothese wird durch ein gleichzeitiges Absinken der Eisenkonzentrationen von 2.5 mg/l auf 1 mg/l verstärkt (Abb. 8b).

Als Erklärung für eine Sulfatreduktion bietet sich die folgende Möglichkeit: anders als bei der landseitigen Überlagerung des Aquifers ist im Meer eine Überlagerung mit Sand (mittel bis fein) und stark sandigen Mudden (genannt Gytja) mit einer sehr weichen Schicht dunkel grauer Schlicks zu finden. Die Mudde und der Schlick bestehen teilweise aus stark

abgebautem und refraktärem organischen Material. Zusätzlich ist der Brunnen in einem Pockmark platziert worden, der sich in methanreichen Mudden befindet, die aus den Holozän Mudden der Eckenförder Bucht bekannt sind (JENSEN, 2001). Das Grundwasser ist stark reduziert ($\text{NO}_3 < 0,1 \text{ mg/l}$), als Elektronendonatoren können entweder gelöstes organisches Material oder Methan dienen, welches in den Pockmarks in Konzentrationen im Bereich von $100\text{-}670 \mu\text{mol CH}_4/\text{l}$ Sediment) (SAUTER, 2002) nachgewiesen wurde und aufgrund des existierenden Gradienten zwischen Sedimentoberfläche (24,5m) und dem Aquifer (29,9m) durchsickern kann.

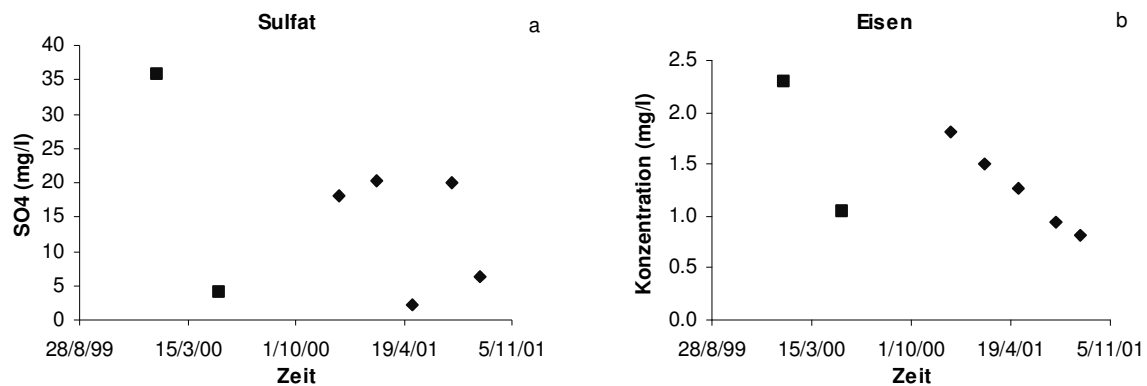


Abbildung 8: Sulfat- (a) und Eisenkonzentrationen (b) in den Proben aus dem submarinen Brunnen während des 8 monatigen Beprobungszeitraumes

Tabelle 2: Sulfatgehalte im submarinen(temporär und dauerhaft) und landseitigen Brunnen

Probe	Chlorid (mg/l)	% Meerwasser ¹	gemessener Sulfatgehalt (mg/l)	Sulfat-Konz. im Meerwasser (mg/l) ²	Sulfat Konz. im GW (mg/l)
Landseitig 17.01.00	26,0	-	36	-	-
Subm. temporär 13.05.00	20,0	-	4,0	0,5	3,5
Subm. 19.12.00	135,0	1,1	18,0	2,2	15,8
Subm. 26.02.01	163,0	1,37	20,3	2,5	17,8
Subm. 4.05.01	20,7	-	2,3	0,3	2,0
Subm. 17.07.01	39,0	0,13	20,0	2,2	18,8
Subm. 6.09.01	49	0,23	6,3	0,8	5,5

¹Ostseewasser Durchschnittswerte 1986; Cl:10000 mg/l; SO₄: 1300 mg/l

²SO₄ relativ zu SO₄/Cl in Ostseewasser

Zeitliche Entwicklung der Ausflussrate

Die Schüttungsrate ist von $8,64 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ auf $2,16 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ während des Messzeitraumes von 8 Monaten gesunken. Als mögliche Ursachen wird die Verstopfung der Filterkiesschüttung durch feine Sedimente oder bakterieller Ablagerungen bzw. Fe(III)-Hydroxidfällung diskutiert. Ebenso kann die abnehmende Schüttungsrate als eine Folge der Druckentlastung des gespannten Aquifers durch die Installation des Brunnens angesehen werden. Aufgrund des geringen Speicherkoeffizienten gespannter Aquifere im Bereich um 10^{-4} bis 10^{-5} können selbst geringe Schüttungsraten zu einer Entlastung der artesischen Drücke und einer kontinuierlich abnehmenden Brunnenförderung führen.

6.4. Zusammenfassung / Summary der erzielten Ergebnisse

Die technische Entwicklung für das Monitoring eines submarinen Brunnens ist wichtig, um Effekte einer küstennahen Landnutzung im Hinblick auf die Qualität des Meerwassers abzuschätzen. In diesem Projekt wurde erfolgreich ein submariner Brunnen zur kontinuierlichen Messung der Parameter Salinität, Temperatur und Grundwasser-Flussraten in einer Pockmark-Lokation in der Eckernförder Bucht (Ostsee) installiert und über einen Zeitraum von 8 Monaten beprobt. Proben für hydrochemische Analysen wurden in einem zweimonatigen Rhythmus genommen und belegen die vollständige Funktion des Brunnens.

Die Flussrate nahm im Beprobungszeitraum von 8 Monaten von 6L/min auf 1,5L/min ab, eine letztendliche Erklärung ist dafür bislang noch nicht gefunden. Daten zu den anorganischen Parametern zeigen, dass bereits im Grundwasser Sulfatreduktion stattfindet, die sich in Richtung des submarinen Brunnens verstärkt. Erhöhte Sulfatreduktion im direkten Bereich des submarinen Brunnens wird auf die Infiltration von Methan bzw. organischem Material zurückgeführt, eine Methanoxidation konnte an der Pockmark-Lokation nachgewiesen werden (SAUTER, 2002). Dies deutet darauf hin, dass das Grundwasser auch durch das Meerwasser beeinflusst wird und nicht nur umgekehrt.

The development of technology for monitoring submarine groundwater discharges is significant for example to evaluate the effect of near-shore land use on the quality of coastal waters. In this project a submarine well equipped with a continuous monitoring system for salinity, temperature and groundwater flow rate was successfully installed in a pockmark

location of the Eckerförder Bay of the Baltic Sea. Samples were obtained on a bimonthly basis for hydrochemical analyses. The flow rate decreased over a period of eight months from 6L/min to 1.5 L/min the cause of which has not yet been clarified. Inorganic analyses showed that there is a reduction of the already small amount of sulfate occurring in the groundwater along its flow path from shore-based to the location of the submarine well. This could be explained by infiltration of reducing substances such as carbon or methane, especially in the pockmark location in which the well is located, into the groundwater aquifer, thus indicating not only an influence of groundwater on sea water but also of sea water on groundwater composition.

6.5. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen

Die Entwicklung einer praktikablen Technologie für das Monitoring submariner Grundwässer ist wichtig, um den Einfluss landseitiger Nutzung für das marine Milieu zu evaluieren. Die Ergebnisse dieses Projektes zeigen, dass die Installation eines Brunnens mit kontinuierlichen Messungen und auch die Gewinnung von Proben erfolgreich durchgeführt werden kann. Probleme in Form von Salzwasserintrusionen traten bei hohen Pumpraten auf, nach längerem Betreiben verschlechterten sich die Filtergeschwindigkeiten. Eine abschließende Erklärung für dieses Problem ist noch nicht gefunden.

Für die Zukunft ist zur Zeit nur die kontinuierliche Messung mit der Microcat-Sonde vorgesehen (GEOMAR). Die Daten werden in 2-monatigen Intervallen ausgelesen. Ein weiteres chemisches Monitoring ist bisher nicht vorgesehen, entsprechende Anträge für weitere Ansätze zur Evaluierung hydrochemischer Parameter sind noch nicht formuliert.

Eine Veröffentlichung in der Zeitschrift „Die Küste“ ist in Vorbereitung, jedoch mussten nach der Installation des Brunnens erst ausreichend Datenmengen gesammelt werden, die eine Publikation ermöglichen und rechtfertigen.

6.6. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekanntgewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

keine

6.7. Literatur

- BALKE, K.-D., BEIMS, U., HEERS, F. W., HÖLTING, B, HOMRIGHAUSEN, R., KIRSCH, R., MATTHESS, G., (2000): Grundwassererschließung, Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 4, Gebrüder Bornträger, Berlin, Stuttgart
- BUSSMANN, I., SUESS, E., LINKE, P., SCHLÜTER, M. (1994): Seasonal transport of methane and fresh water in the Eckernförde Bay /Western Baltic. In Wever, T. F. (Ed). Proceedings of the gassy mud workshop, FWG Kiel, 31-32.
- CHURCH, T.M. (1996): An underground route for the water cycle. Nature, Vol. 380, 579-580.
- DE BREUCK, W. (1991): Hydrogeology of Salt Water Intrusion. A Selection of SWIM Papers. International Association of Hydrogeologists. IAH, International Contributions to Hydrogeology. 422 S., Verlag Heise, Hannover.
- GALLAGHER, D. L., DIETRICH, A.M., REAY, W.G., HAYES, M.C., SIMMONS, Jr., G.M. (1996): Ground water discharge of agriculture pesticides and nutrients to estuarine surface waters. GWMR, Winter, 118-119.
- JENSEN, J.B., KUIJPERS, A., BENNIKE, O., LAIER, T., WERNER, F. (2001): A geological model for freshwater seepage and pockmark formation in Eckenförde Bay, western Baltic. (paper submitted to Continental Shelf Research)
- KHANDRICHE, A. , WERNER, F., (1994): Fresh-water generated pockmarks in the Eckernförde Bay. gassy Mud Workshop, 24-30.
- MOORE, W. S. (1996): Large groundwater inputs to coastal waters revealed by 226Ra enrichments. Nature, Vol 380, 612-614.
- SAUTER, E. LAIER, T., ANDERSEN, C. DAHLGAARD, H., SCHLÜTER, M. (2001): Sampling of sub-seafloor aquifers by a temporary well for CFC age dating and natural tracer investigations. (submitted to the Journal of Sea Research)
- SAUTER, E. (2002) (Ed.): Executive final summary report of the SUB-Gate Project. ENV4-CT97-0631.
- WEVER, T.F. (1994): Proceedings of the gassy mud workshop. Forschungsanstalt der Bundeswehr für Wasserschall und Geophysik (FWEG).
- WEVER, T.F., FIEDLER, H.M. (1995): Variability of acoustic turbidity in Eckernförde Bay related to the annual temperature cycle. Marine Geology, 125, 21-27.

Danksagung

Am 22.11.2000 erfolgte durch Forschungstaucher der Universität Kiel unter Leitung von T. Kollatschni und Dr. P. Linke, Forschungszentrum GEOMAR Kiel, von Bord der FS „Polarfuchs“ der Einbau der Messinstrumente in den Brunnen.