

## KURZFASSUNG

Mit den vorliegenden Untersuchungen im Bereich der Cap-Vert Halbinsel, westlich Dakar Senegal (s. Abb.1), wurde in den Jahren 1996-1999 der aus quartären Sanden aufgebaute Thiaroye Grundwasserleiter untersucht. Geologisch sind die Sande Teil des Senegalesisch-Mauritanischen Sedimentationsbeckens, das eine Fläche von 500 000 km<sup>2</sup> einnimmt.

Die Spitze der Cap-Vert Halbinsel wird durch die von West nach Ost verlaufende Thiaroye-Landenge mit dem Hinterland verbunden. Diese Thiaroye-Landenge die im Norden und Süden vom Atlantischen Ozean begrenzt wird, besteht aus einer Abfolge von Sedimentgesteinen. Aufgrund verschiedener Bohrungen und geophysikalischer Messungen können in diesem Gebiet zwei stratigraphische Einheiten unterschieden werden: tertiäre Tone im Liegenden, auf die quartäre Sande folgen.

Unter den trockenen klimatischen Bedingungen Senegals, die ein sehr eingeschränktes Wasserdargebot bedingen, ist der Thiaroye-Aquifer eine wichtige Basis für die Trinkwasserversorgung der Hauptstadt Dakar, in der zwei Drittel der Bevölkerung Senegals wohnen. Frühere Arbeiten haben eine hohe grenzwertüberschreitende Nitratbelastung (400 mg/l) dieses wichtigen Grundwasservorkommens belegt (COLLINS & SALEM, 1989; GAYE et al., 1989; SONEES, 1989; FALL, 1991; TANDIA, 1997).

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur langfristigen Sicherung der Trinkwassernutzung des Thiaroye-Aquifers durch das Aufzeigen von Möglichkeiten zur Reduzierung des Nitratreintrages in das Grundwasser leisten. Dazu wird auf Basis eines Geo-Informationssystemes (PC ARC/INFO Version 3.4D ESRI 1990) der Einfluß unterschiedlicher Landnutzungsformen auf den Stickstoffhaushalt des Sandgrundwasserleiters untersucht.

Als Basis für die hydrogeologischen Arbeiten wurde eines hydrogeologisches Modell des Quartären Thiaroye Grundwasserleiters erstellt. Das Hydrogeologische Modell lehnt sich an die Ergebnisse dieser Untersuchung und früherer Arbeiten an. Es ist aus folgenden Informationsebenen aufgebaut:

- Klassifizierung der Meßstellen

Die Grundwassermeßstellen, Bohrungen und Privatbrunnen wurden auf der Basis des Kartenblattes „Nappe libre des sables Quaternaires Infrabasaltique-Thiaroye/Beer Thialane“ des „Ministère Développement Industriel Direction Hydraulique Dakar Senegal“ lokalisiert und nach ihrer Repräsentativität klassifiziert. Die geographischen Koordinaten aller Meßpunkte wurden mit einem GPS-System mit 1-5 m Genauigkeit bestimmt (s. Abb.9).

- Digitales Geländemodell

Das Digitale Geländemodell wurde auf der Basis der topographische Kartenblätter „DAKAR, BARGNY, KAYAR,, (I.G.N PARIS & S.G.N DAKAR, 1983) erstellt.

- Grundwassergleichenpläne

Auf der Grundlage von Wasserspiegelmessungen im Juni und Oktober 1997 und dem langjährigen Gleichenplan (1984-1997) herausgegeben durch das „Ministère Hydraulique-

Dakar“ werden mehrere Grundwassergleichenpläne erstellt. Die Wasserspiegelmessungen am Ende der Trockenzeit (Juni) und der Regenzeit (Oktober) erfolgten mittels eines Lichtlotes, relativ zur Pegeloberkante (POK). Problematisch sind im Untersuchungsgebiet die aus einer Datenbank zur Verfügung gestellten absoluten Daten zur POK der Meßstellen. Diese scheinen von geringer Güte zu sein, konnten aber nicht durch eigene Nivellements geprüft werden. Daher wurden unter Zuhilfenahme von topographischen Karten, Karten zum Grundwasserleiter (Basis, Mächtigkeit) und die Lage der Feuchtgebiete (Niayes) die Höhenangaben einzelner Meßstellen korrigiert.

Für das hydrogeologische Modell wurden die Daten zum Grundwasserstand mit Hilfe von geostatistischen Methoden (Variogrammanalyse, lineare Krigeschätzung) bearbeitet. Hierdurch war es möglich, die Meßwerte zu regionalisieren. Verschiedene Richtungsvariogramme wurden erstellt und zeigen für die beiden Stichtagsmessungen und den langjährigen mittleren Grundwasserstand eine Anpassung nach der Gauß-Modellfunktion (s. Abb. 29 bis 31). Die Grundwassergleichenpläne (s. Abb. 38 bis 40) zeigen eine Veränderung der Grundwasseroberfläche zwischen Juni und Oktober. Ebenfalls dargestellt ist ein Grundwassergleichenplan für die Beobachtungszeit 1984-1997. Der mittlere Grundwassergleichenplan erreicht ein Niveau zwischen den beiden Stichtagsmessungen.

Die Darstellung zeigt eine Fliessrichtung des Grundwassers von Süden nach Norden, in Richtung des Meeres. Im Westen und Osten des Gebietes deutet sich eine Grundwasserscheide in Richtung des westlichen „Nappe Infrabasaltique“ bzw. der östlichen „Nappe du Littoral Nord“ an. Das größte Gefälle der Grundwasseroberfläche liegt in den Förderbrunnen „THIAROYE“ (10 000 m<sup>3</sup>/a) und „BEER THIALANE“ (8 000 m<sup>3</sup>/a).

Die Auswertung der langjährigen Grundwasserganglinien (1976-1997) zeigt eine Absenkung der Wasserstände im Südosten des Grundwasserleiters von Kounon nach Mbayakh unter dem Einfluß der relativ trockenen klimatischen Bedingungen der letzten 10 Jahren. Der langjährige mittlere Jahresniederschlag beträgt 357 mm (1976-1997), die Untersuchungsperiode 1987-1997 erreicht dagegen nur 300 mm/a.

- Grundwasserbasis

Die Basis des quartären Thiaroye Sandgrundwasserleiters nach HEBRARD (1966) ist in Abb. 22 dargestellt. Die Isolinien der Aquiferbasis zeigen eine Hochstruktur (10 m ü NN) beim Ausstrich der tertiären Tone im Südosten des Grundwasserleiters im Bereich der Brunnen Pts.202 (Kounon), Pts.235 (Bambilor) und PS.8. Eine Depressionsstruktur (-70; -90 m ü NN) ist an der nördlichen Küste im Bereich der Brunnen Pts.234 und im Westen des Grundwasserleiters (Meßstelle P2-1) zu erkennen.

- Grundwassermächtigkeitskarte nach WHO (1972)

In den Depressionsstrukturen der Grundwasserleiterbasis finden sich höhere Grundwassermächtigkeiten (s. Abb. 23) z.B im Thiaroye Becken (> 50 m) im Bereich der Förderbrunnen (F.15, F.17, F.18, F.22, F.21) und südlich des „Lac Mbeubeuss und Retba“ (20 – 60 m).

- Flurabstandskarte

Eine Grundwasserflurabstandskarte wurde über das Residuals-Modul der Programms SURFER 6.01 berechnet. Das Programm erlaubt die Berechnung der Vertikaldifferenz zwischen dem Z-Wert eines Punktes aus einem XYZ-Data-Point-File und einem interpolierten Z-Wert eines Rasterpunktes aus einem GRID-File mittels subtraktiver Verschneidung. Die Verschneidung erfolgte auf Grundlage des GRID-Files der Grundwasseroberfläche vom Oktober 1997. Der XYZ-Data-Point-File der digitalisierten Höhenlinien der topographischen Karte diente als DAT-file. Das Ergebnis der Verschneidung wird als Isolinienplan ausgegeben. Die Gesamtmächtigkeit der Grundwasserüberdeckung (s. Abb. 42) zeigt insgesamt ein oberflächennahes Grundwasser im Thiaroye Aquifer.

- Geohydraulische Parameter

An einer Auswahl von Grundwassermeßstellen wurden Pumpversuche zur Bestimmung der geohydraulischen Kennwerte des Grundwasserleiters durchgeführt. Zur Registrierung der Meßwerte kam ein Datenlogger (16 – Kanal – Logger 21 X, CAMPELL Scientific LTD) zum Einsatz. Mittels eines Lichtlotens wurden Kontrollmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse für die Durchlässigkeitsbeiwerte, die Transmissivität und den Speicherkoeffizienten an den ausgewählte Grundwassermeßstellen sind auf Basis der verschiedenen Methoden für einen ungespannten Grundwasserleiter (THEIS, COOPER & JACOB, BOULTON) in Tabelle 4 zusammengestellt. Der Wiederanstieg des Grundwassers wurde nicht ausgewertet. In der Tabelle 5 wurden die mittleren Werte der verschiedenen Methoden und die erzielten Ergebnisse den Werten aus dem WHO-Bericht (Etude Hydrogéologique de la Nappe des sables Quaternaires, O.M.S, 1972) gegenübergestellt. Die Werte liegen in der gleichen Größenordnung. Unterschiede ergeben sich durch die Inhomogenität des Grundwasserleiters, durch die wechselnden Mächtigkeiten der einzelnen Schichten und die fehlende Auswertung des Wiederanstieges. Auf Grund der Ergebnisse der deskriptiven Statistik (Histogrammdarstellung, Prüfung auf Normalverteilung) konnte eine Regionalisierung der Daten nicht vorgenommen werden.

- Hydrochemische Untersuchung des Thiaroye Grundwasserleiters

- Basischemische Parameter

Die basischemischen Parameter wurden im Juni und Oktober 1997 gemessen.

Die Meßergebnisse des pH-Wertes betragen 4,47 bis 7,85. Mit wenigen Ausnahmen sind die Werte im sauren Bereich.

Der gelöste Sauerstoffgehalt des Grundwassers beträgt im Mittel 5,45 mg/l. Das Maximum von 8,7 mg/l stammt aus einem handgegrabenen Privatbrunnen mit einem Durchmesser von 1,10 m, dessen Wasseroberfläche offen zutage liegt.

Die Grundwassertemperatur beträgt im Mittel 29° C und ist damit nur geringfügig kühler als die mittlere Lufttemperatur (30° C). Gemeinsam mit den hohen Sauerstoffgehalten des Grundwassers spricht dies für ein offenes System.

Die spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten liegen bei den meisten Proben zwischen 500 und 1000 µS / cm. Die zum Teil hohen Leitfähigkeitswerte des Grundwassers ergeben sich durch die Mischung von Grundwasser mit Meerwasser. Während der Pumpversuche wurden kontinuierlich die physikalisch-chemischen Basisparameter Temperatur, spez. elektrische

Leitfähigkeit, gelöster Sauerstoff und pH-Wert gemessen und auf einem Datenlogger im Intervall von 10 Sekunden vor Ort gespeichert.

Zur Validierung der Datenlogger-Meßwerte wurden die Daten mit manuellen Messungen (pH-Meter, Oximeter, Konduktometer) überprüft. Die Anhänge 5, 6, 7 zeigen bei den Pumpversuchen eine signifikante Veränderungen der physikalisch-chemischen Basisparameter.

#### - Wasserchemie im Thiaroye Grundwasserleiter

Zur Interpretation der Wasserchemie im Thiaroye wurde eine Unterteilung des Arbeitsgebietes aufgrund von Unterschieden in der Landnutzung vorgenommen. In der thematischen Landnutzungskarte sind fünf verschiedene Zonen ausgeschieden, die sich durch Landnutzungstypen abgrenzen lassen. Dabei sind fünf verschiedene Wassergruppen mittels Stiff-Diagramm in Abb. 93 zu unterscheiden:

**Zone A:** Das Stadtgebiet wird als Zone A (SUBURBAN) bezeichnet. Aus den Wasseranalysen ergibt sich in dieser Zone eine hohe Nitratbelastung (100-400 mg/l) des Grundwasserleiters, verursacht durch anthropogenen Nitratreintrag in das Grundwasser.

**Zone B:** Die Zone B stellt das Sanddünengebiet dar. Die chemische Beschaffenheit des Grundwassers in diesem Gebiet ist gekennzeichnet durch hohe  $\text{Na}^+$ -,  $\text{K}^+$ - und  $\text{Cl}^-$ - Gehalte. Diese hohen Konzentrationen können aus der Lösung salzhaltiger Gesteine stammen oder auch Folge einer Aufmineralisation durch Verdunstungsvorgänge sein.

**Zone C:** Mit der Zone C werden die Dörfer dargestellt. Das Grundwasser ist durch hohe anthropogen verursachte Nitrat- und Sulfatgehalte charakterisiert.

**Zone D:** Die „Niayes“ Gebiete stellen Zonen zwischen den Dünenrücken mit flachem Grundwasser dar. Hier ist die Wasserchemie durch hohe Hydrogenkarbonatgehalte charakterisiert.

**Zone E:** Damit sind die landwirtschaftlich genutzten Gebiete zusammengefaßt. Im Gegensatz zur Zone A und C ist diese Zone nicht durch hohe Nitratkonzentrationen belastet. Das Grundwasser weist jedoch relativ hohe Gehalt an Sulfat und Calcium auf.

Ein Vergleich der Wasserchemie der Grundwässer in Korrelation zur Landnutzung zeigt, daß die Nitratbelastung des Thiaroye Grundwasserleiters nicht von der landwirtschaftlichen Nutzung verursacht wird, sondern durch Abwasserversickerung aus Haushalten in Stadtgebieten.

#### - Darstellung der Nitratkonzentrationen im quartären Thiaroye Grundwasserleiter

zur Erfassung der Nitratgehalte des Grundwassers wurden die Wasserproben von Juni und Oktober 1997 photometrisch analysiert, nachdem die Proben zuvor filtriert worden waren (0,45µm Cellulose-Nitrat-Filter, gewaschen). Die Regionalisierbarkeit der Nitrat-Konzentrationen wurde mit Hilfe von deskriptiven statistischen (Histogrammdarstellung, Prüfung auf Normalverteilung) und geostatistischen Methoden (Variogrammanalyse, Lineare Krigeschätzung) überprüft. Über die Histogrammanalysen (s. Abb. 56, 57) erfolgte die Berechnung der arithmetischen Mittel der Nitrat-Konzentrationen im Thiaroye Grundwasserleiter mit 90 mg/l (n=50) (Juni 1997) und 98 mg/l (n=50) (Oktober 1997). Die Verteilung der Meßwerte sind mit einer Schiefe von +1,60 (Juni) und +1,62 (Oktober) rechtsschief. Die Datensätze zeigen einen geringen regionalen Zusammenhang (s. Abb. 58, 59) der Meßwerte im Juni und Oktober 1997. Es konnte keine Kreuzprüfung vorgenommen werden, da die Variogrammparameter zur Krigeschätzung des Isolinienplanes nicht bekannt waren. Daher wird die Nitratkonzentration im Grundwasser als punktuelle Repräsentation der Konzentrationszonen (Abb. 60, 61) im Thiaroye Grundwasserleiter dargestellt.

- Klimatische Wasserbilanz

Eine klimatische Wasserbilanz des Thiaroye Aquifers wurde unter Anwendung des Geo-Informationen-Systems PC ARC/INFO mit Klimadaten (ASECNA/DAKAR) erstellt. Hierzu war es erforderlich, in ARC/INFO die Landnutzungstypen zu berücksichtigen, um die klimatische Wasserbilanz des Arbeitsgebietes mit den Komponenten Niederschlag und Evaporation aufzustellen. Für die „Niayes“ benannten Flächen zwischen den Dünenrücken, in denen Grundwasser zu Tage tritt, und die Seen wurde die PENMAN-Gleichung zur Bestimmung der potentiellen Verdunstung einer freien Wasseroberfläche (MATTHESS & UBELL, 1983) verwendet. Im Bereich der Sanddünen- und Landwirtschaftsgebiete wurde die potentiellen Evaporation für die Regenzeit nach der Methoden von THORNTHWAITE & ALBRECHT (Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone, Bd.4, Nr.29, 1951) berechnet. Aus der Niederschlags- und Verdunstungshöhe erfolgte die Ableitung der klimatischen Wasserbilanz. Die Ergebnisse sind als Grundwasserneubildungskarte dargestellt (s. Abb. 60).

Die Erstellung des hydrogeologischen Modelles des quartären Thiaroye Grundwasserleiters dient als Datenbasis für ein numerisches Grundwassermodell, und ermöglicht die Simulation der Grundwasserströmung. Die Annahmen des hydrogeologischen Modells wurden durch das mathematische Grundwassermodell verifiziert. Die Modellierung der Grundwasserströmung erfolgte unter Anwendung des Computerprogramms PROCESSING MODFLOW (PM3). Das Aquifersystem wurde als ein ungespanntes und zweidimensionales Strömungsmodell definiert, sowie unter stationären (Februar 1971) und instationären (1971-1997) Bedingungen simuliert. Die Kartendarstellung des geohydraulischen Parameters Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  (Abb. 66) ergibt sich aus dem stationären Strömungsmodell. Diese Ergebnisse veranschaulichen die Heterogenität der geohydraulischen Parameter aufgrund des heterogenen geologischen Aufbaus des Grundwasserleiters. Die höchsten Werte ( $5 \cdot 10^{-4}$  -  $10 \cdot 10^{-4}$  m/s) liegen im Nordosten des Grundwasserleiters im Bereich der Meßstelle P2.7 (Lac Retba) und in Thiaroye ( $6 \cdot 10^{-4}$  m/s). Die niedrigsten Werte ( $0,11 \cdot 10^{-4}$  m/s) befindet sich im Südosten des Grundwasserleiters nahe des Ausstrichs der tertiären Tone. Die berechneten und gemessenen Grundwasserhöhengleichen des instationären Strömungsmodells (1971-1997) (Abb.72) und die langjährigen Grundwasserganglinien an einer ausgewählten Grundwassermeßstelle veranschaulichen die bis 3 m betragende Absenkung der Grundwasseroberfläche im Südosten des Grundwasserleiters. Die Wasserbilanz des stationären (Februar 1971) und instationären (1971-1997) Strömungsmodells (s. Tab. 13 und 19) zeigen keine großen Unterschiede der Parameter.

Die Bestimmung des Einflusses unterschiedlicher Landnutzungsformen auf den Stickstoffhaushalt des Sandgrundwasserleiters auf Basis eines Geo-Informationen-Systemes (PC ARC/INFO Version 3.4D ESRI 1990) ist aus folgenden Informationen aufgebaut:

- Digitale Karte zur Landnutzung

Das Satellitenbild (SPOT XS+P) des Arbeitsgebiets wurde aus den beiden vorliegenden Bildern vom 23.12.1995 von „Dakar“ und „Lac Retba“ generiert. Zur Erstellung repräsentativer Daten wurden die Bilder im „Centre de Suivi Ecologique Dakar“ mit einer räumlichen Auflösung von 20 m klassifiziert. Die topographischen (IGN, 1983), geologischen (ELOUARD et al., 1974) und morphopedologischen (USAID/RSI, 1986) Kartenblätter