

Grundwasserstudie zum Otavi-Bergland/Namibia

GERHARD SCHMIDT¹ & DIETER PLÖTHNER¹

Hydrogeologie, Grundwassermodell, Otavi-Bergland, Namibia, Afrika

Kurzfassung

Seit 1992 wurden im Rahmen der Technischen Zusammenarbeit mit Namibia vom Department of Water Affairs (DWA) in Windhoek und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) Grundwasserstudien im Otavi-Bergland durchgeführt. Die Ergebnisse hydrogeologischer Interpretationen wurden in ein räumliches Grundwassermodell übertragen, das die Entwicklung des Grundwassersystems in dem geklüfteten, lokal verkarsteten Dolomitaquifer („Grootfontein Karstaquifer“) von 1978 bis 1997 nachbildet. Dieser Zeitraum ist insbesondere durch Niederschläge gekennzeichnet, welche meist unter dem langfristigen Mittel liegen. Als Folge der entsprechend geringen Grundwasserneubildung befindet sich das hydraulische System seit 1978 im Zustand der überwiegend natürlichen Entwässerung. Das Dolomitgestein weist relativ geringe Leitfähigkeiten und Speicherkoeffizienten auf. Das kalibrierte Modell ermöglicht eine Abschätzung der regionalen Grundwasservorräte und unterstützt die wasserwirtschaftlichen Planungen mit Prognoseberechnungen zu Grundwasserabsenkungen, die sich als Folge zukünftiger Entnahmen einstellen werden. Die Modellergebnisse gehen bei vergleichbaren Verhältnissen in die zukünftige Studie zum nördlich angrenzenden „Tsumeb-Karstaquifer“ ein.

[Groundwater study in the Otavi Mountains of Namibia]

Abstract

Groundwater studies have been conducted in the Otavi Mountains of Namibia since 1992 within the scope of Technical Cooperation between the Department of Water Affairs in Windhoek (DWA) and the Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR). The results of the hydrogeological interpretation of the data were used to develop a three-dimensional groundwater model of the karst aquifer system for the period from 1978 to 1997. Precipitation during this period was mostly below the long-term mean. Owing to the low rate of groundwater recharge, the hydraulic system has been draining since 1978. The dolomite of the aquifer has a relatively low hydraulic conductivity and storage coefficients. Calibration of the model has permitted estimates of the regional groundwater reserves to be made. The model can be used to predict the extent of lowering of the groundwater table by groundwater withdrawal, facilitating water management planning. The results of this study will be used for a study of the Tsumeb karst aquifer adjacent to the north, where similar conditions exist.

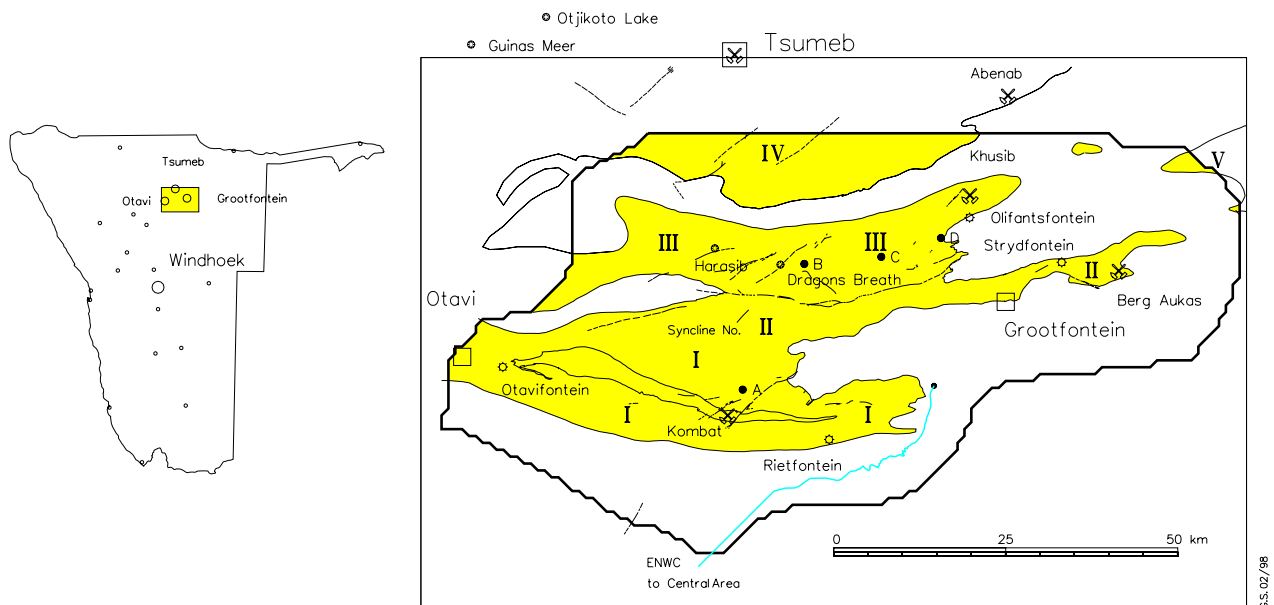


Abb. 1: Untersuchungsgebiet im Otavi-Bergland und Abgrenzung der Fläche der Grundwassermodellberechnung (schwarz umrandet).

gelb: Dolomitaquifer mit den Mulden I bis IV
A bis D: Grundwassermeßstellen.

Fig. 1: Study area in the Otavi Mountains and the boundaries of the groundwater model
yellow: karst aquifer and the synclines I to IV
A - D: groundwater observation wells

¹ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Postfach 510153, 30631 Hannover
e-mail: g.schmidt@bgr.de,
d.ploethner@bgr.de



Abb. 2: Grundwasserpegelschreiber in der Dornbuschsavanne nördlich des Kombat Bergwerks.

Fig. 2: Automatic groundwater level recorder in the savanna north of the Kombat Mine.



Abb. 3: Eastern National Water Carrier (ENWC) in der Dornbuschsavanne des südlichen Vorlandes.

Fig. 3: Eastern National Water Carrier (ENWC) in the savanna south of the Otavi Mts.

Einführung

Das Otavi-Bergland liegt im Städtedreieck Otavi, Grootfontein und Tsumeb (Abb.1) und hat ein semiarides Klima (Abb. 2). Die Regenfälle liegen mit einem langfristigen Mittelwert von mehr als 500 mm (1926 bis 1992) deutlich über dem Niederschlag anderer Landesteile. Das Klima und die günstige Beschaffenheit der Böden in Teilen des Otavi-Berglandes und insbesondere im Vorland sind Grundlage für eine produktive Landwirtschaft mit Viehzucht und Maisanbau.

Seit nahezu zwei Jahrzehnten jedoch liegen die Regenfälle überwiegend unter dem langfristigen Jahresmittel. Deshalb sollen Grundwasserentnahmen aus bereits vorsorglich eingerichteten Brunnenfeldern oder aus dem aufgelassenen

und mit einer Pumpstation ausgestatteten Bergwerk Berg Aukas, der Notwasserversorgung der zentralen Landesteile Namibias dienen. Zum Transport des Wassers in die Zentralregion Namibias ist eine, meist als offener Kanal gebaute Fernwasserleitung, der Eastern National Water Carrier (ENWC, Abb. 1 und 3), schon seit 1987 in Betrieb.

Das geklüftete und lokal verkarstete Dolomitgestein des „Grootfontein-Karstaquifers“ mit den Mulden I (Otavi-Tal-Uitkomst, Abb. 4), II (Grootfontein-Berg Aukas) und III (Harasib-Olifantsfontein) sowie des Synklinoriums IV („Tsumeb-Karstaquifer“) bildet die Grundwasserleiter (Abb.1), deren hydraulische Leitfähigkeit, absolut gesehen, gering ist. Im Vergleich mit den Metasedimenten der Nosib-Gruppe und den Graniten und Gneisen des Grootfontein-Basement-Complex weisen die Grundwasserleiter



Abb. 4: Otavital, Blick von Osten in die Muldenachse.

Fig. 4: View of the Otavi Valley from the east.

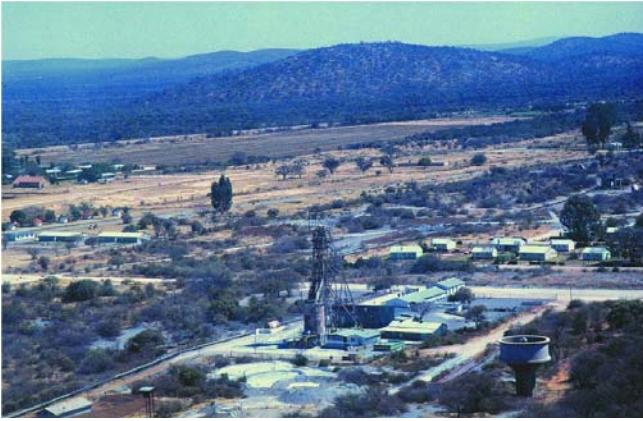


Abb. 5: Kombat Bergwerk.

Fig. 5: Kombat Mine.

jedoch hohe hydraulische Durchlässigkeiten auf. Sowohl die starken Wasserzutritte in den aufgelassenen Bergwerken von Abenab, Berg Aukas, Kombat (Abb. 5) und Tsumeb als auch die Existenz größerer noch fließender Quellen wie Otavifontein, Strydfontein (Abb. 6) und Olifantsfontein und der seit längerem versiegten Quellen Grootfontein und Rietfontein haben den Eindruck hoher Grundwasserhöflichkeit begründet. Auf Grund der hydrogeologischen und klimatischen Bedingungen, die im landesweiten Vergleich als günstig eingestuft werden können, hat das DWA bis ungefähr 1990 eine umfangreiche Grundwasserexploration betrieben (SEGER 1990). Die dabei gewonnenen Daten bilden, einschließlich aller nachfolgenden Messungen, die hydrogeologische Grundlage für die Modellierung (PLÖTHNER et al. 1997).



Abb. 6: Strydfontein Quelle mit Abflußpegelschreiber. Im Hintergrund ein Windrad zur Förderung von Grundwasser.

Fig. 6: Strydfontein Spring with discharge gauge. A windmill for watering livestock can be seen in the background.



Abb. 7: Oberflächennah verkarsteter Dolomit bei Rietfontein im Otavital.

Fig. 7: Karstified dolomite near Rietfontein in the Otavi Valley.

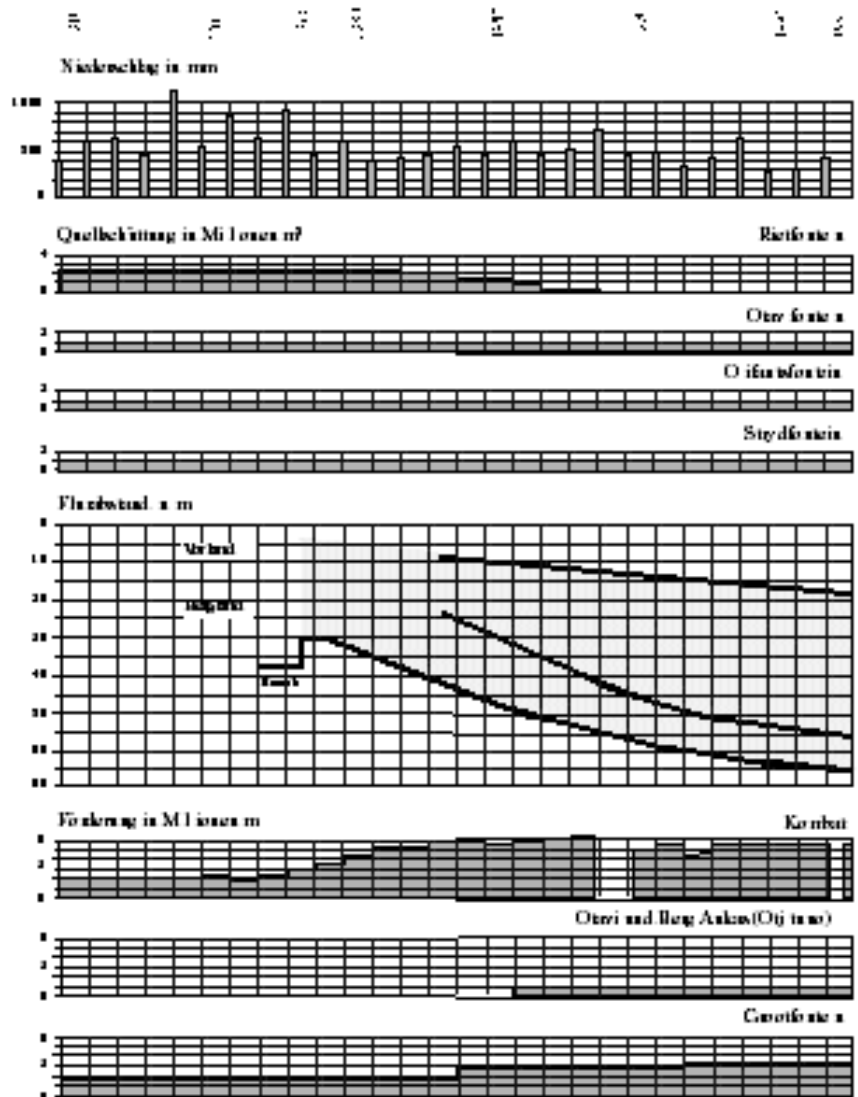


Abb. 8: Mittlere Niederschläge, Quellabflüsse, Grundwasserabsenkungen und -entnahmen im Modellgebiet seit 1970.

Nach einer Folge von überdurchschnittlich guten Regenjahren war das Grundwassersystem 1978 weitgehend aufgefüllt. Die zusammenfassende Interpretation der Grundwasserstände sowohl im Bergland als auch im Vorland zeigt ein kontinuierliches Absinken der Grundwasseroberfläche nach 1978 als Folge der überwiegend natürlichen Entwässerung.

Fig. 8: Mean annual precipitation, spring discharge, lowering of the groundwater table, and withdrawal in the modeled area since 1970.

After several years of above average rainfall, the aquifer system was nearly full in 1978. Since 1978, the groundwater table has continually dropped, mainly as a result of natural drainage of the system.

Der hydrogeologische Aufbau des Untersuchungsgebiets ist heterogen. Das geklüftete Dolomitgestein der Mulden ist weiträumig oberflächennah verkarstet (Abb. 7) und teilweise mit Boden bedeckt. Tiefgründige Verkarstung bzw. Paläokarst (z. B. Tsumeb, Berg Aukas) kommen nur lokal vor. Die Metasedimente der liegenden Nosib-Gruppe und das Basement stehen in den Antiklinen an. Mit einem Speichervermögen von bis zu 1% und einer Transmissivität von bis zu 100 m²/d lassen sich die hydraulischen Parameter der Grundwasserleiter nicht als typische Werte für Karstwasserleiter klassifizieren. Das Grundwasserregime wird seit 1978 von einer unterdurchschnittlich geringen Neubildung bestimmt, in deren Folge die Grundwasseroberfläche im Bergland um ca. 2 m pro Jahr absinkt. Diese Tendenz wird auch im Vorland in abgeschwächter Form beobachtet (Abb. 8). Die Wasseroberflächen in den Dolinenseen von Otjikoto und Guinas, in der Drachenhauhöhle, und in den Schächten aufgelassener Bergwerke korrespondieren mit dem generellen Absinken und mit den jahreszeitlichen Schwankungen der Grundwasseroberfläche. Das hydraulische System reagiert auf die relativ ge-

ringe Grundwasserneubildung aus Niederschlägen insgesamt nicht sprunghaft spontan, sondern ausgeglichen. Die Quellschüttungen von Olifantsfontein, Strydfontein und Otavifontein sind seit 1992 nahezu konstant.

Das aktuelle Simulationsmodell KARST_00 vereint die beiden seit 1992 entwickelten Modelle KARST_01 und 02 (SCHMIDT, 1996, a, b) und berücksichtigt in einer modifizierten Form sowohl die zeitabhängige Grundwasserneubildung als auch die Grundwasseraustritte an der Landoberfläche.

Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) und vom Ministry of Agriculture, Water and Rural Development (MAWRD) gefördert.

Konzeptionelles Modell

Die Analyse der beobachteten Grundwasserstandsreaktionen und die Bewertung der hydrogeologischen Gesamtsituation führen bei einer Betrachtungsweise im regionalen

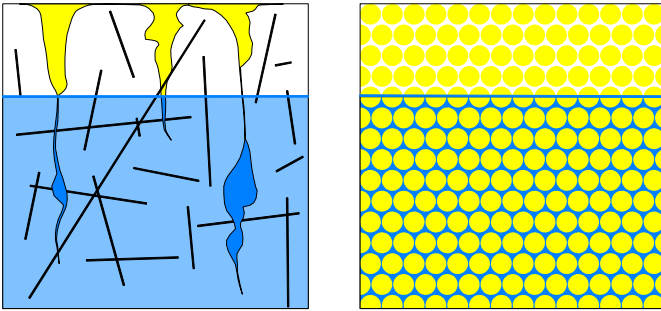


Abb. 9: Der lokal verkarstete Kluftwasserleiter wird im Modell als hydraulisch äquivalenter Porenwasserleiter nachgebildet.

Fig. 9: The fractured and locally karstified aquifer is modeled as a hydraulically equivalent porous aquifer.

Maßstab zu einem einfachporösen hydraulischen Modellansatz, mit dem die Bewegung des Grundwassers in der Gesteinsmatrix als homogen verteilt nachgebildet wird (Abb. 9).

Die hydrogeologischen Einheiten sind in ihrer Wechselfolge von Aquiferen und Aquitarden räumlich und überwiegend schalenförmig ausgebildet und können in Störungszonen zueinander versetzt sein. Absenkungen im tiefen Grundwasserleiter durch die Sumpfung von Bergwerkswässern und ausgeprägte topographische Hoch- und Tiefen bewirken vertikal gerichtete Grundwasserbewegungen, die durch die räumliche Modellierung nachgebildet werden. Die Grundwasserströmung in einem Vertikalchnitt wie in Abb. 10 wird im Prinzip durch die Komponenten QNF, QFX, QEXF und QABS bestimmt. Das Grundwasser wird aus Anteilen des Niederschlagswassers QINF gespeist und strömt durch das Nebengestein seitlich als QFX ab. In Bereichen mit geringen Flurabständen tritt das Grundwasser als QEXF, u.a in Form von Überlaufquellen, an der Landoberfläche aus. Das Grundwasserreservoir wird durch verschiedene Entnahmen QABS beansprucht, die der Wasserhaltung in Bergwerken, der kommunalen Wasserversorgung und der Landwirtschaft dienen.

Das Aquifersystem wird im Modell in vierzehn hydrogeologische Einheiten aufgegliedert, die einheitlich nach hydraulischer Signifikanz entweder einen Aquifer, einen Aquitard oder näherungsweise eine Aquiclude repräsentieren und die mit den jeweiligen Werten für die horizontale und vertikale hydraulische Leitfähigkeit, für das Spei-

chervermögen unter freien und gespannten Bedingungen und für die potentielle Neubildungsaufnahme belegt werden. Die numerische Lösung der partiellen Differentialgleichung der Grundwasserbewegung bei konstanter Dichte und Temperatur des Porenwassers erfolgt auf der Basis finiter Differenzen iterativ mit Hilfe der Methode der vorkonditionierten konjugierten Gradienten. Das verwendete Programmpaket GSMO wurde von SCHMIDT (1998) entwickelt. Die Randbedingungen des Modelles stützen sich auf langfristige Beobachtungen der Grundwasserstandshöhen, die seit 1985 in den südlichen und östlichen Randzonen des Modellgebietes nur geringe Absenkungen zeigen. Entlang dieser Ränder werden die Höhen, wie auch die am nördlichen Rand, als konstant angenommen. Der Modellrand im Südwesten folgt einer langfristig gültigen Stromlinie (Abb. 1). Grundwasserstandsdaten in der zur Konstruktion von Gleichenplänen notwendigen Dichte liegen erst seit 1985 vor.

Die horizontale Diskretisierung des Modelles erfolgt im Sinne der regionalen Betrachtungsweise durch quadratische Zellen mit einer Grundfläche von einem Quadratkilometer. Durch eine enge vertikale Diskretisierung im oberen Bereich werden die Durchlässigkeitskontraste sowie die hydraulischen Reaktionen in der ca. 150 m mächtigen Bewirtschaftungszone besonders berücksichtigt. Die vertikale Diskretisierung erfolgt zwischen der Grundwasseroberfläche und der Modellbasis. Dabei bildet meistens der Grootfontein-Basement-Complex die untere Begrenzung des Modells. In Bereichen, in denen dieser Komplex die

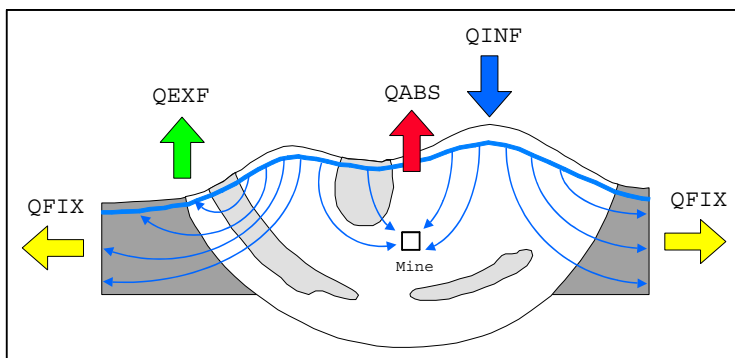
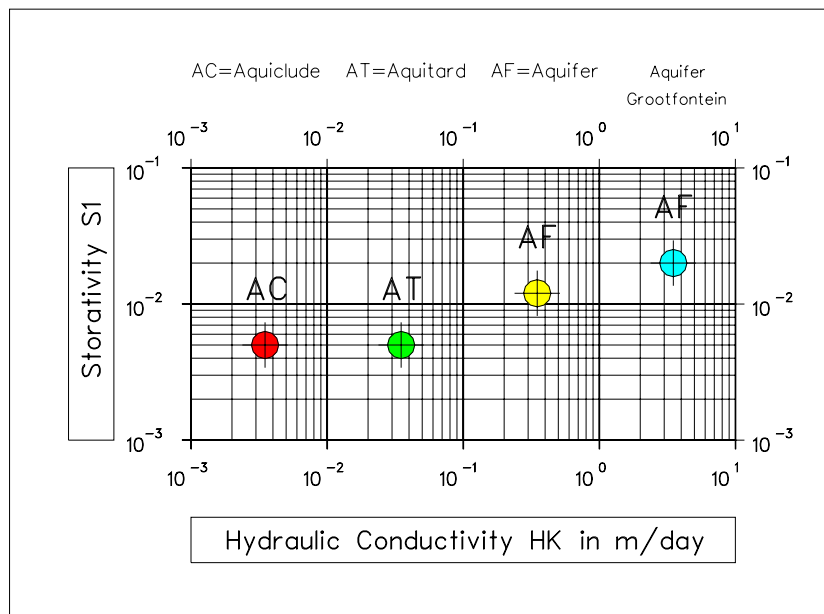


Abb. 10: Konzeptionelles Modell mit den Komponenten der Grundwassermengenbilanz.

Fig. 10: Conceptual model, showing the various components of the groundwater balance.

Abb. 11: Speicherkoeffizienten und horizontale hydraulische Leitfähigkeiten einzelner hydrogeologischer Einheiten als Ergebnis der Modellkalibrierung. Der Grootfontein-Base-ment-Complex (AC) ist in den flachen Partien bei sehr geringer Leitfähigkeit hydraulisch wirksam und wird erst in größeren Tiefen als Aquiclude betrachtet.

Fig. 11: Storage coefficients and horizontal hydraulic conductivities of some of the hydrogeological units determined by calibration of the model. At shallow depths, significant amounts of groundwater pass through the Grootfontein Basement Complex (AC) even it has a very low hydraulic conductivity, and only at greater depths does it function significantly as an aquiclude.



einzigste hydrogeologische Einheit ist, hat er bis zu einer bestimmten Tiefe die hydraulische Wirkung eines Aquitards. Die Mulden erreichen zum Teil Gesamtmächtigkeiten von über 2000 m.

Die zeitabhängige Simulation basiert auf einer berechneten Verteilung der Grundwasserhöhen, welche die vermutete hydraulische Situation zum Ende des Jahres 1978, als das System nach einer Folge von mindestens drei überdurchschnittlich guten Regenjahren (Abb. 8) weitgehend aufgefüllt war, repräsentiert. Bewertet nach der Anzahl der Grundwassermeßstellen sowie an der zeitlichen Auflösung der Daten gilt das Grundwasserströmungsmodell als ein räumliches, regionales Mengenbilanzmodell, das die tatsächliche hydraulische Entwicklung im Otavi-Bergland unter Berücksichtigung von zeitlich variabler Neubildung und Entnahme von 1979 bis 1997 integral nachbildet.

Modellergebnisse

Das berechnete zeitliche Absenkungsverhalten mit saisonbedingten Anstiegsreaktionen auf kurzfristige Niederschlagsereignisse reflektiert im wesentlichen die langfristige natürliche Entwässerung des Systems. Das Grundwasser strömt von den topographischen Hochlagen des zentralen Berglandes, die als potentielle Neubildungsgebiete gelten, auf die tiefer gelegenen Partien des Vorlandes zu. Die Entwässerung vollzieht sich bevorzugt in den Dolomitkörpern. Einzelvergleiche von berechneten und beobachteten Grundwasserhöhen ergeben eine generell gute Übereinstimmung.

Die Modellergebnisse heben die hydraulische Sonderstellung der lang gestreckten Mulde II im Bereich von Grootfontein hervor (Abb. 1). Seit 1978 hat sich der hydraulische Gradient zwischen den Hochlagen (etwa in der Übergangszone von Mulde I nach Mulde II) und dem östlichen Teil der Mulde II um 10% auf ca. 0.0045 verringert. Die im Modell durch die Grundwasserentnahmen von Grootfontein

verursachten Absenkungen sind größer als die beobachteten. Auf Grund der relativ groben Diskretisierungsweite können bevorzugte Wegsamkeiten in der nur ca. 5 km schmalen Mulde II mit dem Modell nur unzureichend nachgebildet werden. Das Grundwasser der Mulde II strömt vorzugsweise in östliche Richtung und folgt dem Verlauf der Muldenachse. In der Natur ist der Zustrom an Grundwasser aus den Dolomitkörpern der Hochlagen über bevorzugte Wegsamkeiten ausreichend groß, um die Quelle Strydfontein trotz der Entnahmen in Grootfontein kontinuierlich zu speisen. Die Schüttung der Quelle in Grootfontein verringerte sich erst mit deutlich ansteigendem kommunalen Wasserbedarf. Die heutige Förderung mit ca. 4 Millionen m³/a (= MCM/a) verursacht Absenkungen von nur wenigen Metern im weiteren Bereich des Brunnenfeldes; die Quelle allerdings ist seit langem versiegt. Die Größenordnung des Grundwasserstromes in der Mulde II läßt sich auch an der Tatsache abschätzen, daß während der aktiven Betriebsphase bis 1978 das Bergwerk Berg Aukas mit ca. 6 MCM/a gesümpft werden mußte.

Hydraulische Parameter

Die Kalibrierung des Modelles KARST_00 hat die Größenordnung der hydraulischen Parameter der vorangegangenen Teilmodelle im wesentlichen bestätigt. Gebietsweise wurden die Werte jedoch auch modifiziert (Grootfontein, Dolomite der Mulde II).

Der Speicherkoeffizient S beträgt für Aquifere 1%. Von dieser gleichförmigen Verteilung abweichend wird S im Bereich von Grootfontein mit 2% angenommen. Für Aquitarde und für den Grootfontein-Base-ment-Complex betragen die Speicherkoeffizienten bis zu 0,4%. Die horizontalen hydraulischen Leitfähigkeiten HK liegen zwischen 0,0035 und 0,35 m/d. Die besondere hydraulische Situation in der Mulde II (Grootfontein) führt zu dem relativ hohen Wert von 3,5 m/d (Abb. 11).

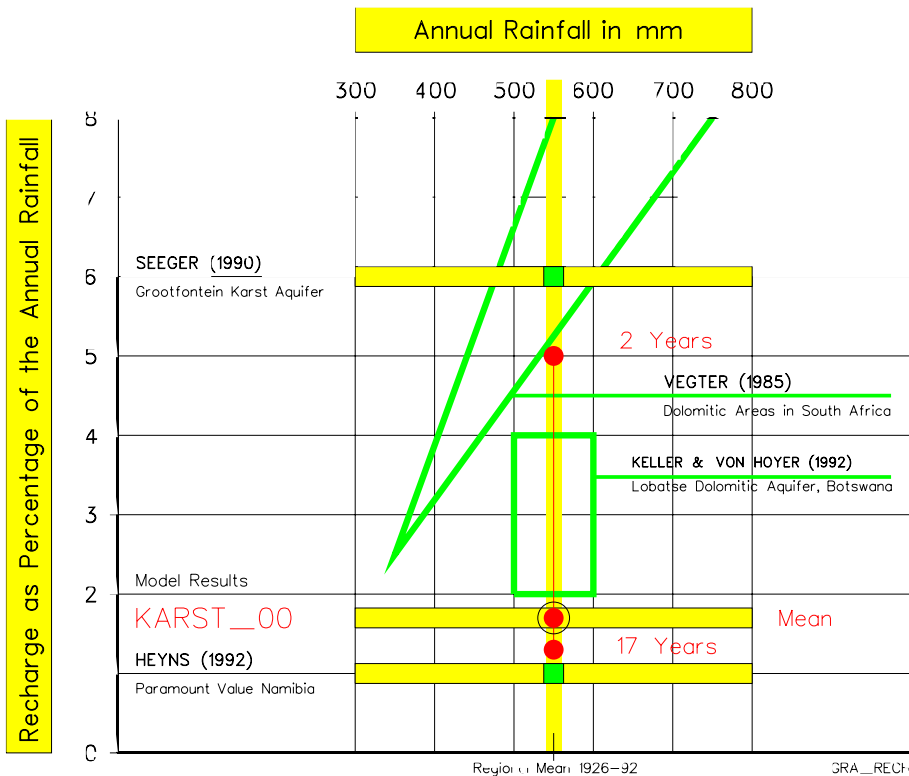


Abb. 12: Berechnete Grundwasserneubildung in Abhängigkeit vom Jahresniederschlag und im Vergleich mit anderen Ergebnissen im südlichen Afrika (siehe Literatur).

Fig. 12: Calculated groundwater recharge as a function of annual rainfall, compared with data for other parts of southern Africa (see references).

Grundwasserneubildung

Das allgemeine Interesse an den Regenfällen ist in dieser Klimazone verständlicherweise sehr stark. Daß es dabei im Hinblick auf die Grundwasserneubildung zu Fehlbewertungen kommen kann, zeigt sich am Beispiel der Regensaison 1996/97. Die Niederschläge lagen an verschiedenen Orten, z.B. in Otavi, deutlich über dem lokalen Jahresmittelwert. Eine Zusammenstellung aller Meßdaten im Otavi-Bergland verdeutlicht allerdings, daß die Niederschläge der Saison 1996/97 keine positive Auswirkung auf die Grundwasserneubildung hatten: sie liegen in den potentiellen Neubildungsgebieten mit bis zu 200 mm deutlich unter dem langfristigen Jahresmittel. Die überdurchschnittlich guten Regenfälle in den östlichen und westlichen Randzonen sind für die Grundwasserneubildung im Gesamtsystem ohne Bedeutung. Die Simulation der Regensaison 1996/97 als überdurchschnittlich gutes Neubildungsereignis führt zu einem entsprechend hohen Anstieg des Grundwasserspiegels im Modell, der in Wirklichkeit aber nicht eintritt.

Die mittlere Regenverteilung des Untersuchungsgebietes basiert auf kontinuierlich registrierten Meßdaten der Jahre 1926 bis 1992. Einzelne Regenmeßstationen, wie z.B. in Tsumeb, weisen deutlich längere Zeitreihen auf. Die jährliche Verteilung der Niederschläge ist hinsichtlich Intensität und Ort inhomogen. VOGEL & VAN URK (1975) haben isopenhydrologisch nachgewiesen, daß überwiegend Starkregen während der sommerlichen Regenzeit zur Grundwasserneubildung beitragen.

Bezogen auf die langfristige Niederschlagsverteilung im gesamten Modellgebiet ergibt sich bei einem Jahresmittel

von 550 mm eine Regenmenge von 2690 MCM/a. In den Neubildungsgebieten (ungefähr 1900 km² in den Hochlagen des Berglandes) beträgt die für die Auffüllung des Grundwassersystems potentiell verfügbare Regenmenge 1000 MCM/a.

Nach einer Folge von überdurchschnittlich starken Regenjahren im gesamten Otavi-Bergland (ca. 1974 bis 1978) kam es zu einer weitgehenden Auffüllung des Grundwassersystems (Abb. 8). Dieser Vorgang läßt sich durch Modellrechnungen mit einer Neubildungsrate von 28 mm/a (ca. 5% des langfristigen Niederschlags-Jahresmittels) nachbilden. Die Ereignisse in den Jahren 1988/89 und 1993/94 führten zu ähnlich guten regionalen Neubildungsraten. Alle anderen simulierten Jahresereignisse nach 1978/79 (das sind 17 Jahre mit unterdurchschnittlichen Niederschlagsereignissen) führen zu einer regionalen Neubildung von ca. 7 mm (1,3% des langfristigen Niederschlags-Jahresmittels). Für die insgesamt 19 Jahre seit dem letzten Höchststand der Grundwasseroberfläche ergibt sich damit rechnerisch eine mittlere jährliche Grundwasserneubildung von ca. 9 mm (das entspricht 1,7% des langfristigen Niederschlags-Jahresmittels), (Abb. 12).

Die naturnahe Simulation der Grundwasserneubildung erfordert eine detaillierte und umfangreiche Datenbasis. Diese Voraussetzung ist durch das relativ weitläufige Meßnetz für Niederschläge und Grundwasserstände im Untersuchungsgebiet nicht erfüllt. Das Regionalmodell geht von einer flächendeckenden und bereichsweise konstanten Niederschlagsverteilung aus und nimmt die Dauer der effektiven Neubildungsperiode innerhalb einer Regenzeit mit einem Monat an.

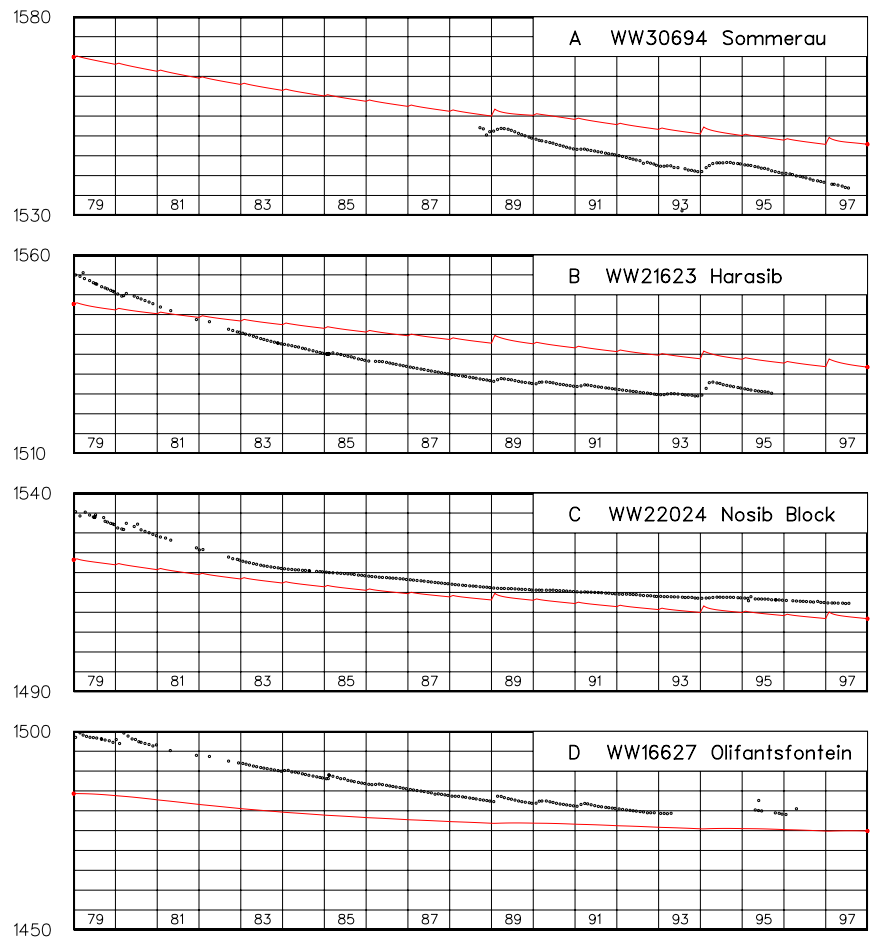


Abb. 13: Beobachtete und berechnete Grundwasseroberflächen in m über Meeresspiegel an den ausgewählten Meßstellen A-D (Lage in Abb. 1) mit unterschiedlichen Reaktionen auf Regenfälle im Simulationszeitraum von 1979 bis 1997.

Fig. 13: Observed and calculated levels of the groundwater table relative to m.s.l. at observation wells A - D (see Fig. 1 for locations), showing the different reactions to rainfall during the modeled period from 1979 to 1997.

Der Vergleich der beobachteten und berechneten Grundwasserstandshöhen an ausgewählten Meßstellen in den Mulden I und III zeigt eine generelle Übereinstimmung in den Reaktionen der Grundwasseroberfläche auf die Neubildungsereignisse (Abb. 13). Abweichungen beruhen wahrscheinlich auf der lokal unterschiedlichen Verteilung der Regenfälle. Die Wasserstandsdaten der Station A in der Mulde I (Abb. 1) werden seit Ende 1988 aufgezeichnet. Sie zeigen deutliche, aber zeitlich verzögerte Reaktionen auf die Niederschläge in den Regenzeiten 1988/89 und 1993/94. Vermutlich hat die Grundwasserneubildung weiter nördlich in den höheren Lagen des Berglandes stattgefunden. Der Anstieg der Grundwasseroberfläche zu anderen Regenzeiten ist schwach. Die im Modell probeweise als günstig angenommene Neubildungssaison 1996/97 führt zu einem Anstieg, der den Beobachtungen widerspricht. Die Grundwasseroberflächen im Bereich der Stationen B und D zeigen deutliche Reaktionen auf die Niederschläge in den Regenzeiten 1979/80, 1988/89 und 1993/94. Zu anderen Zeiten ist der saisonale Anstieg mäßig, von 1980 bis 1984 und von 1986 bis 1988 eher schwach bzw. undeutlich. Die langfristigen Beobachtungen an der Station C (Mulde III) zeigen zu keiner Zeit exponierte Reaktionen der Grundwasseroberfläche, die entsprechenden Niederschlagsereignissen zugeordnet werden können.

Grundwasseraustritte

Das Gefälle der relativ flachen Gebiete des südlichen Vorlandes (siehe Abb. 3) und der südöstlichen Ebenen ist auf das parallel zur südöstlichen Modellgrenze (Abb. 1) verlaufende Omatako-Omambonde Tal ausgerichtet. Dieses ist als regionales Dränniveau für das im Bergland gebildete Grundwasser anzusehen. Generelle Kontraste in den hydraulischen Leitfähigkeiten der Gesteine des Berglandes und des Vorlandes führen zudem zu lokalen Wasseraustritten. Das oberflächennahe Grundwasser tritt an exponierten Stellen, wie z. B. Khusib Springs, Olifantsfontein, Mariabronn, etc., aus oder verdunstet großflächig. Die Grundwasseraustrittsflächen werden durch das Modell nachgebildet. Sie stimmen mit den aktiven und potentiellen Quellgebieten lagemäßig gut überein. Die großflächigen Verdunstungsvorgänge sind deutlich an den weit verbreiteten kalkigen Ablagerungen erkennbar. Das Vorkommen von Kalkkrusten (Calcrete) ist ein Indiz für flächenhaft austretendes Grundwasser an vielen Stellen des Bergvorlandes. Die Mächtigkeiten dieser Ablagerungen zeugen von einem lange währenden Prozeß und auch von anderen klimatischen und hydraulischen Situationen in erdgeschichtlicher Zeit.

Die seit nahezu zwei Jahrzehnten andauernde Trockenperiode zeigt sich konsequenterweise auch an der zeitlichen

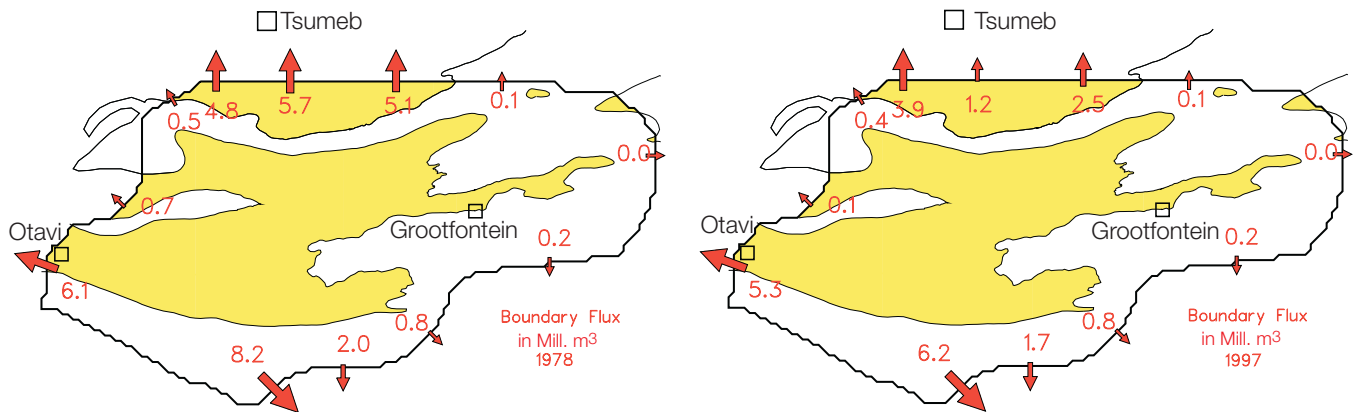


Abb. 14: Im Simulationszeitraum von 1978 bis 1997 hat sich der jährliche Grundwasserabstrom über die Modellränder um ca. 12 Millionen m³ verringert.

Fig. 14: The annual groundwater flux decreased by about 12 million m³ during the modelled period from 1979 to 1997.

Veränderung der Grundwasseraustritte. Die im Modell berechneten Austrittsmengen haben sich seit 1979 von 36 auf 13 MCM/a reduziert. In Relation zur potentiellen Verdunstung von ca. 2800 mm/a, (VAN DER MERWE, 1983) sind diese Mengen insgesamt gering; im Jahre 1979 beträgt der berechnete Grundwasseraustritt maximal 66 mm.

Grundwassermengenbilanz

Die Grundwassermengenbilanz wird im überwiegenden Maße von natürlichen Vorgängen bestimmt. Unter lang anhaltenden, günstigen klimatischen Bedingungen besteht ein quasi stationäres Gleichgewicht zwischen Grundwasserabstrom und Grundwasserneubildung. Relativ geringe Grundwasserentnahmen, wie z. B. für landwirtschaftliche Zwecke ohne intensive Bewässerung, verschieben diese idealerweise ausgeglichene Situation nur geringfügig. Unter der Bedingung einer ausreichend großen Grundwasserneubildung lautet die Mengenbilanz dann :

$$QINF - QEXF - QFIX - QABS = 0$$

mit:

QINF: Grundwasserneubildung

QEXF: Grundwasseraustritt an der Landoberfläche

QFIX: Grundwasserabstrom über die Modellränder

QABS: Grundwasserentnahme (siehe Abb. 10).

Die mittelfristige Veränderung der Bilanzkomponenten QABS und QINF kann dieses Gleichgewicht verschieben und die Entwässerung des Grundwasserkörpers bewirken. Bei durchgehend unterdurchschnittlicher Neubildung verstärkt eine Entnahmesteigerung die Entwässerung des Grundwasserkörpers.

Die in etwa seit 1979 maßgebliche Wassermengenbilanz zu einem beliebigen Zeitpunkt t lautet dann :

$$QINF_t - QEXF_t - QFIX_t - QABS_t = STOR_t.$$

Als Folge der derzeitigen Bedingungen mit überwiegend unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen nimmt die Speicherzehrung STOR bei einhergehender Reduktion von QFIX und QEXF zu. Die Kumulation aller Bilanzteilmenen seit 1979 zeigt, daß die Grundwasseraustrittsmengen QEXF einen großen und die Grundwasserentnahmen QABS einen relativ geringen Anteil an der Gesamtentwässerung haben. Seit 1979 sind bei einer Neubildung von 370 MCM insgesamt 1300 MCM aus dem System abgeströmt.

Bei Annahme einer wasserwirtschaftlich relevanten Mächtigkeit von 150 m in den Dolomiten beträgt die Menge des in diesem Reservoir gespeicherten Grundwassers etwa 3400 MCM. Die im Modell berechnete Speicherzehrung von 930 MCM führt zu einer Reduzierung der gespeicherten Wassermengen um ca. 27% in 19 Jahren. Die simulierten Entwässerungsvorgänge vollziehen sich im ausgeprägten Maße in den Hochlagen des zentralen Berglandes. Die bisherige Entwässerung bedeutet auch, daß das Reservoir für die konventionelle Bewirtschaftung mit relativ flach angelegten Brunnen zum großen Teil erschöpft ist. Größere Mengen an Grundwasser können sicher nur aus den aufgelassenen Bergwerken entnommen werden.

Randlicher Grundwasserabstrom

Der randliche Grundwasserabstrom hat sich natürlicherweise mit zunehmender Abflachung des hydraulischen Gradienten verringert. Zu Zeiten der relativen Auffüllung beträgt der gesamte jährliche Abstrom aus dem Modellgebiet 34,2 MCM, nach Jahren der Entwässerung nur noch 22,4 MCM. Die größte Minderung ergibt sich am Nordrand, über den im Jahre 1978 16,1 MCM und im Jahre 1997 nur noch 8,0 MCM abströmen (Abb. 14). Der nach Süden gerichtete Abstrom verringert sich von 11,0 auf 8,7 MCM. Der am westlichen Modellrand berechnete Abstrom, der regional betrachtet auf die Etoshapfanne ausgerichtet ist, verringert sich von 6,8 auf 5,4 MCM. Vernachlässigbar klein und über den Simulationszeitraum unverändert ist der östliche Abstrom mit 0,3 MCM.

Schlußfolgerungen

Das Grundwassersystem befindet sich seit 1978 in einem Zustand der überwiegend natürlichen Entwässerung. Während dieser Zeit hat sich der potentielle Grundwasservorrat des Otavi-Berglandes um ca. ein Drittel verringert. Die Grundwassermengenbilanz zeigt in den Jahren 1996 und 1997 ein mittleres Defizit von 44 MCM/a. Diese Differenz setzt sich aus den Entnahmen hauptsächlich bei Kombat, Grootfontein und Otavi mit 10 MCM/a, dem Randabstrom mit 22 MCM/a und dem Austritt von Grundwasser an der Landoberfläche mit 26 MCM/a einerseits und der geringen Neubildung von Grundwasser mit 14 MCM/a andererseits zusammen. Eine Verbesserung der Gesamtsituation ist nur vorstellbar, wenn sich mit einer lang anhaltenden Folge von überdurchschnittlich guten Regenjahren die hydrologischen Bedingungen so grundsätzlich ändern, daß das mittlerweile entstandene Defizit kompensiert wird und es zu einer Auffüllung des Grundwassersystems kommen kann.

Die Planungen zur Bewirtschaftung des Grundwassers im Otavi-Bergland müssen sich zwangsläufig auf die aktuellen Bedingungen einstellen und versuchen, die weitere Beanspruchung des Grundwassersystems gering zu halten. Der Aufwand für Neubohrungen ist aus technischer und finanzieller Sicht hoch und wäre nur für Tiefbohrungen, etwa nordöstlich von Kombat zu rechtfertigen. Damit könnte vermutlich auch die Entwässerung des Bergwerkes zum Teil entlastet werden. Absenkprognosen unter der Annahme einer zusätzlichen Brunnengallerie sind bereits durchgeführt worden, als in Kombat noch Erz gefördert wurde (SCHMIDT, 1996, b). Weitere Untersuchungen, die sich möglicherweise auf die Erschließung des diffusen Grundwasserabstromes im südlichen Vorland konzentrieren, könnten von einem gewissen Interesse sein und sollten auch neuere Studien zur Grundwasserneubildung in diesem Gebiet berücksichtigen. Es bleibt allerdings zu beachten, daß eine zukünftige Bewirtschaftung zwangsläufig negative Auswirkungen auf die Farmbrunnen und auf das Brunnenfeld Otjituuo am Omatoko, das die kommunale Wasserversorgung des Okakarara Magistral Districts unterstützt, haben wird.

Für eine Notwasserversorgung der zentralen Landesteile Namibias können bzw. müssen die Grundwasserressourcen des Otavi-Berglandes kurzfristig mit einbezogen werden, u. a. durch die Bewirtschaftung der bereits vor einigen Jahren vom DWA eingerichteten Brunnenfelder in den Mulden I und III. Die zu erwartenden zusätzlichen lokalen Absenkungen der Grundwasseroberfläche wurden bereits mit den Modellrechnungen KARST_01 und KARST_02 (SCHMIDT, 1996, a, b) abgeschätzt und liegen in der Größenordnung von einigen Metern. Bevorzugt sollte die Notwasserversorgung mit Wässern unterstützt werden, die aus aufgelassenen Bergwerken wie Abenab, Berg Aukas, Tsumeb oder Kombat gefördert werden. Diese Wässer sollten ausschließlich dem Zweck der kommunalen Versorgung dienen und nicht für eine großmaßstäbliche Bewässerungswirtschaft verwendet werden.

Literatur

- HEYNS, P. (1992) : Namibia's water resources: A new approach needed. – *Namibia Review*, **1**: 17–29.
- KELLER, S. & VON HOYER, M. (1992) : Erkundung und Bewirtschaftung von präkambrischen Karstaquiferen im südlichen Afrika. – *Zt. dt. geol. Ges.*, **143**: 277–290; Hannover.
- VAN DER MERWE, J. H. (1983) : National Atlas of South West Africa (Namibia). – Inst. of Cartogr. Analysis, University of Stellenbosch.
- PLÖTHNER, D., SCHMIDT, G., KEHRBERG, S. & GEYH, M. A. (1997): Hydrogeology and Isotope Hydrology of the Otavi Mountain Land and its Surroundings, KARST_01 and KARST_02. – Report, Volume **D-III**, German-Namibian Groundwater Exploration Project (GNSEP). – BGR file no. 10793/97, BGR arch. no. **116049**, DWA file no. 12/1/2/16/1; Windhoek, Hannover [Unpubl.].
- SCHMIDT, G. (1996, a): Otavi Mountain Land, Data base evaluation and conceptual model KARST_01 and KARST_02. – Report, Volume **E-II**, GNSEP. – BGR file no. 11267/95, BGR arch. no. **113752**, DWA file no. 12/1/2/16/1; Windhoek, Hannover [Unpubl.].
- SCHMIDT, G. (1996, b): Report on geohydraulic investigations and groundwater modelling of the GNSEP, Volume **E-III**, Otavi Mountain Land, Groundwater modelling KARST_01 and KARST_02. – BGR file No. 11267/95, BGR arch. no. 113752, DWA file no. 12/1/2/16/1; Windhoek, Hannover [Unpubl.].
- SCHMIDT, G. (1998): Report of the GNSEP on geohydraulic investigations and groundwater modelling, Groundwater Simulation Model GSMO, BGR file No. 5652/98, BGR arch. no. 117 298; Windhoek, Hannover [Unpubl.].
- SEEGER, G. (1990): An evaluation of the groundwater resources of the Grootfontein Karst Area, DWA. – Report no. 12/5/G2: 187 pp; Windhoek [Unpubl.].
- VEGTER, J. R. (1984): Dolomitic water supplies with special reference to southern and western Transvaal. – Workshop on groundwater drilling in the Republic of South Africa; Johannesburg.
- VEGTER, J. R. (1993): Concepts for Mapping South Africa's Hydrogeology: Africa Needs Ground Water. – A Ground Water Convention 6–8 Sept. 1993. – Conv. Papers, **II**: 11 pp.; Johannesburg.
- VEGTER, J. R. & FOSTER M.B.J. (1992): The Hydrogeology of Dolomitic Formations in the Southern and Western Transvaal. – In: PALOC, H. & BACK, W. (eds.): Hydrogeology of Selected Karst Regions. – International Contributions to Hydrogeology, **13** : 355–376; Hannover (International Association of Hydrogeologists).
- VOGEL, J. C. & VAN URK, H. (1975): Isotopic composition of groundwater in semiarid regions of southern Africa. – *Journal of Hydrology*, **25**: 23–36.

Eingang des Manuskripts: 11. 12. 1998

Angenommen: 17. 5. 1999