

Abschätzung der Grundwasserneubildung in Namibia mittels der Chlorid-Bilanz-Methode: Ist die trockene Deposition vernachlässigbar?

Heike Wanke

Zusammenfassung

Für diese Studie in Nordost-Namibia wurden mittels der Chlorid-Bilanz-Methode Grundwasserneubildungsdaten an 33 Bodenprofilen und an 47 Grundwasserproben unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der trockenen Deposition bestimmt. An 13 Rohr-Totalisatoren und 2 Trichter-Totalisatoren wurden über den Zeitraum eines Jahre Chlorid-Depositionen beprobt und sowohl mit Niederschlagssammlungen des gleichen Zeitraums als auch mit langfristigen Datenreihen verglichen. Alle Rohr-Totalisatoren zeigen eine deutlich höhere Chlorid-Deposition als die Regenproben der entsprechenden Lokalität. Der Anteil der trockenen Chlorid-Deposition an der totalen Chlorid-Deposition liegt zwischen 22 und 83 %. Grundwasserneubildungswerte liegen zwischen 0,02 % und 29,8 % bei mittleren Jahresniederschlagssummen zwischen 400 und 570 mm/a.

Einführung

Für viele Trockengebiete der Erde, in denen Grundwasser die einzige Wasserressource darstellt, ist nicht ausreichend geklärt, inwieweit eine Grundwasserneubildung stattfindet. Dennoch erhöht sich in diesen Gebieten der Wasserbedarf durch wachsende Bevölkerung und zunehmende Industrialisierung. Eine langfristige Ressourcensicherung ist hier nur gewährleistet, wenn die Grundwasserentnahme die jährliche Grundwassererneuerung nicht übersteigt. Um dies zu gewährleisten, muss vor der weiteren Steigerung der Grundwasserentnahme eine flächenhafte Abschätzung der Grundwasserneubildung erfolgen. Grundlage für solche flächenhaften Abschätzungen sind häufig präzise abgeschätzte punktuelle Daten, die möglichst sinnvoll auf die Fläche übertragen werden.

Zur Ermittlung von punktuellen Grundwasserneubildungsdaten in Trockengebieten stellt die Chlorid-Bilanz-Methode eine anerkannte Methode dar. Sie basiert auf der Bilanzierung von trockener und nasser Chlorid-Deposition gegen den Chloridgehalt im Bodenwasser. Dabei wird häufig die trockene Deposition als vernachlässigbar klein gegenüber der nassen Deposition

betrachtet. In diesem Artikel soll aufgezeigt werden, zu welchen Fehlern diese Annahme führt und wie durch eine einfache Methodik die trockene Deposition ermittelt werden kann.

Chloridbilanzmethode

Die Grundlage der Chlorid-Bilanz-Methode stellt die Aufstellung einer Massenbilanz für eine Bodenelementarzelle dar (EDMUNDS et al., 1988):

$$F_N + F_D = F_S + F_M \quad (1)$$

Mit $F_N =$ *Mittlere Eintrag aus nasser Deposition*
 $F_D =$ *Mittlere Eintrag aus trockener Deposition*
 $F_S =$ *Mittlere Austrag durch Versickerung*
 $F_M =$ *Mittlere Austrag durch Adsorption und Transformation in die Mineralphase*

Da Chlorid sich wie ein konservativer Tracer verhält, kann der Adsorption und Transformation Term F_M vernachlässigt werden (ALLISON & HUGHES, 1978; GIESKE et al., 1995). Für Gebiete ohne geogenen Chlorideintrag, in denen sowohl der Oberflächenabfluss als auch die Aufnahme von Chlorid durch Pflanzen vernachlässigbar klein ist, beschreibt Gleichung (2) die Chlorid-Bilanz zwischen dem Eintrag in und dem Austrag aus einem Bodenvolumen:

$$R = \frac{Cl_{DD} + P * Cl_P}{Cl_{SW}} \quad (2)$$

Mit $R =$ *Mittlere Grundwasserneubildung*
 $P =$ *Mittlerer Jahresniederschlag*
 $Cl_{DD} =$ *Mittlerer Chlorideintrag aus trockener Deposition*
 $Cl_P =$ *Mittlere Chloridkonzentration im Niederschlag*
 $Cl_{SW} =$ *Chloridkonzentration im Bodenwasser*

Die Chlorid-Bilanz-Methode kann in der ungesättigten Zone in Gebieten genutzt werden, in denen Aufwärtsflüsse vernachlässigbar sind, d.h. die Methode kann nicht in der Durchwurzelungszone angewandt werden. In der Kalahari Nordost-Namibias variiert die Mächtigkeit der Durchwurzelungszone sehr stark: Im Grassland ist sie zumeist geringer als 75 cm mächtig, in *Baikiaea plurijuga* Waldsavannen beträgt die Wurzeltiefe mindestens 8 m.

Durch Abwandlung kann die Chlorid-Bilanz-Methode auch in der gesättigten Zone dort angewandt werden, wo der laterale Eintrag quantifizierbar ist, also im Bereich der Grundwasserscheide (kein lateraler Zufluss). Sie kann ebenfalls in Bereichen mit flachem Grundwasser angewandt werden, die nur aus einem räumlich eng begrenzten Gebiet gespeist werden und in dem ähnliche Grundwasserneubildungsraten zu erwarten sind (z.B. BRUNNER et al., 2004).

PHILLIPS et al. (1988) und SCALONE (1992) zeigen, dass die Chlorid-Bilanz-Methode ein zuverlässiges Werkzeug auch zur Ermittlung von Neubildungsraten kleiner als 1 mm/a ist. BACHMAT et al. (1989) ermittelten 100 mm/a als kritische Obergrenze für diese Methode, da bei größeren Neubildungsraten vor allem in bindigen Böden Anionenausschluss (GVIRTZMANN et al. 1986; JAMES & RUBIN, 1986) die Ergebnisse beeinflusst.

Ermittlung der Chlorid Deposition

Während SELAOLO (1998) für die Kalahari Botswanas mittels eines Totalisatornetzwerkes aufgezeigt hat, dass die trockene Chlorid-Deposition nicht unbedingt vernachlässigbar ist, ist in den bisherigen Veröffentlichungen für den namibischen Teil der Kalahari davon ausgegangen worden, dass die trockene gegenüber der nassen Chlorid-Deposition vernachlässigbar klein ist (KLOCK, 2001; KÜLLS, 2000; MAINARDY, 1999; WRABEL, 1998; DACHROTH & SONNTAG, 1983).

In dieser Studie wurden 13 Rohr-Totalisatoren (1-meter-lange Kunststoffrohre, die mit Rohrverschlusskappen verschlossen wurden und 80 cm tief eingegraben wurden, Bauart entsprechend SELAOLO, 1998) und 2 Trichter-Totalisatoren (Trichter, die mit einem in eine Schlinge gelegten Schlauch mit einem Vorratsbehälter verbunden wurden und im Boden weitestgehend versenkt wurden, Bauanleitung von JAKE PETERS/IAHS, frdl. mündl. Mittl.) nach einem Jahr beprobt. Die Lage der Sammelstellen in Arbeitsgebiet ist Abb. 1 zu entnehmen. An 6 Lokalitäten wurde von den Farmern über den entsprechenden Zeitraum der Niederschlag aus Regenmessern gesammelt.

Bei der Probeneinsammlung wurde jeweils eine Probe des gesammelten Wassers aus den Trichter-Totalisatoren entnommen sowie die Gesamtmenge des gesammelten Wassers bestimmt. Der eingedampfte Rückstand in den Rohr-Totalisatoren wurde in 1 l dest. Wasser aufgelöst und als Probe entnommen. Sowohl das verwendete dest. Wasser als auch die Proben wurden am Lehr- und Forschungsbereich Hydrogeologie und Umwelt in Würzburg (LFB) analysiert. Aus der bekannten Probenmenge und den Inhaltsstoffen unter Abzug des Eintrags durch das dest. Wasser wurde die Deposition errechnet.

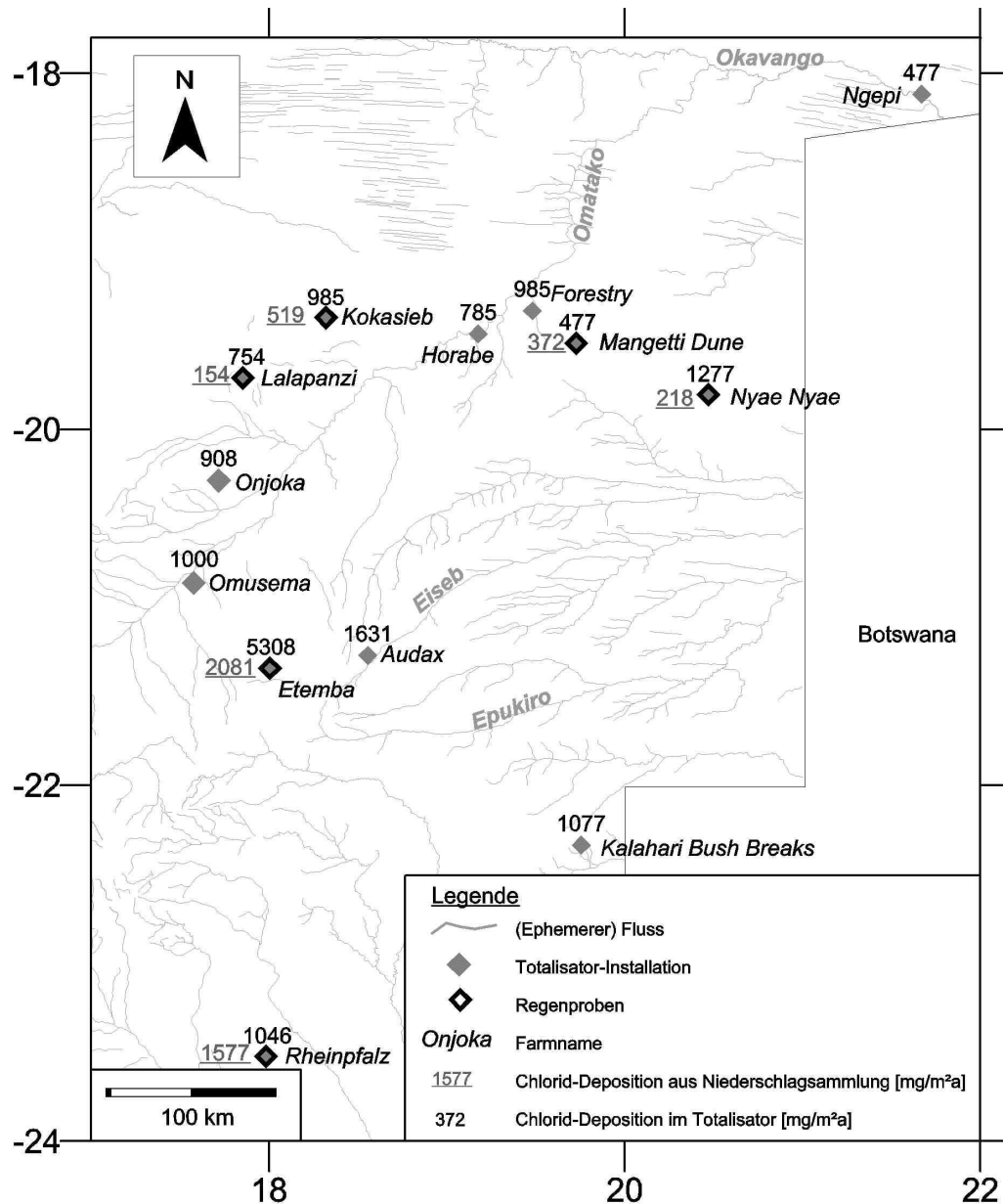


Abb. 1: Lageplan der Totalisatoren (□) und der Niederschlagssammelstellen (◇) in Namibia.

Ergebnisse der Chlorid-Depositions-Messungen

Während des Untersuchungszeitraums von September 2002 bis September 2003 wurden in dem Arbeitsgebiet kumulative Niederschlagshöhen zwischen 130 und 486 mm ermittelt (Tabelle 1). Demgegenüber liegen die durchschnittlichen jährlichen Niederschlagswerte zwischen 250 und 550 mm/a. In der Regensaison 2002/03 ist im Arbeitsgebiet überall weniger Regen gefallen als in durchschnittlichen Jahren, an den Stationen Rheinpfalz, Horabe, Kalahari Bush Breaks, Omusema und Onjoka ist weniger als die Hälfte des mittleren jährlichen Niederschlags gefallen.

Die ermittelte Chlorid-Deposition (Tabelle 1) aus Regenproben liegt im Beobachtungszeitraum September 2002 bis September 2003 zwischen 154 und 2081 mg/m²a mit einem Mittelwert von 802 mg/m²a. Bei den Rohr-Totalisatoren liegen die Werte im Allgemeinen höher mit Werten

zwischen 477 und 5308 mg/m²a. Der Mittelwert liegt bei 1285 mg/m²a. Die Daten für die Farm Etemba fallen aus dem Rahmen der anderen Messungen, und auf der Farm Rheinpfalz wurde der Regenschirm durch Vogelkot verunreinigt (Beobachtung des Farmers). Unter Auslassung dieser Daten ergibt sich für die Chlorid-Deposition durch Niederschlag ein Mittelwert von 316 mg/m²a und für die gesamte Chlorid-Deposition in den Rohr-Totalisatoren von 950 mg/m²a.

Alle Rohr-Totalisatoren zeigen eine deutliche höhere Chlorid-Deposition als die Regenproben der entsprechenden Lokalität. Der Anteil der trockenen Chlorid-Deposition an der totalen Chlorid-Deposition liegt nach diesem Beobachtungszeitraum für die Kalahari Nordost-Namibias zwischen 22 und 83 %. Aus den Totalisator-Daten ergibt sich für die räumliche Verteilung der Chlorid-Deposition eine Abnahme in nördliche und östliche Richtung.

Im Vergleich der beiden Totalisatortypen zeigt sich, dass die Rohr-Totalisatoren deutlich höhere Chlorid-Depositionswerte ermitteln als die Trichter-Totalisatoren (Rheinpfalz ca. sechsfach mit 157 gegen 1046 mg/m²a und Audax ca. dreifach mit 504 gegen 1631 mg/m²a). Durch das wöchentliche Nachspülen der Trichter sollte eigentlich eine Ausblasung der eingetragenen Stäube verhindert werden. Es erscheint jedoch wahrscheinlich, dass in den Trichtern der Staub weniger gut gefangen wurde als in den Rohren und dass in der Zeit zwischen den Spülvorgängen doch eine Ausblasung stattgefunden hat und zwar mehr als in den langen Rohren.

Tabelle 1: Chlorid-Deposition aus Totalisatoren und Niederschlagssammlungen September 2002 – September 2003

Ort	Niederschlags- höhe [mm]	Chlorid-Deposition [mg/m ² a]			Anteil der trockenen Deposition an der Gesamt- Chlorid-Deposition
		Regen	Totalisator	Trichter-Totalisator	
Etemba	340	2081			0,61
Etemba	340		5308		
Kokasieb	346	519			0,47
Kokasieb	346		985		
Lalapanzi	385	154			0,80
Lalapanzi	385		754		
Mangetti	300	372			0,22
Mangetti	300		477		
Rheinpfalz	146	1577			-0,51
Rheinpfalz	146		1046		
Rheinpfalz	146			157	
Tsumkwe	435	217,5			0,83
Tsumkwe	435		1277		
Audax	323		1631		
Audax	323			504	
Forestry	289		985		
Horabe	205		785		
Kalahari Bush Breaks	130		1077		
Ngepi	486		477		
Omusema	200		1000		
Onjoka	192		908		
Mittelwert	301	820	1285	330	
Standardabw.	101	808	1246	245	
Max	486	2081	5308	504	
Min	130	154	477	157	
Anzahl	21	6	13	2	

Befunde früherer Studien und Vergleich mit Vorarbeiten

Seit 1993 wurden am LFB Hydrogeologie 92 Regenproben aus Nordost-Namibia analysiert (Tabelle 2). Der größte Teil der Proben (49 %) zeigte dabei Chlorid-Gehalte zwischen 0,1 und 1 mg/l. In 38 % der Proben wurden Chlorid-Gehalte zwischen 1 und 5 mg/l ermittelt. 5 Proben (5,4 %) zeigen höhere Chlorid-Gehalte (Maximalwert 18,9 mg/l) und für 7 Proben (7,6 %) wurden Chlorid-Gehalte unterhalb der Nachweisgrenze (0,1 mg/l) festgestellt. Die Niederschlagsereignisse mit den niedrigsten Chlorid-Werten wurden dabei in Hochfeld, Windhoek, Grootfontein und Lalapanzi beobachtet, die höchsten in Windhoek und Etemba. Als nasse Chlorid-Deposition würden sich mit diesen Werten und den mittleren jährlichen Niederschlagshöhen Werte zwischen 40 und 6615 mg/m²a ergeben, mit einem Mittelwert von 672 mg/m²a. Dieser Wert liegt bei 71 % der gemittelten gesamt Chlorid-Deposition aus Totalisatoren im Arbeitsgebiet (950 mg/m²a).

Tabelle 2: Chloridgehalt von Niederschlagsereignissen in Nordnamibia, die seit 1993 am LFB Hydrogeologie in Würzburg analysiert wurden und die daraus errechneten nassen Chlorid-Depositionen

Ort	Datum	Chlorid-Gehalt [mg/l]	Mittlerer Jahres-Niederschlag [mm]	Berechnete Chlorid-Deposition bei mittlerem Jahresniederschlag [mg/m ² a]
Otjiwarongo	04.02.1995	0,7	450	315
Otjiwarongo	25.02.1995	2,1	450	945
Otjiwarongo	10 - 12'1995	0,7	450	315
Otjiwarongo	01 - 09'1996	2,1	450	945
Otjiwarongo	10'1996 - 03'1997	0,5	450	225
Otjiwarongo	01.01.1997	0,5	450	225
Otjiwarongo	01.01.1997	0,6	450	270
Grootfontein, Gauss	01.01.1997	< 0,1	480	< 48
Grootfontein, Hochkamp	01.01.1997	< 0,1	480	< 48
Grootfontein, Salzbrunnen	10'1993 - 10'1994	2,4	480	1152
Grootfontein, Salzbrunnen	04' - 12'1994	0,6	480	288
Grootfontein, Salzbrunnen	01' - 04'1995	0,5	480	240
Grootfontein, Salzbrunnen	05' - 12'1995	2,5	480	1200
Grootfontein, Salzbrunnen	25.02.1995	0,5	480	240
Grootfontein, Salzbrunnen	01.04.1995	0,6	480	288
Grootfontein, Salzbrunnen	10.01.1996	2,5	480	1200
Grootfontein, Salzbrunnen	12.02.1996	1,7	480	816
Grootfontein, Salzbrunnen	01' - 02'1996	0,8	480	384
Grootfontein, Salzbrunnen	16.03.1996	0,8	480	384
Grootfontein, Salzbrunnen	17.3. - 30.09.1996	1,7	480	816
Grootfontein, Salzbrunnen	10' - 12'1996	< 0,1	480	< 48
Grootfontein, Salzbrunnen	01' - 03' 1996	< 0,1	480	< 48
Hochfeld Garage	01.04.1995	1,4	400	560
Hochfeld Garage	23.07.1995	1,1	400	440
Hochfeld Garage	27.12.1996	0,1	400	40
Hochfeld Garage	02.03.1997	0,1	400	40
Windhoek Academia	14.10.1993	1,0	350	350
Windhoek Academia	18.10.1993	0,9	350	315
Windhoek Academia	25.11.1993	2,0	350	700
Windhoek Academia	27.11.1993	1,2	350	420
Windhoek Academia	12.12.1993	1,8	350	630

Ort	Datum	Chlorid-Gehalt [mg/l]	Mittlerer Jahres-Niederschlag [mm]	Berechnete Chlorid-Deposition bei mittlerem Jahresniederschlag [mg/m ² a]
Windhoek Academia	01.01.1994	0,7	350	245
Windhoek Academia	05.01.1994	1,5	350	525
Windhoek Academia	08.01.1994	1,0	350	350
Windhoek Academia	10.01.1994	0,8	350	280
Windhoek Academia	22.01.1994	1,1	350	385
Windhoek Academia	26.01.1994	1,5	350	525
Windhoek Academia	10.02.1994	0,7	350	245
Windhoek Academia	10.04.1994	0,9	350	315
Windhoek Academia	11.04.1994	1,0	350	350
Windhoek Academia	01.01.1995	18,9	350	6615
Windhoek Academia	28.02.1995	3,9	350	1365
Windhoek Academia	08.01.1996	4,1	350	1435
Windhoek Academia	24.01.1996	4,2	350	1470
Windhoek Academia	06.03.1996	0,7	350	245
Windhoek Academia	23.07.1996	7,2	350	2520
Windhoek Academia	22.10.1996	7,2	350	2520
Windhoek Academia	07.11.1996	2,4	350	840
Windhoek Academia	07.12.1996	0,7	350	245
Windhoek Academia	16.01.1997	< 0,1	350	< 35
Windhoek Academia	21.01.1997	< 0,1	350	< 35
Windhoek Academia	24.02.1997	0,2	350	70
Windhoek Academia	1998	2,8	350	980
Windhoek Academia	1998	0,8	350	280
Windhoek Academia	1998	1,2	350	420
Platveld, Otavi	23.03.1996	1,5	475	713
Oshakati	04.10.1993	3,5	500	1750
Oshakati	17.11.1993	3,2	500	1600
Oshakati	18.11.1993	1,8	500	900
Oshakati	19.11.1993	1,3	500	650
Oshakati	20.11.1993	0,7	500	350
Oshakati	10.12.1993	0,6	500	300
Oshakati	14.12.1993	0,8	500	400
Oshakati	23.12.1993	0,7	500	350
Oshakati	24.12.1993	0,5	500	250
Oshakati	06.01.1994	0,7	500	350
Etosha	30.01.1994	0,4	450	180
Etosha	10.02.1994	2,0	450	900
Etosha	15.02.1994	0,2	450	90
Etosha	11.03.1994	1,2	450	540
Etosha	09.04.1994	2,4	450	1080
Rooiboklaagte	04.12.2000	0,8	320	256
Eiseb	29.11.2000	0,8	320	256
Ememba	2002	7,5	400	3000
Ememba	2003	1,3	400	520
Kokasieb	2002	0,2	480	96
Lalapanzi	2002	0,1	450	45
Lalapanzi	2003	< 0,1	450	< 45
Mangetti Dune	2002	1,5	450	675
Mangetti Dune	2002	1,5	450	675

Ort	Datum	Chlorid-Gehalt [mg/l]	Mittlerer Jahres-Niederschlag [mm]	Berechnete Chlorid-Deposition bei mittlerem Jahresniederschlag [mg/m ² a]
Mangetti Dune	2003	0,3	450	135
Rheinpfalz	2002	10,8	250	2700
Tsumkwe	1999	0,9	420	378
Tsumkwe	1999	0,8	420	336
Tsumkwe	1999	0,5	420	210
Tsumkwe	2002	0,4	420	168
Tsumkwe	2002	0,4	420	168
Tsumkwe	2002	0,6	420	252
Tsumkwe	2003	0,6	420	252
Tsumkwe	2003	0,6	420	252
Tsumkwe	2003	0,5	420	210
Tsumkwe	2003	0,4	420	168
Mittelwert		1,7		672,0
Standardabweichung		2,6		887,2
Min		< 0,1		< 35,0
Max		18,9		6615,0

SELAOLO (1998) hat mit 12 Totalisatoren, die zwischen 1 und 10 Jahren in Betrieb waren, mittlere Gesamt-Chlorid-Depositionen zwischen 295 und 1194 mg/m²a über Botswana ermittelt. Die Station Shakawe/Botswana (1990/1991) liegt ca. 25 km entfernt von der Station Ngepi/Namibia (2002/2003). Auf Botswanascher Seite wurde eine Chlorid-Deposition von 334 mg/m²a ermittelt, auf Namibischer Seite war sie in diesem Projekt mit 477 mg/m²a höher. Deutlichere Unterschiede zeigen sich zwischen Ghanzi/Botswana (1990/91) und Kalahari Bush Breaks/Namibia (2002/2003), die ca. 100 km voneinander entfernt liegen mit 484 bzw. 1077 mg/m²a. Die Studie SELAOLOS (1998) zeigt auf, dass über dem Okavango-Delta (Nordwest-Botswana) die geringsten Chlorid-Depositionswerte auftreten. Dies wird durch die eigene Studie, mit abnehmenden Chlorid-Depositionen in Richtung Nordosten, bestätigt.

Der Anteil der trockenen Chlorid-Deposition an der totalen Chlorid-Deposition liegt nach diesem Beobachtungszeitraum für die Kalahari Nordost-Namibias zwischen 22 und 83 %. Er ist somit nicht vernachlässigbar klein, und alle Berechnungen der Grundwasserneubildung, die bisher davon ausgegangen sind, dass der Anteil der trockenen Deposition an der gesamten Chlorid-Deposition zu vernachlässigen ist, müssten korrigiert werden.

Ermittlung der Grundwasserneubildung mittels der Chlorid-Bilanz-Methode

Zur Ermittlung punktueller Neubildungswerte wurden im Arbeitsgebiet während eines Geländeaufenthaltes 2002 acht Profile, während einer weiteren Geländephase 2003 ein Profil ausgehoben und unterhalb der Wurzelzone beprobt (Tabelle 3). Im Department of Water Affairs in Windhoek wurden Korngrößenverteilung und Gesamtkohlenstoffgehalt bestimmt. Alle Profile bestehen zum Hauptanteil aus Feinsand mit sehr geringen Gehalten von Kohlenstoff. Im LFB erfolgte die Erstellung der Bodeneluat und anschließende Analyse.

Zusätzlich wurden die am LFB bereits vorhandenen Neubildungsdaten, die durch Anwendung der Chlorid-Bilanzmethode an Bodenprofilen ermittelt wurden (Dissertationen von WRABEL, 1999; MAINARDY, 1999 und KLOCK, 2001), unter Berücksichtigung der Ergebnisse des Totalisator-Netzwerkes, neu berechnet. Insgesamt stehen Ergebnisse von 33 Profilen zur Verfügung, die einen Bereich von mittleren Jahresniederschlagssummen von 400 bis 500 mm/a abdecken (Tabelle 3).

Aus den Hydrochemischen Daten von HYUSER (1982) wurden Brunnen herausgesucht, die geringe Grundwasserflurabstände (< 30 m) aufweisen und die in Lockersedimenten angesiedelt sind. Diese wurden ebenfalls mit der Chlorid-Bilanz-Methode ausgewertet (Tabelle 3), da davon auszugehen ist, dass hiermit näherungsweise die Neubildung im näheren Umfeld des Brunnens zu charakterisieren ist. Aus dieser methodischen Erweiterung ergibt sich eine Abdeckung des Niederschlagsbereichs bis 570 mm.

Ergebnisse der Chlorid-Bilanz-Methode

Für das Untersuchungsgebiet mit mittleren jährlichen Niederschlägen von 400 – 570 mm ergeben sich Grundwasserneubildungswerte zwischen 0,09 und 167,9 mm/a (Tabelle 3). Dabei liegen die Grundwasserneubildungsraten für den mit Bodenprofilen abgedeckten Bereich zwischen 0,02 und 11,9 % des mittleren jährlichen Niederschlages mit einem Mittelwert von 1,8 %. Der niedrigsten Wert wird beim Profil Eindelik erreicht (400 mm mittlere Jahresniederschlagssumme), der höchste beim Profil Otjahevita (488 mm mittlere Jahresniederschlagssumme). Die Grundwasserneubildungsraten für den mit Brunnen abgedeckten Niederschlagsbereich liegen zwischen 0,15 und 29,8 % mit einem Mittelwert von 7,9 %. Da die Chlorid-Bilanz-Methode für Grundwasserneubildungsraten über 100 mm/a zur Überschätzung der Werte neigt (Anionenausschluss), ist eher von einer geringeren Neubildung auszugehen. Die Werte über 100 mm/a sind in Tabelle 3 in grau unterlegt.

In Abb. 2 sind die ermittelten Grundwasserneubildungswerte gegen die jeweilige mittlere Jahresniederschlagssumme aufgetragen. Es zeigt sich für den Niederschlagsbereich, der von beiden Datensätzen (Profile und flache Brunnen) abgedeckt wird, eine gute Übereinstimmung der Neubildungswerte. Es kann also von einer Vergleichbarkeit der Daten ausgegangen werden und die Ableitung von einer generelleren Abhängigkeit (400 bis 570 mm) der Neubildung von der Niederschlagssumme ist möglich. Insgesamt zeigt sich, dass die Neubildungswerte zu jedem Niederschlagswerte streuen. Dabei korrelieren größere Neubildungswerten mit höhere Niederschlagswerte und die Bandbreite der Neubildungswerte wird mit steigendem Niederschlag größer. Als Untergrenze (schwarze gestrichelte Linie in Abb. 2) ist ein Wert von 0,02 % bei 400 mm anzusetzen und 0,2 % bei 550 mm. Die Obergrenze (graue Linie in Abb. 2) ist durch einen exponentiellen Verlauf gekennzeichnet.

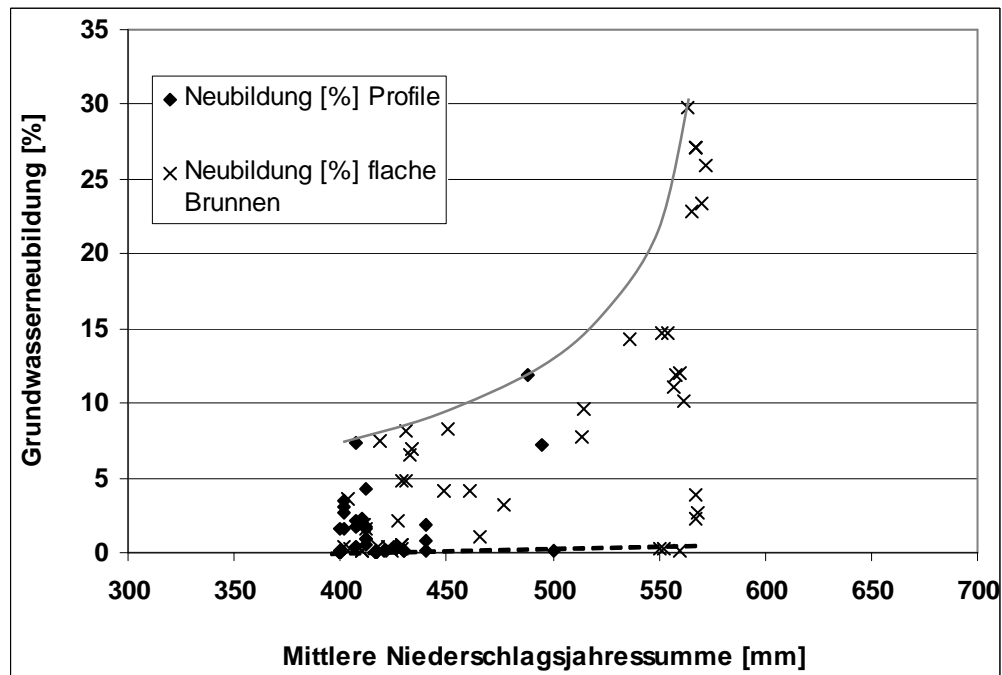


Abb. 2: Gegenüberstellung der Grundwasserneubildung aus der Chlorid-Bilanz-Methode gegen die mittlere Jahresniederschlagssumme unter der Annahme, dass die trockene Deposition mit 50% zur Gesamt-Chlorid-Deposition beiträgt.

Tabelle 3: Grundwasserneubildungsdaten für Nordost-Namibia, die durch Anwendung der Chlorid-Bilanz-Methode ermittelt wurden. Dabei wurde angenommen, dass die trockene Chlorid-Deposition mit 50 % zur Gesamtchlorid-Deposition beiträgt. Datenquellen: 1) Geländeaufenthalte 2002/2003, 2) WRABEL, 1998, 3) MAINARDY, 1999, 4) KLOCK, 2001, 5) HUYSER, 1982

Daten-Quelle	Name	Mittl Jahres-Niederschlag [mm]	Neubildung [%] (Profile)	Neubildung [%] (flache Brunnen)	Neubildung [mm]
1)	Sharukwe	500	0,09		0,47
1)	Eindelik	400	0,02		0,09
1)	East of Tsumkwe	400	1,64		6,57
1)	Etemba	410	2,25		9,23
1)	Omatako Nord	420	0,1		0,42
1)	Omatako Vlei	440	0,84		3,7
1)	Omatako Sand	440	0,2		0,86
1)	Nhoma-Samagaigai	430	0,1		0,45
1)	West of Samagaigai	430	0,15		0,66
4)	Eiseb Block	400	0,15		0,61
4)	East of Tsumkwe	400	0,05		0,21
3)	Otjahewita	495	7,27		36
3)	Otjikona	440	1,82		8
3)	Otjahevita	488	11,89		58
2)	P1	402	3,45		13,89
2)	P2	402	3,04		12,23
2)	P17	402	1,65		6,62
2)	P18	402	2,63		10,56
2)	P3	407	2,12		8,62
2)	P4	407	7,4		30,11

Daten-Quelle	Name	Mittl Jahres-Niederschlag [mm]	Neubildung [%] (Profile)	Neubildung [%] (flache Brunnen)	Neubildung [mm]
²⁾	P13	407	0,34		1,37
²⁾	P14	407	1,69		6,88
²⁾	P7	412	4,24		17,47
²⁾	P15	412	1		4,11
²⁾	P9	412	0,89		3,65
²⁾	P10	412	1,7		7,00
²⁾	P19	412	0,56		2,33
²⁾	P20	412	1,57		6,48
²⁾	P11	417	0,06		0,24
²⁾	P23	417	0,05		0,20
²⁾	P24	417	0,08		0,34
²⁾	P12	426	0,39		1,68
²⁾	P21	426	0,27		1,13
²⁾	P22	426	0,41		1,73
⁵⁾	782	402		0,37	1,5
⁵⁾	778	403		3,6	14,5
⁵⁾	768	405		0,33	1,3
⁵⁾	870	410		0,16	0,7
⁵⁾	871	410		0,2	0,8
⁵⁾	861	411		1,84	7,6
⁵⁾	860	412		1,6	6,6
⁵⁾	C421	418		0,36	1,5
⁵⁾	C423	419		7,51	31,5
⁵⁾	852	422		0,43	1,8
⁵⁾	822	424		0,15	0,6
⁵⁾	C437	427		2,09	8,9
⁵⁾	C410	429		0,26	1,1
⁵⁾	C412	429		0,48	2,1
⁵⁾	C413	429		0,48	2,1
⁵⁾	C435	429		4,83	20,7
⁵⁾	C434	430		8,11	34,9
⁵⁾	903	431		4,8	20,7
⁵⁾	910	433		6,6	28,6
⁵⁾	878	434		6,9	29,9
⁵⁾	917	449		4,1	18,4
⁵⁾	C439	451		8,28	37,3
⁵⁾	C430	461		4,11	19
⁵⁾	C429	466		1,06	4,9
⁵⁾	924	477		3,18	15,1
⁵⁾	C382	514		7,78	40
⁵⁾	C376	515		9,57	49,3
⁵⁾	C306	536		14,26	76,4
⁵⁾	C332	551		0,3	1,6
⁵⁾	C307	552		14,66	80,9
⁵⁾	C332	553		0,3	1,7
⁵⁾	C307	554		14,76	81,7
⁵⁾	C271	557		11,15	62,1
⁵⁾	C386	558		11,93	66,5
⁵⁾	C386	560		12,01	67,2
⁵⁾	C284	560		0,16	0,9

Daten-Quelle	Name	Mittl Jahres-Niederschlag [mm]	Neubildung [%] (Profile)	Neubildung [%] (flache Brunnen)	Neubildung [mm]
⁵⁾	C287	562		10,09	56,7
⁵⁾	C288	564		29,79	167,9
⁵⁾	C322	565		22,84	129,1
⁵⁾	C317	567		3,88	22,0
⁵⁾	C318	567		27,1	153,6
⁵⁾	C319	567		27,07	153,5
⁵⁾	C320	567		27,08	153,5
⁵⁾	C314	567		2,31	13,1
⁵⁾	C321	568		2,66	15,1
⁵⁾	C336	570		23,41	133,4
⁵⁾	C323	572		25,91	148,3

Diskussion

Diese Studie in Nordost-Namibia hat aufgezeigt, dass auch in Gebieten, in denen von unterschiedlichsten Autoren bisher davon ausgegangen wurde, dass eine trockene Chlorid-Deposition nicht stattfindet, ein erheblicher Teil der gesamten Chlorid-Deposition trocken erfolgt. Dadurch hat sich in den vorangegangenen Studien eine Unterschätzung der Grundwasserneubildung ergeben. Diese Unterschätzung ist im Bereich von 1,2- bis 2-fach anzusetzen. Variationen in ähnlichem Maßstab werden allerdings auch bei einem Vergleich zwischen den namibischen Chlorid-Depositions-Stationen und den Stationen auf Botswanascher Seite deutlich und zeigen damit auf, dass ein einjähriger Messintervall nicht unbedingt den langjährigen Mittelwert widerspiegelt. Die Chlorid-Depositions-Daten (Beobachtungszeitraum zwischen 1 und 10 Jahren) SELAOLOS(1998) zeigen auf, dass in außerordentlichen Jahren Verdoppelungen der trockenen Deposition möglich sind, wohingegen die nasse Deposition hauptsächlich von der gesamten Jahresniederschlagsmenge abhängt. Um zu einer verbesserten Abschätzung der Grundwasserneubildung mittels der Chlorid-Bilanz-Methode für Namibia zu gelangen, ist es daher wünschenswert, für ca. 10 Jahre trockene und nasse Chlorid-Deposition zu beobachten.

Für den Versuchsaufbau erscheint es sinnvoll, Rohre zu verwenden, die nach unten mit einer Verschlusskappe abgeschlossen sind und weitestgehend in den Boden eingegraben sind, da hierbei nur eine geringe Wiederausblasung stattfindet. Dieser Versuchsaufbau repräsentiert dabei weite Teile des Arbeitsgebietes, in denen sowohl der Boden als auch die Vegetation Staubfallen darstellen. Demgegenüber stehen vegetationslose Pfannen, die als Ausblasungsflächen zu betrachten sind und in denen die trockene Chlorid-Deposition wahrscheinlich tatsächlich vernachlässigbar klein ist.

Literatur

- ALLISON, G. B. & HUGHES, M. W. (1978):** The use of environmental tritium and chloride to estimate total local recharge to an unconfined aquifer. *Aust. J. Soil Res.*, **16**, 181-195.
- BACHMAT, Y. C., GVIRTZMAN, H. & MARGARITZ, M. (1989):** Evaluation of groundwater replenishment coefficients from the record of a borehole penetrating the unsaturated zone. *Water Resource Res.*, **25**(5), 973-978.
- BRUNNER, P., BAUER, P., EUGSTER, M. & KINZELBACH, W. (2004):** Using remote sensing to regionalize local precipitation recharge rates obtained from the Chloride Method. *J. Hydrology*, **294**, 241-250.
- DACHROTH, W. & SONNTAG, C. (1983):** Grundwasserneubildung und Isotopdatierung in Südwestafrika/Namibia. - *Z. dt. Geol. Ges.*, **134**, 1013-1041.
- EDMUNDS, W. M., DARLING, W. G. & KINNIBURGH, D. G. (1988):** Solute profile techniques for recharge estimation in semi-arid and arid terrain. - In: *Estimation of natural groundwater recharge*, (Ed. by I. Simmers), pp. 313-322. *NATO ASI Series C 222*.
- GIESKE, A., SELAOLO, E. & BEEKMAN, H. E. (1995):** Tracer interpretation of moisture transport in a Kalahari sand profile. In: *Application of tracers in arid zone hydrology* (Ed. by E.M. Adar & C. Leibundgut), pp. 373-382. *IAHS Publ.* **232**.
- GVIRTZMAN, H., RONEN, D. & MAGARITZ, M. (1986):** Anion exclusion during transport through the unsaturated zone. *J. Hydrology*, **87**, 267-283.
- HYUSER D. J. (1982):** Chemiese Kwaliteit van die Ondergronds waters in Suidwest-Afrika/Namibie. Volume 3, parts 2 & 3 - Onverwerkte Data. DWA, Windhoek.
- JAMES, R. V. & RUBIN, J. (1986):** Transport of chloride ion in a water-unsaturated soil exhibiting anion exclusion. *Soil Sci. Am. J.*, **50**, 1142-1149.
- KLOCK, H. (2001):** Hydrogeology of the Kalahari in north-eastern Namibia with special emphasis on groundwater recharge, flow modelling and hydrochemistry. - Doktorarbeit, Universität Würzburg.
- KÜLLS, C. (2000):** Groundwater of the north-western Kalahari, Namibia - Estimation of recharge and quantification of the flow system. - Doktorarbeit, Universität Würzburg.
- MAINARDY, H. (1999):** Grundwasserneubildung in der Übergangszone zwischen Festgesteinsrücken und Kalahari-Lockersedimentüberdeckung (Namibia). *HU-Forschungsergebnisse aus dem Bereich Hydrogeologie und Umwelt*, **17**, 1-145.

PHILLIPS, F. M., MATTICK, J. L., DUVAL, T. A., ELMORE, D. & KUBIK, P. W. (1988): Chlorine 36 and tritium from nuclear weapons fallout as tracers for long-term liquid and vapor movement in desert soils. *Water Resource Res.*, **24**(11), 1877-1891.

SCALONE, B. R. (1992): Evaluation of liquid and vapour water flow in desert soils based on chlorine 36 and tritium tracers and non-isothermal flow simulations. *Water Resource Res.*, **28**(1), 285-297.

SELAOLO, E. T. (1998): Tracer studies and groundwater recharge assessment in the eastern fringe of the Botswana Kalahari: The Letlhakeng - Botlhapatlou Area. - Doktorarbeit, Vrije Universiteit Amsterdam.

WRABEL, J. (1999): Ermittlung der Grundwasserneubildung im semiariden Bereich Namibias mittels der Chlorid-Bilanz-Methode. *HU-Forschungsergebnisse aus dem Bereich Hydrogeologie und Umwelt*, **16**, 1-155.