

Wasser im Jemen – eine hydrologische Charakterisierung

von **Jan-Hendrik May**

1. Einleitung

Durch seine Bedeutung als wichtigste Lebensgrundlage des Menschen ist und bleibt Wasser ein vordringlicher Forschungsgegenstand in der Geographie sowohl für physisch-geographische als auch für kulturgeographische Fragestellungen. Vor allem in Trockengebieten wie dem Jemen erhält das Thema als limitierender Faktor eine besondere Relevanz.

Leider haben sich bisherige Untersuchungen zur regionalen Hydrologie des Jemen im wesentlichen aus ingenieurgeologischen Fragestellungen ergeben. Eine geographisch nachhaltigere Sichtweise, die physisch-geographische und hydrologische Details im kleinen mit geographischen Gegebenheiten im großen zu verknüpfen sucht und damit Wasser als nicht-erneuerbare Ressource in den Mittelpunkt stellt, liegt den wenigsten Arbeiten zu Grunde. So gibt es also eine Vielzahl von hydrologischen Daten für den Jemen, doch ist deren Zuverlässigkeit, Kompatibilität und Relevanz meist fragwürdig (vgl. VAN DER GUN und AHMED 1995, S.1; NOVAKY ET AL. 1998, S. 349). Besonders die Arbeiten von VAN DER GUN und AHMED (1995) und von ABDULBAKI (1984) seien hier als übersichtliche und zusammenfassende Darstellungen hervorgehoben.

Für diese Arbeit ist die Zielsetzung sicherlich eine kurze hydrologische Charakterisierung des Jemen, die nicht zuletzt für weitergehende wirtschaftliche oder kulturgeographische Fragen als Grundlage dienen kann. Wie in der hydrologischen Fachliteratur üblich, basiert die Arbeit auf der hydrologische Grundgleichung (vgl. HÖLTING 1996, S. 15 f) und behandelt deren Komponenten im einzelnen:

$$\text{Niederschlag} = [\text{Oberflächenabfluß} + \text{Grundwasserabfluß}] + \text{Verdunstung}$$

2. Klimatische Hydrologie

2.1. Allgemeine klimatische Charakteristika

Die klimatischen Gegebenheiten im Jemen werden, wie andernorts auch, von verschiedenen Faktoren kontrolliert. Die topographische Lage zwischen 12° und 19° nördlicher Breite beschert dem Jemen eine übers ganze Jahr intensive Globalstrahlung, seine Lage innerhalb der atmosphärischen Zirkulation sorgt für einen wechselnden Einfluß des Nordost-Passats und des Südwest-Monsoons. Das Rote Meer und der Indische Ozean, die den Jemen im Süden und Westen einrahmen, stellen warmes Oberflächenwasser zur Verfügung. Schließlich werden durch Orographie und Relief des Landes die Niederschlags- und Temperaturverhältnisse auch auf regionaler und lokaler Basis entscheidend beeinflusst. Diese Faktoren, von VAN DER GUN und AHMED (1995, S.21) zusammengefaßt, sorgen insgesamt für eine recht hohe klimatische Variabilität, insbesondere im Bereich der Niederschläge. Deshalb sollte das Klima des Jemen differenzierter betrachtet werden als es gebräuchliche Klassifikationen tun. Nach Köppen's Klimaklassifikation beispielsweise befindet sich der Großteil des Jemen im Bereich eines BWh-Klimas (\cong tropische/subtropische Wüste).

2.2. Niederschläge

Niederschläge fallen im Jemen im wesentlichen als Regen. Zumeist handelt es sich dabei um konvektive Niederschläge, die in ihrem Auftreten regional und mengenmäßig stark schwanken. Für das langjährige Niederschlagsmittel lassen sich, auch aufgrund fehlender Meßreihen, keine Trends ablesen. Die Variabilität zwischen den einzelnen Jahren scheint mit abnehmendem Jahresniederschlag anzusteigen.

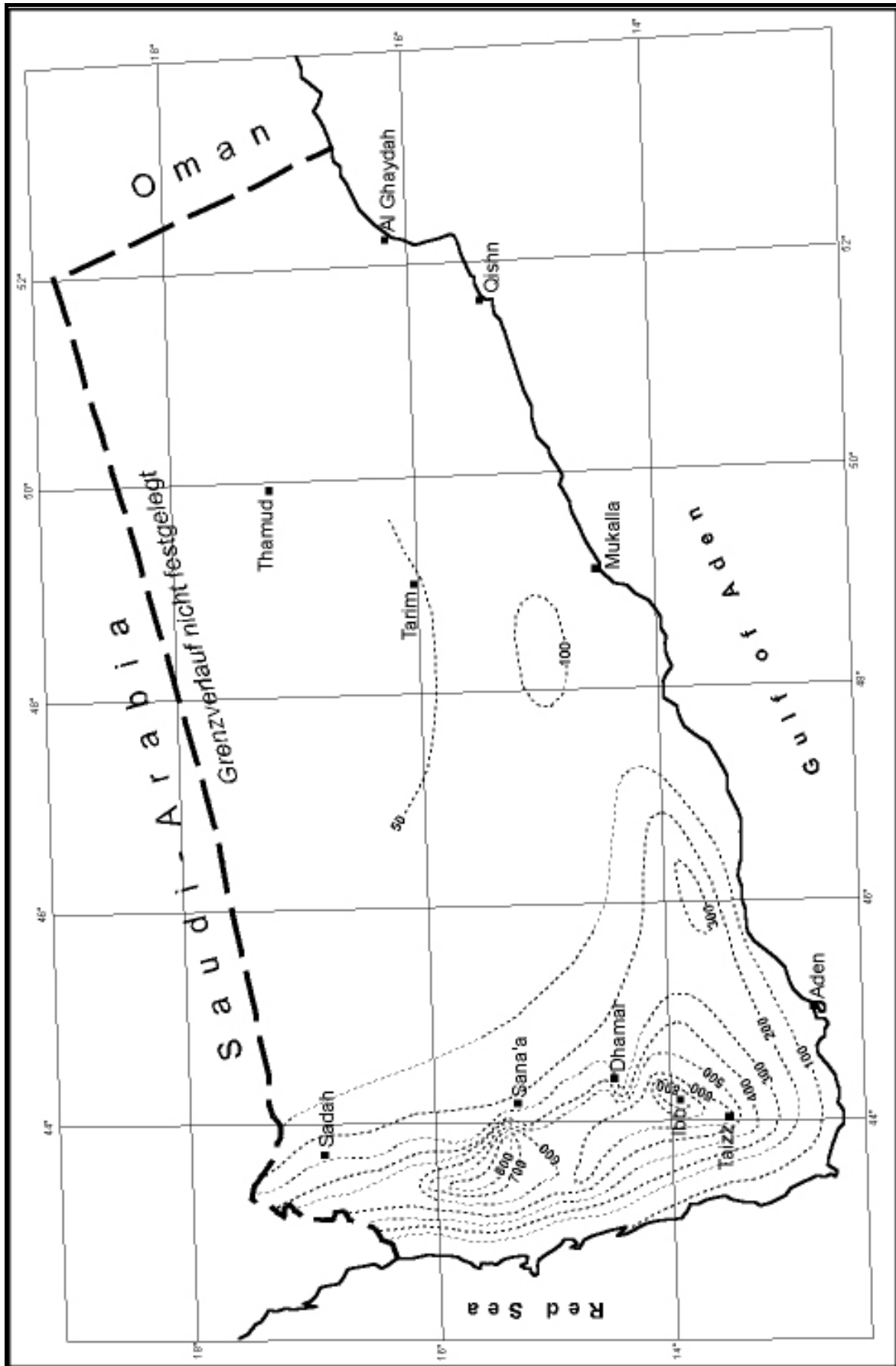


Abbildung 1: Verteilung des durchschnittlichen jährlichen Niederschlages im Jemen für den Zeitraum 1985 bis 1991 (Entwurf: MAY nach ALAWI und MEZHELOVSKY 1995, S. II-1)

Die Verteilung des Niederschlagsjahresmittels im Jemen wird in *Abbildung 1* wiedergegeben. Deutlich hebt sich der regenreichere Westen des Landes gegenüber sehr trockenen Regionen wie der Küste und der Gebiete im Landesinneren ab. Das jährliche Niederschlagsmaximum wird bei Ibb mit 1510 mm/a erreicht, während weite Teile des Landes, wie beispielsweise Aden, unter 50 mm/a Niederschlag erhalten.

Die Niederschlagsverteilung hat im Jemen landesweit einen saisonalen Charakter. Dabei lassen sich nach REMMELE (1989, S. 33 ff) in annähernd allen Stationen zwei Regenzeiten unterscheiden. Die erste findet zwischen März und Mai statt und wird durch die starke Erwärmung der Landflächen ausgelöst. Landwärtsgerichtete Winde bringen durch den sich abschwächenden Passateinfluß zunehmend Feuchtigkeit, die sich in Luvlagen abregnen kann. Die zweite und wichtigere Regenzeit findet zwischen Juli und September statt und wird mit dem weiten Vorrücken der ITCZ auf die Arabische Halbinsel erklärt, wodurch typische Monsoonregen Niederschläge in den Jemen bringen können. In jedem Fall handelt es sich für die Großzahl der Niederschläge im Jemen um kurzzeitige, meist singuläre Starkregenereignisse (vgl. VAN DER GUN und AHMED 1995, S. 30 ff).

2.3. Verdunstung

Die Verdunstung ist eine wesentliche Größe einer jeden Wasserbilanz. Sie ist eine Funktion aus mehreren Größen wie der Temperatur, der Einstrahlung und der Luftbewegung. Unterschieden werden potentielle (\cong theoretisch mögliche) und reelle (\cong tatsächliche) Verdunstung. Gebräuchlich ist dabei die Angabe der potentiellen Verdunstung, die allerdings nach verschiedenen Methoden berechnet werden kann. FARQUHARSON ET AL. (1996, S. 804) und VAN DER GUN und AHMED (1995, S. 34 f) benutzen die Penman-Methode und unterteilen den Jemen in drei Gebiete mit potentieller Verdunstung von 1800 mm/a bis 3500 mm/a. VILLWOCK (1991, S. 56 ff) geht von Werten bis 5000 mm/a aus. In jedem Falle übersteigt die Verdunstung in fast allen Landesteilen die Niederschlagswerte um ein Vielfaches und sorgt im allgemeinen für hochnegative Wasserbilanzen (vgl. VAN DER GUN und AHMED 1995, S. 35).

2.4. Klimazonen

Wie von VAN DER GUN und AHMED (1995, S. 36 f) erläutert läßt sich nach einem Ansatz der UNESCO das Verhältnis von Niederschlag und Verdunstung zur klimatischen Untergliederung des Jemen verwenden. Es ergeben sich fünf Klimazonen: hyper-arid, arid, semi-arid, subhumid und humid. Die letzten drei Zonen nehmen dabei allerdings nur einen sehr kleinen Raum im westlichen Bergland des Jemen ein.

3. Oberflächenwasser

3.1. Einzugsgebiete

Vier große Entwässerungsrichtungen und damit Einzugsgebiete werden für das Oberflächenwasser im Jemen unterschieden (vgl. GROLIER ET AL. 1984, S. 31; VAN DER GUN und AHMED 1995, S. 41):

- *Rotes Meer* mit den Wadis Harad, Mawr, Surdud, Siham und Zabid
- *Golf von Aden* mit den Wadis Tuban, Bana, Hassan, Mai'fah und Hajar
- *Arabisches Meer* mit dem Haupteinzugsgebiet des Wadi Hadramaut und Masila
- Binnenentwässerung *Rub Al Khali* (\approx empty quarter) mit einer Vielzahl von Wadis

3.2. Flußnetzmuster und -entwicklung

Die Ausbildung des Gewässernetzes im Jemen wie es heute ist sowie seine Genese sind im wesentlichen bestimmt von den geologisch-morphologischen Verhältnissen der einzelnen Regionen und spiegeln diese durch ihre unterschiedliche Ausprägung wieder. Die flachlagernden Schichten des Hadramaut-Plateaus resultieren in dendritischen und je nach Faltungsgrad trellisartigen Mustern (vgl. BAKER 1986, Plate F-5). Eine strukturgebundene trellisartige bis asymmetrische Entwässerung wie im Wadi Mawr und Surdud findet sich im Gebirge des westlichen Jemen (vgl. GROLIER ET AL. 1984, S. 40), während sich auf den gleichmäßigen Geländeabfällen hin zum Küsten- und Binnentiefland

eine parallele Entwässerung ausgebildet hat (vgl. VAN DER GUN und AHMED 1995, S. 43).

Die Entwicklung des gesamten Gewässernetzes geht zurück auf subhumide Verhältnisse während des Übergangs Pliozän-Pleistozän (vgl. VILLWOCK 1991, S. 30) Für das Wadi Hadramaut nimmt ABDULBAKI (1986, S. 43) eine zeitweilig binnengerichtete Entwässerung an, die später durch Flußanzapfung an das Arabische Meer angeschlossen wurde. BAKER (1986, Plate F-5) erklärt hingegen die weite Öffnung des Wadi Hadramaut im oberen Einzugsgebiet mit einer rückschreitenden Seitenerosion durch ein vorwiegend im Westen langsam trockener werdendes Klima. Auch das Becken von Sana'a entwässerte ehemals in Richtung Rotes Meer, bevor es durch vulkanische Abdämmungen und antezedente Durchbrüche während des Pleistozäns an das Binnenentwässerungssystem der Rub Al Khali angeschlossen wurde (vgl. JUNGFER 1986, S. 180).

3.3. Oberflächenabfluß und Regime

Wie die Variabilität der Niederschläge schon vermuten läßt, sind auch die Abflüsse des Oberflächenwassers im Jemen durch eine extreme Periodizität oder Episodizität gekennzeichnet. Perennierende Gewässer sind die Ausnahme und auf kleine Gebiete beschränkt. Die Großzahl der Wadis führt nur nach Starkregenereignissen oder zur Regenzeit Wasser. Zumeist handelt es sich dabei um extreme Hochwasserereignisse mit morphologisch sehr starker Wirkung (vgl. CLARK und DAVIES 1988, S. 67 ff; VILLWOCK 1991, S. 81).

Diese Hochwasserereignisse gehen einher mit einem abrupten Ansteigen der Abflußkurve um ein Vielfaches des Abflußwertes. Nach Beginn eines Starkregens dauert es in der Großzahl der jemenitischen Wadis zwischen 2 und 8 Stunden, bis die Abflußkurve reagiert; bis zum Erreichen des Abflußscheitels vergeht dann allerdings gemeinhin weniger als eine halbe Stunde (vgl. VAN DER GUN und AHMED 1995, S. 45). Spitzenwerte für Hochwasserabflüsse können der *Tabelle 1* entnommen werden. Allerdings räumen VAN DER GUN und AHMED (1995, S. 60 f) ein, daß aufgrund der kurzen Meßreihen kaum Hochwässer mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit von mehr als 25-50 Jahren dokumentiert worden sind.

Einzugsgebiet	Fläche [km ²]	Ø Abfluß [m ³ /s]	Max. beob. Spitze
Tuban	5600	4	2640
Bana	7260	4,8	6000
Hajar	7500	6,3	-
Hadramaut	20400/12800	3,6	2100/974
Mawr	7912	5,15	-
Surdud	2370	2,2	600
Zabid	4632	3,96	-
vgl. Main	21505	160	1800

Tabelle 1: Ausgewählte Abflußzahlen (Quelle: NOVAKY ET AL. 1998, S. 339; VILLWOCK 1991, S. 81; CLARK und DAVIES 1988, S. 79; VAN DER GUN und AHMED 1995, S. 61)

Schon aus dieser enormen Schwankungsintensität läßt sich die relativ niedrige Bedeutung des „Baseflow“ (≅ Grundwasserzufluß) für den Abfluß ablesen. Lediglich in Wadis mit perennierendem Abfluß spielt er überhaupt eine Rolle und wird von VAN DER GUN und AHMED (1995, S. 60) mit 40 % der jährlichen Abflußmenge angegeben.

Die Abflußmenge eines jeden Einzugsgebietes wird in Bezug auf einen bestimmten Zeitraum angegeben und ist insbesondere für eine Abschätzung und Nutzbarmachung der regionalen Wasserressourcen von Bedeutung. Das Augenmerk richtet sich dabei vor allem auf das Volumen des jährlichen Abflusses, das in der Abflußspende ausgedrückt wird (siehe *Tabelle 2*). Da etliche Einzugsgebiete keiner konstanten Abflußmessung unterliegen und viele Werte mit Hilfe des Jahresgebietsniederschlages extrapoliert werden müssen, sind viele Angaben bislang nur als grobe Schätzung zu betrachten.

Einzugsgebiet	Fläche [km ²]	Abfluß [Mm ³ /a]	Anteil [%]
Rotes Meer	33.000	741	36
Golf von Aden	46.680	535	27
Arabisches Meer	115.375	553	28
Rub Al Khali	90.900	171	9
Total	285.955	2.000	100

Tabelle 2: Einzugsgebiete und geschätzte durchschnittliche jährliche Abflussspende (Quelle: VAN DER GUN und AHMED 1995, S. 56 f)

Neben der Abflussspende spielt die Verteilung der Abflussmengen innerhalb des Jahres, welche das Regime eines Einzugsgebietes bestimmt, eine wichtige Rolle (vgl. *Abbildung 2*). Abhängig von der Verteilung der Niederschläge sind die Regime der meisten Wadis im Jemen auch von zwei saisonalen Hochwasserperioden gekennzeichnet. Im Westen und Südwesten scheint die Sommerregenzeit für die bedeutenderen Hochwasser zu sorgen (siehe Wadi Surdud und Tuban), während im Landesinneren und an der Südküste der Akzent deutlich auf der Hochwasserperiode im Frühjahr liegt (siehe Wadi Ahwar und Adhanah). Der Grund hierfür liegt möglicherweise in der abschwächenden Wirkung des Nordost-Passates, der im Frühling noch keine ergiebigen Niederschläge an der Westküste erlaubt (vgl. REMMELE 1989, S. 33 ff).

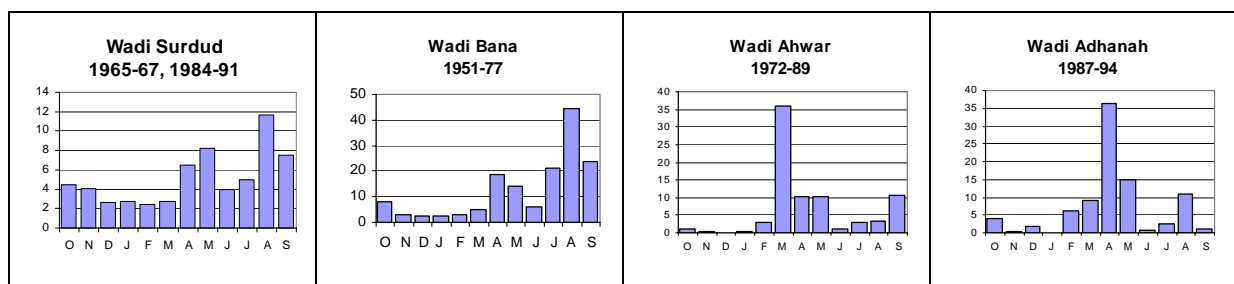


Abbildung 2: Durchschnittliche monatliche Abflüsse ausgewählter Wadis in mm (Quelle: VAN DER GUN und AHMED 1995, Appendix 3.5-12)

Für die einzelnen Regionen des Jemen lassen sich nach VILLWOCK (1991, S. 78 ff) und SHINDOU und TAGUTSCHI (1981, S. 97 ff) folgende Charakteristika herausstellen, die in *Abbildung 3* zusammenfassend veranschaulicht werden.

- Im östlichen Berg- und Binnenland ist die Wasserführung extrem episodisch und tritt nur im Zusammenhang mit Starkregenereignissen auf. Der Verbleib des versickernden Wassers im Bereich der Rub Al Khali ist nicht endgültig geklärt.
- Das zentrale Bergland im westlichen Jemen hat relativ wenig Oberflächenabfluß. Dafür werden aber Niederschläge in intramontanen Becken um so besser gesammelt.
- Im westlichen und südlichen Bergland ist die Wasserführung in den Wadis durch ein steiles Relief und eine Geologie, die nur geringe Mengen an Wasser infiltrieren läßt bzw. das Auftreten von Quellen begünstigt, recht häufig und periodisch bis perennierend (z.B.: Wadi Surdud, Tuban, Bana, Hajar).
- In der westlichen und südlichen Küstenebene sind die Wadis meist nicht mehr auf feste Flußläufe festgelegt und erreichen nur selten die Küste (im engeren, südlicheren Küstenstreifen öfter). Das aus dem Bergland kommende Wasser infiltriert oder verdunstet fast vollständig in den Quartären Lockersedimenten.

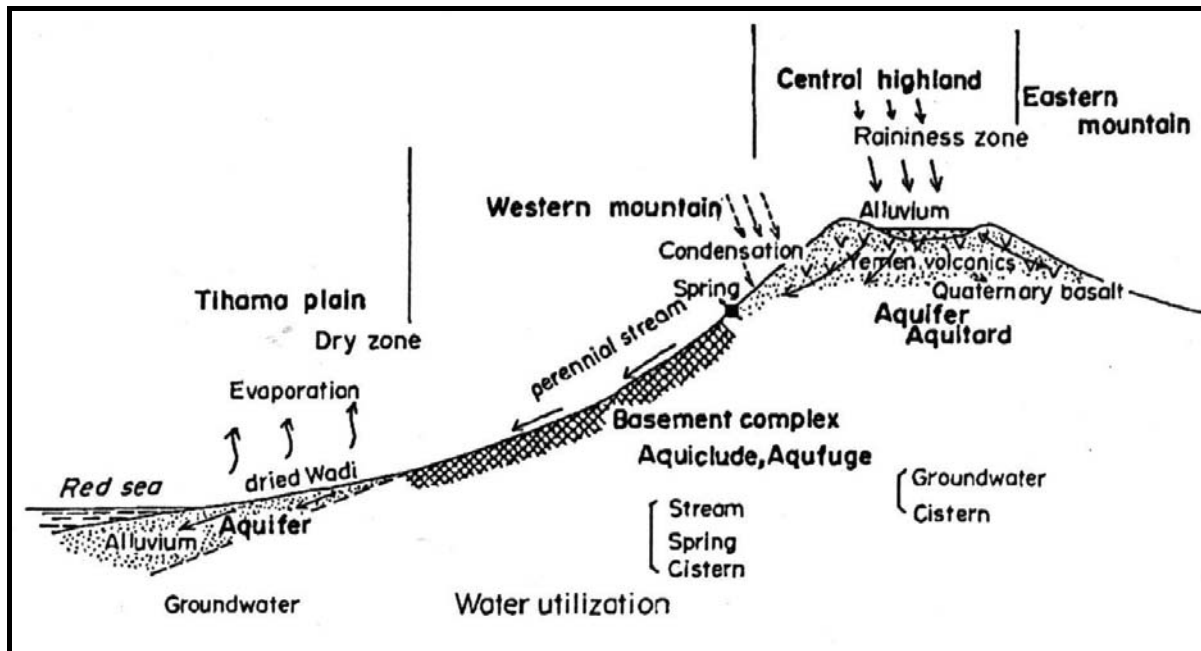


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Wasserzirkulation im jemenitischen Bergland (Quelle: SHINDOU und TAGUTSCHI 1981, S. 97)

4. Grundwasser

Grundwasser ist nach HÖLTING (1996, S. 12) „alles unterirdische Wasser, das die Hohlräume der Erdkruste zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegungsmöglichkeit ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt wird.“ Insbesondere in semi-ariden und ariden Räumen wie dem Jemen ohne größere Mengen an Oberflächenwasser ist Grundwasser eine unverzichtbare Ressource. Vorkommen und Qualität von Grundwasser werden vor allem von der regionalen Geologie und Topographie geprägt. Aber auch die rezenten und historischen hydro-klimatischen Bedingungen sowie die anthropogene Nutzung und Beanspruchung eines Gebietes spielen eine große Rolle (vgl. VAN DER GUN und AHMED 1995, S. 64).

4.1. Hydrogeologie

Inwieweit Grundwasser im Gestein gehalten und gespeichert werden kann, hängt in sehr großem Maße von der Grundwasserspeicherkapazität des Ausgangsgesteins ab, d.h. von seiner Durchlässigkeit, Klüftung und Porosität (vgl. HÖLTING 1996, S. 82 f). Nach einer groben Einteilung (HÖLTING 1996, S. 116) sind Grundwasserleiter und -speicher (\cong Aquifer) im allgemeinen Sandsteine und Konglomerate, während Basalte und Kalksteine in Abhängigkeit ihrer Klüftung nur bedingt geeignet sind. Ton- und Schluffsteinen sowie Granitmassiven werden schlechte bis keine Speicherkapazitäten zugeschrieben (\cong Aquiclude). Im folgenden sollen die wesentlichen Grundwasserleiter des Jemen kurz erläutert werden, die in ausführlicher Weise bei VAN DER GUN und AHMED (1995, S. 70 ff) und bei ALAWI und MEZHELOVSKY (1995, IV-11 ff) beschrieben sind und in *Abbildung 4* veranschaulicht werden.

- Die *alluvialen Quartären Aufschüttungen der Wadis und Täler* sind meist unsortierte, grobkörnige und kaum verfestigte Sedimentkörper und somit ein guter Grundwasserleiter. Das Grundwasser ist einfach und vielerorts erschließbar, weil es in Tiefen von wenigen Metern vorkommt, allerdings reicht das Speichervolumen vielfach nur für recht begrenzte Mengen an Grundwasser. Der wohl größte Aquifer dieser Art findet sich im Wadi Hadramaut. Dort lagern bis zu 100 Meter mächtige Lockersedimente auf Pliozänen Konglomeraten und Kretazischen Sandsteinen, zu denen eine hydraulische Verbindung besteht. Der Grundwasserspiegel liegt bei 20 bis 30 Metern unter der Oberfläche. Besonders günstig ist die regionale Lage des

Aquifers inmitten eines enorm großen Einzugsgebietes aus undurchlässigen Kalksteinserien.

- Die *Quartären Sedimente der Schwemmebenen und Deltabereiche* bieten ebenfalls günstige Voraussetzungen für die Grundwasserspeicherung. Meist sind sie mächtiger und flächenhafter verbreitet als die Talsedimente und auch ihre Lage an Wadi- und Flußmündungen begünstigt die Grundwasserneubildung. Allerdings ist durch diesen Umstand das Vorkommen an Grundwasser sehr inhomogen über den Aquifer verteilt und das piezometrische Niveau (\cong Grundwasserspiegel) kann erheblich variieren (vgl. VAN DER GUN ET AL. 1992, S. 304; SHINDOU und TAGUTSCHI 1981, S. 93 ff). In der Tihama ist der Quartäre Aquifer 50 bis 250 Meter mächtig. Er ist durch den regelmäßigen Grundwassernachschub aus dem regenreicheren westlichen Bergland der Aquifer mit der momentan größten Schüttung im Jemen. Im Osten liegt der Grundwasserspiegel zwischen 150 und 250 Metern, im Westen bei 10 bis 50 Metern. Gerade in küstennahen Bereichen besteht allerdings die enorme Gefahr der Grundwasserversalzung durch eindringendes Meerwasser. In den Schwemmebenen und Deltas der Wadis Bana und Tuban, die für die Trinkwasserversorgung von Aden von enormer Bedeutung sind, gestaltet sich die Situation ähnlich. Durch ihr jüngeres geologisches Alter sind die Sedimente hier weniger mächtig und die Grundwasservorkommen innerhalb des Aquifers sind noch inhomogener verteilt als in der Tihama. Ausnahme sind die küstennahen Deltabereiche mit einer Mächtigkeit von über 200 Metern.
- Die Voraussetzungen der Grundwasserspeicherung in den *Hochlandbecken* sind generell sehr günstig. Durch ihren Beckencharakter kann Wasser gesammelt werden und wird selten oberflächlich wieder abgegeben. Oft sind die Becken mit Quartären Lockersedimenten verfüllt, die gute Grundwasserspeicher sind. So steht Grundwasser in vielen Fällen schon wenige Zehner Meter unter der Oberfläche an. Gute Beispiele sind die Becken von Sadah, Amran, Sana'a, Dhamar und Rada. Trotzdem sind diese Becken meist von komplexer tektonischer und geologischer Natur, was die Eigenschaften der Grundwasserspeicherung enorm modifizieren kann (vgl. CHARALAMBOUS 1982, S. 267 ff) und ein Verständnis des Grundwassersystems erschwert.
- Die *Kretazischen Sandsteine der Tawilah-Formation* gelten durch ihre hohe Porosität als die ergiebigsten und größten Aquifere im Jemen. Im Osten des Landes wird die Tawilah-Formation in verschiedene Formationen aufgegliedert, wobei den Sandsteinen der *Mukalla-Formation* die besten Grundwassereigenschaften zugeschrieben werden. Meist handelt es sich bei Grundwasser der Tawilah- bzw. Mukalla-Formation um artesisches Wasser, da sie von mächtigen Gesteinsserien anderer Formationen überlagert werden. So kann der Grundwasserspiegel in ungünstigen Fällen bis 400 Meter unter der Oberfläche liegen. Im Wadi Hadramaut hingegen ist der Mukalla-Sandstein aufgeschlossen und wird dort auch als Grundwasserspender genutzt. Wie im Hadramaut steht der Mukalla-Sandstein vielfach im hydraulischen Kontakt mit überliegenden Quartären Aquiferen und wird in solchen Fällen auch als ein einziger Aquifer behandelt.
- Verschiedene andere Formationen sind je nach Vorkommen und Struktur als Aquifer von regionaler Bedeutung. Im zentralen Bergland sind die *Jurassischen Kalke der Amran-Formation* ein lokal wichtiger Aquifer. Das Grundwasser bewegt sich vorwiegend durch und entlang der Klüfte im Gestein. Verschiedentlich sorgt der Wechsel von mehr und weniger permeablen Kalken für den Austritt von Grundwasser an Schichtquellen. Die *Sandsteine der Jurassischen Kohlan-Gruppe und der Ordovizischen Wajid-Gruppe* haben gute Grundwassereigenschaften, liegen aber meist in zu großer Tiefe für eine Nutzung. Die weit verbreiteten *Basalte und Vulkanite der „Yemen-Volcanics“* haben je nach Klüftungsgrad sehr variable Eigenschaften und sind nur punktuell ergiebige Aquifere. In der Al Mahrah-Region scheinen die *Kalksteine der Tertiären Um-Er-Radhuma-Formation* artesisches Grundwasser zu führen. Sie sind allerdings meist von einer 100 bis 300 Meter mächtigen Sedimentdecke der Hadramaut-Gruppe bedeckt. VILLWOCK (1991, S. 83 f) erwähnt größere Karstwasservorkommen im Hadramaut, die sich möglicherweise auf diese Formation beziehen.

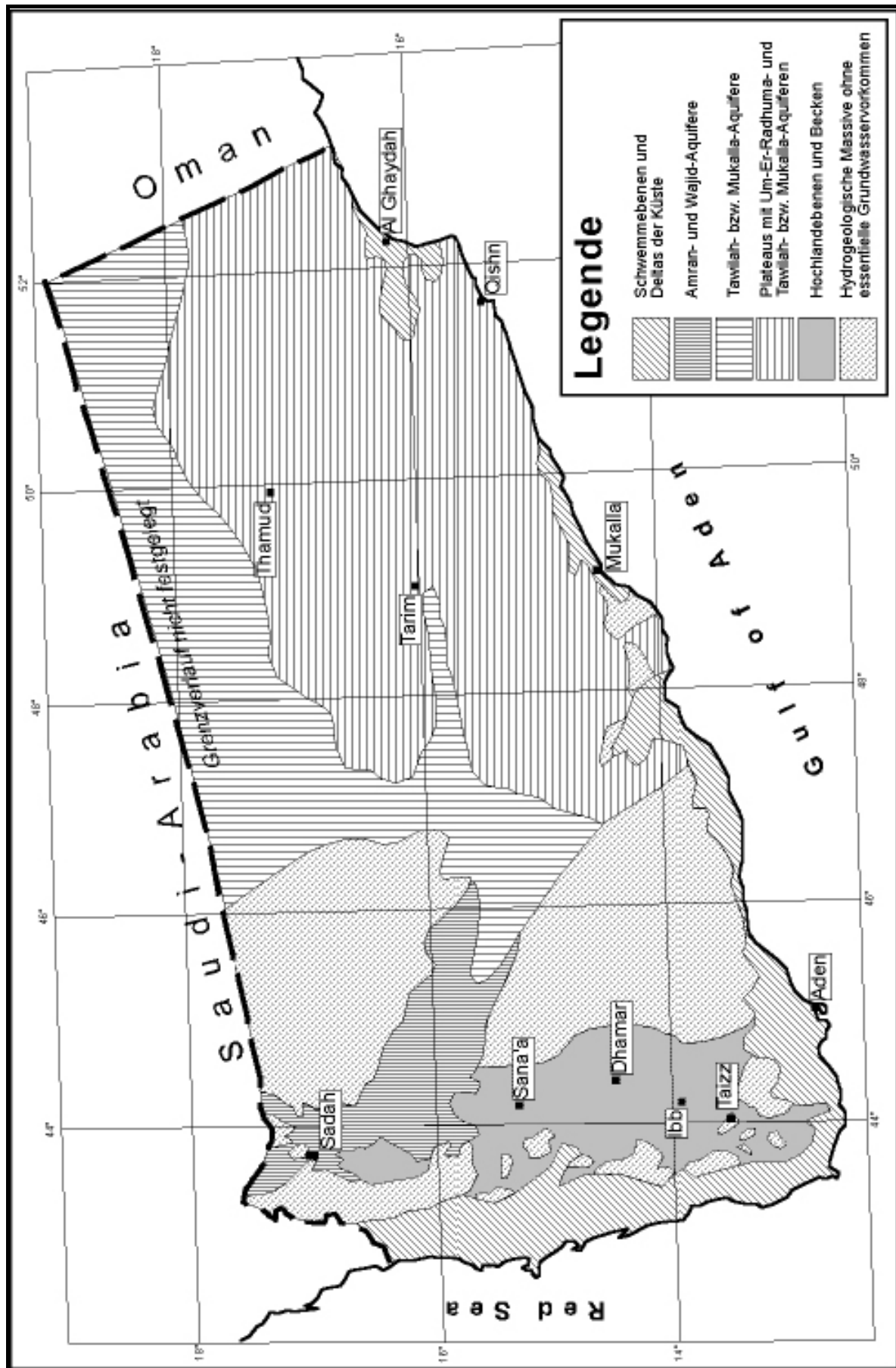


Abbildung 4: Schematische Hydrogeologie des Jemen (Entwurf: MAY nach ALAWI und MEZHELOVSKY 1995, S. IV-17)

4.2. Hydrochemie und Grundwasserqualität

Die Qualität und Zusammensetzung des Grundwassers im Jemen soll nur kurz vorgestellt werden. Die Literatur auf diesem Gebiet ist nicht sehr umfassend und Messungen haben sich oft auf die elektrische Leitfähigkeit beschränkt (vgl. VAN DER GUN und AHMED 1995, S. 91). Trotzdem ist die Wasserqualität für die Trink- und Brauchwasserversorgung und Bewässerungszwecke von Bedeutung.

4.2.1. Allgemeine Charakteristika

Im allgemeinen umfaßt eine einfache Grundwasseranalyse folgende Parameter: Temperatur, pH-Wert, Färbung, Härte, Elektrische Leitfähigkeit (\cong gelöster Feststoffinhalt) und die Menge verschiedener Kationen und Anionen (vgl. HÖLTING 1996, S. 250 ff). Ein Vergleich einiger Proben aus dem Jemen mit deutschen Standards (siehe *Tabelle 3*) führt zu folgenden Ergebnissen:

- Insgesamt gesehen hat das Grundwasser eine recht gute Qualität (vgl. VAN DER GUN und AHMED 1995, S. 91 f).
- In Küstennähe kommt es infolge des absinkenden Grundwasserspiegels zum Eindringen von Meerwasser und einer zunehmenden Versalzung (vgl. EL-NAKHAL 1987, S. 76 ff; JUNGFER 1987, S. 408).
- Die Bewässerungswirtschaft wirkt sich in vielen Regionen negativ auf die Grundwasserqualität aus (vgl. HYANKOVA und ZENISOVA 1988, S. 182 ff).
- Auch die Abwässer der großen Städte, die oft ungereinigt in den Boden gelangen, haben einen sehr negativen Effekt auf die Grundwasserqualität und äußern sich in erhöhten Nitratwerten (vgl. VAN DER GUN und AHMED 1995, S. 93).

	PH	Cl [mg/l]	Na [mg/l]	K [mg/l]	Elekt. Leitf.
Grenzwert	> 6,5 + < 8,5	250	150	12	2000
max. Markah	8,3	202	186	43	-
max. Khawrah	7,8	1072	451	43	-
max. Sana'a	8,2	122	69	6	999
max. Hudaydah	8,5	1654	798	4.8	8800

Tabelle 3: Vergleich von Grundwasserproben aus dem Jemen mit deutschen Standards
Quellen: HÖLTING 1996, S.308 f; HYANKOVA und ZENISOVA 1988, S. 182; EL-NAKHAL 1987, S. 75

4.2.2. Hydrothermale Wässer

Ein sehr interessanter Aspekt der regionalen Wasserqualität im Jemen sind die reichhaltigen Vorkommen an thermalen Wässern. Sie bieten mögliches touristisches und damit auch wirtschaftliches Potential, bedürfen aber einer noch genaueren und kompletteren Erfassung. Im folgenden soll ein kurzer Abriß der hydrothermalen Wässer im Jemen nach DOWGIALLO (1986) dieses Potential unterstreichen, wobei als Thermalwasser alle Wässer zählen, die mindestens 5°C wärmer aus dem Boden kommen als die umgebende mittlere jährliche Lufttemperatur.

Die Vorkommen von Thermalwasser sind recht weit verbreitet und nicht nur punktuell. Im westlichen Bergland sind sie zumeist an die zahlreichen Störungen gebunden, die im Zuge der Roten-Meer-Riftzone entstanden sind. Außerdem findet man in der Nähe von tertiären Granitintrusionen Thermalquellen. Hierbei spielt insbesondere der Granitkomplex um Manakha eine große Rolle. Die heißeste Quelle des Jemen in Hammam Ali im zentralen Bergland hat eine Wassertemperatur von 61°C.

Am östlichen Abfall des Berglandes scheint das Auftreten von Thermalquellen wesentlich an Quartäre vulkanische Aktivitäten geknüpft zu sein. Das wohl spektakulärste hydrothermale Beispiel findet sich in Hammam Damt. Hier haben sich während des Quartär auf Vulkanen eine Reihe von Sinterkegeln gebildet, die teilweise bis heute mit Wasser gefüllt sind. Die sehr CO₂-reichen Wässer in der gesamten Umgebung, die an vereinzelt Stellen mit einer Schüttung von bis zu 20 Litern pro Sekunden austreten, machen Jemen's größten und bekanntesten Thermalkurort aus.

4.3. Grundwasserneubildung

Neben Erkenntnissen über das Vorhandensein und die Menge von Grundwasser gehören zu einer nachhaltigen Erschließung der Grundwasservorräte auch Informationen über die Möglichkeiten der Grundwasserneubildung. So soll einer überschnellen Erschöpfung der Vorräte mit all ihren resultierenden Problemen für Mensch und Natur vorgebeugt werden. Über einen längeren Zeitraum wird die Rate der Grundwasserneubildung an der Schwankung des Grundwasserspiegels festgemacht. Grundwasserbilanzen quantifizieren die Rate der Grundwasserneubildung während eines bestimmten Zeitraumes und schlüsseln Input und Output, d.h. „Recharge“, „Storage“ und „Discharge“, für verschiedene Grundwasserregionen auf.

4.3.1. Recharge, Discharge und Storage

„Groundwater-recharge“ (\cong Grundwasserzufluß) und „Groundwater-discharge“ (\cong Grundwasserabfluß) werden von VAN DER GUN und AHMED (1995, S. 83 ff) unterteilt in natürlichen und induzierten Grundwasser- und -abfluß.

Zum natürlichen Zufluß zählen Infiltration von Regenwasser („direct recharge“) und Infiltration von Oberflächenwasser aus Wadis („indirect recharge“). Hierbei ist zu beachten, daß gerade der indirekte Grundwasserzufluß aus Wadis nicht so sehr von der Höhe des mittleren jährlichen Niederschlages als vielmehr von seiner Verteilung sowie der Intensität und Dauer der einzelnen Ereignisse abhängt (vgl. ALDERWISH und DOTTRIDGE 1998, S. 171 f). Induzierter Zufluß sind Infiltration und Percolation von Bewässerungswasser sowie die Einleitung von Abwasser. Für den Jemen werden von VAN DER GUN und AHMED (1995, S. 83) im wesentlichen zwei Prozesse hervorgehoben.

Erstens infiltriert eine große Menge des Oberflächenwassers aus den bergigen Einzugsgebieten in die Lockersedimente der Waditäler und in die Grundwassersysteme im flacheren Vorland. Dieser Prozeß kann für über die Hälfte des neugebildeten Grundwassers wirksam werden (vgl. VILLWOCK 1991, S. 84). VAN DER GUN ET AL. (1992, S. 310) schätzt die Höhe des Grundwasserzuflusses aus Wadifiltration im Grundwassersystem des Wadi Surdud auf $46 \text{ Mm}^3/\text{a}$. Das ist nach seinen Angaben ein Anteil von 46 %. ALDERWISH und DOTTRIDGE (1998, S. 171 f) geben für 12 Wadis im Becken von Sana'a einen Durchschnittswert von $39 \text{ Mm}^3/\text{a}$ für den indirekten natürlichen Grundwasserzufluß an, was etwa 4,5 % des mittleren jährlichen Gebietsniederschlages sind. Für die von ABDULBAKI (1984) untersuchten Einzugsgebiete des Wadi Tuban sowie des Delta Abian stellt *Tabelle 4* verschiedenste Größen der Grundwasserneubildung zusammen. Als zweiter wichtiger Prozeß des Grundwasserzuflusses versickert ein Teil des Bewässerungswassers in den agrarischen Regionen wieder im Boden und übertrifft bisweilen sogar die Menge des natürlichen Grundwasserzuflusses. Interessant ist dabei, daß eine Bewässerung mit Grundwasser den Grundwasserzufluß noch zu erhöhen und zu intensivieren scheint, während Oberflächenwasser nur für zunehmende Versalzung sorgt. Insgesamt lassen sich an den Werten in *Tabelle 4* folgende wesentliche Merkmale für die Grundwasserneubildung im Jemen ableiten:

- Auf das Jahr betrachtet, geht in den Einzugsgebieten der größte Teil der Niederschläge durch Evaporation und Evapotranspiration verloren ($> 90\%$).
- Die restliche Menge des Niederschlages geht in den Oberflächenabfluß, was Abflußkoeffizienten für Halbwüsten und Wüsten aus der hydrologischen Fachliteratur (MATTHES und UBELL 1983, S. 396 f) bestätigen ($< 10\%$).
- Dies geschieht bei Starkregenereignissen, wenn der Niederschlag kurzzeitig die potentielle Evaporation übersteigt (z.B. liegt für das Wadi Tuban die potentielle Evaporation bei $\sim 2500 \text{ mm/a} = 6,8 \text{ mm/d}$. ABDULBAKI (1984) gibt für Starkregenereignisse aus dem März 1982 bis über 200 mm/d an, die ersichtlich beinahe ausschließlich in den Oberflächenabfluß gehen: $200 \text{ mm/d} \gg 6,8 \text{ mm/d}$).
- In den Untersuchungsgebieten gehen etwa 3 – 4 % der jährlichen Niederschläge in die Grundwasserneubildung ein. Hierbei scheint der größte Anteil des neugebildeten Grundwassers vom infiltrierenden Oberflächenwasser durch Hochwässer gespeist zu sein (40 – 80 %). Dies deckt sich

- a) mit allgemeinen Aussagen über die Grundwasserneubildung in semi-ariden und ariden Gebieten: *Hohe Wasserstände und ähnliche Vorgänge sind in ariden-semiariden Gebieten für die Grundwasser-neubildung außerordentlich wichtig, wo Täler und Flußrinnen i.d.R. über der gesättigten Zone verlaufen und deswegen bei episodischer Wasserführung Wasser an den tieferen Untergrund abgeben* (BAUMGARTNER und LIEBSCHER 1990, S. 426)
- b) mit den geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten in den Untersuchungsgebieten, für die ABDULBAKI (1984) ein maximales hydraulisches Gefälle von 12 bis 20 ‰ angibt und in denen mächtige Serien Quartärer Lockergesteine die Infiltration begünstigen.

	Wadi Tuban	Delta Abian = Wadi Bana + Hassan
P [mm/a] / [Mm³/a]	465 / 2604	Ø 310 / 3044
Area [km²]	5600	9200
A_o [Mm³/a]	119	211
A_o [% P]	4,6	6,9
E_{act} = P – A	2485	2833
E_{act} [% P]	95	93
E_{act} [mm/a]	444	Ø 330
GW_{i.r.} [Mm³/a]	89,4	Ø 95
GW_{i.r.} [% P]	3,4	3,1
GW_{i.r.} [% A_o]	74	45

Tabelle 4: Größen der Grundwasserneubildung für zwei Einzugsgebiete (Zusammenstellung: MAY nach ABDULBAKI (1984) und VAN DER GUN und AHMED (1995, S. 56 f))

Die direkte Infiltration von Regenwasser ist im Jemen von nur untergeordneter Bedeutung. Die Werte für Infiltrationsraten schwanken in der Literatur je nach Region zwischen 3 und 6 % (vgl. SHINDOU und TAGUTSCHI 1981, S. 85) und 4 und 14 % des Jahresniederschlages (vgl. QUADFLIEG und LANGGUTH 1988, S. 289). In klimatisch vergleichbaren Gegenden Afrika's werden nach MATTHESS und UBELL (1983, S. 396) mit 10 % sehr ähnliche Werte gemessen.

Nach VAN DER GUN und AHMED (1995, S. 35) zählen zum natürlichen Grundwasserabfluß eine Abgabe über Quellen und „Baseflow“ sowie Verdunstung und unterirdischer Ausfluß ins Meer, wohingegen ein induzierter Abfluß nur durch anthropogene Entnahme geschehen kann. Im Jemen gibt es verschiedene Quellgebiete mit einer meist recht kleinen Schüttung von wenigen Litern pro Sekunde. NEUMANN-REDLIN (1992, S. 6) berichtet von Quellen an der Grenze zwischen der Tawilah und Amran-Formation. Auch innerhalb der Amran-Formation, im Einzugsgebiet des Wadi Hajar (vgl. VAN DER GUN und AHMED 1995, S. 84), an der östlichen Schichtgrenze der „Yemen Volcanics“, in stark gestörten Regionen des westlichen Berglandes (vgl. DOWGIALLO 1986, S. 68 ff; vgl. NEUMANN-REDLIN 1992, S. 6) und im Hadramaut (VILLWOCK 1991, S. 83 f) gibt es eine Vielzahl von kleineren Quellen. Bis zur Hälfte des natürlichen Grundwasserabflusses im Jemen verlassen das System auf unterirdischem Wege ins Meer, vor allem in der Tihama und im Delta Abiyan und Tuban (vgl. VAN DER GUN und AHMED 1995, S. 85). Ein weiterer wichtiger Prozeß ist die Verdunstung in etlichen Teilen des Jemen, die erkennbar ist in großen Sebkhien und Salzkrusten. Der schließlich wichtigste Faktor des Grundwasserabflusses ist ein anthropogener. Seit Einführung der Dieselpumpe ist die Grundwasserentnahme durch den Menschen explosionsartig gestiegen und stellt im Jemen vielerorts das dringlichste Grundwasserproblem dar (vgl. VAN DER GUN ET AL. 1992, S. 305; VAN DER GUN und AHMED 1996, S. 85; JUNGFER 1987, S. 408; KOHLER 1999, S. 4).

Die vorhandenen Mengen an Grundwasser, die in den regionalen Aquiferen gespeichert sind, werden als „storage“ bezeichnet. Insbesondere Größe und Alter des gespeicherten Wassers erlauben Rückschlüsse auf seine Genese und somit Prognosen für die Zukunft.

SHINDOU und TAGUTSCHI (1981, S. 96) geben das Alter des Grundwassers im Bergland und der Tihama anhand seiner Tritium-Konzentration an (Tritium = ^3H). Dabei haben sehr junge Wadi- und Regenwasser Tritiumwerte von bis zu 20 TU (= Tritium-Unit), Quellwasser zwischen zehn und 18 TU und für Grundwasser der Küstenebene sinkt der Wert sukzessive bis unter ein TU. Mit dieser Methode lassen sich also Bewegung und relatives Alter des Wassers feststellen. In der Tihama schwanken die von JUNGFER (1987, S. 417) anhand verschiedener Isotopenuntersuchungen ermittelten Alter zwischen 0 und 4400 Jahren, was mit der oben erwähnten inhomogenen Struktur des Aquifers konform ist. Für das Hochbecken von Sana'a gibt JUNGFER (1987, S. 408 ff) das Alter des Grundwassers mit 20.000 Jahren an, was auf eine sehr langsame Neubildung hindeutet, die allerdings verschiedene Ursachen hat.

4.3.2. Grundwasserbilanzen

Für die Erstellung einer regionalen Grundwasserbilanz müssen die oben genannten Größen des Grundwasserzuflusses und -abflusses quantifiziert werden. Hinzu genommen werden die noch vorhandenen Mengen an Grundwasser, die in den regionalen Aquiferen gespeichert sind (\cong „storage“). So läßt sich das dynamische Grundwassersystem erfassen. Die langjährige Entwicklung eines solchen Systems läßt sich an der Bewegung der Grundwasserspiegel in regionalen Brunnen ablesen (siehe *Abbildung 5*).

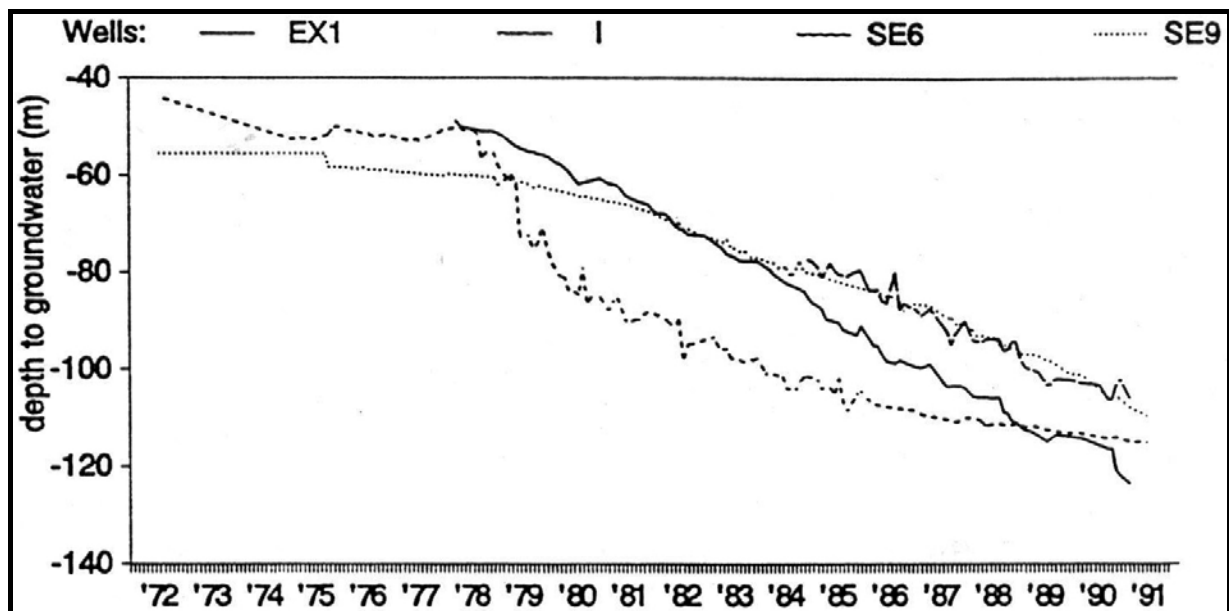


Abbildung 5: Sinkender Grundwasserspiegel in vier Brunnen bei Sana'a (Quelle: VAN DER GUN und AHMED 1995, S. 89)

Für die letzten 20 Jahre zeigt sich ein deutlicher Trend. Beinahe überall im Land sinken die Grundwasserspiegel drastisch ab (vgl. JUNGFER 1987, S. 408; VAN DER GUN und AHMED 1995, S. 88 ff; ALDERWISH und DOTTRIDGE 1998, S. 174 ff; VAN DER GUN ET AL. 1992, S. 305). Vor allem im Hochbecken von Sana'a, wo JUNGFER (1987, S. 408) eine Absinkrate von bis zu zehn Metern im Jahr annimmt, scheint die Lage dramatisch (siehe *Abbildung 5* und *Abbildung 6*).

Trotz negativer Bilanz kann ein Grundwassersystem noch über eine recht lange Zeit funktionieren, wenn die Menge des noch gespeicherten Wassers, d.h. das „storage“, groß genug ist. Es wirkt somit wie ein Puffer. Gleichzeitig treten allerdings verstärkt Probleme auf, die sich in Form von erhöhten Wasserkosten, einer schlechter werdenden Wasserqualität oder einer Versalzung bemerkbar machen (vgl. VAN DER GUN und AHMED 1995, S. 88). Aufgrund der schlechten Datenlage und der wenig einheitlichen Schätzungsmethoden kann die folgende *Tabelle 5* nur einen provisorischen Überblick geben und auf die wesentlichen Problemfelder hindeuten. Trotzdem wird klar, daß auf nationaler Ebene die Entnahme von Grundwasser die Neubildung teilweise um ein Vielfaches übertrifft.

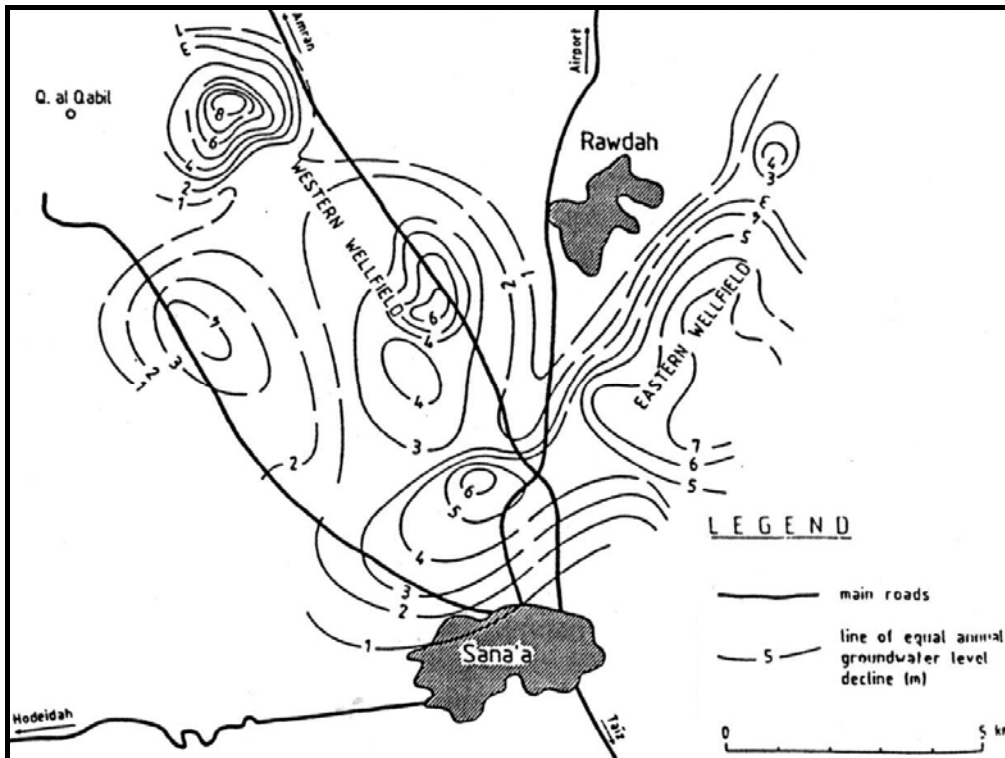


Abbildung 6: Durchschnittliche Absinkrate des Grundwasserspiegels im Becken von Sana'a im Zeitraum 1980-1985 (Quelle: VAN DER GUN und AHMED 1995, S. 78)

Aquifer	Entnahme [Mm ³ /a]	Neubildung [Mm ³ /a]	„Storage“ [Mm ³ /a]
Tihama	810	550	250.000
Südliche Küstenebenen	225	375	70.000
Tawilah-Mukalla Aquifer	575	500	10.000.000
Zentrales Hochland	500	100	50.000

Tabelle 5: Aktuelle Schätzung der Entnahme- und Neubildungsraten sowie Speichervolumen von Grundwasser für die großen Aquifere im Jemen (Quelle: VAN DER GUN und AHMED 1995, S. 88)

5. Ausblick

Für die Zukunft des Jemen scheint sich der oben geschilderte Trend der Wasserverknappung in weiter sinkenden Grundwasserspiegeln fortzusetzen, was vielseitige Probleme für die wirtschaftliche Entwicklung des Jemen mit sich bringen kann. So jedenfalls prognostizieren verschiedene Autoren die Entwicklung für den Fall, daß der Wasserverbrauch und die Wasserentnahme nicht entscheidend reduziert werden (vgl. KOHLER 1999, S. 5). Auch numerische Modelle deuten auf ein weiteres starkes Absinken der Grundwasserspiegel im Jemen hin (vgl. VAN DER GUN ET AL. 1992, S. 313).

Aufgrund dieser Entwicklung weisen VAN DER GUN und AHMED (1995, S. 105) der Regierung eine wichtige Rolle für das Management der Grundwasserressourcen zu. KOHLER (1999, S. 9 f) gibt allerdings zu bedenken, daß sich gerade im Jemen aufgrund der traditionellen dezentralen Stammesstruktur neue Gesetze wie etwa zur Verringerung des Qatanbaus, zur Einführung von Wasserpreisen oder zur Abgrenzung von Schutzgebieten, wie es JUNGFER (1987, S. 420) vorschlägt, kaum durchsetzen lassen. Stammesführer und regionalpolitisch wichtige Personen sollten unbedingt in die

staatlichen Entscheidungen eingebunden werden. Gleichzeitig räumt KOHLER (1999, S. 10) ein, daß sich, ausgelöst durch Notlagen und extreme Wasserknappheit, in verschiedenen Regionen des Jemen schon Lösungsansätze in der Form von Wassertransports und Selbsthilfegruppen zeigen. Diese Tatsache gibt somit trotz der denkbar schlechten Voraussetzungen Hoffnung für die künftige Entwicklung der Wasserressourcen im Jemen.

Literatur

- ABDULBAKI, K. (1984): Das Wasserdargebot in der VDR Jemen und Probleme der Nutzung. - Diss. Univ. Halle, Sektion Geographie und Würzburger Geographische Manuskripte. - Im Druck.
- ABDULBAKI, K. (1986): Physisch-geographischer Überblick über die VDR Jemen. - In: HARKE, H. (Hrsg.): Die Volksdemokratische Republik Jemen – Geschichte, Natur, Wirtschaft. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Wissenschaftliche Beiträge 1986/19: S. 33-55.
- ALAWI, A.J. und MEZHELOVSKY, N.V. (1995, Hrsg.): Republic of Yemen. Groundwater Resources available for Development. Sana'a, Moscow.
- ALDERWISH, A. M. und DOTTRIDGE, J. (1998): Recharge components in a semi-arid area; the Sana'a Basin, Yemen. - In: Geological Society Special Publication 130, S. 169-177.
- BAKER, V. R. (1986): Fluvial Landforms. In: SHORT, N. M. Sr. und BLAIR, R. W. Jr. (Hrsg.): Geomorphology from space. NASA.
- BAUMGARTNER, A. und H.-J. LIEBSCHER (1990): Lehrbuch der Hydrologie. Allgemeine Hydrologie. Berlin, Stuttgart.
- CHARALAMBOUS, A. N. (1982): Problems of groundwater development in the Sana'a basin, Yemen Arab Republic. – In: IAHS-AISH Publication 136, S. 265-274.
- CLARK, P. B. und DAVIES, S., M. A. (1988): The application of regime theory to wadi channels in desert conditions. In: WHITE, W. R. (Hrsg.): International Conference on River Regime: S. 67-82.
- DOWGIALLO, J. (1986): Thermal waters of the Yemen Arab Republic. - In: Geothermics 15 (1): p.63-76.
- EL-NAKHAL, H. A. (1987): Comparison between the groundwater quality in an intramountainous and a coastal plain in Yemen Arab Republic. - In: IAHS-AISH Publication 169, S. 73-80.
- GROLIER, M. J., TIBBITTS, G. C. und IBRAHIM, M. M. (1984): A qualitative appraisal of the hydrology of the Yemen Arab Republic from Landsat images. - In: Geological Survey Water-Supply 1757-P.
- HÖLTING, B. (1996): Hydrogeologie. Stuttgart.
- HYANKOVA, K. und ZENISOVA, Z. (1988): Quality of ground waters in the People's Democratic Republic of Yemen on the example of Wadi Markhah and Wadi Khawrah. - In: Acta Geologica et Geographica Universitatis Comenianae 44, S. 177-185.
- JUNGFER, E. (1986): Das Wasserproblem im Becken von Sana'a. Anthropogene und physische Ursachen einer zunehmenden Austrocknung. - In: Jemen-Studien 1, S. 171-193.
- JUNGFER, E. (1987): Grundwasserergänzung und Grundwassernutzung in den Wüsten des Jemen. - In: Geographische Rundschau 39 (7-8), S. 408-420.
- KOHLER, S. (1999): Hintergründe zur Wasserkrise im Jemen. - In: Jemen-Report 30 (2), S. 4-10.
- MATTHESS, G. und UBELL, K. (1983): Allgemeine Hydrogeologie. Grundwasserhaushalt. Berlin, Stuttgart.
- NEUMANN-REDLIN, C. (1992): Hydrogeologische Untersuchungen in der Provinz Al Mahwit/Jemen – ein Beitrag zur ländlichen Regionalentwicklung. - In: Zeitschrift für angewandte Geologie 38 (1), S. 4-10.
- NOVAKY, B., AHMED, A. Y. A. und AHMED, A. S. (1998): Annual mean runoff and its areal distribution in the Republic of Yemen. - In: Vizügyi-Közlemenyek 80 (2), S. 335-351.

- QUADFLIEG, A. und LANGGUTH, H.-R. (1988): Erste Ergebnisse hydrogeologischer Untersuchungen in der Umgebung von Ibb (Arabische Republik Jemen). - In: Geologisches Jahrbuch Hessen 116, S. 273-292.
- REMMELE, G. (1989): Die Niederschlagsverhältnisse im Südwesten der Arabischen Halbinsel. - In: Erdkunde 43, S. 27-36.
- SHINDOU, S. und TAGUTSCHI, J. (1981): Water resources of the Yemen Arab Republic – Hydrogeology. - In: Science Reports of the Institute of Geoscience, University of Tsukuba, Section B, 2, S. 77-100.
- VAN DER GUN, J. A. M., ELDERHORST, W. I. M. und KRUSEMAN, G. P. (1992): Predicting long-term groundwater impacts of groundwater abstraction from an intensively exploited coastal aquifer. - In: Hydrogeology 3, S. 303-318.
- VAN DER GUN, J. A. M. und AHMED, A. A. (1995): The Water Resources of Yemen. Sana'a.
- VILLWOCK, G. (1991): Beiträge zur physischen Geographie und Landschaftsgliederung des südlichen Jemen (ehemals VDRJ). Jemen-Studien 10. Wiesbaden.