Julien Nikiema

Charakterisierung der hydrologischhydrogeologischen Potentiale im Gebiet von Tikaré, Provinz Bam, Burkina Faso (Westafrika)





Charakterisierung der hydrologischhydrogeologischen Potentiale im Gebiet von Tikaré, Provinz Bam, Burkina Faso (Westafrika)

- ein Modellbeispiel für Wasserressourcenentwicklung und Management in der südlichen Sahel-Zone -

Von der Fakultät für Physik und Geowissenschaften der Universität Leipzig

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor rerum naturalium

(Dr. rer. nat.)

vorgelegt

von Diplom Geologe, Julien Nikiema

geboren am 20 März 1974 in Bobo Dioulasso, Burkina Faso

Gutachter:Prof. Dr. Walter Gläßer, Universität Leipzig (Deutschland), Institut für
Geophysik und Geologie
Prof. Dr. Mario Schirmer, Universität Neuchâtel / Eawag Dübendorf
(Schweiz)
Dr. Stefan Geyer, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Department
Hydrogeologie, AS Halle (Saale)

Tag der Verleihung: 20. April, 2009

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <u>http://dnb.ddb.de</u> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2009 Zugl.: Leipzig, Univ., Diss., 2009

978-3-86955-002-2

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2009 Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen Telefon: 0551-54724-0 Telefax: 0551-54724-21 www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen. 1. Auflage, 2009 Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-002-2

Gewidmet: in Erinnerung an meinen Vater Jean Baptiste und in Dankbarkeit: Simone, Elior und Franz meiner Mutter Pauline meiner Familie

Dédicace

en mémoire de mon père Jean Baptiste à simone, élior et franz à mère pauline à ma famille

Zusammenfassung

Die Ressource Wasser ist essentiell für das Leben. Aus diesem Grund war die Menschheit stets bemüht natürliche Wässer zu gewinnen und zu nutzen (ASADI et al. 2007). Der Umgang mit der Ressource zeigt aber auch, dass dieses wichtigste Lebensmittel durch die anthropogene Verschmutzung bedroht ist (EFE 2002). Der sichere Umgang mit der Ressource Wasser in ariden Ländern erfordert jedoch eine Verbesserung der Kenntnisse der Oberflächen- und Grundwasserpotentiale, in Hinsicht Wassergenese, Qualität und Quantität. Um dazu beizutragen, hat sich die vorliegende Untersuchung mit der Untersuchung mit der hydrologischen und hydrogeologischen Charakterisierung im Gebiet von Tikaré im Norden Burkina Fasos beschäftigt. Dabei wurden Lineationen und Lineationsdichtegebiete mittels Fernerkundung (Nutzung ASTER-Daten im VNIR-Bereich mit ERDAS Imagine und ArcGIS) ausgewertet. Dazu wurden eine qualitative Untersuchung des Stausees von Tikaré und der Bohrungen und Brunnen durch 3 Feldkampagnen, 2 Probennahmen zur hydrochemischen Charakterisierung und für die Isotopensignaturen von Wasserstoff und Sauerstoff durchgeführt. Dabei wurden 22 Brunnen, 2 Bohrungen und 7 Proben aus Oberflächenwässern (Flüsse und Seen) beprobt. Die Haupt-Ionen wurden mit der Ionen-Chromatographie (IC), Spurenelemente durch ICP-MS (Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma) und ASS (Atomabsorptionsspektroskopie) analysiert. Die Bestimmung der stabilen Isotope Sauerstoff (δ^{18} O) und Wasserstoff (δ^{2} H) wurde mittels der Equilibrierung analysiert.

Das regionale Kluft- und Störungsnetz weist bevorzugte Orientierungen von 30-70°, und von 140-160° auf. Die Ausdehnungen der verschiedenen Lineationen reichen von 800 bis 12000 m. An Hand der Analyse des regionalen Kluft- und Störungsnetzes konnten vier Zonen ausgehalten werden, die gleichzeitig Grundwasserpotentialgebiete darstellen. Die Zonen liegen im Nordosten, Südosten, Südwesten und Zentrum des Arbeitsgebietes. Sie weise jeweilig die folgenden Bohrungserfolgsquoten auf: 60%, 100%, 82% und 63%. In den vier ausgehaltenen Zonen erfolgte bis zu Beginn dieser Untersuchungen keine Bohrung. Die Nutzung dieser Gebiete könnten die Erfolgsquoten der Bohrungen im Arbeitsgebiet positiv beeinflussen.

Der Stausee von Tikaré weist in seinem Bett eine Reihe von Mängeln, wie z.B. Klüfte, Störungen, Steinbrüche und Erosionsbereiche auf. Folgen sind ein erhöhter Wasserverlust durch Infiltration in den Lateritgrundwasserleiter und das oberflächige Ausstreichen des Lateritgrundwasserleiters. Die Staumauer zeigt Erscheinungen einer Rieselnerosion von Regenwässern. Der schnelle Verlust des in der Regenzeit gespeicherten Wassers wurde bestätigt durch a) die progressive Anreicherung der schweren Wasserstoffisotope (δ^2 H V-SMOW) im Abstrom des Grundwassers, b) den versumpften Abstrombereich des Dammes und den gleichen Wasserstand in Brunnen (abstrom) und im Staubecken und c) den täglich gemessenen (6 cm) hohen Wasserverlust (im Vergleich der 2 cm/Tag der bilanzierten Verdunstungswerten). Um eine Sanierung der Stausee zu ermöglichen und zugleich Wasser für die sozio-ökonomische Entwicklung der Bevölkerung zu steigern, sind eine Abdichtung des Staubettes und der Bau einer wasserdichten Staumauer zu empfehlen.

Die Grundwässer in den Brunnen sind mit Werten für die elektrische Leitfähigkeit zwischen 90 und 131 μ S/cm gering mineralisiert. Die untersuchten Hauptkat- und anionen sind Mg²⁺, Ca²⁺, Na⁺, K⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ Cl⁻ und HCO₃⁻. Die Ca²⁺-Ionen und HCO₃⁻-Ionen weisen die höchsten Konzentrationen sowohl in der Trockenzeit als auch in der Regenzeit auf. Die durchschnittlichen Konzentrationen schwanken zwischen 9 und 14 mg/l für Ca²⁺und 4 mg/l bis 247 mg/l für HCO₃⁻. Die angetroffenen Elementkonzentration lassen sich größenteils durch die Wasser-Gesteinswechselwirkung im Grundwasserleiter erklären. Ausnahmen bilden NO₃⁻, K⁺ und Cl⁻, die zum Teil auf anthropogenen Quellen, wie aus Dunggräben, Latrinen und Auswaschen von landwirtschaftlichen Flächen zurückzuführen sind. Die besten Ionenkorrelationen bilden SO₄²⁻ und Mg²⁺ mit r = 0,90, Mg²⁺ und Ca²⁺ mit r = 0,95, Cl⁻ und Na⁺ mit r = 0,95. Für die Ionen Mg²⁺, Ca²⁺ und SO₄²⁻ konnte ebenfalls eine Korrelation mit der elektrischen Leitfähigkeit beobachtet werden. Die Schwankungen der verschiedenen Elementkonzentrationen sind auf Verdünnungs-

und Verdunstungsprozesse sowie auf Ionenadsorption- und Ionenaustauschprozesse zurückzuführen.

In Anlehnung an der Trinkwasserqualität der Weltgesundheitsorganisation (WHO) wurden in zwei Brunnen den Grenzwert an Nitrat überschritten.

Bezüglich der Spurenelemente wurden 15 Elemente analysiert. Mn, Fe und Si sind dabei die dominierenden mit mittleren Konzentrationen von 0,8 mg/l, 2 mg/l bis 7,5 mg/l. Das Spurenelement Arsen (As), welches ein toxisches Element für die Menschen darstellt, zeigt allgemein Konzentrationen von $< 4 \mu g/l$ in den untersuchten Proben auf. Die besten Korrelationen ergeben sich für Ni und Cr mit r = 0,93 und für Ba und Rb mit r = 0,81. Zwischen den Spurenelementen und den Haupt-Ionen sind die besten Korrelationen zwischen SO₄²⁻ und Sr (r = 0,81), K⁺ und Rb (r = 0,81), Mg²⁺ und Sr (r = 0,97) und Ca²⁺ und Sr (r = 0,90). Aus Sicht der Wasserqualität für den menschlichen Verzehr sind die WHO-Standards nur für Fe in einigen Brunnen überschritten.

Die Grundwässer aus dem Arbeitsgebiet weisen Isotopenverhältnisse (V-SMOW) zwischen -3,34‰ und -4,47‰ in der Regenzeit und -3,31‰ und -4,58‰ in der Trockenzeit für δ^{18} O auf. Die Verhältnisse für δ^2 H variieren zwischen -18,6‰ und -29‰ in der Regenzeit und zwischen -19,6‰ und -38,8‰ in der Trockenzeit. Die Daten deuten auf einen größeren Einfluss der Verdunstung und der Neubildung über δ^2 H gegenüber δ^{18} O. In den Oberflächenwässern treten δ^{18} O-Verhältnisse zwischen -2,3‰ und -7,5‰ in der Regenzeit und von +2‰ bis +14‰ in der Trockenzeit auf. Die δ^2 H Verhältnisse schwanken zwischen -24‰ und -57‰ in der Regenzeit und +6‰ und +64 ‰ in der Trockenzeit. Die Ergebnisse der Verhältnisse in den Oberflächenwässern lassen sich durch die Verdunstung in der Trockenzeit und durch die Neubildung in der Regenzeit erklären.

Die Brunnen im Arbeitsgebiet erschließen den Lateritgrundwasserleiter in den Tiefen zwischen 8 und 23 m. Die mittlere Wassersäule innerhalb der Brunnen liegt bei 3m in der Trockenzeit und 10 m in der Regenzeit. Das deutet auf eine direkte und schnelle Infiltration des Regenwassers in den Grundwasserleiter hin. Zur Vermeidung von anthropogenen Verunreinigungen und Erosionen sollten Schutzgebiete um die Brunnen und eine Zementierung der Brunneninnenwände ausgewiesen werden. Im Vergleich zu denen im Lateritgrundwasserleiter ausgebauten Brunnen, sind die Bohrungen in dem Verwitterungs- bzw. Kluftgrundwasserleiter mit 74 m Teufe deutlich tiefer. Innerhalb des ca. 39 m mächtigen Verwitterungs- bzw. Kluftgrundwasserleiter liegt der statische Wasserstand bei 20 m und die Förderleistung beträgt an diesen Bohrungen 2,5 m³/h, was auf die schlechten Standortbedingungen zurückzuführen ist. Daraus zeigt sich, dass im Vorfeld eines Brunnenbaus Untersuchungen für Grundwasserpotentialgebiete notwendig sind.

Als Schlussfolgerungen kann man behaupten, dass das Arbeitsgebiet über ein großes Potential für die *Grundwasser- und* Oberflächenwässernutzung verfügt. Diese Arbeit zeigt, dass für den Ausbau Potentiale wissenschaftliche und technische Untersuchungen (geologisch, hydrogeologisch und geotechnisch) benötigt werden. Diese sollten verhindern, dass Stauseen, die kein Wasser behalten können und somit nicht ihre sozio-ökonomische Entwicklungsrolle der Bevölkerung erfüllen, gebaut werden. Selbst wenn die Lage der Grundwasserqualität für die Trinkwasserversorgung akzeptabel ist, müssen Schutzzonen (besonders um die Brunnen herum) definiert werden, um punktuelle Verschmutzung zu verhindern.

Inhaltverzeichnis

1. Ei	nleitung	1
2. Gr	rundlagen	2
2.1	Kriterien der Standortwahl	2
2.2	Regionale Einordnung des Untersuchungsgebietes	3
2.2.1	Geographische Lage und Bevölkerung	3
2.2.2	Hydrographische Übersicht von Burkina Faso	5
2.2.3	Klima und Wetter	5
2.2.3.	1 Windverhältnisse	5
2.2.3.	2 Zeitliche und räumliche Verteilung des Niederschlags	6
2.2.3	3 Temperaturen	8
2.2.3	4 Verdunstung	9
2.3	Relief und Geomorphologie	10
2.3.1	Die Peneplaine	
2.3.2	Das Sandsteinplateau	
2.4	Geologische und hydrogeologische Übersicht	12
2.4.1	Geologische Rahmenbedingungen	12
2.4.1.	1 Allgemeines	12
2.4.1.	2 Geologischen Formationen im Arbeitsgebiet	13
a)	Sedimentär-Vulkanische Abfolge	13
c)	Ouarz-Granodiorite. Tonalite und Diorite	13
d)	Amphibolite (amphobolitfaziell überprägte Basalte)	14
e)	Andere geologische Formationen	14
2.4.2	Hydrologisch-hydrogeologische Übersicht	16
2.4.2.	1 Oberflächengewässer	16
a)	Die Hauptflusse und ihre Einzugsgebiete	16
	a-1) Der Mounoun a-2) Der Nakambé und der Nazinon	16
	a-3) Das Einzugsgebiet des Comoés	17
	a-4) Das Einzugsgebiet des Nigers	17
b)	Natürlichen Seen	17
c) d)	Stauseen Gewässer des Arbeitsgehietes	17
2.4.2		1)
2.4. 2.	Allgemeines	21
a) b)	Identifizierung der Grundwasserleiter	21
-)	b-1) Die oberflächennahen Grundwasserleiter	21
	b-2) Die tiefen Grundwasserleiter	22
2.5	Fragestellung, Zielsetzung und allgemeine Methodik	23
3. M	ethoden und Ergebnisse	25
3.1	Charakterisierung der Grundwasserpotentialgebiete	25
3.1.1	Lineationstanalyse	25

3.1.1.1	Definition und Auswahl der Daten	25
3.1.1.2 Digitale Bildverarbeitung		
3.1.1.3	Zeichnung der Lineationen und ihrer Dichtegebiete	27
3.1.1.4	Analyse der Lineationslänge	29
3.1.1.5	Analyse der Orientierungen der Lineationen	31
a)	Bestimmung der Lineationsorientierungen	31
b)	Statistische Analyse der Orientierungsklassen der Lineationen	31
3.1.1.6	Orientierungen der Lineationen der Längenklassen	32
a) b)	Längenklassen von weniger als 1000 m bis 3000 m	<u> </u>
c)	Längenklassen zwischen 6000 bis über 9000 m	34
3.1.1.7	Charakterisierung der Lineationslängen in den Orientierungsklassen	37
a)	Die Klassen 0°-10° und 10°-20°	37
b)	Die Klassen 20°-30° und 30°-40°	38
c)	Die Klasse 40°-50°	-38
d) e)	Die Klassen 70°-80° und 80°-90°	38 38
f)	Die Klasse 90°-100°	30 39
g)	Die Klassen 100°-110° und 110-120°	<u> </u>
h)	Die Klassen 120°-130° und 130°-140°	39
i)	Die Klasse 140°-150° und 150°-160°	39
J)	Die Klassen 160°-170° und 170°-180°	40
3.1.2	Verteilung der Lineationsdichte und Grundwasserpotentialgebiete	43
3.1.2.1	Allgemeines	43
3.1.2.2	Charakterisierung der Lineationdichtegebiete	43
a)	Die Nord-Ost-Zone	44
b)	Die Zentrale Zone	44
c)	Die Süd-Ost-Zone	45
d)	Die Süd-West-Zone	45
3.2 T	echnische Parameter der Brunnen und Bohrungen	49
3.2.1 Brunnen	Beschreibung der technischen Parameter und Morphologie der traditionellen 49	
3.2.1.1	Technische Parameter der Brunnen	49
3.2.1.2	Lithologie und Morphologie der Brunnen	51
3.2.2	Charakterisierung der wichtigsten technischen Parameter der Bohrbrunnen	54
3.2.2.1	Die Bohrtiefe	54
3.2.2.2	Die Mächtigkeit der Verwitterungsschicht	55
3.2.2.3	Das statische Niveau	55
3.2.2.4	Die Förderleistung	56
3.3 S	tauseen und ihre Funktion zur Stabilisierung der Wasserversorgung	58
3.3.1	<i>Qualitative Untersuchung des Stausees von Tikaré</i>	58
3.3.1.1	Grundlagen	- 58
3.3.1.2	Problematik, Arbeitshypothesen, Ziele, und Methodik	 59
3.3.2	Geomorphologie und Geologie des Dammstandortes	60
3.3.2.1	Geomorphologie des Standortes	60
3377	Lithologie des Standortes	61
Jacland		

Π

		III
3.3.3	Morphologie des Dammes (Staumauer)	_ 63
3.3.4	Analyse des Staudamms von Tikaré	_ 63
3.3.4.1	3.3.4.1 Die Staumauer	
3.3.4.2	Der Stauraum	_ 66
3.3.5	Soziale Aspekte des Umbaus vom Stausee	68
3.3.5.1	Auswirkungen eines Aufstaus der Talsperre	_ 68
3.3.5.2	Auswirkungen eines eventuellen Dammbruchs	_ 69
3.3.6 Lösungsv Lateritge	Analyse der Hypothese über den Wasserverlust des Staussees Tikaré, vorschläge für eine Sanierung und Empfehlungen für den Bau kleiner Staudämn bieten	ne in _ 69
3.3.6.1	Hypothese über den Wasserverlust	_ 69
3.3.6.2	Lösungsvorschläge für eine Sanierung	74
3.3.6.3	Empfehlungen für den Bau kleiner Staudämme in Lateritgebieten	_ 76
3.4 H	ydrochemische und isotopische Untersuchung der Wasserressourcen	_ 78
3.4.1	Allgemeines und physikalisch-chemische Parameter	_ 78
3.4.1.1	Allgemeines	_ 78
3.4.1.2	Beeinflussende Parameter der Grundwasserchemie und ihre Relevanz	_ 79
3.4.1.3	Probenahme und Vor-Ort-Messungen	_ 79
a) b)	Probenahme (Methodik)	$-\frac{79}{81}$
3.4.1.4	Kontaminationsgebiete des Wassers und Bestandsaufnahme der Quellen von	
Schads	toffen	- ⁸¹
a) b)	Verzeichnis der Schadstoffquellen	$-\frac{81}{81}$
3.4.1.5	Physikalisch-chemische Parameter	82
a)	Die Temperatur	82
b)	Der pH-Wert	$-\frac{82}{5}$
d)	Die Redoxspannung (Eh)	$-\frac{83}{90}$
e)	Der Sauerstoff	92
3.4.2	Die Haupt-Ionen	_ 94
3.4.2.1	Relative Häufigkeit der Ionen	_ 94
3.4.2.2	Individuelle Charakterisierung der Haupt-Ionen	_ 97
a)	Nitrat	_ 97
b)	Sulfat	$-\frac{100}{102}$
c) d)	Uniona	$-\frac{102}{107}$
e)	Magnesium	$-\frac{107}{110}$
e) f)	Kalzium	114
g)	Natrium	115
h)	Kalium	_ 118
3.4.2.3 Stausee	Vergleichende räumlich Verteilung der Haupt-Ionen Anstrom und Abstrom des es von Tikaré	120
3.4.3	Spurenelemente	123
3.4.3.1	Allgemeines	123
3.4.3.2	Korrelative Analyse der Spurenelemente in den Gewässern	124

0		124
a	-1) Eisen (Fe)	124
а	-2) Mangan (Mn)	126
b)	Silizium (Si)	127
c)	a) Eisen und Mangan a-1) Eisen (Fe) a-2) Mangan (Mn) b) Silizium (Si) c) Vanadium (V) und Chrom (Cr) d) Strontium (Sr) e) Arsen (As) f) Barium, Zink, Uran und Rubidium f-1) Barium (Ba) f-2) Zink f-3) Rubidium (Rb) f-4) Uran (U) g) Cadmium (Cd) m) Thorium (Th) i) Gold (Au) j) Blei (Pb) 3.4.4.1 Allgemeines 3.4.4.2 Die Isotope des Wasserstoffs und des Sauerstoffs 3.4.4.3 Die Isotopenzusammensetzung der Oberflächenwässer a) Oberflächenwässer in der Trockenzeit b) Oberflächenwässer an der Regenzeit 3.4.4.4 Die Isotopenzusammensetzung der Grundwässer a) Die Brunnenwässer der lateritischen Grundwasserleiter b) Die Grundwässer aus den Bohrungen 4.1 Schlussfolgerungen und Perspektiven 4.1 Schlussfolgerungen	128
d)	Strontium (Sr)	124 126 127 128 129 131 132 131 132 131 132 131 132 131 132 131 132 131 132 131 132 131 132 131 132 131 132 131 132 131 132 131 132 131 132 133 134 135 136 137 138 139 75 139 75 141 111 111 111 1111 1111 1111 1111 <t< td=""></t<>
e)	Arsen (As)	131
f)	Barium, Zink, Uran und Rubidium	132
f	-1) Barium (Ba)	132
f	-2) Zink	134
t	-3) Rubidium (Rb)	134
t	$-4) \qquad \qquad$	135
g)	Cadmium (Cd)	136
h)	I horium (I h)	13/
1)		138
J)	Diel (F0)	139
3.4.4	Die Isotope des Wasserstoffs und des Sauerstoffs	141
3.4.4.1	Allgemeines	141
3.4.4.2	2 Die Co-Varianz von ² H und ¹⁸ O und Veränderung des Isotopenverhäl 142	tnisses $\delta^2 H/\delta^{18} O$
3.4.4.2	 Die Co-Varianz von ²H und ¹⁸O und Veränderung des Isotopenverhält 142 Die Isotopenzusammensetzung der Oberflächenwässer 	tnisses δ ² H/δ ¹⁸ O 143
3.4.4.2 3.4.4.3 a)	 Die Co-Varianz von ²H und ¹⁸O und Veränderung des Isotopenverhält 142 Die Isotopenzusammensetzung der Oberflächenwässer	tnisses δ ² H/δ ¹⁸ O 143 143
3.4.4.2 3.4.4.3 a) b)	 Die Co-Varianz von ²H und ¹⁸O und Veränderung des Isotopenverhäl 142 Die Isotopenzusammensetzung der Oberflächenwässer	tnisses δ ² H/δ ¹⁸ O 143 143 144
3.4.4.2 3.4.4.3 a) b) 3.4.4.4	 Die Co-Varianz von ²H und ¹⁸O und Veränderung des Isotopenverhäl 142 Die Isotopenzusammensetzung der Oberflächenwässer	tnisses δ ² H/δ ¹⁸ O 143 143 144 144 145
3.4.4.2 3.4.4.3 a) b) 3.4.4.4 a)	 Die Co-Varianz von ²H und ¹⁸O und Veränderung des Isotopenverhäl 142 Die Isotopenzusammensetzung der Oberflächenwässer	tnisses δ ² H/δ ¹⁸ O 143 143 144 145 146
3.4.4.2 3.4.4.2 a) b) 3.4.4.2 a) b)	 Die Co-Varianz von ²H und ¹⁸O und Veränderung des Isotopenverhäl 142 Die Isotopenzusammensetzung der Oberflächenwässer Oberflächenwässer in der Trockenzeit Oberflächenwässer in der Regenzeit Die Isotopenzusammensetzung der Grundwässer Die Brunnenwässer der lateritischen Grundwasserleiter Die Grundwässer aus den Bohrungen 	tnisses δ ² H/δ ¹⁸ O 143 143 144 145 146 149
3.4.4.2 3.4.4.2 a) b) 3.4.4.2 a) b) 4. Scl	 Die Co-Varianz von ²H und ¹⁸O und Veränderung des Isotopenverhäl 142 Die Isotopenzusammensetzung der Oberflächenwässer	tnisses δ ² H/δ ¹⁸ O 143 143 144 145 146 149 151
3.4.4.2 3.4.4.3 a) b) 3.4.4.4 a) b) 4. Sch 4.1 S	 Die Co-Varianz von ²H und ¹⁸O und Veränderung des Isotopenverhäl 142 Die Isotopenzusammensetzung der Oberflächenwässer	tnisses δ ² H/δ ¹⁸ O 143 143 144 145 146 149 151 151
3.4.4.2 3.4.4.2 a) b) 3.4.4.2 a) b) 4. Sch 4.1 S 4.2	 Die Co-Varianz von ²H und ¹⁸O und Veränderung des Isotopenverhäl 142 Die Isotopenzusammensetzung der Oberflächenwässer	tnisses δ ² H/δ ¹⁸ O 143 143 144 145 146 149 151 151 152
3.4.4.2 3.4.4.2 a) b) 3.4.4.2 a) b) 4. Scl 4.1 S 4.2. I	 Die Co-Varianz von ²H und ¹⁸O und Veränderung des Isotopenverhäl 142 Die Isotopenzusammensetzung der Oberflächenwässer	tnisses $\delta^2 H/\delta^{18} O$ 143 143 144 145 146 149 151 151 152 152

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Ansicht des Stausees von Tikaré am Ende der Regenzeit (September 2007)	3
Abb. 2: Google - Weltübersichtskarte mit Afrika und der Lagemarkierung von Burkina Faso	4
Abb. 3: Einordnung des Untersuchungsgebietes	4
Abb. 4: Geographische Verhältnisse des Arbeitsgebietes und Landnutzung	5
Abb. 5: Regenwinde (nach PERON et al. 1975)	6
Abb. 6: Klimazonen von Burkina Faso (Quelle: DGIRH, Ouagadougou)	7
Abb. 7: Jährliche Niederschläge von Tikaré (Quelle: DGMN, 2007)	7
Abb. 8: Mittlere monatliche Niederschläge von Tikaré (1990-1995 und 2000-2007) (Quelle:	
DGMN, 2007)	8
Abb. 9: Monatliche durchschnittliche Temperaturen von Ouahigouva (1990-2004), (Ouelle:	
DGMN. 2005)	9
Abb. 10:Darstellung der jährlich potentiellen Verdunstungswerte von Ouahigouva - 1990-2003	
(Ouelle: D.G.M.N. 2006)	10
Abb. 11: Durchschnittliche monatliche Verdunstung (Penmann) von Ouahigouva 1991-2003	10
(Ouelle: D G M N 2006)	10
Abb. 12 Relief und Hauntflüsse von Burking Faso (Quelle: Atlas Jeune Afrique du Continent Africain	10
1999)	11
Abb. 13: Vereinfachte geologische Karte des westafrikanischen Kratons (nach Boher et al. 1992)	12
Abb. 14: Vereinfachte geologische Karte von Burkina Faso (Nach Castaing et al. 2003b)	15
Abb. 15:Vereinfachte geologische Karte des Arbeitsgebietes (Nach Eggl et al. 2003b)	15
Abb. 16: Hauntflüsse und Einzugsgebiete von Burking Easo (Quelle: DGIRH)	16
Abb. 17: Stauseenverteilung in Burking Faso, ihre Voluming und Anzahl im Bezug zur Lage	10
innerhalb der Dreinagegeshiete der größten Flügse (Quelle: MAHPH/DCIPH/DEIE/SIE 2003)	18
Abb. 18 a:Tail des Einzugsgebietes von Nakambé und Abb. 18 a:Tail des Einzugsgebiet des	10
Abb. 18 a. Feli des Ellizugsgebietes von Nakambe und Abb. 180. Ellizugsgebiet des	20
Abb. 10. Alterationany of I dog Cranitag und schematische Darstellung der Crundukassenleiter	20
Abb. 19: Alterationsprofil des Granites und scheinausche Darstenung der Grundwasserieiter	22
Abb. 20. Deputete ASTED Scene in der Kenellsembinstion 2, 2, 1 (VNID)	22
Abb. 21. Ask sizes shrifts der Disitellkilderersk sizer s	27
Abb. 221 Arbensschnute der Dignatorioverarbenung	20
Abb. 22. Lineationskane des Arbeitsgebietes	29
Abb. 25: Haufigkeit der Langenklassen a) 1000m-Abstande und b) 500 m-Abstande	30
Abb. 24: Rosediagramm (Streichen) der Lineationen a) 10° Abstande und b) 20° Abstande	32 25 27
Abb. 25 a) bis r): Rosediagramme der Verschiedenen Langenklassen	33-3/
Abb. 26 a) bis r): Histogrammverteilung der Langen der Lineationen der Orientierungsklassen	40-42
Abb. 2/:Lineationsdichtekarte des Arbeitsgebietes	44
Abb. 28: Dichtekarte der Nord-Ost-Zone	46
Abb. 29: Dichtekarte der Zentrums-Zone	46
Abb. 30: Dichtekarte der Sud-Ost-Zone	4/
Abb. 31: Dichtekarte der Sud-west-Zone	4/
Abb. 32: Unterschiedliche Grundwassergewinnungsarten aus Brunnen und Bohrungen	50
a) Schopfen; b) Rolle; c) India Pumpe Mark II; d) VOLON I A Pumpe; e) Kardia Pumpe	、 50
Abb. 33: Innere Ansichten einiger Brunnen Trad I; b) Irad X VIII; c) Trad II; d) Trad III; e) Trad IX; T)
Irad XV; g) Irad V in Irockenzeit und h) in Regenzeit	52
Abb. 34: Schematische Darstellung der Stratigraphie der Brunnen	53
Abb. 35: Haufigkeit der Bohrtiefen	54
Abb. 36: Häufigkeit der Verwitterungsmächtigkeit	22
Abb. 37: Häufigkeit der statischen Niveaus	56
Abb. 38: Verteilung der Förderleistungen	57
Abb. 39:Satellitenansicht des Stausees von Tikaré	58
Abb. 40:Seitenansicht der schematischen Darstellung der geometrischen Parameter der Staumauer	
(Stausee von Tikaré)	59
Abb. 41: Vorderansicht der Staumauer des Stausees von Tikaré	59
Abb. 42: Vergleich Ansichte zwischen dem Stausee von Silimidougou (a) und dem Stausee von	
Tikaré (b) (02.2006)	60
Abb. 43:Schematische Darstellung der potentiellen Lithographie im Staubecken	62
Abb. 44:Morphologie des Staumaueroberkanntes (schematische Prinzipskizze)	63
Abb. 45:Anblick der Staumauer (04.2007)	65
Abb. 46:Unterirdischer Uberlauf des Staussees (Abstrom, 04.2007)	65
Abb. 47: Teilanblick der Staumauer des Dammes von Koulniéré (Im Vordergrund der Überlauf, 04.200'	7) 65
Abb. 48: a) et b): Erosionsrisse durch Regenwasserabflusse (im Kreis) (04.2007)	65

VI

Abb. 49:Dammbett in Trockenzeit mit Staumauer im Hintergrund (02.2006)	66
Mosaikrisse nebeneinander mit Höhlen, c) Mosaikrisse mit einer Höhle, d) Strukturriss	67
Abb. 51: Vergleichsanblick des Dammbettes a) von Koulniéré und b) von Silmidougou	
(kein Riss ist zu sehen) (02.2006)	67
Abb. 52:Wasserabflusserosionsbereiche (Korridor) in alten Steinbrüchen (04.2007)	67
Abb. 53:Teilansichten von Wohnhäusern im Anstrom des Stausees(09.2007)	68
Abb. 54: Horizontale Anblick von Staumauer in Richtung Anstrom	68
Abb. 55: Hone des täglichen wasserverlustes im Stausee (09.2007)	/0
Verdunstung und Infiltration	70
Abb 57. Schematische stratigrafische Darstellung der oberflächlichen Formationen im Dammbett	70
von Tikaré (Trockenzeit)	71
Abb. 58:Schematische Darstellung des Stausees von Tikaré vor der Sanierung (Regenzeit)	71
Abb. 59 a) und b): Anblick der Abstromseite des Stausees (Regenzeit)	71
Abb. 60:Geographische Lage der Brunnen TradI, II, III und UFZ3 und 4 im Stauseeumfeld	72
Abb. 61:Isotopengehaltsgraphik von Proben in der Umgebung des Stausees von Tikaré (09.2007)	72
Abb. 62 a) und b): Röntgenstrahlausschnitte von Lateritproben aus den Piezometern (ungefähr 8 m tief)	73
Abb. 63 a) und b): Wasserstände in alten und neuen Steinbrüchen (09.2007)	73
Abb. 64: Schematische Darstellung des Stausees von Tikaré nach Sanierung	75
Abb. 65:3D-Ansicht einer idealen Staumauer für den Stausee von Tikare und im Lateritgebiet	75
Abb. 60: Draufsicht einer idealen Staumauer für den Stausee von Tikaré und im Lateritgebiet	/5
Abb. 68: Lage der Grundwässer-Probenahmenunkte	80 80
Abb. 69: Grunnierung der Proben anhand ihrer nH-Werte a) in der Regenzeit und h) in der Trockenzeit	84
Abb. 70:Korrelation pH-Wert – Leitfähigkeit (Regenzeit)	85
Abb. 71:Korrelation pH-Wert – Redoxspanning (Trockenzeit)	85
Abb. 72:Komparative Variation der Leitfähigkeit (Trocken- und Regenzeit)	88
Abb. 73: Verteilung der Leitfähigkeitswerte in den Proben a) Regenzeit und b) Trockenzeit	88
Abb. 74:Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeitswerte a) Trockenzeit und b) Regenzeit	89
Abb. 75:Korrelation Leitfähigkeit – Redoxspannung (Regenzeit)	90
Abb. 76: Vergleich der saisonalen Variation der Redoxspannung und des Sauerstoffes	92
Abb. 77:Saisonaler Vergleich des Sauerstoffgehalts	93
Abb. 78a: Saisonaler Vergleich der mittleren Ionenkonzentrationen	95
Abb. 78b: Saisonaler Konzentrationsvergleich der Ionen zwischen Grund- und Oberflächenwassern	95
Abb. 80: Anionanyerteilung der Grundwässer a) Trockenzeit und b) Regenzeit	90
Abb. 81:Vergleichende Variation von NO_{2}^{-} (Trocken- und Regenzeit)	90
Abb. 82:Räumliche Verteilung der NO ₂ ⁻ -Werte a) in der Trockenzeit und b) in der Regenzeit	99
Abb. 83:Umfeld von Brunnen und Bohrung (a: Trad XIV und b: BOB2)	100
Abb. 84: Vergleichende Variation von SO_4^{2-} (Trocken und -Regenzeit)	101
Abb. 85:Korrelation zwischen SO_4^{2-} und Ca^{2+} (Regenzeit)	101
Abb. 86:Korrelation zwischen SO_4^{2-} und Mg^{2+} (Trockenzeit)	102
Abb. 87:Korrelation zwischen SO ₄ ²⁻ und der elektrischen Leitfähigkeit (Regenzeit)	102
Abb. 88:Lineare und vergleichende Variation von Cl (beide Jahreszeiten)	103
Abb. 89:Räumliche Verteilung der CI-Werte a) Trockenzeit und b) Regenzeit	104
Abb. 90: Vergleichende Variation zwischen Cl und NO_3 (Trockenzeit)	105
Abb. 91: Vergleichende Variation zwischen CI und SO_4 (Regenzeit) Abb. 92: Vergleichende Verteilung CI ⁻ und Ne ⁺ (Regenzeit)	105
Abb. 93: Korrelation CL-Na (Regenzeit)	100
Abb 94 Saisonaler Vergleich der Beziehung CI-Na $^+$ 107	100
Abb. 95:Saisonaler Vergleich des Verhältnisses Cl/(Na+K)	107
Abb. 96: Vergleichende Variation der HCO_3^- -Gehalte mit Mg^{2+} , Ca^{2+} und Na^+ a) Trockenzeit und b)	
Regenzeit (ohne Na+)	108
Abb. 97:Saisonaler Vergleich des Verhältnisses HCO ₃ /(Ca+Mg)	108
Abb. 98:Korrelation zwischen HCO ₃ ⁻ und Na ⁺ (Trockenzeit)	110
Abb. 99:ergleichende Verteilung zwischen Mg^{2+} , Na^+ und Ca^{2+} (Trockenzeit) 111	
Abb. 100: Räumliche Verteilung der Mg-Werte a) in der Regenzeit und b) in der Trockenzeit	112
ADD. 101: Korrelation Mig - Leittanigkeit (Regenzeit) Abb. 102: Korrelation Mg ²⁺ Bodowananung (Bacangait)	113
Abb. 102: Norretallung der Beziehung SO (Ca±Ma) der Grundwösser	113
Abb 104: Saisonale Variation von Ca^{2+} und Vergleich mit $M\sigma^{2+}$ (Regenzeit)	113
Abb. 105:Korrelation Ca^{2+} -Mg ²⁺ (Regenzeit)	115

Abb. 106: Korrelation Ca ²⁺ - Leitfähigkeit (Regenzeit)	115
Abb. 107: Lineare Verteilung von Na und Leitfähigkeit (Trockenzeit)	116
Abb. 108: Korrelation Na ⁺ - Temperatur (Regenzeit)	117
Abb. 109: Variation zwischen Na/Cl und Ca+Mg (Trockenzeit)	117
Abb. 110 : Saisonale Variation von K^+	118
Abb. 111: Räumliche Verteilung der K ⁺ -Werte a) Trockenzeit und b) Regenzeit	119
Abb. 112: Korrelation zwischen K^+ und SO_4^{2-} (Regenzeit)	120
Abb. 113: Vergleich der durchschnittlichen Konzentrationen der Haupt-Ionen zwischen Anstrom	
und Abstrom der Staumauer (Stausee von Tikaré. Regenzeit)	121
Abb. 114: Vergleichende Variation der Konzentrationen von Fe. Mn und O ₂ a) Trockenzeit und	
b) Regenzeit	125
Abb. 115: Korrelationsgraph Mn-U	127
Abb. 116: Vergleichende Variation des Konzentrationen von Si, SO ⁴⁻ , Na ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺ (Grundwasser)	127
Abb. 117: Saisonale Variation der V-Konzentrationen in den Gewässern	128
Abb. 118: Korrelationsgraph Ni-Cr in Brunnenwässern	129
Abb. 119: Vergleichende Variation der Konzentrationen von Sr. Ca und SO ₄	130
Abb. 120: Vergleichende Variation der Konzentrationen von Sr und Mg	130
Abb. 121: Korrelationsgraph Sr- elektrische Leitfähigkeit	131
Abb. 122: Saisonaler Vergleich der Ba-Konzentrationen	132
Abb. 123: Vergleichende Variation der Konzentrationen von Ba, Cl und NO ₃	132
Abb. 124: Korrelation Ba-NO ₃	133
Abb. 125: Vergleichende Variation der Konzentrationen von Ba und Rb	135
Abb. 126: Vergleichende Variation der Konzentrationen von Rb und K ⁺	135
Abb. 127: Diagramme U-Rb-Mn der Oberflächengewässer	136
Abb. 128: Vergleichende Variation der Konzentrationen von Cd und Cl	137
Abb. 129: Vergleichende Variation der Konzentrationen von Fe und Th	137
Abb. 130: Goldbergbau	138
Abb. 131: Korrelationsgraph Au-Cl ⁻ (Grundwasser)	138
Abb. 132: Korrelationsgraph Pb vs. Rb (Grundwasser)	140
Abb. 133: Isotopische Anreicherung der Wässer in ¹⁸ O und ² H zur Niederschlagsgeraden	
(nach BANTON & BANGOY, 1997)	143
Abb. 134: Saisonaler Vergleich der Isotopenverhältnisse von Lac Bam, Stausee Koulniéré	
und Stausee Ziga	145
Abb. 135: Isotopensignatur der gesamten Oberflächengewässer (Regenzeit)	145
Abb. 136: Isotopenverhältnisse der Brunnenwässer	148
Abb. 137: Isotopenverhältnisse der gesamten Wässer (Trockenzeit)	148
Abb. 138: Isotopenverhältnisse der gesamten Wässer (Regenzeit)	148
Abb. 139: Isotopenverhältnisse der Bohrungswässer	150
Abb. 140: Isotopenverhältnisse der Grundwässer (Trockenzeit)	150
Abb. 141: Isotopenverhältnisse der Grundwässer in ² H und ¹⁸ O im Quervergleich mit dem	
Stausee von Tikaré (Regenzeit)	150
Abb. 142: Entwicklungsmodell der Wasserressourcen in semi-arid Gebieten von Burkina Faso und in	
der südlichen Sahel-Zone	153

Tabelleverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung von einigen mit strategischen Nutzungen Stauseen in Burkina Faso	
(Quelle: http://www.eauburkina.bf)	18
Tabelle 2: Stauseen im Department Tikaré (Quelle: DGH/BEWACO, 1999)	19
Tabelle 3: Charakteristiken ASTER-Daten	25
Tabelle 4: Zusammenfassung der technischen Parameter der Brunnen	50
Tabelle 5: Ergebnisse der topographischen Messungen	63
Tabelle 6: Zusammenfassung der Temperaturwerte	82
Tabelle 7: Zusammenfassung der pH-Werte	83
Tabelle 8: Zusammenfassung der elektrischen Leitfähigkeitswerte	87
Tabelle 9: Zusammenfassung der Redoxspannungswerte	91
Tabelle 10: Zusammenfassung der Sauerstoffgehalte	93
Tabelle 11: Zusammenfassung der Konzentrationen der Haupt-Ionen	121
Tabelle 12: Korrelationsmatrix der Haupt-Ionen	122
Tabelle 13: Konzentrationsbereiche der untersuchten Spurenelemente in Grundwassersystemen	
(modifiziert nach Allard, 1995)	123
Tabelle 14: Verteilung der Pb-Konzentrationen	139
Tabelle 15: Korrelationsmatrix der Spurenelemente mit den Haupt-Ionen und den physikalisch-	
chemischen Parametern	140

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celcius
μg/l	Mikrogramm pro Liter
µS/cm	Mikro-Siemens pro Zentimeter
¹⁸ O	Sauerstoff-18 Isotop
AAS	Atomic Adsorption Spectrometry
Abb.	Abbildung
As	Arsen
ASTER	Advanced Spacehorne Thermal Emission and Reflec-
tion Dadia	Advanced Spacebolite Thermal Emission and Refice-
	Cald
Au	Gold
BEWACC	
BFA	Burkina Faso
BJ	Baujahr
С	spezifische Leitfähigkeit
Ca	Ca ²⁺ -Kalzium
Cd	Cadmium
Cl	Cl ⁻ -Chlorid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
D, 2H	Deuterium Isotop (Wasserstoff-2 Isotop)
DGH	Direction Générale de l'Hydraulique
DGIRH	Direction Générale de l'Inventaire des Ressources Hy-
drauliques	
DGMN	Direction Générale de la Météorologie Nationale
Den	Department
E E	Elektrodenpotential
Е	Verdunstung.
- E0	Standard-Elektrodenpotential in Volt
E. (korr)	der korrigierte Redovspannungswert
EH (KUII.)	dia gemessene Redoxspannung
L _H Гh	Padovnotontial
EII et el	et ailii und and and
et al.	
r r	
Fe	Elsen
FE	Fernerkundung
rora.	Clabal Matania Watan Lina
GMWL	Global Meteoric water Line
GW	Grundwasser
H_2O	Wasser
H_2S	Schwefelwasserstoff
H_2SO_4	Schwefelsäure
ha	Hektar
HCO ₃	HCO ₃ ⁻ -Hydrogencarbonat
HNO ₃	Salpetersäure
I	Infiltration
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICP-MS	Inducted Coupled Plasma Masse Spectrometry
IFEN	Institut français de l'environnement
К	K ⁺ - Kalium
Kap.	Kapitel
Kapz.	Kapazität
km	Kilometer
km ²	Quadratkilometer
LF	Leitfähigkeit
LMWL	Local Meteoric Water Line
m	Meter
m/km²	Meter pro Quadratkilometer
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
MAHRH	Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Res-

sources Halieutiques (Burkina Faso)

Milliequivalent pro Liter meq/l Mg²⁺-Magnesium Mg Milligramm pro Liter mg/l Mio Million Milliliter ml Millimeter mm Mn Mangan Mol/l Mol pro Liter Millivolt mV Nord Ν N.B. Nebenbemerkung Na⁺- Natrium Na National Aeronautics and Space Administration NASA Ni Nickel NO_3 NO3⁻ - Nitrat Ø Durchmesser Gelöster Sauerstoff O_2 ONEA Office Nationale de l'Eau et de l'Assainissement OW Oberflächenwasser Aktivität der oxidierten Form des Stoffes Ox Р Niederschlag; Р spezifischer Widerstand Pb Blei PbCO₃ PbS Bleiglanz pН pH-Wert: negativ dekadischer Logarithmus der Wasserstoffkonzentration Prov. Provinz R Abfluss: R Gaskonstante Korrelationskoeffizient r Rb Rubidium Red Aktivität der reduzierten Form des Stoffes RΖ Regenzeit Si Silizium SMOW Standard Mean Ocean Water SN Statisches Niveau SO_4 SO4²⁻ - Sulfat SPOT Strontium Sr SWIR Short Wave Infra Red Т Temperatur Κ Temperatur in Kelvin TDS Total Dissolved Solids Thorium Th TIR Thermal Infra Red ΤZ Trockenzeit U Uran U.S.G.S. United States Geological Survey Vanadium V VNIR Visible and Near Infra Red W West WHO World Health Organisation W-Sch Verwitterungsschichten Z Anzahl der ausgetauschten Elektronen Zn Zink δ Isotopenverhältnis μm Mikrometer

1. Einleitung

Wasser ist für das Leben auf der Erde von fundamentaler Bedeutung und für alle Organismen essenziell und existenziell, damit unentbehrlich! Ist die Wasserver- und Wasserentsorgung in Industriestaaten, insbesondere denen mit ausgeglichenen Wasserressourcenbilanzen, Gegenstand eines etablierten Geschäftswesens, so ist in Trockenregionen der Erde verfügbares Wasser lebensentscheidend. Eine Wasserversorgung als Trink- und Brauchwasser sowie als Bewässerungsgrundlage in klimabenachteiligten Wassermangelgebieten ist quantitativ und qualitativ außerordentlich labil. Das hängt von einer Vielzahl Faktoren ab. Wasserüberfluss in Form von Starkniederschlägen und nachfolgenden Überschwemmungen wechseln mit oft mehrjährigen Trockenperioden und entsprechenden Ernteausfällen und Hungersnöten. Oft betrifft dies Länder und Regionen, in denen ein geringes Bruttosozialprodukt erwirtschaftet wird. Um dieses Desaster zu unterbrechen oder zumindest abzuschwächen ist es erforderlich, genauere und tiefgehende Untersuchungen der hydrologisch-hydrogeologischen Verhältnisse durchzuführen, um längerfristig ein nachhaltiges Wasserressourcenmanagement realisieren zu können.

Eines der Länder, für die die zuletzt beschriebene Situation zutrifft, ist Burkina Faso. Das im weiteren Sinne in der Sahel-Zone liegende Land leidet chronisch an Wassermangel. Wurden in jüngerer Vergangenheit mit technischer und finanzieller Unterstützung Frankreichs Wasserinsbes. Trinkwasserversorgungseinrichtungen (speziell Stauseen) für Ballungszentren wie Ouagadougou geschaffen, nutzt die Landbevölkerung, die auf mehr als 95% der Fläche des Landes leben, trotz einiger internationaler Hilfsprojekte (insbes. auch der GTZ der Bundesrepublik Deutschland), immer noch dominierend traditionelle Brunnen und periodisch Wasser führende Kleinspeicher.

Um dem Ziel, ein regionales, nachhaltiges Wassermanagement schaffen zu können, näher zu kommen, wurden im Rahmen eines vom Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) und dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) gefördertes und unterstütztes Qualifikationsvorhaben in einer Modellregion Burkina Fasos ermöglicht. Neben der Erarbeitung von belastbaren Daten natürlicher Sachverhalte und einem Nutzungsmodell sollte insbesondere berücksichtigt werden, wie sich Auswirkungen der globalen Erwärmung - Ereignisse, die in den vergangenen drei Millionen Jahren für die Lebensbedingungen in Afrika schon immer eine Bedeutung hatten - auf die Lebensbedingungen im Lande zeigen und welche Problemlösungen denkbar wären bzw. gefunden werden können.

2. Grundlagen

2.1 Kriterien der Standortwahl

Burkina Faso ist ein Binnenland in der Sahel-Zone (ohne Küste) und leidet seit mehreren Jahrzehnten unter dem kontinuierlichen Rückgang der Niederschläge mit der Folge zunehmender Dürre. Das betrifft nicht nur Burkina Faso, sondern die gesamte Sahel-Zone. Daher ist es wichtig, alle Wasserressourcen zu erschließen und ordnungsgemäß zu managen und zu verwalten. ASADI et al. (2007) beschreiben, dass Menschen über die Zeit versuchen, Süßwasser zu lokalisieren und zu nutzen, denn Wasser ist die Grundlage jeglichen Lebens. In einigen Ländern wird Grundwasser hauptsächlich zur *Bewässerung* genutzt (YOUNGER 2007). Das trifft für Burkina Faso nicht zu. Grundwasser ist die einzige *Trinkwasser*quelle für die Bevölkerung der ländlichen Gebiete und hat damit eine entscheidende sozio-ökonomische Funktion. Da Burkina Faso dominierend von kristallinen Gesteinen eines präkambrischen Fundamentes geprägt wird und nur regional in geringem Umfang mit mächtigen Lockergesteinsaquiferen (Grundwasserspeicher) ausgestattet ist, muss eine präzise Aufklärung der wenigen, zur Verfügung stehenden Reserven erfolgen. Die durchgeführten Untersuchungsarbeiten dienen deshalb als ein Charakterisierungsmodell, um die quantitative Situation in potentiellen Grundwassergebieten zu ermitteln und ein besseres Verständnis für die Beschaffenheit der Ressourcen zu ermöglichen.

Das Arbeitsgebiet wurde so gewählt, dass eine typische Region mit möglichst vielen Einflussfaktoren (Siedlung, Agrarraum, Bergbau) untersucht, interpretiert und ausgewertet werden musste. Folgende Kriterien wurden berücksichtigt:

Es sollte eine ländliche Region sein, in denen Brunnen unterschiedlichen Typs von der Bevölkerung als Trinkwassergewinnungsstellen genutzt werden. Die Brunnen fördern ausschließlich Wasser aus dem oberen Grundwasserleiter der typischen drei Aquifere im Kristallin (SAVA-DOGO 1984), des am meisten verbreiteten Untergrundes im Lande. Dieser ist gegen organische und anorganische Kontaminationen der menschlichen Aktivitäten relativ stark ungeschützt. Da die Güte des Wassers entscheidend für die Lebensqualität der Bevölkerung ist (FETTER 1998), sind neben der quantitativen Fragestellung auch qualitative Untersuchungen erforderlich. Da gelöste oder partikuläre Schadstoffe die Gesundheit von Menschen und Tieren gefährden können, muss auch die hydrochemische Situation geklärt werden (APELLO & POSTMA 2005, MAYS & TODD 2005).

Kleinspeicher für Oberflächenwasser haben eine außerordentlich große soziale aber auch ökonomische Funktion. Besonders für Gemüseanbau aber auch für Mais und Hirse, elementaren Grundnahrungsmitteln, ist eine Bewässerung notwendig, für die eine Grundwassernutzung Wasserverschwendung wäre. In manchen Regionen wurde aber die Anlage Oberflächenwasser stauender Kleinspeicher politisch entschieden, ohne dass eine ausreichende geologisch - geotechnische Voruntersuchung stattgefunden hatte. Auch elementare Bauausführungsfehler können in kritischen Situationen, z.B. spontanen Starkregenfällen, zu katastrophalen Folgen für die betroffene Landbevölkerung führen. Diese Beispiele verfehlen ihr Ziel und es muss nach Wegen gesucht werden, dass eine nachhaltige Funktionsfähigkeit der Speicher gewährleistet werden kann.

Das dritte Auswahlkriterium für den Untersuchungsstandort ist der geologische Untergrund. Da das Territorium von Burkina Faso sowohl aus hoch aufragendem, oberflächennah anstehenden kristallinen Gesteinen als auch Sedimenten (CASTAING et al. 2003a und 2003b, EGAL et al. 2003a und 2003b) geprägt wird, sind die Untersuchungen auf die Verhältnisse zu konzentrieren, die am weitesten verbreitet sind. Und das trifft für den metamorphen und kristallinen riphäische Kraton zu.

Diese Kriterien sind im Gebiet von Tikaré, ca. 140 km nordnordwestlich von der Hauptstadt Ouagadougou erfüllt. In diesem Gebiet sollten Grundwasserpotentiale hinsichtlich ihrer Quantität und Qualität untersucht und beschrieben werden. Dazu erfolgten die Auswertungen von Fernerkundungsdaten und die Ermittlung von Geländebefunden. Ferner ist ein Kleinspeicher Gegenstand von Untersuchungen, da er das während der Regenzeit aufgestaute Oberflächenwasser kurzfristig verliert. Und mit Hilfe hydrochemischer und isotopenchemischer Untersuchungen wurde der Versuch unternommen, den Wasserhaushalt besser verstehen zu können.



Abb. 1: Ansicht des Stausees von Tikaré am Ende der Regenzeit (September 2007)

2.2 Regionale Einordnung des Untersuchungsgebietes

2.2.1 Geographische Lage und Bevölkerung

Burkina Faso ist ein Binnenstaat und liegt in Westafrika 6° westlicher und 2° östlicher Länge sowie ca. 9° und 15° nördlicher Breite. Seine Fläche umfasst ca. 274.200 km². An das Land (Abbn. 2 und 3) grenzen im Südwesten *Elfenbeinküste*, im Westen und Norden *Mali*, im Osten *Niger*, im Südosten *Togo* und *Benin* und im Süden *Ghana*. Die nächste Küste (Atlantik) liegt ca. 800 km südlich der Südgrenze des Landes. Die wichtigsten Seehäfen für Burkina Faso sind Abidjan (Elfenbeinküste), Téma und Accra (Ghana), Lomé (Togo) und Cotonou (Benin). Laut der letzten Volkszählung im Jahre 2006 leben 13.730.258 Einwohner im Land. Die Gesamtbevölkerung entwickelt sich progressiv mit einer Wachstumsrate von ca. 3%. Burkina Faso ist ein Lebensraum von rd. 60 Völkern bzw. Stämmen, von denen die Mossi (ca. 40%), Bwa (Bobo) und Fulbe (Peul) die deutliche Mehrheit besitzen. Ca. 51% der Bevolkerung hat Zugang zum sauberen Trinkwasser.



Abb. 2: Google - Weltübersichtskarte mit Afrika und der Lagemarkierung von Burkina Faso

Das ausgewählte Untersuchungsgebiet befindet sich im nördlichen Zentralteil von Burkina Faso (Abbn. 3 und 4). Die Koordinaten sind 1°35' und 1°52' W und 13° 08' und 13° 25' N. Im Gebiet liegen rund 30 Dörfer. Hauptausgangspunkt für die Untersuchungsarbeiten war Tikaré, einem Ort mit einer Missionsstation an der Straße Ouagadougou – Kongoussi – Ouahigouya (und weiter nach Mali) (Abb. 3). Die Fernerkundungsanalyse erfasste etwa ein Gebiet von 900 km², um Fernerkundungssignale auch über das engere hydrogeologisch-hydrochemische Untersuchungsgebiet einordnen und interpretieren zu können.



Abb. 3: Einordnung des Untersuchungsgebietes



Abb. 4: Geographische Verhältnisse des Arbeitsgebietes und Landnutzung (Quelle: Topographischer Blatt von Kaya, IGB)

2.2.2 Hydrographische Übersicht von Burkina Faso

Burkina Faso wird hydrografisch sehr außergewöhnlich geprägt. Das ist auf die Erdgeschichte der Lithosphäre zurückzuführen, die bereits präkambrisch und altpaläozoisch konsolidiert und in jüngerer Zeit durch Blockhebungen und –senkungen verändert wurde. Dadurch befinden sich im Land prinzipiell drei Einzugsgebiete, die im südlich liegenden Atlantik münden aber im Lande mehrfach die Abflussrichtungen wechseln. Es sind die Einzuggebiete des Nigers, des Nakambés (ehem. Weißer Volta), des Mouhouns (ehem. Schwarzer Volta) und des Comoés. Detailliertere Beschreibungen zur Hydrologie folgen im Kapitel 2.4.2.

2.2.3 Klima und Wetter

Diese Übersicht bezieht sich auf die folgenden wichtigsten Klimaparameter: Klima-Winde, Niederschlag, Temperatur und Verdunstung.

2.2.3.1 Windverhältnisse

Die klimatisch bedingten Windverhältnisse in Burkina Faso sind hauptsächlich von zwei Einflüssen abhängig: die des Harmattans und des Monsuns.

Harmattan ist ein trockener und staubiger Wind aus den Hochdruckgebieten der Sahara, der aus Nord-Ost in Richtung Süd-Westen (Golf von Guinea) zwischen November und März weht. Während des Tages ist der Harmattan warm, nachts dagegen kühl. Der *Monsun* ist ein feuchter Wind, der aus der entgegen gesetzten Richtung wie das Harmattan weht. Er entspringt den Hochdruckgebieten der Ozeane der südlichen Hemisphäre. Der Fluss entsteht aus der Antizyklone von Sainte-Helène im südlichen Atlantik, erreicht Burkina Faso im April und erstreckt sich über das gesamte Land ab Juni (PERON et al. 1975). Die Wolken der Regenzeit ergeben sich aus dem Monsun. Der Bereich zwischen den Wendekreisen, der die beiden Luftströme trennt, liegt zwischen dem Golf von Guinea (Januar) und dem 25° Breitenkreis (August) (Abb. 5).



Abb. 5: Regenwinde

2.2.3.2 Zeitliche und räumliche Verteilung des Niederschlags

Die Niederschläge spielen für Burkina Faso eine bedeutende Rolle. Die zeitlichen und räumlichen Verteilungen sind sehr unterschiedlich über das Land verteilt. Es ist durch den Typ *Soudano-Sahel* gekennzeichnet, der in zwei Jahreszeiten (eine Regenzeit und eine Trockenzeit) strukturiert ist. Gewöhnlich dauert die Regenzeit im Durchschnitt von Juni bis September und die Trockenzeit von Oktober bis Mai. Aber in der Realität sind die Dauer der Jahreszeiten von Gebiet zu Gebiet verschieden. Die Regenzeit ist in Richtung Norden kürzer und in Richtung Süden länger.

Neben dieser *zeitlichen* Verteilung der Regenzeit ist das Land auch durch eine *räumliche* variable Verteilung der Niederschläge gekennzeichnet. Die Niederschlagsmenge fällt im Verlauf der Regenzeit von Süden nach Norden. Entsprechend dieser räumlichen Verteilung des Niederschlages sind in Burkina Faso drei Niederschlagszonen identifiziert: Die Sahel-Zone im Norden, die Soudan-Sahel-Zone und die Soudan-Zone im Süden des Landes (Abb. 6). Die letzte genannte Klimazone bekommt die höchsten Niederschläge (im Durchschnitt 900 mm pro Jahr), während die Sahel-Zone die trockenste ist (mit einer durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsmenge von ca. 450 mm und einer Regenzeitdauer von etwa zwei Monate. Das Arbeitsgebiet liegt in der Sahel-Zone. Niederschlagsdaten von Tikaré von 1990 bis 2007 wurden vom Staatlichen Meteorologischen Dienst zur Verfügung gestellt. Die Aufzeichnungen von einigen Jahren sind unvollständig oder fehlen sogar. Aus diesem Grund wurden nur die Werte der Jahre 1990-1995, 1998 und 2003-2007 für die Evaluierung der Entwicklung der jährlichen Niederschlagsmenge benutzt (Abb. 7). Daraus geht hervor, dass die Niederschlagsmengen der Jahre 1990, 1993 und 1995 am niedrigsten waren und reflektieren die Niederschläge der Sahel-Zone (Jahresdurchschnitt etwa 450 mm). Dagegen ist die Niederschlagsmenge des Jahres 1994 außergewöhnlich hoch (986 mm) und entspricht mehr der Soudan-Zone im Westen und Südwesten des Landes. Insgesamt gibt es in diesem Beobachtungszeitraum keine klare Entwicklungstendenz des Niederschlages von Tikaré.

Zu den Histogrammen der monatlichen Niederschlagsmengen kann man feststellen, dass die Monate mit den stärksten Regenfällen Juli (Ø 173 mm) und August (Ø 192 mm) sind (Abb. 8).



Abb. 6: Klimazonen von Burkina Faso (Quelle: DGIRH)



Abb. 7: Jährliche Niederschläge von Tikaré (Quelle: DGMN, 2007)



Abb. 8: Mittlere monatliche Niederschläge von Tikaré (1990-2007) (Quelle: DGMN, 2007)

2.2.3.3 Temperaturen

Die Temperatur ist der zweite bedeutende Klimaeinflussfaktor. Weil sich das Arbeitsgebiet im Norden des Landes befindet, unterliegt es den hohen Temperaturen der Sahel-Zone. Die benutzten Werte für diese Arbeit sind die von Ouahigouya (ca. 100 km NW von Tikaré), da es in Tikaré keine Temperaturmesseinrichtung gibt. Die wichtigsten Charakteristiken sind:

- Temperaturen immer über 10°C, unabhängig von der Jahreszeit;
- Die mittlere monatlichen Werte selten über 35°C, bei denen sich die Extreme in der Regel im Norden des Landes ergeben;
- Die heißesten Monate des Jahres sind März, April und Mai und die kühlsten sind Dezember und Januar (minimale Temperaturen), (Abb. 9).

Im Detail liegen die durchschnittlichen maximalen Temperaturen von Ouahigouya zwischen 32°C (August) und 41°C (April) (Werte von 1990 bis 2004). Die minimalen Werte für den gleichen Zeitraum liegen bei 18°C (Januar) und 28°C (Mai) (Abb. 9). Die Daten zeigen auch, dass zu den Monaten Dezember und Januar, wo die Temperaturen am niedrigsten sind, auch der Juli und August etwas kühl erscheinen, zumindest aus der Sicht der maximalen Werten. Der Grund sind sicherlich die Regenfälle in diesem Zeitraum.



Abb. 9: Monatliche durchschnittliche Temperaturen von Ouahigouya (1990-2004), (Quelle: DGMN, 2006)

2.2.3.4 Verdunstung

Die Auswertung der Verdunstungsdaten ist sehr wichtig, denn die potentielle Verdunstung (ETP) ist eine der wichtigsten Variablen der Wasser-Bilanz auf der Ebene des Einzugsgebietes

P = R + E + I, wobei:

P = Niederschlag; R = Abfluss;

E = Verdunstung; I = Infiltration sind.

Sie ist umso wichtiger, da Burkina Faso in einem Soundan-Klima-Zone befindet, wo die Niederschläge manchmal sehr gering sind, wie zum Beispiel in der Klima-Zone (Sahel-Zone) des Arbeitsgebietes.

Wie die Temperaturwerte wurden auch die Verdunstungswerte von Ouahigouya für diese Arbeit verwendet. Im Zeitraum von 1991 bis 2003 schwankten die jährlichen potentiellen Verdunstungswerte zwischen 2037 mm und 2182 mm, mit einer Stagnationstendenz um 2130 mm von 1997 bis 2002. Eine fallende Kurve ab dem Jahr 2002 ist zu sehen (Abb. 10). Die wichtigste Information aus dieser Analyse ist, dass jede liegende Wasseroberfläche in dem Arbeitsgebiet mit einer Wasserhöhe von weniger als 2500 mm ohne Entnahme, aus Folgen der Verdunstung austrocknen würde.

Die Abbildung 11 zeigt, dass die Monate März, April und Mai (1991 bis 2003) die höchsten Verdunstungswerte haben (bis zu 200 mm). Juli, August und September mit einer durchschnittlichen Wert von rund 152 mm sind die Monate, wo die potentielle Verdunstung am geringsten ist. Aber diese geringsten potentiellen Verdunstungswerte können auch eine Folge der Niederschlagsmenge, die in diesem Zeitraum fällt, sein, so dass der Effekt der Verdunstung reduziert wird. Diese monatlichen Mittelwerte beziehen sich auf die Temperaturwerte: heiße und trockene Zeit = starke Verdunstung und kühle und/oder feuchte Zeit = geringe Verdunstung.



Abb. 10: Jährlich potentielle Verdunstung von Ouahigouya - 1990-2003 (Quelle: D.G.M.N, 2006)



Abb. 11: Durchschnittliche monatliche Verdunstung (Penmann) von Ouahigouya 1991-2003 (Quelle: D.G.M.N., 2006)

2.3 Relief und Geomorphologie

Allgemein ist Burkina Faso ein flaches Land. Die Abweichung zwischen den extremen Punkten ist weniger als 600 Meter und die durchschnittliche Höhe ist weniger als 400 Meter. Mehr als die Hälfte des Landes hat eine Höhe im Verhältnis zum Meeresspiegel zwischen 250 und 350 Meter (Abb. 12). Es gibt allerdings lokalen Variationen. Morphologie und Reliefenergie sind abhängig vom geologischen Unterbau und dessen Gesteinseigenschaften. Man unterscheidet zwei wichtige topografische Bereiche: Eine große Peneplaine und ein stärker reliefiertes Gebiet mit dominanter Sandsteinverbreitung.

2.3.1 Die Peneplaine

Peneplains dominieren ³/₄ des Landes. Sie entstanden hauptsächlich auf präkambrischem Fundament. Das monotone Relief ist eine Aufeinanderfolge von sanft abgerundeten Gipfeln und kleinen flachkonvexen Tälern und flachkonkaven Hügeln oder Hügelgruppen. Der Untergrund wird in der Regel aus Granit- und Gneis gebildet.

Es gibt auch einige Ausbildungen von Hügeln, deren Gipfel aus Schiefer und Quarzsandstein des Birrimiens (s.Kap. 2.4.1.1) bestehen, die durch die Erosion schroffer geformt wurden. Sie fallen morphologisch deutlich auf. Das Arbeitsgebiet, mit einer Höhe zwischen 250 und 300 m, liegt in diesem Umfeld (Abb. 12). Die Hügel bestehen in der Regel aus drei Erosionsebenen (-plateaus) mit einem verhärteten Lateritgipfel. An den Flanken treten teilweise geschützt ("gepanzert") gegliederte Plateaus mit einem Tonerdeanteil (Kaolin) auf.

2.3.2 Das Sandsteinplateau

Dieser Bereich liegt im Süd-Westen des Landes, wo sich der höchsten Punkt Burkina Fasos (Ténakourou 749 m Höhe) befindet. Die sedimentäre Sandsteinbedeckung mit beeindruckenden Klippen beherrscht die Landschaft. Die Grenze zwischen dem Sandstein und dem kristallinen Fundament hat von Norden nach Süden zwei verschiedene Bereiche: In der Region von Bobo Dioulasso nach Banfora endet das Plateau mit einer tektonisch bedingten Klippe von 150 m über dem Fundament und ist Nord-Ost / Süd-West orientiert. In Richtung Süden, von Bérégadougou bis zu der Grenze von Mali, ändert sich das Aussehen des Plateaus und ist Ost-West oder Süd-Ost / Nord-Ost orientiert.



Abb. 12: Relief und Hauptflüsse von Burkina Faso (Quelle: Atlas Jeune Afrique du Continent Africain 1999)

Das Relief im Südosten bildet ein nach Süd-West / Nord-Ost orientiertes kleines Massiv, etwa in Richtung der Grenzen von Togo und Benin. Es endet mit einer vertikalen Wand von etwa einhundert Meter Höhe, die das zentrale Plateau von Gobnangou beherrscht.

2.4 Geologische und hydrogeologische Übersicht

2.4.1 Geologische Rahmenbedingungen

2.4.1.1 Allgemeines

Afrika setzt sich aus vier wichtigen Kratonen zusammen: West-Afrika-Kraton, Kongo-Kraton (Zentrum), Kalahari-Kraton (Süd) und Nilothique-Kraton (Nord) (BOHER et al. 1992). Burkina Faso ist Teil des West-Afrika-Kratons. Deswegen wird nur eine Übersicht zu diesem Kraton in dieser Arbeit gegeben.

Das West-Afrika Kraton liegt in zwei Gruppen vor: Das Reguibat-Dorsal im Norden und das Léo oder Man-Dorsal im Süden. Das Bassin von Taoudeni trennen die beiden (Abb. 13). Der größte Teil von Burkina Faso gehört zum Man- oder Léo-Dorsal.



Abb. 13: Vereinfachte geologische Karte des westafrikanischen Kratons (nach Boher et al., 1992)

Das Man-Dorsal umfasst eine Archaisch-Gruppe (den Kénéma-Man-Bereich) und eine Paleoproterozoïk-Gruppe (den Baoulé-Mossi-Bereich). Diese beiden Gruppen sind von der Sassandra-Kluft getrennt, aber in Wirklichkeit ist es nicht so klar: für die Archaisch-Gruppe werden ihre Randbereiche der Tektonik und der Granitisierung der Paleoproterozoik zugeordnet (MILESI et al., 1989; TRIBOULET & FEYBESSE 1998; EGAL et al. 2002) und einige Reliquien des Archéens (nach ca. 3150 Mio. Jahren) wurden im Birrimienmagmatisme von der Elfenbeinküste identifiziert (KOUAMELAN et al. 1997). Burkina Faso ist auch von dem Baoulé-Mossi-Bereich betroffen, der von einigen zwischen 2215 und Mio. Jahren 2260 Mio. Jahren eingerichteten Sedimentäre-Vulkan-Becken und reichlichen Granitoiden charakterisiert ist (HIRDES et al. 1992; OBERTHÜR et al. 1998; HIRDES & DAVIS 2002).

2.4.1.2 Geologischen Formationen im Arbeitsgebiet

In Burkina liegen zwei geologischen Einheiten: eine kristalline Einheit, die etwa 85% des Landes bedeckt, und eine sedimentäre, die an den West-, Nord- und Ostenteil des Landes gebunden sind CASTAING et al. 2003a und 2003b) (Abb. 14). Das Arbeitsgebiet liegt im kristallinen Bereich. Dieser wird charakterisiert durch folgende geologische Formationen:

- Sedimentär- Vulkanische Abfolge (Schiefer);
- Granite, Quarz-Granodiorite, Tonalite und Diorit-Gänge, die zum Teil als Wechselfolge auftreten, und
- Amphibolite (amphobolitfaziell überprägte Basalte) (EGAL et al. 2003a und 2003b) (Abb. 15).

a) Sedimentär-Vulkanische Abfolge

Diese Formation nimmt den größten Teil des Arbeitsgebiets (ca. 75%) ein. Sie ist sehr unterschiedlich ausgebildet. Dennoch können zwei Gesteinskategorien hervorgehoben werden: die Grauwacke- und Tuffgruppe und die Schiefergruppe (CASTAING et al. 2003a und 2003b, EGAL et al. 2003a und 2003b).

Die Grauwacken, feinkörnige Quarz-Sandsteine mit Feldspäten und Gesteinsbruchstücken, sind sichtbar an der Ortsausfahrt von Kongoussi in Richtung Tikaré. Die Tuffe sind häufig verwittert und treten oft wechsellagernd auf, allgemein ohne Schieferung. Sie bestehen aus millimetergroßen Trümmerelementen verstreut in einer reichlichen Matrix und mit geringen Quarzelementen. Sie sind morphologisch reliefbildendend.

Die anchi- bis epizonal metamorphen Schiefer treten in den Aufschlüssen meist nicht frisch auf. In Abhängigkeit der Gesteinsfestigkeit können verschiedene Bereiche mit unterschiedlichem Verwitterungsgrad beobachtet werden. Die sekundäre Gesteinsveränderung führt in der Regel zu lateritisierten bis zu kaolinitisierten Schiefern. Einige Aufschlüsse zeigen Biotithaltige Schiefer.

b) Mittelkörnige Biotit-Granite

Der Granitoid besteht aus Plagioklase, Kali-Feldspat, Quarz und Biotit. Amphibole und Muskovite sind in der Regel nicht vorhanden. Nur sehr vereinzelt wurden derartige Abweichungen von CASTAING et al: 2003a und EGAL et al. 2003b beschrieben. Der Biotit-Granit ist häufig mit den porphyroblastischen Graniten verbunden. Im Arbeitsgebiet erscheinen sie allerdings nur im Westteil (Abb. 15).

c) Quarz-Granodiorite, Tonalite und Diorite

Diese sind mittel- bis dunkelgraue, grobkörnige Plutonite mit einer starken Anisotropie. Die Granodiorite werden im Süden des Arbeitsgebietes angetroffen. Sie sind in die Sedimentär-Vulkanische Abfolge intrudiert. Sie haben allgemein eine ähnliche Mineralzusammensetzung wie die Granite aber der Quarz ist teilweise idiomorph und Amphibol sowie Muskovit sind vorhanden.

d) Amphibolite (amphobolitfaziell überprägte Basalte)

Diese Formationen entsprechen der hauptvulkanischen Einheit des Planquadrats von Kaya, in dem das Arbeitsgebiet liegt. Zusammen mit den schwach metamorphen Schiefern bilden sie den vulkanischen und sedimentären Bogen von Goren. Die Formationen bilden morphologisch niedrige Hügel, die Gesteine sind kaum verwittert und grün bis grüngrau gefärbt. Man findet sie vor allem im Osten und im Norden des Arbeitsgebiets (Abb. 15).

e) Andere geologische Formationen

Zusätzlich zu den oben beschriebenen geologischen Formationen erscheinen noch untergeordnet andere geologische Einheiten im Arbeitsgebiet:

- Die Alluvionen: Es sind Talfüllungen in den Flussbetten und bestehen aus Kies, Sand, Schluff und Ton;
- Die Cherts (Kieselschiefer): Dabei handelt es sich um in Schiefer eingefügte Eisen-(III)haltiges Silizium. Sie sind oft lateritisiert;
- Dolerit-Gänge: Man findet sie im Süden und Osten des Arbeitsgebietes in lokalen Aufschlüssen. Es sind magmatische Gesteine, die intermediär zwischen den Gabbros (körnig) und Basalten (mikrolithisch) liegen. Sie besitzen z.T. in speziellen Fällen eine Zusammensetzung von Gabbro mit Olivin, Pyroxen, Amphibol und selten Biotit (Abb. 15).



Abb. 14: Vereinfachte geologische Karte von Burkina Faso (Nach CASTAING et al. 2003b)



Abb. 15 Vereinfachte geologische Karte des Arbeitsgebietes (Nach EGAL et al. 2003b)

2.4.2 Hydrologisch-hydrogeologische Übersicht

2.4.2.1 Oberflächengewässer

a) Die Hauptflusse und ihre Einzugsgebiete

Obwohl Burkina Faso ein relatives flaches und nicht regenreiches Land ist, verfügt es über ein umfangreiches Wassernetz, vor allem in seinem südlichen Teil. Die Flüsse sind zu den folgenden wichtigsten Einzugsgebieten verbunden: Mouhoun, Nakambé, Comoé und Niger (Abb. 16).



Abb. 16: Hauptflüsse und -Einzugsgebiete von Burkina Faso (Quelle: MAHRH und IWACO, 1991)

a-1) Der Mouhoun

Als einziger permanenter Fluss mit einem Einzugsgebiet von 92.000 km² entspringt der Mouhoun auf der Nordseite des Sandstein-Verbreitungsgebietes, des Kliffs von Banfora, in einer Region, wo die Niederschläge teilweise mehr als 900 mm pro Jahr sein können (Abb. 6). Er fließt zunächst in Richtung Nord-Ost und dann plötzlich nach Süden. Der Hauptnebenfluss des Mouhoun ist der Sourou. Nach der Sourou-Mündung fließt der Mouhoun in Richtung Südost, dann nach Süden, wo er die Grenze zu Ghana bildet. Er durchquert das Land auf ca. 860 km Länge.

a-2) Der Nakambé und der Nazinon

Der Nakambé entspringt im Osten von Ouahigouya in einer Region, wo die jährliche Niederschlagsmenge etwa 500 bis 600 mm beträgt. Er hat ein Einzugsgebiet von etwa 50.000 km² und deckt die zentralen und nördlichen Teile des zentralen Plateaus ab. Er führt nur während der Regenzeit Wasser. Die erste Flussaktivierung kann zu Beginn der Regenzeit auftreten, aber die Durchflussraten sind erst ab Juli/August dauerhaft stabil. Das Arbeitsgebiet liegt nördlich dieses Einzugsgebietes (Abb. 16).

Der Nazinon und sein Hauptnebenfluss, der Sissili, drainieren den südwestlichen Teil des zentralen Plateaus. Sie haben ein Einzugsgebiet von etwa 20.000 km². Ihre Wasserführung ist der des Nakambé sehr ähnlich.

a-3) Das Einzugsgebiet des Comoés

Der Comoé drainiert den Südwestteil des Landes und hat ein Einzugsgebiet von 18.000 km². Er entspringt in den Klippen von Banfora. Sein durch Fälle unterbrochener Lauf verbindet bei permanentem Abfluss die am Fuße des Kliffs von Banfora liegenden Teiche, unter Anderem den See von Tingréla. Die relativ reichlichen Niederschläge in diesen Regionen verleihen den dort liegenden Flüssen eine deutliche Soudan-Rate. Eine Erhöhung der Fließleistung ist ab Juni zu sehen, die im August/September einen noch deutlicheren Anstieg zeigt.

a-4) Das Einzugsgebiet des Nigers

Der Niger fließt im Nordosten und Osten des Landes und hat ein Einzugsgebiet von 72.000 km². Vom Niger zweigen Flüsse (Béli und Gorouol) nach Burkina Faso ab und versiegen im Land (s Abb. 16). In Abhängigkeit von der Flusswasserspende des Nigers und Starkniederschlägen kann es zu bedeutenden Hochwässern in Burkina kommen. Dagegen haben die Soudano-Sahel-Abflüsse (Faga, Sirba, Bonsoaga, Dyamongou und Tapoa) eine regulärere Fließrate. Diese Flüsse bilden eine Reihe von Teichen.

b) Natürlichen Seen

Neben den Flüssen gibt es geschlossene Einzugsgebiete, die zahlreiche unterschiedlich große Seen ohne Abflüsse versorgen und in Niederungen liegen. Die Beispiele dafür sind: Die Seen von Tingréla, Bam und Dem, die kleinen Seen von Oursi, Béli, Yomboli und Markoye. Derjenige, der neben dem Arbeitsgebiet liegt, ist der See Bam (Lac Bam).

c) Stauseen

In Burkina Faso wurden im Jahr 1999 mehr als 1000 Staudämme und andere künstliche Oberflächenwasserspeicher gezählt. Für 402 davon konnte keine Speicherkapazität festgestellt werden; 591 haben eine Speicherkapazität zwischen 1000 m³ und 1 Mio. m³, 72 zwischen 1 und 5 Mio. m³, 12 zwischen 5 und 10 Mio. m³ und 15 haben eine Speicherkapazität von mehr als 10 Mio. m³. Darin sind die folgenden Staudämme mit einer strategischen Nutzung (Stromversor-

gung, Trinkwasserversorgung, Landwirtschaft) enthalten: Kompienga, Bagré, Ziga, Loumbila, Ouagadougou und Sourou (Abb. 17 und Tabelle 1). Andere Nutzungen der Staudämme in Burkina Faso sind unter anderem Fischerei, landwirtschaftliche Viehhaltung und Bewässerung. Nennenswerte Neubauten bis zur Gegenwart sind nicht bekannt.



Abb. 17: Stauseenverteilung in Burkina Faso, ihre Volumina und Anzahl im Bezug zur Lage innerhalb der Drainagegebiete der größten Flüsse (Quelle: MAHRH/DGIRH/DEIE/SIE 2003)

Staudämme	Mögliche Speicherinhalt (Mio. m ³)	Prioritäre Nutzungen		
Bagré	1700	Landwirtschaft und Stromversorgung		
Kompienga	2050	Stromversorgung		
Loumbila	42,2	Trinkwasserversorgung		
Ziga	200	Trinkwasserversorgung		
Ouagadougou	6,87	Trinkwasserversorgung		
(2+3)				
Seytenga	7,3	Stromversorgung und Viehwasserversor-		
		gung		
Sourou in Yaran	608	Landwirtschaft		

Tabelle 1: Zusammenfassung von einigen mit strategischen Nutzungen Stauseen in Burkina Faso (Quelle: http://www.eauburkina.bf)

Im Department Tikaré liegen zurzeit 20 Stauseen mit einer Speicherkapazität zwischen 9.000 m³ (Kilou) und 2.101.000 (Koulniéré) (Tabelle 2). Die Hauptnutzung dieser Seen sind Fischerei und Landwirtschaft.

Drov	Dep.	Dorf	Speichername	Koordinaten		Baujahr	Fläche	Kanz
FIOV.				Länge	Breite	Баијаш	(ha)	$(x10^3 m^3)$
		Baribci	Baripcé	01/41/19-W	13/19/32-N	1975	6	20
		Dafiré					Unb.	
		(Daflé)	Dafiré	01/43/04-W	13/20/31-N	1983		60
		Hamdallaye	Hamdallaye	01/48/12-W	13/23/03-N	1976	Unb.	60
		Horé	Temporé	01/41/33-W	13/15/20-N	1979	Unb.	200
		Ipala	Ipala	01/46/56-W	13/18/42-N	1982	4	75
		Kilou	Bona	01/39/52-W	13/17/19-N	1987	10	95
		Kilou	Kilou	01/40/01-W	13/19/05-N	1978	5	9
		Kouliniéré	Koulniéré	01/42/05-W	13/14/28-N	1988	Unb.	2100
	Tikaré	Oui	Oui	01/48/24-W	13/25/33-N	1983	4	76
Dom		Rouni	Rouni	01/45/24-W	13/18/12-N	1986	Unb.	40
Bam		Sarkounga	Sarkounga	01/48/10-W	13/19/04-N	1984	Unb.	400
		Tanhoka	Dwaguin	01/44/34-W	13/18/49-N	1948	20	250
		Tikaré	Bagrin	01/42/51-W	13/18/33-N	1986	6	60
		Tikaré	Baloum	01/42/28-W	13/18/06-N	1986	4	60
		Tikaré	Tangzougou	01/42/49-W	13/15/14-N	1977	2	8
		Tikaré	Widi	01/42/35-W	13/15/51-N	1980	10	80
		Tikaré	Koulniéré	01/44/00-W	13/14/00-N	1988	154	2191
		Tikaré	Tikaré	01/43/20-W	13/17/40-N	1996	45	901
		Tirbou	Tirbou	01/48/41-W	13/24/13-N	1986	4	40
						Nicht	Unb.	Unb.
		Wampèga	Wampèga	01/39/01-W	13/20/53-N	gegeben		

Tabelle 2: Stauseen im Department Tikaré (Quelle: DGH/BEWACO 1999)

d) Gewässer des Arbeitsgebietes

Das Arbeitsgebiet, das nur über kleine Nebenflüsse verfügt, liegt im Einzugsgebiet des Nakambé (Abb. 18a). Die kleinen Flüsse führen nur bei Niederschlagsereignissen Wasser, während der Nakambé oder der Nazinon in der Regenzeit permanent wasserführend sind. Die Flüsse des Einzugsgebietes im Arbeitsgebiet wurden auf den Abb. 18b dargestellt. Es zeigt sich, dass es zwischen kartographischer Darstellung und ASTER-Daten Abweichungen existieren. Die auf der Karte gezeichneten Flüsse zeigen eine umfangreiche Dichte als die auf dem Satellitenbild. Diese Unterschiede sind sicherlich darauf zurückzuführen, dass einige Flüsse auf der Karte total ausgetrocknet sind und nicht mehr auf dem Satellitenbild, das eine Momentaufnahme ist, abgebildet wird. Dennoch erlauben die Daten aus diesen beiden Quellen die Charakterisierung von drei Unter-Einzugsgebieten in dem Arbeitsgebiet (Abb. 18b):

- Das erste umfasst den Nordost-Teil mit einer Fläche von 130.955.269 m²;
- Das zweite umfasst den zentralen Bereich und ist mit Abstand das breiteste mit einer Fläche von 746.655.667 m²;
- Das dritte Unter-Einzugsgebiet umfasst die Südwest-Zone des Arbeitsgebietes und ist breiter als das erste. Es hat eine Fläche von 248.439.485 m².
Die oben genannten Flächen wurden aus den Satellitenbilddaten entnommen. Im Folgenden werden nur über die auf dem Satellitenbild gezeichneten Flüssen und Einzugsgebieten benutzt.



Abb. 18 a: Teil des Einzugsgebietes von Nakambé (Auszug aus der Abbildung 16)



Abb. 18b: Einzugsgebiet des Untersuchungsgebietes

2.4.2.2 Grundwasser

a) Allgemeines

Die kristallinen geologischen Formationen im Arbeitsgebiet haben unterschiedliche Porositäten und Durchlässigkeiten. Während die oberflächennah anstehende Tiefengesteine (Granit, Granodiorit) kompakt sind und keine hydrogeologisch wirksame Porosität haben (< 1%, daher wasserdicht sind) (BANTON & BANGOY 1997) (mit Ausnahme des primären Kluftgefüges = Kleinspaltengefüge), können eruptive Gesteine (z.B. Basalt) dagegen über Vakuoleporosität (jedoch nicht hydraulisch aktiv) und Rissporositäten verfügen. Für die Schiefer kann der Metamorphismus eine Rissporosität (Schieferungsebene) schaffen (BANTON & BANGOY 1997). Um über eine bessere Porosität und Durchlässigkeit zu verfügen, sind einige spätere Phänomene für die kristallinen Gesteine notwendig. Für BANTON & BANGOY (1997) verbessern Zerklüftung und Frakturbildung, die aus tektonischen Deformationen resultieren. Auch die Verwitterung verbessert die Durchlässigkeit durch Vergrößerung der Porosität. Um gute Grundwasserleiter zu bilden, müssen die kristallinen Gesteine über einen hohen Frakturbildungs- und Verwitterungszustand verfügen. Die Wasser führenden Bereiche in den kristallinen Formationen sind daher die Kluft-, Zerrüttungs- und Verwitterungszonen.

Das konzeptionelle Grundwassermodell zeigt das folgende Grundwasserleitersystem (DE-TAY et al. 1989): Ein System von semipermeabler Abdeckung (Verwitterungszone), die hauptsächlich zwischenspeichernde Funktion hat. Sie wird durch die Niederschlagsinfiltration versorgt. Darunter folgt ein Riss- oder Frakturgrundwasserleiter. Er hat speichernde und eine leitende Funktion. Die Kapazität der Grundwasserleiter in kristallinen Bereichen ist daher von den tektonischen Ereignissen, die diskontinuierlich abgelaufen sind, abhängig.

b) Identifizierung der Grundwasserleiter

Es werden zwei Aquifere differenziert: Der erste oberflächennah und abhängig von der Geomorphologie und den Niederschlägen. Ein zweiter, tiefer liegender Aquifer (SAVADOGO 1984) oft von einem Aquitard von oberen getrennt und unterliegt aber langfristigen Schwankungen des Grundwasserreservoires.

b-1) Die oberflächennahen Grundwasserleiter

Hier hat man die Laterit-Zone und das Alluvium:

- Der Laterit ist gegenüber dem alluvialen Schwemmmaterialien der bessere Grundwasserspeicher und –leiter des Verwitterungsprofils. Er verfügt über ein Waben-Gefüge mit zahlreichen Termitenkanälen. Dieses Wasserreservoir ist direkt abhängig von der Niederschlagsmenge und der Grundwassergewinnung (Brunnen);
- Das Alluvium, das an Flussbetten gebunden ist, kann Grundwasserleiter sein, wenn sie porös (Porenaquifer) sind und eine Mächtigkeit von > zehn Metern haben. Die Brunnen dort sind meistens nur während der Regenzeit nutzbar. Es treten auch manchmal temporäre

Wasseraustritte in Grundwasser-Entspannungsbereichen in Form von Sümpfen auf, die sowohl Grundwasserspeisung aus alluvialen Grundwasserleitern aber auch aus Laterit haben können.

b-2) Die tiefen Grundwasserleiter

Diese Kategorie von Grundwasserleitern hat einen Zusammenhang mit den Frakturbereichen (Klüftigkeit, Störungen, Störungszonen) des Festgesteins (Sockel) und befindet sich in zwei Ebenen:

- Der verwitterte Sockel, der die Struktur des Ausgangsgesteins hat. Es bildet die Vergrusungszone, wo die physikalisch-chemische Verwitterung durch eine Auflösung des Muttergesteins charakterisiert ist. Der Grundwasserleiter ist für eine umfassendere Nutzung nur bedingt geeignet.
- Das Festgestein mit Frakturen (Klüfte, Störungen, Störungszonen), das durch diverse tektonische Ereignisse, die das Muttergestein zertrümmern, entstand.



Abb. 19: Alterationsprofil des Granites und schematische Darstellung der Grundwasserleiter in kristallinen Gebieten (nach SAVADOGO, 1984)

Theoretisch existieren drei Grundwasserleiter: der Laterit- und Alluviumgrundwasserleiter, der verwitterte Sockelgrundwasserleiter und der Kluftgrundwasserleiter (Abb. 19), wobei die beiden letzten in direkter hydraulischer Verbindung stehen können.

In den kristallinen Gebieten sind auch die Gänge (Dyke) wichtig für die Hydrogeologie. Sie haben im Bereich der Salbänder Diskontinuitäten, die den Grundwasserfluss in kristallinen Gesteinen ermöglichen können. Deswegen müssen sie bei einer Grundwasserbilanzierung berücksichtig werden (s. auch NIKIEMA [2002]).

2.5 Fragestellung, Zielsetzung und allgemeine Methodik

Aus den Grundlagen setzt dann die Stabilisierung der Wasserversorgung im Untersuchungsgebiet folgende Fragestellung:

- 1. Welchen Umfang haben natürliche Grundwasserschwankungen in derzeit genutzten Grundwasserleiter (Laterit) und was beeinflusst das?
- 2. Welche Auswege der Stabilisierung und Grund- und Oberflächenwasserversorgung sind denkbar?
- 3. Was ist mit der Qualität der Oberflächenwasserspeichern?
- 4. Wie ist die Beschaffenheit der Wasserressourcen?

Die erste Antwort ist die ausgewogene Nutzung der tiefen Grundwasserleiter um die Abhängigkeit vom Niederschlag zu vermindern. Um eine derartigen Prognose und Nutzung zu ermöglichen, sind unterschiedliche wissenschaftliche Untersuchungstechniken (Fernerkundung, Geophysik) einzusetzen.

Um die verbleibenden Fragen eine Antwort zu geben, hat die Untersuchung folgende Ziele:

- 1) Charakterisierung der Lineationen und Frakturen, ihre Längen und Streichen und Ermittlung der Nutzung von ASTER-Szenen in semi-ariden Gebieten von Burkina Faso;
- 2) Charakterisierung der Grundwasserpotentialgebiete;
- Charakterisierung der Probleme des Stausees von Tikaré, Definierung von Sanierungslösungen und Herstellung eines Staumauermodells f
 ür Neubau zuk
 ünftiger
 ähnlicher Stauseen;
- 4) Charakterisierung der Wasserqualität und –Chemie, und Isotopenverhältnisse vom Sauerstoff und Wasserstoff in der Umgebung des Stausees von Tikaré.

Um die oben genannten Ziele zu erreichen, werden folgende allgemeine Methoden eingesetzt:

- Literaturrecherche: Diese wurde in der vorliegenden Arbeit genutzt um die Grundlagen von Burkina Faso und dem Arbeitsgebiet, und eine Übersicht über das Thema der Arbeit zu bekommen;
- 2) Die Verwendung einer ASTER-Szene durch ERDAS IMAGINE® und ArcGIS® für die Untersuchung der Lineationen und die Charakterisierung der Grundwasserpotentialgebiete;

- Geologische und hydrogeologische Untersuchung des Standortes des Stausees von Tikaré während der Trockenzeit und der Regenzeit durch drei Feldeinsätze (Dezember 2005 bis Februar 2006, April 2007 und September 2007);
- Zwei Probenahmekampagnen (Trocken- und Regenzeit) und Vor-Ort-Messungen von Grund- und Oberflächenwasser für die Untersuchung der physikalisch-chemischen Parameter, Haupt-Ionen, Spurenelemente und Isotopenverhältnisse von Sauerstoff und Wasserstoff;
- 5) Vergleichende und korrelative Analyse der Laborergebnisse der Haupt-Ionen und Spurenelemente;

Nach Bemerkung (N.B.): Es wird darauf hingewiesen, dass eine detaillierte Methodik über jeden Teil der Arbeit im entsprechenden Kapitel beschrieben wird.

Entsprechend der Zielsetzung und der Methodik und nach der Einleitung und den Kriterien der Standortwahl wurden die nächsten Kapitel wie folgend erteilt:

- Regionale Einordnung des Untersuchungsgebietes
 - a. Klima und Wetter;
 - b. Geologische, hydrologische und hydrogeologische Übersicht;
- Methoden und Ergebnisse
 - a. Charakterisierung der Grundwasserpotentialgebiete
 - b. Charakterisierung der technischen Parameter der Brunnen und der Bohrungen
 - c. Qualitative Untersuchung des Stausees von Tikaré;
 - d. Hydrochemische und isotopische Untersuchung der Wasserressourcen;
- Schlussfolgerungen und Perspektiven.

3. Methoden und Ergebnisse

3.1 Charakterisierung der Grundwasserpotentialgebiete

3.1.1 Lineationstanalyse

3.1.1.1 Definition und Auswahl der Daten

In Burkina Faso wird für die "traditionelle" wissenschaftliche Untersuchung bezüglich der Ansiedlung der Bohrungen hauptsächlich Geophysik, besonders die elektrische Widerstandsmethode, angewandt. In einigen Fällen wird sogar überhaupt keine geophysikalische Voruntersuchung durchgeführt. In der Tat werden oft nur Brunnenbauer (empirische Methoden) durch bestimmte Bohrunternehmen oder private Personen (Bohrungsbesitzer) eingesetzt, um Kosten zu sparen. Als Folge sind die meisten Bohrungen in diesem Fall nicht produktiv. SAVADOGO et al. (1996) haben die Anwendung der Fernerkundung und der Geophysik im Rahmen der Durchführung von hohen Förderleistungsbohrungen nacheinander vorgeschlagen. Diese Arbeit soll ein neues und ergänzendes Vorgehen darstellen, das vorher die potentiell geeigneten Gebiete für die Durchführung von Bohrungen durch die Analyse und Interpretation von Fernerkundungsdaten und verschiedenen Karten aber auch gezielten Geländeuntersuchungen und -überprüfungen charakterisiert. Aus diesem Grund wird es auf die Lineationsdichte und die Analyse der Korrelationen der Lineationsdichte mit den bereits vorhandenen Bohrungen fokussiert. Dabei werden AS-TER-Daten in dem Bereich des sehr nahen Infrarots (VNIR) bei der Identifizierung von potenziell geeigneten Gebieten genutzt. Sie sollen einen ersten Anhaltspunkt für die Durchführung der künftigen Entwicklung der Grundwassergewinnung sein. ASTER ist ein Instrument zur Bilderfassung, das 1999 von der NASA und dem japanischen Ministerium für internationalen Handel und Industrie, und dem japanischen Zentrum für die Analyse von terrestrischen Fernerkundungsdaten (ERSDAC) gestartet wurde. ASTER ist ein multispektraler Sensor mit 14 Kanälen und einer hohen Auflösung, der mit drei verschiedenen Instrumenten in dem sichtbaren und nahen Infrarotbereich (VNIR), dem nahen Infrarot (SWIR) und dem thermischen Infrarot (TIR) von elektromagnetischen Energiegebieten funktioniert (MATHER 2004) (Tabelle 3).

	Spektrums	Kanalanzahl	Wellenlänge	Räumliche Auflö-
				sung
Spektrale Abdeckung	VNIR	3	0,52-0,86 µm	15 m
	SWIR	6	$1,6-2,43 \ \mu m$	30 m
	TIR	5	8,125 - 11,65	90 m
			μm	

Tabelle 3: Charakteristiken ASTER-Daten

Breite: 60km; Winkel : ±8,55°; Winkel VNIR: ±24°; Zeitliche Auflösung: 16 Tage

Die Lineamente, die die Grundlage dieser Arbeit darstellen, sind lineare Strukturen, die sich von dem Hintergrund und den angrenzenden Elementen eines Satellitenbildes unterscheiden, und unterirdische Phänomene reflektieren (O'LEARY 1976). SABINS (1987) definiert die Lineamente als +/- gerade lineare Strukturen, die wahrscheinlich ein sub-oberflächliches Phänomen unterschiedlich von den benachbarten Strukturen anzeigen. Für CAMPBELL (1987) nennen die Geologen "Lineament" alle Linien, die eine vermeintliche geologische Herkunft haben und auf Fernerkundungsbildern sichtbar sind. Wichtig ist allerdings, dass zu berücksichtigen ist, dass nur steil stehende (steiler 50°) Bruchzonen der Erde als +/- gerade Linie abgebildet werden können. Ausgehend davon, dass alle Klüfte oder Frakturen nicht über einen topographischen Ausdruck verfügen, muss man sie durch Elemente, die sie charakterisieren, festlegen. In Gebieten mit geringen Faltungen oder horizontalen Stratigraphien sind die Lineamente mit den Frakturen und Klüften verbunden, und ihre Orientierung und Zahl stellen einen Überblick über die Fraktur der Gesteine dar (ARLEGUI & SORIANO 1998, CORTES et al. 1998). Ungeachtet der Vegetation sind die Lineamente, die topographischen und geomorphologischen Elemente, die oberflächlichen Flusssysteme und die Landnutzung durch die linearen Ton- und Pixelveränderungen auf den Satelliten- und Luftbildern charakterisiert.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde aber nur ein Satellitendaten verwendet. Da diese mit wechselnden Intervallen von Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums erlangt werden können, haben die Satelliten-FE-Daten dadurch die Möglichkeit bessere Informationen zu produzieren als die traditionellen Luftbilder (CASAS et al. 1999). Als Satellitendaten wurde AS-TER nicht nur wegen der geringeren Kosten (im Vergleich zu Landsat und SPOT), sondern auch wegen der guten räumlichen (15 m) und zeitlichen Auflösung (16 Tage Überflugsintervall über den gleichen Punkt) ausgewählt. Zu Beginn der Arbeit (April 2005) war es nicht möglich, Szenen mit guter Qualität über diesen Zeitraum für das Arbeitsgebiet zu finden. Deswegen wurde die jüngste, die am 15. Oktober 2000 (in der Trockenzeit) aufgenommen wurde, selektiert.

3.1.1.2 Digitale Bildverarbeitung

Die ASTER-Szene wurde in ERDAS Imagine® für die benötigten digitalen Verarbeitungen importiert. Zu diesem Zweck wurde beschlossen, nur mit dem VNIR zu arbeiten, um seine Anwendbarkeit für die Charakterisierung von Lineationen für die Nutzung von Grundwasser zu untersuchen.

Da die Szene die Identifizierung der linearen Strukturen ermöglichte, wurden nur folgende Bearbeitungen durchgeführt:

- Reorganisation der Reihenfolge der Kanäle in 3-2-1;
- Wahl des Kontrasts.

Nach diesen Operationen wurde das Bild in ArcGis® für die Zeichnung der Lineationen exportiert.



Abb. 20: Benutzte ASTER-Szene in der Konfiguration 3-2-1 (VNIR)

3.1.1.3 Zeichnung der Lineationen und ihrer Dichtegebiete

Nachdem das ASTER-Bild in ArcGis® importiert worden war, wurde eine Geodatabase, die die geographischen Merkmale der Szene hat, erstellt. Die gewählte geometrische Eigenschaft für diese Datei ist die Linie, da die Analyse sich nur auf die geraden linearen oder schwach kurvenförmigen Strukturen bezieht. Die folgende Darstellung beschreibt die Methodik der gesamten Bildverarbeitung.

Die Lineationen wurden basierend auf dem "on screen"-Prinzip (direkt auf dem Bildschirm des Computers) und die zuvor gegebenen Definitionen und Charakteristiken gezeichnet. Das Bearbeitungswerkzeug von ArcGis® wurde zu diesem Zweck verwendet. Das Prinzip des "onscreen" wurde bevorzugt, da es die Möglichkeit bietet, die gewünschten Ansichten und Zoome zu bekommen, um die verschiedenen Elemente auf dem Bild genau zu charakterisieren. Trotzdem wurden teilweise Abschnitte des Bildes auf Papier gedruckt, wenn es schwierig war, die Charakterisierung der linearen Strukturen durchzuführen.



Abb. 21: Arbeitschritte der Digitalbildverarbeitung

Auf die gleiche Weise sind die Straßen und ländlichen Wege gezeichnet worden. Diese Arbeit (Zeichnung der Straßen) wurde auch mit Hilfe der topographischen Karte, auf der sie sehr häufig zu sehen sind, durchgeführt. Dies war notwendig, um jede Verwechslung zwischen Lineationen und Straßen und Wegen zu vermeiden. Damit wurden einige Fehler verhindert. Es wurden 1698 Lineationen gezeichnet und die Abb. 22 stellt das Ergebnis dar.

Es ist zu beachten, dass in dieser Arbeit ein konservativer Ansatz gewählt wurde, wobei nur eindeutig identifizierbare und sehr lange Lineationen gezeichnet wurden. Es wurde daher auf die kilometrischen und multikilometrischen Lineationen (Megalineamente genannt) fokussiert.



Abb. 22: Lineationskarte des Arbeitsgebietes

3.1.1.4 Analyse der Lineationslänge

Die Länge einer Lineation ist durch seine längslaufende Erweiterung definiert. In dem Dokument werden beide Begriffe verwendet. Die Charakterisierung der Lineations- oder Frakturlänge ist sehr wichtig, da diese auch seine Tiefe, und damit seine Versorgung mit Grundwasser voraussetzt. Nach ENGALENC (1978) gilt, je länger eine Kluft ist, desto tiefer ist sie auch. Sie ist somit in der Lage, die tieferen Grundwasserleiter zu erfassen.

Die Analyse der Lineationslängen in dieser Untersuchung wird vor allem statistisch durchgeführt und hat folgende Ziele:

- die Anwendbarkeit der ASTER in dem Untersuchungsgebiet des Grundwassers festzustellen;
- die verschiedenen Längsklassen in dem Arbeitsgebiet zu ermitteln;
- die Bestimmung der Korrelationen Lineationslänge technische Parameter der Bohrung.

Für diese Analyse der Längen wurden die Lineationen in verschiedene Klassen geteilt (Abb. 23). Der gewählte Klassenabstand ist 500 m, aber in diesem Kapitel wird der 1000 m Abstand genutzt. Um jeden Vergleich zu ermöglichen, wurde eine Abbildung der Häufigkeit der Klassen mit 500 m Abstand dargestellt.



Abb. 23: Häufigkeit der Längenklassen a) 1000m-Abstände und b) 500 m-Abstände

Die ermittelten Längen liegen zwischen 600 und knapp über 10000 m mit einer durchschnittlichen Länge von etwa 2500 m. Bezüglich der Häufigkeit sind die Lineationen mit einer Länge zwischen 1000 und 3000 m am stärksten vertreten. Die Häufigkeit liegt bei etwa 35% für jede Klasse 1001-2000 m und 2001-3000 m. Die am wenigsten häufigen Klassen sind die Lineationen kürzer als 1000 m und über 5000 m. Sie weisen jeweils eine Häufigkeit von 2,32% und ca. 3,80% auf (Abb. 23a). Dass die Lineationen kürzer als 1000 m am wenigsten vertreten sind, liegt wahrscheinlich an der Fokussierung auf die Charakterisierung der Megalineationen (>1000 m).

3.1.1.5 Analyse der Orientierungen der Lineationen

Die Streichrichtung einer Lineation ist die Schnittkante zwischen dem tektonischen Element und der Geländeoberfläche, die eine +/- horizontalen Linie bildet. Sie variiert zwischen 0° und 180°. Eine Lineation mit beispielsweise einer Orientierung von 90° ist eine Nord-Süd (Norden) orientierten Lineation. Ein, das über eine Orientierung von 0° oder 180° verfügt, hat eine Ost-West- oder West-Ost-Orientierung (im Vergleich zum Norden). Aus diesem Grund ist die Analyse der Lineationsorientierungen sehr wichtig, denn sie ermöglicht auf dem Gelände eine Orientierung der geologischen Diskontinuitäten (Frakturen, Klüfte), die für die Ansiedlung von Bohrungen in kristallinen Gebieten erforderlich sind, zu ermitteln. Hinsichtlich der oberflächlichen Wasserspeicher kann die Orientierung der Lineationen/Frakturen oder die Schieferung ihre Auswirkungen auf dem Deich oder der gesamten Struktur haben.

a) Bestimmung der Lineationsorientierungen

Die Bestimmung der Orientierung der Lineationen wurde auch, wie bei ihrer Zeichnung, mit Hilfe von ArcGis durchgeführt. Das Prinzip besteht darin, zwei Punkte der Lineation, aus denen die Richtung bestimmt wird, zu nehmen. Falls eine Lineation nicht komplett gerade ist, wird eine durchschnittliche Richtung errechnet.

b) Statistische Analyse der Orientierungsklassen der Lineationen

Für eine bessere Ergebnisanalyse wurden die Lineationsorientierungen in verschiedenen Klassen mit 10°-Abstand verteilt, und für jede Klasse die Häufigkeit bestimmt. Achtzehn Klassen wurden festgelegt.

Ab der Analyse stehen die folgenden Schlussfolgerungen fest:

a) Keine Klasse in der Konfiguration 10°-Abstand erreicht 10% der gesamten Lineationen. Dies könnte eine Folge der hohen Klassenanzahl sein. Trotzdem ist es möglich die folgenden Größenordnungen zu charakterisieren:

- die häufigsten Orientierungsklassen sind Richtungen, die Stellungen sind die von 150-160°, 50°-70°, 30°-40°, und 110°-120°;
- die am wenigsten repräsentierten Richtungen sind 10°-20°, 80°-90° und 160°-170° (Abb. 24a);



Abb. 24: Rosediagramm (Streichen) der Lineationen a) 10° Abstände und b) 20° Abstände

b) Aus den vorherigen Schlussfolgerungen wurden neue Klassen für Vergleich mit 20°-Intervall festgelegt (Abb. 24b). Nach der Analyse war aber keine große Veränderung, z.B. neue dominierende Orientierungstendenzen, für die Häufigkeiten zu erkennen. Keine logische Erklärung konnte für die Lineationsorientierung gefunden werden. Das wird Gegenstand zukünftiger Forschung sein.

3.1.1.6 Orientierungen der Lineationen der Längenklassen

Diese Analyse hat die Charakterisierung der Lineationsorientierungen innerhalb der Längenklassen zum Ziel. Das könnte wichtig sein, wenn nur Lineationen mit gewissen Längen bevorzugt studiert werden. Die einzelnen verwendeten Klassen sind die gleichen wie in den vorhergehenden Kapiteln.

a) Längenklassen von weniger als 1000 m bis 3000 m

Die Lineationen mit einer Länge von weniger als 1000 m zeigen eine bevorzugte Orientierung zwischen 30° und 70° mit einer Dominanz der Orientierungsklasse von 30°-40° (22%) (Abb. 25a). In dieser Längenklasse sind die Richtungen 0°-30°, 80°-90° und 110° bis 180° nicht vorhanden. Diese oben genannten Klassen sind daher nicht in einer Studie über die Lineationen oder Frakturen mit einer Länge von weniger als 1000 m zu berücksichtigen.

Für die Lineationen der Längenklasse 1000 - 1500 m (Abb. 25b) ist die Orientierungsklasse 40°-50° die vorherrschende mit einer Häufigkeit von rund 14% der Lineationen dieser Längenklasse. Im Vergleich zu der Längenklasse von weniger als 100 m ist diese Dominanz nicht so charakteristisch, da andere repräsentative Orientierungsklassen (10°-30°, 50°-80°, 110°-180°) vorhanden sind. Die Orientierungsklassen 80°-90° und 90°-100° (Nord-Süd) existieren nicht.

Die Lineationen, die zu der Längenklasse 1500 - 2000 m gehören, zeichnen sich durch eine Dominanz der Orientierungsklassen 60°-70° und 130°-140° aus (Abb. 25c). Diese beiden Klassen vertreten zusammen mehr als 20% der Lineationen mit einer Länge zwischen 1500 - 2000 m. Im Gegensatz zu den beiden vorherigen Längenklassen sind Lineationen mit einer Orientierung von 80°-90° in dieser Längenklasse vorhanden.

Die Lineationen mit einer Länge von 2000 bis 2500 m charakterisieren sich durch vier repräsentative Orientierungsklassen ($40^{\circ}-50^{\circ}$, $60^{\circ}-70^{\circ}$, $110^{\circ}-120^{\circ}$ und $140^{\circ}-160^{\circ}$), die rund 31%der Lineationen dieser Längenklasse vertreten (Abb. 25d). Die Lineationen mit einer Orientierung von $60^{\circ}-70^{\circ}$ zeigen die die gleiche Häufigkeit (9%) wie in die Längenklasse 1500 - 2000 m.

Die Orientierungsklasse 50°-60° ist die häufigste bei den Lineationen mit einer Länge zwischen 2500 und 3000 m (ca. 11%) (Abb. 25e). Selbst wenn diese Längenklasse die anderen Orientierungsklassen enthält, ist sie nicht wirklich bemerkenswert.

b) Längenklassen von 3000m bis 6000 m

Die Längenklassen 3000 - 3500 m (Abb. 25f) und 3500 - 4000 m (Abb. 25g) zeichnen sich jeweils durch zwei wichtige Orientierungen: 60° - 70° und 150° - 160° für die erste, und 50° - 60° und 150° - 160° für die zweite. Der wichtigste Unterschied zwischen den Orientierungen dieser beiden Längenklassen ist, dass die Richtung 0° - 10° für die Lineationen mit einer Länge von 3500 - 4000 m fast nicht vorhanden ist, während sie in der Längenklasse 3000 - 3500 m auftritt. Eine Ähnlichkeit ergibt sich auch zwischen den Längenklassen 2500 - 3000 m und 3500 - 4000 m, wo die Orientierungsklasse 50° - 60° die häufigste ist.

Die Klasse 4000 - 4500 m (Abb. 25h) weist keine bevorzugte Orientierung aus. Es ist nur zu beachten, dass die Orientierungsklasse 70°-80° fast vollständig.

Die Längenklasse 4500 - 5000 m weist zwei wichtige Orientierungsklassen auf: $150^{\circ}-160^{\circ}$ (12%) und $170^{\circ}-180^{\circ}$ (9%) (Abb. 25i). Wie bei der Klasse 1000 - 1500 m gibt es quasi keine Lineation mit einer Orientierung von 90°-100°.

Bei der folgenden Klasse, 5000 - 5500 m, sind die Orientierungen $30^{\circ}-40^{\circ}$ (12%), 120°-130° (10%) und 140°-150° (10%) die häufigsten (Abb. 25j). Diese Klasse weist eine Ähnlichkeit mit der Klasse 2000 - 2500 m, wo die Orientierung 150°-150° eine der wichtigsten ist. Die Ähnlichkeit mit der Klasse <1000 m liegt bei der Richtung 30°-40°.

In der Längenklasse 5500 - 6000 m (Abb. 25k) dominiert die Orientierung 70°-80° (20%). Diese Längeklasse ist die einzige, wo diese Orientierungsklasse am häufigsten ist. Bei den anderen Längenklassen ist die 70°-80°-Orientierung entweder nicht vorhanden, oder geringfügig.

c) Längenklassen zwischen 6000 bis über 9000 m

Die Lineationslängen von 6000 bis 6500 m sind durch die Präferenzorientierungsklassen 0° - 10° und 150° - 160° charakterisiert (Abb. 251). Diese beiden Klassen vertreten zusammen mehr als 30% der Lineationen mit einer Länge zwischen 6000 und 6500 m. Neben diesen beiden Orientierungsklassen scheint auch die Richtung 50°-60° relativ häufig zu sein (mehr als 10%).

Was die Klassenlängen 6500 - 7000 m (Abb. 25m) und 7000 - 7500 m (Abb. 25n) betrifft, sind die häufigsten Orientierungen jeweils $30^{\circ}-40^{\circ}$ (17%), und $150^{\circ}-160^{\circ}$ (25%). Bei der Klasse 6500 - 7000 m ist auch die Orientierung $110^{\circ}-110^{\circ}$ relativ häufig, da sie 15% erreicht. Ebenso weist diese Klasse eine Ähnlichkeit mit den Klassenlängen <1000 m und 5000 - 5500 m, wo die Orientierung $30^{\circ}-40^{\circ}$ entweder die häufigste ist, oder eine der häufigsten. Für Lineationslängen zwischen 7000 und 7500 m zeigen sie ein wenig Ähnlichkeit mit den Klassen 4500 - 5000 m, 5000 - 5500 und 6000 - 6500 m, wo die häufigste Lineationsorientierung $150^{\circ}-160^{\circ}$ ist.

Die Lineationslängen von 7500 bis 8000 m zeichnen sich durch eine stärkere Präsenz der Orientierungsklassen $30^{\circ}-40^{\circ}$ (10%), $110^{\circ}-120^{\circ}$ (15%), $120^{\circ}-130^{\circ}$ (15%) und $150^{\circ}-160^{\circ}$ (15%) aus (Abb. 250). Im Gegensatz weisen die Lineationen der Längenklasse 8000 - 8500 m die Richtung $170^{\circ}-180^{\circ}$ (24%) als die häufigste aus. Hinzu kommt die Klasse $80^{\circ}-90^{\circ}$ (15%) (Abb. 25p).

Bezüglich der Lineationen mit einer Länge von 8500 bis 9000 m ist die meist vorhandene Orientierungsklasse die 150°-160° (35%) (Abb. 25q), und das wie im Fall der Längenklassen 4500 - 5000 m, 6000 - 6500 m, und 7000 - 7500 m. Die anderen Richtungen sind praktisch nicht vertreten.

N.B. Nur hier überschritt eine Orientierungsklasse die 30%-Häufigkeitsgrenze.

Die dominierende Orientierungsklasse für die Lineationslänge von mehr als 9000 m (Abb. 25r) ist die 140°-150°, die etwa 16% entspricht. Andere sekundäre Orientierungen sind getroffen. Es handelt sich um die Klassen 50°-60°, 60°-70°, und 110°-120°.





















Abb.25 a) bis r): Rosediagramme der verschiedenen Längenklassen

3.1.1.7 Charakterisierung der Lineationslängen in den Orientierungsklassen

Die Orientierungsklassen wurden, wie die Längenklassen, für die Charakteristik ihrer Merkmale analysiert. Es handelt sich um die Häufigkeit der verschiedenen Längen der jeweiligen in der Arbeit definierten Orientierungsklassen. Das Ziel ist es, die Signaturen dieses Parameters für jede Orientierungsklasse hervorzuheben. Es ist eine statistische Analyse und auf die Auftrittshäufigkeiten der Längen ausgerichtet.

a) Die Klassen 0°-10° und 10°-20°

Diese Klasse 0°-10° kennzeichnet sich durch eine Dominanz der Lineationslängen von 1501 bis 3500 m (Abb. 26a). Die Lineationen in dieser Gruppe vertreten 52,14% der Lineationen dieser Orientierungsklasse. Andere Klassen (4000 bis 5000 m und 6001 - 6500 m) treten auch häufig auf. Im Vergleich zu den Längenhäufigkeiten der gesamten Lineationen, wo nur die Lineationslängen von 1501 bis 2500 m die dominierenden waren (Abbn. 24a und b), gibt es also einen kleinen Unterschied. Dazu fehlen die Lineationen mit einer Länge von 8501 - 9000 m. Das könnte an der gesamten Knappheit von Lineationslängen über 6500 m liegen.

Im Vergleich zu den Lineationen, die 0°-10° orientiert sind, weisen die mit der Orientierung 10-20° die Längeklasse 2001 - 3000 m als die häufigste aus. Dazu kommt, in geringerem Maße, die Längenklasse 4001 – 4500 m. Diese Gruppen haben eine gesamte Häufigkeit von 53,25% der 10°-20°-Orientierungsklasse und die Längenklasse <1000 m existiert nicht (Abb. 26b). Auch hier bestehen kleine Unterschiede im Vergleich mit den Längen der gesamten Lineationen: die Lineationen mit einer Länge von 4001 - 4500 m sind häufiger und die mit einer Länge von 1501-2000 m sind weniger.

Im Gegensatz zu der Orientierungsklasse 0° - 10° , wo nur die Längenklasse 8501 - 9000 m repräsentiert waren, sind dazu die Klasse 7001 - 7500 m und 8001 - 8500 m bei der Orientierungsklasse 10° - 20° nicht vorhanden.

b) Die Klassen 20°-30° und 30°-40°

Die Orientierungsklasse 20°-30° zeigt eine Ähnlichkeit mit der 10°-20°-Gruppe. Der Hauptunterschied liegt darin, dass die Lineationen mit einer Länge von 2501 bis 5000 m fast die gleiche Häufigkeit haben (ca. 8%) (Abb. 26c).

Bezüglich der Orientierungsklasse 30°-40° ist die gleichzeitige Dominanz der Längenklassen zwischen 1501 und 4000 m das Hauptmerkmal dieser Gruppe. Jede Klasse hat eine Häufigkeit größer oder gleich 10% (Abb. 26d), was in den zuvor analysierten Klassen nicht der Fall war.

c) Die Klasse 40°-50°

Die Lineationen dieser Orientierungsklasse zeigen etwa die gleichen Eigenschaften im Hinblick auf ihre Längen wie die Klasse 20°-30°. Der größte Unterschied liegt darin, dass die Lineationen mit einer Länge von weniger als 1000 m vorhanden sind (2%), und die mit einer Länge zwischen 8500 und 9000 m nicht existieren (Abb. 26e).

d) Die Klassen 60°-70° und 50°-60°

Die beiden Orientierungsklassen weisen nahezu eine identische Verteilung der Längenhäufigkeiten auf, wo die Häufigkeiten von <1001 m bis 2500 m immer größer werden (Abbn. 26f und g). Der Hauptunterschied besteht darin, dass die häufigste Längenklasse der Lineationen mit einer Orientierung von 50° bis 60° die 2501 - 3000 m-Klasse (18%) ist, und die der Lineationen mit einer Orientierung zwischen 60° und 70° (20%) die 2001 - 2500 m-Klasse ist. Wenn man die gesamten Lineationen betrachtet, ist die Längenklasse 2001 – 2500 m eine der häufigsten, was nicht der Fall für die Längenklasse 2501 - 3000 m ist. Deswegen ist es wichtig, dies hervorzuheben.

Ein weiterer Unterschied zwischen diesen beiden Orientierungsklassen liegt daran, dass die Längen von 7001 m bis 9000 m in der Klasse 60°-70° nicht vorhanden sind, aber in der Klasse 50°-60° trifft das mindestens auf die Längenklasse 7001 - 7500 m zu.

e) Die Klassen 70°-80° und 80°-90°

In der Orientierungsklasse 70°-80° (Abb. 26h) haben die häufigsten Lineationen eine Länge von 2001 m bis 3500 m (45,9%), und in geringerem Ausmaß 3501-4000 m (11,8%). Der größte Unterschied zu den meisten zuvor analysierten Klassen liegt darin, dass die häufigsten Lineationen meist nach der Länge 2000 m zu erscheinen beginnen. Eine Ähnlichkeit mit der Klasse 50°-60° besteht: die Längen, die nicht in einer der Klassen existieren, sind auch in der anderen nicht vorhanden. Es handelt sich um die Klassen 6501 - 7000 m, und von 7501 m bis 9000 m. Im Vergleich zu den Längenklassen der gesamten Lineationen stellt man fest, dass nur eine der beiden häufigsten Klassen, nämlich die 2001 - 2500 m-Klasse, bei der Klassenorientierung 70°-80° erscheint. Im Gegensatz zu den vorigen Orientierungsklassen erscheint in der 80°-90°-Klasse keine Lineation, das kürzer als 1500 m ist. Außerdem ist die Längenklasse 3001 - 3500 m (20%) die meist repräsentierte, und die Längenklasse 8001 - 8500 m erreicht fast eine Häufigkeit von 5% (Abb. 26i).

f) Die Klasse 90°-100°

Bezüglich der Lineationen dieser Klasse sind die häufigsten die Längen zwischen 1501 m und 4500 m (mehr als 70%) (Abb. 26j). Dies ist ein Merkmal im Vergleich zu den anderen Orientierungsklassen. Der Unterschied ist bedeutender im Vergleich zu den Häufigkeiten der gesamten Lineationen, die nur die Längenklassen 1501 - 2000 m und 2001 - 2500 m als die häufigsten repräsentiert haben (Abbn. 24a und b).

g) Die Klassen 100°-110° und 110-120°

Genau wie die Orientierungsklasse 90-100° dominieren die Lineationen, die eine Länge zwischen 1501 m und 4500 m haben, in der Klasse 100°-110° (Abb. 26k). Es gibt Ähnlichkeiten mit den Lineationen der Orientierungsklasse 60°-70°: es ist keine Lineation mit einer Länge zwischen 7001 und 9000 m zu sehen. Die gleich häufigste Längenklasse ist 2001 - 2500 m.

Ebenso zeigt auch die Orientierungsklasse 110°-120° die Längenklasse 2001 - 2500 m (ca. 20%) als die häufigste (Abb. 261). So ergibt sich auch eine Ähnlichkeit mit der Orientierungsklasse 60°-70°. Aber im Gegensatz zu den anderen beiden Klassen, die nicht über Lineationslängen zwischen 7001 und 9000 m verfügen, wird sie hier, mit Ausnahme von 8501 m bis 9000 m, getroffen.

h) Die Klassen 120°-130° und 130°-140°

In der Orientierungsklasse 120°-130° zeigen die Längen eine kontinuierliche Steigerung ihrer Häufigkeiten ab der Lineationslänge 1001 m bis zum 3500 m die jedoch einem Zwischenhöhepunkt bei der Längenklasse 1501 - 2000 m hat (Abb. 26m). Diese Längenklasse ist übrigens am stärksten vertreten (16,5%) und ist einer der beiden häufigsten Längenklassen auf der Ebene der gesamten Lineationen (Abbn. 24a und b). Ein weiteres Merkmal der Lineationen der Orientierungsklasse 120°-130° ist das Vorhandensein der Längen von 1001 m bis 5500 m.

Die angehörigen Lineationen der Orientierungsklasse 130°-140° weisen die Längenklasse 1501 - 2000 m (20%) als die häufigste auf (Abb. 26n). Ebenso bei den beiden letzten analysierten Orientierungsklassen (und 7 weiteren) sind auch hier keine Lineation <1000 m vorhanden. Weitere Merkmale sind das gleichzeitige Fehlen von Lineationen mit einer Länge zwischen 6501 und 8000 m und das Vorhandensein der Klassen mit Lineationslängen über 8000 m, sowie eine Leichte Abnahme der Häufigkeiten ab der Längenklasse 1501 - 2000 m.

i) Die Klasse 140°-150° und 150°-160°

Mit Ausnahme der Längenklasse 2001 - 2500 m (18%) haben die Längenklassen zwischen 1501 und 5500 m einen relativ ähnlichen Präsenzanteil bei der Orientierungsklasse 140°-150°

Abb. 260). Wie bei der Klasse 130°-140° (Abb. 26n) treten auch hier Lineationen in den Längenklassen von über 8000 m auf. Der Unterschied liegt darin, dass die Häufigkeiten von 8000 m bis über 9000 m zunehmen.

Bezüglich der Orientierungsklasse 150°-160° ist diese die einzige, die alle Längenklassen aufweist. Die am stärksten vertretenen Längen sind allerdings fast die gleichen wie bei den meisten anderen Klassen mit einer Dominanz von 2001 - 2500 m (15%) und 3001 - 3500 m (13,6%), sowie einer gewissen Abnahme der Häufigkeit ab der Längenklasse 2001 - 2500 m (Abb. 26p).

j) Die Klassen 160°-170° und 170°-180°

Hinsichtlicht der Orientierungsklasse $160^{\circ}-170^{\circ}$ wurde keine Lineation, das länger als 7000 m ist, angetroffen (Abb. 26q), was ein wichtiges Merkmal im Vergleich zu den anderen Klassen ist. Dabei wird eine relativ große Gruppe von 2500 bis zu 4500 m, die die am häufigsten vorhandenen Lineationen der Orientierungsklasse vertreten, charakterisiert. Das war auch der Fall bei den folgenden Klassen: $30^{\circ}-40^{\circ}$, $40^{\circ}-50^{\circ}$, $90^{\circ}-100^{\circ}$, $100^{\circ}-110^{\circ}$ (Abbn. 26d, e, j und k).

Was die Lineationen mit einer Orientierung von 170° bis 180° betreffen, herrscht eine relative Häufigkeitsmonotonie der verschiedenen Längenklassen zwischen 2001 m und 3500 m, und von 4001 m bis 5500 m (siehe Abb. 26r). Die Lineationen dieser beiden Gruppen vertreten rund 62% der gesamten Klasse. Die Orientierungsklasse $170^{\circ}-180^{\circ}$ ist die einzige, wo die Lineationslängen zwischen 8000 und 8500 m die 6% Schwelle erreicht haben. Ausgenommen die Längenklassen <1001, 6001 – 6500 m und 6501 -7000 m sind alle anderen Klassen zu sehen.







Abb. 26: a) bis r): Histogrammverteilung der Längen der Lineationen der Orientierungsklassen

3.1.2 Verteilung der Lineationsdichte und Grundwasserpotentialgebiete

3.1.2.1 Allgemeines

Die Lineationsdichte charakterisiert die Lineationskonzentration in einer Flächeneinheit. Die Dichte wird theoretisch durch die Berechnung der Länge der gesamten Lineationen in einer Flächeneinheit bestimmt. In dieser Untersuchung ist der km² die Flächeneinheit, und der Meter die Längeneinheit. Die Dichteeinheit ist infolgedessen m/km².

Die Bestimmung der Lineationsdichte wurde automatisch mit der Software ArcGIS 9.2® durchgeführt. Dabei wurde die Funktion "Line density" des Werkzeugs "Spatial analyst tools" verwendet. 5 m wurde als Zellgröße gewählt.

Die Bestimmung der Lineationsdichte oder der Konzentrationsgebiete ist wichtig, wenn man davon ausgeht, dass ein Gebiet mit mehreren Lineationen/Frakturen eine bessere Grundwasserproduktivität im Gegensatz zu einem anderen mit nur einer Fraktur/Kluft haben könnte. Je mehr ein Gebiet Frakturen/Klüfte hat, desto mehr ist es verwittert, und um so mehr könnte es zu Neubildung von Grundwasser kommen, welches gespeichert werden kann.

Das Ziel dieser Untersuchung ist es zu ermitteln, ob die ab dem ASTER-Bild bestimmten Lineationdichtegebiete als Grundlage für die Durchführung von Wasserbohrungen in einem semi-ariden Gebiet sein könnten. Deswegen wurde in dieser ersten Untersuchung eine einfache Analyse der Verhältnisse produktive Bohrungen positiven/nicht produktive Bohrungen angesetzt. Dies ermöglichte es, eine vergleichende Analyse zwischen den wichtigsten Dichtegebieten der gesamten Karte durchzuführen.

3.1.2.2 Charakterisierung der Lineationdichtegebiete

Die Dichtegebiete wurden in vier Kategorien von Grundwasserpotential unterteilt: 1. Null bis niedrig, 2. durchschnittlich, 3. hoch und 4. gut bis herausragend. Es steht fest, dass sich die meisten Bereiche, die am wenigsten dicht sind, an den Rändern des Arbeitsgebietes befinden. Das könnte aus der Tatsache resultieren, dass diese Regionen durch die Begrenzung des Arbeitsgebietes weniger berücksichtigt worden waren. Die anderen schwachen Dichtegebiete (mehr zentriert) beziehen sich auf die verschiedenen Laterit- und Gesteinhügel und Plateaus.

Zweitens wurden auf der Karte vier wichtige Dichtegebiete identifiziert, die wie nachfolgend bezeichnet worden sind: Nord-Ost-Zone, Zentrale Zone, Süd-Ost-Zone, und Süd-West-Zone (Abb. 27). Dazu sind hauptsächlich sechs wichtige hydrogeologische Strukturen auf der Lineationsdichtkarte zu sehen. Sie sind Nord-Ost – Süd-West und Nord-West – Süd-Ost orientiert (Abb. 27). Diese sind im Fall einer Untersuchung zur Herstellung von Bohrbrunnen sehr zu berücksichtigen.



Abb. 27: Lineationdichtekarte des Arbeitsgebietes

a) Die Nord-Ost-Zone

Diese Zone ist auf Loaga (ca. 15 km von Kongoussi Richtung Tikaré) konzentriert und ist am wenigsten geeignet hinsichtlich der Gebiete mit hohen Lineationsdichten (Abb. 28). Sie umfasst nur die durchschnittlich bis hoch klassifizierten Dichtegebiete. Dies könnte die Folge der hohen Zahl der Lateritabdeckungen, die in dem Gebiet (insbesondere in der unmittelbaren Umgebung von Loaga) liegen, sein. Die Lineationen in dieser Zone sind mehr vom Typ geomorphologisch.

In den Gebieten mit einer hohen Lineationsdichte ist keine Bohrung lokalisiert. Dagegen treten Bohrungen vor allem in Gebieten mit mittleren Lineationdichtetendenzen auf (15000 bis 30000 m/km²). Die produktiven Bohrungen weisen Förderleistungen in dem Bereich 0,60 m³ bis 3,80 m³ pro Stunde mit einem Durchschnitt von 1,78 m³ pro Stunde auf (Quelle: DGHIRH). Die Erfolgquote (Verhältnis produktive Bohrungen zu nicht produktiven Bohrungen) beträgt 60%. Dies könnte sich wahrscheinlich mit dem Abteufen von Bohrungen in den hohen Dichtgebieten verbessern.

b) Die Zentrale Zone

Sie liegt in der Nähe Yirims auf dem Verkehrweg Tikaré - Rambo. Sie besteht aus mittleren und hohen bis herausragenden Dichtegebieten und ist die kleinste der vier Dichtezonen (Abb. 29). Wie in der Nord-Ost-Zone befindet sich keine Bohrung in den Regionen mit sehr hohen Lineationsdichten.

Alle vier Bohrungen, die in der Zone liegen, sind produktiv. Deswegen ist die Erfolgsquote hier höher als in der vorherigen Zone. Aber diese Erfolgsquote könnte die Folge einer kleineren Anzahl durchgeführter Bohrungen sein. Die Bohrungen in der Zentralen Zone weisen eine Förderleistung zwischen 0,50 m³ bis 2 m³ pro Stunde mit einem durchschnittlichen Wert von 1,28 m³ pro Stunde auf (niedriger als in der Zone Nord-Ost) (Quelle: DGHIRH). Wenn die Lineationdichte das einzige Kriterium des Erfolgs bei der Durchführung von Bohrungen sein sollte, müsste die Zentrale Zone als besser geeignet eingeschätzt werden als die Nord-Ost-Zone.

c) Die Süd-Ost-Zone

Diese Zone im Südöstlichen Teil des Arbeitsgebietes liegt in der Nähe von Vousnanga, Rouko und Yaogué. In ihr befinden sich eine große Anzahl von Bohrungen (16, davon 2 nicht produktiv) (Abb. 30), was eine Erfolgsquote von rd. 88% bedeutet. Im Vergleich zu der Zentralen Zone scheint die Süd-Ost-Zone, trotzt der geringeren Erfolgsquote, mehr geeignet zu sein, weil in ihr viel mehr Bohrungen hier abgetauft wurden. Die durchschnittliche Förderleistung (ca. 2,5 m³ pro Stunde) liegt hier höher als in den anderen beiden beschriebenen Zonen. Dieser Unterschied liegt wahrscheinlich darin, dass ein größeres Oberflächengewässernetz in der Süd-Ost-Zone zu finden ist. Wie in den zuvor analysierten Zonen wurde auch hier keine Bohrung in den Regionen mit hervorragenden Dichtequalitäten getroffen. Im Vergleich zu den anderen Zonen scheint die Süd-Ost-Zone besser zu sein, da sie mehr hohe Qualitätsgebiete umfasst, und nur mittlere und hoch bis herausragende Tendenzgebiete vorhanden sind.

d) Die Süd-West-Zone

Die Süd-West-Dichtezone befindet sich in der Nähe von Boulli und Yargo. Sie umfasst die größte Fläche der Regionen mit sehr hoher Lineationsdichte. Es tritt aber die geringste produktive Bohrungsanzahl (7 von 19) (Abb. 31) auf. Die Süd-West-Zone hat deswegen die zweitschlechteste Erfolgquote (63%, niedriger als in der Zentrale Zone und Süd-Ost-Zone). Aber auf der Abbildung kann festgestellt werden, dass sich nur zwei der Bohrungen in den Gebieten mit hoher Lineationsdichte befinden, die anderen sind in den Gebieten mit mittlerer Qualität. Wie in den Fällen zuvor wurden kaum Bohrungen in den sehr hohen Dichtgebieten gelistet. Die Förderleistungen der Bohrungen liegen in der Süd-West-Zone zwischen 0,60 m³ und 4,80 m³ pro Stunde mit einem durchschnittlichen Wert von 1,44 m³ pro Stunde (Quelle: DGHIRH), der der zweitniedrigste ist im Vergleich zu den anderen Zonen.



Abb. 28: Dichtekarte der Nord-Ost-Zone



Abb. 29: Dichtekarte der Zentrums-Zone



Abb. 30: Dichtekarte der Süd-Ost-Zone



Abb. 31: Dichtekarte der Süd-West-Zone

Aus den vorhergehenden Analysen kann man folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- a. Trotz kleiner Bohrungsanzahl in den Gebieten mit hohen Lineationsdichten sind die Chancen groß, produktive Bohrungen zu erzielen, vorausgesetzt, dass hohe Lineationsdichtegebiete sich in der unmittelbaren Umgebung befinden und diese auf tektonische Zerrüttungszonen zurückgeführt werden können.
- b. Je weiter man sich von den exzellenten Dichtregionen entfernt, desto mehr trifft man auf nicht produktiven Bohrungen. Da sich aber auch produktive Bohrungen in Gebieten mit sehr geringen Lineationsdichten (Zonen 1 und 2 auf Abb. 27) befinden, wird deutlich, dass die Konzentration von Lineationen in einer Region nicht automatisch zu produktiven Bohrungen führen muss. Eine Kombination mit anderen Faktoren (Dichte des Wassernetzes, Positionierung der Bohrung direkt auf einer produktiven Fraktur oder einem Frakturknoten usw.) ist notwendig, um die Erfolgchancen zu erhöhen.
- c. Als Schlussfolgerung kann man sagen, das Arbeitsgebiet verfügt hinsichtlich der Lineationsdichte interessante Grundwasserpotentialgebiete. In diesen Arealen sind bisher keine Bohrung hergestellt worden. Das trägt dazu bei, dass die bisherigen Bohrerfolgsquoten schlecht und von durchschnittlicher Förderleistung sind. Ein Weg, diese Diskrepanz zu verbessern, ist die Nutzung der hohen Lineationsdichtegebiete für die Durchführung zukünftiger Bohrungen. Dazu sollte auch weiter geforscht werden, um den Einfluss bisher unberücksichtigter Parameter (z.B. die Neubildungspotential der Aquifere der oberflächlichen Formationen, die Topographie, die Wassernetzdichte, die Geologie...) zu ermitteln.

3.2 Technische Parameter der Brunnen und Bohrungen

3.2.1 Beschreibung der technischen Parameter und Morphologie der traditionellen Brunnen

Im Arbeitsgebiet wird das Grundwasser entweder aus Schachtbrunnen (90% = "Traditionelle Brunnen") oder aus Bohrbrunnen (10% der Gesamtförderung) gewonnen. Die Traditionsbrunnen besitzen in der Regel einen großen Durchmesser (0.8 m bis 1.8 m Ø) (Großvolumenbrunnen). Nachfolgend werden diejenigen Brunnen als "Traditionsbrunnen" bezeichnet, die ohne maschinelle Hilfe abgeteuft worden sind. Die Kosten zur Anlage der Traditionsbrunnen sind dadurch wesentlich niedriger, als die der Bohrungen, da sie in Eigenleistung ohne Personal- und Materialkosten geschachtet werden. Beratend wirken für wenige Unkosten einzelne Bewohner der Siedlungen, die schon vielfach Brunnen selbst gebaut haben. Neben der Hauptnutzung zur Trinkwasserversorgung werden auch Wässer aus einigen Brunnen zur Bewässerung beim Gemüseanbau genutzt. Im Rahmen der Erarbeitung von grundlegenden Daten und Parametern für diese Arbeit werden die technischen Parameter, die Morphologie der Innenräume der Brunnen (Kalibrierung), die Lithologie der Aquifere/Aquitarde und die Wassergewinnungstechniken charakterisiert. Hinsichtlich der Bohrungen werden vor allem die technischen Parameter beschrieben, da Schichtenverzeichnisse nicht beschafft werden konnten oder diese nicht existieren.

3.2.1.1 Technische Parameter der Brunnen

Im Zuge der Probenahme wurden die Tiefen der Brunnen, die Wasserstände (bezogen auf die Bodenoberfläche) und deren Durchmesser gemessen. Die Tiefe der Brunnen wurde mit 12 m bis 23 m unter Gelände ermittelt, wobei die meisten (fast 60%) zwischen 11 et 14 m tief waren. Die Wasserstände schwankten erheblich zwischen der Regenzeit (1 m bis 2 m unter Gelände) und > 10 m unter Gelände in der Trockenzeit. Die saisonale Schwankung der Wassertiefen beträgt zwischen 7 m und 12,5 m in der Regenzeit und 0,7 m und 7 m während der Regenzeit (Tabelle 4). Diese weisen darauf hin, dass die Brunnen unter dem Einfluss direkter Infiltration der Niederschläge stehen. Und das wiederum lässt Rückschlüsse zu, dass auch die Wasserqualität erheblichen Schwankungen unterliegen dürfte.

Brunnen	Tiefe (m)	Durchmes- ser an der Oberfläche	Wasserstand (m)		Abweichung Wasserstand (TrockReg.)	Wasserhöhe (m)		Abweichung Wasserhöhe (RegTrock.)
		(m)			(m)			(m)
			Trock.	Reg.		Trock.	Reg.	
Trad I	11,6	1,2	9,7	0,7	9,0	1,9	10,9	9,0
Trad II	14,0	1,5	9,1	0,9	8,2	4,9	13,1	8,2
Trad III	17,2	1,1	8,9	1,5	7,4	8,4	15,7	7,4
Trad IV	9,4	1,0	8,5	0,7	7,7	0,9	8,6	7,7
Trad V	11,0	1,7	9,7	1,1	8,6	1,3	9,9	8,6

Fortsetzung Tabelle 4

Trad VI	11,0	1,1	8,3	1,1	7,3	2,70	10,0	7,3
Trad VII	12,1	1,8	8,5	1,1	7,8	3,58	11,0	7,4
Trad VIII	13,8	1,0	11,4	1,1	10,3	2,40	12,7	10,3
Trad IX	23,2	1,8	12,5	1,9	10,6	10,7	21,3	10,6
Trad X	9,3	1,6	9,0	1,2	7,8	0,28	8,1	7,8
Trad XI	10,6	1,0	9,6	1,2	8,5	1,00	9,5	8,5
Trad XII	13,6	1,2	10,5	1,1	9,4	3,10	12,5	9,4
Trad XIII	12,5	1,2	10,9	1,4	9,5	1,60	11,1	9,5
Trad XIV	12,0	1,1	11,6	1,2	10,4	0,40	10,8	10,4
Trad XV	13,2	1,8	11,0	1,2	9,9	2,20	12,1	9,9
Trad XVI	8,2	1,2	7,36	2,4	5,0	0,81	5,8	5,0
Trad XVII	11,7	1,2	10,8	5,5	5,3	0,90	6,2	5,3
Trad XVIII	13,0	1,01	9,0	2,7	6,4	3,98	10,3	6,4
Trad XIX	7,8	1,3	Trocken	2,4			5,4	
UFZ3	8,3	1,2	Trocken	1,1			7,2	
UFZ4	8,7	1,2	Trocken	0,8			7,9	
BOB 4	13,5	1,8	12,5	7,0	5,5	1	6,5	5,5
Mittelwert	12,1	1,3	9,9	1,8	8,1	2,74	10,30	7,9

N.B. Trock.: Trockenzeit; Reg.: Regenzeit.

Tabelle 4: Zusammenfassung der technischen Parameter der Brunnen



Abb. 32: Unterschiedliche Grundwassergewinnungsarten aus Brunnen und Bohrungen a) Schöpfen («Puisette»); b) Rolle; c) India Pumpe Mark II; d) VOLONTA Pumpe; e) Kardia Pumpe

Für die Wassergewinnung aus den Brunnen werden traditionell seilgebundene Schöpfgefäße ("Puisette") verwendet. Zuweilen und insbesondere bei tieferen Brunnen kommt eine Seilwinde zum Einsatz, um die manuelle Wasserentnahme, die fast ausschließlich von Frauen und Kindern durchgeführt wird, zu erleichtern (Abbn. 32a und 32b).

3.2.1.2 Lithologie und Morphologie der Brunnen

Fast alle Brunnen im Norden Burkina Fasos schneiden unter Plinthit (Plinthosol [SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998, www.geo.unizh.ch/bodenkunde//kapitel/tropen.html {FAO}]) den Lateritgrundwasserleiter (irreversibel verfestigter Plinthit Abb. 33a) an. Im Gegensatz dazu erreichen die Bohrbrunnen die tieferen Kluftaquifere oder den Verwitterungsgrus-Grundwasserleiter. Da die Brunnen unterschiedliche Tiefen haben und unterschiedliche Laterit-schichten aufweisen (Porigkeit, Verfestigungsgrad usw.) unterliegen die Brunnenwände einer ungleichmäßigen Erosion. Folgende Bildungen können hierbei unterschieden werden (Abbn. 33b bis h):

- eine relativ gut zementierte Schicht durch chemisch eisenhaltige Verwitterungs- und Oxydationsprodukte oder Tonverbindungen (Laterit);
- eine Schicht, deren Körner schwach oder nicht befestigt sind und mit der Hand trennbar sind (Plinthit);
- zwei Schichten: eine oberflächennahe Schicht, in der Regel mit gut zementierten oder befestigten Körnern und eine tiefer gelegene, poröse, mit schwach oder nicht befestigten Körnern (Aquifer).

Ausgehend von diesen Betrachtungen kann im Untersuchungsgebiet folgende lithostratigrafische Gliederung vorgenommen werden: Eine hangende Schicht aus Ton- und Sandmischung (Plinthit), gefolgt von einer Lateritschicht mit schwach befestigten Körnern, eine Schicht mit gut befestigten Körnern sowie eine liegende poröse Lateritschicht, die den Grundwasserleiter bildet (Abb. 34).

Im Ergebnis unterschiedlicher Verwitterungsprozesse können verschiedene Brunnenwandmorphologien beschrieben werden. Einige Brunnenwände sind nur im oberen Bereich erodiert, einige zeigen nur eine unteren erodierte Teil und manche Brunnen haben von oben bis zur Endtiefe erodierte Wände. Einige der erodierten Brunnenwände zeigen praktisch "Höhlen"-Morphologie. Zusätzlich zu den Brunnen mit unverkleideten Wänden werden Brunnen mit betonierten Wänden angetroffen, wie beispielsweise die Trad V, IX, XV und BOB4 (Abbn. 33c, e, f, und g). Aber aufgrund mangelnder Wartungen unterliegen diese Betonverkleidungen Verwitterungsprozessen, die die Metallelemente zerstören. Im Trad XV kommt ein Metallrohr (Steigleitung) einer alten verwendeten Pumpe vor. Aus einer Korrosion dieses Rohres könnten für die Menschen potentiell giftige Elemente ins Wasser eindringen.



Abb. 33: a) Plinthit und Innere Ansichten einiger Brunnen b) Trad I; c)Trad XVIII; d) Trad II; e) Trad III; f) Trad XV; g) Trad V in Trockenzeit und h) in Regenzeit



Abb. 34: Schematische Darstellung der Stratigraphie der Brunnen

Die unterschiedlichen Brunnenwandmorphologien lassen sich wie folgt erklären:

- Eine schwache Zementierung der Körner des Laterits im obersten oder untersten Bereich der Brunnen oder eine sehr starke partielle chemische und/oder physikalische Erosion des Zements der Lateritkörner;
- > Intensive Erosion oder schwach zementierte Lateritkörner über die gesamte Tiefe.

Ausgehend von den Wasserständen (vor allem in der Trockenzeit), die Neubildungsarten, und den verschiedenen Morphologien der Wände in den Traditionsbrunnen im Arbeitsgebiet werden, mit dem Ziel ihre Wasserbeschaffenheit und –Förderung zu verbessern, folgenden Maßnahmen vorgeschlagen:

- eine Reinigung der Brunnen, da in einige Fällen zum Teil sehr verwitterte Lateritwände, die in den Brunnen fallen, den Wasserzutritt blockieren (z.B. Trad I);
- eine Vertiefung der Brunnen, um das nutzbare Volumen zu vergrößern, eventuell Fassung von tieferen Grundwasserleitern zu ermöglichen und größere Schwankungen, die im Wechsel von Regenzeit / Trockenzeit auftreten, zu überbrücken;
- eine Zementierung oder Betonierung der oberen Brunnenwände bis zum Wasserzutritt, um die obere Brunnenwandung zu stabilisieren und gleichzeitig flüssige Wasserschadstoffe abzuhalten;
- Wartungen der Betonauskleidungen (z.B. Auftragen einer Schutzschicht oder eines Schutzanstriches), um ihre Beschädigung und damit den Übergang der Korrosionsprodukte ins Wasser zu verhindern;
- die Entfernung von metallischen Elementen (Steigrohre, Pumpen), die toxische Metallionen freisetzen können durch Elemente aus Kunststoff (PE, PP, PVC) (gesundheitlich unbedenkliche Produkte);

- Schaffung einer Betonfläche mit einem Ablauf vom Brunnen weg als Schutzzone I (EU-Norm) (ca. 10 m Ø) gegen anthropogene Grundwasserkontaminationen; in Einzelfällen hilft auch ein gestampfter Tonboden (mit Laufbohlen) von mindestens 0,3 m Mächtigkeit;
- die Installation von Seilrollen oder besser "Flaschenzügen" zur Vereinfachung der Wasserentnahme;
- die Erstellung zusätzlicher Bohrungen, die weniger den klassischen anthropogenen Kontaminationen im Arbeitsgebiet (Eindringen von häuslichen Abwassern, Latrinen, Auswaschensprodukte der landwirtschaftlichen Flächen, usw.) ausgesetzt sind.

3.2.2 Charakterisierung der wichtigsten technischen Parameter der Bohrbrunnen

Die technischen Parameter der Bohrbrunnen sind die Daten, die zum Ende des Bohrverfahrens für eine Bohrung aufgenommen werden. Diese sind die Tiefe, die Dicke der Verwitterungsschicht das statische Niveau, die Tiefe des Hauptdurchflusses des Wassers und die Förderleistung. Ziel war es, einen Überblick über die Werte dieser Parameter zu gewinnen, damit sie für die künftigen Arbeiten zur Wasserversorgung durch Bohrungen als Grundlage dienen können.

3.2.2.1 Die Bohrtiefe

Die Bohrtiefe ist die ereichte gesamte Tiefe am Ende des Bohrprozesses. Sie unterscheidet sich von der Ausbautiefe, die abweichen kann.

Die Bohrbrunnen in dem Arbeitsgebiet haben eine Tiefe 30 m bis >100 m. Da in dem Arbeitsgebiet Sand- und Vulkanit -Schiefer die hauptsächliche geologische Einheit ist, dominieren vor allem tiefere Bohrbrunnen. In der Tat umfassen die Schiefer die tiefsten Bohrungen mit hohen Förderleistungen in den kristallinen Zonen in Burkina Faso wegen ihrer starken sterilen



Abb. 35: Häufigkeit der Bohrtiefen

Tonverwitterungen (NIKIEMA 2002). Die Bohrtiefen sind immer von den spezifischen geologischen Verhältnissen abhängig. Sie variieren deshalb stark. Der generelle Trend ist, dass die Bohrbrunnen in der sedimentär-vulkanischen Gesteinszone tiefer sind als im Granitoid. Die derzeitige Verteilung der Brunnentiefen wird in Abb. 35 zusammengefasst.

3.2.2.2 Die Mächtigkeit der Verwitterungsschicht

Der Verwitterungsprozess spielt eine wichtige Rolle bezüglich der Grundwasserspeicherung in den kristallinen geologischen Einheiten. Wenn sie frisch sind, verfügen diese über keine Porosität und die Durchlässigkeit ist auf Klüfte und Störungen beschränkt, welche zwei wesentliche Faktoren für die Grundwasserspeicherung sind. Eine besondere Rolle spielt die Verwitterungs- und Auflockerungszone, da sie Lockergesteinscharakter hat. In diesem Falle sind auch Porenvolumen Grundwasser-speicherwirksam. Aus diesem Grund ist die Verwitterungsschicht einer der Aquifere in den kristallinen Formationen. Die Stärke der Verwitterungsschichten reichen von 5 bis >90 m. Wenn man diesen Parameter im Zusammenhang mit der Tiefe analysiert, steht fest, dass die tiefsten Bohrungen auch die mit den mächtigsten Verwitterungsschichten sind. Aus den Häufigkeitsansichten sind die Verwitterungsmächtigkeiten zwischen 40 und 50 m am häufigsten vorhanden und die zwischen 0 und 10 m am wenigsten (Abb. 36). In Anbetracht dieser Werte liegt die nutzbare Verwitterungsdicke für die Erzielung einer produktiven Bohrung bei >40 m.



Abb. 36: Häufigkeit der Verwitterungsmächtigkeit

3.2.2.3 Das statische Niveau

Statistische Auswertungen sind schwierig, da die Grundwasseroberflächen (statisches Niveau) sehr stark Jahreszeiten-abhängig sind. Die meisten Bohrbrunnen werden allerdings in Zeiten gebohrt, in denen die Arbeitsbedingungen günstig sind. Es ist deshalb zu vermuten, dass die angetroffenen Grundwasserspiegel in einem annähernd vergleichbaren Niveau liegen. Man kann dessen Wert nutzen, um eine Vorstellung über die Mächtigkeit der Wasserschicht der Bohrung
zu bekommen. Weil es in dieser Analyse nur einen Überblick über die Werte des statischen Niveaus geben kann, kann keine Aussage über die Mächtigkeit der Wasserschicht vorgenommen werden. Die statischen Niveauwerte reichen von 3 m bis 38 m mit einem mittleren Wert von ca. 20 m (Abb. 37).



Abb. 37: Häufigkeit der statischen Niveaus der Grundwasserspiegel

3.2.2.4 Die Förderleistung

Da das Ziel der Herstellung eines Bohrbrunnens die Wasserbeschaffung ist, ist die Förderleistung der wichtigste Parameter des gesamten Bohrprozesses. Die Endförderleistung hängt von mehreren Parametern ab: Den Frakturen und der Verwitterung des Gesteines, der Geometrie der angetroffenen Frakturen oder Klüfte (Kluftkörpergrößen), den lithologischen Eigenschaften des Gesteins, der Neubildung, der Größe und geomorphologischen Lage des Einzugsgebietes, der Bohrtiefe und den finanziellen Mitteln (die zwei letzten werden von den Menschen bestimmt). Die Förderleistungen liegen im Untersuchungsgebiet zwischen 0,7 und 16,20 m³/h mit einem Durchschnitt von 2,5 m³/h. Wie die Ergebnisse ausweisen, sind die Förderleistung nicht außergewöhnlich, aber trotzdem gut für die Trinkwasserversorgung von kleinen ländlichen Bevölkerungsgruppen. Die zwischen 0,7 und 2 m³/h liegenden Förderleistungen wird am häufigsten im Arbeitsgebiet angetroffen (ca. 55%), und die über 10 m³/h mit 2,5% Anteil am weinigsten (Abb. 38).

Diese Werte zeigen die Notwendigkeit von Forschung und genaueren Untersuchungen zur Charakterisierung von potentiell geeigneten Gebieten für die Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen durch Bohrbrunnen in dem Arbeitsgebiet.



Abb. 38: Verteilung der Förderleistungen

3.3 Stauseen und ihre Funktion zur Stabilisierung der Wasserversorgung

3.3.1 Qualitative Untersuchung des Stausees von Tikaré

3.3.1.1 Grundlagen

Der Stausee von Tikaré liegt am nördlichen Eingang des Dorfes Tikaré auf der Straße Kongoussi - Ouahigouya (ca. 25 km von Kongoussi entfernt). Die 1996 gebaute Staumauer hat die folgenden Koordinaten: 1°43'28" W und 13°17'30" N. Der See ist in einem Tal eingerahmt von Laterithügeln und hat laut BEWACO (1999) eine Fläche von 0,45 km² und eine Speicherkapazität von 0,9 Mio. m³. Vermutlich auf Grund von zu untersuchenden Besonderheiten des Stausees sind auf dem benutzten Satellitenbild nur 0,23 Km² zu erkennen (Abb. 39). Die Staumauer besitzt über eine Höhe von ungefähr 5 m, eine Länge von 466,5 m und eine Steigung von 36% (Anstromseite) (Abb. 40 und 41). Unter normalen Bedingungen Aufstauhöhe von ca. 2 m kombiniert mit der aktuellen Fläche beträgt das Volumen des Sees ca. 460.000 m³. Das Wasser des Stausees von Tikaré sollte vorwiegend für Gemüseanbau, Mais und Hirse z.T. für die Wasserversorgung von Vieh genutzt werden. Wie die anderen Stausseen in der Region könnte der von Tikaré eine sehr große Rolle für die sozioökonomische Entwicklung der Region spielen.



Abb. 39: Satellitenansicht des Stausees von Tikaré



Abb. 40: Seitenansicht der schematischen Darstellung der geometrischen Parameter der Staumauer (Stausee von Tikaré)



Abb. 41: Vorderansicht der Staumauer des Stausees von Tikaré

3.3.1.2 Problematik, Arbeitshypothesen, Ziele, und Methodik

Der Grund dieser Untersuchung sind die schnellen hohen Wasserverluste des Stausees von Tikaré, die bislang nicht erklärt werden können. Trotz erheblicher Niederschläge während der Regenzeiten im Untersuchungszeitraum trat nie eine Füllung des Staubeckens auf und die Teilmengen verschwanden in außergewöhnlich kurzer Zeit. Das gespeicherte Wasser ist höchstens bis Oktober (Ende der Regenzeit) verfügbar, dann ist der "See" ausgetrockenet (Abb. 42a). Im Gegensatz dazu halten anderen Stauseen, die kleiner sind, ihr Wasser erheblich länger (wie z.B. der Stausee von Silimidougou, der bis nach Februar sein Wasser hält, Abb. 42b). In der vorliegenden Untersuchung wird die Hypothese geprüft, dass der Wasserverlust durch schnelle Exfiltration in den unterliegenden Grundwasserleiter verursacht wird und anschließend in Richtung Stauseeabstrom abfließt. Ausgehend von den Wasserverlustschätzungen durch die Verdunstung würde eine Sanierung des Sees genügend Wasser für einen größeren Teil des Jahres zur Verfügung stellen. Durch eine geeignete Bewirtschaftung der Ufer wären 3 m Höhe gespeicherte Wasser sehr bedeutend für die >5000 Einwohner von Tikaré und Umgebung.



Abb. 42: Vergleichende Ansichten zwischen dem Stausee von Tikaré (a) und dem Stausee von Silimidougou (b) (02.2006)

Die Untersuchung hat Ziel die Mängel und Probleme des Stausees von Tikaré zu charakterisieren und herauszufinden, warum er nicht langfristig Wasser halten kann. Lösungsvorschläge für eine eventuelle Sanierung und Konzepte für den Neubau künftiger Stauseen in ähnlichen Umfeldern sollen ermittelt werden. Um diese Ziele zu erreichen wird folgende Methodik eingesetzt:

- Eine qualitative Untersuchung der Staumauer und -Bett;
- Eine qualitativ hydrodynamische Untersuchung unter anderem Röntgenanalysen von Lateritproben und isotopenchemische Analyse des Wasserabflusses;
- Konzeption eines Staumauermodells.

3.3.2 Geomorphologie und Geologie des Dammstandortes

Die durchgeführten Feldarbeiten bilden die Grundlage für eine Reihe von Analysen im Zusammenhang mit der Morphologie und der Geologie des Dammstandortes von Tikaré.

3.3.2.1 Geomorphologie des Standortes

Jeder Damm ist mit seinem Umfeld verbunden. Dabei spielt die Morphologie des Gebietes eine wichtige Rolle bei der Standortwahl. Der ideale Standort einer Talsperre hat die Morphologie eines Trichters, d.h. einen engeren Bettteil Richtung Abstrom. Die Morphologie des Staudamms von Tikaré ist durch eine Aue, zu der kein richtiger Fluss fließt, charakterisiert. Die Wässer, die zu dem Bett fließen, sind nur direkt gesammelte Regenwässer während der Regenzeit (Wadi). Die flache Hangneigung zeigt, dass es sich um eine Stagnationszone bzw. eine langsame Abflusszone von Regenwässern handelt. Als Ergebnis hat man Einlagerungen von Wasser- oder Winderosionsprodukten (Löss oder Schwemmlöss [Mischung Sand – tonhaltige Boden]). Drei Zuflüsse zu der Talsperre wurden identifiziert. Der wichtigste befindet sich entlang der Straße Kongoussi-Tikaré (Einfahrt Tikaré). Ein zweiter ist ein Erosionskorridor, der aus alten Lehmgruben, die aus der Tonziegelproduktion für den Bau von Häusern stammen, besteht.

An einigen Stellen ist der Laterit als Grundwasserleiter sichtbar. Dieser ist somit im direkten Kontakt mit den oberflächlichen Wässern. Dies führt dazu, dass sie direkt in den Lateritgrundwasserleiter infiltrieren. Drei weitere Lehmgruben dieser Art sind im Staubecken in der Nähe der Staumauer zu sehen. Dadurch wird die dichtende Wirkung des Lösses bzw. Lösslehms deutlich verringert und eine Infiltration von Stauseewasser in den darunterliegenden Laterit-Aquifer ist gegeben.

Eine Reihe von Laterithügeln sind auch rund um den Stausee präsent: Einer auf jedem Ufer (links und rechts), auf dem der Deich gegründet ist, und einen kleinen aufwärts des Bettes. Der am linken Ufer liegende Laterithügel ist deutlich poröser und weist zusätzlich unter einer festen Kruste von 1,5 dm Hohlräume bis 0,5 m Mächtigkeit auf. Diese Leckage "beschädigt" die Stauwirkung der Talsperre. Die Kiese, die aus den Hügeln stammen, sind im Dammbett zu sehen.

Neben diesen Laterithügeln gibt es Festgesteinshügel (meist Schiefer). Aus diesen Analysen könnte man folgern, dass der Korridor des Dammes das Ergebnis tektonischer und mehrfacher morphogenetischer Ereignisse, die die Gesteinhügel gebildet haben, ist.

3.3.2.2 Lithologie des Standortes

Insgesamt ist der Korridor, in dem das Dammbett liegt, flach und ist auf beiden Seiten von porösen und Höhlen führenden Laterithügeln begrenzt. Der Dammbettkorridor ist im Durchschnitt N-S orientiert, während die Frakturen und die Schieferungen O-W orientiert sind. An den flankierenden Hängen der Hügel, an denen die anchimetamorphen Schiefer ausstreichen, konnten die hydraulisch wirksamen semiperpendikulären Kluftrichtungen beobachtet werden. Sie stimmen mit den Lineationsanalysen der FE-Daten überein.

Zwei Gräben und vier Brunnen mit 1 m Durchmesser und 9 m Tiefe, die als Piezometer dienen, haben erlaubt, die folgende Schichtenfolge partiell zu identifizieren (Abb. 43):

- Eine 1 bis 2 m dicke Schicht aus einer sandig, schluffig und tonhaltigen Mischung, die Kies mit einem Durchmesser von 1 und 2 cm enthält. Der Graben 2 zeigt die Schicht mit einer Dicke von über 2 m. Die Schicht wird dünner und verschwindet in Richtung aufwärts des Stausees und Laterithügel, an denen die Staumauer lehnt;
- 2. Eine nicht oder schwach verfestigte Lateritschicht. Die Zemente, die bei der Entwässerung des Plinthits entstanden sind und die Festigkeit bewirken, haben manchmal eine schwärzliche Färbung und scheinen eisen- und magnesiumhaltige Oxidationsprodukte bzw. tonhaltig zu sein. Der Laterit ist hier sehr porös und die glatten und nassen Poren zeigen, dass Was-

ser durchfließt. Das bestätigt, dass der Laterit ein Grundwasserleiter oder ein Weg für die Neubildung der darunter liegenden Grundwasserleiter ist. Die Dicke dieser Lateritschicht kann bis zu 4 m betragen;

- 3. Eine Schicht mit relativ gut zementierten Körnern: hier sind die Körner manchmal schwierig zu separieren und die Zemente sind insgesamt wie oben beschrieben. Wie in der oberen Lateritschicht existieren auch hier Poren, die miteinander kommunizieren und gleichzeitig bestätigt dies, dass diese Schicht auch ein Grundwasserleiter ist. Die Dicke dieser Schicht kann 5 m überschreiten;
- 4. Eine poröse Lateritschicht, die am meisten den Lateritgrundwasserleiter darstellt;
- 5. Eine Tonschicht, die einen wasserdichten Aquitard zwischen den oberflächlichen Lateritgrundwasserleitern und den tieferen Grundwasserleitern und/oder geologischen Formationen bilden könnte. Seine Mächtigkeit konnte nicht festgestellt werden;

Schiefer in einer Tiefe von 7 m in einem Brunnen im Anstrom des Dammbettes wurde ebenfalls identifiziert. Da bis zu 9 m Tiefe in den im Bett liegenden Piezometern kein Schiefer festgestellt wurde, zeigt, dass die Tiefe der Schiefer in Richtung Staumauer ansteigt.



Abb. 43: Schematische Darstellung der potentiellen Lithographie im Staubecken

3.3.3 Morphologie des Dammes (Staumauer)

Die Staumauer wurde im April 2007 räumlich vermessen. Das benutzte Instrument ist das Nivelliergerät AT-G4/7 von TOPCON Deutschland GmbH. Das Hauptziel war, die allgemeine Bauform der Mauer und deren Position festzustellen. Für die Messverfahren wurde ein Nullpunkt festgesetzt: Der oberste Teil des unterirdischen Abflusses abwärts der Staumauer (auf Abb. 46 zu sehen). Ein GPS Modell 76 von Garmin® wurde verwendet, um die genaue Höhe des Punkts zu ermitteln. Es wurde mehrmals gemessen und eine durchschnittliche Höhe als Nullpunkt festgesetzt. Von diesem Punkt aus wurden die relativen Höhen der Staumauer über seine gesamte Länge gemessen. [Das Messverfahren ist im Anhang F zusammengefasst.]

Nach Analyse der Messwerte (zusammengefasst in der Tabelle 5 Spalte Lm-H und Abb. 44), steht fest, dass die Staumauer über ihre gesamte Länge nicht horizontal ist.

Mess-	Lu	Lo	Lm (cm)	L(Lo-	Lm-H	Vb-Rb	H (cm)
punkt	c m	(cm)		Lu) (cm)		(cm)	
1(G)	169,5	219,5	194,5 v	50	52,5	20	142
Α							
2(L)	149,5	199,5	174,5 r	50	29,5		145
3(G)	127,8	177,8	152,8 v	50	7,8	17,8	
4(L)	110	160	135 r	50	- 8		143
5(G)	141,8	191,8	166,8 v	50	23,8	24,1	
6(L)	117,7	167,8	142,7 r	50,1	-0,5		143,2
7(G)	94,9	144,9	119,9 v	50	-23,3	-35,8	
8(L)	130,6	180,8	155,7 r	50,2	12,2		143,5
9(G)	109	159	134 v	50	-9,5		
10(L)			55 (direkte				
В			Messung)				

Tabelle 5: Ergebnisse der topographischen Messungen

NB. Der Punkt Lg8 ist 4,6 m von Brunnenmitte entfernt.



Abb. 44: Morphologie des Staumaueroberkantes(schematische Prinzipskizze)

3.3.4 Analyse des Staudamms von Tikaré

Um diese Analyse durchführen zu können, wurden drei Feldeinsätze (Februar 2006, April und September 2007) dafür realisiert.

3.3.4.1 Die Staumauer

Mit einer Länge von 466,5 m ist die Staumauer N 110 orientiert und hat eine Höhe von knapp 5, die aus dem tiefsten Punkt bestimmt wurde. Die Steigung beträgt im Durchschnitt im Anstrom 35%. Das Baugrundmaterial ist tonhaltig mit einer Tendenz zu Laterit. Auf der Maueranstromsseite liegen nicht zementierte Steinpackungen aus Lateritbrocken (mit oft mehr als 20 cm Durchmesser).

Die folgenden Unzulänglichkeiten und Mängel wurden identifiziert:

- Obwohl keine Bauausführungsdokumentationen gefunden werden konnte, kann man davon ausgehen, dass der Damm keinen Dichtungskern und keine Dammunterströmungssperre (Tondichtung) besitzt. Das bedeutet für einen Daueraufstau die Gefahr des Durchweichens und damit die Möglichkeit des spontanen Dammbruches;
- Als Damm-Baumaterial wurde eine Mischung aus Sand, Schluff und Ton, mit einem sehr hohen kiesigen Anteil (geschätzt 15%) aus Festgesteinsschutt und –kies sowie Laterit-Geröllen, beobachtet. Genetisch könnte es sich um Hangschutt, wahrscheinlich aber um ein Talbodensediment handeln. Das Material ist scheinbar lagenweise aufgebracht, aber nicht verdichtet zu sein;
- Es gibt keinen Überlauf, der zwingend erforderlich ist, um Erosionen des Dammes bei einem möglichen Überlaufen zu verhindern. Der Staudamm von Koulniéré (Abb. 45 und 47); verfügt als gutes Beispiel über einen solchen Abfluss (selbst wenn die große der beiden Werke nicht identisch sind).
- Die Widerlager des Dammes sind direkt auf den Talflanken aufgebracht. Die der hohen Porosität und die nachgewiesenen Hohlräume des Laterites führen zwingend zu Wasserverlust und damit gleichzeitig zur Instabilität der Dammauflage;
- Auf den Aufwärts- und Abwärtsseiten der Mauer wachsen Sträucher und kleine Bäume (Abb. 46). Einige davon sind über 2 m hoch. Diese Bäume oder Sträucher durchwurzeln den Damm und können ihn dadurch beschädigen und durchlässig machen;
- Der Damm wird als Verkehrsweg benutzt. Dies führt zwangsläufig zu unterschiedlicher Verdichtung des geschütteten Dammmaterials und damit zu einer unterschiedlichen horizontalen Druckbelastbarkeit, wie sie bei Anstausituationen auftreten. Bei einem Damm-Überstau treten an den tiefsten Stellen Erosion auf, die in kurzer Zeit zum Dammbruch führen wird;
- Durch die Regenwasserabflüsse an den Mauerflanken treten erhebliche Erosionsrinnen auf, hauptsächlich auf der Anstromseite (Abbn. 48a und b). Sie sind der Anfang für eine langfristige komplette Beschädigung des Staudammes;
- Die Staudammoberkante ist nicht horizontal, wie die Vermessung es gezeigt hat (Abb.44). Dies könnte entweder Bau-Mängeln sein, ursprüngliche fehlerhafte topographischen Mes-

sungen beim Bau, einer nicht gleichmäßigen Verdichtung des Baumaterials und/oder der Benutzung der Oberkante als Verkehrsweg stammen.



Abb. 45: Anblick der Staumauer (04.2007)

Abb. 46: Unterirdischer Überlauf des Staussees (*Abstrom*, 04.2007)

Ausgang des unterirdischen Überlaufes

Vegetation



Abb. 47: Teilanblick der Staumauer des Dammes von Koulniéré (Im Vordergrund der Überlauf, 04.2007)



Abb. 48: a) et b): Erosionsrisse durch Regenwasserabflusse (im Kreis) (04.2007)

3.3.4.2 Der Stauraum

Mit einer Fläche von etwa 232.000 m² ist der Stauraum mit Fluvial- und Winderosionsmaterialien (Loess) bedeckt (Abb. 49) (s. auch Kapitel 3.3.2). Diese Sedimente, die manchmal über eine Höhe von mehr als 2 m verfügen (Richtung des rechten Flussufers), sind vor allem eine Mischung aus sand- bis tonigem Boden. Die bindigen Böden sind teilweise mit feinen bis groben Kiesen (in der Nähe der beiden Hügel, auf denen die Mauer lehnt)(Festgesteinsgerölle, Laterit-Gerölle) bedeckt. Die oberflächlichen Lockergesteine scheinen nicht wasserdicht zu sein, wie die vielen auf dem gesamten Bett gebildeten Risse es andeuten (Abb. 50a bis e). Im Vergleich dazu wurden im Dammbett von Koulniéré (Abb. 51a) und Silmidougou (Abb. 51b) keine Risse gefunden. Die Risse im Stausee von Tikaré stammen aus dem Wasserrückzug und der folgenden Schrumpfung der tonhaltigen Sedimente und wurden wie folgt kategorisiert:

- oberflächliche Longitudinal- Strukturrisse;
- tiefe Mosaikrisse;
- oberflächliche Mosaikrisse.

Die Risse können die Speicherpotentiale des Dammes negativ beeinflussen.

Neben den Wasserrückzugsrissen liegen folgende Strukturen im Dammbett vor:

- ältere und neue für die Gewinnung von Ton (Produktion von Tonziegeln) gegrabene Steinbrüche. Einige von ihnen reichen bis zum unterliegenden Laterit;



Abb. 49: Dammbett in Trockenzeit mit Staumauer im Hintergrund (02.2006)



Abb. 50: Unterschiedliche Rissarten (02.2006) a) Tiefe Mosaikrisse, b) Oberflächliche und tiefe Mosaikrisse nebeneinander mit Höhlen, c) Mosaikrisse mit einer Höhle, d) Strukturriss



Abb. 51: Vergleichsanblick des Dammbettes a) von Koulniéré und b) von Silmidougou (keine Risse) (02.2006)



Abb. 52:Wasserabflusserosionsbereiche (Korridor) in alten Lehmgruben (04.2007)

- Erosionsbereiche infolge von Wasserabfluss in den alten Lehmgruben (Abb. 52). In diesen Bereichen und in den jüngsten Lehmgruben ist Wasser direkt in Kontakt mit dem unterliegenden Laterit;
- Löcher, die aus den Baumentwurzelungen beim Bau des Staudamms stammen: da diese Löcher immer offen sind, könnte es bedeuten, dass sie als direkte Infiltrationswege des Wassers zu den Lateritgrundwasserleitern dienen. Außerdem kommunizieren einige dieser Löcher mit den im Dammbett liegenden Rissen (Abbn. 50b und 50c).

3.3.5 Soziale Aspekte des Umbaus vom Stausee

3.3.5.1 Auswirkungen eines Aufstaus der Talsperre

Da der Stausee bisher noch keinen maximalen Aufstau (glücklicherweise!) hatte, ist die Maximalausdehnung der Wasserfläche bislang nicht wirksam gewesen. Ein Blick von der Staumaueroberkante zeigt, dass einige Wohnhäuser (Abb. 53) unter Wasser stehen würden, wenn der See aufgefüllt werden sollte (Abb. 54). Hauptsächlich würde dies der Fall sein bei den Häusern, die am nördlichen Rand des Stauraumes lokalisiert sind. Eine vorsorgliche Information der Bewohner dieser Siedlungen ist bisher nicht erfolgt. Ca. 200 Menschen würden bei Stauseefüllung ihrer Häuser beraubt.



Abb. 53: Teilansichten von Wohnhäusern im Anstrom des Stausees(09.2007)



Abb. 54: Horizontale Anblick von Staumauer in Richtung Anstrom

Neben den Häusern könnten auch die in der Verlängerung des virtuellen Stauraumes liegenden Felder überflutet werden. Als Konsequenz würden viele Menschen Gebiete für ihre Landwirtschaftsaktivitäten (saisonale Nahrungsmittelproduktion) verlieren.

Außerdem könnte es für die sich direkt hinter der Staumauer befindlichen Häuser wegen der fehlenden Kontrolle des Abflusses kritisch sein. Die verschiedenen Situationen könnten mehr als 500 Menschen betreffen.

3.3.5.2 Auswirkungen eines eventuellen Dammbruchs

Für den Fall des Staudamms von Tikaré sind im Falle eines Dammbruches die Überflutungen der hinter der Staumauer liegenden Häuser und Felder die größten Risiken. Die größte Zahl der Häuser befindet sich im Korridor des Gewässerflusses (Wadi), in dem der Damm gebaut wurde. Von dem Zerstörungspotential betroffen wären auch eine Gesundheitszentrum, eine Polizeistation und der Markt. Zusätzlich zu den Wohnhäusern, Brunnen (Trinkwasserversorgung) und Feldern könnte die wichtige Verbindungsstraße Kongoussi und Ouahigouya, die hinter dem Staudamm liegt, zerstört werden, da es kein Hochwasserableitungssystem gibt.

3.3.6 Analyse der Hypothese über den Wasserverlust des Staussees Tikaré, Lösungsvorschläge für eine Sanierung und Empfehlungen für den Bau kleiner Staudämme in Lateritgebieten

3.3.6.1 Hypothese über den Wasserverlust

Die Feldarbeiten, die im September 2007 (Ende der Regenzeit) durchgeführt wurden, haben folgende Befunde für den Wasserverlust des Stausees Tikaré gezeigt:

1. Exfiltration durch die Risse, Lehmgruben und Erosionsbereiche zu den Lateritgrundwasserleitern. Die ersten Hinweise für eine mögliche direkte Infiltration des Wassers in die Lateritgrundwasserleiter ist das schnelle Absinken des Wasserspiegels. Da die monatliche Verdunstung im September im Durchschnitt bei 59 cm (Daten von Ouahigouya, DGMN 2006) oder ca. 2 cm/Tag liegt, konnte ein Wasserverlust des Stausees im Durchschnitt von mehr als 6 cm pro Tag (Abbn. 55, 56) gemessen werden. Die Ursachen für die Differenz von ca. 4 cm Wasser pro Tag kann nur als Folge der Exfiltration des Sees in den Untergrund (Infiltration in den Laterit-Aquifer) erklärt werden, da kein Wasser zum Beispiel für den Gartenbau entnommen wurde.

2. Ein zweiter Hinweis ist, dass der direkte Abstrombereich des Dammes komplett versumpft und z.T. überflutet ist (Abbn. 59a und 59b). Die Piezometer UFZ3 und UFZ4 sowie die Brunnen (Trad I und Trad II) haben den gleichen Wasserstand wie das Wasser im Staubecken (Abb. 58). Das setzt einen hydraulischen Niveauausgleich des Wassers in den unterirdischen Schichten des Dammes voraus (Anstrom und Abstrom). 3. Den dritten Hinweis könnte das Verhältnis der stabile Isotopen (δ^{18} O, δ D) der Wasserproben des Stausees, der Brunnen Trad I und Trad II sowie der Piezometer UFZ3 und UFZ4 liefern, denn es wurde eine Anreichung von ²H der Proben vom Stauseewasser in Richtung UFZ4 festgestellt (Abbn. 60 und 60). Die Theorie lautet, dass das im Staubecken gesammelte Wasser schnell versickert, in die darunterliegenden Grundwasserleiter eindringt, sich dort mit im Sediment befindlichen schweren Isotopen anreichert und in Richtung Abstrombereich des Dammes fließt. Dies wird durch die Erhöhung des Gehalts von ²H mit der progressiven Entfernung der Brunnen von dem Dammbett festgestellt (Stauseewasser-UFZ3-Trad I-Trad II-UFZ4).



Abb. 55: Höhe des täglichen Wasserverlustes im Stausee (09.2007)



Abb. 56: Schematische Darstellung des täglichen Wasserverlustes am Stausee von Tikaré durch Verdunstung und Infiltration



Abb. 57: Schematische stratigraphische Darstellung der oberflächlichen Formationen im Dammbett von Tikaré (Trockenzeit)



Abb. 58: Schematische Darstellung des Stausees von Tikaré (Regenzeit)



Abb. 59: Anblick des Abstromseite des Stausees a), und b) (Regenzeit)



Abb. 60: Geographische Lage der Brunnen TradI, II, III und UFZ3 und 4 im Stauseeumfeld



Abb. 61: Isotopengehaltsgraphik von Proben in der Umgebung des Stausees von Tikaré (09.2007)

Die Röntgen-Aufnahmen (Abbn. 62a und 62b) der Laterit-Proben, die aus dem Schachtmaterial der Piezometer (Anstrom und Abstrom) 02.2006 entnommen wurden, zeigen das enorme, hydraulisch wirksame Porenvolumen des Laterits ist. Es wird festgestellt, dass fast alle Poren und Kanäle (Termitengänge) miteinander verbunden sind, und kommunizieren. Die Tatsache, dass dieselben Lateritmuster im Anstrom und Abstrom angetroffen wurden, bestätigt die unterirdische Verbindung des Wassers in dem Laterit-Aquifer. Der hydraulische Einfluss von Frakturen konnte nicht festgestellt werden, da die Tiefenlagen eine direkte Beobachtung ausschließt.



Abb.62: a) und b): Röntgenaufnahme (Falschfarbenkomposite) von Lateritproben aus den Piezometern (ungefähr 8 m tief)



Abb. 63: a) und b): Wasserstände in alten und neuen Lehmgruben (09.2007)

3.3.6.2 Lösungsvorschläge für eine Sanierung

Nach der Bewertung und Analyse der Feldarbeitsdaten vom Standort des Dammes von Tikaré ist es angemessen zu sagen, dass der Damm seiner Rolle als Oberflächenwasserspeicher für die Bevölkerung **nicht** gerecht wird. Ein Umbau scheint erforderlich, wenn man das Staubauwerk in vollem Umfang nutzen möchte.

Vorausgesetzt, dass ausreichende finanzielle Mittel zur Verfügung stünden, könnte auf der Grundlage detaillierter eines Geotechnischen Gutachtens, Ingenieur- und hydrogeologischer Gutachten, einem Gutachten zur Umweltverträglichkeit und einem Sozioökonomischökologischen Gutachten folgendes Sanierungskonzept für den Stausee von Tikaré angewendet werden:

1. Den Bau einer unterirdischen Dichtwand im Stauraum unmittelbar vor dem Staudamm (Schmalwand [Das Prinzip besteht darin, einen ca. 0,6 m breiten Graben parallel zur Staumauer (Anstrom) bis zu der Tonschicht zu fräsen] aus Bentonit etwa 12 bis 14 m Tiefe nach Abschätzung der Brunnenbauer) (Abb. 64). Von dieser Dichtwand (Schmalwand) wird eine wasserdichte Plastikfolie (bewehrte Industriefolie) in Richtung Damm. Die Dichtwand muss so abgedeckt sein, dass eine spätere Erosion ausgeschlossen werden kann.

2. Es müssen auch, wenn möglich, alle Lehmgruben (Ziegeleigruben) und alten Brunnen im Stauraum mit bindigem Lockergestein abgeschlossen werden. Die wasserdichte Plastikfolie kann sehr hilfreich sein, wenn das Füllmaterial Mängel zeigt. Wenn alles regelgerecht ausgeführt wurde, werden alle später versickerten Wässer, anstatt Richtung Abstrom zu fließen, die Poren der Laterite nach und nach unter dem Stauraum auffüllen. Sobald alle Poren gefüllt sind, werden die folgenden Wässer an der Oberfläche gespeichert. Dann sollte genügend Wasser für die Bedürfnisse der Bevölkerung über die Trockenzeit verfügbar sein.

3. Die Infiltration des Wassers in die Lateritgrundwasserleiter könnte auch vermindert werden, wenn man Injektionen mit dem gleichen wasserdichten Material in die unteren Schichten vornimmt. Da die Poren der Laterite miteinander verbunden sind, kann das Material in die Poren eindringen und sie schließen. Dieses Verfahren könnte eine zweite Lösung für die Sanierung des Stausees sein oder die Sanierung unterstützen. Dieses Verfahren birgt allerdings die Gefahr, dass nicht alle hydraulischen Wege verschlossen werden und ein +/- geringerer Wasserablauf möglich ist.

Zusätzlich zur Abdichtung der Staumauer und des Staubeckens (Lehmgruben) muss auch ein gut geeigneter Überlauf gebaut werden (Abbn. 65 und 66). Der Überlauf ist in Beton auszuführen, um seine Erosion und die des Damms zu verhindern. Auch die Ränder des Überlaufes sind bautechnisch vor einer Kontakterosion zu schützen. Um eventuelle Leckagen der Staumauer zu verhindern, wird es empfohlen die o.g. Plastikfolie unter die Steinpackungen (Anstrom der Staumauer) zu verlegen. Diese könnte eine Verlängerung derselben Plastikfolie sein, die für den Graben benutzt wurde. Eine solche Einrichtung (einzelne Folie für die beiden Teile) hat den Vorteil, dass jede Wasserleckage zwischen der Staumauer und der Bodenoberfläche (falls die Staumauer direkt auf dem Boden liegt) zu verhindern. Dann blockiert sie jegliches Eindringen von Wasser in das Innere des Dammes. Wenn genügend finanzielle Mittel verfügbar sind, können die Steinpackungen zementiert oder asphaltiert werden, um die Wasserdichtigkeit der Staumauer zu erhöhen.



Abb. 64: Schematische Darstellung des Stausees von Tikaré nach Sanierung



Abb. 65: 3D-Ansicht einer idealen Staumauer für den Stausee von Tikaré und im Lateritgebiet



Abb. 66: Draufsicht einer idealen Staudamm für den Stausee von Tikaré und im Lateritgebiet

Die Kontaktzonen könnten auch Leckagebereiche zwischen der Staumauer und den Laterithügeln sein und müssen ebenso abgedichtet werden. Denn die Laterithügel, die scheinbar frisch sind, sind sehr porös (vor allem die am linken Flussufer), da die Lateritgrundwasserleiter im Dammbett ihre Fortsetzung sind. Da die Staumauer bereits gebaut ist, wäre eine Zementierung die am besten geeignete Lösung für die Verdichtung der Kontaktzonen.

3.3.6.3 Empfehlungen für den Bau kleiner Staudämme in Lateritgebieten

In den kristallinen Gebieten von Burkina Faso sind die Laterite Grundwasserleiter (SAVA-DOGO, 1984). Fast alle Brunnen im Norden des Landes fassen dieses Aquifer. Dieser Aspekt muss daher während des Baus von oberflächlichen Wasserstauanlagen in Lateritgebieten berücksichtig werden. Geotechnische, geologische und hydrogeologische Voruntersuchungen sollten durchgeführt werden, um die Porositätsniveaus und hydrodynamischen Parameter des Laterits zu charakterisieren. Gleichzeitig muss die Wasserdichtigkeit der Abdeckung beachtet werden, nachdem sichergestellt wurde, dass es keine Risse darin gibt. Für den Fall, dass es Risse gibt und trotzdem eine Entscheidung für die Fortsetzung des Baus getroffen wird, wird eine Injektion mit wasserundurchlässigem Material empfohlen. Das Ziel ist, die Risse dicht zu machen und gleichzeitig die Porosität des Laterits zu verringern. Dazu muss eine unterirdisch wasserdichte Mauer (Schmalwand mit Tonmaterialen) herstellen werden. Diese sollte vorher mit einer wasserdichten Folie bedeckt werden. Eine solche Einrichtung hat die Aufgabe, den Abfluss versickerter Wässer zu verhindern oder zu vermindern. Die Eigenschaften des Mauergrabens, der tonhaltigen Füllung und der undurchlässigen Plastikfolie müssen sehr genau überprüft werden.

Es kann auch passieren, dass die Kontaktzonen zwischen Staumauer und eventuellen Laterithügeln zur Leckage oder Infiltration führen. Um diese zu beseitigen oder drastisch zu vermindern, könnte der Bau einer in den Laterit eingelassenen Staumauer die beste Lösung sein. Aber das Plazieren einer wasserdichten Folie zwischen den beiden Teilen (Laterit und Mauer) gefolgt von einer Zementierung wäre eine Alternativ- oder Zusatzlösung.

Da sich durch die Staumauer kleine Leckagen ergeben können, sollte ihre Undurchlässigkeit überprüft werden. Der Bau einer zementierten Steinpackung (auf Grund sehr starker Sonneneinstrahlung sind asphaltierte Dehnungsfugen vorzusehen!) ist zu empfehlen. Andernfalls könnte die Verlegung einer wasserdichten Kunststofffolie unter nicht zementierte Steinpackungen durchgeführt werden. Die Spitze der Staumauer muss entweder betoniert oder mit zementierter Steinpackung bedeckt werden. So wird ihre Erosion durch Regenwasser verhindert. Um die Nutzung der Staumauer als Verkehrweg zu verhindern, sollte einen parallelen Laufweg (mit Steinpackung aus Laterit), der hinter der Mauer liegt, gebaut werden. Das wird dabei eine weitere soziale Rolle spielen.

Hinsichtlich des Überlaufs sollte der Bau einer unterirdischen Variante verhindert werden, da eine Mängel zum Wasserverlust durch den darunterliegenden Lateritgrundwasserleiter führen kann. Als Modell könnte die auf den Abbn. 65 und 66 dargestellten Staumauer durchgeführt werden.

Wenn alle diese Maßnahmen durchgeführt werden, können ähnliche Situationen, wie sie beim Stausee von Tikaré zu sehen sind, vermieden oder vermindert werden.

3.4 Hydrochemische und isotopische Untersuchung der Wasserressourcen

3.4.1 Allgemeines und physikalisch-chemische Parameter

Die lebensentscheidende Ressource "Wasser" muss zunehmend unter Berücksichtigung unter dem Aspekt "Global warming" betrachtet werden. Eine Weitererwärmung der Atmosphäre aber auch der festen Erdkruste wird auch zur quantitativen und qualitativen Veränderung der Wasserressourcen führen. Diese Betrachtung wird heutzutage immer wichtiger, da die Ressource immer knapper wird. Wasser kann auch für die Menschen zu gesundheitlichen Schäden führen. Die natürlichen Wasserressourcen (Niederschlag, Meer, Oberflächen- und Grundwasser) sind die Hauptumweltkomponenten, die von Übernutzung oder Verschmutzung durch menschliche Aktivitäten auf der Erde bedroht sind (EFE 2002). Daher muss man der Kontamination durch natürliche und anthropogene Ursachen mehr Aufmerksamkeit schenken. Hinsichtlich des Grundwassers sagen TODD & MAYS (2005), dass heutzutage die Grundwasserqualität so wichtig wie seine Menge ist. Trotzdem wird in vielen Aridländern, so auch Burkina Faso, die Verfügbarkeit des Grundwassers viel mehr beachtet als seine Qualität. Folglich gibt es sehr wenige Daten über die Qualität und Chemie der Wasserressourcen. Das Problem ist, es gibt in Burkina Faso viele Faktoren, welche die Wasserqualität verändern können, wie z.B. die Industrie, Bergbau, Haushaltabfälle oder Landwirtschaft.

Da im Untersuchungsgebiet die wesentliche Trinkwasserressource Grundwasser ist, wurden die genutzten Brunnen für die weiteren Untersuchungen in zwei Kampagnen beprobt. Da sie nicht sehr tief sind (im Durchschnitt 13 m) und nicht gut geschützt sind, sind sie empfindlich für den Eintrag von anthropogenen Schadstoffen oder spezifischen chemischen Verbindungen. Da in Burkina Faso nur wenige Untersuchungen über die Qualität und die chemischen Parameter dieser Wasserressourcen vorliegen, hat diese Arbeit eine sehr große soziale und wissenschaftliche Bedeutung.

3.4.1.1 Allgemeines

In den letzen Jahren wurde in Burkina Faso immer mehr Grundwasser als Trinkwasser gefördert. In einigen Städten wird die Trinkwassergewinnung aus Bohrungen oder Stauseen durch das staatliche Unternehmen (ONEA) durchgeführt. Aber auf dem Lande ist die Versorgung durch Rohwasser direkt aus Schacht- und / oder Bohrbrunnen ohne vorherige Untersuchung oder Aufbereitung die Regel. Dabei besteht ein Gesundheitsrisiko, das sowohl auf einem natürlichen hydrochemischen Hintergrund aber auch auf Unaufgeklärtheit der Bevölkerung hinsichtlich des Schutzes der Wasserfassungen und der Einzugsgebieten beruhen kann. So wurde z.B. im Laufe des Jahres 2006 Arsen in Bohrbrunnen im Norden des Landes festgestellt, erst nachdem Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung aufgetreten waren.

3.4.1.2 Beeinflussende Parameter der Grundwasserchemie und ihre Relevanz

Die Parameter der Grundwasserchemie sind durch viele Faktoren bestimmt. Grundwasser enthält chemische Stoffe, deren Konzentrationen von den Neubildungsmechanismen, der ursprünglichen Zusammensetzung des Wassers (dem Regen), der Landnutzung, den Gesteinen sowie der Volumen abhängig sind. Die geochemischen Eigenschaften des Grundwassers und die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Geosphäre ändern sich durch die Interaktion von Wasser und Gestein mit der Zeit (DREVER 1988).

Auch viele weitere Variable können die Qualität einer Wasserprobe beeinflussen. Zu diesen zählen die hydrogeologische Einheit, die Tiefe des Brunnens, die Verweilzeit, die anthropogenen Auswirkungen, die Rohr- und Pumpenmaterialen und die Mineralogie der Wasser Klüfte (CUNNINGHAM & DANIEL 2001). Dazu nennt CUSTODIO (1989) andere Parameter wie die Chemie des Regenwassers, das Klima, die Gesteine und ihre Verteilung, die Temperatur und den Druck.

Die Kenntnis der Zusammensetzung des natürlichen Grundwassers kann also wichtige Informationen über seine Natur, sowie Informationen über die verursachten Reaktionen der natürlichen Chemie und Neubildung, die Bewegung, die Mischungsprozesse und die Entladung des Grundwassers geben (TODD & MAYS 2005).

Zusammenfassend kann man sagen, dass die chemische Zusammensetzung des Grundwassers von atmosphärischen und anthropogenen Quellen, der Interaktion mit dem Boden und dem Sockel (Gesteine) verursacht sind. Die Korrelation zwischen der Wasserchemie und den hydrologischen und geologischen Umfeldern liefert somit wertvolle Informationen über die Grundwasserleiter.

3.4.1.3 Probenahme und Vor-Ort-Messungen

a) Probenahme (Methodik)

Die Probenahme ist einer der wichtigsten Schritte für jede Wasseruntersuchung. Bei unsachgemäßer Durchführung kann es zu falschen Ergebnissen, Analysen und Interpretationen kommen. Deswegen wurden die zwei Probenahmen für die vorliegende Untersuchung besonders sorgfältig durchgeführt. Die Erste fand zwischen dem 28. März und dem 04. April 2007 statt, und die zweite zwischen dem 17. und dem 24. September 2007 (Abbn. 67a und 67b). Dabei wurden 19 traditionelle Brunnen, 2 Bohrungen mit Handpumpe, 1 Natursee und 2 Dämme bei der ersten Probenahme beprobt, bei der Zweiten waren es 20 traditionelle Brunnen, 2 Bohrungen, 2 Piezometer und 6 Oberflächengewässer. In dieser Arbeit werden die Proben der ersten Kampagne als Trockenzeitproben bezeichnet, und die der zweiten Kampagne als Regenzeitproben. Der Unterschied in der Anzahl der Proben zwischen den beiden Jahreszeiten ist durch die Austrocknung einiger Stationen in der Trockenzeit zu erklären. Das Ziel, zwei Kampagne chen Veränderung der Gehalte der einzelnen chemischen Elemente in den Gewässern zu machen, und mögliche Einflüsse der Neubildung über die Grundwasserqualität und -chemie zu bestimmen.



Abb. 67: Probenahme und Vor-Ort-Messungen a) am Stausee von Tikaré und b) an Trad XI (09.2007)



Abb. 68: Lage der Grundwasser-Probenahmestellen

Die traditionellen Brunnen wurden mit einer elektrischen Pumpe (Trockenzeit) und einem mechanischen Verfahren (Regenzeit) beprobt.

Bei Verwendung der elektrischen Pumpe wurde das Wasser fünfzehn Minuten bepumpt, danach beprobt und filtriert. Die filtrierten Proben wurden in Flaschen (200 und 100 ml) eingefüllt und angesäuert (H_2SO_4 in April und HNO_3 in September). Die gefüllten Fläschchen wurden in einem Probenahmekoffer und einer Kühlbox aufbewahrt, und schließlich vor dem Transport nach Deutschland in einem Kühlschrank gelagert. Die verwendeten Filter hatten eine Porengröße von 45μ m. Bei der mechanischen Variante wird das Wasser mit einer Probenahmeflasche bei etwa 2/3 der Wassertiefe entnommen. Die Behandlung der Fläschchen und die Aufbewahrung der Proben folgen dem oben beschriebenen Verfahren. Die Abbildung 68 gibt einen Überblick über die geographische Lage der Probenahmepunkte.

b) Vor-Ort-Messungen

Im Zuge der Probenahmen wurden folgende Parameter vor Ort gemessen: Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, gelöster Sauerstoff, Redoxpotential und pH-Wert. Die Messung erfolgte nach Stabilisierung des Messwertes mit drei Wiederholungen. Die genutzten Geräte waren zwei Multifunktions-pH-Meter Multi 350i mit ConOx-3 Sensoren.

3.4.1.4 Kontaminationsgebiete des Wassers und Bestandsaufnahme der Quellen von Schadstoffen

a) Kontaminationsgebiete des Wassers

Die Grundwassereinzugsgebiete weisen bezüglich ihrer Topographie, Geologie und Geomorphologie eine unterschiedliche Gefährdung auf. Im Allgemeinen haben Gebiete mit hohem Relief, geringer Durchlässigkeit und forstlicher Nutzung die niedrigste Kontaminationsgefährdung des Grundwassers. Im Gegensatz haben Gebiete mit geringem Relief, hoher Durchlässigkeit und intensiver Landnutzung die stärksten Potentiale für die Kontamination des Grundwassers (CUNNINGHAM & DANIEL 2001). Dabei haben die Grundwasser in den topographisch niedrigen Gebieten ein hohes Kontaminationspotenzial durch Haushaltsschadstoffe (aus Latrinen, Abwässern, Abfallentsorgung), Landwirtschaft und Industrie.

Entsprechend der oben genannten Angaben haben die Probenpunkte Trad VII, XVI und BOB4, die relativ hoch gelegen sind, geringere Gefährdung durch anthropogene Schadstoffe aus anderen Bereichen, im Vergleich zu den tiefer liegenden Brunnen. Ebenso sind die Bohrungen BOB2 und BOB3 aufgrund ihrer Tiefe weniger anfällig als die Brunnen.

b) Verzeichnis der Schadstoffquellen

Im Rahmen jedes Projekts über die Grundwasserbewirtschaffung ist es wichtig die Art und die Quellen der potentiellen Schadstoffe zu dokumentieren. Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurde eine solche Inventarisierung durchgeführt. Da keine Industrie im Arbeitsgebiet liegt, ist eine industrielle Kontamination der Grundwasserleiter ausgeschlossen. Die möglichen Schadstoffquellen im Arbeitsgebiet sollten daher die häuslichen Abwässer, die Klärgruben, die mineralischen und organischen Düngemittel aus der Landwirtschaft und mögliche Abfälle aus der handwerklichen Verarbeitung von Golderzen (Quecksilber) sein. Dazu ist auch die Nähe des medizinischen Zentrums von Tikaré zu einigen Probepunkten zu bemerken. Die wichtigsten chemischen Elemente die aus diesen Quellen stammen könnten, sind Nitrat, Chlor und Kalium. Wegen der handwerklichen Landwirtschaft und der relativ großen Entfernung der Klärgruben von den verschiedenen beprobten Stationen sollte jede Kontamination lokal sein.

3.4.1.5 Physikalisch-chemische Parameter

Die Vorortmessungen physikalisch-chemischer Parameter der Wässer geben grobe qualitative Informationen über ihren Zustand (CUNNINGHAM & DANIEL 2001). Die Vorortbestimmung dieser Parameter ist aufgrund ihrer nicht konservativen Eigenschaften notwendig. Erhebliche Abweichungen, die die Wasserressourcenqualität beeinflussen können, können bestehen, selbst wenn sie nicht systematisch sind. Die entsprechenden Messungen wurden während jeder Probennahme durchgeführt, um Informationen über möglichen saisonalen Schwankungen zu erzielen.

In den folgenden Kapiteln werden vergleichende Analysen der Schwankungen der verschiedenen Parameter und ihre eventuellen Korrelationen durchgeführt. Die Analyse der Beziehungen zu den gelösten Ionen wird in den Kapiteln bezüglich der Haupt-Ionen und Spurenelemente dargestellt.

a) Die Temperatur

Die Lufttemperatur ist eine der wichtigsten Klimaparameter, weil sie eine entscheidende Wirkung auf die Wasserressourcen hat. Sie ist der Faktor, der die Wasserverdunstung am meisten beeinflusst. Die mittleren Jahrestemperaturen (zwischen 1992 und 2006) im Arbeitsgebiet liegen zwischen 35° und 38°C (DGMN, Burkina Faso 2007). Die während der Geländearbeiten gemessenen Temperaturen lagen weitestgehend in diesem Bereich, konnten sich aber bei Wetterwechsel ändern.

Die gemessenen Spannweiten der Wassertemperatur und Amplituden in der Trocken- und Regenzeit sind in der Tabelle 6 zu sehen. Die Trockenzeitwerte entsprechen weitestgehend den Schattentemperaturen, die in der Regel im Gebiet beobachtet werden. Im Vergleich zu den Trockenzeitwerten sind die Spannweiten während der Regenzeit etwas geringer. Die durchschnittlichen Temperaturen zeigen, dass die Grundwässer in der Regenzeit wärmer sind als in der Trockenzeit. Die Gründe dafür könnten die unterschiedlichen Zeiten der Probenahme und/oder die Grundwasserstände oft sehr gering (bodennah, mitunter auf gleicher Höhe) sein.

	Trockenzeit (T°C)			Regenzeit (T°C)		
	Minimale Maximale Mittelwert			Minimale	Maximale	Mittelwert
Brunnenwässer	24,2	31,4	29,9	29,3	32,7	31,0
Bohrbrunnenwässer	30,9	31,5	31,2	30,9	31,1	31,0
Oberflächenwässer	26,0	33,3	28,8	28,3	34,0	30,7

Tabelle 6: Zusammenfassung der Temperaturwerte

b) Der pH-Wert

Der pH-Wert oder Wasserstoffpotential stellt den negativ dekadischen Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentraion einer wässrigen Lösung dar. Man berechnet ihn nach der folgenden Formel: pH=-log10[H^+], wobei [H^+] die Konzentration von H^+ (in Mol/l) ist.

Der pH-Wert einer neutralen wässrigen Lösung zeigt den Wert 7. Wenn der pH-Wert kleiner als 7 ist, bedeutet das eine Zunahme an Säure, während ein pH-Wert von mehr als 7 (mit einer Obergrenze von 14) eine Erhöhung der Alkalinität entspricht. Im letztgenannten Bereich gibt es einen Überschuss an [OH⁻]- gegenüber H⁺ Ionen.

Es wurden einige Auswirkungen des pH-Werts auf die im Wasser gelösten Stoffe dargestellt. Der pH-Wert beeinflusst die Löslichkeit vieler Stoffe im Wasser (HÖLTING, 1996). FATOKI et al. (2002) beschreibt, dass der pH-Wert des Wassers sehr wichtig ist, weil er die Löslichkeit und die Toxizität von Metallen in den Grundwasserleitern beeinflussen kann. Es ist wichtig dies zu unterstreichen, da die Einwohner die beprobten Grundwässer hauptsächlich für ihre Haushaltsbedürfnissen nutzen. Der Standard pH-Wert für die Haushaltwasserqualität liegt zwischen 6 und 9.

Die gemessenen pH-Werte (Trocken- und Regenzeit) sind in der Tabelle 7 zusammengefasst. Die Werte zeigen neutral bis schwach saure Signatur. Im Hinblick auf die pH-Werte sind nur 7 der untersuchten Proben für den häuslichen Wassergebrauch geeignet. Die anderen Proben sind entweder sehr sauer oder alkalisch.

Tabelle 7: Zusammenfassung o	der pH-Werte
------------------------------	--------------

	Trockenzeit			Regenzeit		
	Minimale Maximale Mittelwert		Minimale	Maximale	Mittelwert	
Brunnenwässer	4,93	6,61 (9,86!)	5,78	5,37	6,83	5,82
Bohrbrunnenwässer	5,42	7,14	6,28	5,78	6,26	6,02
Oberflächenwässer	7,70	7,97	7,82	7,19	7,95	7,64

Ein Vergleich zwischen Trocken- und Regenzeit zeigt keine erhebliche Veränderung der durchschnittlichen Werte. Insgesamt wird die schwach saure Tendenz der Trockenzeitproben bestätigt. LANGMUIR (1997) schreibt dazu, dass natürliche Gewässer mit pH-Werten von 4,5 bis 7,0 (wie bei fast allen Proben, mit Ausnahme von BOB3 und BOB4) schwache Säure wie Kohlensäure und Fulvosäure umfassen. Diese relativ niedrigen pH-Werte würden auch natürliche Bedingungen voraussetzen, denn die Brunnen sind nicht sehr tief und nicht gut geschützt gegen oberflächliche Infiltration.

Ein Grundwasser mit einem pH-Wert von über 9,0 wird als "Gesteins-dominant" anstatt "Wasser-dominant" bezeichnet (LANGMUIR 1997), d.h. sie gehören zu tiefen Wässern, die nicht vor kurzer Zeit nicht neu gebildet worden sind. Nur eine der Proben scheint so gekennzeichnet (pH> 9) zu sein: die BOB4 (Trockenzeit). Aber diese stammt aus einem Brunnen, der 11 m tief ist. Einen Austausch oder eine Mischung zwischen zwei Wässern von zwei unterschiedlichen Grundwasserleitern (oberflächlich und tief) könnte ein der Gründe sein.

(Dieser hohe pH-Wert konnte nicht in der Regenzeit bestätigt werden. Es konnte nicht geklärt werden, ob es sich um einen Messfehler handelt oder andere Gründe die Ursache dafür sind.)

Die geochemische Entwicklungen des Regenwassers ist typischerweise durch eine schrittweise Senkung (durch die Zersetzungsreaktionen der Silikatmineralien) des pH-Wertes bei zunehmender Tiefe gekennzeichnet (STUMM & MORGAN 1996). Diese Annahme trifft nur bei 42% der Proben (Trockenzeit) zu. Die geringere Tiefe (Durchschnitt 13 m) der Proben, die keinen guten Kontakt zwischen Wasser und Silikatmineralien erlauben, könnte eventuell eine Erklärung dafür sein.

Da es keine große Abweichung der pH-Werte gibt, ist es wahrscheinlich, dass die Grundwässer aus ähnlichen Grundwasserleitern stammen. Wenn man die pH-Werte zusammen analysiert, bilden sie dennoch zwei Gruppen: pH-Wert über 7 (nur Oberflächenwässer in der Regenzeit und Oberflächenwässer + 1 Bohrungswasser in der Trockenzeit) und pH-Wert unter 7 (Grundwässer in der Regen- und Trockenzeit) (Abbn. 69a und b).





Abb. 69: Gruppierung der Proben anhand ihrer pH-Werte a) in der Regenzeit und b) in der Trockenzeit

Der pH-Wert korreliert mit der elektrischen Leitfähigkeit relativ gut korreliert (r = 0,69) (Abb. 70). Mit der Redoxspannung besteht eine negative Korrelation (Trocken- und Regenzeit) mit dabei einem Korrelationskoeffizient von r = 0,76 in der Trockenzeit (Abb. 71; hier wurde der pH-Wert 9,86 nicht berücksichtig, da er wahrscheinlich ein Ausreißer ist).



Abb. 70: Korrelation pH-Wert – Leitfähigkeit (Regenzeit)



Abb. 71: Korrelation pH-Wert – Redoxspannung (Trockenzeit)

c) Die elektrische Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit ist die Fähigkeit des Wassers Strom und gelöste Ionen, zu transportieren (KÖLLE 2001). OTTO (2000) definiert die spezifische Leitfähigkeit als Kehrwert des spezifischen Widerstands:

$K=1/p [\Omega^{1}cm^{-1}]$

Mit: K = spezifische Leitfähigkeit und p = spezifischer Widerstand.

Die Maßeinheit der Leitfähigkeit ist 1 Siemens/cm (S/cm). Für Gewässer wird normalerweise ein Mikro-Siemens/cm (μ S/cm) als Maßeinheit der Leitfähigkeit verwendet. Ihr Wert ist unter anderem vom Trennungsniveau der organischen und anorganischen Elektrolyten und der Temperatur der Probe abhängig (SCHWEDT & SCHNEPEL, 1981). Die Leitfähigkeit ist direkt proportional zu der Konzentration und der Ladung der Ionen, sowie ihrer Migrationgeschwindigkeit in einem elektrischen Feld. Der Beitrag der gelösten Ionen wie Ca²⁺, Mg²⁺, usw. zu der Größe der elektrischen Leitfähigkeit ist größer als der von Nitrat (NO₃⁻) und Phosphat (PO₄³⁻). Da die aufgelösten Ionen den Salzgehalt sowie die Leitfähigkeit erhöhen, sind die beiden Maße miteinander verbunden. Es wird dann von eine gegenseitigen Abhängigkeit zwischen elektrischer Leitfähigkeit und TDS (Total Dissolved Solids) gesprochen.

Da sich der elektrische Leitfähigkeitwert mit der Herkunft des Wassers oder seiner Natur (Grundwasser, Landwirtschaftsnetzwerkswasser oder Regenwasser usw.) ändert, ist eine differentielle Analyse notwendig. So liegen die elektrischen Leitfähigkeitswerte des Grundwassers der beiden Jahreszeiten zwischen 43,8 und 403 µS/cm für die Trockenzeit und 25,2 und 252 µS/cm für die Regenzeit. Für die Oberflächenwässer sind die Werte für die Trockenzeit beziehungsweise für die Regenzeit zwischen 81 bis 93,6 µS/cm und von 81 bis 99,1 µS/cm. Diese Werte bedeuten eine geringe Mineralisierung der Gewässer. Nur zwei Werte (Trad X: 403 µS/cm und Trad XV: 350 µS/cm) waren über 250 µS/cm (Regenzeit). Der Trad X hat auch eine ungewöhnlich hohe Konzentration von Nitrat (123 mg/l in der Trockenzeit). Diese beiden Werte scheinen also korreliert zu sein, d.h. eine Kontaminierung. Fünf Proben zeigen eine erhebliche Erhöhung ihrer Leitfähigkeitswerte in der Regenzeit im Vergleich zur Trockenzeit (Trad VI: 74 und 205 µS/cm; Trad VIII: 61 und 131 µS/cm; BOB2: 58,6 und 95,5 µS/cm; BOB3: 60,2 und $252 \ \mu\text{S/cm}$ und BOB4: 156 und 207 $\mu\text{S/cm}$). Alle anderen Proben haben entweder ähnliche Werte für beide Jahreszeiten oder die Werte sind höher in der Trockenzeit. Bezüglich des letzten Falls könnte eine erhöhte Konzentration der Ionen infolge der Verdunstung des Wassers in der Trockenzeit oder eine Verringerung der Konzentration durch Verdünnung der Ionen in der Regenzeit (durch die Neubildung) sein. Bei den Proben, die eine höhere elektrische Leitfähigkeit in der Regenzeit zeigen, könnte eine Auslösung der Ionen, die in den verbleibenden Sedimenten oder an den Wänden der Brunnen in der Trockenzeit festgehalten wurden, die Ursache sein. Allerdings konnte man diese Hypothese nicht bestätigen. Eine Zusammenfassung der elektrischen Leitfähigkeitswerte befindet sich in der Tabelle 8.

	Trockenzeit			Regenzeit		
	Minimale	Maximale	Mittelwert	Minimale	Maximale	Mittelwert
Brunnenwässer	43,8	403,0	130,9	25,2	207,0	89,5
Bohrbrunnenwässer	58,6	60,2	59,4	95,5	252,0	173,8
Oberflächenwässer	77,8	99,1	86,0	41,3	93,6	55,9

Tabelle 8: Zusammenfassung der elektrischen Leitfähigkeitswerte (µS/cm)

Bezüglich der Oberflächengewässer sind alle Leitfähigkeitswerte in der Trockenzeit höher als in der Regenzeit. Vermutlich spielt dabei die Verdunstung eine große Rolle durch die sich die Konzentration der Ionen in den verbleibenden Wässern erhöht. Entsprechend der saisonalen Veränderung der elektrischen Leitfähigkeitwerte können die Proben in drei Kategorien eingeteilt werden:

- die Proben, die keine erhebliche Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit durch die Jahreszeiten zeigen: Trad I, II, III, IV, VII, XVI, XVII, XVII;
- die Proben mit einem beträchtlich höheren Leitfähigkeitswert in der Regenzeit gegenüber der Trockenzeit (Trad VI, Trad VIII, BOB2, BOB3 und BOB4, wo BOB2 und BOB3 Tiefbohrungen sind);
- die Proben mit einer geringeren Leitfähigkeit in der Regenzeit gegenüber der Trockenzeit (Rest der Proben) (Abb. 72).

Wenn man die Proben zusammen analysiert, bilden sie drei Gruppen (in der Trocken- und Regenzeit): mit mehr als 200 μ S/cm, zwischen 100 und 200 μ S/cm und weniger als 100 μ S/cm. Nur in der Regenzeit zeigt eine Bohrung einen Leitfähigkeitswert von mehr als 200 μ S/cm. Ansonsten sind diese zusammen mit den Werten der Oberflächenwässer weniger als 100 μ S/cm (Abbn. 73a und 73b).

Die räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeitswerte zeigt, dass diese am Abstrombereich des Stausees um die Proben Trad X und Trad XV in der Trockenzeit am höchsten sind (Abb. 74a). In der Regenzeit sind die höchsten Werte um die Proben Trad VI, Trad X und BOB3 zu finden immer noch am Abstrombereich (Abb. 74b). Diese hohen Werte bedeuten entweder eine hohe Mineralisierung oder eine Kontaminationsbereich im Arbeitsgebiet.

(BOB4 scheint eine Anomalie im Anstromsbereich zu sein.)

Im Hinblick auf die Korrelation zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und den weiteren physikalisch-chemischen Parametern ergibt sich:

- der beste positive Wert mit dem pH-Wert (f
 ür die Brunnenwässer mit r = 0,69, Abb. 70, s. 85);
- mit der Redoxspannung einen negativen Korrelationskoeffizient (r = -0,59) (Abb. 75).



Abb. 72: Komparative Variation der Leitfähigkeit (Trocken- und Regenzeit)



Abb. 73: Verteilung der Leitfähigkeitswerte in den Proben a) Regenzeit und b) Trockenzeit





Abb. 74 : Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeitswerte a) Trockenzeit und b) Regenzeit



Abb. 75: Korrelation Leitfähigkeit – Redoxspannung (Regenzeit)

d) Die Redoxspannung (Eh)

Die Redoxspannung (Maßeinheit mV) einer Lösung ist die Größe ihrer Oxydations- und Reduktionsereignisse. Sie stellt den Gehalt der Lösung an oxidierenden und reduzierenden Stoffen (MICHARD 1967) dar. Die Redoxpannung ermöglicht die Einstufung einer wässrigen Lösung zu einer oxydierenden Lösung (Anwesenheit von Sauerstoff) oder einer eher reduzierenden Lösung (Sauerstoff-Mangel). Eine Oxidation bedeutet, dass ein Ion oder ein Molekül Elektronen verliert. Es erfolgt automatisch einen Elektronenverlust oder -Gewinn, so dass man über reversible Redoxreaktionen spricht.

Die Redoxspannung in Wässern wird durch die Präsenz von oxidierbaren organischen Stoffen und Sauerstoff definiert. Die Stoffe, die hauptsächlich an den Reaktionen beteiligt sind, sind organische Stoffe, Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel und Metalle, wie Eisen und Mangan. Je stärker die Oxidation ist, desto positiver ist die Redoxspannung, und je stärker die Reduktion ist, desto negativer ist die Redoxspannung. Da die Wasserstoffkonzentration bei vielen Redox-Prozessen eine Rolle spielt, ist das Elektrodenpotenzial von dem pH-Wert abhängig. Das Elektrodenpotenzial sinkt, wenn der pH-Wert steigt (OTTO 2000). Die Redoxreaktionen liegen vielen analytischen Prozesse zu Grunde. CHEN et al. (2003) beschreibt, dass die Redoxreaktionen in den Grundwasserleitern zur Bildung neuer Mineralienphasen sowie zu Änderungen der Wasserzusammensetzung führen können.

Die Redoxspannung wird durch die NERNSTSCHE Gleichung bestimmt:

E=E0+2,3RT/ZF*ln(Ox/Red)

Mit:

• R (Gaskonstante) $8,314J^*K^{-1}*mol^{-1}$

- F (Faradaykonstante) $96,485*103V^{-1}*mol^{-1}$
- Z: Anzahl der ausgetauschten Elektronen
- T: Temperatur in Kelvin
- E0: Standard-Elektrodenpotential in Volt (Normalpotential)
- E: Elektrodenpotential
- Ox: Aktivität der oxidierten Form des Stoffes
- Red: Aktivität der reduzierten Form des Stoffes

Der gemessene Wert muss korrigiert werden, um den Wert auf die Standard-Wasserstoff-Elektrode zu beziehen. Die Formel lautet:

$E_H(korr.) = E_H - 0198 * (T - 25) + (50230, 214 - 294, 67714 * T) - 2$

Wobei:

- E_H (korr.): der korrigierte Redoxspannungswert (mV);
- E_H: die gemessene Redoxspannung (mV);
- T: die gemessene Temperatur (°C) sind.

In der vorliegenden Untersuchung liegen die gemessenen Redoxspannungen unabhängig von der Jahreszeit zwischen der Übergangzone und dem oxidierenden Bereich. Das gilt sowohl für die Grundwässer als auch für die Oberflächenwässer. Die Tabelle 9 fasst die entsprechenden Werte zusammen. In der Regenzeit zeigen die Werte eine gewisse Einheitlichkeit (nur zwei Werte sind größer als 500 mV, BOB2: 504 mV und BOB3: 564 mV). Dagegen entsteht eine gewisse Variabilität für die Trockenzeitwerte, die eine Amplitude von ca. 300 mV zeigen (Abb. 76). Wenn der Sauerstoff der wichtigste Faktor für die Redoxspannungswerte ist, könnte man die relative Monotonie in der Regenzeit mit einer nahezu einheitlichen Zufuhr dieses Elementes im Zuge der Grundwasserneubildung, die in dieser Jahreszeit stattfindet, erklären.

Die Trockenzeitwerte zeigen sechs Proben, die mehr reduzierend sind (Trad VI: 360 mV, Trad XII: 339 mV, Trad XIII: 333 mV, Trad XIV: 265 mV, Trad XV: 227 mV und BOB2: 348 mV) (Abb. 76). Drei Proben dieser Gruppe zeigen auch die niedrigsten Sauerstoffwerte: Trad VI: 0,14 mg/l, Trad XII: 0,14 mg/l und Trad XV: 0,13 mg/l (Abb. 76). Das könnte zumindest für diese drei Proben bedeuten, dass der Sauerstoff der beeinflussende Faktor des Redoxspannungswertes ist. Für die anderen Proben sollten die mikrobielle Aktivitäten und der Bioabbau mehr berücksichtigt werden.

	Trockenzeit			Regenzeit		
	Minimale	Maximale	Mittelwert	Minimale	Maximale	Mittelwert
Brunnenwässer	227	524	401	207	493	289
Bohrbrunnenwässer	348	465	407	302	363	333
Oberflächenwässer	391	455	425	201	248	225

Tabelle 9: Zusammenfassung der Redoxspannungswerte (mV)


Abb. 76: Vergleich der saisonalen Variation der Redoxspannung und des Sauserstoffes

e) Der Sauerstoff

Der Sauerstoff (O₂) dringt in Wasser ein durch:

- die Verbreitung von Sauerstoff an der Oberfläche;
- die Belüftung (Wasserbewegung); und
- die Photosynthese, wo die Produktion vom Licht, der Temperatur und der Anwesenheit der abbaubaren organischen Stoffe abhängig ist.

CUNNINGHAM & DANIEL (2001) schreiben, dass der Sauerstoff durch die Grundwasserneubildung aus Regenwasser und der vorhandenen Luft in der ungesättigten Zone ins Grundwasser eintrifft. Dieser verbleibt, bis zur Oxydation durch Bakterien, organische und reduzierende Mineralien (z.B. Pyrit) im Wasser. Ein kleiner Sauerstoffgehalt zeigt automatisch keine Kontamination, selbst wenn geringe Konzentrationen dieses Stoffes mit hohen Konzentrationen von Eisen, Mangan und Sulfat verbunden werden können. Hohe Sauerstoffgehalte können eine schnelle Grundwasserneubildung andeuten. Ein hoher Sauerstoffgehalt kann dem Trinkwasser einen besseren Geschmack verleihen, aber man versucht ihn möglichst gering zu behalten, damit er die Wasserrohre nicht korrodiert.

Der Abbau oder der Rückgang des Sauerstoffgehaltes im Wasser ist mit den dort lebenden Organismen und den chemischen Oxidationsprozessen verbunden (SCHWEBT & SCHNEPEL 1981). Diese Hypothese stimmt mit denen von STUMM & MORGAN (1996) überein, denen zufolge die Konzentration des gelösten Sauerstoffs durch die mikrobielle Zersetzung der organischen Stoffe und die Auflösung von Eisen- und schwefeligen Mineralien typischerweise sinkt. CHAMP et al. (1979) folgern, dass der Sauerstoff unter der Wasseroberfläche, wo kein Austausch von Gasen mit der Atmosphäre mehr stattfindet, stufenweise durch die mikrobielle Assimilation (Verdauung), den biologischen Abbau von organischen Stoffen und die Reaktionen mit den reduzierten Mineralienphasen verbraucht wird.

Bezüglich der vorliegenden Untersuchung sind die gemessenen Sauerstoffgehalte für die beiden Jahreszeiten unter 10 mg/l für das Grundwasser. Die Werte in der Trockenzeit zeigen eine gewisse Variabilität (von 0,14 bis 7,97 mg/l). Dagegen zeigen die Regenzeitwerte (von 2,24 bis 5,65 mg/l) geringe Schwankungen (Tabelle 10). Aber die Proben, die einen hohen Sauerstoffgehalt in der Trockenzeit hatten, weisen auch hohe Werte in der Regenzeit auf. Allerdings zeigen vier Proben (Trad XIII, Trad XIV, Trad XV und BOB2) eine umgekehrte Tendenz (Abb. 77).

Der geringe Gehalt des Trad VI (0,14 mg/l in der Trockenzeit) ist vermutlich auf erhöhten Sauerstoffverbrauch durch den biologischen Abbau organischer Stoffe (Pflanzen), die von Bewohnern in die Brunnen geworfen wurden, zurückzuführen. Eine starke Oxidation ist auch nicht auszuschließen. Der geringe Wert des Brunnens Trad XV (0,13 mg/l) könnte die Folge einer Teilschließung seiner Öffnung mit einer Betonplatte sein, wenn der dort gelöste Sauerstoff hauptsächlich von der Atmosphäre stammt. Auch hier ist auch eine Oxidation (wegen der Anwesenheit der metallischen Steigleitung) nicht auszuschließen. Für den Trad XII könnte man als Grund für seinen geringen Sauerstoffgehalt, eine Störung der Belüftung der Neubildungszone des Grundwasserleiters annehmen.

Alle oben beschriebenen Beziehungen entstehen sowohl in der Regenzeit, als auch in der Trockenzeit.

Tuberte 10. Zusummennussung der Suderstoringendre (mg/)								
		Trockenzeit		Regenzeit				
	Minimale	Maximale	Mittelwert	Minimale	Maximale	Mittelwert		
Brunnenwässer	0,13	7,97	3,26	2,24	5,65	3,42		
Bohrbrunnenwässer	3,24	6,45	4,85	3,64	4,42	4,03		
Oberflächenwässer	5,25	10,36	7,57	4,43	7,08	5,16		

Tabelle 10: Zusammenfassung der Sauerstoffgehalte (mg/l)



Abb. 77: Saisonaler Vergleich des Sauerstoffgehalts

3.4.2 Die Haupt-Ionen

Die im Grundwasser gelösten Haupt-Ionen können zur Beschreibung der allgemeinen chemischen Zusammensetzung dienen. Für die vorliegenden Arbeit wurden folgenden Ionen analysiert: Kalzium (Ca²⁺), Magnesium (Mg²⁺), Natrium (Na⁺), Kalium (K⁺) für die Kationen; Chlor (Cl⁻), Nitrat (NO₃⁻), und Sulfate (SO₄²⁻) und HCO₃⁻, für die Anionen. Es wurden hauptsächlich die Korrelationen zwischen den Ionen, der Ionen mit den physikalisch-chemischen Parametern, und der Ionen mit den Gebieten der Probenahme untersucht. Da in der Literatur keine Angaben zu den Konzentrationen der Ionen im Untersuchungsgebiet bekannt sind, ist kein Vergleich der Daten möglich. Die Arbeit kann als eine Grundlage für spätere eventuelle Untersuchungen im Norden von Burkina Faso dienen.

3.4.2.1 Relative Häufigkeit der Ionen

Die Ionen weisen in der Regel in den Wässern unterschiedliche Konzentrationen auf, die von den Neubildungsprozessen, der Höhe, den Gesteinkomponenten und den anthropogenen Faktoren abhängig sind (*Kapitel 3.4.1.2*). Die vorliegenden Proben unterliegen auch dieser Regel.

Die Analyse der durchschnittlichen Gehalte ergibt folgende Konzentrationsreihenfolge (Abbn. 78a und 78b):

- Grundwasser in der Trockenzeit: Ca>Na>Mg>K (Kationen) und HCO₃>NO₃>Cl>SO₄ (Anionen);
- Oberflächenwässer in der Trockenzeit: Ca>K>Na>Mg (Kationen) und HCO₃>Cl>SO₄>NO₃ (Anionen);
- Grundwasser in der Regenzeit: Ca>Na>K>Mg (Kationen) und HCO₃>NO₃>Cl>SO₄ (Anionen);
- Oberflächenwässer in der Regenzeit: Ca>K>Mg>Na (Kationen) und HCO₃>NO₃>Cl>SO₄ (Anionen) (Abb. 78b und Tabelle 11).

Diese Vergleiche zeigen, dass dieselben Reihenfolgen für die Grundwässer in den beiden Jahreszeiten (mit Ausnahme von K und Mg, die ihre Positionen gewechselt haben) gelten. Die Ionengehalte in den Oberflächengewässern zeigen größere Veränderungen in der Reihenfolge über die Jahreszeiten. Bezüglich des durchschnittlichen Ca-Gehaltes haben die hohen Konzentrationen der Brunnen Trad X, Trad XIV und Trad XV und der Bohrung BOB3 einen großen Einfluss (Abbn. 79a und 79b).

Bei den Kationen sind die mittleren Konzentrationen von Natrium und Magnesium sehr ähnlich, während die Konzentration von Kalzium fast das Dreifache von Natrium und Magnesium betragen. Die Konzentrationen der Kationen zeigen in beiden Jahreszeiten allgemein dieselben Tendenzen mit Spitzenwerten bei Trad V, Trad VI, Trad X, Trad XV und BOB3 (Abbn. 79a und 79b). Ausführliche Erklärungen über die verschiedenen Konzentrationen der Ionen werden in den jeweiligen Kapiteln über jedes Ion gegeben.



Abb. 78a: Saisonaler Vergleich der mittleren Ionenkonzentrationen



Abb. 78b: Saisonaler Konzentrationsvergleich der Ionen zwischen Grund- und Oberflächenwässern





Abb. 79: Kationverteilung der Grundwässer a) Trockenzeit und b) Regenzeit



Abb. 80: Anionenverteilung der Grundwässer a) Trockenzeit und b) Regenzeit

3.4.2.2 Individuelle Charakterisierung der Haupt-Ionen

a) Nitrat

Die menschlichen Aktivitäten wie Einträge aus der Landwirtschaft und urbanen Gebieten (Klärgruben, Dünger, Kraftstoffverbrennung (NO_x) oder Verwendung fossiler Brennstoffe) erhöhen die Konzentration von Nährstoffen in einigen oberflächennahen Grundwassersystemen (U.S.G.S. 1999). Einer dieser Nährstoffe ist der Stickstoff. Der kommt im Grundwasser hauptsächlich als Nitrat (NO₃⁻), Nitrit (NO₂⁻) und Ammonium (NH₄⁻) vor. Nitrat gilt dabei die am weitesten verbreitete Form (CUNNIGHAM & DANIEL 2001). Für JALALI (2005) kann die Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag und der Bewässerung die Stickstoffkomponenten der Böden in den Grundwasserleiter transportieren und dabei die Konzentrationen in den Brunnen erhöhen. Die Nitrate sind wasserlöslich und werden nicht in tonhaltigen Boden absorbiert. Dies lässt vermuten, dass die hohen Konzentrationen von NO₃⁻ im Grundwasser im Zusammenhang mit der Übertragung des NO₃⁻ der Böden stehen, denn der Stickstoff des Düngemittels ist die wichtigste Quelle von NO₃⁻ in der Landwirtschaft (JALALI 2005). GROEN et al. (1988) haben in mehreren Bohrungs- und Brunnenproben im Nordwesten Burkina Fasos Werte über den Grenzwert (50 mg/l) der Weltgesundheitsorganisation gemessen.

In der vorliegenden Untersuchung liegen die Nitrat-Konzentration in den Grundwasser zwischen 0,6 mg/l (BOB3) und 124 mg/l (Trad X) (Abb. 81) in der Trockenzeit (mittlerer Wert: 18 mg/l), und zwischen 0,8 mg/l (BOB3) und 42 mg/l (Trad VI) in der Regenzeit (mittlerer Wert 11 mg/l) (Tabelle 11). Dieser Vergleich zeigt, dass Trad X in der Regenzeit den höchsten Wert nicht mehr hatte. Das könnte eine Folge einer Verdünnung durch die Neubildung sein, was die mittleren Werte auch betrifft. Dagegen erleidet Trad VI in der Regenzeit eine punktuelle Kontamination. Die Konzentrationen von NO₃⁻ zeigen in Wasserfließrichtung keine lineare Veränderung (kontinuierliche Zunahme oder Abnahme), aber eine gewisse Konstanz von Brunnen Trad XVII bis Trad XV mit einem Spitzenwert im Trad X in der Trockenzeit (Abb. 81). Die Oberflächenwässer weisen insgesamt einen NO₃⁻-Wert von weniger als 2 mg/l (außer des Stausees von Tikaré) (Tabelle 11).

Folgendes Konzentrationskriterium vom Nitrat wird verwendet, um festzustellen, ob der Nitratwert in den Brunnenwässern einen anthropogenen Ursprung hat (MADISON & BRUNNET 1984):

- eine Konzentration von weniger als 0,9 mg/l deutet auf ein natürliches oder Basisniveau hin;
- eine Konzentration zwischen 0,9 mg/l und 13,5 mg/l zeigt ein Übergangsniveau;
- wenn die Nitratkonzentration höher als 13,5 mg/l ist, bedeutet das einen möglichen Einfluss des Menschen auf die Wasserqualität.

Für BACHMAN (1984) ist eine Nitrat-Konzentration von mehr als 3 mg/l immer mit einer menschlichen Aktivität verbunden.

Bezüglich der Betrachtungen von MADISON & BRUNNET (1984) haben die Proben Trad XV und BOB3 ein natürliches Niveau an Nitrat. Bei den Proben Trad V, Trad X, Trad XI, Trad XIV, Trad XVI und BOB4 hat das Nitrat vermutlich einen menschlichen Ursprung. Der ungewöhnlich hohe Nitratwert (123mg/l) von Trad X könnte aus den nah befindlichen Klärgruben und Latrinen und einer Dunggrube (3m entfernt vom Brunnen) stammen. Der Trad XI, der etwa 15 m vom Trad X in Fließrichtung der Oberflächengewässer liegt, könnte wahrscheinlich einen Teil des kontaminierten Wassers aus dem Trad X bekommen. Das bedeutet, dass die beiden Brunnen zum selben Grundwasserleiter gehören, jedoch NO₃⁻ schrittweise verdünnt wird und/oder an den nicht tonhaltigen Bestandteilen des Grundwasserleiters adsorbiert wird. Dieser Bereich des Probenahmengebiets bildet eine punktuelle Kontaminationszone von NO₃⁻ in der Trockenzeit. In der Regenzeit dagegen sind es ein paar mehr (Abbn. 82a und 82b).



Abb. 81: Vergleichende Variation von NO₃⁻ (Trocken- und Regenzeit)





Abb. 82: Räumliche Verteilung der NO3-Werte a) in der Trockenzeit und b) in der Regenzeit



Abb. 83: Umfeld von Brunnen und Bohrung (a: Trad XIV und b: BOB2)

N.B. Es steht fest, dass alle beprobten Brunnen und Bohrungen, ausgenommen Trad VII, durch Tierabfälle und/oder direkte Infiltration von Abwasser kontaminiert werden. Die Tiere haben im Allgemeinen Zugang zu den Randbereichen der Brunnen, in denen sie sich auf Grund der Vernässung durch verschwapptes Wasser gern im Schlamm baden (Abbn. 83a und 83b).

b) Sulfat

Sulfat ist ein Schwefel-Oxid, das sich gemeinhin in der Luft, dem Boden und im Wasser befindet. Da es im Wasser löslich ist, kann es in sehr hohen Konzentrationen in Grundwasser vorkommen. Gips, Oxidation von Schwefel in der Atmosphäre in Kontakt mit Sauerstoff, Zersetzung organischer Stoffe, Düngemittel und natürliche Quellen wie die Vulkane sind die wichtigsten Sulfat-Quellen im Wasser. Die Verbrennung von kohlenwasserstoffhaltigem Schwefeltreibstoff kann auch zu einem hohen Wert von Sulfat im Wasser führen.

In der vorliegenden Untersuchung wurde mit Ausnahme der Probe BOB3 (55 mg/l) keine SO₄-Konzentration über 10 mg/l getroffen (Abb. 84). Da diese Bohrung einen tiefen Grundwasserleiter anschneidet, könnte das der Grund für diesen hohen Wert sein. Aber BOB2 erhält ebenfalls Wasser aus einem tiefen Grundwasserleiter, hat jedoch eine geringere SO₄-Konzentration. Das könnte andeuten, dass die Wasser in BOB3 eine unterschiedliche Herkunft haben. Ein Vergleich zwischen den Werten der beiden Jahreszeiten zeigt, dass die Konzentration der BOB3 in der Trockenzeit fast das Doppelte von deren der Regenzeit beträgt. Die Ursache könnte eine Verdünnung von SO₄ infolge höherer Grundwasserneubildung sein. Die Konzentration der Probe Trad VIII hat sich in der Regenzeit ebenfalls mehr als verdoppelt (Abb. 84). Das könnte auf eine punktuelle Infiltration sulfatreichen Wassers zurückzuführen sein. Alle übrigen Werte sind annähernd gleich.

Der hohe Wert in BOB3 scheint mit den hohen Konzentrationen von K, Mg und Ca zu korrelieren. Das spiegelt sich in den guten Korrelationskoeffizienten zwischen SO_4^{2-} und K (r=0,73), zwischen SO_4^{2-} und Ca2⁺ (r = 0,73) (Abb. 85) und zwischen SO_4^{2-} und Mg²⁺ (r = 0,77) (Abb. 86) wider. Diese guten Korrelationen werden auch durch die Trockenzeitwerte bestätigt. Da das meiste SO_4^{2-} aus der Sulfid-Verwitterung (Pyrit, Chalcopyrit, Galenit etc.) stammt, muss es über verschiedene Alterationsprozesse zu diesen Ionen-Bildungen gekommen sein. Mögliche Minerale ist CaSO₄ (Anhydrit) oder Na₂SO₄ (Soda – aus Albit-Verwitterung). Man könnte daraus schlussfolgern, dass das SO₄²⁻ und die Kationen aus demselben Gestein stammen.

Die guten Korrelationen zu den Kationen werden nicht durch die Anionen bestätigt. Zu den physikalisch-chemischen Parametern ist $SO_4^{2^-}$ nur mit der elektrischen Leitfähigkeit (r = 0,67 in der Regenzeit [Abb. 87] und r = 0,76 in der Trockenzeit) und dem pH-Wert (r = 0,63 in der Regenzeit) korreliert. Das könnte bedeuten, dass $SO_4^{2^-}$ die Veränderungen der Werte der beiden Parameter sehr beeinflusst. Insbesondere könnte $SO_4^{2^-}$ für die relativen niedrigen pH-Werte der Proben durch die Bildung eines schwach saueren Wassers verantwortlich sein.



Abb. 84: Vergleichende Variation von SO_4^{2-} (Trocken und -Regenzeit)



Abb. 85 Korrelation zwischen SO_4^{2-} und Ca^{2+} (Regenzeit)



Abb. 86: Korrelation zwischen SO_4^{2-} und Mg^{2+} (Trockenzeit)



Abb. 87: Korrelation zwischen SO₄²⁻ und der elektrischen Leitfähigkeit (Regenzeit)

c) Chlorid

Chlorid ist eines der Hauptanionen im Wasser und Abwasser. Ab einer Chloridkonzentration von 250 mg/l weist Wasser entsprechend in Anwesenheit von Natrium-Ionen einen salzigen Geschmack auf. Im Gegenteil dazu weisen Wässer mit Konzentration von bis 1000 mg/l Cl keinen salzigen Geschmack auf, da Cl⁻ über Ca²⁺- und Mg²⁺-Ionen gebunden eingetragen war. Ro-SENTHAL (1994) stellt fest, dass ein Cl-Gehalt von 600 mg/l als höchste akzeptable Konzentration für den menschlichen Verzehr gelten sollte.

In der Regel sind Regenwasser (in Küstennähe), Meerwasser, natürliche Solen, Evaporitenlagen, rezente magmatische Exhalationen und Verschmutzung verantwortlich für hohe ClKonzentration im Grundwasser (JOHNSTON 1987). Bezüglich dieser Bemerkung und da Burkina Faso ein Binnenland ist, können im Arbeitsgebiet anthropogene Verunreinigungen von Cl nur aus Klärgruben, Düngern, tierische Abfällen stammen. Der Gehalt in natürlichen Wässern hängt jedoch zum großen Teil von der Geologie des Gebietes ab. Als Folge können erhöhte Cl-Gehalte in Gewässern können zur Versalzung landwirtschaftlicher Flächen führen, wenn sie zum Bewässern eingesetzt sind.

Im Vergleich zu den anderen Anionen hat Cl die dritthöchste Konzentration (nach HCO₃⁻ und NO₃⁻) (Abb. 78a, Kap. 3.4.2.1, S. 95). Die beprobten Grundwässer zeigen insgesamt geringe Cl-Konzentrationen (im Durchschnitt 5,79 mg/l in der Trockenzeit und 5,64 mg/l in der Regenzeit) (Tabelle 11). Diese relativ homogenen Mittelwerte in den beiden Jahreszeiten zeigen, dass die Wasserneubildung allgemein in der Regenzeit keinen Einfluss über diese Werte hat.

Die Cl⁻Konzentrationen der einzelnen Proben zeigen eine gewisse kontinuierliche Fluktuation mit Spitzenwerten bei Trad I, Trad VI, Trad X, Trad XIII und Trad XVII (Trockenzeit) und Trad VI, Trad VIII und Trad IX (Regenzeit) (Abb. 88). Die Proben Trad XVIII bis Trad III (vor dem Dammbett) zeigen in der Trockenzeit einen linearen und kontinuierlichen Rückgang ihrer Cl⁻Konzentrationen (von 12,4 auf 0,21 mg/l, Abb. 88). Dies könnte eine unterschiedliche Neubildungszone oder eine progressive Senkung der anthropogenen Einträge an Chlor in den Grundwasserleitern bedeuten. Letzteres hat zur Folge, dass der Cl⁻Gehalt kontinuierlich mit zunehmender Entfernung von den Wohnhäusern abnimmt.

Eine räumliche Verteilung zeigt in der Regenzeit zwei Bereiche mit hohen Cl⁻-Werten: Trad X und um Trad VI (Abb. 89b). Diese Bereiche sind auch in der Trockenzeit, mit dazu Trad I und BOB4, zu finden (Abb. 89a). Im Bereich um Trad X und Trad VI waren NO_3^- -Kontaminationszonen zu finden. Diese Zonen können auch die hohen Cl-Werte erklären.



Abb. 88 : Lineare und vergleichende Variation von Cl⁻ (beide Jahreszeiten)

In einzelnen Proben ist Cl⁻ mit NO₃⁻ nur von Trad XV bis Trad XII in der Trockenzeit gut korreliert. Die Proben Trad XVIII, XVI und III zeigen auch eine partielle Korrelation (Rückgang und Zunahme der Konzentrationen) zwischen NO₃⁻ und Cl (Abb. 90). In der Regenzeit haben Cl⁻ und SO_4^{2-} die gleiche skalierbare Tendenz von Trad XVII bis XVIII und von Trad XV bis Trad XIV (Abb. 91), wie es auch für Cl⁻ und NO₃⁻ teilweise der Fall war. Das könnte bedeuten, dass sie diese drei Elemente (Cl⁻, SO_4^{2-} und NO₃⁻) in diesem Teil des Arbeitsgebietes dieselben Quellen haben: das Regenwasser und eine externe Kontamination durch die Klärgruben und anderen oberflächlichen Haushaltabwässer.



Abb. 89: Räumliche Verteilung der Cl-Werte a) Trockenzeit und b) Regenzeit

Da ein hoher Cl⁻-Gehalt im Wasser mit einem hohen Na-Gehalt bedeuten kann, ist es wichtig das Verhalten der beiden Ionen zueinander zu analysieren. In der Regenzeit zeigen die Clund Na-Kurven dieselbe Tendenz mit gleichzeitigen Spitzenwerten bei den Proben Trad VI und Trad IX (siehe Abb. 92) und einem Korrelationskoeffizienten r = 0,95 (Abb. 93), was in der Trockenzeit nicht der Fall ist. Die Wasserneubildung könnte eine große Rolle gespielt haben.



Abb. 90: *Vergleichende Variation zwischen Cl⁻ und NO*₃⁻ (*Trockenzeit*)



Abb. 91: Vergleichende Variation zwischen Cl^{*} und SO₄²⁻ (Regenzeit)



Abb. 92: Vergleichende Verteilung Cl und Na⁺ (Regenzeit)



Abb. 93: Korrelation Cl-Na (Regenzeit)

Die Analyse der Beziehung Cl-Na zeigt einen Cl-Überschuss bei den Proben Trad XVII, Trad I, Trad VI, Trad X und Trad XIII während der Trockenzeit (Abb. 94). [Ein Cl-Na Wert = 0 bedeutet, dass Cl und Na aus der Auflösung von NaCl stammen]. Basierend auf den selben Proben wird dieser Cl-Überschuss zusätzlich durch das Verhältnis Cl/(Na+K) bestätigt (Abb. 95). Daraus ableitend ergibt sich für diesen Brunnen ein Beitrag von atmosphärischen und anthropogenen Cl-Quellen, und zwar vor allem während der Trockenzeit. Das Gleiche gilt für die Proben Trad IX und Trad XI in der Regenzeit. BOB3 dagegen zeigt in beiden Jahreszeiten einen sehr hohen Na-Überschuss im Vergleich zu Cl⁻. Dies kann durch eine starke Verwitterung und Auflösung von Na-reichen Mineralien, wie z.B. Feldspat und/oder Biotit, im Grundwasserleiter erklärt werden.



Abb. 94: Saisonaler Vergleich der Beziehung Cl-Na



Abb. 95: Saisonaler Vergleich des Verhältnisses Cl/(Na+K)

d) Hydrogencarbonat

HCO₃⁻ weist in den Grundwasserproben eine Konzentrationen zwischen 4 mg/l (BOB2) und 247 mg/l (BOB3) (Abb. 96a) in der Trockenzeit (Mittelwert: 49 mg/l) und zwischen 6 mg/l (Trad XIX) und 119 mg/l (BOB3) in der Regenzeit (Mittelwert 33,5 mg/l) auf (95b). Diese Werte zeigen, dass HCO₃ das häufigste Ion im Grundwasser ist. Die Konzentrationsabweichungen zwischen den saisonalen Mittelwerten zeigen den Einfluss der Grundwasserneubildung während der Regenzeit.





*Abb. 96: Vergleichende Variation der HCO*₃⁻*Gehalte mit Mg*²⁺, *Ca*²⁺ *und Na*⁺ *a) Trockenzeit und b) Regenzeit (ohne Na*⁺)



Abb. 97: Saisonaler Vergleich des Verhältnisses HCO₃/(Ca+Mg)

Die höheren HCO₃-Gehalte im Grundwasser (im Vergleich zu anderen Ionen) können durch atmosphärische Quellen (Eindringen von atmosphärische CO₂ in die Grundwasserleiter) sowie mikrobiellen Aktivitäten erklärt werden. Die vergleichende Darstellung des Verhältnisses HCO₃/(Ca+Mg) bestätigt diese Hypothese mindestens für die Proben Trad I, Trad V, Trad VIII und BOB3 in der Trockenzeit (Verhältnis >1) (Abb. 97). Dass die Verhältnisse >1 nur in der Trockenzeit auftreten, lässt sich durch die Begünstigung mikrobieller Aktivitäten (mit allgemein hohen Temperaturen, geringen Wassermengen in den Brunnen und Bohrbrunnen) im Grundwasser zu dieser Jahreszeit erklären. Die restlichen Proben zeigen vorwiegend eine Auflösung von Mg- und Ca-Mineralien. Die Erklärung dafür könnte die Vulkanisch-Sedimentären Schiefer sein, die Kalkstein [ganz überwiegend aus dem Stoff Calciumcarbonat (CaCO₃) in Form der Mineralien Calcit und Aragonit besteht, (Quelle): http://de.wikipedia.org/wiki/Kalkstein)] und Dolomit [(CaMg(CO₃)₂ (,,CaCO₃·MgCO₃"), (Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/Dolomit (Gestein)] beinhalten könnten (obwohl keine Angabe in der Literatur getroffen wurde). [Diese Hypothese soll allerdings weitergeforscht werden]. Die Verwitterung diese Gesteine beeinflussen erheblich die HCO₃-Konzentrationen. Diese Hypothese wird durch der höchste in der Probe BOB3 (tiefe Bohrbrunnen) teilweise bestätigt (Abbn. 96a & 96b). Dazu zeigen HCO₃⁻, Mg und Ca in der Regenzeit eine identische Tendenz ihrer Konzentrationen mit Spitzenwert innerhalb der gleichen Probe (BOB3) (Abb. 96a). In den verbleibenden Proben kann die folgende Reaktion, die zur Fe-Oxidation und zum Verbrauch von HCO3⁻ führt, ursächlich für die niedrigen HCO3⁻-Gehalte sein (KÖLLE 2001):

$2 Fe^{2^+} + \frac{1}{2} O_2 + 4 HCO_3^- \longrightarrow 2 FeOOH + 4 CO_2 + H_2O$

Es ist zu merken, dass BOB3 in der Trockenzeit neben nur Trad XV einen hohen HCO₃⁻ Gehalt in Verbindung mit Mg, Ca und Na aufweist (Abb. 96a). In diesem Brunnen befindet sich eine Metallsteigleitung einer alten Pumpe (Abb. 33f, S. 52).

Ein Vergleich zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser ergibt, dass beide gleiche mittlere HCO₃⁻-Konzentration (49 mg/l) in der Trockenzeit haben. In der Regenzeit dagegen ist die mittlere HCO₃⁻-Konzentration im Grundwasser höher (33,5 mg/l) als im Oberflächenwasser (24 mg/l). Das zeigt, dass die chemischen Reaktionen, die zur Bildung von HCO₃⁻ führen, während der Grundwasserneubildung intensiver sind als während der Bildung der Oberflächenwässer.

 HCO_3^- korreliert sehr gut mit Mg^{2+} (r = 0,89) und Ca^{2+} (r = 0,89) in der Regenzeit sowie mit Na⁺ (r = 0,80) (Abb. 98), Mg^{2+} (r = 0,84) und Ca^{2+} (r = 0,80) während der Trockenzeit (Tabelle 12). Die fehlende Korrelation zwischen Na und HCO_3^- in der Regenzeit könnte das Ergebnis eines Kationenaustauschs zwischen Ca^{2+} und Na⁺ während der Grundwasserneubildung sein, wobei Na⁺ durch Ca²⁺ ersetzt wird.



Abb. 98: Korrelation zwischen HCO₃⁻ und Na⁺ (Trockenzeit)

e) Magnesium

Magnesium gehört zu der Familie der Erdalkalimetalle. Es kommt in vielen Gesteinen und Böden, wie in einigen Evaporiten (FOUCAULT & RAOUL 2000), in Dolomit und untergeordnet in Kalkstein vor. Für CUNNINGHAM & DANIEL (2001) Magnesium sowie auch Kalzium befindet sich im Grundwasser aufgrund der Auflösung von vielen Arten von Gesteinen und Böden. Diese Bestandteile bestimmen maßgeblich den Härtegrad im Grundwasser.

Da Mg mit Sauerstoff in vielen Silikaten gebunden ist (FOUCAULT & RAOUL 2000), stammt dieses Ion im Grundwasser teilweise aus der Lösung der Alumosilikate wie Biotit, Olivin, Pyroxen, Amphibol oder Chlorit vulkanischer und metamorpher Gesteine.

In dieser Untersuchung weist Mg^{2+} die drittgrößte Konzentration der Kationen auf. Sein durchschnittlicher Gehalt in den Grundwässern liegt bei 5 mg/l in der Trockenzeit und 3 mg/l in der Regenzeit. In den Oberflächengewässern sind die durchschnittlichen Werte niedriger (2,4 mg/l in der Trockenzeit und 1,4 mg/l in der Regenzeit) als im Grundwasser (Tabelle 12).

Die Proben zeigen in der Trockenzeit eine lineare Monotonie ihrer Konzentrationen (von Trad XVIII bis BOB2). Von BOB3 an (höchste Gehalt: 19,7 mg/l) wurden relative Konzentrationsschwankungen und ein Rückgang festgestellt. Die Proben in diesem Bereich weisen höhere Mg²⁺-Konzentrationen auf (Abbn. 99, 100a und 100b). Der erste Grund könnte in einem guten Kontakt zwischen Grundwasser und Mg-Quellen (z.B. den Alumosilikaten) und dadurch in einer besseren Auflösung, oder einer anderen Quelle für die Neubildung liegen. Da die Probe BOB3 eine Tiefbohrung ist, und dadurch einen anderen Grundwasserleiter erfasst, ist ein andersartiges Neubildungsgebiet wahrscheinlich. Ca²⁺ und Na⁺ zeigen auch in dieser Probe einen hohen Gehalt (Abb. 99). Weil die Brunnen in diesem Bereich auch höhere Mg²⁺-Gehalte zeigen, könnte man eine Mischung oder einen Kontakt zwischen Tiefgrundwässern und oberflächlichen Grundwässern vermuten.

Ein zweiter Grund könnte eine stärkere Auswirkung der Verdunstung oder der Wasserentnahme (durch die Bewohner) in diesem Teil des Arbeitsgebietes sein, die eine Akkumulation dieses Ion begünstigen. Da die Regenzeitwerte geringer sind, kann diese Erklärung bestätigt werden.

Die besten Korrelationen zwischen Mg^{2+} und den anderen Ionen sind bei Ca^{2+} (r = 0,95, Abb. 105, S. 115), HCO_3^- (r = 0,89 Trockenzeit und r = 0,89 Regenzeit) und SO_4^{2-} (r = 0,73, in der Regenzeit und r = 0,78 [Abb. 86, S.102] in der Trockenzeit) zu finden. Hinsichtlich der physikalisch-chemischen Parameter zeigt Mg eine sehr gute Korrelation mit der Leitfähigkeit (r=0,96 in der Trockenzeit und r = 0,81 in der Regenzeit, Abb. 101). Dies ist auch durch ihre räumlichen Verteilungen (die Probenahmebereiche mit hohen Leitfähigkeitswerten zeigen auch die höchsten Mg^{2+} -Werte) bestätigt (Abbn. 100a und 100b) bestätigt. Weiterhin ist der pH-Wert mit Mg^{2+} sehr gut korreliert (r = 0,74 Tabelle 12). Die Korrelation mit der Redoxspannung ist dagegen umgekehrt (Abb. 102 und Tabelle 12). Das könnte bedeuten, dass Mg^{2+} an die Oxydationsverfahren sehr beteiligt ist.

Die Beziehungen $SO_4 - (Ca+Mg)$ zeigen in allen Brunnen in beiden Jahreszeiten einen Überschuss von Ca+Mg im Vergleich zu SO_4^{2-} (Abb. 103). Diese Werte werden durch hohe Einträge aus der Auflösung von Ca+Mg-reichen Mineralien (Biotit, Feldspat) in den Aquifern im Vergleich zu SO_4^{2-} -reichen Mineralien verursacht. Der höchste Überschuss an Ca+Mg tritt in BOB3 auf. Dies entspricht gleichermaßen dem gemessenen Na⁺-Überschuss im Vergleich zu Cl⁻ (Abb. 94, S. 107). Somit wird der Einfluss von Alumosilikaten bestätigt.



Abb. 99: Vergleichende Verteilung zwischen Mg^{2+} , Na^+ und Ca^{2+} (Trockenzeit)



*Abb. 100: Räumliche Verteilung der Mg*²⁺*-Werte a) in der Regenzeit und b) in der Trockenzeit*



*Abb. 101: Korrelation Mg*²⁺ - elektrische Leitfähigkeit (Regenzeit)



Abb. 102: Korrelation Mg²⁺ - Redoxspannung (Regenzeit)



Abb. 103: Darstellung der Beziehung SO₄ – (Ca+Mg) der Grundwässer

f) Kalzium

Sein Anteil am Aufbau der Erdkruste liegt bei 3,6 % (KÖLLE 2001) und ist somit das fünfthäufigste Elemente der Erdkruste (KÖLLE 2001; FOUCAULT & RAOUL 2000). Kalzium tritt als Kalk (Kalziumcarbonat) und Dolomit (Kalzium-Magnesiumkarbonat) gebirgsbildend auf. Ebenfalls häufig sind Gips und Anhydrit (Kalziumsulfate). Sehr viele Silikate und Tonminerale enthalten Kalzium (KÖLLE 2001). Laut ROSEN und JONES (1998) spielen die Mineralien der Epidotgruppe der Schiefer (wie auch im Arbeitsgebiet vorhanden) eine große Rolle bei den hohen Ca-Konzentrationen im Wasser. Aber FITSPATRICK (1984) im Gegensatz beschreibt, dass die Löslichkeit der Mineralien der Epidotgruppe unter Oberflächenbedingungen relativ schwach ist. Laut KÖLLE (2001) liegt die Ca²⁺-Konzentration im Meerwasser bei 410 mg/l.

In der vorliegenden Untersuchung weist Ca den dritthöchsten Wert unter den Ionen (mittlere Wert 13,68 mg/l in der Trockenzeit) und den höchsten der Kationen. Es zeigt etwa die gleiche Variabilität wie Mg²⁺. Denn die Proben, die einen Mg²⁺- und Na⁺-Gehalt zeigen, verfügen in den beiden Jahreszeiten über einen hohen Ca-Gehalt (mit Ausnahme der Proben Trad XIII und Trad XIV, Abb. 104). Das bestätigt die Hypothesen, dass diese drei Ionen in den Wässern aus Auslösung von Aluminisilikaten stammen.

 Ca^{2+} und Mg^{2+} korrelieren sehr gut (r = 0,95, Abb. 105). Wie Mg^{2+} ist auch Ca^{2+} in beiden Jahreszeitproben mit der Leitfähigkeit sehr gut korreliert (r = 0,80, Abb. 106). Mit dem pH-Wert ist Ca^{2+} nur in der Regenzeit gut korreliert (r = 0,74, Tabelle 12). Das könnte eine gleichzeitige Zunahme von Ca^{2+} - und sauerreichen Elementen in der Regenzeit, oder mehr Einfluss der Säuregrad über den Verwitterungsprozess der Ca^{2+} -haltigen Mineralien (z.B. Alumosilikate) bei der Neubildungsphase andeuten. Ca^{2+} ist mit SO_4^{2-} gut korreliert (r = 0,73, Abb. 85, S. 101 und Tabelle 12). Die Korrelationen zu den weiteren Anionen sind vergleichsweise schwach.



Abb. 104: Saisonale Variation von Ca^{2+} und Vergleich mit Mg^{2+}



Abb. 105 : Korrelation Ca-Mg (Regenzeit)



*Abb. 106: Korrelation Ca*²⁺ - *Leitfähigkeit (Regenzeit)*

g) Natrium

Natrium gehört, wie Magnesium, zur Familie der Alkalimetalle. Na⁺ kann sich mit anderen Elementen Verbindungen eingehen wie z.B. NaCl in den Evaporiten (FOUCAULT & RAOUL 2000). Allgemein ist die Auflösung von Feldspatmineralien oder durch Kationenaustausch in bestimmten Tonen die wahrscheinlichste Na⁺-Quelle im Grundwasser ist. Ein mögliches Verwitterungsszenario um Na⁺ in Lösung zu bringen ist, die Bildung von Schwefelmineralien im sauren Grundwasser, die den Feldspat eingreifen, um Na⁺ in Lösung zu bringen (ROSEN & JONES 1998). FOUCAULT & Raoul (2000) schreiben, dass sich Na⁺ in den Mineralienstrukturen von magmatischen Gesteinen vorkommt, insbesondere bei denen, die sich am Ende der Kristallisierung bilden.

In der vorliegender Untersuchung hat Na die zweithöchste Konzentration unter den Kationen im Grundwasser. Seine lineare Entwicklung ist fast dieselbe wie bei Mg²⁺ und Ca²⁺ mit einem Spitzenwert bei BOB3 und Konzentrationsschwankungen ab Trad XV (Abb. 99, S. 111 und Tabelle 11). Das könnte die Annahme unterschiedlicher Quellen oder Neubildungsbereiche zwischen BOB3 und den anderen Proben, und/oder der Mischung von Wässern aus zwei Grundwasserleitern in diesem Teil des Arbeitsgebietes bestätigen. Anhand des Na⁺-, Mg²⁺- und Ca²⁺-Gehaltes von BOB4 könnte dessen Wasser eine ähnliche Genese wie das der Bohrung BOB3, unterliegen hat.

Im Vergleich mit Ca^{2+} zeigt nur BOB3 eine erhebliche höhere Na-Konzentration (Abb. 99, S. 111 und Tabelle 11). Das könnte das Ergebnis eines Kationenaustausches zwischen Na⁺ und Ca^{2+} , die Anwesenheit eines hohen Na-haltigen Minerals in diesem Grundwasserleiter oder eine Na-Armut in den anderen Grundwasserleiter sein. Denn laut STUMM & MORGAN (1996) wird das gelöste Ca^{2+} durch das gelöste Na⁺ im Zuge von Ionenaustauschreaktionen zwischen Tonmineralien und Grundwasser ersetzt.

In den Proben sind Na⁺ und Cl⁻ in der Regenzeit sehr gut korreliert (r = 0.95 Abbn. 92, S. 106 und 93, S. 106). Das bestätigt damit die Verbindung zwischen diesen beiden chemischen Elementen. Zu den übrigen Ionen zeigt Na⁺ keine gute Korrelation.



Abb. 107: Lineare Verteilung von Na⁺ und Leitfähigkeit (Trockenzeit)

Hinsichtlich der physikalisch-chemischen Parameter zeigt Na nur mit der Leitfähigkeit eine relativ gute Korrelation (r = 0.68; Tabelle 12). In der Trockenzeit zeige sie relativ ähnliche Variationen (Abb. 107). Das (geringeres Korrelationskoeffizient) deutet auf einen geringeren Einfluss des Na⁺ an bei der Gesamtmineralisierung im Vergleich zu Mg²⁺ und Ca²⁺ an. Dagegen haben die Na-Konzentrationen ein umgekehrtes Verhältnis zur Temperatur (Abb. 108). Man könnte daraus schließen, dass eine Temperatursenkung zu einem Konzentrationszuwachs an Natrium in den Gewässern führt.

Mehrere Autoren haben das Molverhältnis Na/Cl benutzt, entweder um den Ursprung von Na⁺, die Geologie der Grundwasserleiter oder ihre hydrodynamischen Eigenschaften zu charak-

terisieren. Unter anderem schreibt MEYBECK (1987) dazu, dass ein Molverhältnis Na/Cl größer als 1 gewöhnlich ein Hinweis auf Na aus Auflösungsreaktionen von Silikaten ist. Nach WHITE (1975) und SCHOELLER (1977) sind rNa/rCl größer als 1 ein Merkmal von Grundwässern, die durch vulkanische oder kristalline Gesteine geflossen und von der Art des Feldspats abhängig sind. Ausgehend von diesen Hypothesen haben alle Proben (ausgenommen Trad I, Trad VI, Trad X, Trad XIII und Trad XVII) einen Molverhältnis Na/Cl größer als 1. Dies setzt voraus, dass das Natrium in diesen Proben aus Verwitterungsreaktionen von Silikaten (Plagioklas) der vulkanischen Gesteine im Arbeitsgebiet stammt.

Von Trad III bis Trad XII (numerische Reihenfolge) ist das Molverhältnis Na/Cl umgekehrt proportional zu der Summe Ca+Mg (Abb. 109). Das könnte aus einer unterschiedlichen Mineralogie des Grundwasserleiters oder einem erheblichen Ionenaustausch zwischen Ca²⁺ und Na⁺ in diesen Brunnen stammen. Eine Adsorption von Na⁺ an den Wänden der Poren in den Grundwasserleitern könnte ebenfalls ein Grund sein.



Abb. 108: Korrelation Na⁺ - Temperatur (Regenzeit)



Abb. 109: Variation zwischen Na/Cl und Ca+Mg (Trockenzeit)

h) Kalium

Kalium (K) ist ein sehr reichlich vorkommendes Element der Erdkruste. Es ist stark oxydierend und verbindet sich mit vielen Metallen. Dabei findet man Kalium im Wesentlichen in der Form von Chlorid in Evaporiten wie Sylvit (KCl) und Carnallit (KMgCl₃, 6H₂O), (FOUCAULT & RAOUL 2000). K⁺ befindet sich auch in vielen Silikaten wie Biotit, Muskovit und den Feldspats. Sein chemisches Verhalten ist wie das von Na, womit es oft in Silikaten kombiniert ist.

In der Untersuchung hat Kalium den kleinsten Gehalt hinsichtlich der Kationen in den Grundwässern. Seine durchschnittliche Konzentration liegt bei 2,5 mg/l und 3,5 für das Grundwasser, und 8 mg/l und 4 mg/l für das Oberflächenwasser in der Trocken- bzw. in der Regenzeit. Der Grund dafür, dass K⁺ eine höhere Konzentration in den Oberflächenwässern gegenüber den Grundwässern zeigt, könnte in der Auswaschung dieser Ion aus Zersatzbereichen Kalium-reicher Quarz-Feldspat-Gesteine, aus Pflanzenasche (z.B. Mais- oder Hirsestroh) oder landwirtschaftlichen Düngemitteln in die Oberflächenwässer hinein sein. Im Gegensatz zu den anderen Kationen, die etwa die gleichen linearen Variationen mit Schwankungen in vielen Grundwasserproben haben, zeigt K⁺ eine Monotonie seiner Konzentrationen. Nur drei Proben weisen eine Konzentration von mehr als 10 mg/l und einen Spitzenwert von 23 mg/l bei Trad X (über die beiden Jahreszeiten) auf (Abb. 110). Trad X zeigte auch die höchsten NO₃⁻ und Cl⁻Gehalte in der Trockenzeit (Abb. 81, S. 99 und Abb. 88, S. 103). Die Brunnen, die im Bereich dieser Proben liegen, zeigen allgemein die höchsten K-Werte (Abbn. 111a und 111b), wie es auch für NO₃⁻ und Cl⁻ der Fall war. Das könnte darauf bedeuten, dass die drei Ionen eine oder mehrere identische Quellen bei dieser Probe haben. Die Tatsache, dass K praktisch in den Tiefbohrungsproben (BOB2 und BOB3) nicht vorkommt (Abb. 110), könnte ein Hinweis dafür sein, dass dieses Element zum großen Teil aus der Auswaschung landwirtschaftlicher Böden oder Dunggruben (im Fall des Trad X) stammt.



Abb. 110 : Saisonale Variation von K^{T}

Die niedrigen Kaliumgehalte in den natürlichen Wässern haben einen Zusammenhang mit der fixierenden Tendenz dieses Elements an die Tonmineralien. Dabei nimmt es an der Bildung von sekundären Mineralien teil (MATHESS 1982). Da die Tonmineralien als Zement der Konglomerate und andere Körner der Lateritgrundwasserleiter im Arbeitsgebiet dienen, könnte das der Grund für die geringen K⁺-Mengen in den Proben der vorliegenden Arbeit sein.

Es ist durch die räumliche Verteilung der K⁺-Konzentration zu bemerken, dass die hohen Werte nur in Schieferbereichen zu finden sind (Abbn. 111a und 111b). Das deutet an, dass die Schiefer mehr K-haltigen Mineralien (z.B. Feldspats) aufweisen oder deren Verwitterung dort fortgeschrittener ist.

 K^+ zeigt eine relative gute Korrelation nur mit SO_4^{2-} (r = 0,73), die auf die Auflösung von K₂SO₄ zurückzuführen könnte (Tabelle 12 und Abb. 112).



Abb. 111: Räumliche Verteilung der K^+ -Werte a) Trockenzeit und b) Regenzeit



Abb. 112: Korrelation zwischen K^{2+} und SO_4^{2-} (Regenzeit)

3.4.2.3 Vergleichende räumlich Verteilung der Haupt-Ionen Anstrom und Abstrom des Stausees von Tikaré

Um eine mögliche Rolle des Damms als Barriere oder Filter für das Grundwasser festzustellen, wurde eine vergleichende Analyse der mittleren Konzentrationen der Haupt-Ionen Anstrom und Abstrom der Deiche durchgeführt. Genutzt wurden nur die Brunnenproben, da deren Grundwasserleiter (die Laterite) im Gegensatz zu den denen der Tiefbohrungen durch das Dammwasser neu gebildet werden kann. Aus den Analysen geht hervor, dass die mittleren Konzentrationen der Ionen, außer NO₃⁻, im Abstrom höher als im Anstrom sind (Abb. 113). Dieser Unterschied könnte sich wie folgt erklärt werden:

- eine leichtere Auflösung und der Übergang der Ionen ins Wasser im Abstrom;
- eine erheblicher Brunnendichte in diesem Bereich; dieser Faktor kombiniert mit der relativ höheren Durchlässigkeit (Sauerstoffgehalt größer) könnte zu einer Mischung der Wässer, also vermutlich zu einem Anstieg der Konzentrationen führen;
- ein erheblicher anthropogener Eintrag (z.B. K⁺ und Cl⁻) im Abstrom, da die Wohnhäuser dort dichter stehen.

Die folgenden Schlussfolgerungen können gezogen werden: je mehr ein Gebiet bewohnt ist, desto mehr ist die anthropogene Kontamination möglich. Ein hoher Grad der relativen Durchlässigkeit fördert die Auflösung der Ionen und erleichtert ihren Übergang in die Wässer, d.h. eine schnellere und intensivere Lösung durch erhöhte Grundwasserzirkulation. Ein eindeutiger Einfluss des Staudamms auf die Konzentrationen der Ionen konnte also in dieser Phase der Arbeit nicht nachgewiesen werden.



Abb. 113: Vergleich der durchschnittlichen Konzentrationen der Haupt-Ionen zwischen Anstrom und Abstrom der Staumauer (Stausee von Tikaré, Regenzeit)

Tabelle 11: Zusammenfassung der Konzentrationen der Haupt-Ionen

Ionen	Cľ (m	g/l)	SO_4^{2-} (mg/l) NO ₃		NO ₃ (1	mg/l) HCO ₃ (mg/l) N		Na ⁺ ((mg/l) K^+ (mg/l)		Mg ²⁺ (mg/l)		Ca²⁺ (mg/l)			
GRUNDWASSER																
Proben	TZ	RZ	TZ	RZ	ΤZ	RZ	ΤZ	RZ	TZ	RZ	TZ	RZ	TZ	RZ	ΤZ	RZ
BOB2	1,49	3,65	0,54	2,14	12,6	14,7	3,89	26,3	2,92	6,09	0,24	0,97	1,91	3,09	3,91	8,74
BOB3	1,46	1,02	55,0	22,1	0,58	0,84	247	119	60,1	15,1	1,14	0,35	19,7	12,5	46,5	23,0
BOB4	5,89	6,63	3,34	2,83	17,8	16,4	35,2	105	7,68	8,04	0,46	0,48	5,57	6,56	15,5	23,2
	17,2	1,83	0,34	2,39	5,49	6,95	22,7	12,3	2,78	1,08	0,62	0,60	1,70	1,38	4,05	3,96
Trad II	1,40	1,25	0,51	0,01	11,5	5,80	17,9	17,8	2,04	1,55	0,35	0,73	1,81	1,50	3,28	6,14
Trad III	0,21	2,05	2,50	0,40	4,30	7.14	16.1	11.7	3,43	2,01	0,70	3,02	1,31	1,98	3,57	0,20
Trad V	6.84	2.40	3,17	1 30	27.7	7,14	30	30.6	5.24	2,91	2.01	1 75	7.45	2 30	3,00	4,44
Trad VI	12.2	2,40	1.18	2 23	3 49	42.4	19.7	15.3	3,24	13.5	2,91	2 52	1 74	4 30	6.42	14.6
Trad VII	1 09	1 48	2.96	0.52	11 1	11.2	19,7	13,5	2 10	1.65	1.65	1.68	1.89	1.85	4 37	4 12
Trad VIII	1,09	15.9	0.98	6.45	8.96	11,2	45.8	18.4	3 29	10.1	0.80	3.28	1,05	2.44	4 42	7.97
Trad IX	1.63	31.3	2.22	2.16	8.20	13.4	64.7	29.4	3.92	14.7	0.61	3.02	3.56	3.53	10.1	15.0
Trad X	17,3	5,98	7,45	7,32	124	18,7	62,9	71,3	9,20	3,97	22,7	17,4	11,6	5,15	31,1	21,5
Trad XI	4,23	9,30	7,43	7,79	44,3	20,4	65,3	82,4	7,02	4,70	5,03	17,5	9,68	5,97	17,6	22,0
Trad XII	2,78	1,78	4,32	0,41	7,81	7,80	74,5	25,2	7,76	2,90	0,91	0,64	5,35	1,86	14,9	6,96
Trad XIII	12,1	3,80	3,28	2,72	10,1	5,08	77,5	44,6	4,57	4,31	3,30	5,09	7,80	4,47	14,8	10,5
Trad XIV	5,15	3,00	2,72	1,98	23,7	5,08	51,8	44,6	5,04	3,88	6,12	5,94	6,10	3,55	34,1	9,35
Trad XV	1,62	2,31	3,20	0,59	0,20	2,87	125	33,0	11,4	2,50	0,83	0,57	12,7	1,48	41,8	8,19
Trad XVI	2,78	4,09	0,42	0,62	15,9	4,17	10,9	20,4	3,98	4,52	0,16	0,42	1,60	1,73	3,75	4,48
Trad XVII	12,5	2,05	0,31	0,19	7,93	3,74	10,5	13,7	3,03	3,53	0,14	0,21	1,01	1,25	2,35	3,29
Trad XVIII	2,37	2,34	0,67	0,67	12,5	11,9	10,9	11,8	3,32	2,50	0,49	5,29	1,48	1,26	3,96	2,78
Trad XIX		5,29		0,47		25,1		5,80		4,58		10,1		0,97		3,70
UFZ3		1,05		0,53		6,30		14,7		1,00		1,22		1,72		4,30
UFZ4		1,35		0,33		8,34		14,2		1,07		0,59		1,41		3,67
Mittlere	5.20	5 ()	5.00	2.01	17.0	11.4	40.1	247	7.21	5.04	2.49	2.52	5.1.1	2.07	12.7	0.45
werte	5,38	5,04	5,06	2,81	17,0	OBER	49,1 FLÄCE	54,7 IENW	ÅSSER	5,04	2,48	3,32	5,11	3,07	13,7	9,45
	CF (i	mg/l)	SQ4 ²⁻	(mg/l)	NO ₂ ⁻	(mg/l)	HCO ₃	(mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (1	mg/l)	Mg^{2+}	(mg/l)	Ca ²⁺	mg/l)
Lac Bam	1,77	0,76	3,79	0,32	1,15	0,29	69,1	19,9	6,54	0,49	9,68	3,19	2,45	0,89	6,83	3,25
Stausee														, ,		, ,
Koulniéré	14,6	0,68	1,35	0,41	1,13	1,15	39,2	16,9	1,35	0,75	8,00	3,85	2,15	0,93	6,78	3,05
Stausee Zi-																
ga	0,86	0,48	0,48	0,35	1,09	1,38	41,2	27,9	1,55	0,44	5,62	3,26	2,56	1,08	7,81	3,46
Stausee Loumbila		0.45		0.07		0.57		21.2		0.63		4.17		1.27		3 66
Steinbruch		0,10		0,07		0,07		21,2		0,00		.,.,		1,27		5,00
Ziniaré		1,46		0,32		0,77		47,7		2,10		7,77		2,60		9,11
Nakambé		1,17		0,31		0,69		20,7		0,53		3,67		1,32		4,24
Stausee Ti-																
karé		0,90		0,68		3,24		21,2		0,76		2,40		1,64		5,38
Mittlere Werte	5,73	08,4	1,87	0,35	1,20	1,15	49,8	20,1	3,15	0,81	7,77	4,04	2,39	1,39	7,14	4,59

TZ: Trockenzeit; RZ: Regenzeit

Tabelle 12: Korrelationsmatrix der Haupt-Ionen

		Cl	SO4 ²⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K^+	Mg ²⁺	Ca ²⁺
	Cl ⁻	1	0,37	0,55	0,09	0,95	0,13	0,4	0,47
	SO_4^{2-}		1	0,33	0,62	0,34	0,73	0,71	0,73
	NO ₃ ⁻			1	0,14	0,59	0,41	0,43	0,46
Regenzeit	HCO3 ⁻				1	0,19	0,48	0,89	0,89
U	Na ⁺					1	0,07	0,48	0,51
	K^+						1	0,51	0,55
	Mg ²⁺							1	0,95
	Ca ²⁺								1
		C1 ⁻	SO4 ²⁻	NO ₃ -	HCO ₃ -	Na ⁺	K^+	Mg ²⁺	Ca ²⁺
	C1 ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻ 0,11	NO ₃ ⁻ 0,43	HCO_3^-	Na ⁺ 0,10	K ⁺ 0,51	Mg ²⁺ 0,20	Ca ²⁺ 0,12
	Cl ⁻ SO4 ²⁻	Cl ⁻ 1	SO4 ²⁻ 0,11 1	NO ₃ ⁻ 0,43 0,70	HCO ₃ ⁻ 0 0,53	Na ⁺ 0,10 0,65	K ⁺ 0,51 0,67	Mg ²⁺ 0,20 0,78	Ca ²⁺ 0,12 0,58
	$ \begin{array}{c} CI^{-}\\ SO_{4}^{2-}\\ NO_{3}^{-} \end{array} $	Cl ⁻ 1	SO ₄ ²⁻ 0,11 1	NO ₃ ⁻ 0,43 0,70 1	HCO ₃ ⁻ 0 0,53 0,16	Na ⁺ 0,10 0,65 0,43	K ⁺ 0,51 0,67 0,96	Mg ²⁺ 0,20 0,78 0,54	Ca ²⁺ 0,12 0,58 0,42
Trockenzeit	Cl ⁻ SO ₄ ²⁻ NO ₃ ⁻ HCO ₃ ⁻	Cl ⁻ 1	SO ₄ ²⁻ 0,11 1	NO ₃ ⁻ 0,43 0,70 1	HCO ₃ ⁻ 0 0,53 0,16 1	Na ⁺ 0,10 0,65 0,43 0,80	K ⁺ 0,51 0,67 0,96 0,26	Mg ²⁺ 0,20 0,78 0,54 0,84	Ca ²⁺ 0,12 0,58 0,42 0,80
Trockenzeit	$\begin{array}{c} \hline Cl^{-} \\ \hline SO_4^{-2-} \\ \hline NO_3^{} \\ \hline HCO_3^{} \\ \hline Na^+ \\ \end{array}$	Cl ⁻ 1	SO ₄ ²⁻ 0,11 1	NO ₃ ⁻ 0,43 0,70 1	HCO ₃ ⁻ 0 0,53 0,16 1	Na⁺ 0,10 0,65 0,43 0,80 1	K ⁺ 0,51 0,67 0,96 0,26 0,44	Mg ²⁺ 0,20 0,78 0,54 0,84 0,89	Ca ²⁺ 0,12 0,58 0,42 0,80 0,84
Trockenzeit	$\begin{array}{c} Cl^{-} \\ SO_{4}^{2-} \\ NO_{3}^{-} \\ HCO_{3}^{-} \\ Na^{+} \\ K^{+} \end{array}$	Cl ⁻ 1	SO ₄ ²⁻ 0,11 1	NO ₃ ⁻ 0,43 0,70 1	HCO ₃ ⁻ 0 0,53 0,16 1	Na⁺ 0,10 0,65 0,43 0,80	K ⁺ 0,51 0,67 0,96 0,26 0,44 1	Mg ²⁺ 0,20 0,78 0,54 0,84 0,89 0,58	Ca ²⁺ 0,12 0,58 0,42 0,80 0,84 0,52
Trockenzeit	$\begin{array}{c} Cl^{*} \\ SO_{4}^{2*} \\ NO_{3}^{*} \\ HCO_{3}^{*} \\ HCO_{3}^{*} \\ Na^{+} \\ K^{+} \\ Mg^{2+} \end{array}$	Cl ⁻ 1	SO4 ²⁻ 0,11 1	NO ₃ ⁻ 0,43 0,70 1	HCO ₃ ⁻ 0 0,53 0,16 1	Na ⁺ 0,10 0,65 0,43 0,80 1	K ⁺ 0,51 0,67 0,96 0,26 0,44 1 1	Mg ²⁺ 0,20 0,78 0,54 0,84 0,89 0,58 1	Ca ²⁺ 0,12 0,58 0,42 0,80 0,84 0,52 0,89

3.4.3 Spurenelemente

3.4.3.1 Allgemeines

FOUCAULT & RAOUL (2000) definieren die Spurenelemente als Elemente, die sich in sehr kleinen Mengen (in der Größenordnung von 100 ppm oder ou 100 mg/kg, d.h. 0,01%) in einem Mineral oder einem Gestein vorkommen und deren Gehalte (bestimmt durch Absorption Spektrometrie, Neutronenaktivierung, usw.) Auskünfte über die Bildungsbedingungen des Minerals und des Gesteins liefern können. Laut WARD (1995) sind Spurenelemente Elemente, die wesentlich geringere Konzentrationen als die Stufe 0,01 bis 100 µg/l haben.

Die Gesteine der Erdkruste sind die primären Reservoirs und die Hauptquelle der meisten Haupt- und Spurenelemente im Boden und in natürlichen Wässern (SALBU et al. 1995). Das Vorkommen der Spurenelemente im Grundwasser hängt unter anderem von folgenden Faktoren ab (ALLARD 1995):

- Verfügbarkeit von Wasserstoff-Ionen (pH), die die Konzentration der Hydroxid-Ionen bestimmen;
- Präsenz und Konzentration organischer Komplexbildner (besonders Humin- und Fulvosäure);
- Verfügbarkeit von freien Elektronen;
- Konzentration des Elements sowie Ionenstärke und Verteilung der Kationen.

Die Gehalte der einzelnen Spurenelemente im Grundwasser sind unterschiedlich. Die Tabelle 13 fasst die typischen Konzentrationsbereiche von einigen zusammen.

Konzentrationen ($\mu g/l$)	Elemente
>1000	Si
100-1000	Fe
10-100	Ba, Sr, Zn
1 - 1 0	Cu, Mn, Rb
0,1-1	As, Cr, Ni, Pb, U, V
0,01-0,1	Cd, Th
<0,01	Au

Tabelle 13: Konzentrationsbereiche der untersuchten Spurenelemente in Grundwassersystemen (modifiziert nach ALLARD 1995)

Die Proben für die Spurenelementanalytik wurden im Zuge der selben Probenahme wie die Proben für die Untersuchung der Haupt-Ionen gewonnen (Kap. 3.4.1.3.a über Probenahme). Die Analysen wurden im Labor für Spurenelemente des UFZ's (Leipzig) direkt nach Ankunft der Proben in Deutschland durchgeführt. Die berücksichtigten Elemente für die Arbeit sind Chrom (Cr), Cadmium (Cd), Eisen (Fe), Mangan (Mn), Barium (Ba), Arsen (As), Silizium (Si), Vanadium (V), Nickel (Ni), Gold (Au), Zink (Zn), Rubidium (Rb), Strontium (Sr) Uran (U), Thorium (Th) und Blei (Pb). Sie wurden mittels AAS (Atomic Adsorption Spectrometry), ICP-MS (Inducted Coupled Plasma Masse Spectrometry) und Spektrometrie analysiert. Vergleichende und korrelative Analysen wurden für diese Arbeit bevorzugt. Da es in den meisten Fallen keine großen Unterschiede zwischen den Gehalten der Trockenzeit und der Regenzeit festgestellt werden konnten, wurden die Regenzeitergebnisse als Grundlage für die Analysen genutzt. Die Trockenzeitkonzentrationen werden hauptsächlich zu Vergleichzwecken genutzt. Dies gilt auch für die Oberflächenwasserproben.

3.4.3.2 Korrelative Analyse der Spurenelemente in den Gewässern

a) Eisen und Mangan

a-1) Eisen (Fe)

Eisen ist am Aufbau der Erdkruste mit einem Anteil von 50 kg/t (5%) beteiligt und ist damit nach Sauerstoff, Silizium und Aluminium das vierthäufigste Element der Erdkruste (KÖLLE 2001). An freier Luft rostet das Eisen. Es reagiert mühelos mit S und O und ist Bestandteil von mehreren Silikaten, wo es Feststoffe mit Mn²⁺, Mg²⁺, Al³⁺ bildet (FOUCAULT & RAOUL 2000). Eisen und Mangan sind sehr wichtige Einflussfaktoren für den Stoffwechsel der Pflanzen und Tiere. Doch können exzessive Gehalte zu negativen kosmetischen Auswirkungen wie farbige Zähne oder Haut, oder ästhetischen Effekten wie Geschmack oder Geruch führen.

Eisen ist im Wesentlichen in Form von anorganischen Komplexen im Grundwasser vorhanden. Als Eisenquelle dienen Laterit und andere Bodenarten (RAMESH et al. 1995). Der Richtwert der WHO (1984) beträgt für Fe ist 300 μ g/l.

Die Fe-Konzentrationen in den untersuchten Grundwasserproben reichen von 0,01 (BOB3) bis 2,20 mg/l (Trad V) in der Trockenzeit und von 0,04 (BOB2) bis 1,32 mg/l (Trad I) in der Regenzeit (Abbn. 114a und 114b). Die durchschnittlichen Konzentrationen betragen 0,27 mg/l in der Regenzeit und 0,33 mg/l in der Trockenzeit. Dieser kleine Unterschied entsteht entweder durch eine stärkere Oxidation von Eisen in der Regenzeit, oder eine stärkere Konzentration von Eisen in der Trockenzeit infolge der niedrigeren Wassermenge in den Brunnen. Die Oxidationstheorie scheint bestätigt zu sein, weil die hohen Fe-Konzentrationen in den Proben mit niedrigen O_2 -Gehalten und umgekehrt auftreten und vor allem in der Trockenzeit zu finden sind (Abbn. 114a und 114b). Das Zeichen dafür könnte die gesamte negative Korrelation zwischen Fe und O_2 (r=-0,31) (Tabelle 15) sein. Mit den Haupt-Ionen wie Na, Mg und Ca hat Fe ebenfalls nur negativen Korrelationen. Man könnte die Hypothese einer Ersetzung dieser Haupt-Ionen durch Fe in den Grundwasserleitern (Lateriten) formulieren, aber das muss weiter geforscht werden. Bei den anderen Spurenelementen zeigt Fe mittlere Korrelationswerte, z.B. mit Th (r = 0,61) und mit V (r=0,58).



Abb. 114: Vergleichende Variation der Konzentrationen von Fe, Mn und O2 a) Trockenzeit und b) Regenzeit

Bei den Oberflächenwässern bewegen sich alle Fe-Konzentrationen (in der Regenzeit) im Bereich von 1 mg/l. Ausnahmen bilden der Staudamm von Tikaré (0,42 mg/l) und der Steinbruch von Ziniaré (0,86 mg/l) (Abbn. 114a und 114b). Da diese beiden Proben eine Mischung aus Grundwasser und Oberflächenwasser darstellen, könnte das die Erklärung für diese Werte sein. Die hohen Konzentrationen in den anderen Oberflächenwässern könnten aus einer Auswaschung der eisenreichen Lateritböden oder der Plinthisol-Bildung stammen.

N.B.

- a) Die hohe Konzentration der Probe Trad XV in der Trockenzeit könnte sich durch das metallische Rohr einer alten Pumpe erklären lassen. Für den Trad I (1,4 mg/l, auch in der Trockenzeit) könnte der hohe verwitterte Laterit der Grund sein;
- b) Die starken Zunahmen der Konzentrationen in den Oberflächenwässern während der Regenzeit (Abb. 114b) könnten aus der Auswaschung des Fe des Bodens durch das fließende Wasser hervorgerufen sein.

 c) Einige Proben, insbesondere in der Regenzeit, überschreiten den Richtwert (300 μg/l) der WHO (Abb. 114b).

a-2) Mangan (Mn)

Mangan ist am Aufbau der Erdkruste mit einem Anteil von 950 g/t beteiligt. Das Massenverhaltnis Eisen/Mangan in der Erdkruste liegt bei 51 (KöLLE 2001). In den Gesteinen befindet sich Mn entweder in vielen Silikaten (häufig durch Ersetzung von Fe²⁺) oder in Oxiden. Die häufigsten ausgebeuteten Mn-Erze sind Pyrolusite (MnO₂, in sedimentären Bereichen), Braunite (Mn²⁺Mn³⁺6SiO₁₂) sowie Manganit (MnOH) (FOUCAULT & RAOUL 2000).

Verwendet wird metallisches Mangan als Reduktionsmittel in der Metallurgie und als Legierungsbestandteil (KÖLLE 2001). Landpflanzen enthalten durchschnittlich 630 mg/kg Mangan, bezogen auf die Trockenmasse (MASON et al. 1985), also 4,5-mal mehr als Eisen. Der Richtwert der WHO (1984) für Mn ist 100 µg/l.

Die Mn-Gehalte in den Proben betragen bis zu 383 µg/l (Trad XIX) in der Regenzeit, und bis zu 913 µg/l (Trad VI) in der Trockenzeit (Abbn. 114a und 114b, S. 125). Die durchschnittlichen Gehalte sind jeweils 43 µg/l und 150 in der Regenzeit bzw. in der Trockenzeit (Grundwasser). Es wurde keine andere Erklärung außer der Akkumulation von Mn oder eine geringere Oxidation in den Proben während der Trockenzeit gefunden. Drei der vier Proben, die die höchsten Fe-Gehalte in der Trockenzeit zeigten, haben auch die höchsten Mn-Gehalte. Dabei handelt es sich um Trad I (266,8 µg/l), Trad VI (913 µg/l) und Trad XV (761 µg/l) (Abb. 114a, S. 125). Das könnte bedeuten, dass die beiden Elemente dieselbe Herkunft in diesen Proben haben (Metallrohr für Trad XV, hinein geworfene Pflanzen für Trad VI, und Laterite für Trad I). Ebenso wie beim Fe wurden die hohen Mn-Konzentrationen in den Proben mit niedrigen Sauerstoffkonzentrationen angetroffen. Auch hier stehen die Mn-Konzentrationen unter dem Einfluss der oxidierenden und reduzierenden Bedingungen. Die niedrigen Sauerstoff-Konzentrationen des Wassers zeigen reduzierende Wirkungen im Hinblick auf das Eisen und das Mangan.

Bezüglich der Oberflächenwässer weist der Steinbruch von Ziniaré die höchste Mn-Konzentration (177 μ g/l) auf. Dafür gelten die gleichen Erklärungen wie im Abschnitt zu Eisen beschrieben.

Die beste positive Korrelation zwischen Mn und einem anderen Spurenelementen ergibt sich mit dem Uran (r = 0,70) (Abb. 115 und Tabelle 15). Es zeigt sich auch, dass eine Senkung des pH-Wertes den Mn-Gehalt im Grundwasser positiv beeinflusst, wie bei fast allen Metallen.

Bemerkung: Die Werte in den Grundwässern Trad XII, BOB3 und den Oberflächenwässern könnte eine Ersetzung zwischen Mn und Fe bedeuten.



Abb. 115: Korrelationsgraph Mn-U

b) Silizium (Si)

Silizium bildet mit Sauerstoff den Grundbaustein der Silikate (z.B. Siliziumdioxid, Glimmer, Feldspats, usw.). Siliziumdioxid (SiO₂) tritt in verschiedenen Formen wie Quarz, Chalzedon, usw. auf (FOUCAULT & RAOUL 2000).

Das Silizium zeigt in den untersuchten Proben bei Weitem die höchsten Konzentrationen der Spurenelemente. Dies ist auf die Geologie des Gebiets zurückzuführen, in welchem Basalt, Schiefer sowie Gänge mit Quarz- und Glimmermineralisierungen dominieren.



Abb. 116: Vergleichende Variation des Konzentrationen von Si, SO₄, Na, Mg, Ca (Grundwasser)
Die *Si*-Konzentrationen in Grundwasser reichen von 4,9 mg/l (UFZ3) bis zu 12,6 mg/l (BOB3) (Abb. 116). Die Durchschnittskonzentration (7,5 mg/l) ist weit höher als die der meisten Haupt-Ionen. Die Konzentrationen der Oberflächenwässer sind im Durchschnitt 2,6 mg/l. Die Probe BOB3, die bei den Grundwässern den höchsten *Si*-Gehalt aufweist, zeigt auch die höchsten SO₄-, Na-, Mg- und Ca-Werte (in der Regenzeit) (Abb. 116). Quarz scheint in diesem (tiefen) Grundwasserleiter eines der Hauptmineralien zu sein. Die Korrelationen von *Si* zu den oben genannten Elementen bestätigen die Hypothese (formuliert in den Kapiteln zu den Haupt-Ionen), das die Herkunft des Wassers in dieser Bohrung andersartig ist.

Nur in den Proben BOB2, BOB3 und BOB4 zeigt *Si* eine sehr gute Korrelation zu den Haupt-Ionen.

c) Vanadium (V) und Chrom (Cr)

V ist ein chemisch korrosionsbeständiges Element. Es bildet allgemein Schwefelverbindungen (Patronit VS₄, Sulvanit Cu₃VS₄) sowie Oxide (Karelianite V₂O₂, Nolanite Fe₃V₇O₁₆), die in metallischen Gängen und in sedimentären Gesteinen (reich an organischen Stoffen), sowie in Kohlenwasserstoffen vorkommen können (FOUCAULT & RAOUL 2000). Die Konzentrationen in der vorliegenden Arbeit reichen von 0,02 (Trad XVII) bis 3,5 µg/l (BOB3) für das Grundwasser (Trockenzeit). Die mittlere Konzentration beträgt 0,72 µg/l in der Trockenzeit und 0,82 µg/l in der Regenzeit. Es besteht eine sehr leichte Zunahme der durchschnittlichen Konzentration in der Regenzeit im Vergleich zur Trockenzeit. Das bedeutet einen Einfluss der Neubildung über die Konzentrationen dieses Elementes. Ein Vergleich zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser zeigt höhere Konzentration in Oberflächenwasser (Abb. 117). Das deutet eine Einreicherung der Bodenoberflächenelemente im Vergleich zu den Grundwasserleitern. Mit Ausnahme von Fe (r = 0,58) zeigt V keine gute Korrelation mit den anderen Spurenelementen (Tabelle 15). Darüber hinaus besteht kein Zusammenhang mit den Haupt-Ionen.



Abb. 117: Saisonale Variation der V-Konzentrationen in den Gewässern

Man findet Cr im Spurbereich in verschiedenen Silikaten (Muskovit, Pyroxen, Epidote, Chlorit usw.) (FOUCAULT & RAOUL 2000). Dreiwertiges Cr bildet starke Komplexe mit Sauerstoff und Hydrolyse ist der dominierende Prozess in wässerigen Lösungen mit einem pH-Wert zwischen 5 und 6 (ALLARD 1995). Chrom gilt als essentielles Spurenelement und der tägliche Bedarf des Menschen wird auf 50 bis 200 µg/l geschätzt. Toxisch wirken nur Verbindungen des sechswertigen Chroms auf Grund ihrer oxidierenden Wirkung bei Zellbestandteilen. Außerdem besitzt Chrom (VI) auch mutagene Eigenschaften und kann Hautallergien hervorrufen (ROSS-KAMP 1991).

Die Konzentrationen an Cr in den untersuchten Proben liegen zwischen 1 und 10 μ g/l und befinden sich damit deutlich unter dem Richtwert für den menschlichen Verbrauch (50 μ g/l laut WHO 1984). Das einzige Spurenelement, mit denen Cr gut korreliert, ist Ni (r = 0,93) (Abb. 118 und Tabelle 15).



Abb. 118: Korrelationsgraph Ni – Cr in Brunnenwässern

d) Strontium (Sr)

Der Anteil von Sr am Aufbau der Erdkruste liegt bei 375 g/t. In der Natur kommen reine Strontiumminerale vor, wie z. B. Coelestin (SrSO₄) und Strontianit (SrCO₃) (KöLLE 2001; FOU-CAULT & RAOUL 2000) sowie in seltenen Silikaten und in vielen hydrothermalen Gängen (FOU-CAULT & RAOUL 2000). Strontiumverbindungen werden in der Pyrotechnik verwendet, weil sie eine rote Flammenfarbung verursachen (KöLLE 2001). Strontium ist weder giftig, noch lebens-notwendig. Es gleicht dem Kalzium in allen chemischen Eigenschaften und im physiologischen Verhalten (KöLLE 2001).

Die analysierten Proben zeigen Sr-Gehalte zwischen 10 und 209, 4 μ g/l in Grundwasser (mittlerer Gehalt: 55 μ g/l) und zwischen 37,3 und 129,6 μ g/l in Oberflächenwasser (mittlerer Gehalt 58 μ g/l). Die höchsten Konzentrationen sind bei den Proben Trad VI (101,8 μ g/l), Trad XI (118,5 μ g/l), BOB4 (105,3 μ g/l) und BOB3 (209,4 μ g/l) zu finden (Abb. 119). Im Gegensatz

zu mehreren Spurenelementen korreliert Sr mit mehreren Haupt-Ionen (SO₄, Na, Mg, Ca) in den Grundwasserproben und die weisen zusammen ähnliche Variationen auf (Abbn. 119 und 120 und Tabelle 15 [bezüglich der Korrelationskoeffizienten]). Sr und diese Ionen scheinen eine oder mehrere gemeinsame Quellen zu haben: die Silikat- und Schwefelmineralien der kristallinen Gesteine mit dem höchsten Gehalt in der Bohrung BOB3. Es wäre wichtig, weitere Untersuchungen durchzuführen, um die genaue Quelle von Sr zu ermitteln. Da die elektrische Leitfähigkeit im Wesentlichen von den oben genannten Haupt-Ionen korreliert ist, ist auch die Korrelation zwischen Sr und diesem Parameter (r = 0,90) sehr hoch (Abb. 121). Die Korrelation zwischen Sr und dem pH-Wert ist mehr als durchschnittlich (r=0,69) (Tabelle 15). Möglicherweise beeinflusst eine Erhöhung des pH-Werts den Sr-Gehalt in den Wässern. Dagegen existiert keine gute Korrelation zwischen Sr und den anderen Spurenelementen.



Abb. 119: Vergleichende Variation der Konzentrationen von Sr, Ca und SO₄



Abb. 120: Vergleichende Variation der Konzentrationen von Sr und Mg



Abb. 121: Korrelationsgraph Sr- elektrische Leitfähigkeit

e) Arsen (As)

Arsen kommt in der Erdkruste mit einem Anteil von 1,8 g/t vor. Meerwasser enthält 2,6 µg/l Arsen (KÖLLE 2001). Arsen stellt derzeit das größte Risiko im Zusammenhang mit der Wasseraufnahme weltweit dar (DECKERS et al. 2000). Deswegen wurde der Trinkwassergrenzwert von 50 auf 10 µg/l gesenkt. Die hauptsächlichen anthropogenen Arsenquellen sind Pestizide, Holzwahrung und in einigen Fällen Zuchtzusatzstoffe. Die anthropogenen As-Quellen stellen rund 70% von As in der Atmosphäre dar (NRIAGU & PACYNA 1998). Technisch wird Arsen als Legierungsbestandteil zum Härten von Blei verwendet, das für die Herstellung von Bleiakkumulatoren und Letternmetall eingesetzt wird (KÖLLE 2001).

Die Arsenkonzentrationen in den untersuchten Proben betragen bei meisten von ihnen weniger als 3 μ g/l. Die höchste Konzentration tritt bei BOB3 (4 μ g/l) auf. Diese niedrigen Konzentrationen zeigen, dass es im Umfeld der Grundwasserleiter keine natürlichen oder anthropogenen Arsenquellen mit erheblichen Mengen dieses Elements gibt. Ein Vergleich zwischen den Werten der beiden Probennahmen (Regen- Vs. Trockenzeit) zeigt keine erhebliche Veränderung auf.

Zum Vergleich haben SMEDLEY et al. (2007) in Grundwässern aus der Region Ouahigouya (Nord Burkina Faso) As-Konzentrationen von <0,50 bis 1630 μ g/l hervorgehoben. Die meisten Grundwässer wiesen allerdings Konzentrationen geringer als 10 μ g/l auf.

Da As fast nie anwesend in den Proben war, ist es nicht sinnvoll, die entsprechenden Analysen durchzuführen.

f) Barium, Zink, Uran und Rubidium

f-1) Barium (Ba)

Allgemein liegt der Anteil von Ba am Aufbau der Erdkruste bei 425 g/t. In der Natur kommt Barium als Baryt ("Schwerspat", BaSO₄) und Witherit (BaCO₃) vor. Bariumsulfat wird auf Grund seiner hohen Dichte von 4,5 g/cm³ im großen Umfang als Füll- und Beschwerungsmittel in der Papier- und Kautschukindustrie sowie in der Medizin als Röntgenkontrastmittel eingesetzt. Bariumsulfat wird auch als weißes Pigment bei der Herstellung von Farben verwendet. In der Pyrotechnik dienen Bariumverbindungen zur Erzeugung grüner Flammenfärbungen. Der menschliche Körper enthält ca. 0,3 mg/kg Barium (KöLLE 2001).



Abb. 122: Saisonaler Vergleich der Ba-Konzentrationen



Abb. 123: Vergleichende Variation der Konzentrationen von Ba, Cl und NO₃

Die Proben zeigen Ba-Konzentrationen zwischen 9 µg/l (BOB2) und 86 µg/l (Trad XII) in der Trockenzeit. Diese Konzentrationen (außer bei den Proben Trad I, Trad VI, Trad IX, Trad XII und Trad XV) zeigen keine erhebliche Veränderung in der Regenzeit. Bei den Brunnen Trad VI und Trad IX wurde eine Erhöhung der Konzentrationen in der Regenzeit festgestellt. Das bedeutet, dass die Neubildung eine Zunahme der Ba-Gehalte in diesen Brunnen fördert. Dagegen zeigen die Proben Trad I, Trad XII und Trad XV eine auf Verdünnung zurückzuführende Ernied-rigung der Ba-Gehalte in der Regenzeit (Abb. 122).

Die Oberflächenwässer zeigen keinen großen Konzentrationsunterschied zwischen den beiden Jahreszeiten.

Eine vergleichende Analyse mit den Haupt-Ionen in den Grundwässern zeigt, dass Ba die gleichen Variationen wie Cl⁻ und NO₃⁻ besitzt (Abb. 123). Die Ba-Konzentrationen in den Oberflächenwässern zeigen zu diesen Ionen ein umgekehrtes Verhältnis, d.h. sie sind "größer" während die von Cl⁻ und NO₃⁻ "kleiner" sind (Abb. 123). Man könnte über eine Erzätzung diese Ionen durch Ba in den Oberflächengewässern sprechen, aber diese Frage muss weitergeforscht werden um einen eventuellen geochemischen Zusammenhang zwischen diesen Elementen herauszustellen. Mit K ist ein geringerer Zusammenhang zu erkennen. Demzufolge hat man die Korrelationskoeffizienten r = 0,71 (Cl⁻), r = 0,72, (NO₃⁻) (Abb. 124) und r = 0,63 (K⁺) in den Grundwässern (Tabelle 15). Möglicherweise sind anthropogene Quellen (Grabgruben, Düngemittel) oder starke verwitterte/geklüfttete Laterite oder Ba(NO₃⁻)₂ (Trad I) die Gründe dafür. Um dies zu klären, wären weiterführende Forschungen notwendig und empfehlenswert. Neben diesen Haupt-Ionen ist Ba mit Rb (r = 0,81) und Pb (r = 0,63) gut bzw. mittelmäßig korreliert (Tabelle 15).



Abb. 124: Korrelation Ba-NO₃⁻

f-2) Zink

Zink hat einen Anteil von etwa 70 bis 132 g/t an der Erdkruste. Allgemein kommt Zink nicht in nativen Zustand vor, sondern ist Bestandteil von vielen Mineralien wie z.B. als Sulfid (Zinkblende ZnS), als Oxide (Zinkspat ZnCO₃, und andere mit Ce, As, Fe). Außerdem tritt es in seltenen Silikaten (Hemimorphit oder Galmei Zn₄[Si₂O₇](OH)₂, H₂O; Willemite Zn₂SiO₄) auf. Das Haupterz von Zink ist die Zinkblende (Sphalerit, ZnS) (FOUCAULT & RAOUL 2000). Zink ist zweiwertig in wässrigen Lösungen und bildet mäßige Komplexe mit Sauerstoff. Bei pH-Werten unter 8 dominiert das Ion Zn²⁺ und bei größeren Werten der Komplex ZnCO₃. Bei pH-Werten größer als 7,5 wird die Hydrolyse bedeutend (ALLARD 1995). Wie Eisen und Mangan ist Zink ein wichtiges Element für den Stoffwechsel der Pflanzen und Tiere.

Fast alle Proben zeigen einen Zn-Gehalt von weniger als 40 μ g/l. Nur die Probe Trad XVI hat eine Konzentration von 177 μ g/l. Da das Wasser von diesem Brunnen für die Reinigung von Golderz benutzt wird, könnte der Wert aus einer direkten Infiltration des Abwassers stammen. Aufgrund der sehr geringen Zn-Konzentrationen in den Proben konnte keine korrelative Analyse mit den anderen chemischen Elementen durchgeführt werden.

f-3) Rubidium (Rb)

Rb ist ein sehr reduzierender weißer Feststoff, der hauptsächlich in Feldspäten und Glimmern (Lepidolith und Zinnwaldit) von Pegmatiten vorkommt. Sein Isotop 87 ist radioaktiv und zerfällt zu Sr mit einer Periode von $5x10^{10}$ Jahren. Das Rb/Sr-Verhältnis wird derzeit als Datierungsmethode (Radiochronologie) verwendet (FOUCAULT & RAOUL 2000).

Die Rb-Konzentrationen in den Proben reichen von 0,37 μ g/l (Trad XVII) bis 4,9 μ g/l (Trad XIX) in den Grundwässern und von 2,3 μ g/l (Talsperre Tikaré) bis 7,1 μ g/l (Steinbruch Ziniaré) in den Oberflächenwässern. Im Durchschnitt sind die Konzentrationen der Oberflächenwässer (4,6 μ g/l) fast dreifach höher als die der Grundwässer (1,7 μ g/l). Die oberflächlichen Formationen enthalten dann mehr Rb als die der Aquifere. Der höchste Wert von Trad XIX kann durch den Kontakt mit hoch glimmerhaltigem Schiefer erklärt werden.

Ebenso wie Ba ist auch Rb (die sehr gut korreliert sind) in den Grundwässern mit NO_3^- (r=0,63), K⁺ (r = 0,81) und Pb (r = 0,60, Abb. 132, S. 140) korreliert. Bezüglich K und Ba zeigen die Abbn. 125 und 126, wie diese Elemente mit Ba ähnliche Variationen bilden.



Abb.125: Vergleichende Variation der Konzentrationen von Ba und Rb



Abb. 126: Vergleichende Variation der Konzentrationen von Rb und K^+

f-4) Uran (U)

Uran besitzt drei natürlichen Isotope: ²³⁸U (99,27%), ²³⁵U (0,72 %) und ²³⁴U (0,05%) und ist sehr mit Thorium verbunden. Am häufigsten ist es in Nebenmineralien wie Zirkon, Monazit, Apatit von Syeniten und Graniten zu finden (von 15 bis 25g/t). Man findet U als Oxid in Graniten, Pegmatiten und deren Gängen, in denen verschiedene Metalle (Ni, Co, Bi, Ag, Au, etc.) ebenfalls zu finden sind (FOUCAULT & RAOUL 2000).

In dieser Arbeit wurden U-Gehalte von $<0,008 \ \mu g/l$ (Trad VI) bis 0,32 $\mu g/l$ (Trad XIX) ermittelt. Wie bei Mn und Rb zeigt sich, dass die Probe Trad XIX (für das Grundwasser) den höchsten U-Gehalt aufweist. Der Grund dafür könnte der Schiefer sein, der der Grundwasserleiter und das Festgestein dieses Brunnen bildet.



Abb. 127: Diagramme U-Rb-Mn der Oberflächengewässer

Die Oberflächengewässer zeigen sowohl in der Trockenzeit als auch in der Regenzeit im Durchschnitt eine höhere Konzentration als die Grundwässer. Die Konzentrationen reichen von $0,032 \mu g/l$ bis zu $0,58 \mu g/l$. Wie bei Rb und Mn zeigt die Probe "Steinbruch Ziniaré" die höchste U-Konzentration (Abb. 127). Da dieses Wassers eine Mischung aus Oberflächenwasser und Grundwasser ist (Kluftaquifer von Granit), könnte der Granit der Grund der hohen Werte sein.

N.B. Mit den anderen Spurenelementen zeigt U nur mit Mn eine relativ gute Korrelation (Abb. 115, S. 127 und Tabelle 15).

g) Cadmium (Cd)

Die Erdkruste enthält 0,20 g/t Cadmium. Im Meerwasser findet man 0,1 µg/l Cadmium. Cadmium kommt nicht in technisch verwertbaren Mengen in eigenständigen Erzen vor, sondern ist praktisch immer mit Zinksulfid vergesellschaftet. Cadmium ist daher stets ein Nebenprodukt der Zinkgewinnung (KÖLLE 2001, FOUCAULT & RAOUL 2000). Wegen der Giftigkeit von Cadmium ist sein Einsatz in der Technik rückläufig. Verwendet wird Cadmium für metallische Schutzüberzüge. Cadmiumverbindungen findet man als Stabilisatoren in PVC, in wiederaufladbaren Nickel-Cadmium-Batterien und in Farbpigmenten ("Cadmiumgelb", CdS). Cadmium ist in fossilen Brennstoffen mit einem Anteil von 0,01 bis 2 mg/kg enthalten (KÖLLE 2001).

Cadmium ist zweiwertig in wässrigen Lösungen und bildet schwache Komplexe mit Sauerstoff und mäßig starke Komplexe mit Chlor und Schwefelwasserstoff. Die Hydrolyse ist nur bei pH-Werten> 8 bedeutungsvoll (ALLARD 1995). Da die pH-Werte der Grundwasserproben der vorliegenden Untersuchung im Durchschnitt unter 7 liegen, könnte man daraus schließen, dass es keine bedeutende Hydrolyse bei den Proben gibt. Die natürlichen Formen von Cadmium, CdCl⁺ und CdSO₄, können wichtige Bestandteile im Grundwasser bis zu einem pH-Wert von 8 sein. Die Bildung von komplexen mit den natürlichen Organismen in Oberflächenwässern kann bedeutungsvoll sein, aber nicht im Grundwasser, es sei denn die Chlor- und Sulfatgehalte gering sind und die von organischem Kohlenstoff hoch ist (ALLARD 1995). Die Analysen haben ergeben, dass die Cd-Konzentrationen in den Grundwasserproben zwischen 0,09 μ g/l (Trad II und III) und 1,49 μ g/l (Trad XIII) sind (Fig. 127). Die Konzentrationen der Oberflächenwasserproben liegen in der gleichen Größenordnung. Cd zeigt keine positive Korrelation mit den anderen gelösten Elementen (Spuren- und Hauptelementen). Lediglich in einigen Proben weisen Cd und Cl⁻ eine ähnliche Entwicklung auf (Abb. 128).



Abb. 128: Vergleichende Variation der Konzentrationen von Cd und Cl

h) Thorium (Th)

Thorium (Th) tritt in Thorianit (Th₂O) und Thorit (ThSiO₄) auf, die an Syenite, Granite und Pegmatite gebunden sind. Sein ist jedoch der Monazit CePO₄ oder (Ce,La,Th)PO₄ (Nebenmineral von biotithaltigen Granitoiden und deren Pegmatiten). Dieser reichert sich auch in Alluvium an (FOUCAULT & RAOUL 2000).

Die Grundwasserproben weisen Th-Konzentrationen von $<0,005 \ \mu g/l$ bis 1,17 $\mu g/l$ (Trad I) auf. Wie bei Fe zeigen die Proben Trad I und Trad XV die höchsten Th-Werte (Abb. 129). Bezüglich der Oberflächenwässer weisen diese fast die gleichen Konzentrationsgrößenordnungen auf. Th korreliert mit Fe (r = 0,62) und Au (r = 0,52) (Tabelle 15).



Abb. 129: Vergleichende Variation der Konzentrationen von Fe und Th

i) Gold (Au)

Gold ist das formbarste und duktilste Edelmetall und befindet sich hauptsächlich im ursprünglichen Zustand. Die Gänge, in denen Gold mit verschiedenen Metallmineralien (Pyrit FeS₂, Arsenkies FeAsS, Zinkblende ZnS, Bleiglanz PbS, etc.) vorkommt, sind allgemein quarzhaltige Gänge, die mit plutonischen Gesteinen wie Granite, Granodiorite und Diorite verknüpft sind (FOUCAULT & RAOUL 2000). In Burkina Faso und im Arbeitsgebiet ist Gold das meist geförderte Edelmetall. Daher liegen mehrere Erzgruben in der Nähe des Probennahmengebietes (Abb. 130). Das Wasser aus einigen Brunnen wird für die Reinigung der Erze aus den Bergwerken verwendet. Es handelt sich dabei um Trad XVIII, TRAD XVI und BOB4. Diese Reinigung findet am Rand der Brunnen statt. Die höchste Au-Konzentration tritt im Grundwasser während der beiden Probennahmen bei Trad VIII (0,055 μ g/l) auf. Hinsichtlich der Oberflächenwässer ist diese deutlich geringer (<0,005 μ g/l).



Abb. 130: Goldbergbau



Abb. 131:Korrelationsgraph Au-Cl (Grundwasser)

Die Au-Gehalte scheinen nicht besonders gut mit denen der anderen Spurenelemente zu korrelieren in spezifischen Proben, wie es der Fall bei einigen Spurenelementen war. Die besten Korrelationen zeigt Au mit Cr, Th, und Cl⁻ (Abb. 131 und Tabelle 15). Die Beziehung Cl⁻Au zeigt, dass Cl neben den möglichen anthropogenen Einträgen auch mineralische Quellen hat. Für Cr setzt dies voraus, dass Au zusammen mit Cr in den Goldgängen vorkommen könnte.

j) Blei (Pb)

Blei findet man ausnahmsweise im elementaren Zustand in Gesteinen. Häufig tritt es auch in Silikaten, Sulfiden, Sulfaten auf. Bleihauptmineral ist Bleiglanz (PbS) (FOUCAULT & RAOUL 2000; KÖLLE 2001). Blei kommt in der Erdkruste mit einem Anteil von 13 g/t vor und Meerwasser enthält 0,03 μ g/l davon (KÖLLE 2001). Blei ist zweiwertig in den aquatischen Umweltsystemen und bildet starke Komplexe mit Sauerstoff- und Sulfidliganden, und infolgedessen auch mit natürlich organischen Liganden. Die Hydrolyse ist bedeutungsvoll bei pH-Werten>6, aber an Stelle der Hydrolyseprodukte ist PbCO₃ die dominierende Art in Lösungen mit einem pH-Wert>6 und bei geringeren pH-Werten das freie Pb²⁺-Ion (ALLARD 1995). Blei wurde in der Malerei, im Benzin und für Rohrleitungsherstellung eingesetzt.

Sowohl in den Grundwässern als auch in den Oberflächenwässern beträgt die Pb-Konzentration nur wenige $\mu g/l$. Die höchste Konzentration (10 $\mu g/l$) tritt bei der Probe Trad XIX auf (wie für Ba und Rb) in der Regenzeit auf (Tabelle 14).

Probe	Trad I	Trad II	Trad III	Trad IV	Trad V	Trad VI	Trad VII	Trad VIII	Trad IX	Trad X
Konzentration (mg/l)	<0,0001	0,0025	0,0014	0,0018	0,0021	0,0046	0,0023	0,0076	0,0096	0,0064

Tabelle 14:	Verteilung der Pb-Konzentrationen	

Probe	Trad	Trad	Trad	Trad	Trad	Trad	Trad	Trad	Trad	UFZ3
	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	
Konzentration	0,0029	0,0018	0,0012	0,0006	0,0021	<0,0001	0,0091	0,0044	0,0103	0,0037
(mg/l)										

Probe	UFZ4	BOB4	BOB2	BOB3	Lac	Dam	Dam	Dam	Steinbruch
					Bam	Koulniéré	Ziga	Loumbila	Ziniaré
Konzentration	0,0013	0,0007	<0,00014	0,0045	0,0056	0,0041	0,0089	0,0076	0,0053
(mg/l)									

Probe	Nakambé	Dam Tikaré	Yilou
Konzentration (mg/l)	0,0026	0,0079	0,0045

Ebenso wie Au scheint auch Pb mäßig mit Cl⁻ zu korrelieren (r = 0,50), selbst wenn diese Korrelation mittelmäßig ist. Darüber hinaus zeigt Pb mit Ba (r = 0,63) und Rb (r = 0,60) (Abb. 132) mittlere Korrelation, welche weiter untersucht werden sollte.



Abb. 132: Korrelationsgraph Pb vs. Rb (Grundwasser)

	Cd	Pb	Cr	Ni	Au	Rb	Th	U	V	Ba	Fe	Mn	Sr	Si
Cd	1,00	-0,07	-0,06	-0,07	-0,13	0,01	-0,07	0,13	-0,25	0,08	-0,06	0,02	0,08	-0,01
Pb		1,00	0,35	0,34	0,28	0,60	-0,22	0,36	-0,23	0,64	-0,16	0,47	0,10	-0,34
Cr			1,00	0,93	0,52	0,35	0,10	-0,02	-0,10	0,30	-0,23	-0,03	0,16	-0,17
Ni				1,00	0,67	0,27	0,24	0,04	-0,12	0,24	-0,10	0,04	0,07	-0,21
Au					1,00	0,11	0,52	-0,13	0,05	0,30	0,10	-0,03	-0,01	-0,20
Rb						1,00	-0,24	0,36	0,00	0,81	-0,18	0,54	0,19	-0,50
Th							1,00	-0,09	0,45	-0,25	0,62	-0,08	-0,19	-0,07
U								1,00	0,18	0,07	0,26	0,70	0,23	-0,28
V									1,00	-0,19	0,58	0,04	0,00	-0,23
Ba										1,00	-0,28	0,38	0,25	-0,30
Fe											1,00	0,36	-0,46	-0,15
Mn												1,00	-0,23	-0,20
Sr													1,00	0,06
Si														1,00
Cu	-0,16	0,09	-0,34	-0,33	0,10	-0,11	-0,02	-0,14	0,11	-0,03	-0,01	0,06	-0,22	0,20
pН	0	-0,03	0,34	0,13	0,05	0,22	0,03	-0,05	0,26	0,24	-0,31	-0,38	0,70	-0,08
T°C	0,02	-0,26	-0,3	-0,38	-0,51	-0,19	0,06	0,32	0,1	-0,39	0,25	0,23	-0,25	0,03
CE	-0,09	0,22	0,37	0,25	0,16	0,32	-0,19	0,15	-0,09	0,44	-0,51	-0,1	0,9	0,09
O ₂	-0,29	0,14	0,16	0,06	-0,03	0,27	-0,13	-0,16	-0,2	0,24	-0,31	-0,08	0,28	0,33
Cl	0,04	0,50	0,24	0,26	0,61	0,43	-0,08	-0,17	-0,20	0,72	-0,36	-0,05	0,29	-0,23
SO4 ²⁻	0,04	0,15	0,27	0,24	-0,01	0,09	-0,09	0,38	-0,01	0,02	-0,32	-0,18	0,89	-0,03
NO ₃	-0,10	0,29	0,11	0,06	0,16	0,62	-0,18	0,01	-0,06	0,72	-0,25	0,27	0,22	-0,25
Na ⁺	0,06	0,41	0,16	0,18	0,37	0,20	-0,20	0,16	-0,29	0,45	-0,50	-0,08	0,73	0,02
\mathbf{K}^{+}	0,07	0,30	0,41	0,24	-0,11	0,81	-0,22	0,09	0,01	0,63	-0,25	0,23	0,28	-0,28
Mg ²⁺	0,16	0,01	0,12	0,02	-0,13	0,05	-0,26	0,22	-0,08	0,10	-0,50	-0,29	0,97	0,17
Ca ²⁺	0,07	0,08	0,28	0,12	0,05	0,25	-0,19	-0,02	0,00	0,36	-0,54	-0,30	0,90	0,21

Tabelle 15: Korrelationsmatrix der Spurenelemente mit den Haupt-Ionen und den physikalisch-chemischen Parametern

3.4.4 Die Isotope des Wasserstoffs und des Sauerstoffs

3.4.4.1 Allgemeines

Isotope sind Atome eines Elements, die unterschiedliche Neutronenzahl haben. Die meisten chemischen Elemente verfügen über mehrere Isotope unterschiedlicher Masse. Es werden zwei Isotopenarten unterschieden: die stabilen Isotope und die instabilen Isotope. Die stabilen Isotope unterliegen keinem Zerfall im Gegensatz zu den instabilen Isotopen.

Zwei Elemente, Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O), bilden das Wassermolekül mit der Formel H₂O. Die verschiedenen Isotope beider Elemente sind im Wassermolekül vorhanden: der leichte Wasserstoff ¹H (häufiger vorkommend), der schwere Wasserstoff oder Deuterium, ²H oder D (seltener vorkommend), der leichte Sauerstoff ¹⁶O (häufig); ¹⁷O (sehr selten) und schwerer Sauerstoff ¹⁸O (selten). Es werden aus diesen Gründen verschiedene Wassermoleküle auftreten: das wichtigste ist H₂¹⁶O, das häufigste Wassermolekül; und die selteneren Moleküle HD¹⁶O und H₂¹⁸O (MAZOR 1997). Die Wasserstoff- und Sauerstoffisotope (¹H und ²H; und ¹⁶O und ¹⁸O) sind stabil. Die natürlichen hydrologischen Prozesse des Niederschlages isolieren diese Wasserstoff- und Sauerstoffisotope und deswegen sind sie ideale Wassermarkierungsstoffe. Die geochemischen Verhältnisse der stabilen Isotope kann Auskunft über die Herkunft und das Alter von Grundwässern. Darüber hinaus kann die Analyse der stabilen Isotopen Informationen über den Mischungsgrad verschiedener Wässer (Wässer mit schweren Isotopen und Wässer mit leichten Isotopen sowie Oberflächenwasser und Grundwasser) geben.

Die relative Häufigkeit der Isotope des Wassermoleküls hängt von mehreren Faktoren wie dem Niederschlagsort (geographische Breite, Höhe und Entfernung vom Meer), dem Prozess der Verdunstung-Kondensation, dem Austausch mit Mineralen, der Mischung mit magmatischem oder Tiefenwasser ab (BANTON & BANGOY 1997).

Die Isotopenverhältnisse der stabilen Wasserisotope werden in der Regel als δ -Werte in Promille (‰) Einheiten im Vergleich zu einem international vereinbarten und bekannten Standardwasser, der mittleren isotopischen Zusammensetzung des Ozeanwassers (kontrolliert von der IAEA in Wien: V-SMOW) angeben. Die Formel lautet:

$\delta^{18}O = [{}^{18}O/{}^{16}O (Proben)/{}^{18}O/{}^{16}O (SMOW) - 1]10^{3}$ $\delta D = [D/H (Proben)/D/H (SMOW) - 1]10^{3}$

Ein negativer δ -Wert einer Probe zeigt, dass diese ein niedrigeres Isotopenverhältnis als der Standard aufweist. Zum Beispiel bedeutet ein δ^2 H-Wert von -5,4‰, dass der Bezug ²H/¹H der Probe 5,4 Promille bzw. 0,54% geringer als der Standard ist.

Im Rahmen dieser Arbeit werden nur die stabilen Isotope von Wasserstoff und Sauerstoff, D und ¹⁸O, berücksichtigt. Die durchschnittliche relative Häufigkeit dieser stabilen Wasserisotope (FRITZ & FONTES 1980) ist ¹H: 99,984%, ²H: 0,015%, ¹⁶O: 99,76%, ¹⁷O: 0,037% und ¹⁸O: 0,10%. Das radioaktive Tritium ³H kommt nur zu 10⁻¹⁶ bis 10⁻¹⁴% vor.

In dieser Arbeit wurden in der Trocken- und Regenzeit dieselben Brunnen, Bohrungen und Oberflächenwässer beprobt, wie es für die Untersuchung der Hauptionen der Fall war: 19 Brunnen, 2 Bohrungen und 3 Oberflächenwässer in der Trockenzeit; 22 Brunnen (darunter 2 Piezometer), 2 Bohrungen, 8 Oberflächenwässer in der Regenzeit.

Hinsichtlich der Probenahme ist das Verfahren im Kap. 3.4.1.3.1 beschrieben. Für die Isotopenproben wurden die Flaschen randvoll gefüllt (CLAASSEN & HALM 1994; CLAASSEN & DOWNEY 1995). Die gekennzeichneten Flaschen wurden im Isotopenlabor des UFZ in Halle, Deutschland, für die Charakterisierung der Isotopenverhältnisse analysiert.

Die Ziele dieser Isotopen-Untersuchung sind die Isotopenverhältnisse von Wasserstoff und Sauerstoff der Wässer und die Identifizierung von möglichen beeinflussenden Phänomenen der Isotopenverhältnisse zu ermitteln. Zusätzlich dient die Arbeit als Grundlage für künftige Untersuchungen der Wasserressourcen in der nördlichen Region des Landes. So gesehen ist diese Arbeit ein wichtiger erster Schritt weiterer Forschungen zur Bewertung der Wassersituation.

3.4.4.2 Die Co-Varianz von ²H und ¹⁸O und Veränderung des Isotopenverhältnisses $\delta^2 H/\delta^{18}O$

Die Isotopenanalysen der Wässer werden durch eine Beziehung zwischen δ^2 H und δ^{18} O definiert (CRAIG 1961): $\delta^2 H = 8\delta^{18}O + 10$. Weltweit korrelieren alle Niederschläge mit dieser Funktion und bilden die Global Meteoric Water Line (GMWL). Lokal können die Koeffizienten dieser Korrelation leicht anders sein. Es wird dann über örtliche Niederschlaglinien gesprochen (LMWL).

Die Verdunstung vom Oberflächenwasser und die Interaktion zwischen Wasser und Gestein sind die beiden wichtigsten Prozesse, die an der Veränderung des Isotopenverhältnisses δ^2 H und δ^{18} O beteiligt sind. Die Verdunstung führt zu einer Anreicherung von schweren Isotopen in den verbleibenden Wässern, wo¹⁸O in der Regel im Vergleich zu²H stärker angereichert wird. Diese Anreicherung wird von einer Verdunstungslinie mit einer Steigung von 1 bis 5, die die Linie des Niederschlagwassers bei der Zusammensetzung der lokalen Niederschläge kreuzt (BAN-TON & BANGOY 1997) beschrieben.

Der Isotopenaustausch bei der Wasser-Gesteins-Wechselwirkung (BANTON & BANGOY 1997) wird bei höheren Temperaturen in der tieferen Erdkruste oder in Geothermalgebieten begünstigt. Da nur der Sauerstoff in diese Prozess involviert ist, ist die Entwicklungslinie auf der Grafik parallel zur δ^{18} O-Achse.

Neben diesen beiden Hauptprozessen können andere zweitrangige Prozesse die Isotopenzusammensetzung des Grundwassers beeinflussen. Es handelt sich um (Abb. 133):

- die Kondensation;
- den Austausch mit dem CO₂ bei niedrigen Temperaturen;
- die Hydratation der Silikate;
- den Austausch mit H₂S.



Abb. 133: Isotopische Anreicherung der Wässer in ¹⁸O und ²H zur Niederschlagsgeraden (nach BANTON & BANGOY 1997)

3.4.4.3 Die Isotopenzusammensetzung der Oberflächenwässer

Zwei Proben von Oberflächenwässern stammen aus dem Umfeld der Grundwässerproben. Bei den anderen Oberflächenwässern, die außerhalb des Arbeitsgebietes liegen, handelt sich um den Stausee von Ziga, den See Lac Bam, den See im Granitsteinbruch von Ziniaré, den Fluss Nakambé, den Stausee von Loumbila und die Probe von Yilou. Die Proben außerhalb des Arbeitsgebiets wurden für eine vergleichende Analyse und eine Untersuchung der räumlichen Verteilung des Niederschlags im Arbeitsgebiet verwendet.

a) Oberflächenwässer in der Trockenzeit

Hinsichtlich der Proben aus der Trockenzeit wird sehr deutlich, dass diese Wässer isotopisch stark an ²H und ¹⁸O angereichert sind. Deswegen weisen sie im Vergleich zum V-SMOW-Standard positive Werte der Isotopenverhältnisse (Abb. 134) auf.

Im Gegensatz zu der Schwankung der ¹⁸O-Gehalte mit 12‰ wird eine höhere Schwankung bei ²H (58‰) festgestellt. Die Isotopengehalte des Staudamms von Koulniéré (δ^{18} O: +2‰ und δ^{2} H: +5,9‰) und des Lac Bam (δ^{18} O: +7,26‰ und δ^{2} H: +26,9‰) unterscheiden sich deutlich von jenen der Talsperre von Ziga (δ^{18} O: +13,97‰ und δ^{2} H: +63,7 ‰). Dieser Unterschied könnte sich durch die räumliche Nähe der beiden ersten Wasserflächen und deshalb ähnlicher Niederschlagsmerkmale erklären lassen. Da entlang des gesamten Ufers des Lac Bam Wasser für Gemüseanbau entnommen wird, könnte dieser See durch erhebliche Verdunstungsprozesse stärker mit schwereren Isotopen angereichert sein, als der benachbarte Stausee von Koulniéré. Aber auch das langsam fließende Wasser des Lac Bam könnte der Grund starker Verdunstung in der Trockenzeit sein. Die schwerste Isotopensignatur des Stausees Ziga könnte daran liegen, dass der See durch eine hohe Wasserentnahme (Trinkwasserversorgung für Ouagadougou) und sein flaches Aspekt eine erhebliche Verdunstung erleidet. Die Isotopenzusammensetzungen der beprobten Oberflächenwässer in der Trockenzeit ist daher durch eine sehr starke Verdunstung beeinflusst. Diese ist durch die folgende Trendlinie gekennzeichnet *y* = *4,85 x* - *4,76*, die die GMWL schneidet (Abb. 134). Da auch die Probenahme an den Rändern der Wasserflächen (wegen feh-

lenden Zugang zum See), wo die Verdunstung stärker als in der Mitte ist, durchgeführt wurden, könnten auch dadurch die realen Isotopengehalte der Gewässer beeinflusst worden sein

Ein Vergleich mit den Daten der Regenzeit zeigt, dass dieselben Proben eine unterschiedliche isotopische Signatur aufweisen. Die Steigung dieser Trendlinie ist nahe der der GMWL (Abb. 134). Der Beitrag des Regenwassers ist also zu erkennen, so dass die Trendlinie fast parallel zu der GWML verläuft. Die Isotopenverhältnisse sind geringer als der VSMOW-Wert und ergeben deshalb negative Werte. Selbst wenn die Auswirkung der Verdunstung in der Regenzeit scheinbar nicht so stark ist, existiert sie dennoch. Das Kennzeichen dafür ist die Verschiebung der Trendlinie von der GMWL (Abb. 134).

Wenn die drei Proben auf demselben Graph mit den anderen Oberflächenwässern dargestellt werden, sind die Auswirkungen der Verdunstung deutlich erkennbar. Die Trendlinie hat die folgende Gleichung: y=6,29x-7,95 (Abb. 135).

b) Oberflächenwässer in der Regenzeit

Die Wässer in der Regenzeit weisen isotopisch drei Signaturen aus:

- (1) Die erste Signatur mit 6 Proben (Stausee von Ziga, Lac Bam, Stausee von Koulniéré, Yilou, Stausee Loumbila, und Nakambé) charakterisiert sich durch leicht abgereicherte H/O-Isotopengehalte (δ¹⁸O: -5,83‰ bis -7,46‰, δ²H: -24‰ bis -57‰) (Abb. 135). Offensichtlich sind der Zufluss von Niederschlags- und Flusswasser und die kontinuierliche Neubildung bei geringerer Verdunstung dafür verantwortlich.
- (2)Die zweite Isotopensignatur (Abb. 135), der Stausee von Tikaré (δ¹⁸O: -3,31‰ und δ²H: -31,1‰) zeigt schwere ²H- und ¹⁸O-Gehalte als in der vorherigen Gruppe. Wegen seines stationären Zustandes und verbunden mit seiner kleineren Fläche unterliegt dieses Oberflächengewässer größerer Verdunstung. Diese Isotopensignatur mit leicht höheren ²H- und ¹⁸O-Gehalten könnte auch auf eine Mischung zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser zurückzuführen sein. Denn die Brunnen direkt hinter dem Damm zeigen den gleichen Wasserstand wie das Wasser im Stausee. Das könnte die Folge einer direkten und schnellen Infiltration des Grundwassers in das Oberflächenwasser sein, die zu einem Gleichgewichtzustand führt (sehe Kap. 3.3.6.1). Es ergibt sich dann eine Mischung durch einen Austausch der beiden Wässer mit einer Zufuhr von isotopisch schwererem Grundwasser zum Wasser des Stausees.
- (3)Die dritte Signatur, der Granitsteinbruch von Granit Ziniaré (δ¹⁸O: -2,33‰ und δ²H: -24,1‰), ist die isotopisch schwerste aller Signaturen der Oberflächenwässer. Dieses Wasser ist ebenfalls eine Mischung aus Oberflächen- und Grundwässern. In dem Steinbruch kommt es zu einer Mischung von Wässern aus dem oberflächlichen Abfluss, dem Regen und dem älteren Grundwasser der Kluftgrundwasserleiter. Diese Grundwässer sind vermutlich an schweren ²H und ¹⁸O angereicht. Wenn es dann zum Kontakt zwischen diesen Wässern kommt, tritt eine Mischung auf, und somit eine Anreicherung oder eine Verarmung an schweren Isotopen (abhängig von der Wasserherkunft). Die Signatur aus dem Granitstein-

bruch, der mit dem Kluftaquifer verbunden ist, entspricht also einem Gleichgewichtszustand zwischen drei Wasserarten.



Abb. 134: Saisonaler Vergleich der Isotopenverhältnisse von Lac Bam, Stausee Koulniéré und Stausee Ziga



Abb. 135: Isotopensignatur der gesamten Oberflächengewässer (Regenzeit)

3.4.4.4 Die Isotopenzusammensetzung der Grundwässer

Es ist wichtig die Untersuchung der Isotopenverhältnisse des Grundwassers durchzuführen, da das Grundwasser ein entscheidender Bestandteil im Wasserkreislauf des Untersuchungsgebietes ist. Das Grundwasser aus den verschiedenen (oberflächlichen) Aquiferen hat Kontakt zu Oberflächenwassern (z.B. natürliche oder künstliche Seen) und tauscht sich dynamisch mit denen aus. Daraus ergeben sich auch unterschiedliche Verweilzeiten des Grundwassers im Aquifer. In dieser Arbeit wird hauptsächlich fokussiert auf a) die Beziehungen zwischen den Brunnenwässern aus den Lateritgrundwasserleitern des Staudammumfeldes von Tikaré und den Wässern der tiefen Grundwasserleiter, b) die mögliche Beziehung zwischen dem Wasser des Stausees und der der Brunnen und c)die Identifizierung der Quellen der neu gebildeten Wässer. Die Schwerpunkte liegen auf der Charakterisierung der Herkunfts- und Austauschprozesse zwischen den Wässern.

a) Die Brunnenwässer der lateritischen Grundwasserleiter

Wegen ihrer unterschiedlichen Einzugsgebiete wird zwischen Brunnenwässern und Bohrungswässern unterschieden. Die Brunnen sind im Lateritgrundwasserleiter ausgebaut und die tieferen Kluftgrundwasserleiter werden von den Bohrungen angeschnitten. Dieser unterschiedliche Zugang an die Wasserreservoire beeinflusst die Dauer und die Menge der Grundwasserneubildung, sowie die Aufenthaltdauer der Wässer im Untergrund.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 19 Brunnen (in der Trockenzeit) und 21 (in der Regenzeit) beprobt, um die Isotopensignatur von ¹⁸O und ²H zu bestimmen.

In den Wässern der Trockenzeit sind die Schwankungsbreiten der Isotopengehalte nicht groß. Sie liegen zwischen -3,31‰ und -4,58‰ für δ^{18} O und zwischen -19,6‰ und -27,4‰ für δ^{2} H. Außer zwei Proben (eine auf der Trendlinie GMWL und die andere oberhalb) befinden sich alle unter der GMWL. Die gebildete Trendlinie ergibt sich zu y = 5,8x - 0,9 (Abb. 136). Sie weist auf einen Verdunstungseffekt hin. Im Vergleich zu den Oberflächenwässern ist dieser Effekt jedoch deutlich geringer. Drei Signaturen konnten trotz der Homogenität unterteilt werden:

- a. Die erste Gruppe (4 Proben) weist isotopisch angereicherte Wässer auf und die Brunnen befinden sich untereinander in einem Abstand von 200 m. Eine Mischung eines "alten" Wassers mit schweren Isotopensignaturen und eines "jungen" Neubildungswassers mit leichten Isotopen könnte zu dieser Signatur geführt haben. Es könnte auch vor der Versickerung eine Verdunstung stattgefunden haben, die zu einer Anreicherung der infiltrierten Grundwässer mit schweren Isotopen geführt hat. Die Proben der Grundwässer weisen fast identische elektrische Leitfähigkeit von 50 bis 74 μS/cm, Cl-Gehalte (0,79 bis 1,92 mg/l; mit Ausnahme der Probe TRAD VI Cl: 12,23 mg/l, welche wahrscheinlich durch eine anthropogene Quelle beeinflusst ist) auf. Da die elektrische Leitfähigkeit stark von Na, Mg und Ca, die eine ähnliche Variationen aufweisen (s. Kap. 3.4.2.2.5), beeinflusst werden, könnte das eine Bestätigung dafür sein, dass sie die gleichen chemischen Prozesse durchlaufen oder mindesten eine ähnliche Entwicklung haben;
- b. Die zweite Gruppe (nur durch eine Probe charakterisiert, TRAD XIV δ^{18} O: -3,82‰ und δ^{2} H: -23,5‰) liegt zwischen schweren und leichten Isotopen. Das könnte die Folge einer schnelleren Auffüllung der Grundwasserleiter (ohne vorherige Verdunstung) im Vergleich zu den Wässern der vorherigen Gruppe sein. Der Sauerstoffgehalt der Probe (O₂ = 7,97 mg/l) bestätigt, dass der Grundwasserleiter zum Teil belüftet ist;
- c. Die dritte Gruppe, die die leichteste Isotopensignatur hat, besteht aus den verbleibenden Proben. Die Bandbreite von δ^{18} O ist sehr gering (von -4‰ bis -4,5‰). Da sie in verschiedenen Bereichen des Arbeitsgebietes liegen, ist eine schnellere Neubildung von isotopisch leichten Wässern aus dem Niederschlag ohne Mischung mit isotopisch schweren Grundwässern zu vermuten.

In der Regenzeit wurden geringere Schwankungen, bezüglich der Brunnenwässer, in den δ^{18} O- und δ^{2} H-Signaturen von -4,67‰ bis -3,34‰ und von -29,0‰ bis zu -18,6‰ gemessen.

Die Wässer scheinen in der Regel wenig von der Verdunstung beeinflusst worden zu sein, weshalb die Trendlinie y = 7,64x + 6,86 nahezu parallel zu der GMWL (Abb. 136) verläuft. Offensichtlich ist die Evaporation in der Regenzeit geringer, so dass sich das neubildende Grundwasser nur geringfügig beeinflusst wird (Abb. 11, S. 10). Im Vergleich der Grundwässer zu den Oberflächengewässern wirkt sich die Verdunstung stärker auf Letztere aus, wie es auch in der Trockenzeit den Fall war (Abb. 137).

Eine vergleichende Analyse der Isotopensignaturen zwischen Regen- und Trockenzeit zeigt keinen großen Unterschied in Bezug auf das Verhältnis der jeweiligen Proben (Abb. 135). Wie in der Trockenzeit werden auch hier drei Isotopensignaturen, vor allem durch die größere Variation im ²H-Gehalt, unterschieden.

Die angereicherte Signatur (-3,34‰ bis -3,72‰ für δ^{18} O, -18,6‰ und -20,7‰ für δ^{2} H) umfasst die gleichen Wässer, die auch in der Trockenzeit zu dieser Gruppe gehörten, plus die Trad VI, V, IX, XII und XV. Diese vier Proben zeigten eine leichtere Signatur in der Trockenzeit und müssen wahrscheinlich isotopisch angereichertes Wasser (Aufstieg von alten Wässern aus dem Grundwasserleiter) zugemischt bekommen haben.

Das gleiche Phänomen scheint bei den Wässern der Proben Trad II, VI, XIII, die mit Wasser aus Trad XIV und dem Piezometer UFZ4 (δ^{18} O: -3,81 und δ^{2} H: -23,7‰) die zweite Isotopensignatur bilden, aufzutreten (Abb. 136). Allerdings konnte das Piezometer UFZ4 in der Trockenzeit nicht beprobt werden, da es kein Wasser führte.

Im Vergleich zur Trockenzeit umfasst die dritte Gruppe weniger Proben, da einige Wässer, die in der Trockenzeit isotopisch abgereichert waren, in der Regenzeit isotopisch schwerer geworden sind. Dennoch unterscheiden sich drei Proben dieser Gruppe, nämlich die Trad I (δ^{18} O: - 4,38‰ und δ^{2} H: -2,97‰), Trad XVIII (δ^{18} O: -4,67‰ und δ^{2} H: -28,3‰) und das Piezometer UFZ3 (δ^{18} O: -4,22‰ und δ^{2} H: -29,2‰), etwas von den anderen durch ihre geringeren ²H-Gehalte (Abb. 136). Wenn man den Abstand von Trad I und UFZ3 (ca. 25 m) betrachtet, kann man einen Wasseraustausch zwischen den beiden Brunnen annehmen, der zu identischer Isotopensignatur führen kann.

Die Isotopensignaturen der Wässer der nur in der Regenzeit beprobten zwei Piezometer und deren von Trad I und Trad II in Verbindung mit denen vom Stausee Tikaré lassen folgende Hypothese zu: unter der Vermutung, dass das Wasser aus dem Stausee direkt die abwärts der Deiche liegenden Brunnen versorgt, könnte man sagen, dass dieses Wasser sich im Verlauf des subterranen Fließens zu diesen Brunnen mit ²H und ¹⁸O anreichert. Das ist möglich, wenn man sich auf die progressive Entfernung der Brunnen (Trad I-UFZ3-Trad II-UFZ4) vom Damm in Richtung Fluss der Oberflächengewässer und die gleiche progressive Anreicherung an schweren Isotopen betrachtet.

Wenn die Brunnenwässer auf derselben Abbildung mit den Oberflächenwässern (in der Regenzeit) getragen sind, weisen sie fast eine parallele Trendlinie zu der GMWL. Ihre Trendlinie bildet folgende Gleichung: y = 7,88 + 7,56 (Abb. 138). Die Auswirkung der Verdunstung ist auf die Oberflächenwässer deutlich stärker zu erkennen.



Abb. 136: Isotopenverhältnisse der Brunnenwässer



Abb. 137: Isotopenverhältnisse der gesamten Wässer (Trockenzeit)



Abb. 138: Isotopenverhältnisse der gesamten Wässer (Regenzeit)

b) Die Grundwässer aus den Bohrungen

Im Untersuchungsgebiet dieser hydro-geochemischen Arbeit konnten nur zwei Bohrungen beprobt werden (BOB2 und BOB3).

Die Analysenergebnisse der Trockenzeit zeigen, dass sich eine der Proben durch eine leichte Isotopensignatur (BOB3: δ^{18} O: -5,96‰ und δ^{2} H: -38,8‰) und die andere durch eine schwere Isotopensignatur (BOB2: δ^{18} O: -3,87% und δ^{2} H: -23,7%) auszeichnen. Die Signatur des Grundwassers aus den beiden Bohrungen deutet im Vergleich zur GMWL an, dass die isotopische Zusammensetzung des Grundwassers weniger von der Verdunstung betroffen ist als es bei den Oberflächen- und Brunnenwässern, deren Oberflächen ständig im Kontakt mit der Atmosphäre stehen, der Fall ist. Daher ist die ²H-¹⁸O-Relation mit y = 7,22 x + 4,26 (Abbn. 139 und 139) auch eher der GMWL ähnlich als vergleichsweise zu den Oberflächenwässern und Brunnenwässern. Das Grundwasser aus BOB2 ist isotopisch ähnlich dem Brunnenwasser, insbesondere dem aus TRAD XIV. Die Probe BOB3 hebt sich völlig von den anderen Proben ab, wie das auch durch seine Ca²⁺-, Mg²⁺- und Na⁺-Werte bestätigt wird. Die leichte Isotopensignatur des Grundwassers in BOB3 könnte aus einer höheren Wasserentnahme in der Bohrung BOB2 gegenüber BOB3 stammen, die durch ein Zumischen isotopisch angereichertes, tieferes und altes Grundwasser bedingt (BOB2). Eine zweite Begründung könnte die höhere topographische Lage der BOB3 sein, die zu einer höheren Neubildung und schließlich zu einem höheren Wasserstand (vorausgesetzt, die beiden Brunnen haben eine Tiefe in der gleichen Größenordnung) führt. In diesem Fall könnte das entnommene Wasser in der BOB3 nur die an leichten Isotopen angereichte Neubildung darstellen. Die dritte Hypothese ist, dass zwei unterschiedliche Grundwasserleiter gefasst werden (einen angereichert an ²H und ¹⁸O entsprechend BOB2, eine isotopisch leichter entsprechend BOB3). Diese Hypothese würde auch durch die Haupt-Ionen (Magnesium, Kalzium und Natrium), wie es im Kapitel "Haupt-Ionen" dargestellt wurde, unterstützt.

Im Vergleich der Wässer der Trockenzeit weisen die der Regenzeit eine Anreicherung in ²H und ¹⁸O bei BOB3 (δ^{18} O: -4,43‰ und δ^{2} H: - 26,9‰) und eine Abreicherung beider Isotopengehalte bei BOB2 (δ^{18} O: -4,29‰ und δ^{2} H: -27,9‰) auf (Abbn. 139 und 141). Beide Wässer nähern sich in der Isotopensignatur an. Für das Grundwasser in BOB3 könnte eine Anreicherung an schweren Isotopen dank des Aufstiegs von isotopisch schweren Wässern und der Zumischung während der Neubildung der Grund sein. Für BOB2 erfolgt die Neubildung des Grundwassers mit isotopisch leichterem Wasser offenbar spontan, da der oberflächliche Abfluss in der Regenzeit direkt neben der Bohrung aktiv ist.

Wenn man nur die Trendlinie der beiden Bohrungen (Gleichung y=-2,94x-39,96) und die Entwicklungsgrafik über die isotopische Anreicherung von δ^{18} O und δ^{2} H (Abb. 139 und 141) betrachtet, könnte man annehmen, dass die beiden Wässer aus den Bohrungen BOB2 und BOB3 von einem Hydratationsbeginn der Silikate betroffen sind.



Abb. 139: Isotopenverhältnisse der Bohrungswässer



Abb. 140: Isotopenverhältnisse der Grundwässer (Trockenzeit)



Abb. 141: Isotopenverhältnisse der Grundwässer in ²H und ¹⁸O im Quervergleich mit dem Stausee von Tikaré (Regenzeit)

4. Schlussfolgerungen und Perspektiven

4.1 Schlussfolgerungen

Durch die vorliegende Arbeit wurden sehr gute hydrologische und hydrogeologische Potentiale für die Trinkwassergewinnung im Arbeitsgebiet gewonnen. In Bezug auf die Charakterisierung der Grundwasserpotentialgebiete konnte klar gezeigt werden, dass ASTER-Satellitenbildern in VNIR (Visible and Near Infra Red) Konfiguration (3 Kanäle und Wellenlängenbereich: 0,52-0,86 µm) in semi-ariden Klimazonen, trotzt einiger Schwächen, einsetzbar sind. Die bereits durchgeführten Bohrungen im Arbeitsgebiet zeigen eine durchschnittliche Förderleistung von 2,8 m³/h, ausreichend für die Trinkwassersorgung ländlicher Regionen, und eine mittlere Erfolgsquote für produktive Bohrungen. Diese Zahlen können verbessert werden, wenn Bohrungen in den hohen Lineationsdichtegebieten oder Grundwasserpotentialgebieten durchgeführt werden würden. Dort befindet sich bisher keine Bohrung.

Durch die qualitative Untersuchung des Stausees von Tikaré konnte festgestellt werden, dass die Standortsauswahl ein entscheidender Faktor für die Qualität der Oberflächenwasserspeicher ist. Die Entscheidung über dessen Bau sollte nach geeigneten hydrogeologischen, hydrologischen und geotechnischen Voruntersuchungen getroffen werden. In Lateritgebieten sollten Standorte ohne oberflächliche Erosionsbereiche, Wasserrückzugs- und Strukturrisse gewählt werden. Dabei sollte die darunterliegende Lateritschicht relativ tief sein und von Tonmaterialen, anstelle von Ton- und Sandmischungen wie in Tikaré, bedeckt sein. Dazu muss die Entnahme von Materialien im Staubett streng verboten werden, damit die Lateritschicht nicht an die Oberfläche kommt. Nur unter diesen Bedingungen können der Bevölkerung Oberflächenwasserspeicher, die ihre sozioökonomische Entwicklung unterstützen, zur Verfügung gestellt werden.

Bezüglich der Grundwasserqualität (einzige Trinkwasserquellen) ist die Lage im Untersuchungsgebiet befriedigend. Es müssen jedoch Maßnahmen unternommen werden, um punktuelle Kontaminationen, hauptsächlich von Nitrat und Chlor, zu vermeiden. Die Hauptquellen anthropogener Verschmutzungen dieser Elemente im Grundwasser sind Dunggruben, Latrinen und häusliche Abwässer. Die Hauptmaßnahmen, die unternommen werden sollten, sind die Zementierung der Innenwände und der unmittelbaren Umgebung der Brunnen, die Festlegung von Schutzgebieten um die Brunnen und Bohrungen herum, und die systematische Entfernung der Quellen von anthropogener Kontaminierung.

Ein Übergang von Metallelementen (Fe und Mn hauptsächlich) ins Grundwasser als Folge von Verwitterung und Erosion wurde im Arbeitsgebiet festgestellt. Aus diesem Grund wird empfohlen, die Metallrohre der Pumpen zu entfernen. Dazu müssen auch die gebauten Innenwände gepflegt werden, da ihre Korrosionen einen Übergang von chemischen Elementen (aus ihren Metallstrukturen) ins Grundwasser ermöglichen können.

Die Mineralisierung der Wässer, insbesondere die der Brunnenwässer, ist allgemein niedrig. Der Grund dafür scheint der Laterit zu sein, wo Fe und vermutlich Mn die anderen mineralischen Stoffe ersetzen. Fe bildet allgemein eine negative Korrelation mit diesen Elementen. Dazu stellt Fe nach Si die zweithöchste Konzentration der Spurenelemente dar, wo es dabei oft Werte über den WHO-Standard für menschlichen Verbrauch (300 μ g/l) zeigt. Die Untersuchung der stabilen Isotope von Sauerstoff (δ^{18} O) und Wasserstoff (δ^{2} H) hat gezeigt, dass die Verdunstung, der bedeutendste Grund für den natürlichen Wasserverlust der oberflächlichen Speicher darstellt. Sie hat auch eine Auswirkung auf fallende Wasserspiegel der Oberflächenwässer, Brunnenwässer und Bohrungswässer. Aus diesem Grund sind die Isotopensignaturen auch in derselben Reihenfolge in den selben Wässern aufsteigend, was aufgrund der unterschiedlichen Fläche und Tiefe logisch ist.

Zusammengefasst sollte ein geeignetes Wasserressourcenmanagement- und Entwicklungsmodell folgende Maßnahmen enthalten (Abb. 142):

- Eine Vorcharakterisierung von Grundwasserpotentialgebiete mittels Satellitenbilder, oberflächlicher Wassernetzdichtekarten und Karten von Gebieten mit starkem Potential von Grundwasserneubildung für die Trinkwasserversorgung der Bevölkerung;
- In Gebieten mit gesättigten Lateriten können Brunnen dank ihrer hohen Neubildungspotentiale errichtet werden. Sie müssen jedoch bis zum ersten Aquitard gebohrt werden, damit genügend Wasser für die Bevölkerung zur Verfügung gestellt werden kann. Dazu müssen die Brunnen und ihre Umgebung geschützt werden (zementierte Wände, Schutzgebiete), um Wasserverschmutzung zu vermindern oder zu verhindern;
- Eine Ausführung von Oberflächenwasserspeicher nach geeigneten wissenschaftlichen Voruntersuchungen, die eine sozioökonomische Entwicklung der Bevölkerung durch Gemüseanbau und andere Aktivitäten erlauben;
- Eine Charakterisierung der Wasserqualität um ihre geeigneten Nutzungen definieren zu können und um Gesundheitsrisiken der Menschen zu verhindern;
- > Eine beaufsichtige Nutzung der Wasserressourcen.

4.2. Perspektiven

Die vorliegende Untersuchung hat eine Grundlage für zukünftige hydrologische und hydrogeologische Forschungsarbeiten, sowohl in der nördlichen Region von Burkina Faso als auch für das gesamte Land geschafft. Im Hinblick auf die Perspektiven für die Zukunft wäre es empfehlenswert:

- 1) Die Neubildungspotentiale der Grundwasserleiter, die Wassernetzdichte, die geomorphologischen Parameter und das Relief in die Charakterisierung der Grundwasserpotentialgebiete zur integrieren;
- 2) Die hydrodynamischen Eigenschaften der Grundwasserleiter zu untersuchen;
- Quantitative hydrologische, hydrogeologische (täglicher Wasserverlust) und hydrodynamische (Tracertests um die Geschwindigkeit des Grundwasserabflusses zu bestimmen) des Stausees von Tikaré auf mindestens zwei Jahre durchzuführen;
- 4) Eine genauere Wasserbilanz der Standorte der Stausseen und andere Oberflächenwasserspeicher zu ermitteln, um die reale Wirkung dieses Parameters zu kennen (da die Verdunstung die bedeutendste natürliche Wasserverlustquelle der oberflächlichen Speicher darstellt);

- 5) Die Durchführung einer breiteren regionalen und zeitlichen Untersuchung der Qualitätsparameter der Wasserressourcen, um ihre genaueren saisonalen und jährlichen Variationen zu bestimmen. Die Parameter, die zu untersuchen sind, sollten auch die mikrobiologischen und organischen Parameter umfassen;
- 6) Eine differentielle und vergleichende Bestimmung der Verweilzeiten der Brunnen- (oberflächliche Grundwasserleiter) und Bohrungswässer (Kluftgrundwasserleiter) durchzuführen.



Abb. 142: Entwicklungsmodell der Wasserressourcen in semi-arid Gebieten von Burkina Faso und in der südlichen Sahel-Zone

Literaturverzeichnis

- ACHYUTHAN, H (1994): Geomorphic evolution and genesis of laterites around the east coat of Madras, Tamil Nadu, India. Geomorphology.
- AIUPPA, A., ALLARD, P., D'ALESSANDRO, W., MICHEL, A., PARELLO, F., TREUIL, M., VALENZA, M. (2000): Mobility and fluxes of major, minor and trace metals during basalt weathering and groundwater transport at Mt. Etna volcano (Sicily). Geochim. Cosmochim. Acta 64, 1827–1841.
- ALLARD, B. (1995): Groundwater in: Trace elements in natural waters. p. 151-172. CRC. Press.
- APPELO, C.A.J. & POSTMA, D. (2005): Geochemistry, Groundwater and Pollution, 2nd Edition. AA Balkema Publishers, Leiden, The Netherlands a member of Taylor & Francis Group.
- ARLEGUI, L.E. & SORIANO, M.A. (1998): Characterizing lineaments from satellite images and field studies in the central Ebro basin (NE Spain), International Journal of Remote Sensing, vol. 19, No. 16, 3169-3185.
- ASADI, S.S., VUPPALA, P. & REDDY, M.A. (2007): Remote Sensing and GIS Techniques for Evaluation of Groundwater Quality in Municipal Corporation of Hyderabad (Zone-V), Int. J. Environ. Res. Public Health 4(1), 45-52.
- ATTEIA, O. (2005): Chimie et Pollution des Eaux Souterraines, Editions TEC & DOC, Lavoisier.
- BABIKER, M., GUDMUNDSSON, A. (2004): The effects of dykes and faults on groundwater flow in an arid land: the Red Sea Hills, Sudan, Journal of Hydrology 297, 256-273.
- BACHMAN, L.J. (1984): Nitrate in the Columbia aquifer, central Delmarva Peninsula, Maryland: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 84–4322, 51 p.
- BANTON, O. & BANGOY, L.M. (1997): Hydrogéologie Multiscience Environnementale des Eaux Souterraines, Presses de l'Université du Québec / AUPELF.
- BOHER, M., ABOUCHAMI, W., MICHARD, A., ALBARÈDE, F. AND ARNDT, N.T. (1992): Crustal growth in West Africa at 2.1 Ga. Journal of Geophysical Research, vol. 97, no B 1, p. 345-369.
- BRIERE, P.R. & SCANLON, K.M. (2000): Lineaments and lithology derived from a Side-Looking Airborne Radar Image of Puerto Rico, USGS, 384.
- CAMPBELL, J.B., (1987): Introduction to Remote Sensing. The Guilford Press, New York.
- CASAS, M.A., CORTÉS, A.L., MAESTRO, A., SORIANO, A.M., RIAGUAS, A., BERNALD, J. (1999): LIN-DENS: A program for lineament length and density analysis, Computers & Geosciences 26, 1011-1022.
- CASTAING, C., BILA, M., MILESI, J.P., THIEBLEMONT, D., LE METOUR, J., EGAL, E., DONZEAU, M., GUERROT, C., COCHERIE, A., CHEVREMONT, P., TEGYEY, M., ITARD, Y., ZIDA, B., OUEDRAOGO, I., KOTE, S., KABORE, B.E., OUEDRAOGO, C., KI, J.C., ZUNINO, C. (2003a): Notice explication de la carte géologique du Burkina à 1/1 000 000,. 3^e édition. BRGM.
- CASTAING, C., LE METOUR, J., BILA, M., DONZEAU, M., CHEVREMONT, P., EGAL, E., ZIDA, B., OUE-DRAOGO, I., KOTE, S., KABORE, B.E., OUEDRAOGO, C., THIEBLEMONT, D., GUERROT, C., CO-

CHERIE, A., TEGYEY, M., MILESI, J.P., ITARD, Y., (2003b): Carte géologique et minière du Burkina Faso à 1/1 000 000. 3^e édition. BRGM.

- CHAMP, D.R., GULENS, J. & JACKSON, R.E. (1979): Oxidation-reduction sequences in groundwater flow systems. *Canadian Journal of Earth Science*, *16*, *12-23*.
- CHAVULA, G.M.S. (2000): The evaluation of the present and potential water resources management for the lake Chilwa basin, BASIS (Broadming Access and Strengthening Input Market Systems).
- CHEN, Y., MILLER, J.R. & FRANCIS, J.A. (2003): Observed and modeled relationships among Arctic climate variables. Journal of Geophysical Research, Vol. 108, NO. D24, 4799, doi:10.1029/2003JD003824.
- CIDA/Geological Survey of Canada (2004): Remote sensing digital image analysis and interpretation strategy for groundwater exploration in semi-arid crystalline terrains: proposal for a case study in NE Brazil, Natal.
- CLAASSEN HC, DOWNEY JS. (1995): A model for deuterium and oxygen 18 isotope changes during evergreen interception of snowfall. Water Resources Research 31: 601–618.
- CLAASSEN HC, HALM DR. (1994): Performance characteristics of a bulk precipitation collector with respect to measurement of water isotopes oxygen-18 and deuterium. US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 94–4008.
- CLARK, I.D., & FRITZ, P. (1997): Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis Publishers, 328 p.
- CORTÉS, A.L., MAESTRO, A., SORIANO, M.A., CASAS, A.M. (1998): Lineaments and fracturing in the Neogene rocks of the the Almazán Basin, northern Spain. Geological Magazine 135 (2), 255-268.
- CRAIG, H., (1961a): Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters, Science, 133, 1833-1934, 1961a.
- CRAIG, H., (1961b): Isotopic variations in meteoric waters. Science 133, 1702-1703.
- CUNNINGHAM, W.L., & CHARLES C. DANIEL, C.C.III (2001): Investigation of groundwater availability and quality in Orange County, Northh Carolina. U.S. GEOLOGICAL SURVEY Water-Resources Investigations Report 00–4286.
- CUSTÓDIO, E. (1989): Groundwater characteristics and problems in volcanic rock terrains. In: Isotopic Techniques in the Study of the Hydrology of Fractures and Fissured Rocks, IAEA, Vienna, pp. 87–137.
- DEGOUTTE, G. (1997): Petits barrages, des recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi. Cemagref Editions.
- DETAY, M., P. POYET, Y. EMSELLEM, A. BERNARDI ET G. AUBRAC (1989): Influence du developpement du réservoir capacitif d'altérites et de son état de saturation sur les caractéristisques hydrodynamiques des forages en zones de socle cristallin. C.R. Acad. Sci., Paris, t. 309, série Ii, p. 429-436.
- DGH/BEWACO. (1999): Inventaire des barrages au Burkina Faso.

- DIRECTION DE LA METEOROLOGIE NATIONALE DU BURKINA FASO (2007): Données pluviométriques du Burkina Faso.
- DIRECTION DE LA METEOROLOGIE NATIONALE DU BURKINA FASO. (2006): Données climatiques du Burkina Faso.
- DREVER, J.I. (1988): The geochemistry of natural waters. 2nd ed. Prentice Hall. Englewood Clifts, NJ.
- EDET, A.E., OKEREKE, C.S., (1996): Assessment of hydrogeological conditions in basement aquifers of the Precambrian Oban massif, southeastern Nigeria, Journal of Applied Geophysics 36, 195-204.
- EFE, S. T. (2002): Urban Warming in Nigerian cities: the case of Warri metropolis. African Journal of Environmental Studies 2(2) 6p.
- EFE, S.I., OGBAN, F.E., HORSFALL, M. JNR., AKPORHONOR, E. E. (2005): Seasonal Variations of Physico-chemical Characteristics in Water Resources Quality in Western Niger Delta Region, Nigeria, J. Appl. Sci. Environ. Mgt., Vol. 9 (1) 191 – 195.
- EGAL, E., DONZEAU, M., CASTAING, C., LE METOUR, J., THIEBLEMONT, D., TEGYEY, M., GUERROT, C., BILLA, M., ITARD, Y., DELPONT, G., KI, J.C., ZUNINO, C., CHEVREMONT, P. (2003a): Notice explicative de la Carte géologique du Burkina Faso à 1/200 000; Feuille de Kaya, 1^{ère} Edition. BRGM.
- EGAL, E., DONZEAU, M., KOTE, S., OUEDRAOGO, I., CASTAING, C., KABORE, E.B., BILLA, M., ZIDA, B. (2003b). Carte géologique du Burkina Faso à 1/200 000; Feuille de Kaya, 1^{ère} Edition. BRGM.
- EGAL, E., THIEBLEMONT, D., LAHONDER, D., GUERROT, C., COSTEA, C.A., ILIESCU, D., DELOR, C., GOUJOU, J.C., LAFON, J.M., TEGYEY, M., DIABY, S., KOLIE, P. (2002): Late Eburnean granititzation and tectonics along the western and northwestern margin of Archean Kénéma-Man domain (Guinea, West African Kraton). Precambrian Res. 117, 57-84.
- ENGALENC, M. (1978): Méthodes d'études et de recherche de l'eau souterraine dans les roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Publ. CIEH Ouagadougou, Vol. 1.
- ENGALENC, M., GRILLOT, J.C. ET LACHAUD, J.C. (1978): Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. Édition Géohydraulique, Volume 1, 190p.
- FATOKI, O.S., LUJIZA, N. and OGUNFOWOKAN, A.O. (2002): Trace metal pollution in Umtata River. Water SA Vol. 28 No. 2.
- FETTER, C.W. (1998): Applied Hydrogeology, 2nd Edition. Merrill Publishing Company.
- FITZPATRICK, E.A. (1984): Micromorphology of soils. Chapman and Hall, London.
- FOUCAULT, A. & RAOUL, J.F. (2000): Dictionnaire de géologie. 5^e Edition. Dunod. Paris.
- FRITZ, P. and FONTES, J. C. (1980) Handbook of environmental isotope geochemistry. Vols 1. Elsevier, New York.
- GRAHAM, M. J., THOMAS, J. A., & METTING, F. B. (1996): Groundwater, in Water Resources Handbook, L.W. Mays, ed., McGraw-Hill, New York.

- GROEN, J., SCHUCHMANN, J.B. & GEIRNAERT, W. (1988): The occurrence of high nitrate concentration in groundwater in villages in northwestern Burkina Faso. Journal of African Earth Sciences, 7, 999-1009.
- HARTER, T. (2003): Groundwater Quality and Groundwater Pollution. University of California, Division of Agriculture and Natural Resources. ANR Publication 8084.
- HIRDES, W., DAVIS, D.W., EISENLOHR, B.N. (1992): Reassessment of Proterozoic granitoide ages in Ghana on the basis of U/Pb zircon and monazite dating. Precambrian Res., 56, 89-96.
- HIRDES, W., DAVIS, D.W., LUDTKE G., KONAN, G. (2002): Two generations of Birimian (Paeloproterozoic) volcanic belts in northeastern Côte d'Ivoire (West Africa): consequences of the "Birimian controversy". Precambrian Res., 80, 173-191.
- HÖLTING, B. (1996): Hydrogeologie Eine Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie. 5. Aufl. Enke, Stuttgart. 441 S.
- http://de.wikipedia.org/wiki/Dolomit_(Gestein)
- http://de.wikipedia.org/wiki/Kalkstein)
- http://www.eauburkina.bf
- http://www.geo.unizh.ch/bodenkunde//kapitel/tropen.html {FAO}]
- http://www.ifen.fr/donnees-essentielles/sol/le-sol/la-pollution-diffuse-des-sols-par-les-elements-traces.html
- JALALI, M. (2005): Major ion chemistry of groundwaters in the Bahar area, Hamadan, western Iran. Environ Geol 47: 763-772, Springer-Verlag 2005.
- JOHNSTON, C.D. (1987): Distribution of environmental chloride in relation to subsurface hydrology. J. Hydrology 94: 67-88.
- KARNKOWSKI, P.H., AND OZIMKOWSKI, W. (1999): Multi-coverage geological interpretation of satellite images: a case study from selected areas of Poland, JAG Volume 1 – Issue 2.
- KOCH M., MATHER, P.M. (1997): Lineament mapping for groundwater resource assessment: a comparison of digital Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery and stereoscopic Large Format Camera (LFC) photographs in Red Sea Hills, Sudan, International Journal of Remote Sensing Vol. 18, No. 7, 1465-1482.
- KOIKE, K., NAGANO, S., KAWABA, K. (1998): Construction and analysis of interpreted fracture planes through combination of satellite-image derived lineaments and digital elevation model data, Computers & Geosciences Vol. 24, No. 6, pp. 573-583.
- KÖLLE, W. (2001): Wasseranalysen richtig beurteilt. Wiley-VCH Verlag GmbH.
- KOUAMELAN, PEUCAT, J.J., A.N., DELOR, C. (1997): Reliques archéennes (3,15 Ga) au sein du magmatisme birrimien (2,1 Ga) de Côte d'Ivoire, Kraton Ouest-Africain. C.R. Acad. Sci. Paris, 324, IIa, 719-727.
- LALURAJ, C.M., GOPINATH, G., DINESHKUMAR, P.K. (2005). Groundwater chemistry of shallow aquifers in the coastal zones of Cochin, India. Applied Ecology and Environmental Research 3(1): 133-139.

LANGMUIR, D. (1997): Aqueous environmental chemistry. Prentice-Hall, Inc, New Jersey.

- LAUTRIN, D. (2002): Vieillissement et réhabilitation des petits barrages en terre. Cemagref Editions.
- LEECH, D.P., TRELOAR, P.J., LUCAS, N.S., AND GROCOTT, J. (2003). Landsat TM analysis of fracture patterns: a case study from the Coastal Cordillera of northern Chile. International Journal of Remote Sensing, Vol. 24, No. 19, 3709-3726. DOI: 10.1080/0143116031000102520.
- MACDONALD, A.M., BALL, D.F., & DOCHARTAIGH, B.É.Ó. (2004): A GIS of aquifer productivity in Scotland: Explanatory notes, British Geological Survey.
- MADISON, R.J. & BRUNETT, J.O. (1984): Overview of the occurrences of nitrate in groundwater of the United States. US Geological Survey National Water Summary 1984. US Geological Survey, Denver, CO, pp. 93-105.
- MAGOWE, M. & CARR, J.R. (1999): Relationship between lineaments and groundwater occurrence in western Bostwana, Groudwater.
- MAHRH/DGIRH/DEIE/SIE (2003): Carte de distribution des barrages au Burkina Faso.
- MARTEN, L., POLLARD, D.D. & MAERTEN, F. (2001): Digital mapping of three-dimentional structures of the Chimney Rock fault system, central Utah, Journal of Structural Geology 23, 585-592.
- MASON, B. & MOORE, C.B. (1985): Grundzüge der Geochemie. Ferdinand Enke Publishers, Stuttgart.
- MATHER, P.M. (2004): Computer Processing of Remotely-Sensed Images An Introduction. 3rd. Chichester, John Wiley & Sons, 324 pp. England.
- MATHESS, G. (1982): The properties of groundwater. Wiley, New York.
- MAZOR, E. (1997): Stable hydrogen and oxygen isotopes. p. 168–195. *In* Chemical and isotopic groundwater hydrology: The applied approach. 2nd ed. Marcel Dekker, New York.
- Mazor, E., 1991, Applied chemical and isotopic groundwater hydrology: Open University Press, Buckingham, 275 pp.
- MEYBECK, M. (1987): Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. Am J Sci 287:401-428.
- MICHARD, G. (1967): Signification du potentiel d'oxydo-réduction dans les eaux naturelles. Mineralium Deposita 2, 34-37.
- MILESI, J.P., FEYBESSE, J.L., LEDRU, P., DOMMANGET, A., OUEDRAOGO, M.F., MARCOUX, E., PROST, A., VINCHON, C., SYLVAIN, J.P., JOHAN, V., TEGYEY, M., CALVEZ, J.Y., LAGNY, P. (1989): Les minéralisations aurifères de l'Afrique de l'Ouest. Leur evolution lithostructurale au Protérozoique inférieur. Notice et Carte à 1/2000000. Chronique de la Recherche Minière, Fr., n° 497, 3-98.
- NAKOLENDOUSSE, S., SAVADOGO, A. N. & ROULEAU, A. (1993): Les facteurs de productivité des aquifères du socle cristallin du Burkina Faso : l'exemple de Pobé-Mengao. NI J.-M.M. Dubois. F. Cavayas et P. Lafrance (réd.). Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique.

159

- NIKIEMA, J. (2002): Caractérisation des forages à haut rendement en zones de socle cristallin du Burkina Faso. Mémoire DEA. Université Cheick Anta Diop de Dakar, Sénégal.
- NOVAK, I.D., SOULAKELLIS, N. (2000): Identifying geomorphic features using LANDSAT-5/TM data processing techniques on Lesvos, Greece. Geomorphology 34.101–109, Elsevier
- NRIAGU, J.O. & PACYNA, J.M. (1998): Quantitative Assessment of Worldwide Contamination, Water and Soils by trace Metals, Nature, 333: 134-139.
- O'LEARY, D.W., FRIEDMAN, J.D., & POHN, H.A. (1976): Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old term. Geological Society of America Bulletin, 87, 1463-1469.
- OBERTHÜR, T., VETTER, U., DAVIS, W.D., AMANOR, J.A. (1998): Age constraints on gold mineralisation and Paleoproterozoic crustal evolution in the Ashanti belt of southern Ghana. Precambrian Res., 89, 129-143.
- OKEREKE, C.S., ESU, E.O., AND EDET, A.E. (1998): Determination of potential groundwater sites using geological and geophysical techniques in the Cross River State, southeastern Nigeria, Journal of Africa Earth Sciences, Vol. 27, No. 1, pp. 149-163.
- OTTO, M. (2000): Analytische Chemie. Wiley-VCH Verlag GmbH.
- PERON, Y.; ZALACAIN, V. (1975): Atlas de la Haute-Volta. Les Atlas Jeune Afrique. Editions Jeune Afrique, Paris.
- RAMESH, R., SHIV KUMAR, K., ESWARAMOORTHI, S., PURVAJA, G.R. (1995): Migration and contamination of major and trace elements in groundwater of Madras City. India; Environmental Geology 25: 126-136. Springer-Verlag.
- REDDY, M.M, SCHUSTER, P., KENDALL, C. & REDDY, M.B. (2006): Characterization of surface and ground water d¹⁸O seasonal variation and its use for estimating groundwater residence times:, HYDROL. Process. 20, 1753–1772. In Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/hyp.5953.
- ROSEN, M., JONES, S. (1998): Controls on the chemical composition of groundwater from alluvial aquifers in the Wanaka and Wakatipu basins, Central Otago, New Zealand. Hydrogeology Journal (1998) 6:264–281.
- ROSENTHAL (AVE) (1994): Saline groundwater in Israel: its bearing on the water crisis in the country. J. Hydrol. 156: 389-430.
- ROSSKAMP, E. (1991): "Vorkommen, Bedeutung und Nachweis von Chrom", in: AURAND et al. (1991).
- SABINS JR, F.F. (1987): Remote Sensing. Principles and Interpretation. 2nd Edi. W. H. Freeman and Co, New York, 449 pp.
- SALBU, B. & STEINNES, E. (1995): Trace elements in natural waters. CRC Press, Inc.
- SANDER, P., MINOR, T.B., CHESLEY, M.M. (1997): Groundwater exploration based on lineament analysis and reproducibility tests, Groundwater.

- SAVADOGO, A.N. (1984): Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta. Etude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse d'état (351 p.). Université Scientifique et Médicale de Grenoble (France).
- SAVADOGO, A.N., ROULEAU, A., LEMIEUX, G. DU BERGER, R. PERRON, S. (1991): Productivité des aquifères du socle cristallin du Burkina Faso. CERM, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, QC, CA. Cahiers du CERM, Université du Québec à Chicoutimi.
- SAVADOGO, N. A. et al. (1996): Etude des facteurs de productivité des aquifères du socle cristallin du Burkina Faso, phase II. Centre d'Etude sur les Ressources Minérales et Laboratoire d'hydrogéologie Université de Ouagadougou.
- SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, P. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde, 14. Auflage. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart
- SCHOELLER, H. (1956): Géochimie des eaux souterraines. Application aux eaux de gisements de pétrole. Soc Ed Technip, Paris.
- SCHOELLER. H. J. 1977. Geochemistry of ground water. Supplement No.3 to ground studies. U-NESCO Tech. Papers Hydrol. 7. UNESCO, Paris.
- SCHWEDT, G., SCHNEPEL, F. M. (1981): Analytisch-chemisches Umweltpraktikum, Thieme Stuttgart
- SHAHID, S. & NATH S.K. (2002): GIS Integration of Remote Sensing and Electrical Sounding Data for Hydrogeological Exploration, Journal of Spatial Hydrology, Vol.2 No.1.
- SIKDAR, P.K., CHAKRABOTY S., ADHYA, E. & PAUIL, P.K. (2004): LandUse/Land Cover Changes and Groundwater Potential Zoning in and around Raniganj coal mining area, West Bengal- A GIS and Remote sensing Approach, Journal of Spatial Hydrology, Vol.4, No.2 Fall.
- SKLASH, M.G., FARVOLDEN, R.N., & FRITZ, P. (1976): A conceptual model of watershed response to rainfall, developed through the use of oxygen-18 as a natural tracer, Can. J. Earth Sci., 13, 271-283.
- SMEDLEY, P.L., KNUDSEN, J., MAIGA, D. (2007): Arsenic in groundwater from mineralised Proterozoic basement rocks of Burkina Faso. Applied Geochemistry 22: 1074–1092.
- STUMM, W. & MORGAN, J.J. (1996): Aquatic Chemistry 3rd ed. John Wiley & Sons, New York.
- TODD, D.K. &, MAYS, L.W. (2005): Groundwater Hydrology, Third Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- TRIBOULET, C., & FEYBESSE, J.L. (1998): Les métabasites birimiennes et archéennes de la région de Toulepleu-Ity (Côte d'Ivoire): des roches portées à 8 kbar (24 km) et 14kbar (42 km) au Paléoprotérozoique. C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des Planètes, 327, 61-66.
- US GEOLOGICAL SURVEY (1999): The quality of our Nation's waters—Nutrients and pesticides: U.S. Geological, Survey Circular 1225, 82 p.
- VASSILAS, N., PERANTONIS, S., CHAROU, E., TSENOGLOU, T., STEFOULI, M. & VAROUFAKIS, S. (2002): Delineation of lineaments form satellite data based on efficient neural network and pattern recognition techniques, 2nd Hellenic Conf. on Al, SETN, Thessaloniki, Greece, Proceedings, Companion Volume, pp. 355-36

- WARD, N.I. (1995): Trace elements in: Fifield. F.W. & Haines. P.J. (eds). *Environmental Analytical Chemistry*. Blackie Academic and Professional. Chapman and Hall.
- WHITE, D.E., HEM, J.D., & WARING, G.A. (1963): Chemical composition of subsurface water. In: *Data of Geochemistry* (Ch. F.). U.S.G.S. Prof. Pap. 440 F, 6th ed.
- WHO (1984): Guidelines fro Drinking Water Standards. Geneva.
- WON-IN, K. & CHARUSIRI, P. (2003): Enhancement of thematic mapper satellite images for geological mapping of the Cho Dien area, Northern Vietnam, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 4, 183-193.
- YOUNGER, P.L. (2007): Groundwater in the environment, An Introduction. Blackwell Publishing Ltd.
- ZAKIR, F.A., QARI, M.H.T., & MOSTAFA, M.E. (1999): A new optimizing technique for preparing lineament density maps, International Journal of Remote Sensing, Vol. 20, No. 6, 1073-1085.

ANHANG

- Anhang A: Tabellen der Bohrungen (mit Koordinaten) im Arbeitsgebiet
- Anhang B: Tabellen der Lineationen (mit Streichen und Längen)
- Anhang C: Protokoll für Wasserprobenahme
- Anhang D1: Tabellen der Spurenelemente (Trockenzeit)
- Anhang D2: Tabellen der Spurenelemente (Regenzeit)
- Anhang E: Tabellen der Wasserstoff- und Sauerstoffverhältnisse
- Anhang F: Messverfahren der Topographie der Staumauer
| Provinz | Dept. | Dorf | Länge
(W) | Breite
(N) | BJ | Tiefe
(m) | W-
Sch
(m) | Ø
(mm) | SN
(m) | Förd.
(m ³ /St.) | Pumpe |
|----------|-----------|--------------------------|-----------------|---------------|------|--------------|------------------|-----------|-----------|--------------------------------|-------------------|
| Yatenga | Rambo | Sougouma | 01/53/03 | 13/11/12 | 1985 | 32 | 24 | 112 | 23,10 | 1,27 | Vergnet
4A |
| Yatenga | Kossouka | Longué-Yarcé | 01/52/30 | 13/24/14 | 1984 | 36 | Unb | 112 | 18.00 | 2.30 | Vergnet
4A |
| Yatenga | Kossouka | Kossouka | 01/54/14 | 13/22/52 | 1984 | 37 | 5 | 112 | 26.00 | 2,20 | Vergnet
4A |
| Bam | Guibaré | Guibaré | 01/36/06 | 13/05/26 | 1986 | 39 | 17 | 125 | 15.30 | 1.50 | India
Mark II |
| Bam | Creihaní | View (Vilee) | 01/22/42 | 12/01/02 | 1096 | 42 | 12 | 105 | 17.00 | 2 (0 | India
Maria II |
| Yatenga | Kassauka | Toèguin- | 01/32/43 | 13/01/02 | 1986 | 43 | 27 | 125 | 17,00 | 3,60 | Vergnet |
| Yatenga | Rambo | Bouga-Mossi | 01/52/00 | 13/14/20 | 1987 | 45 | 32 | 112 | 9.60 | 1,10 | Vergnet
4A |
| Yatenga | Kalaalaa | Gombré- | 01/52/57 | 12/08/00 | 1005 | 47 | 21 | 112 | 17.05 | 0.50 | Vergnet |
| Bam | Kalsaka | Silmi-Mossi | 01/53/57 | 13/08/00 | 1985 | 4/ | 31 | 112 | 17,95 | 0,50 | 4A
Vergnet |
| Bam | Tikaré | Tikaré
Rissiam | 01/42/51 | 13/17/24 | 1976 | 49 | 7 | 112 | Unb | 2,00 | 4C
SBF- |
| | Kongoussi | (Tangzougou) | 01/34/50 | 13/18/48 | 1985 | 50 | 36 | 112 | 27,22 | 13,50 | Kardia
Vergnet |
| Yatenga | Rambo | Bouli | 01/48/45 | 13/11/07 | 1985 | 50 | 38 | 112 | 26,00 | 1,60 | 4A
India |
| Bam | Guibaré | Guibaré | 01/36/10 | 13/05/45 | 1986 | 51 | 18 | 125 | 7,00 | 0,75 | Mark II |
| Y atenga | Rambo | Koumna-
Yargo | 01/51/20 | 13/10/07 | 1985 | 52 | 29 | 112 | 6,00 | 0,80 | 4A |
| Yatenga | Rambo | Rambo | 01/48/30 | 13/14/05 | 1984 | 52 | 42 | 112 | 12,00 | 4,80 | Vergnet
4A |
| Yatenga | Kossouka | Magarourou | 01/52/01 | 13/23/32 | 1987 | 52 | 45 | 112 | 11,30 | 3,00 | Vergnet
4A |
| Yatenga | Rambo | Dierko | 01/47/49 | 13/10/03 | 1985 | 52 | 46 | 112 | 31,60 | 0,90 | Vergnet
4A |
| Bam | Rouko | Raka | 01/37/46 | 13/10/18 | 1986 | 55 | 20 | 112 | 32,88 | 3,08 | ABI |
| Bam | Guibaré | Guibaré | 01/36/13 | 13/06/20 | 1985 | 55 | 30 | 112 | 20,80 | 16,20 | SBF-
Kardia |
| Yatenga | Kossouka | Sassaka-Mossi | 01/51/59 | 13/21/44 | 1987 | 56 | 38 | 112 | 14,60 | 1,10 | Vergnet
4A |
| Yatenga | Rambo | Tobkio | 01/44/53 | 13/13/47 | 1987 | 56 | 47 | 112 | 12,10 | 2,00 | Vergnet
4A |
| Bam | Guibaré | Koundoula | <i>01/41/19</i> | 13/05/54 | 1985 | 57 | 14 | 112 | 11,20 | 12,00 | ABI |
| Bam | Tikaré | Tikaré | 01/42/43 | 13/17/17 | 1986 | 57 | 26 | 125 | 11,60 | 3,50 | India
Mark II |
| Bam | Kongoussi | (Tangzougou) | 01/33/44 | 13/17/43 | 1985 | 58 | 31 | 112 | 23,92 | 4,50 | SBF-
Kardia |
| Yatenga | Rambo | Rambo | 01/48/15 | 13/15/37 | 1984 | 58 | 46 | 112 | 8,00 | 1,10 | Vergnet
4A |
| Bam | Rollo | Tanlili | 01/44/14 | 13/35/53 | 1985 | 60 | 30 | 112 | 30,51 | 2,80 | SBF-
Kardia |
| Yatenga | Rambo | Pourra | 01/48/00 | 13/08/00 | 1987 | 60 | 36 | 110 | 3,03 | 1,40 | ABI |
| Bam | Tikaré | Maègtaba-
Mossi | 01/48/56 | 13/21/31 | 1985 | 61 | 28 | 112 | 30.03 | 1.08 | SBF-
Kardia |
| Bam | Guibaré | Ylou(Yilou) | 01/32/00 | 13/01/00 | 1985 | 61 | 31 | 110 | 12,05 | 1,20 | ABI |
| Bam | Tikaré | Yoba | 01/48/40 | 13/25/10 | 1987 | 61 | 33 | 125 | 24,80 | 0,90 | ABI |
| Bam | Guibaré | Ylou(Yilou) | 01/32/43 | 13/01/09 | 1987 | 61 | 47 | 145 | 32,50 | 1,30 | India
Mark II |
| Bam | Rouko | Rouko-mossi | 01/37/53 | 13/12/51 | 1985 | 63 | 17 | 127 | 15,40 | 2,25 | ABI |
| Bam | Kongoussi | Loga(Loaga) | 01/39/20 | 13/19/27 | 1986 | 63 | 56 | 125 | 16,90 | 0,95 | India
Mark II |
| Yatenga | Rambo | Rambo | 01/45/32 | 13/13/47 | 1985 | 64 | 46 | 112 | 27,00 | 1,00 | Vergnet
4A |
| Y atenga | Rambo | Koungo | 01/46/07 | 13/12/35 | 1984 | 64 | 47 | 112 | 15,00 | 2,10 | vergnet
4A |
| Yatenga | Kossouka | Kapélogo-
Tangaye | 01/53/31 | 13/23/52 | 1985 | 65 | 18 | 112 | 38,00 | 4,00 | Vergnet
4A |
| Bam | Tikaré | Vato | 01/49/46 | 13/27/29 | 1985 | 65 | 26 | 112 | 13,77 | 1,30 | SBF-
Kardia |
| Yatenga | Rambo | Sougouma | 01/53/02 | 13/12/43 | 1985 | 65 | 41 | 112 | 30,20 | 1,00 | Vergnet
4A |

Anhang A: Tabellen der produktiven Bohrungen (mit Koordinaten) im Arbeitsgebiet

Bam Rouko Rouko-mossi 01/37/53 13/12/51 1993 66 23 110 37,00 6,70	Vergnet
	Vergnet
Yatenga Rambo Bouga-Mossi 01/52/00 13/14/20 1987 66 44 112 7,80 1,20	4A
BAM Guibaré Vousnango 01/38/09 13/09/52 1985 66 48 112 11,07 2,50	SBF- Kardia
Bam Guibaré Vousnango 01/38/09 13/09/52 1985 66 48 112 11,07 2,50	SBF- Kardia
Bam Maegtaba- Tikaré 01/49/12 13/21/02 1986 67 30 125 29,55 0,60 Tikaré Mossi 01/49/12 13/21/02 1986 67 30 125 29,55 0,60	India Mark II
Bam Rouko Pittenga 01/40/50 13/12/05 1987 67 45 125 27,00 6,00	ABI
Bam Guibaré Niangouéla 01/40/06 13/08/37 1985 68 27 112 22,95 0,72	SBF- Kardia
Guibaré Niangouéla 01/40/06 13/08/37 1985 68 27 112 22,95 0,72	Kardia
Bam Tikaré Tikaré 01/43/38 13/17/24 1988 70 21 110 -1,00 1,30	
Bam Tikaré Tikaré 01/42/12 13/17/00 1985 70 28 135 17,50 3,60	India Mark II
Yatenga Rambo Rambo 01/47/59 13/13/58 1985 70 55 112 28,10 1,00	Vergnet 4A
Bam Tikaré Zano 01/41/28 13/20/42 1985 71 48 112 33.42 3.80	SBF- Kardia
Bam Rouko Silmidougou 01/37/53 13/15/33 1985 75 57 112 10.93 1.80	SBF- Kardia
Yatenga Rambo Dembrédiéssé 01/47/37 13/13/25 1984 76 46 115 7.88 1.40	Vergnet 4A
Bam Guibaré Watinoma 01/37/53 13/09/36 1985 77 29 112 8.43 1.90	SBF- Kardia
Bam Guibaré Watinoma 01/37/53 13/09/36 1985 77 29 112 8.43 1.90	SBF- Kardia
Bam	SBF-
Guibaré Sindri 01/36/13 13/04/43 1985 78 19 112 33,80 1,20	Kardia Vergnet
Yatenga Rambo Tangaye 01/48/30 13/11/30 1987 78 46 112 29,30 1,40	4A SBF-
Bam Guibaré Guibaré 01/36/07 13/05/48 1985 78 48 112 22,73 9,20	Kardia Vergnet
Yatenga Rambo Irim 01/47/00 13/15/14 1987 78 52 112 15,40 1,60	4A
Bam Rouko Silmidougou 01/37/59 13/15/20 1993 78 63 110 10,40 0,90	
Bam Rouko Yamanyé 01/43/51 13/11/07 1985 79 30 112 24,00 1,25	SBF- Kardia
Yatenga Rambo Lenga 01/46/30 13/16/30 1985 80 47 112 33.00 0.50	Vergnet 4A
Bam Rouko Pittenga 01/40/06 13/12/18 1985 82 20 112 10.00 5.00	ABI
Bam Tikaré Kouliniéré 01/41/52 13/14/19 1993 82 59 110 31,90 4,50	
Bam Tikaré Horé 01/39/32 13/17/11 1985 84 55 112 18,70 1,40	SBF- Kardia
Bam Tikaré Sarkounga 01/47/17 13/19/01 1993 84 59 110 30,00 1,60	
Yatenga Rambo Dierko 01/47/45 13/10/28 1985 85 52 112 25,00 0,60	Vergnet 4A
Bam Kongoussi Loulouka 01/40/35 13/24/05 1987 85 60 125 32,50 1,70	ABI
Yatenga Rambo Irim 01/46/15 13/15/00 1987 90 52 112 11.30 0.50	Vergnet 4A
Bam Bouko Bouko-mossi 01/37/20 13/12/05 1987 97 54 125 126 160	ABI
Bam Tikaré Baribci 01/42/51 13/20/10 1993 99 71 110 26.45 3.10	
Bam Guibaré Niangouéla 01/39/59 13/08/14 1985 100 40 0 15.05 0.67	
Bam Guibaré Niangouéla 01/39/59 13/08/14 1985 100 40 0 15.05 0.67	1
Bam Tikaré Tikaré 01/43/40 13/06/40 1987 100 48 125 6.50 0.77	ABI
Bam Tikaré 11/42/51 13/17/17 1985 102 73 112 19.08 1.00	SBF- Kardia
Hart $01/42/31$ $13/1/17$ 1703 102 73 112 $19,08$ $1,00$ Bam Tikaré Kilou $01/40/19$ $13/10/08$ 1003 103 17 110 24.80 0.66	ixaruta
Bam Rouko Rouko-mossi 01/38/05 13/12/59 1999 122 79 110 12.84 2.06	India Mark II

BamRoukoRouko-mossi01/38/0513/12/59199912279110N.B.: Fett und kursiv markierte Bohrungen haben eine Förderleistung ≥ 5 m³/Stunde

W-Sch: Verwitterungsschichte Ø: Innendurchmesser SN: Statisches Niveau Förd. : Förderleistung BJ: Baujahr

iii

Objekt ID	Streichen (°)	Länge (m)	Objekt ID	Streichen (°)	Länge (m)	Objekt ID	Streichen (°)	Länge (m)
2	123,61	4637,54	61	30,89	2657,24	120	179,80	3002,17
3	115.75	2836.57	62	96.88	1163.48	121	62.89	1458.81
4	38.42	2478.90	63	46.97	1021.58	122	139.49	2750.54
5	43.98	884.14	64	132.04	1501.77	123	120.74	6704.84
6	115.00	1822.71	65	145.90	1154.45	124	120.58	3087.68
7	143.22	2703.47	66	37.90	2107.40	125	163.91	2288.10
8	52.46	2491.56	67	44.62	1063.24	126	146.18	2185.88
9	27.71	1752.49	68	40.32	1554.24	127	17.49	2867.67
10	134.76	1854.83	69	16.49	1578.51	128	92.90	2064.23
11	61.34	2048.03	70	20.29	1751.71	129	132.47	2226.42
12	41.15	1882.73	71	130.96	1199.98	130	0.39	2563.43
13	145.38	2278.83	72	147.30	2082.69	131	157.44	1947.76
14	143.66	1676.63	73	116.30	2039.48	132	153.23	2199.50
15	47.86	2212.75	74	94.15	6154.16	133	42.55	1439.09
16	124 67	1805.13	75	119.88	1689.21	134	48.12	3019.29
17	46.66	1902.97	76	114,74	2184.59	135	129.05	1600.01
18	45.71	1918.10	77	42.75	1683.41	136	156.21	2003.66
19	23.68	2778.99	78	147.74	2718.70	137	118.83	2955.67
20	147.95	1514.48	79	5.51	5393.45	138	123.42	2019.61
21	140.99	3103.01	80	127.55	1926.09	139	0.61	3258.71
2.2	92.81	2279.81	81	117.50	5002.37	140	125.86	3744.46
23	179.92	3301.92	82	149.10	4455.57	141	62.48	1861.66
24	32.21	1581.20	83	44.31	4933.82	142	117.16	1484.54
2.5	31.20	3636.43	84	121.61	1585.67	143	138.72	3041.70
26	125.27	2734.91	85	41.63	1250.89	144	33.64	4047.49
27	13.22	1980.33	86	135.24	2469.77	145	144.12	2433.48
28	175.09	2833.64	87	177.21	1279.25	146	14 19	2225 73
29	152.06	2360.98	88	37.03	4012.01	147	134 50	3007.87
30	99.86	1758 53	89	41 42	2119.63	148	79.64	2344.84
31	145.64	2986.24	90	101.76	2344.97	149	177.83	2295.86
32	138.45	4082.04	91	125.64	2799.20	150	139.09	1969.25
33	128,38	1679.79	92	137.47	2213.05	151	173.59	2109.00
34	126,74	8348.81	93	130.63	2696.30	152	104.14	2469.15
35	51.75	1140.17	94	6.94	1977.83	153	116.27	2045.75
36	160.60	5550.76	95	177.82	8341.03	154	147.68	1985.90
37	83.36	3304.19	96	71.80	3654.01	155	97.29	1353.59
38	160.82	1539.20	97	1.87	7236.89	156	144.54	2605.25
39	63.31	4140.60	98	12.39	2276.03	157	131.79	1183.08
40	6 64	1548.44	99	45.48	2238.42	158	56.68	1335.85
41	135.73	1765.57	100	130.25	2218.60	159	30.15	2793.82
42	174.21	1461.23	101	115.02	1891.49	160	176.09	2519.42
43	37.70	2170.83	102	65.43	1209.39	161	155.85	3906.86
44	142.08	2398.22	103	67.31	2900.02	162	137.56	1850.97
45	112.94	2043.66	104	153.78	2327.53	163	121.31	3270.99
46	68.48	1519.98	105	112.76	2201.95	164	128.51	3529.05
47	170.78	3081.11	106	14.26	2576.93	165	155.28	3747.51
48	108.80	1515.69	107	40.82	2923.93	166	86.08	4597.20
49	124.22	2107.32	108	121.61	2589.66	167	117.71	3783,31
50	38.03	986.02	109	1.17	2177.42	168	33.10	2663.26
51	146.58	1193.10	110	137.61	2419.17	169	53.78	3642.52
52	145.93	2079.66	111	3.41	2965.86	170	81.70	3198,17
53	43,17	2648.83	112	172,84	1915,97	171	119.04	6170.04
54	118.49	2651.17	113	32.79	3126.41	172	88.81	4419,54
55	139.96	2445.39	114	136.83	2763.31	173	52.30	4409.88
56	119.63	1248,69	115	150,45	6351,12	174	90.00	4338.25
57	149.86	1427.81	116	156.85	1717.30	175	151.99	4471,93
58	144.15	1683.12	117	143.36	2071.40	176	90.21	2324,08
59	84,71	3053.55	118	47,73	1235,44	177	142.92	8722.27
60	148,28	1685,68	119	159,16	2661,51	178	7,86	6188,50

Anhang B: Tabellen der Lineatione (mit Streichen und Längen)

Objekt ID	Streichen	Länge (m)	Objekt ID	Streichen	Länge (m)	Objekt ID	Streichen	Länge (m)
179	63.05	2278.93	240	144 74	4021.12	301	156.24	2122.13
180	152.83	2563.88	241	156.83	2631.22	302	157,19	3458.25
181	90.00	3839.01	242	13.44	2016.57	303	117.06	2181.04
182	87.94	1679.57	243	53.06	1867.67	304	63.23	1288.75
183	48.06	4223.97	244	49.83	2381.59	305	175.38	2096.85
184	90.80	4345.93	2.45	154.11	7193.51	306	14.28	4455.17
185	142.58	5169.99	246	66.51	2871.98	307	24.42	2144.69
186	1.23	4829.99	2.47	29.15	3720.34	308	98.84	1626.04
187	146.02	3788.74	248	62.45	2544.14	309	70.54	1282.03
188	28.64	2657.87	249	90.74	1678.21	310	41.50	1537.51
189	120.43	5200.88	2.50	106.22	2224.21	311	23.06	1727.87
190	155.85	1240.41	251	2.53	2067.92	312	130.25	1738.73
191	119.35	2229.88	252	156.04	1476.27	313	79.47	1042.43
192	166.41	1702.59	253	179,79	2903.62	314	119.45	1403.22
193	10.51	3702.14	254	125,70	2110.66	315	37.88	4052.76
194	1,40	1600,73	255	165,11	6218,85	316	53,62	1395,45
195	31.76	963.98	256	52.02	899.75	317	175.14	4176.36
196	159,44	933.73	257	9.31	2941.26	318	173.31	1408.95
197	24,74	4988.35	258	150.38	1044.81	319	30.92	1585.25
198	158,15	4884,35	259	42,47	2481,10	320	61,98	922,85
199	46,01	1357,61	260	133,33	1359,88	321	27,01	2559,44
200	149.20	6866.47	261	134.20	3393.99	322	35.07	1509.14
201	2.82	1371.23	262	160.25	1288.93	323	124.38	1058.72
202	18.58	1373.85	263	155,19	1363.92	324	146.72	1029.51
203	152.77	4057.71	264	30.86	1188.56	325	72,44	1088.74
204	95.69	3504.42	265	135.45	1891.11	326	28.86	1320.24
205	164.43	4807.56	266	48.66	894.84	327	46.71	1398.91
206	94.24	2086.62	267	131.35	1243.06	328	165.05	1298.77
207	125.95	2475.40	268	3.64	4572.23	329	27.60	1304.70
208	52.37	1821.24	269	5.13	974.41	330	179.52	3517.89
209	56.97	1460.89	270	114.22	2573.82	331	23.72	1863.41
210	124.43	1761.36	271	128.32	1133.86	332	141.57	1299.97
211	81.55	1879.80	272	50.00	2770.03	333	170.87	2626.36
212	118.23	1131.82	273	11.07	2009,49	334	109.34	4269.95
213	68.78	1349,70	274	67.22	2989.01	335	168.76	1340.94
214	152,54	2119,27	275	31,73	3145,82	336	48,33	1093,58
215	138,58	1669,01	276	127,82	4727,40	337	172,66	1087,22
216	150,15	3054,42	277	157.86	1755.31	338	26.40	1267.70
217	136.10	1235.35	278	157.18	2451.63	339	35.07	1407.40
218	110.37	6022.27	279	15.02	2924.61	340	17.48	1087.71
219	133,79	1791,85	280	19,75	5067,49	341	39,14	2265,75
220	146.02	1113.71	281	126,13	3856.30	342	45.67	1215,02
221	90.72	1599.62	282	46.99	1959,59	343	120.30	3130,74
222	93,34	804,46	283	14,86	3492,66	344	32,26	1685,22
223	115,45	2876,74	284	129,87	1633,68	345	57,05	3051,75
224	4,74	2977,18	285	107,03	2305,72	346	4,18	1661,97
225	32,72	2765,08	286	106,84	2188,23	347	100,80	2682,45
226	58,14	1686,25	287	34,56	4062,15	348	173,90	5207,77
227	148,68	1300,42	288	147,00	1593,73	349	44,12	3746,04
228	132,27	1492,36	289	152,29	2785,86	350	92,52	3711,53
229	47,42	2525,50	290	27,81	2274,38	351	113,13	2835,66
230	153,55	3268,37	291	99,50	3087,56	352	157,09	5331,42
231	138,84	1924,17	292	20,43	1499,83	353	122,32	3718,27
232	140,61	1612,37	293	116,57	1540,55	354	158,38	5911,26
233	61,34	992,88	294	142,49	2466,61	355	10,46	9566,07
234	153,07	3702,54	295	12,27	3215,11	356	123,22	5415,87
235	157.49	7665.77	296	123.26	4070,15	357	153.31	5823,88
236	33.69	2671.60	297	37.96	2464,15	358	95.36	3758,02
237	17,27	4224,17	298	154,90	2175,96	359	39,04	6580,03
238	48,04	7826,23	299	175,52	8236,46	360	144,57	7093,68
239	41,99	2198,98	300	154,02	6606,22	361	167,75	4230,53

Objekt	Streichen	Länge	Objekt	Streichen	Länge	Objekt	Streichen	Länge
262	154.50	(III)	1D 421	07.52	2007.62	1D 491	145.00	2451.80
362	154,50	4204,03	421	62.00	2424.01	401	143,00	4024.11
303	20,37	5124,55	422	20.07	2424,91	402	04.08	2870.16
304	35,78	7070 72	423	29,97	320 4 ,79	483	94,08	4965.00
365	11.54	4005.33	424	112.60	3621.68	484	60.26	2630.27
300	11,34	4995,55	423	177.22	3021,08	485	0.17	2030,27
269	70.20	4213,31	420	177,55	2600.28	480	27.20	4303,44
308	70,30	6622.66	427	24.17	5405.15	40/	57,20	3730,43
309	151 77	4866.18	420	63.07	3705.60	488	46.40	4000 50
370	55 55	4800,18	429	114 78	3113 21	489	160.25	3001.80
371	108.64	3852.70	430	30.77	4265.15	490	109,23	6254.88
372	18 20	<u> </u>	432	3 22	3307.16	491	14.05	6541.02
373	6 23	3165.66	432	18.64	2707.52	492	51.34	3782.06
375	158.28	2752.20	433	16.00	3626.36	493	16.02	2884.99
376	81.86	4760.35	435	91.19	3184.92	495	177.19	2641.12
370	24.65	2632.67	436	176.47	4196 79	496	47 57	2057.60
378	130.66	2468.48	437	24.62	5444 18	497	154.38	8257.01
379	39.59	2538.66	438	102.94	2958 70	498	54.68	6378.41
380	3 13	4638.66	439	170.97	5300.14	499	57.95	3438 53
381	176.24	4044 57	440	143.06	4299.58	500	158.37	3276.40
382	71.08	2095.56	441	39.17	3391.20	501	31.51	4110.01
383	56.94	1411.88	442	98.43	4030.85	502	30.58	3831.59
384	22.76	2493.11	443	60,48	5159.69	503	160.20	1964.01
385	68.07	1921.24	444	167.69	4238.26	504	112.28	1657.47
386	34,76	2541,28	445	154,88	9832,48	505	93,35	4300,28
387	115,22	1673,20	446	23,39	5351,18	506	141,34	1530,65
388	138,95	2326,31	447	86,28	10127,06	507	132,07	3231,61
389	62,41	3995,59	448	67,85	11898,38	508	122,76	2736,11
390	157,51	4643,01	450	67,89	3241,85	509	140,76	9324,25
391	63,08	5387,29	451	176,25	8479,61	510	113,51	4711,16
392	114,58	4160,40	452	154,29	7776,70	511	9,06	4676,81
393	39,30	5844,43	453	117,84	6220,98	512	11,50	2358,13
394	88,71	8652,34	454	86,39	4081,97	513	123,56	2868,58
395	129,84	4432,13	455	135,51	5617,87	514	24,35	2029,15
396	135,47	8082,01	456	87,85	7010,61	515	25,01	3656,80
397	161,64	4592,92	457	176,29	5969,96	516	107,47	3424,87
398	55,39	3979,22	458	168,87	4823,95	517	24,35	2029,15
399	54,59	5205,20	459	159,58	6336,09	518	52,13	2191,34
400	159,58	5956,00	460	18,10	3398,77	519	7,16	1533,90
401	36,71	5143,63	461	149,80	4345,91	520	165,36	2949,10
402	174,05	10057,33	462	170,59	5023,36	521	37,66	2647,30
403	17,50	4073,59	463	156,98	3392,44	522	11,71	2241,49
404	3,99	4916,66	464	152,99	6239,36	523	158,20	3299,91
405	49,28	4370,80	465	14,43	6476,21	524	22,47	1897,06
406	6,91	6449,90	466	159,35	8710,39	525	59,97	2595,41
407	157,76	5153,09	467	3,13	6291,44	526	10,65	2586,44
408	157,21	6298,00	468	36,27	8818,09	527	163,48	3474,19
409	5,06	7619,56	469	156,68	8743,65	528	64,54	2973,50
410	173,41	7142,17	470	93,87	5822,20	529	30,18	4570,26
411	71,15	4830,30	471	50,21	5021,30	530	13,22	1219,58
412	39,43	4172,39	472	65,58	3951,18	531	12,17	7774,39
413	138,22	4662,36	473	93,22	5069,27	532	12,98	1880,72
414	39,44	3721,20	474	155,37	7231,90	533	14,19	2178,03
415	109,48	3313,74	475	128,22	5065,35	534	87,31	2209,63
416	4,44	2634,12	476	152,98	6866,39	535	104,04	2628,31
417	104,92	3627,84	477	49,85	4344,45	536	161,10	2509,78
418	141,88	3260,36	478	8,79	6147,31	537	36,87	2086,71
419	14,07	3030,82	479	136,92	5458,91	538	2,05	2904,42
420	59,64	4164,07	480	2,03	0207,43	539	53,39	1389,68

Objekt ID	Streichen	Länge (m)	Objekt ID	Streichen	Länge (m)	Objekt ID	Streichen	Länge (m)
540	138.33	3200.11	601	103.96	1678.53	662	54.48	2997.27
541	11.00	2004.97	602	120.96	1850.77	663	31.92	1780.50
542	93.75	2555.32	603	161.92	2944.31	664	152.63	2512.48
543	13.81	1936.46	604	29.24	2028.19	665	46.80	3376.17
544	70,95	2807,20	605	59,58	1918,49	666	132,89	3205,26
545	119,08	1787,04	606	9,19	2289,67	667	5,47	4366,04
546	126,47	1917,21	607	30,62	2190,62	668	64,67	3444,58
547	126,47	1917,21	608	28,79	1884,24	669	157,39	4098,65
548	35,74	4733,42	609	119,06	4829,69	670	114,16	3527,60
549	176,33	1493,13	610	74,60	976,27	671	11,97	2828,86
550	9,39	2051,41	611	49,81	1807,70	672	30,48	3054,07
551	107,91	1942,83	612	62,12	2148,20	673	109,86	3453,99
552	130,62	3317,52	613	65,04	4800,34	674	80,23	2440,75
553	169,68	3425,98	614	89,22	1781,65	675	62,10	1991,66
554	29,98	2475,17	615	38,72	1691,17	676	63,37	3056,15
555	152,05	2363,29	616	75,79	1486,46	677	34,00	1424,69
556	164,34	2497,59	617	57,34	1971,64	678	138,23	1571,31
557	153,53	2240,34	618	177,56	4715,98	679	122,63	1941,42
558	71,49	2097,30	619	137,09	1178,80	680	37,30	1589,69
559	64,11	3144,88	620	//,//	2725,06	681	127,56	1846,38
560	159,30	2401,79	621	163,69	1862,48	682	52,51	852,31
562	54.01	3197,39	622	133,34	1085,88	683	38,00	2389,07
562	126.52	2212.69	624	117,41	1294,43	685	52 21	2749,03
564	120,32	2610.38	625	127,44	1884.36	686	84.02	2/46,01
565	11/2,49	2010,38	626	118 72	2256.78	687	156 53	3011.44
566	58 37	2004 55	627	36.20	1657 57	688	143 13	1922.21
567	28.49	5790.03	628	56.62	1536.27	689	52 33	1386.91
568	29,01	3873.88	629	12.72	1408 67	690	39.49	1602.43
569	139.22	3692.23	630	46.51	1793.44	691	169.57	2661.91
570	127,57	1742,03	631	2,26	3460,46	692	74,45	1909,06
571	44,14	3559,14	632	42,78	1333,79	693	138,38	2311,39
572	153,08	3533,19	633	7,31	1861,38	694	62,62	1854,17
573	38,17	2321,71	634	143,68	2375,23	695	63,72	3382,97
574	8,54	2073,69	635	30,71	2800,35	696	79,79	1966,75
575	73,21	2730,46	636	120,10	2696,90	697	57,93	2039,17
576	148,60	2032,91	637	8,45	1702,45	698	107,50	1430,76
577	62,60	2318,18	638	159,63	3632,25	699	82,66	1974,03
578	132,92	4733,42	639	112,91	1754,73	700	68,65	2627,67
579	157,19	2770,67	640	65,83	3550,78	701	169,66	5081,03
580	118,06	2970,65	641	23,78	1744,14	702	47,37	2540,26
581	58,37	1561,45	642	41,79	2668,91	703	15,32	3521,06
582	150,53	2518,46	643	3,77	2467,03	704	129,57	2992,02
283 504	139,23	2750 61	644	131,41	1911,/9	/05	113,50	5522.14
505	0/,38	1762 40	645	99,24 126.22	4220 50	700	4/,/9	2268 56
586	144,03	103,49	640	84.65	7308 25	707	107.04	1902.02
587	118 55	1823.78	648	2 56	4377 43	708	83.14	2420.17
588	57 78	1285 79	649	51.50	1751 31	710	170.66	5007 15
589	140.67	1493.05	650	109.38	2650.96	711	107.39	3100.85
590	3.90	1643.00	651	121.10	2358.92	712	152.52	2282.11
591	107.38	1830.85	652	155.54	3117.20	713	27.46	2331.85
592	22,98	4118,28	653	36,55	6756,92	714	113,16	3129,75
593	55,27	5322,97	654	39,91	3260,53	715	39,47	2449,85
594	166,41	1603,03	655	41,74	2492,23	716	74,92	5936,01
595	117,48	1760,93	656	151,01	2199,38	717	36,76	2342,02
596	145,83	2345,90	657	120,35	1822,98	718	90,96	2662,77
597	41,60	2162,88	658	156,74	2675,89	719	56,71	2743,97
598	22,76	2093,26	659	159,51	3022,56	720	11,06	2038,34
599	54,23	2658,44	660	60,52	1945,08	721	78,28	5993,29
600	25,62	1524,58	661	179,78	2017,57	722	161,64	4268,78

Objekt ID	Streichen	Länge (m)	Objekt ID	Streichen (°)	Länge (m)	Objekt ID	Streichen	Länge (m)
723	16,42	5076,25	784	110,79	2209,56	845	143,05	3025,91
724	60.82	4994.01	785	40.74	1492,48	846	146.47	2014.02
725	178,54	8798.55	786	139.16	1849.13	847	58.49	2039.51
726	0.00	1726.92	787	18.30	1810.80	848	68.41	1339.80
727	56.70	5202.59	788	159.54	2637.22	849	62.78	2082.71
728	153.64	3256.62	789	156.00	22.82.51	850	23.48	1438.14
729	70.83	5648.65	790	151.53	2372.15	851	116.56	1444.99
730	16.83	2408.62	791	55.43	3191.23	852	89.53	1638.92
731	156 71	7241.80	792	161 73	2168.42	853	3.87	2958.05
732	158,12	3309.49	793	102.87	4975 57	854	41 79	1849 53
732	19.85	2179.68	794	160.65	2840.59	855	49.68	2367.99
734	167.72	3438.98	795	137.29	2197 31	856	159.98	1829.34
735	18.23	2937.66	796	140.00	2177,31	857	42 20	1735.64
736	163.72	4156 51	707	74.70	3368.23	858	94.01	1522.68
730	26.08	4150,51	708	23.07	1584.47	850	127.12	2130.55
738	59.46	2745 70	700	23,07	1714 15	860	20.20	3054.25
730	97.51	3646 72	800	155.50	2/27.07	861	63.24	1716.12
740	161.18	3630.85	801	108.69	017.81	862	84.20	2042.40
740	16 30	4070.00	802	146.57	2034.80	863	146.40	4045.03
741	57.80	3073 13	802	175 33	1685.56	864	61 56	2182.07
742	100.20	2740.47	803	105 77	2257.00	865	62.00	2102,07
743	154.20	2766.82	805	103,77	2337,00	866	114.01	2199,98
744	154,50	3700,83	805	62.14	1460,13	800	114,91	2100,90
745	101,90	<u> </u>	800	122.00	1044.75	869	129.25	1011.21
740	1/9,09	6192,20	807	122,99	2056.26	860	120,55	2600.67
74/	152,55	4190.40	800	4,00	2444 42	809	137,30	2099,07
740	101,08	2210.41	809	102,27	2444,45	870	20.15	2770,79
749	132,11	219,41	010	105,71	2150.01	871	39,13	2947,01
751	44,00	2100,09	011	1/9,41	3130,91	872	72.60	2005,30
752	150,79	3304,09	012 012	61.42	4078,30	873	63 22	1727.85
752	165.42	3500 50	81 <i>J</i>	110.25	2255,28	874	57.06	2418 20
754	51.55	3201.54	815	165.44	1377.78	875	50.30	2418,20
755	106.67	3575.40	816	10.64	1/16 68	870	133.78	1501.04
755	72.14	3400 11	810 817	60.31	1942 53	878	10.06	1056.00
757	72,14	3780/18	818	74.08	2311 10	870	146.01	2557.83
758	88.32	4303.00	810	45.00	1026.13	880	158.86	3339.30
750	111 22	3183.25	820	30.47	5341 53	881	1/ 07	2039 54
760	140.14	3057.35	821	30.03	2272.68	882	104.95	2173.05
761	27.74	30/1 76	822	161.83	2272,08	883	131 47	2200.45
762	1/0 73	1852.26	823	142.78	2561.17	884	153.68	3518 55
763	118 22	3413 31	823	77.25	2301,17	885	9.21	2820.84
763	171.91	8118.82	825	98.08	6726.30	886	64.02	2020,01
765	2 85	4235.80	825	122.62	4970.67	887	26.96	2262.00
766	148 45	2414 81	827	60.97	1495 22	888	25,36	2188.08
767	132.79	1752.53	828	41.68	1995 53	889	73 75	1589.13
768	167.65	1918.97	829	165.70	2064.22	890	112.61	3677.31
769	142.33	1858.32	830	36.86	3163.03	891	14.40	2337.99
770	96.87	2115.52	831	179.32	1647.39	892	169.47	3813.41
771	61.85	1769.12	832	118 78	2498.40	893	88 33	3485 38
772	79.00	1470.54	833	12.60	2975.26	894	57.65	1943.55
773	45 11	2225 17	834	72.94	2335.61	895	66 48	3218 38
774	141.06	2363 20	835	133 50	4442.14	896	71 73	9591 28
775	63.20	2011.63	836	72 49	3984 35	897	96.95	2260.62
776	138.03	2603 25	837	90.85	2892.91	898	144 22	3983 70
777	93.07	4096 77	838	62.18	3394 40	899	4 69	4649 69
778	61 47	2701 89	839	178 82	42.60 88	900	150 35	2651.69
779	114 67	2568 10	840	53 41	1609 57	901	53.96	2485 30
780	140.66	3186 38	841	143 99	2232.04	902	159.48	2505 70
781	111.94	4714.31	842	57.90	2532.35	903	167.61	2136.97
782	23.52	1211.97	843	149.78	2474.93	904	108.67	2420.13
783	64,20	2403,21	844	84,08	2391,76	905	109,64	1427,04

Obje	kt	Streichen	Länge	Objekt	Streichen	Länge (m)	Objekt	Streichen	Länge
ID	906	29.08	1629.38	966	73 54	2750.91	1026	29.21	5126.21
	907	67 34	1029,98	967	105.65	2815.81	1020	116.12	2131.45
	908	53 59	1973.36	968	66.65	2336.52	1027	71 41	3160.09
	909	96.23	2640.44	969	108 78	2772.50	1020	19.17	4100.06
	910	73.61	2715.19	970	58.12	2220.23	1029	13.04	3618.69
	911	73,67	2582.48	971	13 30	2519.22	1031	136.04	4274 55
	912	35.10	3933.46	972	31.88	5048.64	1032	122.02	2419.22
	913	60.96	2004.00	973	27.78	5609.16	1033	68.66	3427.04
	914	38,41	2176,62	974	112,55	5197,71	1034	22,84	2969,69
	915	152,59	2836,66	975	68,93	4226,19	1035	32,58	3205,74
	916	73,38	2934,03	976	48,98	8125,34	1036	86,73	3214,97
	917	63,01	2833,45	977	92,56	4185,42	1037	90,26	5150,65
	918	68,33	2164,95	978	150,73	5227,98	1038	131,70	3483,38
	919	104,76	1908,40	979	171,70	5819,67	1039	61,66	4184,09
	920	100,15	1549,87	980	143,09	5112,51	1040	123,75	5011,81
	921	88,83	2292,22	981	179,02	7922,66	1041	55,88	3498,69
	922	72,10	2254,30	982	153,21	6265,22	1042	111,44	2635,56
	923	60,66	2583,16	983	86,83	3830,92	1043	57,51	3532,16
	924	39,66	2682,66	984	38,37	2390,84	1044	147,80	3206,22
	925	40,01	4976,91	985	79,51	2889,47	1045	62,14	2453,83
	926	165,70	6793,51	986	103,38	2162,06	1046	83,14	2572,04
	927	146,86	3071,06	987	58,90	3694,00	1047	59,59	2207,04
	928	48,30	2373,46	988	152,95	8708,03	1048	75,08	3123,29
	929	147,11	4760,20	989	4,44	3070,93	1049	110,21	3220,55
	930	1,89	2419,65	990	141,01	5445,32	1050	150,05	3895,44
	931	29,28	3337,64	991	150,30	54/7,62	1051	58,65	3896,95
	932	101,31	3366,83	992	137,61	4616,59	1052	45,87	5245,05
	933	147,49	2788,80	993	33,24	3938,68	1053	80,80	3396,07
	934	56,49	2293,04	994	56.02	4119,39	1054	34,12	3330,01
	933	43,40	2011,30	993	177.25	4771.07	1055	32,99	904,34
	937	53 70	2273.21	997	50.93	2031.91	1050	69.96	2494.96
	938	25.40	2190.29	998	120.53	4992.07	1057	86.23	2927 74
	939	53 44	2952.67	999	163.22	4553.27	1050	0.11	6043.82
	940	22.14	2121.68	1000	57.25	4578.15	1060	37.62	2523.04
	941	11.95	2703.39	1001	54.68	3565.14	1061	121.58	2897.52
	942	54.44	2325.67	1002	68.14	3034.72	1062	74.86	2428.18
	943	55,77	1764,65	1003	179,54	3163,61	1063	140,93	2209,67
	944	72,60	2450,52	1004	166,73	6360,85	1064	8,08	4012,17
	945	179,45	1392,43	1005	58,49	4343,89	1065	101,88	3195,30
	946	74,46	2337,23	1006	59,90	4548,81	1066	64,61	3223,59
	947	36,76	3227,93	1007	140,07	5153,76	1067	112,14	2564,38
	948	151,88	3293,41	1008	95,05	4146,45	1068	1,16	5973,22
	949	126,27	3074,04	1009	34,40	5674,14	1069	84,35	3951,33
	950	82,39	1760,96	1010	55,47	3695,83	1070	7,94	3495,95
	951	174,81	3090,56	1011	58,07	4010,68	1071	151,49	7369,73
	952	161,36	2313,20	1012	127,93	5076,41	1072	106,53	4745,75
	953	57,19	2655,49	1013	45,79	4792,18	1073	165,19	3700,73
	954	85,31	2527,38	1014	111,06	9490,87	1074	67,46	4488,08
	955	50,89	2798,87	1015	90,17	2824,27	1075	21,67	4875,93
	956	73,14	1997,93	1016	36,17	6891,09	1076	176,54	5875,65
	957	40,05	2236,56	1017	91,37	6388,22	1077	92,38	3314,01
	958	72,15	3522,85	1018	143,28	10340,05	1078	168,27	3891,26
	939	5/,88	1823,02	1019	48,08	45/0,46	10/9	//,99	3016,00
	900	120,14	3414,18 2064.29	1020	142,99	2016.96	1080	86,14	35//,28
	901	45,17	2004,38	1021	45,80	6122.21	1081	9,23	4130,02
	902	100,98	2400.67	1022	133,/8	3611.96	1082	13,13	4005,/1
	964	123,00	2490,07	1023	/1,09 46.48	4486 21	1083	<u> </u>	3867.78
	965	111 99	22.05 78	1024	19 81	3144 22	1085	69.83	3765 77

Objekt	Streichen	Länge	Objekt	Streichen	Länge	Objekt	Streichen	Länge
ID	(°)	(m)	ID	(°)	(m)	ID	(°)	(m)
1086	136,62	3656,38	1145	7,52	2090,94	1204	143,66	3583,63
1087	62,35	3039,05	1146	176,55	2275,47	1205	68,85	4572,31
1088	91,06	7969,64	1147	6,53	2045,18	1206	8,08	5308,53
1089	75,96	3510,57	1148	101,78	2313,19	1207	154,24	3371,08
1090	76,53	3617,13	1149	115,87	2273,44	1208	149,46	5266,95
1091	119,07	7613,04	1150	72,80	5947,41	1209	176,75	4490,94
1092	109,31	4082,72	1151	177,10	2705,83	1210	149,98	3455,50
1093	157,53	5984,57	1152	3,37	2330,11	1211	101,94	1865,47
1094	39,75	3456,56	1153	90,67	2326,25	1212	179,17	2413,22
1095	0,82	2399,75	1154	18,79	1741,61	1213	32,00	5183,37
1096	126,34	2626,67	1155	6,76	3840,70	1214	11,59	2490,03
1097	53,18	7265,56	1156	21,47	1999,68	1215	179,62	5069,02
1098	151,28	7976,00	1157	177,55	2239,20	1216	121,21	4572,76
1099	115,48	5099,31	1158	38,17	1870,93	1217	75,48	6147,92
1100	81,71	2981,11	1159	63,96	1994,93	1218	51,71	4191,94
1101	105,70	3394,34	1160	26,44	2719,98	1219	177,89	5250,65
1102	0,00	5429,99	1161	54,93	2833,75	1220	61,50	3494,38
1103	127,09	2738,38	1162	63,97	1964,34	1221	37,54	3873,30
1104	31,64	3131,55	1163	119,34	3029,02	1222	179,51	3106,26
1105	75,77	3114,27	1164	176,67	3769,15	1223	47,30	3092,31
1106	59,57	3141,79	1165	31,72	2042,89	1224	158,50	4573,70
1107	178,41	4654,60	1166	139,93	2869,66	1225	60,01	3809,20
1108	68,70	3858,62	1167	119,95	1658,13	1226	34,64	3658,19
1109	86,32	3619,62	1168	115,33	3933,38	1227	147,47	4193,93
1110	52,10	5166,23	1169	134,28	2302,89	1228	73,53	3312,19
1111	111,58	3764,28	1170	33,11	1315,02	1229	42,50	4272,72
1112	156,51	4379,94	1171	132,22	5191,64	1230	159,36	4828,81
1113	102,86	4500,04	1172	124,56	3542,95	1231	161,69	2569,39
1114	46,19	3637,21	1173	91,79	1816,24	1232	91,16	3913,31
1115	179,15	1840,55	1174	50,27	6197,32	1233	154,74	4666,89
1116	91,35	2039,31	1175	158,97	3380,11	1234	115,53	4975,04
1117	59,33	1837,41	1176	7,67	5083,36	1235	6,14	11455,41
1118	118,91	5927,14	1177	177,81	8661,25	1236	8,33	2134,96
1119	2,37	2649,90	1178	52,60	9537,81	1237	146,85	6228,69
1120	147,26	6103,07	1179	13,38	6536,62	1238	127,21	4034,73
1121	34,64	2286,77	1180	115,29	6792,90	1239	66,69	3009,68
1122	122,81	3345,64	1181	148,86	6356,31	1240	0,26	8435,98
1123	80,36	2123,49	1182	45,87	8277,21	1241	115,62	4964,96
1124	74,44	4584,63	1183	115,47	7399,47	1242	139,81	4609,06
1125	76,68	3177,79	1184	178,15	10931,42	1243	155,63	3987,80
1126	60,49	1902,52	1185	24,63	8955,13	1244	59,65	4011,28
1127	113,93	1399,70	1186	103,74	5467,90	1245	150,26	7080,64
1128	68,61	1594,42	1187	24,26	3901,04	1246	65,16	2538,05
1129	0,49	1587,27	1188	90,70	7698,66	1247	59,86	2884,06
1130	166,73	1729,14	1189	70,30	5206,63	1248	112,24	2381,80
1131	147,25	3370,60	1190	169,17	2989,72	1249	111,62	3203,85
1132	134,81	9823,67	1191	37,71	5087,37	1250	20,49	4362,56
1133	42,79	1379,75	1192	43,43	6347,46	1251	90,18	4190,68
1134	67,15	2078,76	1193	177,40	5925,92	1252	12,54	2818,04
1135	4,65	3205,51	1194	149,72	5012,35	1253	149,07	2125,15
1136	163,28	1878,72	1195	161,33	4495,08	1254	67,94	2435,52
1137	52,75	2260,46	1196	140,28	4137,29	1255	161,08	2699,20
1138	120,38	1379.87	1197	53.76	6135.45	1256	81,36	3262,93
1139	166,29	2756.80	1198	174,77	5056.01	1257	39.04	2003.01
1140	70,73	5173.12	1199	176.33	8737.37	1258	117,36	2958,71
1141	109,43	4069.35	1200	171.37	4678.83	1259	65,41	1696,55
1142	0.75	6589.25	1201	142.65	5342.05	1260	100.72	2741.01
1143	108,59	1587.98	1202	77.53	4753.84	1261	66,43	2125,26
1144	157,31	2217,15	1203	4,07	2841,31	1262	38,36	3082,03

Objekt	Streichen	Länge	Objekt	Streichen	Länge	Objekt	Streichen	Länge
1262	158.24	2020 50	1222	41.46	(III) 7760 50	1292	96.47	2979.20
1203	50.52	2738 43	1323	58.65	3058.63	1383	68.66	5070.24
1204	37,52	1030.27	1324	50.02	2582.68	1304	175.05	3970,24
1205	80.00	2020.00	1325	38.32	4317.00	1385	30.02	4060.00
1267	100.32	4641.38	1320	08.85	4082.15	1387	156.25	200/ 53
1207	163.76	2203.66	1327	104.46	3650.43	1387	131.64	3216.98
1208	32.01	4332.04	1320	104,40	0307 57	1380	174.87	5296.41
1209	0.71	4197.00	132)	111.06	7170.34	1300	174,87	4017.14
1270	89.80	5098.81	1331	104.37	4363.02	1301	139 50	3104.90
1271	108 59	3501.21	1332	130.26	3106.07	1392	61 79	5114.18
1272	75.65	4745 14	1333	56.55	4494.01	1393	154.90	8622.35
1275	3.02	3422.53	1334	62 41	3259.99	1394	29.11	6490.13
1271	67.16	2964 43	1335	68 50	4843.80	1395	71.33	2069.02
1276	73 47	3207.41	1336	71.93	5568 78	1396	47.02	3706 34
1277	179,11	3726.31	1337	57.74	3066.56	1397	97.51	2872.61
1278	46.89	2619.56	1338	66.85	5166.20	1398	39.77	4878.51
1279	93,96	4161,33	1339	12,23	4013,20	1399	134,44	4418,99
1280	45,64	4439,19	1340	122,07	4344,79	1400	85,55	4048,50
1281	151,47	2399,90	1341	146,69	7225,91	1401	91,70	3450,47
1282	117,81	8462,55	1342	142,93	8904,50	1402	58,50	3973,12
1283	140,61	7038,36	1343	75,78	5286,84	1403	153,95	4743,51
1284	112,25	9311,92	1344	127,00	5405,73	1404	138,25	2471,72
1285	100,18	4032,66	1345	65,24	4679,54	1405	8,51	4726,77
1286	97,37	8486,60	1346	63,33	4141,38	1406	165,74	5630,22
1287	161,94	4076,75	1347	56,55	4370,60	1407	112,74	8411,95
1288	111,99	4326,36	1348	122,29	6281,63	1408	51,54	3100,83
1289	72,12	4121,06	1349	30,83	3897,92	1409	68,33	2755,86
1290	47,35	4381,62	1350	108,79	2378,39	1410	105,30	4189,66
1291	64,76	1809,71	1351	105,32	3954,46	1411	179,25	4678,68
1292	111,92	5206,22	1352	154,58	4846,64	1412	79,82	3670,66
1293	147,05	5255,44	1353	19,19	2394,82	1413	122,52	3982,01
1294	137,00	5334,72	1354	88,32	3219,68	1414	65,95	6052,74
1295	111,51	2497,87	1355	68,79	3718,68	1415	107,27	6162,61
1296	57,11	2858,30	1356	105,32	3280,10	1416	91,23	3497,56
1297	43,90	6097,25	1357	114,24	3507,48	1417	18,03	2427,58
1298	101,21	3709,19	1358	132,98	2901,83	1418	77,21	2962,39
1299	101,49	2682,94	1359	80,82	2780,59	1419	78,86	3851,02
1300	128,54	3892,86	1360	58,89	4041,76	1420	84,67	2942,61
1301	35,62	5112,04	1361	156,12	4337,08	1421	58,27	2746,28
1302	33,27	3215,65	1362	53,21	3628,37	1422	49,12	3529,65
1303	108,49	2754,43	1363	55,78	3/42,81	1423	124,46	3503,62
1205	20.65	4243,93	1304	9,80	2609 29	1424	1,38	/003,40
1303	20,00	1737 08	1303	114 54	2000,38 1338.88	1423	56.00	2506.04
1300	03,19 17 11	4645 12	1300	1/1 06	4218 17	1420	178.84	4303 52
1307	30.87	3757 27	1368	53 11	3741.84	1427	53 51	2325 53
1300	137.90	4510.17	1360	56 37	3700.01	1420	107 35	3867.05
1310	170.67	4692 91	1370	89.64	3193.44	1430	97.64	3381.04
1311	82.88	3077.02	1371	84 58	2924 20	1431	171.83	5384 73
1312	81.61	3197.72	1372	24.00	4194.03	1432	98.28	2626.06
1313	146.45	4833.95	1373	114.92	3587.70	1433	91.72	3262.15
1314	142.01	5264.32	1374	42.06	6511.39	1434	122.85	7287.35
1315	102.06	3044.12	1375	153.85	6296.82	1435	38.06	3324.40
1316	126.26	3039.86	1376	58.66	5133.78	1436	41.41	3886.56
1317	141.87	5753.09	1377	40,97	4685.79	1437	144.92	8218,98
1318	111,71	3914.58	1378	118.24	7869.30	1438	60.62	6685,70
1319	133.02	6164.89	1379	124.89	3438.97	1439	64,49	2367.81
1320	123,20	3422,15	1380	56,60	4174,67	1440	2,51	7485,94
1321	39,70	4236,03	1381	91,32	2363,68	1441	167,04	3307,09
1322	66,20	3430,96	1382	168,85	5896,04	1442	90,63	4455,64

Objekt ID	Streichen	Länge (m)	Objekt ID	Streichen	Länge (m)	Objekt ID	Streichen	Länge (m)
1443	127.83	4112.91	1504	20.84	4681.26	1565	51.08	2001.53
1444	39.81	2560.36	1505	76.97	3400.89	1566	145.33	1615.68
1445	28.60	4382.48	1506	27.78	3104.37	1567	159.66	1493.31
1446	94,41	3000,23	1507	149,53	4791,20	1568	59,82	2804,21
1447	34.01	3534.62	1508	21.66	5146.89	1569	121.52	2340.96
1448	72.60	2517.55	1509	85.51	4172.82	1570	41.26	1653.64
1449	1.05	1393.47	1510	50.88	4893.46	1571	148.83	2999.99
1450	104.63	3245.11	1511	10.89	4412.75	1572	151.85	3937.48
1451	16,70	2994,73	1512	129,23	5344,55	1573	166,04	3845,73
1452	29,74	1197,60	1513	161,40	5120,82	1574	50,66	2508,81
1453	29,79	2278,30	1514	88,59	3794,50	1575	111,98	2195,30
1454	155,45	7028,18	1515	62,26	3494,97	1576	10,50	3607,01
1455	136,33	1565,10	1516	21,27	3455,33	1577	77,33	2417,93
1456	109,51	1909,78	1517	28,39	3561,64	1578	10,30	1277,29
1457	39,43	2314,48	1518	119,45	3322,54	1579	75,94	5468,45
1458	178,35	2131,72	1519	146,31	4326,68	1580	152,44	4724,96
1459	41,08	2806,34	1520	154,91	3820,49	1581	145,75	4801,32
1460	39,47	1804,88	1521	74,11	3652,89	1582	156,33	6146,89
1461	43,86	2735,11	1522	120,54	5247,45	1583	97,89	3052,53
1462	119,48	1935,87	1523	39,96	3705,42	1584	58,06	3051,68
1463	122,46	3970,19	1524	125,41	3141,03	1585	54,92	5592,48
1464	47,46	2113,53	1525	147,84	3945,34	1586	30,94	6922,01
1465	37,53	1866,66	1526	82,67	3239,82	1587	1,25	2795,83
1466	66,99	1992,19	1527	42,45	3288,95	1588	66,55	3342,91
1467	133,00	2924,99	1528	158,64	8749,12	1589	8,70	7188,44
1468	35,11	2867,74	1529	108,77	3936,06	1590	126,98	3241,49
1469	29,74	4844,13	1530	11,75	5760,78	1591	7,00	5248,66
1470	31,61	1407,37	1531	148,60	3569,58	1592	99,66	3873,20
1471	49,33	3100,84	1532	26,82	4713,70	1593	0,20	5788,39
1472	113,16	7591,33	1533	64,53	3891,49	1594	167,01	3907,31
1473	117,48	2586,55	1534	26,57	3503,19	1595	92,50	3963,20
1474	5,81	1771,13	1535	65,62	4296,40	1596	37,65	7206,56
1475	60,08	2074,37	1536	52,62	3964,17	1597	76,89	4594,84
1476	107,73	6647,69	1537	162,84	4270,15	1598	70,49	5815,71
1477	136,88	2210,57	1538	146,86	4840,92	1599	119,00	7407,55
1478	87,69	1522,54	1539	25,01	4053,27	1600	38,01	5349,86
1479	179,49	2894,16	1540	131,71	2865,69	1601	19,09	4830,48
1480	40,06	5098,34	1541	40,59	3616,97	1602	5,47	8206,63
1481	36,19	8021,78	1542	11,61	4437,53	1603	64,30	6366,39
1482	55,16	1703,69	1543	117,45	3658,66	1604	34,45	3201,30
1483	86,32	5607,80	1544	15,25	3448,02	1605	25,12	4896,33
1484	125,02	6381,93	1545	53,57	3861,46	1606	70,66	2636,81
1485	147,74	2746,08	1546	81,16	3731,00	1607	163,27	4093,01
1486	113,33	3871,78	1547	155,37	5569,36	1608	73,09	3946,48
1487	116,33	5026,61	1548	40,65	4410,94	1609	45,94	2684,70
1488	57,32	2877,50	1549	51,76	5924,38	1610	5,00	2915,41
1489	8,45	3318,60	1550	35,55	3989,57	1611	112,67	1870,87
1490	119,93	4000,78	1551	73,86	5028,12	1612	20,53	2721,79
1491	106,76	6821,22	1552	155,43	3668,72	1613	113,13	2197,48
1492	74,25	3218,05	1553	82,04	3720,69	1614	80,44	8049,46
1493	139,05	5082,26	1554	20,74	4759,54	1615	59,23	3592,88
1494	0,38	3066,88	1555	108,84	4099,37	1616	49,48	5330,00
1495	165,72	2347,21	1556	13,38	1502,86	1617	53,33	9540,95
1496	76,85	6006,17	1557	42,23	1395,81	1618	78,89	2845,96
1497	19,42	4116,90	1558	90,32	1695,48	1619	19,95	2798,02
1498	52,62	3986,41	1559	104,01	2400,25	1620	25,35	3415,95
1499	177,99	4885,96	1560	93,99	2258,14	1621	94,28	1904,30
1500	66,16	5177,34	1561	81,23	2592,54	1622	137,55	3895,06
1501	63,72	3537,57	1562	43,94	1686,30	1623	48,44	3704,74
1502	143,55	3955,47	1563	44,29	2441,70	1624	56,89	3681,19
1503	8,90	4043,18	1564	45,69	2222,78	1625	5,72	6532,80

Objekt	Streichen	Länge	Objekt	Streichen	Länge	Objekt	Streichen	Länge
ID	(°)	(m)	ID	(°)	(m)	ID	(°)	(m)
1626	114,09	3582,00	1651	28,15	8160,91	1676	65,23	6618,33
1627	79,23	5573,95	1652	173,51	7965,38	1677	18,98	3618,29
1628	20,92	7206,01	1653	149,02	4714,43	1678	76,91	4034,87
1629	52,88	3906,74	1654	103,34	6954,20	1679	33,24	6461,92
1630	51,18	6491,33	1655	62,69	9393,11	1680	127,53	5301,27
1631	126,76	7709,86	1656	94,75	5026,16	1681	73,16	5691,63
1632	72,65	3242,40	1657	14,57	5841,77	1682	137,87	5737,38
1633	124,15	7614,87	1658	74,75	3149,74	1683	162,10	5381,53
1634	130,94	3923,26	1659	28,20	4025,09	1684	90,00	4722,08
1635	137,63	8882,62	1660	86,07	3086,12	1685	91,33	1986,49
1636	55,56	7118,09	1661	109,60	3832,91	1686	94,87	3678,79
1637	129,43	7540,06	1662	9,23	2991,93	1687	91,58	5046,85
1638	41,72	4136,23	1663	138,61	3403,65	1688	170,28	4736,76
1639	5,32	3722,63	1664	44,64	6843,47	1689	16,06	4240,15
1640	38,84	5488,99	1665	41,09	2963,53	1690	20,22	2930,13
1641	105,10	3978,78	1666	56,65	3268,26	1691	169,57	6128,65
1642	65,81	3840,82	1667	114,74	4408,88	1692	128,07	4953,18
1643	24,33	4119,91	1668	107,14	2151,92	1693	92,90	4667,13
1644	113,94	6166,26	1669	156,79	4958,02	1694	149,25	10879,64
1645	142,91	7465,96	1670	67,01	3306,52	1695	89,24	8013,47
1646	82,51	5141,69	1671	69,07	2728,98	1696	93,52	10427,12
1647	139,59	5221,93	1672	123,55	5841,28	1697	3,44	3929,47
1648	45,65	5041,16	1673	60,17	3009,05	1698	54,39	6312,65
1649	37,32	7721,30	1674	37,88	4920,63	1699	110,96	3001,47
1650	89,13	8157,72	1675	89,05	4838,40	1700	151,76	4780,79

Anhang C: Protokoll für Wasserprobenahme

Helmholtz Zentrum für Umweltforschung UFZ GmbH	Projekt: Burkina Faso September
2007	
Department Hydrogeologie	Name:

Protokoll zur Wasser-Probenahme

Datum:	Probenahmestelle Nr.	Ort:				
I Thrzait:						
Probenherkunft: GW/OW	Probengewinnung:					
	i looenge winnung.					
Messpunkt						
Rechwert	Hochwert	Höhe NN				

Vor-Ort-Parameter:

Wasserstand (m)			
Teufe (m)			
Temperatur (°C)			
рН			
Leitfähigkeit			
$(\mu S/cm)$			
Redox (mV)			
Sauerstoff (mg/l)			

Titration mit Hach-Titrator

Drohanmanga	Varmandata Säura	nV · Skalantaila
Flobelinenge.	verwendele Saure.	$p_{\mathbf{K}_{s4,3}}$. Skalemene

Schnelltest (MERCK):

/	
Nitrit	
Nitrat	
Sulfat	
Eisen 3+ und 2+	
Mangan	
Aluminium	
Arsen	

Proben:

KI	30 ml angesäuert mit HNO ₃	IC HNO3
Kationen	(5ml/l=0,2 ml oder 2 Tropfen)	
	filtriert 0,45 μm	
AI	30 ml angesäuert mit HgCl ₂	IC HgCl2
Anionen	(0,5ml/l=0,02 ml oder 1 Trop-	
	fen) filtriert 0,45 μm	
Spuren	60 ml angesäuert HNO _{3 auf pH2}	Spuren
Spurenelemente	nicht filtriert	
D/O	30 ml, nicht filtriert	D/O
Deuterium /O18		
Rückstellprobe	60 ml, nicht filtriert	Rück

		Hg	As	Cd	Cu		Cr	
Proben	AAS.C	(AAS)	(AAS)	(AAS)	(AAS)	Pb (AAS)	(AAS)	Ni (AAS)
Trad I	mg/l	<0,0005	0,00072	0,00013	0,0027	<0,0001	0,0015	0,0047
Trad II	mg/l	<0,0005	0,00036	0,00018	0,0012	<0,0001	0,0012	0,0038
Trad III	mg/l	<0,0005	<0,0003	0,000174	<0,0001	<0,0001	0,0013	0,0032
Trad IV	mg/l	<0,0005	0,00041	0,00011	0,0051	<0,0001	0,0019	0,0031
Trad V	mg/l	<0,0005	0,00045	0,00021	0,0141	<0,0001	0,0018	0,0075
Trad VI	mg/l	<0,0005	0,00089	0,0005	0,0078	<0,0001	0,0012	0,002
Trad VII	mg/l	<0,0005	<0,0003	0,00016	0,0022	<0,0001	0,001	0,0016
Trad VIII	mg/l	<0,0005	<0,0003	0,00031	0,0189	<0,0001	0,0049	0,001
Trad IX	mg/l	<0,0005	<0,0003	0,00081	0,0023	0,55	0,001	<0,0001
Trad X	mg/l	0,00436	<0,0003	0,00025	0,0018	0,0095	0,0009	0,0008
Trad XI	mg/l	<0,0005	<0,0003	0,00029	0,0025	0,0087	0,0005	0,0008
Trad XII	mg/l	<0,0005	0,00047	0,0002	0,0022	0,0015	0,0037	0,012
Trad XIII	mg/l	<0,0005	<0,0003	0,00021	0,0024	<0,0001	0,0016	0,0019
Trad XIV	mg/l	<0,0005	0,00118	0,00035	0,0027	0,0005	0,0003	<0,0001
Trad XV	mg/l	<0,0005	0,00173	0,00031	0,0097	<0,0001	0,0013	0,0034
Trad XVI	mg/l	< 0,0005	<0,0003	0,00095	0,0124	0,0003	0,0007	0,0033
Trad XVII	mg/l	<0,0005	<0,0003	0,00014	0,0006	<0,0001	0,0018	0,0063
Trad XVIII	mg/l	<0,0005	0,0023	0,00016	0,007	<0,0001	0,0016	0,0046
BOB 4	mg/l	<0,0005	0,00039	0,00014	0,0009	0,0038	0,0013	0,0012
BOB 2	mg/l	0,00286	0,00037	0,00041	0,0022	0,0056	0,0015	<0,0001
BOB 3	mg/l	<0,0005	0,00406	0,00011	0,0006	0,0028	0,0013	0,0025
Stausee								
Ziga	mg/l	<0,0005	0,00058	0,00021	0,0113	0,0074	0,0032	0,0049
Lac Bam	mg/l	<0,0005	0,00038	0,00025	0,0055	0,0055	0,0013	0,0015
Stausee								
Koulniéré	mg/l	<0,0005	0,00055	0,00042	0,0237	0,01	0,0015	<0,0001
Stausee								
Koulniéré un-								
filtriert	mg/l	<0,0005	0,00048	0,00038	0,0041	0,0063	0,0043	0,0028

Anhang D1: Tabellen	der Spurenelemente (Trockenzeit)	

Proben	ICP-MS.C	Au (ICP-MS)	Rb (ICP-MS)	U (ICP-MS)	V (ICP-MS)
Trad I	μg/l	0,013	1,1	0,031	0,42
Trad II	µg/l	0,0075	0,82	0,051	2,04
Trad III	µg/l	<0,0038	0,86	0,0179	0,151
Trad IV	µg/l	<0,0038	1,18	0,031	1,45
Trad V	µg/l	0,0053	2,31	0,175	0,74
Trad VI	µg/l	0,0042	3	0,86	0,24
Trad VII	μg/l	0,0089	1,96	0,079	0,3
Trad VIII	μg/l	<0,0038	1,56	0,0188	0,072
Trad IX	μg/l	<0,0038	1,31	0,0141	0,49
Trad X	μg/l	0,044	9,4	0,0129	0,71
Trad XI	μg/l	0,0067	2,9	0,035	0,92
Trad XII	μg/l	<0,0038	1,42	0,0216	0,161
Trad XIII	μg/l	<0,0038	1,67	0,0079	0,4
Trad XIV	μg/l	0,0197	2,9	0,035	0,68
Trad XV	μg/l	0,0063	2,9	0,223	0,33
Trad XVI	μg/l	<0,0038	0,58	0,126	0,148
Trad XVII	μg/l	<0,0038	0,37	0,0209	0,0263
Trad XVIII	μg/l	<0,0038	0,94	0,042	1,42
BOB 4	μg/l	0,067	0,74	0,033	0,64
BOB 2	μg/l	0,029	0,4	0,024	0,3
BOB 3	μg/l	0,042	1,68	0,56	3,5
Stausee Ziga	µg/l	0,047	4	0,095	2,58
Lac Bam	µg/l	0,039	3,3	0,095	3,2
Stausee	μg/l				
Koulniéré		0,039	4,1	0,7	1,85
Stausee	μg/l				
Koulniere					
unfiltriert		0.037	55	0.28	8

Proben	Spectro.	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Sr	Zn
Trad I	mg/l	0,0704	< 0,03	< 0,03	< 0,04	1,404	0,2688	< 0,03	0,0348	< 0,04
Trad II	mg/l	0,0104	< 0,03	< 0,03	< 0,04	0,1674	0,01	< 0,03	0,0266	< 0,04
Trad III	mg/l	0,0122	< 0,03	< 0,03	<0,04	0,0672	0,0283	<0,03	0,0248	<0,04
Trad IV	mg/l	0,0195	< 0,03	< 0,03	<0,04	0,3337	0,0275	<0,03	0,0298	<0,04
Trad V	mg/l	0,0317	< 0,03	< 0,03	<0,04	0,1426	0,0853	<0,03	0,1003	<0,04
Trad VI	mg/l	0,048	< 0,03	< 0,03	<0,04	0,794	0,913	<0,03	0,2398	<0,04
Trad VII	mg/l	0,0205	< 0,03	< 0,03	<0,04	0,0826	0,01	<0,03	0,0405	<0,04
Trad VIII	mg/l	0,0294	<0,03	<0,03	<0,04	0,0585	0,0404	<0,03	0,0326	0,0461
Trad IX	mg/l	0,0228	<0,03	<0,03	<0,04	0,0842	0,0431	<0,03	0,0447	<0,04
Trad X	mg/l	0,0844	<0,03	<0,03	<0,04	0,0473	0,0401	<0,03	0,1828	<0,04
Trad XI	mg/l	0,0449	<0,03	<0,03	<0,04	0,0386	0,0315	<0,03	0,1002	<0,04
Trad XII	mg/l	0,0855	<0,03	<0,03	<0,04	0,0785	0,2836	<0,03	0,0716	<0,04
Trad XIII	mg/l	0,0301	<0,03	<0,03	<0,04	0,0592	0,0426	<0,03	0,09	<0,04
Trad XIV	mg/l	0,0535	<0,03	<0,03	<0,04	0,318	0,115	<0,03	0,0824	<0,04
Trad XV	mg/l	0,0673	<0,03	<0,03	<0,04	2,202	0,761	<0,03	0,1889	<0,04
Trad XVI	mg/l	0,0281	<0,03	<0,03	<0,04	0,1223	0,1141	<0,03	0,0489	0,1771
Trad XVII	mg/l	0,0283	<0,03	<0,03	<0,04	0,1438	0,1928	<0,03	0,0173	<0,04
Trad XVI-	mg/l									
II		0,0308	<0,03	<0,03	<0,04	0,3404	0,0598	<0,03	0,0304	<0,04
BOB 4	mg/l	0,0277	<0,03	<0,03	<0,04	0,1954	0,0495	<0,03	0,0831	<0,04
BOB 2	mg/l	0,009	< 0,03	< 0,03	< 0,04	0,3504	0,3978	<0,03	0,0327	< 0,04
BOB 3	mg/l	0,009	<0,03	<0,03	<0,04	0,01	0,01	<0,03	0,557	<0,04
Stausee	mg/l									
Ziga		0,0691	<0,03	<0,03	<0,04	0,618	0,0392	<0,03	0,1014	<0,04
Lac Bam	mg/l	0,0397	<0,03	<0,03	<0,04	0,2254	0,0239	<0,03	0,0686	<0,04
Stausee	mg/l									
Koulniéré		0,061	<0,03	<0,03	<0,04	0,4098	0,01	<0,03	0,1384	<0,04
Stausee	mg/l									
Koulniéré										
unfiltriert		0,0843	<0,03	<0,03	<0,04	1,521	0,0715	<0,03	0,0846	<0,04

Proben	AASC	As (AAS)	Cd (AAS)	Cu (AAS)	Ph (AAS)	Cr (AAS)	Ni (AAS)
Trad I	mg/l	0.00044	0.00018	0.00068	<0.0001	0.001	0.0056
Trad II	mg/l	0.00059	0.00009	0.0109	0.0025	<0.0001	<0.0001
Trad III	mg/l	0.00088	0.00009	0.00443	0.0014	<0.0001	<0.0001
Trad IV	mg/l	<0.0003	0.00013	0.00467	0.0018	< 0.0001	< 0.0001
Trad V	mg/l	<0.0003	0.00011	0.00459	0.0021	<0.0001	<0.0001
Trad VI	mg/l	<0.0003	0.00017	0.00244	0.0046	< 0.0001	< 0.0001
Trad VII	mg/l	< 0.0003	0.00016	0.00124	0.0023	0.0005	0.0014
Trad VIII	mg/l	< 0.0003	0.00012	0.00125	0.0076	0.0136	0.0293
Trad IX	mg/l	< 0.0003	0.00026	0.00778	0.0096	0.0014	0.0014
Trad X	mg/l	< 0.0003	0.00009	< 0.0001	0.0064	0.0129	0.0143
Trad XI	mg/l	< 0.0003	0.00011	0.00278	0.0029	0.001	0.0016
Trad XII	mg/l	< 0.0003	0.00011	0.00243	0.0018	0.0011	0.0024
Trad XIII	mg/l	< 0.0003	0.00149	0.00144	0.0012	0.0012	0.001
Trad XIV	mg/l	< 0.0003	0.00009	0.00412	0.0006	0.001	0.0011
Trad XV	mg/l	< 0.0003	0.00015	0.00151	0.0021	0.001	0.0016
Trad XVI	mg/l	< 0.0003	0.00009	0.00322	< 0.0001	0.001	0.0017
Trad XVII	mg/l	< 0.0003	0.00003	0.00586	0.0091	0.001	0.0016
Trad XVIII	mg/l	<0,0003	0,00008	<0,0001	0,0044	0,0008	0,0015
Trad XIX	mg/l	0,00134	0,00025	0,00371	0,0103	0,0008	0,0021
UFZ3	mg/l	<0,0003	0,00011	0,00239	0,0037	0,0009	<0,0001
UFZ4	mg/l	<0,0003	0,00008	0,00239	0,0013	0,0019	0,0019
BOB 4	mg/l	<0,0003	0,00011	0,00404	0,0007	0,0029	0,0028
BOB 2	mg/l	<0,0003	0,00008	0,00527	<0,00014	0,0002	<0,0001
BOB 3	mg/l	0,00045	0,0002	0,00083	0,0045	0,0008	0,0012
Lac Bam	mg/l	<0,0003	0,00017	0,00048	0,0056	0,001	0,0035
Stausee							
Koulniéré	mg/l	<0,0003	0,00018	0,0052	0,0041	0,0007	0,0068
Stausee Zi-							
ga	mg/l	0,00092	0,00014	0,0052	0,0089	0,0009	0,0017
Stausee							
Loumbila	mg/l	<0,0003	0,00024	0,00572	0,0076	0,0006	0,0042
Steinbruch							
Ziniaré	mg/l	0,0015	0,00016	0,00269	0,0053	0,0017	0,003
Nakambé	mg/l	0,00035	0,00017	0,00912	0,0026	0,0019	0,002
Stausee Ti-	11	0.000.00					0.0004
karé	mg/l	0,00069	0,00011	0,00117	0,0079	0,0007	<0,0001
Yilou	mg/l	<0,0003	0,00016	2,293	0,0045	0,0047	0,0036

Anhang D2: Tabellen der Spurenelemente (Regenzeit)

Proben	ICP-MS.C	Au (ICP-MS)	Rb (ICP-MS)	Th (ICP-MS)	U (ICP-MS)	V (ICP-MS)
Trad I	ng/ml	0,029	0,86	1,17	0,06	1,4
Trad II	ng/ml	0,019	1,06	0,57	0,053	1,5
Trad III	ng/ml	0,017	2	0,064	0,114	0,8
Trad IV	ng/ml	0,015	0,91	0,41	0,023	1,17
Trad V	ng/ml	0,02	1,15	0,61	0,023	0,9
Trad VI	ng/ml	0,025	2,2	0,25	<0,008	0,71
Trad VII	ng/ml	0,009	1,6	0,02	<0,008	0,29
Trad VIII	ng/ml	0,055	2,4	0,53	0,087	0,46
Trad IX	ng/ml	0,034	2,9	0,051	<0,008	0,6
Trad X	ng/ml	0,015	3,6	0,22	0,018	0,91
Trad XI	ng/ml	0,009	3,5	0,029	0,015	1,11
Trad XII	ng/ml	<0,005	0,64	0,003	0,014	0,65
Trad XIII	ng/ml	0,005	1,28	0,087	0,072	0,31
Trad XIV	ng/ml	0,006	1,8	0,119	<0,008	0,51
Trad XV	ng/ml	0,02	0,75	0,9	0,042	1,22
Trad XVI	ng/ml	0,017	0,61	0,092	0,034	0,79
Trad XVII	ng/ml	0,011	0,37	0,003	<0,008	0,18
Trad XVIII	ng/ml	<0,005	2,3	0,003	0,029	0,46
Trad XIX	ng/ml	0,007	4,9	0,043	0,32	1
UFZ3	ng/ml	0,006	1,4	0,048	0,14	1,13
UFZ4	ng/ml	0,007	1,08	0,087	0,019	1,6
BOB 4	ng/ml	0,018	1,05	0,003	0,024	0,91
BOB 2	ng/ml	0,005	0,76	0,21	<0,008	0,32
BOB 3	ng/ml	<0,005	0,85	0,041	0,24	0,85
Lac Bam	ng/ml	0,007	2,8	0,21	0,117	4,2
Stausee Koul-	ng/ml					
niéré		0,008	3,9	0,23	0,17	5,2
Stausee Ziga	ng/ml	0,007	6,4	0,61	0,27	13,1
Stausee	ng/ml					
Loumbila		<0,005	6,2	0,33	0,107	3,2
Steinbruch	ng/ml					
Ziniaré		0,006	7,1	0,26	0,58	1,28
Nakambé	ng/ml	<0,005	4,1	0,19	0,17	7,3
Stausee Tika-	ng/ml					
ré		<0,005	2,3	0,16	0,032	2,4
Yilou	ng/ml	< 0,005	4	0,15	0,19	5,2

Proben	Spectro.	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Si	Sr	Zn
Trad I	mg/l	0,009	< 0,05	<0,04	0,0543	1,032	0,0333	<0,05	5,91	0,0305	<0,04
Trad II	mg/l	0,009	<0,05	<0,04	0,0481	0,4737	0,0283	<0,05	6,71	0,0253	<0,04
Trad III	mg/l	0,0277	<0,05	<0,04	<0,04	0,4465	0,1192	<0,05	7,98	0,0408	<0,04
Trad IV	mg/l	0,009	<0,05	<0,04	0,0444	0,3427	0,042	<0,05	6,74	0,0279	<0,04
Trad V	mg/l	0,0223	<0,05	<0,04	0,0482	0,1495	0,0452	<0,05	8,66	0,0431	<0,04
Trad VI	mg/l	0,0639	<0,05	<0,04	<0,04	0,0774	0,0231	<0,05	5,29	0,1018	<0,04
Trad VII	mg/l	0,0228	<0,05	<0,04	<0,04	0,1141	0,01	<0,05	4,784	0,0271	<0,04
Trad VIII	mg/l	0,0418	<0,05	<0,04	<0,04	0,1058	0,0635	<0,05	5,89	0,0519	<0,04
Trad IX	mg/l	0,0617	< 0,05	<0,04	<0,04	0,0489	<0,02	< 0,05	6,48	0,0784	<0,04
Trad X	mg/l	0,0512	< 0,05	<0,04	<0,04	0,0643	0,0291	< 0,05	6,06	0,0999	<0,04
Trad XI	mg/l	0,0558	< 0,05	<0,04	<0,04	0,0697	0,01	< 0,05	7,11	0,1185	<0,04
Trad XII	mg/l	<0,02	< 0,05	<0,04	<0,04	0,2611	0,0213	< 0,05	10,03	0,0297	<0,04
Trad XIII	mg/l	0,03	< 0,05	<0,04	<0,04	0,1653	0,0318	< 0,05	8,2	0,0587	<0,04
Trad XIV	mg/l	0,031	<0,05	<0,04	<0,04	0,076	0,01	<0,05	7,91	0,0487	<0,04
Trad XV	mg/l	0,0246	< 0,05	<0,04	0,0499	0,671	0,0396	<0,05	10,04	0,0416	<0,04
Trad XVI	mg/l	0,0251	< 0,05	<0,04	<0,04	0,4002	0,0689	<0,05	7,83	0,0274	<0,04
Trad XVII	mg/l	0,0308	<0,05	<0,04	<0,04	0,3158	0,0755	<0,05	10	0,01	<0,04
Trad XVI-	mg/l										
II		0,0278	<0,05	<0,04	<0,04	0,157	0,0391	<0,05	7,08	0,0226	<0,04
Trad XIX	mg/l	0,0644	<0,05	<0,04	<0,04	0,575	0,3837	<0,05	5,26	0,0306	<0,04
UFZ3	mg/l	0,009	<0,05	<0,04	<0,04	0,2603	0,01	<0,05	4,877	0,0274	<0,04
UFZ4	mg/l	0,0211	<0,05	<0,04	<0,04	0,4576	0,01	<0,05	6,54	0,0257	<0,04
BOB 4	mg/l	0,0297	<0,05	<0,04	<0,04	0,0378	0,01	<0,05	11,79	0,1053	<0,04
BOB 2	mg/l	0,009	<0,05	<0,04	<0,04	0,0363	0,01	<0,05	7,73	0,0482	<0,04
BOB 3	mg/l	0,009	<0,05	<0,04	<0,04	0,0928	0,01	<0,05	12,61	0,2094	<0,04
Lac Bam	mg/l	0,0356	<0,05	<0,04	<0,04	1,015	0,0328	<0,05	2,127	0,0339	<0,04
Stausee	mg/l										
Koulniéré		0,0519	<0,05	<0,04	<0,04	1,078	0,0588	<0,05	2,097	0,0373	<0,04
Stausee	mg/l										
Ziga		0,058	<0,05	<0,04	<0,04	1,487	0,056	<0,05	3,22	0,0492	<0,04
Stausee	mg/l	0.0702	-0.05	-0.04	-0.04	1 200	0.0005	-0.05	0.067	0.0671	-0.04
Loumbila	/1	0,0793	<0,05	<0,04	<0,04	1,388	0,0205	<0,05	2,367	0,0671	<0,04
Steinbruch	mg/l	0.072	<0.05	<0.04	<0.04	0.9(2	0.17(0	<0.05	2 9 7 9	0.1200	<0.04
Ziniare		0,073	<0,05	<0,04	<0,04	0,802	0,1709	<0,05	2,878	0,1290	<0,04
INAKAMDe	mg/1	0,0579	<0,03	<0,04	~0,04	1,/30	0,076	<0,05	2,129	0,0508	<i>∖</i> 0,04
Stausee	111 <u>g</u> /1	0.020	<0.05	<0.04	<0.04	0 4220	0.0421	<0.05	2 064	0.0542	<0.04
Vilou	mg/1	0.029	<0.05	<0.04	<pre>>0,04 1.074</pre>	1 524	0.0506	<0.05	2,904	0.0343	~0,04
11100	mg/1	0,005/	~0,03	~0,04	1,9/4	1,324	0,0390	~0,03	2,370	0,0404	0,0055

	Messwerte [d	l°/ ₀₀] -> VSMOW		
Proben	¹⁸ O/EQ	D/EQ	Exzess/EQ	Datum
Trad I	-4,14	-24,2	8,9	30.03.2007
Trad II	-4,01	-25,3	6,8	30.03.2007
Trad III	-4,35	-25,7	9,1	31.03.2007
Trad IV	-3,31	-19,6	6,9	30.03.2007
Trad V	-4,07	-24,7	7,8	02.04.2007
Trad VI	-3,58	-21,0	7,6	01.04.2007
Trad VII	-3,5	-20,6	7,4	01.04.2007
Trad VIII	-3,52	-20,9	7,2	01.04.2007
Trad IX	-4,01	-25,3	6,7	01.04.2007
Trad X	-4,15	-25,8	7,4	02.04.2007
Trad XI	-4,45	-27,4	8,1	02.04.2007
Trad XII	-4,24	-26,6	7,8	02.04.2007
Trad XIII	-4,16	-25,2	8,1	02.04.2007
Trad XIV	-3,82	-23,5	7,0	02.04.2007
Trad XV	-4,23	-25,3	8,5	02.04.2007
Trad XVI	-4,58	-26,8	9,8	31.03.2007
Trad XVII	-4,57	-26,3	10,2	31.03.2007
Trad XVIII	-4,44	-26,4	9,1	31.03.2007
BOB 2	-3,87	-23,7	7,3	02.04.2007
BOB 3	-5,96	-38,8	8,9	01.04.2007
BOB 4	-4,37	-24,8	10,2	31.03.2007
Lac Bam	7,26	28,7	-29,4	01.04.2007
Stausee Koulniéré	2,00	5,90	-10,1	02.04.2007
Stausee Ziga	13,97	63,7	-47,7	01.04.2007

Anhang E: Tabellen der Wasserstoff- und Sauerstoffverhältnisse

	Messwerte [d	l°/ ₀₀] -> VSMOW		
Proben	¹⁸ O/EQ	D/EQ	Exzess/EQ	Datum
Trad I	-4,38	-29,0	6,0	18.09.2007
Trad II	-4,09	-24,7	8,4	18.09.2007
Trad III	-3,72	-20,4	9,4	21.09.2007
Trad IV	-3,55	-20,7	7,7	18.09.2007
Trad V	-3,60	-19,6	9,2	20.09.2007
Trad VI	-3,92	-23,8	7,6	20.09.2007
Trad VII	-3,55	-20,1	8,3	18.09.2007
Trad VIII	-3,50	-20,2	7,7	20.09.2007
Trad IX	-3,49	-19,8	8,1	20.09.2007
Trad X	-4,33	-25,4	9,2	20.09.2007
Trad XI	-4,30	-25,8	8,6	20.09.2007
Trad XII	-3,44	-19,4	8,1	21.09.2007
Trad XIII	-3,88	-23,0	8,0	21.09.2007
Trad XIV	-4,01	-24,0	8,1	21.09.2007
Trad XV	-3,34	-18,6	8,0	20.09.2007
Trad XVI	-4,44	-26,4	9,1	21.09.2007
Trad XVII	-4,52	-26,6	9,6	21.09.2007
Trad XVIII	-4,67	-28,3	9,1	21.09.2007
Trad XIX	-4,33	-27,2	7,4	21.09.2007
UFZ3	-4,22	-29,2	4,5	18.09.2007
UFZ4	-3,81	-23,7	6,8	18.09.2007
BOB 2	-4,29	-27,4	6,9	20.09.2007
BOB 3	-4,43	-26,9	8,5	20.09.2007
BOB 4	-4,37	-26,3	8,7	21.09.2007
Lac Bam	-7,46	-57,0	2,6	19.09.2007
Stausee Koulniéré	-5,83	-44,7	1,9	21.09.2007
Stausee Ziga	-6,92	-50,3	5,0	19.09.2007
Loumbila	-6,19	-45,3	4,2	19.09.2007
Steinbruch Ziniaré	-2,33	-24,1	-5,4	19.09.2007
Nakambé	-6,90	-51,6	3,6	19.09.2007
Stausee Tikaré	-3,92	-31,1	0,3	18.09.2007
Yilou	-6,91	-51,7	3,6	18.09.2007

Anhang F: Messverfahren der Topographie der Staumauer

Von einem Nullpunkt (Oberkannte des Abflusses am Abstrom) aus wurden die relativen Höhen der Staumauer über seine gesamte Länge auf folgende Weise gemessen

- das Nivelliergerät wurde auf ein Stativ montiert und eingestellt bis zum Erreichen eines horizontalen Zustands des Geräts. Dieser Zustand ist durch die Zentrierung der Libelle bezeichnet;
- 2. dann wird die Höhe zwischen dem Boden und dem Gerät gemessen;
- 3. die Messlatte wird vertikal in einen stationären Zustand gebracht;
- 4. die Messungen werden dann vorwärts auf drei Ebenen von dem Nullpunkt ausgeführt: untere, obere und zentrale. Diese sind durch drei horizontale Linien im Ziel des Nivelliergeräts markiert. Die Lesung der zentralen Ebene wird nur für Überprüfungszwecke gemacht, da die der oberen und unteren Ebenen für die Ermittlung der Höhe ausreichend sind (Mittelwert der beiden Messungen); dann wird das Gerät auf die Rückseite der Messlatte (180° und 50 m weiter für diese Arbeit), die auf seiner Position bleibt, für die nächsten Messungen gebracht. Die gleichen ersten Einstellungen des Geräts werden durchgeführt und die Messungen gemacht. Anschließend wird die Messlatte umgestellt und das Gerät 180° (Richtung Uhrzeiger) gedreht. Die Umstellverfahren werden so oft wie nötig wiederholt;
- 5. der horizontale Abstand zwischen dem Nivelliergerät und der Messlatte kann auch durch die Differenz zwischen den oberen und unteren Messwerten erzielt werden.

Für die Ermittlungen der relativen Höhen der verschiedenen Punkte werden die Differenzen zwischen den oberen und unteren Messungen minus die Höhe des Geräts über dem Boden verglichen. Ein Punkt ist höher als ein anderer, wenn seine relative Höhe größer ist und umgekehrt. Um die realen Höhen der Messpunkte zu bekommen, werden die gewonnen Differenzen zu der mit dem GPS ermittelten Höhe des Nullpunktes addiert.

Lebenslauf

Julien Nikiema *DEA Hydrogeologe* 01 BP 214 c/o Kindé Bakary Ouagadougou, Burkina Faso *clo* (Post) Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH UFZ/Department Hydrogeologie Theodor-Lieser-Straße 4 D-06120 Halle (Saale)

Leipzig, 10. November 2008

Name:	Nikiema				
Vorname:	Julien				
Geb.:	20.03.1974				
Geburtsort:	Bobo Dioulasso BF				
Staatsangehörigkeit:	Burkina Faso				
Familienstand:	verheiratet, zwei Kinder				
Ausbildung:					
1994	Abitur (Gymnasium in Bobo Dioulasso)				
1994 - 1998	Universität Ouagadougou (Burkina Faso); Licence de Géologie				
	(= Bachelor of Geology)				
1999	Universität Ouagadougou (Burkina Faso); Maîtrise de Géologie				
	(= Master); Fachrichtung: Hydrogeologie				
1999-2002	Universität Cheick Anta Diop (Dakar, Senegal); Diplôme				
	d'Etudes Approfondies (Diplom-Geologe); Diplomarbeit in Hydrogeologie:				
	"Caractérisation des forages à haut rendement en zones de socle cristallin du Burkina Faso" ("Charakterisierung von Bohrungen hoher Förderleistung in kristallinen Gebieten in Burkina Faso") (Stipendiat des Ministeriums für Bildung der Regierung von Burkina Faso [Ministère des enseignements se- condaire, supérieur et de la recherche scientifique])				
10.2004 - 03.2005	DAAD-Stipendiat für Sprachkurs am InterDaf Leipzig; deutsch; DSH				
	Abschluss (gut)				
Seit 04.2005	Promotionsstipendium des DAAD; Hochschule: Universität Leipzig, Arbeits- stelle: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, UFZ, Department Hydro- geologie.				
	Abschluss voraussichtlich März 2009				

Curriculum vitae

Praktische Tätigkeit:					
2002 - 2004	B-GEO-HYDRO Ouagadougou (Erkundungsunternehmen): Geoelektrische Untersuchungen an Hydro-Bohrungen				
2002 - 2004	Universität Ouagadougou: Assistent und Lehrtätigkeit in Geophysik				
	(allgemeine Bohrlochgeophysik, speziell Geoelektrik) und Hydrogeologie; praktische Arbeiten im hydrogeologischen Labor der Universität				
Weiterbildung:					
Juni 2005	Weiterbildungskurs "Hydrogeologische Untersuchungsmethoden",				
	Eberhard-Karls-Universität Tübingen				
November 2007	Weiterbildungskurs "Projektmanagement" UFZ AS Leipzig				
Vorlesungen	Vorlesungen und Übungen an der Martin-Luther-Universität Halle- Wittenberg:				
	Prof. Dr. P. Wycisk - Hydrogeologie (1 Semester);				
	Prof. Dr. Mario Schirmer - Probenahmetechniken in der Hydrogeologie (V/\ddot{U}) - 1 Semester;				
	Prof. Dr. C. Gläßer - Einführung in die Methoden der Fernerkundung - 1 Se- mester;				
	Dr. Cornelia Leser - Spezialkurs Nutzung von ERDAS Imagine - Daten				
Veröffentlichungen:	Eingereicht bei Environmental Geology: "Trace elements and their corre- lations in hand-dug wells in a laterite environment in semi arid region: case of Tikaré, Northern Burkina Faso"				
	Julien Nikiema, Walter Gläßer, Ronald Krieg, Mario Schirmer				
	Eingereicht bei Environmental Earth Sciences: "Correlative and compara- tive characterization of main ion concentrations in laterite groundwater in semi arid area: Case study of Tikaré, Northern Burkina Faso"				
	Julien Nikiema, Walter Gläßer, Ronald Krieg, Mario Schirmer				
	In Vorbereitung: "Characterisation of the signatures of the stables iso- topes of hydrogen and oxygen in well water in a Laterite environment in a semi arid area: case of Tikaré, Northern Burkina Faso"				
Vorträge:	April 2005 in Großbothen: Doktorandenklausur				
	Mai 2006 in Leipzig: Doktorandenkonferenz				

Für die Richtigkeit der Angaben:

Erklärung

Hiermit versichere ich,

1. dass die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt und dass die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken in der Arbeit als solche kenntlich gemacht wurden;

2. dass außer der Personen, bei denen ich mich bedanken habe, weitere Personen bei der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt waren, insbesondere von dem Bewerber oder in seinem Auftrag weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen;

3. dass die vorgelegte Arbeit weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zwecke einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt und in ihrer Gesamtheit noch nicht veröffentlicht wurde. Ich teile mit, dass kein früherer erfolgloser Promotionsversuch stattgefunden hat.

Julien Nikiema

Leipzig, 10. November 2008

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde durch den DAAD (Deutscher Akademischer Austauschsdienst) und das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ finanziert. Sie wurde am UFZ - Halle, Department Hydrogeologie angefertigt. Ohne den DAAD und das UFZ hätte ich diese Arbeit wahrscheinlich nie machen können. Ich danke den Verantwortlichen dieser Institutionen sehr herzlich für die gegebene Möglichkeit, die mir erlaubt hat, meine Dissertation anzufertigen und in einer Gruppe von hervorragenden Wissenschaftlern zu arbeiten.

Des Weiteren danke ich sehr herzlich Prof. Dr. Walter Gläßer und Prof. Dr. Mario Schirmer für ihre Betreuung, Ratschläge, Geduld, Kooperation und unschätzbare Hilfe.

Für seine unermüdliche Hilfe bei der Vorbereitung und Durchführung von Probenahmekampagnen und bei der Entwicklung von benötigtem Equipment möchte ich mich herzlich bei Ronald Krieg bedanken. Durch ihn war die Datenerhebung vor Ort erst möglich.

Für die Analyse der Haupt- und Spurenelemente und der stabilen Isotopen möchte ich Silke Köhler, Petra Blümel und dem UFZ-Department Analytik in Leipzig danken.

Bernd Hermann hat mir bei der Nutzung von ArcGIS® und Erdas Imagine® sehr viel geholfen. Dafür bedanke ich mich bei ihm.

Ich möchte Dr. Christian Siebert (für seine Tipps und Bereitschaft), Dr Stefan Geyer (für seinen Gutachten), Dr. Gerard Strauch, Dr. Jens Hagenau, Dr. Ulrich Weller (für seine Hilfe bei der Herstellung der Röntgenbilder der Lateritproben), Dr. Tino Rödiger, Herrn Christian Schmidt, Mark Pohlert, Oliver Spott und Michael Dilbat für ihre unschätzbare Hilfe, Kooperation und Unterstützung bei der Korrektur der deutschen Version meiner Arbeit danken. Prof. Dr. Cornelia Gläßer und Dr. Cornelia Leser (MLU-Halle) danke ich auch für die Einweisung in die Digitalbildverarbeitung.

Während der Feldarbeitskampagnen waren Daouda Savadogo (Universität Ouagadougou, Burkina Faso), Adama Ouédraogo (Fahrer), Seydou Sanou (Gewinnung der Niederschlagdaten), Rémy Ouédraogo, und Yassaha (Tikaré) immer zu Stelle, um mich zu unterstützen. Dafür bedanke ich mich sehr herzlich. Dabei danke ich auch dem "Laboratoire d'Hydrogéologie" (Universität Ouagadougou, Burkina Faso) für die Bereitstellung von Feldequipment.

Ich danke auch sehr herzlich Frau Bettina Schneider für die abschließende Korrektur dieser Arbeit. Ich kann auch Frau Ursula Kaßler (UFZ-Halle) nicht vergessen. Sie war da, wenn ich sie für die Literatur brauchte. Dafür sage ich danke.

Ein herzlichen Dank geht auch an meinen «Cousin» Dr. Gbenato Enoch Dachigan Dako (Laboratory of Plant Sciences Faculty of Agronomic Sciences, University of Abomey Calavi, Cotonou, Benin) und Dr. Ir. Irenikatche AKPONIKPE für die Korrektur der französische Version meiner Dissertation, und an alle DAAD Mitarbeiter für ihre Kooperation und Unterstützung.