

Teilprojekt A2**Bodenwasserdynamik, Oberflächenabfluß, Grundwasserneubildung und Bodendegradation auf der lokalen und der regionalen Skala**

Antragsteller	Fach
Prof. Dr. B. Diekkrüger (Koordinator) Geographisches Institut, Universität Bonn	Hydrologie
Prof. Dr. B. Reichert, Geologisches Institut, Universität Bonn	Hydrogeologie
Prof. Dr. A. Skowronek Institut für Bodenkunde, Universität Bonn	Bodenkunde

Zusammenfassung:

Das Teilprojekt A2 hat innerhalb des IMPETUS-Projektes die Aufgabe, die hydrologischen Prozesse auf verschiedenen Skalen zu beschreiben und zu analysieren. Ziel ist es, ein hydrologisches Modell bereitzustellen, mit dem Szenarien unter sich wandelnden Umweltbedingungen durchgeführt werden können.

Erste Voraussetzung für das Erreichen dieses Ziels ist die intensive Untersuchung eines repräsentativen kleinen Einzugsgebietes. Dieses Einzugsgebiet wurde im letzten Jahr in Abstimmung mit allen interessierten Gruppen ausgewählt (Aguima-Einzugsgebiet im Haute Vallée de l'Ouémé) und wird Super Test Site genannt. Der Aguima ist ein Nebenarm des Aguimo, der ein Zulauf des Térou ist. Der Térou mündet dann südlich von Béterou in den Ouémé. Die Größe des Gebietes beträgt ca. 30 km². Morphologisch liegt es in einer weit ausgedehnten Ebene zwischen ca. 250-320 m Höhe über NN. Im Süden des EZG, an der Autopiste Bassila-Beterou liegt die Ortschaft Dogué. Im Herbst 2000 wurde das Gebiet während der ersten Feldkampagne intensiv begangen und die Standortauswahl für die Installation der Meßgeräte durchgeführt. Mit der Instrumentierung wird zur Zeit begonnen. Zu Beginn der Regenzeit im Juni 2001 sollen möglichst alle kontinuierlich Daten erfassenden Geräte im Aguima-Einzugsgebiet installiert sein, damit die gesamte Regenzeit erfaßt werden kann. Installiert werden Geräte, die Untersuchungen zum Gebietswasserhaushalt (A2-1 und A2-2), zum Bodenwasserhaushalt (A2-1), zur Grundwasserneubildung (A2-4) und zur Bodenerosion (A2-3) ermöglichen.

Neben der Standortauswahl wurde während des Geländeaufenthaltes schon eine intensive Beprobung der Böden des Aguima-Einzugsgebietes entlang von Transekten vorgenommen (A2-1 und A2-3). Neben der Bodenansprache wurden zahlreiche gestörte und ungestörte Bodenproben entnommen, um im Anschluß an den Aufenthalt im Labor bodenphysikalische und bodenchemische Analysen durchzuführen, die die Böden charakterisieren und bei der Parametrisierung des hydrologischen Modells behilflich sind.

Als hydrologisches Modell wurde sowohl für lokale als auch für die regionale Anwendung das Modell TOPLATS (FAMIGLIETTI & WOOD (1994), PETERS-LIDARD ET AL. (1997)) ausgewählt. Es

basiert auf einem die vertikalen Wasserflüsse berechnenden SVAT-Schema (soil vegetation atmosphere transfer scheme), dessen rasterbasiert berechnete Wasserflüsse über den TOPMODEL-Ansatz lateral umverteilt werden. Erste Testläufe konnten bereits erfolgreich durchgeführt werden.

Für die Simulationen mit TOPLATS werden eine Reihe von flächenhaften und punktuellen Eingabedaten benötigt, die in einem Informationssystem verwaltet werden sollen. Der Aufbau dieses Hydro-GIS ist so weit fortgeschritten, daß nach dem nächsten Geländeaufenthalt mit hydrologischen Simulationsläufen in Teileinzugsgebieten des Haute Vallée de l'Ouémé begonnen werden kann. Informationen über die Böden, die Topographie, die Landnutzung und die Geologie liegen allerdings in unterschiedlicher Qualität und Auflösung vor, so daß die Datenbasis weiterhin aktualisiert und verbessert werden muß.

Für den kommenden Geländeaufenthalt sind deswegen unter anderem auch eine intensive Bodenkartierung (A2-3) und eine geologische Übersichtskartierung (A2-4) geplant, um die Datengrundlage zu verbessern. Des weiteren sind Bodenprobenahmen im gesamt Térou-Einzugsgebiet vorgesehen, die der Parametrisierung des regionalen hydrologischen Modells dienen sollen. Abgeschlossen werden die Aktivitäten im Gelände hinsichtlich der zuvor erwähnten Instrumentierung des Einzugsgebietes.

Im Teilprojekt A2 wurden eine Nachwuchswissenschaftler- (post-doc) und drei Doktorandenstellen beantragt. Alle Stellen sind mittlerweile besetzt, auch wenn dieses in einem Fall erst zu Beginn 2001 erfolgen konnte. Die Beschaffung der Geräte ist soweit abgeschlossen. Leider ist über die Ende 2000 beantragte Umwidmung von Geräten bislang noch nicht entschieden worden, so daß die notwendige Ergänzung der Ausstattung noch ansteht. Für die erfolgreiche Bearbeitung des Projektes werden allerdings die beantragten Geräte dringend benötigt.

Der Aufenthalt im Untersuchungsgebiet im Herbst 2000 war wichtig für die Wahl der endgültigen Untersuchungsstandorte und die erste Beprobung des Geländes. Das generelle Konzept eines intensiv untersuchten Teileinzugsgebiet war bereits im Vorfeld diskutiert und während der Vor-exkursion im Frühjahr 2000 entschieden worden. In der derzeit laufenden Geländekampagne werden die Geräte installiert und das Gebiet intensiv beprobt.

Durch die enge Abstimmung zwischen den verschiedenen Teilprojekten ist gewährleistet, daß ein kohärenter Datensatz für die Analyse und insbesondere für die Modellierung der Wasserflüsse erstellt wird. Die vorgesehene Abstimmung der Arbeiten (räumlich und zeitlich) und deren Vorbereitung (z.B. digitale Aufbereitung von Karten) hat sich als praktikabel herausgestellt. Die Vorarbeiten des CATCH-Projektes sind für die Durchführung dieses Teilprojektes von hoher Bedeutung. Auch wenn viele Daten bislang nur sehr kleinmaßstäbig vorliegen, bilden sie eine sehr gute Datenbasis für die regionale Analyse.

Durch die Projektorganisation (verantwortlicher Nachwuchswissenschaftler und Doktoranden) wird eine enge Kooperation innerhalb des Teilprojektes und zwischen den verschiedenen Teilprojekten ermöglicht.

Im folgenden werden die ersten Ergebnisse der einzelnen Workpackages vorgestellt. Aufgrund des bislang kurzen Bearbeitungszeitraums sind diese Darstellungen z.T. deskriptiv, verdeutlichen aber, daß das beantragte Konzept tragfähig und erfolgversprechend ist.

Workpackage A2-1: Untersuchungen zum Bodenwasserhaushalt eines kleinen Einzugsgebietes

Zielsetzung des Workpackage

Ziel des Workpackage A2-1 ist es, die bodenhydrologischen Prozesse auf der lokalen Skala zu erfassen, zu quantifizieren und mit einem dynamischen Simulationsmodell zu beschreiben. Die hydrologischen Untersuchungen in Benin beschränken sich bis jetzt vor allem auf großskalige Untersuchungen (CATCH Projekt), so daß detaillierte Untersuchungen der Prozesse des Bodenwasserkreislaufes am Standort notwendig sind, um die vorherrschenden Prozesse zu verstehen.

Die gewonnen Kenntnisse sind auch für die regionale Modellierung (A2-2) von großer Bedeutung.

Die Untersuchung zur Bodenwasserdynamik, Infiltration, Abflußbildung werden im ca. 30 km² großen Aguima-Einzugsgebiet, das sich im oberen Ouémé-Einzugsgebiet befindet, durchgeführt. Hier werden die Arbeiten diese Workpackages mit den Untersuchungen des Workpackage A2-4 Grundwasserneubildung und Workpackage A2-3 Bodendegradation und auch von Teilprojekt A3 koordiniert durchgeführt.

Methodik und durchzuführende Arbeiten

Zur Charakterisierung der Bodenwasserdynamik werden zwei Bodenwassermeßstationen im Aguima-Einzugsgebiet installiert, um eine zeitlich hoch aufgelöste Erfassung der Bodenwasserdynamik zu gewährleisten. Die räumliche Variabilität wird mit Hilfe mobiler TDR-Systeme erfaßt. Des weiteren wird die Infiltrationsrate mittels Haubeninfiltrrometer ermittelt.

Die für die Modellierung benötigten Klimadaten werden mit zwei Klimastationen, die im Aguima-Einzugsgebiet installiert werden, gemessen. Zur Erfassung des Abflusses werden im Aguima und in Nebenbächen Pegel errichtet, die den Wasserstand kontinuierlich aufzeichnen. Die Abflußdaten dienen zur Validierung der Modellergebnisse.

Durchgeführte Geländearbeiten Feldkampagne Herbst 2000

Ziel des Geländeaufenthaltes waren neben der ersten Erkundung des Geländes die Auswahl der Meßstandorte der in Abschnitt 2 aufgeführten Meßgeräte. Weiterhin sollte ein erster Überblick über die bodenhydrologischen Verhältnisse gewonnen werden.

Neben den Geländearbeiten diente der Aufenthalt auch zur Absprache mit Kooperationspartnern des CATCH-Projektes und der Université National du Bénin.

Auswahl der Meßstandorte

Für die Auswahl der Meßstandorte war eine Begehung des Geländes in der Regenzeit von großer Bedeutung, da die Begehrbarkeit im Vergleich zur Trockenzeit stark eingeschränkt ist.

Es zeigte sich, daß das Gelände abseits der Wege aufgrund der dichten und hohen Vegetation und der häufig vorkommenden sumpfigen Bereiche (bas-fonds) sehr schlecht begehbar ist. Aufgrund dieser Tatsache ist die Auswahl der Meßstandorte auf wegnähe Bereiche beschränkt, damit der Zugang für Installation, Wartung und für das Auslesen der Meßdaten gewährleistet ist.

Ausgewählte Standorte für Abflußmeßstationen

Die ausgewählten Standorte sind in Abb. A2-1 dargestellt.

1. Oberes Einzugsgebiet nach Zusammenfluß zweier Bäche

Charakterisierung des Einzugsgebiets: keine Ackernutzung, relativ natürliche Vegetation (Savanne). Anthropogene Beeinträchtigung durch selektiven Holzeinschlag und Brände, die von der Dorfbevölkerung zur Tierjagd einmal jährlich gelegt werden.

2. Einzugsgebiet Dorfnähe

Charakterisierung des Einzugsgebiets: aufgrund der Nähe zum Dorf Dogué ist das Gebiet stark ackerbaulich genutzt. Ein Vergleich zwischen einem relativ natürlichen Gebiet (1.) und einem stark anthropogen überprägten Gebiet ist so möglich.

3. Gesamtes Einzugsgebiet, Unterlauf Aguima

Am Gebietsauslaß des Aguima-Einzugsgebiets ist die Installation einer Abflußmeßstation aufgrund der schlechten Zugänglichkeit nicht möglich. Eine Abflußmeßstation am Unterlauf ist deshalb am Ende eines von Dogué aus befahrbaren Weges geplant.

Die Einzugsgebiete von Abflußpegel 1 und 2 sind ca. 3 km² groß. Durch die unterschiedliche Landnutzung der Einzugsgebiete, Pegel 1 weitgehend natürliche Vegetation (Savanne) und Pegel 2 hauptsächlich landwirtschaftlich genutzt, kann der Einfluß der Landnutzung auf die Abflußbildung verglichen werden. Auf dieser kleinen Skala wird das SVAT-Modell TOPLATS (FAMIGLIETTI & WOOD 1994) auf seine Anwendbarkeit getestet und ggf. modifiziert. Das Einzugsgebiet von Pegel 3 ist mit einer Größe von ca. 20 km² bereits im mesoskaligen Bereich. Dies stellt der Übergang zur regionalen Modellierung dar, die von Workpackage A2-2 für das obere Ouémé-Einzugsgebiet durchgeführt wird. Für dieses Gebiet ist es nicht mehr möglich, flächendeckend bodenhydrologische Parameter aufzunehmen, so daß in der Bodenkarte definierte Parameter anhand von Stichproben im Gelände überprüft bzw. angeglichen werden müssen.

Ausgewählte Meßstandorte

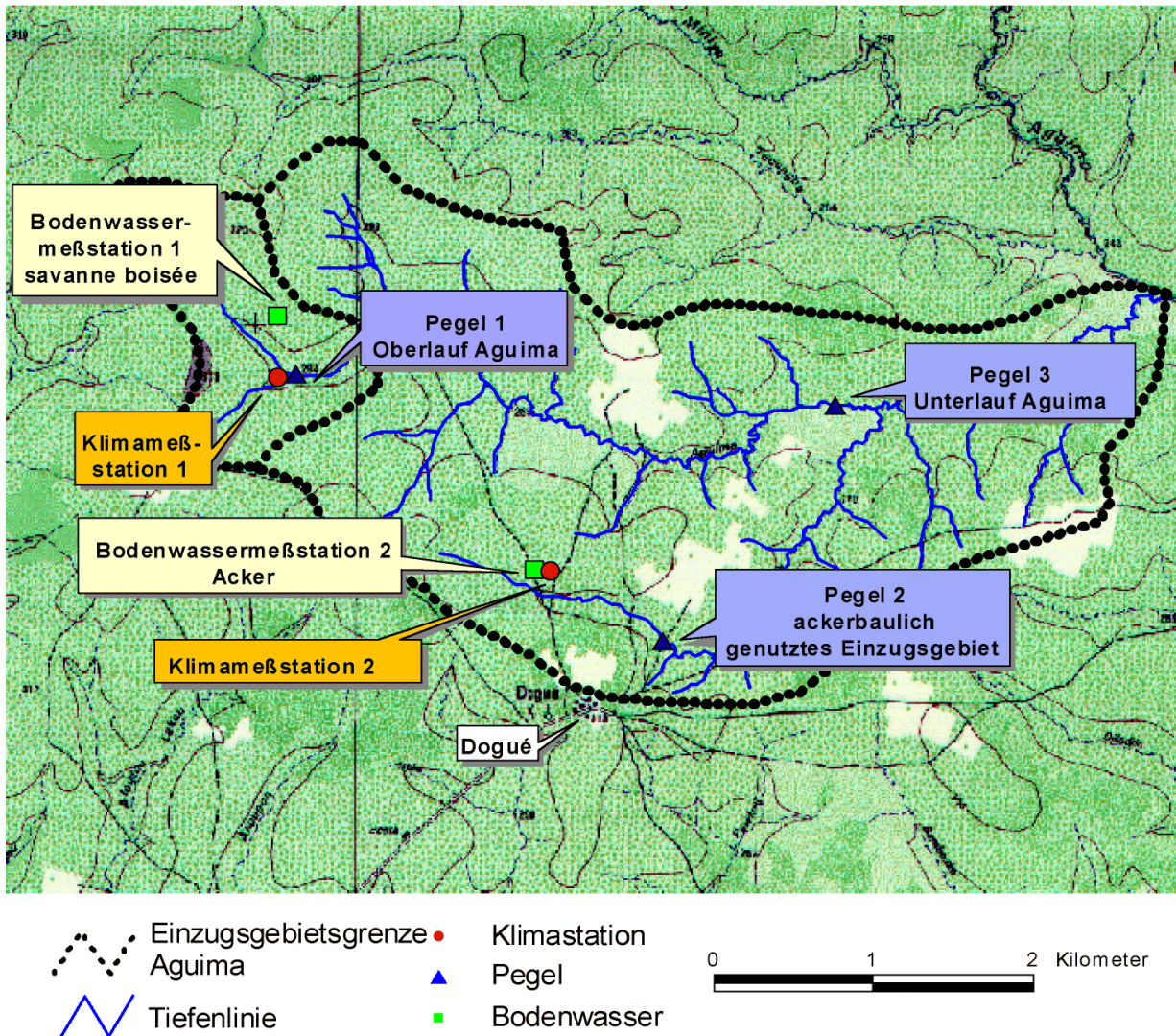


Abb. A2-1: Lage der ausgewählten Meßstandorte

Ausgewählte Standorte für Bodenwassermeßstationen

Im Rahmen des Workpackage A2-1 werden zwei Bodenwassermeßsysteme im Aguima-Einzugsgebiet installiert. Beide Systeme sind mit TDR-Sonden und mit Tensiometern ausgestattet, die in 4 unterschiedlichen Tiefen installiert werden. Grundlage für die Auswahl der Meßtiefen war die bodenkundliche Aufnahme, die in Zusammenarbeit mit Workpackage A2-3 während des Aufenthalts durchgeführt wurde.

Die Meßstandorte wurden im oberen Aguima-Einzugsgebiet im Einzugsgebiet von Pegel 1 (Bodenwassermeßsystem 1) und im Einzugsgebiet von Pegel 2 (Bodenwassermeßsystem 2) ausgewählt. Während System 1 im Bereich natürlicher Vegetation installiert wird, soll System 2 auf einem Acker eingebaut werden, so daß ein Vergleich des Bodenwasserhaushaltes bei verschiedenen Landnutzungen möglich ist.

Ausgewählte Standorte für Klimameßstationen

Für die Modellierung mit SVAT-Systemen sind zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Klimadaten v.a. zur Berechnung der Evapotranspiration von großer Bedeutung. Im Rahmen von Workpackage A2-1 werden im Aguima-Einzugsgebiet zwei voll ausgerüstete Klimastationen aufgebaut. Eine Station wird im Bereich des Oberlaufs des Aguima in der Nähe eines bas-fonds installiert. Hier ist durch das Fehlen von Bäumen eine relativ ungestörte Messung der Einstrahlung gewährleistet. Eine weitere Station wird auf dem selben Feld wie Bodenwassermeßsystem 2 installiert. Beide Standorte sind in Abb. A2-1 dargestellt.

Bodenkundliche Übersichtsuntersuchung

Um einen Überblick über die bodenkundlichen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet zu bekommen, wurden in Form von Transekten mit Hilfe des Pürckhauer-Bohrstocks die Bodenansprache vorgenommen. Die Betrachtung der verschiedenen Bodenverhältnisse ist für die Auswahl eines repräsentativen Standortes zur Installation der Bodenwassermeßstation von großer Bedeutung. Die Arbeiten wurden schwerpunktmäßig im oberen Aguima-Einzugsgebiet durchgeführt. In der 4.-6. Woche des Aufenthalts wurde die Aufnahme zusammen mit Workpackage A2-3 auch weiter im Unterlauf durchgeführt.

Die Untersuchungen zeigten einen relativ einheitlichen Aufbau der Böden. Der Oberboden hat einen sehr hohen Sandanteil (z.T. 80 %). Im Verlauf des Bodenprofils nimmt der Tongehalt meist zu. Sehr auffällig ist die meist in 60 – 80 cm Tiefe (z.T. auch schon bei 40 cm) auftretende schuttreiche Schicht mit einem Skelettanteil von 40 – 50 % und häufig einem höheren Tonanteil als in den darüberliegenden Bodenschichten. Hierbei handelt es sich um Lateritschutt (Plinthite). Eine Ausnahme bilden hier Böden am Fuße des Mt. Général de Gaulle. Hier wurde ein völlig

schuttfreier, aber sehr tonreicher Boden vorgefunden, der einen Tongehalt von 47 % im Unterboden aufweist.

Im Rahmen der bodenkundlichen Übersichtsuntersuchung wurden im oberen Aguima-Einzugsgebiet Bodenproben entnommen. Es wurden gestörte Proben zur Korngrößenanalyse und Humusbestimmung und ungestörte Proben (Stechzylinder) zur Bestimmung der ku- und pF-Kurve und zur Bestimmung der Lagerungsdichte entnommen. Die Proben wurden an jedem Hang der Super Test Site an repräsentativen Stellen entnommen. Die Probenentnahme konnte häufig mit Arbeiten von B. Junge (A2-3), die für die Profilaufnahme Bodengruben anlegte, kombiniert werden.

Untersuchung des Bodenwassergehalts

Mit Hilfe einer mobilen TDR-Sonde wurden erste Untersuchungen zum Bodenwassergehalt verschiedener Standorte der Super Test Site durchgeführt. Es wurde eine große Variabilität innerhalb des Untersuchungsgebiets festgestellt. In bas-fonds wurde erwartungsgemäß die höchsten Bodenfeuchtwerte (zwischen 39,5 und 45,7 Vol.-%) gemessen. Im Galeriewald lag die Bodenfeuchte zwischen 26,5 und 36,4 Vol.-%. Im Bereich der Savannenvegetation (savanne boisée und savanne arborée) wurden Bodenfeuchtwerte zwischen 8 und 27 Vol.-% gemessen.

In der nächsten Feldkampagne ist geplant, eine flächendeckende Bodenfeuchteuntersuchung mit Hilfe der TDR-Sonde für das obere Aguima-Einzugsgebiet durchzuführen und geostatistisch auszuwerten.

Durchgeführte Laborarbeiten

Gestörte Proben

Die Körnungsanalysen wurde mit der Pipettiermethode nach KÖHN durchgeführt. Wie schon in Abschnitt 3.2 erwähnt zeigte sich ein hoher Sandgehalt im Oberboden und ein zunehmender Tongehalt im Unterboden. Exemplarisch sind in Tab. A2-1 die Ergebnisse der Körnungsanalysen zweier Böden des oberen Einzugsgebiets dargestellt. Boden 1 zeigt den in Abschnitt 3.2 beschriebenen Aufbau mit einem schuttreichem Unterboden und sandigem Oberboden. Dieser Aufbau wurde bei der Überblicksuntersuchung überwiegend im oberen Aguima-Einzugsgebiet festgestellt. Boden 2 wurde nur am Fuß des Mt. General de Gaulle gefunden. Er zeigt einen zunehmenden Tongehalt mit der Tiefe und einen sehr geringen Skelettgehalt.

Bodenprofil 1

Tiefe in cm	Feinboden [%]			Skelett [%]
	Ton	Schluff	Sand	
0 – 20	9,09	14,99	75,92	2,41
20 – 40	11,12	12,92	75,97	28,13
40 – 100	19,83	16,82	63,35	49,91

Bodenprofil 2

Tiefe in cm	Feinboden [%]			Skelett [%]
	Ton	Schluff	Sand	
0 – 25	20,95	17,08	60,97	0
25 – 50	29,79	14,12	56,10	1,2
50 - 100	47,90	10,96	41,14	1,3

Tab. A2-1: Körnungsanalysen ausgewählter Bodenprofile

Die Humusbestimmung wurde nach der Lichterfeld-Methode durchgeführt. Der Humusgehalt im Oberboden zeigt mit Werten zwischen 1,4 und 4,3 % eine relativ große Variabilität. Der höchste Humusgehalt wurde im Oberboden Fuß des Inselbergs Mt. G. de Gaulle erreicht. Im Unterboden variiert der Humusgehalt zwischen 0,38 und 1,1%.

Ungestörte Proben

Es wurden Stechzylinder zur Bestimmung der ungesättigten Wasserleitfähigkeit (k_u) und der pF-Kurve entnommen. Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit wurde nach dem Meßverfahren nach SCHINDLER (1980) an Stechzylindern mit einem Volumen von 250 cm³ bestimmt. Die Wasserspannungskurve wurde mit Hilfe der Überdruckmethode ermittelt.

Abbildung A2.2 zeigt eine typische pF-Kurve für einen sandigen Oberboden im oberen Einzugsgebiet des Aguima im Vergleich mit einem tonigen Unterboden. Die Kurven demonstrieren den Einfluß der Körnung auf die Wasserhaltefähigkeit. Die Kurve des Sandbodens verläuft im mittleren pF-Bereich relativ flach, da aufgrund der Korngrößenzusammensetzung die Poren einen relativ einheitlichen Durchmesser haben und somit in diesem Bereich eine einheitliche Bindungsstärke des Wassers besteht. Beim Tonboden ist aufgrund des höheren Anteils an Feinporen bei gleichem Wassergehalt ein höheres Matrixpotential vorhanden.

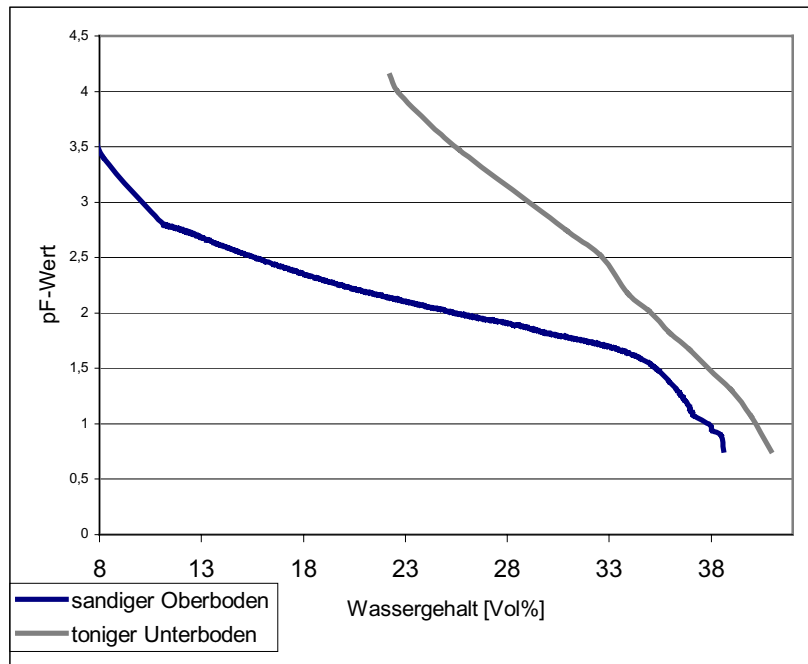


Abb. A2-2: Vergleich der pF-Kurven eines sandigen Oberboden und eines tonigen Unterbodens

Hydrologische Modellierung

Wie in Abschnitt 3.1 erwähnt soll für die Modellierung der Wasserflüsse das SVAT-Modell TOPLATS verwendet werden. Für die kleinskalige Modellierung werden die notwendigen Parameter im Gelände in den nächsten Feldkampagnen erhoben.

Für die Modellierung im mesoskaligen Bereich wurden bereits Grundlagen der notwendigen Eingangsdaten erarbeitet. Auf der Basis der Topographischen Karte 1:50.000 wurde ein Höhenmodell erstellt. Die Qualität des DHM ist allerdings für die kleinskalige Modellierung für das obere Aguima-Einzugsgebiet und das Einzugsgebiet des Abflußpegels 2 nicht ausreichend, da die Isohypsen eine Auflösung von 20 m haben. Aufgrund dessen wird in der nächsten Feldkampagne eine detaillierte Höhenaufnahme mit einem differentiellen GPS in den beiden Teileinzugsgebieten vorgenommen. Für die Modellierung des gesamten Aguima-Einzugsgebietes ist das Höhenmodell jedoch ausreichend. Es wurden für das Gebiet mit Hilfe des Programms TOPAZ (GARBRUCH & MARTZ, 1995) topographische Parameter und Teileinzugsgebietsgrenzen bestimmt.

Für das Untersuchungsgebiet liegt die Bodenkarte im Maßstab 1:200.000 vor. Diese wurde digitalisiert, damit die Daten im GIS für die Modellierung mit TOPLATS analysiert werden können. Sie findet Eingang bei der Simulation des gesamten Aguima-Einzugsgebietes und bei der regionalen Modellierung im Rahmen des Workpackage A2-2.

Zusammenfassung und durchzuführende Arbeiten der nächsten Feldkampagne

Im beschriebenen Zeitraum wurde im Zuge einer Meßkampagne und Laboranalysen ein erster Überblick über die bodenhydrologischen Eigenschaften gegeben. Es wurden erste Grundlagen für die hydrologische Modellierung mit dem Modell TOPLATS erarbeitet. Weiterhin wurden Arbeiten, die im Laufe dieses Jahres in der nächsten Meßkampagne anfallen, vorbereitet, wie z.B. die Auswahl der Meßstandorte. Die in der nächsten Kampagne durchzuführenden Arbeiten sind für die Untersuchungen dieses Workpackage von großer Bedeutung. Neben der Installation aller Meßgeräte sollen die bodenhydrologischen Eigenschaften durch Probennahme und Infiltrationsversuche aufgenommen und geostatistisch ausgewertet werden. Weiterhin erfolgt, wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, die Erstellung eines Geländemodells mit einem differentiellen GPS.

Workpackage A2-2: Regionales hydrologisches Modell

Das regionale hydrologische Modell ist ein wichtiges Teilstück der Modellkette, die im Rahmen von IMPETUS aufgebaut werden soll, um den Einfluß einer sich ändernden Umgebung auf die Hydrologie und damit die Wasserverfügbarkeit von Westafrika zu untersuchen. Es ist in die auf verschiedenen Skalen arbeitenden meteorologischen Modelle eingebettet und berücksichtigt über Randbedingungen den Einfluß der Bevölkerung auf den Wasserhaushalt. Ziel der ersten Phase von Impetus ist es, nach der entgeltigen Modellauswahl die benötigte Datenbasis für das Modell zusammenzustellen und erste Testläufe zu starten.

Die Anwendung des regionalen hydrologischen Modells beruht dabei auf der Nutzung der Erkenntnisse der lokalen Untersuchungen von Bodeneigenschaften, Geologie und Bodenwasserhaushalt der Super Test Site (Aguima-Einzugsgebiet). Die untersuchten Eigenschaften, Zustandsgrößen und Flüsse sollen auf der lokalen Skala die Basis für die kleinräumigen Modellierung des Wasserhaushaltes bilden. Mithilfe der auf dieser Skala gewonnenen Erkenntnisse (z.B. Parametrisierungsschemata) sowie der operationell verfügbaren Daten (Hydro-GIS) kann die regionale Modellierung im *Haute Vallée de l'Ouéme* durchgeführt werden.

Als regionales hydrologisches Modell wurde das Modell TOPLATS ausgewählt (FAMIGLIETTI & WOOD (1994), PETERS-LIDARD ET AL. (1997)). Es basiert auf einer vertikalen Berechnung der Wasserflüsse auf Rasterflächen und einer lateralen Umverteilung des Wassers über den TOPMODEL-Ansatz. In Abhängigkeit von der Skala kann mit einem verteilten oder einem statistischen Modus gerechnet werden. Beim verteilten Modus wird zunächst das betrachtete Einzugsgebiet in Rasterflächen aufgeteilt, deren Wasserflüsse separat berechnet werden. Im Gegensatz dazu werden im statistischen Modus Verteilungsfunktionen der wichtigsten berücksichtigten Eigenschaften (*soils-topographical index*, Vegetation) gebildet und die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion in Intervalle unterteilt. Anschließend werden aus jedem Intervall die Wasserflüsse eines Vertreters berechnet.

Das Modell wurde IMPETUS von der Arbeitsgruppe von E. Wood (Princeton, USA) zur Verfügung gestellt und auf der vorhandenen Hardware unter dem laufenden Betriebssystem installiert und in Betrieb genommen. Die Funktionalität von TOPLATS wurde für einen Testdatensatz aus dem Siegeinzugsgebiet, der vom SFB 350 der Universität Bonn zur Verfügung gestellt wurde, überprüft. Ergänzt werden muß das Modell noch um eine Routing-Routine, die in TOPLATS bisher nicht enthalten ist, damit Translations- und Retentionsprozesse, die im Flußbett auftreten, vom Modell wiedergegeben werden können.

Hydro-GIS für das Haute Vallée de l'Ouémé

Neben der Auswahl und der Inbetriebnahme des Modells war der Aufbau des Hydro-GIS für Benin (insbesondere für das *Haute Vallée de l'Ouémé*) der Schwerpunkt des ersten Projektjahres. In erster Linie handelte es sich dabei um das Zusammenstellen von analogen Kartenmaterial, dessen Digitalisierung und Attributierung. Arc-Info und Arc-View werden hierfür als geographische Informationssysteme genutzt. Mit tatkräftiger Unterstützung der anderen Teilprojekte von IMPETUS konnten die folgenden (analogen) Karten zusammengetragen werden:

- topographische Karten 1:50.000, 1:100.000, 1:200.000
- Bodenkarten 1:200.000, 1:600.000, 1:1.000.000
- geologische Karte 1:200.000

Wesentliche Teile der topographischen Karte 1:50.000 sowie der Bodenkarte 1:200.000 sind inzwischen digitalisiert und liegen als vorläufige Datengrundlage für die hydrologische Modellanwendung vor. Aus den digitalisierten Höhenlinien der topographischen Karte 1:50.000 konnte für das Aguimo-Einzugsgebiet und Teile des Térou-Einzugsgebietes ein digitales Geländemodell (DGM) abgeleitet werden, das eine für die regionale Modellierung ausreichende Genauigkeit besitzt. Da es aber nicht das gesamte *Haute Vallée de l'Ouémé* abdeckt, müssen weitere Datenquellen genutzt werden. In grober räumlicher Auflösung (1km^2) liegt zum Beispiel das globale DGM des USGS (*United States Geological Survey*) vor. Dieses DGM deckt zwar das gesamte Einzugsgebiet ab, gibt aber die Topographie nicht ausreichend aufgelöst wieder. Von den französischen Kooperationspartnern des CATCH-Projektes liegen digitalisierte Höhenlinien der topographischen Karte 1:200.000 vor, aus denen für das Térou-Einzugsgebiet ein Höhenmodell erzeugt werden konnte. Im Laufe dieses Jahres wird ein vom DLR aus ERS-2-Tandem-Daten abgeleitetes, hoch aufgelöstes Geländemodell erwartet.

Abschließende Arbeitsschritte in Bezug auf die digitalisierte Bodenkarte werden die Überführung der polygonbasierten Bodeneinheiten in ein Raster sowie die Zuweisung bodenhydrologischer Eigenschaften zu den Rasterzellen bzw. Bodeneinheiten sein. Mit dem Digitalisieren der geologischen Karten wurde Anfang des Jahres 2001 begonnen, da diese erst Ende 2000 direkt im Benin bei der *Office béninois des Mines* erworben werden konnten. Ergänzt wird der aufgeführte Datenbestand durch Datensätze des CATCH-Projektes.

Zusätzlich zu den aufgeführten Datensätzen wird für die hydrologische Modellanwendung eine Klassifizierung der Landoberfläche bzw. der vorkommenden Vegetation benötigt. Auf mittlere Sicht wird das Teilprojekt A3 eine erste überwachte Klassifizierung der Vegetation vornehmen und zur Verfügung stellen können. Bis diese Daten verfügbar sind, muß eine grobe Klassifizierung des USGS verwendet werden. Verfügbare Datensätze sind die *USGS land use / land cover* Klassifikation (24 Klassen) und die *global ecosystems* Klassifikation (96 Klassen).

Mithilfe der beschriebenen digitalen Kartengrundlage werden zur Zeit erste Simulationen für Teileinzugsgebiete des oberen Ouémé (Aguima, Aguimo, Térou) vorbereitet. Die meteorologi-

schen Antriebsdaten stammen vom Meteorologischen Dienst des Benin und vom Meßnetz des CATCH-Projekts, das vom IRD (*Institut de recherche pour le développement*) betrieben wird. Die zeitliche Auflösung der verfügbaren Datensätze muß vor deren Verwendung angeglichen werden, wobei in der Regel die zeitliche Auflösung erhöht und damit der Datensatz disaggregiert werden muß (z.B. bzgl. der Temperatur, rel. Luftfeuchte und Strahlung nach BORMANN ET AL., 1996).

Die Bestimmung der Modellparameter basiert zum Teil auf Literaturangaben und zum Teil auf Angaben, die in den Datenquellen (Kommentare zu geologischen und Bodenkarten) enthalten sind. Beim nächsten Geländeaufenthalt im Benin werden Experimente zur Bestimmung weiterer Boden- und Pflanzenparameter durch Probenahme durchgeführt werden. Gerade in Bezug auf Pflanzenparameter der tropischen Vegetation ist eine Zusammenarbeit mit der Botanik und der Fernerkundung in Teilprojekt A3 notwendig.

Ergebnisse des Feldaufenthaltes im Herbst 2000

Für das Verständnis der hydrologischen Prozesse und damit für die Modellanwendung in der subhumiden Savannenlandschaft Westafrikas haben sich durch den ersten Feldaufenthalt im Benin im September 2000 einige Aspekte ergeben, die im folgenden Teil erläutert werden sollen.

Die Flußbetten der Fließgewässer in der Region fassen lediglich mittlere und niedrige Abflusssmengen. Bei Hochwasserspitzen treten vor allem die kleinen Vorfluter generell über die Ufer, so daß die Erstellung von verlässlichen Wasserstands-Abfluß-Beziehungen an Pegeln schwierig ist. In sofern müssen die zur Verfügung gestellten Abflußwerte oft kritisch betrachtet werden. Weiterhin müssen diese Vorgänge bei der Modellierung des Routing berücksichtigt werden, da in diesem Fall der Retention im Vorland bei Hochwasser eine entscheidende Bedeutung zukommt. Allgemein erfolgt die Reaktion der kleineren Gewässer (wie z.B. des Aguima oder des Aguimo) auf Niederschlagsereignisse äußerst schnell. Es ist anzunehmen, daß die schnellen Abflußprozesse (Oberflächenabfluß und Interflow) dafür verantwortlich sind. Die Ursachen dafür werden in den Bodeneigenschaften vermutet, da die Topographie größtenteils flach ist. Dieser Fragestellung wird beim kommenden Feldaufenthalt eine große Bedeutung zukommen. Vermutet wird, daß die schnelle hydrologische Reaktion der Böden durch stauende (Tonanreicherungs-)Horizonte in den Böden verursacht wird, die bei der Aufnahme erster Transekte im *Super Test Site* (Aguima-Einzugsgebiet) vorgefunden wurden. Fraglich ist, wie flächenhaft diese stauende Schicht ist, und welchen Einfluß sie auf das den Prozeß der Grundwasserneubildung hat. Weitere Beprobungen beim nächsten Feldaufenthalt werden darüber Aufschluß geben. Bei vielen Bohrstockbeprobungen war der Boden oberhalb der stauenden Schicht sehr naß und unterhalb recht trocken, so daß die Grundwasserneubildung an den beprobten Stellen nur gering sein kann. In Kooperation mit dem Workpackage A2-4 wird die Bearbeitung dieser Frage von großem Interesse sein.

Interflow konnte beim Feldaufenthalt im Herbst 2000 direkt in einer Bodengrube beobachtet werden, die für eine Profilaufnahme ausgehoben wurde. Bei dem oft sehr sandigen Oberboden

(relativ hohe Infiltrationskapazität) und der darunter liegenden tonhaltigen Stauschicht ist davon auszugehen, daß eine solche Zwischenabflußkomponente von Bedeutung sein kann. Schon auf der Vorexkursion im März 2000 wurden in einem bas-fond unterirdische Fließwege entdeckt. Diese Fließwege müssen bei der regionalen Modellierung berücksichtigt werden.

Untersuchungen der Bodenfeuchte haben ergeben, daß die kleinräumige Variabilität des Bodenwassergehaltes im Oberboden (kleinräumig und entlang von Transekten) sehr hoch ist. Die Ursachen dafür (Variabilität der Bodeneigenschaften, Einfluß von Pflanzen, Topographie) sollen in Zusammenarbeit mit den Workpackages A2-1 und A2-3 untersucht und (soweit möglich) in die regionale Modellierung der hydrologischen Prozesse einbezogen werden. Dabei ist zu untersuchen, ob die in TOPLATS integrierten Ansätze ausreichen, um diese Variabilität wiederzugeben, oder ob an dem Modell entsprechende Veränderungen vorgenommen werden müssen.

Ausblick

Die nächsten, direkt anstehenden Aufgaben umfassen die Feldkampagne im Frühjahr 2001 sowie die ersten Simulationsläufe des Wasserhaushaltes im Térou-Einzugsgebiet mit TOPLATS. Während der Feldkampagne soll die Installation eigener Meßgeräte zum Antrieb und zur Validierung des hydrologischen Modells sowie zwecks Erhebung von eigenen Vergleichsdaten zur Überprüfung anderer Datenquellen durchgeführt werden (Workpackage A2-1). Des weiteren sollen bodenphysikalische Parameter erhoben werden. Nach der Feldkampagne stehen unter Nutzung der im Feld erhobenen Parameter erste Simulationsläufe mit dem regionalen hydrologischen Modell TOPLATS für das Térou-Einzugsgebiet an, sobald eine erste Version aller notwendigen Daten im Hydro-GIS zusammengestellt ist.

Workpackage A2-3: Anthropogene Bodendegradierung durch Wassererosion im oberen Ouémé- Einzugsgebiet/Benin - Bodenabtrag in einem Pediplain-Relief mit semihumid-tropischem Sommerregenklima

Exkursion nach Benin (19.09.-09.10.2000)

Die drei Wochen umfassende Exkursion im Herbst des vergangenen Jahres diente der Erkundung des Einzugsgebietes des Flusses Aguima, der Information über aktuelle Bodenerosions- und Landnutzungsformen sowie der Aufnahme von Kontakten zu themenrelevanten Institutionen.

Um einen Eindruck von der Ausdehnung und Gestaltung des Geländes und einen Überblick über die pedogenen Faktoren und bestehende Erosionsschäden zu erhalten, wurden mehrere Geländebegehungen durchgeführt. Weiterhin wurden im gesamten Untersuchungsgebiet zahlreiche Bohrungen systematisch entlang von Transekten vorgenommen. Zwecks detaillierter Charakterisierung und Klassifizierung der Bodeneinheiten nach internationalen Anleitungen, d.h. der FAO-Unesco, USA, Frankreich und der Bundesrepublik wurden mehrere Profilgruben angelegt, beschrieben und horizontweise beprobt.

Da Informationen über die Formen der Landnutzung und Bodenbearbeitung wichtige Hinweise auf mögliche Ursachen der Bodendegradation liefern, wurden Feldbegehungen und Interviews mit Bauern in verschiedenen Dörfern in Zusammenarbeit mit V. Mulindabigwi (A4-3) vorgenommen.

Tätigkeiten im Anschluß an die Exkursion

Die Bodenproben wurden umfangreichen laboranalytischen Untersuchungen unterzogen, um die bodenphysikalischen und –chemischen Parameter zu ermitteln und anhand dessen die Bodenklassifizierung nach internationalen Vorschriften vorzunehmen. Da derzeit weltweit keine standardisierten Analysemethoden vorliegen, erfolgte zunächst ein Vergleich der Vorschriften für bodenkundliche Untersuchungsmethoden. Es stellte sich heraus, daß die Methoden der FAO und USA nahezu identisch sind, während in der Bundesrepublik und in Frankreich z.T. Unterschiede bestehen. Demzufolge wurden die Proben nach verschiedenen Analyseanleitungen mehrfach untersucht und die Ergebnisse verglichen.

Ergebnisse:

Böden

Das *Ausgangsmaterial* der Bodenbildung wird von Metamorphiten, d.h. vorrangig von Migmatiten und Gneisen, gebildet. Die Verwitterung des Festgesteins ist aufgrund der gleichmäßig hohen Temperaturen und Durchfeuchtung von hoher Intensität. Dieser Prozeß findet nicht nur in Oberflächennähe statt, sondern reicht über die eigentliche Bodendecke hinaus bis in größte-

re Tiefen. Über dem Festgestein ist die Verwitterungsdecke somit zweigeteilt, und zwar in Boden (Solum) und Zersatz (Saprolith) (FÖLSTER 1983).

Die Bohrungen bzw. Grabungen haben gezeigt, daß die *Böden* aus mehreren Schichten bestehen. An der Oberfläche liegt feinkörniges Sediment, sog. hillwash, vor, während in der Tiefe Pedimentschutt (basal gravel) über der Steinsohle angetroffen wird. Diese Sortierung in feine und grobe Sedimente ist nach FÖLSTER (1983) das Ergebnis der rückschreitenden Ausräumung von Stufen, der Pedimentation. Die folgende Abbildung A2.3 vermittelt einen Eindruck von einem häufig im Untersuchungsgebiet vorhandenen Boden.



Horizontierung:

Ah

Bt1

Bt2

IICv

Abb. A2-3: Profilgrube. Klassifizierung: O.R.S.T.O.M.: *groupe: Sols ferrugineux tropicaux lessivés*, WRB: *soil unit: Plinthic Lixisols*, FAO: *soil unit: Plinthic Lixisols*, Soil Taxonomy: *great group: Plinthustalfs*, Bodenk. Kartieranleitung: *Typ: Parabraunerde*

Die üppige Vegetation der Savanne boisée und der 25 cm mächtige humose Oberboden lassen auf einen umfangreichen jährlichen Laubfall und eine hohe Aktivität der Bodenorganismen schließen.

Die Fingerprobe und die Körnungsanalyse haben eine vertikale Texturdifferenz innerhalb des Profils ergeben: der Oberboden ist durch einen geringeren Tongehalt (Bodenart Ls4) als der Unterboden (Bodenart Ts2) charakterisiert. Anhand der fehlenden Schlufffraktion im Unterboden ist weiterhin erkennbar, daß eine hohe Verwitterungsintensität der Minerale vorliegt. Die Bestim-

mung der Tonminerale weist auf das Vorliegen von Illit und Kaolinit und Spuren an Eisenoxiden hin. Letztere bewirken trotz ihrer geringen Konzentration die rötliche Färbung des Bodens.

Die Böden des Untersuchungsgebietes weisen allgemein eine schwach saure Bodenreaktion auf und sind durch ein Fehlen von Carbonat gekennzeichnet. Die Kationenaustauschkapazität (KAK) beschreibt die Fähigkeit der Austauscher, Kationen in austauschbarer Form zu binden. Da das Tonmineral Kaolinit nur ein begrenztes Sorptionsvermögen aufweist, beruht die Austauschkapazität auf der Leistung der organischen Substanz und dem Illit–Tonmineral. Sie ist generell als gering einzustufen. Wie bei terrestrischen Böden der gemäßigten Zone dominieren auch hier die zweiwertigen Kationen Calcium und Magnesium. Auffällig ist die hohe Basensättigung ($> 90\%$) der Böden.

Die Untersuchung der mobilen und pedogenen Oxide weist auf die hohe Konzentration an Aluminium- und Eisen-Oxiden in topischen Böden hin.

Bodenerosion



Bodenerosion wird Einzugsgebiet des Flusses Aguima anhand von Sedimentverlagerungen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen bzw. angrenzenden Feldwegen sichtbar. Hier tritt Erosion durch Wasser besonders bei Yams, der in Hügeln angepflanzt wird, und bei in Reihen kultivierten Arten wie Erdnüssen und Mais auf. Tief in den Untergrund eingeschnittene Gullies konnten im Einzugsgebiet des Aguima nicht gefunden werden.

In Abb. A2-4 wird der Bodenabtrag in landwirtschaftlich genutzten Flächen an einer Abbruchkante deutlich. Weiterhin fällt auf, daß Bodenskelett häufig auf der Bodenoberfläche vorliegt, was auf die Erosion des Feinbodens durch fließendes Wasser zurückzuführen ist.

Abb. A2-4: Bodenerosion im Canabis-Feld

Die Abschätzung der Erosionsgefährdung der Böden wird mittels der von Wischmeyer und Smith entwickelten Universal Soil Loss Equation (USLE) bzw. der überarbeiteten Form vorgenommen. Diese Formel ermöglicht die Berechnung des potentiellen jährlichen Abtrags durch Berücksichtigung der Faktoren Klima (K), Boden (R), Gelände (L,S), Nutzung (C) und Schutzmaßnahmen

(P). Entsprechend der Datenverfügbarkeit konnte bisher nur die Berechnung des K-Faktors durchgeführt werden.

Landnutzung

Die Feldbegehungen und Befragungen von Bauern während der Exkursion haben gezeigt, daß am häufigsten die Kulturen Baumwolle, Yams, Maniok, Erdnüsse, Bohnen, Mais und Sorghum entweder als Mono- oder Mischkulturen angebaut werden. Der Anbau erfolgt in Form von Hügeln (Yam), in Reihen (Mais, Sorghum) oder auf der ebenen Fläche. Bei den Feldbegehungen fiel auf, daß die in der Nähe von großen Straßen bzw. Märkten liegenden Dörfer verstärkt die cashcrop Baumwolle anpflanzen, während die Bauern in abgelegenen Ortschaften fast ausschließlich Subsistenzwirtschaft betreiben. Die Fruchtfolge wird demzufolge von Baumwolle oder Yam angeführt, und es folgen die Kulturen Maniok, Mais/Sorghum, Erdnuß und Fayot (Bohne). Im Anschluß wird eine Brache zwischengeschaltet, bei der entweder jegliche Nutzung für mehrere Jahre unterbleibt (40% der gesamten Nutzfläche) oder Anacardia (Cashew-Nuß) für die Dauer von 20 Jahren (60% der gesamten Nutzfläche) angebaut wird.

Die Hauptsaat- bzw. Hauptpflanzzeit umfaßt die Monate Juni bzw. Juli, die Reifezeit der Kulturen beträgt durchschnittlich 2-4 Monate, so daß die Ernte vorrangig in den Monaten August bis September stattfindet. Da in Benin nur wenig Saatzuchtanstalten existieren, wird ein Teil der Ernte als Saatgut verwendet. Verdeutlicht wird diese Vorgehensweise durch die auffallend unterschiedlichen Wuchshöhen der Kulturpflanzen, die z.T. mehrere Meter betragen. In einigen Dörfern verwenden die Bauern Pflanzenschutz- sowie Düngemittel beim Anbau der cashcrop Baumwolle, während in anderen Dörfern kein Einsatz derartiger Mittel erfolgt. Zu Beginn der Trockenzeit wird generell die Hälfte der landwirtschaftlichen Nutzflächen abgebrannt. Auf die abnehmende Fruchtbarkeit der Ackerflächen reagieren die Bauern stets mit der Rodung von bisher ungenutzter Savanne. Jährlich werden ca. 2-5% der Gesamtfläche hinzugewonnen. Die Bearbeitung des Bodens erfolgt ausschließlich mit Hilfe einer Hacke, d.h. daß sowohl bei der Beseitigung von Unkraut als auch beim Wenden des Oberbodens nur ein Gerät Anwendung findet.

Feldkampagne Frühjahr 2001

Während des bevorstehenden Geländeaufenthalts sind folgende Tätigkeiten im Gelände vorgesehen:

Thema Boden:

Das Thema der Arbeit sieht die Erstellung einer Bodenkarte vor. Zu diesem Zweck werden umfangreiche Bohrungen im gesamten Einzugsgebiet vorgenommen und Profilgruben zur detaillierten Beschreibung, Klassifizierung und Beprobung der Böden angelegt. Die Beschreibung der Bodenprofile erfolgt nach „Référence Pédologique“ (France), „Keys to Soil Taxonomy“ (USA), „Guidelines for Soil Description“, (FAO-Unesco) und „Bodenkundliche Kartieranleitung“ (BRD).

Thema Bodennutzung:

Neben umfangreichen Feldbegehungen werden weitere Befragungen der bäuerlichen Bevölkerung erfolgen. Ziel ist die Erstellung einer aktuellen Landnutzungskarte und die Ermittlung von Informationen hinsichtlich der historischen Landnutzung, der heutigen Bodenbearbeitung und Vermarktung von Ernteprodukten. Zu diesem Zweck wurde ein Fragenkatalog vorbereitet, der als Leitfaden bei der Befragung einzelner Bauernfamilien dienen soll.

Thema Bodenerosion:

Um einen Eindruck über das Ausmaß der historischen Bodenerosion zu erhalten, werden Messungen der Mächtigkeit von Kolluvien, Auenböden und der humosen Horizonte im Untersuchungsgebiet durchgeführt.

Die *aktuelle Erosion* wird sowohl qualitativ als auch quantitativ auf unterschiedlichen Maßstabsebenen erfaßt. Für punktuelle Messungen des Oberflächenabflusses und Bodenabtrags unter natürlichen Witterungsbedingungen werden Erosionsparzellen auf Flächen unterschiedlicher Nutzung und in der naturnahen Savanne eingerichtet. Quasiflächenhafte Messungen werden mit Hilfe von Materialfangkästen und Erosionsmeßnägeln durchgeführt. Bei der komplexen Schadenskartierung, die im gesamten Untersuchungsgebiet erfolgt, werden die bestehenden Erosionsformen vermessen, klassifiziert und in einer Karte festgehalten.

Für die Ermittlung der Parameter zur Abschätzung der *potentiellen Erosion* werden ebenfalls Erosionsparzellen angelegt, die jedoch vegetationsfrei gehalten werden.

Kontaktaufnahme zu Institutionen:

Weiterhin ist während des kommenden Aufenthalts in Benin die Aufnahme bzw. Intensivierung von Kontakten zu verschiedenen Institutionen vorgesehen, um weitere Informationen zum Thema Bodenkunde und Landnutzung auszutauschen.

Ein Termin wurde mit Mitarbeitern des *Ministère de l'Education Nationale et de la Recherche Scientifique* (MENRS) in Cotonou vereinbart. Diese Institution führte in den 70er Jahren das *Projet Agro-Pedologie* durch, bei dem Bodeneigungskarten für den Anbau spezieller Kulturen entwickelt wurden. Ein weiterer Besuch ist beim *Centre national de Agro-pédologie* (CENAP), Cotonou, geplant. Diese Behörde verfügt über ein Bodeninformationssystem von Süd-Benin.

Workpackage A2-4: Grundwasser und Grundwasserneubildung im Queme-Einzugsgebiet

Zielsetzung

Der Schwerpunkt in der Zielsetzung von A2-4 liegt in der Ermittlung der Grundwasserneubildung, die hauptsächlich aus dem Sickerwasserabfluss der ungesättigten Bodenzone entsteht. Geklärt werden sollen die aktuelle Grundwasserneubildungsrate, das generelle Grundwasserdargebot sowie das Gefährdungspotential für das Grundwasser.

Geologischer Überblick über das Einzugsgebiet des Aguima

Das Arbeitsgebiet liegt an der Südost-Grenze des archaischen (3,5-2,5 Ga) und seit ca. 2 Ga tektonisch stabilen Westafrikanischen Kratons im Westteil der Nigerianisch-Beninischen Platte (Abb. A2-5) (AFFATON ET AL. 1991, 1980 CABY 1989, GRANT 1969). Hier liegt es in der Interniden Zone des dahomeyidischen Faltengürtels, eines Kollisionsorogens, das während der Pan-Afrikanischen Orogenese (~750-500 Ma) höchstwahrscheinlich durch Mikro-Terrane-Akkretion entstanden ist und auf den Westafrikanischen Kraton, bzw. auf seine sedimentäre Bedeckung (Volta Becken) aufgeschoben wurde (AFFATON ET AL. 2000, EL-HADJI TIDJANI ET AL. 1999, ATTOH ET AL. 1997, VILLENEUVE & CORNEE. 1994). Der dahomeyidische Faltengürtel (Dahomeyiden) ist Teil eines weiter ausgedehnten Orogens, des Transsaharischen Faltengürtels (AFFATON ET AL. 1991). Nach Norden setzt sich das Orogen, bedeckt durch das Niger-Becken über den *Gourma*-Gürtel in die *Pharusiden* des *Hoggar* fort. Nach Süden tauchen die Dahomeyiden im Golf von Benin ab. Eine mögliche Fortsetzung finden sie jenseits des Atlantiks im *Caririschen* Faltengürtel Brasiliens (AFFATON ET AL. 1980).

Allochtone Deckentektonik (EL-HADJI TIDJANI ET AL. 1999, ATTOH ET AL. 1997, AFFATON ET AL. 1997) und das Vorhandensein prominenter, \pm N-S-streichenden Scherzonen (Kandi Fault System), die durch großflächige, mylonitische Zonen gekennzeichnet sind, charakterisieren die regionale Geologie.

Im Arbeitsgebiet selber lassen sich nach der Geologischen Karte 1:200 000, Blatt Djougou–Parakou–Nikki (OFFICE BÉNINOIS DES MINES 1984) zwei lithostratigraphische Einheiten – beide wohl zum größten Teil birrimischen Alters (~500-600 Ma) unterscheiden (Abb. A2-6), deren Ausgangsmaterial granitische, bzw. pelitsch-psammitische Gesteine waren:

- § *Wé-Wé Einheit*: Migmatite und migmatitischen Granitoide
- § *Sonoumon-Bariénou Einheit*: Migmatite und migmatitische Gneise, Einlagerungen aus basischen und ultrabasischen Metamorphiten, Leptyniten und sillimanitisch-aluminosen Gneise.

Beide Einheiten weisen eine Hauptstreichrichtung von N 10-20° E auf. Enge, isoklinale, multiphasige Faltung mit flach bis saiger stehenden Faltenachsen und meso-katazonale Metamor-

phose (Amphibolit-/Granulit-Zone, Bildung von Metatextiten) mit anschließender retrograden Metamorphose (AFFATON ET AL. 2000, 1991, 1980, OFFICE BÉNINOIS DES MINES 1984, 1989) charakterisieren die tektonometamorphe Entwicklung. Datierungen (Rb/Sr, Ar/Ar, Pb/Pb) weisen auf ein Pan-Afrikanisches Alter der Metamorphose hin (ATTOH ET AL. 1997, AFFATON ET AL. 2000, 1997, 1991, CABY 1987, OFFICE BÉNINOIS DES MINES 1984, 1989).

Tiefgründige Verwitterung und z.T. extreme Lateritisierung sind typische Verwitterungsformen, die auch im Arbeitsgebiet anzutreffen sind. Eine mächtige Zone saprolithischer Verwitterung auf dem kristallinen Mantel ist typisch (FAURE & VOLKHOFF 1998). Ferricretes und Eisenkonkretionen/-knollen sind ebenfalls ein typisches Merkmal der im Arbeitsgebiet vorkommenden Böden. Es wird angenommen, daß es sich hierbei um während des Miozäns bis zum frühen Quartär entstandenes reliktsches Material handelt (FAURE & VOLKHOFF 1998).

Hydrogeologische Situation

Zur Abschätzung der hydrogeologischen Situation im Arbeitsgebiet wurde intensive Literaturrecherche betrieben. Neben Datenmaterial des französischen CATCH-IRD (IRD-BENIN und DIRECTION DE L'HYDROLOGIQUE DU BENIN, aufbereitet von Teilprojekt A1) zu Niederschlag, Klima und Abfluß liegt eine hydrogeologische Übersichtskarte von Benin im Maßstab 1:500.000 (GEOHYDRAULIQUE 1985), sowie eine Studie über Wassermanagment der Republik Benin (REPUBLIQUE DU BENIN 1997) vor. Aus dieser können für die hydrogeologische Situation des Arbeitsgebiets, die aus der *Faciés de la Wé-Wé* aufgebaut wird, grob folgende Angaben abgeleitet werden (Prozentangaben beziehen sich auf Anzahl der Brunnen):

Grundwasserleiter und Ergiebigkeit

Ausgehend vom vorliegenden Datenmaterial (GEOHYDRAULIQUE 1985, REPUBLIQUE DU BENIN 1997, CATCH 1999, DIRECTION DE L'HYDRAULIQUE-IRD-UNB 2000) können die folgenden Angaben gemacht werden:

- § Durchschnittlicher Jahresniederschlag: 1.100-1.200 mm
- § Durchschnittliche Mächtigkeit der gesättigten Verwitterungszone^{*)} (Mächtigkeit des Porenaquifers): 11 m, wobei bei 14 % der Bohrungen die Mächtigkeit bei 5 – 10 m liegt und bei 86 % > 10 m.
- § Durchschnittlicher Grundwasserspiegel (Flurabstand) in der Verwitterungszone: 10 – 25 m unter Geländeoberkante
- § Durchschnittliche Förderleistung: 2-5 m³/h, wobei 43 % der Brunnen 0,7-2 m³/h und 57 % 2-5 m³/h liefern. Die Permeabilitäten in der Verwitterungszone liegen für die Sous-Préfecture Djougou im Bereich von 10⁻⁷ m/s (REPUBLIQUE DU BENIN 1997).

* Wert errechnet sich aus der Differenz zwischen der Gesamtmächtigkeit der Verwitterungszone und dem Grundwasserspiegel.

Eine hydraulische Reserve (Rücklage, R) von 440 mm errechnet sich aus der Porosität (4 %, GEOHYDRAULIQUE 1985) und der durchschnittlichen Mächtigkeit der gesättigten Zone. Ohne Eingriffe des Menschen sollte diese Rücklage im langjährigen Mittel gleich bleiben, d.h. Rücklage und Aufbrauch (R und B aus der hydrogeologischen Grundgleichung) halten sich die Waage. Betrachtet man jedoch kürzere Zeiträume und berücksichtigt insbesondere die Entnahme von GW, so ist die unterirdische Wasservorratsänderung (z.B. nach MATTHEß ET AL. 1983) heranzuziehen.

Für den Festgesteinsaquifer (Kluftgrundwasserleiter) wird eine Kluftporosität von durchschnittlich 1,5 % sowie eine Aquifermächtigkeit von durchschnittlich 40 m angegeben. Die Rücklage wird mit durchschnittlich 90 mm angegeben, so dass sich insgesamt eine Rücklage von 530 mm errechnet, der eine Grundwasserneubildung von 260 mm (Schätzung als Funktion des Niederschlages, GEOHYDRAULIQUE 1985, FARQUHARSON & BULLOCK 1992) gegenübersteht. Klassifiziert wird die ganze Einheit als 'günstig', was einer Brunnenförderleistung von 2-5 m³/h entspricht (GEOHYDRAULIQUE 1985). Es kann sich hierbei jedoch nur um eine grobe Abschätzung handeln. Eine Studie im Auftrag der Republik Benin (REPUBLIQUE DU BENIN 1997, S. 45) zeigte z.B., daß in den *Migmatiten* des Arbeitsgebiets mit einer Rücklage von nur noch 240 mm zu rechnen ist, der eine Grundwasserneubildung von 231-288 mm (Schätzung als Funktion des Niederschlages) gegenübersteht.

Eine wesentliche Aufgabe des Teilprojektes ist es nun, detaillierte Daten über die Grundwasserneubildung im Arbeitsgebiet zu erhalten. Die Grundwasserneubildung wird aus dem Bodenwasserhaushalt ermittelt, in dem der Sickerwasserabfluß zum Grundwasser, also der Abfluß innerhalb der ungesättigten Bodenzone, nach $S = N - V \pm R$ (DVWK 1990) ermittelt wird. Die dazu notwendigen Parameter werden mittels Wasserspannungs- und Bodenfeuchtemessungen, Beobachtung der Bewegung des Bodenwassers, sowie hydrogeochemischer und geologischer Analysetechniken mittels teufen- und zeitabhängiger TDR-, Tensiometer- und Saugkerzenverfahren im Arbeitsgebiet gewonnen.

Grundwasserchemie

Das Grundwasser im Bereich des dahomeyidischen Grundgebirge ist gering mineralisiert. Es sind hydrogencarbonatische Wässer mit möglicher signifikanter Sulfat-Präsenz in Schiefereneinheiten. Der pH-Wert liegt im Mittel zwischen 7,2 und 8,2. Die Trinkbarkeit ist generell gewährleistet (GEOHYDRAULIQUE 1985, REPUBLIQUE DU BENIN 1997).

Diese Angaben entstammen der hydrogeologischen Karte von Benin im Maßstab 1 : 500.000 (GEOHYDRAULIQUE 1985), sowie einer Studie zum Management der Ressource Wasser in Benin (REPUBLIQUE DU BENIN 1997) und dienen einer groben Orientierung im Hinblick auf die Abteufung von Brunnen, wie sie in den letzten 20 Jahren von verschiedenen Entwicklungshilfeorganisationen und -diensten großflächig niedergebracht wurden und immer noch werden. Für das aktuelle Projekt können diese Werte jedoch nur als Abschätzung der zu erwartenden

hydrogeologischen Bedingungen im Arbeitsgebiet angesehen werden. So liegt der Grundwasserspiegel in einem Brunnen (Tiefe (GOK): 22 m, Ø 1,19 m) in Dogué nach Angaben des Deutschen Entwicklungsdienstes (DED) (freundl. Mitt. von Herrn Dr. Dr. R. Baginski, IMPETUS-Projekt A5 nach AGRO ACTION ALLEMANDE (AAA), SERVICE ALLEMAND DE DEVELOPMENT (SAD), B.P. 698 , QUARTIER KPEBIE, PARAKOU, BÉNIN) bei 12 m unter GOK. Der Gesamtabfluß des Vorfluters *Aguimo* liegt in den Jahren 1998 und 1999 bei ca. 0,125 km³/a. Über die Förderleistung der Brunnen, die Grundwasserneubildungsrate und die verschiedenen hydrogeologischen Eigenschaften des Aquifers wie z.B. Abstandsgeschwindigkeiten, Transmissivitäten aber auch über die hydrochemische Zusammensetzung der Wässer liegen bislang keine gesicherten Daten vor (s.o.). Um aber Aussagen über das mögliche Nutzungspotential machen zu können, sind diese Parameter unabdinglich und sollen im Rahmen des Workpackages A2-4 ermittelt werden .

In der unmittelbar bevorstehenden Geländekampagne vom 27.03.-26.06.2001 ist die Installation der o.a. Meßinstrumente im Testgebiet geplant, ebenso wie eine erste Beprobung der Grund- und Oberflächenwässer, sowie die teufenabhängige Charakterisierung der ungesättigten Zone an ausgewählten Stellen im Testgebiet.

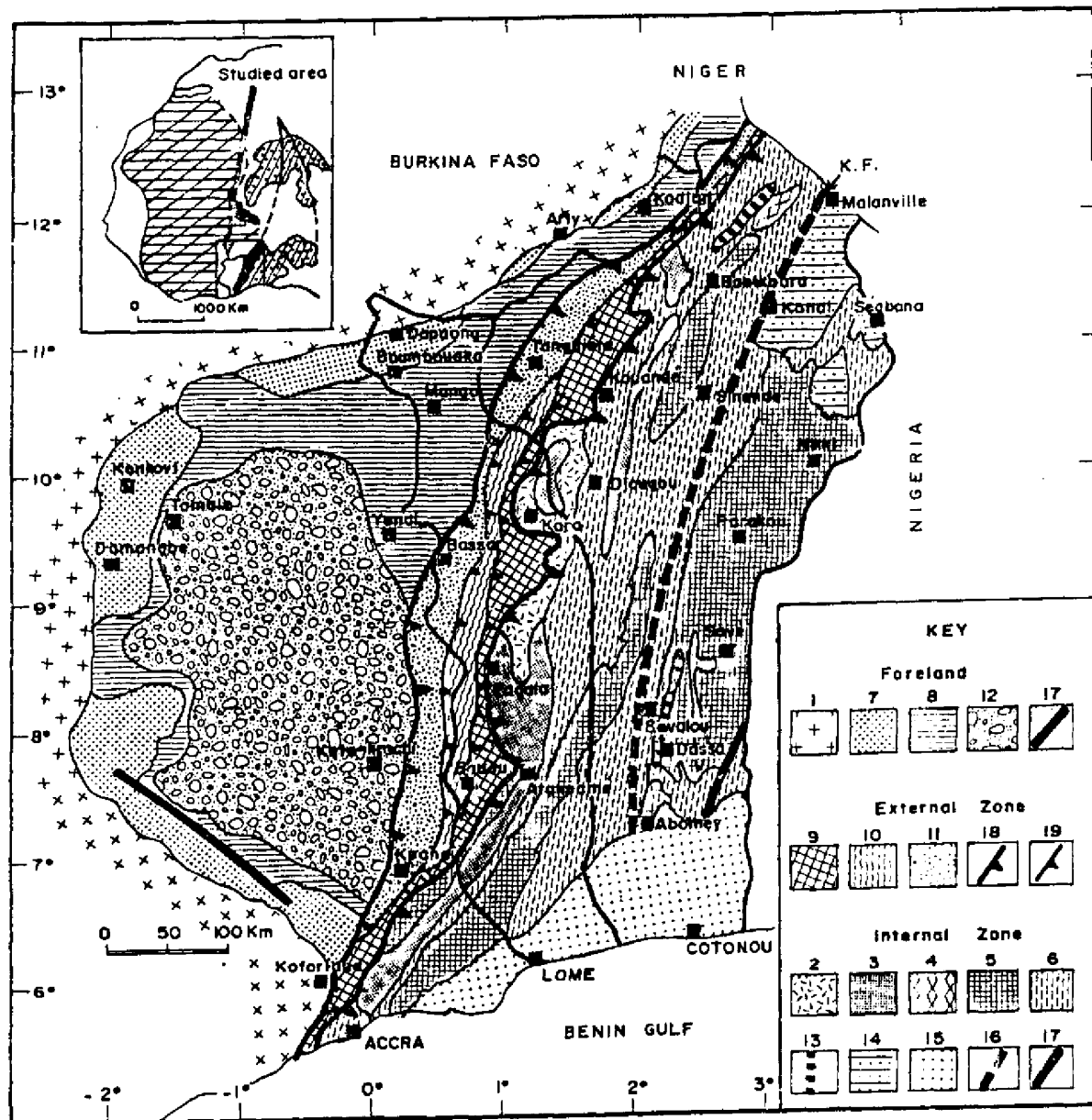


Abb. A2-5: *Synthetic geological Map of the Dahomeyide chain. Foreland: 1: Eburnean basement; 7: lower supergroup of the Volta Basin (Bombouaka); 8: middle supergroup of the Volta basin; 12: upper supergroup of the Volta Basin. 17: other main fault. External Zone: 9: Atacora structural Unit; 10: western structural unit of the Buem (western Buem); 11: eastern structural unit of the Buem (eastern Buem); 18: thrusting boundaries of the external Zone; 19: thrusts limiting the structural units inside the external zone. Internal zone: 2: Eburnean allochthonous acid orthogneisses; 3: Kabyé type metabasic massifs of the suture zone; 4: acid and intermediate granulites; 5: migmatitic orthogneissic and paragneissic complex and undifferentiated Pan-African granitoids; 6: undifferentiated gneissic complex; 13: Pan-African molassic volcanosedimentary formations; 14: Kandi Palaeozoic Basin; 15: costal Meso-Cenozoic sedimentary basin; 16: Kandi Fault; 17: other main fault. (EL-HADJ TIDJANI ET AL. 1997)*

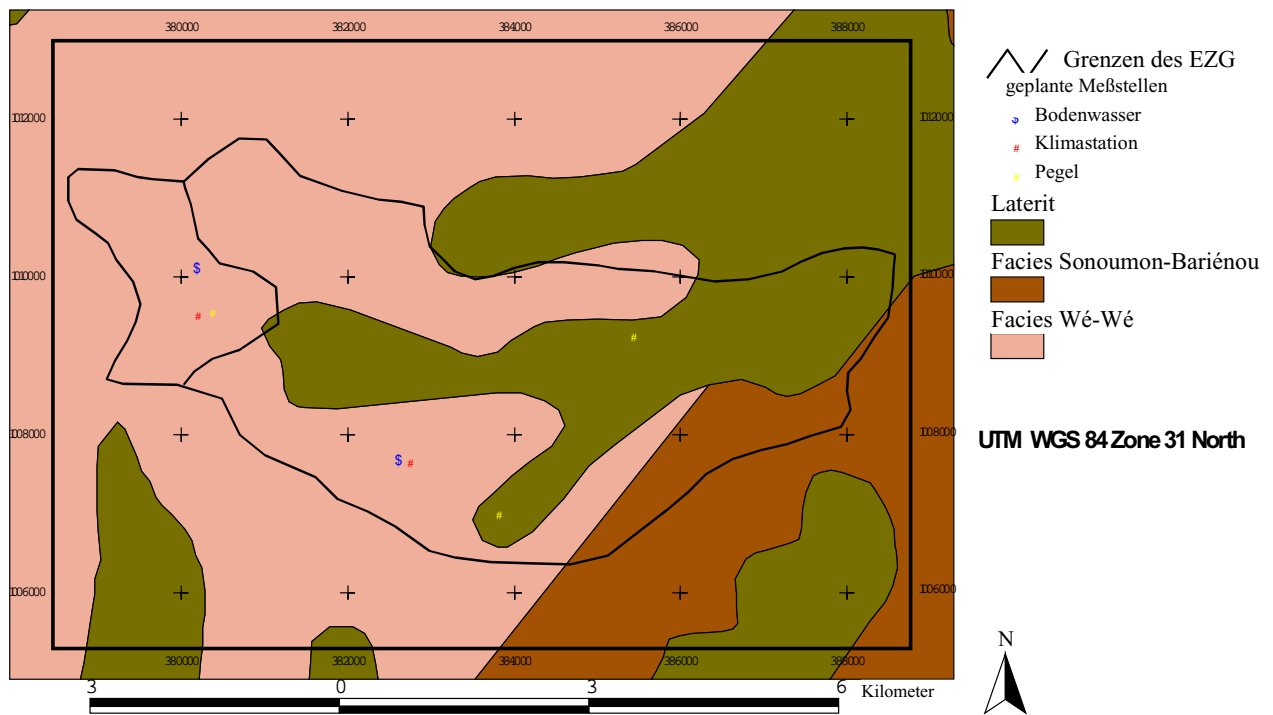


Abb. A2-6: Geologische Karte des Einzugsgebietes des Aguima

Vernetzung von A2

Eine intensive Vernetzung *innerhalb* des Teilprojektes A2 ergibt sich durch den verfolgten genesteten Ansatz. Die regionale hydrologische Modellierung (A2-2) basiert dabei auf der lokalen hydrologischen Modellanwendung (A2-1), die wiederum in die lokalen Messungen der Wasserflüsse (A2-1) und Gebietseigenschaften (A2-3, A2-4) eingebettet ist. Die Parametrisierungsansätze, die sich auf lokaler Ebene durch die Ableitung oder Kalibrierung mit Hilfe von eigenen Messungen ergeben, sollen letztendlich auf der regionalen Skala angewendet werden.

Eine enge Kooperation ergibt sich neben dieser grundsätzlichen Vernetzung in den Bereichen Bodenhydrologie (A2-1) und Bodenerosion (A2-3), da Erosion hauptsächlich durch fließendes Wasser erfolgt. Somit ist die Untersuchung der Erosion an das Infiltrations- und Abflußverhalten geknüpft.

In enger Verbindung stehen zudem die Bereiche des Bodenwasserfluß (A2-1) und der Grundwasserneubildung (A2-4). Da anzunehmen ist, daß das Grundwasser zum großen Teil über die Bodenpassage gebildet wird, werde diese beiden Teilprojekte gemeinsame Meßeinrichtungen installieren und nutzen. Die Durchführung gemeinsamer Meßkampagnen ist geplant.

Verknüpft sind auch die Untersuchung der Grundwasservorkommen sowie das Verhalten des Basisabfluß im Gerinne. Zwar ist zu vermuten, daß die Abflußspitzen in erster Linie durch Ereigniswasser gespeist werden, doch der Basisabfluß spielt wahrscheinlich für die dauerhafte Speisung der Flüsse eine wichtige Rolle. Dieser Prozeß wird auch im regionalen hydrologischen Modell TOPLATS in dieser Form berücksichtigt.

Neben der intensiven Vernetzung innerhalb des Teilprojektes ist auch die *externe* Vernetzung zu den anderen Teilprojekten A1, A3 und A4 von großer Bedeutung (siehe Abb. A2-7). Dabei handelt es sich in allen Fällen um gegenseitige Hilfestellung bzw. um beidseitige Nutzung der Ergebnisse der anderen Teilprojekte.

Das Teilprojekt A1 (Niederschlagsvariabilität im Benin) stellt dem Teilprojekt A2 die für die Modellierung benötigten meteorologische Randbedingungen (Niederschläge, Temperaturen, etc.) zu Verfügung. Weiterhin werden von A2 Klimaszenarien benötigt, mit Hilfe derer der Einfluß sich ändernder Klimabedingungen in Westafrika auf die Hydrologie abgeschätzt werden soll. Auf der anderen Seite können die Nutzer der Atmosphärenmodelle ihre Landoberflächenschemata verbessern, da das regionale hydrologische Modell TOPLATS auch in den Atmosphärenmodellen zur Beschreibung der Landoberflächenprozesse eingesetzt wird. Da im weiteren Projektverlauf eine direkte Kopplung der Modelle zu einer „Modellkette“ angestrebt wird, wird bzgl. der Parametrisierung der Landoberfläche schon jetzt eng zusammengearbeitet.

Die Vernetzung mit dem Teilprojekt A3 (Vegetationsdynamik im Benin) besteht vor allem darin, daß die von A3 abgeleiteten Vegetationsklassifikationen sowie deren Vegetationsparame-

ter als Eingangsdaten für die hydrologische Modellanwendung von A2 im *Haute Vallée de l'Ouéme* benötigt werden. Durch Nutzung aktueller und historischer Klassifikationen kann der Einfluß der Landnutzung auf den Wasserhaushalt in der Vergangenheit geschlossen werden. Auf der anderen Seite werden von den Botanikern, die vor Ort arbeiten, Informationen über die Bodeneigenschaften als Standortfaktor für die Vegetationsentwicklung und –ausbreitung benötigt, die von A2 geliefert werden können.

Das Teilprojekt A4 (soziodemographische Entwicklung und Migration) bearbeitet Fragestellungen, die den Wasserbedarf der wachsenden Bevölkerung und damit den Einfluß von evtl. steigender Wasserentnahme aus dem Grundwasser und aus Flüssen auf den Wasserhaushalt des Einzugsgebietes analysieren. Die Vernetzung zwischen A4 und A2 besteht darin, daß im Spannungsfeld von Wasserbedarf und Wasserverfügbarkeit die genannten Teilprojekte Abschätzungen für die jeweils eine Seite zu geben versuchen. Bei der regionalen Anwendung des hydrologischen Modells wird vor allem bei der Szenarioanalyse versucht werden, den Einfluß der Bevölkerung auf den Wasserhaushalt als Senkenterm (Wasserentnahme aus dem Grund und Oberflächenwasser) im Modell zu berücksichtigen. Ebenso werden Informationen über mögliche Landnutzungsänderungen benötigt.

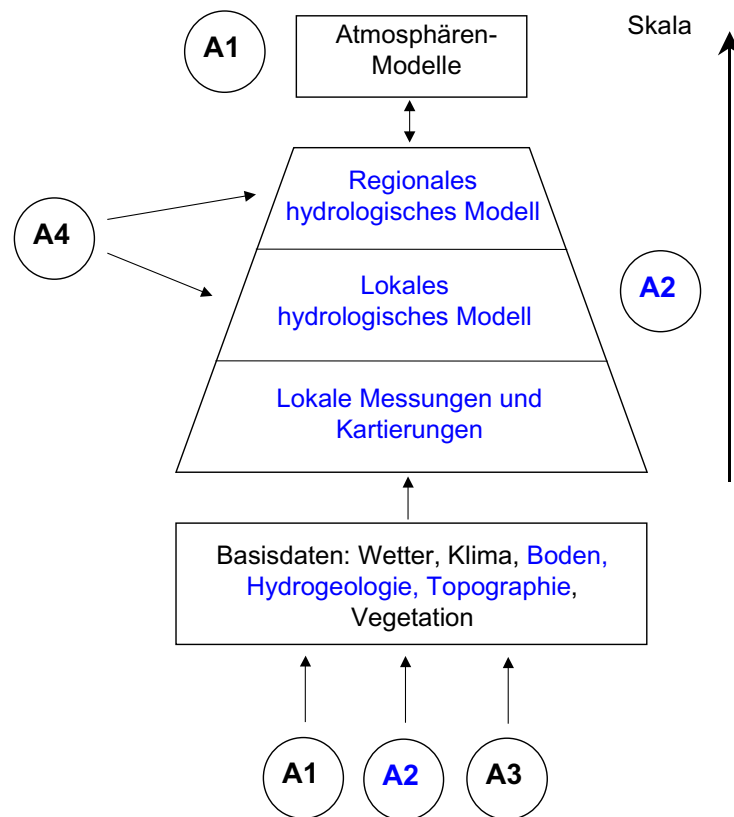
Zusammenfassend benötigt bzw. liefert das Teilprojekt A2 folgende Datensätze:

Inputdaten für hydrologische Modelle (lokal und regional)

- A1 Meteorologische Daten und Randbedingungen
- A3 Vegetationsklassifizierung, Pflanzenparameter und Eigenschaften
- A4 Wasserentnahme aus Oberflächenwasser und Grundwasser

Outputdaten aus den hydrologischen Modellen

- A1 Nutzung der hydrologischen Modellergebnisse für die Validierung der in den meteorologischen Modellen verwendeten Landoberflächenschemata
- A3 Nutzung der räumlichen Strukturen und der zeitlichen Dynamik des Bodenwasserhaushaltes für die Analyse der Vegetationsentwicklung, Vegetationsverteilung, Strukturen etc.
- A4 Informationen aus den hydrologischen Modellen über die räumlich differenzierte Wasserverfügbarkeit

Interne und externe Vernetzung von A2:**Abb. A2-7:** Vernetzung der Arbeiten innerhalb der Teilprojekte im Bereich A**Literatur**

- ASSOCIATION INTERNATIONALE POUR LE DEVELOPPEMENT (A.I.D.)(1997): Etude de la strategie nationale de gestion des ressources en eau du Benin. Volet A - Etudes specifiques. Rapport R2: Potentialites des aquiferes discontinus des formations du socle. 52 S., 2. Annex., 2 Cards.
- Affaton, P.; Aguirre, L.; Ménot, R.-P. (1997): THERMAL AND GEODYNAMIC SETTING OF THE BUEN VOCANIC ROCKS NEAR TIELÉ, NORTHWEST BÉNIN, WEST AFRICA.- PRECAMBRIAN RESEARCH, 82, S. 191-209.
- Affaton, P.; Kröner, A.; Seddoh, K.F. (2000): PAN-AFRICAN GRANULITE FORMATION IN THE KABYE MASSIF OF NORTHERN TOGO (WEST AFRICA): Pb-Pb ZIRCON.- INT. JOURN. EARTH SCI., 88, S. 778-790.
- Affaton, P.; Rahaman, M.A.; Trompette, R.; Souhy, J. (1991): THE DAHOMEYIDE OROGEN: TECTONOTHERMAL EVOLUTION AND RELATIONSHIPS WITH THE VOLTA BASIN.- IN: Dallmeyer, R.D.; Lécorché, J.P. (EDS.) (1991): THE WEST AFRICAN OROGENS AND CIRCUM-ATLANTIC CORRELATIVES.- 405 S., 196 FIG., SPRINGER-VERLAG, BERLIN-HEIDELBERG-NEW-YORK.
- Affaton, P.; Sougy, J.; Trompette, R. (1980): THE TECTONO-STRATIGRAPHIC RELATIONSHIPS BETWEEN THE UPPER PRECAMBRIAN AND LOWER PALAEOZOIC VOLTA BASIN AND THE PAN-AFRICAN DAHOYIDE OROGENIC BELT (WEST AFRICA).- AM. J. SCI., 288, 224-248.
- Attoh, K.; Dallmeyer, R. D.; Affaton, P. (1997): Chronology of nappe assembly in the Pan-African Dahomeyide orogen, West Africa: evidence from 40Ar/39Ar mineral ages.- Precambrian Res., 82, 153-171, Elsevier, Amsterdam.
- BORMANN, H., DIEKKRÜGER, B. & O. RICHTER (1996): Effects of data availability on estimation of evapotranspiration. Phys. Chem. Earth. 21 (3), S. 171-175.
- Caby, R. (1989): THE PAN-AFRICAN BELTS OF WEST AFRICA FROM THE SAHARA DESERT TO THE GULF OF BENIN.- IN: THE ANATOMY OF MOUNTAIN RANGES (EDITED BY SCHAEER, J.-P. & RODGERS, J.), S. 129-170, PRINCETON UNIVERSITY PRESS, NEW JERSEY.

- Catch, Direction De l'Hydraulique, Institut de Recherche pour le développement (1999) : PROJET CATCH/BENIN : PRESENTATION DU SITE DE L'OBSERVATOIRE HYDROMETEOROLOGIQUE DE LA HAUTE VALLEE DE L'OUEME.- COTONOU.
- Direction De l'Hydraulique, Institut de Recherche pour le développement, Université Nationale du Bénin (2000) : OHOVO – OBSERVATOIRE HYDRO-METEOROLOGIQUE DE LA HAUTE VALLEE DE L'OUEME.
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.) (1990): GEWINNUNG VON BODENWASSERPROBEN MIT HILFE DER SAUGKERZEN-METHODE - DK 628.112.1 WASSERGEWINNUNG - DK 556.322.2 BODENWASSER MERKBLÄTTER DES DEUTSCHEN VERBANDES FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU, 217, 12 S., PAREY, HAMBURG-BERLIN.
- El-Hadj Tidjani, M.; Affaton, P.; Louis, P.; Socohou, A. (1997): Gravity characteristics of the Pan-African Orogen in Ghana, Togo and Benin (West Africa).- J. Afr. Earth Sci., 24, 3, 241-258, Pergamon, Elsevier, Amsterdam.
- FAMIGLIETTI, C.D. & WOOD, E.F. (1994): Multiscale modeling of spatially variable water and energy balance processes, Water Res. Res. 30 (11), S. 3061-3078.
- Farquharson, F.A., Bullock, A. (1992): THE HYDROLOGY OF BASEMENT COMPLEX REGIONS OF AFRICA WITH PARTICULAR REFERENCE TO SOUTHERN AFRICA.-IN: Wright, E.P.; Burgess, W.G. (Eds.) (1992) : "THE HYDROGEOLOGY OF CRYSTALLINE BASEMENT AQUIFERS IN AFRICA.-", GEOL. SOC. SPEC. PAP., 66, 264. S, LONDON.
- Faure, P. & Volkoff, B. (1998): SOME FACTORS AFFECTING REGIONAL DIFFERENTIATION OF THE SOILS IN THE REPUBLIC OF BENIN (WEST AFRICA).-CATENA, 32, S. 281-306.
- Grant, N. K. (1969): THE LATE PRECAMBRIAN TO EARLY PALAEOZOIC PAN-AFRICAN OROGENY IN GHANA, TOGO, DAHOMEY, AND NIGERIA.- GEOL. SOC. AM. BULL., 80, 45-56.
- GARBRECHT, J. UND L. MARTZ (1995): TOPAZ. An Automated Digital Landscape Analysis Tool for Topographic Evaluation, Drainage Identification, Watershed Segmentation and Subcatchment Parametization. National Agricultural Water Laboratory, USDA, Agricultural Research Service, Durant Oklahoma
- MATTHEß, G.; UBELL, K.(1983): Allgemeine Hydrogeologie. Grundwasserhaushalt. 438 S., 214 Abb., 75 Tab., Gebr. Borntraeger, Berlin-Stuttgart.
- PETERS-LIDARD, C.D., ZION, M.S. & WOOD, E.F. (1997): A soil-vegetation-atmosphere transfer scheme for modeling spatially variable water and energy balance processes, Journal of Geophysical Research, 102 (D4), S. 4303-4324.
- Schindler, U. (1980): EIN SCHNELLVERFAHREN ZUR MESSUNG DER WASSERLEITFÄHIGKEIT IM TEILGESÄTTIGTEN BODEN AN STECHZYLINDERN. ARCHIV FÜR ACKER- UND PFLANZENBAU UND BODENKUNDE. BAND 24, HEFT 1.
- Office béninois des Mines(1984): NOTICE EXPLICATIVE DE LA CARTE GEOLOGIQUE A 1 \ 200 000: FEUILLE DJOUGOU-PARAKOU-NIKKI. 39.S., REPUBLIQUE POPULAIRE DU BENIN, MINISTRE DES FINANCES ET DE L'ÉCONOMIE.
- OFFICE BENINOIS DES MINES (1989): Notice Explicative de la Carte Géologique à 1\200.000, Feuilles Pira - Saé. 77 S., République Populaire du Bénin, Ministre des Finances et de l'Économie.
- Republique du Bénin, Ministre du Plan, Ministre des Mines, Projet de pre-investissement (P.P.I),
- VILLENEUVE, M.; CORNEE, J. J.(1994): Structure, evolution and palaeogeography of the West African craton and bordering belts during the Neoproterozoic. Precambrian Res., 69, 307-326, Elsevier, Amsterdam.