Kilimanjaro - Ewiges Eis in den Tropen: Gründe und Folgen des Gletscherschwundes

Urs SIEBER
Bahnstrasse 9a
CH-9323 Steinach
sieberu@stvsteinach.ch

Travail de recherche personnel 1
Universität Freiburg
Departement Geowissenschaften, Einheit Geographie
Betreut durch Prof. Michel Monbaron
und Michelle Bollschweiler

Steinach, November 2005



Zusammenfassung

Die verbleibenden Tropengebiete, in denen Gletscher noch vorkommen, sind im Rückzug. Einer der letzten Orte in Afrika, an dem man noch ewiges Eis in tiefen Breiten betrachten kann, ist das Kilimanjaro-Massiv. Aber auch dort sind die Gletscher stark im Rückzug. Einerseits spielen die Erderwärmung, andererseits aber auch die erhöhte Sonneneinstrahlung und steigende Trockenheit eine Rolle. Sie sind die Hauptgründe für den Gletscherschwund. Auch der Mensch trägt mit seinem Tun auf verschiedene Weise zum Rückgang der Gletscher des Kilimanjaros bei. Kursierende Medienberichte, in denen ausschliesslich die Erderwärmung und der Treibhauseffekt für die Gletscherschmelze am Kilimanjaro verantwortlich gemacht werden, sind ungenau und oberflächlich.

Auswirkungen und Folgen des Verschwindens des Eises in den nächsten Dekaden sind schwer abzuschätzen. Die Völker um den Kilimanjaro werden dies am meisten in der Wasserversorgung und im Tourismus zu spüren bekommen. Abbildung 1 zeigt den Kilimanjaro mit weisser Haube, so wie ihn die Welt in Erinnerung hat.



Abbildung 1: Ausdruck der Gegensätze von ewigem Eis und Tropen: Der Kilimanjaro (aus Climbing 2005).

Inhaltsverzeichnis

1	Vor	wort	1
2	Ein	leitung	1
	2.1	Gliederung der Arbeit	2
3	Ewi	ges Eis in Tropengebieten	2
	3.1	Vorkommen	2
	3.2	Charakteristika	3
4	Geo	ologie Ostafrika und Kilimanjaro	5
	4.1	Geologische Grosslage Ostafrika	5
	4.2	Geologischer Ursprung des Kilimanjaro	7
	4.3	Kilimanjaro-Massiv	7
5	Gla	ziologie Kilimanjaro	9
	5.1	Klima Kilimanjaro	9
	5.2	Gletscherschwund auf dem Kilimanjaro	10
		5.2.1 Fakten des Gletscherrückzugs	10
		5.2.2 Mögliche Ursachen	12
		5.2.3 Blick in die Zukunft	16
	5.3	Auswirkungen des Gletscherrückganges am Kilimanjaro	17
		5.3.1 Auswirkungen auf die Geomorphologie	17
		5.3.2 Auswirkungen auf Land und Leute	18
6	Eva	luation	19
	6.1	Tropischer Gletscherschwund: Eine Folge des Klimawandels oder mehr?	19
	6.2	Behandlung der geomorphologischen Auswirkungen in den Quellen	20
Li	terat	surverzeichnis	22

${\bf Abbildung sverzeichnis}$

1	Ausdruck der Gegensätze von ewigem Eis und Tropen: Der Kilimanjaro	
	(aus Climbing 2005)	i
2	Die Verteilung tropischer Gletschervorkommen auf der Erde. Man erkennt	
	gut die noch grossen Vorkommen in Südamerika und die dazu winzigen	
	Überreste in Afrika und auf Irian Jaya (aus Kaser 1997, Fig. 1)	3
3	Topografische Karte Ostafrikas mit den zwei Hauptgrabensystemen	
	ostafrikanischer- und zentralafrikanischer Graben (nach Kugler 1999,	
	p.161). 1 Ostafrikanischer Graben, 2 Zentralafrikanischer Graben, 3 Tan-	
	ganjikasee, 4 Njassasee, 5 Victoriasee.	6
4	Die geologische Landschaft in der Region um das Gregory Rift Valley. Eine	
	Vielzahl von vulkanischen Erscheinungen prägt das Gebiet. Norden liegt	
	oben (aus Downie and Wilkinson 1972, p. 9)	8
5	Kibo mit weitreichender Gletscherkuppe zu Beginn des 20. Jahrhunderts	
	(aus Jäger 1909, Tafel IX). Jäger (1909) weist in seiner Bildlegende darauf	
	hin, dass der Kibo auf diesem Bild mit Neuschnee bedeckt ist	11
6	Kibo 1997, die Gletscherkuppe ist fast nicht mehr zu erkennen (aus The	
	Center for Science and Public Policy 2004, p. 1)	11
7	Fast lineare Abnahme der afrikanischen Tropengletscher seit 1880 (aus Ka-	
	ser et al. 2004, p. 330)	12
8	Vergleich der Ausmasse der Gletscher am Kilimanjaro zur Zeit der klei-	
	nen Eiszeit und heute. Die heutigen Ausmasse sind schwarz gefärbt, die	
	Moränen der kleinen Eiszeit sind mit Linien gezogen. Norden liegt oben	
	(aus Downie and Wilkinson 1972, Fig. 4.1).	13
9	Entwicklung der Temperaturen in den Höhen des Kibogipfels seit 1979 (aus	
1.0	The Center for Science and Public Policy 2004, p. 7)	15
10	Entwicklung der globalen Temperaturen von 1856 bis 2001 (aus The Center	
	for Science and Public Policy 2004, p. 9).	16
11	Radiales Abflusssystem um den Kilimanjaro. 1 Flusskraftwerke, 2 Weru	
	Weru Schlucht, 3 Pangani River Bassin. Norden liegt oben (aus Downie	0-
	and Wilkinson 1972, Fig. 3.7)	21

1 Vorwort

Schon immer hat mich die Tatsache fasziniert, dass in Tropengebieten neben Palmen auch Gletschergebiete vorkommen können. Der Kilimanjaro ist das Aushängeschild für diesen krassen Gegensatz. Das Bild des Berges mit seiner schneeweissen Kuppe und Elefanten, die sich in der Steppe an seinem Fusse tummeln, lässt den Afrikareisenden nicht mehr los. Mit seiner Kegelform und dem wie leicht überzuckerten Gipfel steht der Kilimanjaro frei in der afrikanischen Landschaft: Ein faszinierendes Bild der Gegensätze. Viele Medienmitteilungen, in denen von den letzten Tagen der Gletscher auf dem Kilimanjaro berichet wird, lassen aufhorchen. Sind die Tage, an denen dieses wunderbare Bild noch in Realität genossen werden kann, gezählt? Bilder, auf denen der Unterschied der Gletscherausdehnungen während einer Dekade oder weniger gezeigt werden, lassen Schlechtes befürchten. Das Beispiel des Gletscherschwundes auf dem Kilimanjaro wird in vielen Berichten als Mahnmal für den vom Menschen verursachten Treibhauseffekt gebraucht. Unsere Gesellschaft verursacht durch ihre Lebensweise das Erwärmen der Erdatmosphäre. Ist sie gar direkt für das Schwinden der Gletscher verantwortlich?

Diese Gedanken und Fragen führten mich zum Thema dieser Arbeit. Genauere Informationen und Kenntnisse über den Kilimanjaro und ewiges Eis in Tropengebieten sollen helfen, den wohl unausweichlichen Verlust dieser einzigartigen Landschaft der Gegensätze zu begreifen.

2 Einleitung

Ist der Mensch durch den von ihm verursachten Treibhauseffekt schuld am Abschmelzen der Gletscher? Sind die Auswirkungen der Erderwärmung an Gletschern in tiefen Breiten besonders gut zu erkennen, da diese Gletscher besonders anfällig sind auf Temperaturschwankungen? Oder umgekehrt: Kann man aus dem Abschmelzen der Gletscher am Kilimanjaro folgern, dass sich das Klima nachhaltig geändert haben muss in den letzten Jahrzehnten, da diese Gletscher in Tropengebieten vorzügliche Klimaindikatoren sind (Kaser 1999)?

Vielleicht sind solche Fragen und Ideen polemisch und unbegründet. Womöglich missbraucht einfach irgendeine Lobby die Bilder der abschmelzenden Eiskuppe des Kibos als Werbeträger für ihre Ansichten. Ein Bildervergleich von früher und heute, auf dem der Schwund der Gletscher am Kibo deutlich sichtbar ist, lässt die Menschen eher aufhorchen als rohe Zahlen und Fakten. Möglich auch, dass die Thematik dazu verwendet wird, wissenschaftliche Erkenntnisse, die womöglich andere Ursachen des Gletscherschmelzens als die Erderwärmung sehen, unter dem Tisch zu verbergen. Der Mensch ist seit eh und je auf Bilder angewiesen, da sie nicht nur das rationale Denken ansprechen. Er glaubt ihnen mehr als neutralen Fakten und Zahlen (The Center for Science and Public Policy 2004).

Wie weit ist der Gletscherschwund bereits fortgeschritten? Gibt es noch Hoffnung auf eine Rettung? Dass die Erderwärmung einen Teil am Abschmelzen der Gletscher am Kibo zu verantworten hat, scheint plausibel. Doch wirken bestimmt noch andere Faktoren ein, die es genauso zu berücksichtigen gilt. Möglichen weiteren Einflüssen soll in

dieser Arbeit ebenso ein Platz gewidmet werden wie den möglichen Auswirkungen eines Verschwindens der Gletscher auf dem Kilimanjaro. Die Folgen der Gletscherschmelze auf die Geomorphologie und Umwelt sind ebenso zu erläutern wie die Folgen für die Menschen in der Region. Wird die Gletscherschmelze die Landschaft gründlich verändern? Muss mit Katastrophen gerechnet werden, die die Landschaft und die Menschen bedrohen? Oder wird der Kilimanjaro gar zurückschlagen und die Region mit einem unvorhergesehenen Vulkanausbruch erschüttern?

Auf alle diese Fragen und Gedanken sollen mit dieser Arbeit mögliche Antworten gesucht werden. Einige von ihnen kann man klären, einige von ihnen kann man mit Einschränkungen beantworten und andere werden weiterhin unbeantwortet bleiben. Diese noch offenen Fragen am Schluss sollen zum Weiterdenken und Weiterforschen anregen.

Das Thema ist recht spezifisch gewählt. Aussagekräftige Quellen lassen sich nicht ohne Probleme finden. Die wenigen vorhandenen Studien sind alle in Fachmagazinen erschienen und in Fachenglisch verfasst worden. Die vorhandenen Quellen sollen dennoch best möglichst analysiert werden und dem Leser Antworten auf die aufgeworfenen Fragen liefern.

2.1 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in 6 Kapitel unterteilt, die immer näher ans Thema heranführen. Im Vorwort ist die perönliche Motivation für die Wahl dieses Themas festgehalten. Die Einleitung enthält Fragestellungen zum Titel, die in der Arbeit erläutert werden sollen. Auch Rahmenbedingungen und Hypothesen werden in diesem Kapitel aufgestellt. Im 3. Kapitel werden die Besonderheiten von tropischen Gletschergebieten näher erläutert und beschrieben. Es soll einen Überblick über die Entwicklung, Vorkommen und speziellen Eigenschaften dieser Gebiete ermöglichen. Kapitel 4 widmet sich der geologischen Situation des Kilimanjaros, die wichtige Fakten und Hintergrundinformationen auch für die weiteren Kapitel enthält. In Kapitel 5 werden die Gründe und Auswirkungen des Gletscherschwundes auf dem Kilimanjaro erläutert. Das letzte Kapitel dient der Evaluation und der Analyse des Themas über einen grösseren Rahmen als nur den des Kilimanjaros.

3 Ewiges Eis in Tropengebieten

Man stutzt beim Gedanken an Gletschergebiete in tropischen Breiten. Eis im Umfeld von Palmen und schweisstreibenden Temperaturen, in Gebieten, die man nur als Sonnendestinationen aus Reisekatalogen kennt?

Macht man sich einige Überlegungen dazu, kommt man schnell zur Folgerung, dass ewiges Eis in tiefen Breiten nur in extremen Höhen, also auf hohen Gebirgen vorkommen kann. Die Temperatur muss ja auch in diesen Gebieten, zumindest im Nährgebiet des Gletschers, unter Null Grad Celsius sinken können.

3.1 Vorkommen

Schaut man die von den Tropen und Subtropen tangierten Hochgebirge der Erde an, so stechen einem eigentlich nur die Anden ins Auge. Sieht man etwas genauer hin, so erkennt man auch hohe Erhebungen im Osten Afrikas und auf Irian Jaya. Diese drei Gebiete sind die letzten Regionen, in denen man noch diese Gegensätze von Eis und Tropen betrachten kann. Im Vergleich zu den Gletschervorkommen in Südamerika sind die Gletscher in Afrika und Irian Jaya winzig (siehe Abb. 2). Die Gletscher auf Irian Jaya, in Ostafrika auf dem Mount Kenya, dem Kilimanjaro und dem Rwenzori machen weniger als 0.5 % des Eises in äquatorialen Breiten aus. Die grössten Vorkommen sind in den grossen Inlandeismassen der Anden zu finden. Dort findet man auch das letzte zusammenhängende Gletschergebiet in tiefen Breiten (Kaser 1999b).

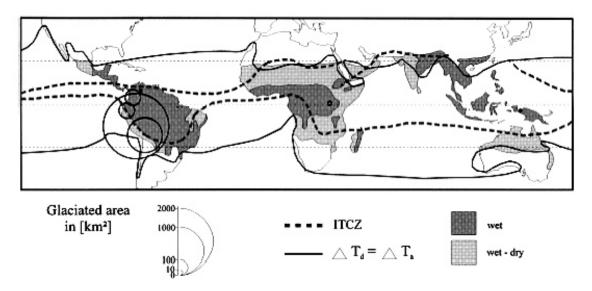


Abbildung 2: Die Verteilung tropischer Gletschervorkommen auf der Erde. Man erkennt gut die noch grossen Vorkommen in Südamerika und die dazu winzigen Überreste in Afrika und auf Irian Jaya (aus Kaser 1997, Fig. 1).

3.2 Charakteristika

Tropische Gebiete zeichnen sich dadurch aus, dass sie keine jahreszeitlichen Klimaschwankungen erfahren. Saisonalität gibt es in diesen Gebieten nicht. Man unterscheidet die Gletschervorkommen in tiefen Breiten nach Vorkommen in den inneren Tropen, also ohne Saisonalität, und Vorkommen in den äusseren Tropen. In den äusseren Tropen gibt es im Verlauf des Jahres infolge der Verschiebung der Innertropischen Konvergenzzone durch den wechselnden Sonnenstand eine trockene und eine feuchte Saison. Die äusseren Tropen sind eine Art Übergangszone zwischen feuchten Tropengebieten und ariden Subtropen. Kaser (1999a) betont die zwei klimatischen Hauptkomponenten dieser Gebiete, nämlich das Passatwindsystem und die Innertropische Konvergenz (ITC). Die ITC ist eher mit feuchten Konditionen verbunden, die Passatwinde bringen eher trockene Konditionen. Passend zur Unterteilung der Tropen in innere Tropen, äussere Tropen und Subtropen können auch drei unterschiedliche Gletscherregime in tiefen Breiten ausgemacht werden (Kaser 1999a, Sonnensystem 2005):

Innere Tropen: Diese Zone, einige Grade Nord bis einige Grade Süd des Äquators liegend (Spiess 1994), wird auch Regenwaldzone genannt, da das ganze jahr hindruch sehr feuchte und warme Konditionen herrschen, die das Wachstum von Regenwald

erst ermöglichen. Es gibt keine Jahreszeiten in den inneren Tropen. Stabil hohe Temperatur und Feuchtigkeit durchs ganze Jahr hindurch kreieren eine Situation, in der Akkumulation und Ablation der Gletscher gleichzeitig übers ganze Jahr geschehen. Die Ostafrikanischen Gletschervorkommen und die Vorkommen auf Irian Jaya sind Beispiele für diesen Gletschertyp der inneren Tropen.

Äussere Tropen: In dieser an die inneren Tropen angrenzende Zone, die in Ostafrika über 15 Grad in nördliche und südliche Richtung reichen kann (Spiess 1994), findet man die Savannen. Es gibt einen Wechsel von Regen- und Trockenzeit. In diesen Gebieten gibt es die höchsten Niederschlagsraten der Erde. Akkumulation der Gletscher korreliert mit der feuchten Saison, während in der trockenen Saison Akkumulation verschwindet. Infolge der trockenen Luft wird viel der vorhandenen Energie durch Sublimation verbraucht und weniger Energie bleibt für das Abschmelzen übrig. Das heisst, dass Eis an der Gletscheroberfläche direkt vom festen in den gasförmigen Zustand übergeht und der Gletscher so einen Teil seiner Energie verliert. Die Ablation geht also nicht hauptsächlich aus Schmelzprozessen des Gletschers hervor. Dies ist ein wichtiger Unterschied von Gletschern in gemässigten Breiten und Gletschern in Tropengebieten.

Subtropen: Die Subtropen, fast den gesamten Rest Afrikas bedeckend (Spiess 1994), sind geprägt durch starke Trockenheit, heisse Sommer und milde Winter. Unter extremen subtropischen Konditionen, also bei sehr trockenem und warmem Klima, wird fast alle Energie durch Sublimation verbraucht. Die sporadische Akkumulationsphase beschränkt sich auf seltene Regenfälle, die übers ganze Jahr auftreten können.

Die drei unterschiedlichen tropischen Gletscherregime zeigen auch die zwei Hauptunterschiede der Gletscher in tiefen Breiten zu den Gletschern der gemässigten oder mittleren Breiten. Das Verhältnis von Sublimation zu Ablation verändert sich mit der Breite. In den mittleren Breiten ist dieses Verhältnis weit weniger ausgeprägt als in den Subtropen oder äusseren Tropen. Die Ablationsperiode ist ein weiteres Charakteristikum der Gletscher in tiefen Breiten. Sie existiert eigentlich mehr oder weniger durchs ganze Jahr hindurch, da die Temperaturen keinen Jahreszeiten folgen. Für die Tropengletscher bedeutet das, dass sie eine starke Ablationsperiode nicht einfach in der kalten Jahreszeit teilweise wieder kompensieren können, sondern dauernd unter Stress stehen und sich nur langsam von einer Ablationsperiode erholen (Kaser 1999a).

Medien und Literatur bringen haufenweise Berichte über das Abschmelzen der Gletscher, auch der Gletscher in den Tropen (siehe beispielsweise Kaser 1999a, Kaser 1999b, The Center for Science and Policy 2004, Wissenschaft-online 2005, Nationalgeographic 2005). Die Gletscher der äquatorialen Breiten seien besonders gute Klimaindikatoren, wird betont, reagierten sie doch sehr rasch auf gegebene Veränderungen (Kaser 1999a). Immer wieder wird im Zusammenhang damit auf die vom Menschen verursachte Klimaerwärmung hingewiesen. Faktum ist, dass, seit es Beobachtungen von Gletschern in diesen Regionen gibt, die Gletscher im Rückzug sind. Beobachtete Gletscherückgänge in tiefen Breiten von über Dreiviertel der Fläche im letzten Jahrhundert sind viele vorhanden (Kaser 1999b). Kaser nennt einen weiteren Grund für die spezielle Sensibilität der tropischen Gletscher auf Klimaänderungen. Er erwähnt, dass durch die Abwesenheit von Jahreszeiten

in den Tropen einige glaziologische Schlüsselwerte anders reagieren. Der vertikale Massengradient des Gleschters ist schwächer als bei Gletschern in mittleren Breiten. Das heisst: Die Masse des Gletschers ist eher gleichmässig verteilt und nicht konzentriert auf entweder Nähr- oder Zehrgebiet. Daraus resultiert ein höherer Verhältniswert von Akkumulationszone zu Ablationszone. Diese Zonen sind eher gleich gross und das Verhältnis Akkumulation zu Ablation geht gegen 1:1. Das Verhältnis Nähr- zu Zehrgebiet von Gletschern in unseren Breiten ist 2:1 (AWI 2005). Da das Akkumulationsgebiet tropischer Gletscher ähnlich gross ist wie das Ablationsgebiet wirkt sich eine Veränderung in der Akkumulationszone viel rascher auf die Gletscherzunge, auf das Ablationsgebiet, aus. Das wiederum bedeutet, dass tropische Gletscher mit ihren spezifischen Massengradienten anfälliger auf Klimaschwankungen sind als Gletscher gemässigter Breiten (Kaser 1999a).

4 Geologie Ostafrika und Kilimanjaro

Dieses Kapitel soll die geologischen Besonderheiten Ostafrikas erläutern und erklären. Es führt vom geologischen Grossraum Ostafrika an die regionale Geologie des Kilimanjaros heran. Fragen nach einem aktiven oder inaktiven Vulkanismus oder zur Geschichte der Orographie in der Region werden besprochen.

4.1 Geologische Grosslage Ostafrika

Ostafrika befindet sich in einem höchst interessanten tektonischen Gebiet. In vielen Berichten hört man vom Afrikanischen Great-Rift-Valley oder Grabensystem, das beispielsweise, als es entstand, die letzte evolutionäre Trennung zwischen Mensch und Affe hervorgebracht haben soll.¹

Betrachtet man eine geologische oder topografische Karte dieser Region, so fallen einem verschiedene Besonderheiten auf:

In Nord-Süd-Richtung verlaufen parallel zwei Grabensysteme (siehe Abb. 3), die durch ihre markanten topografischen Erhebungen und Vertiefungen auffallen. Ebenfalls in dieser Richtung gestreckt fallen der Tanganjikasee und der Njassasee (auch Malawisee genannt) weiter im Süden auf. Der Victoriasee, der zwischen den beiden Grabensystemen liegt, ist im Gegensatz zu allen anderen grossen Seen nicht in Richtung der Gräben gestreckt, sondern liegt rund in der Ebene zwischen den Gräben. Weiter erkennt man eine Folge von grösseren Gewässern nördlich des Tanganjikasees, die in einer von Nord nach Süd verlaufenden Linie angeordnet sind.

Es handelt sich bei diesen geologischen Erscheinungen um das grosse Ostafrikanische Grabensystem oder Rift-Valley. Der Ostafrikanische Graben, östlich des Victoriasees verlaufend, und der Zentralafrikanische Graben westlich des Sees gelegen, bilden die Hauptgräben der Region. Tektonisch grenzt dort die Somalische Platte an die Afrikanische Platte. Es handelt sich hier um einen konstruktiven Plattenrand, wodurch sich

¹Als sich die Hügelzüge um das Rift Valley entwickelten, veränderte sich das Klima in Ostafrika. Die letzten gemeinsamen Vorfahren von Mensch und Affe sollen genau in diesem Gebiet angesiedelt gewesen sein. Nun teilte aber das unterschiedliche Klima das Siedlungsgebiet in zwei unterschiedliche Teile. Die Populationen des gemeinsamen Vorfahren passten sich unterschiedlich an die verschiedenen Klimata an und entwickelten sich so sukzessive infolge natürlicher Selektion auseinander. So sollen die ersten Hominiden in Ostafrika entstanden sein (Senckenberg 2005).

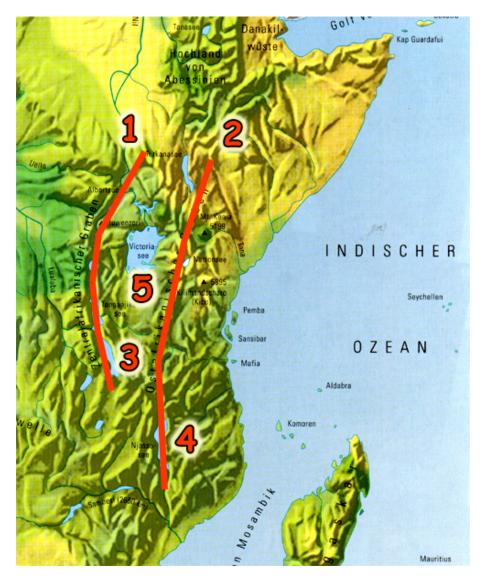


Abbildung 3: Topografische Karte Ostafrikas mit den zwei Hauptgrabensystemen ostafrikanischer- und zentralafrikanischer Graben (nach Kugler 1999, p.161). 1 Ostafrikanischer Graben, 2 Zentralafrikanischer Graben, 3 Tanganjikasee, 4 Njassasee, 5 Victoriasee.

die angrenzenden Platten voneinander entfernen. Konvektionsströme, die im Gebiet der Gräben nahe an die Erdkruste gelangen und seitlich zu den Gräben an der Oberfläche divergierend wegfliessen, rissen die ursprüngliche Afrikanische Platte entzwei. Im Ostafrikanischen Gebiet mit divergierenden Platten dehnte sich die Erdkruste aus und wurde dünner - es entstanden Gräben und Risse einerseits, Gebirge in den Stauchungszonen auf beiden Seiten der Gräben andererseits. Die dünne Erdkruste liess Vulkanismus entstehen. Die austretende Lava bildete über Jahrtausende mächtige Vulkangebirge, so wie das Kilimanjaro-Massiv. In die entstandenen Afrikanischen Gräben und Depressionen nisteten sich im Laufe der Zeit Seen und Flüsse ein (Kugler 1999). Ein Blick auf die Karte (Abb. 3) lässt gut die Folge der Gewässer entlang des Zentralafrikanischen Grabens erkennen. Vor ungefähr 25 Millionen Jahren begann sich dieses Gebiet zu öffnen, womit auch die Bildung der Gräben begann. Das Grabensystem ist geologisch also noch jung. Twarz (2003) sieht darin den Grund, weshalb die Geschwindigkeit von 0.5 - 2 cm / Jahr , mit der

sich die Platten auseinanderbewegen, bescheiden ist. Sie vergleicht diese Geschwindigkeit mit der älterer Grabensysteme , die sich mit weit höheren Geschwindigkeiten von 2 - 10 cm / Jahr ausdehnen. Trotzdem könnte in einigen Millionen Jahren der Afrikanische Kontinent entlang dieser Gräben entzwei brechen (Kilimanjaroworld 2005). Zwischen den Hauptgräben liegt eine Ebene, über die sich der Victoriasee erstreckt. Durch die Lage auf der Ebene ist der Victoriasee nicht besonders tief. Hingegen erreichen die Seen, die in den Gräben liegen, markante Tiefen. Im Osten des Ostafrikanischen Grabens befinden sich die grössten Erhebungen des Kontinents. Das Kilimanjaro Massiv und der Mount Kenya erstrecken sich entlang dieser aktiven tektonischen Zone.

An den vielfältigen geologischen Erscheinungen in der Region erkennt man, wie speziell dieses Gebiet in geologischer Hinsicht ist. Nicht umsonst wird Ostafrika immer wieder als Exempel für einen auseinander brechenden Kontinenten mit all den damit verbundenen geologischen Folgen verwendet.

4.2 Geologischer Ursprung des Kilimanjaro

Mit dem Beginn der entgegengesetzten Bewegungen der beiden Lithosphärenplatten vor ungefähr 25 Millionen Jahren begann die Ausdünnung der Erdkruste im Gebiet der sich öffnenden Gräben. Während dieser Zeit änderte sich die Topographie stark. Die tektonisch wirkenden Kräfte entwickelten Gebirgszüge und Depressionen. Einerseits entstanden durch die Plattenverschiebung zu dieser Zeit also Gebirge, andererseits entwickelten sich Vulkane, die mit zunehmenden Ausbrüchen auch eine stattliche Höhe erreichten (Twarz 2003).

Das Kilimanjaro Massiv liegt ungefähr 80 km östlich der aktiven Zone rund um den Ostafrikanischen Graben, in der Nähe des Gregory Rift Valley (Kilimanjaro 2005). Seine Form verrät bereits den vulkanischen Ursprung des Massivs. In der gleichen Region befinden sich grosse Überreste von zum Teil bereits wieder erodierten Vulkanen. So liegt der mächtige Ngorongoro-Krater und der Mount Meru auf dem Gregory Rift oder weiter im Norden der Mount Kenya, ebenfalls vulkanischen Ursprungs (siehe Abbildung 4). Man vermutet, dass vor 750'000 Jahren die ersten Vulkanausbrüche des Kilimanjaros stattfanden und damit sein stetiges Wachsen seinen Anfang nahm. Zu dieser Zeit war sein älterer Gegenspieler um den höchsten Punkt Afrikas, der Mount Kenya (5199 m), bereits wieder durch Erosion am Schrumpfen. Verfolgt man die Evolution der Vulkane in der Region, kommt man zum Schluss, dass der Mount Kenya früher höher war als der Kilimanjaro heute, im Laufe seiner bereits langen Erosionsgeschichte jedoch viel seiner ursprünglichen Höhe verloren hat (Kilimanjaroworld 2005). Das Kilimanjaro-Massiv mit 5895 m.ü.M. auf der höchsten Erhebung, dem Uhuru Peak, gilt heute als höchster Punkt Afrikas und darüber hinaus als höchste freistehende Erhebung der Erde (Gratzel 2005).

4.3 Kilimanjaro-Massiv

Im Nordosten Tanzanias, an der Grenze zu Kenya liegend, erhebt sich das Kilimanjaro-Massiv. Spricht man vom Kilimanjaro, ist gemeinhin der berühmte kegelförmige Berg mit der Eiskappe gemeint. Dies stimmt so nicht ganz, denn Kilimanjaro wird eine ganze Gruppe von Erhebungen genannt, die zusammen ein Massiv bilden. Drei wichtige Spitzen, alles Vulkankegel, prägen das Massiv. In einer Linie erstrecken sich von Nordwest nach Südost

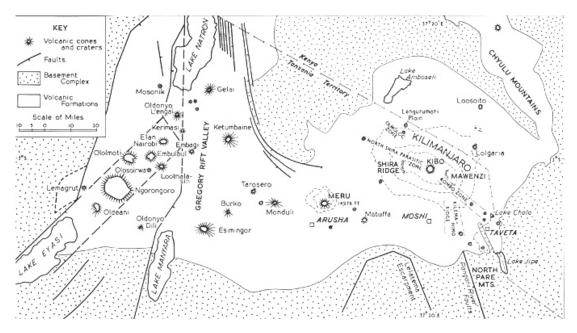


Abbildung 4: Die geologische Landschaft in der Region um das Gregory Rift Valley. Eine Vielzahl von vulkanischen Erscheinungen prägt das Gebiet. Norden liegt oben (aus Downie and Wilkinson 1972, p. 9).

Shira, Kibo und Mawenzi (Ozarkoasis 2005). Der mächtigste und besterhaltene Kegel ist der Kibo. Auf seinem Kraterrand liegt auch der höchste Punkt Afrikas mit 5895 Metern über Meer.

Lange Zeit rätselte man über den Ursprung des Berges. So war der Beweggrund der ersten Expedition zum Gipfel die Klärung der Frage: Vulkan oder nicht Vulkan. Erst als nach mühsamer Erstbesteigung im Jahre 1887 die Kratermündung erreicht wurde, war das lange Rätsel um den Kilimanjaro gelüftet (Dippelreither 2002).

Fortan rätselte man darüber, ob der Vulkan noch aktiv oder bereits erloschen sei. Die vulkanische Geschichte des Massivs begann im frühen Pleistozän, als sich die diversen vulkanischen Aktivitäten in der Region auf die drei Hauptzentren Shira, Kibo und Mawenzi konzentrierten und diese langsam Gestalt annahmen. Obwohl alle gleich aktiv waren, entwickelten sich die drei Zentren unterschiedlich. Im späten Pleistozän nahm die vulkanische Aktivität ab und Ausbrüche folgten auf längere ruhige Perioden (Downie and Wilkinson 1972). Shira und Mawenzi sind mittlerweile ganz erloschen und zeigen keine vulkanischen Aktivitäten mehr. Die ersten Forscher am Kibo konnten keine vulkanische Aktivität feststellen, so dass sie postulierten, der Kibo sei ebenfalls erloschen. Erst 1933 gelang einem Forscher der Nachweis von Schwefelaustritt am Kibo und fumarolischer Aktivität. Viele spätere Expeditionen zeigten ebenfalls Schwefelausstoss am Kibo, so dass heute allgemein anerkannt ist, dass der Kibo auch heute noch vulkanisch aktiv ist. Es stellt sich natürlich die Frage, ob und wann ein Ausbruch bevorsteht, da mittlerweile doch viele Menschen in dieser Region leben und die fruchtbare vulkanische Erde viele Leute ernährt. Sieht man in die Vergangenheit, so kann mit Sicherheit gesagt werden, dass der letzte Ausbruch mehr als 200 Jahre zurückliegen muss, da keine Aufzeichnungen über Eruptionen aus diesen Jahren existieren. Im einheimischen Volk jedoch wird die Erzählung von kleineren beobachteten Eruptionen überliefert. Dies ist umso interessanter, als dieses Volk sich erst vor 500 Jahren in diesem Gebiet ansiedelte. Der Kibo befindet sich also im momentanen Schlaf und ist seit den vulkanischen Aufzeichnungen nur wenig aktiv. Die letzte kleine, unbedeutende Eruption könnte aber vor relativ kurzer Zeit (einige hundert Jahre) die Region getroffen haben (Downie and Wilkinson 1972).

5 Glaziologie Kilimanjaro

In diesem Kapitel sollen die Ausgangsfragen über die Gründe und die Auswirkungen des Gletscherrückganges anhand diverser Fakten diskutiert werden. Der Fokus der Arbeit liegt auf diesem Kapitel. Für das Unterkapitel "Auswirkungen auf die Geomorphologie" gibt es nur wenig Literatur, so dass hier vor allem eigene Gedankengänge und Hypothesen ausformuliert werden.

5.1 Klima Kilimanjaro

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, liegt der Kilimanjaro in den Inneren Tropen. Die Inneren Tropen zeichnen sich dadurch aus, dass sie durchs ganze Jahr hindurch feuchte Konditionen haben. Stabile Luftfeuchtigkeit und konstante Temperaturen sowie stabile humide Konditionen führen dazu, dass in den Inneren Tropen Gletscher das ganze Jahr hindurch gleichzeitig wachsen (Akkumulationszone) und schmelzen (Ablationszone).

Eisbohrkerne aus den verschiedenen Gletschern des Kilimanjaro haben ergeben, dass das Gebiet im Osten Afrikas von drei klimatischen Hauptereignissen geprägt wurde. Vor ungefähr 8300 Jahren ereignete sich in der Region um den Kilimanjaro eine kurze, aber umso heftigere Trockenperiode, die sich mit grossen hydrologischen Änderungen in den afrikanischen Tropen deckte. Vor 5200 Jahren ging eine kühlere Periode zu Ende, die gleichzeitig mit einer feuchteren Periode als heute auftrat. Der dritte abrupte Wechsel im Klima trat vor 4000 Jahren in Kraft, als eine heftige Trockenzeit über Ostafrika hereinbrach und die Seespiegel stark absinken liess. Die Dürreperiode war so stark, dass sie weit über Afrika hinaus wirkte. Einige Zivilisationen dieser Zeit erlitten ihren Untergang infolge der Dürre (Thompson et al. 2002). Just zu diesem Zeitpunkt brach in Ägypten eine Hungersnot aus und das alte Reich zerfiel (Wissenschaft-online 2005).

Ein Zitat von Jäger aus dem Jahre 1909 (Jäger 1909, p. 143f) soll einen Eindruck vom Klima am Kilimanjaro geben, wie es die Pioniere vor einem Jahrhundert beschrieben:

"Die Niederschläge nehmen mit der Höhe zunächst bedeutend zu [...] Dass aber die Niederschlagsmenge noch weiter zunimmt, beiwest der Regenwald, der über dem Kulturland von etwa 1800m an gedeiht und meist in Nebel gehüllt ist [...] 2500m ist etwa die mittlere Höhe der Kumulus- oder Stratuswolkendecke, die den Kilimandscharo zu umlagern pflegt und im Durchschnitt mittags am dichtesten ist, abends aber, wenn der Fallwind vom Berg herabkommt, am lichtesten [...] Über der Wolkendecke ragt der Berg in eine andere Klimaschicht hinein. Die Winde haben ihre Feuchtigkeit weiter unten abgegeben und sind nun trocken [...] Hier müssen die Niederschlagsmengen weit geringer sein als im Urwald, ich möchte vermuten, etwa ein Meter. Diese sehr rohe Schätzung kann sich lediglich auf die Beschaffenheit der Vegetation stützen. Je weiter wir emporsteigen, desto trockener sieht die Vegetation aus."

Als Vergleich dazu hier die Beschreibung des Lokalklimas, wie es in Mölg (2002, p. 352) gegeben wird:

"In der Nacht und noch am frühen Morgen herrschen in der Atmosphäre über dem Gebirge absinkende Luftmassen vor. Dies führt zu Aufklarung der Gipfelregionen und zu dichter Bewölkung in den Tälern, da dort die hangabwärtigen Winde zusammentreffen und ein Konfluenzbereich entsteht. Mit zunehmender Besonnung kehrt sich die topografisch induzierte Zirkualtion noch in den Morgenstunden um, und hangaufwärts gerichtete Winde stellen sich ein. Dadurch bildet sich bereits am Morgen sog. konvektive Bewölkung, die die Gipfelbereiche einhüllt. Das Maximum der Bewölkung und des Niederschlags wird dann am Nachmittag erreicht. In den Abendstunden beginnen wieder hangabwärts gerichtete Winde zu dominieren, und der Kreislauf beginnt erneut."

Die klimatischen Bedingungen rund um das Kilimanjaromassiv haben im Laufe der Zeit immer wieder geändert. Heute sind sich die Forscher einig, dass man sich auch in Ostafrika in einer Phase der Erwärmung befindet, die nach der letzten kleinen Eiszeit 1400 - 1700 (die letze grosse Vereisung des Kibo) begonnen hat (Dippelreither 2002). Eine gute Beschreibung des heutigen Klimas am Kilimanjaro liefern Kaser et al. (2004). Nach ihnen gibt es trotz der Nähe zum Äquator (der Kibo befindet sich ca. 370 km südlich des Äquators) in den Inneren Tropen kleine Unterschiede in den Feuchteperioden. Da die tropische Konvergenzzone den Norden Tanzanias zweimal pro Jahr überquert und die Regenfälle zu diesem Zeitpunkt am grössten sind, gibt es erhöhte Niederschläge von März bis Mai und von Oktober bis Dezember. 70 - 80% aller Niederschläge und 75% der Schneefälle am Kilimanjaro fallen in diesen zwei Feuchtperioden. Die Durchschnittstemperatur schwankt nur wenig über das Jahr und ist ziemlich homogen. Weiter verweisen Kaser et al. (2004) auf die Besonderheit des Kilimanjaros, der grösste freistehende Berg der Welt zu sein. Mit seinen immensen Ausmassen und seiner isolierten Position bringt der Kilimanjaro lokale atmosphärische Zirkulationen durcheinander und verändert so das Lokalklima um den Berg signifikant. Diese lokalen klimatischen Prozesse sind bis heute noch nicht geklärt.

5.2 Gletscherschwund auf dem Kilimanjaro

Immer wieder werden die Bilder des Kibo mit seiner weissen Kappe für die Darstellung von Gletscherschwund und Klimaerwärmung gebraucht (nur noch auf dem Kibo sind heute Eisvorkommen vorhanden). Doch wie weit ist der Gletscherschwund auf dem Kibo bereits fortgeschritten? Inwiefern kann man die Gründe für den Rückgang der Gletscher am Kilimanjaro auf die Klimaerwärmung reduzieren? Sind die Schwankungen der Eismassen am Kilimanjaro nur die Auswirkungen eines endlosen Zyklus der Natur?

5.2.1 Fakten des Gletscherrückzugs

Da die Erhebung der Eisdaten am Kilimanjaro Ende des 19. Jahrhunderts begann, können Veränderungen der Gletscher nur bis dahin gesichert verfolgt werden. Kartierungen aus verschiedenen Jahrzehnten lassen aber ersehen, wie stark die Eismassen am Kibo in den letzten Jahren abgenommen haben. Der Vergleich zweier Fotos vom Beginn und dem Ende des 20. Jahrhunderts veranschaulicht die Abnahme der Gletscher am Kibo (Abb. 3 und

4). Man muss beim Vergleich der beiden Fotografien beachten, dass sie nicht zwingend zur gleichen Jahreszeit gemacht wurden. Man erkennt trotzdem den deutlichen Rückgang der Gletschereismassen am Kibo im letzten Jahrhundert.



Abbildung 5: Kibo mit weitreichender Gletscherkuppe zu Beginn des 20. Jahrhunderts (aus Jäger 1909, Tafel IX). Jäger (1909) weist in seiner Bildlegende darauf hin, dass der Kibo auf diesem Bild mit Neuschnee bedeckt ist.



Abbildung 6: Kibo 1997, die Gletscherkuppe ist fast nicht mehr zu erkennen (aus The Center for Science and Public Policy 2004, p. 1).

Thompson et al. (2002) vergleichen fünf Kartierungen unterschiedlicher Epochen des 20. Jahrhunderts mit ihrer eigenen Karte, erstellt im Jahre 2000. Nach ihren Berechnungen aus Luftfotografien ist die Mächtigkeit der Gletscher des Kibos im Jahre 2000 noch 2.6 km² verglichen mit 12 km² im Jahre 1912. Dies entspricht einer Abnahme von über 80% in weniger als 100 Jahren (Thompson et al. 2002).

In neueren Berichten werden häufiger auch die Zerstückelung der Gletscher, das Verschwinden von Schneefeldern oder vermehrte Toteisvorkommen erwähnt. Die heutigen Eisvorkommen beschränken sich vor allem auf die Kaldera des Kibo und seine westlichen bis südlichen Hänge. Eine in Kaser et al. (2004) publizierte Grafik zeigt den Gletscherrückgang im Lauf der Zeit (Abb. 5). Man erkennt gut, wie seit Ende des 19. Jahrhunderts, als die ersten Aufzeichnungen gemacht wurden, die afrikanischen Tropengletscher zurückgingen. Der Rückzug verläuft kontinuierlich und man kann keine Bremsung des Effekts feststellen.

Faktum ist also, dass seit ungefähr 1880, als erstmals Aufzeichnungen über die Erforschung des Kilimanjaros gemacht wurden, die Gletscher am Berg kontinuierlich abnahmen. Bereits Jäger (1909) weist in seinem Buch aus dem Jahre 1909 auf den Rückgang der

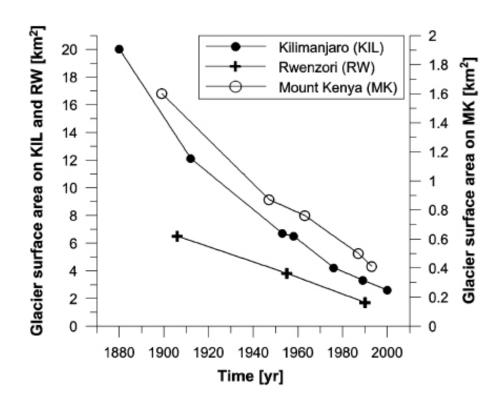


Abbildung 7: Fast lineare Abnahme der afrikanischen Tropengletscher seit 1880 (aus Kaser et al. 2004, p. 330).

Gletscher hin. Es muss vermutet werden, dass das Abschmelzen der Gletscher seit dem Ende der kleinen Eiszeit im Gange ist. Eine eindrückliche Karte der Geltscherrückgänge ist auch in Downie und Wilkinson (1972) dargestellt (siehe Abb. 8).

Man erkennt darauf gut, wie die mächtigen Gletscherzungen während der kleinen Eiszeit die Hänge des Kibo und Mawenzi bedeckten und weit in die Tiefe reichten. Keine bevorzugte Richtung kann ausgemacht werden, in der die Gletscher damals die Hänge des Kilimanjaros säumten. Radial um die gesamte Kaldera des Kibo erstreckten sich grosse Gletscher. Im Gegensatz dazu bedecken heute nur noch wenige Gletscherreste die Kaldera des Kibo und nur noch kümmerliche Überreste der grossen Gletscher sind geblieben. Die einst zahlreich vorhandenen Gletscher des Mawenzi sind heute vollständig verschwunden.

5.2.2 Mögliche Ursachen

Uber die Ursachen des Gletscherschwundes auf dem Kilimanjaro streiten sich die Gesellschaft und die Wissenschaft bis heute. Viele mögliche Ursachen kommen in Frage und werden in den Medien diskutiert, allen voran die These vom schmelzenden Kibo als Folge der globalen Klimaerwärmung. All zu oft wird diese vereinfachte These als Mahnmal für das Auseinanderdriften des Klimaextreme in heutiger Zeit missbraucht. Es kommt aber eine Vielzahl von Faktoren in Frage, von denen die wichtigsten und plausibelsten in diesem Abschnitt erläutert werden sollen.

Sonneneinstrahlung: Die Gletscher des Kibo befinden sich grösstenteils oberhalb des Wettergeschehens und sind lange Zeit der äquatorialen Sonne ausgesetzt. Die Sonneneinstrahlung ist im 20. Jahrhundert intensiver geworden, sie hat sogar einen

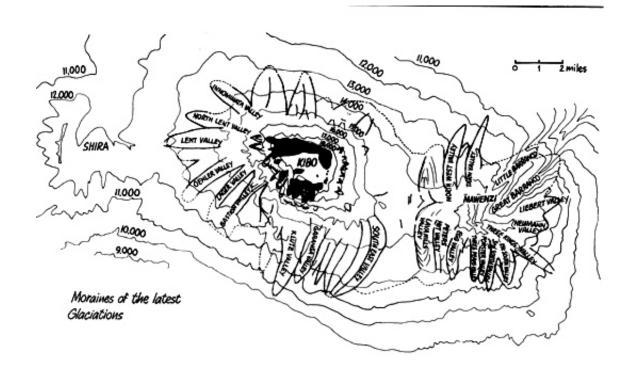


Abbildung 8: Vergleich der Ausmasse der Gletscher am Kilimanjaro zur Zeit der kleinen Eiszeit und heute. Die heutigen Ausmasse sind schwarz gefärbt, die Moränen der kleinen Eiszeit sind mit Linien gezogen. Norden liegt oben (aus Downie and Wilkinson 1972, Fig. 4.1).

Wert erreicht, der seit hunderten von Jahren nicht mehr erreicht worden ist (The Center for Science and Public Policy 2004). Man findet verschiedene absolute Werte in Quellen. Sie haben alle gemeinsam, dass die Sonneneinstrahlung in Watt / Quadratmeter in den letzten Jahrhunderten stetig anstieg. Um 1700 lag sie bei 1362 Watt / Quadratmeter und im Jahre 2000 bei ca. 1367 Watt / Quadratmeter (Hamburg 2005). Die intensivere Strahlung setzt den Gletschern zu und lässt sie vermehrt schmelzen. Mölg (2002) hat mit seiner Arbeit am Rwenzori, nahe des Kilimanjaros, gezeigt, wie sich eine Veränderung der Bewölkungsdichte auf die Tropengletscher auswirken würde. Beobachtungen seit 1963 sichern seine These gut ab, die besagt, dass die Bewölkungsdichte an den grossen Bergen am Äquator in Ostafrika laufend abnimmt. Besonders Gletschergebiete, die in den Morgen- und Abendstunden grosser Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind (das heisst die stark von der Waagrechten abgewinkelten Hänge zur Ost- und Westseite) sind sehr empfindlich auf eine Veränderung der lokalen Zirkulation, die in Kapitel 5.1 beschrieben wurde. Verzögert sich der Beginn der Bewölkung am Morgen nur um wenige Minuten, so würde sich nach dem von Mölg errechneten Modell die mittlere Jahreseinstrahlung der Sonne um mehrere Watt pro Quadratmeter erhöhen. Eine solche Verzögerung der morgentlichen Bewölkung wurde tatsächlich in einer 1996 publizierten Studie an den Ostafrikanischen vergletscherten Gebirgen nachgewiesen (Kaser und Noggler 1996). Diese Erkenntnis erlaubt Mölg den Schluss, dass der Rückgang der Gletscher in Ostafrika auch auf die vermehrte Sonneneinstrahlung zurückzuführen sei (Mölg 2002). Spannend dabei ist, dass jene Gletscher, die für die Sonneneinstrahlung am Morgen

und Abend am sensibelsten sind, weil sie an den Hängen liegen, auch am schnellsten schmelzen oder bereits geschmolzen sind. Man vergleiche die ursprünglichen Gletscher an den Hängen des Kibo, die heute vollständig geschmolzen sind. Praktisch nur noch in der Kaldera sind Gletscher zu beobachten, also dort, wo sie für die morgendliche und abendliche Sonneneinstrahlung nicht besonders empfindlich sind (Mölg et al. 2003). Eine weitere Untersuchung von Mölg et al. (2003) am Kilimajaro hat ergeben, dass die Sonneneinstrahlung der klimatische Hauptfaktor des Rückzuges der Gletscher am Kibo sei.

Abforstung: The Center for Science and Public Policy (2004) weist darauf hin, dass auch die bereits weit fortgeschrittene Abholzung der Regenwälder an den Hängen des Kilimanjaros der Hauptgrund des Gletscherrückganges sein könnte. Je mehr Bäume die Hänge säumen, desto mehr Feuchtigkeit gelangt mit der lokalen Zirkulation (siehe Kapitel 5.1) in die Gipfelregionen und nährt die Gletscher. Ohne diese Bäume, also durch vermehrte Abholzung der Wälder, sind die aufwärtsgerichteten Winde trocken und können der Eisschmelze durch die Sonne nicht die Waage halten.

Globale Erderwärmung: Die globale Erderwärmung ist wohl der am meisten genannte Grund für den Rückzug der Tropengletscher. Es scheint auf der Hand zu liegen, dass höhere Temperaturen die Gletscher rascher schmelzen lassen. Eisbohrkerne aus diversen Tropengletschern wurden durch Thompson et al. (2002) untersucht. Er fand in Schichten, die nicht älter als 50 Jahre sind, kleine längliche Hohlräume im Eis, die in älteren Schichten nirgends auffindbar sind. In diesen Hohlräumen ist das Eis geschmolzen und danach wieder gefroren, was auf eine heftige Erwärmung in den letzten Dekaden hindeutet. Weiter sind Aufzeichnungen vorhanden, die zeigen, dass alleine in den letzten 30 Jahren die Temperatur am Fusse des Kilimanjaros um 3°C zugenommen hat, ohne dass aber die Niederschläge weniger geworden wären. Das heisst, dass nicht weniger Niederschlag Ursache für den Rückzug der Gletscher sein kann, da die Feuchtigkeit stabil ist, sondern die angestiegene Temperatur Motor dieses Effektes ist. Weiter werden Daten aus Bohrkernen der Anden und Asien herangezogen. Aus den Daten zieht Thompson den Schluss, dass die Niederschlagsmenge im 20. Jahrhundert nicht abgenommen hat, die Gletscher also wachsen oder stagnieren sollten. Jedoch zeigten Messungen, dass die Niederschläge im 20. Jahrhundert die wärmsten des vergangenen Jahrtausends waren (Wissenschaft-online 2005). Thompsons Bohrungen bestätigen also die Theorie, nach der gestiegene Temperaturen und nicht grössere Trockenheit zur Gletscherschmelze am Kilimanjaro geführt haben. Es existieren aber auch Fakten, die gegen einen starken Einfluss der Klimaerwärmung auf die Gletscher sprechen. So zum Beispiel liefert Abbildung 9 die Temperaturen der Atmosphäre seit 1979 nicht direkt am Boden, sondern in der Region des Kibogipfels, gemessen von einem NASA Satelliten. Die Grafik zeigt deutlich, dass sich die Temperaturen in den Höhen, in denen auch die Gletscher vorkommen, nicht erhöht haben, sondern entgegen der allgemeinen Auffassung sogar tiefer geworden sind.

Gegen die direkte Wirkung der Klimaerwärmung spricht auch die nicht vorhandene Korrelation zwischen Entwicklung der globalen Temperaturen und des Schmelzens der Tropengletscher. Während die globale Temperatur nicht linear seit 1850 steigt, sondern immer wieder kleine Abkühlungen erfahren hat, haben die Gletscher kon-

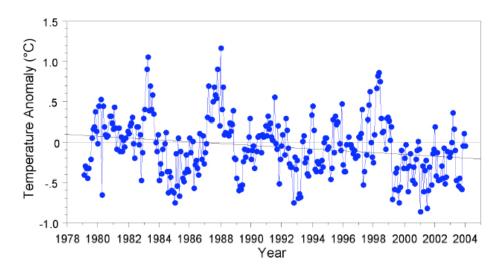


Abbildung 9: Entwicklung der Temperaturen in den Höhen des Kibogipfels seit 1979 (aus The Center for Science and Public Policy 2004, p. 7).

tinuierlich an Eis verloren. Da aber die tropischen Gletscher nach Auffassung der Vertreter der These der Klimaerwärmung sehr empfindlich auf Temperaturschwankungen sein sollen, sollten die Gletscher schnell auf eine Abkühlungsphase der globalen Temperaturen reagieren - was sie aber nicht tun. Zum Vergleich betrachte man die Abbildungen 9 und 10.

Trockenheit: Eine weitere These besagt, dass die Kibogletscher nicht durch Temperaturerhöhung abschmelzen, sondern mangels Niederschlägen verhungern. Sie werden infolge erhöhter Trockenheit in der Region nicht mehr genügend genährt und schmelzen sozusagen passiv, da der Nachschub an Schnee fehlt. Kaser et al. (2004) publizieren einige Hinweise, die für eine solche Theorie sprechen. So sind die Gletscherformen auf dem Kibo heute sehr schroff, scharf und mit vielen Klippen versetzt. Diese spitzen Formen sind auf differentielle Ablation zurückzuführen. Die Gletscher schmelzen also nicht gleichmässig, sondern lokal unterschiedlich stark, wodurch sich an Positionen, die weniger abschmelzen, spitze Formen aus Eis ausbilden. Ein trockeneres Klima unterstützt die Bildung dieser Eisformungen. Würden die Gletscher am Kibo infolge wärmerer Temperaturen schmelzen, so gäbe es diese Formen nicht, da die schroffen Eisformen schnell abgerundet und vom Abschmelzen zerstört würden. Weiter könnten solche Formen auch gar nicht erst entstehen, und wenn, dann nur sehr langsam und unter sehr speziellen Konditionen. Somit ist für Kaser et al. (2004) die Existenz dieser Eisformen ein Indiz, dass die Gletscher am Kibo nicht infolge globaler Erwärmung wegschmelzen, sondern stärkere Trockenheit der Grund dafür ist. Weiter beobachteten Kaser et al. (2004) eine horizontale, rückwärtige Verschiebung der steilen Klippen der einzelnen Gletscher. Da sich die Klippen nicht zurückbilden, sondern sich der gesamte Gletscher zurückzieht, ist dies ein Hinweis auf ungenügende Schneefälle im Akkumulationsgebiet. Typisch für einen abschmelzenden Gletscher ist sonst seine flach auslaufende Gletscherzunge. Eine solche kann aber am Kibo nicht beobachtet werden. Neulich wurden Permafrostfelder am Kibo auf einer Höhe von 4700 m gefunden, die über 50 cm dick waren. Sie lagen in der Nähe des Ar-

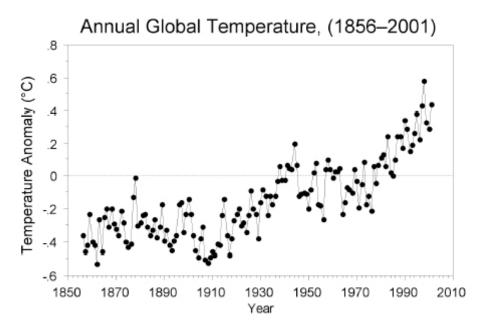


Abbildung 10: Entwicklung der globalen Temperaturen von 1856 bis 2001 (aus The Center for Science and Public Policy 2004, p. 9).

row Gletschers am Kibo, der heute noch in eine Tiefe von 4800 m.ü.M. reicht. Das tiefergelegene Permafrostgebiet induziert eine Gleichgewichtslinie, die tiefer liegt als die heutige Gleichgewichtslinie des Arrow Gletschers. Das heisst, dass die Temperaturbedingungen gegeben sind für ein Wachsen des Gletschers. Dieser tut dies aber nicht, da zum Wachsen die Niederschläge fehlen. Für Kaser et al. (2004) ist klar, dass um 1880 eine Klimaänderung in den Gebieten Ostafrikas zu trockeneren Konditionen führte. Es sei sicher, dass der Hauptgrund für den Gletscherschwund am Kibo in der Trockenheit liege und nicht in den nur marginal höheren Temperaturen in diesem Gebiet. Kaser et al. (2004) weisen aber auch darauf hin, dass die zunehmende Trockenheit am Kilimanjaro indirekt mit einem Temperaturanstieg im Indischen Ozean oder in anderen tropischen Gebieten verbunden sein könnte. So wäre der Gletscherrückgang am Kibo indirekt doch mit der globalen Erderwärmung verlinkt.

Vulkanismus: Indizien deuten darauf hin, dass vulkanische Aktivität ebenfalls zur Abschmelzung der Gletscher auf dem Kibo beiträgt. In die Gletscher geschmolzene Löcher oder Gletscherbögen sind durch fumarolische Aktivität auf dem Krater entstanden. Vulkanische Aktivität könnte auch zum schnelleren Abschmelzen der Gletscher an den Hängen des Kibo geführt haben (Kaser et al. 2004).

5.2.3 Blick in die Zukunft

In einem Punkt scheinen sich die Wissenschaftler einig zu sein: Die Tage der Gletscher auf dem Kibo sind gezählt und das Verschwinden des Eises auf dem höchsten Berg Afrikas scheint unausweichlich. Es wird vorausgesagt, dass wenn die klimatologischen Bedingungen sich nicht drastisch ändern, die Gletscher am Kibo und somit auf dem ganzen Kilimanjaro zwischen 2015 und 2020 vollständig geschmolzen sein werden (Thompson et al.

2002). Dazu beachte man die Entwicklung der Gletschergrösse anhand Abbildung 7 und extrapoliere die Abnahme der Eismassen des Kilimanjaros. Zuerst werden die noch vorhandenen Gletscher an den Hängen des Kibo schmelzen und zuletzt auch die Eismassen im Innern der Kaldera verschwinden.

5.3 Auswirkungen des Gletscherrückganges am Kilimanjaro

Bei der Aussicht, dass die weisse Kuppe des Kibos der Vergangenheit angehören wird, spricht man heute bereits von einem ästhetischen Desaster. Die Gletscher des Kilimajaros gehören zu den bedeutendsten und meist abgebildeten Natursujets. Aber auch die Tourismusindustrie, die das ewige Eis in den Tropen in den letzten Dekaden perfekt zu vermarkten wusste, wird unter einem Verschwinden der Gletscher leiden. Tourismus ist die Haupteinnahmequelle Tanzanias und es wird vermutet, dass ein Abschmelzen der Gletscher am Kibo die Wirtschaft Tanzanias treffen würde (Nationalgeographic 2005). Zudem bedauern Wissenschaftler den möglichen Verlust von wertvollen Klimadaten, die im Eis des Kibos noch gespeichert sind und Aufschlüsse über das Klimageschehen in Afrika während der letzten 10000 Jahre geben können. Die Bibliothek dieser Daten würde für immer verschwinden. Nicht zuletzt wird aber ein Verschwinden der Eismassen Auswirkungen auf die Bevölkerung im Umkreis des Kilimanjaros haben. Auch die Ökologie wird sich den neuen Gegebenheiten ohne Eis und Schmelzwasser anpassen müssen.

5.3.1 Auswirkungen auf die Geomorphologie

Sieht man das Abflussystem in Abbildung 11 des Kilimanjaro-Massiv genauer an, so erkennt man gut, wie zahlreich die Abflüsse an den Hängen sind. Ein dendritisches Abflussystem säumt das gesamte Massiv. Bei genauerer Betrachtung erkennt man auch, dass die Abflüsse auf der Südseite stärker verästelt sind als auf der Nordseite, die allgemein trockener ist (Downie and Wilkinson 1972). Der Pangani River, dessen Bassin die ganze südliche Region des Kilimanjaros entwässert, ist die Lebensader der Region. Die zahlreichen kleinen Abflüsse an den Hängen dienen zur Bewässerung der fruchtbaren Vulkanerde um das Massiv. Mit der Zeit haben sich die Abflüsse so weit in das Vulkangestein gefressen, dass sogar Schluchten wie die Weru Weru Schlucht (Nummer 2, Abb. 11), erodiert wurden. Das Bild der gesamten Region um den Kilimanjaro hängt stark von dessen Abflüssen ab.

Man kann sich gut vorstellen, dass alle diese Abflüsse vom Schmelzwasser des Kibos, also direkt vom Gletschereis abhängig sind. Nach dieser Vorstellung, käme man zum Schluss, dass die Abflüsse mit dem Verschwinden der Gletscher ebenfalls verschwinden würden. Das Versiegen der Abflüsse würde das Leben der Menschen, die direkt von diesem Wasser abhängig sind (Trinkwasser, Landwirtschaft, Stromproduktion etc.), tangieren (Thompson et al. 2002). Die Geomorphologie würde sich nur noch durch die Erosion der verbleibenden Niederschläge ändern. Die Erosionskraft des Wassers würde sich mit dem ausbleibenden Schmelzwasser verkleinern. Es würden keine neuen glazialen Erosionsformen mehr gebildet. Die verschwundenen Gletscher würden ihre fluvioglazialen Schuttkegel hinterlassen und die zum Teil schroffen Formen des Untergrundes hervorkommen lassen (Jäger 1909). Diese neu an der Oberfläche liegenden Stellen würden nicht mehr durch die Kraft des Eises erodiert, sondern durch die Erosionskraft von Niederschlagswasser und

Schmelzwasser verändert. Das Pangani Becken im Süden (Nummer 3 in Abb. 11) würde weiter verkümmern und wohl menschliche Eingriffe in die Geomorphologie erzwingen. Denn Bewässerungskanäle würden benötigt, um die Felder im Becken zu bewässern.

Dass es soweit kommen wird, wird mehr und mehr angezweifelt. Die Abflüsse des Kilimanjaros würden auch bleiben, wenn das Eis verschwunden sei, behaupten Autoren. So weist Dippelreither (2002) darauf hin, dass die Bäche und Flüsse nicht von den Gletschern gespeist werden. Er beruft sich auf Messungen, die besagen, dass die Zonen der Abflüsse jährlich bis zu 2000 mm Niederschlag erhalten und davon gespeist werden (Dippelreither 2002). Einen anderen Hinweis bringen Kaser et al. (2004). Da infolge der starken Trockenheit Sublimationsprozesse als Grund der Ablation wichtiger sind, ist Schmelzwasser nicht die treibende Kraft der Abflüsse. ² Das Eis evaporiert direkt, ohne überhaupt in flüssiges Wasser überzugehen. Schmelzwasser wird so verringert. Ebenfalls weist er darauf hin, dass die Intervalle, in denen Schmelzwasser vom Plateau abfliessen, immer nur sehr kurz und unbedeutend seien. 96 % des Wassers der Abflüsse sei von Niederschlägen in den Abflussonen (Kaser et al. 2004).

Mit dem Schmelzen des Eises wird wohl auch der Permafrostboden tauen und Instabilitäten an den Hängen des Kibos fördern. Hangrutsche durch Tauwasser und Einsturz von Permafrostboden werden die Landschaft möglicherweise verändern. Gletscherabbrüche an den noch vorhandenen Eismassen werden Steinschlag oder Gerölllawinen auslösen, die die Hänge verändern werden. Mölg (2003) diskutiert auch die Veränderung des Albedowertes (durch das Verschwinden der weissen Farbe des Eises) und die klimatischen Folgen, die sich dann auch wieder auf die Geomorphologie der Umgebung auswirken werden.

Wohl keine Folgen wird der Gletscherschwund auf die vulkanische Aktivität des Kibo haben, so dass ein Ausbruch nicht wahrscheinlicher wird, wenn die eisige Decke dahinschmilzt. Ein Ausbruch würde die Geomorphologie der Region nachhatlig verändern. Ob diese Variante eintreffen wird, entscheidet allein der Kibo.

5.3.2 Auswirkungen auf Land und Leute

Auch wenn die Abflüsse grösstenteils durch die Niederschläge gespeist werden, so führt das Verschwinden von Schmelzwasser doch zu einer Verringerung der Abflussmenge. Die Perioden der ausgetrockneten Flüsse während der Trockenzeiten verlängern sich. Der Pangani River, das Herz des Gebietes südlich des Kilimanjaros, bringt weniger Wasser, um die Felder der Eingeborenen zu bestellen. Die fruchtbare Erde an den Hängen und Ausläufern des Massivs können nicht mehr stark genug bewässert werden, wodurch der Ertrag abnimmt. Auch die Elektrizitätsversorgung in der Region ist gefährdet, zumal Energie aus Flusskraftwerken gewonnen wird (siehe Nummer 1, Abb. 11). Der Pangani River ist auch die Lebensader des fauna- und florareichen Unterlandes des Kilimanjaros, ein Gebiet mit der grössten Biodiversität Ostafrikas. Unzählige endemische Arten sind durch ein Absinken des Pangani Rivers bedroht. Auch wertvolle Mangrovengebiete und Sümpfe sind gefährdet (iucn 2005).

Nicht vergessen darf man die Auswirkungen auf den Toursimus am Berg. Der Reiz des ewigen Eises in den Tropen wird nicht mehr vorhanden sein und mit dem Eis werden auch wichtige Devisen für Tanzania verschwinden. Der Tourismus ist Tanzanias wich-

²Das Verhältnis Schmelzen / Sublimation der Gletscherablation verändert sich hin zur Sublimation, je trockener die Umgebung ist (Kaser 1999).

tigste Einnahmequelle. Problematisch wird sich die Lage in der Region direkt um den Berg entwickeln. Die Bevölkerung ist fast vollständig abhängig vom Bergtourismus. Ein Verschwinden der Gletscher würde diese Leute am härtesten treffen (Nationalgeographic 2005).

Zuletzt darf man nicht vergessen, wie der Kilimanjaro mit seiner weissen Kuppe in der Kultur der endogenen Stämme verwurzelt ist. Kibo als "der Weisse, der Helle" in den Erzählungen der Leute wird nur noch im Gedächtnis vorhanden sein. Die Chaggas, die Masaai, die Stammesvölker werden mit dem Eis einen Teil ihrer Kultur verlieren (50plus 2005).

6 Evaluation

Aus den besprochenen Informationen über tropische Gletschervorkommen, speziell am Kilimanjaro, können einige Schlüsselfragen herausgelesen werden, die in diesem Kapitel speziell eräutert werden sollen.

6.1 Tropischer Gletscherschwund: Eine Folge des Klimawandels oder mehr?

Dass der Gletscherschwund am Kilimanjaro nicht allein durch die ansteigende Globaltemperatur hervorgerufen wird, ist sicher. Es spielen viele Faktorn eine wichtige Rolle. Zusammenfassend kann man sagen, dass drei Hauptrichtungen in der Literatur verfolgt werden:

- Die These, die besagt, dass die laufend steigenden Erdtemperaturen verantwortlich sind für das Schmelzen der Gletscher, wird allen voran von Thompson in Thompson et al. (2002) und in Wissenschaft-online (2005) vertreten. Indirekt verweist Thompson auf die Schuld des Menschen, der verantwortlich für die globale Erderwärmung sei.
- Kaser und sein Team (1999a, 1999b, 2004) vertreten die These, wonach nicht die steigenden Temperaturen, sondern die steigende Trockenheit für den Gletscherschwund hauptverantwortlich sei.
- Mölg vertritt die These (2003, 2004), wonach der Hauptgrund der Gletscherschmelze in der erhöhten Sonneneinstrahlung zu suchen sei. Diese trete durch eine verminderte Bewölkungsdichte am Kilimanjaro auf.

Es scheint plausibel, die Gründe für den Gletscherschwund in einem Mix aus den oben genannten Thesen zu suchen. Nicht nur die globale Erderwärmung ist schuld am Sterben der tropischen Gletscher. Auch zyklische, natürliche Faktoren, wie Vulkanaktivität oder Sonnenaktivität sind zu berücksichtigen. Auch die Völker in den Regionen der Gletscher nehmen direkt Einfluss auf die Zukunft der Gletscher, indem sie das Land bewirtschaften und verändern (siehe Abforstung).

6.2 Behandlung der geomorphologischen Auswirkungen in den Quellen

Über geomorphologische Folgen des Gletscherschwundes am Kilimanjaro wird erstaunlich wenig in der Litertaur publiziert. Es scheint, als ob die Forschung sich auf die Gründe für den Gletscherrückgang konzentrieren würde. Nur in drei der von mir gefundenen Quellen werden die geomorphologischen Folgen des Eisrückganges erwähnt (Dippelreither 2002, Thompson et al. 2002, iucn 2005). Und in diesen Quellen sind stets kleine Absätze diesem Thema gewidmet.

Mögliche Gründe für das Desinteresse an den Auswirkungen des Verschwindens der Kibogletscher könnten sein, dass die umliegende Bevölkerung gar nicht so stark von den Folgen betroffen wäre. Die Abflüsse würden ja vielleicht weiter fliessen (siehe Kapitel 5) und die Felder könnten weiter bestellt werden. Katastrophen wie Steinschlag oder Erdrutsche wären eher in den höheren Gebieten zu erwarten. Da sie keine Auswirkungen auf den Menschen hätten, interessieren sie weniger.

Das Interesse der Forscher und der Regierungen liegt eher in den mediophilen Themen. Die Regierung Tanzanias täte gut daran, auch Studien über die Auswirkungen der Eisschmelze zu unterstützen. Denn am Ende, wenn die Kibogletscher nicht mehr da sind und womöglich auch die Touristen fernbleiben, muss Tanzania mit den Folgen leben.

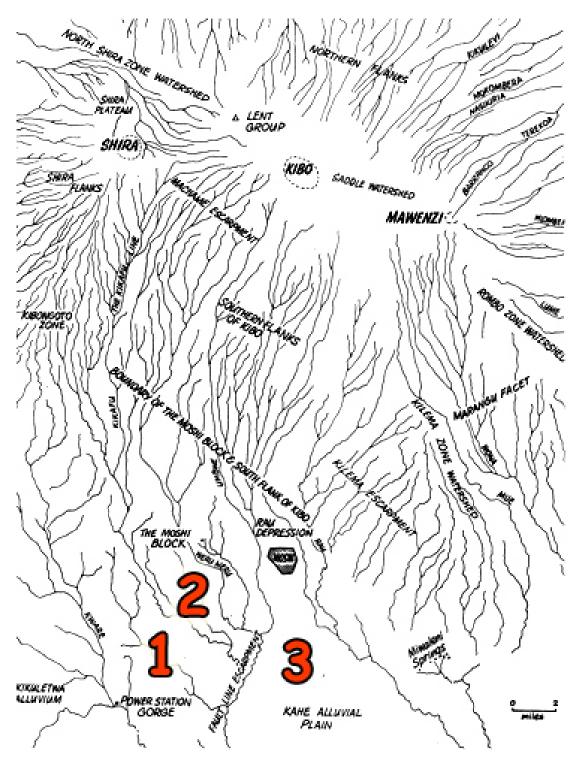


Abbildung 11: Radiales Abflusssystem um den Kilimanjaro. 1 Flusskraftwerke, 2 Weru Weru Schlucht, 3 Pangani River Bassin. Norden liegt oben (aus Downie and Wilkinson 1972, Fig. 3.7).

Literatur

[>] Textquellen:

- [▷] Dippelreither R. (2002): Kilimanjaro Lesebuch. Welver: Conrad Stein Verlag, 2. Auflage, 128pp.
- [\(\right) \) Downie C. und Wilkinson P. (1972): The geology of Kilimanjaro. Sheffield: Sheffield University Press, 287pp.
- [\(\rightarrow \)] Jaeger F. (1909): Forschungen in den Hochregionen des Kilimandscharo. in: Mitteilungen aus den deutschen Schutzgebieten Band XXII, p. 115-197.
- [\(\right) \] Kaser G. (1999a): Glacier-Climate Interaction at Low-Latitudes. in: Journal of Glaciology 47 (157), p. 195-204.
- [▷] Kaser G. (1999b): A review of modern fluctuations of tropical glaciers. in: Global and Planetary Change 22, p. 93-103.
- [▷] Kaser G. und Noggler B. (1996): Glacier fluctuations in the Rwenzori Range (East Africa) during the 20th century a preliminary report. in: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 32, p. 109-117.
- [>] Kaser G., Hardy R., Mölg T., Bradley S. und Hyera M. (2004): Modern Glacier retreat on Kilimanjaro as evidence of Climate Change: Observations and facts. in: International Journal of Climatology 24, p. 329-339.
- [▷] Kugler A. (1999): Die Erde unser Lebensraum. Zürich: Lehrmittelverlag des Kanotns Zürich, p. 161.
- [▷] Mölg T. (2002): Modellierung der kurzwelligen Einstrahlung mit GIS am Beispiel eines tropischen Hochgebirges. in: Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg, p. 347-356.
- [▷] Mölg T. und Hardy D. (2004): Ablation and associated energy balance of a horizontal glacier surface on Kilimanjaro. in: Journal of Geopysical Research, 109(D16104).
- [▷] Mölg T., Hardy R. und Kaser G. (2003): Solar-radiation-maintained glacier recession on Kilimanjaro drawn from combined ice-radiation geometry modeling. in: Journal of Geopysical Research, 108(D23), 4731.
- [▷] Spiess E. (1994): Schweizer Weltatlas. Zürich: Lehrmittelverlag des Kantons Zürich, 223pp.
- [\(\right) \] The Center for Science and Public Policy (2004): The Consensus on Kilimanjaro is Wrong. Washington: Science and Policy, 11pp.
- [▷] Thompson L., Mosley-Thompson E., Davis M., Henderson K., Brecher H., Zagorodnov V., Mashiotta T., Lin P., Mikhalenko V., Hardy R. und Beer J. (2002): Kilimanjaro Ice Core Records: Evidence of Holocene Climate Change in Tropical Africa. in: Science magazine Vol. 298, p. 589-593.

[\(\rightarrow \)] Twarz C. (2003): Entwicklung und Sedimente des Ostafrikanischen Grabensystems. Freiberg: TU-Bergakademie Freiberg, 11pp.

[| Internet quellen:

- [\triangleright] AWI (2005): Gletscher und Eisschilde. Internetseite (konsultiert am 10. November 2005):
 - http://www.awi-bremerhaven.de/GPH/eLEARN/ GletscherundEisschilde.swf
- [>] Climbing (2005): 7 Summits. Internetseite (konsultiert am 08. November 2005): http://www.climbing4thecure.org/wst_page8.html
- [▷] Hamburg (2005): Verändert der Mensch das Klima?. Internetseite (konsultiert am 08. November 2005):
 http://www.hamburger-bildungsserver.de/welcome.phtml?
 unten=/klima/klimawandel/ursachen/ursachen.html
- [▷] iucn (2005): A complex and diverse river basin under threat. Internetseite (konsultiert am 16. April 2005): http://www.iucn.org/themes/wani/e1.html
- [▷] Kilimanjaro (2005): Kilimanjaro Geology and Glaciology. Internetseite (konsultiert am 21. März 2005):
 http://www.kilimanjaro.cc/kgeology.htm
- [▷] Kilimanjaroworld (2005): Geology and Glaciology. Internetseite (konsultiert am 15. April 2005): http://www.kilimanjaroworld.com/tanzania.htm
- [▷] Nationalgeographic (2005): Mount Kilimanjaro's Glacier is crumbling. Internetseite (konsultiert am 25. März 2005): http://news.nationalgeographic.com/news/2003/09/ 0923_030923_kilimanjaroglaciers.html
- [▷] Ozarkoasis (2005): The Volcano: Kilimanjaro, Tanzania. Internetseite (konsultiert am 15. März 2005): http://www.ozarkoasis.com/kilimanjaro/kilimanjaro_volcano.html
- [>] Senckenberg (2005): *Hominiden*. Internetseite (konsultiert am 08. November 2005): http://www.senckenberg.de/root/index.php?page_id=483
- [▷] Sonnensystem (2005): Oberfläche und Klimazonen. Internetseite (konsultiert am 07. November 2005): http://www.sonnensystem.haebler.info/Erde.html
- [▷] Wissenschaft-online (2005): Eismann in den Tropen. Internetseite (konsultiert am 27. März 2005): http://www.wissenschaft-online.de/artikel/614048

 $[\,\triangleright\,]$ 50 plus (2005): Kilimandscharo (Tansania / Tanzania). Internetseite (konsultiert am 25. März 2005):

http://www.50plus.at/Default.htm?http%3A//www.50plus.at/land/kiliman.htm