

Geographisches Institut der Friedrich Alexander Universität Erlangen



2008

LANDWIRTSCHAFTLICHES NUTZUNGSPOTENTIAL DER  
DÜNENSYSTEME BEI PATRICE LUMUMBA  
(MOÇAMBIQUE)



Diplomarbeit | Martin Brandt

Geographisches Institut der Friedrich Alexander Universität Erlangen



Diplomarbeit

## Landwirtschaftliches Nutzungspotential der Dünensysteme bei Patrice Lumumba (Südmoçambique)

Vorgelegt von

**Martin Brandt**

Student der physischen Geographie (Nebenfächer: Informatik, Geologie)

Ungerthalerstr.12

91126 Schwabach

Betreut durch **PD. Dr. Cyrus Samimi**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>DAS UNTERSUCHUNGSGBIET .....</b>	<b>6</b>
2.1	DIE STADT XAI-XAI .....	7
2.2	KLIMA .....	11
2.3	GEOLOGIE .....	13
2.4	FLÄCHENNUTZUNG .....	15
2.4.1	<i>Hackbauregion mit Fruchtbaumnutzung .....</i>	<i>15</i>
2.4.2	<i>Pflugbauregion des Limpopotals.....</i>	<i>19</i>
2.4.3	<i>Problempflanze Mais (Zea mays).....</i>	<i>21</i>
2.4.4	<i>Maniok (Manihot esculenta).....</i>	<i>22</i>
2.4.5	<i>Erdnuss (Arachis hypogaea).....</i>	<i>23</i>
<b>3</b>	<b>DATENGEWINNUNG UND –AUFBEREITUNG.....</b>	<b>23</b>
3.1	METHODIK.....	23
3.2	RELIEFDATEN .....	25
3.3	SATELLITENDATEN .....	30
3.3.1	<i>Landsat .....</i>	<i>31</i>
3.3.2	<i>Grundlagen und Bilderaufbereitung .....</i>	<i>32</i>
3.3.2.1	<i>Radiance und Reflectance .....</i>	<i>33</i>
3.3.2.2	<i>Resolution Merge.....</i>	<i>33</i>
3.3.3	<i>NDVI und Change Detection .....</i>	<i>33</i>
3.3.4	<i>Tasseled Cap .....</i>	<i>36</i>
3.3.5	<i>Optimale Darstellung.....</i>	<i>37</i>
3.3.6	<i>Quickbird.....</i>	<i>37</i>
3.4	STATISTISCHE AUSWERTUNGEN.....	37
3.5	AUSWAHL DES GEBIETES.....	38
3.6	BODENDATEN .....	39
3.6.1	<i>Probenahmetechnik.....</i>	<i>40</i>
3.6.2	<i>Laboranalysen.....</i>	<i>40</i>
3.6.2.1	<i>Elektrische Leitfähigkeit .....</i>	<i>41</i>
3.6.2.2	<i>pH-Wert .....</i>	<i>42</i>
3.6.2.3	<i>Eisen(hydr)oxide .....</i>	<i>45</i>
3.6.3	<i>Analyse des Nährstoffhaushaltes.....</i>	<i>46</i>
3.6.3.1	<i>Stickstoff .....</i>	<i>48</i>
3.6.3.2	<i>Organische Substanz .....</i>	<i>50</i>
3.6.3.3	<i>Phosphor.....</i>	<i>54</i>
3.6.3.4	<i>Effektive Kationenaustauschkapazität und Basensättigung.....</i>	<i>55</i>
3.6.4	<i>Analyse der Korngrößenzusammensetzung.....</i>	<i>59</i>
3.6.5	<i>Wasser- und Lufthaushalt der Böden.....</i>	<i>61</i>
3.6.5.1	<i>Wasserbindung .....</i>	<i>62</i>
3.6.5.2	<i>Wasserbewegung.....</i>	<i>63</i>
3.6.5.3	<i>Wasserversorgung .....</i>	<i>Fehler! Textmarke nicht definiert.</i>
3.6.6	<i>Bodenfarbe .....</i>	<i>64</i>
3.6.7	<i>Diskussion der Methoden.....</i>	<i>65</i>
<b>4</b>	<b>ANALYSE DER GEWONNENEN DATEN .....</b>	<b>65</b>

4.1	DAS LIMPOPOTALGEBIET .....	65
4.1.1	<i>Klassifikation nach WRB</i> .....	66
4.1.2	<i>Weit im Tal gelegenes Gebiet</i> .....	66
4.1.3	<i>Unmittelbar an die Dünen angrenzendes Talgebiet</i> .....	69
4.1.4	<i>Bodenfruchtbarkeit</i> .....	71
4.1.4.1	Physische Faktoren .....	71
4.1.4.2	Pflanzennährstoffe.....	72
4.1.4.3	Chemische Faktoren.....	73
4.1.4.4	Humusgehalt.....	75
4.1.5	<i>Eignung für Pflanzen</i> .....	75
4.2	DAS DÜNENGEBIET .....	76
4.2.1	<i>NDVI und change detection</i> .....	76
4.2.2	<i>Die Böden der Dünen nach WRB</i> .....	80
4.2.3	<i>Einteilung</i> .....	81
4.2.4	<i>Bodenfruchtbarkeit</i> .....	89
4.2.4.1	Physische Faktoren .....	89
4.2.4.2	Pflanzennährstoffe.....	92
4.2.4.3	Chemische Faktoren.....	92
4.2.4.4	Humusgehalt.....	92
4.2.5	<i>Eignung für Pflanzen</i> .....	93
4.2.6	<i>Bodenerschöpfung und Degradation</i> .....	94
4.2.6.1	Vitalität der Pflanzen .....	94
4.2.6.2	Auslaugung der Böden – direkte Vergleiche benachbarter Parzellen .....	96
4.3	BRANDFELDWIRTSCHAFT.....	98
4.3.1	<i>Die Bedeutung des Feuers für den Stoffhaushalt</i> .....	98
4.3.2	<i>Brandfeldwirtschaft in Patrice Lumumba</i> .....	101
4.4	BEWERTUNG DER BODENFRUCHTBARKEIT ANHAND DES FERTILITY CAPABILITY CLASSIFICATION SYSTEM (FCC).....	102
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b> .....	<b>103</b>
<b>6</b>	<b>NACHWORT</b> .....	<b>105</b>
<b>7</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>106</b>
<b>8</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>109</b>
<b>9</b>	<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>109</b>
<b>10</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>111</b>
<b>11</b>	<b>ANHANG</b> .....	<b>114</b>
	.....	129
	.....	131
	.....	133
	.....	135

## 1 Einleitung und Zielsetzung

**Z**iel dieser Arbeit ist die Klassifizierung und Analyse der quartären Dünensysteme östlich des Limpopoflusses bezüglich ihrer landwirtschaftlichen Nutzbarkeit. Hierzu wurde ein Gebiet südlich der Stadt Xai-Xai gewählt und mit einem im Limpopotal gelegenen Gebiet verglichen.

Diese ursprüngliche Zielsetzung offenbarte im Laufe dieser Arbeit ein weitreichendes Problem, welches das Potential zu einer humanitären Katastrophe zeigt.

Wird das fruchtbare aber schwer zu bearbeitende Talgebiet bereits seit langer Zeit landwirtschaftlich genutzt, wurden die Dünensysteme in einer von G. Richter 1974 durchgeführten agrargeographischen Kartierung noch als unter Tragfähigkeit genutzte Entlastungsräume ausgezeichnet (Richter, 1974). Die rapide Änderung dieser Kartierung soll anhand von Satellitenbildern in dieser Arbeit hergeleitet werden. Ebenso soll die falsche Handhabung und somit die Zerstörung bis hin zur landwirtschaftlichen Unbrauchbarkeit innerhalb nur kurzer Zeit der ohnehin nährstoffarmen Dünenböden aufgezeigt werden. Das Dünengebiet soll anhand von Mischproben und Leitprofilen nach der KA5 bodenkundlich näher untersucht werden.

Bevölkerungsdruck (Verdreifachung der Bevölkerung in den letzten 25 Jahren), knappe Nahrungsmittel, mangelnde Gerätschaften um auf Talgebiete auszuweichen, fehlendes agrartechnisches Wissen sowie Überschwemmungen führen zu einer immer weiteren Auslaugung der Anbauflächen. Da diese Subsistenzwirtschaft die Lebensgrundlage vieler Bewohner dieser Gegend darstellt, existiert die eigentlich vorgesehene Landwechselwirtschaft größtenteils nur noch auf dem Papier. Trotz des sichtbaren Rückganges der Bodenfruchtbarkeit werden weiterhin an immer denselben Stellen anspruchsvolle Pflanzen wie etwa Mais angebaut. Die Erträge schrumpfen auf ein Minimum, während der Aufwand gleich bleibt.

Die ohnehin nicht einfache Situation der Nahrungsgrundlage wird auf diese Weise vor allem in der Zukunft nicht wenig entspannt sein. Die Dünensysteme werden zu dem Zeitpunkt dieser Arbeit seit 5-7 Jahren bewirtschaftet, während die Bevölkerungszahlen weiter explodieren. Die Untersuchungen zeigen die erschreckenden Ergebnisse, dass der Boden in vielen Gebieten bereits erschöpft ist, bzw. in nur wenigen Jahren für die Landwirtschaft unbrauchbar sein wird. Gelingt es nicht eine bodenschonende Nutzung der Dünen zu installieren und die Talebene vollständig zu erschließen, wird die Nahrungsmittelsicherung der Region in naher Zukunft erheblich beeinträchtigt.

Durch Abholzen und Abbrennen der natürlichen Baum- und Buschvegetation und der erosionswirksamen lichten Bepflanzung mit Mais wird der Boden extrem anfällig für Wind- und Wassererosion. Auch dies soll im Laufe der Arbeit thematisiert werden.

Spricht man von dem Nutzungspotential eines Bodens, gilt es in erster Linie die Fruchtbarkeit eines Bodens zu kennzeichnen. Die Bodenfruchtbarkeit als Standortproduktivität ist die

Fähigkeit eines Bodens, unter definierten Bedingungen Pflanzenertrag hervorzubringen (Finck A. , 1986). Sie gewährleistet ein gewisses Wachstumsmilieu für Anbaupflanzen und resultiert aus zahlreichen edaphischen Eigenschaften. Diese Eigenschaften sind Hauptthema dieser Arbeit und werden aus Finck (1986), Finck (1963), Landon (1991) und Young (1976) definiert.

Um die erwähnten Themengebiete sowohl visuell als auch analytisch darzustellen, werden in dieser Arbeit moderne Fernerkundungsmethoden mit bodenkundlichen Geländeaufnahmen sowie chemischen Laboranalyseverfahren verknüpft.

## 2 Das Untersuchungsgebiet



Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes in Südmoçambique

## 2.1 Die Stadt Xai-Xai

Das Untersuchungsgebiet ist Teil der Stadt Xai-Xai, der Hauptstadt der Provinz Gaza im Süden von Moçambique. Xai-Xai ist 210 km von der Hauptstadt Maputo entfernt und liegt im Flussbett nahe der Mündung des zweitgrößten Flusses von Moçambique, des Rio Limpopo. Der gleichnamige Distrikt (Xai-Xai) entspricht etwa 0,2 % der Gesamtfläche der Provinz Gaza.

### *Historisches*

Vor der Ankunft der Portugiesen im 18. Jahrhundert wurde die Region von So Xangaan vom Stamme der Nduandue erobert. Nach der Kolonialisierung durch Portugal kam der Ortschaft eine wichtige Rolle als Flusshafen des Limpopo zu. Erst 1911 bekam die Siedlung den Status eines Dorfes und wurde von der Kolonialregierung João Belo genannt. Es wuchs besonders nach dem Bau der Küstenstraße EN1 im Jahre 1958 und erhielt 1961 den Stadtstatus. Xai-Xai erhielt seinen heutigen Namen nach der Unabhängigkeit 1975 nach dem Widerstandskämpfer N'txai-N'txai Dlamine. Den folgenden raschen Anstieg der Bevölkerung verdankt Xai-Xai der Umsiedlung der Flutopfer des Limpopotals in die höher gelegenen Dünenregionen sowie zahlreichen Flüchtlingen, die in der langen Zeit des Bürgerkrieges in die Nähe der Stadt zogen. Nach dem Bürgerkrieg erhielt Xai-Xai 1998 eine eigene Stadtverwaltung (Give Sibinde, 2005).

Die Bevölkerung hat sich in den letzten 25 Jahren mehr als verdreifacht:

Jahr	1980	1996	2004
Bevölkerung	46 206	101 379	153 000

Tab. 1: Bevölkerungswachstum von Xai-Xai nach (Give Sibinde, 2005)

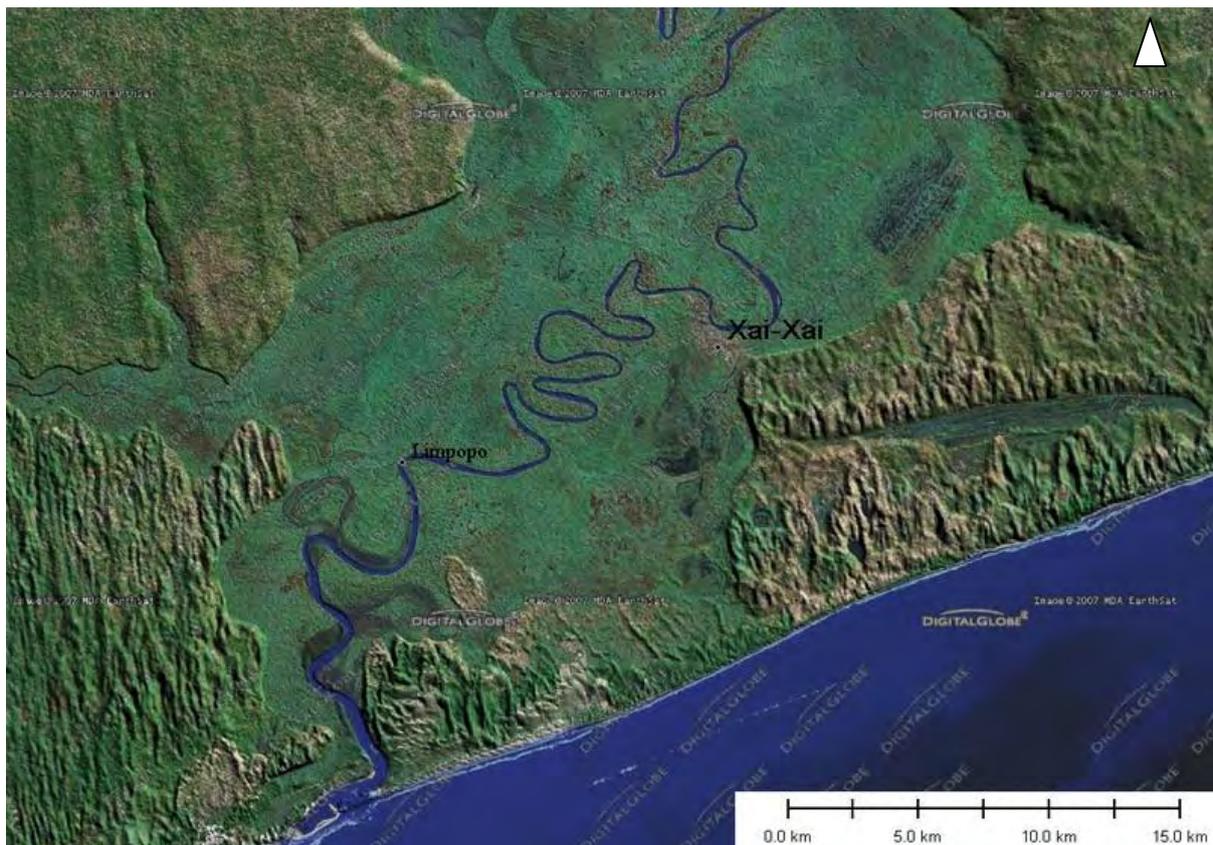
### *Geomorphologische Lage*

Xai-Xai liegt etwa 15 km von der Küste des indischen Ozeans entfernt und erstreckt sich über 131 000 km<sup>2</sup>. Es teilt sich in zwei grundlegend verschiedene geomorphologische Gebiete auf. Das eigentliche Stadtgebiet liegt in einer tiefen Zone knapp über Meeresspiegelhöhe in der Talebene des Limpopo. Hier befinden sich ein Großteil der Geschäfte und Verwaltungsgebäude. Die Böden der tiefen Zone sind flach und bestehen aus Schwemmsanden des Limpopo und hartem Ton. Sie fallen in die Pflugbauregion und werden zu 90 % landwirtschaftlich genutzt. Die Lage am Ostufer des Rio Limpopo und der wasserundurchlässige Boden machen diese Zone sehr verwundbar gegenüber Überschwemmungen (Give Sibinde, 2005).

Die hochgelegene Zone wird Tavene-City genannt (Give Sibinde, 2005). In diesem quartären Dünengebiet, welches sich über 10 km Luftlinie bis hin zum indischen Ozean erstreckt, lebt

ein Großteil der Stadtbewohner. Dünenhöhen von knapp 100 m bieten hier Schutz vor Überschwemmungen. Gleichzeitig sorgen Hangneigungen von 20-30 % verstärkt für Erosion durch Wasser auf den anfälligen Sandböden. Hier liegt auch der Distrikt Patrice Lumumba, welcher in dieser Arbeit Mittelpunkt der Untersuchungen sein wird.

Eine Darstellung der beiden Zonen liefert Abb. 3. Die Darstellung ist mit einem SRTM Höhenmodell unterlegt und zeigt farblich den Höhenunterschied zwischen dem Limpopotal und den Dünensystemen.



**Abb. 2:** Hochauflösendes DigitalGlobe-Echtfarbenkomposit der Mündung des Limpopo in den indischen Ozean. Zur besseren Darstellung der Höhenunterschiede zwischen Tal und Dünen wurde das Bild mit einem SRTM-Höhenmodell-Hillshade unterlegt (© der DigitalGlobe-Überlagerung: MDA EarthSat 2007)

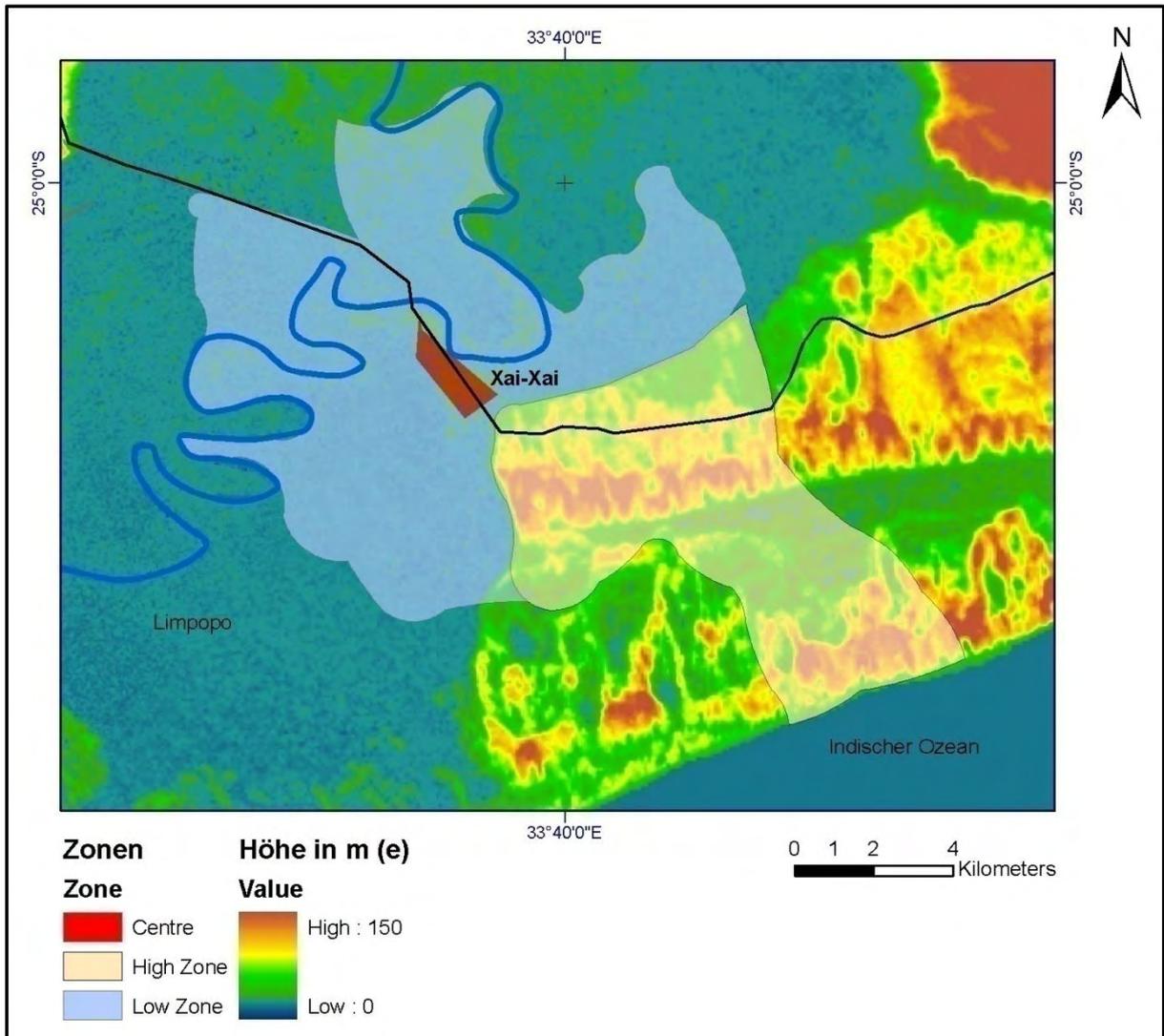


Abb. 3: Die Zonen von Xai-Xai, unterlegt mit einem DEM (nach Cidade de Xai-Xai Plano de Estruturo 1999, Give Sibindi 2005)

### Ökonomie

Die Ökonomie von Xai-Xai ist landwirtschaftlich geprägt. Etwa 70 % der Familien besitzen Felder in den Dünen oder im Tal. Handel, Industrie (Konservenherstellung, Automechanik, Zimmermannshandwerk, etc.) und der öffentliche Dienst spielen neben der Landwirtschaft nur eine untergeordnete (Give Sibinde, 2005).

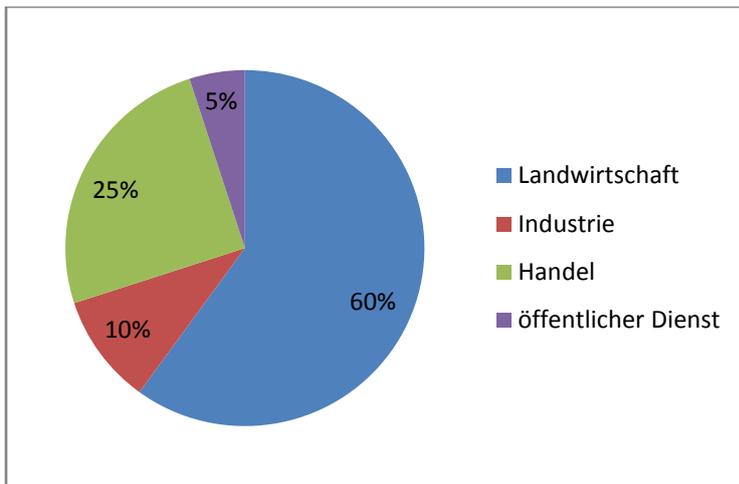


Abb. 4: Die Berufsverteilung der Bevölkerung Xai-Xais (Give Sibinde, 2005)

### Verwaltung

Xai-Xai unterteilt sich in vier Verwaltungsbezirke. Der *Central Administrative District* umfasst den Stadtkern, die komplette tiefgelegene Zone, sowie einen Teil der Wohngebiete der Dünen. Die Distrikte *Inhamissa*, *Patrice Lumumba*, und *Xai-Xai Beach* liegen überwiegend in den Dünen und bestehen größtenteils aus eher einfachen Wohnsiedlungen und landwirtschaftlichen Anbaugeländen. Im Blickfeld dieser Arbeit soll besonders Patrice Lumumba und das daran angrenzende Dünengebiet stehen (Give Sibinde, 2005).

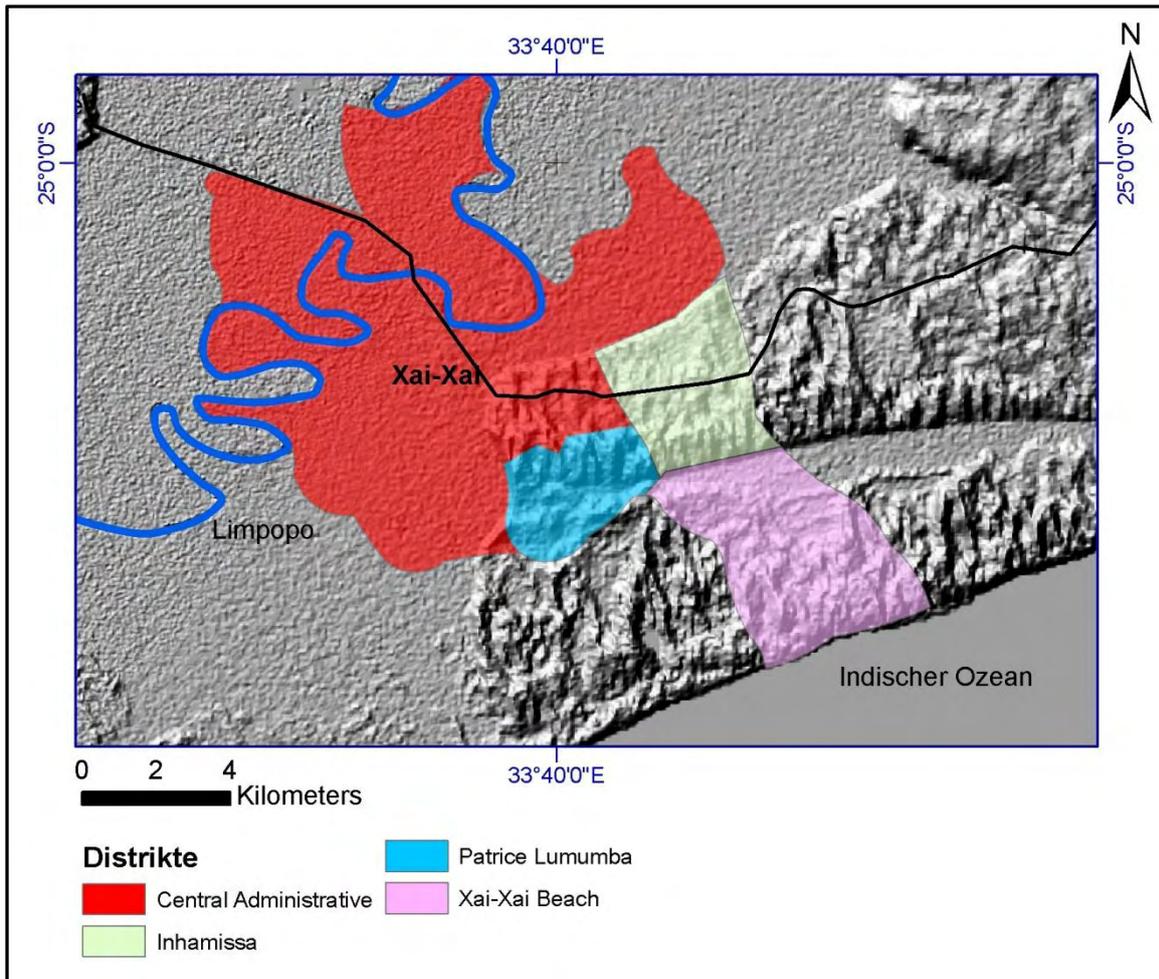


Abb. 5: Administrative Einteilung Xai-Xais, unterlegt mit einem Hillshade eines DEMs nach (Give Sibinde, 2005)

## 2.2 Klima

Klimatisch ist die Küstenregion durch tropisch semi- bis perhumides Klima gekennzeichnet (Fränzle & Fränzle, 1998). Die Durchschnittstemperatur liegt bei 25°C und der jährliche Durchschnittsniederschlag bei 953 mm. Höchstwerte im Sommer sind bei 42°C, die niedrigsten Temperaturen im Winter bei 8°C zu suchen. Die vorherrschenden Winde kommen aus dem Süden und Südosten, während die mittlere jährliche Luftfeuchtigkeit bei 75% liegt (Give Sibinde, 2005).

Temperaturen: Mittleres monatliches Maximum: 28°C

Mittleres monatliches Minimum: 18°C

Jahresdurchschnitt: 25°C

Niederschläge: Mittleres monatliches Maximum: 175 mm

Mittleres monatliches Minimum: 32 mm

Jährlich: 953 mm

Die Niederschläge sind sehr unregelmäßig auf das Jahr verteilt. Um dies zu visualisieren wurde in Abb. 6 der Niederschlag anhand der *Tropical Rainfall Measuring Mission* Daten für die einzelnen Monate des Jahres 2003 dargestellt. Die Daten basieren auf dem TRMM Mikrowellensensor (*TMI*), Infrarotsensoren sowie Niederschlagsmessungen und werden in mm/Tag angegeben (Braun, 2007).

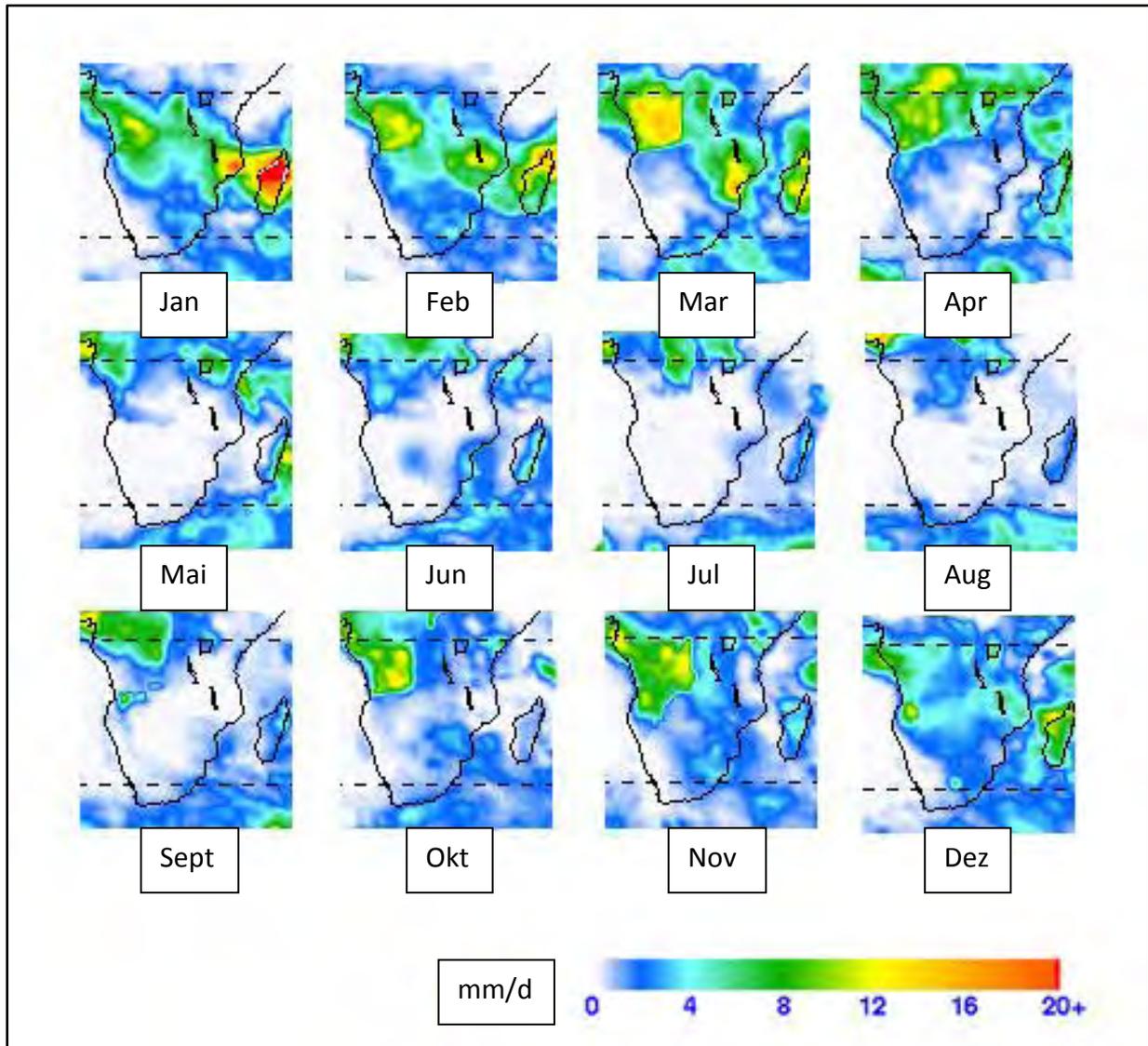


Abb. 6: TRMM Merged Precipitation 2003. Datenquelle: (Braun, 2007)

Deutlich zu erkennen sind die starken Niederschläge an der Ostküste Afrikas von Januar bis März. Von Mai bis Oktober folgt eine sehr trockene Zeit, erst im November kommt es wieder häufiger zu Niederschlägen.

Dieses sommerfeuchte Tropenklima mit knapp 1000 mm Niederschlag pro Jahr ermöglicht den Bauern Regenfeldbau, d.h. es kann auf Bewässerung verzichtet werden.

## 2.3 Geologie

Der gesamte Südteil Moçambiques, und damit auch die Limpoposenke, gehört zur mesozoisch-känozoischen Sedimentationszone. Die ältesten Sedimente stammen aus dem Barreme und Unterapt, gefolgt von einer einheitlichen Sedimentation bis in das Untermiozän mit zwei ausgeprägten Regressionen im oberen Cenoman und im Oligozän. Nachdem es im Untermiozän zu einem maximalen Meeresvorstoß kam, wurden in der Folge weite Gebiete herausgehoben und riesige Flächensysteme gebildet (Förster, 1975) (Fränzle & Fränzle, 1998). Im Quartär entstanden nun die eigentlichen Küstendünen. Zunächst wurden die Rumpfflächen im Pleistozän mit fluvialen Sanden überdeckt (Jaritz, Ruder, & Schlenker, 1977).

Nach der Ablagerung des Decksandes kam es zu zahlreichen regressiven Vorstößen des Indik, welche für die äolisch-fluviale Sedimentation der Dünen von Bedeutung sind. Tabellen dieser Regressionsphasen sind zu finden in Fränzle (1998) und Jaritz et al. (1977).

Küstenwärts schließen sich mächtige Regressions-Dünenwallssysteme an. Parallel zur Küste findet sich ein Wall heller Dünensande mit Höhen von 120 m, welche durch eine Kette von küstenparallelen Lagunen von den alten Dünen getrennt sind (Fränzle & Fränzle, 1998).

In den Regressionsphasen entstanden diese ausgedehnten Dünensysteme aus braunrot gefärbten stark eisenhaltigen Sanden (Fränzle & Fränzle, 1998). Diese Dünen verfestigten sich (die roten Sande wurden von teils helleren überlagert), und zwangen den großen Flussläufen (hier der Limpopo) eine teils küstenparallele Fließrichtung auf. Meeresspiegelschwankungen führten im Flusslauf des Limpopo zu starker Tiefenerosion bis zu 250 km landeinwärts und bis zu 30 m Tiefe (Jaritz, Ruder, & Schlenker, 1977). Die Täler wurden im Holozän durch Sedimentationsfracht wieder aufgefüllt (Fränzle & Fränzle, 1998).

Abb. 8 zeigt den von Dünengebieten umgebenen Flusslauf des Limpopo, der diese durchbricht und in den indischen Ozean mündet. Die Abbildung unterscheidet zwischen den verfestigten Dünensystemen (Qd), und den aktiven küstennahen, welche noch in Bewegung sind (Qdc). Abb. 2 zeigt das Gebiet in einer Satellitenaufnahme. In Abb. 7 ist ein Profil von NNW nach SSE dargestellt. Es startet im Limpopotal, durchschneidet den Fluss und die Dünenwälle, und endet im Ozean. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Gebiet in Küstennähe und das nahe des Limpopo von den Ausläufern einer Senke durchzogen wird. Auch in Abb. 8 ist diese wasserbeeinflusste Senke zu erkennen.

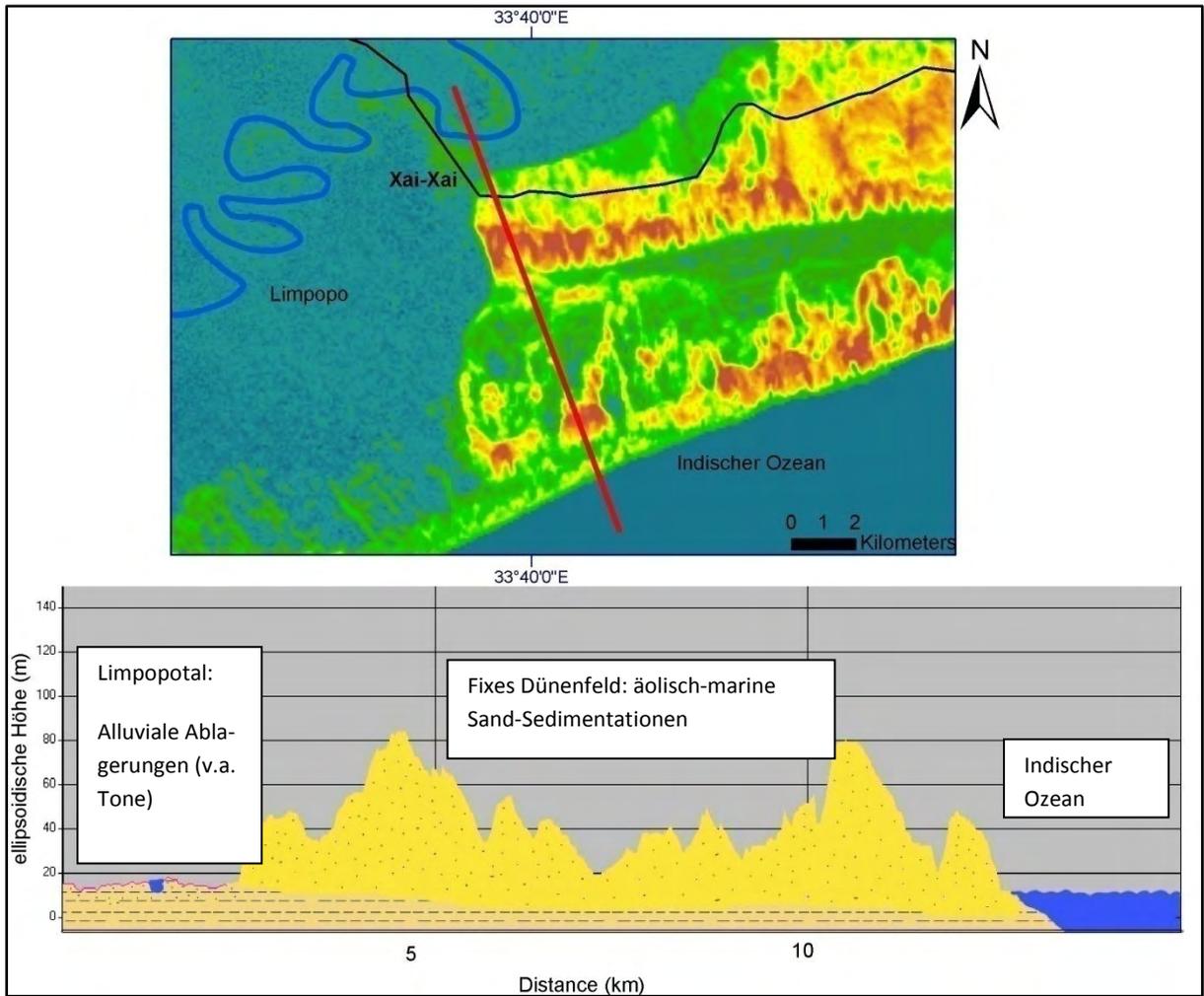


Abb. 7: 30-fach überhöhtes Höhenprofil durch die Dünen (unten), entspricht der roten Profillinie des DEMs (oben) nach (Jaritz, Ruder, & Schlenker, 1977), (Geologisches Museum Maputo 2007)



Abb. 8: Quartäre Ablagerungen (Wandkarte des Geologischen Museums Maputo 2007)

## 2.4 Flächennutzung

Das Gebiet um Xai-Xai gliedert sich vor allem in zwei für Moçambique typische Bewirtschaftungsformen. Diese tragen zum einen der edaphischen und hydrologischen Beschaffenheit des Untergrunds und zum anderen der traditionellen Orientierung sowie mangelnde Alternativmöglichkeiten der Bevölkerung Rechnung. Die Wirtschaftsform der Viehhaltung spielt in der Gegend um Xai-Xai nur eine untergeordnete Rolle. Zwar existiert eine große Weidefläche im Bereich der Dünen, diese wird jedoch von einem privaten brasilianischen Farmer zu persönlichen Zwecken genutzt und soll hier nur am Rande erwähnt werden. Die folgenden Darstellungen der beiden dominierenden Wirtschaftsformen entspringen zum Teil den Arbeiten von G. Richter (1974) und O. Fränzle (1998), größtenteils aber der Befragung der lokalen Bevölkerung.

### 2.4.1 Hackbauregion mit Fruchtbaumnutzung

Diese Nutzungsform ist typisch für die Küstenräume des indischen Ozeans. Die quartären Dünensande bieten dank eines Jahresniederschlags von etwa 1000 mm gute Wasserleitfähigkeiten (siehe auch Kapitel 3.6.5) und erlauben den Wuchs einer Reihe von Fruchtbaumkulturen.

Durch die dichte Besiedlung der Küstenregion ist die natürliche Vegetation durch eine von Menschen getroffene Auslese ersetzt worden. Dabei spielen nicht nur die Früchte eine wichtige Rolle, auch die Eignung als Nutz-, Brenn oder Kohleholz ist entscheidend. Die Frucht-bäume finden sich verstreut in den menschlichen Siedlungen und überziehen einzeln die Felder der Dünenregionen (Fränzle & Fränzle, 1998).

Die Fruchtbaumnutzung ist marktorientiert, d.h. ihre Erträge werden größtenteils gewinnbringend verkauft und stellen eine der wenigen Einnahmequellen der Bevölkerung dar. Verkauft werden die Kokosnüsse, Cajunüsse und Mafurrakerne am Fernstraßenrand (Xai-Xai – Maputo) und auf den Straßen der Stadt Xai-Xai (Macamo & Neubert, 2004). Typische einheimische Fruchtbäume sind die Kokospalme und der Mafurrabaum (*Trichilia emetica*), während die weiteren dominanten Arten Cajubaum (*Anacardium occidentale*) und Mango-baum (*Mangifera indica*) eingeführt worden sind. Weiter sind die Häuser von Citrusbäumen umgeben (Fränzle & Fränzle, 1998).



Abb. 9: Fruchtbaumnutzung in Wohngebieten und auf Feldern (Patrice Lumumba). Quickbirdaufnahme von 2005

Neben den direkt um die Häuser gelegenen Flächen werden rezent die Dünen von Patrice Lumumba bis hin zur Küste des indischen Ozeans landwirtschaftlich genutzt. Hierfür sind besonders zwei Gründe von Bedeutung:

Zwar ist das Limpopotal wesentlich fruchtbarer, der harte Tonboden erfordert aber Geräte, welche kaum vorhanden sind. Es fehlt den Menschen an Kraft, Pflugzugtiere gibt es nicht. Ebenso ist das Talgebiet im Besitz der Regierung und muss zur Bewirtschaftung zugeteilt und freigegeben werden.

Desweiteren führten die Überschwemmungen im Jahre 1977 und 2000 zur Gründung des Gemeinschaftsdorfes Patrice Lumumba 2000. Die Regierung siedelte hier Menschen an, die am Ufer des Limpopo wohnten. Hinzu kamen Kriegsflüchtlinge und später auch Dürreflüchtlinge (Macamo & Neubert, 2004). Abb. 10 zeigt das Wachstum Xai-Xais, insbesondere des Distriktes Patrice Lumumba. Bevölkerungsdruck (bis zu 100 Einwohner pro km<sup>2</sup>) und daraus resultierende Landknappheit und Nahrungsmangel zwang die Regierung die Dünensysteme komplett zur landwirtschaftlichen Nutzung freizugeben. Befragungen der Bevölkerung zeigten, dass jede Familie soviel Land bewirtschaften kann, wie es die Arbeitskraft zulässt. Im Durchschnitt waren dies 8 Felder, kaum eines größer als 15 x 20 m. Zwar existiert ein traditionelles Stammesbodenrecht, welches einer Familie nicht nur das Nutzungsrecht über derzeitige Felder zuschreibt, sondern ihnen ein Areal zuweist, in dessen Grenzen sie ihre Felder anlegen können. In der Realität wird aber nicht nur teilweise unkontrolliert angebaut. Lässt eine Familie ein Feld brach fallen, wird dies in der Regel im darauffolgenden Jahr von einer anderen genutzt. Der Boden ist leicht zu bearbeiten, und die Wege sind gut begehbar.

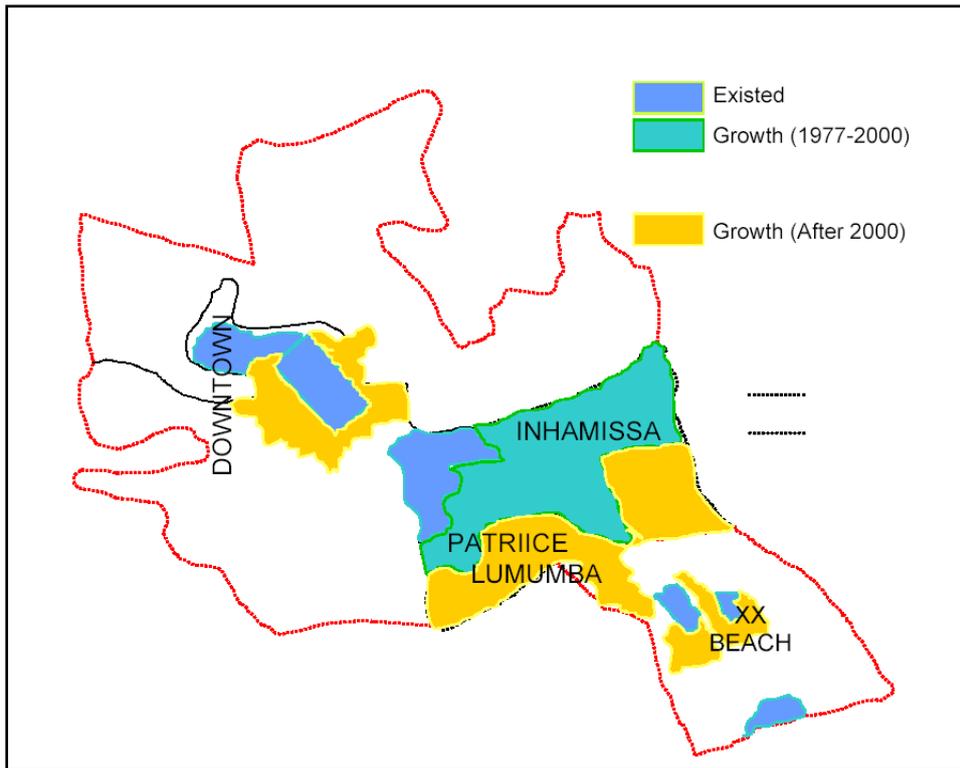


Abb. 10: Wachstum in den letzten drei Dekaden (Give Sibinde, 2005)

Die Arenosol-Böden der Küstendünen sind nährstoffarm und erschöpfen sich sehr schnell. Bereits nach 5-7 Jahren ist der Boden als unfruchtbar einzustufen, was eine Landwechselwirtschaft unumgänglich macht. Dies bedeutet, dass Felder nur eine gewisse Zeit für eine bestimmte Nutzpflanze genutzt werden, bevor sie für einige Jahre brach liegen. Als Problematisch erweist sich die Unkenntnis der Bevölkerung, so werden die Böden immer und immer wieder bis zur völligen Unfruchtbarkeit bewirtschaftet. Es werden stets Mischkulturen aus Mais, Maniok und Erdnuss angebaut. Bereits nach dem ersten Jahr gedeiht Mais nur noch sehr schlecht. Nach dem dritten Jahr gedeihen fast nur noch Maniok und Erdnuss, und ab dem vierten ist neben vertrockneten, nur 2 dm hohen Maispflanzen nur noch Erdnuss auf den Feldern zu finden (Fränze & Fränze, 1998) (Richter, 1974).

In dieser Hackbauregion dominiert die Subsistenzwirtschaft, was ein weiteres Problem für die erforderliche Fruchtfolge darstellt. Die Erträge reichen kaum zur Ernährung der Feldbesitzer und nur in sehr guten Erntejahren gelangen größere Mengen an Erdnuss und Feldfrüchten auf die Märkte. Die Bauern sind auf die Erträge ihrer Felder angewiesen und brauchen die Felder Jahr für Jahr. Lässt man ein Feld brach liegen, bedeutet dies keine Nahrung für die feldbesitzende Familie.

Die in Abb. 11 erkennbare unterschiedliche Vegetationsbedeckung der einzelnen Feldparzellen beruht heute nicht mehr wie G. Richter 1974 schrieb allein auf der Landwechselwirtschaft. Gründe sind vielmehr in der unterschiedlichen Bewirtschaftungsweise der einzelnen Familien zu suchen, vor allem aber in den unterschiedlichen Zustandsstufen des Bodens

(hervorgerufen durch unterschiedlich lange Arealnutzung), und damit der unter Nährstoffmangel wachsenden Vegetation. Dies soll in einem späteren Kapitel genauer belegt werden.

Die Anbauzeiten richten sich nach der Regen- und Trockenzeit. So wird im August Mais gepflanzt, von März bis Juni erneut Mais und Süßkartoffeln, von Juli bis Oktober Erdnüsse, von August bis März Maniok und von November bis Februar Bohnen.

	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
Mais			■					■				
Maniok	■							■				
Süßkart.			■									
Erdnuss							■					
Bohne	■											■
Regenzeit	■											■
Trockenzeit							■					

Tab. 2: Anbauzeiten der Landwirtschaft in den Dünen (Quelle: Befragung vor Ort)

Zur Neulandgewinnung werden immer weitere Wiesen abgebrannt. Das abgebrannte Gras verbleibt bis zur Regenzeit auf dem Boden und dient auf diese Weise als Schutz für den empfindlichen Boden.



Abb. 11: Hackbau in den Dünen bei Patrice Lumumba 2000. Gut zu erkennen ist die Parzellierung und die verschiedenen Zustandsstufen der Vegetation und des Bodens. Vereinzelt sind Fruchtbäume eingestreut. QuickBirdaufnahme von 2005



Abb. 12: Links: Hackbau mit eingestreuten Fruchtbäumen. Rechts: Mais und Erdnuss

Wie im Folgenden noch dargestellt werden soll, waren die Dünensysteme um Patrice Lumumba noch im Jahr 1989 weitgehend bewaldet. Doch wie bereits erwähnt zwangen Subsistenzwirtschaft und Überschwemmungen des Tales die Menschen zur Kultivierung der Flächen.

Eine Düngung der Flächen erfolgt aus Kostengründen nicht, die Bearbeitung wird mit der Hand per Hacke betrieben. Niederschläge nahe 1000 mm/Jahr machen Regenfeldbau trotz der schlechten Wasserhaltefähigkeiten der Böden innerhalb der Regenzeit möglich, Bewässerungsanlagen wären aber ohnehin nicht erschwinglich.

#### 2.4.2 Pflugbauregion des Limpopotals

Liegt der Grundwasserspiegel nicht zu hoch, stellen die Talregionen mit ihren tonigen, nährstoffreichen Schwemmlandböden ein fruchtbares Gebiet dar. Zwar zwangen mächtige und lang anhaltende Überschwemmungen, besonders in den Jahren 1977 und 2000 die Bewohner des Tales auf die hoch gelegenen Dünen umzusiedeln, doch besitzen noch heute zahlreiche Familien aus Patrice Lumumba und Patrice Lumumba 2000 Felder im Limpopotal (Macamo & Neubert, 2004).

Die nährstoffhaltigen Böden und Zuschusswasser vom Grundwasser ermöglichen weitaus höherer Erträge und generell zwei bis drei Ernten pro Jahr. Neben den bereits erwähnten Maispflanzen der Hackbauregionen wachsen hier weitaus vielfältigere Gemüsearten. So ist neben verschiedenen Kohl, Bohnen und Salatarten der Anbau von Süßkartoffeln und Bananenstauden möglich. Das sumpfige Areal am Fuße der Dünen ermöglicht in der Regenzeit den Anbau von Reis und Zuckerrohr. Die Fruchbaumnutzung spielt in der Talregion keine Rolle (Fränzle & Fränzle, 1998) (Richter, 1974).

Der Oberboden besteht aus schwerem Ton, und ist per Hand sehr schwer zu bearbeiten. Da es an Geld fehlt, können nur sehr wenige Bauern Rinder als Zugvieh nutzen oder gar Traktoren zur Feldbearbeitung mieten. Da es zur typischen Biographie eines Mannes gehört, Wan-

derarbeiter zu sein, fällt die Aufgabe der Feldarbeit den Frauen zu (Macamo & Neubert, 2004). Die Haushalte sind auf die Überweisungen der Wanderarbeiter angewiesen, die ertragreichen Nutzflächen der Talregion ermöglichen aber neben Subsistenzkulturen auch gelegentliche Verkäufe auf den Märkten und an den Straßen.

Auch hier wird teilweise Landwechselwirtschaft betrieben, jedoch führt auch in Talregionen Landknappheit vermehrt zu Dauerkulturen mit eingeschalteten kürzeren oder längeren Brachperioden (Richter, 1974).

Die Familien verfügen über fest umgrenzte Flächen, die sie bei Fortzug aus dem Gebiet verlieren. Verwaltet werden die Talflächen von der Regierung. Die Gebiete sind eingeteilt, und müssen vor ihrer Nutzung von der Regierung freigegeben werden.



Abb. 13: Pflugbauregion im Limpopotal, am Fuße der Dünen westlich von Patrice Lumumba. QuickBirdaufnahme von 2005



Abb. 14: Das grüne, fruchtbare Schwemmland des Limpopotals

Im Folgenden sollen die wichtigsten Anbauprodukte kurz mit ihren Vor- und Nachteilen vorgestellt werden. Eine zusammenfassende Tabelle mit weiteren Feldfrüchten findet sich in Anhang 2.

### 2.4.3 Problempflanze Mais (*Zea mays*)

Mais wurde zu Kolonialzeiten von den Portugiesen aus Amerika nach Afrika gebracht und veränderte die Ernährungsgewohnheiten der Afrikaner nachhaltig. Der Anbau von Mais ist wenig arbeitsintensiv, er wirft hohe Ernten ab und die Kolbenblätter schützen das Korn vor Insekten und Vögeln. Aber Mais braucht viel Wasser (Niederschläge von 600-1200 mm), er laugt die mageren Sandböden aus und ist nicht dürreresistent. Mit sinkendem Nährstoffgehalt der Böden und nach langen Trockenperioden gehen die Erträge dramatisch zurück und die Menschen müssen hungern (Grill, 2003). Der optimale pH-Wert liegt zwischen 5,0 und 7,0, Böden mit einem Wert kleiner 5 sind für Mais eher ungeeignet. Mais gehört zu den C4-Pflanzen, wodurch er bei hohen Temperaturen mehr Photosynthese betreiben kann (Franke, 1995). Optimale Temperaturen liegen bei 22 bis 24°C, höhere Temperaturen beschleunigen das Wachstum zwar, verteilen allerdings die Trockenmasse in der Pflanze ungünstig (Franke, 1995). Mais benötigt große Mengen an Nährstoffen, besonders Stickstoff; eine Ernte von 1000 kg entzieht dem Boden 30-50 kg Stickstoff 5 kg P und bis zu 20 kg K (Franke, 1995). Die Reserven eines Bodens reichen gewöhnlich nicht länger als 1-2 Jahre, daher ist Fruchtfolge und Stickstoffdüngung unabdingbar. Da Mais dem Boden auf diese Weise organisches Material entzieht, ist die Aufrechterhaltung eines gewissen Humusbestandes sowohl für die Nachlieferung an Stickstoff als auch als Erosionsschutz wichtig (Young, 1976). Mais eignet sich in Fruchtfolgen nur bedingt als Vorfrucht, da er dem Boden Nährstoffe in großer Menge entzieht, und zurückgelassene Pflanzenreste nur schwer zersetzbar sind. Mais ist selbstverträglich, d.h. er kann mehrfach an derselben Stelle angebaut werden, solange die

Nährstoffe ausreichen (Franke, 1995). Durch den hohen Nährstoffentzug sind Fruchtfolgen mit Leguminosen jedoch zu empfehlen, besonders wenn kein N-Dünger zur Verfügung steht. Diese hohen Ansprüche bedingen auch einen relativ großen Abstand der einzelnen Pflanzen, da sie in großer Konkurrenz um Wasser und Nährstoffe stehen. Diese mangelnde Bedeckung der Böden durch die weit auseinander gepflanzten Stauden macht den Boden angreifbar für Bodenerosion durch Wind. Die am Hang parallel aufgestellten Reihen der Pflanze bieten dem Wasser rasche Abflussbahnen, was die Erosion durch Wasser begünstigt. Hinzu kommt das Hauptproblem: die Menschen sind keine Bauern und besitzen kein agrartechnisches Wissen. Es ist äußerst negativ für Böden aller Art Mais mehrere Jahre an ein und derselben Stelle anzubauen. Die nährstoffarmen Arenosole der Dünen werden seit mehreren Jahren an denselben Stellen mit Mais bepflanzt – die Erschöpfung der Böden ist oft schon von weitem zu erkennen. Eine Düngung findet nicht statt und wie später noch deutlich wird sind die Bodenbedingungen in den Dünen alles andere als optimal.

#### 2.4.4 Maniok (*Manihot esculenta*)

Auch Cassava genannt, gehört Manihot zur Familie der Wolfsmilchgewächse (Franke, 1994) und ermöglicht mit die höchsten Ernten aller Kulturpflanzen (bis zu 25 t/ha) (Young, 1976). Maniok zeichnet eine gewisse Dürresistenz aus, so kann er mehrere Perioden schwerer Dürre nahezu unbeschadet überstehen, da Maniok bei Trockenheit den Blattflächenindex verringert. Er bildet Verzweigungen und kleinere Blätter, außerdem wird die Transpiration durch Verengen der Stomata reduziert. Auf diese Weise kann er auch bei Wassermangel Photosynthese betreiben. Hält die Trockenheit an, werden die Blätter abgeworfen und das Knollenwachstum eingestellt. Setzen die Niederschläge wieder ein, wird das Wachstum umgehend wiederaufgenommen (Franke, 1994). Die besten Erträge werden in Böden mittlerer Körnung erzielt, aber auch reine Sandböden liefern Erträge. Wenig geeignet sind schwere Tonböden, da zu hohe Bodennässe zum Faulen der Knollen führt (Franke, 1994). Auch die Salzverträglichkeit ist sehr gering. Bereits eine EC von 0,5 mS/cm führt zu erheblichen Ertragseinbußen (Franke, 1994). Auch wenn Cassava einen hohen Bedarf an Kalium hat, kann auf sehr nährstoffarmen Böden eine beträchtliche Ernte eingefahren werden. Nährstoffreiche Böden führen zu einem extensiven Wachstum auf Kosten der Knolle unter der Erde (Young, 1976). 1000 kg Maniokpflanze inklusive Knolle entziehen dem Boden etwa 4,9 kg Stickstoff; 1,1 kg P; 5,8 kg K; 1,8 kg Ca und 0,8 kg Mg. Ist der Boden nährstoffarm, nimmt die Verzweigung der Wurzeln zu, ein großer Vorteil gegenüber anderen Pflanzen (Franke, 1994).

Da Maniok daher selbst auf sehr nährstoffarmen Böden gedeiht, wird er oft als letztes Glied in einer Fruchtfolge eingesetzt. Er erzeugt auch kurz vor Aufgabe der Felder noch nennenswerte Mengen an Nahrungsmitteln. Maniok wird ebenfalls bevorzugt in Mischkulturen mit Mais und Erdnuss eingesetzt, da er sich kaum nachteilig auf diese Pflanzen auswirkt und aufgrund seiner längeren Wachstumsperiode keine Überschneidungen durch Bodenbeschattung entstehen (Franke, 1994).

### 2.4.5 Erdnuss (*Arachis hypogaea*)

Die Erdnuss gehört zur Familie der *Leguminosae*, und ist damit in der Lage atmosphärischen Stickstoff zu fixieren, indem sie mit stickstofffixierenden Bakterien eine Symbiose eingeht. Daher eignet sie sich auch als Vorfrucht in einer Fruchtfolge, bzw. in Mischkulturen mit Nichtleguminosen wie Mais und Maniok. Optimale Temperaturen liegen zwischen 25 und 30°C. Hohe Lichtverhältnisse wirken sich sehr positiv auf den Wuchs aus (Franke, 1994). Sie benötigen Niederschläge von mindestens 300 mm/Jahr. Optimale pH-Werte liegen zwischen 6 und 6,4, die EC sollte weniger als 4 mS/cm betragen (Franke, 1994)

Die optimalen Bodenbedingungen für Erdnuss sind sandige Böden, besonders sandiger Lehm. Erdnüsse sind relativ dürreresistent, daher ist das eher schlechte Wasserhaltevermögen der Sandböden unkritisch. Eine schwere undurchdringliche Körnung plastischer Tone ist für Erdnüsse ungeeignet, da die Nuss sich unter der Pflanze in den Boden eingräbt. Tonige Böden hindern die Pflanze am ungestörten Wachstum und verkleben bei der Ernte mit der Nuss (Young, 1976).

Erdnüsse entziehen dem Boden viele Nährstoffe, da meist neben den Hülsenfrüchten auch die oberirdische Pflanze abgeerntet wird. 1000 kg Erdnuss mit 2000 kg Heu entziehen dem Boden 63 kg N, 8 kg P, 38 kg K, 19 kg Ca und 8 kg Mg. Dabei entfallen 50 % des Stickstoffes und des Phosphates und 90 % des Kaliums, Calciums und Magnesiums auf das oberirdische Heu (Franke, 1994). Die Fähigkeit als Leguminose selbst Stickstoff zu fixieren, lässt die Erdnuss jedoch selbst auf Feldern wachsen, auf denen längst kein Mais mehr gedeiht. Ein hoher Erdnussbestand kennzeichnet daher oft schon viele Jahre in Betrieb stehende Parzellen.

## 3 Datengewinnung und –Aufbereitung

### 3.1 Methodik

Zunächst wurden von dem Untersuchungsgebiet vorhandene Fernerkundungsdaten ausgewertet. Es steht ein hochauflösendes SRTM-Höhenmodell zur Verfügung, mit dessen Hilfe Informationen über die Geländemorphologie, die Hangneigung und Hanglänge, Exposition sowie die Geländehöhe errechnet wurden. Außerdem liegen multispektrale Orthoszenen der Satelliten Landsat MSS, TM und ETM+ aus den Jahren 1979, 1989 und 2001 vor. Mit Hilfe von Falschfarbendarstellungen, spektralen Analysen und errechneten Indices kann ein guter Eindruck über die Nutzung und Oberflächenbeschaffenheit des Untersuchungsgebietes geschaffen werden. Durch Berechnung des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) der vorliegenden Satellitenbilder kann die Vegetation der vergangenen 22 Jahre verglichen werden. Hierzu wurde eine change detection Darstellung über 12 Jahre erstellt.

Mit Zuhilfenahme der hochauflösenden Quickbirdszenen aus dem Jahre 2005 von Google Earth konnte nun eine Vorauswahl des näher zu untersuchenden Gebietes getroffen werden.

Die folgende Geländebegehung erbrachte sowohl eine großflächige, als auch eine detailgenaue Kartierung der aktuellen Landnutzung der ausgewählten Gebiete, sowie einen guten Überblick über die Methoden und Möglichkeiten der lokalen Bevölkerung. Erstellte Karten und Satellitenbilder wurden vor Ort verifiziert und aktualisiert. Es wurden insgesamt 52 Bodenmischproben in verschiedenen Tiefen und an unterschiedlichen Standorten genommen um ein möglichst großes Gebiet flächenhaft abzudecken. Außerdem wurden 25 Leitprofile gegraben und teilweise gemäß der Bodenkundlichen Kartieranleitung aufgenommen. Durch diese sollen die Böden exakt nach der WRB-Klassifikation eingestuft und Standortparameter in unterschiedlichen Tiefen bestimmt werden. Die Bodenproben wurden im Labor auf zahlreiche Parameter untersucht um so die spezifischen Eigenschaften und die aktuellen Nährstoffverhältnisse des Bodens festzustellen.

Die Analyse der optischen Fernerkundungsdaten stützt sich auf standardisierte Algorithmen der Bildverarbeitungssoftware *Erdas Imagine 9.1*. Für Gis-Analysen und Visualisierung der Endprodukte fanden das Geographische Informationssystem *ArcGis 9.2* sowie *Global Mapper 9.0* und *Surfer 8* Verwendung. Für die Grafische Verarbeitung stand *Photoshop CS3* und *Freehand MX* zur Verfügung. Statistische Auswertungen wurden mit *SPSS 14* und *SigmaPlot 9.0* angefertigt. Die Planung und Durchführung der Bodenaufnahme sowie die Bewertung der Daten, erfolgte grob nach „*Soil Survey and Land Evaluation*“ (Dent & Young, 1981) sowie „*Booker Tropical Soil Manual*“ (Landon, 1991) und „*Tropical Soils and Soil Survey*“ (Young, 1976), die Laboranalysen orientierten sich am „*Bodenkundlichen Praktikum*“ (Schlichting & Blume, 1995).

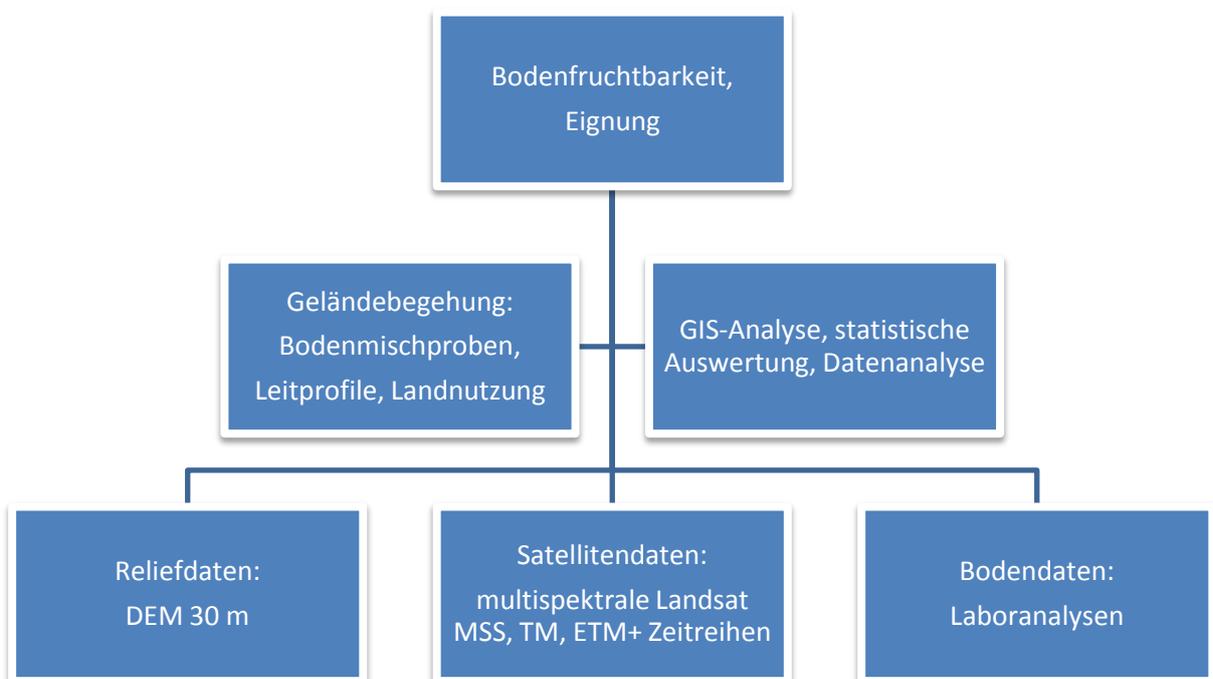


Abb. 15: Entwurf der methodischen Vorgehensweise der Datenaufbereitung

### 3.2 Reliefdaten

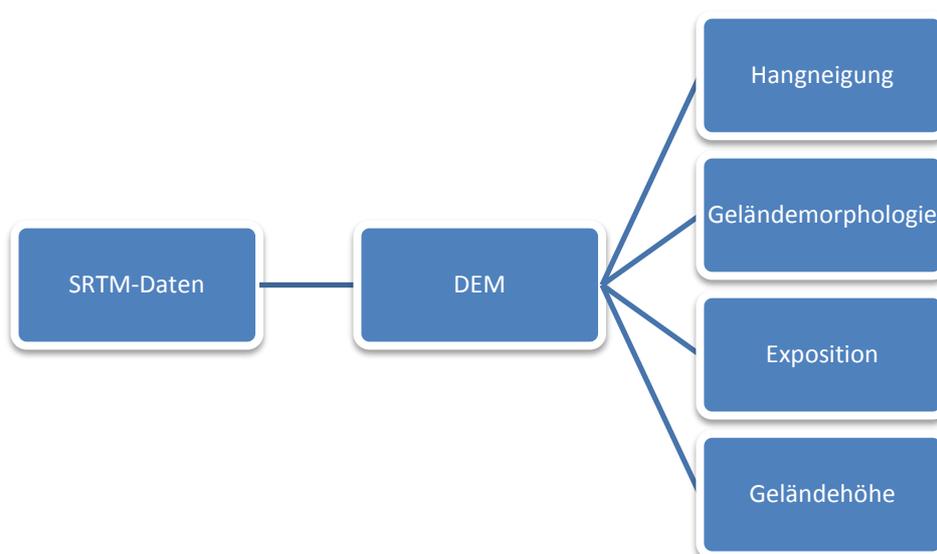


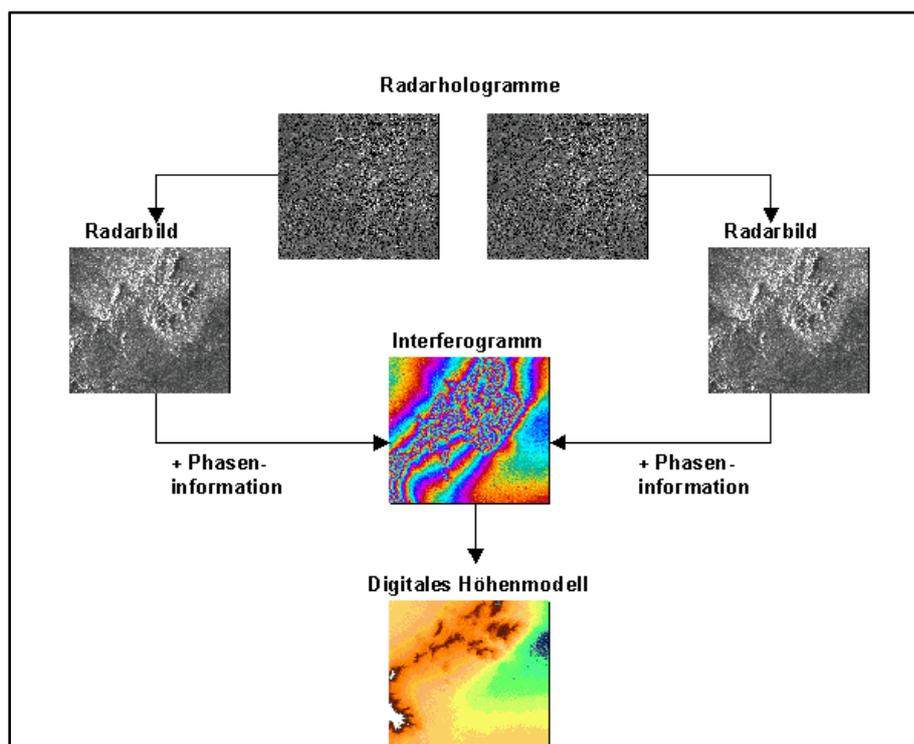
Abb. 16: Organigramm des Ablaufs der Datenprozessierung der SRTM-Daten

**E**in DEM (*Digital Elevation Model*) ist ein digitales, numerisches Modell der Geländehöhen und –formen. Die Grauwerte der einzelnen Pixel des Rasters stellen die entsprechenden Höhen im Gelände, inklusive Bebauung und Vegetation dar (Hildebrandt, 1996).

Das vorliegende DEM entstand im Rahmen der Shuttle Radar Topography Mission (*SRTM*) durch X-SAR-Aufnahmen des DLR im Februar 2000. Die Bahn des Shuttle im Weltraum erlaubte nur eine Erfassung der Gebiete zwischen 54 ° S und 60 ° N. Nördlichere oder südlichere Gebiete lagen außerhalb der Reichweite der Radargeräte. Flächendeckende Daten liegen in niedrigerer Genauigkeit durch SIR-C Aufnahmen (Frequenzbereich 4-8 Ghz, Wellenlänge 7,50-3,75 cm) der NASA vor (DLR, 2007) (Ramirez, 2006).

Die Höheninformationen werden aus den Rückstrahlungen von der Erdoberfläche errechnet. X-SAR wird im X-Band bei 8,8 Ghz betrieben und hat eine Wellenlänge von 3,75-2,40 cm. Durch diese kurze Wellenlänge erfolgt die Reflexion meist direkt an der Oberfläche, daher ist das entstehende Oberflächenmodell wie ein Modell der herkömmlichen optischen Stereoauswertung zu betrachten. Der Vorteil der Radaraufnahmen liegt in ihrer Unabhängigkeit gegenüber dem Wetter und dem Sonnenlicht. Dieselbe Oberfläche wird aus leicht verschiedenen Blickwinkeln von zwei verschiedenen Antennen des Shuttles aufgenommen, so dass ein größerer Teil sich überschneidet. Nun werden mittels eines Algorithmus homologe Punkte in dem Bildpaar gesucht, welche weiter verdichtet werden. Anhand der Überschneidung der Bilder kann nun ein Interferogramm erstellt und Höhenwerte (Z-Koordinaten) zu den gefundenen Punkten errechnet werden (DLR, 2007).

Die einzelnen Höhenwerte werden aus einem Flächensignal generiert, das eine Ausdehnung



von einer Bogensekunde hat. Dies bedeutet, dass in dem vorliegenden Modell ein Pixel etwa 25 -30 m entspricht. Der Höhendatensatz wird in geographische Koordinaten transformiert und als Kacheln mit einer Seitenlänge von 15'x15' in Länge und Breite ausgeliefert (DLR, 2007) (Ramirez, 2006).

Abb. 17: Prozess der Erstellung eines DEMs aus X-Band Daten nach (DLR, 2007)

Die Höhwerte des vorliegenden Modells werden ellipsoidisch angegeben. Die ellipsoidische Höhe gibt den Abstand eines Punktes zum Bezugsellipsoid WGS84 an, daher entspricht der Nullpunkt nicht der Meeresoberfläche (Hildebrandt, 1996). In den verwendeten DEMs liegt der Meeresspiegel bei etwa 11 m. Dies ist bei Höhenangaben im weiteren Verlauf dieser Arbeit stets zu beachten.

Das vom DLR für diese Arbeit zur Verfügung gestellte DEM ist bereits fehlerkorrigiert. Die Korrektur erfolgte im DFD mit Hilfe der niedriger auflösenden SIR-C Daten (3 Bogensekunden) sowie der Interpolation von Fehlpixeln. Die Meeresoberfläche wurde auf einen fixen Wert festgelegt.

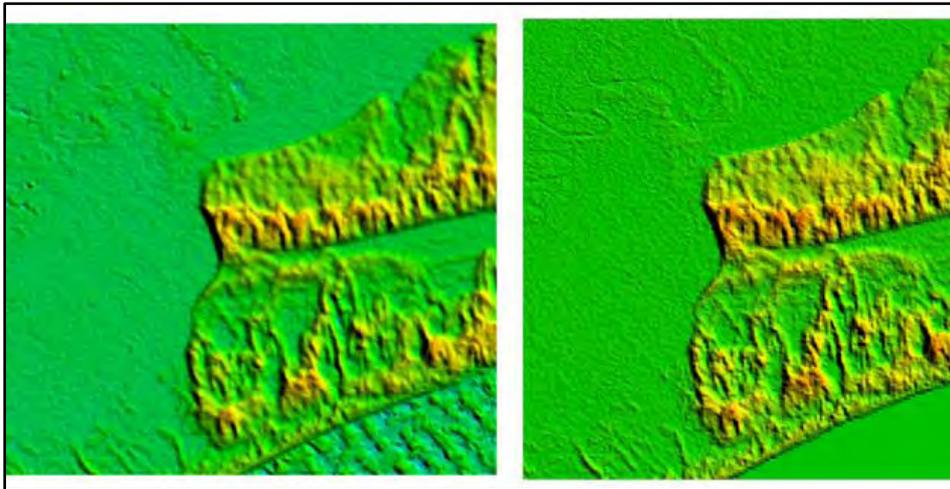


Abb. 18: Das Dünengebiet bei Xai-Xai. links: unkorrigiertes SRTM-DEM aus SIR-C Daten des USGS (Auflösung 3 Bogensekunden), rechts: korrigiertes Modell aus X-Band Daten des DLR (Auflösung: 1 Bogensekunde)

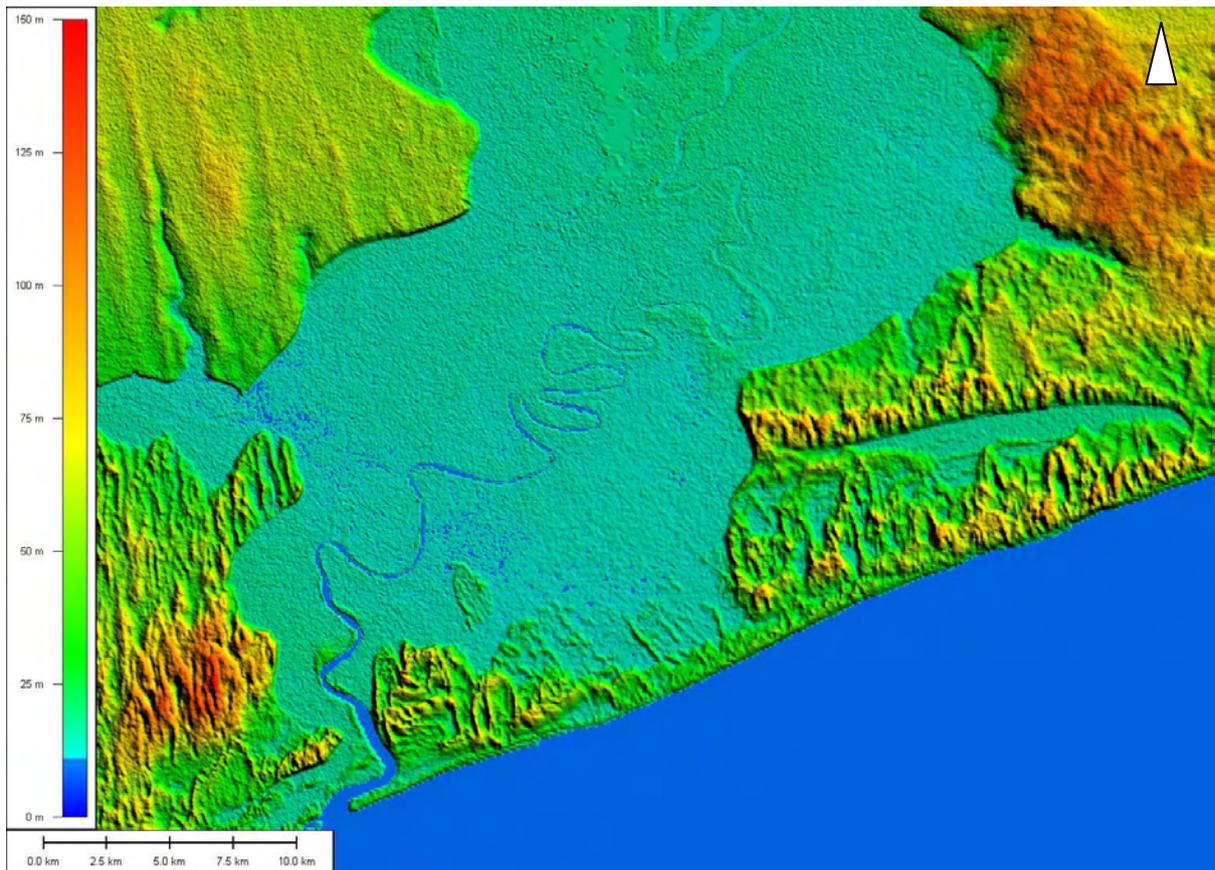


Abb. 19: DEM aus SRTM-Daten der Mündung des Limpopo in den indischen Ozean. Optisch mit einem Hillshade unterlegt

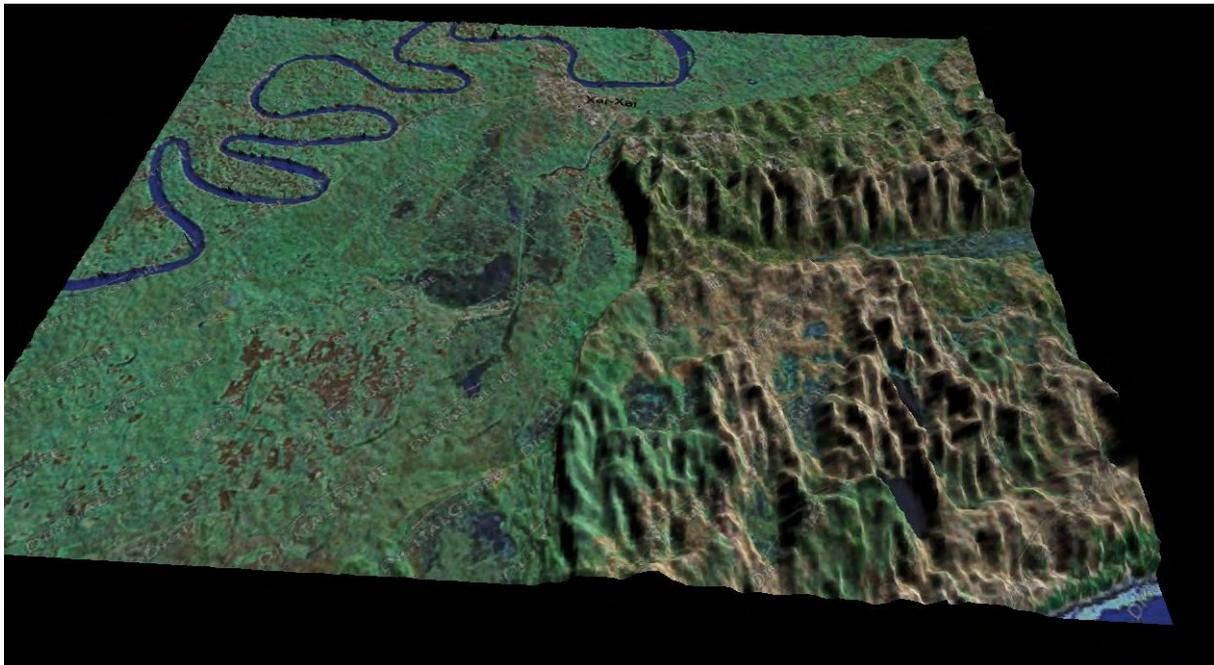


Abb. 20: Dünengebiet bei Xai-Xai in perspektivischer 3D-Darstellung. 8-fach überhöhtes DEM überlagert mit einer DigitalGlobe Szene (siehe Abb. 2)

### Hangneigung und Exposition

Aus einem DEM kann nun eine Grafik erstellt werden, welche die Hangneigungen wahlweise in Grad oder Prozent wiedergibt. In unserem Dünengebiet ist dies besonders interessant, da kaum eine Düne eine Neigung von weniger als  $5^\circ$  aufweist. Auch Neigungen von mehr als  $10^\circ$  sind keine Seltenheit. Diese starken Hangneigungen beeinflussen nicht nur die Nutzbarkeit für Anbaupflanzen durch extreme Exponierungen, sie nimmt ebenso Einfluss auf die Bodenentwicklung und Erosionsanfälligkeit. Es sind wiederum drei sich unterscheidende Gebiete erkennbar. Zum einen die hoch gelegenen Dünen der Tavene-City mit Hangneigungen von  $8-13^\circ$ , gelegentlich auch steiler. Zum anderen die Dünen in Küstennähe mit zahlreichen sehr steilen Hängen, oftmals  $13-20^\circ$ . Dazwischen liegt ein relativ flaches Stück. Hier sind kaum Neigungen  $>5-8^\circ$  erkennbar.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit eines DEMs ist die Illustration der Himmelsrichtungen. Abb. 22 zeigt die durch Dünenmorphodynamik entstandenen Expositionen. Die Hauptrichtung der Dünen zeigt von NNW nach SSE (siehe Pfeil). Entsprechend dominieren West- und Osthänge.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird immer wieder auf diese Darstellungen der Hangneigung und der Exposition zurückgegriffen werden.

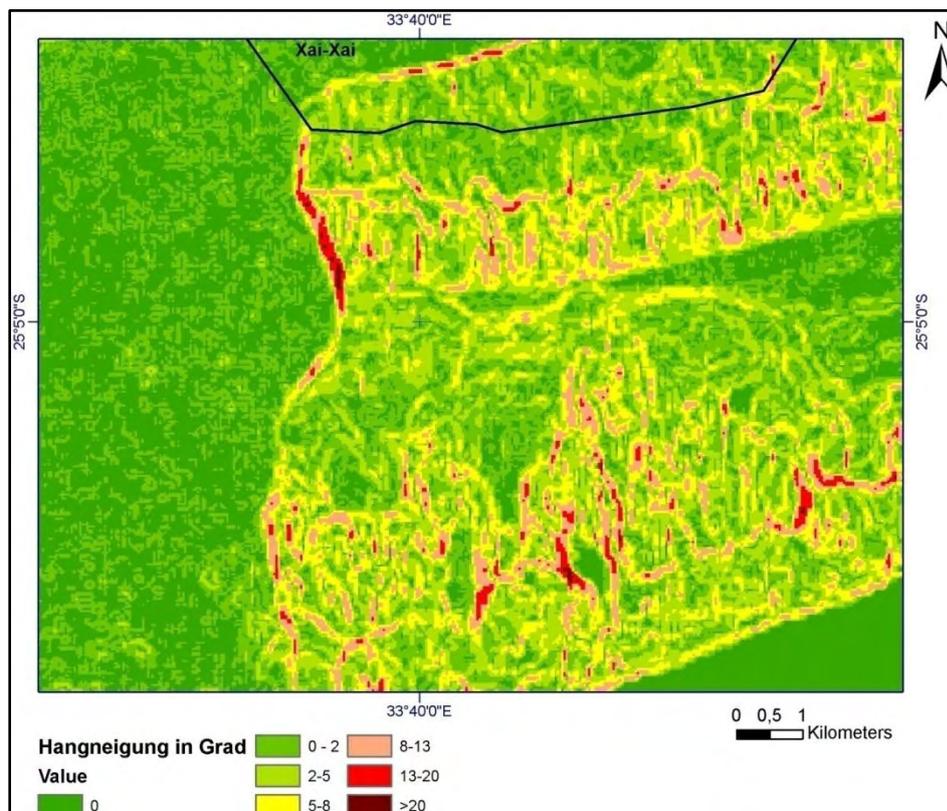


Abb. 21: Die Hangneigung (slope) der Dünen in Grad (SRTM-Höhenmodell)

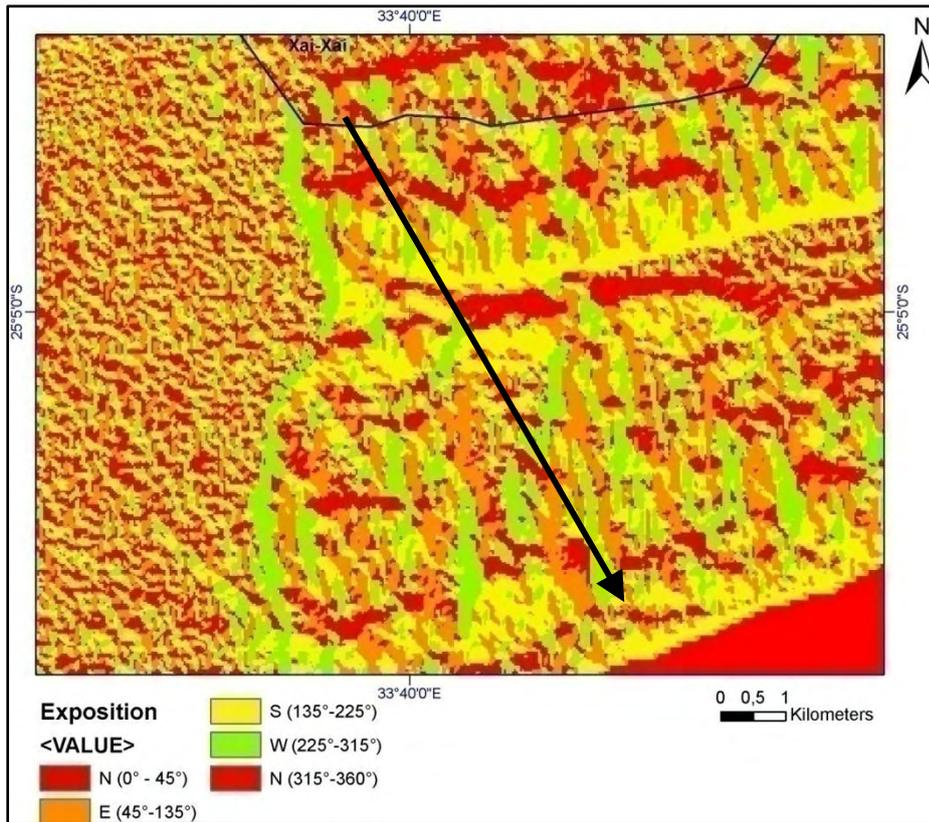


Abb. 22: Die Expositionen (aspects) der Dünen (SRTM-Höhenmodell)

### 3.3 Satellitendaten

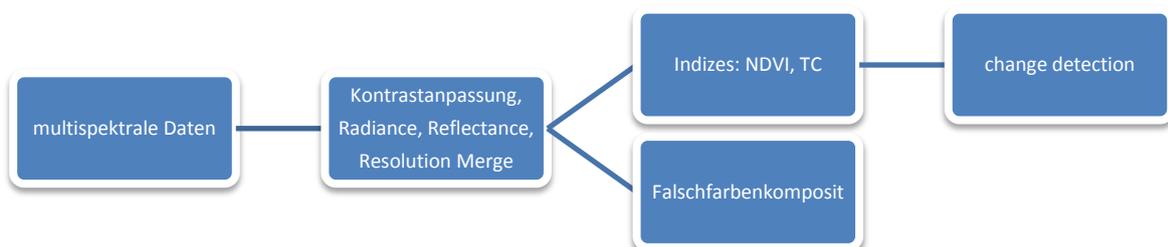


Abb. 23: Datenprozessierung der Satellitendaten

Um das Untersuchungsgebiet bereits vor der Begehung abzuschätzen, ist eine Fernerkundung mittels Luftbildern oder Satellitendaten unabdingbar. Sensoren im nahen und mittleren Infrarot-Bereich liefern zudem Attribute, die mit dem menschlichen Auge nicht wahrzunehmen sind.

### 3.3.1 Landsat

Die Landsat-Satelliten besitzen opto-elektronische Sensoren, welche Reflexionen im Spektralbereich des sichtbaren Lichts und des nahen und mittleren Infrarots messen. Diese empfangene Energie wird in elektrische Signale umgewandelt und kann nach analog-digitaler Wandlung in ganze Zahlen (*DNs*) als Grauwert in einem flächenhaften Bild dargestellt werden. Die Darstellung erfolgt in der Regel als 8 Bit unsigned Integer; damit stehen Werte im Bereich von 0 bis 255 zur Verfügung, wobei ein Wert von 0 keine, ein Wert von 255 eine maximale Reflexion bedeuten (Hildebrandt, 1996).

Scanner Plattform	Räumliche Auflösung (m)	VIS [ $\mu\text{m}$ ]	NIR [ $\mu\text{m}$ ]	MIR [ $\mu\text{m}$ ]	THIR [ $\mu\text{m}$ ]
Landsat MSS 1-3	56 * 79	0,5-0,6 0,6-0,7	0,7-0,8 0,8-1,1	-	-
Landsat TM 4,5	30, 120	0,45-0,52 0,52-0,6 0,6-0,69	0,78-0,9	1,55-1,75 2,08-2,35	10,4-12,5
Landsat ETM+ 6,7	30, 120, 15	Wie TM, dazu Panchromatisch: 0,5- 0,9			

VIS= sichtbares Licht, NIR= nahes Infrarot, MIR= mittlere Infrarot, THIR= thermales Infrarot

Tab. 3: Vergleich der Landsat Systeme (nach Hildebrandt 1996, <http://landsat.gsfc.nasa.gov> 2.10.2007)

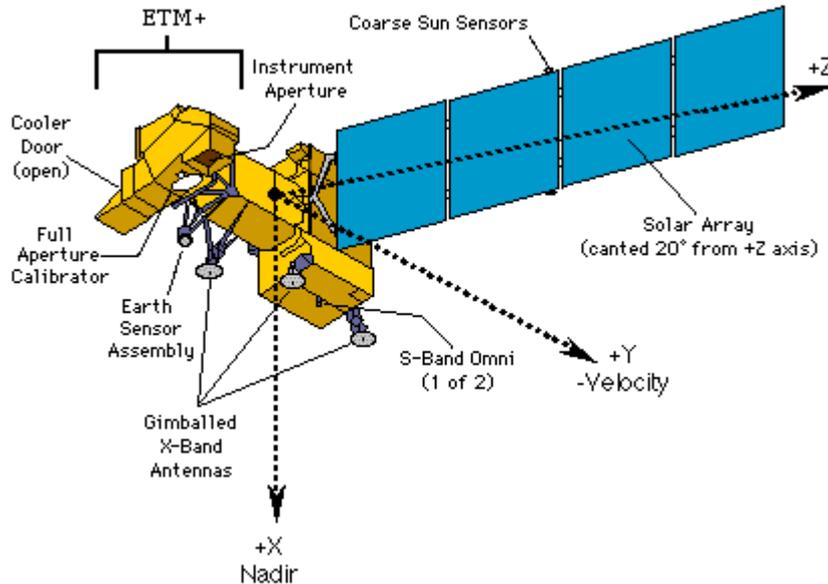


Abb. 24: Der Satellit Landsat 7 ETM+ (Williams, 2008)

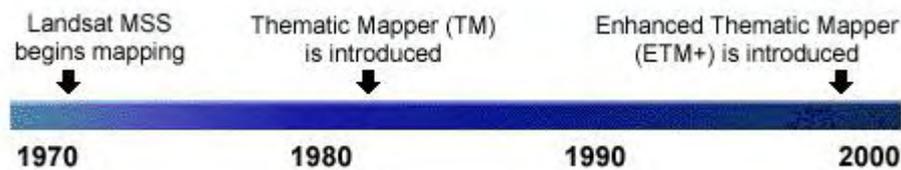


Abb. 25: Startjahre der Landsat-Systeme 1-7 (Williams, 2008)

### 3.3.2 Grundlagen und Bilderaufbereitung

Vorliegende Landsatzzenen:

- Landsat MSS: 31.05.1979
- Landsat TM: 02.08.1989
- Landsat ETM+: 07.05. 2001

Die verwendeten Satellitenbilder werden von dem USGS zur Verfügung gestellt und sind über den USGS-Earth-Explorer frei im Internet verfügbar (<http://edcns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/> am 26.10.2007). Die Szenen liegen multispekttral als „Tri-Decaded Global Landsat Orthorectified“ –Daten vor. Dies sind orthorektifizierte wolkenfreie Szenen der Satelliten Landsat 1-5 und 7, welche von dem NASA Commercial Remote Sensing Program erstellt, und mit dem Ziel den Nutzern eine weltumspannende, qualitativ hochwertige Abdeckung der Landmassen zur Verfügung zu stellen, veröffentlicht wurden. Insgesamt existieren 7500 Szenen der MSS-Satelliten, 7461 der TM und 8500 des ETM+ Satelliten über die letzten 25 Jahre (USGS, 2006).

Die Daten sind bereits geodätisch orthorektifiziert. Um Verfälschungen durch Geländehöhen zu vermeiden, wurden Höhendaten in die Georeferenzierung miteinbezogen.

Als Referenzellipsoid wird das WGS84 verwendet, die Projektion erfolgt in Universal Transverse Mercator (UTM) bei einer Pixelauflösung von 28,5 m beim TM und ETM+ bzw. 57 m beim MSS. Um eine bessere Vergleichsmöglichkeit mit anderen georeferenzierten Daten zu schaffen und eine Nutzung mit *Arc-Pad* auf dem PDA vor Ort zu ermöglichen, wurden die Szenen nach dem Download im *GeoTiff*-Format in eine geographische Projektion (Lat/Long) überführt (USGS, 2006).

### 3.3.2.1 Radiance und Reflectance

Um die spektralen Reflexionswerte aus den gelieferten DN's zu errechnen, wird zunächst anhand der Daten des Meta-Files die Strahlung (Radiance) berechnet. Mit den Werten des Sonnenzenithwinkels und des Abstandes Erde-Sonne zum Zeitpunkt der Aufnahme (abzuleiten aus dem julianischen Datum) kann nun die eigentliche Reflexion (Reflectance) errechnet werden. Diese Schritte können per Hand, oder mit dem in *Erdas Imagine* implementierten Algorithmus vollzogen werden (Williams, 2008).

### 3.3.2.2 Resolution Merge

Um eine genauere Darstellung der multispektralen Bänder des Landsat 7 Satelliten zu ermöglichen, bietet *Erdas Imagine* die Möglichkeit, eine Resolution Merge mit dem höher auflösenden panchromatischen Band durchzuführen. Durch dieses Verfahren nehmen alle 6 Bänder optisch die hohe Auflösung von 15 m an und zeigen eine wesentlich detailliertere Übersicht über das Untersuchungsgebiet. Die spektrale Information verbleibt allerdings auf dem Stand der niedrig auflösenden Bänder bei 28,5 m.

Zu diesem Zweck stehen unterschiedliche Algorithmen zur Verfügung. In dieser Arbeit wurde die Variante der IHS-Transformation gewählt. Dabei werden bis zu drei multispektrale Kanäle mit einem minimalen Verlust in die höhere geometrische Auflösung transformiert. Dazu findet zunächst eine Transformation der drei geometrisch schlechter auflösenden Kanäle von RGB in den IHS-Farbraum statt. Das hoch aufgelöste Bild wird nun so gestreckt, dass es ungefähr die gleichen Varianz- und Mittelwerte wie der eben ermittelte Intensitätskanal hat. Danach wird das gestreckte panchromatische Bild mit dem Intensitätskanal ausgetauscht. Nach der inversen Transformation zurück von IHS zu RGB entsteht eine Farbkomposite, die die höhere geometrische Auflösung des panchromatischen Kanals mit einer RGB-Darstellung verbindet (Hildebrandt, 1996).

### 3.3.3 NDVI und Change Detection

Die charakteristischen spektralen Reflexionseigenschaften vitaler Vegetation und die daraus folgenden spektralen Signaturen können verwendet werden, um in multispektralen Aufzeichnungen sowohl den Gesundheitszustand und Bedeckungsgrad als auch die Unterscheidung zwischen bedeckter und unbedeckter Oberfläche quantitativ und qualitativ zu erfassen. Zu diesem Zweck wurden zahlreiche Vegetationsindices aufgrund rechnerischer Kombinationen von Messwerten und Spektralkanälen erstellt (Hildebrandt, 1996).

Der Vegetationsindex NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) ist der bekannteste und gebräuchlichste. Er stellt ein Berechnungsverfahren dar, das auf den unterschiedlichen Reflexionseigenschaften der Vegetation im roten (Landsat 7 Kanal 3: 0,6-0,7  $\mu\text{m}$ ) und nahen infraroten (Landsat 7 Kanal 7: 0,78-0,9  $\mu\text{m}$ ) Spektralbereich beruht. Wie in Abb. 28 zu erkennen ist, weisen gesunde Pflanzen im nahen Infrarot stark ansteigende Reflexion auf, während die Reflexion von unbewachsenem Boden in Abhängigkeit von seinen Eigenschaften linear steigt. Je aktiver das Chlorophyll, desto steiler fällt die Kurve des Reflexionsanstiegs im nahen Infrarotbereich zwischen 0,7 und 1  $\mu\text{m}$  aus. Diese Zusammenhänge erlauben es den Zustand und die Vitalität der Vegetation zu beurteilen (Herring & Weier).

Der NDVI kann Werte zwischen -1 (die Reflexion im TM Kanal 4, IR ist 0) bis 1 (die Reflexion im TM Kanal 3, rot ist 0) annehmen. Werden bei Landsat TM und ETM+ die Kanäle 4 und 3 verwendet, sind dies bei dem MSS die Kanäle 4 und 2. Formel 1 zeigt die Berechnung des NDVI, Abb. 24 demonstriert an einem Rechenbeispiel das Zustandekommen hoher und niedriger Werte (Herring & Weier):

$$NDVI = \frac{(LNIR - LRot)}{(LNIR + LRot)}$$

**Formel 1: NDVI-Berechnung aus den Kanälen des nahen IR und sichtbaren Rot. L: Strahlungsleistung (die DN's müssen die Strahlung (Reflectance) wiedergeben)**

Der NDVI wird Rouse et al. (1973) zugeschrieben, wobei allerdings die Grundlagen schon von Kriegler et al. (1969) aufgestellt wurden.

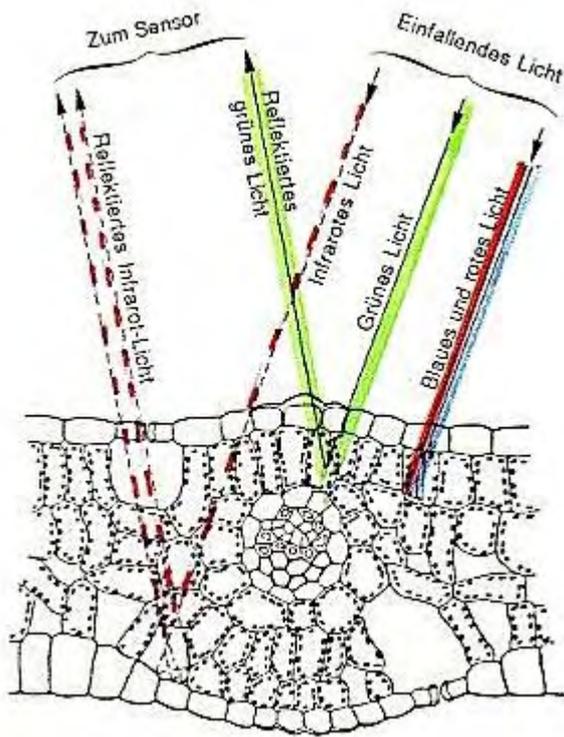


Abb. 27: Reflexion an einer Pflanze (Roseuu, 2003)

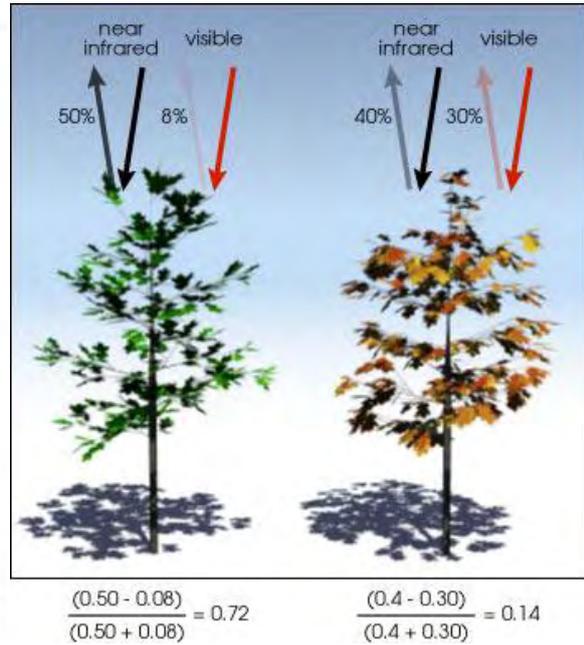


Abb. 26: Rechenbeispiel eines NDVI gesunder und ungesunder Vegetation (Herring & Weier)

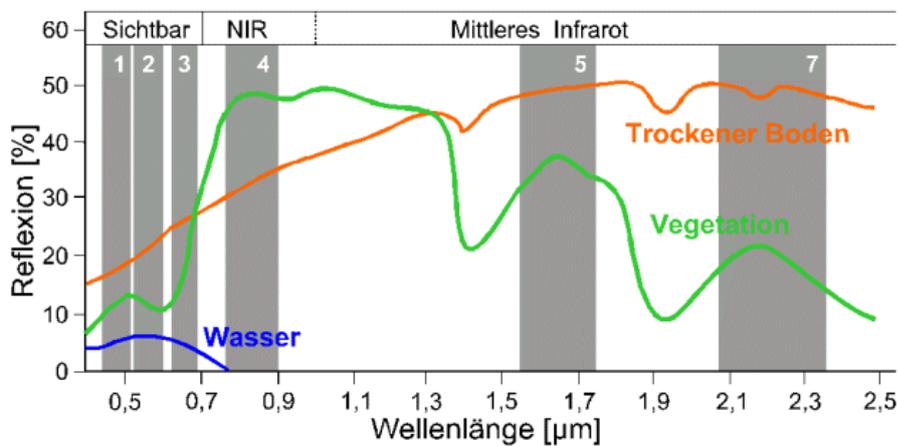


Abb. 28: Reflexionskurven von Boden, Wasser und Vegetation. Die Landsat TM Kanäle sind grau dargestellt (Stech)



Abb. 29: Links: ETM+ Kanal 3 (0,6-0,7  $\mu\text{m}$ ), Rechts: ETM+ Kanal 4 (0,78-0,9  $\mu\text{m}$ ). Deutlich zu erkennen ist die stärkere Reflexion der unbewachsenen Dünen in Kanal 3. In Kanal 4 strahlen die Dünen deutlich weniger stark, Wasser überhaupt nicht, aber das bewachsene Talgebiet umso stärker

Um nun den Unterschied zwischen den Aufnahmen genau zu quantifizieren und bildlich darzustellen, wird eine change detection durchgeführt.

Unter einer Veränderungsdetektion (= *change detection*) versteht man den Prozess der Identifizierung von Unterschieden im Status eines Objektes oder Phänomens durch die Beobachtung des Objektes zu unterschiedlichen Zeiten (Singh, 1989).

Zu diesem Zweck werden die NDVI-Darstellungen zweier Satellitenaufnahmen von unterschiedlichen Zeitpunkten voneinander subtrahiert.

### 3.3.4 Tasseled Cap

Diese Darstellungsart stellt einen Index dar, der aus den RGB Komponenten Greenness, Brightness und Wetness besteht. Die Komponenten werden generell nach der Formel  $T = A * X + b$  errechnet. Dabei ist  $A * X$  das Produkt des für jeden Kanal wissenschaftlich ermittelten Koeffizienten A und dem Bildvektor X. b ist ein additiver Term. Werden alle 7 Kanäle miteinbezogen, erhält man als Ergebnis die bereits erwähnten Komponenten (Hildebrandt, 1996). Die Komponente Greenness kann als weiterer Vegetationsindex verstanden werden; Wetness verarbeitet niedrigere Wellenlängen und hebt so besonders feuchte Flächen farblich hervor; Brightness bedient sich besonders bei den höheren Wellenlängen und zeigt so sehr trockene und stark reflektierende Gebiete. In dieser Arbeit dient die TC Darstellung besonders zur Hervorhebung der trockenen Böden im Brightness-Kanal und dem Auffinden sumpfiger Flächen im Wetness-Kanal. Der Nachteil ist, dass im Brightness-Kanal kaum zwischen stark reflektierenden Häusern und trockenem Boden unterschieden werden kann. Die TC-Transformation ist im Anhang zu finden (Anhang 8).

### 3.3.5 Optimale Darstellung

Die optimale Darstellung ergibt sich alleine aus der Fragestellung. In dieser Arbeit stehen sowohl der trockene unbewachsene Boden, als auch die Vitalität der Vegetation im Vordergrund. Gemäß Abb. 28 fiel die Wahl somit auf die Landsat 7 Kanäle 7,4 und 2. Zur besseren optischen Darstellung wurde eine Resolution Merge mit dem panchromatischen Kanal durchgeführt. Ebenso wurden einige Kontrast- und Farboptimierungen durchgeführt. Die RGB Darstellung liefert ein gutes Ergebnis und zeigt deutlich in welchen Gebieten die Dünen nur dünn (sprich mit Mais – hier dominiert Kanal 7 - violett) bzw. dichter (Fruchtbäume - hier finden sich die Siedlungen - grünlich) bewachsen sind. Gewässer werden sehr dunkel dargestellt. Auch stark reflektierende Betonbauten sind erkennbar. Diese Falschfarbenkomposition lässt eine erste Klassifikation der Region zu und führte letztendlich zu einer Vorauswahl des Untersuchungsgebietes und der Leitprofile in den Dünen. Die Aufschlüsselung der einzelnen Bänder erfolgt im Detail im Analyseteil. Die kommentierte Komposition findet sich im Anhang (Anhang 7).

### 3.3.6 Quickbird

Das frei verfügbare Programm *Google Earth* zeigt das Untersuchungsgebiet in einer hochauflösenden Aufnahme des Satelliten Quickbird, welcher von DigitalGlobe betrieben wird. Die Aufnahme in Echtfarben stammt aus dem Jahr 2005 und besitzt eine Auflösung von 0,6 m pro Pixel im Nadirbereich (DigitalGlobeInc., 2008).

Um die Aufnahme für diese Arbeit verwenden zu können, wurde die Google Earth Darstellung per Screenshot in mehr als 100 Einzelbilder zerlegt und in Photoshop wieder zusammengesetzt. Das entstandene Bild wurde nun auf das geodätische Datum WGS84 projiziert und in einem GIS mithilfe der vorhandenen Landsataufnahmen und des DEMs georeferenziert. Die anschließende Rektifizierung ordnete die Pixel nun neu an. Da die Aufnahme nun entzerrt im geographischen Koordinatensystem (Lat/Long) vorliegt, kann es für weitere Arbeiten in jedem GIS (auch vor Ort in ArcPad) verwendet werden. Sie ist flächendeckend hochauflösend und detailgenau, bietet allerdings nur den Spektralbereich des sichtbaren Lichts.

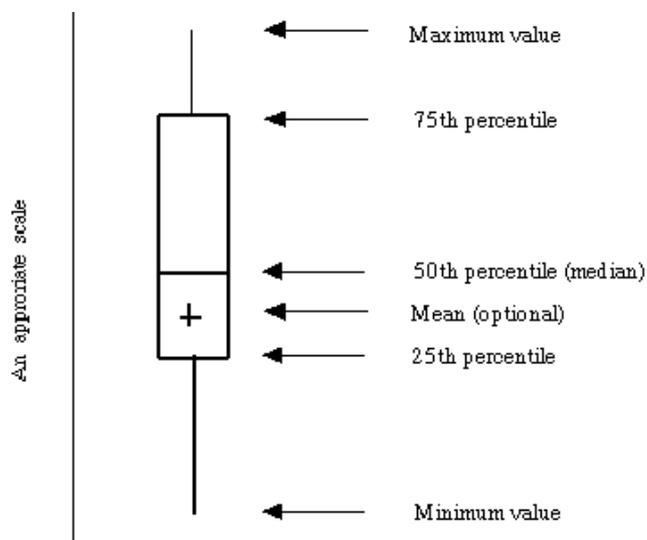
In dieser Arbeit dient sie vor allem als Kartenersatz, zur Orientierung im Gelände und der detaillierten Darstellung.

## 3.4 Statistische Auswertungen

Zur Auswertung gewonnener Daten ist die multivariate Statistik ein wichtiger Teil der Geographie. Dabei werden multivariat verteilte Variablen untersucht, d.h. die Variablen werden nicht isoliert betrachtet, sondern ihr Zusammenwirken und ihre Abhängigkeit stehen im Vordergrund (Bahrenberg, Giese, & Nipper, 1992).

Ein wichtiges Werkzeug zum Auffinden einer Abhängigkeit mehrerer Variablen ist die Korrelation. In dieser Arbeit wird dabei auf die Pearson-Korrelation zurückgegriffen. Die Pearson-Korrelation ist ein dimensionsloses Maß für den Grad des linearen Zusammenhangs zwischen zwei mindestens intervallskalierten Merkmalen. Der Koeffizient nimmt Werte zwischen -1 und +1 an. Bei einem Wert von +1 besteht ein vollständiger positiver linearer Zusammenhang zwischen den untersuchten Variablen. Ein Wert von -1 zeigt eine vollständige negative Korrelation. Nimmt der Korrelationskoeffizient 0 an, hängen die beiden Merkmale überhaupt nicht linear voneinander ab (Bahrenberg, Giese, & Nipper, 1992).

Ebenfalls von Bedeutung zum Auffinden einer Abhängigkeit ist die Regressionsanalyse. deren Ziel ist es, die Beziehung zwischen einer abhängigen, und einer oder mehrerer unabhängigen Variablen aufzuzeigen. Als Darstellungsart kann ein Streudiagramm gewählt werden,



der R-Wert gibt die Normalverteilung der Werte wieder (1 = normalverteilt, 0 = Punktwolke) (Bahrenberg, Giese, & Nipper, 1992).

Um eine große Datenmenge optisch und inhaltlich klar darzustellen, wurde in dieser Arbeit das Boxplot gewählt. Es zeigt sowohl Maximal- als auch Minimalwerte, zwei Quartile, den Median und eventuelle Ausreißer an (siehe Abb. 30) (Schwarzer, 2007).

Abb. 30: Erklärung der Boxplot-Darstellung (Schwarzer, 2007)

### 3.5 Auswahl des Gebietes

Da diese Arbeit in erster Linie landwirtschaftliche Zwecke erfüllt, wurde auf eine einheitliche bodenkundliche Kartierung verzichtet. Ungenutzte Sumpfgebiete sowie Weideländer wurden nicht beprobt. Ziel war es, die Fläche die den Bewohnern von Patrice Lumumba und Patrice Lumumba 2000 zur Ernährung, dient möglichst genau abzudecken. Die Wahl fiel daher auf das direkt an PL angrenzende südliche Gebiet. Diese Fläche umfasst Teile des bewohnten Bezirks und erstreckt sich bis zu 4,8 km Richtung indischer Ozean. In der Richtung West-Ost erfasst es knapp 3 km Die Talregion wurde in 2 separaten Bereichen beprobt. Zum einen wurde eine Fläche gewählt, welche unmittelbar an die Dünen angrenzt, zum anderen eine weiter im Tal gelegene Fläche. Die genaue Lage der Untersuchungsgebiete ist Anhang 5 zu entnehmen.

### 3.6 Bodendaten

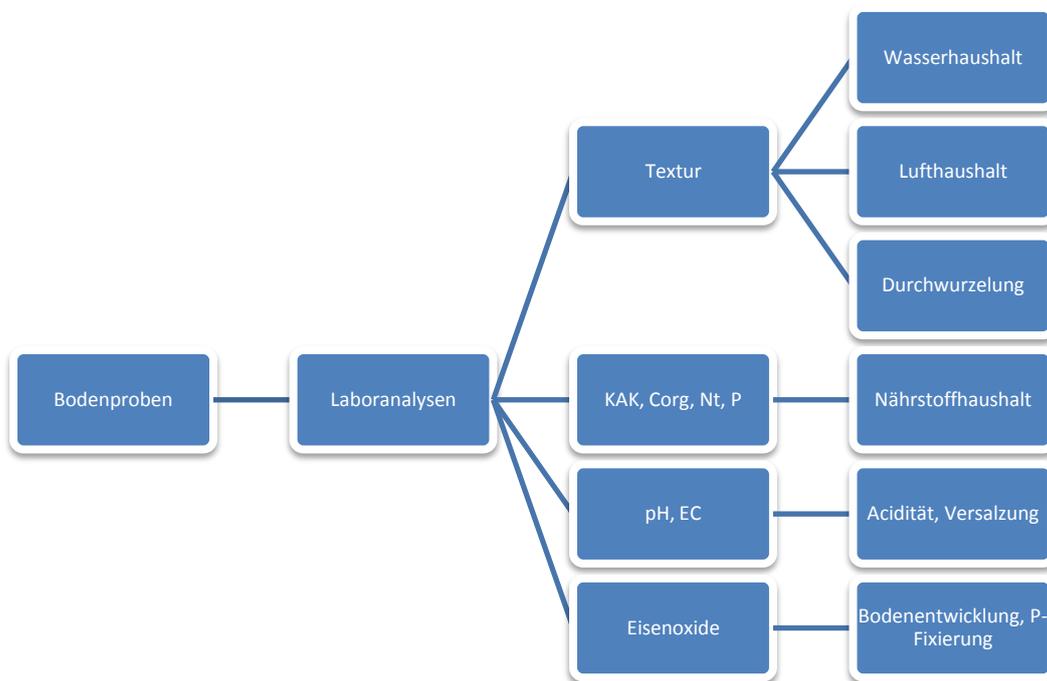


Abb. 31: Flussdiagramm der Laboranalysen

Die Untersuchung zielt in erster Linie auf die landwirtschaftliche Nutzbarkeit der Böden. Die wichtigsten Eigenschaften des Bodens für die Fruchtbarkeit und damit die landwirtschaftliche Produktion sind folgende (Finck A. , 1963):

- Korngrößenzusammensetzung des Oberbodens
- Wasserdurchlässigkeit des Unterbodens
- Mächtigkeit des Oberbodens
- Mächtigkeit des Unterbodens
- Wasserhaltefähigkeit des Bodens
- Bodenreaktion
- Natürlicher Wasserabzug
- Natürlicher Nährstoffgehalt
- Humusgehalt
- Grad der Erosion
- Grad der Versalzung

Sowohl die Probenahme, als auch die Laboranalysen zielen auf die oben genannten Parameter. In diesem Kapitel wird zunächst kurz die Probenahme erläutert. Danach werden die untersuchten Parameter sowie die Analysemethoden aufgezeigt. Es folgt jeweils eine graphische Darstellung und eine kurze Einstufung und Wertung der gefundenen Ergebnisse. Eine zusammenfassende Bewertung hinsichtlich der oben genannten Punkte und eine Bewertung

der Böden erfolgt in Kapitel 4.1.4 bzw. 4.2.4. Eine Zusammenfassung der Fruchtbarkeit findet sich tabellarisch in Anhang 1. Die Rohdaten der Laboranalysen enthält Anhang 14.

### 3.6.1 Probenahmetechnik

#### *Mischproben*

Die Entnahme der Mischproben im Oberboden erfolgte anhand des Probenahmeprotokolls in Anhang 4. Es wurden stets 6 Spateneinstiche a 3-4 kg in einem Mischeimer homogenisiert, auf 300 g verkleinert und in einem PE-Beutel verpackt. Es wurde auf homogene Boden- sowie Vegetationseigenschaften bei der Entnahme und Abgrenzung des Entnahmegebietes geachtet. Bei verändertem Pflanzenwuchs oder einem Wechsel der Bodenfarbe erfolgte eine erneute Probenahme. Da die Homogenität der Felder nie gewährleistet werden konnte, führte stets nur ein einzelnes Feld zu einer Mischprobe. Erfasst wurde der Hauptdurchwurzelungshorizont bis in eine Tiefe von 40 cm. Bei einem Teil der Proben wurden die oberen 2 cm separat auf dieselbe Weise beprobt.

Es wurde darauf geachtet, eine möglichst differenzierte Bepflanzung und einen möglichst inhomogenen Vitalitätszustand der Vegetation zu erfassen. Ebenfalls wichtig war die Erfassung unterschiedlicher morphologischer Gegebenheiten.

Als Richtlinien der Probenahme und Probenbehandlung fanden soweit möglich die Deutschen Industrienormen (DIN) sowie die Bodenkundliche Kartieranleitung der AG Bodenkunde (2005) Anwendung.

Die Areale der entnommenen Proben wurden vor Ort per GPS eingemessen und in ArcPad weiterverarbeitet.

Die Probenahme erfolgte im August, und damit in der Trockenzeit.

#### *Leitprofile*

Die Leitprofile wurden anhand der Bodenkundlichen Kartieranleitung (2005) vor Ort aufgenommen. Die Beprobung erfolgte wenn möglich Horizontweise. Waren keine Horizonte zu erkennen, wurde in regelmäßigen Abständen beprobt. Ziel der Leitprofile war die Erfassung der Tiefenfunktionen der Böden in einem möglichst großen und unterschiedlichen Gebiet. Auch die Leitprofile wurden per GPS und ArcPad punktuell eingemessen.

### 3.6.2 Laboranalysen

Die 96 Bodenproben wurden nach 9-wöchigem Transport im geomorphologischen Labor der FAU-Erlangen untersucht. Im Vordergrund der Untersuchungen stehen typische Kennwerte der Bodenkunde, insbesondere der Nährstoffversorgung. Neben der elektrischen Leitfähigkeit als Maß der gelösten Minerale und Salze, dem pH-Wert als Kennzeichen des Protonengehaltes, dem Gesamtgehalt an Stickstoff, organischem Kohlenstoff und der effektiven Kat-

ionenaustauschkapazität (NH<sub>4</sub>Cl-Methode nach Trüby und Aldinger, bestimmt wurde das austauschbare Ca, Na, K, Mg, Mn, Al sowie die Basensättigung), wurde der Gehalt an dithionit- und oxalatlöslichen Eisenoxiden sowie die Korngrößenverteilung analysiert. Ebenso wurde das pflanzenverfügbare, wasserlösliche Phosphor stichprobenartig bestimmt.

### 3.6.2.1 Elektrische Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Summenparameter für gelöste, dissoziierte Stoffe und damit für den Ionengehalt. Die Größe der Leitfähigkeit resultiert aus der Konzentration und dem Dissoziationsgrad der Ionen sowie aus der Temperatur und der Wanderungsgeschwindigkeit. Über die Art der Ionen selbst kann eine Messung der Leitfähigkeit keine Aussage machen. Trotzdem kann man Rückschlüsse von der Leitfähigkeit auf die Konzentration gelöster Elektrolyte ziehen. Die Leitfähigkeit wird zur Ermittlung der Wasserversalzung gemessen, z.B. bei der Kontrolle von Oberflächengewässern und Grundwässern. Bei Bodenuntersuchungen gibt die Leitfähigkeit Hinweise auf den Anteil löslicher Salze und somit auf das Nutzungspotential von Böden (Höiting, 1998).

Die Leitfähigkeit (Einheit:  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) wird ausgedrückt durch den reziproken Wert des elektrischen Widerstandes ( $S=1/\text{Ohm}$ ) bezogen auf einen Wasserwürfel von 1 cm bei 25 °C (Höiting, 1998).

Zur Messung wurden 10 mg Boden mit 50 ml Aqua-dest. vermischt (Verhältnis 1:5) und zwei Stunden maschinell geschüttelt. Die Messung erfolgte bei einer Temperatur von 25°C (normiert).

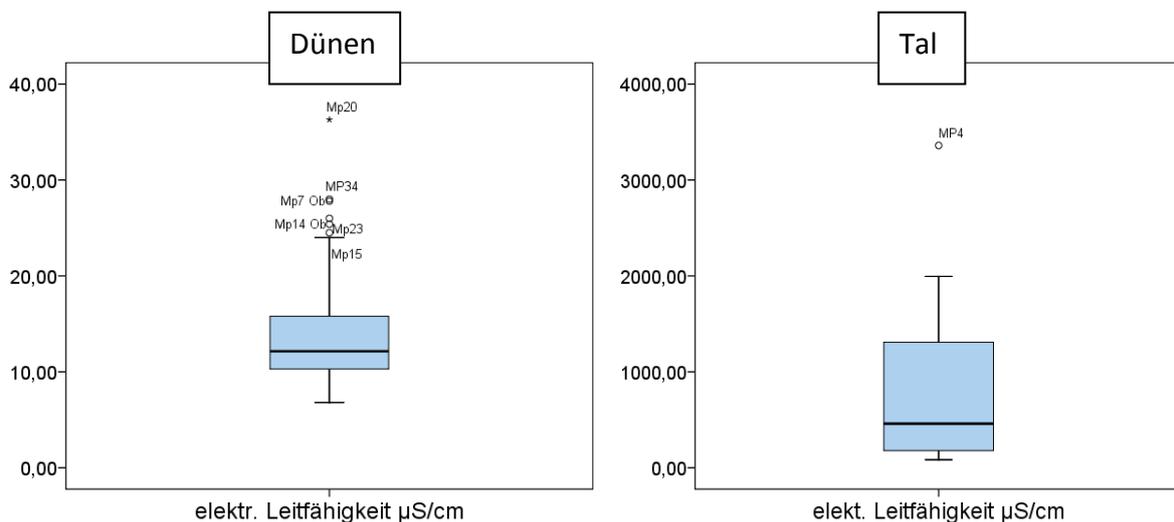


Abb. 32: Boxplot der elektr. Leitfähigkeit in  $\mu\text{S}/\text{cm}$  der Dünenproben (links) und der Talproben (rechts). Minimum, Maximum, Quantile und Median der 91 Messwerte werden angezeigt. Beide Messreihen zeigen Ausreiser

	EC [ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ]	Salzgehalt [%]	Pflanzenreaktion
salzfrei	0-2000	<0,15	vernachlässigbar für die meisten Pflanzen
leicht salin	4000-8000	0,15-0,35	Ernteeinbußen bei den meisten Pflanzen
mittel salin	8000-15 000	0,35-0,65	nur sehr tolerante Pflanzen liefern Erträge
stark salin	>15 000	>0,65	kaum Erträge

Tab. 4: allgemeine Bewertung der EC-Werte nach (Landon, 1991)

Nachdem die untersuchten Gebiete nicht weiter als 20 km von der Küste des indischen Ozeans entfernt liegen und teilweise von Grundwasser gesättigt sind (Untersuchungsgebiet im Limpopotal), soll die EC vor allem als Maß der Bodenversalzung dienen.

Wie in Abb. 32 zu erkennen ist, nimmt die elektrische Leitfähigkeit in den Dünenböden keine Werte höher als 30  $\mu\text{S}/\text{cm}$  an. Der Großteil der 81 gemessenen Werte schwankt zwischen 10 und 15, daher ist der Gehalt der gelösten Salze zu vernachlässigen. Einen etwas höheren Gehalt (36,3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) weist lediglich die auf einem gerade brandgerodeten Feld entnommene Mischprobe 20 auf. Der Glaube der Bauern die schlechter werdenden Ernten auf eine zunehmende Versalzung der Böden zurückzuführen wäre damit wiederlegt. Vielmehr spiegelt sich hier die mangelnde agrartechnische Ausbildung wieder. Versalzung ist die einzige einheimische Erklärung für die Erschöpfung der Böden.

Die EC im Dünengebiet nimmt stetig mit dem Abstand zur Küste zu, d.h. es findet sich eine etwas höhere Konzentration gelöster Minerale im Boden.

Ein anderes Bild zeigt sich bei den Ergebnissen der Limpopotalproben. Der Mittelwert aller 17 Messungen im Schwemmland des Limpopo liegt bei 857  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , einzelne Gebiete erreichen sogar Maximalwerte von über 3 mS/cm. Differenziert man die Proben etwas genauer, weisen die unmittelbar an die Dünen angrenzenden Talfelder keine Werte größer als 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  auf und liegen damit außerhalb der für Pflanzen schädlichen Bereiche. Die Messungen des weiter im Tal gelegenen Untersuchungsgebietes offenbaren einen Mittelwert von etwa 1200  $\mu\text{S}$ . Da gemäß Scheffer et al. (2002) der „non-effect-level“ von Bohnenpflanzen bereits bei 1000  $\mu\text{S}$ , bei Mais bei 1800  $\mu\text{S}$  und Reis bei 3000  $\mu\text{S}$  liegt, sind in diesem Gebiet Einschränkungen für die Landwirtschaft zu erwarten. Tab. 4 zeigt eine erste allgemeine Bewertung der EC-Werte. Da die Interpretation jedoch stark pflanzenabhängig ist, soll dies vertieft Thema in Kapitel 4.1.4.3.1 (Seite 73) sein.

Untersucht wurden insgesamt 51 Mischproben (davon 13 in unterschiedlichen Tiefen beprobt, also 38 Standorte) und 17 Leitprofile (meist 1 m tief, 3 Proben, insgesamt 44 Proben).

### 3.6.2.2 pH-Wert

Der pH-Wert ist als negativer dekadischer Logarithmus der  $\text{H}^+$ -Ionen-Konzentration ein Maß für die Versauerung eines Bodens. Durch seine Bestimmung lassen sich Aussagen über Ver-

füßbarkeit von Pflanzennährstoffen und die Mobilität von Schwermetallen treffen. Ebenso sind die Prozesse der Bodenbildung sehr stark pH-Wert abhängig. Er wirkt auf biologische, chemische und physikalische Prozesse wie etwa die Verwitterung von Mineralen und die Verlagerung von Ton und Fe- und Al-Verbindungen. Weiter beeinflusst er das Bodengefüge und den Wasser- und Lufthaushalt des Bodens (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

Gemessen wurde der pH-Wert mit H<sub>2</sub>O und einer 0,01 M CaCl<sub>2</sub>-Lösung. Während der H<sub>2</sub>O-Wert den momentanen pH-Wert angibt, bringt die CaCl<sub>2</sub>-Lösung alle austauschbaren Ionen in die Lösung und simuliert so die natürliche Bodenlösung. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird stets der in CaCl<sub>2</sub>-Lösung gemessene Wert verwendet.

Zur Messung wurden 5 g Feinboden mit 12,5 ml H<sub>2</sub>O bzw. 0,01 M CaCl<sub>2</sub>-Lösung versetzt (Mischungsverhältnis 1:2,5). Nach etwa einer Stunde wurde der pH-Wert im Bodenüberstand mit einer Glaselektrode gemessen (Schlichting & Blume, 1995).

Gemäß der KA5 (2005) sind die Werte (pH-CaCl<sub>2</sub>) der Talböden als sehr schwach sauer und die Dünenböden als stark sauer bis mäßig sauer einzustufen (siehe Tab. 5).

pH-Wert (CaCl <sub>2</sub> )	Bezeichnung
>10,7	Extrem alkalisch
10,0 – 10,7	Sehr stark alkalisch
9,3 – 10,0	Stark alkalisch
8,6 – 9,3	Mäßig alkalisch
7,9 – 8,6	Schwach alkalisch
7,2 – 7,9	Sehr schwach alkalisch
6,8 – 7,2	Neutral
6,1 – 6,8	Sehr schwach sauer
5,4 – 6,1	Schwach sauer
4,7 – 5,4	Mäßig sauer
4,0 – 4,7	Stark sauer
3,3 – 4,0	Sehr stark sauer
<3,3	Extrem sauer

Tab. 5: Einstufung der Bodenreaktion nach (Bodenkunde AG, 2005)

Mit Hilfe der pH- H<sub>2</sub>O –Werte kann auf die aktuellen Pufferbereiche für die H<sup>+</sup>-Protonen geschlossen werden. Sie zeigen an, welche Austauscher mit den H<sup>+</sup>-Ionen reagieren und sie neutralisieren. Ist ein Puffer aufgebraucht, greift der nächste Bereich. Mit sinkendem pH-Wert und damit steigender H<sup>+</sup>-Konzentration, sinkt die Verfügbarkeit der Nährstoffe, da die Protonen sie von den Austauscherplätzen verdrängen.

Auch werden die für Nährstoffe wichtigsten Sorbenten (Tonminerale und Huminstoffe) bei sehr niedrigen pH-Werten grundlegend zerstört und toxisches Al<sup>3+</sup> wird freigesetzt (Schröder, 1992).

Mit Hilfe des Pufferbereichs kann nun das Risiko durch eine Säurebelastung für die Pflanzen abgeschätzt werden (Makki, 1999).

pH-Wert	Pufferbereiche
6,2 – 8,3	Calciumkarbonat
5,0 – 6,2	Silikat
4,2 – 5,0	Austauscher (Tonminerale, Huminstoffe)
3,8 – 4,2	Aluminium
3,2 – 3,8	Aluminium / Eisen
2,8 – 3,2	Eisen

Tab. 6: Pufferbereiche im Boden nach (Makki, 1999)

Da die untersuchten Böden überwiegend im Bereich der Austauscher und des Silikatpuffers liegen, ist die Säurebelastung noch als gering einzustufen. Nur säureintolerante Arten können beeinträchtigt werden (Makki, 1999).

Als kritische Grenze kann ein pH-Wert von 5,5 (H<sub>2</sub>O) genannt werden. Ein Wert darunter führt sowohl zu einer verminderten Verfügbarkeit der Nährstoffe als auch zu einer verstärkten Freisetzung toxischer Ionen (Landon, 1991). Während die Talproben außerhalb dieses Bereichs liegen, ist bei den Dünenproben teils eine knappe Unterschreitung dieser Grenze zu beobachten.

Untersucht wurden insgesamt 51 Mischproben (davon 13 in unterschiedlichen Tiefen beprobt, also 38 Standorte) und 17 Leitprofile (meist 1 m tief, 3 Proben, insgesamt 44 Proben).

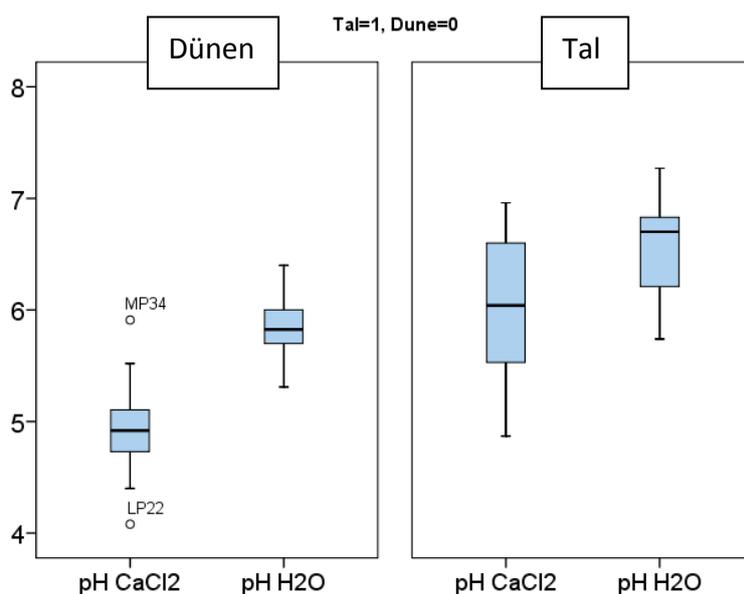


Abb. 33: Boxplot der pH-Werte der Dünen- (links) und Talproben (rechts) : Minimum, Maximum, Quartile, Median und Ausreiser von 88 Messungen werden angezeigt

### 3.6.2.3 Eisen(hydr)oxide

Durch Verwitterung eisenhaltiger Silikate (Amphibol, Pyroxen, Biotit, Olivin) werden Eisen(II)- und Eisen(III)-Ionen im Boden frei. Das meist zweiwertige Eisen der Primärminerale wird durch Sauerstoff in Gegenwart von Wasser oxidiert und aus dem Silikatgestein freigesetzt. Während ein Teil in dreischichtige Tonminerale eingebunden wird, hydrolysiert das dreiwertige Eisen größtenteils sofort zu Fe(III)Oxiden. Diese geben dem Boden eine braune bis rote Färbung (Mückenhausen, 1995) (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

Man unterscheidet kristalline und amorphe (sog. aktive Eisenverbindungen) Formen von Eisenoxiden. Durch den Alterungsprozess im Boden gehen amorphe Formen in kristalline Formen über.

Eisenoxide besitzen eine Bedeutung für den Stoffhaushalt, so können sie bei ihrer Entstehung Spurenelemente einbauen (z.B. Chrom) und binden Anionen (z.B. Phosphat) fest an ihre Oberfläche (Scheffer & Schachtschabel, 2002). Daher sind sie für die Betrachtung der Böden hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit durchaus von Bedeutung. Ein hoher Anteil an Eisenoxiden kann dem Boden Anionen entziehen, welche essentiell für den Pflanzenwuchs sind.

Die beiden häufigsten Formen der Fe(III)-Oxide sind der Goethit ( $\alpha$ -FeOOH) und der Hämatit ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Weniger häufige Formen sind der Lepidokrokit ( $\gamma$ -FeOOH), der Maghemit und der schlecht kristallisierte Ferrihydrit (sehr hohe Oberfläche). Selten zu finden ist der schwer verwitterbare Magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) und sogenannte Grüne Roste (blaugrüne Fe(II,II)-Hydroxide) (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

Die rötliche Färbung der untersuchten Dünenböden (insbesondere der tieferen Horizonte, da hier farbgebendes organisches Material fehlt) macht eine genauere Untersuchung der Eisenoxide unverzichtbar. Zur Bestimmung des gesamten Eisengehalts wurden zunächst 2 mg Feinboden mit 40 ml Na-Citratlösung und 10 ml Natriumhydrogencarbonat (dient zur Einhaltung des optimalen pH-Wertes von 7,3) versetzt. Es wurde 1 g festes Natriumdithionit zugesetzt und 16 Stunden lang geschüttelt. Dabei wird das Fe durch Reduktion dank der Dithionitlösung in Lösung gebracht. Das Na-Citrat bedingt eine inneroxide Bindung von Fe<sup>2+</sup>, so dass keine Hydroxid-Niederschläge entstehen können. Danach wurde das Extrakt zentrifugiert, gefiltert, und der Rückstand erneut mit 2x20 ml MgSO<sub>4</sub> zentrifugiert (auf diese Weise wird das an Tonminerale adsorptiv gebundene Fe<sup>2+</sup> durch Mg<sup>2+</sup> rückgetauscht). Eine Verdünnung von 1:10 wurde an dem AAS gemessen (Schlichting & Blume, 1995).

Diese Methode erfasst sowohl amorphe als auch kristalline (Hydr)Oxide. Zur selektiven Extraktion der „aktiven“ amorphen (Hydr)Oxide wurde 1 g Feinboden mit 50 ml NH<sub>4</sub>-Oxalatlösung (pH: 3,25) versetzt, die bei Dunkelheit (1 h schütteln) durch Komplexbildung nur die amorphen Fe-Verbindungen extrahiert. Wiederum wurde eine Verdünnung von 1:10 an dem AAS gemessen (Schlichting & Blume, 1995).

Neben Fe kann auf dieselbe Methode mit den entsprechenden Eichflüssigkeiten Mn und Al gemessen werden.

Untersucht wurden 18 Mischproben und 13 Leitprofile (Tiefe meist 1 m, 3 Proben) aus Dünen und Talgebiet.

Abb. 34 zeigt die gefundenen Ergebnisse. Die Dünenböden sind demnach reich an dithionit- und arm an oxalatlöslichen Eisenoxiden. Das Verhältnis ist beinahe Null, nimmt aber mit dem Abstand zur Küste zu. Dies bedeutet, dass die Eisenoxide gut kristallisiert sind und kaum in amorpher Form vorliegen. Bei den Talböden überwiegt in den meisten Fällen das amorphe Eisen, erst in größerer Tiefe nimmt das Verhältnis ab. Dies spricht neben der Bodenfarbe für die Anwesenheit von Magnetit, was durch einen Test mit einem Magneten bestätigt wurde. Die Ursachen für diese hohe Anreicherung an Magnetit sind vermutlich fluvial zu begründen. Der Limpopo fließt auf seinem Weg zum indischen Ozean durch die Limpopo-Metamorphit-Provinz und nimmt dort vulkanische Sedimentfrachten auf, welche weit entfernt abgelagert werden (Jaeckel et al., 1997). Magnetit kann in grundwasserbeeinflussten Böden ebenso bakteriell gebildet werden (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

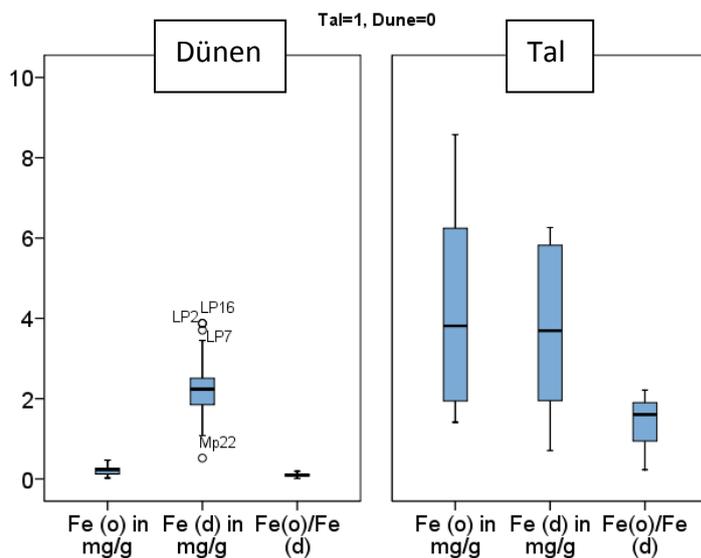


Abb. 34: Boxplot des oxalat- und dithionitlöslichen Eisens und deren Verhältnis in Dünen (links) und Tal (rechts). N=51

### 3.6.3 Analyse des Nährstoffhaushaltes

Der Nährstoffhaushalt des Bodens ist einer der wichtigsten Faktoren für den Pflanzenwachstum, sollte aber gegenüber den physischen Faktoren, welche ebenso entscheidend sein können, nicht überbewertet werden (Young, 1976). Tab. 7 gibt einen tabellarischen Überblick der für das Pflanzenwachstum wichtigsten Nährstoffe. Pflanzen benötigen eine Vielzahl von Elementen oder deren Ionen, die primär durch die Wurzeln aus dem Boden aufgenommen werden.

	Element	Chem. Symbol	Bevorzugte Aufnahmeform
Elemente aus Wasser und Luft	Kohlenstoff	C	CO <sub>2</sub>
	Wasserstoff	H	H <sub>2</sub> O, H <sup>+</sup>
	Sauerstoff	O	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O...

Primärnährstoffe	Stickstoff	N	$\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_3^-$
	Phosphor	P	$\text{H}_2\text{PO}_4$
	Kalium	K	$\text{K}^+$
Sekundärnährstoffe	Calcium	Ca	$\text{Ca}^{2+}$
	Magnesium	Mg	$\text{Mg}^{2+}$
	Schwefel	S	$\text{SO}_4^{2-}$
Spurenelemente	Eisen	Fe	$\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Fe}^{3+}$
	Bor	B	
	Zink	Zn	$\text{Zn}^{2+}$
	Kupfer	Cu	$\text{Cu}^{2+}$
	Mangan	Mn	$\text{Mn}^{2+}$
	Chlor	Cl	$\text{Cl}^-$
	Molybdän	Mo	$\text{Mo}_4^{2-}$

Tab. 7: Nährstoffe des Pflanzenwachstums nach (Young, 1976). Untersuchte Elemente sind farblich hervorgehoben

Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff werden normalerweise nicht als Nährelemente bezeichnet, ihre Verfügbarkeit hängt in erster Linie von der Wasser- und Luftversorgung des Bodens ab. Die Primärnährstoffe sind für Pflanzenwachstum essentiell und werden in großen Mengen gebraucht. Sekundärnährstoffe sind wichtig, werden aber in geringeren Mengen benötigt. An Spurenelementen (auch Mikronährstoffe genannt) bedarf es nur sehr geringe Mengen. Liegen diese vielfach vor, ist von einer toxischen Wirkung auf die Pflanzen auszugehen. K, Ca, Mg, N (als  $\text{NH}_4^+$ ) und einige der Spurenelemente werden als Kationen von den Pflanzenwurzeln aufgenommen. P, S, N ( $\text{NO}_3^-$ ) und andere Spurenelemente als Anionen (Young, 1976).

Nährstoffe liegen in verschiedenen chemischen Formen im Boden vor, interessant ist vor allem die Fraktion der verfügbaren Nährstoffe, da diese im Gegensatz zur immobilen Fraktion von den Pflanzen aufgenommen werden kann. Eine dritte Fraktion ist die der nachlieferbaren Nährstoffe. Diese liegen organisch in Humus oder anorganisch in verwitterbaren Gesteinen vor und können durch Humifizierung mineralisiert (d.h. aus ihrer organischen Bindung befreit) bzw. Verwitterung pflanzenverfügbar werden (Schröder, 1992).

Das Wachstum der Pflanzen ist oft durch den Nährstoff limitiert, der in der niedrigsten Konzentration vorliegt. Auf diese Themen wird in den einzelnen Kapiteln nährstoff- und bodenspezifisch noch genauer eingegangen.

Die untersuchten Nährstoffe werden anhand ihrer Konzentration jeweils in gering, mittel und hoch eingestuft (nach Landon, 1991). Dabei ermöglicht das Bewertungsschema eine Interpretation der Daten anhand des Nährstoffbedarfs der Fruchtpflanzen und offenbart mögliche Mängel bzw. Gründe für minderwertiges Wachstum. Es ist zu beachten, dass im Falle einer Düngung bei einer hohen Konzentration meist keine Ertragssteigerung zu erwarten ist, bei einer mittleren ist ein Zuwachs sehr wahrscheinlich, bei der niedrigsten Stufe ist dies sicher zu erwarten (Landon, 1991). Da unterschiedliche Messmethoden verschiedene

Ergebnisse liefern können, wurde darauf geachtet, Bewertungsschemen zu finden, welche der angewandten Technik entsprechen und auf tropische Böden und Nutzpflanzen zugeschnitten sind.

### 3.6.3.1 Stickstoff

Stickstoff gehört zu den Hauptnährelementen der Pflanzen und Bodenorganismen. Er ist in Form von Nitraten ( $\text{NO}_3^-$ ) und Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) pflanzenverfügbar und oft der limitierende Faktor der Photosynthese betreibenden Primärproduzenten eines Ökosystems (Wan, Hui, & Luo, 2001). Ein Großteil des Vorkommens (99 %) befindet sich als  $\text{N}_2$  in der Atmosphäre und kann nur durch mit Leguminosen (z.B. Erdnuss) in Symbiose lebende Bakterien (*Rhizobia*) und frei im Boden lebende Bakterien (*Azotobacter*) in Form von  $\text{NH}_3^+$  und  $\text{NH}_4^+$  fixiert werden. In der so genannten Nitrifikation wandeln nun autotrophe Bakterien (*Nitrosomonas* und *Nitrobacter*) unter aeroben Bedingungen Ammonium über Nitrit in Nitrat um. Optimale Bedingungen sind Temperaturen von 25-35° C und pH Werte von 5,5 bis 8. Nitrat wird von Pflanzen bevorzugt aufgenommen und ist für Wachstum unabdingbar. Im Vergleich zu Ammonium kann es allerdings nicht an Bodenpartikeln sorbiert und somit leicht ausgewaschen werden. Pflanzen bauen nun den aufgenommenen Stickstoff in organische Verbindungen ein, welche von Mensch und Tier durch Verzehr in der Nahrungskette weitergereicht werden. Durch Kadaver, Harnstoffe, Exkreme und abgestorbene Pflanzen werden die organischen Verbindungen wieder in für die Produzenten nutzbares anorganisches Ammonium überführt (Ammonifikation). Dies übernehmen Destruenten (Bakterien, Pilze) oder auf eine zeitlich effektivere Art, ein Vegetationsbrand. Auf diese Weise liefert die organische Substanz des Bodens eine ständige Quelle an Nährstoffen (Scheffer & Schachtschabel, 2002) (Schröder, 1992).

Tropische Böden weisen oft einen erheblichen Mangel an Stickstoff auf. Daher ist Stickstoffmangel in humiden Klimaten oftmals alleine für schlechte Ernten verantwortlich. Der Grund für den Mangel ist das Fehlen organischen Materials, das wie bereits erwähnt als Hauptquelle für die Mineralisation von Stickstoff gilt. Die atmosphärische Fixierung ist vergleichsweise gering, da *Azotobacter* Bakterien keine pH-Werte unter 6,0 tolerieren und daher in tropischen Böden kaum vorkommen. *Rhizobia* dagegen sind auch in den Tropen anzutreffen (besonders an den Wurzeln von Gräsern, Erdnüssen, Bohnen u.a.), auch Termitenhügel sind in der Lage Stickstoff zu fixieren (Young, 1976). Eine weitere Besonderheit in tropischen Trockenzeit-Klimaten ist ein starker N-Anstieg zu Beginn der Regenzeit. Wird der ausgetrocknete Boden durchnässt, steigt die Mineralisierung des organischen Materials und damit die Nitrifikation schlagartig an und sinkt ebenso schnell nach ein paar Tagen. Je länger die Trockenzeit andauert, umso stärker fällt dieser „Stickstoff-flush“ aus (Finck A. , 1963). Durch gezielte Anbaumethoden können die Bauern sich dieses Phänomen zunutze machen.

Die Bestimmung erfolgte zusammen mit Kohlenstoff an einem TruSpec® CN-Analyser von „LECO“. Es wurden etwa 200 mg Bodenprobe (< 2 mm) in einem Sauerstoffstrom oxidativ bei 980° C verbrannt. Die entstandenen Stickoxide werden an einem Katalysator zu moleku-

larem  $N_2$  reduziert. Dieses kann an einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD) gemessen werden. Das ebenfalls entstandene  $CO_2$  wird in einer speziellen Säule zunächst sorbiert und nach der  $N_2$ -Messung ebenfalls im WLD gemessen (Werres, 2000). Die Ausgabe erfolgt jeweils in % und kann mit Hilfe der Einwaage in mg/g umgerechnet werden; zur besseren Vergleichbarkeit mit Standardwerten wird in dieser Arbeit jedoch meist die Prozentangabe verwendet.

Untersucht wurden insgesamt 38 Mischproben (davon 13 in unterschiedlichen Tiefen beprobt, insgesamt also 51 Mischproben) und 17 Leitprofile (meist 1 m tief, 3 Proben, insgesamt 44 Proben).

Wie Abb. 35 zeigt, sind die Stickstoffwerte in den Dünenböden sehr gering. Niedrige pH-Werte und kaum organisches Material führen zu diesen erwarteten suboptimalen Verhältnissen. Etwas höhere Werte zeigen die Mischproben der niedriger und flacher gelegenen Fläche in Dorfnähe. Die stärker der Wind- und Wassererosion ausgesetzten Böden der hohen und steilen Dünen Richtung Ozean weisen extrem niedrige Werte auf.

Die gewonnenen Mittelwerte von 0,040 % Gesamtstickstoff in den oberen 40 cm, 0,037 % in dem Bereich 40 – 60 cm und 0,022 % in Tiefen von 60 – 90 cm sind für tropische Sandböden üblich (Finck A. , 1963) (Mohr, Van Baren, & Schuylenborgh, 1972) (Young, 1976).

Die Stickstoffwerte der Talböden dagegen liegen, dank des hohen Gehaltes an organischer Substanz meist über 0,2 %, und sind laut Tab. 8 als hoch einzustufen.

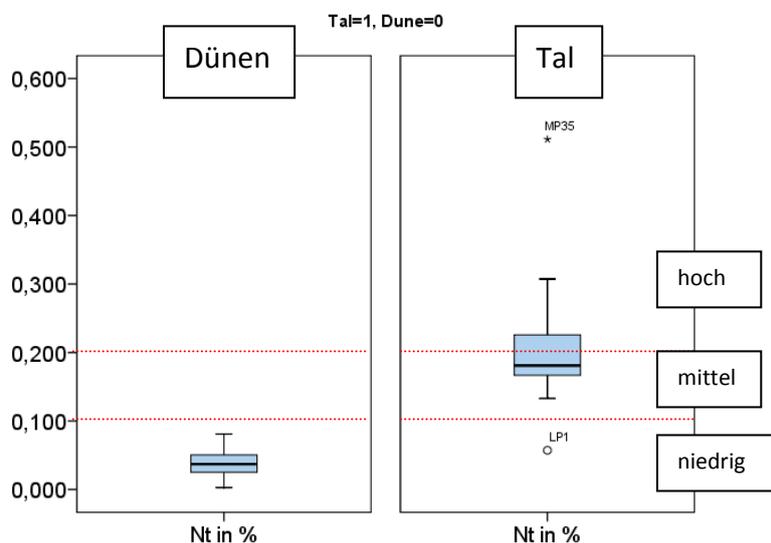


Abb. 35: Boxplot des Gesamtstickstoffgehaltes in % der Dünenproben (links) und der Talproben (rechts). Minimum, Maximum, Quantile und Median der 91 Messwerte werden angezeigt. Die Talproben zeigen zwei Ausreißer

Nährstoff	niedrig	mittel	hoch
Stickstoff [%]	<0,1	0,1-0,2	>0,2

Tab. 8: Bewertung der Stickstoffkonzentration in Gew.-% tropischer Böden nach (Young, 1976), (Landon, 1991)

### 3.6.3.2 Organische Substanz

Die gesamte lebende Natur basiert auf organischen Kohlenstoff-Verbindungen, hauptsächlich in Verbindung mit Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff. Zwischen der Erde, den Ozeanen und der Erdatmosphäre findet ein kontinuierlicher Fluss von Kohlenstoff statt. Diesen Prozess nennt man Kohlenstoffkreislauf (Scheffer & Schachtschabel, 2002). Die aus Kohlenstoffverbindungen aufgebaute organische Substanz ist kein direkter Nährstoff, jedoch dient sie sowohl als Nährstoffquelle, als auch zur Adsorption.

Der Humusgehalt eines Bodens ist von zwei Prozessen abhängig: zum einen von dem Humusaufbau: der Produktion der organischen Substanz und deren Humifizierung.

Es folgt der Humusabbau, der auch als Mineralisation bezeichnet wird. Destruenten lösen die organischen Bindungen und setzen die Nährstoffe frei (Finck A. , 1963).

Die Tropen bieten generell gute Bedingungen zur Mineralisierung pflanzlicher Substanz, daher sind Humusanreicherungen sehr selten und bilden die Ausnahme. Die Talregion des Limpopo ist eine solche Ausnahme. Der Überschuss an Wasser und Mangel an Sauerstoff hemmen die Zersetzung, während Schilfe und Gräser ständig Material nachliefern. Mit Ausnahme dieser Sonderfälle, ist die Mineralisierung meist gleich, teilweise sogar höher als der Humusaufbau. Hohe Luftfeuchtigkeiten und Temperaturen bieten den Bakterien und Pilzen ein sehr gutes Arbeitsmilieu. Entsprechend der hohen Temperatur überwiegt meist die bakterielle Mineralisation (Finck A. , 1963).

Auch die Bedingungen des Humusaufbaus unterscheiden sich von denen der gemäßigten Breiten. Die potentiell das ganze Jahr umfassende Produktionsdauer umfasst in Europa eine Zeitspanne von 4 Monaten. Dem steht eine theoretische Vegetationsperiode von 12 Monaten in den humiden Tropen gegenüber (Finck A. , 1963). Der begrenzende Faktor liegt somit nicht in der Lichtintensität, sondern meist in der Verfügbarkeit von Wasser.

Organisches Material dient nicht nur als Nährstofflieferant, sondern hat ebenfalls Einfluss auf die Aggregatstabilität, die Filtereigenschaften und die Wasserhaltekapazität des Bodens. Zudem sind Huminstoffe in der Lage, große Mengen an Kationen und Anionen zu adsorbieren (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

Ebenso dient Humus als wichtige Stickstoffquelle des Bodens. Durch mikrobiellen Abbau wird Stickstoff aus seiner organischen Bindung freigesetzt (mineralisiert) und damit pflanzenverfügbar. Die Humusqualität ist um so höher zu bewerten, je stickstoffreicher die organische Substanz, d.h. je enger ihr Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis (C/N) ist (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

Der Humusgehalt tropischer Böden ist als Nährstoffspeicher und Lieferant für die Landwirtschaft umso wichtiger, da kaum verwitterbares Gestein vorliegt und die Tonminerale meist nur zwei-schichtig sind und damit keinen ausreichenden Speicher für Kationen darstellen. Bleibt der Gehalt organischer Substanz unter natürlichen Bedingungen meist stabil, kann er unter anthropogener Nutzung innerhalb weniger Jahre stark abfallen. Der Grund ist die Störung des natürlichen Kreislaufes durch Entnahme der Pflanzen und dem damit gekoppelten Entzug des Humuslieferanten (Young, 1976).

Bestimmt man den Kohlenstoffgehalt des Bodens, kann der Anteil des organischen Materials im Boden abgeschätzt werden. Da die untersuchten Böden carbonatfrei sind, kann der gemessene Kohlenstoffgehalt mit dem des organischen Kohlenstoffs gleichgesetzt werden und dient zur Abschätzung der organischen Substanz. Die Bestimmung erfolgte zusammen mit Stickstoff gemäß Kapitel 3.6.3.1.

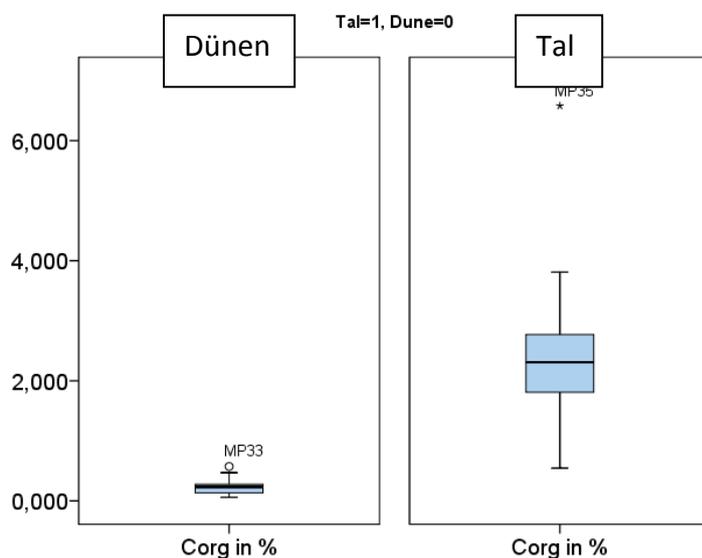


Abb. 36: Boxplot des Gesamtgehaltes an organischem Kohlenstoff in % der Dünenproben (links) und der Talproben (rechts). Minimum, Maximum, Quantile und Median der 91 Messwerte werden angezeigt

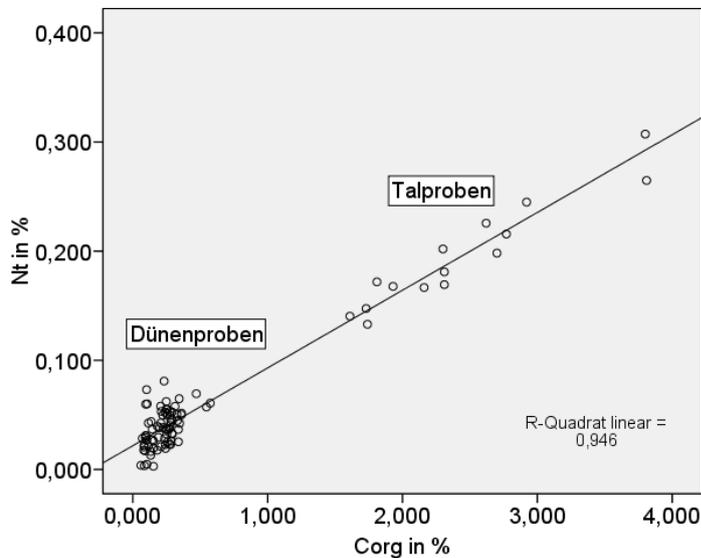


Abb. 37: Regressionsanalyse zwischen Gesamt-N und Gesamt C in % der 91 Proben

Abb. 37 zeigt das direkte Verhältnis von organischem Kohlenstoff als Maßstab der organischen Substanz und dem Gesamtstickstoff und belegt diese als Hauptstickstoffquelle der Böden. Die Talböden weisen eine erheblich höhere Menge organischen Kohlenstoffs auf und ermöglichen so auch eine weitaus stärkere Nitrifikation.

Das C/N Verhältnis ist gemäß der KA5 (Bodenkunde AG, 2005) bis auf wenige Ausnahmen als hoch bis sehr hoch einzustufen, der Humifizierungsgrad ist daher sehr gut (siehe Abb. 38). Das C/N-Verhältnis liegt bei 99% der Proben unter 20, daher kann von einer deutlichen Freisetzung von organisch gebundenem Stickstoff ausgegangen werden. Damit ist der Bedarf der Mikroorganismen gedeckt. Dieser Wert ist bei den Dünenproben allerdings aufgrund des sehr geringen Gehalts an Stickstoff und Kohlenstoff mit Vorsicht zu sehen und bedeutet keineswegs dass ausreichend organisches Material und damit Stickstoff vorhanden ist, sondern vielmehr, dass das Verhältnis auf einem extrem niedrigen Niveau ausgewogen ist und Nitrifikation ungehindert stattfinden kann. Ebenso besteht bei sehr geringen Werten die Möglichkeit, dass vom Boden fixiertes, und dem Kreislauf entzogenes Ammonium ein sehr enges C/N Verhältnis vortäuscht (Finck A. , 1963).

Die Talproben offenbaren ein etwas weiteres Verhältnis (~15) als die Dünen sands (~10). Die Ursache ist in den grundwasserbeeinflussten Böden zu suchen. Sauerstoffarme Verhältnisse hemmen die Mineralisation und sorgen für die Akkumulation organischer Substanz.

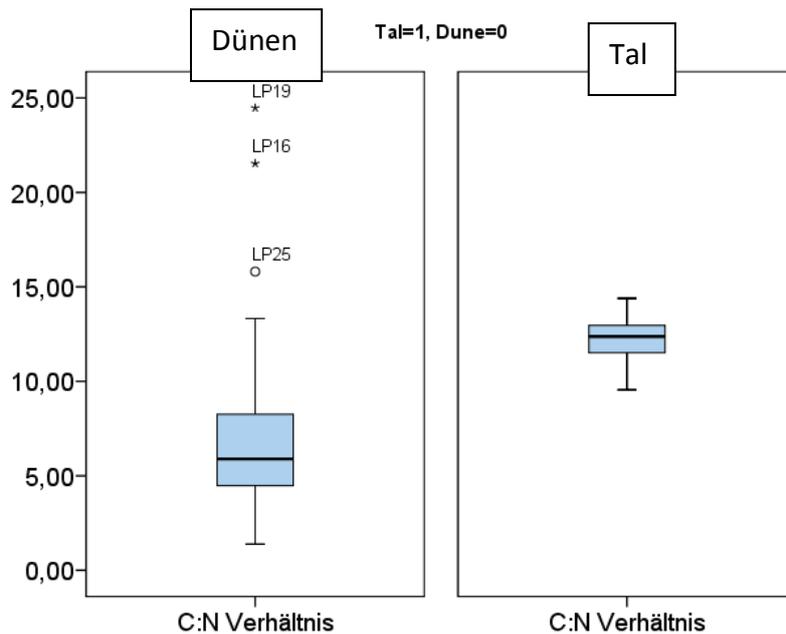


Abb. 38: Boxplot des C:N-Verhältnisses der Dünenproben (links) und der Talproben (rechts). Minimum, Maximum, Quantile und Median der 91 Messwerte werden angezeigt. Die Dünenproben zeigen Ausreiser

Der Humusgehalt wird aus dem Gehalt des organischen Kohlenstoffs und dem Umrechnungsfaktor 1,72 errechnet. Durch Multiplikation erhält man einen Schätzwert zur Beurteilung des Humusgehaltes (Makki, 1999).

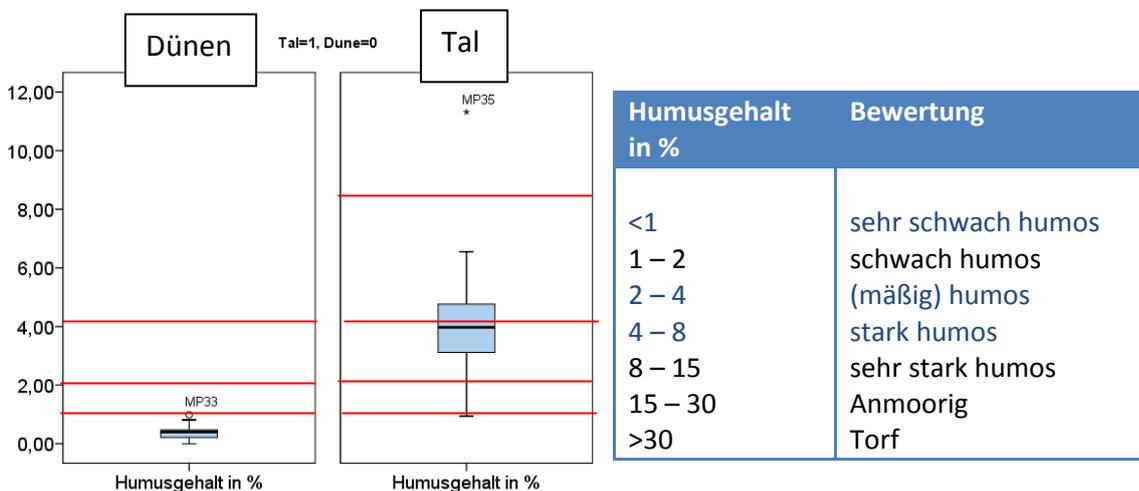


Abb. 39: Boxplot des Humusgehaltes in % von 91 Messwerten. Links Dünen-, rechts Talproben

Tab. 9: Bewertung des Humusgehaltes in % bei landwirtschaftlich genutzten Böden nach (Makki, 1999)

Erwartungsgemäß zeigt sich zwischen Tal- und Dünenböden ein sehr großer Unterschied. Während die Dünenböden stets weniger als 1 % Humus enthalten und somit ausnahmslos als sehr schwach humos eingestuft werden, weisen die Talböden im Oberboden nie Werte

unter 3 % auf. Damit sind diese Böden als humos bis stark humos, in einem Einzelfall (Mp35) sogar als sehr stark humos zu bewerten.

### 3.6.3.3 Phosphor

Ein weiterer primärer Pflanzennährstoff ist Phosphor. Der P-Gehalt variiert besonders durch das Ausgangsgestein, die Textur und den Verwitterungsgrad von Böden. Er steigt von der Sand- zur Tonfraktion an, da freigesetztes P an Oberflächen der Tonminerale (variable Ladung) gebunden oder in Huminstoffe eingebaut wird. Ein weiterer wichtiger Speicher von P sind Eisenoxide. Bodenerosion verringert den Gehalt besonders an steilen Hängen, während der Gehalt in Senken deutlich höher ist (Scheffer & Schachtschabel, 2002). Phosphor liegt meist als Orthophosphat-Anion gebunden vor, der Anteil in der Bodenlösung macht nur etwa 0,1 % des gesamten P aus (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

In dieser Arbeit wurde der Anteil der wasserlöslichen P-Konzentration bestimmt. Damit wird der pflanzenverfügbare P-Anteil erfasst, welcher die natürlichen Bedingungen der Wurzeln widerspiegelt und damit den Pflanzenwuchs limitiert (Page, Miller, & Keeney, 1982).

Gemäß Page, Miller, & Keeney (1982) wurden 5 mg lutro Feinboden mit 50 ml dest. Wasser versetzt, 5 min geschüttelt, zentrifugiert und filtriert. 4 ml einer Mischung aus Ammonium-Paramolybdat, Kalium-Antimon-Tatrat, Schwefelsäure und Ascorbinsäure wurden 20 ml der Lösung beigelegt und auf 25 ml verdünnt. Mit der entsprechenden Eichkurve wurde nun die Farbintensität an einem Photometer bei 882 nm gemessen. Gemessen wurden 8 Proben des Limopotals und 12 Proben der Dünen.

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Messmethoden ist eine einheitliche Interpretation der Werte problematisch. Tab. 10 zeigt eine mögliche Bewertung des wasserlöslichen Phosphats nach Landon (1991).

Stellt das Bodenmilieu eine hohe Anzahl an P-sorbierenden Eisenoxiden, ist eine relativ geringe P-Konzentration zu erwarten. Entsprechend niedrige Werte offenbaren die Proben der Talregion, trotz des vermutlich wesentlich höheren Gehaltes an Gesamt-P. Ein Großteil des P ist an die Eisenoxide gebunden und somit nicht pflanzenverfügbar. Die Werte liegen in der Talregion zwischen 0,6 und 1,7 mg/kg; in den Dünen zwischen 0,3 und 3,6 mg/kg. Der Extremwert von 3,6 stellt eine ungeklärte Ausnahme dar. Der Durchschnitt liegt im Tal bei 1,0; in den Dünen bei 0,53 mg/kg (ohne den Ausreiser). Ist der Wert der Talböden gerade noch akzeptabel, leiden die Dünenböden größtenteils unter einem Phosphatmangel.

Nährstoff	niedrig	mittel	hoch
Verfügbares P [mg/kg]	<1	1-2	>2

Tab. 10: Beurteilung des wasserlöslichen, pflanzenverfügbaren P-Gehaltes in tropischen Böden nach (Landon, 1991)

### 3.6.3.4 Effektive Kationenaustauschkapazität und Basensättigung

In dieser Arbeit wird die effektive Kationenaustauschkapazität bestimmt. Sämtliche Angaben zu Nährstoffkationen beziehen sich daher auf die austauschbaren Kationen bei aktuellem Boden-pH. Besonders bei den sauren Dünenböden liegt die potentielle Kationenaustauschkapazität (enthält alle austauschbaren Kationen) über den hier gemessenen Werten; wobei die zusätzlichen Nährstoffe bei aktuellem pH-Wert nicht pflanzenverfügbar sind. Da die Talböden nahezu im neutralen pH-Bereich liegen, sollten die beiden Werte der effektiven und potentiellen Austauschkapazität sich in etwa entsprechen. Die Analyse richtet sich nach dem Verfahren von Trüby und Aldinger (Schlichting & Blume, 1995). Ein Vergleich mit der  $KAK_{pot}$  wäre sicher interessant, würde aber den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Um eine Verfälschung durch gelöste Salze zu verhindern, wurden sämtliche Proben die eine EC größer 0,05 mS/cm aufweisen durch vorgeschaltete Perkolation mit 100 ml dest. Wasser gespült.

5 g Feinerde wurden mit 50 ml  $NH_4Cl$ -Lösung versetzt. Das Ammoniumchlorid verdrängt nun die Kationen von den Sorbenten. Nach Messung des pH-Wertes wurde die Lösung zentrifugiert und dekantiert/filtrierte. Daraus wurde eine 1:10 Lösung hergestellt, der Lanthan (verhindert die Bildung von Eigenverbindungen in der Flamme bei der Ca- und Mg-Bestimmung) und Cäsium (kompensiert Ionisierungs- und Verdampfungsinterferenzen bei K und Na) beigefügt wurden. Unter Verwendung der entsprechenden Eichlösungen wurden nun Na, K, und Ca am Flammenphotometer und Mg, Mn und Al am AAS gemessen. Unter Verwendung des Perkolationsvolumens, dem Verdünnungsfaktor, der molaren Masse des jeweiligen Ions und der Einwaage wurde die ermittelte Konzentration (in mg/l) in  $cmol_c/kg$  Boden umgerechnet.

$$cmol\ M/kg = (M * P * V * 100) / (E * W * 1000)$$

Formel 2: M=Konzentration des Kations in ppm, P=Perkolationsvolumen, V=Verdünnungsfaktor, E=Atommasse/Wertigkeit, W=Einwaage nach (Makki, 1999)

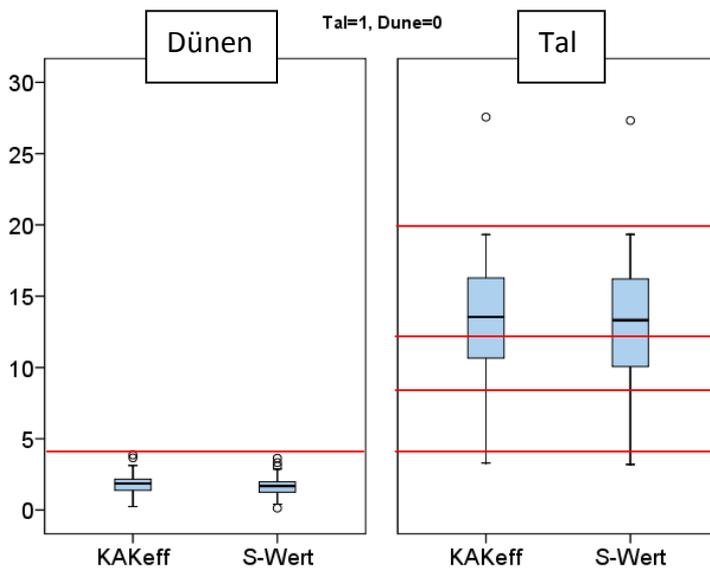
Zur Ermittlung der austauschbaren Protonen wurden die pH-Werte des Perkolates und der Ammoniumchlorid-Lösung gemessen. Daraus werden die  $H^+$ -Konzentrationen abgeleitet und voneinander subtrahiert. Die Differenz zwischen dem nun ermittelten  $H_{eff}$ -Wert und dem gemessenen Al ergibt die sorbierten H-Ionen. Zur Berechnung werden der Aktivitätskoeffizient und die Ionenstärke miteinbezogen (Schlichting & Blume, 1995).

Die Summe aller austauschbaren Kationen ergibt nun die  $KAK_{eff}$ , auch T-Wert genannt. Die Summe aller austauschbaren basischen Nährstoffe (Na, K, Mg, Ca) ergibt den S-Wert. Die Basensättigung errechnet sich nach folgender Formel:

$$BS\ \% = \frac{S}{T} * 100$$

Formel 3: Berechnung der Basensättigung nach (Schlichting & Blume, 1995)

Sie gibt den Prozentanteil der Kationen an, welche nicht zur Bodenversauerung beitragen. Alle sauer wirkenden Kationen ( $H^+$ ,  $Al^{3+}$ ) zusammengefasst ergeben den H-Wert (H-Wert + S-Wert = T-Wert). Der Verlust an basischen Kationen ist an die Produktion der  $H^+$ -Ionen gekoppelt, da diese gegen adsorbierte Kationen ausgetauscht werden. Verluste erfolgen durch starke Niederschläge und Auswaschung aus dem Ökosystem, sowie durch den Entzug durch Pflanzen. Werden die Pflanzen abgeerntet und die Biomasse dem Feld nicht wieder zugeführt, sind die Kationen dem System entzogen (Schröder, 1992).



KAK eff [cmol/kg]	KAKeff-Stufe	Nährstoff-Speicher- vermögen
<4	sehr gering	gering
4 – 8	gering	gering
8 – 12	mittel	mittel
12 – 20	hoch	hoch
>=20	sehr hoch	hoch

Tab. 11: Bewertung des Nährstoffspeichervermögens aus den Stufen der effektiven Kationenaustauschkapazität nach (Lahmeyer, 2000)

Abb. 40: effektive Kationenaustauschkapazität und S-Wert (Summe der Nährstoffe) von 89 untersuchten Proben (links Dünen, rechts Tal). Es existieren einige Ausreiser

Neutrale pH-Werte und nur geringe Al-Konzentrationen führen in der Talregion zu nahezu deckungsgleichen Werten bei T- und S-Wert. Auch die Dünenböden zeigen nur marginale Unterschiede. Ein sehr geringer Gehalt an Tonmineralen und organischer Substanz führt erwartungsgemäß zu einer sehr geringen KAK in den Dünenböden. Das Nährstoffspeichervermögen ist entsprechend gering. Ein entgegengesetztes Bild liefert das Ergebnis der Talböden. Das Ton- und Humusreiche Schwemmland besitzt eine durchgehend hohe KAK mit einem hohen Nährstoffspeichervermögen.

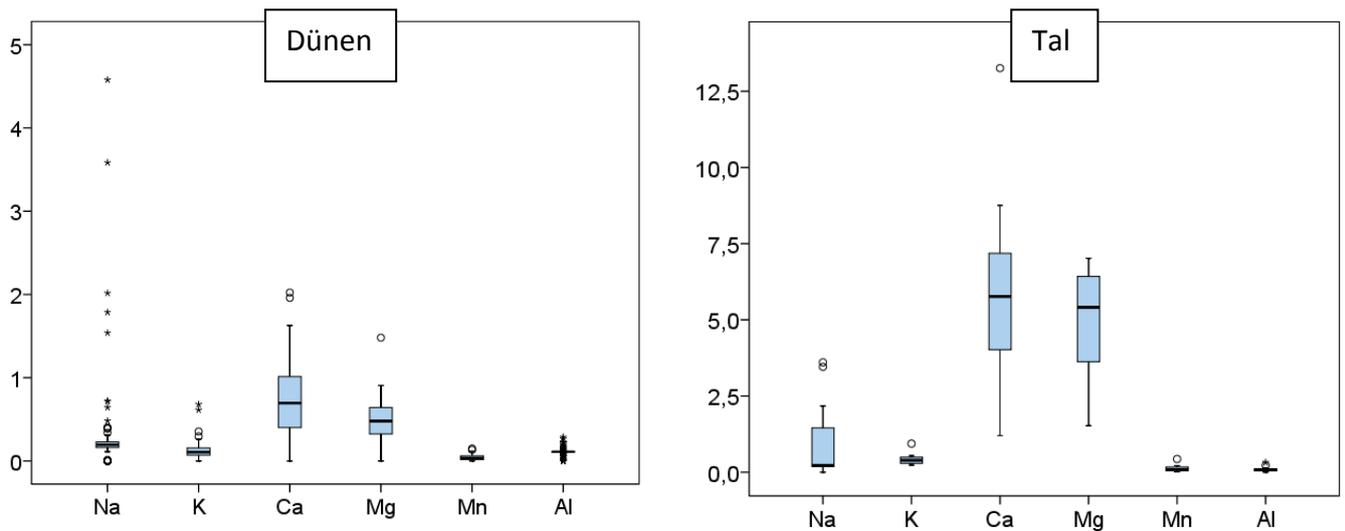


Abb. 41: Boxplot der austauschbaren Elemente von 68 Dünenproben (links) und 18 Talproben (rechts). Alle Angaben in cmol/kg

Bewertet man die austauschbaren Elemente separat, ergibt sich wiederum ein differenziertes Bild zwischen Dünen und Tal. Der Primärnährstoff Kalium bewegt sich in den Dünen zwischen 0,08 und 0,25 mit einem arithmetischen Mittel von 0,16 cmol/kg und damit laut Tab. 12 im geringsten Bereich (mit einigen Ausreißern in die mittlere Zone). Der Durchschnitt der Talproben liegt bei 0,43 cmol/kg, und damit an der Grenze des mittleren zum hohen Bereich. Auch Na, Ca und Mg ist in den Talböden ausreichend vorhanden während die Dünenböden in allen Fällen oftmals die Mindestanforderungen der Pflanzen unterschreiten. Im Durchschnitt herrscht jedoch kein akuter Ca- und Mg-Mangel. Diese Bewertungen sind allerdings mit Vorsicht zu sehen, da die Anforderungen der einzelnen Pflanzen variieren. So ist bei Erdnüssen bereits bei einem Ca-Wert <0,8 cmol/kg eine Beeinträchtigung zu erwarten (Landon, 1991) (siehe Anhang 3).

Nährstoff	gering	mittel	hoch
K	<0,2	0,2-0,4	>0,4
Ca	<0,2	0,2-10	>10
Mg	<0,2	0,2-0,5	>0,5
Na			>1

Tab. 12: Bewertung des austauschbaren Kalium, Calcium, Magnesium, Natrium nach (Landon, 1991), alle Angaben in cmol/kg

Die Sorption der Kationen erfolgt an Tonmineralen und organischer Substanz (Huminstoffe). Daher soll die Korrelation der  $KAK_{eff}$  mit den beiden Sorbentengruppen überprüft werden.

$KAK_{eff}$

	$KAK_{eff}$	Humusgehalt in %	Tonanteil in %
Korrelation nach Pearson	1	,680(**)	,961(**)
Signifikanz (2-seitig)		,000	,000
N	89	89	44

\*\* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

Tab. 13: Pearson-Korrelation zwischen der  $KAK_{eff}$ , dem Humus- und Tongehalt

Tab. 13 zeigt den engen Zusammenhang zwischen den Sorbenten und der  $KAK_{\text{eff}}$  bei den getesteten 89 Bodenproben. Die Korrelation mit dem Tonanteil beträgt nahezu 1, auch die Adsorption an den Huminstoffen ist deutlich erkennbar. Die Sorption an Tonmineralen erfolgt auf zwei verschiedene Methoden. Die Adsorption durch variable Ladung ist pH-abhängig und erfolgt an den Bruch- und Kantenflächen der Schichtsilikate. Dabei entsteht durch Sprengung von Si-O-Si- und Al-O-Al-Bindungen unter Beteiligung von H- und OH-Ionen des Wassers eine positive bzw. negative Ladung (siehe Abb. 42). Hohe pH-Werte (ab 5-6) führen zu einer steigenden OH-Konzentration und eine zunehmende Dissoziation von H-Ionen, die durch andere Kationen austauschbar sind (Schröder, 1992). Bei niedrigen pH-Werten lagern sich H-Ionen zunehmend an Al-OH-Gruppen an und ermöglichen durch die positive Ladung die Anlagerung von Anionen, jedoch nicht von Kationen.

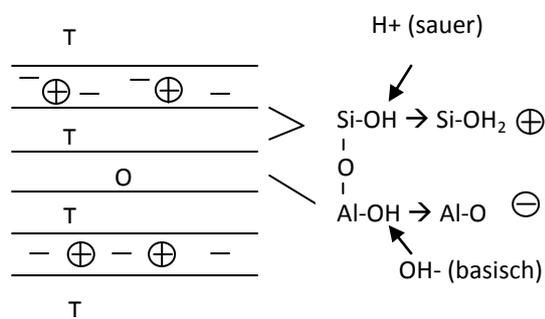


Abb. 42: Adsorption an Tonmineralen durch variable und permanente Ladung. T=Tetraeder, O=Oktaeder nach (Schröder, 1992) und (Scheffer & Schachtschabel, 2002)

Adsorption durch permanente Ladung erfolgt durch isomorphen Ersatz. Dabei werden Teilchen eingelagert, die eine Ladungsänderung bewirken. Dies ermöglicht den positiv geladenen Kationen sich permanent (pH unabhängig) einzulagern. In den Tetraeder-Schichten der Schichtsilikate wird dabei  $Si^{4+}$  gegen  $Al^{3+}$ , in den Oktaeder-Schichten wird  $Al^{2+}$  gegen  $Fe^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  u.a. ausgetauscht, so dass eine negative Ladung entsteht (Schröder, 1992).

Eine wichtige Rolle spielt die Anzahl an Schichten der Tonminerale. 3-Schicht-Tonminerale (Illit, Smectit, Vermiculit) besitzen jeweils zwei Tetraeder-Schichten und eine Oktaeder-Schicht, während Kaolinite nur 2-Schichten besitzen und damit nur eine variable Ladung besitzen (Schröder, 1992).

Die Sorption an Huminstoffen erfolgt ähnlich der variablen Ladung pH-abhängig. Sie steigt mit zunehmendem Wert, da verstärkt H-Ionen an COOH und OH-Gruppen dissoziieren. Es entsteht eine negative Ladung (Schröder, 1992).

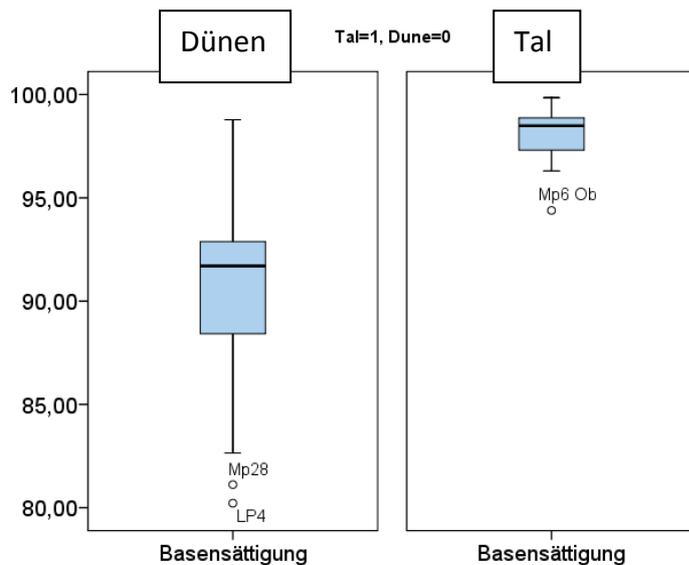


Abb. 43: Basensättigung in % der Dünenproben (68, links) und Talproben (18, rechts)

Eine Basensättigung >70% ist für landwirtschaftlich genutzte Böden als hoch einzustufen (Makki, 1999). Sowohl die Dünen- als auch die Talböden weisen nur geringe Al Gehalte auf. Da die austauschbar gebundenen Protonen ebenfalls in einem vernachlässigbar niedrigen Bereich liegen, beträgt die Basensättigung aller Proben mindestens 80 %, die Böden sind daher als basengesättigt einzustufen (Bodenkunde AG, 2005). Die hohe Basensättigung der Talböden erscheint durch die ständige Speisung durch Grund- und Flusswasser und den neutralen pH-Wert logisch. Die im sauren Bereich angesiedelten Dünenböden lassen hingegen eine Basensättigung <50 % vermuten (Finck A. , 1963). Die Tatsache, dass auch diese Böden basengesättigt sind, ist vermutlich auf die Nähe zum indischen Ozean und den damit verbundenen feuchten Seewinden zurückzuführen. Durch sie ist eine ständige Nachlieferung an basischen Kationen möglich. Eine Anreicherung im Boden wird nur durch den niedrigen Gehalt an Tonen und Humus verhindert.

### 3.6.4 Analyse der Korngrößenzusammensetzung

Die Korngrößenverteilung eines Bodens hat Einfluss auf die Größe der Poren und den Anteil an Tonmineralen, und damit auf dessen Nährstoff-, Wasser-, und Lufthaushalt. Sie bestimmt die Erosionsanfälligkeit, die Festigkeit und Struktur der Aggregate.

Zur Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung wurde eine Nasssiebung mit einer Sedigraphenanalyse kombiniert.

Da weder Dünen- noch Talböden einen Skelettanteil (>2 mm) aufweisen, entfällt die Bestimmung des Grobbodens.

Die salzhaltigen Talböden mussten vor der Siebung mit deionisiertem Wasser gewaschen und Humusbestandteile größer 2 % mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> zerstört werden.

Nach der Dispergierung mit einer Natriumpyrophosphatlösung wurde der Feinboden in Grobsand (2000 – 630  $\mu\text{m}$ ), Mittelsand (630 – 200  $\mu\text{m}$ ) und Feinsand (200 – 63  $\mu\text{m}$ ) nass gesiebt und bei 105 °C getrocknet.

Der SediGraph (III V1.04) misst nun mittels Röntgenstrahlung den verbliebenen Schluff- (2 – 63  $\mu\text{m}$ ) und Tonanteil (<2  $\mu\text{m}$ ) jeweils in grob, mittel und fein.

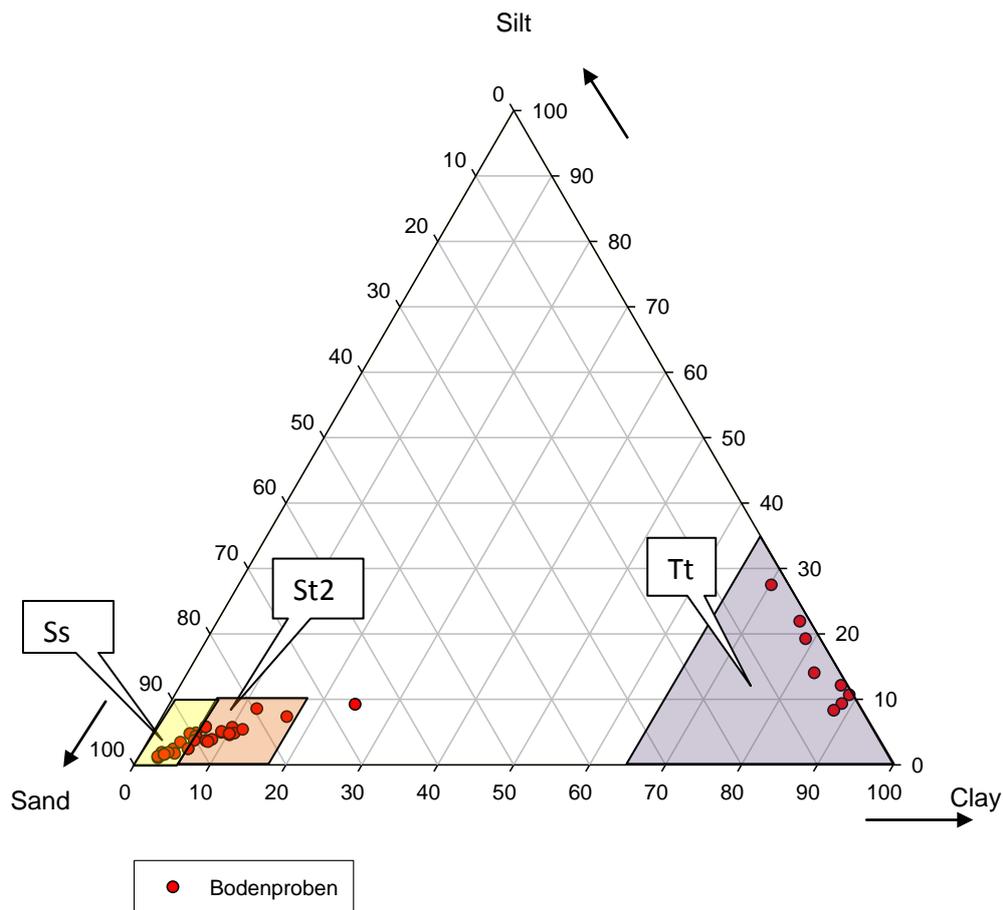


Abb. 44: Dreiecksdiagramm mit %-Anteilen an Sand, Ton und Schluff der gefundenen Feinbodenarten nach (Bodenkunde AG, 2005)

Abb. 44 zeigt die prozentualen Anteile der Fraktionen Sand, Ton und Schluff der untersuchten Böden. Die Böden der Dünen können grob als grobkörnig (>70 % Sand, <15 % Ton), die

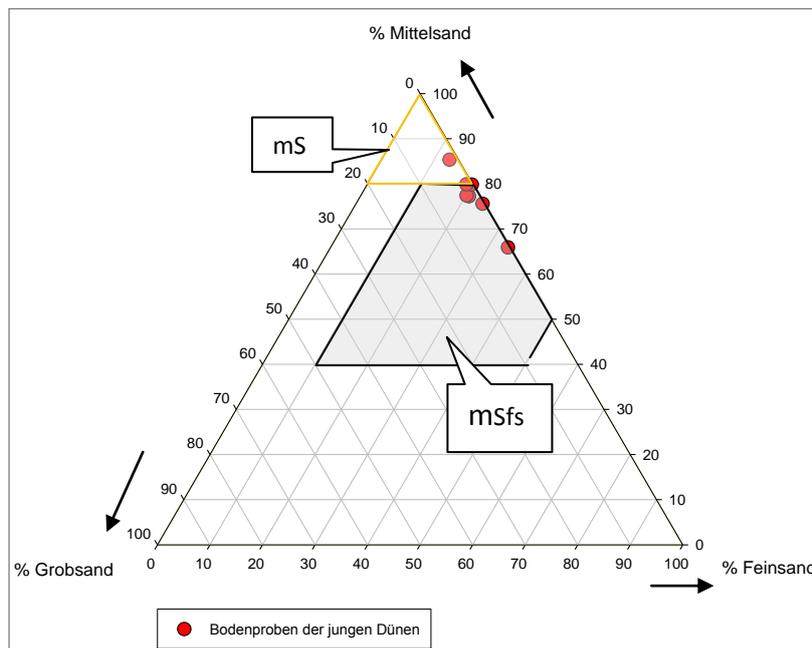


Abb. 45: Unterteilung der Bodenart „reiner Sand“ nach (Bodenkunde AG, 2005)

des Tales als feinkörnig (>35 % Ton) eingestuft werden (FAO, 1988). Eine feinere Unterteilung führt zu den Bodenarten schwach toniger Sand (St2) (etwa 90 % Sand, 6 % Ton, 4 % Schluff) und reiner Sand (Ss) (etwa 95 % Sand) der Dünenannde. Reiner Sand lässt sich weiter unterteilen und führt aufgrund des hohen Gehaltes an Mittelsand und des erhöhten Gehaltes an Feinsand zu der Art „feinsandiger Mittelsand“ an der Grenze zu „Mittelsand“ (mSfs, siehe Abb. 45)

(Bodenkunde AG, 2005). Auffällig ist die gleichmäßige Verteilung der Fraktionen Schluff und Ton (Schluff 2-5 %, Ton 2-10 %; oft sogar jeweils 5 %). Unterteilt man diese Fraktionen weiter in grob, mittel und fein, ist weiterhin diese gleichmäßige Verteilung erkennbar (siehe auch Leitprofile und Korngrößensummenkurven im Anhang). Der Grund ist die äolisch-marine Entstehung der Dünenysteme im Quartär.

Die Talböden hingegen sind reine Tonböden mit Höchstwerten von knapp 90 % Ton, deren fluviale Entstehung nicht zu übersehen ist. Auffällig ist auch der hohe Gehalt an Feinton (teilweise etwa 70 %). Eine Ausnahme bilden die Talböden in Dünennähe. Hier ist der tonige Unterboden mit einer sehr sandigen Schicht überdeckt. Eine genauere Aufschlüsselung der Bodenarten ist im Anhang bei den einzelnen Leitprofilen in der Tiefenfunktion erkennbar.

### 3.6.5 Wasser- und Lufthaushalt der Böden

Der Wasserhaushalt spielt eine entscheidende Rolle bei der landwirtschaftlichen Nutzung von Böden.

Aufgrund der fehlenden Möglichkeit ungestörte Proben in Stechzylindern bearbeiten zu können, beruhen die Werte dieses Kapitels auf den aus Erfahrungswerten entstandenen Tabellen der KA5 (2005). In diese Tabellen wurden die im Gelände und Labor ermittelten Werte eingesetzt.

Die wichtigsten Kenngrößen sind hierbei die Feinbodenart, die effektive Lagerungsdichte und die Trockenrohdichte. Die Feinbodenart wurde im Labor ermittelt, die effektive Lagerungsdichte und die Trockenrohdichte wurden aus Feldversuchen und Schätztabellen errechnet. Mithilfe dieser drei Werte können nun die folgenden Kennwerte ermittelt werden.

Die kombinierte Nasssiebung und Sedigraphenanalyse führt zu den Feinbodenarten St2 und Ss (mSfs) in den Dünen. Bei St2 beträgt die Trockenrohdichte 1,38, die Lagerungsdichte 1,4. Beide sind als Stufe 2, gering einzustufen. Aufgrund des niedrigen Tongehaltes (2-5 %) erreicht die Lagerungsdichte bei Ss nur Stufe 1, gleichbedeutend mit sehr gering.

Der aus reinem Ton (Tt) bestehende Talboden erreicht eine Trockenrohdichte von 1,16. Aufgrund des hohen Tongehaltes von knapp 90% errechnet sich hier eine Lagerungsdichte von 1,97; Stufe 4 von 5. Da die Böden humos sind (Stufe 3) erhalten sie entsprechende Zuschläge.

### 3.6.5.1 Wasserbindung

Neben der aus den festen Bodenteilchen gebildeten Bodenmatrix, existieren, abhängig von der Korngrößenverteilung, Zwischenräume zwischen den festen Partikeln. In diesem Porensystem vollziehen sich Luftaustausch und Wasserbewegung verbunden mit Transport- und Akkumulationsvorgängen. Während das Wasser in den groben Poren frei beweglich ist, wirken in den feinen und mittleren Poren Bindungskräfte zwischen den Wassermolekülen und den Bodenpartikeln, genannt Adhäsion, und zwischen den Wassermolekülen selbst, genannt Kohäsion (Bodenkunde AG, 2005) (Achnich, 1986).

Die Korngrößenverteilung bestimmt die Größe der Zwischenräume und somit der Poren. Diese wiederum bestimmen die Kräfte mit denen das Wasser gehalten wird. Wesentliche Kräfte sind Adsorptions- und Menisken- sowie Kapillarkräfte; als Maß dient die Saugspannung  $pF$  (Achnich, 1986).

#### Luftkapazität

Die Luftkapazität ist der Porenraum  $>50 \mu\text{m}$ , der bei einer Saugspannung  $pF < 1,8$  mit Luft gefüllt ist. Sie dient als Maß für die Versorgung der Wurzeln mit Sauerstoff (Bodenkunde AG, 2005). Aufgrund des hohen Sandanteils und den damit großen Poren besitzen die Böden mit St2 und Ss eine hohe, bzw. sehr hohe Luftkapazität. Die Sauerstoffversorgung ist somit gewährleistet. Die tonreichen Böden des Limpopotals hingegen zeigen nur eine mittlere Luftkapazität (siehe Tab. 14).

#### Feldkapazität

Die Feldkapazität ist die Menge des Bodenwassers in %, die in den Poren der Größe  $< 50 \mu\text{m}$  gebunden ist. Sie zeigt an, wie viel Wasser der Boden gegen die Schwerkraft halten kann. Die Wasserspannung  $pF$  liegt über 1,8 (Bodenkunde AG, 2005). Wiederum ist der hohe Sandanteil der Dünenböden dafür verantwortlich, dass nur wenige Poren klein genug sind,

das Wasser im Boden zu halten. Die Bodenarten St2 und Ss zeigen eine geringe, bzw. sehr geringe Feldkapazität. Anders im Limpopotal. Der hohe Anteil an feinporigen Tonmineralen führt zu einer sehr hohen FK (siehe Tab. 14).

### Nutzbare Feldkapazität

Die nutzbare Feldkapazität nFK ist ein Teil der Feldkapazität, und gibt den Wasseranteil in den Poren zwischen 50 und 0,2  $\mu\text{m}$  an. Die Saugspannung pF liegt zwischen 1,8 und 4,2. Die nFK ist gleichzusetzen mit dem pflanzenverfügbaren Wasser, da sie nur den %-Teil angibt, der für die Pflanzenwurzeln zugänglich ist und nicht durch zu starke Kräfte im Boden gehalten wird. Diese Schwelle zwischen Verfügbarkeit und Nichtverfügbarkeit wird permanenter Welkepunkt, das unzugängliche Wasser Totwasser genannt (Bodenkunde AG, 2005). Da in den Sandböden nur ein geringer Teil des Wassers als Totwasser zurückgehalten wird, ist das pflanzenverfügbare Wasser bei St2 als mittel einzustufen und gewährleistet eine noch brauchbare Versorgung der Pflanzenwurzeln. Bei reinen Sanden ist die nFK aufgrund des niedrigeren Tongehaltes nur gering. Die Tonböden des Tales halten einen sehr hohen Teil des Wassers als Totwasser zurück, bieten aber, auch aufgrund des hohen Humusanteils, dennoch eine hohe nFK und damit eine gute Versorgung der Pflanzen.

Abb. 46 zeigt die Wasserspannungskurven pF und die damit verbundenen Anteile an der LK, der FK, nFK und dem TW der ermittelten Bodenarten St2, mSfs und Tt.

Bodenart u. Wertung	Gesamtporenvolumen	Luftkapazität LK	Feldkapazität FK	Nutzbare Feldkapazität nFK	Totwasser TW
<b>St2</b> Bezeichnung	50 hoch	24 hoch	26 gering	18 mittel	8 gering
<b>Ss (mSfs)</b> Bezeichnung	50 hoch	36 sehr hoch	14 Sehr gering	9 gering	5 gering
<b>Tt</b> Bezeichnung	70 sehr hoch	10 mittel	60 sehr hoch	24 hoch	36 sehr hoch

Tab. 14: Bodenphysikalische Kennwerte der Wasserbindung in Vol.-% und ihre Bewertung nach (Bodenkunde AG, 2005). Zuschläge humusreicher Böden sind eingerechnet

### 3.6.5.2 Wasserbewegung

Zum Ausgleich des ständigen Ungleichgewichts des Bodenwassers findet eine Bewegung des Wassers statt. Es wird unterschieden zwischen Bewegung im gesättigten Zustand (es treten Gravitationskräfte und hydrostatischer Druck auf) und im ungesättigten Zustand (Einbeziehung der Matrixkräfte). Ebenso muss in Salzböden das osmotische Potential einbezogen werden (Achnich, 1986). Im gesättigten Boden verläuft die Bewegung nach dem Gesetz von Darcy (Höiting, 1998). Um die Wasserleitfähigkeit wassergesättigter Böden zu charakterisieren, wurde der Wasserleitfähigkeits-Koeffizient  $k_f$  eingeführt. Er charakterisiert die Filtergeschwindigkeit und Durchlässigkeit der Böden und dient als Maß zur Beurteilung der Stau- und Haftnässe, Erosionsgefährdung und Dränwirksamkeit (Bodenkunde AG, 2005).

Wiederum entscheiden die Bodenart, die Lagerungsdichte und die Trockenrohdichte über die Geschwindigkeit. Die sehr sandigen Böden (mSfs) der jungen Dünen verfügen mit einem kf-Wert von 675 cm pro Tag über eine extrem hohe, die älteren Dünen (St2) mit 150 cm/Tag immer noch über eine sehr hohe Wasserleitfähigkeit. Der tonige Ton der Talböden lässt kaum Bewegung zu, daher ist die Wasserleitfähigkeit mit 3 cm/Tag niedrig (siehe Tab. 15).

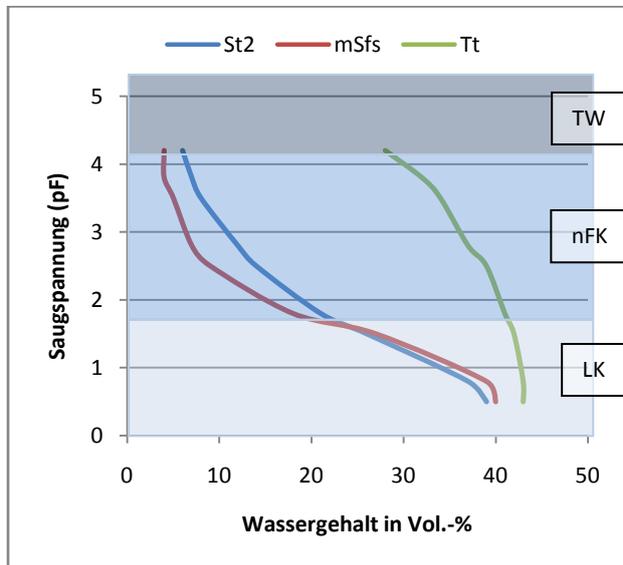


Abb. 46: LK, TW, nFK und Wasserspannungskurven der ermittelten Bodenarten nach (Bodenkunde AG, 2005)

Bodenart	Gesättigte Wasserleitfähigkeit kf in cm/d
St2	~ 150
Bezeichnung	sehr hoch
Ss (mSfs)	~675
Bezeichnung	extrem hoch
Tt	~3
Bezeichnung	gering

Tab. 15: Gesättigte Wasserleitfähigkeit der Dünen- und Talböden nach (Bodenkunde AG, 2005)

### 3.6.6 Bodenfarbe

Die Farbe eines Bodens wird nach der Munsell-Skala bestimmt und teilt sich in hue, chroma und value. Sie wurde bei luftgetrockneten Proben bestimmt.

Die Bodenfarbe (trocken) des Oberbodens der älteren Dünen beträgt meist 7,5 YR 4/4 bzw. 4/6, der jüngeren Dünen meist 10 YR 5/6. Der Unterschied in der Färbung ist auf den niedrigeren Gehalt an organischem Material und kaum vorhandenen Eisenoxiden in den jungen Dünen zurückzuführen. Die Farbe des Horizontes wird daher vorwiegend durch die Farbe der primären Sand- und Schluff-Teilchen und weniger durch die Überzüge auf diesen Teilchen bestimmt (FAO, 1988).

Der Unterboden hat eine deutlich rötere Färbung, die meist bei ~80 cm unter GOK eintritt. Eine Rotfärbung von 5 YR belegt hier den im Labor festgestellten Anstieg von Eisenoxiden. Die Farbe 5 YR 4/6 spricht für eine Anhäufung der Eisenoxide Haematit und Lepidocrocit (~ 0,1 µm) und evtl. Goethit (~ 0,2 µm) (Cornell & Schwetmann, 2003).

Die Talböden zeigen Färbungen von 10 YR 3/1 im Oberboden und 2,5 YR 5/2 ab 40 cm u. GOK bzw. auch im Oberboden nachdem der Humus zerstört wurde. Diese Färbung ist ein erstes Anzeichen für Magnetit (Cornell & Schwetmann, 2003).

### 3.6.7 Diskussion der Methoden

In dieser Arbeit wurde versucht mit Hilfe einer Vielzahl von Bodenproben Ausreiser zu erkennen und einen möglichst genauen Überblick über die gesamte Fläche zu erhalten. Dabei sind jedoch lokale Einflüsse (z.B. die Nähe zu einer Kloake in Dorfnähe) welche die Werte verfälschen nicht komplett auszuschließen. Daher wurden 25 Leitprofile aufgenommen und nur die aussagekräftigsten, dem Durchschnitt entsprechende, näher erläutert. Da die Arbeitsbedingungen vor Ort sehr schwierig waren, sind Fehler möglich, jedoch aufgrund der hohen Anzahl an Proben vernachlässigbar. Die Methoden der Laboranalysen wurden so gewählt, dass gute Vergleichsmöglichkeiten mit internationaler Literatur über tropische Böden bestehen. Da Ergebnisse und Messwerte meist mit der Technik der Analyse variieren, gewährleistet dies eine einheitliche Präsentation mit hohem Vergleichswert und guten Interpretationsmöglichkeiten.

## 4 Analyse der gewonnenen Daten

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse und bereits angerissenen Themen weiter vertieft und zueinander in Relation gebracht werden. Es wird nach Auffälligkeiten gesucht, welche erklärt und gebietlich abgegrenzt werden sollen. Die Böden werden anhand von Tiefenprofilen genauer untersucht. Schwerpunkt ist die landwirtschaftliche Nutzbarkeit, und damit die Fruchtbarkeit der Böden.

### 4.1 Das Limpopotalgebiet

Vor Beginn des Krieges, in den 1970er Jahren wurde von einem russischen Konzern der Versuch unternommen das Talgebiet intensiv landwirtschaftlich zu nutzen. Es wurde gedüngt und Bewässerungsanlagen eingesetzt. Nach dem Rückzug der Russen ging das Land in den Besitz der mosambikanischen Regierung, daher bedarf die Nutzung durch Bauern und Bewohner eines Antrages und einer Freigabe. Das Limpopotalgebiet fällt in die Region der Pflugbauregion.

Einheimische erzählen sich, dass durch die intensive Nutzung durch die Russen der Boden verdorben, sprich versalzen wurde. Dieser Aussage soll später nachgegangen werden.

Zufälligerweise hatte das Landwirtschaftsamt in Xai-Xai von der mosambikanischen Regierung den Auftrag, Felder im Talgebiet des Limpopo auf ihre landwirtschaftliche Tauglichkeit zu untersuchen. Da ihnen die nötigen Gerätschaften fehlen, bat man uns um Hilfe. Dieser Zufall bot uns eine gute Gelegenheit einen Bereich des Tales genauer zu untersuchen.

Um einen breiträumigeren Bereich abzudecken, wurde etwas später noch ein unmittelbar an die Dünen angrenzender Bereich aufgenommen und beprobt.

#### 4.1.1 Klassifikation nach WRB

Die vorhandenen Böden werden anhand der FAO-Klassifikation als Eutric Fluvisole eingestuft. Dies sind Fluvisole, die eine Basensättigung (in  $\text{NH}_4$ -Acetat) von 50 % oder mehr mindestens in der Tiefe zwischen 20 und 50 cm unter der Bodenoberfläche aufweisen, aber in der gleichen Tiefe nicht kalkhaltig (calcareous) sind; innerhalb der obersten 125 cm des Bodens tritt kein Sulfuric Horizont oder Sulfidic Material auf; es sind keine Salic Eigenschaften vorhanden, bzw. sie sind zu schwach um als Salic zu gelten (FAO, 1988). Fluvisole besitzen Fluvic Eigenschaften: Der Begriff 'Fluvic Eigenschaften' bezieht sich auf fluviale, marine und lakustrine Sedimente, die regelmäßig mit neuem Material überdeckt werden, oder bis in die jüngste Vergangenheit noch überdeckt wurden (FAO, 1988). Ebenfalls besitzen sie Gehalte an organisch gebundenem Kohlenstoff, die mit der Tiefe in einer unregelmäßigen Weise abnehmen oder die bis in eine Tiefe von 125 cm oberhalb von 0,20 % bleiben (FAO, 1988).

Die Textur ist bestimmt durch Sedimentationen des Limpopo und typisch für Schwemmland. Der Sandanteil ist sehr gering (<3 %), der Schluffanteil schwankt zwischen 10 und 30 %. Auffällig hoch ist der Tonanteil (bis zu 90 %), insbesondere der Feintonanteil (bis zu 70 % in 50 cm Tiefe). In der Nähe der Dünen ist der Tonboden bis in eine Tiefe von 40 cm mit Sanden bedeckt.

#### 4.1.2 Weit im Tal gelegenes Gebiet

Die genaue Lage des Gebietes im Tal ist Anhang 5 zu entnehmen.

Entnommen wurden insgesamt 6 Mischproben (Mp1-6), jeweils in den Tiefen 0-2 und 0-40 cm, sowie ein Leitprofil mit 3 Horizontproben (LP1).

Das Gebiet besteht aus 3 Feldern. Feld 1 wurde in 4 Teile aufgeteilt, in denen jeweils eine Mischprobe der oberen 40 cm aus 4 Einstichen à 2 kg alle ca. 50 m entnommen wurde. Die oberen 2 cm wurden in 2 separaten Gängen beprobt (Mp1-3 Ob und Mp4 Ob). Dieses Feld wurde erst kurze Zeit vor der Probenahme zur landwirtschaftlichen Nutzung freigegeben. Es ist etwa 200 ha groß und ist teilweise mit Mais bepflanzt. Das Gebiet um Mp1 und Mp2 dichter, Mp4 bisher noch gar nicht.

Feld 2 ist ebenfalls in Gebrauch und wurde zum Zeitpunkt der Probenahme gerade umgegraben. Seine Größe beträgt 36 ha. Da Feld 3 (11 ha) in seiner Beschaffenheit Feld 2 glich,

wurde hier auf eine Probenahme verzichtet. Es ist zurzeit ungenutzt, soll aber demnächst zur Nutzung zur Verfügung gestellt werden.

Lange Wege und harter Tonboden machen diese Felder nur schwer bearbeitbar. Erhöhte Salzgehalte schränken die Nutzbarkeit für einige Pflanzen ein. Auf der anderen Seite ist das Land sehr humus- und damit nährstoffreich. Die KAK ist hoch, ebenso die Basensättigung. Der Grundwasserspiegel steht sehr hoch, was zu einer guten Durchwässerung des Bodens führt. Die Tiefenfunktionen sind im Anhang bei Leitprofil 1 zu finden, die Ergebnisse der Mischproben finden sich in Tab. 16.

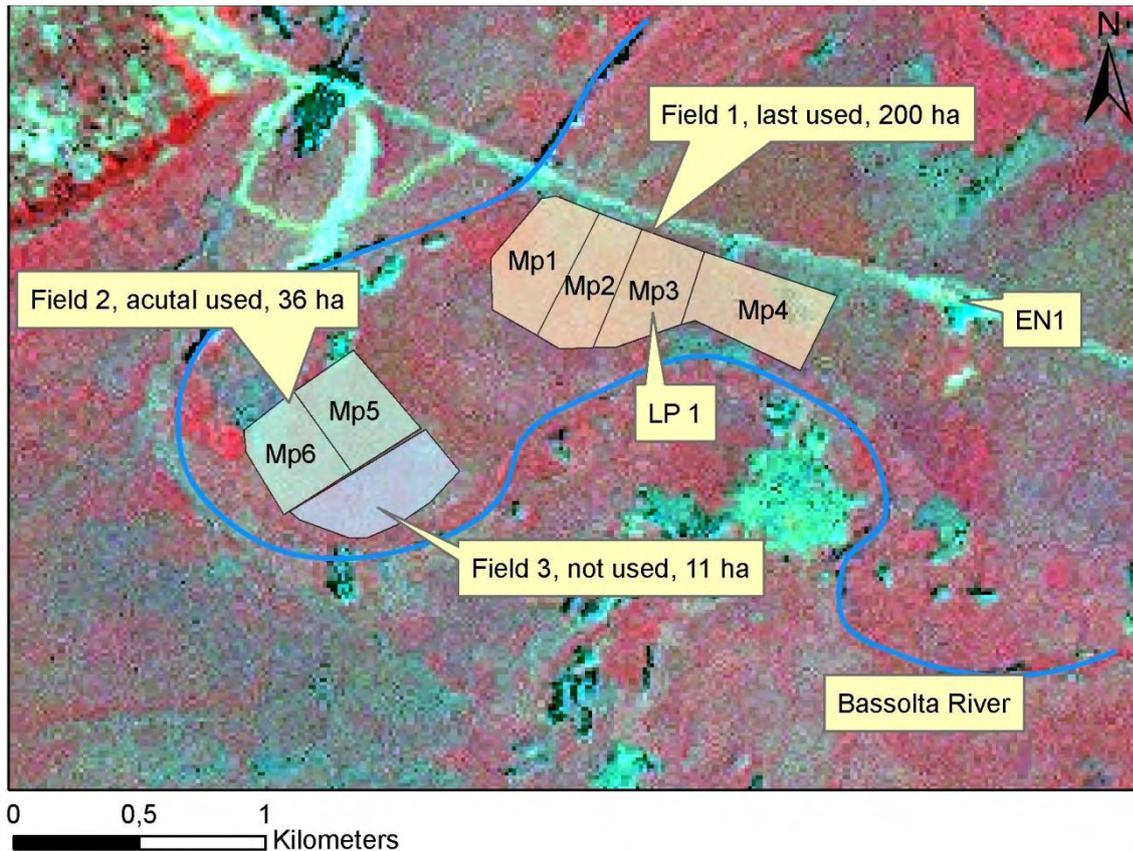


Abb. 47: Untersuchungsgebiet im Limpopotal. Als Untergrund dient die Landsat ETM+ Szene von 2001 in der Kanalkombination 432. Zur detaillierteren Darstellung wurde ein Resolution Merge mit dem panchromatischen Kanal durchgeführt.

Probe	pH (CaCl <sub>2</sub> )	EC [µS]	C <sub>org</sub> [%]	N <sub>ges</sub> [%]	C/N	KAK **	Na *	Ca *	K *	Mg *	Mn *	BS [%]	Ton [%]
	<i>Feld 1</i>												
Mp1-3 Ob	6,04	630	2,77	0,216	13	27,6		13,3	0,9	13,1	6,1	99	
Mp1	6,04	460	1,61	0,14	11								
Mp2	6,36	1270	2,31	0,181	13	14,5	2,6	5,8	0,4	5,5	0,07	99	89
Mp3	6,6	1420	2,31	0,169	14	10,7	1,5	3,9	0,3	4,9	1,7	99	
Mp4 Ob	6,5	1309	3,81	0,265	14	18,8	3,5	7,6	0,5	7	0,2	99	
Mp4	6,23	3360	1,74	0,133	13	19,3	3,6	8,8	0,5	6,4	0,03	100	
	<i>Feld 2</i>												
Mp5 Ob	5,87	134	2,7	0,198	14	14,9	1,1	7,5	0,4	5,7	0,2	98	
Mp5	6,88	990	2,16	0,167	13	13,5	1,8	5,8	0,3	5,3	0,03	98	83

Mp6 Ob	4,87	83,7	2,92	0,245	12	10,7	0,7	4,4	0,4	4,5	0,4	94	70
Mp6	5,53	115	1,81	0,172	11	13,6	0,6	6	0,4	6,4	0,1	98	79
Ø Feld 1	6,34	1408	2,4	0,18	13	18,2	2,8	7,9	0,5	7,4	1,6	99	89
Ø Feld 2	5,79	331	2,4	0,20	13	13,2	1,1	5,9	0,4	5,5	0,2	97	77

Tab. 16: Ergebnisse der Taluntersuchungen. Untersuchungsmethoden siehe Kapitel 3.6.2. Entnahmetiefe Ob: 0-2 cm, sonst 0-40 cm

\*\*  $KAK_{eff}$  in cmol/kg **sehr gering, gering, mittel, hoch, sehr hoch** \* austauschbare Kationen in cmol/kg Ca, Mg, K,  $N_{ges}$ : **gering, mittel, hoch**

Das spektrale Reflexionsprofil des Gebietes in der Landsat ETM+ Aufnahme (2001) ist geprägt durch die vitale Vegetation (absolutes Maximum), den dunklen humus- und magnetit-reichen Tonboden sowie den erhöhten Wassergehalt. Die Reflexion eines Bodens nimmt mit zunehmender Feuchtigkeit über den gesamten Spektralbereich ab (Hildebrandt, 1996). Daher werden feuchte Böden in Satellitenbildern in der Regel dunkler wiedergegeben als trockene. Ein eindeutiges Maximum liegt im nahen Infrarot, während höhere Wellenlängen durch die Feuchtigkeit kaum eine Rolle spielen (siehe Abb. 48).

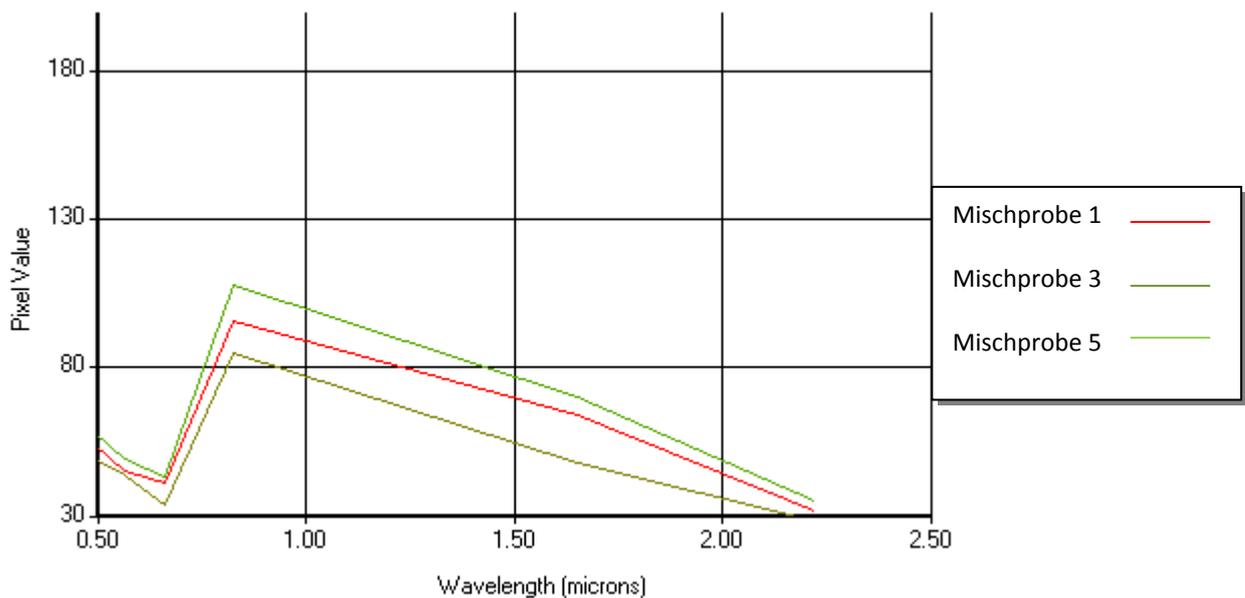


Abb. 48: Spektrale Profile des Talgebietes der Landsat ETM+-Aufnahme von 2001 (6 Bänder)



Abb. 50: Feld 1 im Talgebiet



Abb. 49: umgegrabenes Feld 2 im Talgebiet.

#### 4.1.3 Unmittelbar an die Dünen angrenzendes Talgebiet

Dieses Untersuchungsgebiet grenzt unmittelbar an die Dünen (die Lage ist Anhang 9 zu entnehmen) an. Entnommen wurden zwei Mischproben (Mp35 und Mp36) sowie ein Leitprofil (Lp24), deren Standorte in Anhang 6 nachvollzogen werden können. Auf den ersten Blick unterscheidet sich diese Fläche kaum von der übrigen Talregion. Auch hier folgt auf einen sehr dunklen humusreichen Oberboden ein reiner Tonboden mit 70 % Feintonanteil. Sowohl chemische als auch physische Faktoren entsprechen der weiter im Tal gelegenen Fläche. Eine Ausnahme bildet die EC, welche hier 0,5 mS/cm nicht überschreitet und somit vernachlässigt werden kann. Die auffälligste Unterscheidung besteht in der Korngrößenverteilung der oberen 40 cm. Wie man in der Tiefenfunktion von Lp24 (siehe Anhang) erkennt, wird der C-Horizont von einem sehr sandigen A-Horizont überlagert. Die Tongehalte liegen bei 12-24 %, entsprechend niedriger ist die KAK. Diese Böden stehen unter dem Einfluss von Grundwasser (Pegel in der Trockenzeit bei etwa 3 m unter GOK) und sind stets feucht. Aufgrund des tonigen C-Horizontes ab 40 cm unter GOK und des aufsteigenden Kapillarwassers ist die Basensättigung nahezu 100 % und trotz des Sandbodens der Bedarf der Pflanzen an Nährstoffen gedeckt. Die Mischung aus Sand, Ton und Humus bietet gute Wasserhalteigenschaften und stellt den Pflanzen ausreichend Wasser zur Verfügung. Gleichzeitig ist der Boden auch mit primitiven Gerätschaften bearbeitbar und für die Bevölkerung von Patrice Lumumba aufgrund nur kurzer Wege eine wichtige Quelle für Gemüse und Obstpflanzen

(auch für den Verkauf an der Straße), die in den Sandböden der Dünen nicht wachsen. Ist genug Geld vorhanden, werden Traktoren angemietet, um gemeinsam diese Flächen zu bearbeiten. Aufgrund der wasserstauenden Schicht sammelt sich in der Regenzeit das Wasser bereits im Oberboden, und ermöglicht den Bauern den Anbau von Reis.

Probe	pH CaCl <sub>2</sub>	EC [μS]	C <sub>org</sub> [%]	N <sub>ges</sub> [%]	C/N	KAK **	Na *	Ca *	K *	Mg *	Mn *	BS [%]	Ton [%]
	-40 cm												
Mp35	4,97	257	6,6	0,5	13	5,8	0,5	2,1	0,3	2,7	0,1	96	
Mp36	5,02	303	2,3	0,2	11	5,5	0,7	2	0,2	2,3	0,1	97	12
Lp24	5,4	180	3,8	0,3	14	8	0,3	4	0,2	3	0,2	97	24
	>40 cm												
Lp24	6,07	174	1,7	0,14	14	11	1,5	3,3	0,2	6	0	99	88

Tab. 17: Bodenverhältnisse des Talgebietes nahe der Dünen

\*\* KAK<sub>eff</sub> in cmol/kg **sehr gering, gering, mittel, hoch, sehr hoch** \* austauschbare Kationen in cmol/kg Ca, Mg, K, N<sub>ges</sub>: **gering, mittel, hoch**



Abb. 51: direkt an die Dünen angrenzendes Talgebiet. Die hohe Bodenfeuchte und die Menge organischen Materials ist gut erkennbar



Abb. 52: direkt an die Dünen angrenzendes Talgebiet. Oben sind die Dünen erkennbar

#### 4.1.4 Bodenfruchtbarkeit

In diesem Abschnitt werden die bereits in Kapitel 3.6 erwähnten Maßstäbe zur Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit aufgegriffen und in vier Hauptgruppen untergliedert. Ebenfalls werden die Ergebnisse aus selbigem Kapitel eingesetzt und bewertet. Eine tabellarische Zusammenfassung findet sich in Anhang 1. Dort ist auch eine Eignungstabelle bezüglich der angebauten Nutzungspflanzen zu finden. Da die Faktoren bereits erläutert und die Ergebnisse der Untersuchungen bereits vorgestellt wurden, wird an dieser Stelle auf diese Kapitel zurückgegriffen.

##### 4.1.4.1 Physische Faktoren

###### 4.1.4.1.1 Geländemorphologie

Beide untersuchte Flächen liegen flach im Tal und weisen keinerlei Hangneigung und Exposition auf. Das Talgebiet wird in der Regenzeit teilweise überschwemmt und ist daher fluvial geprägt.

###### 4.1.4.1.2 Durchwurzelung

Die Durchwurzelung eines Bodens erlaubt einer Pflanze sich natürlich zu entfalten, oder hält sie davon ab (Young, 1976). Sie ist mitbestimmend für die Fruchtbarkeit eines Bodens, da die meisten Nährstoffe nur sehr kurze Distanzen zu den Wurzeln zurücklegen können. Phosphate bewegen sich im Durchschnitt 2,5 mm, Calcium und Magnesium 5 mm, Kalium 2,5 mm, während Nitrat sich frei bewegt (Young, 1976).

Die durchgehend festen Böden der Bodenart „toniger Ton“ der im Tal gelegenen Böden machen es Erd- und Knollenfrüchten wie Erdnuss und Maniok unmöglich sich in den Boden

ezugraben. Auch Maispflanzen wird die Wurzelbildung erschwert. Das bereits wenige cm unter der GOK einsetzende feste Kohärentgefüge erschwert den Wurzeln das Eindringen (siehe Anhang, LP1). Nahe den Dünen erleichtert der hohe Sandanteil der oberen 40 cm die Durchwurzelung (siehe Anhang, LP24). In beiden Fällen tritt in einer Tiefe von 40 cm der humusarme Stauhorizont mit einem Feintonanteil von etwa 70 % auf und behindert ab dieser Tiefe weitere Durchwurzelung.

#### 4.1.4.1.3 Wasser- und Lufthaushalt

Dank des nahegelegenen Grundwasserspiegels sind die Böden der Talregion selbst in der Trockenzeit stets mit Wasser versorgt. Aufgrund des hohen Tonanteils und des damit verbundenen hohen Anteils an Feinporen, sind die Wasserhaltemöglichkeiten dieser Böden hervorragend und der Abfluss gering. Allerdings wird ein großer Teil dieses Wassers über dem permanenten Welkepunkt gehalten und ist somit als Totwasser den Pflanzenwurzeln nicht zugänglich (siehe Abb. 46). Dennoch ist die nFK ausreichend, um eine gute Wasserversorgung der Pflanzen zu gewährleisten. Die effektive Durchwurzelungstiefe bei dieser Bodenart beträgt in etwa 80 cm (Bodenkunde AG, 2005).

Zwar ist der Boden in der Nähe der Dünen im Oberboden sehr sandig, eine ständige Wassernachlieferung, ein hoher Humusanteil und ein Ton- und Schluffanteil von insgesamt 30 % schaffen auch hier gute Voraussetzungen. Aufgrund des niedrigen Tonanteils steht das vorhandene Wasser den Pflanzen weitestgehend zur Verfügung. Die in der Trockenzeit entnommenen Proben zeigen stets sehr hohe Wassergehalte. Bereits wenige cm unter GOK ist weit im Tal ein Wassergehalt von 50 – 60 Gew.-% festzustellen. Nahe den Dünen schwankt dieser Wert von 30 – 75 %. Beide Gebiete zeigen in einer Tiefe von über 40 cm unter GOK Wassergehalte >60 %. Wiederum stellt in beiden Fällen der C-Horizont ab 40 cm ein Pflanzenhindernis dar. Der hohe Feintonanteil hält das Wasser mit einer für die Wurzeln nicht zu durchbrechenden Saugspannung fest.

Aufgrund der zahlreichen Feinporen der Tonböden mitten im Tal liegt die Sauerstoffversorgung der Wurzeln nur im mittleren Bereich, während die sandigen Oberböden der dünen-nahen Fluvisole eine hervorragende Versorgung liefern. Die ganzjährig hohe Wassersättigung der Fluvisole kann jedoch leicht zu einem Defizit an Sauerstoff führen.

#### 4.1.4.2 Pflanzennährstoffe

Aufgrund der ausgezeichneten Adsorptionsmöglichkeiten an Tonmineralen und Huminstoffen und der ständigen Nachlieferung durch Kapillarwasser, fluviale Einträge sowie Zersetzung der organischen Verbindungen ist die Versorgung an Nährstoffen gesichert, auch wenn sich keine verwitterbaren Minerale in den oberen Horizonten befinden. Untersucht wurde die effektive KAK, die aufgrund des neutralen pH-Wertes nahezu der potentiellen KAK entspricht. Der neutrale pH-Wert gewährleistet, dass die Nährstoffkationen in pflanzenverfügbarer Form vorliegen. Die KAK liegt somit in allen untersuchten Horizonten des Gebietes im Tal im mittleren bis hohen Bereich von 10-20 cmol/kg Boden. An der Grenze zu den Dünen

sind die Nährstoffgehalte aufgrund des sandigen Oberbodens entsprechend niedriger (0-40 cm 3-8, ab 40 cm 11 cmol/kg), aber immer noch im akzeptablen Bereich, da Grundwasser und der tonige Unterboden für Nachschub sorgen.

Stickstoff ist, als einer der wichtigsten Primärnährstoffe, in beiden Talregionen ausreichend vorhanden. Der hohe Gehalt organischer Substanz liefert meist Werte  $>0,2\%$  - ein als hoch einzuordnender Wert. Er nimmt parallel zur organischen Substanz mit zunehmender Tiefe ab. Nahe den Dünen wurde sogar ein Extremwert von  $0,5\%$  gemessen (Mp35). Auch die Vorräte an austauschbarem Kalium sind mit Werten von meist  $>0,4$  cmol/kg im mittleren bis hohen Bereich anzusiedeln. Nur der gemessene pflanzenverfügbare Phosphor liegt aufgrund der erhöhten Fixierung an Eisenoxide im Durchschnitt unter  $2$  mg/kg, und damit im mittleren bis niedrigen Bereich.

#### 4.1.4.3 Chemische Faktoren

Pflanzen besitzen im Durchschnitt bei einem pH-Wert von 6,0 bis 7,5 ihr Optimum. Niedrigere Werte führen zu einer erhöhten  $H^+$ -Konzentration und somit einer Verdrängung der Nährstoffe von den Austauschplätzen. Da der in der Talregion gern angebaute Mais relativ empfindlich auf Bodenversauerung reagiert, sind die neutralen Werte (6-7) dieser Region von großer Bedeutung. Zwar ist keinerlei Kalk vorhanden, doch sorgen fluviale Einträge sowie Kapillarströme für eine ständige Nachlieferung an basischen Kationen. Daher beträgt die Basensättigung in sämtlichen Fällen nahezu  $100\%$  - eine optimale Bedingung für den Pflanzenwuchs. Auch gewährleistet ein neutraler pH-Wert die Immobilität toxischer Stoffe. So wird  $Al^{3+}$  erst bei sehr niedrigen pH-Werten mobil und ist aktuell fest gebunden (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

Auffällig ist der höhere Anteil an amorphen Eisen- und Manganoxiden gegenüber den kristallisierten, besonders in den oberen cm unter GOK beträgt das Verhältnis oft 2:1. Diese oxalatlöslichen Eisenoxide sind „aktiv“ und nicht vollständig kristallisiert. Eisenoxide dienen Anionen (z.B. Phosphat) zur Sorption. Da diese nicht sofort pflanzenverfügbar sind, wird das P daher durch Eisenoxide dem System vorläufig entzogen. Der hohe Gehalt an Eisenoxiden in den Talböden kann daher für den Mangel an Phosphor verantwortlich gemacht werden.

##### 4.1.4.3.1 Bodenversalzung

Auch wenn die Bevölkerung die leichte Bodenversalzung auf die Bearbeitung der Böden durch russische Konzerne zurückführt, ist eine natürliche Versalzung wahrscheinlicher.

Die Böden liegen nur knapp über dem Meeresspiegel und sind grundwasserbeeinflusst. Ständiger kapillarer Aufstieg führt Salze aus Grundwässern zu. Die Salze verbleiben nach Verdunstung des Wassers im Boden. Ebenso erfolgt der Eintrag fluvial durch Überschwemmungen des Limpopo und anschließende Verdunstung des Überflutungswassers. Die Salze scheiden sich an der Bodenoberfläche und im Oberboden aus (Zech & Hintermaier-Erhard, 2002). Die Folge sind leichte Salzkrusten (besonders bei Mp4) und Zeigerpflanzen (Halophyten).

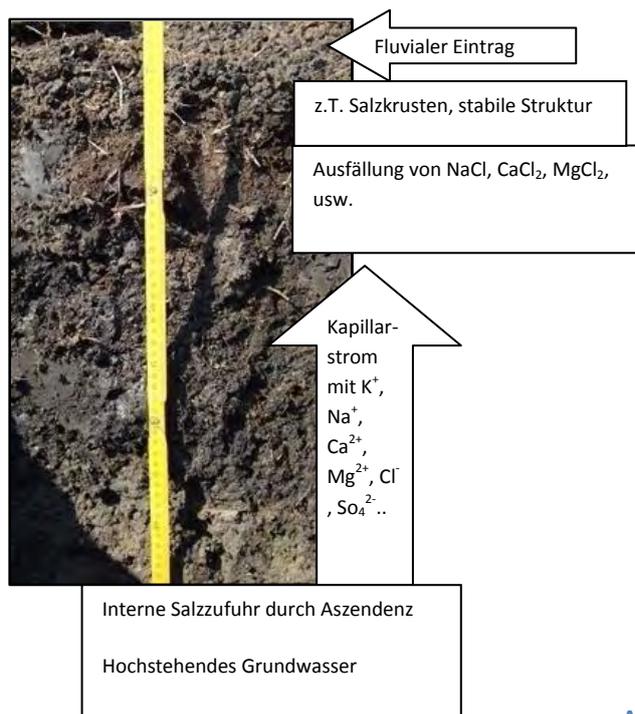


Abb. 53: Bodenbeeinflussende Prozesse nach (Zech & Hintermaier-Erhard, 2002)



Abb. 54: Salzkrusten und Zeigerpflanze bei Mp4

Gemessene Gehalte der elektrischen Leitfähigkeit (EC) von 2-3 mS/cm sind erhöhte Werte, aber keineswegs besorgniserregend. Von einem Salzboden spricht man ab 4 mS/cm (Schulze, Beck, & Müller-Hohenstein, 2002). Da die gemessenen Werte nur knapp an dieser Grenze liegen, ist die Anwesenheit von wirklichen Salzböden in unmittelbarer Umgebung des im Tal gelegenen Untersuchungsgebietes nicht auszuschließen.

Die Versalzung nimmt auf Feld 1 von Mp1 zu Mp4 zu. Mp5 und Mp6 (Feld 2) weisen nur geringe Werte unter 1 mS/cm auf und können daher vernachlässigt werden. Das untersuchte Gebiet in unmittelbarer Nähe der Dünen zeigt keine Werte über 0,5 mS/cm, und ist daher als unproblematisch einzustufen.

Nutzpflanzen reagieren unterschiedlich auf Stress durch Salz, daher ist eine differenzierte Betrachtung der Auswirkung auf die Fruchtbarkeit erforderlich. Tab. 18 zeigt die Toleranzschwelle von Mais und drei weiteren angebauten Pflanzen. Danach ist der Boden für Bohnen und Bananen gänzlich ungeeignet. Die Hauptnutzung besteht aus Maisstauden. Da Mais eine mittlere Toleranzschwelle aufweist, sind bei Feld 1 Ertragseinbußen von etwa 15 % im östlichen Teil bei Mp4 zu erwarten. Auch andere Gemüsesorten wie z.B. Tomate und besonders Süßkartoffel sind nur mit Einbußen anbaubar.

Pflanze	Toleranzschwelle EC	90 % Ertrag EC	75 % Ertrag EC	50 % Ertrag EC	0 % Ertrag EC
Mais	1,7	2,5	3,8	5,9	10
Reis	3	3,8	5,1	7,2	11
Bohne	1	1,5	2,3	3,6	6,5
Tomate	2,5	3,5	5	7,6	12,5
Süßkartoffel	1,5	2,4	3,8	6	11
Erdnuss	3,2	3,5	4,1	4,9	6,5
Banane	<1				

Tab. 18: Salztoleranz einiger Nutzpflanzen. EC Einheit = 1 mS/cm nach (Landon, 1991)

#### 4.1.4.4 Humusgehalt

Humus ist sowohl als Nährstoffquelle (Zersetzung der organischen Verbindungen und Freigabe als anorganische Pflanzennährstoffe) als auch zur Nährstoffspeicherung (Adsorption an Huminstoffen) essentiell und trägt maßgeblich zu den physischen Faktoren bei (Bodenstruktur, Durchwurzelung, Feuchteverhältnisse, Erosionsschutz) (Young, 1976). Bereits die dunkle Farbe der oberen 40 cm zeigt den erhöhten Humusgehalt im gesamten Talgebiet. Aufgrund der feuchten Böden und der ständigen Nachlieferung an Nährstoffen ist das Schwemmland reich an Vegetation, welche nach dem Absterben als Humus in den Boden eingearbeitet wird. Die hohe Wassersättigung der Böden wirkt hemmend auf die Mineralisation (anaerobe Verhältnisse) und führt zu einer hohen Akkumulation des Humus. Gilt bereits ein Humusgehalt ( $C_{org} * 1,72$ ) ab 2 % als humos, unterschreitet keine der Bodenproben einen Gehalt von 3 %. Die dunkle Oberfläche bewirkt dank eines hohen Albedo-Wertes ein starkes Aufheizen der Oberfläche und schafft zusammen mit der Feuchtigkeit und dem neutralen pH-Wert dennoch gute Bedingungen für mikrobielle Aktivität, was für ein enges C/N Verhältnis (11-14) und damit eine gute Humusqualität und eine ausreichende Stickstoffquelle sorgt.

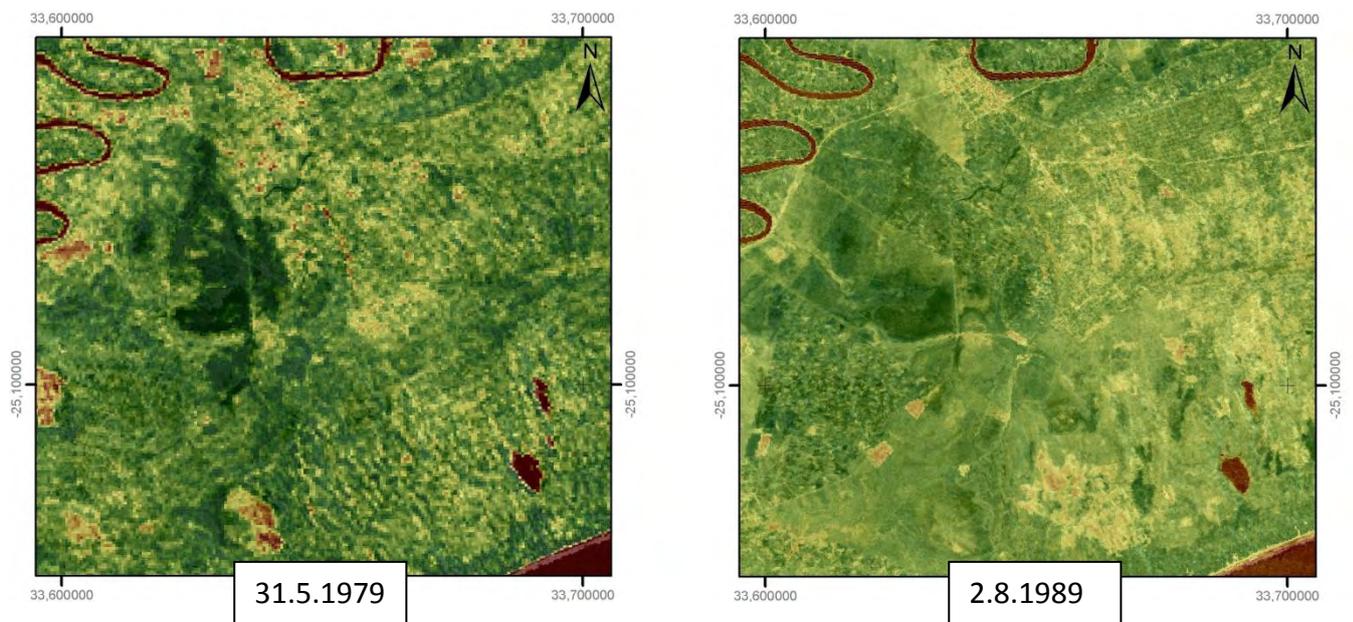
#### 4.1.5 Eignung für Pflanzen

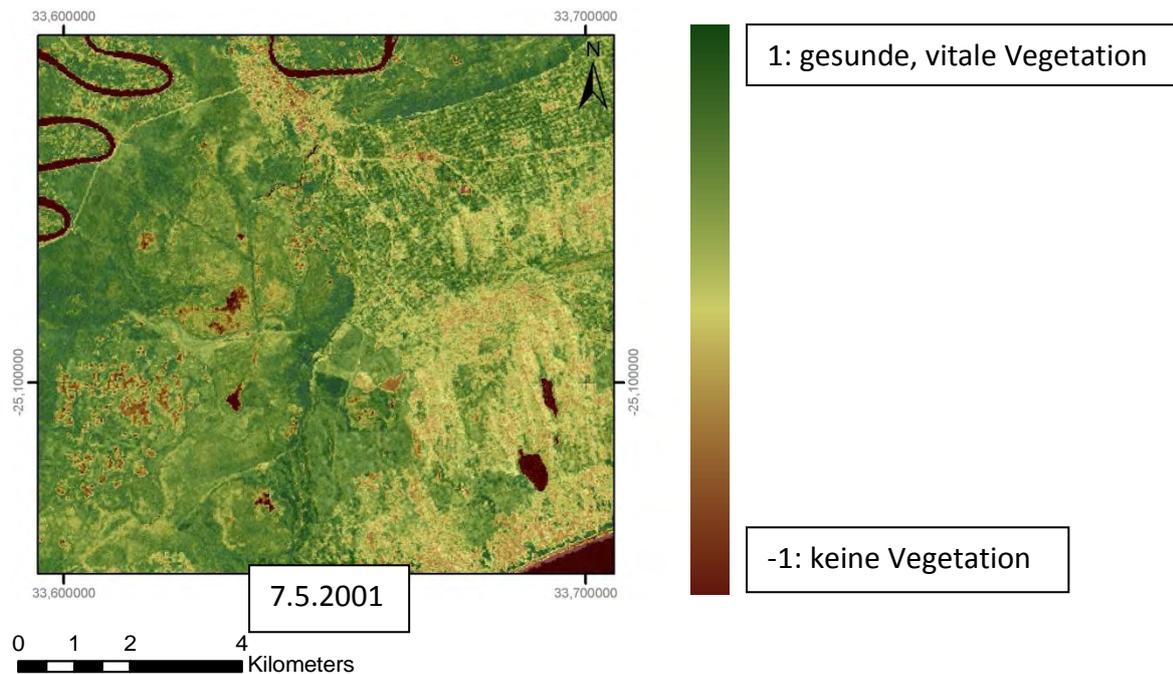
Das Talgebiet wird bestimmt durch den sehr hohen Tongehalt, die Staunässe und die leichte Versalzung auf der einen Seite, sowie der hohen Verfügbarkeit an Nährstoffen, organischer Substanz und Wasser auf der anderen Seite. Dies macht das Talgebiet für Landwirtschaft eingeschränkt nutzbar. Eine Übersicht über Vorlieben und Toleranzschwellen der einzelnen Nutzpflanzen befindet sich in Anhang 2. Eine differenzierte Übersicht zwischen den beiden Talgebieten schafft Anhang 1. So ist der Boden für Maniok und Erdnuss gänzlich ungeeignet, während Mais nahe den Dünen wächst, weiter im Tal aber Defizite aufweist. Grundsätzlich müssen Anbauprodukte eine gewisse Toleranz gegenüber erhöhten Salzgehalten besitzen, will man nicht stellenweise Ertragseinbußen in Kauf nehmen. Wichtig ist außerdem eine gute Verträglichkeit mit dem harten Tonboden. Gemäß Landon (1991) erfüllen Weizen, Roggen, Kautschuk, Reis, die Ölpalme, Hafer und Mangold diese Anforderung. Sehr staunässeverträglich zeigen sich Roggen, Reis, Kartoffeln, Hafer und Mangold. Beachtet man beim Anbau die Defizite der Böden, sind dank des hohen Angebots an Nährstoffen gute Erträge zu erzielen.

## 4.2 Das Dünengebiet

### 4.2.1 NDVI und change detection

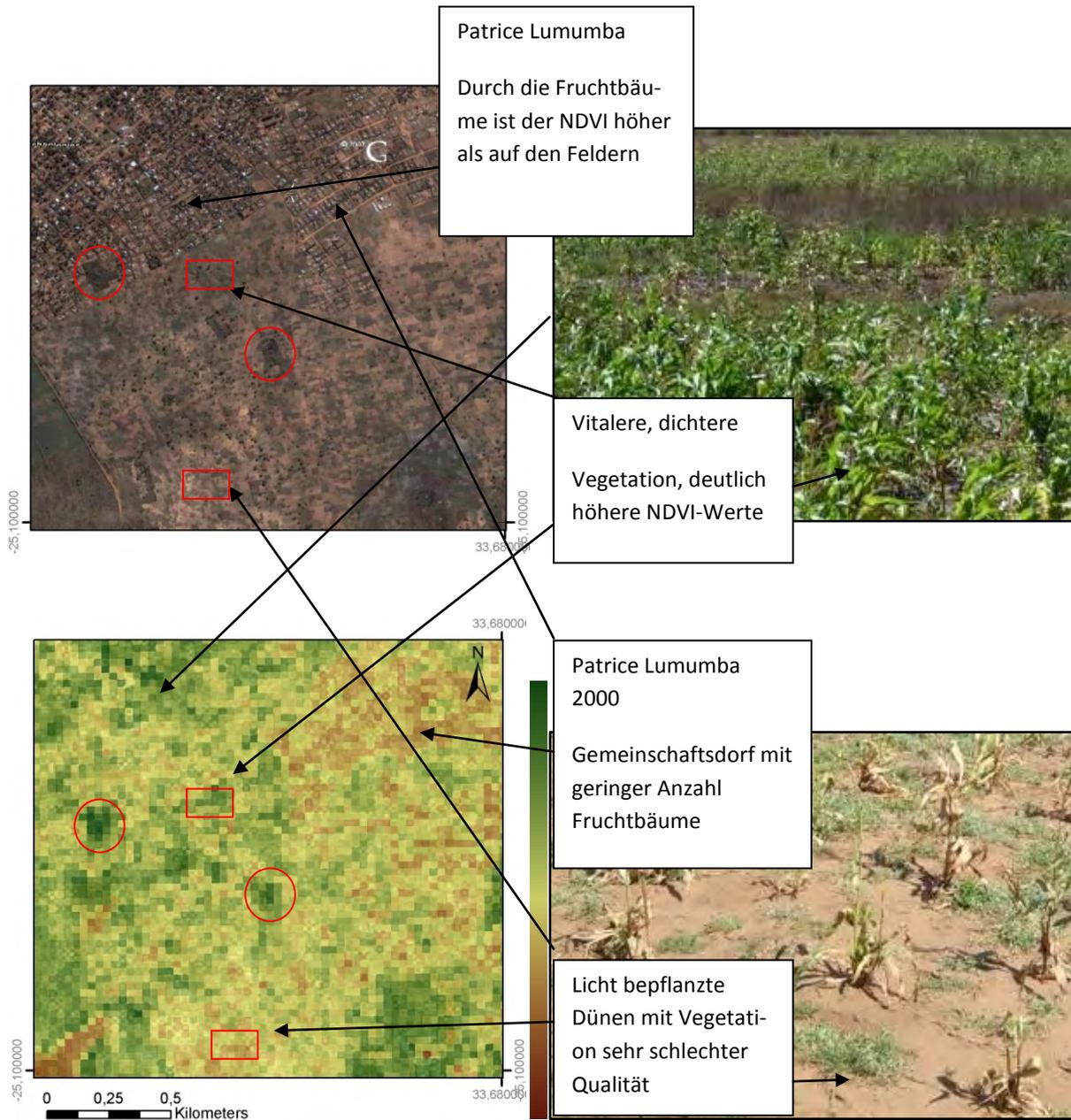
In dieser Arbeit soll der NDVI dazu dienen, die Landnutzungsveränderung im Dünengebiet bei Patrice Lumumba darzustellen und zu quantisieren. Die dichte Fruchtbaumvegetation wurde durch eine lichte Bepflanzung mit kaum vitalen Mais ersetzt. Verglichen werden die Aufnahmen aus den Jahren 1979, 1989 und 2001. Auch wenn die Aufnahme von 1979 eine Auflösung von 80 m besitzt, während die neueren Szenen mit einer Pixelgröße von 30 m deutlich hochauflösender sind, liefert die Darstellung doch ein ungefähres Bild der vorhandenen Vegetation 1979. Aufgrund der unterschiedlichen Sensoren der MSS, TM, und ETM+ Scanner, der sich unterscheidenden atmosphärischen Einflüsse und der leicht verschiedenen Zeitpunkte (und damit unterschiedlichen Stand der Vegetation) der Aufnahmen ist der Vergleich nicht 100% quantifizierbar. Vergleicht man die Zeitreihe, ist dennoch ein deutlicher Trend erkennbar.





**Abb. 55:** NDVI-Darstellung zu drei verschiedenen Zeitpunkten. Zur plastischeren Darstellung wird die NDVI Szene leicht transparent dargestellt und von einer panchromatischen-Landsat-Szene unterlagert

Sowohl die Entwaldung der Dünen als auch die Ausbreitung der im Tal gelegenen Zementstadt sind deutlich durch Rückgang der Vegetation zu erkennen. Waren die Dünen bei Patrice Lumumba und auch Inhamissa 1979 noch von vitaler Vegetation besiedelt, liegt der NDVI-Wert im Jahre 2001 im Bereich der Dünen bei Patrice Lumumba bis hin zum indischen Ozean oft im Bereich unter 0. Bereits 1989 ist ein deutlicher Rückgang erkennbar. Die Gründe sind nicht nur in der Entwaldung und lichten Bepflanzung der Dünen zu suchen, auch der sehr schlechte Zustand der Pflanzen und die ausbleibende Produktion von Chlorophyll aufgrund des Mangels an Nährstoffen in den Böden wird durch den niedrigen NDVI-Wert deutlich. Ist der Bedeckungsgrad allerdings zu gering, überwiegt die Reflexion des blanken Bodens und der Pixel erhält keine Strahlung der Pflanzen. Die geringeren Werte westlich der Dünen sind durch größere Wassergebiete zu erklären, welche zu früheren Zeiten noch Sumpf waren. Die Wohngebiete Xai-Xais in der Tavene-City zeigen überwiegend Werte höher als 0,5. Zurückzuführen ist dies auf den hohen Anteil an Fruchtbäumen, lediglich größere Höfe zeigen niedrige NDVI-Werte. Abb. 56 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt und vergleicht die Stelle mit einer hochauflösenden Szene sowie Foto-Aufnahmen. Selbst kleinräumige Unterschiede in der Pflanzenvitalität und Bodenbedeckung können erkannt werden. Vergleicht man die NDVI-Darstellung mit der Bodenkarte in Anhang 9, lässt sich durchaus ein Zusammenhang feststellen. Wie später noch klar wird, ist es möglich durch die Qualität der Pflanzen erste Schlüsse auf den Boden zu folgern. Daher kann der NDVI-Index als erste grobe Orientierung zur Bodennutzung und -qualität Verwendung finden.



**Abb. 56:** Analyse des NDVI bei Patrice Lumumba 2000. Die roten Rechtecke zeigen den Standort der Fotos, die roten Kreise zeigen die Darstellung größerer Grünflächen im NDVI-Bild. Oben links: QuickBirdaufnahme von 2005 (Auflösung 1 m). Oben rechts: eigene Aufnahme 2007. Unten links: NDVI von 2001 (Auflösung 30 m). Unten rechts: eigene Aufnahme 2007

Zwar ist ein Vergleich aufgrund der unterschiedlichen Sensoren nicht völlig korrekt, dennoch lässt sich durch Subtraktion der Bilder eine aussagekräftige change detection erstellen. Problematisch sind unterschiedliche atmosphärische Einflüsse zu unterschiedlichen Aufnahmezeiten, sowie die Alterung des Sensors mit fortwährendem Verbleib in der Umlaufbahn. Abb. 57 liefert trotzdem ein überzeugendes Ergebnis, zeigt sie doch klar die Veränderungen zwischen 1989 und 2001 auf. Deutlich ist der Ausbau der im Tal gelegenen Zement-

stadt erkennbar (rot). Ebenso eindeutig erfassbar ist die drastische Veränderung der Dünenlandschaft zwischen Patrice Lumumba und dem indischen Ozean. Das Abholzen und Abbrennen der Wälder und die Umwandlung in landwirtschaftlich nutzbare Flächen ist an einen Rückgang der Vegetation gekoppelt. Insbesondere der Küstenstreifen und die hohen Dünen zeigen in der Aufnahme von 2001 kaum noch Reflexion im nahen Infrarot, ganz im Gegensatz zu der Aufnahme von 1989. Keine Veränderung (gelbe Farbe) sowie leichte Zunahme (grün) zeigen die Wohnbezirke mit Fruchtbäumen sowie das Weideland im Osten der Dünen. Die offensichtliche Abnahme im Talgebiet des Limpopo ist auf sehr feuchte Flächen zum Zeitpunkt der zweiten Aufnahme zurückzuführen, welche 1989 noch vegetationsbedeckt waren (siehe auch TC-Transformation in Anhang 8).

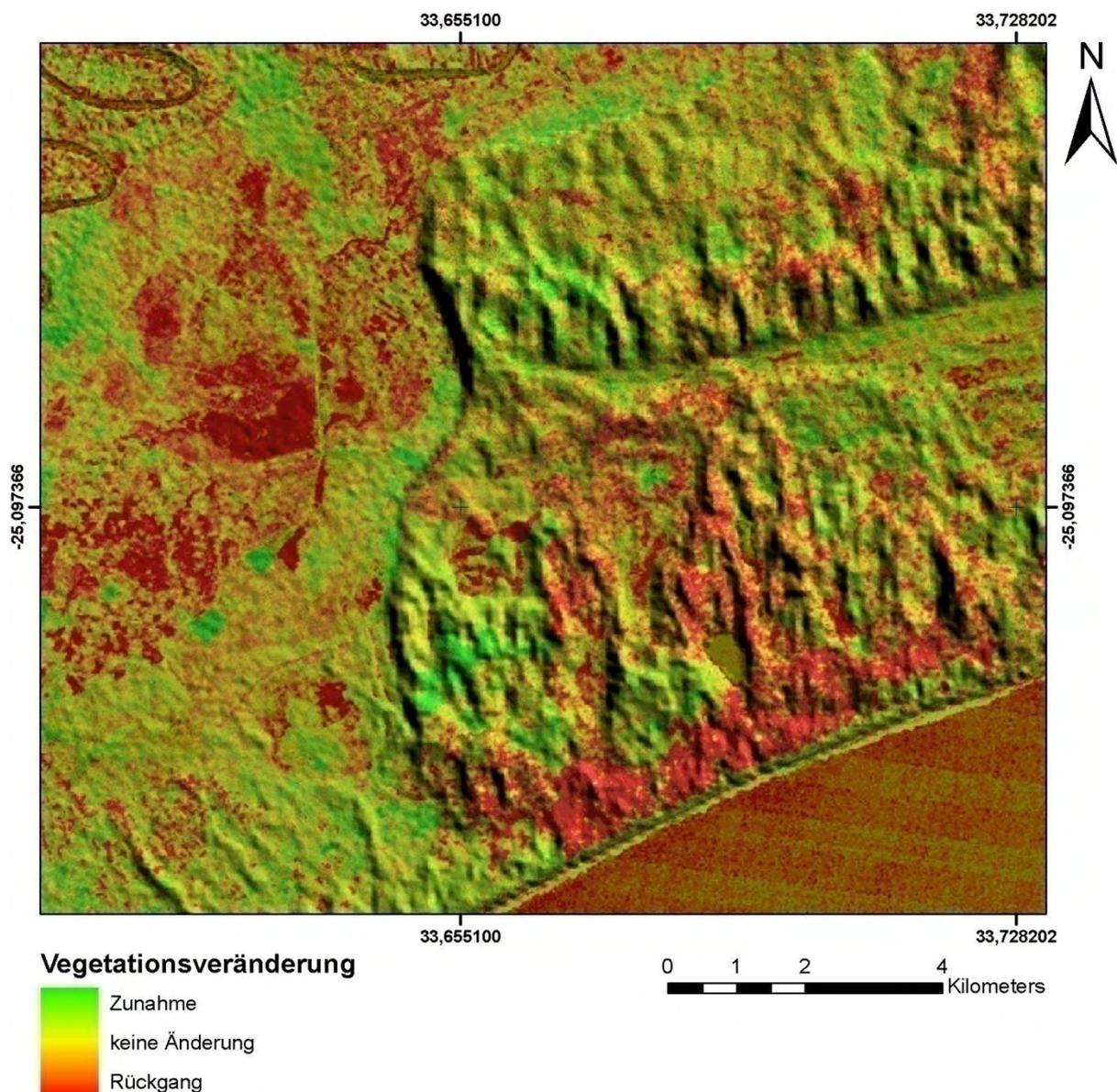


Abb. 57: change detection der Vegetation (NDVI) der Landsataufnahmen von 1989 und 2001. Zur besseren Darstellung mit einem Hillshade des DEMs texturiert und leicht transparent mit dem panchromatischen Kanal des Landsat 7 unterlegt

#### 4.2.2 Die Böden der Dünen nach WRB

Gemäß der FAO Klassifikation werden Böden, die innerhalb der obersten 100 cm des Bodens grobkörniger als sandiger Lehm sind und in allen Subhorizonten der obersten 100 cm weniger als 35 % Gesteinsfragmente oder andere grobe Fragmente besitzen als Arenosole eingestuft (FAO, 1988) (Zech & Hintermaier-Erhard, 2002). Die  $KAK_{\text{eff}}$  beträgt weniger als 4 cmol/kg. Dies trifft auf sämtliche Böden der älteren Dünen zu. Es liegen keine direkten Horizonte außer dem A und C Horizont vor. Es fehlen entscheidende Tongehaltszunahmen oder Tonanreicherungs-Lamellen innerhalb der obersten 125 cm des Bodens, es fehlt ein Albic E-Horizont mit einer Mächtigkeit von mindestens 50 cm, es fehlen Gleyic Eigenschaften innerhalb der obersten 100 cm des Bodens und das Material ist nicht kalkreich (calcaric). Die Böden wurden als Ferralic Arenosole diagnostiziert. Dies sind Arenosole, die Ferralic Eigenschaften innerhalb der obersten 125 cm des Bodens besitzen und deren unmittelbar auf den A-Horizont folgender Horizont eine Farbsättigung (chroma) von 5 oder mehr oder einen Farbton (hue) roter als 10 YR aufweist (FAO, 1988). Ab einer Tiefe von etwa 80 cm weisen die Dünenböden ausnahmslos eine deutliche Rotfärbung auf (mind. 5YR trocken) und zeigen eine deutliche Zunahme an dithionitlöslichen Eisenoxiden.

Arenosole sind typische Sandböden der sommerfeuchten Tropen. Eine organische Auflage sowie eine Skelettfraktion >2 mm fehlen vollständig. Die Bodenart ist schwach toniger Sand (St2). Die Böden sind nur schwach entwickelt; der Gehalt an amorphen Eisenoxiden niedrig. Zwar nimmt der Tongehalt in der Regel mit der Tiefe um etwa 2-3 % zu, dies ist allerdings für Luvic Eigenschaften nicht ausreichend. Das Grundgefüge ist ein Einzelkornggefüge, ein Aggregatgefüge ist nicht erkennbar (Bodenkunde AG, 2005).

Nähert man sich den Küstendünen, ist keine Bodenentwicklung mehr erkennbar. Der Anteil an amorphen Eisenoxiden beträgt nahezu Null. Es findet sich kaum Ton und Schluff (maximal 5 %). Diese Böden werden daher als Regosole eingestuft. Regosole sind Böden aus nicht verfestigtem Material mit Ausnahme von Material, das grobkörnig und mächtiger als 100 cm ist; es treten keine diagnostischen Horizonte auf; es fehlen Gleyic Eigenschaften innerhalb der obersten 50 cm des Bodens; es fehlen die diagnostischen Merkmale der Vertisole oder Andosole; es fehlen Salic Eigenschaften. Aufgrund der hohen Basensättigung werden diese Böden als Eutric Regosole diagnostiziert. Dies sind Regosole, die eine Basensättigung (in  $\text{NH}_4$ -Acetat) von 50 % oder mehr mindestens in der Tiefe zwischen 20 und 50 cm unterhalb der Bodenoberfläche besitzen, in dieser Tiefe aber nicht kalkhaltig (calcareous) sind (FAO, 1988).

Die sandige Textur beeinflusst maßgeblich die Eigenschaften des Bodens und damit auch die Nutz- und Fruchtbarkeit.

### 4.2.3 Einteilung

Nimmt man die gewonnenen Daten der Feldarbeit, der Laboranalysen und der multispektralen Analyse als Grundlage, lässt sich das untersuchte Gebiet in drei Areale aufteilen. Die Kriterien für die Aufteilung sollen insbesondere sein:

- Die Geländemorphologie (Hangneigung, Höhe, Exposition)
- Die Bodenprofilansprache nach KA5 (AG Bodenkunde 2005)
- Der Anteil an amorphen Eisenoxiden als Anhaltspunkt der Bodenentwicklung
- Hue, Value, Chroma nach Munsell
- Der pH-Wert ( $\text{CaCl}_2$ ) und elektrische Leitfähigkeit
- $C_{\text{org}}$  und  $N_{\text{ges}}$ -Gehalt sowie die  $KAK_{\text{eff}}$
- Korngrößenverteilung, speziell Tongehalt
- Die Spektrale Signatur, speziell der Spektralbereiche im nahen Infrarot (0,78-0,9  $\mu\text{m}$ ) und mittleren Infrarot (2,08-2,35  $\mu\text{m}$ ), NDVI
- Anthropogene Nutzung

Bereits im bisherigen Verlauf dieser Arbeit haben sich drei Gebiete herauskristallisiert, die die geforderten Unterscheidungen erfüllen. Die Gebiete sind kartographisch in Anhang 9 dargestellt.

#### Gebiet 1

Das erste Gebiet sind die Dünen jüngerer Entstehung. Diese Dünen liegen in einer Entfernung von maximal 5 km zur Küste. Die Hangneigung beträgt in der Regel mindestens 5-10° (Durchschnitt 5°), an steilen Hängen auch bis zu 30° (siehe Abb. 21), die Höhe der Dünengipfel schwankt zwischen 60 und 97 m. In den Tälern dieses Gebietes befinden sich zwei Süßwasserseen; bereits ausgetrocknete Seen sind an verbliebenen Sümpfen und an der Konzentration hoher Feuchtigkeit im Satellitenbild zu erkennen (siehe TC-Transformation in Anhang 8). Die Böden sind sehr schwach entwickelt und werden als Regosol diagnostiziert. Der Gehalt an organischer Substanz ist sehr niedrig. Der Tongehalt beträgt 3-5 % in den oberen 40 cm und steigt in größerer Tiefe maximal um 2 %. Entsprechend niedrig sind der Gehalt basischer Kationen und die  $KAK_{\text{eff}}$ . Ebenfalls sehr gering sind der Stickstoffgehalt und die EC. Dank hoher jährlicher Niederschläge ist eine Bodenversalzung ausgeschlossen; eine ständige Nachlieferung basischer Kationen durch Seewinde bewirkt einen pH-Wert im mäßig-sauren Bereich und einen basengesättigten Boden. Leitprofil 4 (siehe Anhang) stellt exemplarisch die Bodenverhältnisse dieser Böden dar, Tab. 19 gibt die Werte der entnommenen Proben in diesem Gebiet an. Neben den sehr hohen Sandanteilen (~95 %) ist besonders die gleichmäßige Verteilung der Ton/Schluff Fraktion auffällig. Dies ist, wie bereits erwähnt, auf die äolisch-marine Entstehung der Dünen zurückzuführen. Der insgesamt sehr geringe Tonanteil führt zu der Bodenart reiner Sand (Ss). Der hohe Anteil an Fein- und Mittelsand gliedert den Sand meist exakt in mSfs, dessen gute Wasserleitfähigkeiten in Kapitel 4.1.4.1.3 beschrieben wurden.

Diese Böden besitzen einen geringen Teil an Eisenoxiden mit einer Zunahme in einer Tiefe von 20-60 cm, die Färbung liegt daher bei 10 YR (trocken). Die Helligkeit nach Munsell beträgt 5, die Intensität 6 (trocken). Der C-Horizont ist, abhängig vom Erosionsgrad, bei etwa 80 cm unter GOK zu finden und zeigt typische Ferralic Eigenschaften.

Selbst weit entlegene Dünen werden landwirtschaftlich genutzt. In den stets verwendeten Mischkulturen überwiegt Mais, Maniok und Erdnuss nehmen einen geringeren Teil ein. Die Qualität der Pflanzen ist erwartungsgemäß sehr schlecht. Die Erschließung dieses Gebietes erfolgte nach der letzten großangelegten Umsiedelung zahlreicher Menschen aus der Talebene in die Dünen nach der großen Flut im Jahr 2000. Das neugegründete Gemeinschaftsdorf Patrice Lumumba 2000 basiert fast vollständig auf Subsistenzwirtschaft in dieser Landschaft. Die Erträge sind gering, die Wege weit.

Probe	pH (CaCl <sub>2</sub> )	EC [µS]	C <sub>org</sub> [%]	N <sub>ges</sub> [%]	C/N	KAK **	Na *	Ca *	K *	Mg *	BS [%]	S [%]	Ton [%]	U [%]
<i>Tiefe 0-40 cm</i>														
Mp21	4,85	12	0,14	0,04	4	1,3	0,2	0,5	0,1	0,3	85			
Mp22	4,79	9	0,15	0,002	50	1,1	0,2	0,4	0,07	0,3	87	95	3	2
Mp37	4,72	9	0,15	0,02	8	1,3	0,2	0,6	0,08	0,3	93			
Mp38		7	0,11	0,06	2	0,8	0,17	0,2	0,08	0,2	90	96	3	1
<i>Tiefe &gt;40 cm</i>														
Lp4	4,95	11	0,08	0,03	4	1,4	0,2	0,4	0,07	0,5	90	95	3	2
Lp11	4,72	7	0,15	0,03	6	1,1	0,2	0,4	0,06	0,3	90	94	5	1
Lp12	4,71	13	0,25	0,06	3	1,5	0,4	0,3	0,35	0,3	88			
Lp25	4,59	7	0,2	0,06	4	1,4	0,2	0,7	0,11	0,4	94			
Ø 0-40	4,75	9	0,15	0,036	10	1,1	0,2	0,4	0,12	0,3	89	95	3,5	1,5
Ø >40 cm	4,73	8	0,10	0,032	6	0,8	0,14	0,2	0,05	0,15	86	94	4,5	1,5

Tab. 19: Bodenverhältnisse der jungen Dünen (Gebiet 1). Aufgrund der nur geringen Anzahl an Mischproben wurden die Leitprofile in die Tabelle mit aufgenommen

\*\* KAK<sub>eff</sub> in cmol/kg **sehr gering, gering, mittel, hoch, sehr hoch** \* austauschbare Kationen in cmol/kg Ca, Mg, K, N<sub>ges</sub>: **gering, mittel, hoch** S=Sand, U=Schluff

Der spektrale Reflexionsbereich wird durch die trockenen wuchs- und humusarmen Sandoberflächen bestimmt und durch Minerale und Eisenoxide dominiert. Ruft man sich Abb. 28 in Erinnerung, erkennt man deutliche Parallelen zu der Kurve des trockenen Bodens. Die Strahlung hat ein absolutes Maximum im mittleren Infrarotbereich (~1,7 µm), während die Bereiche des nahen Infrarots aufgrund der spärlichen Maisbepflanzung weniger stark ausgeprägt sind. Aufgrund der sehr trockenen Oberfläche ist die Reflexion über den gesamten

Spektralbereich deutlich höher als im Talgebiet, da trockene Böden das Licht wesentlich stärker reflektieren als wassergesättigte.

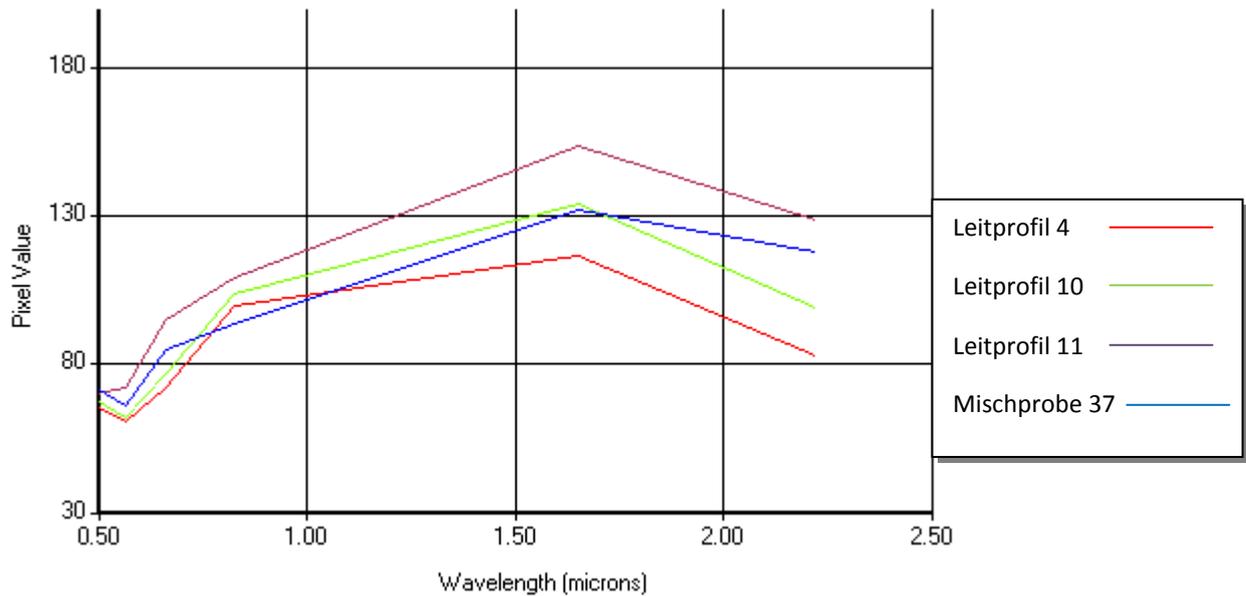


Abb. 58: Spektrale Profile der jungen Dünen der 6 Bänder der Landsat ETM+-Szene von 2001



Abb. 59: junges Dünenfeld  
Richtung Ozean



Abb. 60: junges Dünenfeld und Süßwassersee

### Gebiet 2

Das zweite Gebiet ist morphologisch flacher (maximal  $9^\circ$ , meist jedoch nicht  $>2^\circ$ , siehe Abb. 21) und weiter von der Küste entfernt (3,5 – 7 km). Es beginnt mit dem Abflachen der Dünen aus Gebiet 1, umfasst Teile des Dorfes Patrice Lumumba und Patrice Lumumba 2000 und endet mit dem erneuten Ansteigen der Dünen innerhalb des Dorfes. Dieses Gebiet ist aufgrund seiner Morphologie etwas geschützter und zeigt daher deutlichere Anzeichen einer Bodenentwicklung. Die nur geringe Höhe (schwankt zwischen 15 und 50 m), die flache Lage und das Angrenzen einiger Sumpfgebiete (ausgetrocknete Seen) sprechen für einen historischen Wassereinfluss. Der Tongehalt ist höher und steigt mit der Tiefe deutlich an (auf bis zu 10 %), der Sandgehalt ist daher niedriger. Entsprechend höher ist die  $KAK_{\text{eff}}$ . Der höhere Nährstoffgehalt bewirkt einen besseren Wuchs der Pflanzen, was wiederum einen höheren Gehalt an organischer Substanz bewirkt. Dies färbt den Boden deutlich dunkler, erhöht den Stickstoffgehalt und verbessert die Wasserhaltefähigkeiten. Die Pflanzen werden höher, stehen dichter und liefern mehr Ertrag.

Die Besonderheit der Arenosole dieses Distrikts ist ein paläontologischer Oberboden in einer Tiefe von 40-80 cm unter GOK, zu erkennen an dem erhöhten amorphen Eisenoxidgehalt und einer deutlicheren Rotfärbung als in den oberen 40 cm. Dieser Zwischenhorizont zeigt stellenweise einen erhöhten Nährstoffgehalt und eine höhere KAK. Eine Entstehungsmöglichkeit ist historischer Einfluss von Hangwasser der umliegenden Dünen bzw. eine Verbindung zu weiteren Feuchtstellen über längere Zeit. Betrachtet man die TC-Transformation (Anhang 8) und eine Höhendarstellung sind ehemalige Verbindungen denkbar. Die dreidimensionale Grafik in Anhang 11 verdeutlicht dies. Die Umwandlungsnachweise genügen jedoch nicht, um einen Cambic-Horizont zu kennzeichnen. Exemplarisch sind im Anhang die

Leitprofile 3 und 5 zu finden. Dabei wird deutlich, dass bereits kleine morphologische Unterschiede zu einer abweichenden Bodenentwicklung führen können.

Bessere Erreichbarkeit und höherer Ertrag machen dieses Gebiet für die Bewohner den Umständen entsprechend landwirtschaftlich besser nutzbar. Dieses Gebiet wurde besonders genau untersucht, da hier ein Großteil der Bauern ihre Felder besitzen.

Probe	pH CaCl <sub>2</sub>	EC [µS]	C <sub>org</sub> [%]	N <sub>ges</sub> [%]	C/ N	KAK **	Na *	Ca *	K *	Mg *	BS [%]	S [%]	Ton [%]	U [%]
	<i>Tiefe</i>													
	<i>0-2</i>													
	<i>cm</i>													
Mp7	5,3	28	0,29	0,03	9	2,7	0,2	1,3	0,25	0,7	91			
Mp8	5,0	18	0,29	0,03	9	2	0,2	0,9	0,16	0,46	87			
Mp9	4,9	20	0,25	0,03	8	1,7	0,24	0,7	0,12	0,4	83			
Mp10	5,2	24	0,35	0,04	8	3	0,4	1	0,6	0,59	94	89	6	5
Mp11	4,8	10	0,33	0,05	6	1,9	0,17	0,9	0,16	2	86			
Mp12	4,8	13	0,22	0,05	4									
Mp13	4,8	23	0,28	0,03	11									
Mp14	5,3	25	0,27	0,02	12									
	<i>Tiefe</i>													
	<i>0-40</i>													
Mp7	5,1	12	0,33	0,04	7	2,3		1,3	0,16	0,69	95			
Mp8	4,8	12	0,24	0,03	8	2	0,2	0,9	0,11	0,62	91			
Mp9	4,9	14	0,25	0,06	5	2,1	0,2	1	0,12	0,6	93			
Mp10	5	11	0,29	0,05	6	2,2	0,2	1,1	0,15	0,64	94	87	7	6
Mp11	5,3	19	0,28	0,04	6	3	0,18	1,6	0,17	0,9	95			
Mp12	4,9	8	0,26	0,05	5	1,4	0,16	0,67	0,1	0,4	89			
Mp13	5	10	0,21	0,02	10	2,1	0,2	1	0,14	0,6	92			
Mp14	4,5	16	0,25	0,04	7	1,4	0,2	0,56	0,09	0,37	88			
Mp15	5,3	25	0,47	0,07	7	3,1	0,2	2	0,21	0,7	98	87	7	6
Mp16	4,7	10	0,23	0,08	3	2	0,2	0,9	0,18	0,4	85			
Mp17	4,8	13	0,28	0,04	7	2,2	0,17	1,1	0,15	0,49	89			
Mp18	4,6	12	0,24	0,02	11	1,1	0,17	0,4	0,12	0,32	85			
Mp19	4,7	16	0,25	0,04	7	1,5	0,21	0,7	0,06	0,43	91	90	5	5
Mp26	4,4	19	0,24	0,02	13	1,7	0,19	0,67	0,16	0,51	87			
Mp27	5,1	19	0,25	0,05	5	2,5	0,19	1,12	0,22	0,69	88	90	5	5
Mp28	4,7	14	0,28	0,02	12	1,7	0,15	0,7	0,15	0,41	81			
Ø 0-2	5	20	0,29	0,04	8	2,3	0,24	0,96	0,26	0,83	88	89	6	5
Ø 0-40	4,9	14	0,27	0,04	7	2	0,19	0,98	0,14	0,55	90	88	6	5,5
cm														

Tab. 20: Ergebnisse der Dünenmischproben aus Gebiet 2. Aufgrund der guten Aussagekraft der zahlreichen Proben sind die Leitprofile nicht aufgeführt (siehe Anhang)

\*\* KAK<sub>eff</sub> in cmol/kg **sehr gering, gering, mittel, hoch, sehr hoch** \* austauschbare Kationen in cmol/kg Ca, Mg, K, N<sub>ges</sub>: **gering, mittel, hoch** S=Sand, U=Schluff

Diese Faktoren spiegeln sich in der spektralen Reflexion wieder. Ganz anders als im Gebiet der jungen Dünen finden sich die Reflexionsmaxima mehrheitlich nicht im mittleren, sondern im nahen Infrarot. Der Grund ist die wesentlich dichtere Bepflanzung mit Mischkulturen und die ausgeprägtere Vitalität der Maisstauden. Der Oberboden ist aufgrund des höheren Gehaltes an organischer Substanz dunkler und feuchter, aber auch hier sind hohe Refle-

xionswerte im mittleren Infrarot zu beobachten, da die trockene Sandoberfläche oft einen großen Teil der Oberfläche einnimmt.

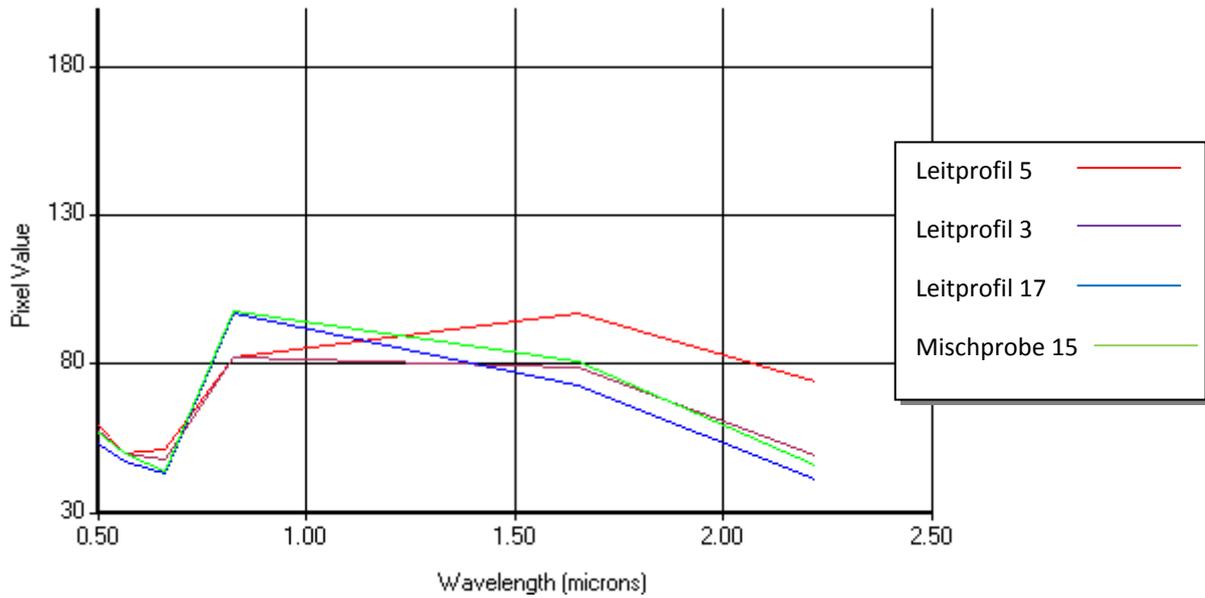


Abb. 61: Spektrale Profile einiger Proben im Dünengebiet 2



Abb. 62: flaches Dünenfeld in Dorfnähe



Abb. 63: flaches Dünenfeld in Dorfnähe

### Gebiet 3

Die dritte Fläche wird aus sehr hohen älteren Dünen gebildet und umfasst die Wohnbezirke Xai-Xai, Inhamissa, Patrice Lumumba und teilweise Patrice Lumumba 2000. Die Hauptnutzung bilden kleine Wohnhäuser mit zahlreichen Fruchtbäumen, insbesondere Mango und Kokospalmen. Die Häuser sind umgeben von zahlreichen parzellierten Feldern die teilweise ganze Hänge durchziehen. Hauptanbaupflanze ist Mais, gemischt mit Maniok, Erdnuss, Süßkartoffel und etwas Bohne und Kohl. Den südlichen Teil bestimmen zahlreiche längliche Dünen (NNW nach SSE) mit einer maximalen Höhe von ca. 90 m. Die Hänge der hohen Dünen sind bis zu 25° geneigt, der Durchschnitt liegt bei 4°.

Die Bodeneigenschaften entsprechen nahezu dem zweiten Gebiet, allerdings geht der A-Horizont nach etwa 60 cm direkt in den roten C-Horizont über, wobei ein Anstieg des Tonanteils um bis zu 6 % zu beobachten ist (auf maximal 12 %). Die Beprobung einer Düne am Osthang (Mp32), Westhang (Mp34) und auf dem Gipfel (Mp33) zeigen kleinräumige Unterschiede. So zeigt der Westhang eine doppelt so hohe KAK wie der erosionsanfällige Gipfel. Die entnommenen Proben entstammen ausschließlich aus größeren landwirtschaftlich genutzten Gebieten, in bewohnten Arealen mit Fruchtbäumenutzung konnten leider keine Bodenproben entnommen werden, daher ist nicht geklärt inwiefern Fruchtbäume, Siedlungsabfall und kleine Gemüsegärten Einfluss auf die Bodeneigenschaften nehmen.

Probe	pH (CaCl <sub>2</sub> )	EC [µS]	C <sub>org</sub> [%]	N <sub>ges</sub> [%]	C/N	KAK **	Na *	Ca *	K *	Mg *	BS [%]	S [%]	Ton [%]	U [%]
<i>Tiefe 0-40</i>														
Mp29		12	0,27	0,04	7	1,8	0,2	0,8	0,2	0,5	90			
Mp30	5,14	22	0,24	0,05	5	2,4	0,2	1	0,24	0,6	88	94	4	2
Mp31	5,26		0,31	0,06	5	1,9	0,15	0,8	0,21	0,6	93			
Mp32	4,87	10	0,21	0,05	4	2,1	0,24	1	0,15	0,5	92			
Mp33	4,64	13	0,57	0,06	9	1,6	0,2	0,7	0,12	0,4	89	90	6	4
Mp34	5,91	28	0,28	0,05	5	2,9	0,14	2	0,16	0,5	98			
<i>Tiefe &gt;60</i>														
Lp22	4,68	14	0,47	0,05	5	1,5	0,2	1,1	0,13	0,4	89			
Lp22	4,08	14	0,12	0,01	11	0,9	0,18	0,2	0,11	0,3	86	83	12	5
Ø 0-40 cm	5,1	17	0,34	0,05	6	2,03	0,19	1,06	0,17	0,5	91	92	5	3

Tab. 21: Bodeneigenschaften des Dünengebietes 3

\*\* KAK<sub>eff</sub> in cmol/kg **sehr gering, gering, mittel, hoch, sehr hoch** \* austauschbare Kationen in cmol/kg Ca, Mg, K, N<sub>ges</sub>: **gering, mittel, hoch** S=Sand, U=Schluff

Das spektrale Profil entspricht im Bereich der Bodenproben Gebiet 2, da auch hier sich die Strahlung der Vegetation mit der des trockenen Bodens vermischt. Exemplarisch wurden in Abb. 64 zwei Profile aus dem Siedlungsbezirk mit Fruchtbäumen aufgenommen. Deutlich erkennbar ist der extreme Anstieg im nahen Infrarot, hervorgerufen durch die Blattkronen, und der Abfall in höheren Wellenlängen, da der trockene Boden völlig überdeckt ist.

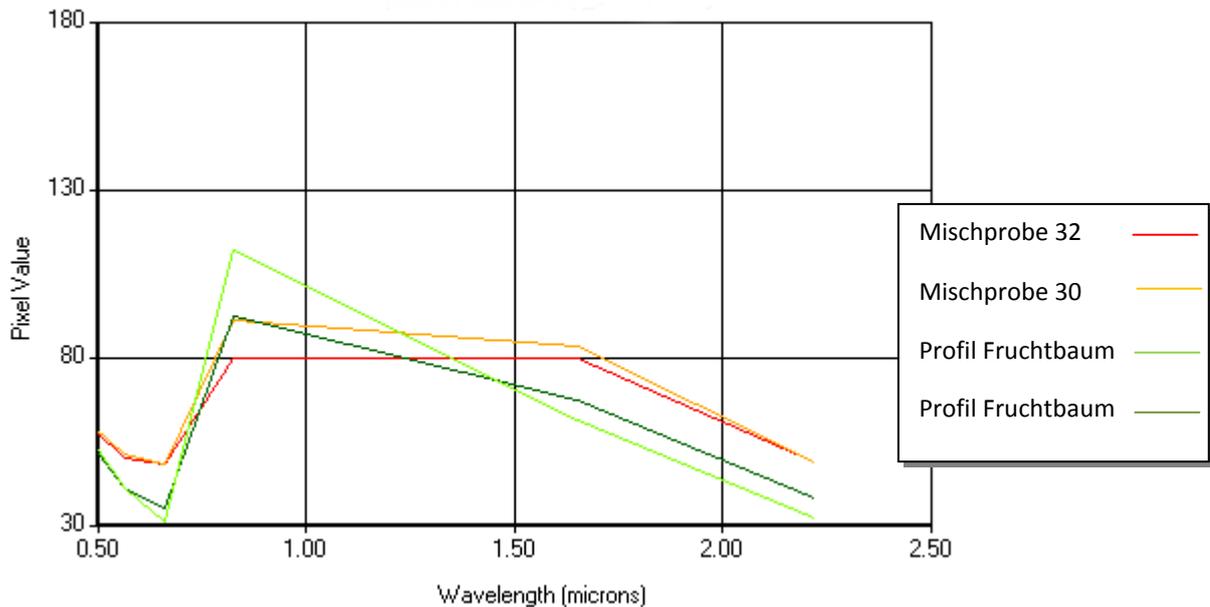


Abb. 64: Spektrale Profile von Dünengebiet 3



Abb. 65: alte Dünen bei PL mit Siedlungen, Fruchtbäumen und Landwirtschaft

#### 4.2.4 Bodenfruchtbarkeit

Parallel zur Fruchtbarkeit der Talböden sollen die Dünenböden anhand selbiger Kriterien auf ihre Nutzbarkeit zusammenfassend bewertet werden. Aufgrund fehlender Relevanz entfällt das Kapitel über Bodenversalzung, aufgenommen wird dagegen aus gegebenem Anlass ein Abschnitt über Bodenerosion. Dabei werden die bereits eingeteilten drei Gebiete (siehe Anhang 9) aufgegriffen und auf die jeweiligen Tabellen Bezug genommen. Zwar gibt es Unterscheidungen zwischen den einzelnen Gebieten, die Problematik ist jedoch meist identisch.

##### 4.2.4.1 Physische Faktoren

###### 4.2.4.1.1 Geländemorphologie

Die Morphologie der Dünen bietet zwar Schutz vor Hochwasser, ist jedoch für Landwirtschaft wenig geeignet. Steile, lange Wege erschweren nicht nur den Menschen den Zugang, die hohe Hangneigung (Abb. 21) und unregelmäßige extreme Expositionen (Abb. 22) sind dem Wuchs der Pflanzen hinderlich. Die einzige positive Ausnahme in dieser Beziehung bildet Gebiet 2.

#### 4.2.4.1.2 Durchwurzelung

Ein fehlendes Aggregatgefüge und eine sehr sandige Körnung ermöglichen eine optimale Durchwurzelung für Pflanzen. Besonders unter der Erde gedeihende Früchte und Knollengewächse wie Erdnuss und Maniok können sich problemlos in den Boden eingraben und leicht geerntet werden. Die Struktur ist bis in mehrere Meter Tiefe homogen und von Gesteinsfragmenten unbeeinflusst.

Die effektive Durchwurzelungstiefe (Mächtigkeit in der die nFK von den Pflanzenwurzeln voll ausgeschöpft werden kann) ist bei sandigen Böden eher gering und steigt nur mit wachsendem Tonanteil von 8 dm (bei mSfs) auf 10 dm (bei St2) (Bodenkunde AG, 2005).

#### 4.2.4.1.3 Wasser- und Lufthaushalt

Die sandige Textur der Böden bedingt sehr gute Wasserleitfähigkeiten (kf-Werte bis zu 675 cm/Tag in Gebiet 1; 150 cm/Tag in Gebiet 2 und 3) und sehr schlechte Wasserhaltefähigkeiten. Das Wasser versickert durch die groben Poren rasch aus dem Wurzelraum der Pflanzen. Der Anteil an Totwasser ist aufgrund der Tongehalte von maximal 10 % nur marginal. Die nutzbare Feldkapazität ist in Gebiet 2 und 3 mittel (18 %), in Gebiet 1 nur gering (9 %). Die Wasserspannungskurven und die Anteile der nFK, des TW und der LK sind Abb. 46 zu entnehmen. Entsprechend gering zeigte sich der Wassergehalt der in der Trockenzeit entnommenen Proben. In Gebiet 2 und 3 stieg der Gehalt immerhin von etwa 5 % in den oberen 40 cm auf bis zu 10 % in größeren Tiefen. Die reinen Sande von Gebiet 1 hingegen beinhalteten in den oberen 40 cm lediglich 2 %, mit einem Anstieg auf maximal 4 % in bis zu 80 cm Tiefe (siehe Tiefenfunktionen im Anhang). Im Verlauf der Trockenzeit werden die Wasservorräte der Böden weitgehend aufgebraucht bis kaum noch pflanzenverfügbares Wasser vorhanden ist und die LK nahezu 100 % beträgt. Mit Beginn der Regenzeit füllen sich die Poren wieder mit Wasser, die pflanzenverfügbare Wassermenge steigt an und die LK sinkt entsprechend ab. Die Wasservorräte des Bodens sind nun wieder vollständig aufgefüllt, so dass Wassersättigung im Boden und verstärkter Oberflächenabfluss auftreten. Insgesamt ist der Pflanzenbau durch den klimatisch bedingt stark schwankenden Wasserhaushalt begrenzt, der nur in der Regenzeit praktikabel für Regenfeldbau nutzbar ist. Zwar sind die Niederschläge mit 1000/Jahr hoch, doch die geringe Verfügbarkeit von Bodenwasser im Verlaufe eines Jahres ist problematisch (Achnich, 1986).

Aufgrund der sehr sandigen Böden und den damit verbundenen groben Poren, sind die Wurzeln meist optimal mit Sauerstoff versorgt.

#### 4.2.4.1.4 Bodenerosion

Die Bodenerosion in den Dünen sowohl durch Wasser als auch durch Wind, stellt ein signifikantes Problem dar und gäbe Material für eine separate Arbeit.

Es werden gemäß Landon (1991) sämtliche Voraussetzungen für Erosionsanfälligkeit erfüllt:

- Hohe Hangneigung von 5-10°, oft auch >20° (siehe Abb. 21)
- Ganzjährig starke Winde

- Sehr wenig organisches Material (~0,25 %)
- Sehr geringe Bodenbedeckung, schwache Durchwurzelung
- Starke saisonale Niederschläge und lange Trockenzeiten (siehe Abb. 6)
- Lose Bodenstruktur, da Einzelkorngefüge vorliegt

Als der Erosion entgegenwirkender Faktor kann lediglich die sehr grobkörnige Bodenart aufgezählt werden, da die Sande zu schwer sind, um von Winden aufgenommen zu werden.

Die steilen Dünen in Patrice Lumumba und Richtung indischer Ozean zeigen bereits deutliche Spuren anhaltender Erosion. Ist die ohnehin spärliche Vegetationsdecke aufgerissen, untergräbt der Wind diese und trägt den Oberboden ab. Die Vegetation wird unterhöhlt und stirbt ab (siehe Abb. 66). Ein noch größeres Problem sind bereits kultivierte Böden. Die spärliche Maisbewuchs bedeckt nur einen Bruchteil der Oberfläche da die Wasser- und Nährstoffkonkurrenz groß ist, und liefert große Teile der Erosion aus. Ohnehin geringe Tonanteile werden ausgeblasen. Auch Sand wird durch starke Winde verlagert. So wurde an steilen Dünen in der Ortschaft ein oftmals stark reduzierter Oberboden beobachtet. Aufgrund nur marginaler Veränderungen an Nährstoff- Ton- und Humusgehalt in den Tiefenfunktionen ist der Abtrag des Oberbodens allerdings keineswegs dramatisch. Anders stellt es sich bei den mehrere Meter tiefen Erosionsrillen dar, welche abfließende Regenfälle hinterlassen (siehe Abb. 67).



Abb. 66: Winderosion auf den Dünengipfeln. Der Oberboden wurde abgetragen und die Grasnarbe untergraben



Abb. 67: Wassererosion an den Westhängen der Dünen-Arenosole. Deutlich sind die tiefen Spülrinnen erkennbar

#### 4.2.4.2 Pflanzennährstoffe

Tropische Sandböden sind generell sehr nährstoffarm (Finck A. , 1986). Der niedrige Tongehalt bietet nur geringe Speichermöglichkeiten, der geringe Humusgehalt keine ausreichende Quelle organisch gebundener Nährstoffe. Die KAK ist entsprechend gering (0,8 – 3,1 cmol/kg im Oberboden), die Gehalte an Stickstoff sehr niedrig (0,02 – 0,08 %). Die Tiefenfunktionen (siehe Anhang) zeigen auch in größerer Tiefe keinen nennenswerten Zuwachs, und auch verwitterbares Gestein ist nicht vorhanden. Als einzige nachlieferbare Nährstoffquelle kann somit neben der Mineralisierung der wenigen organischen Substanz nur der Eintrag durch feuchte Seewinde sowie das Abbrennen von brachliegenden Flächen angebracht werden. Auf der anderen Seite ist der Entzug durch anspruchsvolle Pflanzen enorm. Sowohl Mais als auch Erdnuss entziehen dem Boden große Mengen an Nährstoffen (siehe Kapitel 2.4.3). Lediglich Maniok wirkt eher schonend auf den Nährstoffhaushalt. Die Pflanzen werden oft komplett abgeerntet und die Nährstoffe gehen dem System verloren. Auch der Verlust durch eine Auswaschung in der Regenzeit ist aufgrund der fehlenden Sorptionsmöglichkeiten groß. Pflanzenverfügbares Phosphor, ebenfalls ein essentieller Nährstoff, überschreitet kaum Werte >1 mg/kg, was für akuten Phosphormangel spricht. Austauschbares Kalium zeigt Maximalgehalte von ~0,2 cmol/kg und liegt damit in Gebiet 2 und 3 an der Grenze zwischen dem niedrigen und mittleren Bereich. Ca und Mg liegen im Durchschnitt bei 1 bzw. 0,5 cmol/kg und damit im akzeptablen Bereich für die angebauten Feldfrüchte. Magnesium zeigt in den Gebieten 2 und 3 meist sogar erhöhte Werte. Es ist jedoch zu beachten, dass die Regosole der jungen Dünen (Gebiet 1) meist nur sehr geringe Mengen beinhalten und die Nährstoffmengen nur in den seltensten Fällen den Ansprüchen der Pflanzen gerecht werden.

#### 4.2.4.3 Chemische Faktoren

Die Böden zeigen keinerlei Anzeichen von Kalk, daher bewegt sich der pH-Wert ( $\text{CaCl}_2$ ) etwa zwischen 4,5 und 5,2 und damit im mäßig bis stark sauren Bereich in der Zone der Silikat- und Austauscherpuffer. Diese Werte stellen für keine der Hauptanbauarten (Mais, Maniok, Erdnuss) ein Optimum dar, sind allerdings noch oberhalb des kritischen Bereichs. Bereits ein schwaches Abfallen des Wertes (z.B. durch Entzug basischer Kationen) würde wiederum den Anbau von Mais unmöglich machen. Positiv für Nutzpflanzen ist der hohe Prozentanteil basischer Kationen, der die Basensättigung selten 80 % unterschreiten lässt. Betrachtet man die Basensättigung sehr kleinräumig, kann man selbst kleinere Unterschiede im Wuchs der Pflanzen erkennen, der eine lineare Relation zu dem Verhältnis der  $\text{H}^+$ -Ionen/basische Kationen zeigt (siehe 4.2.6). Eine sinkende Basensättigung bedeutet so meist auch ein Sinken der Erträge. Ebenfalls positiv ist die niedrige EC zu sehen (<0,03 mS/cm), da eine Stresswirkung durch Salze auszuschließen ist.

#### 4.2.4.4 Humusgehalt

Die Wichtigkeit dieses Faktors bzgl. der Bodenfruchtbarkeit (sowohl des Nährstoffhaushaltes als auch der physischen Eigenschaften) ist bereits mehrmals angesprochen worden. Umso

dramatischer sind die sehr geringen Werte in dieser Rubrik zu betrachten. Liefern die Untersuchungen in Gebiet 2 und 3 immerhin noch Werte zwischen 0,4 und 1 % Humus, und damit wenigstens ein Minimum, nimmt der Humusgehalt Richtung Ozean (Gebiet 1) drastisch ab und sinkt auf Werte von 0,1 % bereits in den oberen 40 cm. Der Anbau von Mais und die Entnahme der Pflanzen ohne anschließende Ausbringung auf die Felder wird die Fruchtbarkeit bis hin zum kompletten Kollaps der Böden absenken. Zwar bieten ganzjährig hohe Temperaturen und lange Regenzeiten mit jährlichen Niederschlägen von bis zu 1000 mm sehr gute Bedingungen zur Mineralisation (Finck A. , 1963), auch die hohe Luftfeuchtigkeit der Regenzeit bietet Bakterien ein gutes Umfeld, jedoch liegt das Problem im Humusaufbau aufgrund mangelnder organischer Verbindungen. Pflanzliche Substanz wird rasch mineralisiert, während Nachschub ausbleibt. Es entsteht ein dauerhaftes Defizit.

C/N Verhältnisse kleiner 10, in den meernahen Dünen oftmals nahezu 1, spiegeln eine hervorragende Humusqualität vor. Da diese Werte allerdings nicht einmal bei reinem Protein vorkommen (hier läge das Verhältnis bei einem Wert  $>3$ ), ist dieses Phänomen laut Finck (1963) durch Stickstoff in nicht organischer Form zu erklären. Vom Boden fixiertes Ammonium wird durch Einlagerung in die Zwischenschichten der Tonminerale dem Kreislauf entzogen und täuscht bei der Analyse ein extrem enges C/N-Verhältnis vor (Finck A. , 1963). Ungewöhnlich ist allerdings, dass dies normalerweise nur bei stärker tonhaltigen Böden vorkommt, daher ist für diese extrem niedrigen Verhältnisse wohl eher der extrem geringe Gehalt der beiden Variablen verantwortlich. Jedoch ist sicher, dass die Mineralisation rasch abläuft und eine Akkumulation von Humus verhindert.

#### 4.2.5 Eignung für Pflanzen

Betrachtet man die Eignung der Böden für bestimmte Nutzpflanzen, ist eine Differenzierung der Dünen notwendig. So bieten die Regosole der jungen Dünen suboptimale Verhältnisse für die meisten Anbauprodukte, während die älteren Dünen bedingt geeignet sind. Die positiven Eigenschaften aller Dünenböden ist die grobe Textur, die hervorragende Durchwurzelbarkeit bis in mehrere Meter Tiefe, die sehr guten Wasserabflusseigenschaften sowie der sehr geringe Salzgehalt. Negativ ist die hohe Hangneigung, der niedrige Gehalt an Nährstoffen (sowohl verfügbare als auch nachlieferbare) und organischer Substanz zu sehen. Ebenso ist der sandige Boden kaum in der Lage Wasser zu speichern, wodurch eine gewisse Dürre-resistenz vorteilhaft ist. Gemäß Anhang 1, Anhang 2 und Anhang 3 wird deutlich, dass diese Faktoren zu einer Begrenzung der Anbaumöglichkeiten führen. In den jungen Dünen ist lediglich Maniok, bedingt Erdnuss und einige Fruchtbäume in der Lage nennenswerte Erträge zu liefern, da die Nährstoffvorräte des Bodens ungenügend sind. Die älteren Dünen erlauben, abhängig von der Länge ihrer Bewirtschaftungszeit, der Fruchtfolge und Auslaugung, eine ausgeprägtere Nutzung. Neben Maniok und Erdnuss gedeihen hier Mais, Süßkartoffel, Bohne und einige Fruchtbäume (Kokosnuss, Citrus, Mango, Cashew) und liefern teils zufriedenstellende Erträge.

#### 4.2.6 Bodenerschöpfung und Degradation

Die Theorie der Brandfeldwirtschaft in den Küstendünen Moçambiques besagt nach dem Abbrennen der Gras- und Buschvegetation die einjährige Nutzung mit Maismonokulturen, danach ein bis zwei Jahre Mais-Erdnuss-Maniok-Mischkulturen, worauf ab dem vierten Jahr nur noch Erdnuss folgt. Nach 5-8 Jahren fällt das Feld brach und regeneriert sich unter einer Grasvegetation (Fränzle & Fränzle, 1998). In der Realität wird das angebaut, was zur Verfügung steht, solange es geht. Danach wird die Fläche zu einem Sandfeld degradiert. Beliebt sind in erster Linie Mischkulturen aus Mais, Maniok und Erdnuss. Gedeiht der Mais im Laufe der Jahre immer schlechter, steigt der Anteil an Maniok und Erdnuss, was die Bauern nicht daran hindert, weiterhin Mais anzubauen. Dabei entzieht der Mais Jahr für Jahr große Mengen an Nährstoffen, setzt den Boden der Erosion aus, und degradiert die Arenosole.

##### 4.2.6.1 Vitalität der Pflanzen

Um die Auslaugung des Dünenbodens und die entsprechende negative Auswirkung auf die landwirtschaftlich angebauten Pflanzen zu belegen, wurden zahlreiche homogene Felder beprobt, welche deutliche Unterschiede in der Vitalität der Pflanzen zeigten. Oftmals ist der Unterschied selbst in unmittelbar angrenzenden Feldern markant. Um eine Korrelation mit dem Nährstoffhaushalt des Bodens herzustellen, wurde ein Zustandsschlüssel für die beprobten Areale entwickelt. Der Schlüssel reicht von 20 (sehr schlechter Zustand) bis 80 (ein den Umständen entsprechend guter Zustand). Die Bewertung setzt sich vor allem aus der Vitalität der Maispflanzen, aber auch aus der prozentualen Zusammensetzung von Mais, Maniok und Erdnuss zusammen. Steigt der Anteil an Erdnuss, sinkt automatisch der Anteil an Mais. Dies deutet auf eine Auslaugung des Bodens hin, da Erdnusspflanzen weitaus weniger anspruchsvoll sind und als Leguminosen selbst Stickstoff fixieren können. Auch ein höherer Anteil des robusten Manioks weist auf schwindende Nährstoffe hin. Grünland wurde automatisch auf 80 gesetzt. Auch der Bedeckungsgrad der Pflanzen spielte bei der Bewertung eine Rolle, ebenso die Größe der Pflanzen, ihr Wuchs und der Chlorophyllgehalt, erkennbar an der grünen Farbe. Es wurde darauf geachtet die Verhältnisse der Unterschiede möglichst genau in den Zahlen wiederzugeben. Die Mischproben wurden oftmals in unmittelbar angrenzenden Feldern in einem möglichst kleinen und homogenen Raum entnommen, um eine vorgetäuschte Korrelation durch weitere Einflüsse zu minimieren.

Betrachtet man nun die Korrelationen anhand des Pearson-Korrelationskoeffizienten (Tab. 17), fällt besonders die starke positive Korrelation des Pflanzenzustandes mit dem S-Wert (der Summe der Nährstoffe Ca, Na, Mg, K) auf.

In dem untersuchten Fall liegt der Korrelationswert bei 0,809, das Signifikanzniveau liegt bei 0,00, die Nullhypothese (kein Zusammenhang zwischen den Variablen) kann daher abgelehnt werden. Ein Zusammenhang mit dem Gesamtstickstoff ist etwas schwächer zu erkennen, ist aber vorhanden. Dies ist möglicherweise auf die sehr geringen Stickstoffgehalte, und den daher normalen Schwankungen bei der Messung zurückzuführen. Auch können Erdnüsse als Leguminosen Korrelationen verhindern. Die auffällig starke Korrelation mit dem

pH-Wert ( $\text{CaCl}_2$ ), der  $\text{KAK}_{\text{eff}}$  und der Basensättigung steht in enger Relation zu dem S-Wert. Mit sinkendem pH-Wert verdrängen freie H-Ionen die basischen Nährstoffe, wodurch die Basensättigung sinkt. Interessant ist auch die Betrachtung der einzelnen Nährstoffgruppen. Ca, Mg zeigen einen starken Zusammenhang mit dem Pflanzenwachstum, während K eher wenig stark korreliert und Na kaum. Da die Böden meist akutem P-Mangel leiden und kaum unterscheidbare Ergebnisse liefern, ist hier kein deutlicher Zusammenhang erkennbar. Auffällig auch der hohe Wert der Korrelation des Tonanteils. Dies ist nachvollziehbar, stellen Tonminerale doch die wichtigste Sorbentengruppe der Nährstoffe. In diesem Fall ist es allerdings nicht aussagekräftig im Bezug auf benachbarte Parzellen, da in diese Korrelationsanalyse lediglich 9 Stichproben einbezogen wurden. Diese liegen teils in den jungen, teils in den alten Dünen und unterscheiden sich deutlich in ihrem Tonanteil. Startet man die Analyse ohne diese tonarmen jungen Dünen, schwindet die Korrelation zwischen dem Pflanzenzustand und dem Tongehalt, während die übrigen erhalten bleiben.

Für den Vergleich mit dem Schlüssel des Pflanzenzustandes wurden insgesamt 29 Mischproben einheitlicher Entnahmetiefe (0-40 cm) mit einer deutlichen Unterscheidung des Vitalitätszustandes der Vegetation herangezogen.

Abb. 68 zeigt die Korrelation zwischen S-Wert und dem Pflanzenzustand grafisch in einem Streudiagramm. Zwar ist die Streuung um die Regressionsgerade hoch, diese zeigt aber eine eindeutige Tendenz. Der R-Wert beträgt 0,522. Es bleibt festzuhalten, dass anhand der Vitalität der Maispflanzen und der prozentualen Zusammensetzung von Mais, Maniok und Erdnuss durchaus Schlüsse auf die Auslaugung des Bodens an Nährstoffen gezogen werden können. Um einen direkten Zusammenhang herzustellen, ist eine genauere Analyse notwendig.

### Korrelationen

Zustand der Pflanzen

	Korrelation nach Pearson	Signifikanz (2-seitig)	N
Zustand der Pflanzen	1		31
pH $\text{CaCl}_2$	,527(**)	,003	29
$\text{N}_i$ in %	,505(**)	,004	31
Humusgehalt in %	,499(**)	,004	31
S-Wert	,809(**)	,000	30
$\text{KAK}_{\text{eff}}$	,797(**)	,000	30
Na	-,146	,432	31
K	,371(*)	,040	31
Ca	,648(**)	,000	31
Mg	,635(**)	,000	31
Basensättigung in %	,653(**)	,000	30
P in mg/kg	,337	,342	10
Tonanteil in %	,881(**)	,001	10

\*\* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

\* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Tab. 22: Pearson-Korrelationskoeffizienten. N=31.  $\text{KAK}$ , S-Wert, Na, Ca, K, Mg in cmol/kg

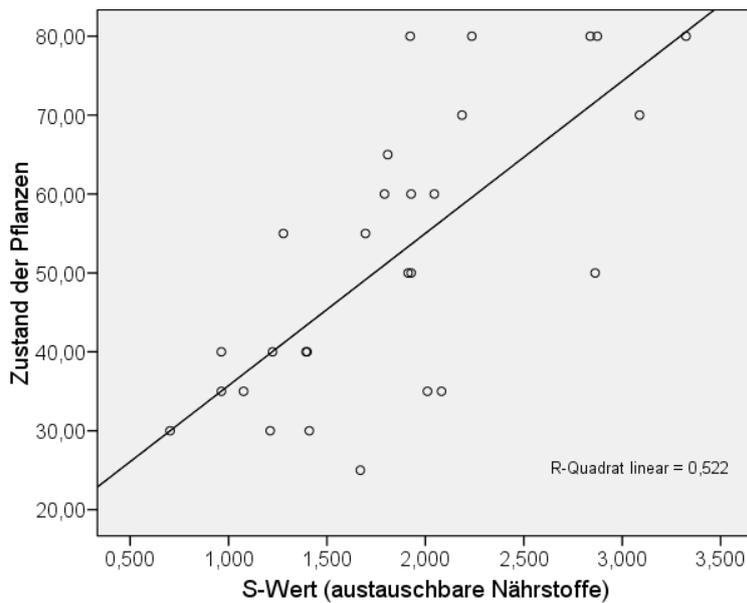


Abb. 68: Streudiagramm des S-Wertes und der Pflanzenzustände von 28 Dünen-Mischproben

#### 4.2.6.2 Auslaugung der Böden – direkte Vergleiche benachbarter Parzellen

Die Korrelation der Pflanzenvitalität mit dem Nährstoffgehalt der Böden spricht für eine Auslaugung der Arenosole durch intensive landwirtschaftliche Nutzung. Um dies genauer zu untersuchen, sollen nun exemplarisch direkt benachbarte Parzellen mit unterschiedlicher Bepflanzung detailliert betrachtet werden. Durch die direkte Angrenzung der Parzellen in bodenkundlich homogenen Gebieten wird der Einfluss weiterer Variablen (z.B. Ton) minimiert. Da Dünger gänzlich unbekannt bzw. nicht erschwinglich ist, ist diese Variable ebenfalls auszuschließen.

Mischprobe 27 grenzt unmittelbar an Mischprobe 28 an. Trotzdem wachsen auf dem einen Feld relativ gesunde Pflanzen, während auf dem anderen Maispflanzen nur sehr klein werden und kaum Chlorophyll produzieren. Der Anteil der genügsamen Erdnuss ist sehr hoch.



Abb. 69: Mischprobe 28



Abb. 70: Mischprobe 27



Abb. 71: Mischprobe 26



Abb. 72: Mischprobe 24

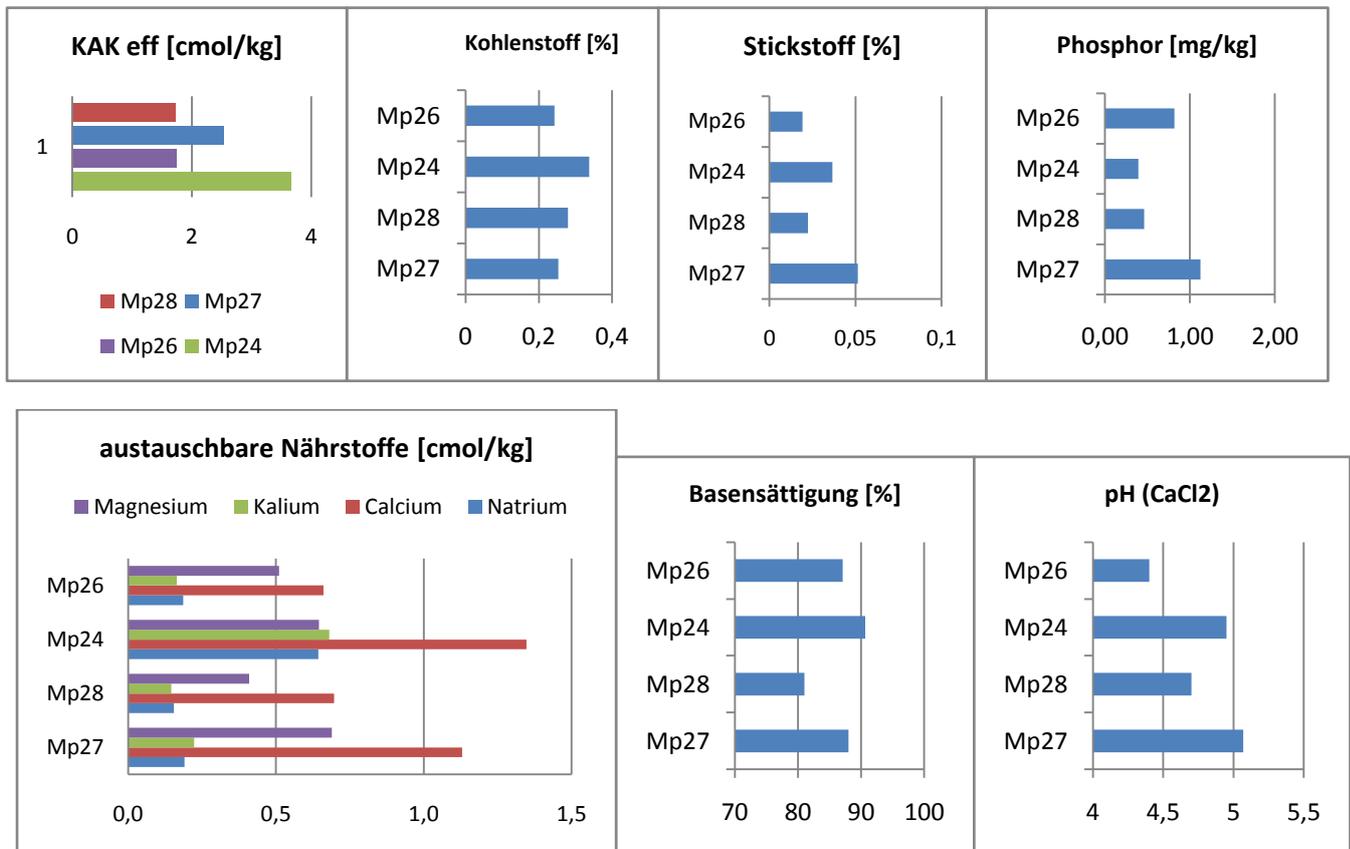


Abb. 73: Gegenüberstellung ausgesuchter Parameter von Mp24, 26, 27, 28

Ein Blick auf die effektive Kationenaustauschkapazität zeigt einen deutlichen Unterschied zwischen den beiden beprobten Parzellen. Auch der Gesamtstickstoff und die an Tonminerale und Huminstoffe gebundenen Minerale offenbaren prägnante Unterschiede während sowohl der Tongehalt als auch der Gehalt an organischem Kohlenstoff keine signifikanten Differenzen aufweisen.

Als weiteres Beispiel sollen mit den Mischproben 24 und 26 zwei weitere Extreme verglichen werden. Zwar grenzen die Parzellen nicht unmittelbar aneinander, der Abstand beträgt aber lediglich 330 m bei konstanten Bodenverhältnissen. Mp26 zeigt wesentlich schlechter gewachsene Maispflanzen und einen hohen Anteil Maniok. Auch hier sind deutliche Unterschiede in allen Bereichen (Stickstoff, KAK, austauschbare Nährstoffe) erkennbar.

Oftmals ist der Mangel eines einzelnen wichtigen Primärnährstoffes für schlechte Ernten verantwortlich. In den Tropen ist dies meist Stickstoff, oft auch Kalium oder Phosphat (Young, 1976). Auffallend an diesen Beispielen ist daher das Abfallen sämtlicher Werte. Auch wenn die Basensättigung aufgrund des nahe gelegenen Ozeans in allen Fällen hoch ist, ist ein Unterschied erkennbar. Bereits ein geringes Abfallen der BS bewirkt einen schlechteren Wuchs. Die Anzahl der H-Ionen ist in den Parzellen der schlecht gewachsenen Pflanzen höher, entsprechend niedriger ist der pH-Wert. Da sich alle gefundenen Parameter in einem sehr niedrigen Niveau bewegen und Unterschiede nur marginal sind, ist diese starke Korrelation umso erstaunlicher.

Diese 4 Beispiele sollen exemplarisch für die 31 auf Korrelation untersuchten Parzellen dienen. Die direkte Korrelation der Bodeninhaltsstoffe mit der aktuellen Nutzung wäre damit nachgewiesen.

## 4.3 Brandfeldwirtschaft

### 4.3.1 Die Bedeutung des Feuers für den Stoffhaushalt

Zuerst soll ein Überblick über die Auswirkung von Bränden allgemein auf den Stoffhaushalt eines Ökosystems gegeben werden. Ein Zusammenhang zu den Böden dieser Arbeit wird im nächsten Kapitel hergestellt. Ein Brand wirkt sich folgendermaßen auf Nährstoffe aus:

Die Nährstoffe werden als anorganische Ionen in den Boden freigegeben:

Während eines Brandes wird organisches Material in seine einzelnen Bestandteile zersetzt. Diese oxidierten, anorganischen Formen der Nährstoffe sind nun pflanzenverfügbar (Cilimburg & Short, 2005).

Nährstoffe verflüchtigen sich und gehen als Gase in die Atmosphäre über:

Abhängig von der Menge der brennenden Biomasse und der daraus resultierenden Temperatur können Nährstoffe, je nach ihrer spezifischen kritischen Temperatur gasförmig aus dem Ökosystem verloren gehen. Einer der essentiellsten Nährstoffe, Stick-

stoff, beginnt bereits bei ca. 200°C sich zu verflüchtigen. Organisch gebundenes Phosphor benötigt ca. 350°C während Sulfate bei Temperaturen über 375°C in größeren Mengen verloren gehen, gefolgt von Kalium bei 550°C. Anorganischer Phosphor benötigt 770°C. Da diese hohen Temperaturen nur selten erreicht und überschritten werden, sind Natrium (bei ca. 900°C), Magnesium (1107°C) und Calcium (1483°C) wenig gefährdet und daher in großen Mengen in der übrig bleibenden Asche zu finden (Agee, 1996). Die Stärke der Hitzeentwicklung in von Ökosystem zu Ökosystem unterschiedlich, da verschiedene Vegetation unterschiedlich starke Mengen und Konzentrationen an Brennstoff liefert. So werden in Graslandschaften Temperaturen von 550°C erreicht und kurzzeitig aufrecht erhalten, während in Wäldern oder Strauchfeuern die Bodenoberfläche 850°C heiß werden kann (Giovannini, Lucchesi, & Giachetti, 1990).

Nährstoffe gehen als Rauchpartikel verloren:

Wie eben erwähnt besteht die zurückbleibende Asche meist aus hitzetoleranten Nährstoffen wie Kalium, Phosphor, Magnesium und Calcium. Diese Asche kann nun als Rauch über weite Strecken transportiert, und so dem Ursprungsgebiet entzogen werden. Auch nach dem Brand besteht die Möglichkeit des Verlustes der leichten Asche durch starke Winde, wie sie in den Küstengebieten häufig zu finden sind (Cilimburg & Short, 2005).

Nährstoffe werden durch Regenwasser ausgewaschen:

Feuer hat einen großen Einfluss auf die Speziation von Nährstoffen. Wird nun zuviel Stickstoff umgewandelt, so dass Nachfolgevegetationen nicht ausreichend Nitrat aufnehmen können ( $\text{NO}_3^-$  kann nicht von Bodenpartikeln gebunden werden), besteht die Gefahr der Auswaschung in tiefere Horizonte, Flüsse und größere Gewässer. Die übrigen oben bereits erwähnten Nährstoffe können von Huminstoffen und Tonmineralen sorbiert werden, und sind daher nur bei einem Überschuss oder schlechten Böden gefährdet dem System verloren zu gehen. Fehlende Tonminerale der Arenosolböden stellen ein Problem dar. Die Menge der ausgespülten Nährstoffe hängt somit von der verbrannten Vegetation ab: je mehr Pflanzen und Biomasse zerstört wurden, je weniger potentielle Nachfrager sind vorhanden, und umso mehr Nährstoffe befinden sich im Boden, was die Gefahr der Auswaschung erhöht (Christensen, 1987).

Zusammenfassend zeigt sich, dass durch die direkte Wirkung von Feuer der Gesamtbestand an Nährstoffen durch Verflüchtigung, Rauch, Auswaschung und Erosion verringert wird. Allerdings steigt die Pflanzenverfügbarkeit dank der Umwandlung von unzugänglichen organischen Formen in nutzbare anorganische Formen direkt nach dem Verbrennen des organischen Materials kurzfristig an. Des Weiteren wird ein indirekter Schub auf die Mineralisierung auch Monate nach einem Brand beobachtet: dank des hohen pH Wertes der Asche und des erhöhten Mikroklimas wird die mikrobielle Aktivität und damit die Mineralisierung und Nitrifikation über Monate hinweg um hohe Prozentzahlen gesteigert. So kann in den meis-

ten Fällen im Folgejahr eines Brandes ein sehr rascher Neubewuchs folgen (Christensen, 1987). Die Menge der Verlorenen und freigesetzten Nährstoffe hängt stark mit der Dauer und Intensität des Brandes sowie der verbrannten Biomasse zusammen. Es ist die Aufgabe frei lebender Stickstoff-fixierender Bakterien (Azotobacter, Amylobacter) (Schröder, 1992), Stickstoffverluste, welche sich längerfristig gesehen bemerkbar machen können, auszugleichen. Das Wetter nach einem Brand bestimmt Verluste durch Winde und Auswaschung nicht sorbierter Nährstoffe durch Regenfälle (Wan, Hui, & Luo, 2001).

### *pH, Kationen und KAK*

Während Erhitzungen von bis zu 220°C den pH-Wert erniedrigen, wird dieser bereits bei 460°C erhöht und bei Temperaturen von 700°C und 900°C um bis zu 5 Einheiten gesteigert (Giovannini, Lucchesi, & Giachetti, 1990). Der Grund ist die Freisetzung basischer Kationen (hauptsächlich Ca, K, Na) durch die Verbrennung des organischen Materials (Kutiel, Naveh, & Kutiel, 1990) und die Reaktionen verschiedener Oxide mit den Protonen in der Asche. Dieser Effekt kann bis zu 15 cm tief greifen und Auswirkungen bis zu einem Jahr haben (Agee, 1996).

Die Menge der gelösten Minerale lässt sich durch die Messung der elektrischen Leitfähigkeit bestimmen. Ein hoher Wert entspricht einer Vielzahl gelöster anorganischer Ionen – die wichtigsten sind Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium (Kutiel, Naveh, & Kutiel, 1990).

Untersuchungen ergaben nahezu eine Verdopplung der elektrischen Leitfähigkeit direkt nach einem Feuer in dem verbrannten Boden (Kutiel, Naveh, & Kutiel, 1990).

Dank der Verbrennung der Biomasse wird eine Vielzahl austauschbarer Basen frei und in den Boden eingewaschen. Dabei ist die Menge des Anstieges proportional zu der Menge der entstandenen Asche. So wurden Steigerungen von bis zu 830% bei Calcium und 166% bei Kalium nach einem intensiven Brand beobachtet (Agee, 1996).

Auch auf die an Bodenpartikel sorbierten Kationen und die Kationenaustauschkapazität hat eine Erhitzung des Bodens Auswirkung – und somit auch auf die Verfügbarkeit von Pflanzennährstoffen.

So sinkt die Kationenaustauschkapazität stufenweise mit steigender Temperatur im Boden. Gründe sind die Austrocknung der Kolloide sowie die Verbrennung des organischen Materials (und damit der Huminstoffe) bereits bei Temperaturen von 220°C – 460°C (Giovannini, Lucchesi, & Giachetti, 1990).

Da Kalium und Natrium ein niedrigeres Austauschpotential als Calcium und Magnesium haben (da niederwertiger geladen und stärkere Hydrathülle) (Schröder, 1992), und somit weniger stark sorbiert werden, ist hier nach ihrer Freisetzung die Gefahr der Auswaschung in tiefere Horizonte weitaus größer. Dies wird durch Untersuchungen belegt: gehen im Schnitt nur 75 kg/ha Ca<sup>++</sup> und 33 kg/ha Mg<sup>++</sup> der oberen Horizonte verloren, betragen die Zahlen bei

$K^+$  282 kg/ha und bei  $Na^+$  698 kg/ha. Berücksichtigt werden muss auch die spezifische Temperatur, welche zu Verflüchtigung der Minerale führt (Agee, 1996).

Unfruchtbare Böden mit niedriger KAK (da wenig Tonminerale und Huminstoffe vorhanden sind) wie sie in den Dünen zu finden sind, erleiden einen wesentlich höheren Verlust durch Auswaschung. Ist zudem der pH Wert niedrig, verdrängen zu viele Protonen die Kationen von den Austauschern. Können verbleibende und neu siedelnde Sträucher, Bäume und Gräser und einsetzende Landwirtschaft die nach einem Brand frei gewordenen Kationen nicht rechtzeitig aufnehmen, werden diese unterhalb des Wurzelraumes gespült und gehen so dem Ökosystem verloren (Agee, 1996).

### Stickstoff

Während eines Brandes geht N gewöhnlich durch Vergasung, Verflüchtigung und Konvektion der Asche direkt verloren - abhängig von der Menge des verbrannten Materials und der Feuerintensität.

Interessant wird die Betrachtung von Ammonium und Nitrat. Betrachtet man hier den Faktor Zeit, ergeben sich signifikante Unterschiede zwischen  $NH_4^+$  und  $NO_3^-$ . Untersuchungen von Wan et al. (2001) zeigen den enormen Anstieg von Ammonium direkt nach einem Feuer (ca. 200%). Der Anstieg von Nitrat folgt erst allmählich (nach dem Feuer 24%, nach 7-12 Monaten 322%) und sinkt nach einem Höhepunkt innerhalb von 5 Jahren wieder auf sein ursprüngliches Niveau. Der starke Ammonium-Anstieg unmittelbar nach einem Feuer ist durch die Zerlegung organischer Stickstoffbindungen und Mineralisierung leicht erklärbar. Der Grund für den zeitlich versetzten Nitrat-Anstieg ist in dem für nitrifizierende Bakterien geschaffenen optimalen Milieu (Temp. 25-35°C, pH 5,5-8) zu suchen. Der erhöhte pH-Wert und die stärkere Aufheizung der Oberfläche (durch fehlende Vegetation und den höheren Albedo der Asche begünstigt) regen die mikrobielle Aktivität und damit die Umwandlung von Ammonium in Nitrat an (Wan, Hui, & Luo, 2001).

#### 4.3.2 Brandfeldwirtschaft in Patrice Lumumba

Während des Feldaufenthalts konnte sowohl in den Talgebieten als auch den Dünensystemen aktive Brandfeldwirtschaft beobachtet werden. Üblicherweise wird das Gras etwa zwei Monate vor der Regenzeit abgebrannt und über diese Zeit auf der Fläche belassen. Auf diese Weise dient es dem empfindlichen Boden als Erosionsschutz vor Wind und Wasser. Das gezielte und kontrollierte Abbrennen der Grasflächen schafft neuen Platz für die Landwirtschaft und gibt vergleichsweise fruchtbaren Boden frei. Die Gefahr der Auswaschung freigewordener Nährstoffe ist relativ groß, da durch fehlende Tonminerale und Huminstoffe schlechte Sorptionsmöglichkeiten geboten sind, und hohe Niederschläge und starke Winde besonders in der Regenzeit alltäglich sind.

Um die bis hierhin theoretische Ausarbeitung des vorigen Kapitels zu belegen, wurde in einem gerade abgebrannten Feld eine Mischprobe (Mp20) der oberen 10 cm entnommen. Als

Vergleich sollen die in unmittelbarer Nähe, aber bewirtschafteten Feldern entnommenen Proben Mp18 und Mp19 dienen. In Tab. 23 werden einige gemessene Werte einander gegenübergestellt. Auffällig sind der stark erhöhte pH-Wert, sowie eine verdoppelte elektrische Leitfähigkeit. Die Gehalte an organischem Kohlenstoff sowie an Gesamtstickstoff sind leicht erhöht. Ebenso die effektive Kationenaustauschkapazität. Die Menge der austauschbaren Nährstoffe zeigt in ihrer Gesamtheit einen höheren Wert als bei vergleichbaren Böden.

Probe	pH (CaCl <sub>2</sub> )	EC [μS]	Corg [mg/g]	Nges [mg/g]	KAK <sub>eff</sub> [cmol/kg]	Na *	Ca *	K *	Mg *
Mp20	5,44	36,3	0,0025	0,00050	1,71	3,36	14,24	8,79	6,65
Mp19	4,65	15,5	0,0017	0,00036	1,53	4,72	13,92	2,43	5,21
Mp18	4,55	12	0,0011	0,00023	1,13	3,84	7,11	4,57	3,93

Tab. 23: Vergleich einer abgebrannten Fläche (Mp20) mit 2 benachbarten bewirtschafteten Flächen (Mp18 und Mp19)

\*austauschbare Kationen in mg/l

#### 4.4 Bewertung der Bodenfruchtbarkeit anhand des Fertility Capability Classification System (FCC)

Abschließend sollen die Böden anhand eines international gültigen Bewertungssystems eingestuft werden. Die Wahl fiel dabei auf das FCC Version 4 von Sanchez (2003), dessen Parameter auf tropische Böden und ihre spezifischen Probleme zugeschnitten sind. Das FCC gruppiert dabei die Böden anhand ihrer Körnung und zahlreichen fruchtbarkeitsbedingten Problemen, um daraus bodenverbessernde Maßnahmen ableiten zu können (Scheffer & Schachtschabel, 2002). Die Indikatoren wurden für die bereits eingeteilten Gebiete nach Sanchez (2003) bestimmt und in die Legende der Karte in Anhang 9 eingearbeitet. Sie stimmen weitestgehend mit den bereits erläuterten Parametern überein und kennzeichnen die Problematik der Dünen- und Talböden. Allerdings gibt diese Bewertung nur einen groben Überblick und verkennt detaillierte Unterscheidungen. So wird das Dünengebiet in nur eine Kategorie eingestuft, ohne zwischen jungen und alten Dünen eine Differenzierung treffen zu können. Diese Abgrenzung ist aber im Bezug auf eine optimale Nutzung notwendig. Der Vorteil dieses Systems ist die schnelle Identifizierung der Fruchtbarkeitsdefizite eines Bodens. Es kann als einfache Basis für geeignete Maßnahmen aufgegriffen werden. Dabei stehen drei Hauptthemen im Fokus: Ernährungssicherheit, ländliche Armut und Ökosystemdegradierung (Sanchez, Cheryl, & W., 2003). Die FCC konzentriert sich dabei auf die Parameter, welche sich über mehrere Dekaden nicht verändern. Sie können sowohl positiv, als auch negativ sein.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

**D**as Dünengebiet weist sowohl konstante, als auch variable die Produktion begrenzende Faktoren auf. Als konstant, und damit nicht änderbar, sind die starke Hangneigung und die sehr sandige Textur mit einem Tonanteil von maximal 10 % zu nennen. Dies bewirkt eine schlechte Wasserhaltekapazität und ein niedriges Bindungsvermögen von Nährstoffen. Nicht vorhandene verwitterbare Gesteine sorgen für einen Mangel an Nachlieferung. Der Nährstoff- und Humusmangel sowie der Mangel an Kalk und Wasser dagegen sind variabel, sprich beeinflussbar. Jedoch kann aufgrund des Defizits an Geld kaum Einfluss genommen werden. Problematisch zeigt sich ebenfalls das System der Brandfeldwirtschaft. Die durch die steigende Bevölkerungszahl verursachten Nahrungsmitteldefizite verhindern, dass eine disziplinierte Anwendung dieses Systems sowie eine strenge Fruchtfolge inklusive längerer Brachzeiten möglich wären. Trotz der anhaltenden Bewirtschaftung über einige Jahre weisen die Böden eine erstaunlich hohe Basensättigung auf. Es fällt auf, dass in den Gebieten der älteren Dünen im Bereich der Siedlungen bereits seit vielen Jahren erfolgreich Landwirtschaft betrieben wird. Kleine Gemüsegärten bringen seit längerer Zeit erfolgreich Maisstauden hervor. Allerdings zeigt bereits ein geringes Abfallen dieser Basensättigung eine erhebliche Auswirkung auf die Qualität der Pflanzen. Deutlich ist zu erkennen, welche Felder bereits seit längerer Zeit intensiv bewirtschaftet werden. Es ist wichtig, diese Felder brach fallen zu lassen, und neue, bisher ungenutzte Grasflächen zu erschließen. Der Versuch auf den jungen, ton- und humusarmen Dünenböden Mais anzubauen dürfte bereits in wenigen Jahren gescheitert sein. Bereits neu erschlossene Felder bringen nur sehr kümmerliche Maisstauden hervor. Diese Gebiete sollten in erster Linie nur mit Maniok und Erdnuss bewirtschaftet werden, auch Fruchtbäume (Kokosnuss, Citrus, Mango...) sind in der Lage durch Wurzelverzweigung sich ein Minimum an Nährstoffen zu erschließen und Erträge zu liefern. Der Versuch der Regierung, die Bauern durch Subsistenzwirtschaft auf den neu erschlossenen jungen Dünenböden zu ernähren, wird nicht lange aufrechterhalten werden können. Die Geschwindigkeit der Erschließung dieses Gebietes war enorm. Man sollte darüber nachdenken, dieses Gebiet anhand von Fruchtbäumen zu nutzen und durch den Verkauf der Früchte Geld für Nahrungsmittel zu verdienen. Die Bäume liefern Erträge, erlauben eine zusätzliche Bepflanzung mit Gräsern, und liefern dem Boden organische Substanz. Diese ist für den Erhalt der Dünenböden als Nutzungsfläche essentiell. Maisstauden dürfen nicht komplett abgeerntet werden. Bei Erdnüssen muss das Heu auf dem Feld verbleiben. Felder müssen zeitweise mit Leguminosen (z.B. Gräser) zur Stickstofffixierung bepflanzt werden. Zwar schafft das Abbrennen neuer Flächen kurzzeitig einen Schub an anorganischen Nährstoffen, doch gehen auf diese Weise große Mengen dem System verloren. Ein Einarbeiten der Gräser in den Boden wäre eine sinnvolle Alternative.

Die sandige Textur bietet nur sehr geringe Wasserspeichermöglichkeiten. Innerhalb der Trockenzeit ist die Wasserversorgung der Pflanzen problematisch. Regenfeldbau ist somit nur in der Regenzeit uneingeschränkt möglich. Dieses Problem nimmt mit sinkendem Abstand zur Küste zu.

Der Wanderfeldbau entlang der Küstendünen führt zu radikaler Rodung der Wälder. Dies destabilisiert die sensiblen Dünensysteme und liefert sie der Erosion aus. Ohne die hohen Dünen ist Mosambik einem steigenden Meeresspiegel hilflos ausgeliefert, da die Küstenebene sehr niedrig liegt und ohne die hohen Dünen von Überschwemmungen, Fluten und Stürmen heimgesucht werden kann (Ferraz & Munslow, 2000).

Werden die Dünen bei Xai-Xai weiter intensiv genutzt, ist es nur eine Frage der Zeit bis sie vollständig degradiert sind und keine landwirtschaftlichen Erträge mehr liefern. Bereits in wenigen Jahren ist mit einer völligen Bodenerschöpfung zu rechnen. Es ist sehr wichtig, den Spagat zwischen Ernährungssicherheit und nachhaltiger, extensiver Landwirtschaft zu finden. Es muss nach Maßnahmen geforscht werden, welche sowohl den Menschen als auch den Böden das Überleben in absehbarer Zukunft sichert, da mit dem Erschöpfen der Böden die wichtigste Nahrungsquelle der Menschen versiegt. Das Problem und seine Auswirkungen müssen den Bauern und der Regierung bewusst sein. Es bleibt nichts anderes übrig, als über geeignete Düngungsmaßnahmen und deren Finanzierung nachzudenken. Die Einführung und Anwendung einer geeigneten Fruchtfolge ist essentiell, will man die Dünenböden auch weiterhin landwirtschaftlich nutzen.

Auch das Talgebiet ist nicht ausnahmslos geeignet. Hoher Salzgehalt beeinträchtigt den Wuchs; harte Tonböden erschweren die Durchwurzelung, Wasserverfügbarkeit und Bearbeitung; hohe Eisenoxidgehalte fixieren Phosphate. Jedoch sind die Böden reich an Nährstoffen und Humus, leiden auch in der Trockenzeit keinen Mangel an Wasser und bieten eine weitaus geeignetere Plattform für Landwirtschaft als die Dünensysteme. Zwar sind diese Böden aufgrund der genannten Defizite für viele Anbauprodukte ungeeignet, eine ausgewiesene Stratifizierung kann der Bevölkerung dennoch Auskunft über eine Eignung geben. So bietet das Talgebiet in Dünennähe einen sandigen Oberboden dessen Salzgehalt minimal ist, während die Mitte der Talregion sehr tonige, salzhaltige Böden aufweist. Warum hier sehr große Flächen fruchtbarer Böden brach liegen und mit Schilf überwuchert sind muss geklärt werden. Die Anschaffung geeigneter Hilfsmittel (z.B. Pflüge) sollte diskutiert werden. Diese Böden bedürfen weder Düngung, noch Bewässerung um ausreichende Erträge (mehrfach pro Jahr) zu liefern. Zwar sind einige Kulturpflanzen für diese Flächen gänzlich ungeeignet, daraus darf aber nicht sofort auf Versalzung und Unfruchtbarkeit geschlossen werden, gibt es doch eine Reihe von Nutzpflanzen die problemlos auf hartem Ton gedeihen.

### *Ausblick*

Die Thematik ist fast zu komplex als dass ihr diese Diplomarbeit gerecht werden könnte. Sollte es zu einer weiterführenden Arbeit kommen, wäre sicher am interessantesten, eine größere Fläche mit einem hochauflösenden multispektralen Satellitenbild (z.B. Ikonos, Quickbird) zu analysieren und mit Stichproben zu vergleichen. Die Frage wäre, inwieweit von den Satellitendaten (der Reflexion in den einzelnen Bändern, Indizes) auf die Pflanzen- bzw. Bodenqualität (welche Parameter korrelieren?) Schlüsse gezogen werden können und wie genau auf diese Weise Ernteerträge vorausgesagt werden können. Es wäre interessant

zu sehen, inwiefern man bereits aus Satellitendaten den Grad der Bodendegradierung im Detail erkennen kann, Aussagen darüber treffen kann wie lange der Boden noch Erträge zulässt und ob diese Methode auf ein großes Gebiet anwendbar ist. Auf diese Weise könnte die Tragfähigkeit der Dünengebiete großflächig untersucht werden. Es könnten digital Karten anhand diverser Produktivitätsindizes (z.B. Storie Rating Index, FCC, LCC) erstellt werden und mit den Ergebnissen verglichen werden.

Auch interessant wäre die genauere Untersuchung der Gebiete unter Fruchtbaum- und Siedlungseinfluss. Welche Einflüsse haben die Bäume, gelangen Schadstoffe durch Siedlungsabfälle in den Boden? Die sehr hohe Basensättigung der küstennahen Dünensysteme wäre es wert, genauer untersucht zu werden. Da für eine weitere Tragfähigkeit düngen unabdingbar scheint, wäre es interessant zu untersuchen, ob und in welchem Maß Düngung tatsächlich zu Erfolg führt. Interessant wäre ein Vergleich der Böden mit der pedogen gleichen, aber landwirtschaftlich ungenutzten Weideregion im SW der Dünen. Eine genauere Untersuchung der Böden hinsichtlich ihrer genauen mineralischen Zusammensetzung und ihrer KAKpot wäre sinnvoll.

Die Problematik der Erosion und die Auswirkung auf Landwirtschaft, Schutz vor einem steigenden Meeresspiegel und Stürmen ist ein weiteres Themengebiet. Messungen vor Ort und eine Abschätzung mittels GIS-Modellen (z.B. USLE) wären angebracht. Hierbei könnten verschiedene Klimaszenarien im Modell getestet werden.

Auch das Talgebiet birgt einige interessante Aspekte. Die Problematik der Versalzung bedarf weitere, flächenhaftere Untersuchungen, um eine klare Aussage zu treffen. Welchen Einfluss haben die Überschwemmungen? Wie homogen sind die Fluvisole des Limpopotals? Wie setzt sich die Sedimentfracht des Limpopo zusammen? Welche Art von Tonmineralen liegen vor und woher kommt der Magnetit? Wie hoch ist der Anteil des fest gebundenen Phosphats?

Die wohl wichtigste Frage bleibt weiterhin: ist das Küstengebiet von Moçambique über weitere Jahre in der Lage die wachsende Bevölkerung zu ernähren, oder wäre ein Abkommen von der Subsistenzwirtschaft sinnvoller bzw. möglich? Welche Maßnahmen können getroffen werden um die Böden nachhaltig zu nutzen ohne sie vollständig zu degradieren?

## 6 Nachwort

**D**ie Idee zu dieser Arbeit hatte PD. Dr. Cyrus Samimi, der im Rahmen einer Exkursion 2005 Xai-Xai bereiste. Ihm danke ich für die Betreuung und die Erstkorrektur.

Die Feldarbeit in Moçambique erfolgte zusammen mit Christian Greger, der im Rahmen seiner Diplomarbeit die Dorfbrunnen in Patrice Lumumba auf ihre Wasserqualität untersuchte. Während des Feldaufenthalts wohnten wir im Elternhaus des an der Uni Bayreuth unterricht-

tenden Dr. Elisio Macamo. Vielen Dank auch an seine Haushälterin Garcilla und ihre beiden Kinder Sinha und Julinio, die uns gut versorgten. Ohne Elisio und seine Familie in Maputo wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Elisio war die ersten Tage mit uns vor Ort und stellte uns in sämtlichen Verwaltungsstellen und den Dorfvorstehenden vor. Dank seiner Schwester Inés, welche an der Eduardo Mondlane Universität in Maputo arbeitet, besaßen wir eine offizielle Genehmigung für unsere Untersuchungen. Wir hatten die volle Unterstützung der Bevölkerung, sowohl in Patrice Lumumba, als auch von dem Landwirtschaftsamt in Xai-Xai.

Besonderer Dank geht an Anelido Cossa, unserem Guide vor Ort. Er übersetzte für uns, und führte uns zu den Untersuchungsstellen.

Vielen Dank auch an Ute Schmidt, die mir im Labor geholfen hat, und Prof. Dr. Rupert Bäumler, den man bodenkundlich alles fragen konnte, und der auch die Zweitkorrektur übernahm.

Dank auch an das DLR für die kostenlose Bereitstellung des hochauflösenden SRTM-Modells des Untersuchungsgebietes.

Prof. Dr. Horst Kopp und der Zantner-Busch-Stiftung danke ich für die finanzielle Unterstützung unseres Vorhabens.

Ein letzter großer Dank geht an meine Eltern und Freunde, ohne deren Unterstützung das Ganze nicht zu machen gewesen wäre.

Die Eindrücke die wir über diese Arbeit hinaus vor Ort sammeln konnten, kann man nicht in Worte fassen, man muss es erlebt haben. 8 Wochen in einem der ärmsten Länder der Welt zu wohnen, verändert ein Leben grundlegend.

## 7 Abbildungsverzeichnis

ABB. 1: LAGE DES UNTERSUCHUNGSGBIETES IN SÜDMOÇAMBIQUE.....	6
ABB. 2: HOCHAUFLÖSENDES DIGITALGLOBE-ÉCHTFARBENKOMPOSIT DER MÜNDUNG DES LIMPOPO IN DEN INDISCHEN OZEAN. ZUR BESSEREN DARSTELLUNG DER HÖHENUNTERSCHIEDE ZWISCHEN TAL UND DÜNEN WURDE DAS BILD MIT EINEM SRTM-HÖHENMODELL-HILLSHADE UNTERLEGT (© DER DIGITALGLOBE-ÜBERLAGERUNG: MDA EARTH SAT 2007) .....	8
ABB. 3: DIE ZONEN VON XAI-XAI, UNTERLEGT MIT EINEM DEM (NACH CIDADE DE XAI-XAI PLANO DE ESTRUTURO 1999, GIVE SIBINDI 2005).....	9
ABB. 4: DIE BERUFSVERTEILUNG DER BEVÖLKERUNG XAI-XAIS (GIVE SIBINDE, 2005) .....	10
ABB. 5: ADMINISTRATIVE EINTEILUNG XAI-XAIS, UNTERLEGT MIT EINEM HILLSHADE EINES DEMS NACH (GIVE SIBINDE, 2005) .....	11
ABB. 6: TRMM MERGED PRECIPITATION 2003. DATENQUELLE: (BRAUN, 2007) .....	12
ABB. 7: 30-FACH ÜBERHÖHTES HÖHENPROFIL DURCH DIE DÜNEN (UNTEN), ENTSpricht DER ROTEN PROFILINIE DES DEMS (OBEN) NACH (JARITZ, RUDER, & SCHLENKER, 1977), (GEOLOGISCHES MUSEUM MAPUTO 2007) .....	14
ABB. 8: QUARTÄRE ABLAGERUNGEN (WANDKARTE DES GEOLOGISCHEN MUSEUMS MAPUTO 2007) .....	14

ABB. 9: FRUCHTBAUMNUTZUNG IN WOHNGBIETEN UND AUF FELDERN (PATRICE LUMUMBA). QUICKBIRDAUFNAHME VON 2005.	16
ABB. 10: WACHSTUM IN DEN LETZTEN DREI DEKADEN (GIVE SIBINDE, 2005)	17
ABB. 11: HACKBAU IN DEN DÜNEN BEI PATRICE LUMUMBA 2000. GUT ZU ERKENNEN IST DIE PARZELLIERUNG UND DIE VERSCHIEDENEN ZUSTANDSSTUFEN DER VEGETATION UND DES BODENS. VEREINZELT SIND FRUCHTBÄUME EINGESTREUT. QUICKBIRDAUFNAHME VON 2005	18
ABB. 12: LINKS: HACKBAU MIT EINGESTREUTEN FRUCHTBÄUMEN. RECHTS: MAIS UND ERDNUSS	19
ABB. 13: PFLUGBAUREGION IM LIMPOPOTAL, AM FUßE DER DÜNEN WESTLICH VON PATRICE LUMUMBA. QUICKBIRDAUFNAHME VON 2005	20
ABB. 14: DAS GRÜNE, FRUCHTBARE SCHWEMMLAND DES LIMPOPOTALS	21
ABB. 15: ENTWURF DER METHODISCHEN VORGEHENSWEISE DER DATENAUFBEREITUNG	25
ABB. 16: ORGANIGRAMM DES ABLAUFES DER DATENPROZESSIERUNG DER SRTM-DATEN	25
ABB. 18: DAS DÜNENGEbiet BEI XAI-XAI. LINKS: UNKORRIGIERTES SRTM-DEM AUS SIR-C DATEN DES USGS (AUFLÖSUNG 3 BOGENSEKUNDEN), RECHTS: KORRIGIERTES MODELL AUS X-BAND DATEN DES DLR (AUFLÖSUNG: 1 BOGENSEKUNDE)	27
ABB. 17: PROZESS DER ERSTELLUNG EINES DEMs AUS X-BAND DATEN NACH (DLR, 2007)	27
ABB. 19: DEM AUS SRTM-DATEN DER MÜNDUNG DES LIMPOPO IN DEN INDISCHEN OZEAN. OPTISCH MIT EINEM HILLSHADE UNTERLEGT	28
ABB. 20: DÜNENGEbiet BEI XAI-XAI IN PERSPEKTIVISCHER 3D-DARSTELLUNG. 8-FACH ÜBERHÖHTES DEM ÜBERLAGERT MIT EINER DIGITALGLOBE SZENE (SIEHE ABB. 2)	28
ABB. 21: DIE HANGNEIGUNG (SLOPE) DER DÜNEN IN GRAD (SRTM-HÖHENMODELL)	29
ABB. 22: DIE EXPOSITIONEN (ASPECTS) DER DÜNEN (SRTM-HÖHENMODELL)	30
ABB. 23: DATENPROZESSIERUNG DER SATELLITENDATEN	30
ABB. 24: DER SATELLIT LANDSAT 7 ETM+ (WILLIAMS, 2008)	32
ABB. 25: STARTJAHRE DER LANDSAT-SYSTEME 1-7 (WILLIAMS, 2008)	32
ABB. 27: REFLEXION AN EINER PFLANZE (ROSEEU, 2003)	35
ABB. 28: REFLEXIONSKURVEN VON BODEN, WASSER UND VEGETATION. DIE LANDSAT TM KANÄLE SIND GRAU DARGESTELLT (STECH)	35
ABB. 26: RECHENBEISPIEL EINES NDVI GESUNDER UND UNGESUNDER VEGETATION (HERRING & WEIER)	35
ABB. 29: LINKS: ETM+ KANAL 3 (0,6-0,7 $\mu\text{m}$ ), RECHTS: ETM+ KANAL 4 (0,78-0,9 $\mu\text{m}$ ). DEUTLICH ZU ERKENNEN IST DIE STÄRKERE REFLEXION DER UNBEWACHSENEN DÜNEN IN KANAL 3. IN KANAL 4 STRAHLEN DIE DÜNEN DEUTLICH WENIGER STARK, WASSER ÜBERHAUPT NICHT, ABER DAS BEWACHSENE TALGEBIET UM SO STÄRKER	36
ABB. 30: ERKLÄRUNG DER BOXPLOT-DARSTELLUNG (SCHWARZER, 2007)	38
ABB. 31: FLUSSDIAGRAMM DER LABORANALYSEN	39
ABB. 32: BOXPLOT DER ELEKTR. LEITFÄHIGKEIT IN $\mu\text{S}/\text{CM}$ DER DÜNENPROBEN (LINKS) UND DER TALPROBEN (RECHTS). MINIMUM, MAXIMUM, QUANTILE UND MEDIAN DER 91 MESSWERTE WERDEN ANGEZEIGT. BEIDE MESSREIHEN ZEIGEN AUSREISER	41
ABB. 33: BOXPLOT DER PH-WERTE DER DÜNEN- (LINKS) UND TALPROBEN (RECHTS) : MINIMUM, MAXIMUM, QUANTILE, MEDIAN UND AUSREISER VON 88 MESSUNGEN WERDEN ANGEZEIGT	44
ABB. 34: BOXPLOT DES OXALAT- UND DITHIONITLÖSLICHEN EISENS UND DEREN VERHÄLTNISS IN DÜNEN (LINKS) UND TAL (RECHTS). N=51	46
ABB. 35: BOXPLOT DES GESAMTSTICKSTOFFGEHALTES IN % DER DÜNENPROBEN (LINKS) UND DER TALPROBEN (RECHTS). MINIMUM, MAXIMUM, QUANTILE UND MEDIAN DER 91 MESSWERTE WERDEN ANGEZEIGT. DIE TALPROBEN ZEIGEN ZWEI AUSREISER	49
ABB. 36: BOXPLOT DES GESAMTGEHALTES AN ORGANISCHEM KOHLENSTOFF IN % DER DÜNENPROBEN (LINKS) UND DER TALPROBEN (RECHTS). MINIMUM, MAXIMUM, QUANTILE UND MEDIAN DER 91 MESSWERTE WERDEN ANGEZEIGT	51
ABB. 37: REGRESSIONSANALYSE ZWISCHEN GESAMT-N UND GESAMT C IN % DER 91 PROBEN	52
ABB. 38: BOXPLOT DES C:N-VERHÄLTNISSES DER DÜNENPROBEN (LINKS) UND DER TALPROBEN (RECHTS). MINIMUM, MAXIMUM, QUANTILE UND MEDIAN DER 91 MESSWERTE WERDEN ANGEZEIGT. DIE DÜNENPROBEN ZEIGEN AUSREISER	53
ABB. 39: BOXPLOT DES HUMUSGEHALTES IN % VON 91 MESSWERTEN. LINKS DÜNEN-, RECHTS TALPROBEN	53
ABB. 40: EFFEKTIVE KATIONENAUSTAUSCHKAPAZITÄT UND S-WERT (SUMME DER NÄHRSTOFFE) VON 89 UNTERSUCHTEN PROBEN (LINKS DÜNEN, RECHTS TAL). ES EXISTIEREN EINIGE AUSREISER	56

ABB. 41: BOXPLOT DER AUSTAUSCHBAREN ELEMENTE VON 68 DÜNENPROBEN (LINKS) UND 18 TALPROBEN (RECHTS). ALLE ANGABEN IN CMOL/KG.....	57
ABB. 42: ADSORPTION AN TONMINERALEN DURCH VARIABLE UND PERMANENTE LADUNG. T=TETRAEDER, O=OKTAEDER NACH (SCHRÖDER, 1992) UND (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002).....	58
ABB. 43: BASENSÄTTIGUNG IN % DER DÜNENPROBEN (68, LINKS) UND TALPROBEN (18, RECHTS) .....	59
ABB. 44: DREIECKSDIAGRAMM MIT %-ANTEILEN AN SAND, TON UND SCHLUFF DER GEFUNDENEN FEINBODENARTEN NACH(BODENKUNDE AG, 2005) .....	60
ABB. 45: UNTERTEILUNG DER BODENART „REINER SAND“ NACH (BODENKUNDE AG, 2005) .....	61
ABB. 46: LK, TW, NFK UND WASSERSPANNUNGSKURVEN DER ERMITTELTEN BODENARTEN NACH (BODENKUNDE AG, 2005) .....	64
ABB. 47: UNTERSUCHUNGSGEBIET IM LIMPOPOTAL. ALS UNTERGRUND DIENST DIE LANDSAT ETM+ SZENE VON 2001 IN DER KANALKOMBINATION 432. ZUR DETAILLIERTEREN DARSTELLUNG WURDE EIN RESOLUTION MERGE MIT DEM PANCHROMATISCHEN KANAL DURCHGE .....	67
ABB. 48: SPEKTRALE PROFILE DES TALGEBIETES DER LANDSAT ETM+-AUFNAHME VON 2001 (6 BÄNDER) .....	68
ABB. 49: UMGEGRABENES FELD 2 IM TALGEBIET. ....	69
ABB. 50: FELD 1 IM TALGEBIET .....	69
ABB. 51: DIREKT AN DIE DÜNEN ANGRENZENDES TALGEBIET. DIE HOHE BODENFEUCHTE UND DIE MENGE ORGANISCHEN MATERIALS IST GUT ERKENNBAR.....	70
ABB. 52: DIREKT AN DIE DÜNEN ANGRENZENDES TALGEBIET. OBEN SIND DIE DÜNEN ERKENNBAR .....	71
ABB. 53: BODENBEEINFLUSSENDE PROZESSE NACH (ZECH & HINTERMAIER-ERHARD, 2002).....	74
ABB. 54: SALZKRUSTEN UND ZEIGERPFLANZE BEI MP4 .....	74
ABB. 55: NDVI-DARSTELLUNG ZU DREI VERSCHIEDENEN ZEITPUNKTEN. ZUR PLASTISCHEREN DARSTELLUNG WIRD DIE NDVI SZENE LEICHT TRANSPARENT DARGESTELLT UND VON EINER PANCHROMATISCHEN-LANDSAT-SZENE UNTERLAGERT .....	77
ABB. 56: ANALYSE DES NDVI BEI PATRICE LUMUMBA 2000. DIE ROTEN RECHTECKE ZEIGEN DEN STANDORT DER FOTOS, DIE ROTEN KREISE ZEIGEN DIE DARSTELLUNG GRÖßERER GRÜNFLÄCHEN IM NDVI-BILD. OBEN LINKS: QUICKBIRDAUFNAHME VON 2005 (AUFLÖSUNG 1 M). OBEN RECHTS: EIGENE AUFNAHME 2007. UNTEN LINKS: NDVI VON 2001 (AUFLÖSUNG 30 M). UNTEN RECHTS: EIGENE AUFNAHME 2007 .....	78
ABB. 57: CHANGE DETECTION DER VEGETATION (NDVI) DER LANDSAT AUFNAHMEN VON 1989 UND 2001. ZUR BESSEREN DARSTELLUNG MIT EINEM HILLSHADE DES DEMS TEXTURIERT UND LEICHT TRANSPARENT MIT DEM PANCHROMATISCHEN KANAL DES LANDSAT 7 UNTERLEGT.....	79
ABB. 58: SPEKTRALE PROFILE DER JUNGEN DÜNEN DER 6 BÄNDER DER LANDSAT ETM+-SZENE VON 2001 .....	83
ABB. 59: JUNGES DÜNENFELD RICHTUNG OZEAN .....	83
ABB. 60: JUNGES DÜNENFELD UND SÜßWASSERSEE .....	84
ABB. 61: SPEKTRALE PROFILE EINIGER PROBEN IM DÜNENGEBIET 2 .....	86
ABB. 62: FLACHES DÜNENFELD IN DORFNÄHE .....	86
ABB. 63: FLACHES DÜNENFELD IN DORFNÄHE.....	87
ABB. 64: SPEKTRALE PROFILE VON DÜNENGEBIET 3 .....	88
ABB. 65: ALTE DÜNEN BEI PL MIT SIEDLUNGEN, FRUCHTBÄUMEN UND LANDWIRTSCHAFT .....	89
ABB. 66: WINDEROSION AUF DEN DÜNENGIFFELN. DER OBERBODEN WURDE ABGETRAGEN UND DIE GRASNARBE UNTERGRABEN... ..	91
ABB. 67: WASSEREROSION AN DEN WESTHÄNGEN DER DÜNEN-ARENOSOLE. DEUTLICH SIND DIE TIEFEN SPÜLRINNEN ERKENNBAR ..	91
ABB. 68: STREUDIAGRAMM DES S-WERTES UND DER PFLANZENZUSTÄNDE VON 28 DÜNEN-MISCHPROBEN .....	96
ABB. 69: MISCHPROBE 28	96
ABB. 70: MISCHPROBE 27.....	96
ABB. 71: MISCHPROBE 26	97
ABB. 72: MISCHPROBE 24.....	97
ABB. 73: GEGENÜBERSTELLUNG AUSGESUCHTER PARAMETER VON MP24, 26, 27, 28 .....	97

## 8 Tabellenverzeichnis

TAB. 1: BEVÖLKERUNGSWACHSTUM VON XAI-XAI NACH (GIVE SIBINDE, 2005)	7
TAB. 2: ANBAUZEITEN DER LANDWIRTSCHAFT IN DEN DÜNEN (QUELLE: BEFRAGUNG VOR ORT)	18
TAB. 3: VERGLEICH DER LANDSAT SYSTEME (NACH HILDEBRANDT 1996, HTTP://LANDSAT.GSFC.NASA.GOV 2.10.2007)	31
TAB. 4: ALLGEMEINE BEWERTUNG DER EC-WERTE NACH (LONDON, 1991)	42
TAB. 5: EINSTUFUNG DER BODENREAKTION NACH(BODENKUNDE AG, 2005)	43
TAB. 6: PUFFERBEREICHE IM BODEN NACH (MAKKI, 1999)	44
TAB. 7: NÄHRSTOFFE DES PFLANZENWACHSTUMS NACH (YOUNG, 1976). UNTERSUCHTE ELEMENTE SIND FARBLICH HERVORGEHOBEN	47
TAB. 8: BEWERTUNG DER STICKSTOFFKONZENTRATION IN GEW.-% TROPISCHER BÖDEN NACH (YOUNG, 1976), (LONDON, 1991)	50
TAB. 9: BEWERTUNG DES HUMUSGEHALTES IN % BEI LANDWIRTSCHAFTLICH GENUTZTEN BÖDEN NACH (MAKKI, 1999)	53
TAB. 10: BEURTEILUNG DES WASSERLÖSLICHEN, PFLANZENVERFÜGBAREN P-GEHALTES IN TROPISCHEN BÖDEN NACH (LONDON, 1991)	54
TAB. 11: BEWERTUNG DES NÄHRSTOFFSPEICHERVERMÖGENS AUS DEN STUFEN DER EFFEKTIVEN KATIONENAUSTAUSCHKAPAZITÄT NACH (LAHMEYER, 2000)	56
TAB. 12: BEWERTUNG DES AUSTAUSCHBAREN KALIUM, CALCIUM, MAGNESIUM, NATRIUM NACH (LONDON, 1991), ALLE ANGABEN IN CMOL/KG	57
TAB. 13: PEARSON-KORRELATION ZWISCHEN DER $KAK_{EFF}$ , DEM HUMUS- UND TONGEHALT	57
TAB. 14: BODENPHYSIKALISCHE KENNWERTE DER WASSERBINDUNG IN VOL.-% UND IHRE BEWERTUNG NACH (BODENKUNDE AG, 2005). ZUSCHLÄGE HUMUSREICHER BÖDEN SIND EINGERECHNET	63
TAB. 15: GESÄTTIGTE WASSERLEITFÄHIGKEIT DER DÜNEN- UND TALBÖDEN NACH (BODENKUNDE AG, 2005)	64
TAB. 16: ERGEBNISSE DER TALUNTERSUCHUNGEN. UNTERSUCHUNGSMETHODEN SIEHE KAPITEL 3.6.2. ENTNAHMETIEFE OB: 0-2 CM, SONST 0-40 CM	68
TAB. 17: BODENVERHÄLTNISSE DES TALGEBIETES NAHE DER DÜNEN	70
TAB. 18: SALZTOLERANZ EINIGER NUTZPFLANZEN. EC EINHEIT = 1 MS/CM NACH (LONDON, 1991)	75
TAB. 19: BODENVERHÄLTNISSE DER JUNGEN DÜNEN (GEBIET 1). AUFGRUND DER NUR GERINGEN ANZAHL AN MISCHPROBEN WURDEN DIE LEITPROFILE IN DIE TABELLE MIT AUFGENOMMEN	82
TAB. 20: ERGEBNISSE DER DÜNENMISCHPROBEN AUS GEBIET 2. AUFGRUND DER GUTEN AUSSAGEKRAFT DER ZAHLREICHEN PROBEN SIND DIE LEITPROFILE NICHT AUFGEFÜHRT (SIEHE ANHANG)	85
TAB. 21: BODENEIGENSCHAFTEN DES DÜNENGEBIETES 3	88
TAB. 22: PEARSON-KORRELATIONSKOEFFIZIENTEN. N=31. KAK, S-WERT, NA, CA, K, MG IN CMOL/KG	95
TAB. 23: VERGLEICH EINER ABGEBRANNTEN FLÄCHE (MP20) MIT 2 BENACHBARTEN BEWIRTSCHAFTETEN FLÄCHEN (MP18 UND MP19)	102

## 9 Abkürzungsverzeichnis

ABKÜRZUNG	ERKLÄRUNG
DEM	Digital Elevation Model (=digitales Höhenmodell)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
RGB	Rot Grün Blau

IHS	Intensity Hue Saturation
WGS	World Geodetic System
UTM	Universal Transverse Mercator
GIS	Geographische Informationssysteme
ETM	Enhanced Thematic Mapper
TM	Thematic Mapper
MSS	Multispectral Scanner
IR	Infrared
USGS	United States Geological Survey
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
DFD	Deutsches Fernerkundungs Datenzentrum
SAR	Synthetic Aperture Radar
DN	Digital Numbers
TC	Tasseled Cap
EC	Electrical Conductivity (=elektrische Leitfähigkeit)
BS	Basensättigung
KAK	Kationenaustauschkapazität
AAS	Atomabsorptionsspektroskopie
N <sub>t</sub>	Gesamtstickstoff (auch N <sub>ges</sub> )
C <sub>org</sub>	Organischer Kohlenstoff
pt	Trockenrohddichte
LK	Luftkapazität
GPV	Gesamtporenvolumen
FK	Feldkapazität
nFK	Nutzbare Feldkapazität
Ld	Lagerungsdichte
TW	Totwasser
FAO	Food and Agriculture Organisation of the United Nations
GOK	Geländeoberkante
KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung, Ausgabe 5
FCC	Fertility Capability Classification
WRB	World Reference Base for Soil Resources
Mp	Mischprobe
Lp	Leitprofil
eWe	Effektive Durchwurzelungstiefe

## 10 Literaturverzeichnis

Achtnich, W. (1986). Bewässerungsbau in den Tropen und Subtropen. In Rehm, *Grundlagen des Pflanzenbaus in den Tropen und Subtropen* (S. 285-342). Stuttgart.

Agee, J. (1996). *Fire Ecology of Pacific NW Forests*. Washington, D.C.

Bahrenberg, G., Giese, E., & Nipper, J. (1992). *Statistische Methoden in der Geographie. Bd. 2: Multivariate Statistik*. Stuttgart.

Bodenkunde AG, . (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Hannover.

Braun, S. (2. Oktober 2007). Abgerufen am 10. Oktober 2007 von TRMM Tropical Rainfall Measuring Mission: <http://trmm.gsfc.nasa.gov>

Christensen, N. (1987). The biochemical consequences of fire and their effects on the vegetation of the coastal plain of the southeastern United States. *The Role of Fire in Ecological Systems* , 1-19.

Cilimburg, A., & Short, K. (2005). *Forest Fire in the Northern Rockies U.S.* Abgerufen am 9. Dezember 2007 von After the Fire: Indirect Effects on the Forest Soil: <http://www.northernrockiesfire.org>

Cornell, R., & Schwetmann, U. (2003). *The iron oxides. Structure, properties, reactions, occurrences and uses*. Weinheim.

Dent, D., & Young, A. (1981). *Soil Survey and Land Evaluation*. London.

DigitalGlobeInc. (2008). Abgerufen am 1. Januar 2008 von Digital Globe: <http://www.digitalglobe.com/>

DLR. (23. Oktober 2007). Abgerufen am 8. November 2007 von Shuttle Radar Topography Mission: [http://www.dlr.de/srtm/level1/start\\_ge.htm](http://www.dlr.de/srtm/level1/start_ge.htm)

FAO. (1988). World Reference Base for Soil Resources. *World Soil Resources Report 84* .

Ferraz, B., & Munslow, B. (2000). Sustainable development in Mozambique. In G. Harrison, *Review of African Political Economy Vol. 27 No. 85* (S. 10-100).

Finck, A. (1986). Düngung und Bodenfruchtbarkeit in den Tropen und Subtropen. In Rehm, *Grundlagen des Pflanzenbaues in den Tropen und Subtropen* (S. 249-284). Stuttgart.

Finck, A. (1963). *Tropische Böden. Einführung in die bodenkundlichen Grundlagen tropischer und subtropischer Landwirtschaft*. Hamburg und Berlin.

- Förster, R. (1975). Die geologische Entwicklung von Süd-Mozambique seit der Unterkreide und die Ammoniten-Fauna von Unterkreide und Cenoman. In *Geologisches Jahrbuch Reihe B*, 12. Hannover.
- Franke, G. (1995). *Nutzpflanzen der Tropen und Subtropen; Bd. 2: Spezieller Pflanzenbau*. Stuttgart.
- Franke, G. (1994). *Nutzpflanzen der Tropen und Subtropen; Bd. 3: Spezieller Pflanzenbau*. Stuttgart.
- Fränzle, O., & Fränzle, U. (1998). Geomorphogenese, Bodenentwicklung, Vegetationsverteilung und Landnutzung im Küstensaum Südmozambiques. *Kieler Geographische Schriften, Band 97*, 149-162.
- Giovannini, G., Lucchesi, S., & Giachetti, M. (1990). Beneficial and detrimental effects of heating on soil quality. *Fire in Ecosystems Dynamics*, 95-101.
- Give Sibinde, A. A. (2005). Water-Related Disaster and Flood Management in Xai-Xai, Mozambique. *Water related risk management in urban agglomerations* (S. 82-94). Bonn: United Nations University.
- Grill, B. (2003). *Ach, Afrika. Berichte aus dem Inneren eines Kontinents*. München.
- Herring, D., & Weier, J. (kein Datum). Abgerufen am 1. Oktober 2007 von Earth Observatoty: Measuring Vegetation (NDVI & EVI): <http://earthobservatory.nasa.gov/Library/MeasuringVegetation/index.html>
- Hildebrandt, G. (1996). *Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie*. Heidelberg.
- Hölting, B. (1998). *Hydrogeologie. Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie*. Stuttgart.
- Jaeckel, P., Kroner, A., Kamo, S., Brandl, G., & Wendt, J. (1997). Late Archaean to early Proterozoic granitoid magmatism and high-grade metamorphism in the central Limpopo belt, South Africa. *Journal of the Geological Society, Vol. 154*, 25-44.
- Jaritz, W., Ruder, J., & Schlenker, B. (1977). Das Quartär im Küstengebiet von Mozambique und seine Schwermetallführung. In *Geologisches Jahrbuch Reihe B* (S. 26-93). Hannover.
- Kriegler, F. J., Malila, W. A., Nalepka, R. F., & Richardson, W. (1969). Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. , in: *Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment, University of Michigan, Ann Arbor, MI*, S. 97-131.

- Kutiel, P., Naveh, Z., & Kutiel, H. (1990). The effect of a wildfire on soil nutrients and vegetation in an Aleppo pine forest on Mount Carmel, Israel. *Fire in Ecosystem Dynamics*, 85-93.
- Lahmeyer. (2000). *Bodenschutzkonzeption für das Land Berlin, Berichte zur Phase II*. Berlin.
- Landon, J. R. (1991). *Booker Tropical Soil Manual - A handbook for soil survey and agricultural evaluation in the tropics and subtropics*. London, England.
- Macamo, E., & Neubert, D. (2004). Die Flut in Mosambik - Zur unterschiedlichen Deutung von Krisen und Katastrophen durch Bauern und Nothilfeapparat. *Lokales Wissen - Sozialwissenschaftliche Perspektiven*, 185-208.
- Makki, M. (1999). *Bodenkundliches Laborpraktikum*. Erlangen.
- Mohr, E. C., Van Baren, F. A., & Schuylenborgh, V. (1972). *Tropical Soils*. Amsterdam, Niederlande.
- Mückenhausen, E. (1995). *Die Bodenkunde und ihre geologischen, geomorphologischen, mineralogischen und petrologischen Grundlagen*. Frankfurt am Main.
- Page, A., Miller, R., & Keeney, D. (1982). *Methods of Soil Analysis Part 2 - Chemical and Microbiological Properties Second Edition*. Madison, USA.
- Piätikäinen, J. (1999). Soil microbes in boreal forest humus after fire. *Finnish Forest Research Institute Research Papers 750*, 50-78.
- Ramirez, E. (2. Februar 2006). Abgerufen am 8. November 2007 von Shuttle Radar Topography Mission: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
- Richter, G. (1974). Agrargeographische Kartierung in Südmosambique: Erfassungsprobleme und Auswertungsmöglichkeiten in einem Entwicklungsland. *39. Deutscher Geographentag Kassel 1973, Band 39*, 216-234.
- Roseeu, R. (1. Dezember 2003). Abgerufen am 1. Oktober 2007 von Satellitengeographie im Unterricht: <http://satgeo.zum.de/satgeo/beispiele/Spainien/Blatt.jpg>
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third ERTS Symposium, NASA SP-351, vol. 1*, S. 309-317.
- Sanchez, P., Cheryl, A., & W., S. (2003). *Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics*. Raleigh, USA.
- Scheffer, F., & Schachtschabel, P. (2002). *Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage*. Stuttgart.
- Schlichting, E., & Blume, H.-P. (1995). *Bodenkundliches Praktikum*. Berlin-Wien.
- Schröder, D. (1992). *Bodenkunde in Stichworten*. Stuttgart.

- Schulze, E., Beck, E., & Müller-Hohenstein, K. (2002). *Pflanzenökologie*. Stuttgart.
- Schwarzer, C. (2007). Abgerufen am 2. Januar 2008 von Statistics for the life science: <http://www.math.sfu.ca/~cschwarz/Stat-301/Handouts/boxplot.png>
- Singh, A. (1989). Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing* 10 , S. 989-1003.
- Stech, C. (kein Datum). Abgerufen am 1. Oktober 2007 von EWF Kiel: Einführung in die Fernerkundung: [http://www.uni-kiel.de/forum-erdkunde/unterric/material/einf\\_fe/images/spectralkvemd.gif](http://www.uni-kiel.de/forum-erdkunde/unterric/material/einf_fe/images/spectralkvemd.gif)
- USGS. (22. August 2006). Abgerufen am 2007. Oktober 1 von Tri-Decadal Global Landsat Orthorectified: [http://eros.usgs.gov/products/satellite/landsat\\_ortho.html](http://eros.usgs.gov/products/satellite/landsat_ortho.html)
- Wan, S., Hui, D., & Luo, Y. (2001). Fire effects on nitrogen pools and dynamics in terrestrial ecosystems: a meta-analysis. *Ecological Applications* 11 , 1349-1365.
- Weber, P. (1972). Agrargeographische Skizze des Makonde-Gebietes (Mocambique). *Erde, Band 103* , 60-76.
- Weber, P. (1972). Die agrarräumliche Gliederung als Grundlage landwirtschaftlicher Entwicklungsplanung (Beispiel: Mittel-Mozambique). *38. Deutscher Geographentag Erlangen-Nürnberg 1971, Band 38* , 479-490.
- Werres, F. (2000). Bestimmung der Konzentration gelösten Stickstoffs in natürlichen Wässern mittels Wärmeleitfähigkeitsdetektion. *Wasser und Boden. Bd. 52, H. 3* .
- Williams, D. (10. Januar 2008). Abgerufen am 2. Februar 2008 von Landsat 7 Science Data Users Handbook: [http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook\\_htmls/chapter11/chapter11.html](http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_htmls/chapter11/chapter11.html)
- Young, A. (1976). *Tropical Soils and Soil Survey*. Melbourne, Australia.
- Zech, W., & Hintermaier-Erhard, G. (2002). *Böden der Welt. Ein Bildatlas*. Stuttgart.

## 11 Anhang

Faktoren	Ältere Dünen	Jüngere Dünen	Limpopotal nahe der Dü- nen	Limpopotal
<b>Physikalische Faktoren</b>				
Durchwurzelung	++	++	+/-	--
Wasserspeicherung	-	--	+	+
Wasserleitfähigkeit	++	++	+/-	---
Erosionsgefährdung	--	---	+/-	-
Körnung	--	---	+	-
Tongehalt	--	---	+	++
Bodenerschöpfung	-	--	+	+
Geländemorphologie (v.a. Hangneigung)	-	---	++	++
Bodenbearbeitung	++	++	-	--
Erreichbarkeit (Wege, Entfernung)	+	-	+	--
<b>Pflanzennährstoffe</b>				
Basensättigung	+	+	++	++
Stickstoff	--	---	+	+
Phosphat	-	--	+/-	+/-
Kalium	+/-	--	+	+
Calcium	+	+/-	++	++
Natrium				
Magnesium	+	+/-	++	++
C/N Verhältnis	++	++	++	++
Verwitterbare Minerale	--	--	--	--
Kationenaustauschkapazität	-	--	+	++
<b>Chemische Faktoren</b>				
Bodenreaktion	-	-	+	++
Basensättigung	+	+	++	++
Bodenversalzung	++	++	+	-
Kalkgehalt	0	0	0	0
<b>Humus</b>				
C <sub>org</sub>	--	---	++	++
Humusgehalt	--	---	++	++
<b>Eignung für Pflanzen</b>				
Mais	-	---	+	-
Maniok	+	+/-	-	---
Erdnuss	+	+/-	-	---
Süßkartoffel	-	--	++	
Fruchtbäume	+	+/-	+	
Bohne			+	--

++ sehr gut + gut +/- neutral - schlecht -- sehr schlecht --- extrem schlecht

Anhang 1: Bodenfruchtbarkeitstabelle und Eignung der angebauten Pflanzen. Die einzelnen Faktoren werden in Kapitel 4.1.4 und 4.2.4 erläutert

Name	Textur *	Abfluss **	Durchwurzelung ***	Dürreerresistenz ****	Erosionsgefährdung ****	Bodenreaktion pH-(H <sub>2</sub> O)	Nährstoffbedarf ****	Salzverträglichkeit ****
Mais	m	f, s, t=60	M	L	H	5,5-8	H, bes. N	L
Maniok	m, g, sg	f, t=50	D	H	M	5,5-6,5	M, tolerant	L
Erdnuss	m, g, sg	f, t=50	M	M	M	5-7	M	L
Süßkartoffel	m, g	f	M		M	5,8-6	H, bes. K	
Bohne	m, g	f, t=30-50		L	M	6-7	M	L
Kokosnuss	m, g, sg	s, t=50	D	L		5-8	L	M
Banane	m, g	f, s, t=100	D	L	H	4-8	M, bes. N, K	L
Citrus	m, g	f, t=130	D	M		5-8	M, bes. N, K	L
Mango	m	s, t=60	D			5,5-7,5	M	L
Cashew	g	s, t=100	D			5,5-7	M	M
Tomate	m	f, t=50	M	L		5-7	H	L
Reis	f, m	s, t=50	S		M	4,5-7,5	M	M

\*f=fein, m=mittel, g=grob, sg=sehr grob

\*\* f=freier Abfluss wichtig, s=toleriert Staunässe, t=minimale Grundwassertiefe in cm

\*\*\*D=tief (>90 cm), M=mittel (60-90 cm), flach (30-60 cm)

\*\*\*\* niedrig=L, mittel=M, hoch=H

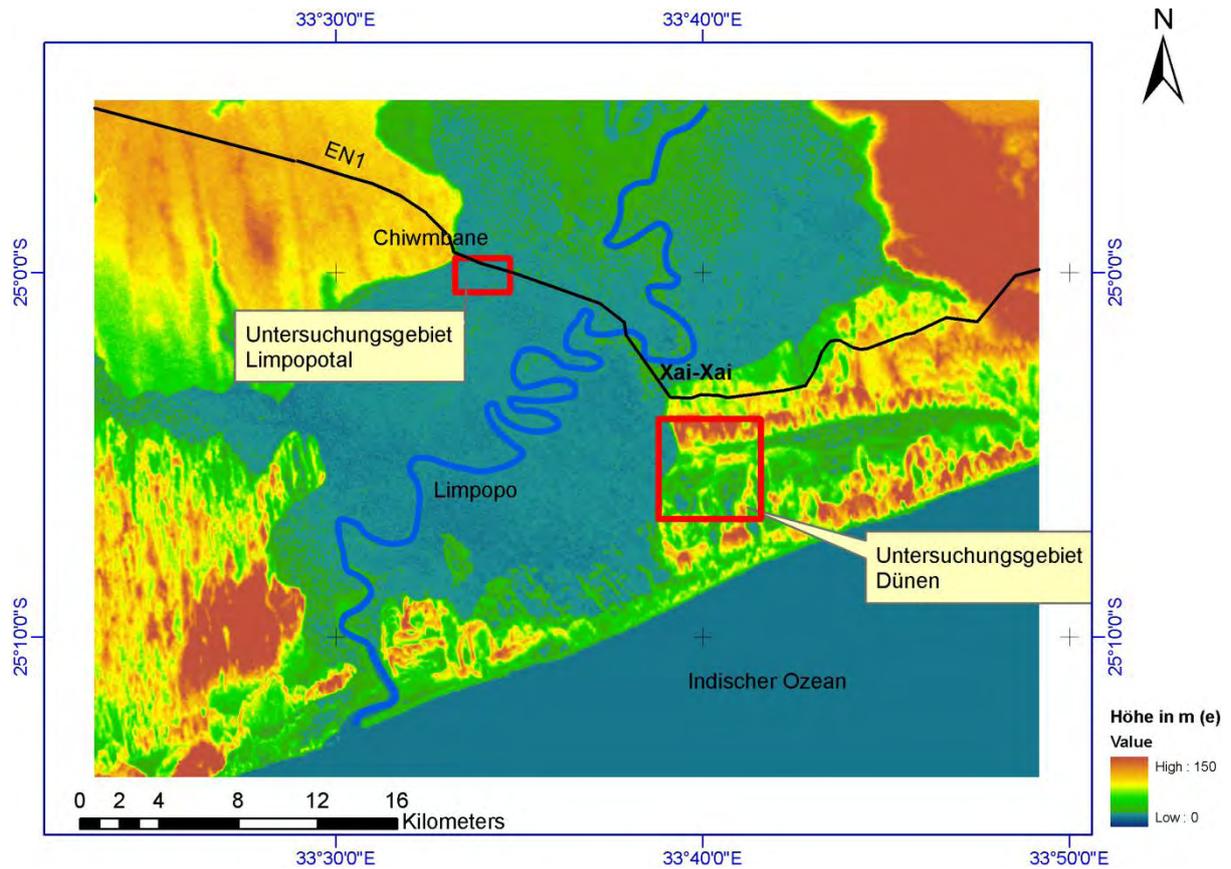
#### Anhang 2: Eignungstabelle der wichtigsten Feldfrüchte anhand von 8 Kriterien nach (Landon, 1991)

Name	Nährstoffbedarf N : P : K kg/ha/ Wachstumsperiode	Wasserbedarf mm/Wachstumsperiode
Banane	0-40 : 55-65 : 75-100	800-1600
Bohne	20-40 : 40-60 : 240-480	1200-2200
Citrus	100-200 : 35-45 : 50-160	900-1200
Erdnuss	10-20 : 15-40 : 25-40	500-700
Mais	100-200 : 50-80 : 60-100	500-800
Reis	100-150 : 20-40 : 80-120	350-700
Tomate	100-150 : 65-110 : 160-240	400-600

#### Anhang 3: Nährstoff- und Wasserbedarf einiger Feldfrüchte nach (Landon, 1991)

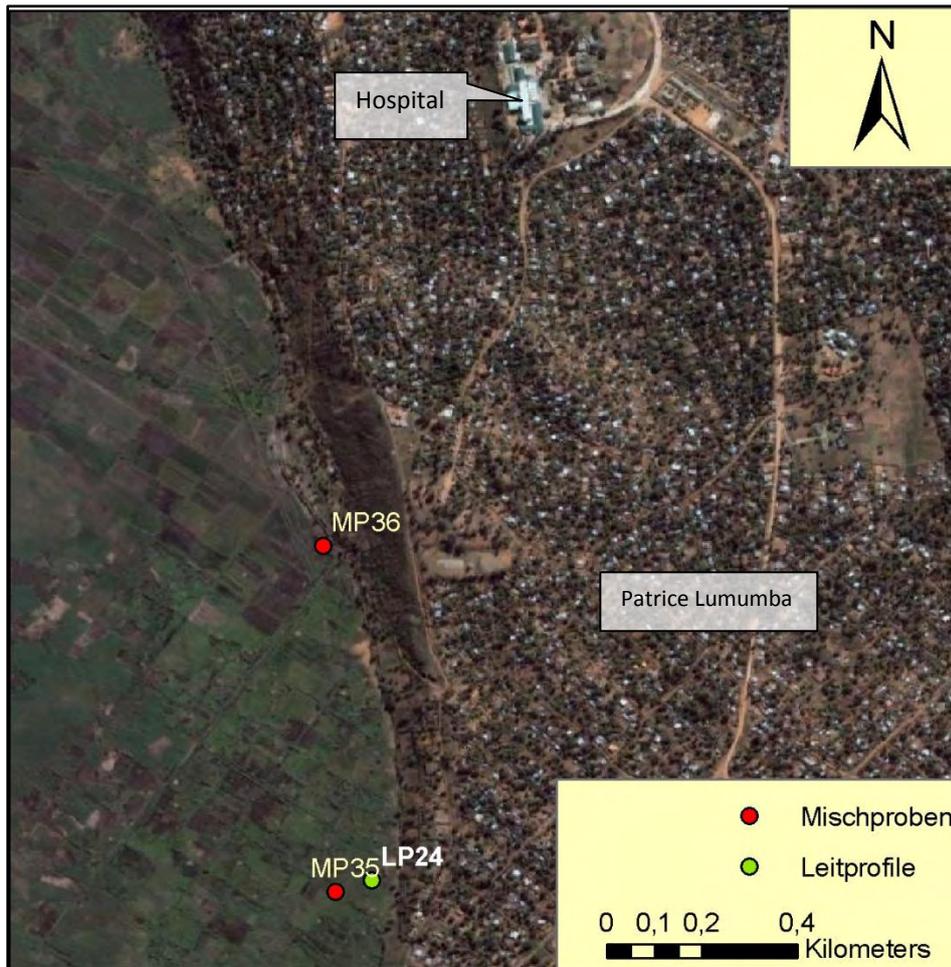
<b>Projekt</b>			
<b>PN-Datum, Uhrzeit</b>		<b>Probenehmer</b>	
<b>Witterung</b>			
<b>Temperatur °C</b>			
<b>Probenahmeart</b>	[ ] Einzelprobe; [ ] Mischprobe		
<b>Probenahmegeräte</b>	[ ] Handbohrstock; [ ] Spaten; [ ] Sonstige: _____		

<b>Probenbezeichnung</b>			
<b>Beprobter Bodenhorizont</b>	<input type="checkbox"/> 0 – 2 cm u. GOK <input type="checkbox"/> 0 - 40 cm u. GOK <input type="checkbox"/> Bodenmischprobe aus [        ] Einstichen <input type="checkbox"/> kg homogenisiert und auf [    ] kg verkleinert		
<b>Zu untersuchende Parameter</b>			
<b>Probenvorbehandlung</b>	<input type="checkbox"/> Homogenisierung; <input type="checkbox"/> Aussortieren von Probenanteil > 10 mm, ca.        Vol.-% <input type="checkbox"/> Aussieben von Probenanteil > 2 mm, ca        Vol.-%		
<b>Probenahmegefäß</b>	<input type="checkbox"/> PE-Beutel; [ ] sonstige _____ <input type="checkbox"/> Headspace        [ ] HS auf Dichtheit überprüft		
<b>Angaben zur Örtlichkeit/ Vorherrschende Vegetation/ Bodennutzung/ Relief</b>			
<b>Probentransport, Probenlagerung</b>			
<b>Bodengefüge/ Farbe/ WRB Klassifikation/ Sonst. Bemerkungen</b>			

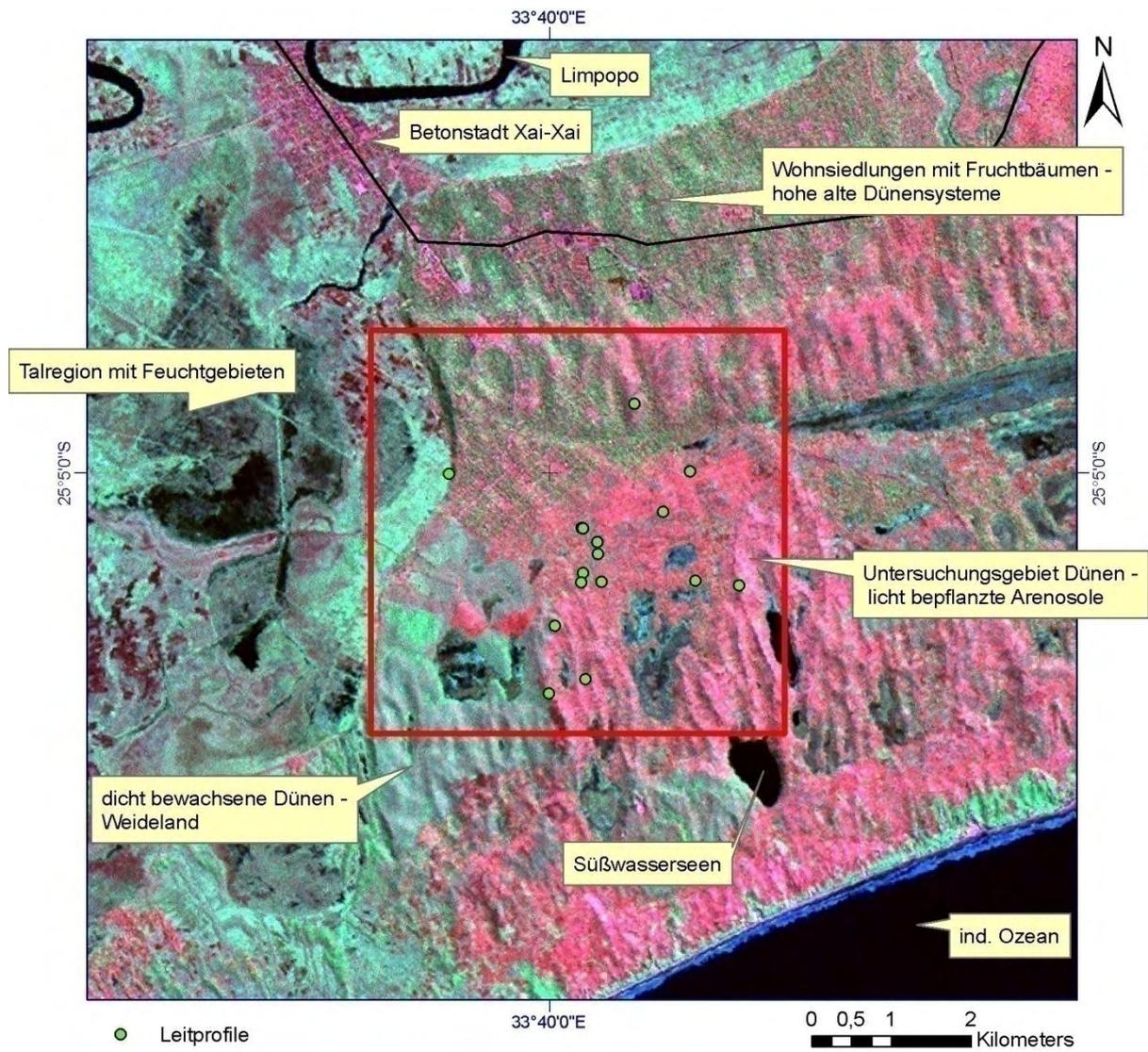


Anhang 5: Deses eingefärbte DEM aus den SRTM Daten zeigt die Lage der beiden Untersuchungsgebiete

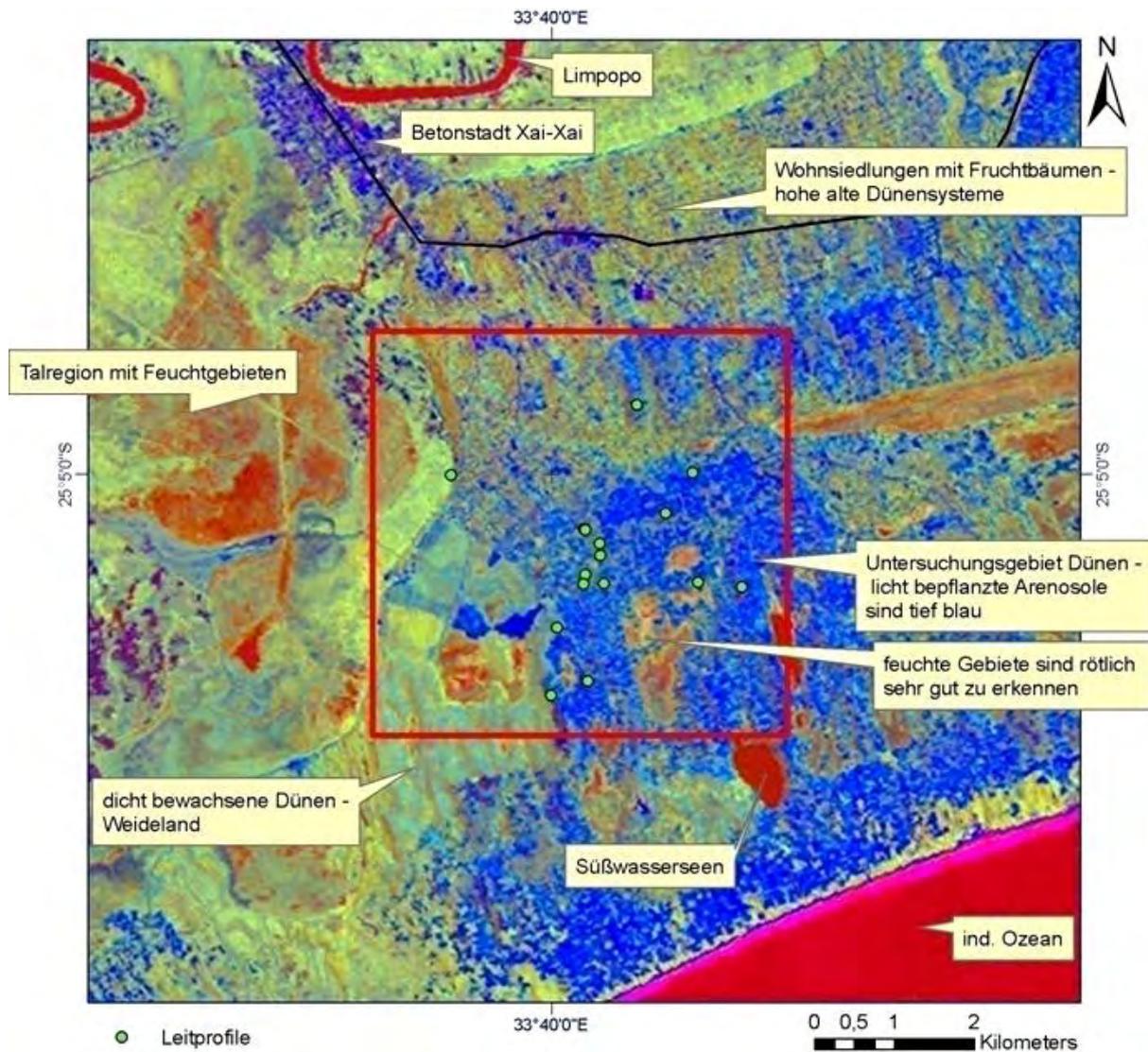




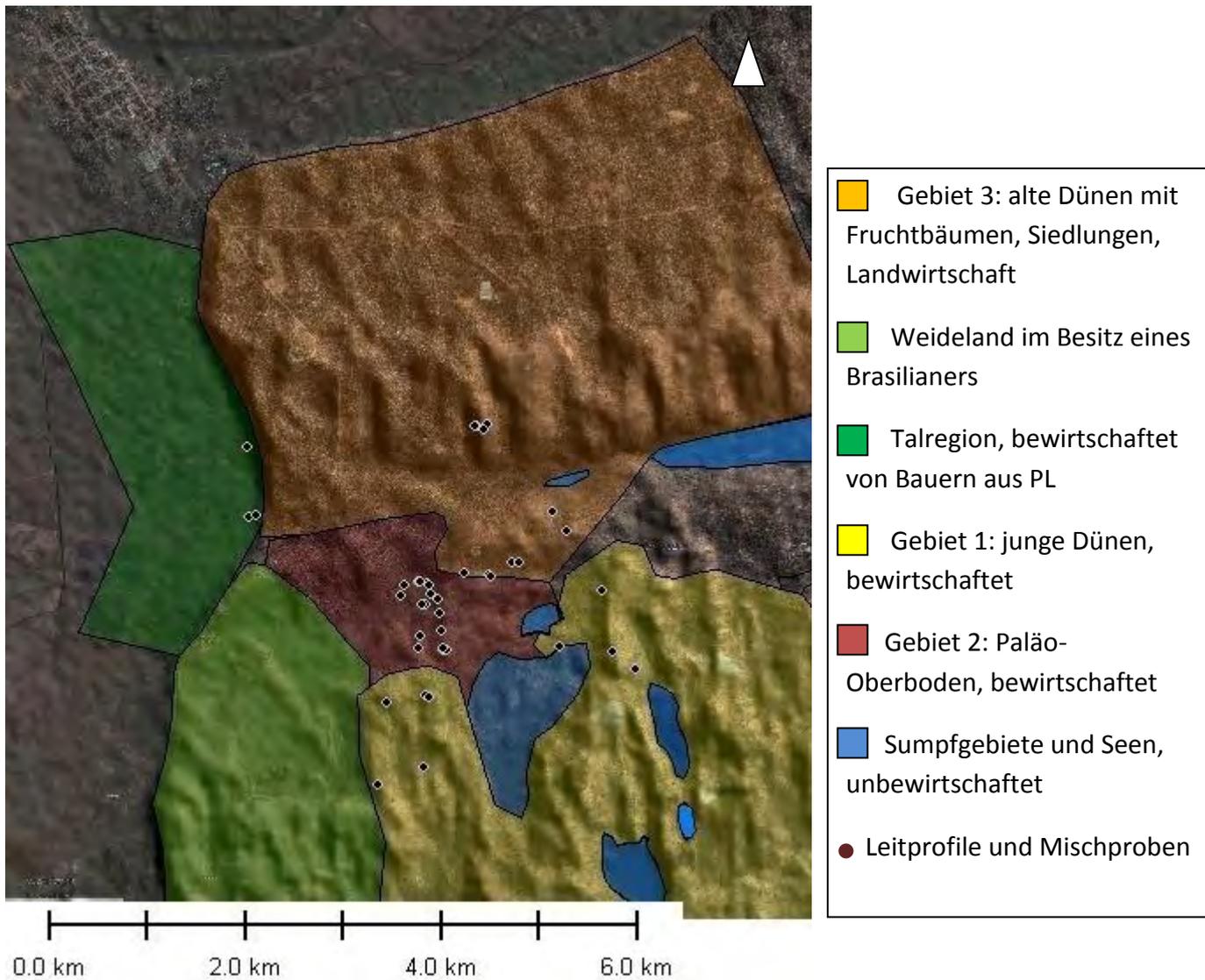
Anhang 6: Übersichtskarten der Leitprofile und Mischproben im Dünengebiet und der unmittelbar angrenzenden Talregion. Als Kartenmaterial dient die überarbeitete Quickbird-Aufnahme von DigitalGlobe



Anhang 7: Kommentiertes Falschfarbenkomposit der Landsat 7 Kanäle 742 (Aufnahme Mai 2001). Die geometrische Auflösung wurde mit dem panchromatischen Kanal erhöht (IHS-Transformation)



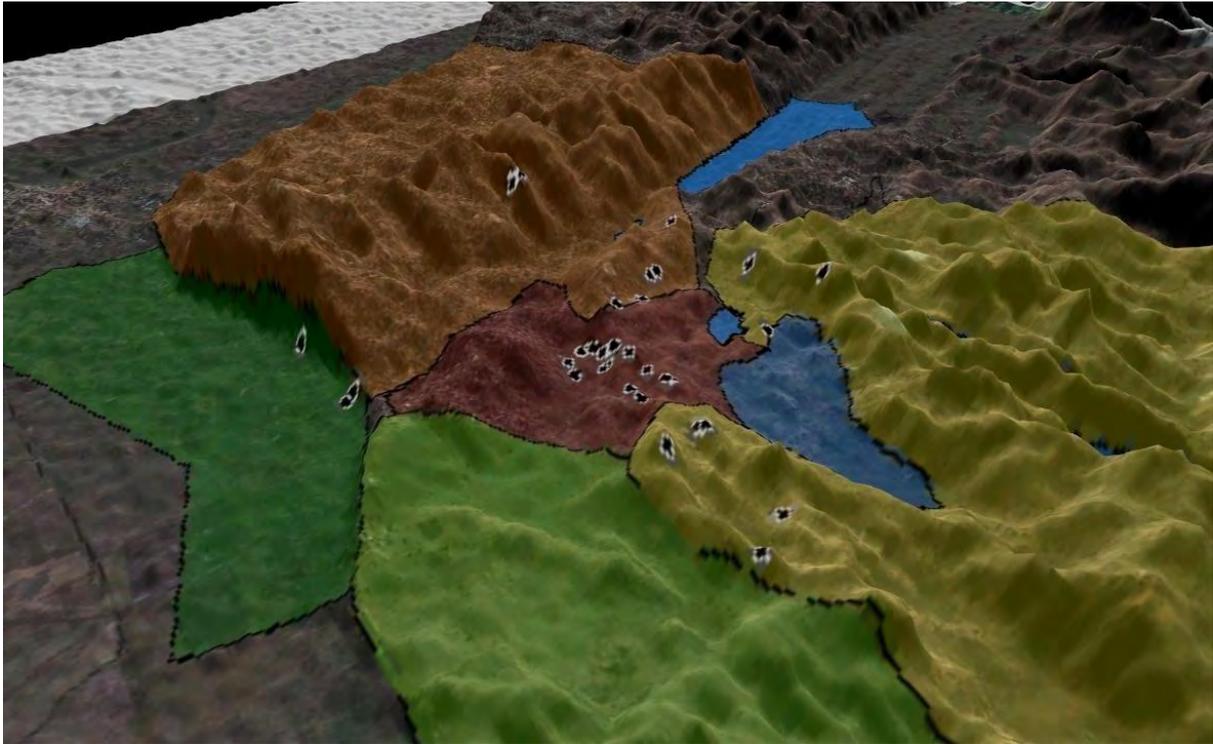
Anhang 8: Kommentierte Tasseled Cap-Transformation. Wetness = Rot, Greenness = Grün, Brightness = Blau. Die Aufnahme stammt von 2001 (Landsat 7) und wurde mit dem panchromatischen Kanal geometrisch verbessert (IHS-Transformation)



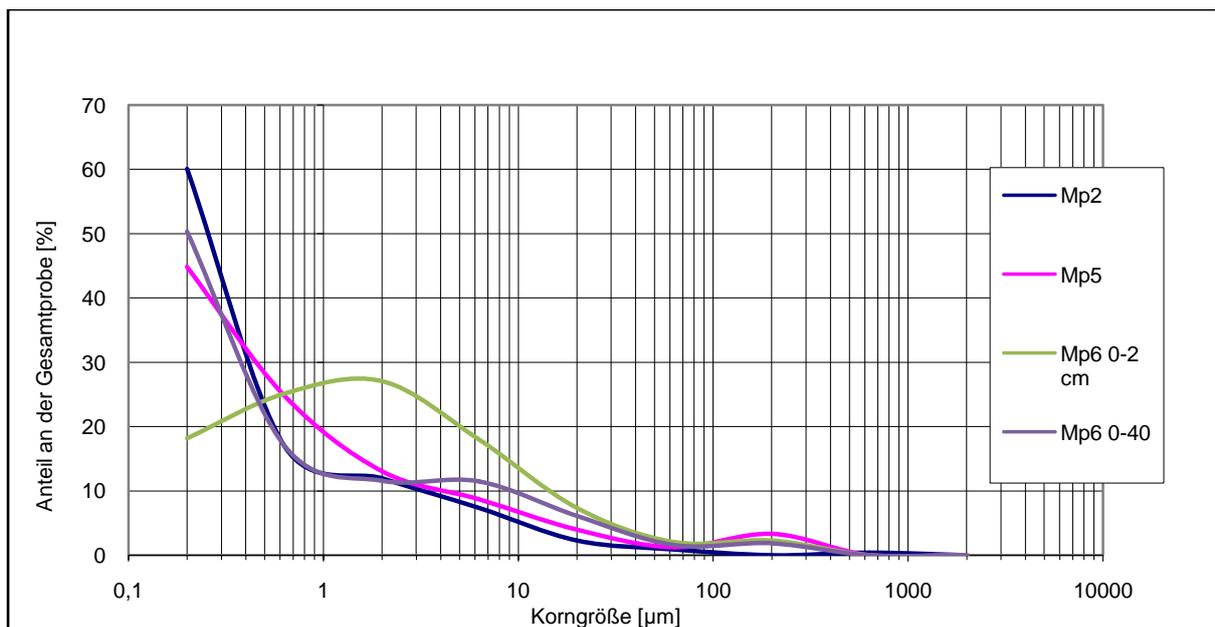
Anhang 9: Unterteilung der Dünengebiete. Unterlegt mit der Quickbirdaufnahme und einem Hillshade. Die Beschreibung der einzelnen Flächen finden sich in Kapitel 4.2.3 auf Seite 81, Legende mit FCC siehe nächster Anhang

Fläche:	WRB	FCC	Interpretation
Gebiet 1	 Eutric Regosol N=12	SS d 0-30° k e m	Junge, hohe Dünen; hauptsächlich mit Mais bepflanzt, bis auf Gipfel vollständig genutzt; 95 % Sand 3 % Ton, 2 % Schluff (SS); lange Trockenzeit (d), schlechte Wasserhaltefähigkeiten, Hangneigung -30°, keine Bodenentwicklung, mäßig sauer, hohe BS, keine verwitterbaren Minerale (k), niedrige KAK (e), sehr wenig Humus (m), erosionsgefährdet, siehe LP4
Gebiet 2	 Ferralic Arenosol N=43	SS d 0-9° k e m	Paläooberboden in 40-80 cm Tiefe, flach; Flickenteppich aus Parzellen teils mit Wiesen, teils mit Mischkulturen, 87 % Sand, 9 % Ton, 4 % Schluff, lange Trockenzeit, schlechte Wasserhaltefähigkeiten, Hangneigung -9°, keine verwitterbaren Minerale, niedrige KAK, mäßig sauer, hohe BS, niedriger Humusgehalt, siehe LP 5
Gebiet 3	 Ferralic Arenosol N=8	SS d 0-25° k e m	ältere Dünen mit Siedlungen, Fruchtbäumen, Feldern, Bodeneigenschaften ~ wie Gebiet 2, an den Hängen der steilen Dünen (-25°) entsprechend schlechter, erosionsgefährdet
Talregion nahe der Dünen	 Eutric Fluvisol N=5	SC g+ i	grenzt unmittelbar an Dünen an, landwirtschaftlich genutzt: Gemüse, Obst, Mais, Reis, Oberboden sandig, Unterboden 90 % Ton (SC), mittlere KAK, hohe BS, schwach sauer- neutral, sehr humos, hohe Wasserhaltefähigkeit, wassergesättigt (g+), hohe P-Fixierung (i), magnetithaltig, flach, siehe LP24
Weideland			Privates Weideland, umzäunt, Busch und Grasvegetation, keine Daten verfügbar
weit im Tal liegende Region	Eutric Fluvisol N=12	CC g+ s- i	Im Tal gelegen, Mais, Ober- und Unterboden tonig (CC), hohe KAK, hohe BS, neutrale Acidität, humos, hohe Wasserhaltefähigkeit, mittlere Wasserverfügbarkeit, Stress durch Salz (s-), hohe P-Fixierung, magnetithaltig, flach, siehe LP1

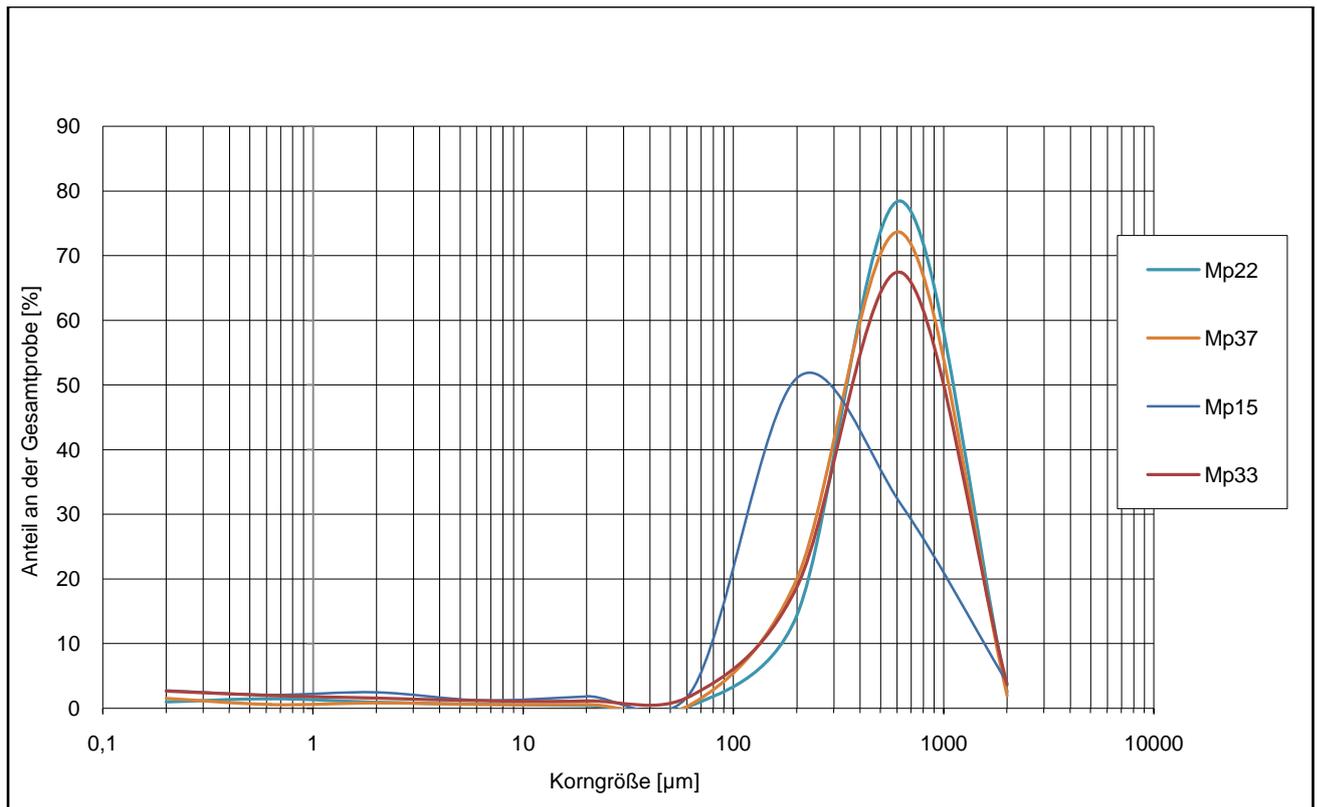
Anhang 10: Legende zu Anhang 9 + weit im Tal liegende Region. Einstufung anhand der Fertility Capability Classification Version 4 mit Interpretation der Symbole nach (Sanchez, Cheryl, & W., 2003). N=Anzahl der Proben



Anhang 11: Dreidimensionale Darstellung von Anhang 9. Legende siehe Anhang 10. 10-fache Überhöhung



Anhang 12: Korngrößensummenkurven einiger Talmischproben von Feld 1 und 2. Mp6 ist in 2 Tiefen (0-2 cm und 0-40 cm) dargestellt

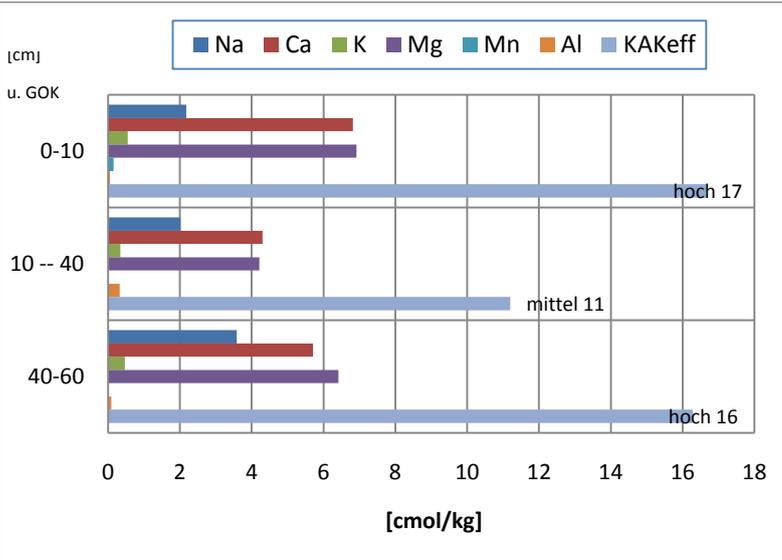
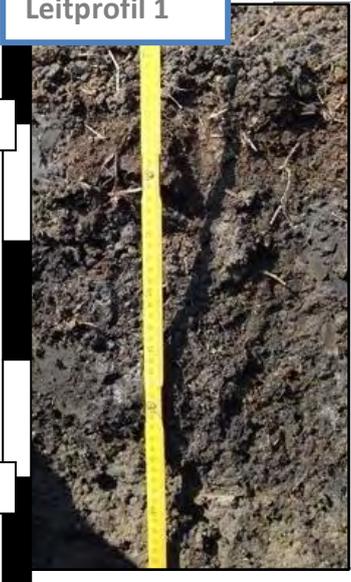


Anhang 13: Korngrößensummenkurven einiger Dünenmischproben. Auffällig ist die sehr homogene Verteilung im Schluff- und Ton-Bereich. Mp22 und 37 stehen exemplarisch für die jungen Dünen, Mp33 für die alten, und Mp15 für die flache Fläche dazwischen

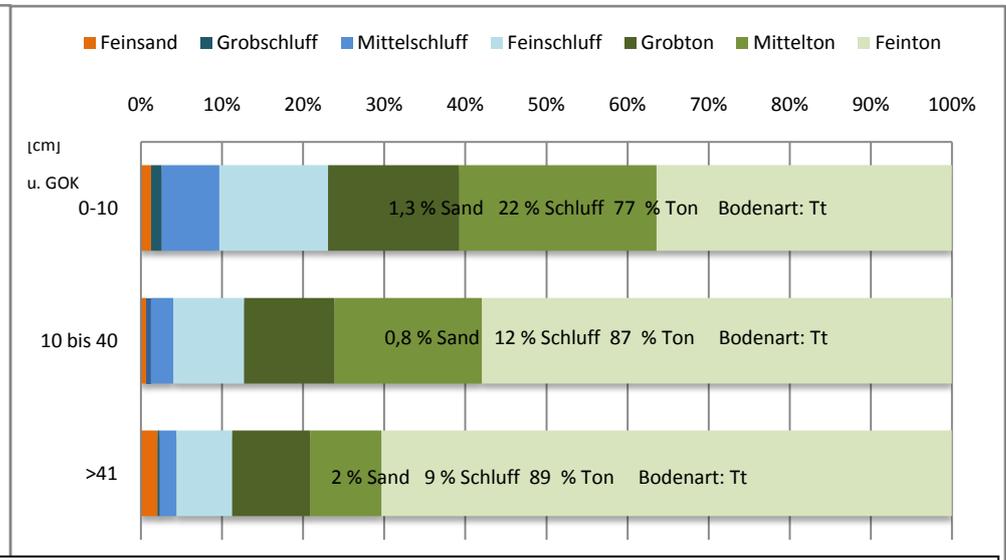
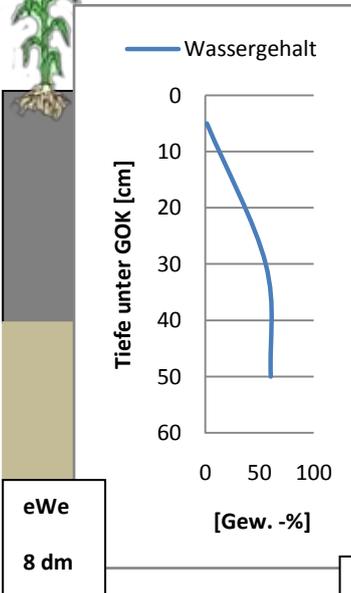
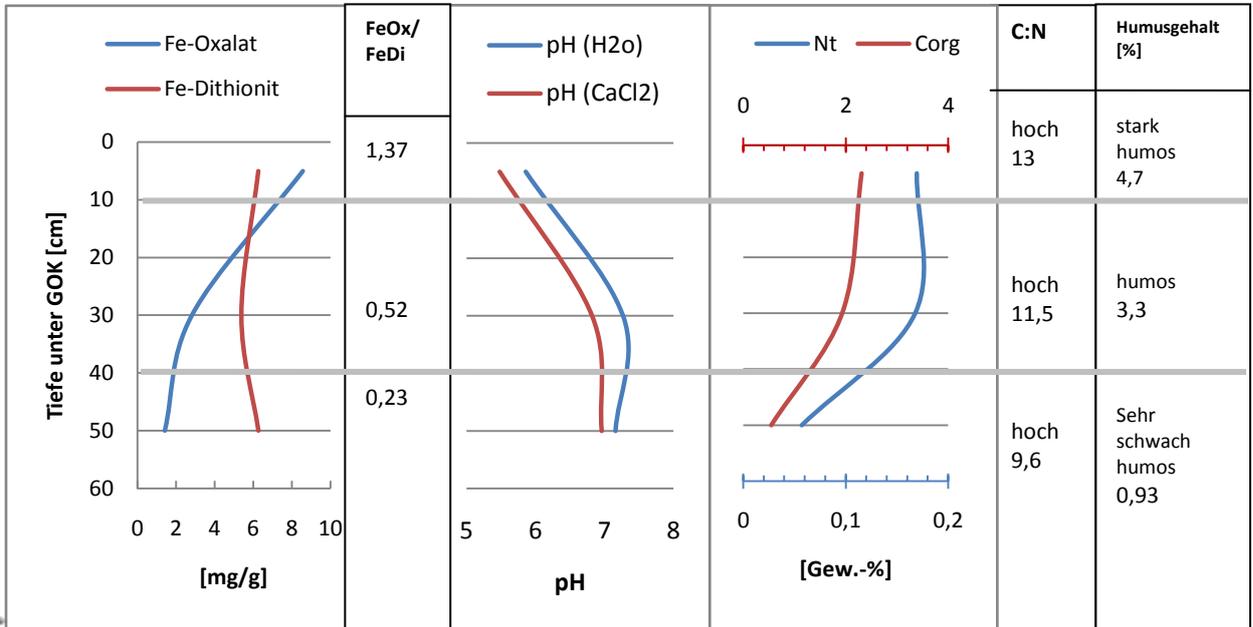
Leitprofil 1

10

40



BS [%]	EC [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
Hoch 98	1160
Hoch 97	1680
Hoch 99	1995



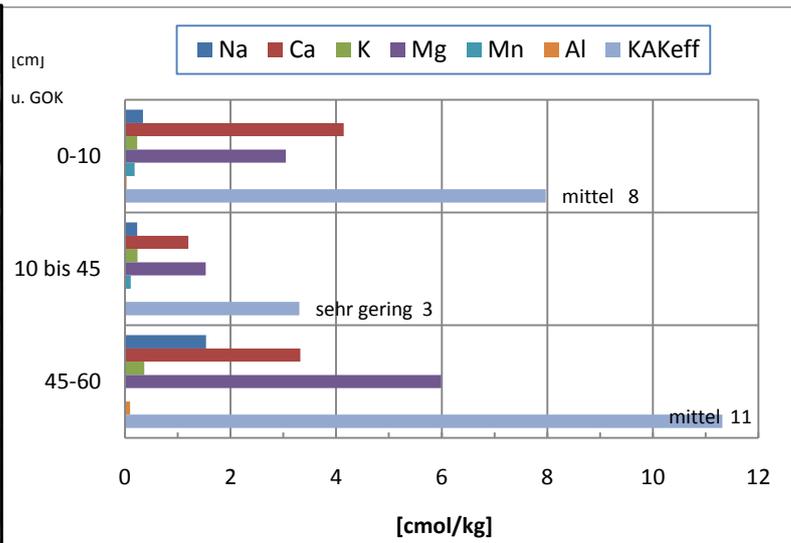
Ld: 1,97 pt: 1,2 FK: 60 %, sehr hoch nFK: 24 %, hoch LK: 10 %, mittel GPV: 70 %, sehr hoch TW: 36 %, sehr hoch kf: 3 cm/d, gering

eWe  
8 dm

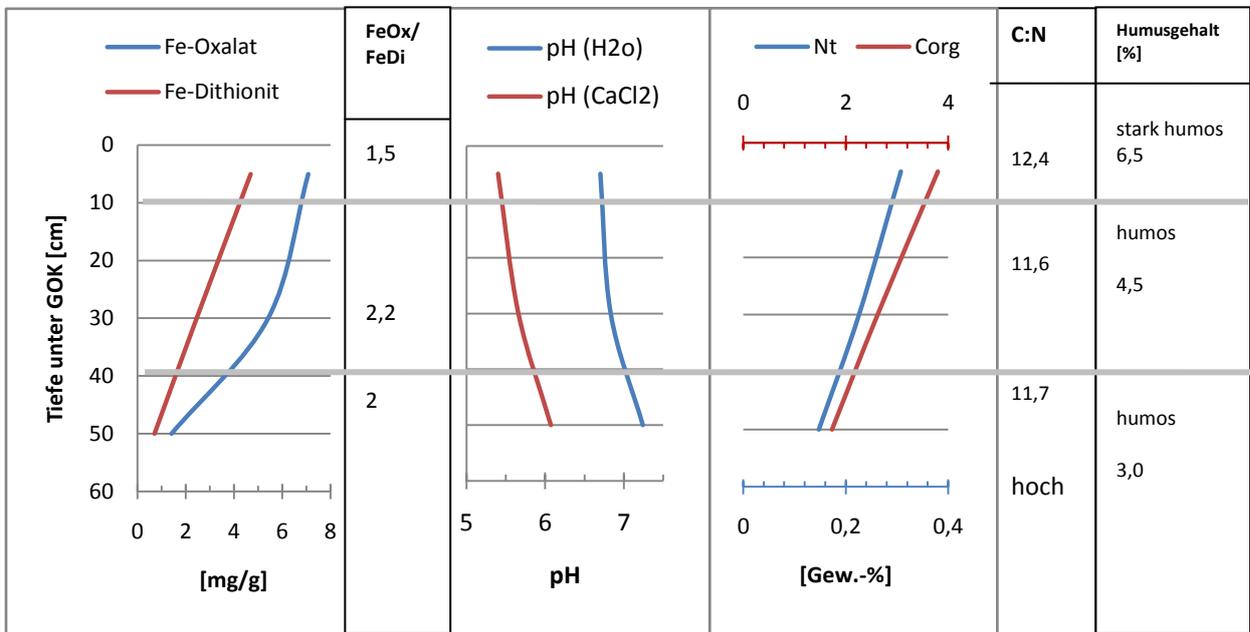
**Leitprofil 1**

<b>WRB:</b>	Eutric Fluvisol
<b>Ort:</b>	Schwemmland des Limpopo, Xai-Xai, weit im Tal gelegenes Gebiet / Feld 1
<b>Höhe:</b>	
<b>Landnutzung:</b>	extensive Landwirtschaft, Mais
<b>Profilbeschreibung:</b>	
<b>0-10 cm A</b>	Trocken, magnetithaltig, Polyedergefüge, toniger Ton (76 %)
<b>10-40 cm</b>	Nass, Kohärentgefüge, toniger Ton (87 %)
<b>&gt;40 cm C</b>	Nass, Kohärentgefüge, 70% Feinton, toniger Ton (88 %)
<b>Analyse:</b>	<p>Dieses Profil liegt im Schwemmland des Limpopo. Die Sedimente sind deutlich fluvialen Ursprungs, auch ist der Einfluss von Grundwasser unverkennbar. Bereits wenige cm unter GOK steigt der Wassergehalt, nimmt ab 40 cm u. GOK mehr als 50 % ein. Der Gehalt an organischem Material ist hoch, nimmt mit der Tiefe deutlich ab und schrumpft auf ein Minimum im C-Horizont. Parallel dazu verläuft die Tiefenfunktion des Gesamtstickstoffs. Das C/N-Verhältnis ist eng. Der hohe Ton- und Humusgehalt bewirkt eine hohe Kationenaustauschkapazität, insbesondere Ca und Mg sind erhöht vorhanden. Der pH-Wert befindet sich an der Oberfläche im schwach sauren Bereich und steigt mit zunehmender Tiefe auf einen neutralen Wert. Die Basensättigung beträgt in allen Horizonten nahezu 100 %. Die EC liegt im erhöhten Bereich und nimmt mit steigender Tiefe zu. Die Bodenart ist ausschließlich reiner Ton mit einem Tongehalt von nahezu 90 %. Mit der Tiefe nimmt der Schluffgehalt ab und der Feintonanteil erheblich zu und erreicht im C-Horizont einen Gesamtanteil von 70 %. Die Wasserhaltefähigkeiten dieser Böden sind bestimmt durch den hohen Tonanteil und den damit verbundenen Feinporen.</p>

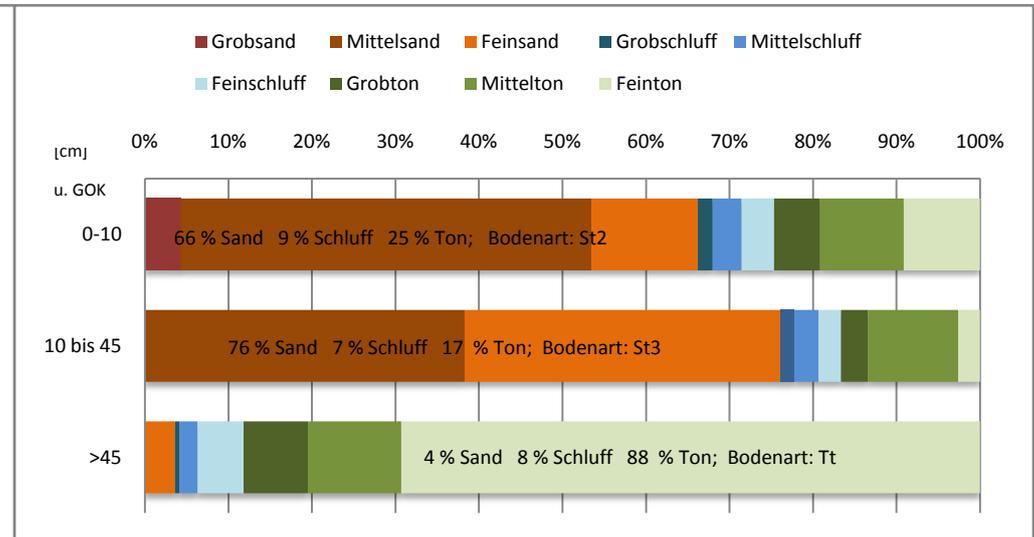
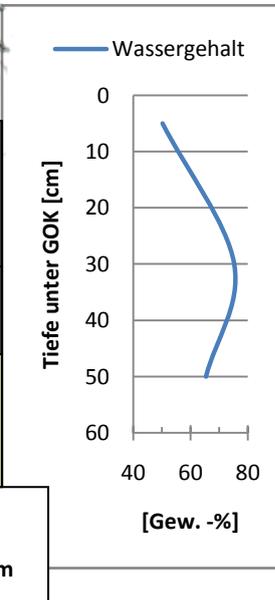
**Leitprofil 24**



BS [%]	EC [µS/cm]
97	180
96	219
90	174
hoch	



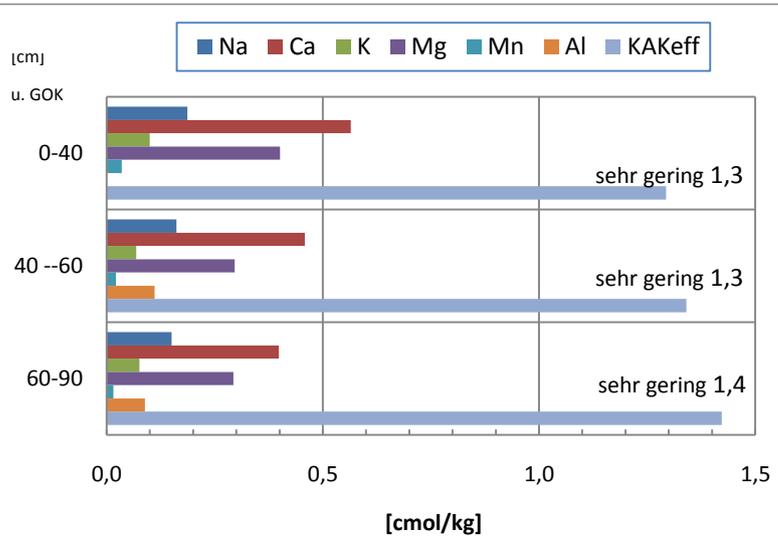
eWe  
10 dm



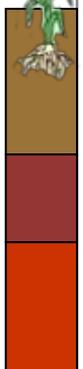
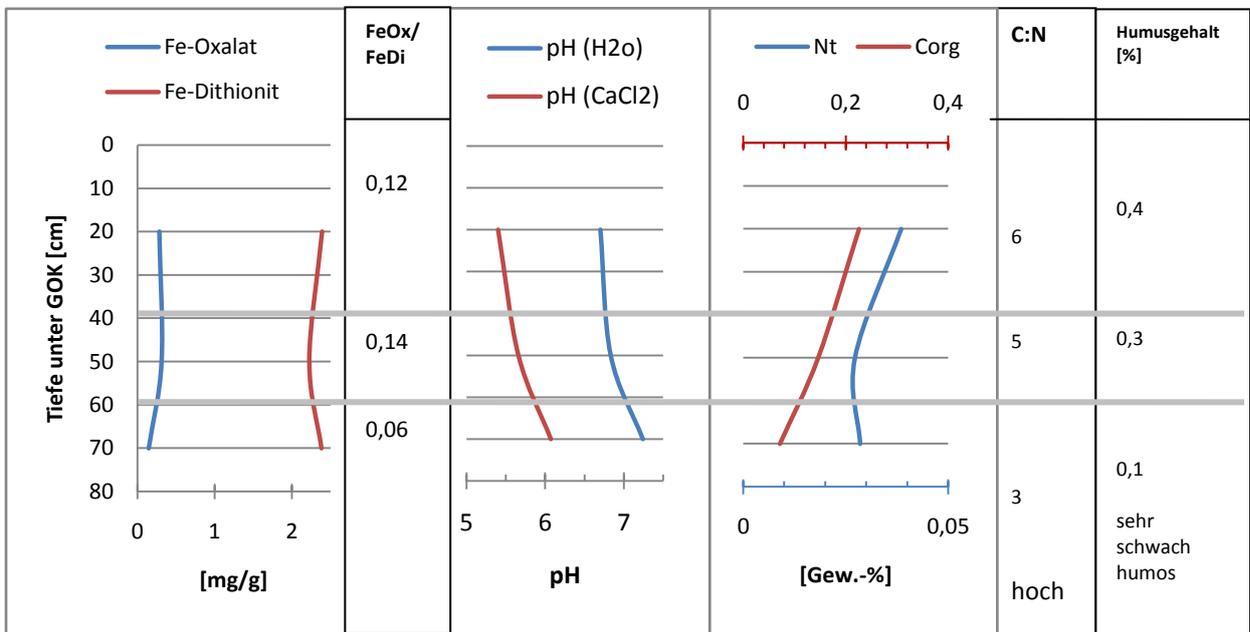
## Leitprofil 24

<b>WRB:</b>	Eutric Fluvisol
<b>Ort:</b>	Schwemmland des Limpopo, unmittelbar am Rande der Dünen bei Patrice Lumumba
<b>Höhe:</b>	
<b>Landnutzung:</b>	Landwirtschaft; in der Regenzeit Reis; in der Trockenzeit Gemüse, Mais, Obstbäume
<b>Profilbeschreibung:</b>	
<b>0-10 cm A1</b>	Sehr hoher Organikanteil, St3, Subpolyeder, Klumpengefüge, 66 % Sand, 25 % Ton
<b>10-40 cm A2</b>	sehr feucht (bis zu 70 %), St2, Subpolyeder, Klumpengefüge, 76 % Sand, 17 % Ton
<b>&gt;40 cm C</b>	Ab 40 cm setzt reiner Tonboden mit einem Wassergehalt von 65 % ein. Weniger organisches Material, Kohärentgefüge, Tt, 88 % Ton
<b>Analyse:</b>	Dieses Profil liegt im Schwemmland des Limpopo und grenzt unmittelbar an die Dünensysteme an. Der reine Tonboden in einer Tiefe ab 40 cm (sehr hoher Feintonanteil) ist überdeckt von tonigem Sand. Der Boden ist grundwasserbeeinflusst und weist einen Wassergehalt von 60-70 % bereits wenige cm u. GOK auf (in der Trockenzeit). Die Wasserhaltekapazität und Verfügbarkeit unterscheidet sich stark in Ober- und Unterboden. Der tonige Unterboden hält einen Großteil des Wassers als Totwasser zurück, ganz im Gegensatz zum sandigen Oberboden. Die Oberfläche ist stark humos. Der Humusanteil sinkt mit der Tiefe, zeigt aber auch unter 40 cm noch hohe Werte. Das C/N-Verhältnis ist durchgehend eng, der Gesamtstickstoff fällt parallel zum organischen Kohlenstoff. Der pH-Wert ist an der Oberfläche im schwach sauren Bereich und steigt mit der Tiefe auf neutrale Verhältnisse. Die EC ist niedrig und ohne Einwirkung auf die Pflanzen. Die Basensättigung ist hoch und sinkt leicht im C-Horizont ab. Die KAK ist im Durchschnitt mittel, steigt mit zunehmendem Tongehalt im C-Horizont an. Der Gehalt an Eisenoxiden (vornehmlich Magnetit) ist hoch und sinkt mit zunehmender Tiefe.

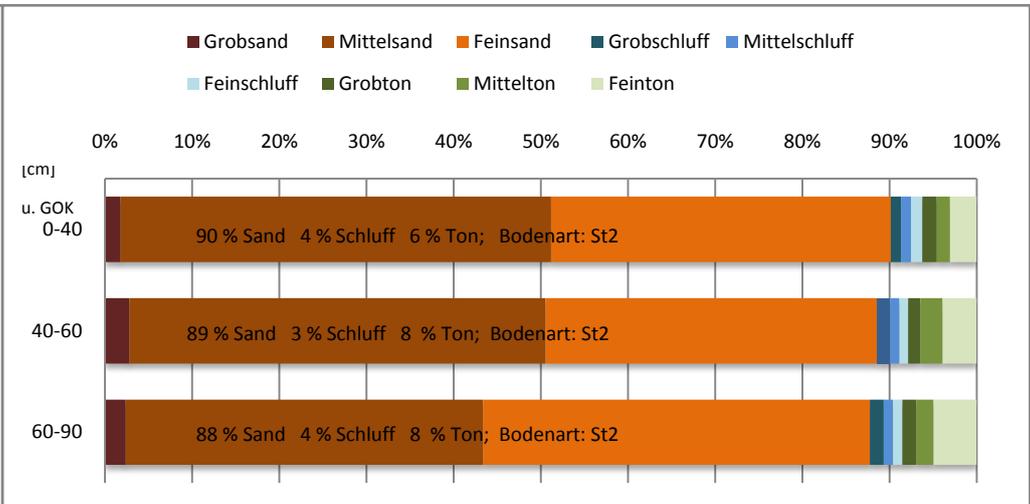
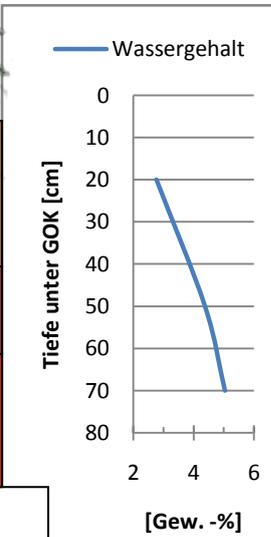
**Leitprofil 3**



BS [%]	EC [ $\mu\text{S/cm}$ ]
97	10
90	11
92	14
hoch	



eWe  
10 dm

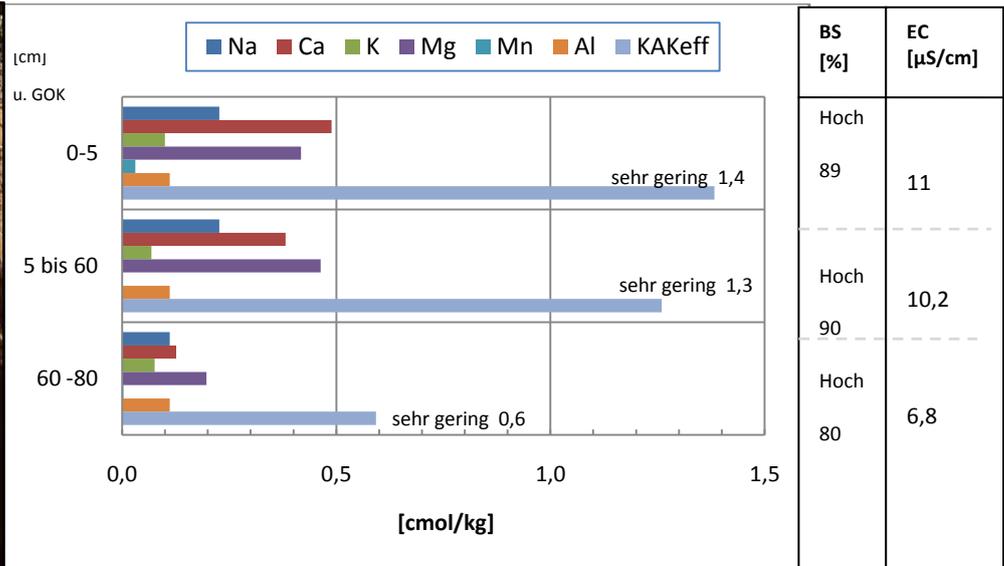


Ld: 1,4 pt:1,3 FK: 26 %, gering nFK: 18 %, mittel LK: 24 %, hoch GPV: 50 %, hoch TW: 8 %, gering kf: 150 cm/d, sehr hoch

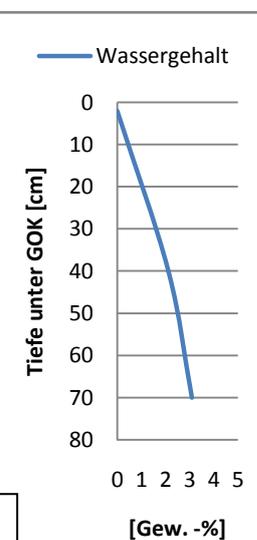
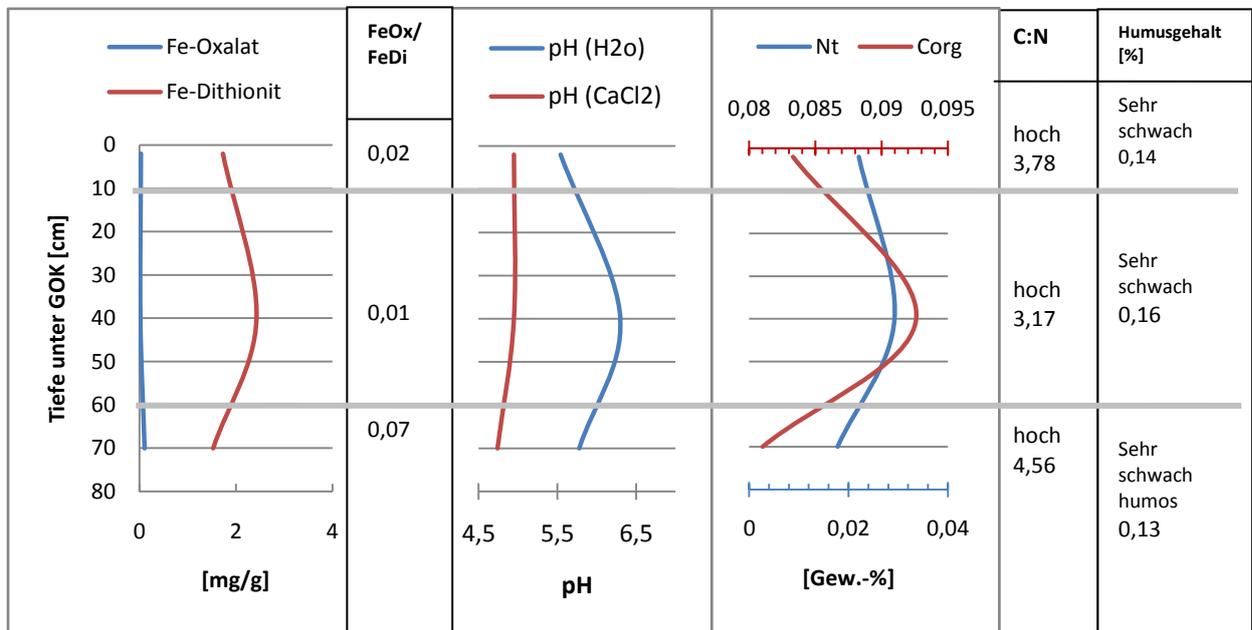
## Leitprofil 3

<b>WRB:</b>	Ferralic Arenosol
<b>Ort:</b>	Leicht hügeliges Dünenstück, Gipfel einer kleinen Düne nahe Patrice Lumumba
<b>Höhe:</b>	
<b>Landnutzung:</b>	Landwirtschaft, Mischkultur
<b>Profilbeschreibung:</b>	
<b>0-40 cm A1</b>	St2, Einzelkorngefüge, 90 % Sand, 6 % Ton
<b>40-60 cm A2</b>	St2, Einzelkorngefüge, 89 % Sand, 8 % Ton, rötlichere Färbung
<b>&gt;60 cm C</b>	St2, Einzelkorngefüge, 88 % Sand, 9 % Ton , deutliche Rotfärbung
<b>Analyse:</b>	Dieses Profil liegt in dem flachen Stück zwischen den hohen Küstendünen und den alten bewohnten Dünen. Es wurde auf dem Gipfel einer kleinen, schwach geneigten Düne entnommen. Es wird mit einer Mais, Maniok, Erdnuss Mischkultur genutzt. Eine Bodenentwicklung ist erkennbar, so färbt sich der Boden in einer Tiefe von 40-60 cm rötlich, ab 60 cm u. GOK deutlich rot. Die Entstehung des Zwischenhorizontes ist durch historischen Einfluss von Wasser zu erklären. Dabei ist ein Tonanstieg von 3 % erkennbar. Die Acidität ist schwach bis mäßig sauer und fällt mit der Tiefe. Die KAK ist sehr gering und zeigt mit der Tiefe keine Änderung. Der Gehalt an organischem Material, Nges und P ist ebenfalls gering. Die schlechten Wasserhaltefähigkeiten sind von der Bodenart St2 geprägt. Der Wassergehalt (in der Trockenzeit) steigt mit der Tiefe auf knapp 6 %. Der Gehalt an amorphen Eisenoxiden ist deutlich höher als in den Regosolen der jungen Dünen. Die Basensättigung ist hoch, das C/N-Verhältnis eng.

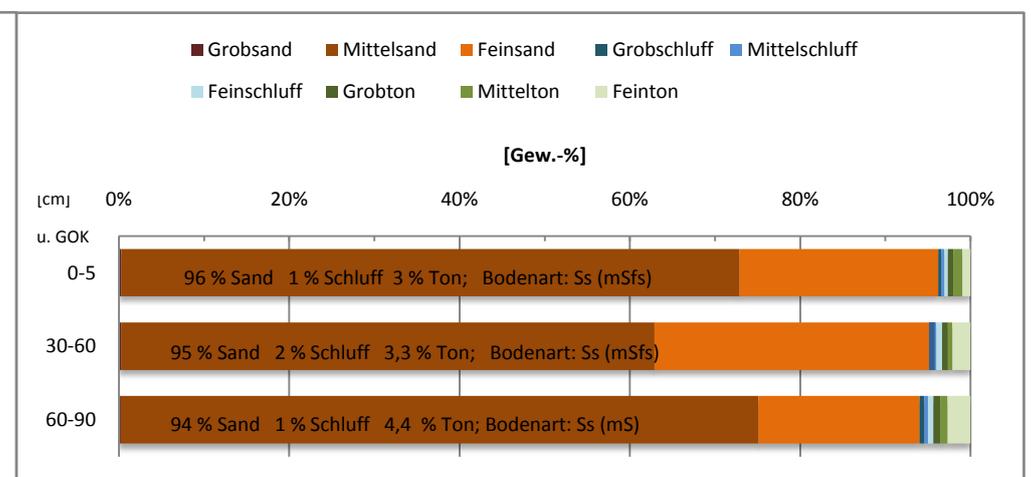
Leitprofil 4



BS [%]	EC [ $\mu\text{S/cm}$ ]
Hoch 89	11
Hoch 90	10,2
Hoch 80	6,8



eWe  
8 dm

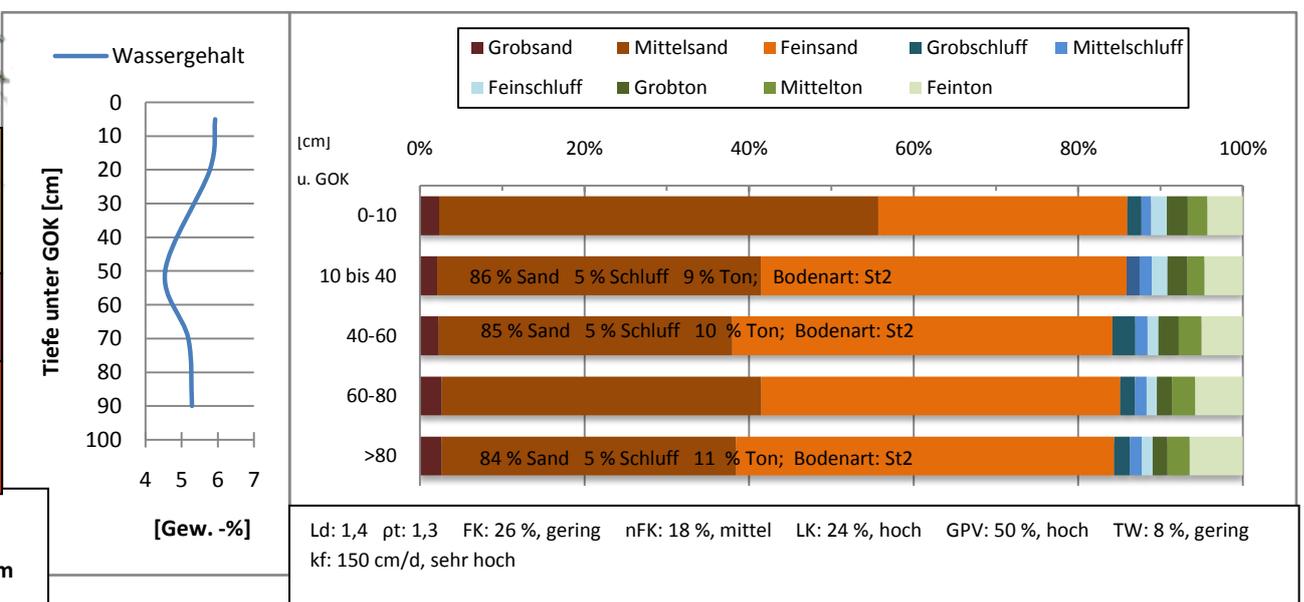
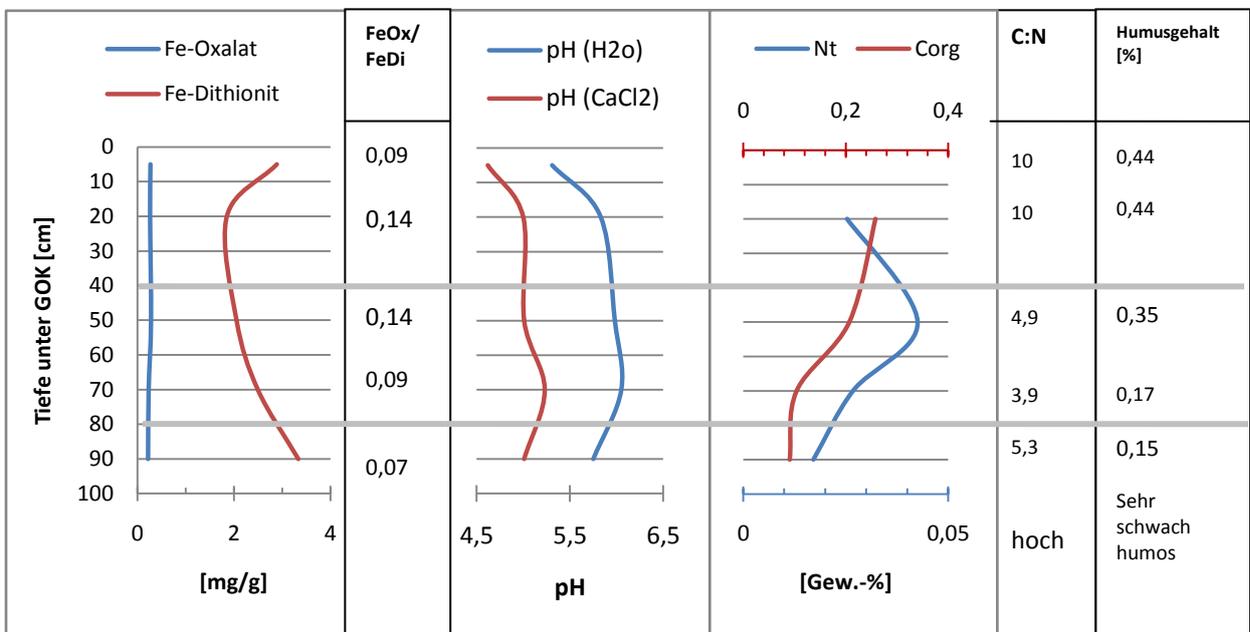
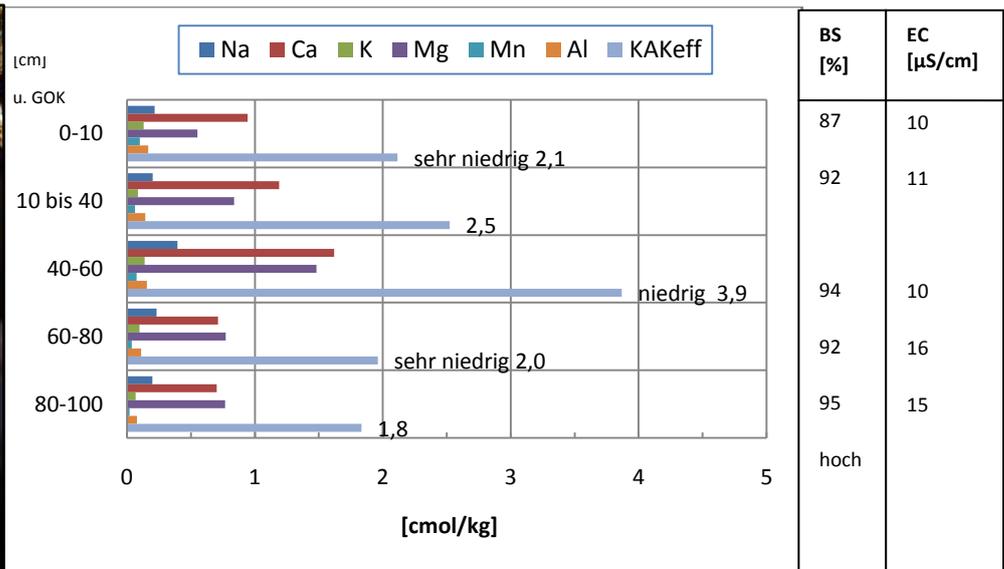


Ld: 1 pt: 1,3 FK: 14 %, sehr gering nFK: 9 %, gering LK: 36 %, sehr hoch GPV: 50 %, hoch TW: 5 %, gering kf: 675 cm/d, extrem hoch

## Leitprofil 4

<b>WRB:</b>	Regosol
<b>Ort:</b>	junges Dünenfeld südlich PL 2000, Gipfel einer hohen Düne
<b>Höhe:</b>	
<b>Landnutzung:</b>	Grasvegetation, durch Erosion ist die Grasnarbe aufgerissen
<b>Profilbeschreibung:</b>	
<b>0-5 cm A</b>	Sehr trocken, Einzelkorngefüge, Ss (mSfs), 96 % Sand, 3 % Ton
<b>5-60 cm</b>	Keine Horizonte erkennbar, trocken, Ss (mSfs), ein
<b>&gt;60 cm</b>	Leicht feucht, Ss (mSfs), leichter Tonanstieg, ein, 94 % Sand, 4 % Ton
<b>Analyse:</b>	<p>Dieses Profil liegt auf dem Gipfel einer jungen Düne in der Nähe von PL 2000. Zwar ist diese Düne landwirtschaftlich genutzt, der Ort der Grabung weist allerdings noch natürliche Grasvegetation auf, welche durch Erosion bereits aufgerissen ist. Es ist eine deutliche Dynamik der Oberflächensande erkennbar. Eine Bodenentwicklung ist kaum erkennbar. Naheliegende, von Erosion freigelegte Dünen zeigen den Übergang zum rotgefärbten C-Horizont ab etwa 1,5 m (erosionsabhängig). Die Bodenart ist durchgehend reiner Sand mit einem Großteil an Mittelsand (mSfs). Die Böden sind sehr trocken und zeigten zum Zeitpunkt der Probenahme einen Wassergehalt von maximal 3 % in höherer Tiefe. Die KAK ist sehr gering und halbiert sich mit der Tiefe weiter. Lediglich Ca und Mg zeigen annehmbare Konzentrationen. Dennoch ist die Basensättigung hoch, sinkt mit der Tiefe aber etwas ab. Der pH-Wert liegt im mäßig bis schwach sauren Bereich. Der Boden ist sehr arm an organischer Substanz und zeigt in mittlerer Tiefe eine leichte Erhöhung. Ebenso der Gehalt an Gesamtstickstoff. Das C/N-Verhältnis ist sehr eng, allerdings auf einem sehr niedrigen Niveau.</p>

Leitprofil 5



eWe  
10 dm

## Leitprofil 5

<b>WRB:</b>	Ferralic Arenosol
<b>Ort:</b>	Flaches Dünenfeld vor PL
<b>Höhe:</b>	
<b>Landnutzung:</b>	Intensive Landwirtschaft, Mischkulturen aus Mais, Maniok und Erdnuss
<b>Profilbeschreibung:</b>	
<b>0-10 cm A1</b>	86 % Sand, 9 % Ton, St2, Einzelkorngefüge
<b>10-40 cm</b>	
<b>40-60 cm A2</b>	84 % Sand, 10 % Ton, St2, Einzelkorngefüge, rötliche Färbung
<b>60-80 cm</b>	
<b>&gt;80 cm C</b>	84 % Sand, 11 % Ton, St2, Einzelkorngefüge, deutliche Rotfärbung
<b>Analyse:</b>	Die Eigenschaften dieses Profils entsprechen grob Leitprofil 3. Es liegt jedoch in einem flachen, erosionsgeschützten Stück zwischen mehreren kleinen Dünen. Entsprechend besser entwickelt ist der Boden. Der Tonanteil ist etwas höher und steigt auf bis zu 11 % im C-Horizont an. Dementsprechend ist die KAK höher, jedoch immer noch im sehr niedrigen Bereich. Der A2-Horizont ist deutlich entwickelt und zeigt hier höhere Werte. Es handelt sich möglicherweise um einen überdeckten A-Horizont. Die Basensättigung ist hoch, das C/N-Verhältnis eng. Um eine genauere Tiefendifferenzierung erkennen zu können, wurde dieses Profil in 5 Tiefen beprobt.

Name	Ent-nahme-tiefe	pH (CaCl2)	EC in µS/cm	N [%]	C [%]	C/ N	Humus [%]	Wasser [%]	KAKeff [cmol/kg]	BS [%]	Na [cmol/kg]	Ca [cmol/kg]	K [cmol/kg]	Mg [cmol/kg]	Fe Ox [mg/g]	Fe Dit [mg/g]	P [mg/kg]	Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]
Mp1	0-40	6,04	46	0,14	1,61	11	2,77	31,4							.	.				
Mp2	0-40	6,63	1270	0,18	2,31	13	3,97	38,3	14,47	99	2,58	5,82	0,39	5,52	.	.	2,01	0,4	10,6	89,0
Mp3	0-40	6,6	1420	0,17	2,31	14	3,97	50,9	10,75	99	1,53	3,90	0,34	4,86	.	.				
MP1-3	0-2	6,04	630	0,22	2,77	13	4,76	0,3	27,56	99		13,26	0,94	13,10	.	.				
MP4	0-2	6,23	1309	0,26	3,81	14	6,55	44,5	18,80	99	3,46	7,56	0,54	7,02	.	.				
MP4	0-40	6,5	3360	0,13	1,74	13	2,99	51,5	19,33	100	3,60	8,75	0,52	6,42	.	.				
MP5	0-2	5,88	134	0,20	2,70	14	4,64	0,3	14,99	98	1,06	7,54	0,41	5,72	.	.				
Mp5	0-40	6,88	990	0,17	2,16	13	3,72	36,8	13,54	98	1,85	5,84	0,31	5,30	.	.	0,60	3,3	13,9	82,7
MP6	0-2	4,87	83,7	0,24	2,92	12	5,02	0,3	10,65	94	0,68	4,41	0,45	4,52	.	.		2,3	27,4	70,4
Mp6	0-40	5,53	115	0,17	1,81	11	3,11	46,6	13,63	98	0,57	6,05	0,39	6,42	.	.		1,9	19,1	79,0
MP7	0-2	5,32	27,8	0,03	0,29	9	0,50	0,3	2,72	91	0,23	1,32	0,25	0,67	.	.				
Mp7	0-40	5,07	12	0,04	0,33	7	0,57	3,0	2,29	95	0,00	1,34	0,16	0,69	.	.				
MP8	0-2	5,06	18,1	0,03	0,29	9	0,50		2,02	87	0,20	0,93	0,16	0,46	.	.				
Mp8	0-40	4,77	12	0,03	0,24	8	0,41	4,2	1,98	91	0,20	0,87	0,11	0,62	.	.				
MP9	0-2	4,85	20,1	0,03	0,25	8	0,43	0,0	1,86	83	0,24	0,71	0,16	0,43	.	.				
Mp9	0-40	4,92	13,8	0,06	0,25	5	0,44	3,7	2,08	93	0,23	0,95	0,12	0,61	.	.				
MP10	0-2	5,21	24	0,04	0,35	8	0,60	0,0	2,98	89	0,40	1,03	0,61	0,59	.	.		89,3	4,8	5,9
Mp10	0-40	5	11,2	0,05	0,29	6	0,50	4,8	2,17	94	0,20	1,05	0,15	0,64	0,24	2,85		87,6	5,7	6,7
MP11	0-40	5,32	19	0,04	0,28	6	0,49		3,02	95	0,18	1,63	0,17	0,89	0,31	2,68				
MP11	0-2	4,83	9,6	0,05	0,33	6	0,56		1,92	86	0,17	0,89	0,16	0,43	.	.				
Mp12	0-2	4,78	12,8	0,05	0,22	4	0,38								.	.				
Mp12	0-40	4,85	7,8	0,05	0,26	5	0,44	2,4	1,43	89	0,16	0,66	0,10	0,36	.	.				
MP13	0-2	4,81	23	0,03	0,28	11	0,49	1,0							.	.				
Mp13	0-40	5	10,3	0,02	0,21	10	0,36	3,7	2,08	92	0,19	0,97	0,14	0,61	.	.				
MP14	0-2	5,3	25,4	0,02	0,27	12	0,47	2,3							.	.				

Mp14	0-40	4,54	15,8	0,04	0,25	7	0,43	4,5	1,38	88	0,20	0,56	0,09	0,37	.	.					
MP15	>40	5,25	11,4	0,01	0,13	10	0,23	4,9							.	.					
Mp15	0-40	5,34	24,5	0,07	0,47	7	0,81	4,3	3,12	99	0,19	1,96	0,21	0,72	0,4	2,52	3,55	87,1	5,7	7,2	
Mp16	0-40	4,68	10,4	0,08	0,23	3	0,40	2,9	1,99	85	0,19	0,90	0,18	0,42	.	.					
Mp17	0-40	4,77	12,9	0,04	0,28	7	0,47	4,5	2,16	89	0,17	1,11	0,15	0,49	.	.					
Mp18	0-40	4,55	12	0,02	0,24	11	0,41	6,0	1,13	85	0,17	0,35	0,12	0,32	.	.					
Mp19	0-40	4,65	15,5	0,04	0,25	7	0,43	4,6	1,53	91	0,21	0,69	0,06	0,43	.	.	0,26	90,2	4,6	5,2	
Mp20	0-5	5,44	36,3	0,05	0,36	7	0,62	2,5	1,71	95	0,15	0,71	0,22	0,55	0,23	2,32	0,61				
MP21	0-40	4,85	11,9	0,04	0,14	4	0,25		1,26	85	0,19	0,46	0,10	0,32	0,08	1,08					
Mp22	0-40	4,79	8,8	0,00	0,15	52	0,26	2,6	1,10	87	0,20	0,41	0,07	0,29	0,1	0,52	0,63	95,2	1,5	3,3	
Mp23	0-40	5,43	26	0,03	0,34	13	0,58		3,01	95	0,17	1,62	0,30	0,77	.	.					
MP24	0-40	4,95	13	0,04	0,34	9	0,58	2,6	3,66	91	0,64	1,35	0,68	0,65	.	.	0,39				
MP25	0-40	4,7	11	0,05	0,28	6	0,48	5,2	2,40	84	0,20	1,10	0,15	0,56	.	.					
Mp26	0-40	4,4	19,2	0,02	0,24	13	0,42	3,7	1,75	87	0,19	0,66	0,16	0,51	.	.	0,82				
Mp27	0-40	5,07	19,2	0,05	0,25	5	0,44	3,7	2,52	88	0,19	1,13	0,22	0,69	0,27	2,03	1,13	89,7	4,7	5,6	
Mp28	0-40	4,7	13,5	0,02	0,28	12	0,48	4,4	1,74	81	0,15	0,70	0,15	0,41	0,25	2,17	0,46				
Mp29	0-40		12,3	0,04	0,27	7	0,47	3,4	1,85	90	0,23	0,79	0,19	0,46	0,25	1,55					
Mp30	0-40	5,14	22,3	0,05	0,24	5	0,41	2,0	2,35	88	0,22	1,00	0,24	0,62	0,22	1,86		93,6	2,3	4,1	
MP31	0-40	5,26		0,06	0,31	5	0,54	2,5	1,92	93	0,15	0,81	0,21	0,62	0,18	2,24					
MP32	0-40	4,87	10,7	0,05	0,21	4	0,36		2,07	92	0,24	1,03	0,15	0,49	.	.					
MP33	0-40	4,64	12,8	0,06	0,57	9	0,99	27,3	1,56	89	0,20	0,67	0,12	0,41	0,14	1,25	0,39	89,6	4,2	6,1	
MP34	0-40	5,91	28	0,05	0,28	5	0,47	4,4	2,90	98	0,14	2,02	0,16	0,51	0,08	2,11					
MP35	0-40	4,97	257	0,51	6,58	13	11,32	39,4	5,79	96	0,48	2,08	0,27	2,75	4,81	2,69					
MP36	0-40	5,2	303	0,20	2,30	11	3,96	29,8	5,45	97	0,72	2,02	0,24	2,33	2,46	1,45	0,58	79,5	8,4	12,1	
MP37	0-40	4,72	9	0,02	0,15	8	0,26	2,3	1,30	93	0,21	0,61	0,08	0,32	0,15	0	0,26	95,4	1,8	2,9	
MP38	0-40		7	0,06	0,11	2	0,18	2,2	0,78	90	0,17	0,22	0,08	0,23	0,11	1,39	0,39	96,3	0,9	2,8	
LP1	0-10	5,48	1160	0,17	2,31		3,97	1,5	16,65	99	2,18	6,82	0,54	6,92	8,58	6,26	1,67	1,3	21,8	76,9	

LP1	10 bis 40	6,82	1680	0,17	1,93	12	3,32	55,7	11,20	97	2,02	4,30	0,34	4,21	2,82	5,39	1,26	0,8	12,0	87,2
LP1	>41	6,96	1995	0,06	0,55	10	0,94	60,4	16,28	99	3,58	5,71	0,47	6,42	1,41	6,26	0,09	2,1	9,2	88,7
LP2	0-30	4,88	11	0,06	0,34	5	0,59	1,4	2,57	94	0,21	1,16	0,26	0,77	0,3	2,12				
LP2	30-60	5,01	10	0,04	0,20	5	0,34	4,6	2,41	94	0,23	1,16	0,12	0,76	0,26	3,45				
LP2	60-90	4,88	12,5	0,02	0,13	8	0,23	1,7	1,98	92	0,16	0,68	0,07	0,91	0,47	3,71				
LP3	0-40	4,5	10	0,04	0,23	6	0,39	2,8	1,29	97	0,19	0,56	0,10	0,40	0,29	2,39		90,2	3,6	6,2
LP3	40-60	5,01	10,6	0,03	0,15	5	0,25	4,4	1,34	90	0,16	0,46	0,07	0,52	0,31	2,23		88,6	3,5	7,8
LP3	60-90	4,95	1404	0,03	0,07	3	0,12	5,0	1,42	92	0,15	0,40	0,08	0,69	0,14	2,38		87,8	3,7	8,5
LP4	0-5	4,95	11	0,02	0,08	4	0,14	0,0	1,38	90	0,23	0,49	0,11	0,42	0,03	1,73		96,2	1,1	2,7
LP4	30-60	4,95	10,2	0,03	0,09	3	0,16	2,1	1,26	91	0,23	0,38	0,07	0,46	0,02	2,43		95,2	1,5	3,3
LP4	60-90	4,74	6,8	0,02	0,08	5	0,14	3,1	0,59	80	0,11	0,13	0,04	0,20	0,11	1,53		94,0	1,6	4,3
LP5	0-10	4,62	10				0,00	5,9	2,12	87	0,22	0,94	0,13	0,55	0,27	2,89		86,0	4,8	9,2
LP5	10 bis 40	5	11,2	0,03	0,26	10	0,44	5,8	2,52	92	0,20	1,19	0,08	0,84	0,26	1,85		85,9	5,0	9,2
LP5	40-60	5,01	10,3	0,04	0,21	5	0,36	4,5	3,87	94	0,40	1,62	0,14	1,48	0,28	2,05		84,2	5,6	10,2
LP5	60-80	5,23	15,8	0,03	0,10	4	0,18	5,2	1,96	92	0,23	0,71	0,10	0,77	0,23	2,49		85,1	4,5	10,4
LP5	>80	5,01	15,2	0,02	0,09	5	0,16	5,3	1,83	95	0,20	0,70	0,07	0,77	0,22	3,33		84,3	4,7	10,9
LP6	0-60	5,2	20,3	0,05	0,29	6	0,50	6,2	2,26	92	0,15	1,16	0,21	0,56	.	.				
LP6	>60	5,52	14	0,04	0,12	3	0,20	4,4	2,26	94	0,20	1,17	0,09	0,67	.	.				
LP7	0-45	5,06	10,6	0,06	0,25	4	0,43	2,4	1,87	98	0,16	1,09	0,13	0,45	0,18	2,25		92,1	3,3	4,6
LP7	40-80	5,47	11	0,02	0,12	5	0,20	4,4	1,74	92	0,19	0,90	0,07	0,44	0,16	1,77		91,6	2,3	6,1
LP7	>80	5,46	12,6	0,03	0,10	3	0,17	7,4	1,67	92	0,14	0,62	0,13	0,64	0,18	3,88		91,6	2,3	6,1
LP10	0-45	4,59	9	0,04	0,27	7	0,46	4,2	2,09	92	0,72	0,83	0,10	0,28	0,16	1,62				
LP10	>45	4,84	11	0,07	0,10	1	0,18	3,3	1,35	89	0,17	0,55	0,09	0,40	0,27	2,16				
LP11	0-45	4,72	7,1	0,03	0,15	6	0,26	2,3	1,09	88	0,18	0,42	0,06	0,30	0,07	1,85		93,7	1,6	4,7
LP11	>45	4,85	7,6	0,06	0,10	2	0,17	2,2	0,95	88	0,16	0,32	0,06	0,29	0,07	1,6		94,5	1,8	3,7
LP12	0-40	4,71	13,4	0,06	0,25	5	0,43	4,2	1,46	90	0,39	0,30	0,35	0,27	.	.				
LP12	>40	4,65	8,1	0,04	0,14	3	0,23	3,1	0,92	87	0,22	0,29	0,06	0,23	.	.				

LP16	~60	4,75	10,8	0,04	0,18	5	0,31		1,42	92	0,17	0,58	0,08	0,47	0,28	3,88				
LP16	>90	5,02	13,4	0,00	0,10	22	0,18	4,5	1,34	92	0,19	0,34	0,07	0,64	0,16	2,36	85,0	4,6	10,3	
LP17	0-40		12,5	0,05	0,36	7	0,62	3,4	2,11	93	0,20	0,97	0,12	0,67	0,25	2,26	83,8	6,9	9,4	
LP17	40-80	5,03	11,4	0,03	0,19	6	0,33	3,7	2,12	92	0,25	0,87	0,11	0,72	0,37	2,78	88,6	3,6	7,8	
LP17	>80	5,2	12,7	0,03	0,10	3	0,16	4,5	1,96	93	0,31	0,72	0,15	0,64	0,27	3,08	88,5	3,4	8,1	
LP18	~60																			
LP18	>65	5,15	12,7	0,02	0,08	4	0,15	3,8	1,51	93	0,21	0,51	0,08	0,58	.	.				
LP19	0-50	4,92	17,3					0,3	0,25	55	0,01	0,06	0,04	0,02	.	.				
LP19	~60	4,88	8,4	0,02	0,18	10	0,31	0,7	1,62	93	0,19	0,63	0,11	0,59	.	.				
LP19	>80	5,24	22,2	0,00	0,09	24	0,15	1,0	1,87	90	0,18	0,56	0,05	0,89	.	.				
LP22	>60	4,08	14		0,12		0,20	9,7	0,94	86	0,18	0,19	0,11	0,34	0,03	2,47	82,9	5,3	11,8	
LP24	0-10	5,4	180	0,31	3,80	12	6,54	50,3	7,97	97	0,34	4,14	0,23	3,05	7,08	4,7	0,56	66,2	9,1	24,7
LP24	10 bis 45	5,66	219	0,23	2,62	12	4,51	75,3	3,30	97	0,23	1,20	0,24	1,53	5,42	2,45	0,96	76,1	7,2	16,6
LP24	>45	6,07	174	0,15	1,73	12	2,98	65,3	11,32	99	1,54	3,32	0,37	5,99	1,42	0,71	1,40	3,6	8,2	88,2
LP25	0-40	4,59	7,2	0,06	0,21	0		3,4	1,43	94	0,20	0,66	0,11	0,38	0,21	1,86				
LP25	>40	4,7	7,4	0,00	0,06	0		4,8	0,44	93	0,08	0,11	0,04	0,19	0,04	2,38				

Anhang 14: Rohdaten der Laboranalysen aller Bodenproben

## Korrelationen

		Zustand der Pflanzen	pH CaCl2	Nt in %	Humusgehalt in %	S-Wert	KAKeff	Na [mg/l]	K [mg/l]	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	Basensättigung in %	Tonanteil in %
Zustand der Pflanzen	Korrelation nach Pearson	1	,559**	,167	,270	,722**	,696**	,244	,421*	,689**	,703**	,577**	,758**
	Signifikanz (2-seitig)		,002	,386	,157	,000	,000	,220	,026	,000	,000	,001	,018
	N	29	27	29	29	28	28	27	28	28	28	28	9
pH CaCl2	Korrelation nach Pearson	,559**	1	,007	,088	,521**	,487**	-,075	,216	,555**	,456**	,337**	-,173
	Signifikanz (2-seitig)	,002		,954	,462	,000	,000	,543	,074	,000	,000	,005	,352
	N	27	73	70	73	69	69	68	69	69	69	69	31
Nt in %	Korrelation nach Pearson	,167	,007	1	,478**	,260*	,256*	,052	,267*	,354**	-,049	,126	-,188
	Signifikanz (2-seitig)	,386	,954		,000	,031	,034	,674	,027	,003	,689	,301	,312
	N	29	70	73	73	69	69	68	69	69	69	69	31
Humusgehalt in %	Korrelation nach Pearson	,270	,088	,478**	1	,537**	,542**	,226	,513**	,581**	,184	,273*	-,114
	Signifikanz (2-seitig)	,157	,462	,000		,000	,000	,058	,000	,000	,121	,020	,526
	N	29	73	73	80	72	72	71	72	72	72	72	33
S-Wert	Korrelation nach Pearson	,722**	,521**	,260*	,537**	1	,995**	,442**	,584**	,934**	,778**	,495**	,330
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,031	,000		,000	,000	,000	,000	,000	,000	,061
	N	28	69	69	72	72	72	71	72	72	72	72	33
KAKeff	Korrelation nach Pearson	,696**	,487**	,256*	,542**	,995**	1	,458**	,612**	,920**	,765**	,434**	,331
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,034	,000	,000		,000	,000	,000	,000	,000	,060
	N	28	69	69	72	72	72	71	72	72	72	72	33
Na [mg/l]	Korrelation nach Pearson	,244	-,075	,052	,226	,442**	,458**	1	,538**	,233	,176	,208	,227
	Signifikanz (2-seitig)	,220	,543	,674	,058	,000	,000		,000	,051	,142	,082	,204
	N	27	68	68	71	71	71	71	71	71	71	71	33
K [mg/l]	Korrelation nach Pearson	,421*	,216	,267*	,513**	,584**	,612**	,538**	1	,439**	,199	,110	-,090
	Signifikanz (2-seitig)	,026	,074	,027	,000	,000	,000	,000		,000	,093	,359	,620
	N	28	69	69	72	72	72	71	72	72	72	72	33
Ca [mg/l]	Korrelation nach Pearson	,689**	,555**	,354**	,581**	,934**	,920**	,233	,439**	1	,625**	,460**	,215
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,003	,000	,000	,000	,051	,000		,000	,000	,229
	N	28	69	69	72	72	72	71	72	72	72	72	33
Mg [mg/l]	Korrelation nach Pearson	,703**	,456**	-,049	,184	,778**	,765**	,176	,199	,625**	1	,488**	,549**
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,689	,121	,000	,000	,142	,093	,000		,000	,001
	N	28	69	69	72	72	72	71	72	72	72	72	33
Basensättigung in %	Korrelation nach Pearson	,577**	,337**	,126	,273*	,495**	,434**	,208	,110	,460**	,488**	1	,129
	Signifikanz (2-seitig)	,001	,005	,301	,020	,000	,000	,082	,359	,000	,000		,473
	N	28	69	69	72	72	72	71	72	72	72	72	33
Tonanteil in %	Korrelation nach Pearson	,758**	-,173	-,188	-,114	,330	,331	,227	-,090	,215	,549**	,129	1
	Signifikanz (2-seitig)	,018	,352	,312	,526	,061	,060	,204	,620	,229	,001	,473	
	N	9	31	31	33	33	33	33	33	33	33	33	33

\*\* - Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

\* - Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.





