universität wien

MASTERARBEIT

Titel der Masterarbeit

„Die Bodenqualität in der Ferlo-Region (Senegal) in Abhängigkeit von den Raum- und Nutzungsparametern“

Verfasser

BSc Tobias Grau

angestrebter akademischer Grad

Master of Science (MSc)

Wien, 2013

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 066 855
Studienrichtung lt. Studienblatt: Masterstudium Geographie
Betreuerin / Betreuer: Univ.-Prof. Mag. Dr. Cyrus Samimi

Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei allen Leuten herzlichst bedanken, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben. Dabei gilt ein besonderer Dank an Prof. Mag. Dr. Cyrus Samimi, der im Rahmen des micle-Projektes mir diese Arbeit ermöglichte, sie betreute und stets für Fragen zur Verfügung stand. Weiterhin richtet sich mein Dank an Dipl. Geogr. Martin Brandt, der mich zum einen während des Geländeaufenthaltes begleitete und zum anderen die in dieser Arbeit benutzten Vegetations- und Fernerkundungsdaten bereitstellte und mir stets für methodische und inhaltliche Anregungen beiseite stand und wertvolle Informationen lieferte.

Außerdem bedanke ich mich bei

- Ass.-Prof. Mag. Dr. Robert Peticzka und Christa Hermann für die Unterstützung während der Laborarbeiten
- Ass.-Prof. Mag. Dr. Wilfried Körner und Petra Körner des Departments für Umweltwissenschaften für spezielle Laboranalysen
- Dr. Kim André Vanselow für die statistischen Anregungen
- den lokalen Guides und Übersetzern Ameth Lacor, Modu Gueye and Mitsuharu Uchiyama
- CSE (Centre de Suivi Ecologique) für wichtige Literaturhinweise
- allen Freunden, die mich beim Korrekturlesen unterstützten
- allen Studienkollegen für die schöne Zeit am UZA

Nicht zu vergessen, gilt mein außerordentlicher Dank meiner Freundin Patricia, die mich immer wieder motivierte und mir stets zur Seite stand. Außerdem danke ich meinen Eltern, die mich während der ganzen Studienzeit unterstützten.

Zusammenfassung

In der Sahelzone leben viele Menschen vom primären Sektor und sind somit von Ernteerträgen abhängig. Das schnelle Bevölkerungswachstum, Überweidung sowie der Klimawandel (weniger Niederschläge) führen zu einem erhöhten Druck auf die Nahrungsmittelproduktion. Angemessene Ernteerträge sind auf eine gute Bodenqualität angewiesen. Diese Arbeit untersucht die Bodenqualität zur Eignung für den landschaftlichen Anbau sowie deren Einflussfaktoren auf einer lokalen Maßstabsebene, für ein rund 40 X 40 km großes Untersuchungsgebiet im Senegal, im Umkreis von Linguère. Dazu wurden im Februar/März 2012 insgesamt 84 Bodenproben genommen. Zusätzlich wurden im Gelände wichtige Boden- sowie Vegetationsparameter aufgenommen. Anschließend wurden im Labor der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit, die Korngröße, das C/N-Verhältnis, die KAK sowie die Phosphat-, Nitrat- und Ammoniumgehalte bestimmt. Außerdem wurden weitere Umwelt- und Fernerkundungsparameter (zum Beispiel: Höhe, Distanz zur nächsten Siedlung, Termiten, NDVI) mittels Fernerkundungsdaten und GIS-Analysen, für die einzelnen Aufnahmeflächen, ermittelt. Die Auswertung des Datensatzes erfolgte mittels Verfahren der multivariaten Statistik, wobei zunächst eine Clusteranalyse zur Einteilung des Datensatzes vorgenommen wurde. Dabei ergab sich auf einem Ähnlichkeitsniveau von 20 % eine eindeutige Vierteilung, die vier Bodentypen repräsentiert. Von den vier ermittelten Bodentypen, erwiesen sich, aufgrund der Nährstoffparameter, die hydromorphen Böden sowie die Regosole als am günstigsten. Diese beiden Bodentypen können jedoch nur eingeschränkt landwirtschaftlich genutzt werden, da in den hydromorphen Böden während der Anbauzeit, der Regenzeit, meist Wasser steht und die Regosole oft durch die Anwesenheit von Laterit(krusten) gekennzeichnet werden. Die anderen beiden Bodentypen sind Arenosole, die für den landwirtschaftlichen Anbau mit verschiedenen Anbauprodukten genutzt werden, mit geringer KAK und Nährstoffgehalten aber nur mäßige Voraussetzungen bieten, was für tropische Böden jedoch nicht ungewöhnlich ist. Mit Hilfe des NMDS (zwei Dimensionen, Stresswert 9,13 %), wurden Zusammenhänge der Bodentypen mit den Parametern ermittelt, wobei sich bei insgesamt 13, wie zum Beispiel Höhe, Bäume/ha, oder NDVI, ein signifikanter Zusammenhang herausstellte. Außerdem konnten Zusammenhänge zwischen der Vegetation, dem Auftreten einiger Arten auf bestimmten Bodentypen, nachgewiesen werden. Mit Hilfe der Ergebnisse aus den Analysen und den im Feld geführten Interviews, konnten die einzelnen Bodentypen aus der Clusteranalyse, den regionalen Bodentypen zugeordnet werden, die in einem finalen Schritt auf die Fläche des Untersuchungsgebietes, mit Hilfe des Random-Forest-Modells (OOB error rate 8,72 %) modelliert wurden. Hierfür wurden die signifikanten Fernerkundungsparameter aus dem NMDS genutzt. Da jeder Bodentyp bestimmte Fruchtbarkeitsparameter beinhaltet, kann die Modellierung der regionalen Bodentypen mit einer Bodeneignungskarte verglichen werden.

Abstract

In the Sahel many people's livelihoods depend on the primary sector, and thus on crop yields. Rapid population growth, overgrazing and climate change (excluding precipitation) have lead to increased pressure on food production. Adequate crop yields depend on soil quality. The aim of this study is to assess soil quality around Linguère, Senegal, in terms of its agricultural suitability and influencing parameters. For this purpose, 84 soil samples were taken in February/March 2012. Additionally, important soil and vegetation parameters were recorded. Subsequently the soil parameters pH-value, electrical conductivity, grain size, C/N-ratio, CEC (cation exchange capacity), phosphorus, nitrate and ammonium content were analysed in the laboratory. Furthermore, for each site, other parameters (such as altitude, distance to the nearest settlement, TRMM rainfall, termites, NDVI) are calculated from remote sensing data and GIS analyses. Multivariate statistical techniques were used for data analysis. Using a cluster analysis, 84 soil samples were classified into four soil types at a similarity level of 20%. Two of these four soil types, namely hydromorphic soils and Regosols, possess the best nutrient parameters. However, their agricultural use is limited: hydromorphic soils are flooded during growing season while widespread laterit crusts are present in Regosols. The two remaining clustered soil types are Arenosols and used for agricultural cultivation with different crops. They offer only moderate conditions (low cation exchange capacity and nutrient content), which is not unusal for tropical soils. Using a NMDS-ordination (two dimensions, stress value 9.13%), correlations of soil types with environmental factors have been identified. Significant correlations ($p < 0.05$) were observed for 13 parameters such as altitude, trees/ha and remote sensing parameters (NDVI or Reflectance of Landsat imagery). Furthermore, a relationship between woody species abundance and soil type could be proven. Using the results of the analyses and the field interviews, the soil types from the cluster analysis can be associated with local soil types and their Wolof names. These local soil types are modeled via a Random Forest classifier (OOB error rate: 8,72 %) over the study area using significant remote sensing parameters obtained by the NMDS. Since each soil type represents certain fertility parameters, the modeled map of the regional soil types can be considered as a land suitability map.

Resumée

Dans le Sahel beaucoup de personnes vivent du secteur primaire et ils sont dépendent de récolte. L'accroissement démographique rapide, l'exploitation abusive des pâturages et les changements climatiques font pression sur la production alimentaire. Les récoltes sont dépendent de bonne qualité du sol. L'objectif de cette étude est d'une part d'analyser la qualité des sols pour la culture et d'autre part de découvrir les paramètres qui influencent la qualité des sols. Dans la zone d'étude, qui est située au Sénégal à Linguère, 84 échantillons de sol ont été prélevés en Février/ Mars 2012. En outre, beaucoup de paramètres du sols et de la végétation ont été enregistrés. Par la suite quelques paramètres du sols (pH, conductivité électrique, C/N, taille du grain, capacité d'échange cationique, phosphate, nitrate et ammonium) ont été mesurés en laboratoire. En plus, d'autres paramètres environnementaux (par exemple l'altitude, NDVI) ont été calculés des données de télédétection et des GIS-analyses. L'exploitation des données a été réalisée à l'aide statistique multivariée. Tout d'abord, une analyse des grappes pour classer les données a été effectuée. Au niveau de similitude de 20 % quatre parties sont visibles, qui représentent les types de sol. Deux types de sols, les sols hydromorphes et les Régosols sont les plus fertiles, mais l'utilisation agricole de ces deux types de sols est limitée: Les sols hydromorphes sont marquée par la présence de l'eau pendant la saison des pluies tandis que les Régosols souvent sont caractérisée par la présence de latérite. Les Arénosols, les deux autres types de sols sont utilisés pour les cultures agricoles avec des cultures différentes, mais ils n'offrent seulement des conditions modérées (faible capacité d'échange cationique et il y a un manque en nutriments). Avec l'aide des NMDS (deux dimensions, la valeur de stress 9,13 %) corrélations entre les types de sol et les paramètres environnementaux ont été déterminées. Il existe des corrélations significatives ($p < 0,05$) de 13 paramètres tels que l'altitude, arbres par hectare, NDVI ou le réflectance des images Landsat. En outre, il y a aussi des relations entre la végétation, la présence de certaines espèces dans certains types de sol. En utilisant les résultats de l'analyse et des entretiens menés sur le champ, les différents types de sol de l'analyse typologique ont affectés aux types de sols régionaux. Cependant, ces types de sols locaux ont été modélisés par les Random Forest (OOB: 8,72 %) sur la zone d'étude en utilisant les signifiantes données de télédétection sur les NMDS. Chaque type de sol contient les paramètres de fertilité - la carte des sols modélisé peut être comparés à une carte d'aptitude des terres.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....I
Zusammenfassung.....II
Abstract.....III
Resumée.....IV
Abbildungsverzeichnis.....IX
Tabellenverzeichnis.....XI
Abkürzungsverzeichnis.....XII
1. Einleitung und Zielsetzung.....1
1.1 Stand der Forschung, Zielsetzung und Hypothesen der Arbeit.....1
1.2 Hintergrund und Kennzeichen tropischer Savannenböden.....2
2. Untersuchungsgebiet.....7
2.1 Geographische Lage 7
2.2 Klima 9
2.3 Geologie 12
2.4 Geomorphologie.....15
2.5 Hydrologie.....17
2.6 Boden 18
2.7 Vegetation.....22
2.8 Landnutzung.....24
2.9 Bevölkerung.....27
3. Methodik.....29
3.1 Feldmethoden.....30
3.1.1 Auswahl der Probenstandorte.....30
3.1.2 Probennahme.....30
3.1.3 Analysen im Gelände.....32
3.1.3.1 Bodenanalysen.....32
3.1.3.2 Vegetationsanalysen.....32
3.1.3.3 Beweidungsintensität.....33
3.1.3.4 Interviews mit Einheimischen.....33
3.1.4 Analysen im Basislager Linguère.....33
3.1.4.1 Bodenfarbe.....33
3.1.4.2 Wassergehalts- und Dichtebestimmungen.....34
3.1.4.3 Bodenstabilität.....34

3.2 Labormethoden....36
3.2.1 Allgemeines und Probenvorbereitung....36
3.2.2 Korngröße....37
3.2.3 Wasser- und Lufthaushalt....38
3.2.4 pH-Wert....39
3.2.5 Leitfähigkeit....39
3.2.6 C/N Verhältnis....39
3.2.7 Ammonium und Nitrat....40
3.2.8 Phosphat....41
3.2.9 Kationenaustauschkapazität und Basensättigung....41
3.3 GIS und Fernerkundungsmethoden....42
3.3.1 Vorbereitung des Geländeaufenthaltes....42
3.3.2 Analysen mit dem DGM....43
3.3.3 Bestimmung der Termitenhügeldichte....43
3.3.4 Entfernungen zu Siedlung / Fluss / Forage....44
3.3.5 Vegetationsanalysen....44
3.3.6 Fernerkundungsdaten....45
3.4 Statistische Methoden....47
3.4.1 Univariate Methoden....48
3.4.2 Bivariate Methoden....49
3.4.2.1 Korrelationsanalysen....49
3.4.2.2 Regressionsanalysen....49
3.4.3 Multivariate Methoden....50
3.4.3.1 PCA....50
3.4.3.2 Clusteranalyse....51
3.4.3.3 NMDS....51
3.4.3.4 Random-Forest-Modell....53
3.4.4 Schließende Statistik....54
3.4.4.1 Shapiro-Wilk-Test....54
3.4.4.2 U-Test....54
4. Ergebnisse....55
4.1 PCA der Bodenvariablen....55
4.2 Unterteilung der Standorte mittels Clusteranalyse....57

4.3 Bodenparameter....60
4.3.1 Physikalische Bodenparameter....60
4.3.1.1 Korngröße....60
4.3.1.2 Lagerungsdichte....62
4.3.1.3 Wasser- und Lufthaushalt....63
4.3.1.4 Stabilität....65
4.3.1.5 Farbe....66
4.3.2 Chemische Bodenparameter....67
4.3.2.1 pH-Wert....67
4.3.2.2 Elektrische Leitfähigkeit....68
4.3.2.3 Kohlenstoff- und Humusgehalt....70
4.3.2.4 Stickstoff....71
4.3.2.5 C/N-Verhältnis....72
4.3.2.6 Phosphat....73
4.3.2.7 Kationenaustauschkapazität und Basensättigung....74
4.4 Vegetationsparameter....78
4.4.1 Vegetationszusammensetzung....78
4.4.2 Einfluss von Leguminosen....79
4.5 Umwelt- und Fernerkundungsparameter....81
4.5.1 Aufnahmesituation....81
4.5.2 Distanzberechnungen....82
4.5.3 Beweidungsintensität und Termiten....83
4.5.4 Bäume/ha und Baumbedeckung....84
4.5.5 Fernerkundungsparameter....85
4.6 Zusammenhänge der Parameter mit Hilfe des NMDS....87
4.7 Zusammenfassung der Bodenqualität der einzelnen Bodentypen....92
4.7.1 Hydromorphe Böden....92
4.7.2 Regosole....93
4.7.3 Arenosole....94
4.7.3.1 Arenosoltyp I....95
4.7.3.2 Arenosoltyp II....96
4.8 Modellierung der Bodentypen mit Random-Forest....97

5. Diskussion....101
5.1 Bodenqualität anhand der einzelnen Bodenparameter....101
5.1.1 Korngröße und daraus ableitbare Parameter....101
5.1.2 Bodenfarbe....102
5.1.3 pH-Wert....102
5.1.4 Leitfähigkeit....103
5.1.5 Humusgehalt....103
5.1.6 Stickstoff....104
5.1.7 C/N – Verhältnis....106
5.1.8 Phosphat....107
5.1.9 KAK und Basensättigung....108
5.2 Einfluss der Vegetation auf Bodenqualität....111
5.3 Diskussion und Interpretation der statistischen Vorgehensweise....112
5.3.1 Clusteranalyse....112
5.3.2 NMDS sowie Einfluss der Umwelt- und Fernerkundungsparameter....112
5.3.3 Zuordnung der regionalen Bodentypen....116
5.3.4 Bodeneignungskarte....118
6. Conclusio und Ausblick....121
7. Literaturverzeichnis....123
8. Anhang....131
Anhangsverzeichnis....131
Eidesstattliche Erklärung....146
Lebenslauf....147

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Übersichtskarte Senegal....8
Abb. 2: Die Einteilung Senegals in „ecoregions“ 8
Abb. 3: Verschiebung der Isohyeten Richtung Süden....10
Abb. 4: Jährliche Niederschlagsmengen in Linguère 1901 bis 2012....11
Abb. 5: Klimadiagramm von Linguère....12
Abb. 6: Höhenkarte des Untersuchungsgebietes 17
Abb. 7: Vereinfachte pedomorphologische Karte des Untersuchungsgebietes 21
Abb. 8: Hydrische Erosion im Norden von Linguère 21
Abb. 9: Prozentuale Verteilung der Anbauprodukte im sylvo-pastoralen Raum 26
Abb. 10: Landnutzung und Vegetation des Untersuchungsgebietes....26
Abb. 11: Fließschema der Methodik....29
Abb. 12: Verteilung der Untersuchungsstandorte....31
Abb. 13: Mit Hilfe von Satellitenbilern sind Termitenhügel des Geländes anhand weißer Punkte erkennbar 44
Abb. 14: Reflexionskurven und Spektralbereiche der TM-Landsatkanäle 1-5,7....46
Abb. 15: Aufbau eines Boxplots 48
Abb. 16: Korrelationsbiplot aller 28 Bodenvariablen einer PCA....56
Abb. 17: Dendogramm der Clusteranalyse 58
Abb. 18: Elbow criterion als Gütemaß zur Bestimmung der Anzahl der Klassen....59
Abb. 19: Räumliche Darstellung des Clusterergebnisses....60
Abb. 20: Vergleich der durchschnittlichen Korngrößenzusammensetzung der Bodentypen. .61
Abb. 21: Korngrößendreieck....61
Abb. 22: Unterteilung der Bodenart reiner Sand....62
Abb. 23: Vergleich der effektiven Lagerungsdichte der einzelnen Bodentypen....63
Abb. 24: Vergleich der maximalen Wasserkapazitäten der einzelnen Bodentypen....64
Abb. 25: Wasserspannungskurven der ermittelten Bodentypen 65
Abb. 26: Vergleich der Stabilität der einzelnen Bodentypen....66
Abb. 27: Farbzusammensetzung der Bodenproben....67
Abb. 28: Vergleich des pH-Wertes der einzelnen Bodentypen....68
Abb. 29: Vergleich der Leitfähigkeit der einzelnen Bodentypen....69
Abb. 30: Vergleich der Humusgehalte der einzelnen Bodentypen....70
Abb. 31: Vergleich der Stickstoffgehalte der einzelnen Bodentypen....71
Abb. 32: Vergleich der C/N-Verhältnisse der einzelnen Bodentypen....73
Abb. 33: Vergleich der Phosphatgehalte der einzelnen Bodentypen....73
Abb. 34: Vergleich der KAKpot- und Basensättigung der einzelnen Bodentypen....74

Abb. 35: Vergleich der Anteile der Kationen an der Basensättigung der einzelnen Bodentypen.....76
Abb. 36: Vergleich der Anteile der Kationen an der KAKpot der einzelnen Bodentypen.....76
Abb. 37: Vergleich der Ca^{2+}-, Mg^{2+}-, K^{+}- und Na^{+}-Gehalte der einzelnen Bodentypen.....77
Abb. 38: Durchschnittliche Vegetationszusammensetzung der acht Hauptarten.....79
Abb. 39: Vergleich des Stickstoffgehaltes der Böden zwischen Leguminosen 80
Abb. 40: Vergleich der Höhenlage der einzelnen Bodentypen.....81
Abb. 41: Vergleich der Distanzen zur nächsten Siedlung, Fluss und Forage.....83
Abb. 42: Vergleich der Beweidungsintensität und Beeinflussung durch Termiten.....84
Abb. 43: Vergleich der Bäume/ha und Baumbedeckung der einzelnen Bodentypen.....85
Abb. 44: Vergleich der Fernerkundungsparameter NDVI, REFL 7 und TC 1 der einzelnen Bodentypen.....86
Abb. 45: Güteparameter des NMDS.....87
Abb. 46: NMDS mit geplotteten Bodenvariablen.....89
Abb. 47: NMDS mit geplotteten Parametern.....89
Abb. 48: NMDS mit geplotteten Vegetationseinheiten.....91
Abb. 49: Die hydromorphen Böden des Untersuchungsgebietes - *„Dek“* oder *„Xur“*.....92
Abb. 50: Die Regosolböden (Laterit) des Untersuchungsgebietes.....94
Abb. 51: Die Erdnuss/Bohnenstandorte des Untersuchungsgebietes - *„Diors“* 95
Abb. 52: Die Hirsestandorte des Untersuchungsgebietes - *„Bardial“* 96
Abb. 53: Importance-Werte als Gütekriterium für die Variablenauswahl.....98
Abb. 54: Flächenanteile der im Untersuchungsgebiet modellierten Bodentypen.....99
Abb. 55: Modellierung der regionalen Bodentypen.....100
Abb. 56: Regression des Ton- und Sandanteiles mit dem Humusgehalt.....103
Abb. 57: Regression von C_{org} und N_{ges} 104
Abb. 58: Durchschnittliche Stickstoffanteile am Gesamtstickstoff (N_{min}).....105
Abb. 59: Zusammenhang zwischen KAKpot und KAKeff 109
Abb. 60: Bodeneignungskarte des Untersuchungsgebietes für den Ackerbau.....120

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Die Windsysteme im Senegal 9
Tab. 2: Verwendungszweck einiger Baumarten..... 24
Tab. 3: Klasseneinteilung der Aggregatstabilität 35
Tab. 4: Klasseneinteilung des Verfestigungsgrades 35
Tab. 5: Berechnung der Bodenstabilität..... 36
Tab. 6: Einteilung der Korngrößen 37
Tab. 7: Codierung der Vegetationsdaten für die statistische Weiterverarbeitung..... 45
Tab. 8: Eckdaten der extrahierten Hauptkomponenten..... 55
Tab. 9: Klassengrößen bei unterschiedlicher Klassenanzahl bei der Ward-Methode..... 57
Tab. 10: Bewertung der effektiven Lagerungsdichte..... 63
Tab. 11: Durchschnittliche bodenphysikalische Kennwerte und Bewertungen der ermittelten Bodenarten 65
Tab. 12: Bewertung der Stabilität..... 66
Tab. 13: Bewertung des pH-Wertes 68
Tab. 14: Signifikante Korrelationen der Leitfähigkeit..... 69
Tab. 15: Bewertung des Humusgehaltes 70
Tab. 16: Signifikante Korrelationen des Humusgehaltes..... 71
Tab. 17: Signifikante Korrelationen des Stickstoffgehaltes..... 72
Tab. 18: Bewertung des Stickstoffgehaltes 72
Tab. 19: Bewertung der KAKpot 75
Tab. 20: Signifikante Korrelationen der KAKpot..... 75
Tab. 21: Bewertung der Nährstoffe 77
Tab. 22: Mittelwerte und p-values für die einzelnen Parameter..... 80
Tab. 23: Bewertung der Beweidungsintensität..... 84
Tab. 24: Signifikante Korrelationen der Umwelt- und Fernerkundungsparameter..... 86
Tab. 25: Vektoren der geplotteten Parameter des NMDS 90
Tab. 26: Vektoren der geplotteten Vegetationsarten des NMDS 91
Tab. 27: Wichtige Parameter und deren Bewertung der vier verschiedenen Bodentypen …. 97
Tab. 28: Confusion matrix des Random-Forest-Modells..... 98
Tab. 29: Abschläge zur Berechnung der KAKeff aus der KAKpot 109
Tab. 30: Wünschenswerte Anteile der Kationen an der KAKeff und Bewertung der einzelnen Bodentypen..... 110

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Al	Aluminium
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ALT	Altitude
$BaCl_2$	Bariumchlorid
BI	Beweidungsintensität
B.P.	Before Present
BS	Basensättigung
C	Kohlenstoff
C_{org}	Organischer Kohlenstoff
Ca	Calzium
$CaCl_2$	Calziumchlorid
C	Kohlenstoff
DCA	Detrended Correspondence Analysis
DF	Distanz Forage
DGM	Digitales Geländemodell
DR	Distanz Fluss
DS	Distanz Siedlung
DF	Distanz Forage
Fe	Eisen
FK	Feldkapazität
FS	Feinsand
GHCN	Global Historical Climatology Network
GPV	Grobporenvolumen
GS	Grobsand
H	Wasserstoff
HG	Humusgehalt
hydro.	hydromorph
K	Kalium
KAKeff	Effektive Kationenaustauschkapazität
KAKpot	Potentielle Kationenaustauschkapazität
Kap.	Kapitel
LAT	Latitude
LF	Leitfähigkeit
LK	Luftkapazität
LONG	Longitude
LS	Landsat
lS	lehmiger Sand
ma	Millionen Jahre
Mg	Magnesium
Mio.	Millionen
MS	Mittelsand
N	Stickstoff
N_{ges}	Gesamtstickstoff
Na	Natrium
$Na_4P_2O_7$	Natriumpyrophosphat
n. Br.	nördliche Breite
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
nFK	Nutzbare Feldkapazität
NH_4^+	Ammonium
NMDS	Non-metric Dimensional Scaling
NO^{3-}	Nitrat
p	Signifikanzniveau
PCA	Principal Component Analysis
PN	Probennummer
PO_4^{3-}	Phosphat
PWP	Permanenter Welkepunkt
R^2	Bestimmtheitsmaß
REFL	Reflectance
S	Schwefel
SA	Sand
sL	sandiger Lehm
SOTER	Soil and Terrain database
spec.	Spezies
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
STA	Stabilität
T	Ton
Tab.	Tabelle
TC	Tasseled Cap
TER	Termiten
TLU	Tropical Livestock Unit
TREECOV	Baumbedeckung
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
TW	Totwasser
U	Schluff
ü. NN	über Normalnull
WGS	World Geodetic System
w. L.	westliche Länge
WkMax	Maximale Wasserkapazität

1. Einleitung und Zielsetzung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Projektes "Klimawandel, Umweltveränderungen und Migration“ (micle), welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird. Mit Hilfe dieses Projektes sollen Zusammenhänge von Migration, Klimawandel und Umweltveränderungen in zwei Testgebieten im Westsahel (im Mali bei Mopti und im Senegal bei Linguère) aufgezeigt werden. Dabei beschäftigt sich diese Arbeit mit dem Umweltaspekt, mit der aktuellen Bodenqualität und deren Einflussfaktoren im Raum Linguère.

1.1 Stand der Forschung, Zielsetzung und Hypothesen der Arbeit

Nach der Unabhängigkeit Senegals 1960 wurden durch das IRD (L'Institut de recherche pour le développement) viele Forschungen im Senegal in unterschiedlichen Bereichen durchgeführt. In dieser Zeit entstanden umfangreiche Werke zu den Themen Geologie (BRIGAUD 1960), Klima (BRIGAUD 1965), Vegetation (ADAM 1965) und Boden (CHARREAU, FAUCK 1965; MAIGNEN 1965). Anfang der 1980er Jahre wurde das Projekt Fernerkundung und Kartographie der natürlichen Ressourcen Senegals unter Leitung von STANCIOFF gestartet, wobei flächendeckende Karten unter anderem auch zur Bodenqualität für ganz Senegal erstellt wurden und welches heute noch als Standardwerk gilt. 1986 wurde das CSE (Centre de Suivi Ecologique) zur Beobachtung und Verwaltung der natürlichen Ressourcen Senegals gegründet, das mehrere Projekte im Senegal beispielsweise zu Vegetationsmonitoring durchführt. Außerdem zählt Senegal zu den Untersuchungsländern der weltweiten Projekte von LADA (Land Degradation Assessment in Drylands) und ROSELT/OSS (Réseau d’Observatoires de Surveillance Ecologique à Long Terme durchgeführt vom l’Observatoire du Sahara et du Sahel). Senegal ist außerdem ein beliebtes Forschungsgebiet für Doktorarbeiten, die sich beispielsweise mit der Tragfähigkeit (GONZALEZ 1997), der Bodendegradierung (NDOUR 2001) oder den Produktionssystemen (NDIAYE 2007) auseinandersetzen.

Da bisherige Arbeiten, wie die Bodenqualitätskarte von STANCIOFF et al. 1986, aber zumeist sehr kleinmaßstäblich und somit starken Generalisierungseffekten ausgesetzt sind, lassen sich diese allgemein gehaltenen Aussagen, nur schwer auf ein bestimmtes Gebiet übertragen. Um die Bodenqualität für ein konkretes Gebiet genau einzuschätzen, ist es

notwendig in der lokalen Maßstabsebene zu arbeiten, denn die Bodenqualität kann sich, aufgrund vieler Einflussfaktoren, auf engstem Raum stark unterscheiden. Zu diesen Faktoren zählen unter anderem Raum- und Nutzungsparameter wie Landnutzung, Beweidungsintensität, Vegetation, Geomorphologie, Termiten oder Niederschlag.

Ziel dieser Arbeit ist es zum einen, die Bodenqualität anhand der chemischen und physikalischen Laborparameter zu ermitteln und zum anderen die beeinflussenden Faktoren herauszufinden sowie anschließend zu quantifizieren, um Aussagen darüber zu treffen, welche Parameter für die Bodenqualität und damit für den Ernteerfolg ausschlaggebend sind oder nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Dabei wurden folgende Forschungsfragen formuliert:
- Was sind die vorherrschenden Bodentypen und wie ist ihre räumliche Ausbreitung?
- Wie wird die Bodenqualität der einzelnen Typen des Untersuchungsgebietes bewertet?
- Welchen Einflussfaktoren unterliegt die Bodenqualität?

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden im Februar/März 2012, im Umfeld der Stadt Linguère, insgesamt 84 Bodenproben genommen und anschließend bezüglich ihrer chemischen und physikalischen Parameter im Labor der Universität Wien analysiert. Zusätzlich wurden an diesen 84 Standorten diverse Umwelt- und Fernerkundungsparameter aufgenommen beziehungsweise berechnet und deren Bedeutung mit Verfahren der multivariaten Statistik überprüft.

Um im gesamten Untersuchungsgebiet und nicht nur an den untersuchten Standorten, Aussagen zur Bodenqualität zu treffen, wurde anschließend eine Bodentypenkarte modelliert, wobei die einzelnen Bodentypen verschiedene Qualitätsparameter beinhalten.

Da diese Arbeit Teil des Projektes micle ist, kann auf weitaus umfangreichere Datensätze zurückgegriffen werden, als es im Rahmen einer Masterarbeit möglich wäre.

1.2 Hintergrund und Kennzeichen tropischer Savannenböden

Die Sahelzone, in der momentan ungefähr 25 Mio. Menschen leben, stellt ein weltweites Risikogebiet bezüglich Nahrungsmittelknappheit dar. Aktuelle Dürreperioden in den Jahren 2008 sowie 2012 weisen auf die Aktualität der Problematik hin. Da in der Sahelzone viele Menschen vom primären Sektor leben, spielen die Ernteerträge dort eine überaus wichtige

Rolle und sind überlebensnotwendig. Das schnelle Bevölkerungswachstum, mit einer jährlichen Wachstumsrate von 2,4 % (2010 bis 2015) (UNDS 2013) führt dabei zu einem erhöhten Druck auf die Nahrungsmittelproduktion. Mit dem Anstieg der Bevölkerung ist auch eine Erhöhung der Viehzahl verbunden, was zu Überweidung und damit verbunden, zu schweren Bodenerosions- und Degradationserscheinungen führt. Zusätzlich führen Buschbrände sowie unangemessene Bodenbewirtschaftungs- und Anbaumethoden zu beschleunigten Erosionserscheinungen sowie zur Nährstoffverarmung und somit zu Ertragseinbußen. Daraus resultiert im Senegal ein Rückgang der Ackerflächen von 3,8 auf 2,4 Mio. ha (DIACK et al. 2010), wodurch die nationale Erdnussproduktion im Zeitraum von 1960-1970 bis 1990-1996 um 28 % zurückging. FAYE et al. 2001 S. 5 begründen die geringere Produktion mit „*changes in rainfall and poor resource management and environmental degradation*“. Wirtschaftliche Faktoren, wie Preiserhöhungen bei Samen und Dünger, Landbesitz oder auch die Regierungspolitik spielen ebenfalls eine entscheidende Rolle (GRAY 2005).

Durch die oben genannten Faktoren steigt der Druck der Bevölkerung gute Ernteerträge, die aus einer angemessenen Bodenqualität resultieren, zu erzielen. Die Bodenqualität ist definiert als die Fähigkeit eines Bodens, Funktionen auszuüben, die wesentliche Aspekte für die Menschen und die Umwelt darstellen. Dazu zählen unter anderem die Lebensraum-, Filter-, Puffer- sowie die Produktivitätsfunktion (BLUME et al. 2010), wobei letztere in dieser Arbeit betrachtet wird. FINCK 1963 S. 80 definiert die Bodenproduktivität als *„die Fähigkeit eines Bodens zur Produktion einer bestimmten Pflanze oder Folge von Pflanzen auf einem bestimmten Boden, unter einem bestimmten Klima, bei einer bestimmten Anbauweise“*. Die Bodenproduktivität ist somit stark durch den wirtschaftenden Menschen beeinflussbar und wird oft mit der Bodenfruchtbarkeit gleichgesetzt.

Für die landwirtschaftliche Produktion sind insbesondere *„die Tiefe des gesamten Bodenprofils, die Korngrößenzusammensetzung des Oberbodens, die Wasserdurchlässigkeit des Unterbodens, die Mächtigkeiten des Ober- und Unterbodens, die Wasserhaltefähigkeit des Bodens, die Bodenreaktion, der natürliche Wasserabzug und Nährstoffgehalt, der Humusgehalt sowie der Grad der Erosion und Versalzung, von großer Bedeutung"* LEWIS 1952 zitiert in FINCK 1963 S. 171. Dabei sind die physikalischen Eigenschaften (Textur und Struktur) für die landwirtschaftliche Nutzung am wichtigsten, gefolgt von der organischen Substanz als Sorptionskomplex und Nährstofflieferant sowie chemischen Eigenschaften der Nährstoffversorgung (BAEYENS 1949).

Das erste Kriterium, eine genügende Tiefe des gesamten Bodenprofils, ist für die Lateritböden, die in den Tropen und Subtropen weit verbreitet sind, nur zum Teil zutreffend.

Als Laterite werden laut SCHULTZ 2000 S. 438 *„irreversibel verhärtete Bodenhorizonte aus eisenreichem Substrat (Plinthit) bezeichnet, die sich an oder knapp unterhalb der Bodenoberfläche befinden“*. Sie sind das Produkt der tropischen chemischen Verwitterung, unterschiedlichen Alters und können sich aus allen Gesteinsarten entwickeln, wobei die mineralische und chemische Zusammensetzung der Laterite vom Ausgangsgestein abhängt. Meist enthalten Laterite die Mineralien Goethit, Hämatit (die für die rotbraune Färbung verantwortlich sind) sowie Aluminiumhydroxid, Kaolinit und Quarz (TARDY 1997). Die Laterite wurden oft bereits fossil, zu Zeiten mit höheren Niederschlägen, gebildet und geraten erst durch nachträgliche Abspülung des Oberbodens an die Bodenoberfläche (SCHULTZ 2000).

Die Bodenentwicklung in den Tropen und Subtropen, wird in weiten Bereichen durch den Wechsel von Regen- und Trockenzeiten bestimmt (BLUME et al. 2010). Während der Wind in den ariden Trockengebieten den wichtigsten „Störfaktor“ für die Pedogenese darstellt, ist es in den semi-ariden Randgebieten, zu denen auch die Sahelzone zählt, das Wasser. Da in diesen Gebieten eine mehr oder weniger geschlossene Pflanzendecke vorherrscht, spielt der Wind nur eine untergeordnete Rolle. Das Wasser kann hingegen durch Abspülung und Sedimentation starke Materialumlagerungen bewirken (SCHULTZ 2000). Außerdem können die Niederschläge, verbunden mit der ständigen starken Sonneneinstrahlung, eine Ausbildung von Krusten an der Bodenoberfläche bewirken. Diese Krusten erschweren das Vegetationswachstum und behindern, bereits bei einer Mächtigkeit von 0,1 mm, die Infiltration entscheidend (GONZALEZ 1997). In den semi-ariden Gebieten überwiegen vor allem die physikalischen Verwitterungsprozesse, wie Temperaturverwitterung, aber auch chemische Verwitterungsprozesse (Salzverwitterung) treten unter Einwirkung von Wasser auf.

Eine wichtige Rolle üben in den Tropen die Termiten aus, deren Tätigkeit oft durch mehrere Meter hohe Termitenhügel sichtbar werden, wobei sich der Bau meist noch einige Meter unterirdisch weiter erstreckt. Für die Errichtung ihrer Nester transportieren die Termiten Feinerde (< 2 mm), aus bis zu 2 m Tiefe an die Bodenoberfläche, sodass sich Termitenbauten durch feinere Texturen, als ihre Umgebung auszeichnen. NYE 1955 schätzt die jährliche Bioturbation durch Termiten in Westafrika auf über 1 t/ha. Ebenfalls charakteristisch für Termitenbauten, sind die höheren Kationenaustauschkapazitäten, Sättigungsgrade der einzelnen Kationen, Humus- beziehungsweise Stickstoffgehalte (SCHULTZ 2000), eine höhere Aggregatstabilität sowie eine höhere Wasserhaltekapazität, resultiertend aus dem höheren Tonanteil (BLACK, OKWAKOL 1997). Außerdem üben Termitenbauten durch das vielfältige unterirdische System von Kammern und Gängen, einen entscheidenden Einfluss auf die Wasserdynamik aus.

Meist sind nur weniger als 10 % der Bauten bewohnt (FINCK 1963), bei verlassenen, bleibt jedoch noch einige Zeit der Nährstoffreichtum erhalten, sodass einige Bauern in Westafrika sogar den nährstoffreicheren Termitenboden zur Düngung ihrer Felder verwenden (BLACK, OKWAKOL 1997). Sind die Termitenbauten verlassen, so beginnen diese, aufgrund von Wind- und Wassererosion, schnell zu zerfallen, bis eine vegetationslose verfestigte Kruste auf dem Boden zurückbleibt.

Neben der Bioturbation und der damit verbundenen Durchlüftung des Bodens, sind die Termiten für die mechanische Zerkleinerung der trockenen Streuschicht und deren Einarbeitung in den Boden, wo die Mikroorganismen die weitere Zersetzung ausführen, verantwortlich. Insbesondere auf ackerbaulichen Böden verbessert der Abbau die Bodenqualität (BLACK, OKWAKOL 1997). Durch das Zusammentragen von Abfällen, führt das auf den entsprechenden Flächen jedoch zu Kohlenstoff- und Nährstoffentzügen. Insgesamt ist die *„Zeitspanne in der Zersetzungsvorgänge ablaufen, deutlich länger als diejenige, in der die Pflanzen produzieren“* SCHULTZ 2000 S. 403.

Aus diesem Grund und der geringen Biomasseproduktion der Vegetation, die nur in der Regenzeit stattfindet, ist der Gehalt an organischer Substanz im Boden generell sehr niedrig, weshalb die Stickstoff- und Phosphatgehalte ebenfalls sehr gering sind und neben Wasser die wachstumsbegrenzenden Faktoren darstellen. Im Gegensatz dazu sind die Pflanzennährstoffe Kalium, Calcium und Magnesium oft reichlich verfügbar (FINCK 1963).

Die Hauptprobleme der ariden Tropenböden stellt die Wasserversorgung der Pflanzen sowie die Versalzung der Böden dar, wobei die Struktur vieler Böden, aufgrund des hohen Anteils stabiler Aggregate, als günstig angesehen wird. Eine Ausnahme bilden dabei tonige Böden, die zur Verdichtung neigen und damit eine schlechte Durchlüftung für die Pflanzen bieten. Jedoch auch bei sandigen Böden besteht die Gefahr, dass sich die geringe Wasserhaltekraft durch den Übergang in ein Einzelkorngefüge noch weiter verringert (FINCK 1963).

GONZALEZ 1997 sieht die Erosionsanfälligkeit und den Einsatz von Buschfeuern, als wichtigste Probleme der tropischen Sahelböden an. Aufgrund der geringen Produktivität bildet sich keine geschlossene Vegetationsbedeckung während der Trockenzeit aus, die vegetationsfreien Stellen sind der Winderosion, durch den Harmattan ausgesetzt, wobei die einzelnen Sandkörner durch Saltation transportiert werden. In größerem Ausmaße wirkt sich jedoch die hydrische Erosion aus. Starke Niederschlagsintensitäten bis zu 50 mm/h, übersteigen die Feldkapazität der Böden und verursachen insbesondere Rillenerosion (gully erosion). LE HOUÉROU 1989 gibt für typische Sahelböden jährliche Erosionsraten von 200 kg/ha bei Brache und 1000-3000 kg/ha bei Kultivierung an.

Neben der Erosion wirken sich auch Buschfeuer, die zur Reinigung der Felder in der Trockenzeit durch die Bauern gelegt werden, negativ auf die Bodeneigenschaften aus. Durch die Feuer werden nützliche Mikroorganismen verbrannt und das restliche Bodenwasser verdampft. Außerdem erhärtet der Oberboden, wodurch die Infiltrationskapazität reduziert, und somit die Feldkapazität gemindert wird. Gleichzeitig steigt die Erosionsanfälligkeit. Da die Asche von Feuer Kalium benötigt, die Kationen jedoch bereits vor der Aussaat leicht ausgewaschen oder weggeblasen werden, führt Feuer zu einer Absenkung des pH-Wertes und damit verbunden zu einem Anstieg der Aluminiumkonzentration, durch die verfügbares Phosphat immobilisiert wird. Außerdem verdampft durch das Feuer viel Stickstoff (GONZALEZ 1997).

Trotz der übermäßig ungünstigen Eigenschaften der tropischen Böden, wird auf vielen Landwirtschaft betrieben, da es für viele Menschen die einzige Einkommens- und Versorgungsquelle darstellt.

2. Untersuchungsgebiet

In diesem Kapitel sollen kurz wichtige Hintergrundinformationen über Senegal und das Untersuchungsgebiet in den Bereichen Lage, Klima, Geologie, Geomorphologie, Hydrologie, Boden, Vegetation, Landnutzung und Bevölkerung vermittelt werden, die für das weitere Verständnis notwendig sind.

2.1 Geographische Lage

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Senegal in der Sahelzone, die sich in Afrika von der Atlantikküste bis zum Roten Meer erstreckt und als Übergangszone von der im Norden gelegenen Wüste Sahara zu der sich südlich anschließenden Trocken- beziehungsweise Feuchtsavanne charakterisiert wird. Senegal umfasst eine Fläche von 196.722 km² bei einer Bevölkerung von 12,768 Mio., wobei im Großraum der Hauptstadt Dakar allein 2,7 Mio. Menschen leben. Im Norden trennt der gleichnamige Fluss das Land von Mauretanien, im Westen grenzt Senegal an den Atlantischen Ozean, im Osten an Mali sowie im Süden an Guinea und Guinea Bissau. Des Weiteren wird der südlichste Teil Senegals, die Casamance, von Gambia abgegrenzt. Dabei reicht Senegal von 12,8 bis 16,4 ° n. Br. bei einer w. L. von 11,2 bis 17,3° (s. Abb. 1) (FISCHER WELTALMANACH 2013).

Im engeren Sinne liegt das Untersuchungsgebiet rund 250 km von Dakar in nordöstlicher Richtung entfernt in der Region Louga, im Departement Linguère, welches eine Fläche von 19.716 km² umfasst. Den Mittelpunkt bildet dabei die Departementshauptstadt Linguère (15°23‘40“ n. Br., 15°6‘57“ w. L.), in der ungefähr 15.000 Einwohner leben. Von Linguère aus erstreckt sich das Untersuchungsgebiet rund 20 km in alle vier Himmelsrichtungen, sodass sich insgesamt eine rechteckige Form bei einer West-Ost-Ausdehnung von 46 km und einer Nord-Süd-Erstreckung von 43 km mit einer Fläche von circa 1700 km² ergibt. (s. Abb. 1 - lila gefärbtes Rechteck) (CONSEIL REGIONAL LOUGA 2007).

Schon seit vielen Jahren wird Senegal in verschiedene „ecoregions“ unterteilt. Das sind ökologische Regionen mit ähnlichen biophysikalischen (Klima, Geologie, Hydrologie, Boden und Vegetation) und menschlichen Faktoren (Siedlungsparameter, Landnutzung). Sie zeichnen sich durch eine relative Homogenität in ökologischen Systemen aus, die die Wechselbeziehungen zwischen Organismen mit ihrer Umwelt beeinflussen (TAPPAN et al. 2004). Nach TAPPAN et al. 2004 werden im Senegal 13 solcher Zonen unterschieden

(s. Abb. 2).Davon befinden sich drei verschiedene, die nördliche sandige pastorale (Northern Sandy Pastoral Region), die südliche sandige pastorale (Southern Sandy Pastoral Region) sowie die eisenhaltige pastorale (Ferruginous Pastoral Region), im Untersuchungsgebiet. Auf diese Zonen wird in den folgenden Kapiteln zum Teil verwiesen. Diese drei „ecoregions“ lassen sich zur sylvo-pastoralen Zone zusammenfassen und bilden die Ferlo-Region.

Abb. 1: Übersichtskarte Senegal
(INTERNET STUDIOS SPAIN 2013)

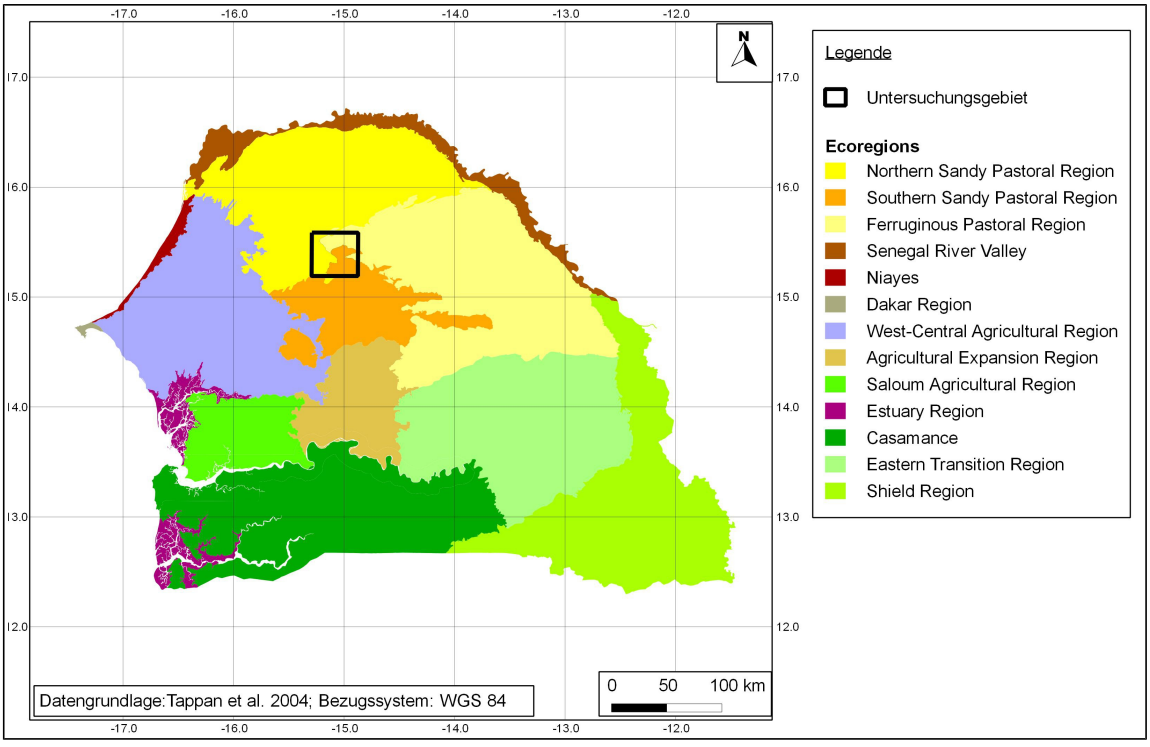


Abb. 2: Die Einteilung Senegals in „ecoregions“
(eigene Darstellung nach TAPPAN et al. 2004)

2.2 Klima

Nach der Klimaklassifikation von Köppen gehört Senegal größtenteils dem ariden Klima an, wobei es je nach Breitengrad eine Dreiteilung gibt: Der Norden Senegals ist gekennzeichnet durch arides heißes Wüstenklima (BWh), die Mitte, in der auch das Untersuchungsgebiet liegt, durch arides heißes Steppenklima (BSh) und die Casamance, der Süden Senegals, ist charakterisiert durch äquatorial Winter trockenes Klima (KOTTEK et al. 2006).

Das Klima Senegals wird durch die Wechselwirkung zwischen geographischen und meteorologischen Faktoren beeinflusst, wobei der Wechsel der Jahreszeiten mit dem Vorhandensein verschiedener Luftmassen einhergeht, was in drei Windsystemen mit unterschiedlicher Herkunft und Richtung resultiert (s. Tab. 1). Diese Windsysteme beruhen auf insgesamt vier Aktionszentren, die das Klima im Senegal verursachen: Die Antizyklonen der Azoren, die Hochdruckgebiete der Sahara und Saint-Helena sowie die innertropische Konvergenzzone, die sich als ein Tiefdruckgebiet auszeichnet (NDOUR 2001).

Tab. 1: Die Windsysteme im Senegal
(eigene Darstellung nach CONSEIL REGIONAL LOUGA 2007)

Windsystem	aus Richtung	Verbreitung	Luftmassen	
maritime Winde	Norden, entlang Küste	Oktober - Juni	feucht, stabil	
Harmattan	Nordostost	Januar - Mai	heiß, trocken	Trockenzeit
Monsun	Südwest	Juli - Oktober	heiß, feucht, instabil	Regenzeit

Aufgrund der geographischen Lage Senegals in den Tropen, werden ganzjährig hohe Temperaturen erreicht. Im Küstenbereich, der unter dem Einfluss der maritimen Winde steht, fallen diese, im Gegensatz zu den restlichen Landesteilen, geringer aus – so beträgt die Jahresmitteltemperatur von Dakar rund 24 °C, wobei nur geringe Tages- und Monatsamplituden auftreten. Im Landesinneren steigen die Temperaturen erheblich an, sodass Jahresmitteltemperaturen von knapp 30 °C, im Osten des Landes (Bakel, Matam), erreicht werden. Außerdem variieren die Tages- und Jahresamplituden der Temperatur (beispielsweise in Matam bis 19,8 °C) stärker als im Küstenbereich. Die kühlsten Temperaturen werden im Dezember und Januar gemessen, bevor diese bis zum Mai, dem wärmsten Monat im Jahr, durch den warmen Passatwind, den Harmattan, kontinuierlich ansteigen (NDOUR 2001).

Im Sommer verlagert sich die innertropische Konvergenzzone, aufgrund des Monsuns nach Norden – die Regenzeit beginnt. Dabei nehmen Dauer und Niederschlagsmenge Richtung Süden zu. Während in der Casamance mehr als 1000 mm fallen, so sind es im Norden Senegals weniger als 400 mm (s. Abb.3 (2)) (CSE 2010).

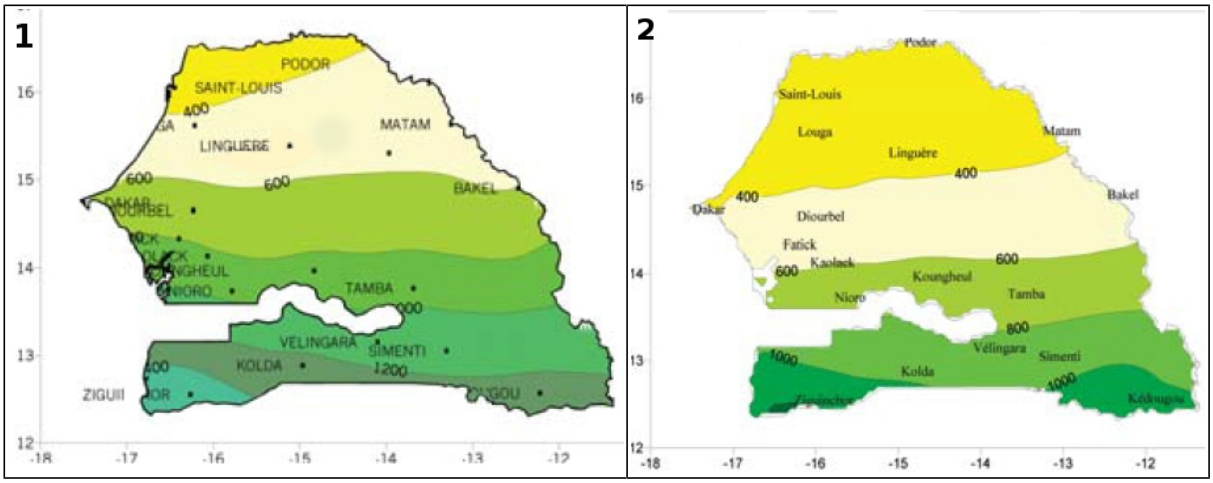


Abb. 3: Verschiebung der Isohyeten Richtung Süden, (1) mittlerer Niederschlag 1931-1960 (2) 1971-2007 (CSE 2010)

Aufgrund der unterschiedlich langen Trocken- und Regenzeiten sowie weiterer klimatischer Parameter, werden im Senegal insgesamt fünf klimatische Großregionen unterschieden (BRIGAUD 1965). Das sind im Einzelnen:

- die Sahelzone im Norden (100-400 mm Niederschlag),
- die Nordsudanzone im Zentralsenegal (400-800 mm),
- die Südsudanzone im Süden (bis 1000 mm)
- die Sudan-Atlantik-Zone im Küstenbereich der Casamance (> 1000 mm) und
- die Zone - der stabilen Meeresbrise - an der Küste, die im Einflussbereich der maritimen Winde liegt (NDOUR 2001).

Das Untersuchungsgebiet, mit der Klimastation Linguère, gehört nach der Einteilung der großklimatischen Gebiete, dem südlichen Teil der Sahelzone sowie dem nördlichen Teil der Nordsudanzone an. Dieses Gebiet ist durch eine drei bis vier Monate andauernde Regenzeit (Einfluss des Monsuns), die ungefähr von Mitte Juni bis Mitte Oktober (s. Abb. 5) andauert sowie durch eine acht bis neun Monate lange Trockenzeit (Einfluss des Passates, - Harmattan) gekennzeichnet. Bei der Niederschlagsmenge lässt sich, im Untersuchungsgebiet, auch eine deutliche Zunahme Richtung Süden feststellen: Während

im Norden, laut TRMM-Daten (Tropical Rainfall Measuring Mission) (Mittelwert der jährlichen Daten im Zeitraum 1998 bis 2010) rund 400 mm Niederschlag jährlich fallen, so sind es im Süden mit 450 mm, knapp 50 mm mehr. Werden die jährlichen Niederschlagsmengen von Linguère der letzten 40 Jahre verglichen, so wird ersichtlich, dass die Spannbreite der Werte stark von < 200 mm bis knapp 800 mm variiert. Insbesondere in den Dürrejahren 1941, 1973, 1983 und 2002 fiel die Niederschlagsmenge sehr gering aus (s. Abb. 4) (NDOUR 2001). Im Vergleich des mittleren jährlichen Niederschlages, der Perioden 1931-1960 mit 530 mm (BRIGAUD 1965) und 1961-1990 mit 411 mm fällt auf, dass die Niederschläge generell abnehmen, was eine Verschiebung der Isohyeten nach Süden zur Folge hat (s. Abb. 3) (CSE 2010). Die Niederschlagsdaten seit 1998 lassen jedoch wieder einen Aufwärtstrend erkennen (s. Abb. 4). Ist die Regenzeit dann beendet, bewirkt der konstante Harmattan die schnelle Austrocknung der Wasserstellen, so werden die Möglichkeiten der Tierhaltung und des Gemüseanbaus stark limitiert (NDOUR 2001).

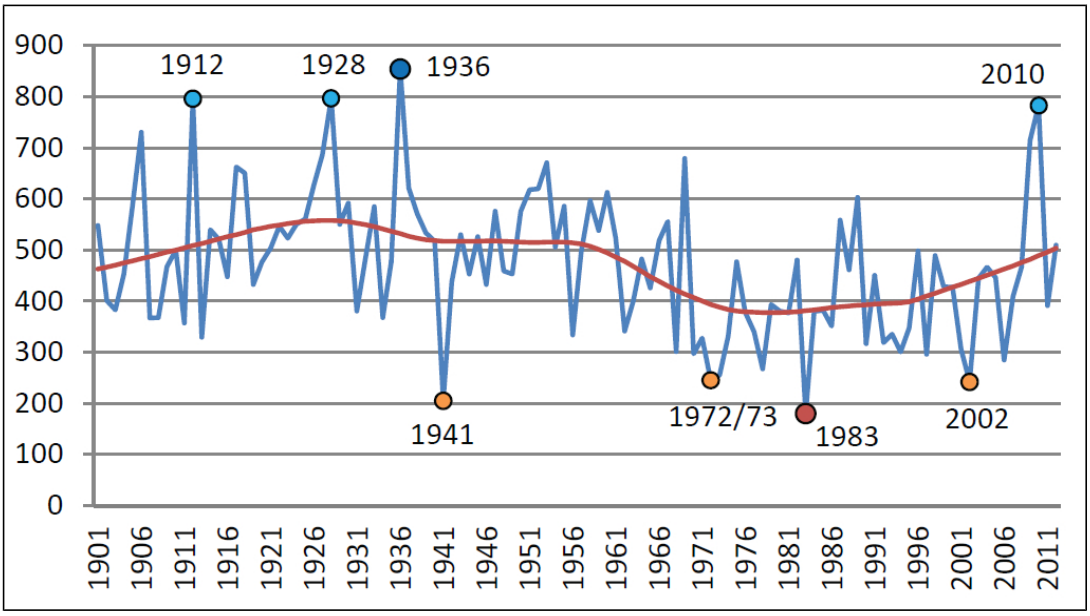
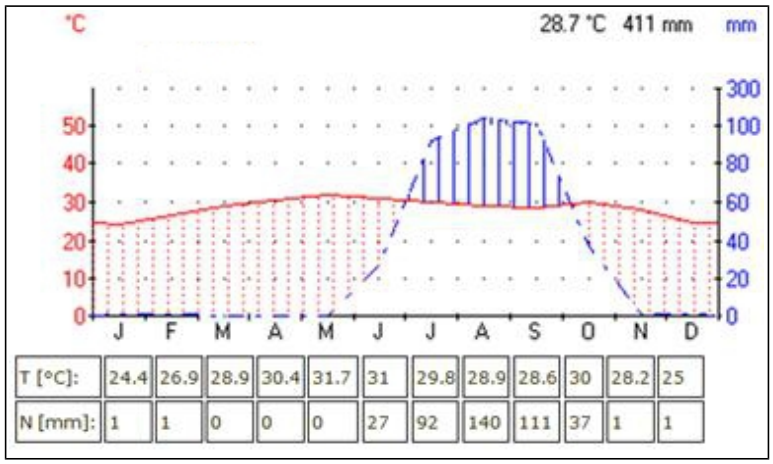


Abb. 4: Jährliche Niederschlagsmengen in Linguère 1901 bis 2012 [mm]
(STROMMER et al. 2013)

Linguère hat eine Jahresmitteltemperatur von 28,7 °C (GHCN 1961-1990), wobei die Amplitude zwischen dem kältesten Monat, dem Januar (24,4 °C) und dem wärmsten Monat, dem Mai (31,7 °C), 7,3 °C beträgt. Das thermische Regime ist durch eine bimodale Entwicklung gekennzeichnet, das bedeutet, es gibt jeweils zwei Monate in denen die maximalen (Mai und Oktober) und minimalen (Januar und September) Temperaturen erreicht werden (s. Abb. 5). Dabei folgt die durchschnittliche Menge des verdunsteten Wassers dem bimodalen Temperaturverlauf und ist charakterisiert durch zwei Anstiege, zum einen von

Januar bis Mai, bei einem Maximum von 9,6 mm/Tag und zum anderen von September bis November, bei Höchstwerten bis zu 7,8 mm/Tag. Die mittlere relative Luftfeuchtigkeit beträgt 47 %, wobei die durchschnittlich höchsten Werte im August (73 %) und die niedrigsten im Februar (29 %) auftreten (DIOP et al. 2004).

Werden die Jahresmitteltemperaturen von Linguère während der Zeitspanne 1950-2000 verglichen, so ist ein Temperaturanstieg von rund 2 °C erkennbar (CSE 2010).



	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T [°C]:	24.4	26.9	28.9	30.4	31.7	31	29.8	28.9	28.6	30	28.2	25
N [mm]:	1	1	0	0	0	27	92	140	111	37	1	1

Abb. 5: Klimadiagramm von Linguère: Datengrundlage GHCN 1961-1990
(eigene Darstellung, erstellt mit Programm Klima 0.9; rote Punkte = aride Verhältnisse, blaue Schraffur entspricht humiden Verhältnissen)

Die Regenzeit ist für die Bevölkerung sehr wichtig, denn währenddessen wird Ackerbau betrieben, in der Trockenzeit spielt vor allem die Weidewirtschaft eine große Rolle.

2.3 Geologie

Die geologischen Formationen Senegals können insgesamt drei Hauptgruppen zugeordnet werden, die folglich kurz erläutert werden. Eine geologische Zeitskala ist im Anhang 1 zu finden.

- Der Sockel Birrimien (mittleres Präkambrium) mit seiner Bedeckung im Paläozoikum
- Die Ablagerungen im Sedimentbecken des Meso- und Paläozoikums
- Die quartären Bildungen und Formationen des quartären Vulkanismus (NDOUR 2001)

Präkambrium & Paläozoikum

Der westafrikanische Sockel setzte sich im Präkambrium aus verschiedenen gefalteten, schwach metamorphisierten Gesteinsfragmenten (verschiedene Schiefer, Glimmer, Tonschiefer) zusammen und wurde von Eruptivgesteinen, vor allem Graniten, durchdrungen. Im Birrimien (vor 2100-2000 ma) wurden diese Gesteinsfragmente befestigt. Das Relief Westafrikas war zu diesem Zeitpunkt sehr eben – lediglich in der Saraya-Region wurden durch Granitintrusionen kleine Bergmassive geformt. Während des Paläozoikums (542-251 ma) wurde der Sockel, aufgrund einer Transgression, diskordant, also unregelmäßig, von dicken Sedimentschichten überlagert, es bildete sich das Bové-Sedimentbecken aus. Die Ablagerungen waren überwiegend Sand- und Tonsteine, die aus dem Unterkambrium und Ordovizium stammen. Aufgrund der herzynischen Gebirgsbildung (ab dem Devon) und der damit verbundenen Entstehung von tektonischen Störungen, brach das Bové-Sedimentbecken im Süden, Richtung Gambia auseinander. Des Weiteren entstanden zu dieser Zeit die großen tektonischen Einheiten Westafrikas und es kam zur Bildung von großen Sills aus Doleriten (NDOUR 2001; STANCIOFF et al. 1986; BRIGAUD 1960).

Sedimentbecken des Meso- und Känozoikums

Im Mesozoikum, ab dem oberen Jura, führte ein Meeresspiegelanstieg zu mehreren 1000 m dicken Ablagerungen, die aus Sand, Kies, Sandstein, Kalkstein und Ton bestehen – es kam zur Ausbildung eines neuen Sedimentbeckens, wobei der westliche Teil einer leichten Subsidenz ausgesetzt war (NDOUR 2001). Besonders wichtig waren dabei die über 2000 m mächtigen Aquifersande aus dem Maastricht, die das Fundament für den größten Teil Senegals bildeten (BRIGAUD 1960). In der oberen Kreide reichte das Sedimentbecken von der Küste, rund 500 km landeinwärts bis nach Bakel, hatte eine Nord-Süd-Ausdehnung von über 1000 km und erstreckte sich vor allem in Richtung Norden, weshalb es auch als Senegalesisches-Mauretanisches-Sedimentbecken bezeichnet wird.

Im Eozän, im *Lutetium* (vor 48,6-40,4 ma) wurden vor allem Kalkstein, Mergel und Phosphate im zentralen Bereich des Beckens, der die Region von Barkedji bis Tambacounda umfasst sowie in Louga, Kalksteine und Aluminiumphosphate abgelagert. Anschließend setzte eine rasante Transgression ein, die fast das gesamte Sedimentbecken, bis auf einige aus tonigem Sandstein bestehende 50 bis 100 m mächtige Festlandsockel, im zentralen und östlichen Teil sowie in der Casamance gelegen, auffüllte. Die Tektonik war im Paläogen und Neogen sehr ruhig, erst ab dem Miozän (vor 23-5,3 ma), kam es in der Region Dakar zu kleineren vulkanischen Tätigkeiten und im Pliozän (vor 5,3-2,6 ma), zu tektonischen Bewegungen und damit verbunden zur Ausbildung von Horst- und Grabenstrukturen, wie beispielsweise dem Horst von N'Dias (BRIGAUD 1960). Im Pliozän bildeten sich außerdem eisenhaltigen Laterite auf dem Festlandsockel aus (NDOUR 2001).

Quartäre Bildungen

Das Quartär ist durch Klimaschwankungen und Meeresspiegeländerungen gekennzeichnet (s. Anhang 1). Aufgrund des Wechselspiels von Regression und Transgression wird das Quartär in das marine und kontinentale Quartär eingeteilt (NDOUR 2001). Während dieses Wechselspiels, schneidet sich das Wassernetz in die verkrustete Oberfläche des Kontinentsockels ein und bildet ein mehrstufiges Relief aus, welches heute noch im Osten und Süden der sedimentären Becken und in den Tälern der Flüsse Senegal und Gambia zu finden ist. Zusätzlich kommt es in den Flusstälern sehr oft zu alluvialen Anschüttungen. Diese sind im Bereich der Flussmündungen ausschließlich marin und bekommen stromaufwärts einen immer mehr kontinentalen Charakter (NDOUR 2001). Die Zeiten des ariden Klimas (entsprechen den Regressionszeiten) sind durch unregelmäßige Niederschläge mit vereinzelter Vegetation charakterisiert, wobei die Winderosion eine erhebliche Rolle spielt. In den Zeiten des humiden Klimas (entsprechen oft den Transgressionszeiten) gibt es regelmäßig Niederschläge, was zu einer ständigen Vegetation führt. Außerdem ist das humide Klima geprägt durch die Ausbildung von verkrusteten Oberflächen.

Vor rund 120.000 Jahren, im *Aioujian,* kam es aufgrund einer Transgression zu Überschwemmungen der Flüsse und zum Grundwasseraustritt an der Oberfläche, wodurch zahlreiche Seen entstanden. Außerdem wurden lakustrine Kalksteine gebildet. Im Folgenden wurde das Klima wieder trockener (subarid). Große Sanddünen (Erg), mit einer Nordost-Südwest- beziehungsweise Nordwest-Südost-Ausrichtung, bedeckten durch verstärkte Windeinwirkung, die Region Nordferlo (STANCIOFF et al. 1986). In der daran anschließenden humiden Periode (*Aioujien*), entwickelten sich Böden auf den Dünen. Während der Transgression vor rund 30.000 Jahren, (*l'Inrichien*) wurden vor allem Muschelkalke und Sande im Deltabereich des Senegalflusses abgelagert (STANCIOFF et al. 1986).

An das *l'Inrichien* schließt sich eine lange, durch sehr arides Klima gekennzeichnete Regressionsphase, das *Ogolien,* an, in der die Küstenlinie 100 m unter dem heutigen Niveau lag. Während dieser Zeit vertieften sich die großen Flüsse im nördlichen, zentralen und östlichen Senegal. Der Senegalfluss hat zu dieser Zeit viele andere kleine Flüsse in sein Einzugsgebiet aufgenommen, wodurch sich die geomorphologische Entwicklung Senegals veränderte. Durch dieses Ereignis, begünstigt durch starke äolische Tätigkeit, bildeten sich zu diesem Zeitpunkt sehr viele natürliche Seen aus, die wahrscheinlich die Ursache für die zahlreichen Seeablagerungen in der Mitte, im Norden und Osten Senegals darstellen (STANCIOFF et al. 1986).

Während des *Ogolien* bedeckten äolische Ablagerungen, die sich bis zum Gambiafluss erstreckten, weite Teile von Westsenegal. Zu diesem Zeitpunkt wurden nordost-südwest orientierte Dünen, im Becken des Sine Saloura und im Delta des Senegalflusses gebildet. Aufgrund der Rotfärbung des obersten Horizontes, werden diese auch als Rotdünen „dunes rouges“ bezeichnet. Neben diesen Rotdünen, entwickelten sich zu dieser Zeit auch die geometrisch sehr heterogenen Gelb- und Weißdünen („les dunes jaunes et blanches“), die sich am Küstenbereich zwischen Dakar und St. Louis befinden und eine Nordwest-Südost-Orientierung aufweisen (NDOUR 2001).

An diese lange Phase mit aridem Klima schließt sich eine sehr humide, das *Tchadien,* an, in der sich tonhaltige Kalke und Muschelkalke zwischen den Dünen ablagerten. Sie sind besonders häufig in den Regionen Louga, Diourbel und im Ferlo zu finden. An der Küste bei Niayes entwickelten sich diese Ablagerungen zu Torf, dessen durchschnittliche Mächtigkeit 14 m beträgt (NDOUR 2001).

In der nachfolgenden Zeit (vor 8000 Jahren) gab es ein Klima, das noch viel trockener als das heutige war. In dieser Zeit wurden die bestehenden Dünenketten bearbeitet und zum Teil neugebildet, bevor in den darauffolgenden Transgressionen im *Nouakchottien* und *Dakarien*, die insbesondere im Deltabereich des Senegalflusses und im Graben des Guiersees aktiv waren, in den Dünenzwischenräumen Muschelkalke und Sande mit einer Maximalmächtigkeit von 5 m abgelagert wurden (BILLE et al. 1972). In den letzten 2000 Jahren wurde das Klima wieder arider, wobei einige Geologen jedoch die Ansicht vertreten, dass es im Mittelalter im gesamten Sahel noch eine humidere Phase gab (BILLE et al. 1972).

Tektonisch gesehen ist das Quartär im Senegal relativ ruhig, lediglich in Dakar, am Kopf der Vert-Halbinsel, gibt es Formen vom quartären Vulkanismus, die hauptsächlich durch Dolerite, Basalte und Tuffe vertreten sind (NDOUR 2001; STANCIOFF et al. 1986).

2.4 Geomorphologie

Im Senegal liegt der südliche Teil des ehemaligen Senegalesischen-Mauretanischen-Sedimentbeckens (s. Kap. 2.3), woraus ein relativ flaches Relief mit niedrigen Plateaus mit maximalen Erhebungen von 130 m resultiert. Lediglich im Südosten Senegals ist das Relief höher. Dabei haben 75 % des Geländes nur eine Höhe bis 50 m. Das Relief Senegals wird von zwei großen Ebenen, von den großen Flüssen Senegal und Gambia sowie von ein paar

trockenen Tälern (wie Sinus, Saloum, Ferlo) durchschnitten. Der geringe topographische Kontrast erklärt sich mit der einfachen geologischen Struktur und der morphoklimatischen Entwicklung (NDOUR 2001).

Nach SALL 1982, werden im Senegal vier große geomorphologische Einheiten unterschieden:

- Die verkrusteten Formationen im Südosten, die geologisch den Sockel Birrimien mit seiner paläozoischen Abdeckung umfassen. Diese Landschaft ist charakterisiert durch Erosionserscheinungen, steile Bergabhänge, niedrige Plateaus und Inselberge, die aus harten Gesteinen wie Metabasiten und Doleriten bestehen. In diesem Gebiet befindet sich mit den Bassari-Bergen, mit einer Höhe von 581 m, auch die höchste Erhebung Senegals.
- Die niedrigen Plateaus im zentralen und südlichen Teil Senegals, die in drei weitere Bereiche eingeteilt werden:
    - Das einheitliche 50 m hohe Relief südlich des unteren Senegalflusses, welches aufgrund des Harmattans aus mehreren Longitudinaldünen besteht.
    - Das gleichmäßig niedrige 25 bis 30 m hohe Plateau vom mittleren Ferlo bis zur Casamance reichend, das aus Sandsteinen des Kontinentsockels aufgebaut ist.
    - Der unebene aus eozänischen Mergeln und Phosphaten bestehende, sich bis nach Thiès erstreckende westliche Teil, mit vielen Süß- und Salzwasserseen.

  Ausnahmen dieser Einheit, bilden das im Südwesten von Thiès gelegene Ndiass-Massiv sowie die vulkanischen Gebäude („Mamelles“) beim Cap Manuel in Dakar.
- Die alluvialen Ebenen der großen Flüsse sowie
- die über 700 km langen Küsten, deren Charakteristiken von sandigen Flachküsten (von Saint-Louis bis Cambéréne), über felsige Steilküsten (Cap Vert, Cap de Naze), bis hin zu Mangroven geprägten Küsten in der Casamance reichen (SALL 1982).

Das Untersuchungsgebiet wird von Nordwesten in Richtung Südosten vom Ferlo durchschnitten, dessen Tal 8 bis 25 m ü. NN liegt und eine maximale Breite von 2 km erreicht. Im Nordwesten Linguères (13 m ü. NN) zweigt vom Ferlo ein weiteres großes Flusstal in nordöstlicher Richtung ab. Der restliche Teil vom Untersuchungsgebiet liegt zumeist über 40 m ü. NN, im Südwesten werden laut SRTM (s. Kap. 3.3.2) sogar Höhen um die 60 m gemessen (s. Abb. 6.).

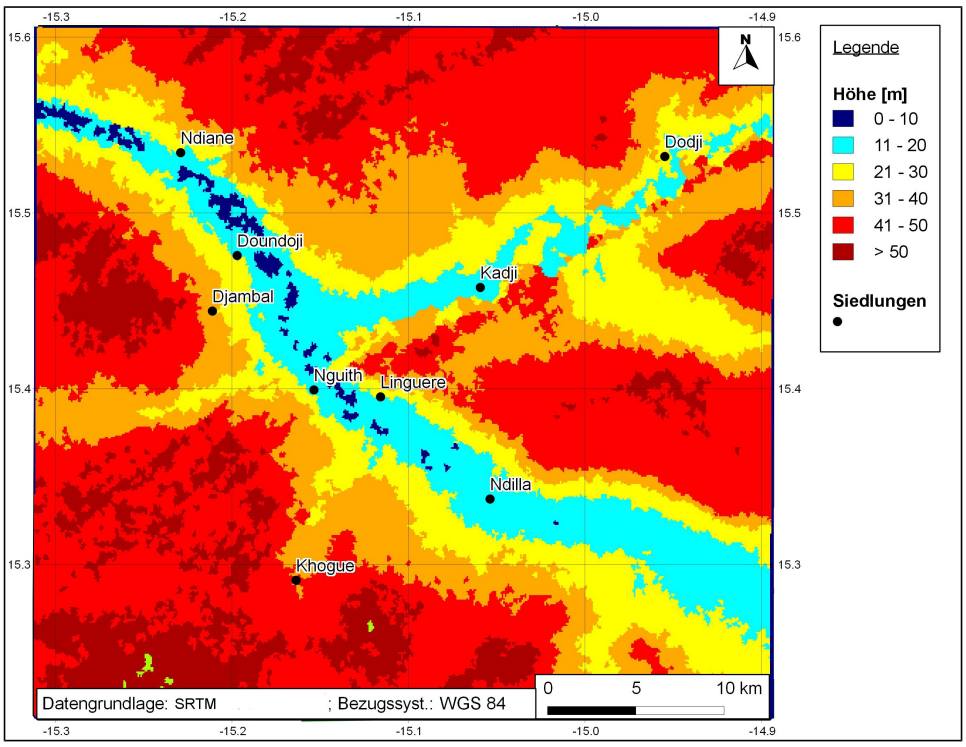


Abb. 6: Höhenkarte des Untersuchungsgebietes
(eigene Darstellung aus SRTM-Daten)

2.5 Hydrologie

Das unregelmäßig verteilte Flusssystem vom Senegal hängt einerseits von den geologischen und geomorphologischen Rahmenbedingungen, andererseits von der Niederschlagsverteilung ab. Es gibt insgesamt vier große Flusssysteme (Senegal, Gambia, Sine Saloum und Casamance), wobei das Untersuchungsgebiet zum Einzugsgebiet des Senegalflusses, mit einer Fläche von 220.000 km², zählt. Durch das Untersuchungsgebiet fließt der Ferlo, der in der Regenzeit eine Länge von rund 500 km aufweist und in den Senegalfluss entwässert. Der Ferlo, wie auch die anderen senegalesischen Flüsse, besitzt ein tropisches Abflussregime mit maximalen Wasserständen im August und September, während in der Trockenzeit die niedrigsten Wasserstände erreicht werden. Beim Ferlo fällt beispielsweise die halbe Länge des Flussbettes trocken (UNICEF 2011).

Da es im Senegal an Oberflächenwasser mangelt, setzt die Politik auf die Ausbeutung des unterirdischen Wassers, um den Bedarf der Bevölkerung zu decken. Diese Grundwasserressourcen sind in verschiedenen geologischen Schichten enthalten, die sich bezüglich ihrer Mächtigkeit und Lithologie unterscheiden. Die ältesten Aquifere stammen aus dem Maastrichtan (obere Kreidezeit), während die geologisch jüngsten dem Quartär

zugeordnet werden (DIOP et al. 2004). Unter dem Untersuchungsgebiet befindet sich der Aquifer aus dem Maastrichtan, der insgesamt eine Fläche von 130.000 km² umfasst und ein Volumen von 2,6 X 10^{12} m³ fossiles Wasser enthält, welches zum Teil vom Senegalfluss gespeist wird. Dieser Aquifer besteht aus kontinentalen Sanden mit vereinzelten Tonen und Kalken, wobei der Tongehalt in Richtung Westen höher wird. Insgesamt verändert sich die Tiefe des Aquifers von 20 m beim Horst von N'Dias über 100-350 m sylvo-pastoralen Raum bis hin zu 600 m unter der Geländeoberfläche in der Casamance, wobei auch die Mächtigkeit zwischen 80 und 300 m schwankt (mittlere Mächtigkeit 200 m) (DIOP et al. 2004; GONZALEZ 1997; STANCIOFF et al. 1986).

In diesen Aquiferen wurden Bohrungen durchgeführt und Brunnen, sogenannte Forages errichtet, aus denen das Wasser mit Hilfe von Dieselmotoren betriebenen Pumpen nach oben befördert wird. Dabei werden Förderungsraten zwischen 100 und 205 m³/h erreicht. Der erste Forage wurde bereits 1931 errichtet, 1950 waren es 16 und 2001 bereits 169 im sylvo-pastoralen Raum (DIOP et al. 2004).

Da die Forages die Bevölkerung und die Tierherden auch während der Trockenzeit sowie in Dürrejahren versorgen, konnten sich zum Teil permanente Siedlungen entwickeln, was zu einer Expansion der Viehwirtschaft führte (VINCKE et al. 2010). 1975 hatte sich die Anzahl der Rinder im Vergleich zu 1950 mehr als verdoppelt, die Anzahl der Schafe und Ziegen sogar verfünffacht (HANAN et al. 1991). Durch erhöhte Viehzahlen kommt es in der Nähe der Forages, verstärkt zu Desertifikationserscheinungen. Der Viehtritt führt einerseits zum Absterben sensitiver Spezies und damit verbundenen zu einer Erhöhung der Bodenbelichtung, andererseits bildet sich aufgrund des mechanischen Stampfens auf die Bodenoberfläche Staub, der sehr anfällig für die Winderosion ist. Außerdem dringt dieser in den Boden ein und führt somit zur Bodenverdichtung sowie zur Ausbildung von Krusten (s. Kap. 2.6), durch die wiederum der Oberflächenabfluss erhöht und gleichzeitig die Infiltration gesenkt wird, was eine geringere Bodenfeuchtigkeit verursacht (HANAN et al. 1991).

2.6 Boden

Im Senegal stützt sich das wirtschaftliche Leben der Bevölkerung auf die kontinuierliche Ausbeutung der Böden, die für die Menschen verschiedene wichtige Funktionen erfüllen. Insbesondere sind die Produktionsfunktion (Landwirtschaft, Holz, Wasser) sowie die Regulierungsfunktion (Erosionsschutz, Grundwasserneubildung, Abwasser) bedeutsam (CSE 2010). Durch den Einfluss wechselnder Luftmassen, mit verschiedenem Ursprung und

Charakter (s. Kap. 2.2) sowie aufgrund der abwechselnden Transgressions- und Regressionsphasen, im Laufe der geologischen Entwicklung (s. Kap. 2.3), gibt es im Senegal eine Vielfalt an Bodentypen und damit verbunden eine unterschiedlich ausgeprägte Vegetation. Dabei spielt vor allem die Niederschlagszunahme in Richtung Süden eine enorme Rolle (NDOUR 2001).

Nach der pedomorphologischen Karte von STANCIOFF et al. 1986, die unter anderem an die Bodenkarte von MAIGNEN 1965 angelehnt ist, werden im Untersuchungsgebiet drei große Einheiten unterschieden, die in der Abbildung 7 dargestellt sind und im Nachfolgenden genauer beschrieben werden.

Hydromorphe Böden

Die grauen hydromorphen Böden, befinden sich im Untersuchungsgebiet entlang des Flussbettes vom Ferlo sowie dessen Nebenflüssen und werden von den Einheimischen als *„Xur“* (GONZALEZ 1997) oder *„Dek“* (NDIAYE 2007) bezeichnet. Sie werden aus kolluvialen und alluvialen Ablagerungen gebildet und weisen nur eine geringe Mächtigkeit auf. Da die Textur dieser Böden von sandigem Lehm, über Lehm bis hin zum Ton variiert, steht hier oft während der Regenzeit das Wasser und es kommt zur Ausbildung von hydromorphen Merkmalen. Dabei wird die Korngrößenzusammensetzung mit zunehmender Tiefe sandiger, denn unterhalb der flachgründig hydromorphen Böden befinden sich Sande und Kiese. Aufgrund von starker Windeinwirkung, kommt es in der Trockenzeit zur Ausbildung von Inseln, gelblich tropisch eisenhaltiger Böden, die aus Sand bestehen. Auf diesen hydromorphen Böden wachsen viele verschiedene Arten, aber überwiegend *Acacia seyal*. Diese Böden bieten ein gutes Weidepotential in der Trockenzeit, wenn vor allem die Blätter der dichten Bäume eine wichtige Futterquelle darstellen. In der Regenzeit steht in diesen Senken meist Wasser, sodass sie als Tränke verwendet werden (STANCIOFF et al. 1986; CHARREAU, FAUCK 1965).

Regosole

Insbesondere im Osten des Untersuchungsgebietes, befinden sich mehr oder weniger tonhaltige Formationen, auf Kiesen des Kontinentsockels aus dem Oligo-, Mio- oder Pliozän (s. Kap. 2.3). Auf den Plateaus werden diese zumeist als Regosole oder Lithosole bezeichnet. Charakteristisch dafür ist, dass das Ausgangsgestein, der Laterit, oft an der Bodenoberfläche sichtbar wird, sodass die Böden meist nur flachgründig und wenig entwickelt sind. Unter einer weit verbreiteten dünnen harten Kruste setzen sich die Regosole aus Sanden oder schluffigen Sanden zusammen. In den klein- bis großräumigen Senken, befinden sich hydromorphe oder tropisch eisenhaltige Böden, mit höheren Tongehalten, in denen während der Regenzeit ebenfalls das Wasser steht. Das sind zumeist sandige Lehme mit einem neutralen pH-Wert, weshalb diese Senkenböden fruchtbarer als die der Plateaus

sind. Die Vegetation dieser Zone ist zumeist eine Strauchsavanne, die in der Regenzeit sehr gut, aber in der Trockenzeit weniger als Weideland geeignet ist, da der Boden durch Viehtritt sehr verfestigt wird. Außerdem sind die Regosole sehr anfällig gegenüber Wind- und Wassererosion (STANCIOFF et al. 1986; CHARREAU, FAUCK 1965).

Eisenhaltige tropische Böden

Den dritten vorherrschenden Bodentyp stellen die eisenhaltig tropischen Böden dar, die sich auf den rezenten welligen Dünen (äolische Formationen) entwickelt haben und von den Einheimischen als *„Dior“* bezeichnet werden. MAIGNEN 1965 gibt als Entwicklungsdauer dieser Böden, eine Zeitspanne von 2 bis 3000 Jahren an. Im Untersuchungsgebiet nehmen sie die größte Fläche ein und befinden sich überwiegend im westlichen Teil.

STANCIOFF et al. 1986 beschreiben die *„Diors“* als schwer definierbar. Diese farblich variablen Böden, sind im Allgemeinen gut durchlässig und weisen eine sandige Textur (zumeist Feinsand), bei Tongehalten zwischen 2 bis 6 % auf und haben einen niedrigen Gehalt, an organischer Substanz sowie einen leicht sauren pH-Wert. Die Böden sind arm an chemischen Elementen, insbesondere Phosphat fehlt, weshalb die Fruchtbarkeit nicht sehr hoch ist. Trotzdem haben die Böden eine enorme Bedeutung für die Landwirtschaft, denn es werden in erster Linie Erdnüsse und Hirse angebaut. Neben der landwirtschaftlichen Nutzung werden diese auch als Weideland verwendet (CHARREAU, FAUCK 1965).

Die von STANCIOFF et al. 1986 klassifizierten *„Diors“,* werden laut NDIAYE 2007, noch zusätzlich in *„Bardial“* (schwere Böden) sowie *„Baida“* (sand/tonhaltige Übergangsböden) und *„Dek“* (tonhaltige Senken) kleinräumiger unterteilt, die sich in der Vegetationszusammensetzung und den Anbauprodukten unterscheiden. Während bis zu den Dürren der 1970er Jahre auf den *„Diors“* Erdnüsse, Hirse und Maniok angebaut wurden, waren es nach den Dürren fast ausschließlich Erdnüsse und Bohnen.

Auf den *„Diors“* ist eine Fruchtfolge im 4-Jahresrhythmus empfehlenswert (Erdnüsse, Hirse, Erdnüsse, Brache oder Gründüngung). Jedoch ist diese Bewirtschaftungsart nicht weit verbreitet, denn in der Realität wird über mehrere aufeinanderfolgende Jahre dieselben Früchte, zumeist Erdnüsse, angebaut, was den Boden negativ beeinträchtigt (CHARREAU, FAUCK 1965). Diese *„Diors“* werden durch das Vorhandensein von *Combretum glutinosum* charakterisiert, im Gegensatz zu den *„Bardial“*, auf denen hauptsächlich Hirse angebaut wird und die sich durch *Balanites aegyptiaca* kennzeichnen. Auf den *„Baida“* werden bevorzugt Hirse und Bohnen angebaut, für Erdnüsse werden diese Übergangsböden als zu schwer erachtet (NDIAYE 2007).

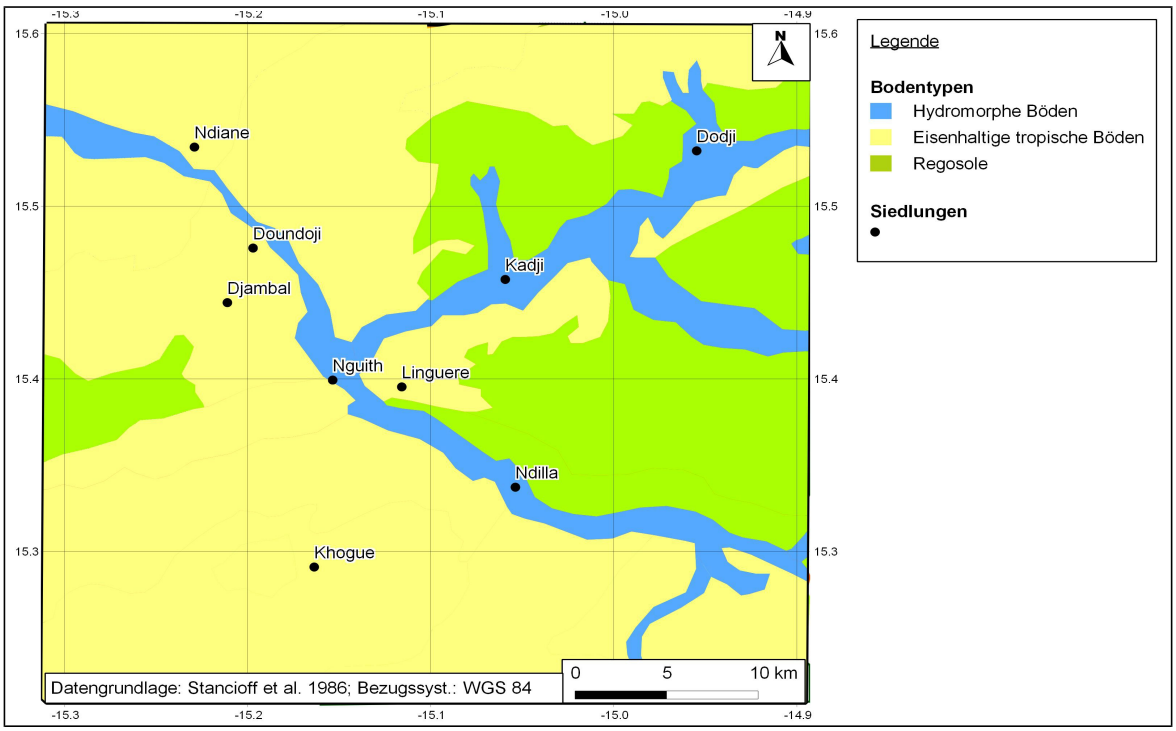


Abb. 7: Vereinfachte pedomorphologische Karte des Untersuchungsgebietes
(eigene Darstellung nach STANCIOFF et al. 1986)

Diese Böden sind sehr erosionsanfällig, zum einen gegenüber der Wassererosion in der Regenzeit (beispielsweise Rillenerosion, gully erosion s. Abb. 8) und zum anderen gegenüber der Winderosion in der Trockenzeit. Allein die potentielle Winderosion der *„Diors“* beträgt 655 t/ha (GONZALEZ 1997). Durch die hohe Intensität der Winde, verstärkt durch das Fehlen der Vegetation und das Vorhandensein eines flachen Reliefs, kommt es auf diesen Böden verstärkt zur Bildung von Wanderdünen, was sich nachteilig auf den Anbau auswirkt (CONSEIL REGIONAL LOUGA 2007).

Abb. 8: Hydrische Erosion im Norden von Linguère
(eigene Aufnahme, März 2012)

2.7 Vegetation

Im Senegal gibt es insgesamt drei dominante pflanzengeographische Gebiete, die aus den unterschiedlichen Jahresniederschlagsmengen in der Nord-Süd-Ausdehnung (s. Abb. 3) resultieren: die Sahelzone (bis 500 mm), die Sudanzone (bis 1000 mm) sowie die Guineazone (über 1000 mm). Die nördlichste Zone, die Sahelzone, die den nördlichen Teil Senegals bis zur Linie Dakar-Bakel umfasst (500 mm Isohyete) und somit auch das Untersuchungsgebiet enthält, ist durch eine offene Vegetation (pseudo-Steppe beziehungsweise Buschland) gekennzeichnet (MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE 2008a). In dieser Zone dominieren vor allem *Balanites aegyptiaca sowie Acacia tortilis*, *Acacia senegal*, *Acacia seyal* und *Combretum glutinosum* in der Baumschicht sowie *Boscia senegalensis* und *Ziziphus mauritiana* in der Strauchschicht (CONSEIL REGIONAL LOUGA 2007).

Die drei großen pflanzengeographischen Gebiete lassen sich in mehrere Untergruppen einteilen. Nach ADAM 1965 gehört der Großteil des Untersuchungsgebietes zu der Djolof-Nord-Zone, die durch sommertrockenes Grasland, mit Bäumen und Sträuchern und vereinzelt niedrigen Wäldern gekennzeichnet ist. Dieses Gebiet ist durch drei verschiedene Bodentypen charakterisiert, aus denen sich die vorherrschende Vegetation wie folgt ableiten lässt (s. Kap. 2.6).

- Auf den sandigen Dünen (*„Dior"*) wachsen vor allem kleine Bäume aus der *Sudanzone,* wie *Combretum glutinosum* und *Terminalia avicennioides*. Die Krautschicht ist, im Gegensatz zu weiter nördlichen Gebieten, sehr abwechslungsreich und setzt sich aus zahlreichen Leguminosen (*Tephrosia, Crotalaria, Indigofera, Cyamopsis*) und Rubiaceen (*Borreria, Kohautia*) sowie Gräsern (*Andropogon pseudapricus*) zusammen.
- Die interdunären feinsandigen und schluffigen Böden (meist hydromorph), sind durch das Vorkommen von *Balanites aegyptiaca* und *Acacia seyal* charakterisiert und werden durch die Gräser *Schoenefeldia gracilis* und *Chloris prieurii* bedeckt. In der Nähe von Bäumen sind die Gräser *Andropogon pseudapricus* und *Diheteropogon hagerupii* häufig anzutreffen.
- Die vor allem weit im Norden und Osten anzutreffenden, eisenhaltigen Lateritböden (Regosole) sind durch Steppenvegetation (Gräser *Borreria radiata* und *Blepharis linearifolia*) und vereinzelte kleine Bäume sowie Sträucher (*Pterocarpus lucens*, *Combretum spec.*) gekennzeichnet (ADAM 1965).

Die Vegetation der beiden weiteren Zonen im Senegal, differenziert sich deutlich vom Untersuchungsgebiet: So ist die Sudanzone durch eine Baumsavanne mit großwüchsigen Arten wie *Bombax costatum*, *Cassia sieberiana*, *Cordyla pinnata*, *Daniella oliveri*, *Parkia biglobosa*, *Pterocarpus erinaceus*, *Sterculia setigera* und *Combretum spec,.* mit dominierenden Gräsern der Gattung *Andropogon spec.* gekennzeichnet, während sich die südlichste Zone, die Guineazone, durch einen dichten zweistufigen Wald mit *Afzelia africana*, *Detarium microcarpum*, *Elaeis guineensis*, *Erythrophleum guineense*, *Khaya senegalensis* und *Parinari curatellifolia* auszeichnet (MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE 2008a).

Die Vegetationsentwicklung ist abhängig vom Klimawandel, der sich durch rückläufige Niederschläge (s. Kap. 2.2), höhere Temperaturen, Versalzung und verstärkte Wasser- und Winderosion äußert (MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE 2008a). Durch erhöhte Temperaturen steigt das Risiko der Buschfeuer, durch die innerhalb einer Trockenzeit durchschnittlich 200.000 ha Land vernichtet werden. Insbesondere die Sahelzone ist aufgrund der leicht entzündlichen Gräser besonders gefährdet. Dort haben Feuer eine negative Auswirkung auf die Artzusammensetzung und die Produktivität, durch die Zerstörung der Samen sowie die Vernichtung der Halme. Jedoch sind die Samen einiger Gräser, wie *Diheteropogon hagerupii*, *Loudetia togoensis*, *Schoenefeldia gracilis* und *Blepharis linariifolia* resistent gegenüber Feuer (CSE 2005).

Zusätzlich zu den Buschfeuern wird die Vegetation insbesondere durch den Menschen beeinflusst, der Senegal in eine Kulturlandschaft verwandelt hat. Beispielsweise wurden großflächige Gebiete, zum einen für die landwirtschaftliche Expansion und zum anderen für die Herstellung von Energie (Brennholz und Holzkohle) abgeholzt. Eine Ausbreitung der Anbauflächen wurde aufgrund der schlechten Effektivität, der Bodendegradierung sowie der steigenden Nachfrage nach Nahrungsmitteln, ausgelöst durch Bevölkerungszunahme, erforderlich. Mehr als 4 Mio. m³ Holz werden jedes Jahr zur Energiegewinnung verwendet, bereits 1990 deckten Brennholz und Holzkohle 85 % der Haushaltsenergie ab (CSE 2005).

Neben der Abholzung verändert der Mensch die Vegetation, indem er unter anderem Pflanzenschutz- und Düngemittel einsetzt, Leguminosen zur Stickstoffanreicherung auf den Feldern anpflanzt oder auch bestimmte Arten, wie zum Beispiel zur Gewinnung von Gummiarabikum (*Acacia senegal*, *Acacia seyal*) oder Holz, auf Plantagen anbaut. Viele Arten werden von den Einheimischen vielfältig genutzt. So dienen die Früchte von *Balanites aegyptiaca* und *Ziziphus mauritiana* als Nahrungsmittel sowie von *Combretum micranthum* zur Herstellung von Tee. Außerdem werden die Äste von den Einheimischen, den Peulh, allgemein als Nahrungsergänzung für die Tiere verwendet (DIOP et al. 2004). Einen Überblick der Nutzungsmöglichkeiten, für einige bedeutende Arten, gibt die folgende Tabelle.

Tab. 2: Verwendungszweck einiger Baumarten
(eigene Auswahl nach MAYDELL 1990)

Legende + Hauptnutzung o Nebennutzung - keine Nutzung . keine Information	Brennholz	Bauholz	Nahrung	Viehfutter	Medizin	Rohstoff	Schutzfunktion	Ästhetik	kulturell
Acacia senegal	+	o	o	+	o	+	+	-	.
Acacia seyal	+	+	o	+	o	o	o	o	-
Acacia tortilis	+	o	-	+	o	o	o	o	.
Adansonia digitata	-	o	+	+	+	o	o	+	+
Balanites aegyptiaca	+	+	+	+	o	o	-	o	o
Boscia senegalensis	o	o	+	o	o	-	-	-	-
Combretum glutinosum	+	+	o	.	+	o	-	-	-
Combretum micranthum	o	o	+	.	+	o	o	o	o
Guiera senegalensis	o	o	-	o	+	-	-	-	-
Pterocarpus lucens	+	o	o	o	o	-	-	-	-
Terminalia avicennioides	o	o	-	o	o	o	-	-	-
Ziziphus mauritiana	o	o	+	o	+	o	o	+	.

Bereits zur Kolonialzeit, ab den 1930er Jahren, wurden im Senegal insgesamt 213 Wälder unter Schutz gestellt, die zusammen eine Fläche von 1.055.700 ha aufweisen. In diesen Schutzgebieten ist es der Bevölkerung untersagt Ackerbau zu betreiben, außerdem gibt es in diesen Bereichen nur kleine Siedlungen. Dazu gehören die sylvo-pastoralen Reservate von Khogue, im Süden sowie von Barkedji-Dodji (s. Abb. 60), im Osten des Untersuchungsgebietes. Zusätzlich gibt es im Senegal sechs Nationalparks und sechs Tierreservate mit einer Gesamtfläche von 1.614.940 ha, was 8,2 % der Landesfläche Senegals entspricht (CSE 2010)

2.8 Landnutzung

Die sylvo-pastorale Zone ist durch eine agrarisch-pastorale Nutzung definiert, wobei der Pastoralismus die vorherrschende Nutzungsform darstellt (MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE 2008a). Dabei wird zwischen dem traditionell extensiv nomadischen/halbnomadischen und dem sesshaften Pastoralismus unterschieden. Der traditionell nomadische Pastoralismus ist sehr stark verbreitet und wird hauptsächlich von den Peulh (Fulbe) betrieben, die vor allem Rinder (Rasse: Zebu), Schafe und Ziegen halten (NDIAYE 2007). Während der Regenzeit führen die Peulh ihr Vieh auf die Weiden zwischen den Dörfern, in der Trockenzeit grast das Vieh überall, sogar auf den Feldern. Ist die Grasdecke weitestgehend abgestorben, so schneiden die Peulh Äste von Bäumen ab und füttern damit ihre Tiere, denn in den Blättern sind Eiweiße, Phosphor und Carotine enthalten (GONZALEZ 1997).

Vor der Errichtung der Forages zogen die Peulh in der Trockenzeit, nachdem das Nahrungsangebot aufgebraucht und das Trinkwasser in den kleinen Teichen/Senken bereits verdunstet war, weiter in Richtung Süden, in humidere Gebiete, wo mehr perennierendes Wasser zur Verfügung steht (HEIN 2006). Aufgrund der Forages (s. Kap. 2.6) konnte sich auch der sesshafte Pastoralismus entwickeln, der sich an einer halb-intensiven Landwirtschaft orientiert, wobei die Tiere vor allem mit Ernteresten, aber um sie zu mästen, ebenfalls mit Kraftfutter gefüttert werden (NDIAYE 2007). Diese Nutzungsform wird jedoch nur vereinzelt ausgeführt.

Der Viehbestand des Departement Linguères setzte sich 1999 aus 230.000 Rindern, 458.000 Schafen, 399.000 Ziegen, 15.600 Eseln sowie 9400 Pferden zusammen und umfasst somit insgesamt 1,11 Mio. Stück, was 5,5 Tieren je Einwohner (Jahr 2000) entspricht (NDOUR 2001). Eine gebräuchlichere Darstellung der Viehzahlen erfolgt in den Tropen durch Tropical Livestock Units (TLU), wobei 1 TLU für 250 kg Tiergewicht steht. In der Ferloregion zählt ein Rind ungefähr 0,73 TLU, während eine Ziege oder ein Schaf 0,12 TLU ausmachen. Aktuell liegen die Viehdichten in der Ferloregion zwischen 0,15 und 0,2 TLU/ha (HEIN 2006).

In der sylvo-pastoralen Zone gibt es insgesamt 150.000 ha Ackerland, wovon knapp 53.000 ha im Departement Linguère liegen, dies entspricht 4 % der Gesamtfläche (OECD 2008). Vorherrschende Anbauprodukte sind dabei Hirse *(Pennisetum typhoides)* und Erdnüsse (*Arachis hypogaea)* (s. Kap. 2.5). Vereinzelt werden auch Bohnen *(Vignasinensis)*, Sorghum *(Sorghum bicolor)* oder Mais *(Zea mays)* angebaut. Die prozentuale Verteilung der Anbauprodukte in dieser Zone, ist in der Abbildung 9 dargestellt.

Im Untersuchungsgebiet verteilen sich die Anbauflächen, vor allem im Westen auf die „ecoregions“ der nördlichen und südlichen sandigen pastoralen Zone. Laut STANCIOFF et al. 1986, sind rund 15 % des Untersuchungsgebietes als Ackerland ausgewiesen (s. Abb. 10). In der östlich gelegenen eisenhaltigen Lateritzone, gibt es aufgrund des niedrigen landwirtschaftlichen Potentials und der großen Tierreservate Ferlo-Nord (487.000 ha) und Ferlo-Süd (633.700 ha), nur wenige Anbauflächen (TAPPAN et al. 2004).

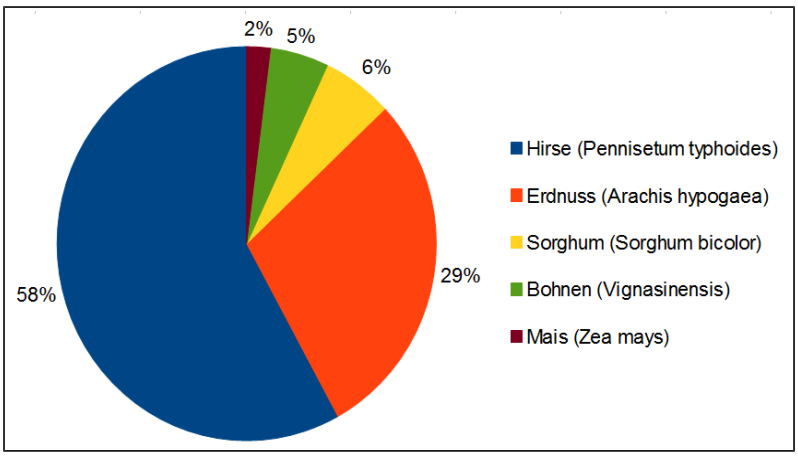


Abb. 9: Prozentuale Verteilung der Anbauprodukte im sylvo-pastoralen Raum
(eigene Darstellung nach MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE 2008b)

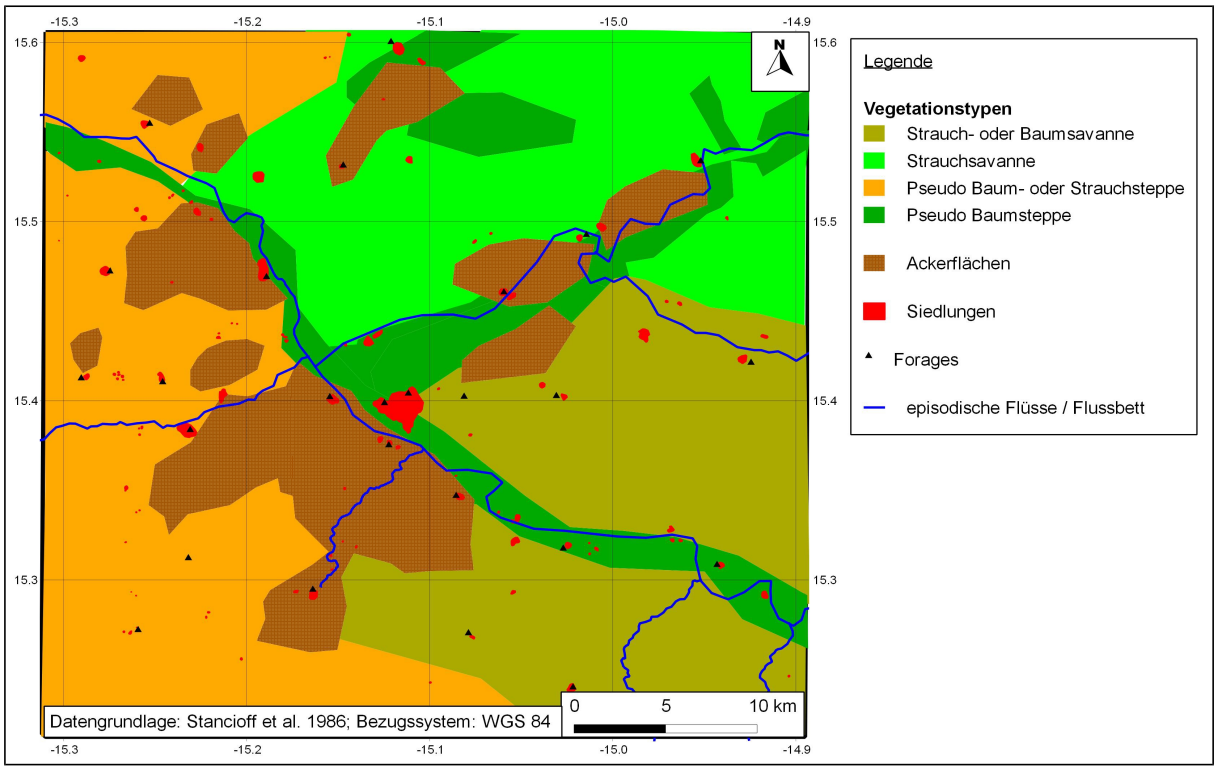


Abb. 10: Landnutzung und Vegetation des Untersuchungsgebietes
(eigene Darstellung verändert und ergänzt nach STANCIOFF et al. 1986)

Die Lateritzone wird vor allem von den Peulh als Weideland genutzt, die in diesem Gebiet wenige, oft nur temporäre, Siedlungen, zumeist in der Nähe der fossilen Flusstäler besitzen. Auf den kieshaltig lateritischen Plateaus in dieser Zone, ist aufgrund der geringen Infiltration und niedrigen Wasserspeicherkapazität der Böden, die Baumsterblichkeit besonders groß, sodass ganze Friedhöfe von Baumstümpfen, nach den Hauptdürren in den 1970er und 1980er Jahren entstanden. Wegen der Dürre und der Überweidung nahm die Fläche der

kahlen degradierten Böden der Lateritzone von 0,3 %, im Jahr 1965 auf 4,5 % 1999 zu. Insbesondere in der Nähe der Forages (HANAN et al. 1991) und entlang der fossilen Täler, führt der hohe Viehbestand zur Zerstörung der Vegetationsdecke und zur Bodenkompaktion (TAPPAN et al. 2004).

2.9 Bevölkerung

In den letzten Jahren hatte ganz Senegal einen rasanten Bevölkerungsanstieg zu verzeichnen. So stieg im Departement Linguère, die Bevölkerung von 102.800 Menschen 1976, auf knapp 200.000 im Jahr 2000 an. Das entspricht fast einer Einwohnerverdopplung innerhalb von 25 Jahren. Jedoch ist die Bevölkerung nicht gleichmäßig verteilt, denn die Bevölkerungsdichte (durchschnittlich 10 Einwohner/km²) nimmt vom Westen (Werte um die 40 Einwohner/km²) nach Osten ab (NDOUR 2001). Die im Osten gelegene „ecoregion“, die Lateritzone, die im Untersuchungsgebiet beginnt, weist mit weniger als 5 Einwohner/km², die niedrigste Bevölkerungsdichte Senegals auf (TAPPAN et al. 2004). Nicht nur die Bevölkerung stieg an, sondern es kam gleichzeitig zu einer Bevölkerungswanderung, von den ländlichen, in die städtischen Räume, da die Regierung hauptsächlich in die städtische Infrastruktur investierte. Lebten 1976 nur 34 % in städtischen Gebieten, so waren es 1988 bereits 39 % (GONZALEZ 1997) und 2010 mittlerweile 42,4 % (UNDS 2013).

Die Bevölkerung der sylvo-pastoralen Zone besteht hauptsächlich aus den zwei Ethnien der Peulh (engl. Fulbe) und der Wolof, ebenfalls sind die Mauren und Serer in diesem Gebiet verbreitet (DIOP et al. 2004). Ab dem 11. Jahrhundert haben sich die verschiedenen Ethnien aus Berbern und lokalen Afrikanern im Delta des Senegalflusses in Waalo ausgebildet. Schon seit dem Neolithikum (ab 7000 B.C.) wurde Senegal, in erster Linie entlang des Senegalflusses durch verschiedene Kulturen, unter anderem von Ägyptern besiedelt, die später erste Siedlungen errichteten sowie Ackerbau betrieben. Während sich die Peulh zunächst nördlich des Senegalflusses ansiedelten, expandierten die Wolof stark nach Süden, wo durch den Wolofkönig *Njajaan Njaaz* 1350 das Königreich *Jolof* ausgerufen wurde.

Das Königreich reichte vom Atlantischen Ozean, bis zum Peulh Königreich *Tekrur* im Westen und vom Senegalfluss im Norden, bis zum Gambiafluss im Süden und hatte Linguère als Hauptstadt. Das große Königreich wurde später in fünf kleinere aufgeteilt, wobei das letzte, (*Jolof*) (später mit der Hauptstadt Yang Yang) bis 1890 bestand, als es von französischen Kolonisten erobert wurde. Die Zeit ab 1443 ist durch die Besetzung europäischer Großmächte mit einem Sklavenhandel, der bis 1946 andauerte, gekennzeichnet, der soweit

führte, dass sogar die Wolof und Peulh ihre eigenen Sklaven nahmen. Am 4. April 1960 wurden Mali und Senegal von Französich-Westafrika unabhängige Staaten (GONZALEZ 1997).

Mit 43 % der Gesamtbevölkerung Senegals, haben die Wolof den höchsten Anteil zu verzeichnen. Sie leben, historisch bedingt, vor allem auf dem Land, aber auch in den Städten zwischen den Flüssen Senegal und Gambia, zeichnen sich durch ein streng organisiertes Kastensystem aus. Die Wolof sind auf dem Land Farmer, besitzen meist auch ein wenig Kleinvieh, wie Ziegen und Schafe zur Milcherzeugung sowie Hühner als Nahrungsmittel. Es gibt auch Familien mit langer Viehhaltungstradition. Dann überlassen die Wolof ihr Vieh den Peulh, die das Vieh gegen Bezahlung auf den Weiden hüten.

Die Wolof leben in Dörfern (200 bis 400 Personen), die aus mehreren 1 bis 3 km entfernten Siedlungen bestehen können. Den Mittelpunkt einer größeren Siedlung, bildet ein großer offener Platz vor einer Moschee (90 % der Wolof sind Muslime). Traditionell bestehen die 3 bis 4,5 m² großen Hütten aus *Andropogon gayanus*, einem perennierenden Gras, wobei das Dach alle fünf bis sieben Jahre erneuert werden muss. In der Nähe der Dörfer befinden sich die meisten Felder (1 bis 3 km), die zum Schutz vor Tierfraß zumeist mit dornigen Hecken aus Zweigen von *Balanites aegyptiaca* und diversen *Acacia spec.* umgeben sind. Daran schließt sich das Weideland an. Oft wurden die Siedlungen dort gegründet, wo *„Diors“* als günstige Ackerböden in der Nähe sind (NDIAYE 2007). Normalerweise wird der älteste männliche Bewohner einer Siedlung zum Dorfanführer ernannt, der das Dorf repräsentiert und für die Unterbringung von Gästen zuständig ist (GONZALEZ 1997).

Die Peulh, die in erster Linie extensive Weidewirtschaft betreiben und ihr Vieh dann verkaufen, bilden die zweite große Ethnie im Senegal, mit knapp 24 % der Gesamtbevölkerung. Sie sind insbesondere im sylvo-pastoralen Raum (85 % der Bevölkerung) (SY 2010) sehr weit verbreitet. Zum einen leben sie in Feldlagern und ziehen alle paar Jahren weiter, zum anderen gibt es auch permanente Peulhdörfer, oft neben Wolofdörfern, da sie sich um das Vieh der Wolof kümmern. Neben ihren Hütten existieren zerstreute Gehege von 100 bis 200 m² Größe, in denen das Vieh in der Nacht verweilt. Tagsüber wird es auf Weideland gehütet und meist um die Mittagszeit zu den Tränken, den Forages, geführt. Die Peulh bauen auch Feldfrüchte an, die meiste Zeit des Jahres verbringen sie jedoch mit dem Hüten ihrer Viehherden (GONZALEZ 1997; SANTOIR 1983).

Neben den Peulh betreiben auch die Mauren in der sylvo-pastoralen Zone, nomadischen Pastoralismus, die in der Trockenzeit aus Mauretanien kommen und ihre Dromedare sowie Rinder grasen lassen. Vor allem die Dromedare brauchen viel Nahrung sowie Wasser und richten auf ihren Routen große Schäden an der Vegetation an (SY 2010).

3. Methodik

Die Datenerhebung gliedert sich in drei Teilbereiche: Feld-, Labor- sowie GIS- und Fernerkundungsmethoden, wobei die Daten anschießend durch statistische Methoden ausgewertet wurden. Dabei ist die Vorgangsweise in der folgenden Abbildung dargestellt.

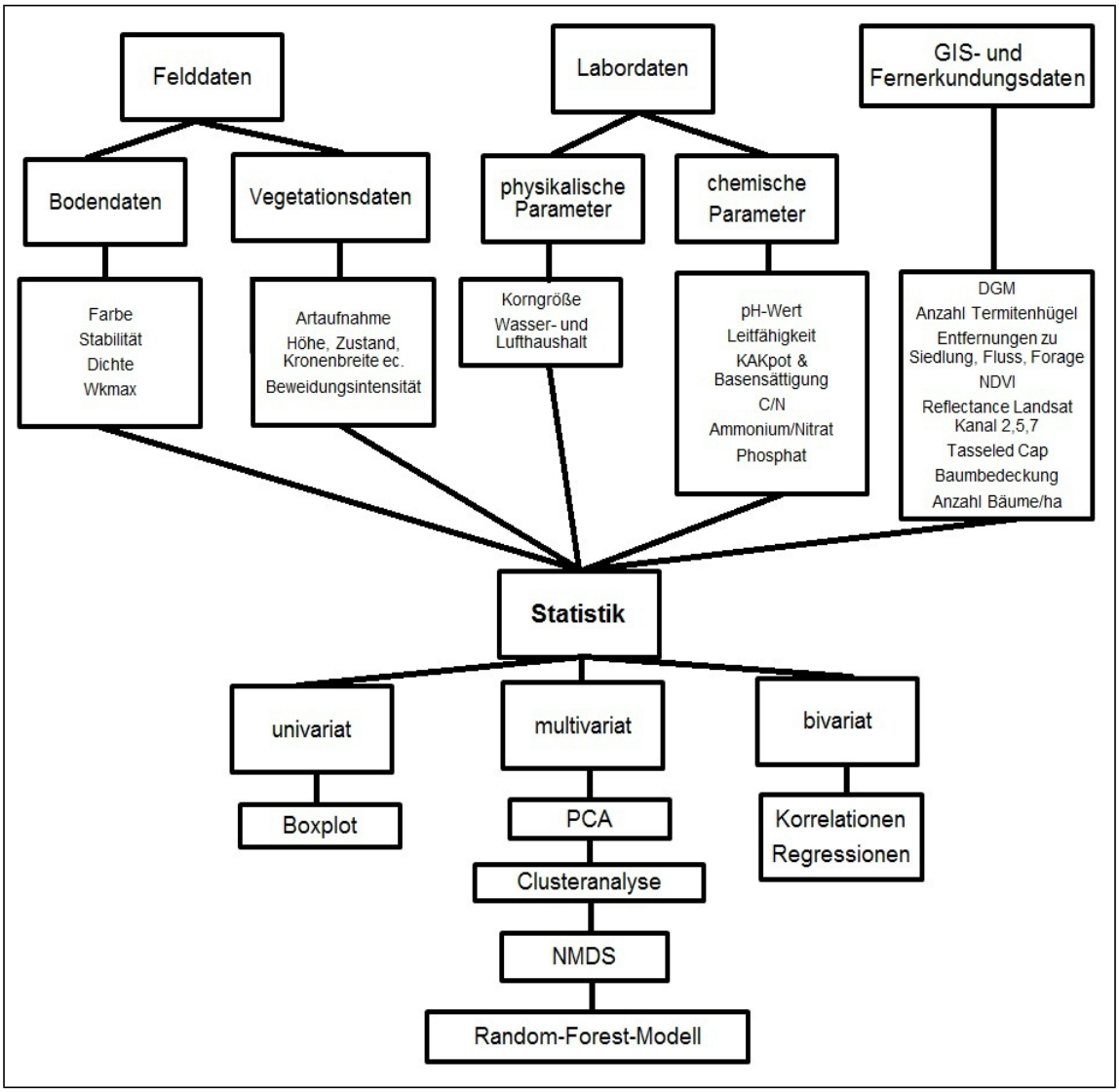


Abb. 11: Fließschema der Methodik

3.1 Feldmethoden

3.1.1 Auswahl der Probenstandorte

Mit Hilfe von Satellitenbildern und daraus berechneten Indices, wie der NDVI (s. Kap. 3.3.6), wurde bereits vor dem Geländeaufenthalt, eine Auswahl von interessanten Standorten getroffen (s. Kap. 3.3.1). Neben diesen Standorten, wurde bei der Auswahl der Probenstandorte, auch die pedomorphologische Karte von STANCIOFF et al. 1986, die darauf basierende Einteilung von TAPPAN et al. 2004, nach „ecoregions“ sowie die SOTER Bodenklassifikation berücksichtigt. Durch die Probennahme sollten die unterschiedlichen pedomorphologischen Zonen, „ecoregions“ und auch Bodentypen abgedeckt werden. Insgesamt wurden die Standorte so gewählt, dass diese im kompletten Untersuchungsgebiet gut verteilt liegen, damit es möglich wird, pedogene Punktinformationen auf die Fläche zu interpolieren/übertragen (SAMIMI 2003). Nach diesen Gesichtspunkten wurden die entsprechenden Gebiete angefahren und untersucht. Erwies sich ein Gebiet als geeignet, so wurde nach einem repräsentativen Bereich für die Boden- und Vegetationsaufnahmen gesucht. Dabei wurde auf folgende Kriterien geachtet:

- großflächige Homogenität bezüglich Boden und Vegetation
- keine Extremstandorte
- nicht zu nah an Hauptsiedlungen (Müllproblem) und Hauptstraßen
- gleichbleibende Aufnahmesituation wie Hangneigung, Exposition, Höhe
- Vermeidung von Flächen mit starkem anthropogenem Einfluss

Aufgrund von Aufforstungen und Baumplantagen (s. Kap. 2.7), wurden große Bereiche westlich Linguères nicht berücksichtigt, bezüglich Straßenbauarbeiten und der damit verbundenen Beeinflussung des Bodens, wurden entlang der Nordwest-Südost verlaufenden Hauptstraße keine Standorte untersucht.

3.1.2 Probennahme

Die Probennahmen fanden während des sechswöchigen Geländeaufenthaltes, von Mitte Februar bis Ende März in der Trockenzeit statt. Pro Standort (rund 2 ha) wurden jeweils eine gestörte und eine ungestörte Bodenprobe entnommen. Die gestörte Bodenprobe resultiert aus einer Mischprobe von mindestens zehn gut verteilten Einstichen, wobei die oberen 15 cm bei Weideland und 20 cm bei Ackerland bei der Probennahme berücksichtigt wurden, denn dieser obere Abschnitt der Pedosphäre bildet den Hauptwurzelraum und ist bezüglich

der Fragestellung von größter Bedeutung. Bei den einzelnen Einstichen wurde darauf geachtet, dass diese repräsentativ für deren Umgebung sind und keinen Extremstandort wiederspiegeln. Der Bodenaushub der einzelnen Einstiche wurde in einem Eimer gesammelt, durchmischt und anschließend ein repräsentativer Teil in beschriftete Gefrierbeutel doppelt luftdicht verpackt und zum Basislager nach Linguère transportiert. Neben der gestörten Mischprobe wurde zusätzlich eine ungestörte Bodenprobe, mit Hilfe eines 100 cm³ Stechzylinders entnommen, denn anhand ungestörter Proben, können Bodenparameter wie Dichte oder der volumenbezogene Wassergehalt bestimmt werden (BLUME et al. 2011). Bei der ungestörten Probennahme wurde zunächst eine für den kompletten Standort repräsentative Stelle gewählt, wohlwissend dass durch die einmalige Entnahme eine hohe Unsicherheit besteht. An dieser Stelle wurde der lockere Oberboden entfernt, anschließend der komplette Stechzylinder, senkrecht in den Boden geklopft und bei der Entnahme darauf geachtet, dass dieser vollständig mit Bodenmaterial aufgefüllt ist. Die ungestörten Bodenproben wurden ebenfalls in Gefrierbeutel luftdicht verschlossen und verlustfrei ins Basislager transportiert, wo weitere Versuche durchgeführt wurden.

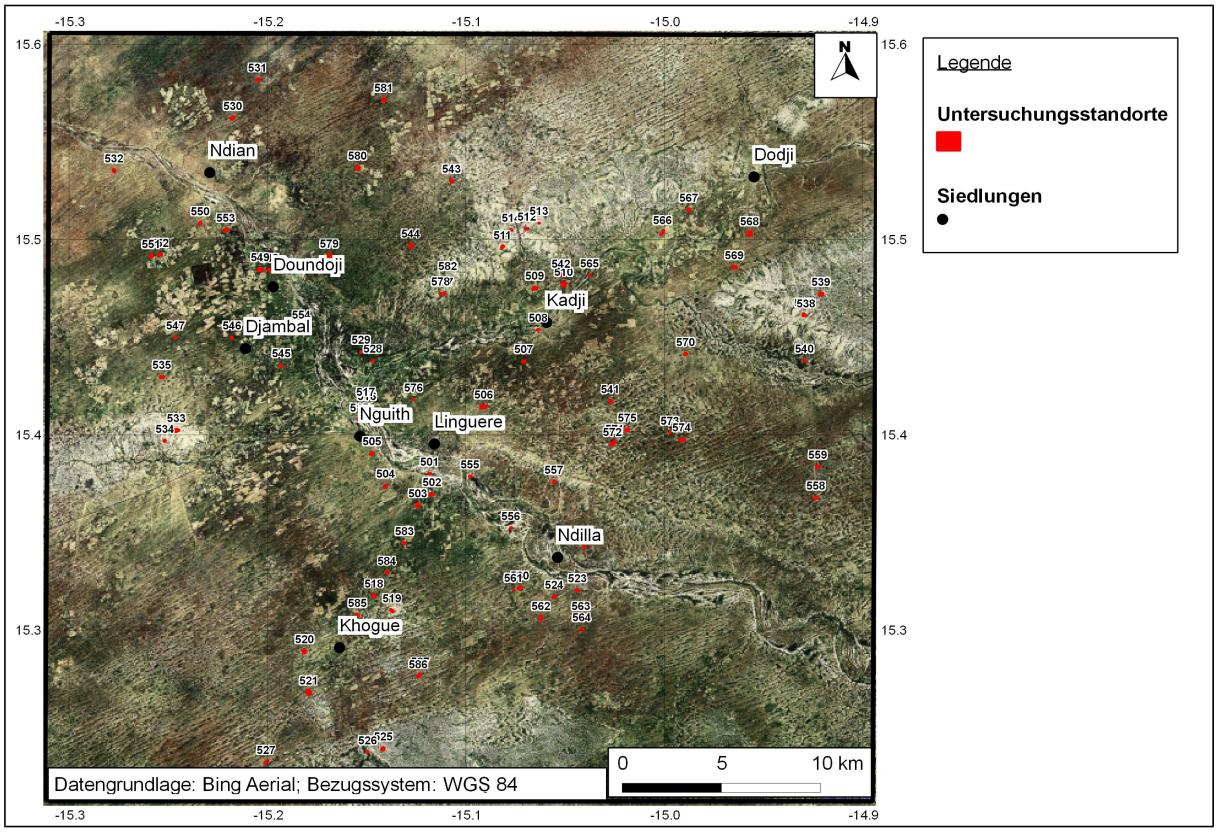


Abb. 12: Verteilung der Untersuchungsstandorte

Insgesamt wurden 84 Standorte untersucht, die sich allesamt in einem 20 km Radius um Linguère konzentrieren. Somit besitzt das Untersuchungsgebiet insgesamt eine Ausdehnung von knapp 45 X 45 km und weist eine Fläche von 1250 km² auf. Die Abbildung 12 gibt einen Überblick über die Verteilung der untersuchten Standorte.

3.1.3 Analysen im Gelände

3.1.3.1 Bodenanalysen

Zusätzlich zur eigentlichen Bodenprobennahme (s. Kap. 3.1.2), wurden im Gelände auch andere bodenspezifische Analysen durchgeführt, mit dem Vorteil, dass der Boden dabei in einem ungestörten Zustand vorliegt und die natürlichen Verhältnisse wiedergespiegelt werden. Zum einen wurde für jeden Standort die Mächtigkeit des lockeren Oberbodens gemessen, der während der Trockenzeit äolisch transportiert wird. Hohe Mächtigkeiten des lockeren Oberbodens sind ein Indiz für geringe Bodenfestigkeit oder für Akkumulationsgebiete, während fester Oberboden auf starke Bodenfestigkeit und Degradierung schließen lässt. Zum anderen wurde mit Hilfe eines Pocket-Penetrometers von *ELE International* die Bodenstabilität gemessen, ein Maß dafür, wie stark der Boden am entsprechenden Standort verhärtet ist. Die Verhärtung kann von Degradierungserscheinungen oder verstärktem Viehtritt verursacht werden. Für die Messung wurde zunächst der lockere Oberboden entfernt, um dann anschließend mit ansteigendem Kraftaufwand das Penetrometer senkrecht in den Oberboden zu drücken, so lange bis ein Abdruck im Boden zu erkennen ist beziehungsweise wenn dieser aufreißt. Diese Messung wurde an jedem Standort an unterschiedlichen Stellen durchgeführt, wobei letztendlich der am häufigsten auftretende Wert als repräsentativ angenommen wurde.

3.1.3.2 Vegetationsanalysen

Neben den bodenspezifischen Analysen wurden im Gelände, an den entsprechenden Standorten, auch Vegetationsaufnahmen unternommen, die vollständig von Martin Brandt durchgeführt und deren Daten im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden. Dazu wurden alle Arten innerhalb von rund 100 m, links und rechts, entlang eines zufällig ausgewählten 200 m langen Transektes, in Anlehnung an HERRICK et al. 2005a aufgenommen, wobei jeweils der Start- und Endpunkt per GPS-Gerät markiert wurde. Als Transektstartpunkt wurden bevorzugt große Bäume verwendet, damit diese auf Satellitenbildaufnahmen eindeutig zugeordnet werden können. Wenn es die Vegetation, aufgrund von Verbuschung nicht zuließ, einen Transekt zu bilden, so wurden alle Arten um einen Startpunkt herum aufgenommen. Die Artbestimmung erfolgte nach MAYDELL 1990 sowie mit Hilfe eines lokalen Wolof-Führers. Außer der eigentlichen Artbestimmung wurden bei jeder Art zusätzlich der Umfang und die Höhe in m gemessen. Dabei wurden Arten > 4 m, zu den Bäumen und

< 4 m, zu den Sträuchern gezählt (TAPPAN et al. 2004). Bei den Bäumen wurde zusätzlich die Kronenbreite, Länge und Blattbedeckung abgeschätzt und außerdem die Nutzung (entspricht Verbiss), in einer Ordinalskala von 0 (keine) bis 5 (starke Nutzung) sowie der Zustand von 1 (gut) bis 5 (schlecht) ermittelt (BRANDT et al. 2013b).

3.1.3.3 Beweidungsintensität

Als zusätzliche Parameter wurden je Standort, die Kotbedeckung und die Trittspuren in einer Ordinalskala von 0 (entspricht kein Kot, keine Trittspuren) bis 5 (bedeutet sehr viel Kot und Spuren) abgeschätzt (BRANDT et al. 2013b). Zusammen mit dem am häufigsten vorkommenden Wert des Verbisses (Nutzung) der Sträucher (alle Arten mit einer Höhe bis 4 m), aus den Vegetationsaufnahmen, wurde die neue Variable Beweidungsintensität berechnet, indem für jeden Standort die drei einzelnen Werte addiert wurden (BIMÜLLER 2009). Daraus wurden fünf gleichgroße Klassen, mit den Bezeichnungen extrem stark, stark, mittel, wenig und extrem wenig (s. Tab. 23), für die Beweidungsintensität abgeleitet.

3.1.3.4 Interviews mit Einheimischen

Neben den Boden- und Vegetationsanalysen im Feld, wurden vor Ort auch Interviews mit der einheimischen Bevölkerung, den Wolof oder Peulh durchgeführt. Dazu wurde in den Siedlungen meist der Dorfälteste aufgesucht, der Fragen bezüglich Vegetationsdichteveränderung, Artzusammensetzung, Nutzung von Bäumen, Dürrejahren, Auftreten von Feuern, Bodenfruchtbarkeit oder Bodentypen beantwortete. Bei den Interviews wurde darauf geachtet, dass bestimmte Aussagen mehrmals vorkamen, sodass diese repräsentativ sind.

3.1.4 Analysen im Basislager Linguère

Nachfolgende Versuche konnten aus logistischen Zwecken nicht direkt im Gelände durchgeführt werden. Stattdessen erfolgte die Bestimmung, am Abend jedes Probennahmetages, in Linguère. Nach den Analysen wurden für weitere Versuche, im Physiogeographischen Labor der Universität Wien, ungefähr 150 g der einzelnen Proben luftdicht in Gefrierbeutel verpackt.

3.1.4.1 Bodenfarbe

Von den Bodenproben wurde die Bodenfarbe, mit Hilfe der *„Munsell Soil Color Charts“* bestimmt. Diese Analyse wurde doppelt, zum einen mit der trockenen und zum anderen mit der bis auf WkMax (maximale Wasserkapazität) angefeuchteten Bodenprobe durchgeführt. Diese Doppelbestimmung ist zweckmäßig, wenn es sich um sehr trockene Böden handelt und die beiden Werte stark voneinander abweichen (AD-HOC-AG BODEN 2005). Bei der

Farbbestimmung wurde darauf geachtet, dass diese stets am selben Ort, zur gleichen Zeit erledigt wurde, um mögliche Fehlerquellen, die aus unterschiedlichen Lichtverhältnissen resultieren, so gering wie möglich zu halten. Die entsprechenden Bodenproben wurden mit den Farben der *„Munsell Soil Color Charts“* verglichen, zuerst bezüglich der Farbe (Hue), dann Helligkeit/Grauwert (Value) und letztendlich der Intensität (Chroma), sodass sich zum Beispiel folgender Farbschlüssel ergibt: 10 YR 3/4 (AD-HOC-AG BODEN 2005).

3.1.4.2 Wassergehalts- und Dichtebestimmungen

Die ungestörten Stechzylinderproben wurden zunächst gewogen (Waage mit Genauigkeit von 0,1 g). Aus dem Gewicht und dem Volumen von 100 cm³, konnte mit der Formel (1) die Dichte derProben berechnet werden.

(1) $p_t = \frac{m}{V}$ *p_t = Trockenrohdiche [g/cm³], m = Masse [g], V = Volumen* [cm³]

In diesem Fall wurde die ermittelte Dichte mit der Trockenrohdichte, die bei der 105 °C (atro) getrockneten Bodenprobe ermittelt wird, gleichgesetzt. Denn die Probennahme fand rund vier Monate nach dem letzten Niederschlagsereignis statt, sodass die Proben nur einen sehr geringen zu vernachlässigbaren Wassergehalt besitzen. Da es sich um Mineralböden handelt, kann aus der Trockenrohdichte mit Hilfe der Formel (2), die effektive Lagerungsdichte bestimmt werden (AD-HOC-AG BODEN 2005).

(2) $Ld = p_t + 0{,}009 \times T$ *Ld = Lagerungsdichte [g/cm³], p_t = Trockenrohdichte [g/cm³], T = Tongehalt [%]*

Als zusätzlicher Parameter wurde die WkMax bestimmt, indem die Stechzylinder rund 12 h mit Wasser gesättigt wurden, um sie anschließend abzuwiegen. Daraus kann mit der Formel (3), die maximale Wasserkapazität bestimmt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass die vollständige Wassersättigung bei tonhaltigen Proben normalerweise mehrere Tage dauert, sodass die entsprechenden Werte bei dieser Analyse deutlich geringer sind.

(3) $WkMax = \frac{m_n - m_t}{m_t} \times 100$

WkMax = maximale Wasserkapazität [%],
m_t = Masse der trockenen Probe [g],
m_n = Masse der bis zur WkMax angefeuchteten Probe [g]

3.1.4.3 Bodenstabilität

Die Bodenstabilität, wurde aus dem Stabilitätswert des Penetrometers, der Aggregatstabilität sowie dem Verfestigungsgrad zusammengesetzt. Dabei ist die Aggregatstabilität ein Maß für die Festigkeit der einzelnen Bodenaggregate zueinander (ÖNORM L 1072 2004), die nach HERRICK

et al. 2005a mittels Nasssiebung ermittelt wurde. Dazu wurde ein rund 1 cm³ großes Bodenaggregat auf ein Sieb gegeben, dann fünfmal mit gleichbleibender Geschwindigkeit in einem mit Wasser gefüllten Eimer eingetaucht. Anschließend wurde der Siebrückstand in [%], des ursprünglichen Volumens nach Tabelle 3 klassifiziert, wobei höhere Klassen für stabilere Aggregate stehen. Dieser Versuch wurde je Standort fünfmal ausgeführt, der Mittelwert aus den fünf Einzelmessungen, steht für den repräsentativen Wert der Aggregatstabilität eines Standortes.

Tab. 3: Klasseneinteilung der Aggregatstabilität
(leicht verändert nach HERRICK et al. 2005a)

Klasse	
1	zerfällt schon bei der Entnahme
2	zerfällt vollständig während der 5 Siebzyklen
3	< 10 % Siebrückstand
4	10 – 25 % Siebrückstand
5	25 – 50 % Siebrückstand
6	50 – 75 % Siebrückstand
7	>75 % Siebrückstand

Als ein weiterer Parameter der Bodenstabilität, wurde der Verfestigungsgrad nach AD-HOC-AG BODEN 2005 ermittelt, wobei ein rund 10 cm³ großes Bodenaggregat aus 1 m Höhe, auf eine glatte Betonfläche gefallen ist. Aus der Anzahl der Zerfallsprodukte, wurde nach folgender Klasseneinteilung (s. Tab. 4), der Verfestigungsgrad abgeschätzt. Dieser Versuch wurde solange wiederholt, bis eine eindeutige Abschätzung des Verfestigungsgrades vorlag.

Tab. 4: Klasseneinteilung des Verfestigungsgrades
(AD-HOC-AG BODEN 2005)

Klasse	Charakterisierung	
1 - Vf1	keine Entnahme von Aggregaten möglich	sehr lose
2 - Vf2	zerfällt beim Aufprall in zahlreiche Bruchstücke	lose
3 - Vf3	zerfällt beim Aufprall in wenige Bruchstücke	mittel
4 - Vf4	zerfällt kaum	fest

Die drei Variablen, Stabilitätswert vom Penetrometer, Aggregatstabilität und Verfestigungsgrad, wurden insgesamt zu der Bodenstabilität zusammengefasst und in drei gleichgroße Klassen, hoch (7-8 Punkte), mittel (5-6) und gering (3-4) (s. Tab. 5) eingeteilt. In den weiteren Ausführungen werden nur die neuen Bodenstabilitätswerte berücksichtigt.

Tab. 5: Berechnung der Bodenstabilität

Messwerte der Einzelergebnisse			Punktevergabe
Aggregatstabilität	Penetrometer	Verfestigungsgrad	
7,6	>5	Vf4	je 3
5,4	4-5	Vf3	je 2
3,2	<4	Vf2	je 1

3.2 Labormethoden

3.2.1 Allgemeines und Probenvorbereitung

Im Physiogeographischen Labor der Universität Wien wurden die Proben zunächst alle einheitlich auf lutro (40 °C) getrocknet. Anschließend wurde die Kiesfraktion (> 2 mm) abgetrennt und bestimmt, da für alle Bestimmungen stets Feinerde (< 2 mm) benötigt wird.

Für alle photometrischen Bestimmungen, wurde als Extraktionsmittel 0,0125 mol $CaCl_2$ (nach ÖNORM L 1092 2005) verwendet, da dieses den Bodenwasserhaushalt am besten wiederspiegelt, die Analysen mit wenig Arbeitsaufwand und kostengünstig durchführbar sind. Der normalerweise für tropische Böden typische Einsatz von Wasser, als Extraktionsmittel, wurde ebenfalls überprüft, erwies sich aber als ungeeignet, da das Eluat selbst nach mehrmaligem Zentrifugieren und Filtrieren noch immer eine Trübung besaß, sodass keine photometrische Messung stattfinden konnte. Zur Herstellung der Eluate wurden 10 g Feinboden mit 100 ml Extraktionslösung versetzt, 1 h geschüttelt und anschließend durch Faltenfilter filtriert, wobei das erste Filtrat verworfen wurde. Bis zur eigentlichen Analyse wurden die Eluate dann im Kühlschrank gelagert. Mit Hilfe der Nitrat- und Ammonium-Schnelltests von *MACHERY-NAGEL,* wurden zuvor die Extraktionsverhältnisse 1 : 4 (ÖNORM L 1092 2005) und 1 : 10 (LANDON 1991) getestet, wobei letzteres aufgrund des geringen Probenmaterial geeigneter war. In Vorbereitung der photometrischen Bestimmungen, wurde zunächst jeweils eine Eichkurve aus mindestens fünf Standards, im linearen Messbereich, erstellt. Dabei wurde auf einen hohen Kalibrierungskoeffizienten geachtet. Die photometrischen Bestimmungen, wurden mit dem *PERKIN ELMER UV/VIS Spectrometer Lambda 2* durchgeführt.

3.2.2 Korngröße

Die Korngröße gilt als eine der wichtigsten, grundsätzlichen, physikalischen Bodeneigenschaften, aus denen viele andere Parameter, wie Luft- oder Wasserhaushalt abgeleitet werden (BLUME et al. 2010). Im Zuge der Probenvorbereitung (s. Kap. 3.2.1) wurde bereits die Kiesfraktion abgetrennt. Die weitere Einteilung in die Korngrößen Sand, Schluff und Ton, erfolgte aus einem kombinierten Verfahren, aus Trockensiebung der Sandfraktion und Röntgenstrahlung der Schluff- und Tonfraktion, mit Hilfe des *Sedigraphen III TM 5120,* der Firma *Micromeritics.* Für die Korngrößenklassen wurde die international gebräuchliche Einteilung gewählt, die in der Tabelle 6 dargestellt ist.

Tab. 6: Einteilung der Korngrößen
(AD-HOC-AG BODEN 2005)

Name		Bezeichnung	Bereich in mm
Grobboden		GB	>2
Feinboden		FB	<2
Kies		G	>2
Sand		S	0,063 - 2
	Grobsand	gS	0,63 - 2
	Mittelsand	mS	0,2 - 0,63
	Feinsand	fS	0,063 - 0,2
Schluff		U	0,0063 - 0,2
	Grobschluff	gU	0,02 - 0,063
	Mittelschluff	mS	0,0063 - 0,02
	Feinschluff	fS	0,002 - 0,0063
Ton		T	< 0,002

Zunächst wurden 50 g Feinerde, mit 100 ml destilliertem Wasser versetzt und zur Lösung der Bodenaggregate 6 h lang geschüttelt. Auf eine Humuszerstörung mit Wasserstoffperoxid kann verzichtet werden, da es sich in diesem Fall um humusfreie Proben handelt. Die geschüttelten Proben, wurden durch das 0,063 mm große Sieb, mittels Gummiwischer und destilliertem Wasser gewaschen, wobei die Suspension, die den Schluff und Tonanteil enthält, per Becherglas aufgefangen und im Trockenschrank verdampft wurde. Der Siebrückstand wurde getrocknet und mittels Trockensiebung in die einzelnen Sandfraktionen unterteilt. Die eingedampften Proben wurden mit 0,1 % $Na_4P_2O_7$, der Basislösung, mit der der Sedigraph arbeitet, versetzt und mittels Röntgenstrahlung durch Bestimmung der Sedimentationsgeschwindigkeit, nach dem Stok'schen Gesetz analysiert. Um Fehlerquellen zu minimieren, wurde eine Dreifachbestimmung, des Schluff- und Tongehaltes, mit anschließender Mittelwertberechnung durchgeführt. Anhand der prozentualen Masseanteile der einzelnen Fraktionen, erfolgten verschiedene Klassifikationen in Bodentypen.

3.2.3 Wasser- und Lufthaushalt

Der Wasser- und damit verbunden auch der Lufthaushalt, sind für die Bodenqualiätsuntersuchungen wichtige Parameter. Da die Probennahme im Februar/März und damit rund vier Monate nach dem Ende der letzten Regenzeit stattfand, kann davon ausgegangen werden, dass die Wassergehalte generell sehr gering sind.

Der Boden setzt sich aus einer festen Matrix sowie einem Porensystem zusammen, welches insbesondere von der Korngrößenverteilung abhängt. In den Poren treten verschiedene Kräfte wie die Adsorptions- und Kapillarkräfte auf, die mit abnehmender Porengröße zunehmen, denn das Bodenwasser ist nur in den Grobporen des Bodens frei beweglich. Denn in den Mittel- und Feinporen überwiegen bereits Bindungskräfte, zum einen zwischen den Wassermolekülen selbst (Kohäsion) und zum anderen zwischen den Wassermolekülen sowie der Bodenmatrix (Adhäsion). Diese Kräfte entsprechen dem negativen Druck der Saug- beziehungsweise Wasserspannung und werden in [hPa] angegeben. Die Darstellung erfolgt gewöhnlich in pF-Kurven, wobei die einzelnen Werte den dekadischen Logarithmus dieser Saugspannung darstellen (AD-HOC-AG BODEN 2005).

Einige bodenphysikalische Parameter des Wasser- und Lufthaushaltes basieren auf diesen Wasserspannungskurven. Dazu zählen die Luft- und Feldkapazität, das Totwasser oder das Grobporenvolumen, die mit Hilfe der Feinbodenart und der berechneten Trockenrohdichte ermittelt wurden (AD-HOC-AG BODEN 2005). Dabei ist die Luftkapazität (LK) definiert als Porenraum in [% Volumen] > 50 µm, der bei pF < 1,8 mit Luft gefüllt und somit für die Sauerstoffversorgung, der Pflanzenwurzeln verantwortlich ist. Die Feldkapazität (FK) gibt die Menge des Bodenwassers in [% Volumen] an, die in Poren < 50 µm oder bei einer Saugspannung von pF > 1,8 gebunden ist. Bis zu einer Saugspannung von pF = 4,2 ist dieses Bodenwasser für die Pflanzenwurzeln aufnehmbar, weshalb dieser Bereich zwischen 1,8 < pF < 4,2, auch als nutzbare Feldkapazität (nFK) bezeichnet wird. Der Wasseranteil über pF > 4,2 (entspricht den Feinporen < 0,2 µm) stellt Totwasser (TW) dar, da der Druck so hoch ist, dass die Pflanzen das Wasser nicht mehr aufnehmen können und welken. Aus diesem Grund wird der Punkt pF = 4,2 auch permanenter Welkepunkt (PWP) genannt. Das Gesamtporenvolumen (GPV) setzt sich aus der Luft- und Feldkapazität zusammen (AD-HOC-AG BODEN 2005).

3.2.4 pH-Wert

Der pH-Wert ist definiert, als der negative dekadische Logarithmus der Aktivität der H_3O^+-Ionen (AD-HOC-AG BODEN 2005) und bestimmt die Nährstoffverfügbarkeit sowie die Mobilität von toxischen Schwermetallen im Boden (BLUME et al. 2011). Um eine Vergleichbarkeit mit anderen Arbeiten tropischer Böden zu gewähren, erfolgte die Analyse mit destilliertem Wasser mit einem Extraktionsverhältnis von 1 : 2,5 (20 g Feinboden und 50 ml destilliertes Wasser). Mit Wasser als Extraktionsmittel wird die aktuelle, bei der Nutzung von $CaCl_2$ die potentielle, Acidität gemessen. Die mit destilliertem Wasser gemessenen pH-Werte, liegen ungefähr um 0,4 bis 0,7 pH-Einheiten (LANDON 1991), über die von $CaCl_2$. Die eigentliche Analyse beruhte auf der ÖNORM L 1083 2006, das heißt nach der Herstellung des Extraktionsverhältnisses, wurde die Probe 2 h auf der Schüttelapparatur geschüttelt, 30 min stehen gelassen und anschließend der pH-Wert mittels *inoLab pH 720,* von den *Wissenschaftlich-Technischen Werkstätten* gemessen. Vor dem Beginn einer Messreihe wurde die Elektrode geeicht, nach jeder Messung gründlich mit destilliertem Wasser gereinigt, um eine Verschleppung zu verhindern. Die Messungen wurden stets bei der gleichen Temperatur durchgeführt und haben eine Messgenauigkeit von 0,005 digit.

3.2.5 Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit ist ein Summenparameter, der die Anzahl aller gelösten Salze im Boden beschreibt, stellt den Kehrwert des in Ohm gemessenen spezifischen Widerstandes dar (AD-HOC-AG BODEN 2005). Da die Löslichkeit temperaturabhängig ist, erfolgte die Messung stets bei einer konstanten Temperatur von 25 °C, mit dem *Cond 315 i* und der *Leitfähigkeitsmeßzelle TetraCon® 325,* der Firma *Wissenschaftlich-Technische Werkstätten*. Für die Analyse wurden 10 g Feinboden mit 50 ml destilliertem Wasser (Eigenleitfähigkeit von 1,4 µs/cm) versetzt (Extraktionsverhältnis 1 : 5) und 1 h geschüttelt. Nach jeder Messung wurde die Messzelle gereinigt. Die Messung erfolgte in [µS/cm] mit einer Genauigkeit von ± 1 digit.

3.2.6 C/N Verhältnis

Das C/N-Verhältnis ist ein weiterer wichtiger Indikator für die Bodenfruchtbarkeit, an dem der pflanzenverfügbare Stickstoff, ein Hauptnährelement, im Boden abgeschätzt werden kann. Der Gesamtstickstoff des Bodens, entspricht nicht dem pflanzenverfügbaren Stickstoff, da Mikroorganismen Stickstoff schneller als Pflanzen aufnehmen und verarbeiten, aber dazu auch Kohlenstoff aus dem Boden benötigen. Das bedeutet, dass bei geringen Kohlenstoffgehalten das Mikroorganismenwachstum eingeschränkt wird und somit die Verfügbarkeit des Stickstoffes für die Pflanzen steigt (BLUME et al. 2010).

In Vorbereitung zur Analyse wurden die Proben zunächst sehr fein gemahlen, davon rund 100 mg mittels Feinwaage, auf einer Zinnfolie, eingewogen sowie mit rund 100 mg Wolframpulver vermengt und letztendlich zu einer Tablette zusammengepresst. Die Analyse dieser Tabletten erfolgte am *Elemental Analyzer VarioMacro* im Department für Umweltwissenschaften der Universität Wien, wobei mittels oxidativer Verbrennung bis 1200 °C die prozentualen Masseanteile von Stickstoff, Kohlenstoff, Schwefel und Wasserstoff bestimmt wurden.

Da die Böden carbonatfrei sind und es sich um Mineralproben handelt, kann der Kohlenstoffwert, der normalerweise aus organischem und anorganischem Kohlenstoff besteht, mit der organischen Substanz gleichgesetzt werden. Wird dieser Kohlenstoffwert mit dem Faktor 1,72 multipliziert, so stellt das eine Annäherung an den Humusgehalt der Probe dar (AD-HOC-AG BODEN 2005).

3.2.7 Ammonium und Nitrat

Der Stickstoff im Boden stammt hauptsächlich aus der Atmosphäre (N_2), wird von Mikroorganismen fixiert und als organischer Stickstoff in Aminogruppen ($-NH_2$) in Proteine eingebaut. Bei der Zersetzung der organischen Substanz, durch Mikroorganismen, werden Teile dieses organischen Stickstoffes, in den mineralischen Stickstoff, in der Form von Ammonium (NH_4^+), sowie durch Oxidation weiter in Nitrit (NO_2^-) und Nitrat (NO_3^-) umgewandelt. Dieser mineralische Stickstoff ist für Pflanzen verfügbar, wird von diesen sowie von Mikroorganismen aufgenommen und in organischen Stickstoff umgewandelt. Diese Abfolge von Reaktionen wird als Stickstoffkreislauf bezeichnet (ROWELL 1994).

Im Zuge der Mineralisierung wird der organische Stickstoff, mikrobiell zu Ammonium umgewandelt, welches photometrisch durch die Verfärbung, in Indophenolblau, bei 668 nm, im linearen Messbereich zwischen 0,01 bis 1 mg/l gemessen wurde. Zur Bestimmung wurden 10 ml Probenextrakt mit 1 ml Na-Salicylat/Na-Citrat-Lösung (enthält Nitroprussid) sowie 1 ml Natriumhydroxid-Lösung (enthält Di-Cl-Isocyansäure) versetzt.

Nitrat entsteht im Zuge dieses Stickstoffkreislaufes durch Nitrifikation, was die Oxidation von Ammonium, durch spezielle Bakterien zu Nitrit und später Nitrat beinhaltet. Der Nitratgehalt des Bodens wurde bestimmt, indem zunächst 5 ml des Probenextraktes (s. Kap. 3.2.1) mit 0,5 ml Na-Salicylat-Lösung, welches eine Gelbfärbung bewirkt, versetzt und anschließend eingedampft. Am nächsten Tag konnte der Nitratgehalt der Probe, nach der Zugabe von 1 ml konzentrierter Schwefelsäure und 7,5 ml NaK-Tartrat-Lösung, photometrisch bei einer Wellenlänge von 420 nm, im linearen Messbereich von 0,1 bis 20 mg/l bestimmt werden.

Um die prozentualen Anteile der Stickstoffverbindungen, Nitrat und Ammonium, am Gesamtstickstoff zu ermitteln, wurden die Stickstoffanteile unter Berücksichtigung des Molekulargewichtes der Verbindungen herausgerechnet, indem die Nitratwerte durch 4,42 und die Ammoniumwerte durch 1,3 dividiert und anschließend mit dem Gesamtstickstoff verglichen. Dazu war es notwendig den Gesamtstickstoff zunächst in [mg/kg] umzurechnen.

3.2.8 Phosphat

Phosphat wird in den Tropen oft als limitierender Faktor für das Pflanzenwachstum angesehen. Es gibt sehr viele verschiedene Messverfahren, mit unterschiedlichen Extraktionsmitteln, um den pflanzenverfügbaren Phosphatgehalt zu ermitteln (LANDON 1991). In dieser Arbeit wurde das Phosphat mittels der Ammoniumheptamolybdat-Methode bestimmt, die durch Zusatz von Ascorbinsäure und Schwefelsäure, zu einer Reduzierung der PO_4^{3-}Ionen, in der Bodenlösung und damit verbunden zu einer Verfärbung in Phosphormolybdänblau führt. Das Phosphat wurde bei einer Wellenlänge von 880 nm am Photometer gemessen (linearer Messbereich 0,01 bis 2 mg/l).

Alle photometrischen Messergebnisse wurden von [mg/l] in [mg/kg], mittels folgender Formel (4) umgerechnet.

$$(4) \quad c_{cor} = \frac{c \times V_p}{E}$$

c_{cor} = Konzentration [mg/kg], c = Konzentration [mg/l],
V_p = Extraktionsvolumen [l], E = Einwaage [g]

3.2.9 Kationenaustauschkapazität und Basensättigung

Die Kationenaustauskapazität, verbunden mit der Basensättigung stellen wesentliche Bodenfruchtbarkeitsparameter dar (LANDON 1991). Dabei ist die KAK in erster Linie von dem Ton- und Humusgehalt des Bodens abhängig, auch der pH-Wert spielt eine entscheidende Rolle, denn bei einem höheren pH-Wert, nimmt die Anzahl der variablen negativen Ladungen zu. Deswegen wird bei den Bestimmungsmethoden zwischen der effektiven (KAKeff), die die KAK, beim jeweiligen pH-Wert des Bodens beschreibt und der potentiellen Kationen-austauschkapazität (KAKpot), bei einem bestimmten pH-Wert, der meist zwischen 7 und 8 liegt und somit die maximale KAK darstellt, unterschieden (BLUME et al. 2010). Bei neutralen und alkalischen Böden entspricht die KAKeff in etwa der KAKpot, bei den im Untersuchungsgebiet erwarteten sauren Böden, ist die KAKeff jedoch geringer als die KAKpot (ÖNORM L 1086 2001).

In diesem Fall wurde die KAKpot, mit einer auf pH 8,2 gepufferten $BaCl_2$-Lösung, nach der ÖNORM L 1086 2001 ermittelt. Dazu wurden 5 g Feinerde (< 2 mm) je Probe eingewogen, mit 50 ml Extraktionslösung (0,1 mol $BaCl_2$) versetzt und mit Hilfe von Trithanolamin und 0,2 mol Salzsäure auf einen pH-Wert von 8,2 eingestellt. Dann wurden die Proben über Nacht stehen gelassen, am nächsten Tag 2 h geschüttelt und anschließend durch Faltenfilter in Polyfläschchen filtriert. Die Bestimmung von Calcium (Ca), Natrium (Na), Kalium (K), Magnesium (Mg), Eisen (Fe) und Aluminium (Al) im Filtrat, erfolgte am Massenspektrometer *PE Elan 6100 Sciex,* mittels Atomimmissionsspektroskopie, mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-AES), im Department für Umweltwissenschaften der Universität Wien. Anschließend wurden die Ergebnisse von [mg/l] in [$cmol_c kg^{-1}$], mit Hilfe der Formel (5) umgerechnet. Eisen kann zwar im Boden als Fe^{2+} und Fe^{3+} auftreten, jedoch wird aufgrund des Vorherrschens der dreiwertigen Form, in aeroben Böden, diese Eisenform angenommen (BLUME et al. 2010).

(5) $$cmol_c kg^{-1} = \frac{c}{M} \times z \times 100$$

$cmol_c kg^{-1}$ = ionenäquivalente Konzentration, c = Konzentration [mg/l], M = molare Masse [g/mol], z = Valenz

Die KAKpot berechnet sich dann aus der Summe der einzelnen austauschbaren Kationen, die Basensättigung ist der prozentuale Anteil der Summe, der basischen Ca^{2+}-, Mg^{2+}-, K^{+}-, Na^{+}-Ionen, an der KAKpot (BLUME et al. 2010).

3.3 GIS und Fernerkundungsmethoden

Die nachfolgenden Methoden wurden allesamt mit Open-Source-Programmen durchgeführt, wobei für die Fernerkundungsmethoden *GRASS* und für die GIS-Methoden, *Quantum-GIS* mit der einheitlichen Projektion Lat/Long und dem geodätischen Referenzsystem WGS 84 genutzt wurde.

3.3.1 Vorbereitung des Geländeaufenthaltes

Im Voraus wurden hochauflösende Satellitenbilder, vom Untersuchungsgebiet, aus unterschiedlichen Jahren verwendet, um großflächige Veränderungen bezüglich der Vegetation festzustellen. Das Datenmaterial lieferten zum einen panchromatische Corona-Aufnahmen, die in den 1960er Jahren von den Amerikanern zu Spionagezwecken eingesetzt wurden und hohe räumliche Auflösungen bis zu 2 m besitzen. Dabei stammen die Satellitenaufnahmen des Untersuchungsgebietes vom Dezember 1965. Zum anderen wurden aktuelle multispektrale RapidEye-Aufnahmen, vom Dezember 2010, mit einer

räumlichen Auflösung von 6,5 m verwendet. Zusätzlich wurden auch die kostenlosen Onlinemapsets von Google Earth und Bing Aerial benutzt. Mit Hilfe dieses Materials wurden markante Gebiete markiert, in denen aktuell deutlich mehr oder weniger Vegetation, gegenüber den Corona-Aufnahmen vorhanden ist. Diese markierten Flächen bildeten einen ersten Anhaltspunkt, bei der Geländearbeit und stellten interessante Gebiete dar. Aus den Flächen wurden repräsentative Punkte gewählt, die auf ein GPS-Gerät übertragen und im Gelände angefahren wurden (BRANDT et al. 2013a).

3.3.2 Analysen mit dem DGM

Im Gelände wurde die Höhe auch mit dem GPS-Gerät aufgenommen, doch erwiesen sich die Werte als sehr ungenau. Deswegen wurde als Höhenmodell das SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) mit einer räumlichen Auflösung von 90 m verwendet, wobei die Daten kostenlos, unter *http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/,* verfügbar sind. Das ASTER-Höhenmodell (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) hat mit 30 m eine deutlich bessere Auflösung, ist jedoch mit Fehlern behaftet, die sich in negativen Höhenangaben im Untersuchungsgebiet äußern. Das SRTM-Höhenmodell wurde mehrmals geglättet, um anschließend daraus für jeden Standort, die Hangneigung sowie die Exposition zu berechnen.

3.3.3 Bestimmung der Termitenhügeldichte

Termiten spielen eine sehr große Rolle in tropischen Böden (s. Kap. 1.2). Verlassene Termitenbauten werden im Laufe von Jahrzehnten und Jahrhunderten erodiert. Übrig bleiben kreisrunde vegetationsfreie degradierte Stellen (s. Abb. 13 (2)), die in den Satellitenbildern sehr gut als weiße Punkte (s. Abb. 13 (1)) sichtbar sind. Diese Punkte wurden anhand Google Earth oder Bing Aerial für jeden Standpunkt gezählt. Da die Aufnahmeflächen nahezu gleich groß sind (rund 2 ha), ist die Anzahl der verlassenen Termitenhügel, ein vergleichbarer Indikator zwischen den einzelnen Standorten.

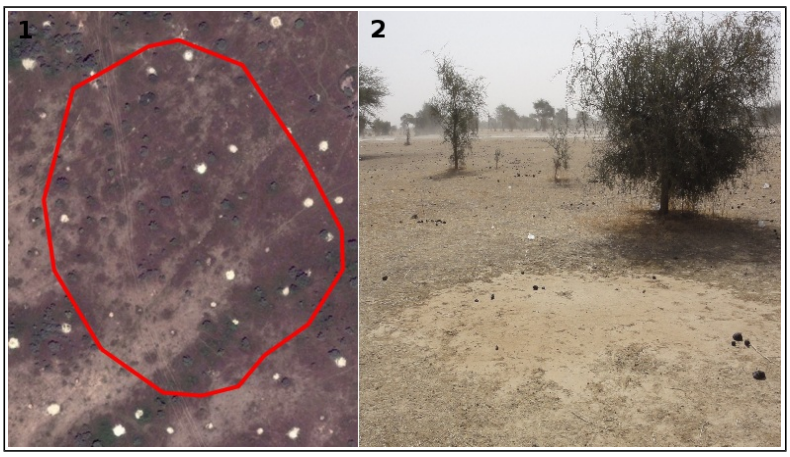


Abb. 13: Mit Hilfe von Satellitenbilern (1) sind Termitenhügel des Geländes (2) anhand weißer Punkte erkennbar
((1) Bing Aerial, (2) Aufnahme von Martin Brandt, Februar 2012)

3.3.4 Entfernungen zu Siedlung / Fluss / Forage

Als zusätzliche Umweltparameter, die die Bodeneigenschaften beeinflussen könnten, wurden von jeder Aufnahmefläche, die geringsten Entfernungen zur nächsten Siedlung, zum nächsten Flussbett und Forage ermittelt. Das wurde analog zu Kapitel 3.3.3, mit Hilfe der hochauflösenden Satellitenbildern von Google Earth und Bing Aerial durchgeführt, indem die einzelnen Objekte im Untersuchungsgebiet kartiert wurden, wobei das Ergebnis in der Abbildung 10 dargestellt ist. In der Nähe der Siedlungen und der Forages ist aufgrund verstärkten Viehtritts, mit erhöhter Bodenverdichtung und geringerer Vegetationsbedeckung zu rechnen, da die Peulh ihr Vieh täglich zu den Forages führen (s. Kap. 2.6). Bei den Siedlungen wurden allerdings nur diejenigen berücksichtigt, die permanent bewohnt werden und mehr als eine Hütte aufweisen. Anhand des Höhenmodells wurden die Flussbetten des Ferlo sowie der Nebenflüsse kartiert. In den Flussbetten gibt es eine andere Korngrößen- und Vegetationszusammensetzung und damit auch andere Bodentypen.

3.3.5 Vegetationsanalysen

Aus den im Gelände markierten Start- und Endpunkten, der einzelnen Aufnahmeflächen, wurden mit Hilfe der aufgenommen Vegetationsparameter, Untersuchungsflächen mit nahezu gleicher Größe gebildet. Da als Start- und Endpunkte der Transekte, im Gelände zumeist große Bäume gewählt wurden (s. Kap. 3.1.3.2), konnte eine eindeutige Wiedererkennung, anhand der hochauflösenden Satellitenbilder erfolgen. Mit Hilfe der Anzahl der aufgenommenen Arten je Standort, wurden die dominanten Spezies der Bäume und Sträucher ermittelt, wobei solche < 4 m Höhe, zu den Sträuchern und jene darüber zu

den Bäumen gezählt wurden (BRANDT et al. 2013b). Für die statistische Weiterverarbeitung, wurde das Auftreten der einzelnen Baumarten je Standort, nach Häufigkeit, durch Zahlen von 0 bis 3 codiert (s. Tab. 7).

Tab. 7: Codierung der Vegetationsdaten für die statistische Weiterverarbeitung

Anzahl des Artvorkommens	Codierung
0	0
1	1
2 bis 10	2
mehr als 10	3

Um die Standorte besser miteinander zu vergleichen, wurde die Baum- und Strauchanzahl je ha ermittelt. Dazu wurden in *Quantum-GIS,* jeweils drei Kästchen von exakt 1 ha zufällig auf die Standorte verteilt, in denen die Baum- und Strauchanzahl mit Hilfe der hochauflösenden Satellitendaten, der erhobenen Felddaten und Feldfotos gezählt wurde. Aus den Ergebnissen der drei Einzelflächen pro Standort, wurde der repräsentative Mittelwert berechnet. Neben der Baum- und Strauchanzahl pro ha, wurde außerdem die Baumbedeckung für jeden Standort in [%] berechnet. Dazu wurden alle Bäume und Sträucher, innerhalb des Standortpolygons in *GIMP,* schwarz mit einer Pinselstärke von 0,6, bei einem Maßstab von 1 : 1000, gezeichnet. Um die Daten zu verifizieren, wurden die im Feld gemessenen Daten des Kronendurchmessers und der Kronenbedeckung verwendet. Die Baumbedeckung in [%], entspricht dem schwarzen Anteil des Polygons, welcher aus dem Histogramm ersichtlich ist (BRANDT et al. 2013b).

3.3.6 Fernerkundungsdaten

Neben den hochauflösenden Satellitenbildern wie RapidEye, Google Earth, Bing Aerial oder Corona, wurden auch Landsatbilder aus mehreren Jahren, jeweils vom selben Aufnahmemonat, Februar, für weitere Analysen verwendet. Im Einzelnen sind das die Landsatbilder vom 22.02.2002, 13.02.2003, 28.02.2007 und 20.02.2010, die alle eine räumliche Auflösung von 30 m haben und kostenlos beim *USGS Earth Explorer (http://landsat.usgs.gov/)* der NASA zur Verfügung stehen.

Die Landsatsatelliten arbeiten mit optoelektronischen Sensoren, deren einzelne Kanäle Reflexionen, im Spektralbereich des sichtbaren Lichtes sowie des nahen und mittleren Infrarots messen, wobei die empfangene Energie in elektrische Signale umgewandelt wird. Nach der analog-digitalen Wandlung beträgt die radiometrische Auflösung, normalerweise

8 Bit unsigned Integer, wobei die Darstellung in Grauwerten, in einem Wertebereich zwischen 0 (keine Reflexion) und 255 (maximale Reflexion) erfolgt (HILDEBRANDT 1996).

Je nach Oberfläche werden bestimmte Anteile der Energie reflektiert. Die Reflexionskurven von Wasser, Vegetation und trockenen Boden liegen im Spektralbereich zwischen 400 und 2500 nm und sind in der Abbildung 14 dargestellt. Daran ist zu erkennen, dass die unterschiedlichen Oberflächen in verschiedenen Spektralbereichen ihre maximale Reflexion erreichen.

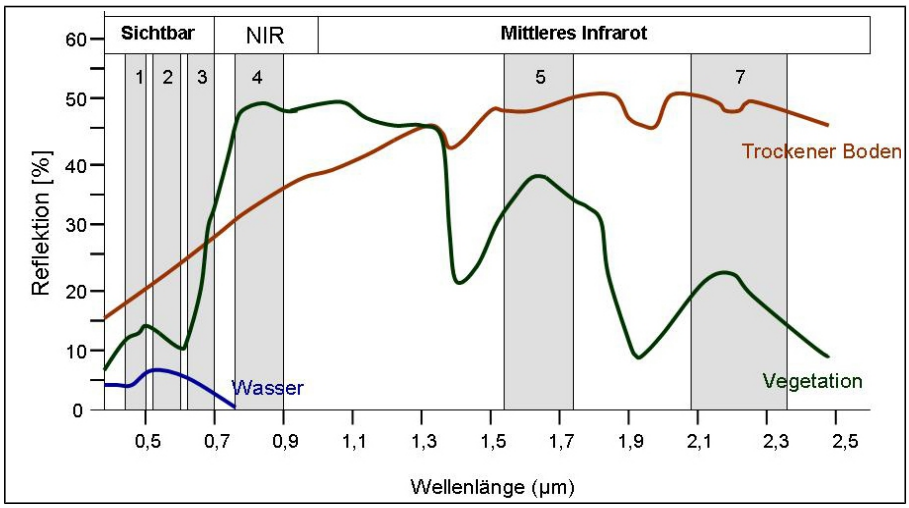


Abb. 14: Reflexionskurven und Spektralbereiche der TM-Landsatkanäle 1-5,7
(LÖFFLER 1994)

Während der trockene Boden hohe Reflexionswerte im mittleren Infrarot erreicht, hat die Vegetation im nahen Infrarot ihr Maximum. Ausgehend von diesen Reflexionskurven, wurden in dieser Arbeit die Werte des fünften und siebten Landsatkanales verwendet, da diese vor allem Informationen des trockenen Bodens enthalten und damit hilfreich für bodenkundliche Kartierungen sind. Zusätzlich wurde der zweite Kanal, im grünen Bereich des sichtbaren Lichtes, verwendet, der ebenfalls einen höheren Informationsgehalt des trockenen Bodens, im Vergleich zur Vegetation (s. Abb. 14) beinhaltet. Anstelle des vierten Landsatkanals, der den Maximalwert der Reflexion für die Vegetation darstellt, wurde der sehr weit verbreitete NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) verwendet. Dieser hat einem Wertebereich von -1 bis +1, wobei negative Werte Wolken, Wasser und Schnee, geringe positive Werte (0 bis 0,1) Fels und degradierte Böden sowie Werte zwischen 0,2 und 0,3 Busch und Grasland repräsentieren (WEIER, HERRING 2000).

Da der NDVI nur Werte zu einem bestimmten Zeitpunkt enthält, wurde außerdem der Range des Jahres 2010 berechnet. Dabei zeigt dieser für jedes Pixel, den Unterschied zwischen dem Saisonhöchstwert und dem niedrigsten Wert, somit die Produktivität innerhalb eines Jahres an. Je höher dieser Wert für ein Pixel ist, desto mehr Vegetation wächst dort im Verlauf eines Jahres. Für das Jahr 2010 kamen hierbei neun, über das Jahr verteilte, Aufnahmen zum Einsatz.

Weitere wichtige Fernerkundungsparameter stellen die Tasseled Cap Transformationen dar, die durch Lineartransformationen der Landsatbänder berechnet werden. Dabei ist der Tasseled Cap 1 ein Maß für die Helligkeit (Brightness) des Bodens.

Alle hier vorgestellten Fernerkundungsdaten, mit Ausnahme des Ranges, sind Durchschnittswerte aus vier Jahren, jeweils vom Februar und wurden für jede Aufnahmefläche (Durchschnitt des entsprechenden Polygons) ermittelt (BRANDT et al. 2013b). Aufgrund der Verwendung von Durchschnittsdaten sind die Daten repräsentativer, denn Extremwerte sowie saisonale Schwankungen fallen somit nicht so stark ins Gewicht.

Für flächenmäßige Aussagen über die Niederschlagsverteilung des Untersuchungsgebietes, wurden Niederschlagsdaten von der Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) verwendet, die seit 1998 vorliegen, kostenlos von der NASA unter *http://trmm.gsfc.nasa.gov/,* zur Verfügung gestellt werden und eine Auflösung von 0,25 ° besitzen. In dieser Arbeit werden die Jahresdurchschnittswerte, von den Jahren 1998 bis 2010, genutzt (BRANDT et al. 2013a).

3.4 Statistische Methoden

In diesem Kapitel, werden die in dieser Arbeit benutzten statistischen Methoden, angefangen von univariaten, bivariaten, bis hin zu multivariaten Analyseverfahren und Teststatistiken, vorgestellt. Alle Daten wurden zunächst in *Excel* eingetragen und entsprechend aufbereitet, dass sie in *R* weiter verarbeitet werden konnten. Mit diesem Programm wurden alle statistischen Methoden durchgeführt, denn es hat gegenüber anderen Statistikprogrammen entscheidende Vorteile. Zum einen verfügt *R* über vielseitige Einstellungsmöglichkeiten und Methoden und zum anderen kann es kostenlos genutzt werden Der *R*-Code zu den statistischen Methoden ist im Anhang 5 dargestellt.

3.4.1 Univariate Methoden

Vor dem Beginn der eigentlichen bi- und multivariaten Analyseverfahren, ist es notwendig, den Datensatz hinsichtlich Skalenniveaus sowie Streu- und Lageparametern auszuwerten, da die verschiedenen Methoden unterschiedliche Anforderungen an den Datensatz stellen. Ein geeignetes Mittel, zur Visualisierung der einzelnen Variablen, stellt dabei der Boxplot (s. Abb. 15) dar, durch den Lokalisationsmaße wie Ausreißer, Quartile und Median sowie Streuungsmaße (Spannweite) dargestellt werden. Als Ausreißer gelten dabei solche Werte, die mehr als 1,5 Boxlängen entfernt liegen (SACHS, HEDDERICH 2006).

Neben dem Boxplot wurden zur Prüfung auf Normalverteilung, die für viele statistische Methoden eine wichtige Voraussetzung ist, auch Histogramme sowie Quantil-Quantil-Plots erstellt. Liegen bei den Quantil-Quantil-Plots die einzelnen Werte, annähernd auf einer durch den Koordinatenursprung verlaufenden Geraden, so liegt eine Normalverteilung vor, anderenfalls können die einzelnen Variablen, durch Wurzel- oder Logarithmustransformationen, einer Normalverteilung angeglichen werden. Um auch nominal skalierte Daten, wie die Vegetationsdaten zu nutzen, ist es notwendig diese in Zahlen zu codieren (s. Tab. 7) (LEYER, WESCHE 2007).

Weiterhin wurde insbesondere der Vegetationsdatensatz, auf Nullwerte untersucht. Viele Nullwerte innerhalb einer Variablen können die Analysen entscheidend verfälschen (LEYER, WESCHE 2007). Deswegen wurden im Vegetationsdatensatz nur die Arten für multivariate statistische Auswertungen verwendet, die insgesamt über 50-mal vorkommen (s. Kap. 3.3.5).

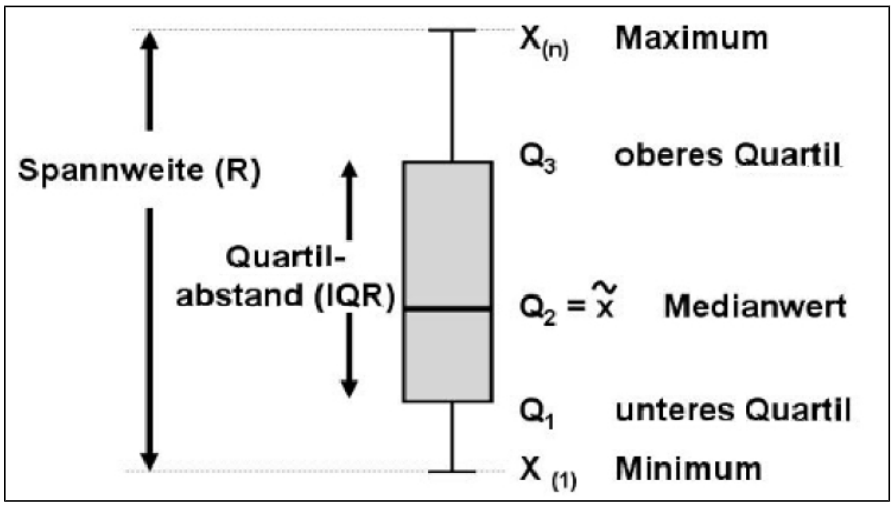


Abb. 15: Aufbau eines Boxplots
(SACHS, HEDDERICH 2006)

3.4.2 Bivariate Methoden

3.4.2.1 Korrelationsanalysen

Korrelationsanalysen werden verwendet, um die Stärke des Zusammenhanges zwischen zwei oder auch mehreren abhängigen Variablen, wie beispielsweise den Bodenlaborparametern, zu ermitteln. Dabei gibt es mehrere Varianten, die von der Skalierung und Verteilung der Variablen abhängen. So setzt die Pearson-Korrelation normalverteilte Daten sowie einen linearen Zusammenhang zwischen metrisch skalierten Variablen voraus. Außerdem ist die Pearson-Korrelation sehr anfällig gegenüber Ausreißern. In dieser Arbeit wurde die viel robustere Variante, der Spearman-Rangkorrelationskoeffizient, verwendet. Dieses Verfahren ist weniger empfindlich gegenüber Ausreißern und eignet sich auch für ordinal skalierte und nicht normal verteilte Daten. Es wird lediglich Monotonie zwischen den Variablen vorausgesetzt (SACHS, HEDDERICH 2006; BAHRENBERG et al. 1999).

Im Gegensatz zur Pearson-Korrelation arbeitet der Spearman-Rangkorrelationskoeffizient nicht mit den eigentlichen Variablenwerten, sondern mit Rangnummern. Haben dabei mehrere Merkmale denselben Wert, so erhalten alle denselben mittleren Rangplatz. Diese Methode eignet sich gut, um die ordinal skalierten Variablen, wie Beweidungsintensität oder Bodenstabilität, mit anderen Parametern in Beziehung zu setzen. Erreicht der Korrelationskoeffizient rho (Wertebereich -1 bis +1) dabei positive Werte von 0,7 bis 1, so handelt es sich um einen starken Zusammenhang, während negative Werte von -0,7 bis -1 für einen starken gegenläufigen Zusammenhang stehen. Befindet sich der Korrelationskoeffizient nahe 0, so korrelieren die entsprechenden Variablen nicht linear miteinander (LEYER, WESCHE 2007).

3.4.2.2 Regressionsanalysen

Die Regressionsanalysen stellen Beziehungen zwischen einer abhängigen und einer oder mehreren unabhängigen (erklärenden) Variablen her, die mit Hilfe des Bestimmtheitsmaßes, angegeben werden. Das Bestimmtheitsmaß wird als das Quadrat des Korrelationskoeffizienten (in diesem Fall wird der Spearman-Rangkorrelationskoeffizient [s. Kap. 3.4.2.1] verwendet) definiert (R^2). Das Bestimmtheitsmaß beschreibt die Stärke des Zusammenhangs, das heißt den prozentualen Anteil der Streuung der abhängigen Variable, der durch die lineare Regression der unabhängigen Variable, erklärt wird (SACHS, HEDDERICH 2006). Je näher der Wert in Richtung der 1 liegt, desto größer ist die lineare Abhängigkeit zwischen den beiden Variablen, Werte nahe 0 stehen für keinen linearen Zusammenhang, was aber nicht ausschließt, dass ein anderer Zusammenhang zwischen den Parametern besteht.

3.4.3 Multivariate Methoden

Da diese Arbeit die Abhängigkeit der Bodenfruchtbarkeit, von vielen verschiedenen Parametern ermittelt, wurden in erster Linie multivariate Methoden, in einer bestimmten Reihenfolge, verwendet (s. Abb. 11).

3.4.3.1 PCA

Die Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis, PCA) zählt zu den ältesten Ordinationsverfahren, mit dem Ziel die Dimension von einem n-dimensionalen Raum, auf zwei bis vier interpretierbare Achsen zu reduzieren. Dabei versucht die PCA solche Faktoren, die Hauptkomponenten, zu finden, mit denen die gesamte Variation der Daten erklärbar ist (BAHRENBERG et al. 2002). Aus der Datenmatrix werden die Hauptinformationen herausgefiltert, Redundanzen zusammengefasst und in wenigen Hauptkomponenten dargestellt. Diese Hauptkomponenten stehen senkrecht aufeinander, das heißt, dass sie nicht miteinander korrelieren. Die Hauptkomponenten sind dabei so geordnet, dass sie nacheinander jeweils die meiste Varianz der Daten erklären. Für ökologische Fragestellungen ist es sinnvoll, die ersten zwei bis vier Achsen zu interpretieren, wobei diese für ein gut interpretierbares Resultat mindestens 80 % der kumulierten Varianz erklären sollten (LEYER, WESCHE 2007). Dabei sollen nach dem Kaiserkriterium, nur die Achsen zur Erklärung herangezogen werden, die einen höheren Eigenwert (höherer Varianzanteil als jede Ausgangsvariable für sich selbst) als eins aufweisen.

Für die inhaltliche Interpretation, werden die einzelnen Ladungen der Variablen (entsprechen dem Korrelationskoeffizienten), auf die Hauptkomponenten zugrunde gelegt, wobei diese mindestens einen Wert von ± 0,3 annehmen sollten (LEYER, WESCHE 2007). Je höher diese Ladungen sind, umso stärker nimmt die Variable, in Richtung der entsprechenden Hauptkomponente zu oder bei negativem Vorzeichen ab. Die PCA erfordert keine normal verteilten Daten, es sollte aber eine lineare Beziehung zwischen den einzelnen metrischen Ausgangsvariablen vorliegen, da die PCA als Distanzmaß die euklidische Distanz verwendet. Bevor die PCA beginnt, müssen die Daten zunächst zentriert (Abziehen des Mittelwertes) und standardisiert (Division durch die Standardabweichung) werden, sodass die Variablen untereinander vergleichbar sind. Für die Erstellung der Korrelationsmatrix wurde, aufgrund der Robustheit, der Spearman-Rangkorrelationskoeffizient verwendet (s. Kap. 3.4.2.1). Generell ist es sinnvoll eine PCA vor der eigentlichen Clusteranalyse vorzuschalten, damit die Ausgangsvariablen gefiltert und somit überschüssige Variablen entfernt werden können (BAHRENBERG et al. 2003). Die PCA wurde mit dem *R*-Befehl *princomp* aus dem Paket *(stats)* berechnet (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2012).

3.4.3.2 Clusteranalyse

Clusteranalysen verfolgen das Ziel, die Daten so zu ordnen, dass eine einfachere Struktur ersichtlich wird, wobei zur Gruppenbildung alle vorliegenden Eigenschaften der Untersuchungsobjekte gleichzeitig verwendet werden (BACKHAUS et al. 2011). Dabei hat der Nutzer viele Auswahlmöglichkeiten, angefangen vom Distanzmaß, mit dem die Ähnlichkeit beziehungsweise Unähnlichkeit zwischen den einzelnen Objekten gemessen wird, über die unterschiedlichen Clustermethoden, bis hin zur subjektiven Klasseneinteilung anhand eines Dendrogramms. Der Methodenblock der Clusterfamilie, umfasst viele verschiedene Verfahren, die nach BAHRENBERG et al. 2003 in zwei große Gruppen, die schrittweisen, hierarchischen und in die nicht-hierarchischen Verfahren eingeteilt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit, wurde die in der Ökologie sehr verbreitete Methode, des hierarchischen Verfahrens, mit dem Fusionierungsalgorithmus nach Ward verwendet, der die Gruppen so vereinigt, dass die Varianz in einer Gruppe möglichst wenig erhöht wird (Minimum-Varianz-Methode) (BACKHAUS et al. 2011). Als Distanzmaß wurde dabei die, für metrische Daten geeignete, euklidische Distanz benutzt, die als wichtigstes Distanzmaß in der Ökologie angesehen wird (LEYER, WESCHE 2007). Vor der eigentlichen Analyse, wurden die Bodenparameter zunächst transformiert, damit die Ausreißer nicht so stark ins Gewicht fallen und anschließend standardisiert, um die einzelnen Variablen miteinander zu vergleichen. Das Ergebnis der Clusteranalyse hängt vor allem von der Variablenauswahl ab. Damit keine redundanten Informationen mit einfließen, sollte von Variablen, die sehr stark miteinander korrelieren ($R^2 > 0.9$), nur eine verwendet werden (BACKHAUS et al. 2011). Die Clusteranalyse wurde mit der *R*-Funktion *hclust* aus dem Paket *(stats)* durchgeführt (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2012) und die optimale Klassenanzahl mit Hilfe des elbow criterion bestimmt.

3.4.3.3 NMDS

In dieser Arbeit wurde auf ein indirektes Ordinationsverfahren zurückgegriffen, bei dem die signifikanten Parameter zunächst ermittelt und nicht in die Berechnungen mit einbezogen werden, so wie es bei direkten Ordinationsmethoden der Fall ist. Die DCA (Detrended Correspondence Analysis) ist die Methode, die in der Ökologie am häufigsten verwendet wird, jedoch setzt diese eine unimodale Verteilung der Variablen voraus. Das ist vor allem bei biotischen Variablen der Fall, da Organismen in der Regel ein ökologisches Optimum besitzen, in dem sie am häufigsten vorkommen. Abiotische Variablen, wie die vorliegenden Bodenparameter, zeigen jedoch nur selten dieses Verhalten. Ein weiteres Argument, das gegen die Verwendung der DCA spricht, ist, dass diese sehr anfällig gegenüber Ausreißern ist. Aus diesem Grund wird auf die robuste Methode des Non-metrical Dimension Scaling (NMDS) zurückgegriffen.

Das NMDS wurde von Shepard und Kruskal entwickelt, gilt als eine sehr robuste Methode unter den Ordinationsverfahren und ist auch für ordinal skalierte Daten geeignet (LEYER, WESCHE 2007). Sie ist ein rangbasiertes Verfahren, das heißt, es wird nur die Monotonie in den Beziehungen und nicht die absolute Größe der Distanzen verwendet, mit dem Ziel, die ursprüngliche Rangfolge der Distanzen, in einem Ordinationsraum möglichst unverzerrt wiederzugeben. Die Distanzen zwischen den Objekten werden als Ähnlichkeit beziehungsweise Unähnlichkeit interpretiert, das heißt, je näher sich zwei Objekte im Raum befinden, desto ähnlicher sind sie zueinander. Im Gegensatz zu der DCA oder PCA, ist das NMDS keine Eigenvektoranalyse, denn es beruht auf einer iterativ numerischen Optimierungsmethode. Dabei werden die, zunächst aus einer willkürlichen Startkonfiguration resultierenden, Abstände zwischen den Objekten, die auf den gewählten Distanzkoeffizienten basieren, schrittweise an die Distanzen des Ordinationsraumes angeglichen. Die Qualität dieser Angleichung kann mit Hilfe des Stresswertes, aus dem Shepard-Diagramm, ermittelt werden: Je größer der Stresswert, umso schlechter geben die Distanzen die Ähnlichkeiten wieder. Dieser Stresswert sollte nach zunehmender Optimierung der Ordination, so weit verringert werden, dass dieser < 10 % ist und somit das Ergebnis gut interpretierbar scheint (LEYER, WESCHE 2007).

Gegenüber anderen Verfahren besteht der große Vorteil des NMDS darin, dass das Distanzmaß frei gewählt werden kann – die Methode lässt dem Nutzer somit einen großen Spielraum und ist dadurch wesentlich flexibler. Da in dieser Arbeit der überwiegend metrisch skalierte Bodendatensatz für die Analyse verwendet wird, erscheint das euklidische Distanzmaß als sehr sinnvoll. Nach der Berechnung der Distanzmatrix ist es erforderlich, die Anzahl der Dimensionen auszuwählen, da das NMDS bei einer Änderung der Dimensionsanzahl, eine Änderung der gesamten Projektion herbei steuert.

Das NMDS wurde mit der Funktion *metaMDS,* aus dem *R*-Paket *(vegan),* zunächst mit verschiedenen Dimensionen bei 200 Iterationen berechnet, um die einzelnen Stresswerte zu vergleichen. Letztendlich wurde nach dem elbow criterion (Plot der Dimensionsanzahl gegen die Stresswerte) die Dimensionsanzahl ausgewählt, bei der der Stresswert stark vom vorherigen abnimmt und ein gut interpretierbares Ergebnis entsteht (LEYER, WESCHE 2007). Weiterhin wurde mit der ermittelten besten Dimensionsanzahl, das endgültige NMDS, mit 1000 Iterationen berechnet und die Güte im Shepard-Diagramm überprüft. Außerdem wurde mit Hilfe des MonteCarlo-Tests ermittelt, ob die gewählte Konfiguration signifikant weniger Stress, als eine zufällig ausgewählte berechnete. Die Umwelt- und Fernerkundungsparameter wurden mit der Funktion *envit* auf das NMDS projeziert und deren Signifikanz auf einem Niveau von 5 %, mit einem Permutationstest (999 Permutationen), berechnet und die Bedeutung anhand des Bestimmtheitsmaßes (R^2) abgeschätzt (OKSANEN 2012).

3.4.3.4 Random-Forest-Modell

Ein weiterer Aspekt dieser Arbeit, ist die Modellierung der Ergebnisse auf die Fläche des Untersuchungsgebietes, wozu potentielle erklärende Variablen notwendig sind, die für jedes Pixel des Untersuchungsgebietes vorliegen. Je genauer dabei die räumliche Auflösung, der erklärenden Variablen ist, desto kleinräumiger kann die Modellierung erfolgen. Dabei wird der Modellierung ein nichtlineares Modell zugrunde gelegt, welches nicht viele Voraussetzungen und Anforderungen, wie Normalverteilung, an den Datensatz hat, so wie das beim linearen Modell der Fall ist. Bezüglich der Skalierung der Zielvariable, wird zwischen Klassifikations- (nominal und ordinal) und Regressionsbäumen (intervall und rational), unterschieden. Die einfachen Klassifikationsbäume haben jedoch den Nachteil, dass bereits geringfügige Veränderungen des Trainingsdatensatzes das Modell grundlegend verändern können.

Aus diesem Grund wurde das von BREIMAN 2001 entwickelte Random-Forest-Modell verwendet, das mit einer großen Anzahl von Klassifikations- beziehungsweise Regressionsbäumen, auf Basis verschiedener Bootstrap-Datensätze rechnet. Bootstrap ist eine von Efron und Tibshirani entwickelte Resampling-Methode, die nach dem Prinzip des Zurücklegens von Werten arbeitet. Das bedeutet, dass nur eine Teilmenge des Datensatzes, zur Erstellung des Baumes verwendet wird. Dieser Teildatensatz wird binär an Knoten, entsprechend eines Schwellenwertes einer bestimmten Variable, aufgespalten, wobei die erklärende Variable an einem Knoten zufällig, aus einer Auswahl der vorhandenen Variablen gewählt wird. Das finale Modell entsteht durch die Aggregation der Vorhersagen der Anzahl der Bäume, auf Basis der Mehrheit der Entscheidungen (BREIMAN 2001).

Die Validierung (out-of-bag) des Random-Forest-Modells, ist direkt in den Berechnungen integriert und basiert auf dem Bootstrap-Resampling. Dabei werden einzelne Bäume des ausgewählten Teildatensatzes verwendet, um die Werte des zurückgelegten Teildatensatzes vorherzusagen. Das Ergebnis wird mit Hilfe einer confusion matrix dargestellt. Werden die Einzelfehler der Klassen addiert, so ergibt das den Gesamtfehler (error rate) des Modells (BREIMAN 2001).

Neben der out-of-bag Validierung ist auch der Importance-Wert ein Maß für die Modellgüte. Dieser Wert basiert auf der Zunahme des Modellfehlers, wenn die entsprechende Variable verändert wird und gleichzeitig die übrigen Parameter konstant bleiben. Dieser gibt die Wichtigkeit der einzelnen erklärenden Variablen an, je höher dieser Wert, umso bedeutender ist die entsprechende Variable für dieses Modell (BREIMAN 2001).

Die Berechnungen des Random-Forest-Modells wurden mit Hilfe von Martin Brandt, mit *GRASS* durchgeführt, welches auf das *R*-Paket *(RandomForest)* zurückgreift. Aufgrund der Komplexität des Skriptes wird im Anhang auf eine Darstellung verzichtet.

3.4.4 Schließende Statistik

Mit der schließenden Statistik werden Hypothesentests an den einzelnen Bodenparametern durchgeführt, die im Nachfolgenden kurz erklärt werden.

3.4.4.1 Shapiro-Wilk-Test

Der Shapiro-Wilk-Test dient zur Überprüfung, ob eine Normalverteilung der entsprechenden Variablen vorliegt. Er zeichnet sich gegenüber anderen Normalverteilungstest durch eine hohe Teststärke aus und liefert selbst bei geringen Stichproben (ab n = 3) gute Ergebnisse und ist für metrische Daten geeignet. Dabei nimmt die Nullhypothese H_0 an, dass eine Normalverteilung vorliegt, während die Alternativhypothese H_1 der Stichprobe keine Normalverteilung unterstellt. Ist der p-Wert größer als das festgelegte Signifikanzniveau α, so wird die Nullhypothese nicht abgelehnt, das heißt, es liegt eine Normalverteilung vor. Wenn nicht anders angegeben, wurde jeweils ein Signifikanzniveau von p = 0,05 angenommen (SACHS, HEDDERICH 2006). In *R* wurde der Test mit der Funktion *shapiro.test*, aus dem Paket *(stats),* durchgeführt (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2012).

3.4.4.2 U-Test

Mit Hilfe des U-Testes, auch Mann-Whitney-Test genannt, kann festgestellt werden, ob die Werte der einen Stichprobe insgesamt signifikant größer, als die der anderen sind. Dabei verwendet der U-Test nicht die Werte an sich, sondern lediglich deren Rangordnung, weshalb dieser auch als Wilcoxon-Rangsummentest bezeichnet wird. Die Nullhypothese H_0 gibt an, dass beide Stichproben derselben Grundgesamtheit entstammen, die H_1-Hypothese verwirft diese Behauptung. Der Test vergleicht die beiden Stichproben indem er die Prüfgröße U berechnet und diese mit kritischen Werten einer U-Tabelle vergleicht. Ist der berechnete U-Wert, bezüglich eines wählbaren Signifikanzniveaus p kleiner oder gleich dem kritischen U-Wert, unterscheiden sich die beiden Stichproben signifikant voneinander, andernfalls besteht kein signifikanter Unterschied. Dieser Test wurde in *R* mit der Funktion *wilcox.test*, aus dem Paket *(stats),* mit einem Signifikanzniveau von p = 0,05 durchgeführt (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2012; BAHRENBERG et al. 1999).

4. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dargelegt, wobei zunächst die Clusteranalyse (Kap. 4.2) und die ihr vorgeschaltete PCA (Kap. 4.1) erklärt werden, um anschließend die einzelnen Bodentypen bezüglich der Labor-, Vegetations-, Umwelt- und Fernerkundungsparameter (Kap. 4.3-4.5) zu untersuchen und die Zusammenhänge, mit Hilfe des NMDS (Kap. 4.6) darzustellen. Anschließend erfolgt eine zusammenfassende Darstellung der einzelnen Bodentypen (Kap. 4.7), die auf das Untersuchungsgebiet mit Random-Forest modelliert werden (Kap. 4.8). Da sich eine klare Abgrenzung zwischen Ergebnissen und Diskussion als schwierig erweist, werden in diesem Kapitel die Ergebnisse ansatzweise diskutiert, das heißt mit Hilfe von anderen Literaturangaben bewertet. Eine ausführlichere Diskussion der einzelnen Bodenparameter, der Vegetation sowie der statistischen Vorgehensweise erfolgt im 5. Kapitel.

4.1 PCA der Bodenvariablen

Die PCA dient in diesem Fall zur Vorschaltung, der im Kapitel 4.2 beschriebenen Clusteranalyse, um redundante Variablen aufzuspüren. In diesem Fall bilden die 28 Bodenvariablen (s. Anhang 6), die jeweils für die 84 Standorte ermittelt wurden, die Datengrundlage der PCA. Anhand der PCA sollen diese 28 Dimensionen auf wenige interpretierbare Achsen (Hauptkomponenten) reduziert werden. Bei diesem Datensatz erklären die ersten beiden Achsen bereits einen kumulierten Varianzanteil von 82 %, weshalb die PCA für diesen Datensatz als eine geeignete Methode zu bewerten ist. Nach dem Kaiserkriterium soll nur die erste Achse zur Erklärung herangezogen werden, da die zweite mit 0,96 keinen höheren Eigenwert (entspricht Varianzanteil) als 1 aufweist (s. Tab. 8).

Tab. 8: Eckdaten der extrahierten Hauptkomponenten

	Komp. 1	Komp. 2	Komp. 3	Komp. 4	Komp. 5	Komp. 6
Standardabweichung	4,523	1,641	1,300	0,967	0,827	0,688
Varianzanteil	0,730	0,096	0,060	0,033	0,024	0,016
kumulativer Anteil	0,730	0,826	0,887	0,920	0,943	0,960

Alle Variablen weisen, bezüglich der ersten Hauptkomponente, ungefähr gleich große Ladungen auf und sind in Abhängigkeit vom Vorzeichen im Ordinationsdiagramm (s. Abb. 16), entweder nach links (negativ) oder rechts (positiv) ausgerichtet. Die Werte liegen um ± 0,2 und sind somit geringer, als der mit 0,3 von LEYER, WESCHE 2007 zur inhaltlichen Interpretation vorgeschlagenem Schwellenwert (s. Anhang 2). Da in diesem Fall alle 28 Variablen durch die erste Hauptkomponente erklärt werden, sind alle Variablen annähernd gleich wichtig und sollten für die Clusteranalyse (s. Kap. 4.2) verwendet werden.

Anhand des Ordinationsdiagrammes der PCA, dem Korrelationsbiplot, werden die Beziehungen zwischen den einzelnen Variablen sichtbar (s. Abb. 16). Variablen, die nah beieinander liegen, korrelieren stärker miteinander (zum Beispiel Bodenstabilität und NH_4^+) als solche, die weiter voneinander entfernt sind, zum Beispiel der pH-Wert mit der Basensättigung. Je kleiner der Winkel zwischen den Variablen, desto stärker korrelieren sie. Variablen, die genau gegenüber stehen, korrelieren negativ miteinander, wie beispielsweise Aluminium und Natrium oder die Korngrößen Sand und Schluff, das heißt die Werte schließen sich tendenziell aus. Die Variablen, die im rechten Winkel zueinander stehen, korrelieren nicht miteinander (Eisen und Aluminium oder pH-Wert und Dichte).

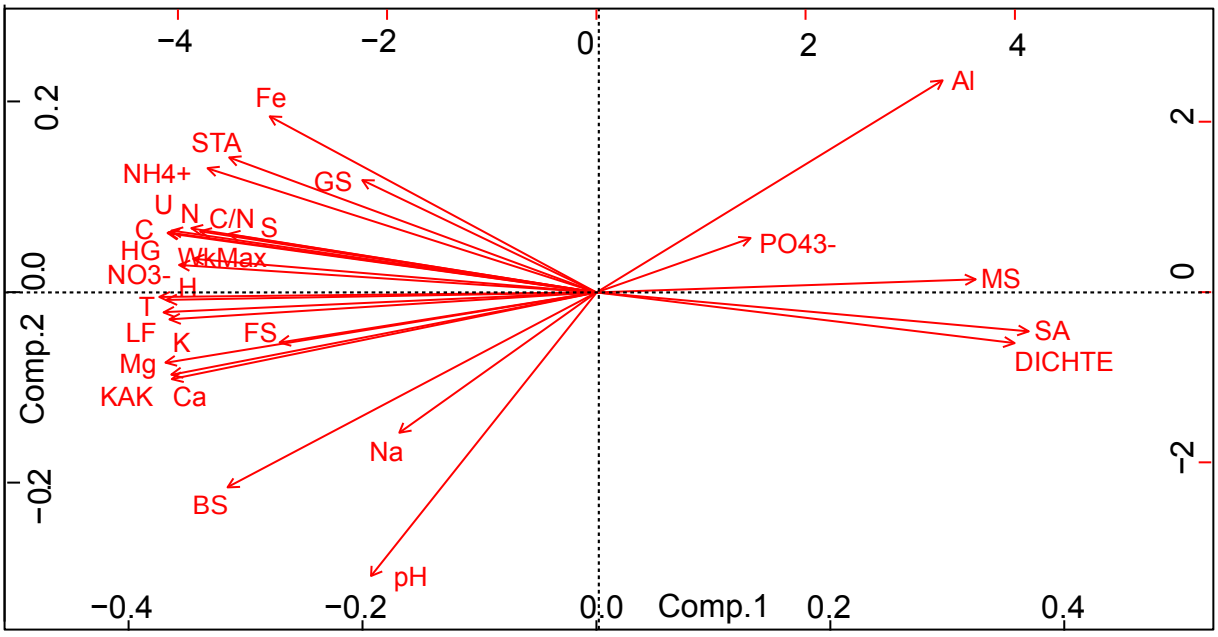


Abb. 16: Korrelationsbiplot aller 28 Bodenvariablen einer PCA

4.2 Unterteilung der Standorte mittels Clusteranalyse

Die Clusteranalyse wird in dieser Arbeit verwendet, um verschiedene Bodentypen im Untersuchungsgebiet aufzuzeigen. Diese wurde für alle 84 Standorte anhand von 28 Bodenvariablen (s. Anhang 6), unter Verwendung der euklidischen Distanz und des Ward-Algorithmus durchgeführt. Für die geeignete Variablenauswahl wurde eine PCA (s. Kap. 4.1) vorgeschaltet.

Beim Vergleich der ursprünglichen Matrix mit der Distanzmatrix (euklidische Distanz), ergibt sich ein hoher kophenetischer Korrelationskoeffizient von 0,827 bei einer starken Signifikanz von $p < 0{,}001$, was für die geeignete Methodenauswahl spricht. In einem nächsten Schritt wurden bei verschiedenen Ähnlichkeitsniveaus Klassen gebildet und die Klassengrößen miteinander verglichen (s. Tab. 9). Zusätzlich wurde die Anzahl der Klassen gegen das Distanzmaß, welches der Ähnlichkeit entspricht, geplottet. Dabei erweist sich nach dem elbow criterion (Knick des Graphen), eine Einteilung in vier Klassen als sinnvoll (s. Abb. 18) (BACKHAUS et al. 2011). Bei einer Einteilung in mehr Klassen wäre das Ähnlichkeitsniveau sehr gering und es würden oft nur wenige oder einzelne Standorte eine eigene bilden (s. Tab. 9). Die beiden großen Klassen erweisen sich außerdem als sehr robust, denn erst bei einer Einteilung in sieben Klassen, wird die vierte (rot) und bei einer Einteilung in elf, die dritte Klasse (grün) weiter unterteilt.

Tab. 9: Klassengrößen bei unterschiedlicher Klassenanzahl bei der Ward-Methode

Klassen	Distanz	Klassengrößen
2	85	7 – 77
3	38	7 – 19 – 58
4	20	7 – 19 – 28 – 30
5	16	1 – 6 – 19 – 28 – 30
6	16	1 – 6 – 8 – 11 – 28 – 30
7	15	1 – 6 – 8 – 11 – 28 – 4 – 26
8	14	1 – 2 – 4 – 8 – 11 – 28 – 4 – 26
9	14	1 – 2 – 4 – 8 – 1 – 10 – 28 – 4 – 26
10	13	1 – 2 – 4 – 8 – 1 – 10 – 28 – 4 – 6 – 20
11	12	1 – 2 – 4 – 8 – 1 – 10 – 2 – 26 – 4 – 6 – 20
12	11	1 – 2 – 4 – 8 – 1 – 10 – 2 – 11 – 15 – 4 – 6 – 20

Anhand des Dendogramms (s. Abb. 17) ist die Vierteilung bei einem Ähnlichkeitsniveau von 20 %, die der euklidischen Distanz der Variablen untereinander entspricht, dargestellt.

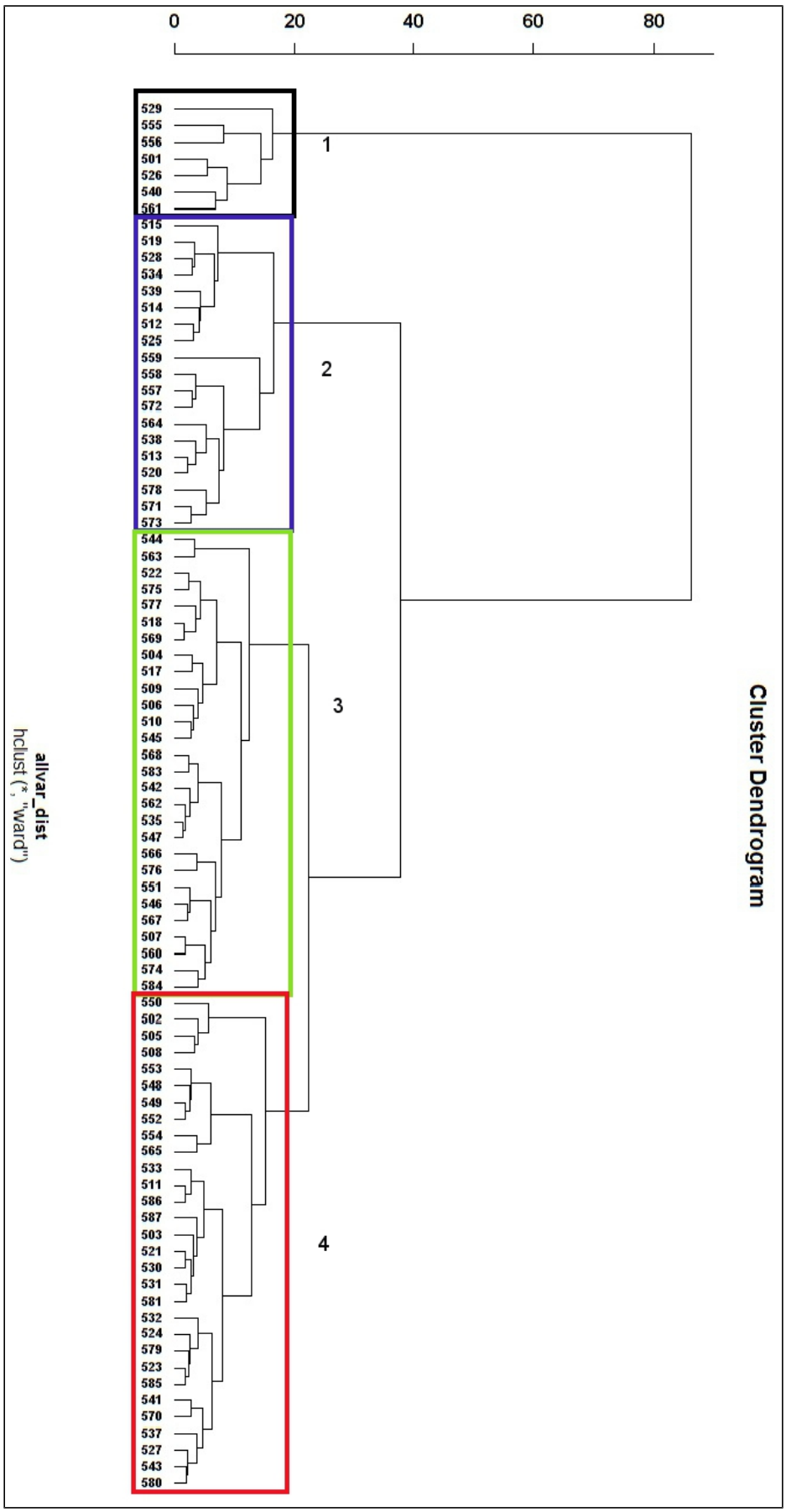


Abb. 17: Dendogramm der Clusteranalyse

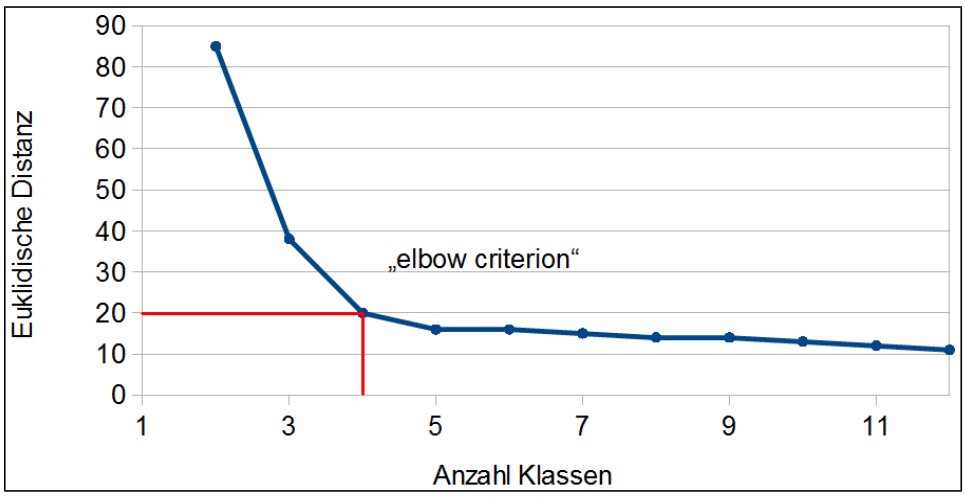


Abb. 18: Elbow criterion als Gütemaß zur Bestimmung der Anzahl der Klassen

Nachfolgend wird versucht, die entstandene Clusterung durch verschiedene Bodentypen zu erklären. Dabei dient die pedomorphologische Karte von STANCIOFF et al. 1986, als Datengrundlage (s. Kap. 2.6), die mit einem Maßstab von 1 : 500.000, eine doppelt so gute Auflösung wie die SOTER (Soil and Terrain database) besitzt und somit eine höhere Genauigkeit aufweist. In der Abbildung 19 sind die einzelnen Untersuchungsstandorte in den Farben des Clusterergebnisses dargestellt. Die Clustergruppe 1 umfasst sieben Standorte, die sich komplett von allen anderen unterscheiden. Das sind diejenigen Standorte, die sich in Senken beziehungsweise im Flussbett des Ferlos befinden und nach der Bodenklassifikation von STANCIOFF et al. 1986, den hydromorphen Böden zugeordnet werden (s. schwarze Punkte in Abb. 19). Die 19 Standorte der Clustergruppe 2 (blau) befinden sich überwiegend im Osten, in der Lateritzone des Untersuchungsgebietes und können somit den Regosolen zugeordnet werden. Bei den anderen beiden, annähernd gleich großen, Clustergruppen, ist keine Unterscheidung des Bodentyps möglich, denn die Untersuchungsflächen liegen überwiegend auf Arenosolen. Deswegen wird im Folgenden die Clustergruppe 3 als Arenosoltyp I und die Clustergruppe 4 als Arenosoltyp II bezeichnet.

Warum wurden diese Arenosolböden aufgrund ihrer Eigenschaften in zwei Gruppen eingeteilt? Das nächste Kapitel versucht diese Frage zu beantworten und vergleicht die vier, aus der Clusteranalyse ermittelten, Bodentypen anhand bestimmter Gesichtspunkte.

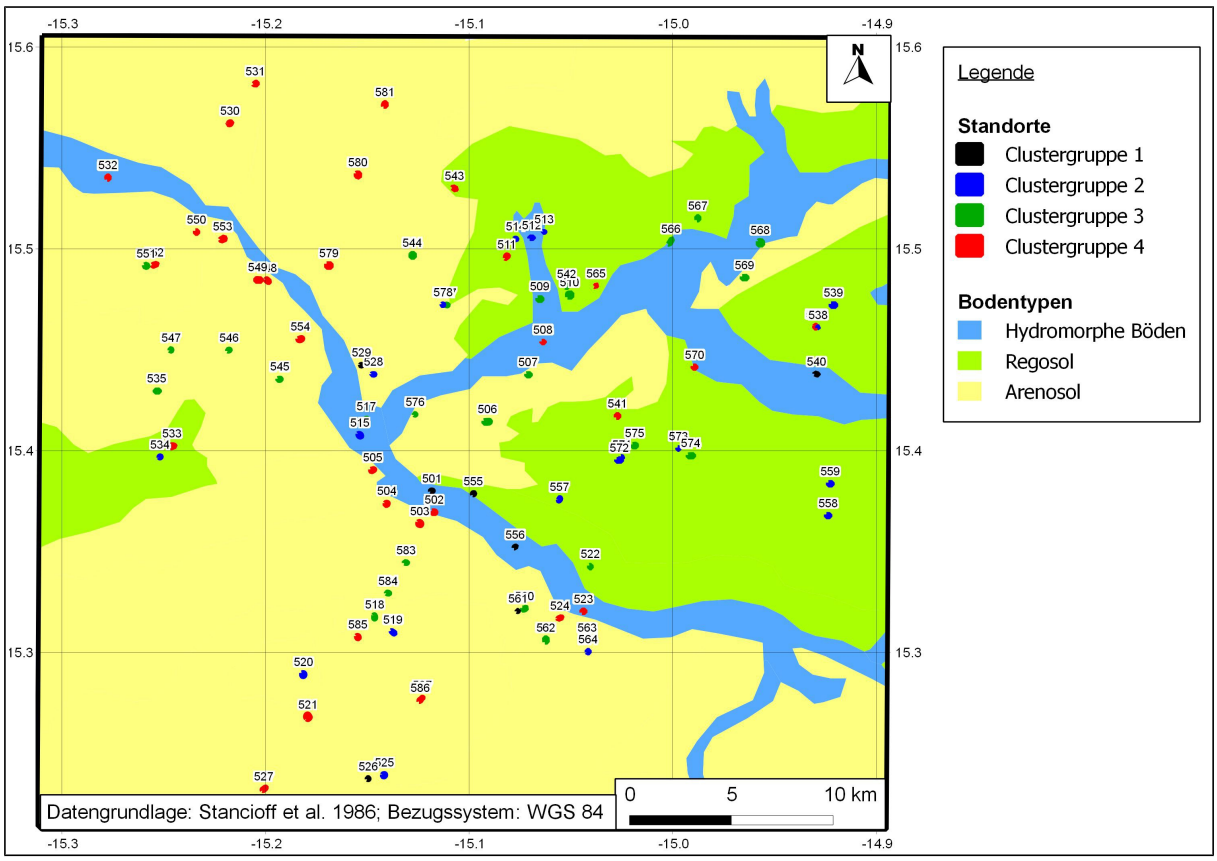


Abb. 19: Räumliche Darstellung des Clusterergebnisses

4.3 Bodenparameter

4.3.1 Physikalische Bodenparameter

4.3.1.1 Korngröße

Die drei Bodentypen der hydromorphen Böden, der Regosole und der Arenosole unterscheiden sich in erster Linie hinsichtlich der Korngrößenzusammensetzung ihres Feinbodens (< 2 mm), wobei alle Unterschiede zwischen den drei Fraktionen Sand, Schluff und Ton, mit Ausnahme des Schluffanteiles zwischen den hydromorphen Böden und den Regosolen, signifikant ($p < 0,05$) ausfallen. Im Gegensatz dazu, haben die beiden Arenosoltypen nahezu eine identische Korngrößenzusammensetzung ($p > 0,05$). Es ist auffällig, dass bei allen Bodentypen der Sandanteil überwiegt (s. Abb. 20). Insbesondere weisen die Arenosole mit Werten von knapp 85 % sehr hohe Sandanteile auf, weshalb diese den Sanden zugeordnet werden (s. Abb. 21).

Dieser reine Sand lässt sich noch weiter in die Komponenten Fein-, Mittel- und Grobsand klassifizieren. Aufgrund des hohen Feinsandanteils, zwischen 45 und 75 %, bei einem Mittelsandanteil zwischen 20 und 50 %, wird die Mehrheit der Proben dem mittelsandigen Feinsand (fSms) zugeordnet (s. Abb. 22).

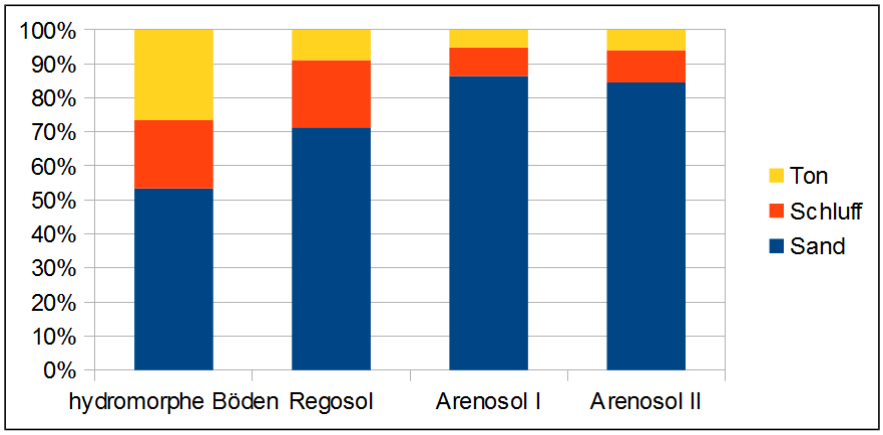


Abb. 20: Vergleich der durchschnittlichen Korngrößenzusammensetzung der Bodentypen

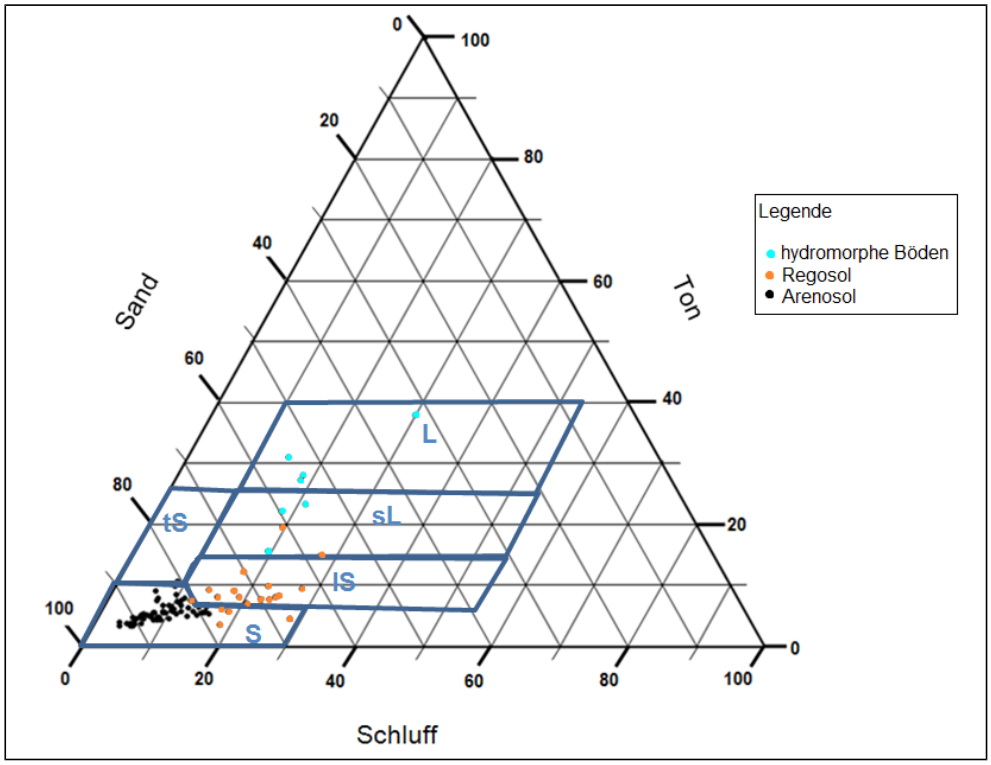


Abb. 21: Korngrößendreieck

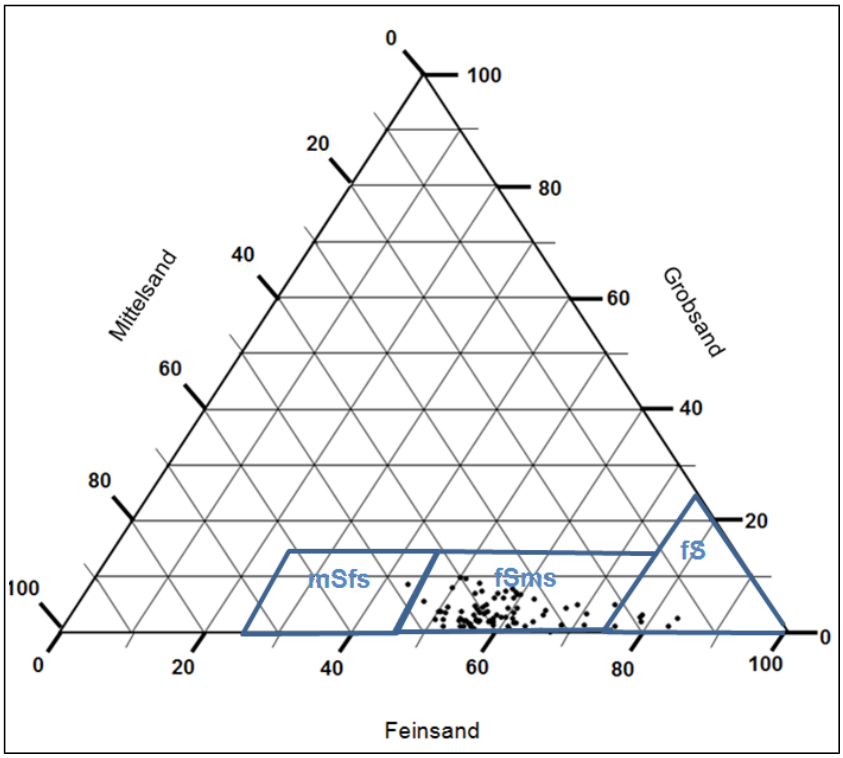


Abb. 22: Unterteilung der Bodenart reiner Sand

Die Regosole, mit durchschnittlich 10 % Ton, 20 % Schluff und 70 % Sand, gehören hauptsächlich der Gruppe der lehmigen Sande (lS) an, während die hydromorphen Böden mit einem durchschnittlichen Tonanteil, von knapp 25 % sandige Lehme (sL) beziehungsweise Lehme (L) darstellen (s. Abb. 21). Die Korngrößenfraktionen der einzelnen Bodentypen sind sehr homogen, sodass sie einer Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test mit $p > 0,05$) unterliegen. Eine Ausnahme bildet der Tonanteil der Regosole, der zwischen 3,6 und 14,7 % stark schwankt. Bezüglich des Grobbodens (> 2 mm) sind die Anteile mit < 1 % sehr gering, wobei die Regosole mit 0,8 % einen höheren Wert als die Arenosole (< 0,1 %) sowie die hydromorphen Böden (0,5 %) aufweisen. Aufgrund der geringen Kiesanteile werden diese im Folgenden vernachlässigt.

4.3.1.2 Lagerungsdichte

Die Lagerungsdichte von allen Proben sowie der einzelnen Bodentypen, unterliegt einer Normalverteilung ($p > 0,05$). Dabei unterscheidet sich die Dichte der Regosole signifikant von den beiden Arenosoltypen ($p < 0,05$), während zwischen den anderen Bodentypen keine signifikanten Unterschiede bestehen (s. Abb. 24). Die Regosole weisen mit einem Mittelwert von 1,57 g/cm³ die geringsten Dichten auf, gefolgt von den Arenosol II Standorten, mit 1,62 g/cm³ und den hydromorphen Böden sowie Arenosol I Standorten, mit Mittelwerten von jeweils 1,65 g/cm³. Mehr als zwei Drittel aller Standorte haben nach AD-HOC-AG BODEN 2005

mittlere Lagerungsdichten, mit Werten zwischen 1,55 und 1,8 g/cm³, während der Rest eine geringe Lagerungsdichte (zwischen 1,3 und 1,55 g/cm³) besitzt (s. Tab. 10). Eine Ausnahme bilden die Standorte 555, 584, die eine höhere Lagerungsdichte als 1,8 g/cm³ aufweisen.

Tab. 10: Bewertung der effektiven Lagerungsdichte
(eigene Darstellung nach AD-HOC-AG BODEN 2005)

Bewertung	Dichte [g/cm³]	Anzahl				
		alle	hydro. Böden	Regosole	Arenosol I	Arenosol II
hoch	1,8 bis < 2,05	2	1	0	1	0
mittel	1,55 bis 1,8	65	5	11	25	24
gering	1,3 bis < 1,55	17	1	8	2	6
Summe		84	7	19	28	30
Mittelwert		1,62	1,65	1,57	1,65	1,62

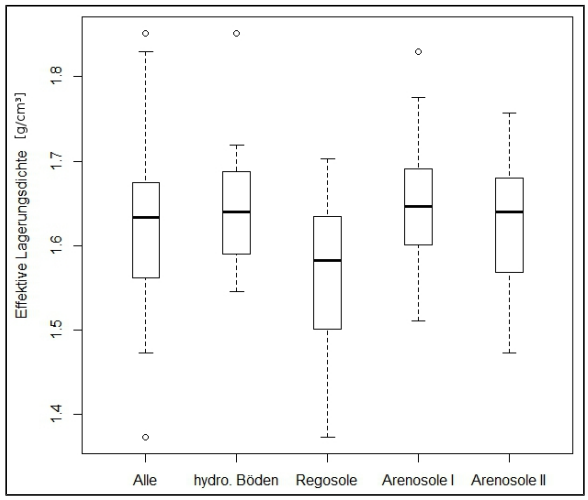


Abb. 23: Vergleich der effektiven Lagerungsdichte der einzelnen Bodentypen

4.3.1.3 Wasser- und Lufthaushalt

Bezüglich der maximalen Wasserkapazität (WkMax), gibt es zwischen den einzelnen Bodentypen jeweils signifikante Unterschiede (s. Abb. 24), wobei die höchsten Werte von den hydromorphen Böden, aufgrund des hohen Tonanteils (mittlere maximale Wasserkapazität von 35,5 %), gefolgt von den Regosolen mit knapp 31 %, erreicht werden. Deutlich geringer mit knapp 29 % und 27 % fallen die Werte der Arenosolstandorte aus, die ebenfalls wie die anderen Bodentypen einer Normalverteilung unterliegen.

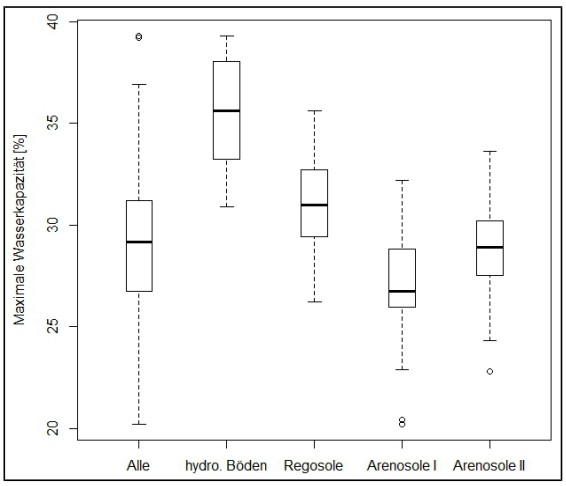


Abb. 24: Vergleich der maximalen Wasserkapazitäten der einzelnen Bodentypen

Die maximale Wasserkapazität korreliert signifikant mittelmäßig negativ (rho = - 0,52), mit der effektiven Lagerungsdichte sowie signifikant mittelmäßig positiv, mit der Leitfähigkeit (rho = 0,588) sowie dem Humusgehalt (rho = 0,537).

Wichtige Kennwerte des Wasser- und Lufthaushaltes der Böden, abgeleitet von der Feinbodenart (s. Abb. 21) und der berechneten Trockenrohdichte (s. Kap. 3.1.4.2), sind für die entsprechenden Bodenarten in der Tabelle 11 dargestellt. Die hydromorphen Böden, die durch die Bodenarten sandiger Lehm (sL) und Lehm (L) repräsentiert werden, haben ein Gesamtporenvolumen von über 50 %, wovon die Feldkapazität mit Werten von rund 40 % den höchsten Anteil aufweist. Allerdings ist nur rund die Hälfte der Feldkapazität für die Pflanzen nutzbar. Den restlichen Teil stellt das Totwasser dar, das aufgrund der hohen Tonanteile der hydromorphen Böden am höchsten ausfällt. Bei den Regosolen (Bodenart lehmiger Sand) ist die nutzbare Feldkapazität als hoch einzustufen, der Totwasseranteil ist deutlich geringer, gegenüber den hydromorphen Böden. Noch einen geringeren Totwasser-anteil weisen die Arenosole auf, die allerdings auch nur niedrige nutzbare Feldkapazitäten haben (s. Tab. 11).

Mit Hilfe der Feinbodenart können Wasserspannungskurven (pF-Kurven) für die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Bodenarten erstellt werden (s. Abb. 25). Anhand dieser sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Bodentypen sichtbar: Die Sandböden (Arenosole) sind durch einen hohen Anteil von Grobporen und damit verbunden durch eine sehr hohe Luftkapazität, aber auch durch eine geringe nutzbare Feldkapazität charakterisiert. Demgegenüber stehen die tonhaltigen hydromorphen Böden, mit mittleren nutzbaren Feldkapazitäten, aber auch mit mittleren bis hohen Totwasseranteilen. Zwischen den Arenosolen und den hydromorphen Böden, verläuft die Wasserspannungskurve der Regosole, die sich durch hohe nutzbare Feldkapazitäten auszeichnet.

Tab. 11: Durchschnittliche bodenphysikalische Kennwerte und Bewertungen der ermittelten Bodenarten (GPV = Grobporenvolumen, LK = Luftkapazität, FK = Feldkapazität, nFK = nutzbare Feldkapazität, TW = Totwasser) (eigene Darstellung nach AD-HOC-AG BODEN 2005)

Bodenart	Bodentyp	GPV [%]	LK [%]	FK [%]	nFK [%]	TW [%]
lS	Regosol	50 - hoch	16 - hoch	34 - mittel	22 - hoch	12 - mittel
sL	hydro. Böden	54 - sehr hoch	15 - hoch	39 - hoch	20 - mittel	19 - mittel
L	hydro. Böden	53 - hoch	11 - mittel	42 - hoch	18 - mittel	24 - hoch
tS	Arenosol	46 - hoch	22 - hoch	24 - gering	17 - mittel	7 - gering
fSms	Arenosol	47 - hoch	32 - sehr hoch	15 - sehr gering	9 - gering	5 - gering
mSgs	Arenosol	46 - hoch	34 - sehr hoch	12 - sehr gering	7 - gering	4 - gering

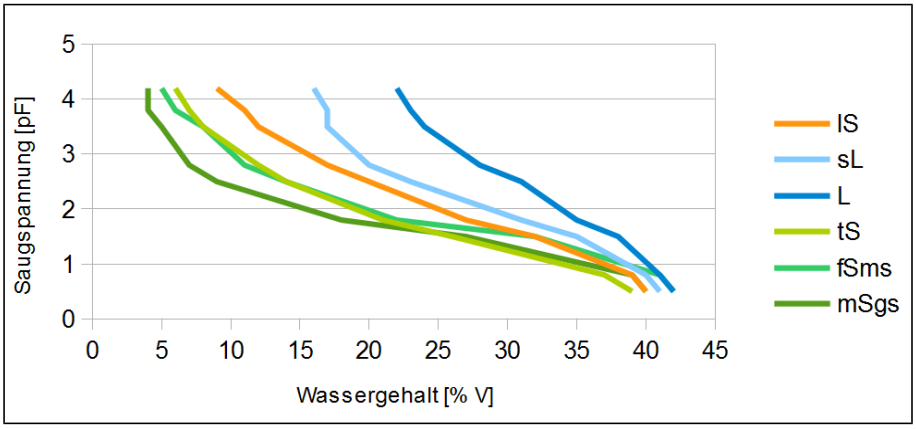


Abb. 25: Wasserspannungskurven der ermittelten Bodentypen (orange = Regosole, blau = hydromorphe Böden, grün = Arenosole) (eigene Darstellung nach AD-HOC-AG BODEN 2005)

4.3.1.4 Stabilität

Der ordinal skalierte Parameter der Bodenstabilität, setzt sich aus den im Gelände ermittelten Parametern, der Penetrometermessungen, des Verfestigungsgrades sowie der Aggregatstabilität zusammen und nimmt Werte zwischen 3 (gering) und 8 (hoch) an (s. Tab. 12), wobei der Mittelwert aller Proben 5,3 beträgt. Die höchste Bodenstabilität haben die hydromorphen Böden (Mittelwert 7,4), gefolgt von den Regosolen (Mittelwert 6,1), die sich signifikant (U-Test mit $p < 0,05$) von den anderen Bodentypen unterscheiden. Keinen signifikanten Unterschied ($p = 0,76$) weisen die beiden Arenosoltypen auf, deren Mittelwerte und Mediane sehr eng beieinander liegen (s. Abb. 26). Die Arenosole verzeichnen überwiegend mittlere und geringe Bodenstabilitäten.

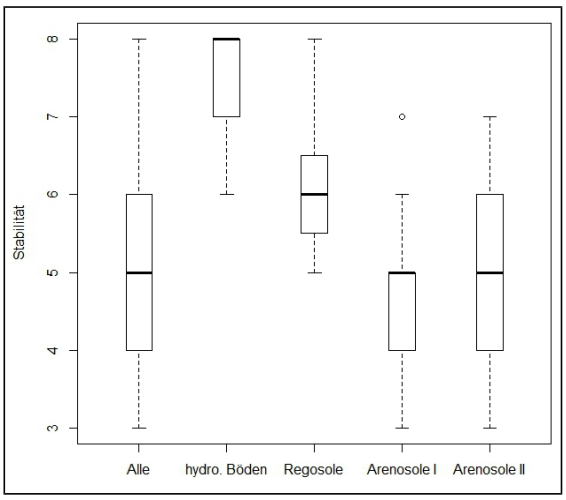


Abb. 26: Vergleich der Stabilität der einzelnen Bodentypen

Die Bodenstabilität korreliert negativ (rho = - 0,576) mit dem Sand- und positiv mit dem Schluffanteil (rho = 0,562).

Tab. 12: Bewertung der Stabilität

Bewertung	Stabilität	Anzahl				
		alle	hydro. Böden	Regosole	Arenosol I	Arenosol II
hoch	7 - 8	14	6	5	2	1
mittel	5 - 6	46	1	14	16	15
gering	3 - 4	24	0	0	10	14
Summe		84	7	19	28	30
Mittelwert		5,3	7,4	6,1	4,8	4,9

4.3.1.5 Farbe

Da sich in diesem Fall die Bodenfarbe der trockenen und wassergesättigten Proben unterscheiden, wurden beide Bestimmungen durchgeführt. Die häufigsten Farben der trockenen Proben, die auch jeweils in den einzelnen Bodentypen am meisten vorkommen, sind 10 YR 5/6 „yellowish brown“ beziehungsweise 10 YR 6/4 „light yellowish brown“ (s. Abb. 27). Ebenfalls häufig sind die trockenen Böden „brown“ (7,5 YR 5/4) oder „light brown“ (7,5 YR 6/4) gefärbt. Die Farben der bis zur Wassersättigung befeuchteten Proben, haben gegenüber den trockenen Proben eine meist zwei Stufen höhere Farbintensität (Value), sodass bei den feuchten Proben die Farben „strong brown“ (7,5 YR 4/6), „dark brown“ (7,5 YR 3/3), „brown“ (7,5 YR 4/4) und „dark yellowish brown“ (10 YR 4/4) dominieren (s. Abb. 27). Insgesamt gibt es keine signifikanten Farbunterschiede zwischen den Bodentypen

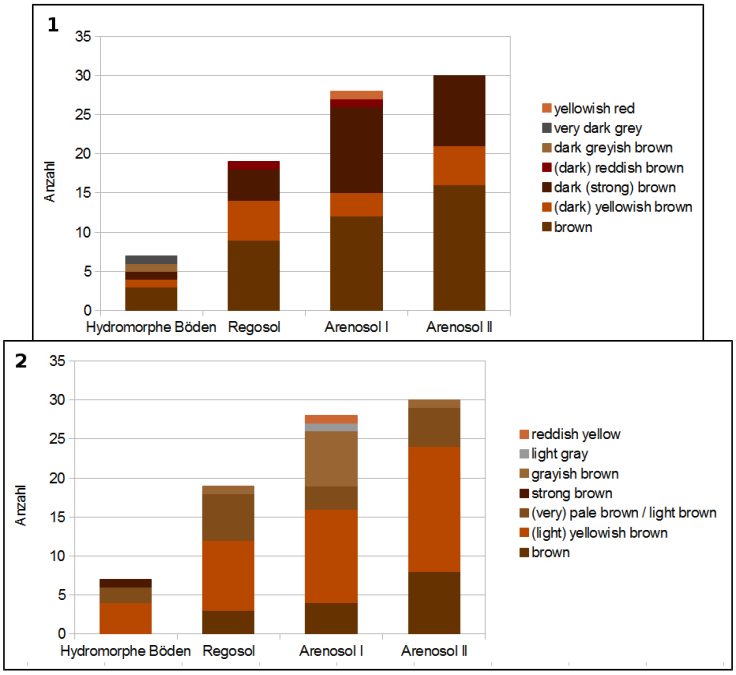


Abb. 27: Farbzusammensetzung der Bodenproben, (1) nass, (2) trocken

4.3.2 Chemische Bodenparameter

4.3.2.1 pH-Wert

Der mittlere pH-Wert der Böden liegt im Untersuchungsgebiet bei 5,88, wobei Schwankungen im Bereich von 4,43 bis 8,08 vorkommen. Nach dem Shapiro-Wilk-Test sind die Werte nicht normal verteilt ($p = 0{,}004$), was vor allem an den vier Standorten (515, 529, 540, 550) liegt die laut LANDON 1991 (s. Tab. 13), mit pH > 7 einen hohen pH-Wert aufweisen. In der Abbildung 28 werden die Verteilungen der pH-Werte der einzelnen Bodentypen dargestellt. Dabei unterscheiden sich die pH-Werte der Regosole und des Arenosoltyps I sowie der beiden Arenosoltypen ($p < 0{,}05$) signifikant voneinander. Die Spannweite des pH-Wertes beträgt bei den hydromorphen Böden ungefähr 3,5 Einheiten, während diese bei den anderen drei Typen, mit maximal 1,5 Einheiten, deutlich geringer ausfällt. Zwei Standorte der hydromorphen Böden, 555 und 556 haben mit 4,43 und 4,51 die niedrigsten pH-Werte von allen Untersuchungsflächen. Den höchsten durchschnittlichen pH-Wert, mit 6,17, weisen die Regosole auf, was unter anderem durch den hohen Ausreißer des Standortes 515, mit einem pH-Wert > 8 verursacht wird. Dieser Ausreißer führt auch dazu, dass die pH-Werte der Regosole ($p = 0{,}002$), im Gegensatz zu den drei anderen Bodentypen ($p > 0{,}05$), nicht normal verteilt sind. Die Arenosole des Typ I haben einen durchschnittlich niedrigen pH-Wert von 5,44, der damit um 0,7 pH-Einheiten signifikant geringer, als der vom Arenosoltyp II ist.

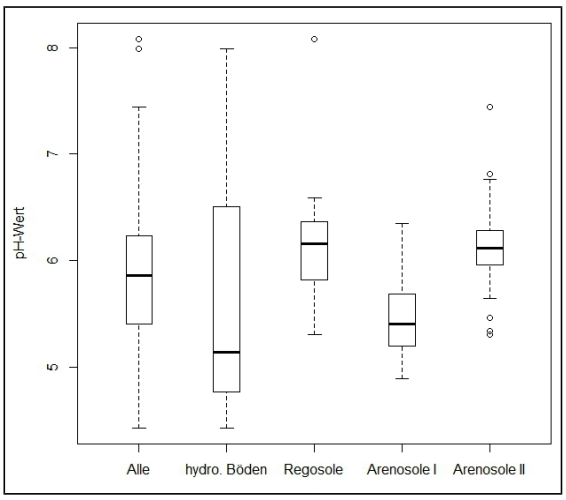


Abb. 28: Vergleich des pH-Wertes der einzelnen Bodentypen

Der pH-Wert korreliert signifikant positiv (ab |rho| > 0,5, p < 0,00) mit der Basensättigung (rho = 0,761) und negativ mit dem Aluminiumgehalt (rho = - 0,665).

Tab. 13: Bewertung des pH-Wertes
(eigene Darstellung nach LANDON 1991)

Bewertung	pH-Wert	Anzahl				
		alle	hydro. Böden	Regosole	Arenosol I	Arenosol II
sehr hoch	>8,5	0	0	0	0	0
hoch	7.0 – 8,5	4	2	1	0	1
mittel	5.5 – 7	55	1	17	11	26
niedrig	<5.5	25	4	1	17	3
Summe		84	7	19	28	30
Mittelwert		5,88	5,73	6,17	5,44	6,13

4.3.2.2 Elektrische Leitfähigkeit

Alle 84 Standorte sind nach der Einteilung von LANDON 1991 salzfrei, denn sie weisen alle kleinere Werte als 2000 µS/cm auf, wobei der Mittelwert aller Proben 24,8 µS/cm beträgt. Jedoch gibt es zwischen den einzelnen Bodentypen Unterschiede, die allesamt (p < 0,05) signifikant sind. Die insgesamt hohen Schwankungen des Wertebereiches, zwischen 6 und 251 µS/cm, mit einem geringen Median von 12,7 führen dazu, dass die Leitfähigkeit nicht normal verteilt ist. Es gibt viele positive Ausreißer, die um ein Vielfaches über dem Mittelwert liegen (s. Abb. 29). Viele Ausreißer können den hydromorphen Böden zugeordnet werden, die mit Werten zwischen 40 und 200 µS/cm die höchste Spannweite und mit 89,6 µS/cm den höchsten Mittelwert der einzelnen Bodentypen besitzen. Trotz der hohen Spannweite weisen die hydromorphen Böden keine Ausreißer auf, was im Gegensatz zu den drei anderen

Bodentypen, zu einer Normalverteilung führt (p = 0,444). Die durchschnittliche Leitfähigkeit der Regosole beträgt 37,8 µS/cm, wobei der Standort 559 mit 251 µS/cm den höchsten Wert erreicht. Damit ist die mittlere Leitfähigkeit der Regosole deutlich geringer, als die der hydromorphen Böden, aber auch mehr als doppelt so hoch, wie die der beiden Arenosoltypen. Der Arenosoltyp I weist mit durchschnittlich 9,7 µS/cm die niedrigste Leitfähigkeit auf und unterscheidet sich somit signifikant (p < 0,005) vom Arenosoltyp II, dessen mittlere Leitfähigkeit 15,5 µS/cm beträgt.

Die Leitfähigkeit korreliert stark positiv mit dem Kalium- und stark negativ mit dem Calziumgehalt. Weitere positiv mittlere Korrelationen, gibt es unter anderem mit den Stickstoffparametern, dem Schluff- und Tongehalt sowie mit den Bäumen/ha, während der Sand- und Aluminiumgehalt mittel negativ mit der Leitfähigkeit korreliert (s. Tab. 14).

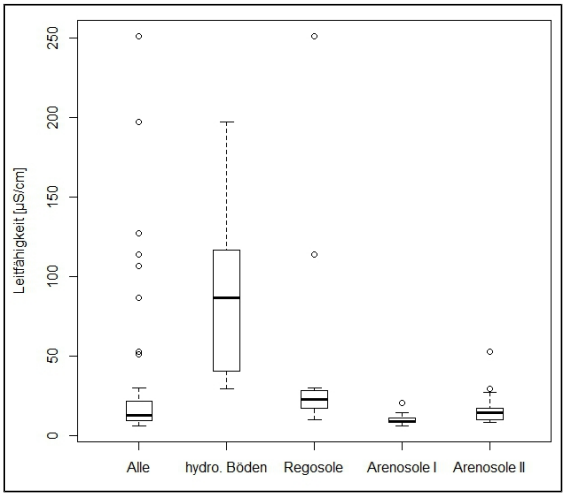


Abb. 29: Vergleich der Leitfähigkeit der einzelnen Bodentypen

Tab. 14: Signifikante Korrelationen der Leitfähigkeit (ab |rho| > 0,5, p < 0,00)

Parameter	rho	Parameter	rho	Parameter	rho
Ca^{2+}	-0,706	KAKpot	0,669	Ton	0,558
K^{+}	0,704	HG	0,654	NH_4^{+}	0,532
NO_3^{-}	0,698	H	0,611	Al^{3+}	-0,532
Sand	-0,689	BS	0,587	Bäume/ha	0,523
Mg^{2+}	0,683	Dichte	-0,568	N	0,519
Schluff	0,674	WkMax	0,558	C/N	0,501

4.3.2.3 Kohlenstoff- und Humusgehalt

Alle Kohlenstoffgehalte der Standorte sind < 2 % und werden somit, laut LANDON 1991, als sehr niedrig eingestuft. Die höchsten Werte verzeichnen die hydromorphen Böden, gefolgt von den Regosolen, während die Arenosole die niedrigsten Kohlenstoffgehalte aufweisen. Dabei unterscheiden sich die einzelnen Werte, mit Ausnahme der beiden Arenosolstandorte signifikant. Beim Humusgehalt, der aus dem Kohlenstoffgehalt berechnet wurde (s. Kap. 3.2.6), zeigt sich demzufolge die gleiche Verteilung (s. Abb. 30)

Mit Ausnahme der sieben hydromorphen Standorte, die laut AD-HOC-AG BODEN 2005, mit Humusgehalten zwischen 1 und 2 %, als schwach humos bezeichnet werden, sind die restlichen Proben mit Werten < 1 % sehr schwach humos (s. Tab. 15).

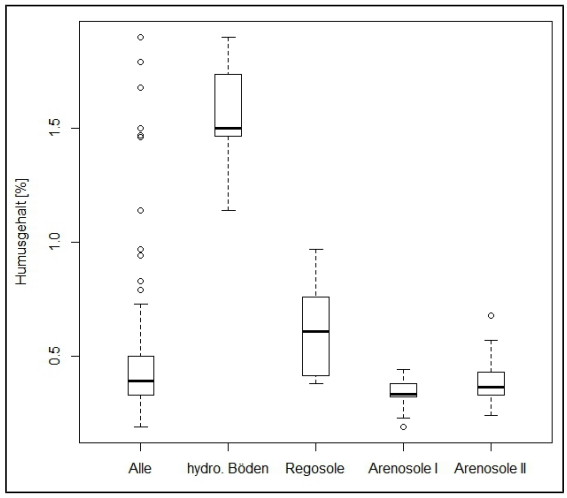


Abb. 30: Vergleich der Humusgehalte der einzelnen Bodentypen

Tab. 15: Bewertung des Humusgehaltes
(eigene Darstellung nach AD-HOC-AG BODEN 2005)

Bewertung	Humusgehalt		Anzahl			
	[%]	alle	hydro. Böden	Regosole	Arenosol I	Arenosol II
sehr stark humos	8 - 15	0	0	0	0	0
stark humos	4 - 8	0	0	0	0	0
mäßig humos	2 - 4	0	0	0	0	0
schwach humos	1 - 2	7	7	0	0	0
sehr schwach humos	< 1	0	0	19	28	30
Summe		84	7	19	28	30
Mittelwert [%]		0,52	1,56	0,62	0,34	0,39

Der Humusgehalt korreliert stark positiv mit dem Wasserstoff-, Calzium- und Magnesiumgehalt sowie mit der KAKpot. Mittlere gleichsinnige Beziehungen werden unter anderem, mit dem Schluff- und Tonanteil, der Anzahl der Bäume/ha oder mit den Nitrat- und Ammoniumgehalten erzielt. Negativ zum Humusgehalt korrelieren der Sandanteil sowie die effektive Lagerungsdichte (s. Tab. 16).

Tab. 16: Signifikante Korrelationen des Humusgehaltes (ab |rho| > 0,5, p < 0,00)

Parameter	rho	Parameter	rho	Parameter	rho
H	0,756	Schluff	0,694	Ton	0,567
KAKpot	0,736	Leitfähigkeit	0,654	NH_4^+	0,562
Sand	-0,717	K^+	0,647	WkMax	0,537
Ca^{2+}	0,713	Dichte	-0,626	NO_3^-	0,506
Mg^{2+}	0,704	Bäume/ha	0,573		

4.3.2.4 Stickstoff

Die Stickstoff-, Nitrat- und Ammoniumgehalte weisen insgesamt einige Ausreißer auf, sodass diese Parameter nicht einer Normalverteilung unterliegen (p < 0,05). Bei den meisten Ausreißern, handelt es sich um die hydromorphen Standorte, die sowohl bei dem Stickstoffgehalt (s. Abb. 31), als auch bei den Nitrat- und Ammoniumgehalten die höchsten Werte haben. Die Stickstoffwerte der hydromorphen Böden, unterscheiden sich signifikant von den Regosolen, die die zweithöchsten Stickstoffgehalte aufweisen, bei denen der Standort 559, bezüglich der Nitrat- und Ammoniumwerte, sehr stark ausreißt. Signifikant geringer sind die Stickstoffparameter der beiden Arenosoltypen (p > 0,05), die keine signifikanten Unterschiede aufweisen.

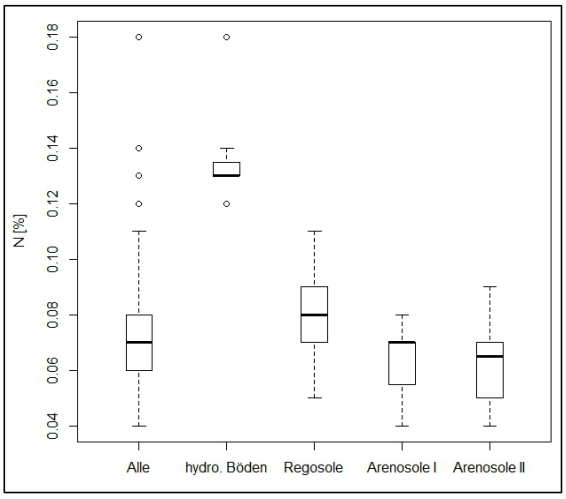


Abb. 31: Vergleich der Stickstoffgehalte der einzelnen Bodentypen

Insgesamt sind die Stickstoffwerte, bei 73 von 84 Standorten mit < 0,1 % sehr gering. Bei den restlichen elf Standorten (davon die sieben hydromorphen sowie vier Regosolstandorte) liegen diese zwischen 0,1 und 0,2 % und können somit, laut LANDON 1991, als gering bewertet werden (s. Tab. 18).

Der Stickstoffgehalt [%] korreliert (ab |rho| > 0,5, p < 0,00) positiv mit dem Humusgehalt, der Leitfähigkeit, dem Schluff- und Tonanteil sowie dem Nitratgehalt, eine negative Korrelation wird mit dem Sandanteil erreicht (s. Tab. 17).

Tab. 17: Signifikante Korrelationen des Stickstoffgehaltes (ab |rho| > 0,5, p < 0,00)

Parameter	rho	Parameter	rho
HG	0,623	NO_3^-	0,541
Sand	-0,581	Leitfähigkeit	0,519
Schluff	0,545	Ton	0,505

Tab. 18: Bewertung des Stickstoffgehaltes
(eigene Darstellung nach LANDON 1991)

Bewertung	N		Anzahl			
	[%]	alle	hydro. Böden	Regosole	Arenosol I	Arenosol II
sehr hoch	> 1	0	0	0	0	0
hoch	0,5 - 1	0	0	0	0	0
mittel	0.2 – 0.5	0	0	0	0	0
gering	0,1 – 0,2	11	7	4	0	0
sehr gering	< 0,1	73	0	15	28	30
Summe		84	7	19	28	30
Mittelwert [%]		0,07	0,14	0,08	0,06	0,06
MW NO_3^- [mg/kg]		14,9	75,52	26,36	2,65	4,94
MW NH_4^+ [mg/kg]		4,35	16,49	4,88	2,77	2,66

4.3.2.5 C/N-Verhältnis

Die C/N-Verhältnisse aller Standorte sind < 10 und schwanken bei einem Mittelwert von 4 zwischen 1,56 (Standort 576) und 8,09 (Standort 529), wobei sich die C/N-Werte der einzelnen Bodentypen (p < 0,05), mit Ausnahme der beiden Arenosoltypen (p = 0,12), signifikant unterscheiden. Dabei weisen die hydromorphen Böden, mit einem durchschnittlichen C/N-Verhältnis von 6,79, die höchsten Werte auf, die nächsthöheren Werte (Mittelwert 4,51) werden von den Regosolen erreicht. Die beiden Arenosoltypen haben sehr enge C/N-Verhältnisse, deren Werte zwischen 2 und 5, bei Mittelwerten von ungefähr 3,5, schwanken (s. Abb. 32). Im Gegensatz zu allen Standorten im Ganzen gesehen, sind die C/N-Verhältnisse der einzelnen Bodentypen normal verteilt (p > 0,05).

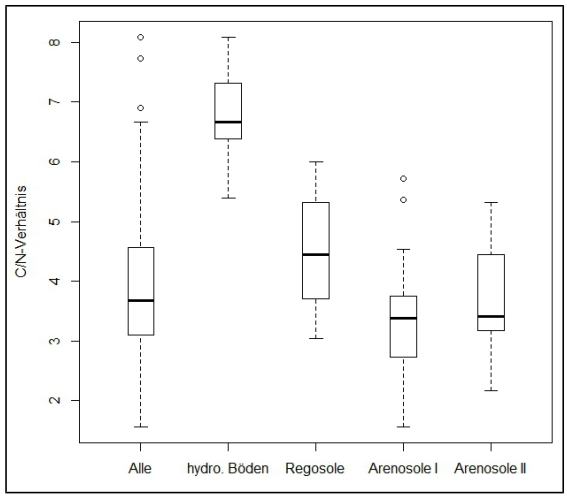


Abb. 32: Vergleich der C/N-Verhältnisse der einzelnen Bodentypen

4.3.2.6 Phosphat

Fast alle Standorte weisen einen Phosphatgehalt < 1 mg/kg auf (s. Abb. 33). Lediglich bei vier Standorten wird der Phosphatgehalt von 1 mg/kg überschritten, wobei Standort 550 mit über 3 mg/kg Phosphat einen deutlich höheren Wert aufweist. Zwischen den einzelnen Bodentypen gibt es keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$). Weder die Phosphatgehalte von allen Standorten, noch von den einzelnen Bodentypen, unterliegen nach dem Shapiro-Wilk-Test einer Normalverteilung. Der Phosphatgehalt korreliert mit keiner anderen Variablen mit $|rho| > 0,5$.

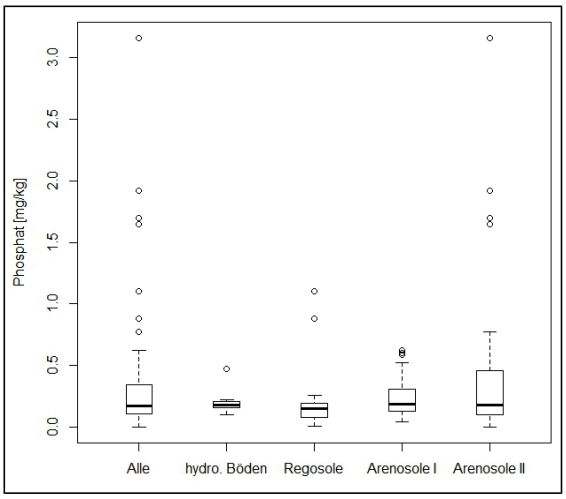


Abb. 33: Vergleich der Phosphatgehalte der einzelnen Bodentypen

4.3.2.7 Kationenaustauschkapazität und Basensättigung

Die Summe der KAKpot (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}, Al^{3+} und Fe^{3+}) schwankt zwischen 1,03 cmol/kg und 20,9 cmol/kg (Standort 529), wobei 75 % aller Proben, Werte < 3 cmol/kg aufweisen. Dabei werden die höheren Werte, den hydromorphen Böden zugeordnet, deren Wertebereich zwischen 5 und 11cmol/kg liegt und laut LANDON 1991 als gering eingestuft wird (s. Tab. 19). Außerdem enthält die Gruppe der hydromorphen Böden auch den Außreißerstandort 529, dessen KAKpot-Wert als mittel eingeordnet wird. Die KAKpot der anderen Bodentypen ist bei allen Standorten < 5 cmol/kg und wird somit als sehr gering bewertet. Jedoch gibt es zwischen den einzelnen Bodentypen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$). Mit einer durchschnittlichen KAKpot von 1,33 cmol/kg, haben die Arenosolstandorte I die niedrigsten Werte, wobei die Streuung sehr gering ausfällt (s. Abb. 34) und somit eine Normalverteilung vorliegt. Ebenfalls normal verteilt, sind die KAKpot-Werte der Regosolstandorte, deren durchschnittlicher Wert mit 2,56 cmol/kg signifikant ein wenig höher, als der von den Arenosolstandorten II, mit 2,05 cmol/kg, ausfällt.

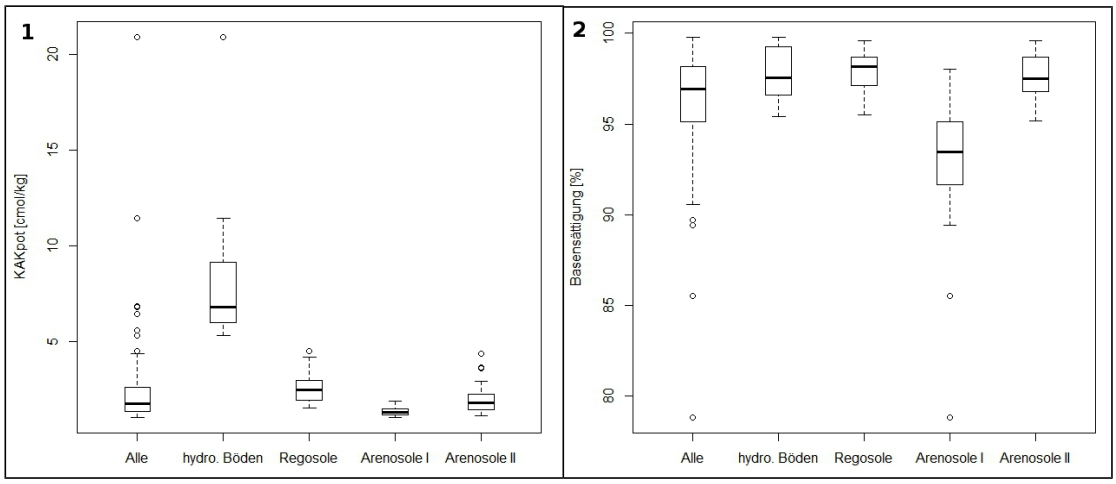


Abb. 34: Vergleich der KAKpot- (1) und Basensättigung (2) der einzelnen Bodentypen

Die Basensättigung (prozentualer Anteil von Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} und Na^{+} an der KAKpot) ist bei fast allen Proben > 90 % (s. Abb. 34). Nur die vier Standorte 544, 563, 576 und 577, des Arenosoltyps I, weisen mit 78,8, 85,5, 89,4 und 89,9 % geringere Werte als 90 % auf. Aus diesem Grund unterscheiden sich die hydromorphen Böden, die Regosole sowie der Arenosoltyp II, signifikant vom Arenosoltyp I ($p < 0,05$), der eine mittlere Basensättigung von 92,75 % aufweist. Bei den anderen drei Bodentypen beträgt diese jeweils rund 97,5 %, weshalb es keine signifikanten Unterschiede gibt ($p > 0,05$).

Die KAKpot korreliert stark positiv mit dem Humusgehalt, ein mittlerer positiver Zusammenhang wird mit der Leitfähigkeit, dem Schluff- und Tonanteil sowie mit dem C/N-Verhältnis erreicht, während der Sandanteil negativ korreliert (s. Tab. 20).

Tab. 19: Bewertung der KAKpot
(eigene Darstellung nach LANDON 1991)

Bewertung	KAKpot			Anzahl		
	[cmol/kg]	alle	hydro. Böden	Regosole	Arenosol I	Arenosol II
sehr hoch	> 40	0	0	0	0	0
hoch	25 - 40	0	0	0	0	0
mittel	15 - 25	1	1	0	0	0
gering	5 - 15	6	6	0	0	0
sehr gering	< 5	77	0	19	28	30
Summe		84	7	19	28	30
Mittelwert [cmol/kg]		2,51	9,04	2,56	1,33	2,05

Tab. 20: Signifikante Korrelationen der KAKpot (ab |rho| > 0,5, p < 0,00)

Parameter	rho	Parameter	rho
HG	0,734	Ton	0,649
Leitfähigkeit	0,669	C/N	0,597
Sand	-0,652	Schluff	0,564

Die Anteile der einzelnen Kationen an der Basensättigung (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}) und an der gesamten KAKpot (zusätzlich Al^{3+} und Fe^{3+}), sind in den folgenden Abbildungen 35 und 36 dargestellt. Bei der Basensättigung nimmt Calzium mit 54 % (Arenosol I Standorte) bis 68 % (hydromorphe Böden) den größten Anteil ein, gefolgt von Magnesium mit jeweils rund 20 %. Die Natrium- und Kaliumanteile, fallen mit Werten von jeweils 5 bis 10 %, deutlich geringer aus. Eine Ausnahme bildet hier der Natriumanteil der Arenosol I Standorte, der mit rund 15 % deutlich höher gegenüber den anderen Bodentypen ausfällt.

Insgesamt weisen die Eisen- sowie Alumiumgehalte jeweils nur knapp 1 % an der KAKpot auf, nur beim Arenosoltyp I ist der Aluminiumanteil, mit rund 5 %, deutlich höher als bei den anderen. Gegenüber den anderen Kationen, spielt Aluminium hingegen beim Arenosoltyp I nur eine untergeordnete Rolle, denn die anderen Kationen weisen deutlich größere Anteile auf (s. Abb. 36).

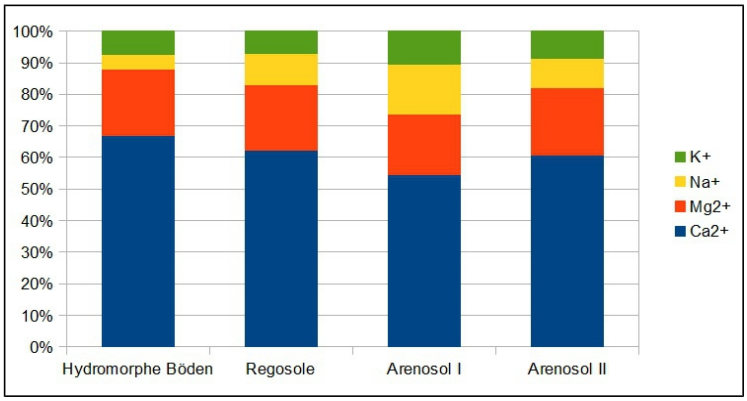


Abb. 35: Vergleich der Anteile der Kationen an der Basensättigung der einzelnen Bodentypen

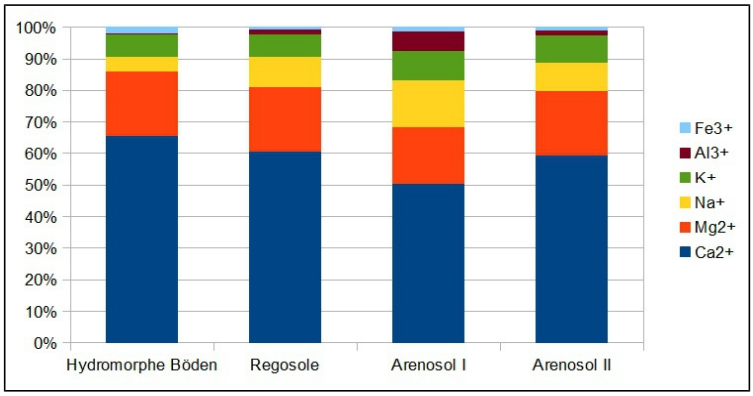


Abb. 36: Vergleich der Anteile der Kationen an der KAKpot der einzelnen Bodentypen

Nachfolgend werden die Verteilungen der Kationen in den verschiedenen Bodentypen (s. Abb. 37) dargestellt und deren Gehalte nach LANDON 1991, bewertet (s. Tab. 21). Die Ca^{2+}-, Mg^{2+}-, K^{+}-, Na^{+}-Gehalte der einzelnen Bodentypen, unterscheiden sich signifikant voneinander ($p < 0,05$). Lediglich zwischen dem K^{+}-Gehalt der Regosole und der Standorte des Arenosoltyps II, gibt es keinen signifikanten Unterschied ($p = 0,38$). Bezüglich der Mg^{2+}- und K^{+}-Gehalte, weisen die hydromorphen Böden jeweils die höchsten Werte auf und werden somit eine Stufe höher als die anderen Bodentypen bewertet (hohe Mg^{2+}- und K^{+}-Gehalte). Auch der Ca^{2+}-Gehalt der hydromorphen Böden ist gegenüber den anderen Bodentypen, mit 6,26 cmol/kg, deutlich höher, wird aber ebenfalls als mittel bewertet (s. Tab. 21). Der Arenosoltyp I weist mit durchschnittlich 0,67 cmol/kg Ca^{2+}, 0,24 cmol/kg Mg^{2+} und 0,12 cmol/kg K^{+}, jeweils die geringsten Werte auf. Die Na^{+}-Gehalte der einzelnen Bodentypen, unterscheiden sich nicht signifikant voneinander und liegen allesamt mit 0,2 cmol/kg unter dem von LANDON 1991 vorgeschlagenen Grenzwert von 1 cmol/kg.

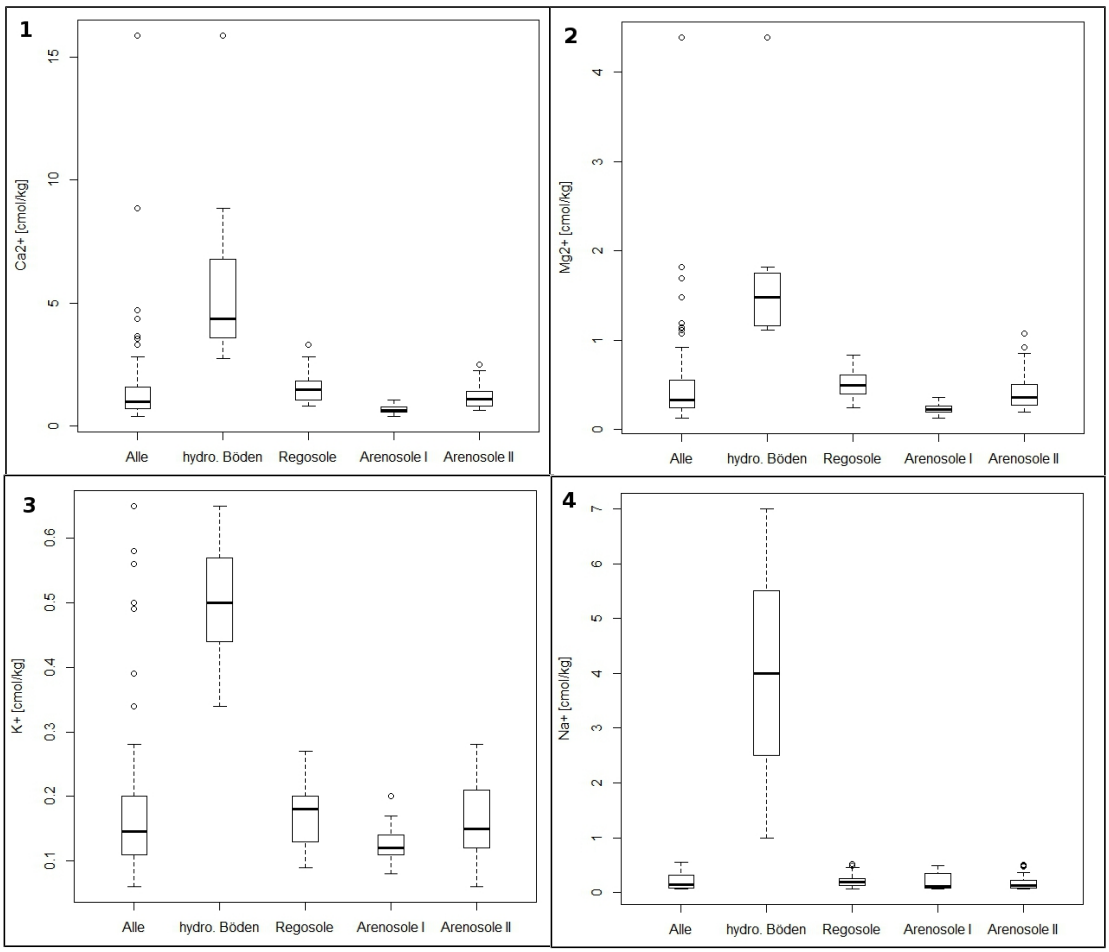


Abb. 37: Vergleich der Ca^{2+}-(1), Mg^{2+}-(2), K^{+}-(3) und Na^{+}-Gehalte (4) der einzelnen Bodentypen

Tab. 21: Bewertung der Nährstoffe
(eigene Darstellung nach LANDON 1991)

Bewertung	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Anzahl (Ca^{2+}/Mg^{2+}/K^{+})				
				alle	hydro. Böden	Regosol	Arenosol I	Arenosol II
hoch	> 10	> 0,5	> 0,4	1/11/20	1/7/5	0/10/0	0/0/0	0/9/0
mittel	> 0,2	> 0,2	> 0,2	83/30/57	6/0/2	19/9/8	28/23/1	30/21/9
gering	< 0,2	< 0,2	< 0,2	0/43/7	0/0/0	0/0/11	0/5/27	0/0/21
Summe				84/84/84	7/7/7	19/19/19	28/28/28	30/30/30
Mittelwert [cmol/kg]	Ca^{2+}			1,54	6,26	1,6	0,67	1,22
	Mg^{2+}			0,5	1,83	0,51	0,24	0,44
	K^{+}			0,18	0,5	0,18	0,12	0,16

Alle Standorte weisen ein Ca-Mg-Verhältnis von circa 3 : 1 auf (Mittelwert 2,99 : 1), nur beim Arenosoltyp I liegt es, mit 2,9 : 1, knapp < 3 : 1. Jedoch gibt es zwischen den einzelnen Bodentypen keine signifikanten Unterschiede. Das K-Mg-Verhältnis liegt bei allen Standorten < 1 : 1 (Mittelwert 0,44 : 1), wobei sich die Bodentypen jeweils signifikant vom Arenosoltyp I unterscheiden, der mit 0,54 : 1 ein signifikant höheres K-Mg-Verhältnis aufweist.

4.4 Vegetationsparameter

4.4.1 Vegetationszusammensetzung

Bei den Vegetationsaufnahmen wurden insgesamt 24 verschiedene Arten ermittelt, wobei 15 Arten auf allen Standorten weniger als 20-mal vorkommen. Diese seltenen Arten (*Acacia albida*, *Acacia nilotica var. adansonii, Acacia nilotica var. tomentosa, Acacia pennata, Adansonia digitata, Combretum nigricans, Commiphora africana, Bauhinia rufescens, Grewia bicolor, Mitragyna inermis, Piliostigma reticulatum, Sclerocarya birrea, Sterculia setigera, Tamarindus indica, Ziziphus mauritiana)* sind meist in den Senken auf den hydromorphen Böden zu finden, wo günstigste Bedingungen vorherrschen und sich somit eine hohe Artenvielfalt ausbildete (s. Kap. 2.6). Da es sich nur um vereinzeltes Auftreten dieser Arten handelt, beschränken sich die folgenden Ausführungen auf jene acht Arten, die mindestens 50-mal auftreten und somit auch für die Bodeneigenschaften eine Rolle spielen. Da *Boscia senegalensis* überwiegend als Strauch < 4 m Höhe auftritt, wird diese Species ebenfalls nicht weiter berücksichtigt, obwohl insgesamt mehr als 50, insbesondere auf den Regosolen vorkommen.

Rund 35 % aller aufgenommenen Bäume gehören der Art *Balanites aegyptiaca* an, die die dominierende Art im Untersuchungsgebiet darstellt. Weitere dominierende Arten mit jeweils 20 %, sind *Acacia tortilis* und *Combretum glutinosum*, die zusammen mit *Balanites aegyptiaca* fast drei Viertel aller aufgenommenen Bäume abdecken. Bezüglich der Vegetationszusammensetzung der acht Arten, auf den einzelnen Bodentypen (s. Abb. 38), gibt es einige signifikante Unterschiede:

- auf Regosolen tritt *Combretum micranthum* signifikant häufiger auf, als auf den drei anderen Bodentypen
- im Arenosoltyp I gibt es signifikant mehr *Combretum glutinosum,* als im Arenosoltyp II
- auf Regosolen kommt *Pterocarpus lucens* signifikant häufiger vor, als auf den beiden Arenosoltypen, bezüglich der hydromorphen Böden kein Unterschied ($p = 0{,}052$)
- *Acacia seyal* tritt signifikant häufiger auf hydromorphe Böden auf
- *Guiera senegalensis* kommt auf Regosolstandorten signifikant mehr vor, als auf den beiden Arenosolstandorten

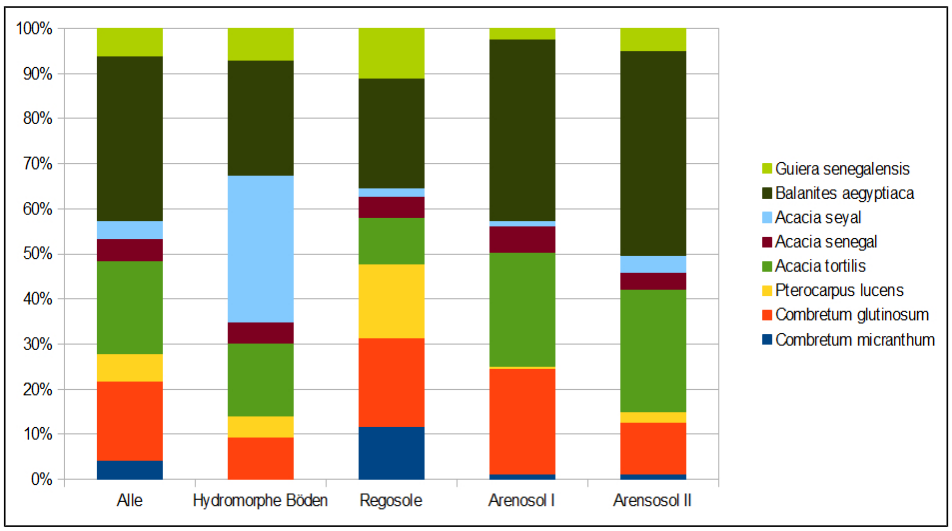


Abb. 38: Durchschnittliche Vegetationszusammensetzung der acht Hauptarten

Bei den drei Arten *Acacia tortilis*, *Acacia senegal* und *Balanites aegyptiaca,* gibt es kein signifikantes Auftreten auf einem bestimmten Bodentyp. Auffällig ist jedoch, dass auf jedem Bodentyp, mit Ausnahme der hydromorphen Böden, wo *Acacia seyal* überwiegt, *Balanites aegyptiaca* die vorherrschende Spezies darstellt.

4.4.2 Einfluss von Leguminosen

Leguminosen zeichnen sich dadurch aus, dass sie den atmosphärischen Stickstoff (N_2), mittels Knöllchenbakterien fixieren und in für Pflanzen verfügbare Stickstoffverbindungen umwandeln (ROWELL 1994). Dieser Aspekt lässt vermuten, dass die Standorte mit Leguminosen höhere Stickstoffgehalte aufweisen. Das wurde beispielhaft für Akazien und Erdnüsse/Bohnen überprüft, indem verschiedene Stickstoffparameter von Flächen, wo diese Arten vorkommen, mit denen, wo sie nicht vorkommen, verglichen wurden (s. Abb. 39).

Insgesamt sieben verschiedene Akazienarten (*Acacia tortilis, Acacia senegal, Acacia nilotica var. Adansonii, Acacia seyal, Acacia albida, Acacia nilotica var. Tomentosa, Acacia pennata*) kommen auf 59 Standorten vor, wobei nur Bäume ab einer Höhe von 4 m berücksichtigt wurden. Demgegenüber stehen 25 Standorte ohne Akazien. Zusätzlich wurden die sieben Standorte (508, 529, 541, 561, 565, 567, 568) heraus kristallisiert, wo Akazienarten eine sehr vorherrschende Rolle einnehmen und mindestens zehn mal auftreten (entspricht vielen Akazien). Beispielhaft wird in der Abbildung 39 (1) der Stickstoffgehalt [%] der Böden ohne Akazien, mit Akazien und mit vielen Akazien dargestellt. Dabei zeigen sich keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$).

Ebenfalls keine signifikanten Unterschiede, gibt es bei den anderen Parametern NO_3^--, NH_4^+-, Humusgehalt und C/N, wobei die Mittelwerte der einzelnen Variablen sowie die berechneten p-Werte des U-Testes in der Tabelle 22 dargestellt sind.

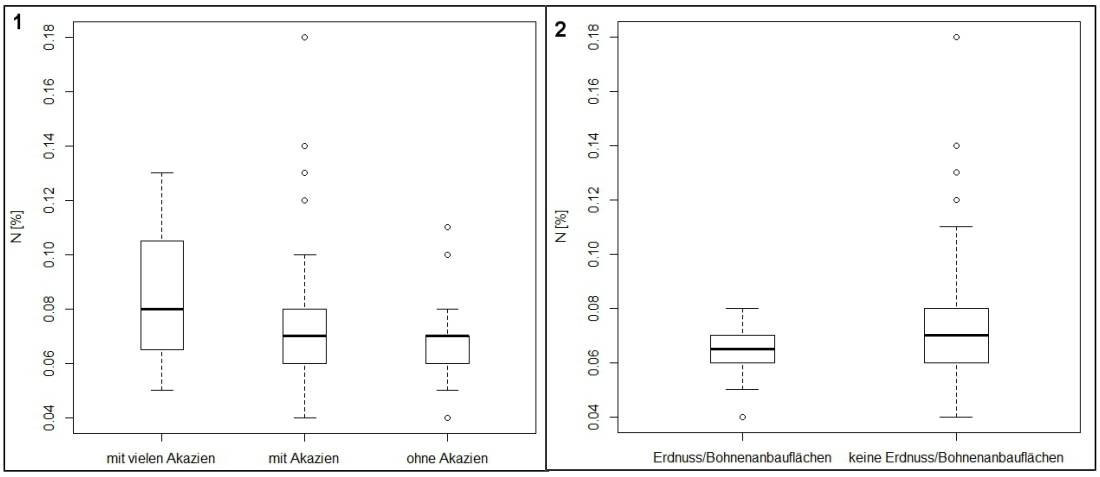


Abb. 39: Vergleich des Stickstoffgehaltes der Böden zwischen Leguminosen und leguminosenfreien Standorten

Als Erdnuss-/Bohnenstandorte wurden jene ausgewählt, an denen Erdnüsse (beziehungsweise Bohnen) angebaut wurden oder wo es offensichtlich war, dass es sich um eine Erdnuss-/Bohnenbrache handelt. Insgesamt wurden folgende elf Standorte heraus kristallisiert: 528, 548, 550, 551, 566, 567, 568, 575, 576, 579, 580, 583 und diese mit den 73 Standorten, ohne Erdnuss-/Bohneneinfluss, bezüglich der Parameter Stickstoff-, NO_3^--, NH_4^+-, Humusgehalt und C/N verglichen. Dabei zeigt sich bei keinem Parameter ein signifikant höherer Wert (s. Abb. 39 (2)) (s. Tab. 22).

Tab. 22: Mittelwerte und p-values für die einzelnen Parameter

	viele Akazien	keine Akazien	wenig Akazien	Erdnuss/ Bohnen ja	Erdnuss/ Bohnen nein
N [%]	0,086	0,0672	0,075	0,063	0,074
	p = 0,15	p = 0,3		p = 0,15	
NO_3^- [mg/kg]	11,32	5,846	18,74	3,7	16,77
	p = 0,13	p = 0,41		p = 0,16	
NH_4^+ [mg/kg]	3,61	3,15	4,86	1,71	4,79
	p = 0,51	p = 0,64		p < 0,00	
C/N	4,86	3,79	4,13	3,08	4,19
	p = 0,19	p = 0,44		p < 0,00	
HG [%]	0,77	0,44	0,56	0,32	0,56
	p = 0,06	p = 0,26		p < 0,00	

4.5 Umwelt- und Fernerkundungsparameter

4.5.1 Aufnahmesituation

Von jedem Standort wurden während des Geländeaufenthaltes die Koordinaten Latitude (Nord-Süd-Lage) und Longitude (Ost-West-Lage) ermittelt, wobei die Standorte der einzelnen Bodentypen gleichmäßig in der Nord-Süd-Ausdehnung des Untersuchungsgebietes verteilt liegen, sodass es keine signifikanten Unterschiede gibt. Im Gegensatz dazu, befinden sich die Regosol- sowie die Arenosolstandorte I signifikant weiter östlich als die Arenosolstandorte II.

Die aus der SRTM ermittelten Höhendaten, der einzelnen Standorte, schwanken zwischen 11 m (Standort 515, im Flussbett des Ferlos gelegen) und 56 m (Standort 546, im Westen von Djambal), wobei die mittlere Höhe aller untersuchten Standorte 33,5 m beträgt. Dabei liegen die hydromorphen Böden mit einer Durchschnittshöhe von 21,1 m signifikant niedriger, als die anderen Bodentypen (s. Abb. 40). Ebenfalls unterscheidet sich die Durchschnittshöhe der Regosole (39,1 m) signifikant von denen der Arenosol I Standorte (33,8 m).

Die aus dem DGM der SRTM ermittelte Hangneigung, zeigt bei 72 Standorten 0 °, bei 11 Standorten 1 ° sowie beim Standort 576, 3 °. Aufgrund der geringen Hangneigung sowie der schlechten Auflösung des DGM, kann die Exposition in diesem Fall vernachlässigt werden und wird genau wie die Hangneigung, im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht mehr berücksichtigt.

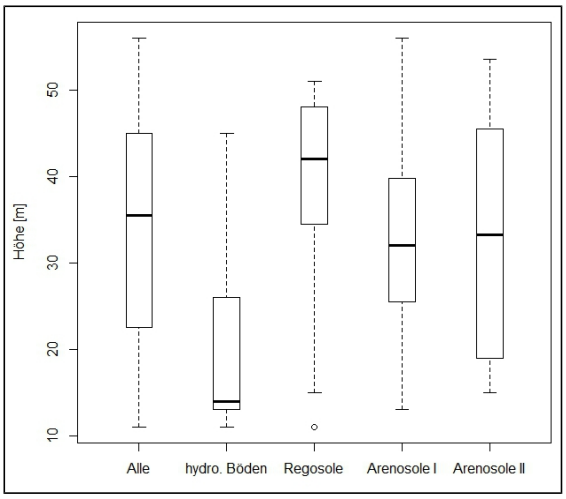


Abb. 40: Vergleich der Höhenlage der einzelnen Bodentypen

4.5.2 Distanzberechnungen

Für jeden Standort wurde die Entfernung zur nächsten Siedlung, zur nächsten Forage und zum nächsten Flussbett ermittelt (s. Kap. 3.3.4). Die Ergebnisse sind anhand der Abbildung 41 bezüglich der einzelnen ermittelten Bodentypen dargestellt.

Im Untersuchungsgebiet wurden insgesamt 114 Siedlungen kartiert, wobei Linguère mit einer Fläche von rund 4,5 km² die größte ist. Die meisten der Siedlungen, vor allem die größeren wie Linguère, Kadji, Nguith, Ndilla oder Doundoji, befinden sich in der Nähe von Flüssen beziehungsweise Flussbetten (s. Abb. 6, 10). Bei der Siedlungsdichte ist auffällig, dass diese zum Osten des Untersuchungsgebietes abnimmt (s. Abb. 10), insbesondere in der Regosolzone sind nur wenige Siedlungen anzutreffen, weshalb dort der Abstand der Aufnahmeflächen mit durchschnittlich 2400 m am größten ausfällt und sich signifikant vom Arenosoltyp II unterscheidet. Ebenfalls signifikant ($p < 0,05$) unterschiedlich, sind die Siedlungsdistanzen zwischen den beiden Arenosoltypen, wobei der Arenosoltyp I, mit durchschnittlich 1814 m, eine höhere mittlere Entfernung zur nächsten Siedlung, als der Arenosoltyp II (1553 m) aufweist. Die mittlere Entfernung aller Standorte zur nächsten Siedlung beträgt 1860 m (s. Abb. 41 (1))

Im Untersuchungsgebiet befindet sich der Ferlo, mit einer Länge von 68,2 km, wobei mehrere Nebenflüsse von ihm abzweigen, sodass das episodische Fließgewässernetz insgesamt eine Länge von knapp 185 km im Untersuchungsgebiet aufweist (s. Abb. 10). Die durchschnittliche Entfernung der Aufnahmeflächen zum nächsten Fluss beziehungsweise Flussbett beträgt 3044 m, wobei sich die Entfernungen der hydromorphen Böden (durchschnittlich 1943 m) und der Regosole (durchschnittlich 3968 m) signifikant unterscheiden. Aufgrund des Standortes 526, der im Süden des Untersuchungsgebietes über 6000 m vom nächsten Fluss entfernt liegt, weisen die hydromorphen Böden mit knapp 2000 m eine scheinbar hohe Distanz auf, obwohl die anderen sechs Standorte im Flussbett des Ferlos liegen (s. Abb. 41 (2)).

Am Rand der großen Siedlungen befinden sich meist die Forages, von denen im gesamten Untersuchungsgebiet insgesamt 26 identifiziert wurden. Sie liegen alle gleichmäßig verteilt, lediglich im Raum Linguère, lässt sich eine leichte Anhäufung erkennen (s. Abb. 10). Die mittlere Entfernung der Aufnahmeflächen zu den Forages beträgt 3346 m, wobei es zwischen den einzelnen Bodentypen keine signifikanten Unterschiede gibt (s. Abb. 41 (3)).

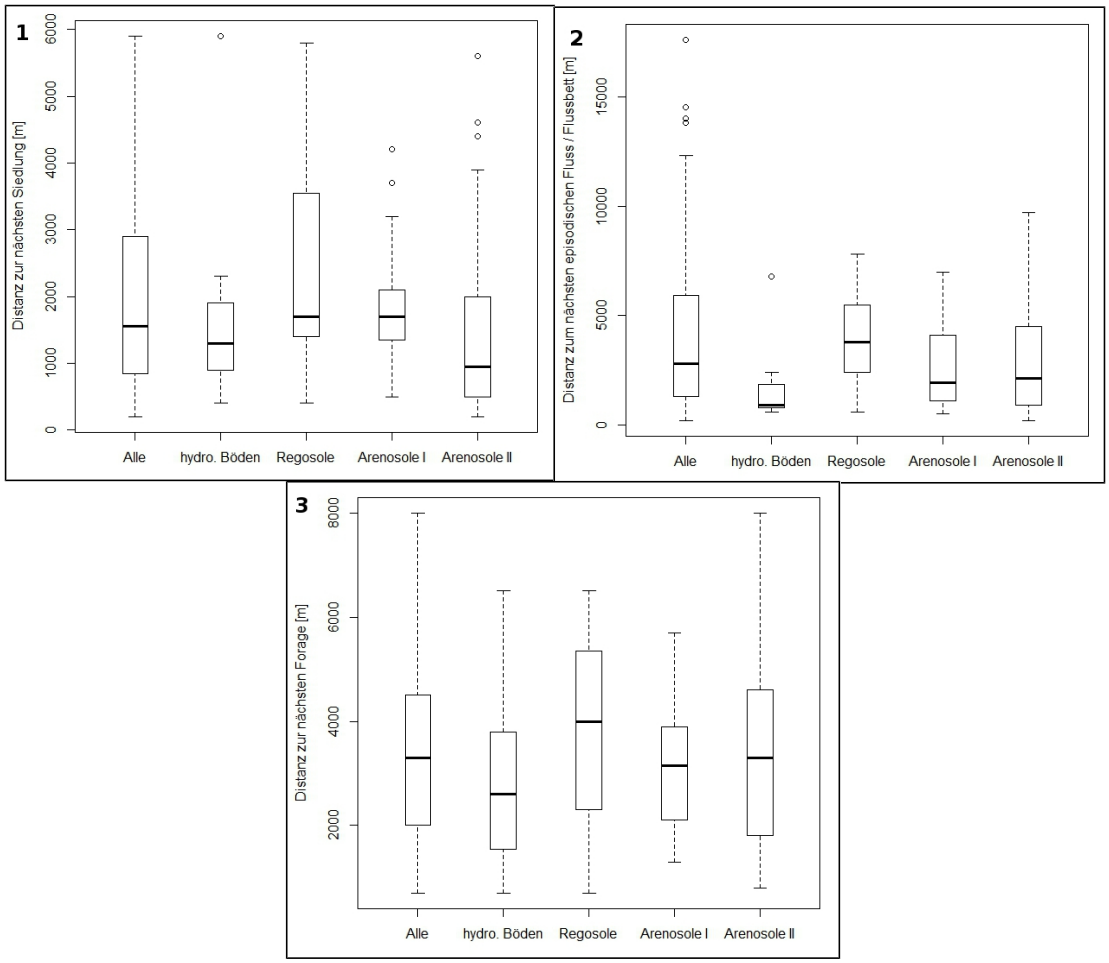


Abb. 41: Vergleich der Distanzen zur nächsten Siedlung (1), Fluss (2) und Forage (3)

4.5.3 Beweidungsintensität und Termiten

Die Beweidungsintensität, bestehend aus Kot, Spuren und Strauchnutzung, schwankt im Untersuchungsgebiet zwischen den Werten 2 (extrem wenig) und 12 (stark), die meisten werden der mittleren Klasse (Werte zwischen 7 und 9) zugeordnet (s. Tab. 23). Zwischen den einzelnen Bodentypen gibt es keine signifikanten Unterschiede (s. Abb. 42 (1)).

Die Standorte weisen durchschnittlich 4,26 Termitenhügel auf, wobei die Anzahl zwischen 0 und 23 schwankt. Zwischen den einzelnen Bodentypen, gibt es keine signifikanten Unterschiede, die durchschnittlich meisten Termitenhügel, mit knapp 6,5, verzeichnen die Regosolstandorte, zu denen auch die Standorte 539 und 525 zählen, die 20 und mehr Termitenhügel besitzen (s. Abb. 42 (2)).

Tab. 23: Bewertung der Beweidungsintensität

Bewertung		Anzahl				
	Wert	alle	hydro. Böden	Regosol	Arenosol I	Arenosol II
extrem stark	13 – 15	0	0	0	0	0
stark	10 - 12	18	0	2	6	10
mittel	7 – 9	36	5	8	12	11
wenig	4 – 6	29	2	9	10	8
extrem wenig	1 - 3	1	0	0	0	1
Summe		84	7	19	28	30
Mittelwert		7,66	7,29	7,1	7,68	8,1

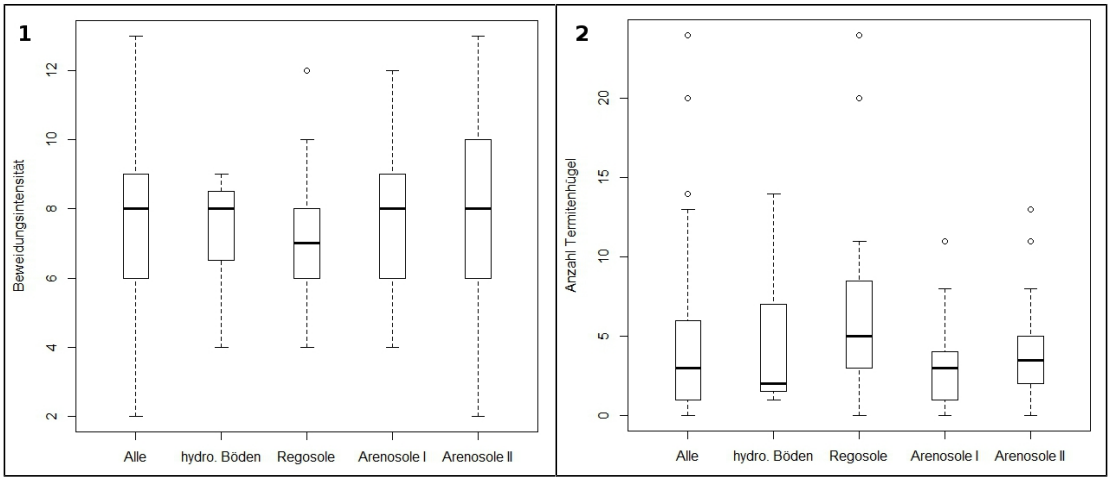


Abb. 42: Vergleich der Beweidungsintensität (1) und Beeinflussung durch Termiten (2)

4.5.4 Bäume/ha und Baumbedeckung

Die Standorte weisen im Durchschnitt 19 Bäume auf (ab 4 m), wobei die Werte der einzelnen Aufnahmeflächen zwischen 0 und 90 sehr stark variieren. Mit durchschnittlich 53 Bäumen/ha haben die hydromorphen Böden die höchste Baumanzahl zu verzeichnen, die sich signifikant von den anderen Bodentypen unterscheidet (s. Abb. 43). Die Werte der Regosolstandorte schwanken sehr stark, da in dieser Gruppe einige Standorte fallen, die keine Vegetation besitzen. Trotzdem weisen sie mit 27, die zweithöchste Anzahl der Bäume/ha auf, die sich signifikant vom Arenosoltyp I unterscheidet.

Bezüglich der Baumbedeckung, weisen die hydromorphen Böden, mit durchschnittlich 15,7 %, den höchsten Wert auf, sodass sich diese Standorte signifikant von den anderen unterscheiden. Die Baumbedeckung der anderen Bodentypen differenziert sich nicht signifikant (jeweils rund 6,5 %) (s. Abb. 43), wobei die Werte der Regosole am meisten schwanken.

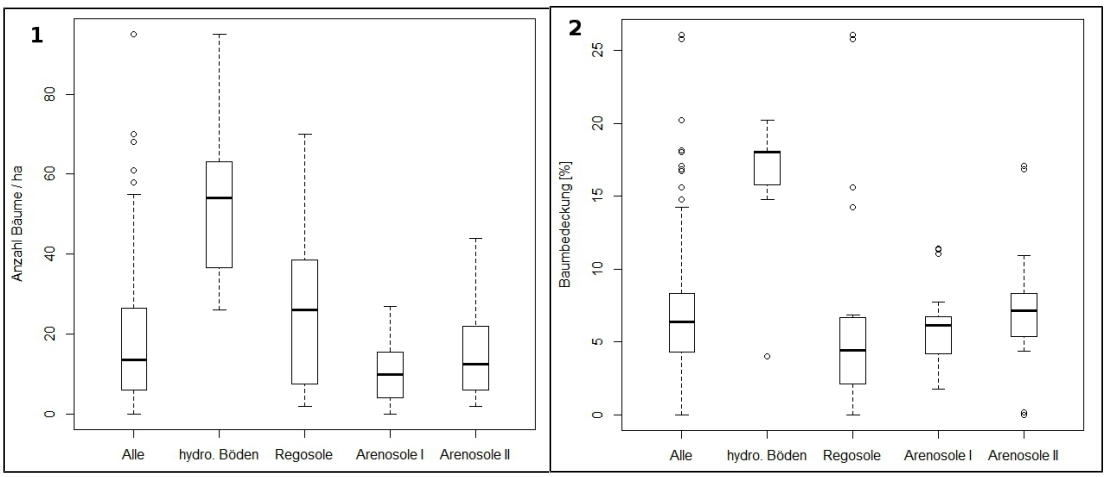


Abb. 43: Vergleich der Bäume/ha (1) und Baumbedeckung (2) der einzelnen Bodentypen

4.5.5 Fernerkundungsparameter

Als zusätzliche Fernerkundungsparameter, wurden die Reflectance der Landsatkanäle 2, 5, und 7, der NDVI und der Tasseled Cap (alles Durchschnittswerte mehrerer Jahren, aus Landsatbildern vom Februar) sowie der Range (Landsat 2010) und der mittlere Niederschlag aus den TRMM-Daten verwendet (s. Kap. 3.3.6).

Der durchschnittliche NDVI korreliert stark (rho = 0,77) mit der Baumbedeckung (s. Tab. 24), sodass sich die Werte der hydromorphen Böden (durchschnittlicher NDVI 0,24) signifikant von den anderen Bodentypen unterscheiden (mittlerer NDVI von 0,19). In diesem Fall unterscheidet sich ebenfalls der NDVI der beiden Arenosoltypen (s. Abb. 44 (1)) signifikant (p = 0,009). Die Produktivität des Jahres 2010 ist, als Range ausgedrückt, ebenfalls bei den hydromorphen Böden, mit 0,39 am höchsten, differenziert sich jedoch signifikant nur von den Werten der Arenosol I Standorte (0,29). Dieses Maß korreliert mit rho = 0,59 mittelmäßig mit dem NDVI. Bei den Reflectance-Werten der Kanäle 2, 5, 7 von Landsat werden die hydromorphen Böden signifikant von den anderen Typen unterschieden, jedoch sind die Werte, gegenüber den restlichen Bodentypen, signifikant geringer. Stellvertretend für die Reflectance-Werte sind die vom Kanal 7 in der Abbildung 44 (2) dargestellt. Auf eine Darstellung der anderen Werte, wird aufgrund hoher Signifikanzen zwischen den einzelnen Parametern (s. Tab. 24), an dieser Stelle verzichtet. Die Brightness-Werte des Tasseled Cap 1 zeigen ein ähnliches Bild, wie die Reflectance-Werte, wobei die hydromorphen Böden signifikant niedrigere Werte, als die anderen aufweisen (s. Abb. 44 (3)).

Wichtige Korrelationen der Umwelt- und Fernerkundungsparameter ab einem |rho|-Wert > 0,5, bei einer Signifikanz von p < 0,00, sind in der Tabelle 24 dargestellt.

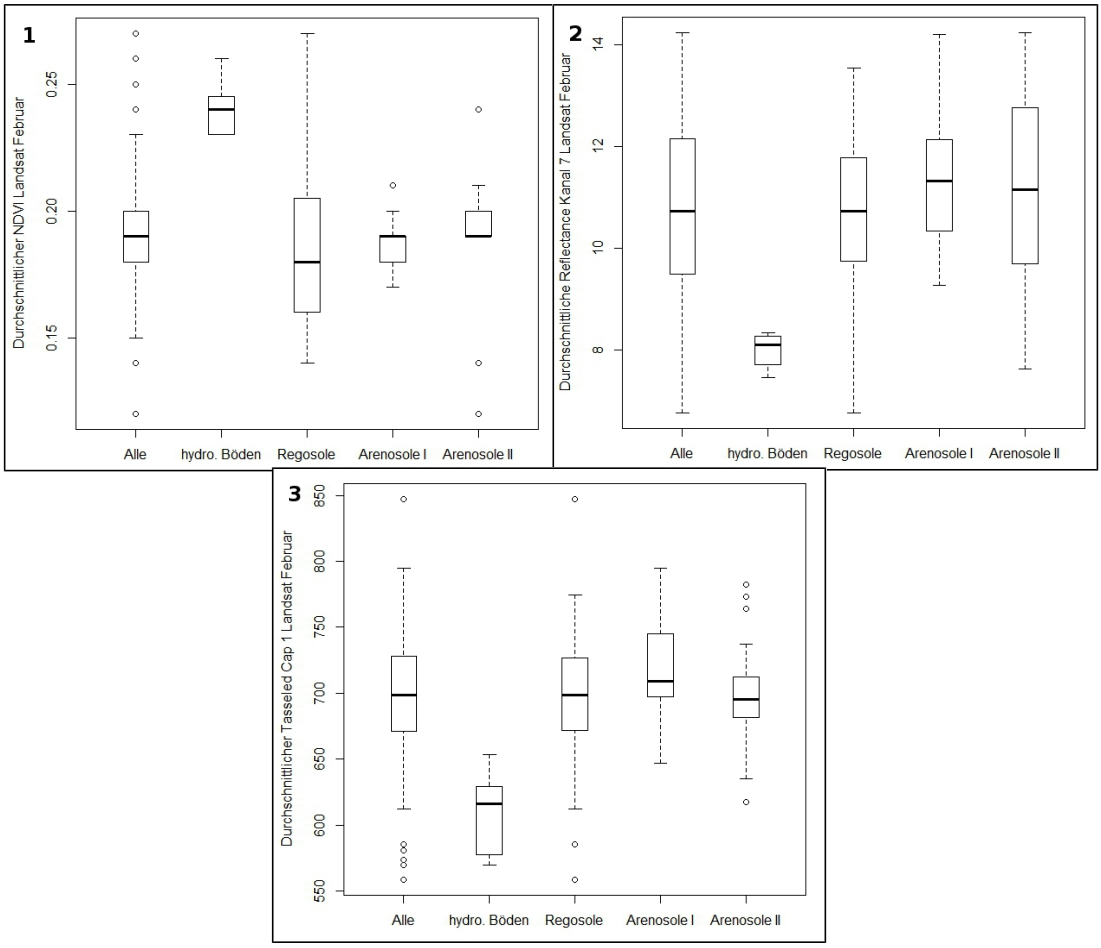


Abb. 44: Vergleich der Fernerkundungsparameter NDVI (1), REFL 7 (2) und TC 1 (3) der einzelnen Bodentypen

Tab. 24: Signifikante Korrelationen der Umwelt- und Fernerkundungsparameter (ab |rho| > 0,5, p < 0,00)

Parameter	rho	Parameter	rho
TRMM – Latitude	- 0,946	Tasseled Cap - Baumbedeckung	- 0,596
REFL 7 – REFL 5	0,936	NDVI - Range	0,590
Höhe – Distanz Fluss	0,844	REFL 5 – C-Gehalt	- 0,580
Tasseled Cap – REFL 5	0,794	Bäume/ha - C-Gehalt	0,573
Baumbedeckung – NDVI	0,777	Bäume/ha – NDVI	0,566
Tasseled Cap – REFL 2	0,761	REFL 7 – C-Gehalt	- 0,560
REFL 5 – Bäume/ha	- 0,740	REFL 5 – REFL 2	0,558
Tasseled Cap – REFL 7	0,739	REFL 7 – REFL 2	0,551
Range - Baumbedeckung	0,733	REFL 5 - Schluffgehalt	- 0,539
REFL 7 - Baumbedeckung	- 0,710	Bäume/ha - Leitfähigkeit	0,523
Tasseled Cap - NDVI	-0,693	Beweidungsintensität – *Balanites*	0,508
REFL 2 - Baumbedeckung	- 0,650	REFL 2 - Range	- 0,508
REFL 5 - Baumbedeckung	- 0,640	Bäume/ha - K-Gehalt	0,505
Tasseled Cap – Bäume/ha	- 0,623	REFL 5 – N-Gehalt	- 0,502
REFL 7 – Bäume/ha	- 0,610		

Alle Standorte weisen einen mittleren Jahresniederschlag von 427 mm (TRMM-Daten) auf, wobei es eine sehr hohe negative Korrelation (rho = - 0,946) bezüglich der Breitenlage im Gradnetz gibt, das heißt, je weiter im Norden der Standort ist, desto weniger Niederschlag fällt dort (s. Abb. 3, Kap. 2.2). Hinsichtlich der einzelnen Bodentypen gibt es keine signifikanten Unterschiede.

4.6 Zusammenhänge der Parameter mit Hilfe des NMDS

Mit dem Bodendatensatz (s. Anhang 6), wurde unter Nutzung der euklidischen Distanz ein NMDS berechnet. Dabei erwies sich nach dem elbow criterion (s. Abb. 45 (1)) die Auswahl von zwei Dimensionen als sinnvoll, da hier die maximale Stressreduktion zur vorherigen Dimension stattfindet und der Stresswert mit 9,13 % in einem akzeptablen, gut interpretierbaren, Bereich liegt (LEYER, WESCHE 2007). Bei der endgültigen NMDS-Berechnung wurde dieser Stresswert bereits nach 99 Schritten erreicht, sodass keine 500 Iterationen erforderlich waren. Die Auswahl von zwei Dimensionen hat außerdem den Vorteil, dass beide Dimensionen gleichzeitig dargestellt werden, sodass eine Achsenrotation vermieden wird. Der Stressplot, in dem die Werte nicht weit streuen und ein hoher R^2-Wert von > 0,98, sprechen ebenfalls für diese Methode (s. Abb. 45 (2)). Der berechnete Monte-Carlo-Test, mit 200 zufällig berechneten NMDS mit zwei Dimensionen, ergab einen Stresswert > 20 %, der somit deutlich über den ermittelten 9,13 % liegt.

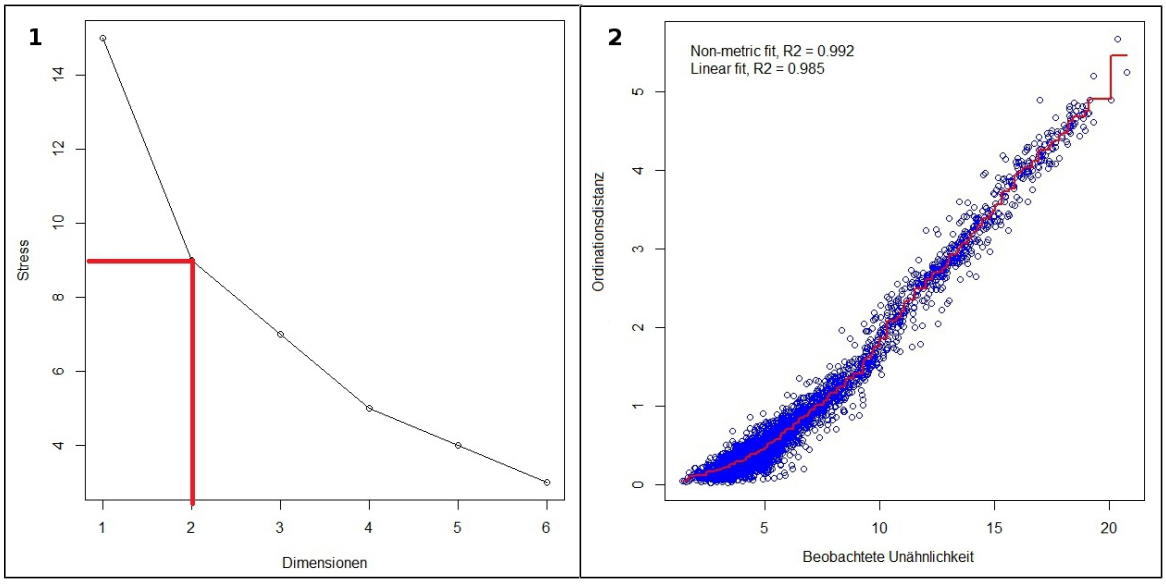


Abb. 45: Güteparameter des NMDS (elbow criterion (1), Stressplot (2))

Bei dem NMDS spiegeln die Distanzen, zwischen den einzelnen Standorten, die Ähnlichkeiten wieder. Die sieben Standorte mit hydromorphen Böden (schwarze Punkte), liegen sehr weit von den anderen Standorten entfernt, im negativen Achsenabschnitt des NMDS1 (X-Achse) (s. Abb. 46). Ebenfalls links im Ordinationsdiagramm, sowohl im positiven als auch im negativen Achsenabschnitt des NMDS2 (Y-Achse), sind die Regosolstandorte (blaue Punkte) orientiert. Demgegenüber befinden sich im positiven Achsenabschnitt des NMDS1 alle Arenosolstandorte, wobei eine eindeutige räumliche Unterscheidung zwischen den beiden Typen erfolgen kann: Während sich die Arenosol I Standorte (grün), überwiegend im positiven Achsenabschnitt des NMDS2 befinden, so liegen die meisten der Arenosol II Standorte (rot) im negativen Bereich. Es ist somit die räumliche Abtrennung der, aus der Clusteranalyse ermittelten, vier verschiedenen Bodentypen gegeben.

Zunächst wurden die Bodenvariablen, als Vektorpfeile über den Ordinationsraum aufgespannt (s. Abb. 46). Anhand deren Richtungen ist zu erkennen, welche Variablen für die entsprechenden Standorte von Bedeutung sind. So zeigen beispielsweise der Tongehalt (T), das C/N-Verhältnis oder die WkMax in Richtung der hydromorphen Böden und der Regosolstandorte, da diese höhere Werte als der Durchschnitt aufweisen. Ähnlich verhält es sich mit dem Sand- und Aluminiumgehalt beider Arenosolstandorte. In diesem Fall sind alle Bodenvariablen signifikant, da das NMDS mit derselben Datenmatrix berechnet wurde.

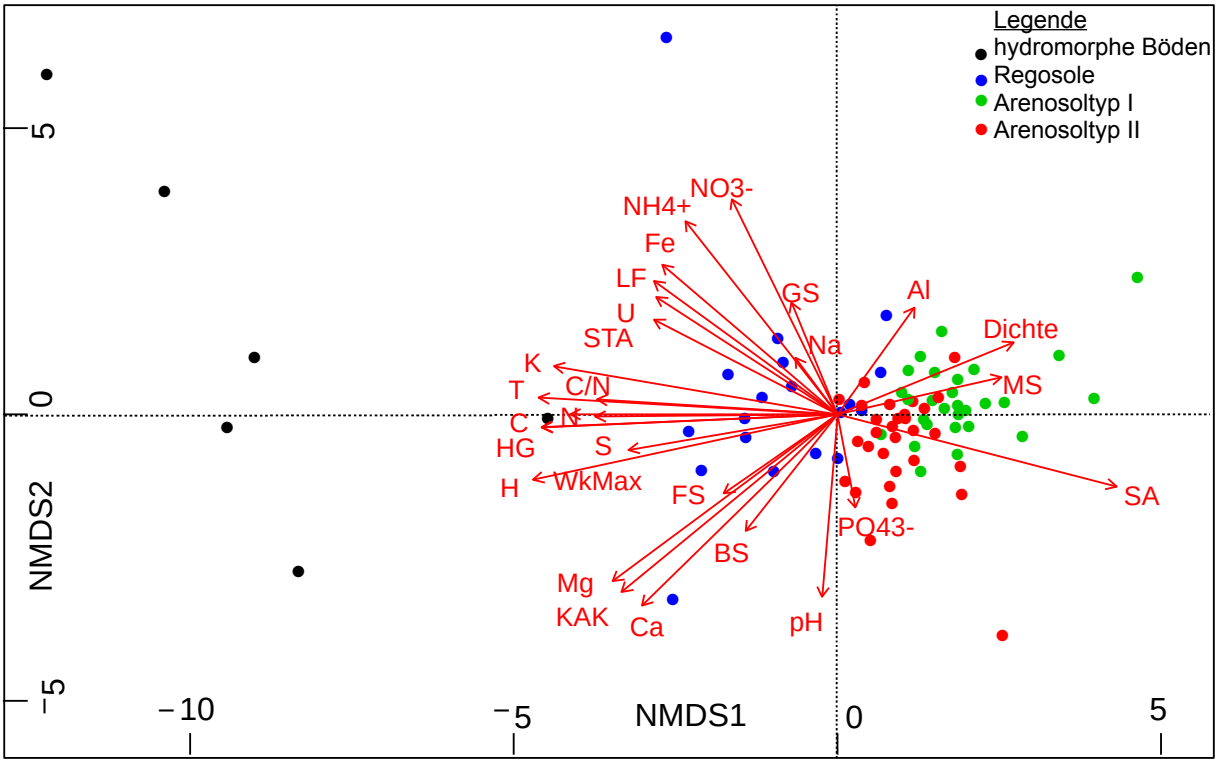


Abb. 46: NMDS mit geplotteten Bodenvariablen

Anschließend wurden über den zweidimensionalen Ordinationsraum 17 Umwelt- und Fernerkundungsparameter (s. Tab. 25) geplottet, wobei diejenigen, die auf dem 5 %-Niveau signifikant, in der Abbildung 47, als rote Pfeile dargestellt sind. Insgesamt stellen sich zehn Parameter als signifikant heraus, ein weiterer, die Latitude (s. Tab. 25), würde unter Berücksichtigung des 10 %-Signifikanzniveaus hinzukommen. Die Longitude zeigt in Richtung der Regosolstandorte, die sich zusammen mit den Arenosol I Standorten signifikant weiter östlich befinden. Für die Arenosol I Standorte, spielt ebenfalls die Höhe eine entscheidende Rolle. Die drei Reflectance-Werte sowie der Tasseled Cap, zeigen in Richtung der Arenosol II Standorte, wobei insbesondere der Landsat Kanal 5, nach der Anzahl der Bäume/ha, den zweitwichtigsten Parameter darstellt (s. Tab. 25). Die signifikanten Vegetationsparameter Bäume/ha, Baumbedeckung, NDVI und Range sind in Richtung der hydromorphen Böden und Regosolstandorte ausgerichtet, da diese, im Gegensatz zu den Arenosolstandorten, mehr Vegetation aufweisen. Die restlichen Umweltparameter, wie der Niederschlag oder die Anzahl der Termiten sowie die Beweidungsintensität, spielen nur eine untergeordnete Rolle und erstrecken sich im Ordinationsdiagramm in unterschiedliche Richtungen.

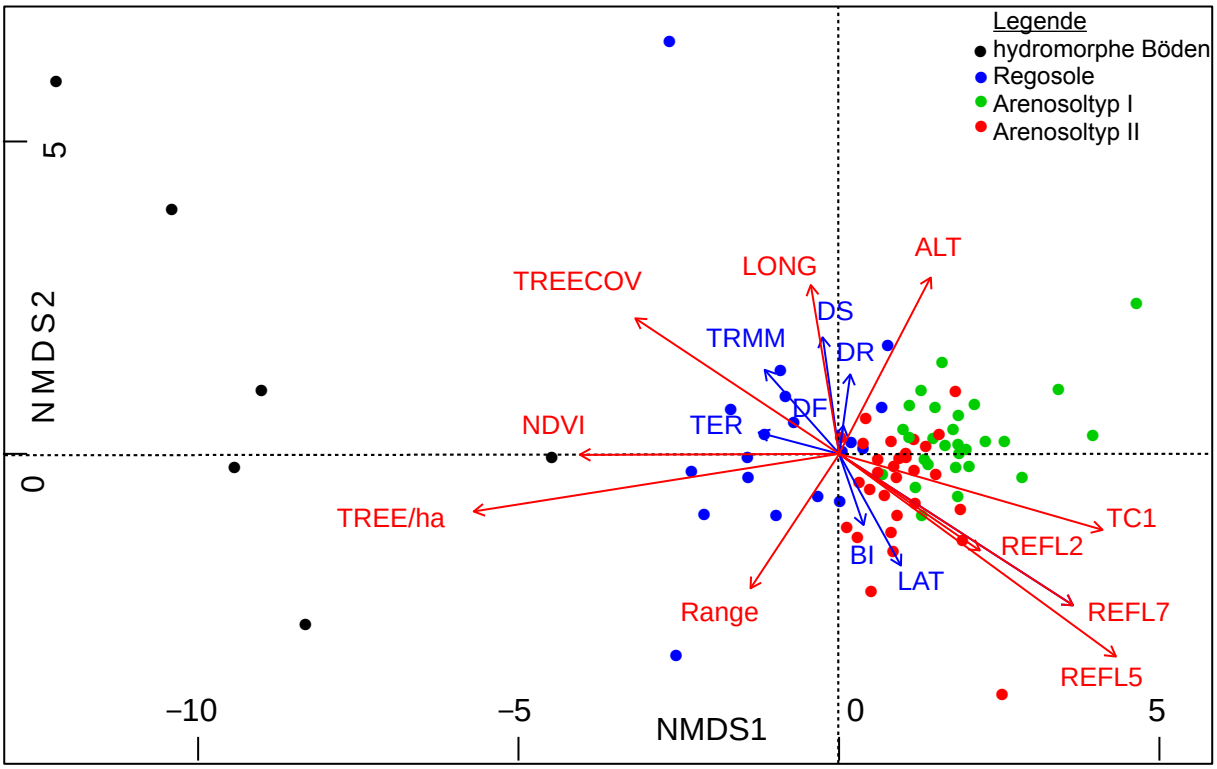


Abb. 47: NMDS mit geplotteten Parametern
(signifikante Parameter [s. Tab. 25] mit p=0.05 sind in rot dargestellt)

Mit Hilfe der Länge der Pfeile beziehungsweise dem R^2-Wert, kann eine Reihenfolge beziehungsweise Quantifizierung der Bedeutung der einzelnen Parameter, für die Standorte, vorgenommen werden.

Tab. 25: Vektoren der geplotteten Parameter des NMDS
(signifikante Parameter mit p = 0.05 sind in rot, mit p = 0.1 in blau dargestellt, geordnet nach Bedeutung)

Parameter	NMDS1	NMDS2	R^2
Bäume/ha (TREE/ha)	-0,986	-0,169	0,4769
Reflectance Kanal 5 (REFL5)	0,795	-0,607	0,4193
Reflectance Kanal 7 (REFL7)	0,827	-0,562	0,2740
Tasseled Cap 1	0,958	-0,285	0,2611
NDVI	-1	0,001	0,2371
Baumbedeckung (TREECOV)	-0,816	0,578	0,2156
Höhe (ALT)	0,445	0,895	0,1484
Longitude (LONG)	-0,155	0,988	0,1061
Reflectance Kanal 2 (REFL2)	0,814	-0,581	0,1017
Range	-0,536	-0,844	0,0992
Latitude (LAT)	0,462	-0,887	0,0600
Distanz Siedlung (DS)	-0,128	0,992	0,0549
TRMM	-0,645	0,764	0,0459
Distanz Fluss (DR)	0,135	0,991	0,0264
Anzahl Termitenhügel (TER)	-0,941	0,338	0,0258
Beweidungsintensität (BI)	0,296	-0,955	0,0200
Distanz Forage (DF)	0,145	0,989	0,0035

In einem weiteren Schritt, wurden anstatt der Umwelt- und Fernerkundungsparameter, die ordinal skalierten Vegetationsdaten, die das Aufkommen von den acht am weitesten verbreiteten Baumarten beinhalten (s. Tab. 26), über das NMDS geplottet. Dabei wurden Arten, die im 5 %-Niveau signifikant auftreten mit roten und jene im 10 %-Niveau mit dunkelgrünen Pfeilen in der Abbildung 48 dargestellt. Sehr signifikant ist das Auftreten von *Acacia seyal* (längster Pfeil bedeutet wichtigster Parameter) auf den hydromorphen Böden (schwarze Punkte). Ebenfalls auf dem 5 %-Niveau signifikant, ist das Vorhandensein von *Combretum glutinosum* auf den Arenosol I Standorten, das Vorkommen von *Balanites aegyptiaca* (10 %-Niveau) auf den Arenosol II Standorten sowie von *Guiera senegalensis* auf den Regosolstandorten (10 %-Niveau). Daraus lässt sich schließen, dass sich die Vegetation aufgrund anderer Bodeneigenschaften unterschiedlich entwickelt. Somit wurde der im Gelände festgestellte Eindruck, dass manche Arten eher auf bestimmte Böden vorkommen, bestätigt.

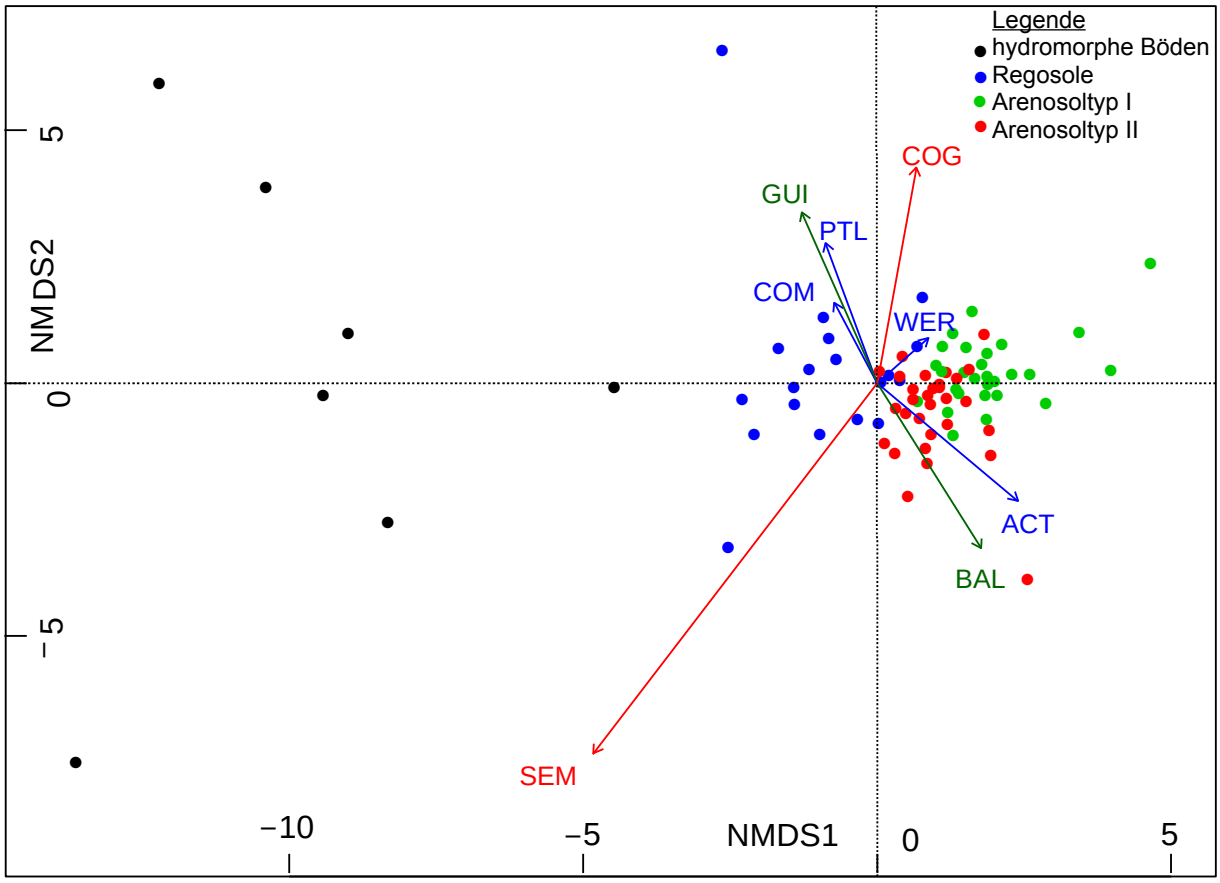


Abb. 48: NMDS mit geplotteten Vegetationseinheiten
(signifikante Parameter mit p = 0.05 sind in rot, mit p = 0.1 in grün dargestellt)
(COM = Combretum micanthum, COG = Combretum glutinosum, PTL = Pterocarpus lucens, ACT = Acacia tortilis, WER = Acacia senegal, SEM = Acacia seyal, BAL = Balanites aegyptiaca, GUI = Guiera senegalensis)

Tab. 26: Vektoren der geplotteten Vegetationsarten des NMDS
(signifikante Parameter mit p = 0.05 sind in rot, mit p = 0.1 in blau dargestellt, geordnet nach Bedeutung)

Art	NMDS 1	NMDS 2	R^2
Acacia seyal (SEM)	-0,551	-0,835	0,3217
Combretum glutinosum (COG)	0,155	0,988	0,0772
Guiera senegalensis (GUI)	-0,343	0,939	0,0552
Balanites aegyptiaca (BAL)	0,469	-0,883	0,0542
Acacia tortilis (ACT)	0,698	-0,716	0,0488
Pterocarpus lucens (PTL)	-0,289	0,957	0,0387
Combretum micanthum (COM)	-0,39	0,921	0,0153
Acacia senegal (WER)	0,662	0,749	0,0069

Eine ausführlichere Auseinandersetzung und Interpretation der aufgestellten Ordinationsdiagramme erfolgt im Kapitel 5.3.2.

4.7 Zusammenfassung der Bodenqualität der einzelnen Bodentypen

4.7.1 Hydromorphe Böden

Die nach STANCIOFF et al. 1986, als hydromorph klassifizierten Böden, können laut FAO 1990 und der WRB-Soil-Classification (BGR 2008) zum Teil den Vertisolen zugeordnet werden. Für diese Zuordnung ist der Tongehalt, der > 30 % sein sollte, das entscheidende Kriterium (FAO 1990). Der durchschnittlich gemessene Tongehalt dieser Proben, liegt mit 26,5 % knapp unter dem vorgeschriebenen Schwellenwert Da die Probennahme teilweise am Rand der Flussbetten erfolgte, kann davon ausgegangen werden, dass der Tongehalt in der Mitte weiter ansteigen würde. Vertisole zeichnen sich dadurch aus, dass sie aufgrund des hohen Anteils der quellfähigen Tone (wie Smektit und Montmorillonit), von der Oberfläche nach unten tiefe und breite Schrumpfrisse, die Slickenslides, bilden (BGR 2008). Das wird insbesondere am Standort 555 (s. Abb. 49 (2)) sehr gut deutlich. Da die Basensättigung deutlich > 50 % ist, handelt es sich in diesem Fall. um einen eutric Vertisol. Im Allgemeinen werden Vertisole als günstige, nährstoffreiche Standorte beschrieben, bei denen allerdings der Wechsel zwischen Regen- und Trockenzeit, die ackerbauliche Nutzung erschwert (FAO 1990). Denn in vielen dieser Senken steht oft bis weit in die Trockenzeit Wasser, sodass wenig Zeit für den Anbau bleibt (s. Abb. 49 (3)). Bei den Einheimischen, werden diese Böden als *„Dek“* oder *„Xur“* bezeichnet (s. Kap. 2.6), was mit tonhaltige Böden übersetzt werden kann.

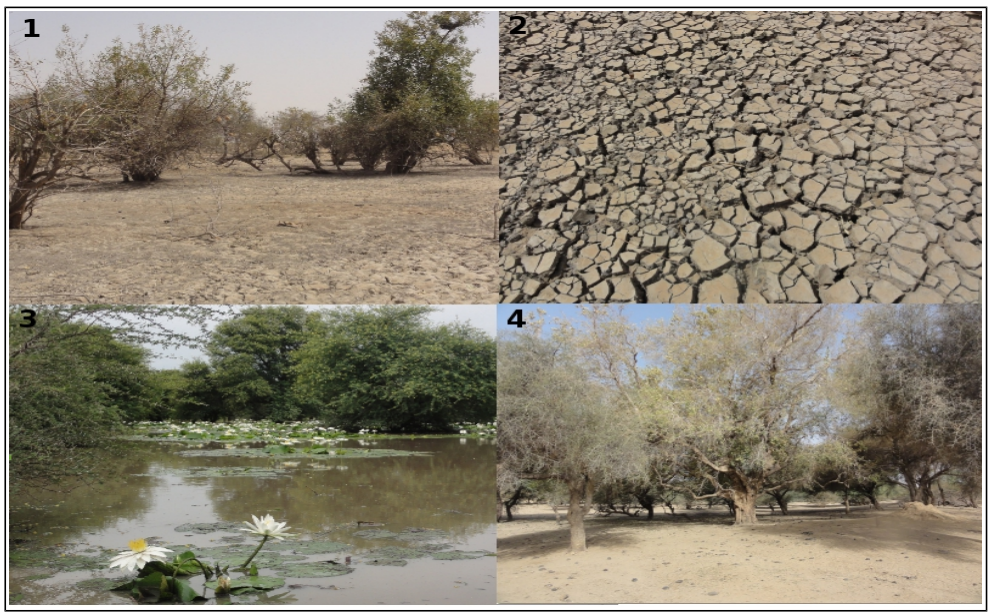


Abb. 49: Die hydromorphen Böden des Untersuchungsgebietes - *„Dek“* oder *„Xur“*
(Aufnahmen von Martin Brandt, März (1, 2, 4) und September (3) 2012)

Wie im Kapitel 4.3 bereits dargestellt, sind die hydromorphen Böden von den Bodentypen des Untersuchungsgebietes am fruchtbarsten, das heißt, dass die Bewertung meist um eine Stufe besser, als bei den anderen Bodentypen ist. Eine Übersicht der Bewertung der wichtigsten Bodenfruchtbarkeitsparameter ist in der Tabelle 27 dargestellt. Trotz der teils höchsten Werte von allen Bodentypen, wurden wichtige Parameter wie Phosphat- und Stickstoffgehalt sowie die KAKpot, nach LANDON 1991, als gering bewertet. Demgegenüber stehen die als hoch eingestuften Gehalte von Magnesium und Kalium, die zu den wichtigsten Pflanzennährstoffen zählen.

Aufgrund des hohen Tonanteils (Bodenarten L und sL), weisen die hydromorphen Böden eine hohe Stabilität auf. Die günstigsten Standortbedingungen im Untersuchungsgebiet, führen zu einer Baumbedeckung von knapp 16 %, mit 53 Bäumen/ha und einer hohen Artenvielfalt (s. Abb. 49), wobei jedoch hauptsächlich *Acacia seyal* sowie *Balanites aegyptiaca* vertreten sind.

4.7.2 Regosole

Die schon bei STANCIOFF et al. 1986 klassifizierten Regosole, werden auch laut der FAO 1990 diesem Bodentyp zugeordnet, da sie ein klassisches A/C-Profil aufweisen, wobei sich das Ausgangsgestein (Laterit) häufig nahe der Oberfläche befindet (s. Abb. 50 (1)). Bei den Regosolen des Untersuchungsgebietes, handelt es sich um eutric Regosole (Basensättigung mehr als 50 %), die einen ochric A-Horizont besitzen, das heißt, dass der C_{org}-Anteil geringer als 0,6 % ausfällt, was bei allen untersuchten Standorten zutrifft (FAO 1990). Diese Böden haben aufgrund ihrer geringen Wasserspeicherkapazität und Nährstoffvorräte, kaum eine landwirtschaftliche Bedeutung (BGR 2008), weshalb auch im Untersuchungsgebiet auf diesen Flächen nur vereinzelt Landwirtschaft betrieben wird. Die im Labor untersuchten Parameter, ergaben für diese lehmigen Sandböden sehr geringe Stickstoff- und Phosphatgehalte sowie eine sehr geringe KAKpot, wohingegen die Magnesiumkonzentration als hoch einzuschätzen ist (s. Tab. 27). Die chemischen Fruchtbarkeitsparameter der Regosole sind somit meist günstiger als die der beiden Arenosoltypen.

Die häufigsten Baumarten dieses Bodentyps sind *Balanites aegyptiaca, Combretum glutinosum, Pterocarpus lucens, Combretum micranthum* sowie *Guiera senegalensis,* wobei sich durchschnittlich 27 Bäume/ha befinden. Dieser Wert schwankt jedoch sehr stark, da es viele vegetationslose Standorte vor allem im Nordosten des Untersuchungsgebietes gibt (s. Abb. 50 (4)). Früher waren diese Gebiete stark beweidet, durch enorme Abholzung und ein Massenbaumsterben, aufgrund der Dürren, wurden die Böden sehr erosionsanfällig, sodass der Laterit freigelegt wurde. Die meisten Termitenhügel mit durchschnittlich

6,5 je Standort, gibt es auf Regosolen. Da Termiten den Boden durchlüften und ihn somit fruchtbarer machen (s. Kap. 1.2), ist annehmbar, dass besonders viel Vegetation dort vorkommt, wo es auch viele Termitenhügel gibt. Jedoch korrelieren diese beiden Variablen mit rho = 0,07 nicht miteinander.

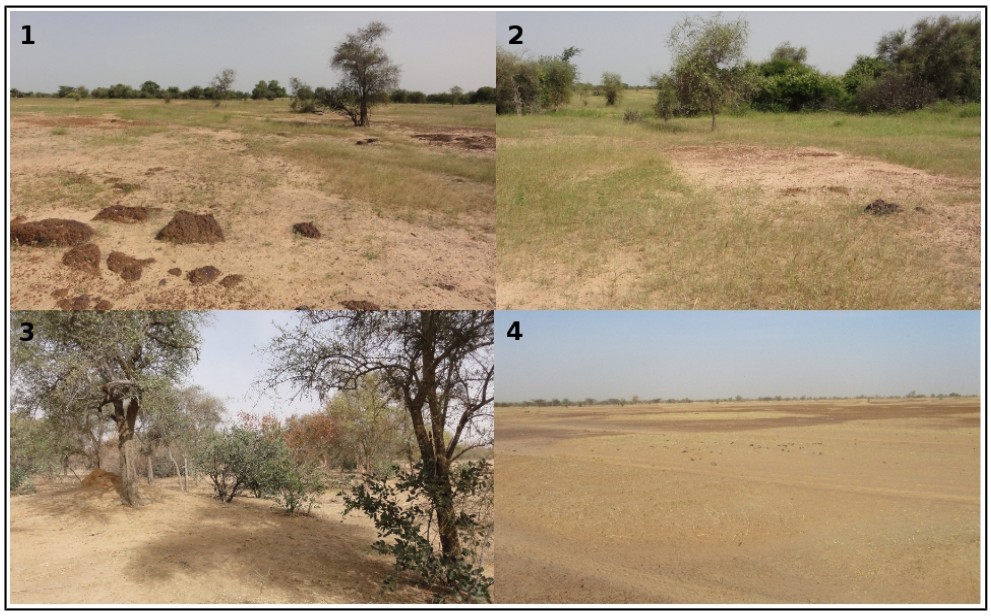


Abb. 50: Die Regosolböden (Laterit) des Untersuchungsgebietes
(Aufnahmen von Martin Brandt, März (3, 4) und September (1, 2) 2012)

4.7.3 Arenosole

Die nach STANCIOFF et al. 1986, als tropisch eisenhaltig klassifizierte Böden, können nach der FAO 1990, den haplic Arenosolen (ARh) zugeordnet werden, da der Sandanteil höher als 70 % ist und der Tongehalt weniger als 15 % beträgt (FAO 1990). Bezüglich der Korngrößen, gibt es zwischen den beiden Arenosoltypen keine Unterschiede, denn bei beiden ist fSms die Feinbodenart. Arenosole werden allgemein als nährstoffarm und gut bearbeitbar charakterisiert, wobei sie aufgrund der hohen Durchlässigkeit allerdings nur wenig Wasser, in pflanzenverfügbarer Form speichern können (niedrige nutzbare Feldkapazität s. Tab. 27) (FAO 1990). Außerdem gelten diese als sehr erosionsanfällig, insbesondere dort, wo nur eine spärliche Vegetation vorherrscht. Im Gegensatz zu den anderen beiden Bodentypen, wachsen hier durchschnittlich deutlich weniger Bäume (13 pro ha). Da die Arenosole eine gute Durchwurzelung ermöglichen, ist ein einfaches Ernten von Wurzel- und Knollenfrüchten möglich (BGR 2008). Deswegen werden auch im Untersuchungsgebiet große Flächen der Arenosole, neben der Beweidung, vor allem für die Landwirtschaft genutzt. Auf den Feldern, werden von den Wolofbauern oft kleine Akazien, insbesondere *Acacia tortilis* oder *Acacia*

albida angepflanzt, die Messungen der Stickstoffgehalte, lieferten allerdings keine signifikant höheren Werte mit Akazien auf den Feldern.

Durch die Clusteranalyse (s. Kap. 4.2) stellten sich zwei verschiedene Arenosoltypen heraus, die im Folgenden kurz charakterisiert werden.

4.7.3.1 Arenosoltyp I

Der Arenosoltyp I entspricht den *„Dior“*-Böden, die von den Einheimischen als leichte Sandböden charakterisiert werden (s. Kap. 2.6) und auf denen vor allem Erdnüsse (*Arachis hypogaea)* und Bohnen (*Vignasinensis*) angebaut werden (s. Abb. 51 (2)) (NDIAYE 2007). Diese Böden sind durch einen niedrigen pH-Wert gekennzeichnet, haben eine sehr geringe KAKpot, wobei die Basensättigung mit 92,5 % signifikant geringer, als bei den anderen Bodentypen ausfällt. Das liegt daran, dass hier die Al^{3+}-Gehalte signifikant höher sind. Im Gegenzug sind die Ca^{2+}-, K^{+}- und Mg^{2+}-Gehalte signifikant geringer, als beim Arenosoltyp II. Der Stickstoff- und Phosphatgehalt wird nach LANDON 1991, als niedrig bewertet (s. Tab. 27).

Bezüglich der Vegetationszusammensetzung wachsen auf den *„Diors“* signifikant mehr *Combretum glutinosum* (s. Abb. 51), als auf den Arenosoltyp II Standorten. Ansonsten ähnelt sich die Vegetation sehr stark, das heißt, dass die beiden Spezies *Balanites aegyptiaca* und *Acacia tortilis* dominieren.

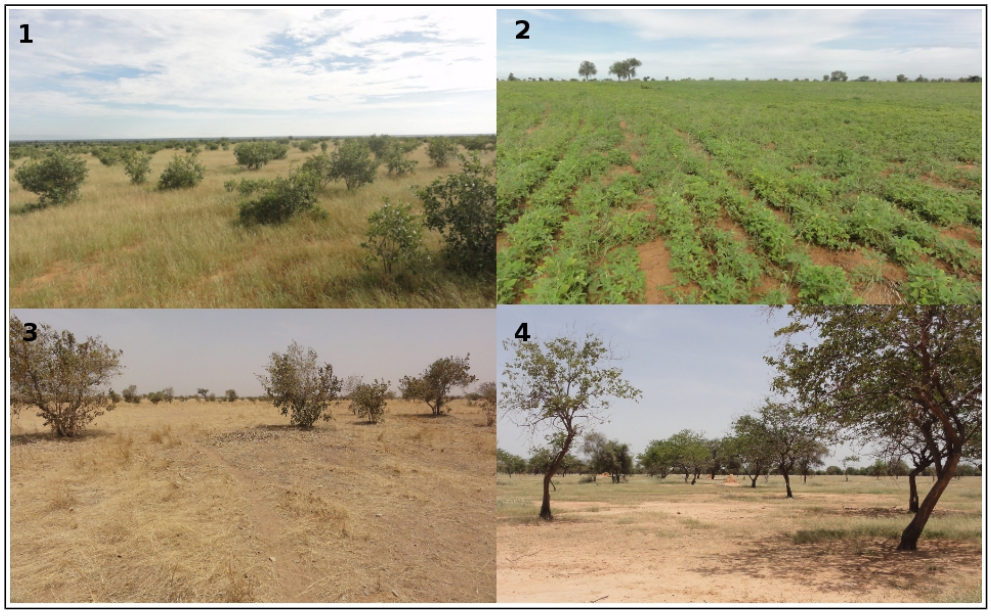


Abb. 51: Die Erdnuss/Bohnenstandorte des Untersuchungsgebietes - *„Diors“*
(Aufnahmen von Martin Brandt, März (3, 4) und September (1, 2) 2012)

4.7.3.2 Arenosoltyp II

Dieser Bodentyp entspricht den von den Einheimischen klassifizierten *„Bardial“*-Böden, die als harte schwere Böden charakterisiert werden und auf denen in erster Linie Hirse *(Pennisetum typhoides)* angebaut wird (s. Abb. 52 (2)), da Erdnüsse auf diesem Bodentyp nicht gedeihen (NDIAYE 2007) (s. Kap. 2.6). Die Böden haben eine höhere KAKpot als die *„Diors“* und auch signifikant höhere Konzentrationen der Pflanzennährstoffe Kalium, Magnesium und Calzium, die zusammen mit Natrium eine Basensättigung > 97 % an der KAKpot erreichen. Die Stickstoff- und Phosphatgehalte sind genau wie bei den *„Diors“* sehr niedrig (s. Tab. 27).

Wie bei allen anderen Bodentypen, dominiert vor allem *Balanites aegyptiaca,* doch in diesem Fall, gehören sogar über 50 % aller aufgenommenen Bäume dieser Spezies an, was ebenfalls für die *„Bardials“* spricht (NDIAYE 2007). Zusammen mit *Acacia tortilis* bilden sie mehr als drei Viertel der gesamten Baumvegetation (s. Abb. 52). Neben der landwirtschaftlichen Nutzung, werden diese Böden besonders zur Beweidung genutzt, die höchste Beweidungsintensität von allen Bodentypen bestätigt diese Aussage.

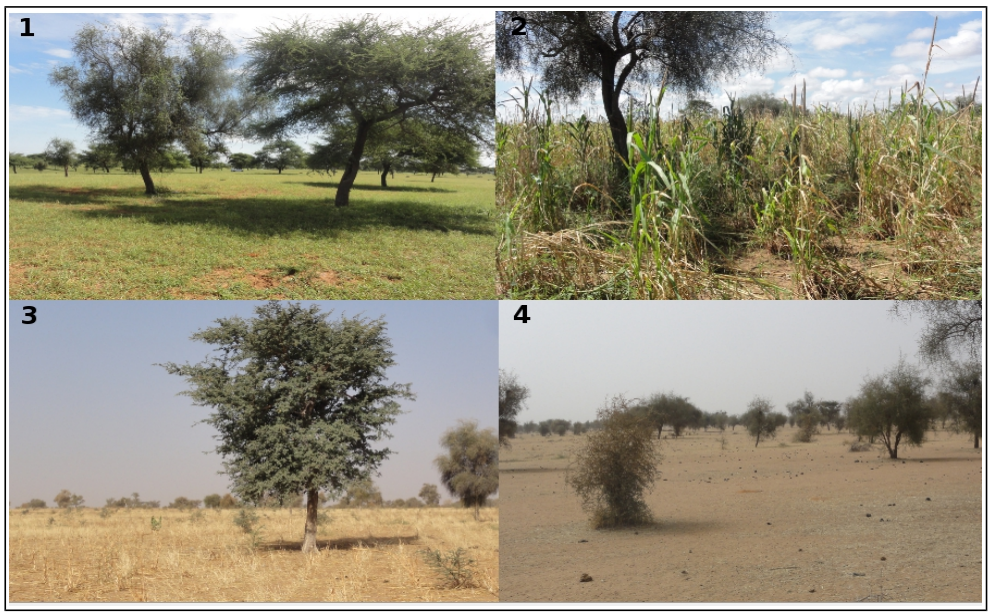


Abb. 52: Die Hirsestandorte des Untersuchungsgebietes - *„Bardial“*
(Aufnahmen von Martin Brandt, März (4) und September (1, 2, 3) 2012)

Tab. 27: Wichtige Parameter und deren Bewertung der vier verschiedenen Bodentypen
(eigene Darstellung nach AD-HOC-AG BODEN 2005 und LANDON 1991)

	Hydro. Boden		Regosol		Arenosol I		Arenosol II	
Parameter	MW	Bewertung	MW	Bewertung	MW	Bewertung	MW	Bewertung
pH-Wert	5,73	meist niedrig	6,17	mittel	5,44	niedrig	6,13	mittel
Humusgehalt [%]	1,56	schwach humos	0,62	sehr schwach humos	0,34	sehr schwach humos	0,39	sehr schwach humos
Stickstoff [%]	0,14	gering	0,08	sehr gering	0,06	sehr gering	0,06	sehr gering
C/N-Verhältnis	6,8	sehr eng	4,5	sehr eng	3,4	sehr eng	3,7	sehr eng
Phosphat [mg/kg]	0,21	gering	0,22	gering	0,24	gering	0,48	gering
KAKpot [cmol/kg]	9,04	gering	2,56	sehr gering	1,33	sehr gering	2,05	sehr gering
BS [%]	97,8	hoch	97,8	hoch	92,7	hoch	97,5	hoch
Ca^{2+} [cmol/kg]	6,26	mittel	1,6	mittel	0,67	mittel	1,22	mittel
Mg^{2+} [cmol/kg]	1,83	hoch	0,51	hoch	0,24	mittel	0,44	mittel
K^{+} [cmol/kg]	0,5	hoch	0,18	gering	0,12	gering	0,16	gering
nFK [% Volumen]	19	mittel	22	hoch	8	gering	8	gering
LK [% Volumen]	13	mittel	16	hoch	33	sehr hoch	33	sehr hoch

4.8 Modellierung der Bodentypen mit Random-Forest

Um auch flächenmäßige Aussagen zu den verschiedenen Bodentypen und damit auch zur Bodenqualität zu machen, wurden die vier verschiedenen, aus der Clusteranalyse ermittelten Bodentypen, die hydromorphen Böden, Regosole und die zwei verschiedenen Arenosoltypen (s. Kap. 4.2), auf die Fläche des Untersuchungsgebietes mit Hilfe von Random-Forest modelliert. Dazu wurde jedem Probenstandort eine Zahl, die den Bodentyp aus der Clusteranalyse repräsentiert, zugeordnet. Zur Modellierung auf die Fläche, wurden die aus dem NMDS signifikanten Umwelt- und Fernerkundungsparameter mit Ausnahme der Longitude verwendet (s. Kap. 4.6), die flächendeckend für das Untersuchungsgebiet vorlagen. Das sind das SRTM-Höhenmodell, der Range 2010, der NDVI sowie die Reflectance der Landsat-Kanäle 2, 5, 7 und der Tasseled Cap 1. Die Longitude wurde nicht als Modellierungsvariable verwendet, da der Einsatz das Ergebnis visuell verschlechtert und viele Einzelheiten verloren gehen.

Da die Zielvariable nominal skaliert ist und nur vier Werte (vier verschiedene Bodentypen) annehmen kann, wird die Methode der Klassifikationsbäume verwendet. In diesem Fall wird von 500 Bäumen ausgegangen. Zur besseren visuellen Interpretation, wurde die modellierte Karte zunächst durch einen 3 x 3 Majority-Filter geglättet.

Anhand der confusion matrix ist zu erkennen, dass die meisten Pixel richtig zugeordnet (s. Tab. 28) wurden, wobei die Einzelfehler aller vier Klassen nahezu gleich groß sind. Der Gesamtfehler (error rate) des Modells beträgt in diesem Fall 8,72 % und ist damit sehr niedrig. Das bedeutet, dass insgesamt nur 8,72 % der Pixel falsch klassifiziert wurden. Zusätzlich wurde das Modellergebnis mit den Interviews zum Bodentyp vom Geländeaufenthalt verglichen, sogar bei dicht nebeneinanderliegenden Flächen stimmt das Modell überein.

Tab. 28: Confusion matrix des Random-Forest-Modells

	Hydro. Böden	Arenosoltyp II	Arenosoltyp I	Regosol	Class.error
Hydro. Böden	73	2	2	1	0,0641
Arenosoltyp II	2	841	66	12	0,0858
Arenosoltyp I	2	47	721	17	0,0836
Regosol	1	18	20	354	0,0992

Laut den Importance-Werten ist das Höhenmodell die wichtigste erklärende Variable für die Modellierung der Bodentypen. Ebenfalls hohe Bedeutung haben der Tasseled Cap 1, der Range 2010 sowie der Reflectance-Wert des Landsatkanal 5, während die restlichen Parameter nur eine untergeordnete Rolle spielen (s. Abb. 53).

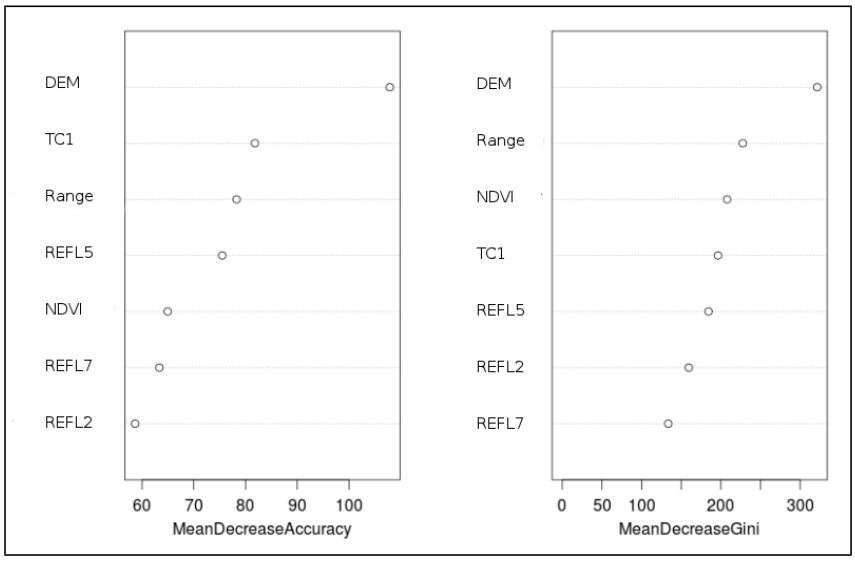


Abb. 53: Importance-Werte als Gütekriterium für die Variablenauswahl

Das Ergebnis der Bodenmodellierung mit einer Auflösung von 30 m ist anhand der Abbildung 55 dargestellt. Mit Hilfe des Histogramms können die flächenmäßigen Anteile der Bodentypen für das Untersuchungsgebiet ermittelt werden. Den geringsten Anteil mit 1,8 % (s. Abb. 54), weisen dabei die hydromorphen Böden auf, die insbesondere in den Flussbetten vertreten sind. Die Regosole machen mit 19,5 % den zweitkleinsten Anteil aus, wobei diese vor allem im Norden, Süden und Osten des Untersuchungsgebietes vorkommen. Außerdem wurde ein Großteil des Ferloflussbettes ebenfalls dieser Klasse zugeordnet. Die restliche Fläche des Untersuchungsgebietes beanspruchen die beiden Arenosoltypen, wobei die *„Diors“* mit 41,3 % ein wenig häufiger, als die *„Bardials“* mit 37,4 % auftreten. Während sich die *„Bardials“* vor allem im Westen des Untersuchungsgebietes sowie entlang der Flussläufe befinden, sind die *„Diors“* überwiegend im Osten vertreten.

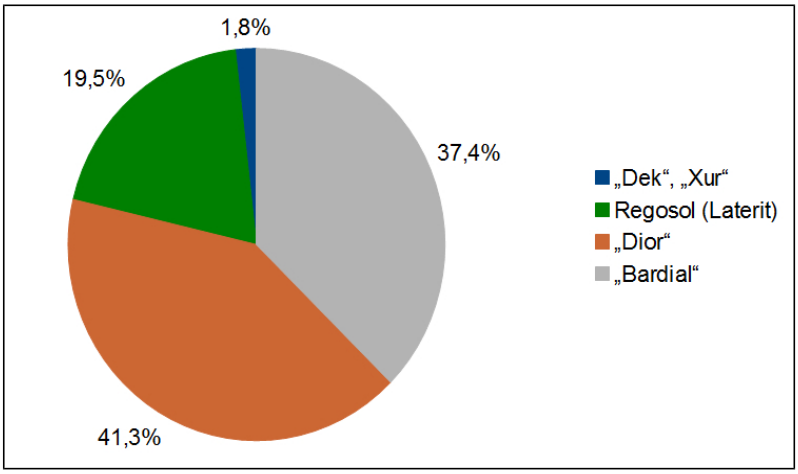


Abb. 54: Flächenanteile der im Untersuchungsgebiet modellierten Bodentypen

Ein größerer Ausschnitt, der über die Grenzen des Untersuchungsgebietes hinausreicht, ist zusätzlich im Anhang 4 dargestellt. Daran ist zu erkennen, dass weiter östlich der Regosolanteil (Laterit) weiter zunimmt, während weiter im Westen nur sehr vereinzelt Regosole vorhanden sind.

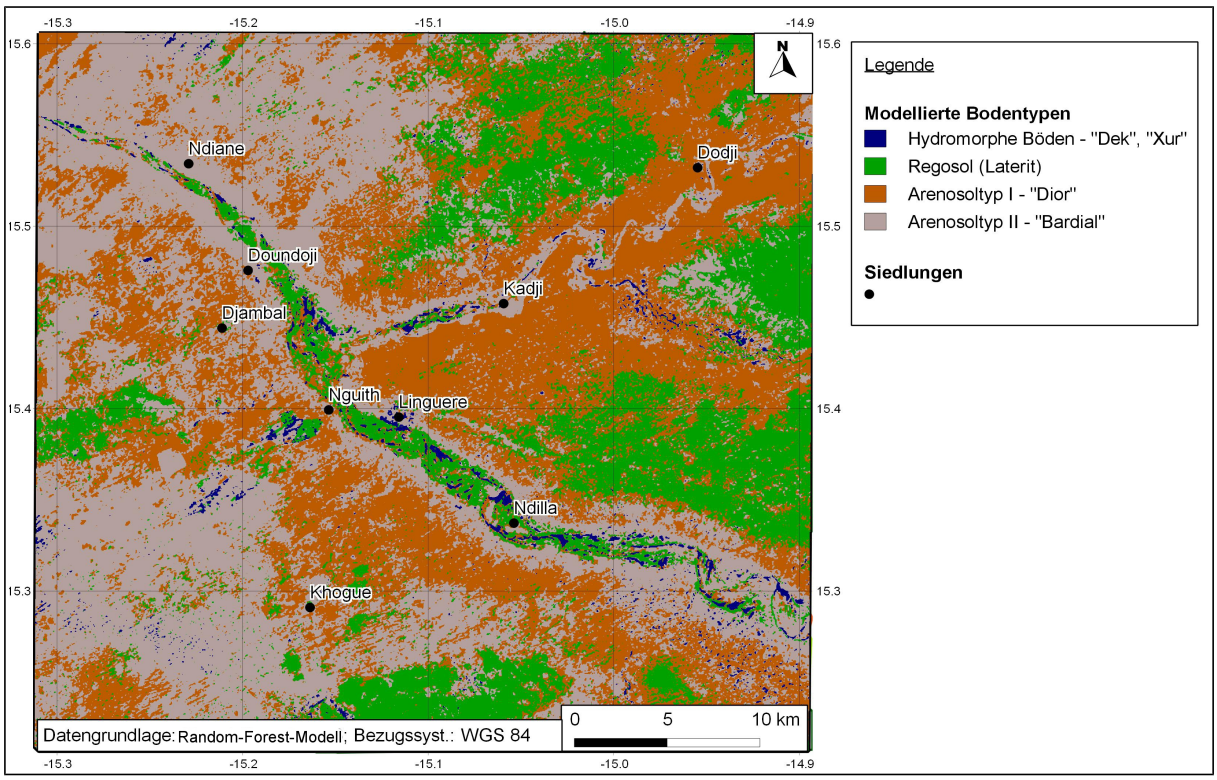


Abb. 55: Modellierung der regionalen Bodentypen

5. Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse tiefgründiger beleuchtet und mit anderen Literaturangaben verglichen. Bevor eine Diskussion der statistischen Vorgehensweise erfolgt (s. Kap. 5.3), wird zunächst über verschiedene Bodenparameter (s. Kap. 5.1) sowie Vegetationseinflüsse (s. Kap. 5.2) diskutiert.

5.1 Bodenqualität anhand der einzelnen Bodenparameter

5.1.1 Korngröße und daraus ableitbare Parameter

Die im Untersuchungsgebiet landwirtschaftlich genutzten Böden bestehen hauptsächlich aus Sand und weisen einen geringen Tongehalt von rund 5 % auf. Im Vergleich zu anderen Arbeiten von IAO 2003 und GONZALEZ 1997, fällt der Sandanteil der Arenosole des Untersuchungsgebietes mit ungefähr 85 %, etwa 10 % geringer aus. Sandböden zeichnen sich positiv durch eine leichte Bearbeitbarkeit und eine gute Sauerstoffversorgung der Pflanzen, resultierend aus dem hohen Porenvolumen, aus. Demgegenüber haben Sandböden eine geringe Fruchtbarkeitsveranlagung, also ein geringes natürliches Ertragspotential, welches aus der schwachen Nährstoffbindung und dem Mangel an Nährstoff nachliefernden Mineralien resultiert. Aufgrund der hohen Wasserdurchlässigkeit (hoher kf-Wert), versickert das Niederschlagswasser sehr schnell in tiefe Bodenschichten und ist somit für die Pflanzen nicht mehr aufnehmbar. Außerdem führt die geringe Wasserspeicherfähigkeit der Sandböden, zu einer starken Fluktuation der Wasserversorgung der Pflanzen, insbesondere bei hohen Transpirationsraten wird der permanente Welkepunkt schnell überschritten, sodass leicht Trockenschäden auftreten (REHM 1986). Des Weiteren sind Sandböden bei geringer Vegetationsbedeckung, sehr anfällig gegenüber Winderosion, da diese im Gegensatz zu Tonböden, geringere Stabilitäten und Lagerungsdichten aufweisen. Der Korrelationskoeffizient (rho = - 0,576) zwischen dem Sandanteil und der Stabilität bestätigt, dass die Böden mit hohen Sandanteilen geringe Stabilitäten aufweisen. In diesem Fall wurde bei den Sandböden allerdings keine signifikant geringere Lagerungsdichte festgestellt, was eventuell mit der erschwerten Stechzylinderentnahme, ausgelöst durch zum Teil extrem harte Böden, erklärt werden kann.

Das Pflanzenwachstum ist in vielen Böden abhängig von der Verteilung der Mikrostrukturen und Poren. Ungünstige Bodenstrukturen, die im Untersuchungsgebiet hauptsächlich durch starke Beweidung hervorgerufen werden, führen dabei zu erheblichen Einschränkungen der Pflanzenentwicklung. Verstärkter Viehtritt bewirkt eine strukturelle Zerstörung des Bodens und trägt zur Bodenverdichtung bei, wodurch die Wurzelausbreitung begrenzt wird. Bei Sandböden mit sehr geringen Tongehalten, so wie das im Untersuchungsgebiet der Fall ist, kann außerdem eine Strukturverschlechterung erfolgen, indem ein Übergang zum Einzelkorngefüge stattfindet. Dadurch wird die ohnehin schon geringe Wasserhaltekapazität und damit verbunden der Wasseraufstieg weiter reduziert (LANDON 1991).

5.1.2 Bodenfarbe

Die meisten trockenen Proben weisen eine leichte Gelbfärbung auf, bei einigen nassen Proben ließ sich auch eine geringe Rotfärbung erkennen, wobei die Gelb- beziehungsweise Rotfärbung, aus dem Vorhandensein von Eisenoxiden resultiert. Diese Eisenoxide sind genauso wie die Aluminiumoxide in humideren Perioden, im *Nouakchottien* sowie im *Dakarien* (s. Kap. 2.3, Anhang 1) entstanden, in einer Phase, in der höhere Niederschlagsmengen und dichte Vegetation die Böden stark chemisch verwitterten (GONZALEZ 1997). Somit ist eine Versorgung der Pflanzen mit Eisen, einem wichtigen Spurennährelement, sichergestellt. Aluminium hingegen ist für Pflanzen, ab Gehalten von 50 mg/kg toxisch, allerdings ist mobiles Aluminium im Boden nur bei pH-Werten < 5 vorhanden (FINCK 2007).

5.1.3 pH-Wert

Der pH-Wert übt starke Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum aus und ist für die Ertragsfähigkeit verantwortlich. Das optimale Pflanzenwachstum sowie die Versorgung mit Nährstoffen, findet zwischen den pH-Werten 5 und 7 statt. Darunter werden toxisch reagierende Al^{3+}- und Mn^{2+}-Ionen verstärkt gelöst. Letzteres trifft zum Teil auf die *„Diors“* zu, da sie mit einem durchschnittlichen pH_{H20} von 5,44 (entspricht pH_{CaCl2} < 5), den geringsten Wert aufweisen. Dabei hängt der optimale pH-Wert eines Bodens vom Tongehalt, der organischen Substanz sowie den Nähr- und Schadstoffen ab. Für tonarme Sandböden, die im Untersuchungsgebiet sehr weit verbreitet sind, wird ein idealer pH-Wert zwischen 5,3 und 5,7 angegeben, denn bei einem höheren pH-Wert, erfolgt keine Ertragssteigerung, da die Verfügbarkeit einiger wichtiger Mikronährstoffe wie Mangan (Mn), Kupfer (Cu) oder Zink (Zn) mit steigendem pH-Wert limitiert wird (BLUME et al. 2010). Für Hirse und Erdnüsse, gibt LANDON 1991 zum optimalen Gedeihen einen pH-Wert-Bereich von 5,5 bis 7 an, wobei beide Arten auch niedrigere pH-Werte bis pH = 5 tolerieren.

5.1.4 Leitfähigkeit

Da alle 84 Standorte von LANDON 1991, als salzfrei bewertet werden und die gemessenen Werte deutlich unter dem Schwellenwert von 2000 µS/cm liegen, beziehungsweise der Salzgehalt < 0,15 % ist, spielt die Leitfähigkeit für die Bodenqualität keine Rolle und kann deswegen vernachlässigt werden. Selbst bei höheren Salzgehalten würden Erdnüsse und Hirse gedeihen, da diese beiden Anbaupflanzen sehr salztolerant sind.

5.1.5 Humusgehalt

Laut FINCK 1963 sind Humusgehalte < 1 % für tropische Savannenböden normal, da die Substanzproduktion der Vegetation sehr gering ist und nur während der Regenzeit stattfindet (s. Kap. 1.2). Im Untersuchungsgebiet konnten die niedrigen Humusgehalte für die Arenosole sowie die Regosole bestätigt werden. Andere Arbeiten wie BAKHOUM et al. 2012 (Humusgehalt 0,88 %), IAO 2003 (Humusgehalt 0,32 %) oder GONZALEZ 1997 (Humusgehalt *"Diors"* 0,3 %), wiesen ebenfalls niedrige Werte auf. Nur in den Senken wurden im Untersuchungsgebiet minimal höhere Humusgehalte von durchschnittlich 1,56 % ermittelt, was auf den erhöhten Tonanteil zurückzuführen ist. Bei Untersuchungen von Vertisolen von IAO 2003, in der Nähe von Thiès, wurden ebenfalls höhere Humusgehalte von knapp 2 % gemessen. Eine Studie von JONES 1973 zeigt, dass der Humusgehalt in Westafrika in Bezug auf Regenmenge und Tongehalt variiert. Das bedeutet, je höher der Niederschlag sowie der Tongehalt ist, umso höher fällt auch der Humusgehalt aus. Im Umkehrschluss führen hohe Sandanteile zu geringen Humusgehalten, was anhand der Abbildung 56 dargestellt ist.

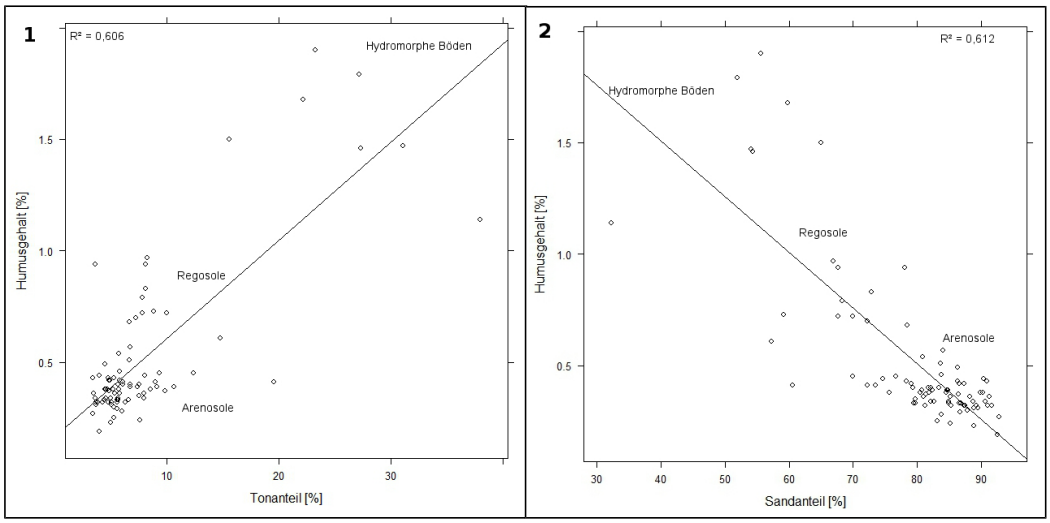


Abb. 56: Regression des Ton-(1) und Sandanteiles (2) mit dem Humusgehalt

5.1.6 Stickstoff

Der ermittelte Stickstoffgehalt von durchschnittlich 0,07 %, spiegelt den generell niedrigen Gesamtstickstoffgehalt tropischer Böden wieder. So gibt beispielsweise FINCK 1963 für tropische Böden einen Wert von 0,05 % an, während BAKHOUM et al. 2012, bei Dahra ebenfalls niedrige Gesamtstickstoffgehalte von 0,05 % und IAO 2003, in Arenosolen bei Thiès von 0,02 % feststellten. Laut LANDON 1991, ist der Stickstoffgehalt als sehr niedrig zu bewerten (s. Tab. 18), nur die hydromorphen Böden sowie vier Regosolstandorte weisen mit Werten > 0,1 % etwas höhere Stickstoffgehalte auf, was mit erhöhten C_{org}-Gehalten dieser Standorte erklärt werden kann, denn der N_{ges}-Gehalt steht in einer engen Beziehung zu dem C_{org}-Gehalt (BLUME et al. 2010). Anhand der Abbildung 57 ist die Beziehung zwischen C_{org} und N_{ges} dargestellt. Je höher der Kohlenstoffanteil der Probe, desto höher ist ebenfalls der Stickstoffanteil. Das Bestimmheitsmaß mit R^2 = 0,794, verdeutlicht den starken Zusammenhang zwischen diesen beiden Parametern.

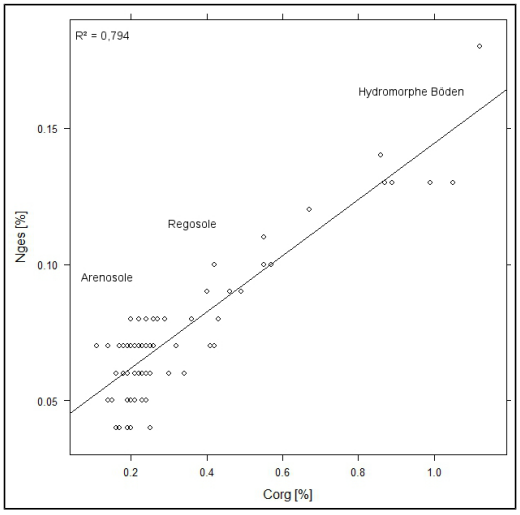


Abb. 57: Regression von C_{org} und N_{ges}

Der Gesamtstickstoffgehalt korreliert, wie erwartet signifikant mit dem NO_3^--Gehalt (rho = 0,541) und ebenfalls mit dem NH_4^+-Gehalt (rho = 0,413). Diese beiden anorganischen Stickstoffverbindungen stellen zusammen mit dem zu vernachlässigbaren Nitrit, den mineralischen, für die Pflanzen verfügbaren Stickstoff dar, der im Labor als Gesamtstickstoff N [%] bestimmt wurde. Demzufolge müsste die Summe des Nitrat- und Ammoniumstickstoffes annähernd dem Gesamtstickstoff entsprechen. Aufgrund der teilweise hohen Einzelwerte des Nitrat- und Ammoniumstickstoffes, insbesondere bei den hydromorphen und Regosolstandorten, wird bei zehn Standorten der Gesamtstickstoff

bereits überschritten. Diese Standorte wurden für die folgende Abbildung 58 nicht berücksichtigt, welche die durchschnittlichen Stickstoffanteile von Nitrat und Ammonium der einzelnen Bodentypen am Gesamtstickstoff zeigt. Dabei decken sie durchschnittlich jedoch nur ungefähr 50 % vom Gesamtstickstoff ab, wobei Ammonium den höheren Anteil aufweist.

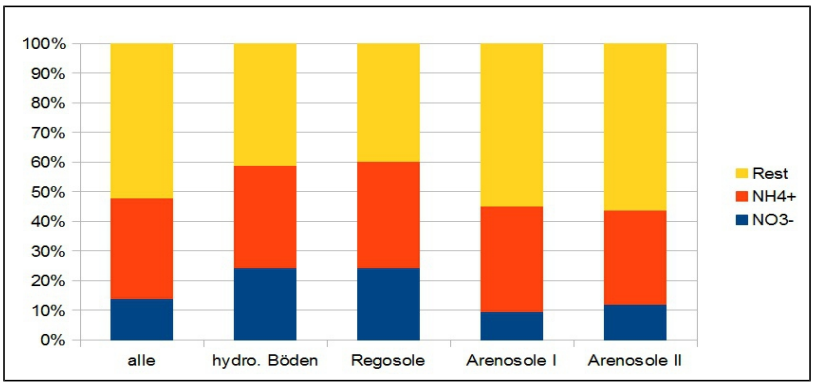


Abb. 58: Durchschnittliche Stickstoffanteile am Gesamtstickstoff (N_{min})

Die starken Abweichungen zum Gesamtstickstoff sowie der viel höhere Anteil von Ammoniumstickstoff, im Vergleich zu Nitratstickstoff, kann nicht erklärt werden. Normalerweise bildet Nitrat, das aus der Nitrifikation von Ammonium durch *Nitrobacter*bakterien entsteht, die Hauptfraktion des mineralischen Stickstoffes im Boden und gilt als sehr stabil. Lediglich durch Auswaschung sowie durch Nässe bei anaeroben Bedingungen kann es zu Stickoxiden (Lachgas, N_2O) oder elementarem Stickstoff N_2 reduziert werden (Denitrifikation) (FINCK 2007).

In tropischen Böden kann die Nitrifikation durch die hohen Temperaturen (Optimalbereich 25 bis 35 °C) und die teilweisen sauren Milieus (pH < 5,5) verlangsamt werden, jedoch sollte der Großteil des Ammoniums zu Nitrat umgewandelt sein. Einerseits ist diese Reaktion besonders an die Verfügbarkeit von Sauerstoff gekoppelt (Sandböden sind durch eine gute Bodendurchlüftung ausgezeichnet) und andererseits erfolgt während der Trockenzeit, der Zeit der Probennahme, durch die Mineralisierung fast keine Nachlieferung von Ammonium. Diese ist hauptsächlich an die Regenzeit gebunden, da die entsprechenden Mikroorganismen (beispielsweise *Azotobacter, Beijerinckia*) überwiegend im feuchten Milieu aktiv sind (BLUME et al. 2010; ROWELL 1994). Deswegen kommt es zum Beginn der Regenzeit zu einem sogenannten Nitratstoß (FINCK 2007), das heißt, die Mineralisierung sowie die Nitrifizierung sind zu dieser Zeit, im Verlauf eines Jahres am stärksten. Das wurde für *„Diors“* im Norden Senegals bestätigt, wo nur am Beginn der Regenzeit eine Mineralisierung (von 49 bis 115 kg/ha/Jahr) gemessen wurde (GONZALEZ 1997).

Die einzelnen gemessenen Werte des Ammonium- und Nitratstickstoffes, können anhand von MARX et al. 1999 eingeschätzt werden. Demnach sind Ammoniumstickstoff-konzentrationen von 2 bis 10 mg/kg typisch. Die meisten Proben fallen in diesen Messbereich, bei rund einem Drittel der Proben, liegen die Werte jedoch < 2 mg/kg, während bei vier Standorten, darunter drei hydromorphe, deutlich höhere Konzentrationen erreicht werden. Die Nitratstickstoffgehalte fast aller Proben, liegen deutlich < 10 mg/kg und werden laut MARX et al. 1999 als gering bewertet. Ausnahmen bilden die hydromorphen Standorte 501, mit einem mittleren Nitratstickstoffgehalt zwischen 10 und 20 mg/kg, 555, und 556 und 559 (Regosolstandort) mit über 30 mg/kg (extrem hoch). Die hohen Werte der hydromorphen Standorte, können wiederum mit einem höheren C_{org}-Anteil dieser Standorte zurückgeführt werden.

Diese Bewertung zeigt, dass die Nitratstickstoffgehalte im Gegensatz zu den Ammoniumstickstoffgehalten viel zu gering ausfallen. Es liegt die Vermutung nahe, dass durch den Einsatz von $CaCl_2$, als Extraktionsmittel, nicht das ganze Nitrat gelöst wurde. Diese Vermutung ist jedoch rein spekulativ, da viele Einflussfaktoren (Temperatur, Sauerstoff ec.) die Stickstoffgehalte verändern können. Um diese Einflussfaktoren zu minimieren, wäre es zweckmäßig, die Nitrat- und Ammoniummessungen direkt im Gelände an der feldfrischen Probe durchzuführen.

5.1.7 C/N – Verhältnis

Die gemessenen C/N-Verhältnisse liegen allesamt < 10 und können somit als sehr eng bewertet werden. Dabei weisen vor allem die Arenosole mit rund 3,5 ein extrem enges C/N-Verhältnis auf. Andere Arbeiten von BAKHOUM et al. 2012 und IOA 2003, ermittelten für Arenosolböden im Sengal, ebenfalls enge C/N-Verhältnisse, die jedoch mit etwa 10 ein wenig weiter ausfallen. Ein enges C/N-Verhältnis, ist normalerweise ein Anzeichen für das Vorhandensein von genügend Stickstoff sowie für den fortschreitenden Humifizierungsgrad, das heißt, je enger das C/N-Verhältnis, umso schneller wird die organische Substanz zersetzt. In diesem Fall hebt das enge C/N-Verhältnis in erster Linie den geringen Gehalt an organischer Substanz hervor, der bei den meisten Proben weit < 1 % liegt (s. Tab. 15) (IAO 2003). Bei den tonreichen hydromorphen Böden, besteht außerdem die Möglichkeit, dass das enge C/N-Verhältnis durch Ammonium-Fixierung vorgetäuscht wird. Denn Ammoniumionen können in die Zwischenschichten von Tonmineralen eingelagert werden und stehen dem Stickstoffkreislauf deshalb zeitweise nicht zur Verfügung (FINCK 1963).

5.1.8 Phosphat

Aufgrund der Vielzahl von unterschiedlichen Bestimmungsmethoden und damit verbunden der großen Auswahl an verschiedenen Extraktionsmitteln, gestaltet sich eine Interpretation schwierig. Generell ist im Savannengebiet Phosphatmangel weit verbreitet und Phosphat wird häufig als der limitierende Nährstoff angesehen. Laut FINCK 1963 sind Gesamtphosphorgehalte von 20 bis 270 mg/kg für tropische Savannenböden typisch. Allerdings sind nur ungefähr 10 % des Gesamtphosphorgehaltes pflanzenverfügbar. Die Laboranalyse ergab bei fast allen Proben, pflanzenverfügbare Phosphatgehalte < 1 mg/kg (s. Kap. 4.3.2.6). Diese fallen im Vergleich zu jenen von LANDON 1991, der mittels unterschiedlicher Methoden Phosphatgehalte bestimmte, extrem gering aus. Am besten können die ermittelten Werte, mit der Methode verglichen werden, indem Wasser als Extraktionsmittel verwendet wurde. Dabei werden Phosphatgehalte < 1 mg/kg als gering, zwischen 1 und 2 mg/kg, als mittel und > 2 mg/kg, als hoch bewertet. BAKHOUM et al. 2012 analysierten Bodenproben in der Nähe von Dahra (40 km westlich von Linguère) und ermittelten durchschnittlich pflanzenverfügbare Phosphatgehalte von 8 mg/kg, die somit deutlich höher, als die der Standorte des Untersuchungsgebietes ausfallen.

Die generell niedrigen ermittelten Phosphatgehalte, können zum Teil mit dem sauren pH-Wert erklärt werden, da die Ausfällung der Phosphationen pH-abhängig ist. Das Phosphat stammt vor allem aus der Verwitterung von Apatit, gelangt aber auch durch Exkremente oder Mineralisierung der organischen Bodensubstanz in den Boden. Dabei erfolgt die Mobilisierung, welche den entscheidenden Prozess der Phosphorversorgung für die Pflanzen darstellt, durch biotische Aktivität, indem die anorganischen Reserven aufgeschlossen beziehungsweise die organischen abgebaut werden. Jedoch werden die frei werdenden Phosphationen wenig im Boden sorbiert, sondern meistens wieder ausgefällt, wobei die Ausfällung vom pH-Wert abhängig ist: Bei den im Untersuchungsgebiet vorwiegend mäßig bis stark sauren Böden (pH < 6), werden die Phosphationen zunächst in feinkristalline, leicht mobilisierbare Eisen- und Aluminiumphosphate ausgefällt, die mehr oder weniger schnell in schwer mobilisierbare Formen umgewandelt werden und deswegen für die Pflanzen nicht mehr zur Verfügung stehen (Phosphatsperre) (FINCK 2007).

Eine weitere temporäre Phosphatsperre entsteht beim Abbau von organischer Substanz mit einem C/P-Verhältnis > 150, da die Mikroben für den Abbau zusätzlich Phoshat benötigen, das erst wieder nach einigen Wochen für die Pflanze zur Verfügung steht (FINCK 2007). In diesem Fall ist dieses Kriterium jedoch nicht zutreffend, da im Boden generell nur geringe Kohlenstoffgehalte vorliegen, sodass das C/P-Verhältnis deutlich enger als 150 : 1 ausfällt.

5.1.9 KAK und Basensättigung

Die potentielle Kationenaustauschkapazität aller Proben, mit Ausnahme der hydromorphen Standorte, wurde laut LANDON 1991 mit < 5 cmol/kg, als sehr gering bewertet, insbesondere die *„Diors“* weisen, mit durchschnittlich 1,33 cmol/kg, sehr geringe Werte auf. Untersuchungen von BAKHOUM et al. 2012; IAO 2003 und GONZALEZ 1997 bestätigen mit Werten von ungefähr 2 cmol/kg, die sehr geringen Kationenaustauschkapazität der Arenosole, die mit den geringen Humus- und Tongehalten dieser Böden erklärt werden kann.

Sand, der Hauptbestandteil der Arenosole, weist (mit Werten von < 0,1 m²/g Boden) nur eine sehr geringe spezifische Oberfläche auf und kann, aufgrund des geringen Speichervermögens, nur wenige Kationen binden. Im Gegensatz dazu, haben Tonminerale eine große spezifische Oberfläche, von bis zu 800 m²/g Boden, die aus der großen inneren Oberfläche zwischen den einzelnen Silikatschichten resultiert. Ton stellt deswegen die wichtigste Fraktion als Sorbent, sowohl für gelöste, als auch für gasförmige Stoffe, dar. Noch höhere spezifische Oberflächen von 800 bis 1000 m²/g Boden weisen, die aus der Humifizierung von organischer Substanz gebildeten, Huminstoffe auf. Da diese die meisten Kationen sorbieren können, hängt die KAK in erster Hinsicht von der Verfügbarkeit der organischen Substanz, beziehungsweise dem Humusgehalt ab. Die hydromorphen Böden haben, im Gegensatz zu den anderen Bodentypen, einen höheren Humus- und Tongehalt und demzufolge fällt die Kationenaustauschkapazität mit 5 bis15 cmol/kg etwas höher aus, sodass sie von LANDON 1991, als gering bewertet wird (BLUME et al. 2010).

In dieser Arbeit wurde die potentielle Kationenaustauschkapazität bestimmt, die die maximale Kationenaustauschkapazität bei einem pH-Wert von 8,2 bezeichnet. Die effektive KAK ist bei sauren Böden, wie sie im Untersuchungsgebiet vorliegen, jedoch geringer, da die negativen variablen Ladungen abnehmen, was anhand der Abbildung 59 ersichtlich wird. Bei diesen variablen Ladungen, handelt es sich in erster Linie um Tauscherplätze von Huminstoffen, da ein abnehmender pH-Wert zu einer Absenkung der Bindungsstärke der Kationen an diesen Humuskolloiden führt. Im Gegensatz dazu ist die Mehrheit der Tauscherplätze, an den Tonmineralen pH-unabhängig (CHRISTEN 1996).

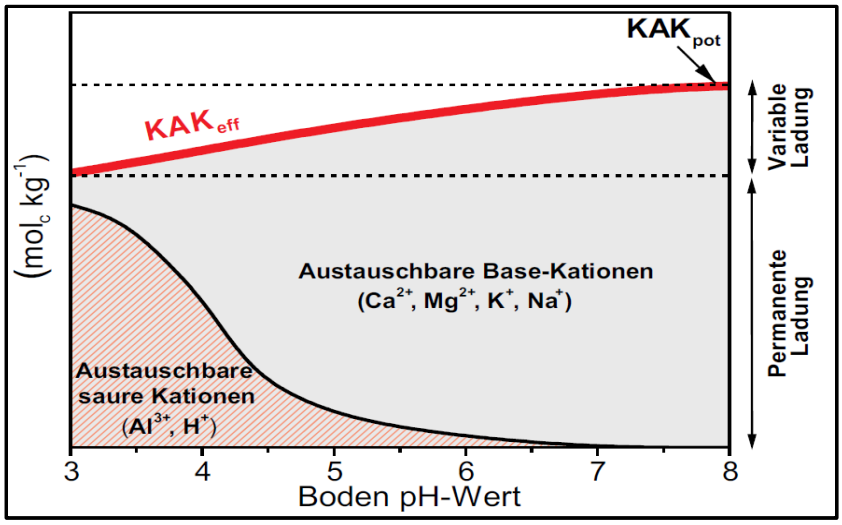


Abb. 59: Zusammenhang zwischen KAKpot und KAKeff
(BLUME et al. 2010)

Da die meisten untersuchten Standorte nur einen sehr geringen Humusgehalt aufweisen, fällt der Unterschied zwischen der effektiven und der potentiellen Kationenaustauschkapazität nicht sehr hoch aus. Laut AD-HOC-AG BODEN 2005, lässt sich aus der KAKpot, in Abhängigkeit vom pH-Wert und dem Humusgehalt, die KAKeff ableiten, die in diesem Fall, mit Ausnahme der hydromorphen Proben, ungefähr mit der KAKpot übereinstimmt (s. Tab. 29) (AD-HOC-AG BODEN 2005).

Tab. 29: Abschläge [cmol/kg] zur Berechnung der KAKeff aus der KAKpot in Abhängigkeit vom pH-Wert und Humusgehalt
(AD-HOC-AG BODEN 2005, Werte, die für die hydromorphen Böden zutreffen sind rot dargestellt)

pH-Wert	Humusgehalt [%]					
	< 1	1 - 2	2 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 30
> 7,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6,5 – 7,5	0,0	**- 0,6**	- 1,4	- 3,0	- 5,0	- 10,0
5,5 – 6,5	**0,0**	**- 1,2**	- 2,8	- 6,0	- 10,0	- 20,0
4,5 – 5,5	**0,0**	**- 1,8**	- 4,2	- 9,0	- 15,0	- 30,0
3,5 – 4,5	**0,0**	- 2,3	- 5,3	- 11,3	- 18,8	- 37,5
< 3,5	0,0	- 2,6	- 6,0	- 12,8	- 21,3	- 42,5

Auch wenn, laut AD-HOC-AG BODEN 2005, bei vielen Proben die KAKpot mit der KAKeff absolut übereinstimmt, so ändern sich bei der Bestimmung der KAKeff, die Anteile der einzelnen Kationen, insbesondere nimmt der Anteil der sauren austauschbaren H^+-Ionen an der KAK mit abnehmenden pH-Wert zu (s. Abb. 59), weil ein niedrigerer pH-Wert eine hohe H^+-Aktivität in der Bodenlösung bewirkt. Diese führt dazu, dass die variablen Ladungen an den

Oberflächen der Minerale, die außer an Huminstoffen auch an Eisen- und Aluminiumoxiden sowie an Bruchflächen von Tonmineralen vorkommen, aufgrund der Adsorption von Protonen stärker positiv geladen sind. Überwiegt die Anzahl der positiven die der negativen Ladungen, so fungiert die Oberfläche als Anionentauscher und kann keine Kationen mehr aufnehmen. Ab pH_{H2O} < 5,5 geht außerdem Al^{3+} verstärkt in Lösung und besetzt die Kationenplätze, was insbesondere bei den *„Diors“* zutrifft, da sie einen durchschnittlichen pH-Wert von 5,44 aufweisen (BLUME et al. 2010). Bei der Bestimmung der KAKeff, führt die Zunahme der H^+- sowie Al^{3+}-Ionen zu einer geringeren Basensättigung und dadurch zu einer Abnahme der Nährstoffverfügbarkeit im Boden. Die Basensättigung lässt sich, laut AD-HOC-AG BODEN 2005, vom pH-Wert ableiten (Korrelation von rho = 0,761) und beträgt in diesem Fall, bei den meisten Proben, rund 90 % und bei den *„Diors“* 70 %. Laut LANDON 1991, wird eine Basensättigung ab 60 % als hoch angesehen, was bei allen Proben, selbst bei der KAKeff zutrifft. Somit sind die Böden bezüglich der Basensättigung als fruchtbar einzustufen.

Neben der KAK und der Basensättigung, spielen die Mengenverhältnisse der einzelnen Kationen untereinander, ebenfalls eine große Rolle und sind wichtige Anzeiger der Bodenfruchtbarkeit. Ein Leitfaden, der für viele Pflanzen zutrifft, ist dabei in der folgenden Tabelle 29 dargestellt (HAZELTON, MURPHY 2007). Bei der Bewertung ist allerdings zu beachten, dass die Datengrundlage den Kationenanteil an der KAKpot und nicht an der KAKeff bildet. Bei der KAKeff würden die Anteile entsprechend dem pH-Wert geringer ausfallen. Trotzdem lassen die KAKpot-Werte eine erste Einschätzung erkennen. Mit Ausnahme der hydromorphen Standorte, fällt der Ca^{2+}-Anteil an der KAK viel zu gering aus. Das Ca/Mg-Verhältnis von 3, bestätigt den geringen Ca-Anteil. Die Mg^{2+}-, K^+- und Na^+-Anteile sind hingegen ausreichend vorhanden, während bei den *„Diors“* der Al^{3+}-Anteil, mit > 5 %, zu hoch ausfällt. Eine hohe Al^{3+}-Konzentration kann bei empfindlichen Pflanzenarten zu Aluminiumtoxizität und weiterhin zu einem gehemmten Wurzelwachstum führen, wodurch Phosphatmangel und eine erhöhte Anfälligkeit für Trockenstress hervorgerufen wird (BLUME et al. 2010).

Tab. 30: Wünschenswerte Anteile der Kationen an der KAKeff und Bewertung der einzelnen Bodentypen
(eigene Darstellung nach HAZELTON, MURPHY 2007)

Kation	Anteil an der KAKeff [%]	Kriterium erfüllt			
		"Dek", "Xur"	Regosol	*"Dior"*	*"Bardial"*
Ca^{2+}	65 - 80	ja	nein	nein	nein
Mg^{2+}	10 - 15	ja	ja	ja	ja
K^+	1 - 5	ja	ja	ja	ja
Na^+	0 - 1	ja	ja	ja	ja
Al^{3+}	< 5	ja	ja	nein	ja

5.2 Einfluss der Vegetation auf Bodenqualität

Allgemein spielt die Vegetation für den Boden eine bedeutende Rolle. So schützt Vegetation zum einen vor Erosionserscheinungen, indem die Wurzeln den Boden stabilisieren oder zum anderen gegen die starke Sonneneinstrahlung. Messungen auf *"Diors"* ergaben, ohne Vegetation Temperaturen von 55-65 °C, während mit Vegetation, die Temperaturen deutlich kühler (38-44 °C) ausfallen (GONZALEZ 1997). Durch diesen Hitzeschutz gedeihen unter bestimmten Bäumen, neben Gras, auch Anbaufrüchte, wie Erdnüsse oder Hirse besser, sodass hier im Vergleich zu anderen Gebieten, höhere Erträge erzielt werden (MAYDELL 1990). Einen weiteren positiven Effekt, stellt die Nährstoffpumpe der Bäume dar, denn aufgrund ihrer tiefen Wurzeln, können sie wasserlösliche Minerale aus großen Bodentiefen aufnehmen. Diese werden dann in den Blättern gespeichert und nach Blattabwurf sowie der Zersetzung dem Boden zugeführt (MAYDELL 1990).

Außerdem können bestimmte Spezies, beispielsweise die Leguminosen, zu denen Akazien, Erdnüsse sowie Bohnen zählen, den atmosphärischen Stickstoff fixieren und in für Pflanzen verfügbare Stickstoffverbindungen umwandeln, was dann zu Stickstoffanreicherungen und somit zur Qualitätsverbesserung und Ertragssteigerung führt. Laut BLUME et al. 2010, kann die symbiotisch gebundene Stickstoffmenge, bei Erbsen 20 bis 140 kg/ha sowie bei Bohnen 60 bis 170 kg/ha betragen. Messungen auf *"Diors"* im Norden Senegals, mit durchschnittlich 16 *Acacia senegal* je ha, ergaben einen jährlichen Stickstoffeintrag von 113 kg/ha und bestätigen die Stickstoffanreicherung (GONZALEZ 1997). Bei den Einheimischen sind, laut den Interviews, die positiven Effekte der Akazien bekannt. Aus diesem Grund werden diese auf den Feldern stehen gelassen beziehungsweise sogar angepflanzt.

Im Untersuchungsgebiet konnten keine erhöhten Stickstoffgehalte im Boden, weder an Erdnuss-/Bohnen-, noch an Akazienstandorten nachgewiesen werden. Selbst an Standorten mit mehr als zehn Akazien, ist der Stickstoffgehalt nicht signifikant höher. Gerade bei alten großen Bäumen führt die Stickstofffixierung und Mineralisierung zu höheren pflanzenverfügbaren Stickstoffgehalten im Boden. Messungen von ISAAC et al. 2010 zeigten, dass unter alten Akazien (*Acacia senegal*) die Stickstoffmineralisierungsrate, 2- bis 3-mal höher, als bei jungen Bäumen ist (ISAAC et al. 2010). Die nicht signifikanten Unterschiede sind auf die Probennahme zurückführen, da diese nicht direkt unter Bäumen stattfand. Vielleicht hätten Bodenproben direkt unter Akazien, zu der erhofften größeren Stickstoffmenge im Boden geführt. Das Hauptproblem liegt aber in der Zeit der Probennahme. In der Trockenzeit sind mikrobielle Aktivitäten, aufgrund des Wassermangels, stark eingeschränkt, die stärkste Mineralisierung findet am Anfang der Regenzeit statt. Bei Probennahmen zu dieser Zeit und Messung der Stickstoffgehalte vor Ort, wäre ein Einfluss der Leguminosen erkennbar.

5.3 Diskussion und Interpretation der statistischen Vorgehensweise

5.3.1 Clusteranalyse

Zur Analyse der Bodenqualität, wurden an insgesamt 84 verschiedenen Standorten, Bodenproben sowie diverse Vegetations- und Umweltparameter aufgenommen. Bereits im Gelände, wurden durch verschiedene Farben, Nutzungsweisen, Vegetation und Textur unterschiedliche Bodentypen sichtbar, die auch per Interviews von den Einheimischen bestätigt wurden. Da die Zuordnung des regionalen Bodentyps nicht für alle Standorte gegeben war, sollte diese mit Hilfe einer Clusteranalyse vorgenommen werden die die Standorte, aufgrund der physikalischen und chemischen Bodenparameter gruppiert und in Klassen einteilt. Weil die Clusteranalyse jedoch sehr sensibel auf Veränderungen in der Variablenauswahl reagiert, wurde als erstes eine PCA (s. Kap. 4.1) durchgeführt mit dem Ergebnis, dass alle Variablen wichtig sind und für die Clusteranalyse verwendet werden sollten. Die Clusterung (s. Kap. 4.2) der 84 Standorte ergab, bei einem Ähnlichkeitsniveau von 20 %, eine eindeutige Vierteilung, die auf einer Datenmatrix von 28 Bodenvariablen basiert.

Ein erstes Anzeichen zur Anzahl der Clustergruppen, bildet dabei das elbow criterion, letztendlich bleibt die endgültige Einteilung dem Nutzer überlassen und ist somit subjektiv (BAHRENBERG et al. 2003), sodass es keine "richtige" Klassenanzahl gibt. Neben der zum Teil subjektiven Entscheidung zur Klassenanzahl, sieht BACKHAUS et al. 2011, bei den Clusteranalysen den Nachteil, dass durch die verschiedenen Clustermethoden und Fusionierungsalgorithmen sowie durch die hohe Sensibilität beim Nutzer die Gefahr besteht, solange mit den Daten zu experimentieren, bis das gewünschte Ergebnis erreicht wird. Um ein Resultat, welches auf Ausprobieren beruht auszuschließen, wurden aus diesem Grund die Standorte einmal anhand der 28 Bodenvariablen geclustert und das Ergebnis entsprechend interpretiert. Das Clusterergebnis beim 20 %-Level, wurde mit vorhandenen Interviewergebnissen verifiziert, wobei eine Übereinstimmung von 81 % vorliegt.

5.3.2 NMDS sowie Einfluss der Umwelt- und Fernerkundungsparameter

Für die vier einzelnen Klassen, konnten die entscheidenden Parameter, durch das Ordinationsverfahren des NMDS (s. Kap. 4.6) ermittelt werden, indem zunächst die Boden- und später dann die Umwelt-, Fernerkundungs- und Vegetationsparameter posthoc, über den Ordinationsraum als Vektoren geplottet wurden. Dabei erfolgt die Interpretation in Anlehnung an die biplot-Regel von LEYER, WESCHE 2007. Standorte, die in der Hälfte des

Koordinatensystems liegen, in welche der entsprechende Vektor zeigt, haben betreffend dieser Variablen höhere Merkmalsausprägungen, als der Durchschnitt. Andersherum weisen die Standorte, die sich in der anderen Hälfte des Koordinatensystems befinden, bezüglich dieser Variablen, unterdurchschnittliche Werte auf. Eine Abschätzung der einzelnen Werte kann erfolgen, indem das Lot von den Standorten auf den entsprechenden Vektor gefällt wird. Dabei können die Vektoren in beide Richtungen verlängert werden. Je weiter sich der Schnittpunkt in Richtung der Pfeilspitze befindet, umso höher ist die Merkmalsausprägung. Der Abstand der einzelnen Standorte zueinander, ist ein Maß für die Ähnlichkeit. Weit voneinander entfernte Standorte, sind bezüglich ihrer Bodeneigenschaften unähnlich. Analog zur PCA gibt der Winkel zwischen zwei Vektoren die entsprechende Korrelation an (LEYER, WESCHE 2007). Die relative Vektorlänge, der einzelnen Parameter zueinander, ist ein Maß für ihre Bedeutung, das heißt, längere Pfeile üben einen stärkeren Einfluss, als kürzere Pfeile aus. Im Gegensatz dazu, besitzen die absoluten Längen der Vektoren, insgesamt keine Aussagekraft, da ihre Länge automatisch der Größe des jeweiligen Plots angepasst wird, sodass die Pfeillängen mehrerer Abbildungen zueinander nicht vergleichbar sind (OKSANEN 2012).

In dem NMDS, lassen sich die vier verschiedenen Clustergruppen räumlich gut auseinanderhalten, wobei sich die Gruppe der hydromorphen Böden extrem stark von allen anderen Standorten unterscheidet, weshalb sie bei der Clusteranalyse, bereits bei einem Ähnlichkeitsniveau von 85 %, abgespalten wurde. Diese Gruppe ist sehr heterogen, da die einzelnen Standorte weit voneinander entfernt liegen. So schwanken vor allem der pH-Wert (zwischen 4,4 und 8), die Leitfähigkeit (zwischen 29 und 197 µS/cm), die Korngrößenanteile sowie die Nitrat- (zwischen 11 und 258 mg/l) und Ammoniumgehalte (zwischen 4 und 38 mg/l). Dabei hat der Standort 529 solche extremen Eigenschaften, die sich anhand des hohen pH-Wertes, der hohen Ca^{2+}- und Mg^{2+}-Konzentrationen und damit verbunden der hohen KAKpot äußern, dass dieser außerhalb der Darstellungen, weit im negativen Bereich des NMDS1 und NMDS2 liegt. Die Vektoren der KAKpot und die mit ihr hoch korrelierten Parameter Ca^{2+}- und Mg^{2+}-Gehalt zeigen dabei die Richtung an, in der sich dieser Standort befindet. Bei diesem Standort 529 liegt die Vermutung nahe, dass es sich um einen Analysefehler beziehungsweise eine verunreinigte Bodenprobe handelt, da die extrem hohen Werte nicht erklärt werden können. Die starken Schwankungen, innerhalb der hydromorphen Gruppe, können mit der Lage der Probenstandorte zusammen hängen, das heißt, dass sie in unterschiedlichem Maße vom Wasser beeinflusst wurden, je nachdem wie lange das Wasser in diesen Senken beziehungsweise Flussbetten steht und wie stark die hydrische Erosion eine Korngrößenumverteilung bewirkt.

Die meisten Vektoren der Bodenparameter (s. Abb. 46), zeigen in Richtung der hydromorphen Böden, da diese höhere Nährstoffgehalte, als die anderen Bodentypen aufweisen. Lediglich der Al^{3+}-Gehalt, die Rohdichte sowie der Sand- und Mittelsandanteil zeigen in die entgegengesetzte Richtung, zu den beiden Arenosoltypen, die im Gegensatz zu den anderen Bodentypen eine geringere Bodenqualität aufweisen (s. Tab. 27). Sandige Böden haben aufgrund der gröberen Korngröße, eine hohe Luftkapazität, weisen aber nur eine geringe nutzbare Feldkapazität auf und liefern ungünstige Voraussetzungen für die Wasserversorgung der Pflanzen (BLUME et al. 2010). Der Aluminiumgehalt hängt sehr stark vom pH-Wert ab, je saurer der Boden, umso stärker nimmt der Al^{3+}-Gehalt zu, was insbesondere bei pH-Werten < 4,5 sehr stark ausgeprägt ist. Die Zunahme des Al^{3+}-Gehaltes, führt zu einer geringeren Basensättigung der Pflanzennährstoffe Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} und Na^{+} an der KAK, was sich negativ auf die Bodenqualität auswirkt (BLUME et al. 2010). Insbesondere ist das bei den Arenosol I Standorten, die einen durchschnittlichen pH-Wert von 5,44 aufweisen, ausgeprägt, die sich dadurch von den Arenosol II Standorten unterscheiden.

Die Arenosolstandorte, liegen insgesamt sehr zentriert in der Nähe des Koordinatenursprungs und streuen nicht so stark wie die hydromorphen Standorte. Ausnahmen bilden hier lediglich die Standorte 544 (hoher Aluminiumgehalt) des Arenosoltyp I sowie der sich durch einen extrem hohen Phosphatgehalt auszeichnende Standort 550 des Arenosoltyp II, der wahrscheinlich aus einer verunreinigten Bodenprobe resultiert.

Zwischen den hydromorphen Böden und den Arenosolstandorten, befinden sich im Ordinationsraum die Regosolstandorte, die ähnlich wie die hydromorphen Böden, höhere Nährstoffwerte, im Gegensatz zu den Arenosolstandorten, aufweisen (s. Tab. 27). In diese Gruppe fallen, neben den Lateritstandorten, zum Teil auch kleine Senkenstandorte, die bezüglich der Korngrößenzusammensetzung einen Übergang von den Arenosolen, zu den hydromorphen Böden darstellen. Die einzelnen Standorte dieser Gruppen streuen dabei stärker als die Arenosolstandorte, insbesondere der Standort 515, mit einem pH-Wert > 8 und einem hohen Ca^{2+}-Gehalt, fällt aus der Reihe. Diese Probe wurde, obwohl sie in der Nähe des Ferloflussbettes aufgenommen wurde (s. Abb. 19), nicht den hydromorphen Böden, sondern den Regosolen zugeordnet. Diese Zuordnung kann zum Teil mit den geringen Stickstoff-, Kohlenstoff-, und Magnesiumgehalten sowie dem geringen Tongehalt, der < 20 % ist, erklärt werden. Bei der Probennahme, wurde in diesem Fall höchstwahrscheinlich weniger nährstoffreiches äolisch transportiertes gröberes Material mitgenommen, welches zu einer Verfälschung des Ergebnisses führt.

Von den 17 Parametern (s. Abb. 47), stellen sich 10 als signifikant heraus (p = 0.05). Dabei zeigen die Vegetationsparameter Bäume/ha, NDVI, Baumbedeckung sowie der Range in Richtung der hydromorphen Böden sowie der Regosole. Aufgrund der besseren Standortbedingungen dieser Böden, gedeihen hier mehr Pflanzen, mit Ausnahme einiger degradierter Standorte, die sich in der Nähe des Koordinatenursprungs in der Regosolgruppe befinden. Da diese Lateritböden vor allem im Osten des Untersuchungsgebietes liegen, stellt die Longitude ebenfalls einen signifikanten Parameter dar, wobei eine weitere Interpretation nicht möglich ist. Ähnlich verhält es sich mit der morphologisch bedingten Höhe: Weil die tiefer liegenden Senken den hydromorphen Böden sowie zum Teil den Regosolen zugeordnet werden, befinden sich die Arenosole, insbesondere die im Quartär gebildeten Dünen der Arenosol I Standorte, automatisch höher.

Ebenfalls signifikant sind die Parameter des Tasseled Cap 1, sowie die Reflectance der Landsatkanäle 2, 5 und 7, die allesamt in Richtung der Arenosole zeigen. Da die Arenosole signifikant weniger Baumbedeckung, als die anderen Bodentypen aufweisen, kommen somit mehr Bodeninformationen zum Vorschein, weshalb die bodenspezifischen Fernerkundungsparameter des TC 1 (Brightness) und die Reflectance der Landsatkanäle 5 und 7 in Richtung der Arenosole orientiert sind.

Weil sich viele Arenosolstandorte vor allem im Nordwesten des Untersuchungsgebiet befinden, wäre selbst die Latitude auf einem Niveau von p = 0.10 signifikant. Die Latitude korreliert sehr stark negativ, mit dem selbst nicht signifikanten Parameter des Niederschlages (TRMM). Das bedeutet, je weiter im Norden der entsprechende Standort ist, desto weniger Niederschlag fällt dort (s. Kap. 2.2). Für die Bodenentwicklung ist die Niederschlagsmenge von enormer Bedeutung, denn der Regen bewirkt die chemische Verwitterung sowie Materialumlagerungen, die Bodenerosion wird jedoch in erster Linie durch starke Niederschlagsintensität hervorgerufen (SCHULTZ 2000).

Laut den R^2-Werten (s. Tab. 25), die ein Maß für die Bedeutung der Parameter darstellen, liegt die Distanz zur nächsten Siedlung (R^2 = 0,055), nur knapp hinter der, auf dem 10 %-Niveau signifikanten, Latitude (R^2 = 0,060) und ist somit ebenfalls wichtig, jedoch nicht signifikant. Der Parameter Distanz zur nächsten Siedlung zeigt genau, wie die Entfernung zum nächsten Fluss, überwiegend in Richtung der Regosolstandorte, die sich zu einem großen Teil in der „ecoregion“ der Ferruginous Pastoral Region befinden (s. Abb. 2), die sich laut TAPPAN et al. 2004, aufgrund des schlechten Anbaupotentials und der Wasserverfügbarkeit, durch eine geringe Bevölkerungs- und damit verbunden auch Siedlungsdichte auszeichnet.

Da die Forages, genau wie die Untersuchungsstandorte, gleichmäßig im Untersuchungsgebiet verteilt liegen (s. Abb. 10), spielt die Entfernung für die Böden überhaupt keine Rolle (niedrigster R^2-Wert von 0,0035). Im Voraus wurde damit gerechnet, dass die Standorte in der Nähe der Forages qualitativ schlechter, als weiter entfernte sind, denn die Gebiete, um die Forages zeichnen sich durch höhere Stabilität und Verlust der Grasbedeckung, hervorgerufen durch erhöhten Viehtritt, aus (s. Kap. 2.5) (HANAN et al. 1991). Die Vermutung konnte jedoch nicht bestätigt werden, wahrscheinlich trifft das nur in unmittelbarer Nähe der Forages zu. Eventuell hätte ein von der Forage weggelegter Transekt, an dem ungefähr alle 100 m eine Bodenprobe genommen wird, zu dem erwarteten Ergebnis geführt.

Neben einem höheren Einfluss der Forages, wurde auch mit einer höheren Bedeutung der Termiten für die Bodenqualität gerechnet, deren Einfluss sich in der Ordination, als nicht signifikant herausstellt, wobei der Vektor in Richtung der hydromorphen Böden und Regosolstandorte zeigt. Es konnte aber näherungsweise, die von FINCK 1963, beschriebene Veränderung der Korngrößenzusammensetzung nachgewiesen werden, denn Termiten transportieren vor allem Ton- und Schluffpartikel, zur Errichtung ihrer ober- und unterirdischen Bauten, an die Bodenoberfläche. In diesem Fall korreliert die Anzahl der Termitenhügel signifikant schwach positiv, mit dem Schluff- und Tongehalt, während gleichzeitig eine signifikant schwache negative Korrelation, mit dem Sandanteil erzielt wird. Da in diesem Fall nur bereits erodierte Termitenhügel berücksichtigt wurden, liegen einerseits bezüglich der Korngrößenzusammensetzung, nur schwache Zusammenhänge vor und andererseits kann der Nährstoffreichtum der Termitenhügel (s. Kap. 1.2) nicht mehr nachgewiesen werden.

Bei der nicht signifikanten Beweidungsintensität, die sich aus der Anzahl der Trittspuren, der Viehexkremente sowie der Strauchnutzung (bis 4 m Höhe) zusammensetzt, wurden zwischen den einzelnen Bodentypen, keine signifikanten Unterschiede ermittelt (s. Kap. 4.5.3).

5.3.3 Zuordnung der regionalen Bodentypen

Anhand der Labor- und Vegetationsanalysen wurde schließlich festgestellt, dass drei einzelne Gruppen des Clusterergebnisses den von NDIAYE 2007 sowie den Einheimischen während der Feldinterviews vorgestellten regionalen Bodentypen *„Xur“* beziehungsweise *„Dek“*, *„Dior“* und *„Bardial“* entsprechen (s. Kap. 4.7), die sich unter anderem hinsichtlich der landwirtschaftlichen Nutzung und Vegetation unterscheiden.

So werden auf den Arenosol I Standorten, den *„Diors“* in erster Linie Erdnüsse (*Arachis hypogaea)*, aber auch Bohnen (*Vignasinensis*) angebaut. Laut FRANKE 1997 S. 193 benötigen Erdnüsse einen lockeren Boden, *„damit die Karpophoren (Fruchtträger) leicht eindringen können und das mit Wurzelknöllchen besetzte Pfahlwurzelsystem sich gut entfalten kann“.* Diese *„Diors“* stellen überwiegend, die im Quartär entstandenen Dünen dar (s. Kap. 2.3), die einen durchschnittlichen Sandanteil von 86,4 % aufweisen, sodass diese Böden eine hohe Luftkapazität besitzen, somit locker und für Erdnüsse geeignet sind. Bei den Einheimischen werden diese Böden auch als „weich“ bezeichnet, was auf den geringen Tonanteil von durchschnittlich 5,2 % zurückzuführen ist. Das von NDIAYE 2007 beschriebene übermäßige Auftreten von *Combretum glutinosum* auf diesem Bodentyp, konnte zum einen durch Vegetationsanalysen (s. Kap. 4.4) sowie zum anderen, mit Hilfe des NMDS, mit den geplotteten Baumarten, bei der der entsprechende Pfeil in die *„Dior“*-Richtung zeigt, bestätigt werden (s. Abb. 48). Laut MAYDELL 1990 wächst *Combretum glutinosum* insbesondere auf sandigen Dünen. JANSEN, CARDON 2005 geben ebenfalls sandige und degradierte Böden als Verbreitungsschwerpunkt an, auf denen diese Art oft in Gruppen vorkommt.

Die *„Bardials“* werden von den Einheimischen als „harte“ Böden charakterisiert, auf denen überwiegend Hirse angebaut wird, da sie für Erdnüsse einen zu hohen Tonanteil aufweisen und als zu schwer gelten. Der mittlere Tonanteil der *„Bardials“* liegt mit 6 %, ungefähr 0,8 % über dem der *„Diors“*, was einen signifikanten Unterschied bei einem Signifikanzniveau von p = 0.1 bedeutet, wobei der Unterschied aus dem hohen Tonanteil des *„Dior“*-Standortes 545 resultiert. Die Rohrkolbenhirse (*Pennisetum typhoides)* ist nach FRANKE 1997 sehr anspruchslos, trockenresistent und gedeiht auch auf nährstoffarmen Böden. Das bedeutet, dass die Hirse auch auf den *„Diors“* wachsen könnte, wo sie vor den großen Trockenperioden Anfang der 1970er Jahre auch verstärkt eingesetzt wurde (NDIAYE 2007).

Zum optimalen Gedeihen auf den *„Diors“,* benötigt Hirse große Mengen Mineraldünger, tiefe Bodenbearbeitung sowie zusätzlich organische Substanzen, wie Gülle oder Gründung, wohingegen Erdnüsse nur geringe Mengen von 150 kg/ha Mineraldünger, der in erster Linie Phosphat enthält, benötigen (CHARREAU, FAUCK 1965). In der Regel wird wenig Mineraldünger verwendet. Stattdessen führen die Bauern ihr Vieh nach der Ernte auf die Felder, wo die Tiere die Reste fressen und den Boden gleichzeitig durch Exkremente düngen.

Aktuell wird nur vereinzelt Hirse auf *„Diors“* angebaut, wie das beim Standort 542 der Fall ist, da diese Böden für Erdnüsse die wichtigeren Ansprüche erfüllen, denn Erdnüsse würden auf *„Bardials“* nicht gut gedeihen. Dieser Aspekt wurde während der im Feld durchgeführten Interviews, von mehreren Personen bestätigt. Die im Gelände aufgenommenen Erdnussstandorte, stellen für die Clusterung eine inhaltliche Validierungsmethode, zur

Unterscheidung der beiden Arenosoltypen dar, wobei ein Wert von über 80 % für ein solides Ergebnis spricht.

Auf den *„Bardials“* ist laut NDIAYE 2007 und der Interviews, *Balanites aegyptiaca* die vorherrschende Spezies, was im Zuge der Vegetationsanalysen auch bestätigt wurde (s. Abb. 38). Jedoch kann dieses Kriterium nicht zur Unterscheidung der beiden Bodentypen herangezogen werden, da *Balanites aegyptiaca* auf jedem Bodentyp, mit Ausnahme der hydromorphen Böden, im Untersuchungsgebiet überwiegt. Diese Art ist ökologisch sehr flexibel, gedeiht auf Böden verschiedenster Textur und ist aufgrund ihrer tiefen Pfahlwurzel und dicken Rinde sehr trockenresistent (wächst ab einer Niederschlagsmenge von 200 mm) und widersteht sogar Grasfeuern (MAYDELL 1990).

Die Einheimischen haben keinen eigenen Namen für die zweite geclusterte Gruppe, die Regosole, jedoch bezeichnen sie die Lateritböden als *„Miolo“* oder das im Osten gelegene Gebiet als *„All“*, was wörtlich mit Wald oder Busch übersetzt wird. Wie diese Bezeichnung vermuten lässt, war laut diverser Interviews vor der Dürreperiode Anfang der 1970er Jahre, die Vegetation viel üppiger und dichter. Es wurde von wilden Tieren, wie Löwen oder Hyänen, berichtet. Doch aufgrund der Dürren sind sehr viele Bäume abgestorben. Von der einstigen Vegetationsdichte sind heute nur stellenweise die Baumstümpfe geblieben (TAPPAN et al. 2004) (s. Kap. 2.8).

5.3.4 Bodeneignungskarte

Diese vier aus der Clusteranalyse resultierenden Bodentypen, wurden abschließend mit Hilfe des Random-Forest-Modells, auf die Fläche des Untersuchungsgebietes modelliert (s. Kap. 4.8). Da jeder einzelne Bodentyp bestimmte Qualitätsparameter beinhaltet (s. Tab. 27), können annäherungsweise flächendeckende Aussagen bezüglich der Bodenqualität unternommen werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass sehr viele Parameter (s. Kap. 1.2) die Bodenqualität auch sehr kleinräumig beeinflussen, weshalb eine genaue Interpretation mit Vorsicht erfolgt.

Für das Untersuchungsgebiet existiert bereits eine Bodeneignungskarte, für die landwirtschaftliche Nutzung, die im Zuge des Projektes Fernerkundung und Kartographie der natürlichen Ressourcen Senegals, unter Leitung von STANCIOFF et. al. 1986, entstand. Diese Karte (s. Abb. 60) wurde durch Interpretation von Landsatbildern zwischen 1972 und 1981 und ausführlichen Bodenanalysen zwischen 1982 und 1984, ergänzt durch Angaben aus der Literatur, erstellt und soll im Folgenden mit der Bodentypenmodellierungskarte (s. Abb. 55) verglichen werden.

Bezüglich der Bodenfruchtbarkeitsparameter, weisen die hydromorphen Böden die günstigsten Voraussetzungen auf, da diese jedoch die Senken- beziehungsweise Flussbettstandorte beinhalten, in denen während der Regenzeit, bis weit in die Trockenzeit, Wasser stehen kann, ist es nur bedingt möglich, Landwirtschaft zu betreiben. Während des Geländeaufenthaltes, wurden keine landwirtschaftlichen Aktivitäten auf diesen Böden festgestellt. In der Modellierung wurden die Flussbetten nur schlecht erfasst, was aus der geringen Anzahl der Proben und der spektralen Ähnlichkeit zu degradierten Flächen resultiert. Für diese hydromorphen Standorte, schwankt die Bewertung der Bodeneignung für den landwirtschaftlichen Anbau laut STANCIOFF et. al. 1986, sehr stark: So wird das Flussbett des Ferlos, als stark limitierend bewertet, während das vom Nebenfluss in Richtung Kadji und Dodji nach Bewässerung für Ackerbau durchschnittlich geeignet sein soll (s. Abb. 60).

Die Regosolstandorte zeichnen sich überwiegend durch das Vorhandensein von Laterit aus, der an der Oberfläche, aufgrund von Erosionserscheinungen, des darüberliegenden Oberbodens sichtbar wird und somit die Mächtigkeit des Bodens begrenzt. Da laut BAEYENS 1949, die physikalischen Bodeneigenschaften der Textur und Struktur, die wichtigsten für die landwirtschaftliche Bedeutung darstellen, haben diese Böden nur ein geringes landwirtschaftliches Potential, obwohl die Nährstoffparameter günstiger, als die der Arenosole sind. Außerdem befinden sich im Osten sylvo-pastorale Reservate, in denen die großflächige landwirtschaftliche Nutzung untersagt ist. Die Lateritisierung ist zum Teil bereits im Osten, Nordosten und Süden des Untersuchungsgebietes anzutreffen (s. Abb. 55), doch richtig intensiv ist diese erst weiter östlich, jenseits der Grenzen des Untersuchungsgebietes ausgebildet, was anhand des größeren Ausschnitts der Modellierung (Anhang 4) ersichtlich wird. Da diese Ferruginous Pastoral Region erst im Osten von Linguère beginnt (s. Abb. 2), stellt der Osten des Untersuchungsgebietes eine Übergangszone dar. Laut STANCIOFF et. al. 1986 (s. Abb. 60) werden diese Böden, als stark limitierend für die landwirtschaftliche Nutzung, ganz im Nordosten sogar als unkultivierbar, angesehen.

Die beiden Arenosoltypen, die den restlichen Teil des Untersuchungsgebietes abdecken, haben hinsichtlich der Nährstoffe geringere Bodenqualitätsmerkmale, als die beiden anderen Bodentypen (s. Tab. 27), werden aber trotzdem in erster Linie für den landwirtschaftlichen Anbau genutzt. Dabei befinden sich die *„Diors“*, die vor allem für den Anbau von Erdnüssen und Bohnen geeignet sind, überwiegend im Nordosten- und Südosten des Untersuchungsgebietes, während die *„Bardials“* vor allem im Westen sowie in der Nähe der Flussbetten (s. Abb. 55) liegen und für den Anbau von Hirse genutzt werden. STANCIOFF et. al. 1986 bewertet die Böden, die sich im Süden des Untersuchungsgebietes befinden, als durchschnittlich für den landwirtschaftlichen Anbau. Dem Großteil dieser Böden wird eine durchschnittliche Bodeneignung nach Bewässerung zugeschrieben, im Nordwesten sind die

Böden laut STANCIOFF et. al. 1986, allerdings für eine landwirtschaftliche Nutzung nicht geeignet. Der Geländeaufenthalt sowie die Bodenmodellierung, die *„Bardials“* für dieses Gebiet aufzeigt, beweisen das Gegenteil.

Dieser Aspekt verdeutlicht, dass die Bodeneignungskarte von STANCIOFF et. al. 1986, für das Untersuchungsgebiet nicht mehr aktuell ist und insgesamt nur eine geringe räumliche Auflösung besitzt, da große Bereiche für bestimmte Bodeneignungsklassen zusammengefasst wurden. Im Gegensatz dazu, besitzt die Bodenmodellierungskarte (s. Abb. 55 sowie Anhang 4) eine räumliche Auflösung von 30 m und ist genauer als die Bodeneignungskarte von STANCIOFF et. al. 1986.

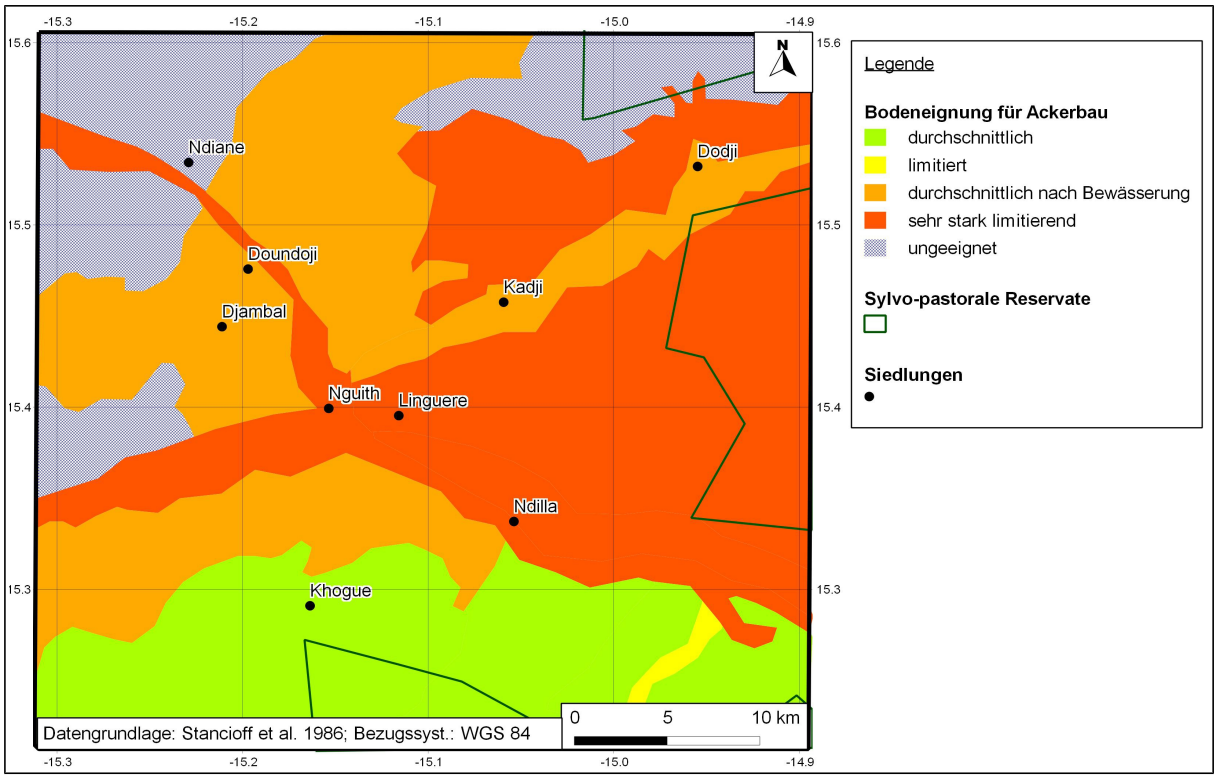


Abb. 60: Bodeneignungskarte des Untersuchungsgebietes für den Ackerbau
(eigene Darstellung nach STANCIOFF et al. 1986)

6. Conclusio und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, die Bodenqualität für den landschaftlichen Anbau auf einer lokalen Maßstabsebene für ein rund 40 X 40 km großes Untersuchungsgebiet im Senegal, im Umkreis von Linguère zu ermitteln, bewerten und die Einflussfaktoren herauszufinden. Dabei sollten zunächst verschiedene Bodentypen und ihre räumliche Verteilung, im Untersuchungsgebiet aufgezeigt werden. Aufgrund der physikalischen und chemischen Eigenschaften, ließen sich vier verschiedene Bodentypen ausweisen, von denen die hydromorphen Böden sowie die Regosole, aufgrund der Nährstoffparameter, die günstigsten Anbauvoraussetzungen bieten. Diese beiden Bodentypen, können jedoch nicht landwirtschaftlich genutzt werden, da in den hydromorphen Böden während der Anbauzeit, der Regenzeit, Wasser steht und die Regosole sich oft durch die Anwesenheit von Laterit kennzeichnen, der durch Abtragung des Oberbodens an die Bodenoberfläche gelangt ist. Bei den anderen beiden Bodentypen, handelt es sich um Sandböden (Arenosole), die landwirtschaftlich, jedoch mit unterschiedlichen Anbauprodukten, genutzt werden. Bezüglich der Nährstoffparameter, liefern diese Arenosole sehr mäßige Voraussetzungen für den landwirtschaftlichen Anbau, was jedoch nichts Ungewöhnliches für tropische Böden ist. In diesem Gebiet stellt das Wasser, insbesondere in der Trockenzeit, häufig den limitierenden Wachstumsfaktor dar. Eine Bewässerung würde den Ertrag sicherlich erheblich steigern, ist aber aus Kostengründen meist nicht realisierbar.

In dieser Arbeit wurde auf die Einteilung in vier Bodentypen zurückgegriffen, an der Clusteranalyse lassen sich jedoch auch einige Subgruppen erkennen, deren Zugehörigkeit in weiteren Analysen noch überprüft werden kann. Außerdem können noch weitere Vegetationsparameter, wie Baumhöhe oder Baumumfang sowie weitere Baum- und Straucharten, in die Analysen miteinbezogen werden.

Bei einigen Umweltparametern konnte, zum Teil wegen der weit verstreuten Probenstandorte und dem kleinen Untersuchungsgebiet, kein signifikanter Einfluss festgestellt werden. Hier könnten kleinräumige Untersuchungen zu dem gewünschten Ergebnis führen. Zur genaueren Analyse der Parameter könnten ebenfalls direkte Ordinationsverfahren, wie die CCA (Correspondence Analysis) oder die RDA (Redundancy Analysis) angewandt werden, auf die in dieser Arbeit, aufgrund der Komplexität, verzichtet wurde. Beim Einfluss der Forages, der Siedlungen und der Termiten, wäre es interessant, diese als Ausgangspunkte für Transekte zu nutzen, entlang derer beispielsweise alle 10 m detailgetreue Bodenuntersuchungen durchgeführt werden. Ebenfalls sinnvoll erscheint es, die

Fernerkundungsdaten von einem weiteren Monat zur Analyse heranzuziehen und deren Einfluss mit den Februardaten zu vergleichen.

Da sich die Bodenqualität auf engstem Raum unterscheiden kann, wäre es ebenfalls sinnvoll viel kleinräumiger zu arbeiten, was bedeutet, mehrere Bodenproben auf engstem Raum zu nehmen und zusätzlich Bodenprofile anzulegen, bei denen die einzelnen Bodenhorizonte untersucht werden. Somit könnten genauere Aussagen über die Charakteristika des Bodens getroffen werden. Hinsichtlich der Nährstoffparameter ist es besser, die einzelnen Werte direkt im Feld, beispielsweise mit sogenannten Feldphotometern zu erheben und auch zu verschiedenen Jahreszeiten die Messungen durchzuführen, um die Nährstoffdynamik besser zu verstehen.

Neben der kleinräumigen Untersuchung, ist auch eine Abdeckung auf ein großflächigeres Gebiet sicherlich interessant. Wie anhand am Anhang 4 ersichtlich, funktioniert die Bodentypenmodellierung auch für die benachbarten Gebiete. Um eine genaue Validierung vorzunehmen, sind jedoch auch Bodenproben jenseits der Grenzen des Untersuchungsgebietes erforderlich. Die Karten der Bodentypenmodellierung stellen eine Alternative zu bestehenden Landnutzungskarten dar, die zumeist nur in sehr geringen Auflösungen vorliegen (GRAU et al. 2013)

Alles in allem zeigt die Arbeit, dass mittels Bodenanalysen und statistischen Verfahren (Clusterung, NMDS und Modellierung), die lokale Bodeneinteilung nachvollzogen werden kann. Somit lässt sich die Eignung für den landwirtschaftlichen Anbau anhand von lokalen Namen ausweisen.

7. Literaturverzeichnis

AD-HOC-AG BODEN (Hrsg.) (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Auflage. Schweizerbart: Hannover.

ADAM, J.G. (1965): Généralités sur la flore et la vegetation du Senegal = Études Sénégalaises N°9. Connaissance du Sénégal Fascicule III: Climat – Sols – Végétation. C.R.D.S.: Saint-Louis.

BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W., WEIBER, R. (2011): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer: Heidelberg.

BAEYENS, J. (1949): The bases of classification of tropical soils in relation to their agricultural value = Commonwealth Bureau Soil Science Technical Commonication No. 46.

BAHRENBERG, G.; GIESE, E.; NIPPER, J. (1999): Statistische Methoden in der Geographie. Band 1. Univariate und bivariate Statistik. Teubner Borntraeger: Stuttgart.

BAHRENBERG, G.; GIESE, E.; NIPPER, J. (2003): Statistische Methoden in der Geographie. Band 2. Multivariate Statistik. Teubner Borntraeger: Stuttgart.

BAKHOUM, K.; NDOYE, F.; KANE, A.; ASSIGBETSE, K.; FALL, D.; SYLLA, S.; NOBA, K.; DIOUF, D. (2012): Impact of rhizobial inoculation on *Acacia senegal (L.) Willd.* growth in greenhouse and soil functioning in relation to seed provenance and soil origin. In: World Journal of Microbiology and Biotechnology 28. S. 2567-2579.

BILLE, J.C.; LEPAGE, M.; POUPON, H. (1972): Présentation de la zone d'étude de Pété Olé. Travail effectué dans le cadre du programme „O.R.S.T.O.M. Sahel". Étude d'un écosytème subdésertique: St. Louis.

BIMÜLLER, C. (2009): Die Böden im Ostpamir Tadschikistans – Charakteristik und Einfluss unterschiedlicher Beweidungsintensitäten. Diplomarbeit. Friedrich-Alexander-Universität: Nürnberg-Erlangen.

BLACK, H.I.J.; OKWAKOL, M.J.N. (1997): Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function in the tropics: the role of termites. In: Applied Soil Ecology 6. S. 37-53.

BLUME, H.-P.; STAHR, K.; LEINWEBER, P. (2011): Bodenkundliches Praktikum: Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, Land- und Forstwirte, Geo- und Umweltwissenschaftler. 3. Auflage. Spektrum: Heidelberg.

BLUME, H.-P.; BRUMMER, G.W.; HORN, R.; KANDELER, E.; KOGEL-KNABNER, I.; KRETZSCHMAR, R.; STAHR, K.; WILKE, B.-M. (2010): Scheffer/Schachtschabel- Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage. Spektrum: Heidelberg.

BRANDT, M.; ROMANKIEWICZ, C.; SPIEKERMANN, R.; SAMIMI, C. (2013a): Environmental change in time series and high resolution imagery - An interdisciplinary study in the Sahel of Mali and Senegal. In: Journal of Arid Environments, (in review).

BRANDT, M.; GRAU, T.; SAMIMI, C. (2013b): Modeling soil and woody vegetation in the Senegalese Sahel – A study in the context of environmental change, (in progress)

BREIMAN, L. (2001): Random forests. In: Machine Learning 45. S. 5-32.

BRIGAUD, F. (1965): Le climat du Sénégal = Études Sénégalaises N°9. Connaissance du Sénégal Fascicule III: Climat – Sols – Végétation. C.R.D.S.: Saint-Louis.

BRIGAUD, F. (1960): Géologie du Senegal = Études Sénégalaises N°9. Connaissance du Sénégal. Fascicule I: Géologie. Centre I.F.A.N.: Saint Louis.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR) (2008): World Reference Base for Soil Resources 2006. Ein Rahmen für internationale Klassifikation, Korrelation und Kommunikation. Erstes Update 2007. Deutsche Ausgabe: Hannover

CENTRE DE SUIVI ECOLOGIQUE (CSE) (2010): Rapport sur l'etat de l'environnement au Sénégal. Edition 2010.

CENTRE DE SUIVI ECOLOGIQUE (CSE) (2005): Rapport sur l'etat de l'environnement au Senegal. Edition 2005.

CHARREAU, C.; FAUCK, R. (1965): Les sols du Senegal = Études Sénégalaises N°9. Connaissance du Sénégal Fascicule III: Climat – Sols – Végétation. C.R.D.S.: Saint-Louis.

CHRISTEN, M. (1996): Beiträge zur Naturlandschaft Sihlwald. Universität Zürich. Geographisches Institut.

CONSEIL REGIONAL LOUGA (2007): Plan d'action environnemental regional de Louga.

DIACK, M.; DIOM, F.; SOW, K. (2010): Managing soil fertility to sustain crop production in the watersheds in Senegal. In: 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World:1-6 August 2010, Brisbane, Australia. Published on DVD.

DIOP, A.T.; DIAW, O.T.; DIÉMÉ, I.; TOURÉ, I.; SY, O.; DIÉMÉ, G. (2004): Mares de la zone sylvopastorale du Sénégal : tendances évolutives et rôle dans les stratégies de production des populations pastorales. In: Revue Élev. Méd. vét. Pays trop. 57. S. 77-85.

FAYE, A.; FALL, A.; TIFFEN, M.; MORTIMORE, M.; NELSON, J. (2001): Région de Diourbel: Synthesis, Drylands Research Working Paper 23a. Drylands Research, Crewkerne, United Kingdom.

FINCK, A. (2007): Pflanzenernährung und Düngung in Stichworten. 6. völlig neu bearbeitete Auflage. Borntraeger: Stuttgart.

FINCK, A. (1963): Tropische Böden. Einführung in die bodenkundlichen Grundlagen tropischer und subtropischer Landwirtschaft. Paul Parey: Hamburg.

FISCHER WELTALMANACH (2013): Der Fischer Weltalmanach. Fischer: Frankfurt am Main.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO) (1990): Guidelines for Soil Description. 3rd ed. (revised). Soil Resources, Managment and Conservation Service, Land and Water Development Division, FAO: Rome.

FRANKE, W. (1997): Nutzpflanzenkunde. Nutzbare Gewächse der gemäßigten Breiten, Subtropen und Tropen. 6. neubearbeitete und erweiterte Auflage. Georg Thieme: Stuttgart.

GONZALEZ, P. J. (1997): Dynamics of biodiversity and human carrying capacity in the Senegal Sahel. Dissertation, University of California, Berkeley.

GRAY, K.M. (2005): Changing soil degradation trends in senegal with carbon sequestration payments. Master thesis, Montana State University.

GRAU, T.; BRANDT, M.; SAMIMI, C. (2013): Predicting local Soil- and Land-units with Random Forest in the Senegalese Sahel. Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013-10981, EGU General Assembly 2013 (submitted).

HANAN, N.P.; PREVOST, Y.; DIOUF, A.; DIALLO, O. (1991): Assessement of desertification around deep wells in the sahel using satellite imagery. In: Journal of Applied Ecology 28. S. 173-186.

HAZELTON, P.; MURPHY, B. (2007): Interpreting Soil Test Results. What do all the numbers mean? CSIRO: Melbourne.

HEIN, L. (2006): The impacts of grazing and rainfall variability on the dynamics of a Sahelian rangeland. In: Journal of Arid Environments 64. S. 488–504.

HERRICK, J.E.; VAN ZEE, J.W.; KAVSTAD, K.M.; WHITFORD, W.G. (2005a): Monitoring Manual for Grassland, Shrubland and Savanna Ecosystems. Volume I: Quick Start. USDA – ARS Jornada Experimental Range. Las Cruces: New Mexico.

HERRICK, J.E.; VAN ZEE, J.W.; KAVSTAD, K.M.; WHITFORD, W.G. (2005b): Monitoring Manual for Grassland, Shrubland and Savanna Ecosystems. Volume II: Design, supplementary methods and interpretation. USDA – ARS Jornada Experimental Range. Las Cruces: New Mexico.

HILDEBRANDT, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. Herbert Wichmann: Heidelberg.

INTERNET STUDIOS SPAIN (2013): Weltkarten. Karten und Flaggen der Welt. http://de.justmaps.org/karten/afrika/senegal/, abgerufen am 22.01.2013.

ISAAC, M.W.; HARMAND, J.M.; LESUEUR, D.; LELON, J. (2010): Tree age and soil phosphorus conditions influence N_2-fixation rates and soil N dynamics in natural populations of *Acacia senegal*. In: Forest Ecology and Management 261. S. 582–588.

ISTITUTO AGRONOMICO PER L'OLTREMARE (IAO) (2003): Land Evaluation in the province of Thiès - Senegal = Report of 23rd Course Professional Master. Geomatics and Natural Resources Evaluation: Florenz.

JANSEN, P.C.M.; CARDON, D. (Hrsg.) (2005): Plant Resources of Tropical Africa 3. Dyes and tannins. PROTA Foundation. Backhuys Publishers: Leiden.

JONES, M.J. (1973): The organic matter content of the savanna of West Africa. In: Journal of Soil Science 24. S. 42-53.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. (2006): Worldmap of Köppen-Geiger Climate Classification. In: Meteorologische Zeitschrift 15. S. 259-263.

LANDON, J.R. (1991): Booker Tropical Soil Manual. A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics. Pearson Longman: New York.

LE HOUÉROU, H.H. (1989): The grazing land ecosystem of the African Sahel. Springer: Berlin.

LEWIS, A.B. (1952): Land classification for agricultural development. = FAO Development Paper. No. 18: Rome.

LEYER, I.; WESCHE, K. (2007): Multivariate Statistik in der Ökologie. Springer: Berlin.

LÖFFLER, E. (1994): Geographie und Fernerkundung. 2. Aufl. - Teubner Borntraeger: Stuttgart.

MAIGNEN, R., (1965): Notice Explicative, Carte Pédologique du Senegal au 1/1.000.000. Publication ORSTOM: Dakar.

MARX, E.S.; HART, J.; STEVENS, R.G. (1999): Soil Test Interpretation Guide = Extension and Station Communications 1478. Oregon State University.

MAYDELL, H.-J.V. (1990): Trees and Shrubs of the Sahel: Their Characteristics and Uses. Josef Margraf: Weikersheim.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE (2008a): État des ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde. Second Rapport National du Sénégal.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE (2008b): Grande offensive agricole pour la nourriture et l'abondance. Cahier de reperes techniques. Objectifs et potential de production.

NDOUR, T. (2001): La degradation des sols au Sénégal: l'exemple de deux communautés rurales. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Cheikh Anta Diop.

NDIAYE, M. (2007): Systemes de production et mutations des paysages ruraux dans la basse vallee du Ferlo au Sénégal. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Bordeaux III.

NYE, P.H. (1955): Some soil-forming processes in the humid tropics. IV. The action of the soil fauna. In: Journal of Soil Science 6. S. 73-83.

OKSANEN, J. (2012): Package vegan. Version 2.0-5. http://cran.r-project.org/web/packages/vegan/vegan.pdf, abgerufen am 29.01.2013.

ÖNORM L 1072 (2004): Physikalische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der Aggregatstabilität nach dem Siebtauchverfahren. Österreichisches Normierungsinstitut: Wien.

ÖNORM L 1083 (2006): Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der Acidität (pH-Wert). Österreichisches Normierungsinstitut: Wien.

ÖNORM L 1086 (2001): Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung der austauschbaren Kationen und der potentiellen Kationen-Austauschkapazität (KAKpot) durch Extraktion mit gepufferter Bariumchlorid-Lösung. Österreichisches Normierungsinstitut: Wien.

ÖNORM L 1092 (2005): Chemische Bodenuntersuchungen - Extraktion wasserlöslicher Elemente und Verbindungen. Österreichisches Normierungsinstitut: Wien.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD) (2008): Profil sécurité alimentaire Sénégal.

OULD SABAR, M.S. (2002): La sebkha Ndghamcha. In: Amis de la Mauritanie n°22. 15.09.2002.

R DEVELOPMENT CORE TEAM (2012): Package stats. Version 2.15.2. http://stat.ethz.ch/R-manual/R-patched/library/stats/html/00Index.html, abgerufen am 29.01.2013.

REHM, S. (Hrsg.) (1986): Handbuch der Landwirtschaft und Ernährung in den Entwicklungsländern. Band 3: Grundlagen des Pflanzenbaues in den Tropen und Subtropen. 2. völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage. Eugen Ulmer: Stuttgart.

ROWELL, D.L. (1994): Bodenkunde. Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen. Springer: Heidelberg.

SACHS, L.; HEDDERICH, J. (2006): Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R. 13. Auflage. Springer: Berlin.

SALL, M.M. (1982): Dynamique et morphogenèse actuelles au Sénégal Occidental. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Strasbourg.

SAMIMI, C. (2003): Das Weidepotential im Gutu Distrikt (Zimbabwe). Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung unter Verwendung von Landsat TM-5. In: Karlsruher Schriften zur Geographie und Geoökologie 19.

SANTOIR, C. (1983): Raisons pastorales et Politiques de développement. Les Peuls sénégalais face aux aménagements. Travaux et documents de l'O.R.S.T.O.M.: Paris.

SCHULTZ, J. (2000): Handbuch der Ökozonen. Eugen Ulmer: Stuttgart.

STANCIOFF, A.; STALJANSENS, M.; TAPPAN, G.G. (1986): Cartographie et télédétection des Ressources Naturelles de la République du Sénégal. Dakar: Direction de l'Aménagement du Territoire (DAT), Remote Sensing Institut (RSI), USAID. Projet USAID / RSI n0685-0233.

STROMMER, G.; BRANDT, M.; DIONGUE-NIANG, A.; SAMIMI, C. (2013): Analysis of daily rainfall of the Sahelian weather-station Linguère (Senegal) – Trends and its impacts on the local population. Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013-12716, EGU General Assembly 2013 (accepted).

SY, O. (2010): La transhumance transfrontaliere, source de conflits au Ferlo (Sénégal). In: M@ppemonde 98.

TAPPAN, G.G.; SALL, M.; WOOD, E.C.; CUSHING, M. (2004): Ecoregions and land cover trends in Senegal. In: Journal of Arid Environments 59. S. 427-462.

TARDY, Y. (1997): Petrology of Laterites and Tropical Soils. A. A. Balkema: Rotterdam.

UNITED NATIONS CHILDREN'S EMERGENCY FUND (UNICEF) (2011): Étude de faisabilite des forages manuels identification des zones potentiellement favorables.

UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION (UNSD) (2013): Country profile Senegal. http://data.un.org/CountryProfile.aspx?crName=SENEGAL, abgerufen am 18.02.2013

VINCKE, C. (2010): Long term dynamics and structure of woody vegetation in the Ferlo (Senegal). In: Journal of Arid Environments 74. S. 268–276.

WEIER, J.; HERRING, D. (2000): Measuring Vegetation (NDVI & EVI) http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/,NASA; abgerufen am 29.01.2013.

8. Anhang

Anhangsverzeichnis

- Anhang 1: Ausschnitt der geologischen Zeitskala Senegals 132
- Anhang 2: Eigenwerte der Variablen an den Hauptkomponenten.....133
- Anhang 3: Korngrößendiagramm der verschiedenen Bodentypen.....134
- Anhang 4: Bodenmodellierungskarte für ein größeres Gebiet.....135
- Anhang 5: R-Skript.....136
- Anhang 6: Datenmatrix der Clusterung - Laborparamter.....138
- Anhang 7: Datenmatrix der Umwelt-, Fernerkundungs- und Vegetationsparameter.....142

Anhang 1: Ausschnitt der geologischen Zeitskala Senegals

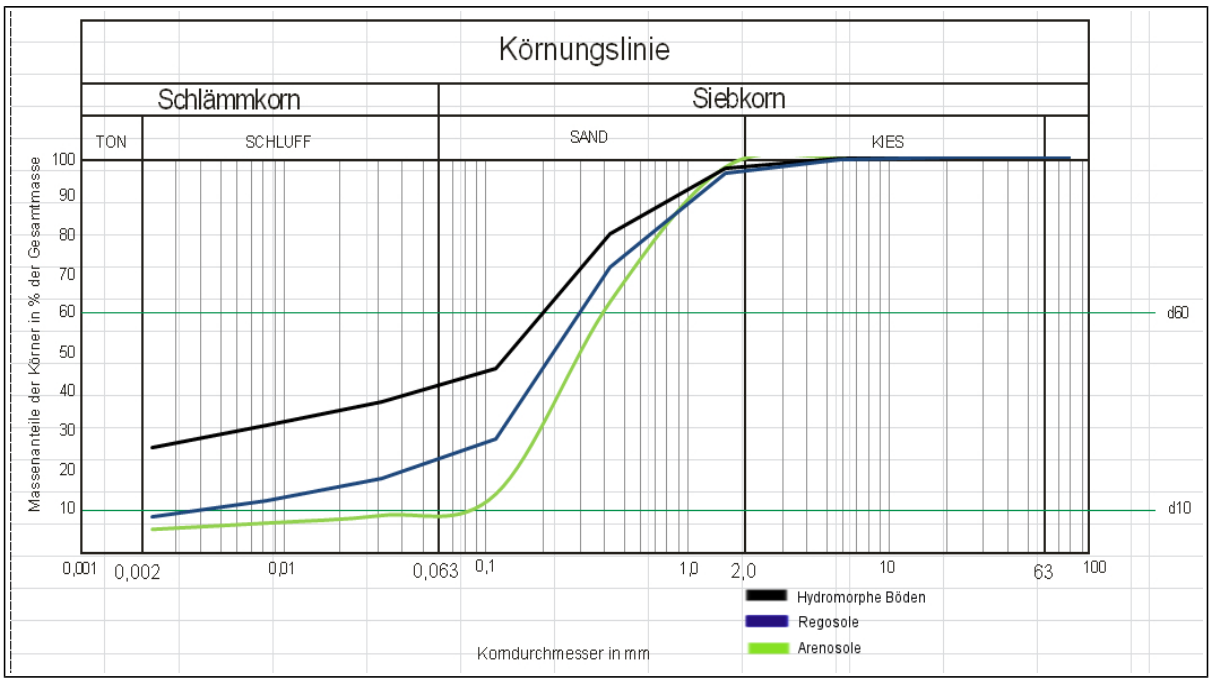
(P – Präkambrium, PZ – Paläozoikum, MZ – Mesozoikum, KZ – Kanäozoikum; m N – marines Niveau; a – arid, h – humid)
(eigene Darstellung, ergänzt nach OULD SABAR 2002.)

Äon	System	Zeit [ma B.P.]	Serie	m N	Klima	Charakteristik
P	Birriem	2100 - 2000				Westafrikanischer Sockel (Schiefer & Granite)
PZ	Kambrium	542 - 488			h	Ablagerung von Sand- und Tonsteinen
	Ordovizium	488 - 444			h	
	Devon	416 – 359			a	Herzynische Gebirgsbild.
MZ	Jura	200 - 145			h	
	Kreide	145 - 65			a & h	Aquifersande
KZ	Paläogen	65 - 56	Paläozän		h	
		56 - 34	Eozän		h	Kalksteine
		34 - 23	Oligozän		a	
	Neogen	23 – 5,3	Miozän		h	
		5,3 - 2,6	Pliozän		a & h	Horst N'Dias
	Quartär	1,0 – 0,7	Tafaritien		h	
		0,7 – 0,5	Akcharien		a	Erg von Ferlo
		0,5 – 0,2	Aioujien		h	
		0,2 – 0,12	Aguerguérien		a	
		0,12 – 0,03	Inchirien		h	Bodenentwicklung
		0,03 – 0,01	Ogolien		a	Rot/Gelb/Weißdünen
		0,01 – 0,007	Tchadien		h & a	
		0,007 – 0,004	Nouakchottien		h	Muschelkalke, Sande
		0,004 – 0,0028	Tafolien		a	
		0,0028 – 0,0023	Dakarien		h	
		0,0023 – 0,002	Tafolien		a	
		0,002 - 0	rezent		a	

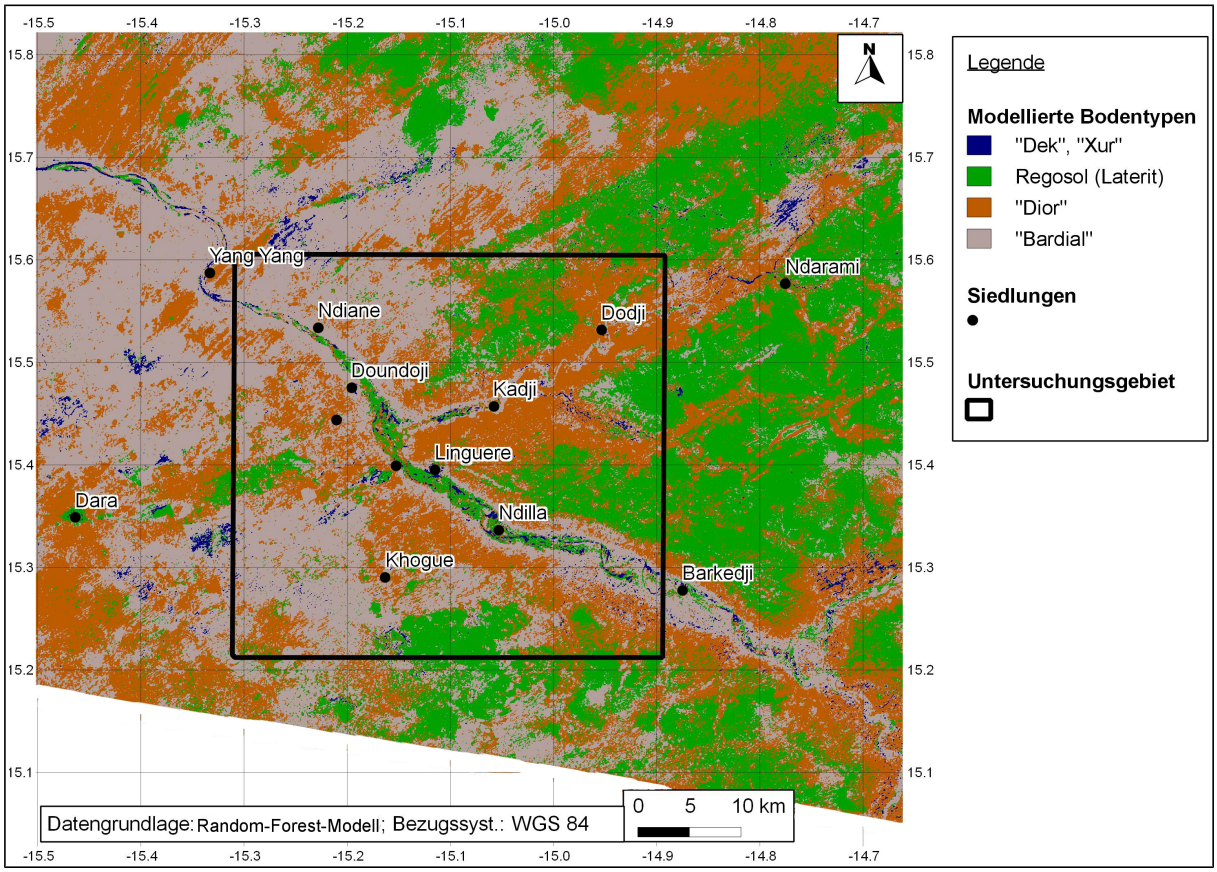
Anhang 2: Eigenwerte der Variablen an den Hauptkomponenten

	Variable	Komp.1	Komp.2	Komp.3	Komp.4
pH	pH-Wert	-0,112	-0,489	-0,273	-0,184
LF	Leitfähigkeit in [µS/cm]	-0,216	-0,125	-0,112	-0,246
S	Sand in [%]	0,216	0,103	-0,2	0,215
U	Schluff in [%]	-0,212	0,102	-0,107	-0,161
T	Ton in [%]	-0,215	0,157	0,221	-0,186
NO_3^-	Nitrat in [mg/kg]	-0,208	0,402	-0,28	0,542
NH_4^+	Ammonium in [mg/kg]	-0,194	0,207	0,173	-0,246
PO_4^{3-}	Phosphat in [mg/kg]	0,115	0,542	-0,331	-0,376
C/N	Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis	-0,198	0,108	-0,121	-0,233
N	Stickstoff in [% Masse]	-0,202	0,108	0,125	0,412
C	Kohlenstoff in [% Masse]	-0,214	0,109	-0,1	-0,221
S	Schwefel in [% Masse]	-0,183	-0,194	-0,19	0,43
H	Wasserstoff in [% Masse]	-0,218	0,107	-0,22	-0,27
Ca^{2+}	Calzium in [cmol/kg]	-0,212	-0,148	0,122	-0,101
Mg^{2+}	Magnesium in [cmol/kg]	-0,215	-0,118	-0,147	-0,135
Na^+	Natrium in [cmol/kg]	-0,101	-0,248	0,103	-0,575
K^+	Kalium in [cmol/kg]	-0,213	-0,154	-0,133	-0,192
Al^{3+}	Aluminium in [cmol/kg]	0,17	0,367	-0,105	-0,191
Fe^{3+}	Eisen in [cmol/kg]	-0,133	0,426	0,212	0,128
Dichte	Dichte in [g/cm³]	0,208	-0,101	-0,161	-0,328
WkMax	Maximale Wasserkapazität in [%]	-0,201	0,182	-0,205	0,212
HG	Humusgehalt in [%]	-0,214	0,107	-0,217	-0,206
KAKpot	Potentielle Kationen-austauschkapazität in [cmol/kg]	-0,212	-0,141	-0,13	0,118
BS	Basensättigung in [%]	-0,183	-0,336	-0,104	0,141
STA	Bodenstabilität	-0,184	0,217	-0,117	-0,318
GS	Grobsand in [%]	-0,117	0,137	-0,568	-0,407
MS	Mittelsand in [%]	0,189	-0,192	-0,412	-0,168
FS	Feinsand in [%]	-0,158	0,389	0,441	0,185

Anhang 3: Korngrößendiagramm der verschiedenen Bodentypen



Anhang 4: Bodenmodellierungskarte für ein größeres Gebiet



Anhang 5: R-Skript

Vorbereitung

```
setwd("C:/Users/Tobias/Desktop/Masterarbeit/Statistik/Rkurs/Senegal") # Arbeitsverzeichnis festlegen
rm(list=ls(all=TRUE))
```

1. PCA

```
require(stats) # Paket stats laden
alles <- read.table("alles.txt", dec=",", sep="\t", header=T, row.names=1) # Daten einlesen
allvar_sub <- subset(alles, select=c(1:25,68:70)) # Subdatensatz auswählen
allvart <- scale(allvar_sub, center=T, scale=T) # standardisieren und zentrieren
allvart <- as.data.frame(allvart) # standardisierte Matrix in einen Dataframe umwandeln
class(allvart) # Klassentyp anzeigen
allvart_Cor <- cor(allvart, method="spearman") # Korrelationsmatrix berechnen
allvart_PCA <- princomp(allvart_Cor, cor=T) # Durchführung der PCA
loadings(allvart_PCA) # Ladungen anzeigen
summary(allvart_PCA) # Eigenwerte anzeigen
biplot(allvart_PCA, scale=1, cex=c(0.1, 0.5)) # Korrelationsbiplot zeichnen
abline(h=0, lty=2) # horizontale Linie durch Koordinatenursprung hinzufügen
abline(v=0, lty=2) # vertikale Linie durch Koordinatenursprung hinzufügen
```

2. Clusteranalye

```
require(stats) # Paket stats laden
alles <- read.table("alles.txt", dec=",", sep="\t", header=T, row.names=1) # Daten einlesen
allvar_sub <- subset(alles, select=c(1:25,68:70)) # Subdatensatz auswählen
allvart<-scale(allvar_sub, center=T, scale=T) # standardisieren und zentrieren
allvart1<-as.data.frame(allvart) # Uwandlung der erzeugten Matrix in einen Dataframe
allvar_dist <- dist(allvart1, method="euclidean") # Distanzmatrix berechnen
allvar_dendro <-hclust(allvar_dist, method="ward") # Durchführung der Clusterung
plot(allvar_dendro, main="Böden im Senegal", cex=0.6, cex.lab=0.8, hang=-1,
ylab="Ähnlichkeit") # Dendogramm zeichnen
Klassen <- cutree(allvar_dendro, k=4) # Dendogramm in 4 Klassen aufspalten
a<-as.matrix(Klassen, 1) # Matrix erzeugen
```

3. NMDS

```
require(vegan) # Paket vegan laden
alles <- read.table("alles.txt", dec=",", sep="\t", header=T, row.names=1) # Daten einlesen
allvar_sub <- subset(alles, select=c(1:25, 68:70)) # Subdatensatz auswählen
LA_subt<-scale(allvar_sub, scale=T) # standardisieren und zentrieren
LA_subt1<-as.data.frame(LA_subt) # Umwandlung der erzeugten Matrix in einen Dataframe
LA_dist <- dist(LA_subt1, method="euclidean") # Distanzmatrix berechnen
NMDS_v1 <- metaMDS(LA_dist, k=2, trymax=200, autotransform=TRUE, trace=1) #
Berechnung des NMDS mit 4 Dimensionen und 200 Wiederholungen
Dimensionen <- c(1,2,3,4,5,6)
Stress <- c(15,9,7,5,4,3)
elbow <- plot(Stress~Dimensionen, type="o") # Elbow zeichnen
stressplot(NMDS_v1, main="Shepard plot") # Stressplot zeichnen
par(mar = c(4, 4, 1, 1) + 1)
ordiplot(NMDS_v1, choices = c(1,2), type= "n") , xlim = c(-0.15, 0.11)) # NMDS zeichnen
points(NMDS_v1, col = a[,1], dis = "sites", cex = 0.6) # Punkte aus Clusteranalyse anzeigen
title (main = paste("NMDS - Stress =", round(NMDS_v1$stress,3))) # Titel anzeigen
abline(h=0, lty=2) # horizontale Linie durch Koordinatenursprung hinzufügen
abline(v=0, lty=2) # vertikale Linie durch Koordinatenursprung hinzufügen
BOD <- subset(alles, select=c(1:25, 68:70)) # Subdatensatz Boden auswählen
UV <- subset(alles, select=c(29,30,31,32,33,34,35,36,37,41,43,49,71)) # Datensatz Umweltvariablen auswählen
VEG <- subset(alles, select=c(59:66) # Subdatensatz Vegetationsdaten auswählen
fit <- envfit(NMDS_v1,BOD, choices=c(1,2,3), perm = 999) # Bodendaten rüberplotten
fit <- envfit(NMDS_v1,UV, choices=c(1,2,3), perm = 999) # Umweltdaten rüberplotten
fit <- envfit(NMDS_v1,VEG, choices=c(1,2,3), perm = 999) # Vegetationsdaten rüberplotten
plot(fit, choices = c(1,2), cex=0.8) # rübergeplottete Parameter darstellen
plot(fit, choices = c(1,2), p.max = 0.1, col = "dark green", cex=0.8) # signifikante Parameter (0,05 < p < 0,1)
werden dunkelgrün dargestellt
plot(fit, choices = c(1,2), p.max = 0.05, col = "red", cex=0.8) # signifikante Parameter (p < 0,05) werden rot
dargestellt
```

4. Boxplot

```
require(graphics) # Paket graphics laden
#zuerst 4 separate Datensätze resultierend aus dem Clusterergebnis erstellen
aa <- read.table("1.txt", dec=",", sep="\t", header=T, row.names=1) # Datensatz hydromorphe Böden einlesen
bb <- read.table("2.txt", dec=",", sep="\t", header=T, row.names=1) # Datensatz Regosolböden einlesen
cc <- read.table("3.txt", dec=",", sep="\t", header=T, row.names=1) # Datensatz Arenosolböden I einlesen
dd <- read.table("4.txt", dec=",", sep="\t", header=T, row.names=1) # Datensatz Arenosolböden II einlesen
allvar <- read.table("alles3.txt", dec=",", sep="\t", header=T, row.names=1) # kompletten Datensatz einlesen
boxplot(allvar[,22], aa[,22], bb[,22], cc[,22], dd[,22], ylab= "Humusgehalt [%]", boxwex=0.3, names=c("Alle",
"hydro. Böden", "Regosol", "Arenosol I", "Arenosol II")) # Boxplot erstellen
shapiro.test(allvar[,22]) # Test auf Normalverteilung der Daten
wilcox.test(aa[,22],bb[,22], alternative="two.sided") # U-Test zwischen Humusgehalt der hydromorphen Böden
und der Regosolstandorte
```

5. Regression

```
require(lattice) # Paket lattice laden
c<-allvar[,11] # C aus Datensatz auswählen
n<-allvar[,10] # N aus Datensatz auswählen
nc <- lm(n ~ c) # lineares Modell erzeugen
summary(nc) # Statistik mit R² anzeigen
xyplot(n~c, type=c("p","r"), col = "black", xlab = "C [%]", ylab = "N [%]") # Regression darstellen
```

Anhang 6: Datenmatrix der Clusterung - Laborparamter

PN	pH [H_2O]	LF [µS/cm]	SA [%]	U [%]	T [%]	GS [%]	MS [%]	FS [%]	Dichte [g/cm³]	WkMax [%]	STA	NO_3^- [mg/kg]	NH_4^+ [mg/kg]	PO_4^{3-} [mg/kg]
501	5,02	51,10	59,80	18,08	22,13	1,97	19,23	78,80	1,42	39,30	7	76,46	15,61	0,47
502	5,34	20,50	83,98	9,32	6,71	3,52	35,94	60,54	1,50	31,50	3	0,28	4,95	1,92
503	5,87	14,30	83,62	9,77	6,61	2,08	39,49	58,43	1,43	33,60	5	1,55	2,60	0,77
504	5,51	20,20	82,12	11,14	6,74	1,95	34,00	64,05	1,45	32,00	5	3,31	5,41	0,21
505	6,41	27,10	86,32	9,29	4,43	2,57	39,16	58,27	1,56	29,50	6	1,73	3,82	1,70
506	5,38	11,90	89,18	6,08	4,74	6,17	35,93	57,91	1,62	26,80	5	0,16	5,50	0,14
507	5,75	8,70	87,36	7,74	4,90	3,78	45,74	50,48	1,69	24,50	5	0,00	4,02	0,26
508	6,11	15,30	91,26	5,30	3,44	1,42	39,69	58,89	1,62	31,00	3	2,86	2,65	1,65
509	5,30	10,60	84,94	9,45	5,61	3,65	45,14	51,21	1,50	30,60	4	1,30	2,74	0,52
510	5,82	9,80	86,68	7,74	5,58	1,43	30,41	68,16	1,59	26,40	4	0,00	2,69	0,17
511	5,97	17,30	79,67	12,10	7,54	3,27	38,79	57,94	1,50	29,90	6	8,80	3,54	0,24
512	6,24	27,20	66,89	24,79	8,21	5,02	21,30	73,69	1,41	32,40	5	10,63	5,32	0,02
513	5,58	16,90	72,28	17,64	8,98	2,19	43,65	54,16	1,42	29,60	7	5,39	4,04	0,26
514	6,27	27,80	68,36	23,54	7,78	3,12	18,75	78,13	1,43	33,10	8	9,16	5,88	0,88
515	8,08	113,9	60,59	19,60	19,57	1,12	16,17	82,71	1,46	33,50	5	12,53	1,68	0,01
517	4,91	14,10	81,28	12,48	6,24	0,25	32,55	67,20	1,47	32,20	5	9,75	3,52	0,60
518	5,64	12,70	80,47	14,31	5,19	4,32	34,98	60,70	1,55	28,20	6	0,00	2,74	0,18
519	6,42	20,20	73,48	16,71	6,06	2,65	22,01	75,35	1,62	29,80	7	9,05	3,19	0,16
520	5,83	9,70	79,10	15,10	5,78	2,76	37,94	59,30	1,42	30,90	7	2,49	2,46	0,06
521	5,99	9,70	84,50	10,54	4,56	2,79	37,37	59,83	1,61	29,90	6	0,00	1,00	0,47
522	5,16	10,90	79,72	14,75	5,53	7,07	36,30	56,62	1,52	26,50	5	0,00	1,72	0,04
523	6,16	12,70	82,32	10,33	7,36	3,74	39,38	56,88	1,66	29,50	4	1,79	2,19	0,18
524	6,81	29,20	82,66	11,69	5,65	3,12	41,62	55,26	1,69	24,90	4	0,00	1,16	0,34
525	6,36	28,30	59,16	25,87	8,84	3,11	30,59	66,30	1,43	34,30	5	12,89	4,55	0,16
526	5,14	29,40	55,58	21,09	23,26	6,01	31,97	62,03	1,43	39,20	8	19,46	9,12	0,10
527	5,46	9,00	82,12	12,91	4,97	3,58	40,62	55,80	1,69	29,20	6	2,03	2,64	0,17
528	6,16	11,40	80,74	8,63	10,63	1,41	27,35	71,24	1,50	29,20	6	2,48	1,70	0,11
529	7,99	126,9	51,91	17,87	27,17	7,21	37,06	55,73	1,41	33,80	8	14,80	3,91	0,16
530	6,07	10,50	88,74	6,70	4,56	2,21	39,82	57,97	1,50	30,50	5	0,11	2,11	0,35
531	6,13	14,40	86,58	8,60	4,83	1,87	42,90	55,23	1,54	28,50	5	7,80	1,88	0,05
532	6,40	15,60	92,82	3,82	3,37	0,73	42,77	56,50	1,65	30,60	4	4,87	0,96	0,35
533	6,28	17,70	85,19	7,14	7,56	3,96	31,45	64,59	1,50	30,20	6	20,00	3,48	0,38
534	6,23	29,00	69,94	17,60	12,35	1,20	23,25	75,55	1,39	33,00	6	28,37	3,34	0,15
535	5,15	9,40	86,86	8,72	4,42	2,14	44,00	53,86	1,61	29,90	5	0,00	1,52	0,16
537	6,35	14,90	83,09	11,14	5,28	5,58	47,45	46,97	1,71	24,30	6	6,63	2,46	0,08
538	5,81	17,40	67,71	22,29	9,98	6,17	37,24	56,59	1,42	32,20	7	7,63	3,02	0,26
539	5,68	30,10	57,21	27,13	14,74	4,30	28,99	66,71	1,57	26,30	6	31,56	4,02	0,08
540	7,04	86,30	54,14	14,80	31,06	4,95	26,52	68,53	1,44	30,90	7	11,01	7,70	0,18
541	6,03	17,70	80,82	13,44	5,72	7,15	39,36	53,49	1,59	27,90	7	2,88	4,36	0,18
542	5,37	7,80	88,22	6,43	5,35	2,34	41,60	56,06	1,58	27,20	7	0,00	3,92	0,24
543	5,85	10,20	81,69	10,81	7,49	3,82	46,10	50,09	1,57	28,60	6	2,34	4,44	0,10
544	5,18	9,00	87,28	8,39	4,28	4,19	40,61	55,20	1,61	26,70	5	1,73	3,18	0,04
545	5,44	10,20	81,90	9,55	8,55	1,83	36,75	61,42	1,59	27,70	4	2,83	7,50	0,09

PN	pH [H_2O]	LF [µS/cm]	SA [%]	U [%]	T [%]	GS [%]	MS [%]	FS [%]	Dichte [g/cm³]	WkMax [%]	STA	NO_3^- [mg/kg]	NH_4^+ [mg/kg]	PO_4^{3-} [mg/kg]
546	5,65	8,60	90,56	5,88	3,56	2,16	41,25	56,58	1,63	29,00	6	0,92	2,96	0,19
547	5,25	8,20	90,82	5,83	3,35	1,23	43,03	55,74	1,60	27,80	5	0,03	2,58	0,15
548	6,22	9,60	81,40	8,79	9,82	1,87	36,44	61,70	1,58	28,70	5	0,00	1,91	0,10
549	6,58	10,30	84,92	7,15	7,93	2,54	36,50	60,95	1,60	29,20	3	0,00	1,68	0,05
550	7,44	52,50	90,94	5,25	3,81	1,06	42,89	56,06	1,57	28,70	4	19,65	0,00	3,16
551	5,21	7,60	91,60	4,71	3,69	1,09	44,00	54,91	1,60	26,60	4	3,45	1,00	0,28
552	6,24	8,10	87,88	6,87	5,25	1,16	35,59	63,25	1,62	29,10	4	0,00	2,47	0,18
553	6,76	14,00	84,70	6,18	9,12	2,20	41,65	56,15	1,63	26,90	4	0,38	3,95	0,14
554	6,15	11,10	79,30	15,07	5,64	3,20	32,01	64,79	1,47	22,80	4	1,13	2,34	0,46
555	4,43	196,9	32,24	29,79	37,97	2,61	13,96	83,44	1,51	36,90	8	258,9	37,64	0,19
556	4,51	106,5	54,29	18,26	27,29	4,97	38,95	56,09	1,30	32,70	8	132,4	36,89	0,22
557	6,44	17,60	78,30	15,88	5,26	4,55	39,90	55,55	1,58	31,90	6	8,41	4,14	0,21
558	6,15	12,30	75,62	18,61	5,69	8,64	47,86	43,50	1,65	26,20	6	5,05	3,88	0,06
559	5,31	251,0	72,25	20,50	7,21	9,85	40,01	50,14	1,54	30,80	6	293,9	7,83	0,17
560	5,81	8,90	85,34	9,12	5,54	2,48	46,14	51,37	1,65	25,70	5	7,79	3,16	0,62
561	5,97	30,10	64,94	19,48	15,58	4,74	40,62	54,64	1,42	35,60	6	15,54	4,55	0,15
562	4,97	7,00	89,80	5,72	4,48	1,25	44,39	54,37	1,51	28,00	5	4,27	2,02	0,09
563	5,47	7,90	90,40	5,63	3,97	2,46	47,23	50,31	1,58	28,60	5	0,00	1,28	0,59
564	5,68	22,70	78,06	18,32	3,62	3,33	39,99	56,67	1,34	35,60	6	29,10	4,22	1,10
565	5,31	21,10	83,82	10,41	5,77	0,38	33,69	65,93	1,45	26,10	4	35,43	6,95	0,17
566	5,12	8,70	88,90	6,14	4,96	0,76	37,95	61,28	1,63	26,20	3	1,51	2,69	0,34
567	5,82	8,10	86,38	8,78	4,84	1,25	37,86	60,89	1,52	30,30	5	3,10	0,68	0,13
568	5,31	11,10	90,28	5,04	4,68	2,13	43,53	54,34	1,68	24,30	4	4,63	2,20	0,04
569	5,24	10,80	83,44	10,45	6,09	4,36	36,23	59,41	1,55	29,70	5	13,58	1,77	0,13
570	6,01	14,60	76,70	13,96	9,34	6,94	33,25	59,82	1,55	24,90	6	5,33	3,11	0,31
571	6,59	25,50	67,64	24,30	8,06	8,93	37,82	53,25	1,49	31,00	5	8,88	4,01	0,15
572	5,85	10,60	74,60	15,39	7,99	7,28	39,56	53,17	1,56	28,60	5	4,43	3,09	0,13
573	6,38	22,40	72,92	18,96	8,06	9,73	39,31	50,96	1,51	32,10	6	5,77	2,63	0,08
574	6,35	12,30	85,16	9,06	5,78	7,33	33,61	59,07	1,63	20,20	4	3,64	2,14	0,11
575	5,87	9,10	83,80	10,19	5,99	8,14	41,99	49,87	1,59	26,20	4	5,48	2,12	0,26
576	4,89	6,00	92,48	3,58	3,94	1,25	46,69	52,05	1,74	20,40	3	0,00	1,73	0,40
577	5,53	7,90	79,46	13,86	6,60	7,95	33,90	58,15	1,69	26,30	7	2,43	2,37	0,35
578	6,16	24,90	69,95	22,21	7,80	6,92	33,78	59,30	1,57	27,00	6	12,96	23,79	0,16
579	5,91	8,10	87,48	7,50	5,02	6,31	34,43	59,26	1,67	27,60	4	0,68	2,26	0,00
580	5,65	8,30	89,46	6,84	3,70	4,63	44,42	50,95	1,61	27,50	6	0,04	1,98	0,10
581	6,11	15,40	86,28	8,97	4,75	2,09	40,06	57,86	1,43	28,00	6	4,57	3,11	0,46
583	5,47	8,00	88,82	6,12	5,06	1,67	42,72	55,62	1,67	24,30	4	3,35	2,21	0,24
584	5,73	6,90	84,84	8,47	6,69	3,75	42,95	53,30	1,77	22,90	5	1,00	2,09	0,18
585	5,96	9,20	81,00	11,03	7,97	3,58	39,83	56,59	1,61	27,50	4	4,40	2,17	0,04
586	6,23	8,60	86,54	7,88	5,58	2,08	41,53	56,39	1,44	32,20	6	5,23	1,98	0,16
587	6,15	17,30	78,50	14,89	6,61	2,68	43,59	53,73	1,56	31,40	4	7,76	1,83	0,13

PN	C/N	N [%]	C [%]	HG [%]	S [%]	H [%]	Ca	Mg	Na	K [cmol/kg]	Al	Fe	KAKpot	BS [%]
501	7,73	0,13	0,99	1,68	0,04	0,36	3,54	1,19	0,12	0,50	0,02	0,19	5,57	96,13
502	5,23	0,06	0,34	0,57	0,03	0,06	1,30	0,61	0,09	0,20	0,02	0,02	2,23	98,02
503	5,32	0,06	0,30	0,51	0,02	0,05	1,13	0,51	0,20	0,15	0,03	0,02	2,03	97,79
504	4,43	0,05	0,24	0,40	0,01	0,04	0,81	0,36	0,16	0,17	0,07	0,02	1,57	94,70
505	3,63	0,08	0,29	0,49	0,02	0,02	1,02	0,28	0,13	0,21	0,02	0,01	1,67	98,17
506	2,70	0,07	0,19	0,32	0,01	0,00	0,53	0,20	0,09	0,14	0,06	0,01	1,02	93,70
507	5,72	0,04	0,25	0,42	0,02	0,02	0,98	0,30	0,35	0,12	0,07	0,01	1,84	95,33
508	4,47	0,05	0,21	0,36	0,02	0,01	0,86	0,20	0,18	0,11	0,03	0,02	1,40	96,49
509	2,49	0,08	0,20	0,33	0,01	0,01	0,73	0,28	0,25	0,11	0,06	0,03	1,45	94,15
510	2,27	0,07	0,17	0,29	0,01	0,01	0,59	0,20	0,09	0,10	0,04	0,01	1,01	95,30
511	3,03	0,07	0,20	0,35	0,02	0,04	0,98	0,37	0,21	0,11	0,02	0,01	1,70	98,02
512	5,61	0,10	0,57	0,97	0,03	0,12	1,40	0,53	0,19	0,25	0,02	0,02	2,40	98,21
513	3,81	0,06	0,24	0,41	0,02	0,10	0,96	0,38	0,22	0,13	0,03	0,01	1,73	97,26
514	5,03	0,09	0,46	0,79	0,02	0,11	1,69	0,56	0,13	0,15	0,03	0,02	2,58	98,17
515	3,04	0,08	0,24	0,41	0,02	0,18	3,32	0,68	0,28	0,21	0,01	0,01	4,50	99,60
517	2,94	0,07	0,19	0,32	0,02	0,03	0,56	0,21	0,10	0,20	0,07	0,03	1,15	91,79
518	3,36	0,07	0,22	0,38	0,02	0,03	0,61	0,26	0,11	0,11	0,08	0,02	1,18	91,68
519	3,33	0,07	0,24	0,41	0,02	0,08	1,07	0,41	0,12	0,09	0,04	0,01	1,75	96,87
520	4,17	0,06	0,25	0,42	0,02	0,05	0,89	0,34	0,10	0,12	0,05	0,01	1,51	95,48
521	4,41	0,05	0,23	0,38	0,02	0,05	0,83	0,30	0,09	0,10	0,05	0,01	1,39	95,20
522	4,54	0,04	0,20	0,33	0,02	0,04	0,63	0,23	0,09	0,13	0,07	0,01	1,16	93,12
523	3,43	0,07	0,23	0,39	0,02	0,04	0,75	0,32	0,14	0,28	0,03	0,01	1,53	97,12
524	2,96	0,07	0,20	0,34	0,02	0,03	1,09	0,27	0,08	0,18	0,04	0,01	1,69	96,72
525	5,24	0,08	0,43	0,73	0,02	0,12	1,82	0,60	0,11	0,20	0,02	0,02	2,75	98,61
526	6,39	0,18	1,12	1,90	0,04	0,54	4,36	1,69	0,11	0,49	0,06	0,14	6,84	97,11
527	3,77	0,05	0,20	0,34	0,02	0,04	0,70	0,26	0,08	0,12	0,03	0,02	1,21	95,86
528	3,80	0,06	0,23	0,39	0,02	0,13	1,75	0,83	0,10	0,16	0,02	0,01	2,87	99,08
529	8,09	0,13	1,05	1,79	0,04	0,74	15,87	4,39	0,21	0,39	0,04	0,01	20,90	99,79
530	4,10	0,05	0,20	0,34	0,02	0,04	0,63	0,21	0,09	0,10	0,04	0,01	1,08	95,59
531	4,45	0,06	0,25	0,42	0,02	0,05	1,36	0,51	0,10	0,18	0,02	0,01	2,19	98,26
532	2,49	0,06	0,16	0,27	0,03	0,01	1,11	0,27	0,09	0,15	0,03	0,01	1,66	97,52
533	2,17	0,07	0,14	0,24	0,02	0,05	0,69	0,28	0,13	0,06	0,01	0,01	1,18	98,79
534	3,53	0,08	0,27	0,45	0,02	0,12	1,48	0,55	0,17	0,13	0,02	0,01	2,35	98,80
535	3,39	0,06	0,19	0,33	0,02	0,03	0,57	0,21	0,09	0,15	0,08	0,01	1,12	91,50
537	3,04	0,05	0,15	0,25	0,01	0,05	0,63	0,23	0,21	0,11	0,02	0,01	1,22	97,44
538	5,70	0,07	0,42	0,72	0,02	0,13	1,05	0,44	0,13	0,18	0,05	0,02	1,86	96,19
539	4,51	0,08	0,36	0,61	0,02	0,19	1,40	0,62	0,20	0,20	0,03	0,02	2,46	97,86
540	6,66	0,13	0,87	1,47	0,04	0,46	8,86	1,82	0,13	0,56	0,02	0,02	11,41	99,67
541	4,56	0,07	0,32	0,54	0,02	0,05	1,11	0,36	0,09	0,19	0,04	0,01	1,79	97,28
542	3,77	0,06	0,21	0,36	0,02	0,04	0,91	0,24	0,21	0,11	0,08	0,02	1,56	93,94
543	3,39	0,07	0,24	0,40	0,02	0,05	1,36	0,46	0,13	0,16	0,03	0,02	2,17	97,44
544	3,73	0,05	0,19	0,32	0,02	0,03	0,52	0,19	0,11	0,12	0,21	0,04	1,18	78,81
545	2,68	0,08	0,22	0,38	0,02	0,05	0,86	0,34	0,11	0,11	0,07	0,01	1,49	94,64

PN	C/N	N [%]	C [%]	HG [%]	S [%]	H [%]	Ca	Mg	Na	K [cmol/kg]	Al	Fe	KAKpot	BS [%]
546	3,00	0,07	0,20	0,34	0,02	0,02	0,79	0,27	0,35	0,12	0,04	0,01	1,59	96,72
547	3,44	0,07	0,25	0,43	0,02	0,03	0,79	0,25	0,09	0,08	0,08	0,01	1,30	93,22
548	3,39	0,07	0,22	0,37	0,02	0,12	2,12	0,92	0,36	0,17	0,02	0,01	3,59	99,23
549	4,49	0,05	0,20	0,34	0,02	0,06	2,24	0,85	0,34	0,15	0,02	0,01	3,60	99,35
550	3,20	0,06	0,19	0,32	0,02	0,02	1,44	0,33	0,23	0,21	0,01	0,01	2,22	99,03
551	2,89	0,07	0,19	0,32	0,02	0,02	0,69	0,23	0,36	0,10	0,06	0,01	1,45	95,12
552	4,05	0,04	0,17	0,30	0,02	0,05	1,41	0,57	0,35	0,12	0,02	0,01	2,48	98,71
553	4,58	0,05	0,23	0,39	0,02	0,09	2,50	1,08	0,50	0,24	0,01	0,01	4,33	99,61
554	3,34	0,07	0,24	0,40	0,02	0,09	2,03	0,82	0,51	0,24	0,02	0,02	3,64	98,93
555	5,39	0,12	0,67	1,14	0,03	0,49	3,65	1,48	0,56	0,58	0,02	0,14	6,42	97,54
556	6,37	0,14	0,86	1,46	0,04	0,48	2,75	1,11	0,55	0,65	0,04	0,20	5,30	95,42
557	3,60	0,07	0,25	0,43	0,02	0,12	1,15	0,33	0,52	0,18	0,02	0,01	2,19	98,93
558	4,43	0,05	0,23	0,38	0,02	0,06	1,00	0,33	0,49	0,13	0,03	0,01	1,98	98,25
559	6,00	0,07	0,41	0,70	0,03	0,07	1,87	0,76	0,25	0,18	0,05	0,01	3,12	98,07
560	5,37	0,04	0,19	0,32	0,02	0,04	0,71	0,27	0,21	0,14	0,05	0,01	1,38	95,59
561	6,91	0,13	0,89	1,50	0,03	0,27	4,72	1,14	0,49	0,34	0,02	0,05	6,77	98,84
562	3,50	0,06	0,22	0,38	0,02	0,05	0,55	0,17	0,22	0,11	0,08	0,01	1,15	91,61
563	3,46	0,07	0,26	0,44	0,02	0,04	0,68	0,23	0,10	0,11	0,17	0,02	1,31	85,50
564	4,88	0,11	0,55	0,94	0,02	0,09	2,05	0,47	0,23	0,25	0,04	0,04	3,07	97,39
565	3,28	0,08	0,27	0,46	0,02	0,13	1,54	0,41	0,47	0,15	0,03	0,09	2,68	95,74
566	2,54	0,05	0,14	0,23	0,01	0,03	0,42	0,18	0,48	0,11	0,09	0,01	1,27	92,34
567	2,76	0,08	0,22	0,37	0,02	0,02	0,59	0,26	0,49	0,13	0,05	0,01	1,53	96,13
568	3,98	0,06	0,22	0,38	0,02	0,04	0,75	0,23	0,07	0,14	0,09	0,01	1,29	92,22
569	3,44	0,07	0,24	0,40	0,02	0,06	0,64	0,22	0,09	0,15	0,07	0,01	1,19	92,68
570	3,33	0,08	0,26	0,45	0,02	0,10	1,70	0,69	0,23	0,25	0,02	0,02	2,89	98,94
571	5,74	0,10	0,55	0,94	0,02	0,12	2,82	0,68	0,37	0,27	0,03	0,01	4,18	99,08
572	3,57	0,07	0,26	0,44	0,02	0,09	0,81	0,25	0,46	0,11	0,07	0,01	1,71	95,50
573	5,41	0,09	0,49	0,83	0,02	0,10	2,22	0,50	0,07	0,20	0,04	0,01	3,04	98,43
574	2,92	0,07	0,21	0,36	0,02	0,03	1,06	0,30	0,35	0,14	0,03	0,01	1,88	98,00
575	4,38	0,04	0,16	0,28	0,02	0,02	0,70	0,26	0,12	0,14	0,06	0,01	1,29	94,37
576	1,56	0,07	0,11	0,19	0,02	0,01	0,40	0,13	0,37	0,08	0,11	0,01	1,09	89,41
577	2,84	0,07	0,19	0,33	0,02	0,03	0,53	0,20	0,07	0,14	0,10	0,01	1,04	89,69
578	4,44	0,10	0,42	0,72	0,02	0,09	1,66	0,49	0,16	0,20	0,06	0,02	2,59	97,01
579	2,71	0,07	0,19	0,32	0,02	0,03	0,85	0,26	0,09	0,14	0,03	0,01	1,37	96,77
580	3,17	0,06	0,18	0,31	0,02	0,02	0,70	0,24	0,07	0,12	0,05	0,01	1,19	95,15
581	4,12	0,06	0,25	0,43	0,02	0,04	1,08	0,39	0,07	0,21	0,02	0,01	1,78	97,94
583	2,58	0,07	0,18	0,31	0,03	0,04	0,60	0,18	0,08	0,08	0,09	0,01	1,04	90,57
584	3,49	0,07	0,23	0,39	0,03	0,04	0,62	0,20	0,47	0,11	0,06	0,01	1,47	95,13
585	3,17	0,07	0,21	0,36	0,02	0,05	1,14	0,44	0,07	0,14	0,04	0,01	1,84	97,34
586	2,92	0,07	0,19	0,33	0,02	0,03	0,81	0,25	0,30	0,11	0,04	0,01	1,51	97,25
587	4,69	0,09	0,40	0,68	0,02	0,06	1,33	0,40	0,08	0,21	0,05	0,01	2,07	96,89

Anhang 7: Datenmatrix der Umwelt-, Fernerkundungs- und Vegetationsparameter

PN	ALT [m]	LAT	LONG	DS [m]	DR [m]	DF [m]	TER	BI	TRMM [mm]	RANGE	NDVI	REFL 7	REFL 5	REFL 2
501	13	15,38	-15,12	400	600	700	3	9	435	0,24	0,26	7,45	9,17	3,08
502	19	15,37	-15,12	400	1700	900	2	10	436	0,4	0,19	11,57	13,78	4,33
503	22	15,37	-15,13	1200	2500	1300	5	9	437	0,38	0,19	10,01	13,17	4,41
504	25	15,38	-15,14	1400	1400	2100	4	11	435	0,39	0,18	10,73	13,9	4,59
505	19	15,39	-15,15	1000	500	1500	2	10	433	0,38	0,20	10,19	13,92	4,87
506	46	15,41	-15,09	2000	3600	1800	3	6	430	0,29	0,17	13,98	15,15	4,64
507	44	15,44	-15,07	2500	1900	2900	1	4	427	0,23	0,19	12,59	14,00	4,16
508	17	15,46	-15,06	700	200	800	1	10	424	0,21	0,21	12,37	13,76	4,73
509	22	15,47	-15,06	1500	2000	1800	4	6	420	0,35	0,19	12,35	13,97	4,57
510	24	15,48	-15,04	1800	700	2200	2	9	419	0,3	0,20	10,72	13,31	4,52
511	36	15,50	-15,08	4400	4800	4600	0	10	418	0,1	0,14	12,55	14,13	5,54
512	35	15,51	-15,07	4800	4200	5000	7	6	416	0,31	0,18	10,20	12,45	4,7
513	40	15,51	-15,06	5000	3800	5400	4	6	416	0,07	0,14	13,21	14,49	5,99
514	34	15,51	-15,07	5000	5200	5300	10	9	417	0,27	0,19	10,29	12,19	4,55
515	11	15,41	-15,14	400	600	700	5	12	431	0,13	0,15	13,54	15,45	6,7
517	13	15,42	-15,15	1000	500	1600	7	11	429	0,36	0,20	10,61	13,24	4,49
518	39	15,32	-15,15	3000	7500	3200	4	12	442	0,29	0,19	9,75	12,85	4,07
519	45	15,31	-15,13	3300	7500	3400	0	6	444	0,05	0,14	12,61	14,27	5,58
520	47	15,29	-15,19	1700	12300	2100	11	4	443	0,27	0,18	11,94	14,09	4,5
521	48	15,27	-15,17	2800	14000	3400	13	9	447	0,34	0,19	9,70	13,16	4,36
522	21	15,34	-15,04	1400	1500	3200	3	11	437	0,29	0,18	10,59	12,97	4,62
523	18	15,32	-15,04	800	800	2000	3	8	441	0,37	0,20	8,37	12,23	4,16
524	20	15,32	-15,05	200	1300	3300	0	13	441	0,33	0,19	11,42	13,75	4,31
525	48	15,24	-15,14	5900	13800	6500	20	7	453	0,12	0,16	11,49	13,3	5,18
526	45	15,24	-15,15	5900	14500	6500	14	5	453	0,39	0,23	8,33	11,44	3,36
527	54	15,23	-15,21	500	17600	8000	11	9	449	0,34	0,19	8,93	12,44	4,24
528	15	15,44	-15,15	600	700	4000	3	10	427	0,49	0,18	10,75	13,46	4,47
529	13	15,45	-15,15	1300	1300	4500	1	8	426	0,59	0,23	8,22	11,59	4,00
530	46	15,56	-15,22	3900	4300	4000	2	8	409	0,37	0,19	11,89	13,93	4,62
531	45	15,58	-15,21	5600	7100	6100	3	8	408	0,37	0,19	11,26	13,4	4,49
532	26	15,54	-15,29	300	1300	3400	4	7	409	0,22	0,20	12,86	13,72	4,14
533	46	15,40	-15,25	900	1800	900	0	6	425	0,05	0,12	12,86	14,81	6,06
534	39	15,39	-15,26	1600	1000	1600	10	9	424	0,11	0,16	12,08	13,6	5,5
535	53	15,43	-15,26	1500	4600	2200	3	6	421	0,29	0,19	9,31	12,72	4,19
537	42	15,46	-14,92	3700	3100	4500	0	8	413	0,05	0,14	13,14	14,33	5,64
538	42	15,46	-14,92	3800	3100	4500	0	6	413	0,49	0,26	7,16	9,36	2,53
539	51	15,47	-14,90	4900	4500	5600	24	6	411	0,22	0,18	10,43	12,46	4,57
540	27	15,44	-14,92	1100	900	2000	11	8	417	0,44	0,25	7,49	10,54	3,39
541	40	15,42	-15,03	1300	5600	1800	8	6	426	0,28	0,19	10,48	13,25	4,38
542	22	15,48	-15,05	2200	1100	2600	8	6	420	0,32	0,21	9,66	12,29	4,04
543	39	15,53	-15,11	300	9100	4400	6	9	414	0,32	0,19	10,00	12,87	4,5
544	38	15,50	-15,12	4200	5900	4400	6	11	420	0,33	0,18	12,03	13,75	4,54
545	23	15,44	-15,20	1300	2200	3800	11	9	425	0,43	0,19	10,03	13,39	4,67

PN	ALT [m]	LAT	LONG	DS [m]	DR [m]	DF [m]	TER	BI	TRMM [mm]	RANGE	NDVI	REFL 7	REFL 5	REFL 2
546	38	15,45	-15,22	1400	4600	3900	0	8	422	0,32	0,20	10,50	13,75	4,44
547	56	15,45	-15,25	1700	6900	3900	0	7	420	0,21	0,19	9,27	12,86	4,24
548	16	15,48	-15,21	800	700	2000	4	6	419	0,35	0,19	13,93	15,03	4,12
549	20	15,48	-15,21	1200	1200	2400	4	4	419	0,29	0,19	14,14	14,88	4,05
550	27	15,51	-15,24	300	1700	5500	0	11	415	0,33	0,20	14,24	15,17	4,4
551	41	15,49	-15,27	900	4600	2800	1	6	415	0,23	0,19	13,96	15,18	4,55
552	38	15,49	-15,26	900	4300	3300	5	7	415	0,36	0,20	12,76	14,31	4,44
553	18	15,51	-15,22	300	800	5300	0	5	416	0,29	0,21	13,43	14,36	3,82
554	18	15,46	-15,19	1500	900	1600	4	2	424	0,5	0,19	12,42	14,01	4,42
555	11	15,38	-15,10	1500	700	2600	2	8	435	0,33	0,23	8,33	10,11	3,89
556	14	15,35	-15,07	700	900	1100	1	4	438	0,43	0,24	8,10	10,42	3,54
557	32	15,38	-15,05	2400	2200	4000	3	6	434	0,29	0,18	10,73	12,67	4,56
558	48	15,37	-14,92	5800	6700	6000	0	7	425	0,12	0,17	11,63	13,49	5,00
559	49	15,38	-14,91	4100	4800	4200	6	8	424	0,13	0,18	10,21	12,59	4,75
560	26	15,32	-15,07	1700	1900	3100	3	8	442	0,38	0,18	11,53	13,66	4,23
561	25	15,32	-15,07	2300	2400	3100	2	9	442	0,33	0,24	7,93	10,62	3,47
562	26	15,30	-15,06	1500	2900	4100	4	5	443	0,34	0,18	12,22	14,25	4,36
563	31	15,30	-15,03	1700	2400	2100	4	8	441	0,39	0,19	9,94	13,1	4,06
564	30	15,30	-15,04	1400	3200	2500	1	5	442	0,4	0,26	6,76	9,9	2,88
565	15	15,48	-15,04	2000	200	2800	2	6	419	0,17	0,24	8,44	10,44	3,41
566	30	15,50	-15,00	500	1000	1800	0	7	412	0,2	0,17	14,21	15,47	5,08
567	32	15,52	-14,98	2600	1600	3900	2	9	410	0,33	0,18	12,06	14,45	4,7
568	39	15,50	-14,94	2000	1100	3400	1	7	409	0,22	0,19	11,75	14,38	4,47
569	31	15,48	-14,95	3200	1800	5500	1	8	412	0,27	0,18	11,83	14,09	4,35
570	27	15,44	-14,98	400	1800	6300	4	10	420	0,23	0,19	10,99	13,36	4,5
571	46	15,39	-15,01	400	7800	700	6	7	428	0,44	0,22	7,89	10,92	3,66
572	49	15,39	-15,02	500	7800	900	6	8	429	0,11	0,16	11,34	13,46	4,83
573	49	15,40	-14,99	3000	5800	3700	3	7	426	0,5	0,27	7,01	9,6	2,61
574	49	15,40	-14,98	3700	6000	4800	4	10	426	0,17	0,17	10,16	13,2	4,6
575	42	15,40	-15,02	600	7000	1300	5	4	428	0,21	0,17	11,27	13,92	4,82
576	32	15,42	-15,13	1700	2300	2100	0	4	430	0,19	0,17	14,01	15,07	4,49
577	37	15,47	-15,10	2000	2800	5700	4	8	423	0,26	0,19	11,52	13,13	4,28
578	36	15,47	-15,12	2200	2800	6100	4	6	423	0,39	0,22	9,29	11,48	3,68
579	31	15,49	-15,17	2600	2600	3300	7	13	420	0,46	0,19	10,70	13,13	4,35
580	48	15,54	-15,15	700	5900	1000	6	11	415	0,4	0,19	9,30	13,13	4,54
581	48	15,57	-15,14	1700	9700	3900	6	10	410	0,43	0,20	8,66	12,68	4,84
583	32	15,35	-15,13	1700	4400	3500	1	8	440	0,23	0,19	10,53	13,44	4,16
584	39	15,33	-15,14	1100	6200	4700	3	6	442	0,28	0,18	11,38	13,8	4,44
585	38	15,31	-15,15	500	9100	1800	3	8	443	0,31	0,19	11,05	13,63	4,19
586	53	15,28	-15,13	4400	9300	4900	3	5	449	0,27	0,19	7,62	11,73	3,75
587	51	15,28	-15,13	4600	9200	5000	4	5	448	0,47	0,21	7,68	10,95	3,34

PN	COM	COG	PTL	ACT	WER	SEM	BAL	GUI	TREE/ha	TREECOV	TC1
501	0	0	0	1	0	0	2	0	68	18,04	629,53
502	0	0	0	0	0	0	3	0	10	6,33	737,42
503	0	0	0	2	0	0	3	0	9	7,73	689,50
504	0	0	0	2	0	0	3	0	14	6,78	755,34
505	0	0	0	3	0	0	3	0	11	8,30	721,13
506	0	3	0	0	0	0	2	0	4	1,79	765,50
507	0	3	0	0	0	0	2	0	14	3,53	685,07
508	0	0	0	3	0	0	3	0	27	8,07	727,22
509	0	0	0	2	1	1	3	0	4	6,50	729,73
510	0	0	0	2	0	0	3	0	21	7,16	712,55
511	2	0	0	0	0	0	1	0	7	0,16	763,90
512	2	2	0	0	0	0	2	0	43	6,88	695,24
513	1	0	2	0	0	0	0	0	7	0,00	774,61
514	0	2	0	0	0	0	3	0	34	6,54	693,42
515	0	0	0	1	0	0	3	0	4	0,65	847,24
517	0	0	0	2	1	0	3	0	17	11,44	756,73
518	0	1	0	2	2	1	3	0	22	11,38	698,42
519	0	0	3	2	0	0	2	0	2	0,03	738,10
520	0	3	0	2	2	1	2	0	10	5,44	734,14
521	0	2	0	2	0	1	3	0	14	8,38	658,56
522	0	0	0	1	1	0	3	0	23	5,21	682,22
523	0	0	0	2	1	0	3	0	19	10,28	682,96
524	0	0	0	2	0	0	3	0	11	7,02	710,16
525	2	3	2	0	0	0	2	2	11	2,69	719,46
526	0	3	0	0	0	3	2	3	54	16,77	573,77
527	0	0	0	0	0	0	2	3	22	8,72	639,17
528	0	0	0	2	0	1	3	0	7	5,44	696,09
529	0	0	0	0	0	3	1	0	95	4,00	581,04
530	0	2	0	0	0	0	3	0	18	4,93	695,70
531	0	0	0	0	0	0	3	0	24	5,83	712,54
532	0	0	0	2	0	0	3	0	44	5,31	690,60
533	0	2	0	2	0	0	2	0	5	0,00	782,26
534	0	2	2	2	0	0	3	0	33	0,00	745,22
535	0	2	0	2	0	0	3	0	11	6,72	706,41
537	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0,00	773,23
538	2	0	2	0	0	0	0	2	61	4,00	558,55
539	3	1	2	0	0	0	0	1	26	4,81	698,29
540	0	0	2	0	0	3	2	0	43	18,02	569,35
541	0	3	0	3	0	0	2	0	6	7,32	697,60
542	0	0	0	0	0	0	3	0	27	11,04	646,93
543	0	0	0	0	0	0	3	0	14	7,67	681,47
544	0	1	0	1	0	0	3	0	13	4,18	707,65
545	0	0	0	2	0	0	3	0	24	6,72	702,86

(COM = Combretum micanthum, COG = Combretum glutinosum, PTL = Pterocarpus lucens, ACT = Acacia tortilis, WER = Acacia senegal, SEM = Acacia seyal, BAL = Balanites aegyptiaca, GUI = Guiera senegalensis)

PN	COM	COG	PTL	ACT	WER	SEM	BAL	GUI	TREE/ha	TREECOV	TC1
546	0	3	0	0	0	0	1	0	0	7,76	755,50
547	0	3	0	0	0	0	2	0	5	7,47	654,51
548	0	0	0	3	1	2	3	0	2	5,35	711,36
549	0	0	0	3	0	0	2	0	2	5,84	691,28
550	0	0	0	3	0	0	3	0	17	4,39	728,34
551	0	3	0	2	0	0	2	0	4	3,47	703,45
552	0	0	0	2	2	0	3	0	5	6,46	711,90
553	0	0	0	3	0	1	2	0	3	7,87	665,31
554	0	0	0	2	1	2	3	0	6	5,57	712,45
555	0	1	0	2	0	0	0	0	58	14,79	615,91
556	0	0	0	2	0	2	2	0	26	20,21	653,33
557	1	2	3	2	2	1	3	1	26	4,02	696,24
558	1	0	2	1	1	0	3	0	8	2,37	702,37
559	0	3	2	0	0	0	0	2	30	4,42	698,35
560	0	1	0	3	0	0	2	0	7	5,49	710,44
561	0	0	0	2	2	3	2	0	30	18,17	629,36
562	0	3	0	2	1	0	2	0	11	5,16	731,48
563	0	3	0	2	0	0	3	0	11	6,00	676,91
564	0	3	0	0	0	0	2	2	44	25,82	612,28
565	0	1	0	3	0	0	1	0	37	17,07	636,68
566	0	1	0	3	0	0	3	0	8	2,69	794,72
567	2	0	0	3	0	0	3	0	3	6,43	767,31
568	0	1	0	3	0	0	1	0	9	6,20	713,43
569	0	2	0	2	2	0	3	0	11	6,33	733,68
570	0	0	1	0	0	0	3	0	34	5,38	694,00
571	2	3	0	0	0	0	2	3	55	15,61	636,86
572	0	2	3	2	2	0	2	1	4	1,83	716,23
573	2	2	0	1	0	0	3	3	70	26,10	585,10
574	0	2	0	1	2	0	3	2	6	4,23	703,52
575	0	2	0	2	0	0	2	0	1	4,10	734,98
576	0	2	0	0	0	0	1	0	3	2,02	767,95
577	0	0	1	0	0	0	2	0	19	6,59	696,04
578	2	2	2	1	0	0	2	0	30	14,23	650,26
579	0	0	0	0	0	0	3	0	14	6,46	617,38
580	0	3	0	0	0	0	2	0	3	8,46	712,46
581	0	1	0	0	0	0	3	0	18	8,34	695,35
583	0	2	0	2	0	0	3	2	1	5,84	681,96
584	0	2	0	2	0	0	2	0	8	6,15	699,35
585	0	0	0	2	0	0	3	0	22	8,10	686,14
586	0	2	0	1	1	0	1	2	11	10,97	645,56
587	0	2	1	0	0	0	0	3	31	16,87	635,28

(COM = Combretum micanthum, COG = Combretum glutinosum, PTL = Pterocarpus lucens, ACT = Acacia tortilis, WER = Acacia senegal, SEM = Acacia seyal, BAL = Balanites aegyptiaca, GUI = Guiera senegalensis)

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich eidesstattlich, dass Ich diese vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer, als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen, wurden entsprechend gekennzechnet. Diese Masterarbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Wien, März 2013

Unterschrift

Lebenslauf

Tobias Grau

Persönliche Daten

Kontakt:	tobias_grau@arcor.de
Geburtstdatum:	28.04.1987
Geburtstort:	Prenzlau
Staatsangehörigkeit:	deutsch

Ausbildung

10/2010 – 04/2013	Masterstudium Geographie Universität Wien
10/2007 – 09/2010	Studium Geographie Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Abschluss: Bachelor of Science
09/1999 – 06/2006	Christa-und-Peter-Scherpf-Gymnasium, Prenzlau

Berufserfahrung

03/2012 – 06/2012	Tutor Lehrveranstaltung Labormethoden II, Universität Wien
10/2011 – 02/2012	Tutor Lehrveranstaltung Labormethoden I, Universität Wien
10/2011 – 01/2012	Studienassistent Labor, Universität Wien
03/2008	Praktikum: Wasser-und Bodenverband Prenzlau

Auslandserfahrung

02/2012 – 03/2012	Feldarbeit im Senegal im Rahmen der Masterarbeit

Weitere Kenntnisse

Fremdsprachen	Englisch, Französisch
EDV-Kenntnisse	Microsoft Office, ArcGis, QuantumGis, R, SPSS