

**Fernerkundungsgestützte Prozessanalyse  
im Küstenraum Benins**

**Analyse de processus par télédétection  
dans la zone côtière du Bénin**

Zur Erlangung des akademischen Grades einer

**DOKTORIN DER NATURWISSENSCHAFTEN**

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften  
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

**DISSERTATION**

von

Dipl.-Geoökol. Ulrike Sturm-Hentschel  
aus Quedlinburg

Tag der mündlichen Prüfung: 08. 02. 2012

Hauptreferent:  
Prof. Dr. habil. Joachim Vogt

Korreferent:  
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Hans-Peter Bähr

Korreferent:  
Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Hinz

Karlsruhe 2013



# Vorwort

*Nein, ich fliege nicht nach Berlin, sondern nach BENIN!*

Die hier vorliegende Arbeit hat als Untersuchungsgegenstand den Küstenraum Benins, den ich während meiner Promotionszeit dreimal besuchte, um Daten im Feld zu erheben und mich mit Kollegen vor Ort auszutauschen, ob an der Université d'Abomey-Calavi oder bei Behörden.

Aus diesem Grund ist meiner Promotionsarbeit eine französische erweiterte Zusammenfassung vorangestellt, um die Kernaussagen meiner Arbeit meinen beninischen Kollegen und anderen dortigen Interessierten in französischer Sprache zur Verfügung zu stellen.

An dieser Stelle möchte ich herzlich all jenen danken, die mich während meiner Promotion unterstützt haben.

An erster Stelle gilt mein Dank meinem Doktorvater Prof. Joachim Vogt für die Übernahme des Hauptreferats, Prof. Hans-Peter Bähr für die Übernahme des Korreferats von Beginn an und über seine Pensionierung hinaus sowie Prof. Stefan Hinz für den Einstieg als Korreferent nach seinem Ruf an das KIT. Allen dreien danke ich sehr für die fachliche Betreuung der unterschiedlichen Aspekte meiner Arbeit, wesentliche Impulse und die Unterstützung des Vorhabens.

Die Umsetzung dieser Arbeit und insbesondere der Feldforschungen in Benin wären nicht möglich gewesen ohne die Unterstützung zahlreicher Menschen an der Université d'Abomey-Calavi und ihrem Umfeld, insbesondere dem IGN\* Benin, CENATEL, IITA Benin, DED, GTZ, DG Eau, aber auch beninischen Kollegen hier in Deutschland. Sie alle haben durch Diskussionen und die Bereitstellung von Daten, Unterstützung im Gelände, sprachliche Hilfeleistung, aber auch durch ihre Gastfreundschaft und logistische Unterstützung wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben – ihnen allen ein GRAND MERCI.

Ein herzlicher Dank gilt auch meinen Kollegen am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF), am Institut für Regionalwissenschaft (IfR), Geodätischen Institut (GIK) und Institut für Geographie und Geoökologie (IfGG) sowie Prof. Tillmann Buttschardt und Dr. Gilbert Zomahoun für die zahlreichen Gespräche, Diskussionen, Tipps, Anregungen, gemeinsame Publikationen und nicht zuletzt ihre moralische Unterstützung.

Einen großen Dank möchte ich an meine Hiwis aussprechen, die mir vor allem bei der Aufbereitung der Geodaten und der zeitraubenden visuellen Interpretation eine wesentliche Unterstützung waren.

Weiterhin möchte ich mich beim DAAD, der Karlsruher Universitätsgesellschaft e.V. und dem KHYS für die finanzielle Unterstützung von Forschungsaufenthalten in Benin bedanken.

Am Schluss, aber darum nicht weniger herzlich, möchte ich ganz besonders meinem Mann, meiner Familie und Freunden für den wichtigen Rückhalt und die liebevolle Hintergrundarbeit danken, ob durch einfaches Dasein, Korrekturlesen, Übersetzungshilfe, Kuchenpakete oder interkulturellen Austausch.

München im Januar 2012

*Ulrike Sturm-Hentschel*

P.S.: Für Austausch oder bei Interesse an den Daten kann ich gern unter [ulrike.sturmhentschel@yahoo.de](mailto:ulrike.sturmhentschel@yahoo.de) kontaktiert werden.

\* Alle Abkürzungen sind im Abkürzungsverzeichnis ab S. xxiii aufgeführt.



# Résumé

Traduction: David Menjoulet

## Introduction

Les espaces côtiers constituent le plus souvent des territoires densément peuplés, dans lesquels se déroulent de nombreux processus spatiaux fortement dynamiques. Ceux-ci ont lieu le plus souvent, en particulier dans les pays en développement, en dehors de toute planification publique ou même de tout concept intégré de gestion. Pourtant, ce sont justement ces espaces côtiers qui nécessitent une action proactive à moyen et à long terme, qui puisse mettre en marche un développement adapté et limiter les risques, afin de répondre par exemple à la forte pression démographique et économique et au changement climatique. En ce qui concerne des stratégies de gestion adaptées, l'approche dite de gestion intégrée des zones côtières (GIZC) est depuis quelques années au centre des discussions concernant les espaces côtiers (par ex. Salomons et al. 1999). L'analyse des systèmes côtiers constitue un élément fondamental de la GIZC (entre autres EC 1999, RIKZ 2004, Daschkeit 2007, Adam 1998a). Cela implique entre autres la nécessité de réunir les données spatiales et d'en tirer les informations et les indicateurs appropriés.

La télédétection constitue une technique d'une grande importance pour la saisie de données spatiales, tant qualitatives que quantitatives, concernant les transformations et les processus passés et en cours. L'interprétation visuelle des images ainsi que la classification algorithmique des données issues des images satellites et aériennes permettent, en fonction du capteur utilisé, d'appréhender la situation actuelle telle qu'elle apparaît dans les données au moment de la prise de vue pour en déduire les évolutions et les processus de transformation spatiale (figure 1)<sup>1</sup>. Cela est rendu possible par les progrès des techniques de mesure, dont la résolution spatiale, spectrale, radiométrique et temporelle est de plus en plus grande.

C'est en particulier dans les pays en développement que la télédétection peut jouer un rôle de premier plan dans la saisie de données concernant les transformations spatiales: les bases de données spatiales, sur lesquelles une planification urbaine et régionale peut être développée, sont dans ces pays trop réduites, insuffisantes et souvent obsolètes (Lechtenböcker 1997, Amisah-Arthur & Miller 2002, Teka 2010); la recherche de données sur le terrain s'avère difficile à organiser et leur coût est élevé. La télédétection se heurte cependant à ses limites lorsque les processus étudiés sont à trop court terme, lorsque les structures d'utilisation du sol sont trop morcelées, lorsque les possibilités de détection sont difficiles à cause de limites imprécises et en outre lorsque le traitement algorithmique des données n'est que partiellement possible à cause de l'hétérogénéité des données image et du trop grand nombre de lacunes spatiales et temporelles – ce qui est le cas pour beaucoup de côtes tropicales et subtropicales et donc aussi pour le territoire d'étude de ce travail de recherche.

Dans la présente thèse de doctorat est exposée une approche méthodologique qui permet, dans ces conditions spécifiques et néanmoins typiques aux pays en développement, d'analyser des processus de transformation de l'espace. Dans ce but, des espaces particuliers des zones côtières du Bénin, pays d'Afrique de l'Ouest, seront étudiées à titre d'exemple (cartes 1, 2 et 3). La zone côtière du Bénin est soumise à une pression démographique et économique et à des transformations importantes et illustre les problèmes typiques des régions côtières des pays en développement: fortes densités de population et croissance démographique (cartes 8 et 9), utilisation du sol non réglementée, processus de transformation marqué, destruction des habitats naturels et proches de l'état naturel, utilisation des ressources non réglementée, pression et conflits accrus concernant l'usage du sol. En outre, cette côte basse d'accumulation est caractérisée par un phénomène d'érosion côtière (voir tableau 1, carte 5) et des inondations récurrentes (INSAE 2003, Domingo 2007, Teka 2010, Kaki & Oyede 2000, Vogt et al. 2007, CEDA 2007).

---

<sup>1</sup> Les titres des figures, cartes et tableaux sont traduits à la fin de ce thèse à partir de la page 139. Pour un échange, si vous êtes intéressé par les figures et les cartes ou si vous désirez une traduction, vous pouvez prendre contact avec moi directement à l'adresse suivante: [ulrike.sturmhentschel@yahoo.de](mailto:ulrike.sturmhentschel@yahoo.de).

Tandis que de nombreuses analyses spatiales quantitatives ont été réalisées sur la dynamique de l'utilisation des sols au Bénin central<sup>2</sup>, il y a peu d'équivalents pour les espaces côtiers du Bénin. Dans le cadre de certains projets, une étude spatialement différenciée de l'occupation des sols a été menée (par ex. PAZH 2001, ABE 2001<sup>3</sup>) qui cependant n'a pas pris en compte les transformations en cours. Différents auteurs exposent la dynamique des espaces côtiers (par ex. N'Bessa 1997, Domingo 2007, CEDA 2007). Teka (2010) mène une analyse sociologique des processus spatiaux dans l'espace côtier du Bénin ainsi que des problèmes socio-économiques et des défis de l'aménagement régional qui leur sont liés. Une analyse dans le temps des effets des processus de transformation de l'espace, telle qu'elle peut être réalisée avec des données issues de la télédétection, n'est actuellement pas disponible pour l'espace côtier du Bénin.

La présente thèse de doctorat a pour objectif le développement d'une combinaison de méthodes pour l'analyse quantitative et spatialement différenciée des processus en cours dans l'espace côtier d'un pays en développement – au travers de l'exemple du Bénin – dans les conditions suivantes: des données visuelles de télédétection hétérogènes et lacunaires sur le plan spatial et temporel et des structures d'utilisation du sol morcelées avec des limites le plus souvent imprécises.

### Terrain d'étude et données

L'arrondissement rural d'Avlékété à l'ouest de Cotonou et l'arrondissement suburbain d'Èkpè à l'est ont été choisis comme terrain d'étude. Pour chacun des deux arrondissements, deux transects nord-sud ont fait l'objet d'un relevé de données (cartes 1, 2 et 3).

Les données image suivantes sont disponibles pour les terrains d'étude: images aériennes panchromatiques (9 et 10 mars 1995), données satellite QuickBird avec les canaux NIR-R-G-B (23 décembre 2002 pour Èkpè, 6 novembre 2006 pour Avlékété), scans d'images aériennes RGB (2 mai 2006, 25 mars 2007) ainsi que données satellite RGB-SPOT prétraitées (5 mars 2008).

Avec cela, des données image sont disponibles pour Avlékété à deux dates, et pour Èkpè à trois dates différentes (tableau 4, figures 5, 6, 58). L'ensemble de données QuickBird a servi de base de géoréférencement, car aucune référence cartographique fiable n'était disponible (figure 7).

### Méthodologie

De nombreux processus de transformation de l'espace sont en cours dans l'espace côtier du Bénin, parmi lesquels le **développement de l'espace bâti**, **l'évolution des surfaces agricoles utiles** et **l'érosion côtière** ont été perçus comme particulièrement significatifs; pour cette raison, leur développement spatial et leurs interactions ont fait l'objet d'une analyse détaillée.

Les catégories répertoriées d'utilisation du sol et les classes objets correspondantes sont les suivantes:

- **Bâtiments** pour l'observation des processus de développement de l'espaces-bâtissables, car les espaces bâtis de nos terrains d'étude ne consistent pas pour l'essentiel en des surfaces construites – dans la plupart des cas, le sol des espaces libres et des voies de circulation entre les bâtiments n'est pas revêtu et est souvent couvert de végétation. De plus, les bâtiments sont en partie isolés les uns des autres.
- **Champs** pour la compréhension des transformations des surfaces agricoles utiles. Comme les données image disponibles ont été prises durant la saison sèche, ce sont surtout les caractéristiques géométriques qui se sont révélées pertinentes. Aucune différence n'était apparente entre les surfaces exploitées à ce moment et celles en friche.
- **Ligne d'eau, ligne d'interface entre sable sec et sable mouillé, ligne d'escarpement** (figure 15) comme indicateurs de trait de côte pour observer l'érosion côtière.

Les processus de transformation spatiale ont été analysés en trois étapes adaptées chacune aux processus en question (figure 17):

---

<sup>2</sup> En particulier dans le cadre du Projet IMPETUS.

<sup>3</sup> Cartes réalisées pour le « Schéma directeur d'aménagement du littoral ».

- 1) **Interprétation d'images / classification:** nous avons tout d'abord répertorié les espaces correspondant aux différentes catégories à partir des données image géoréférencées, en nous appuyant sur des recherches sur le terrain (en particulier durant la grande saison sèche de 2008<sup>4</sup>). L'exploitation visuelle des données a constitué l'aspect principal de l'interprétation des images, d'une part pour obtenir des résultats comparables à partir de données différentes et d'autre part pour établir le plus précisément possible dans quelle mesure les données issues de la télédétection peuvent être utiles à l'analyse des processus. De plus, cette base de données issue d'une interprétation humaine peut servir de référence pour une classification algorithmique. Nous avons examiné à titre d'exemple dans quelle mesure une classification par segmentation pouvait être significative (eCognition Developer).
- 2) **Analyse spatiale:** nous avons intégré une partie des résultats de cette interprétation dans des analyses spatiales pour chaque moment de prise de vue (ArcGIS).
- 3) **Analyse des évolutions:** nous avons analysé les transformations spatiales dans une troisième étape, basée sur les résultats de l'interprétation d'images et de l'analyse spatiale (ArcGIS):
  - évolution des surfaces: par intersection des polygones;
  - évolution des densités de points: par la soustraction des mesures de densité;
  - évolution des lignes par la détermination de la distance euclidienne entre les lignes.
- 4) **Processus de transformation de l'espace:** enfin, nous avons pu déterminer, à partir de ces évolutions, les processus de transformation de l'espace, que nous avons interprétés qualitativement en les mettant en relation avec des données issues des sciences régionales.

### Analyse des processus d'extension des espaces bâtis dans l'espace côtier

Il n'existe pour le moment pas d'étude qui ait opéré un relevé spatial et quantitatif de la croissance des espaces bâtis: où, sous quelle forme et avec quelle rapidité a-t-elle lieu? Le présent travail fournit une contribution dans ce sens, ainsi qu'un apport méthodologique (figure 18). Le premier point en est le relevé des bâtiments. Les figures 19–21 montrent à ce sujet plusieurs types de bâtiments avec les matériaux qui constituent leur toiture ainsi que leur apparence dans les différentes données image.

Pour le relevé des bâtiments, nous avons testé une classification par segmentation sur un transect, pour ensuite s'en servir comme modèle (tableau 6: paramètres de la segmentation, tableau 7: caractéristiques pour la classification). L'évaluation quantitative de la segmentation montre que seulement environ 40% des bâtiments digitalisés (tableau 9) sont représentés par un ou plusieurs segments (extraits d'images dans les figures 23 et 30). Cela est avant tout dû à la faible résolution spectrale des données image. Les caractéristiques utilisées pour la classification basée sur la connaissance ont été finalement choisies de telle sorte que les éléments des segments tests soient classifiés de la façon la plus détaillée possible. Le taux élevé de faux positifs dans les résultats de la classification peut être expliqué par la similitude spectrale et géométrique entre bâtiments, végétation et espaces couverts de sable dans les données image: c'est ainsi que de nombreux champs dans des lagunes ensablées ont une forme similaire à une maison; les routes qui traversent les lagunes ensablées sont en partie recouvertes par le feuillage des palmiers qui les bordent et forment des sections de petite taille; dans les plantations du Sud apparaissent des formes semblables à des bâtiments du fait de l'ordonnement régulier des palmiers. Les résultats des trois classifications basées sur des segments testées ici sont de ce fait inadéquats (tableau 10) et ne peuvent pas être utilisées pour une analyse fiable des processus en cours. Les résultats présentés par Sturm et al. (2011) d'autres classifications algorithmiques (tableau 12) sont certes meilleurs, mais ils sont également insuffisants pour servir de base à de nouvelles analyses. Pour cette raison, les analyses spatiales qui suivent sont exclusivement basées sur les résultats des interprétations visuelles.

Les bâtiments à usage de logements sont fondamentaux pour évaluer l'évolution de la population. Mais d'autres types de bâtiments contribuent également au développement de l'espace bâti. Dans le cadre de l'interprétation visuelle des images, nous avons opéré une distinction entre « bâtiments d'habitation », « bâtiments à usage d'activités », « étals de vente », « autres bâtiments » et « bâtiments en construction » (tableau 5, figure 29).

<sup>4</sup> Prérecherche février–avril 2007, recherche complémentaire en février 2010.

Les images aériennes de 1995 et les données QuickBird ont été les plus faciles à interpréter grâce à leur résolution spatiale élevée: les toits des bâtiments y sont clairement visibles. De plus, la signature spectrale a constitué une aide importante dans le cas des données QuickBird. Les bâtiments étaient nettement plus difficiles à reconnaître dans les scans des images aériennes et dans les données SPOT prétraitées, en raison de la faible résolution spatiale des images. Pour effectuer une interprétation, nous avons dans un premier temps appliqué les résultats issus des données QuickBird sur les autres données image, pour ensuite pouvoir les comparer et le cas échéant les compléter en vue d'obtenir des résultats fiables.

Les bâtiments constituent la base pour le recensement de la surface bâtie et de la densité du bâti. Les surfaces bâties sont définies en fonction de la proximité des bâtiments les uns par rapport aux autres (150 m au maximum entre les bâtiments, image 26). Nous avons déterminé la densité du bâti en utilisant un noyau carré quadratique. Nous avons utilisé le nombre de points centraux des bâtiments pour déterminer cette densité en forme de points (formules p. 57 sq.). Chaque point représentant un bâtiment est pondéré par la surface bâtie correspondante (voir densité du bâti / densité spatiale dans le figure 26 et la carte 18).

Nous avons observé une importante extension des espaces bâtis dans tous les secteurs observés. Dans les transects étudiés, nous avons constaté des hausses du nombre de bâtiments de près de 60 % (Avlékété) jusqu'à 325 % dans l'arrondissement d'Èkpè; la surface bâtie correspondante a crû de 95 % à 335 %. Le nombre de bâtiments et la surface bâtie ont donc connu partout une croissance importante (tableau 11, images 32, 33), mais avec des différences spatiales (cartes 13-19). Différentes formes de développement du bâti sont reconnaissables sur les images:

- **L'extension** des espaces bâtis dans les noyaux d'habitat existants
- **La densification** des espaces bâtis existants
- **Le mitage** d'espaces non densément bâtis
- **L'apparition de nouveaux espaces bâtis** ainsi que
- **Le déplacement** de noyaux d'habitat.

Il est apparent pour l'ensemble des transects que les espaces bâtis qui existaient déjà en 1995 présentent partout et à toutes les dates d'observation les densités les plus élevées et ont connu lors de la poursuite de leur évolution une extension spatiale et une densification. La comparaison entre les densités du bâti en nombre et en surface montre, en particulier le long de la route qui mène de Cotonou à Porto-Novo et au Nigéria dans l'arrondissement d'Èkpè, que les bâtiments plus grands (activités, industrie) sont de plus en plus nombreux (carte 18). Tandis que l'extension des surfaces bâties ne concerne que les espaces où plusieurs bâtiments sont regroupés, les bâtiments dispersés et donc le phénomène de mitage apparaît grâce à l'évaluation de la densité. Les surfaces bâties s'étendent le long des voies d'accès principales: le long de la route côtière (Route de Pêche) à Avlékété ainsi qu'à Èkpè le long de la route qui mène de Cotonou à Porto Novo et au Nigéria. La croissance du nombre de bâtiments au nord d'Avlékété est liée à un développement du bâti le long de la route qui relie Cotonou à Ouidah. Domingo (2007) parle au sujet de ces voies de communication et de la croissance urbaine qui tend à relier Ouidah, Cotonou et Porto-Novo d'un « entre-deux villes ». Un étalement le long des voies de communication nord-sud est également visible sur les transects. De la même manière, Le réseau des voies de communication s'étend dans le même temps s'élargit. L'expansion des espaces bâtis se retrouve également dans les zones agricoles, les savanes herbeuses, les cuvettes (bas-fonds) et dans les zones humides (savane humide, forêt dense humide). Cela signifie que les routes et les pistes sont certes un facteur qui facilite l'expansion du bâti, mais n'en sont dans notre territoire d'étude pas une condition nécessaire.

Dans les zones côtières, il existe trois différentes barrières naturelles à l'extension des espaces bâtis: les cuvettes et les zones humides (pour l'essentiel d'anciennes lagunes), les lagunes dans la partie ouest du littoral et la mer au sud. Une extension des espaces bâtis dans les zones humides et dans les cuvettes montre cependant que ces obstacles n'empêchent pas de façon absolue les constructions. La barrière constituée par la mer, du fait de son déplacement dû à l'érosion côtière (voir plus bas), a pour conséquence observable l'abandon de noyaux d'habitats entiers qui se réimplantent ailleurs (carte 20).

L'ampleur du développement du bâti dans notre territoire d'étude montre bien qu'il s'agit d'un espace fortement attractif pour l'ensemble du pays. L'extension du bâti à usage d'habitation atteste d'un phénomène de migration;



l'extension du bâti à usage d'activités ainsi que des locaux à usage commercial, en particulier le long des voies de communication principales, montre une croissance des activités économiques.

Avec l'aide de la télédétection, nous avons pu mettre en évidence les disparités régionales dans le développement des espaces bâtis, ce qui a nous a permis d'intégrer dans notre analyse des différences spatiales dans le processus de développement qui n'étaient pas visibles dans les données démographiques.

### **Processus de transformation des surfaces agricoles utiles**

Les transformations observées des espaces bâtis ont des conséquences directes et indirectes sur la répartition des autres catégories d'utilisation et de couverture du sol, et donc aussi sur les surfaces agricoles utiles. En conséquence de cela, ainsi que du contexte des mutations de la structure professionnelle dans les espaces côtiers (par ex. Vogt et al. 2010), il est important d'analyser si, où et dans quelle mesure les surfaces agricoles évoluent. La recherche présentée ici des dynamiques spatiales de l'agriculture est la seule à avoir été réalisée à ce jour dans les espaces côtiers du Bénin.

Seules les surfaces qui étaient reconnaissables par des caractéristiques spectrales, géométriques et structurelles ont pu être analysées à partir des données image. C'est ainsi la surface agricole « visible » qui a été prise en compte pour l'étude des processus de transformation de l'agriculture. Elle est à distinguer des surfaces agricoles « disponibles » et « utilisées », telles qu'elles ont été analysées par exemple dans les enquêtes socio-économiques de Téka (2010).

Nous avons interprété visuellement les données image prises à différentes dates et recoupé les ensembles de données comparables qui en sont ressortis pour chaque date (figures 36 et 44). Les champs dans les espaces côtiers du Bénin ont des caractéristiques différentes (figures 39–43) et sont de ce fait plus ou moins visibles dans les données de télédétection: la présence de sillons et de billons nous permet de reconnaître visuellement des champs cultivés. Outre les champs directement visibles, il existe cependant également dans les espaces côtiers du Bénin des cultures sous des palmiers à huile ou des cocotiers – les seules surfaces que nous pouvons prendre en compte sont celles qui sont reconnaissables sous les arbres dans les données images; de plus, nous ne pouvons pas toujours définir aisément les limites des champs car les surfaces agricoles se fondent souvent dans la végétation environnante. Dans les zones humides, il est difficile de reconnaître dans les données image les surfaces agricoles qui sont actuellement en friche à cause de la végétation qui les recouvre. A l'inverse, dans les zones sèches, il est difficile de distinguer les surfaces exploitées actuellement des friches, quand des traces d'exploitation sont encore reconnaissables. En outre, des données rassemblées à différentes dates durant une même année seraient nécessaires. En raison de tout cela, nous devons nous attendre à ce que la superficie des surfaces agricoles soit sous-estimée dans les zones humides et surestimée dans les zones sèches.

Les prises de vues ont été effectuées durant la saison sèche ou à la limite de la saison humide. Les figures 37 et 38 mettent en relation les dates des prises de vue avec les courbes pluviométriques des années correspondantes<sup>5</sup>. La mise en relation avec les calendriers agricoles<sup>6</sup> des terrains d'étude est plus importante pour l'interprétation des données que les courbes pluviométriques. Ainsi, les prises de vues pour la saison sèche des zones sèches<sup>7</sup> et dans la plupart des cas des marges des zones humides ont été acquises en dehors des périodes de pousse des plantes (tableaux 16, 17, 21). Les zones humides et les cuvettes de l'arrondissement d'Èkpè (tableaux 19 et 20) permettent cependant – et parfois seulement en cette période – la culture de produits agricoles. Les périodes de culture varient en fonction du niveau de l'eau. Dans les zones humides, en plus des cultures en plein champ de céréales et de tubercules, des plantes sont utilisées pour leurs tiges et leurs feuilles (par exemple des typha australis pour le tressage de nattes). Il est impossible de différencier de façon fiable sur les données images les surfaces où elles poussent des champs cultivés et elles peuvent être incluses dans les zones agricoles.

Comme lors de l'analyse des surfaces bâties, les données QuickBird nous ont fourni les meilleurs résultats, car grâce à leur résolution spatiale élevée dans un canal PAN de 0,6 m, elles rendent clairement visibles les structures

<sup>5</sup> Pour l'année 2008, les données pluviométriques n'étaient pas disponibles.

<sup>6</sup> Etablis par des enquêtes auprès des agriculteurs aux printemps 2008 et 2010.

<sup>7</sup> Le manioc n'est certes récolté qu'au bout d'une année. Il n'est cependant pas possible de différencier les champs de manioc des champs moissonnés à cause de la structure fine du manioc dans les données image.

agricoles, comme par exemple les sillons et billons ou les limites des champs. Nous pouvons re-connaître ces sillons et billons également sur les images aériennes de 1995 à condition qu'ils soient assez larges. Nous ne pouvons en revanche pas distinguer de telles structures dans les scans des photos aériennes et dans les données SPOT traitées préalablement à cause de la trop faible résolution spatiale de ces données. Sur celles-ci, seules les différentes nuances de gris permettent de reconnaître et de délimiter les champs. Comme pour les surfaces bâties, nous avons tout d'abord appliqué les résultats issus des données QuickBird sur les autres données image, avant de les comparer avec elles et le cas échéant de les compléter en vue d'obtenir des résultats fiables.

Nous avons constaté une évolution des surfaces agricoles visiblement utilisées sur tous les transects observés. La figure 46 montre cette évolution sur l'ensemble de notre territoire, tandis que la carte 24 montre comment elle se manifeste dans chaque subdivision de l'espace. Une croissance importante du total des surfaces agricoles entre 1995 et 2006 est visible sur les deux transects de l'arrondissement d'Avlékété (figure 46); sur les transects de l'arrondissement d'Èkpè, nous ne constatons qu'une légère évolution du total des surfaces agricoles. La carte 24 montre des différences parfois importantes au niveau local. En ce qui concerne l'évolution spatiale des surfaces agricoles utiles, nous avons remarqué les tendances suivantes:

- **Recul de l'agriculture face à l'extension des surfaces bâties**, après que des bâtiments se soient implantés, dans un premier temps, s'implantent un par un et de façon dispersée dans les surfaces agricoles
- **Evolution à l'échelle locale** – peut-être par rotation culturale avec jachère, en particulier dans les zones humides des anciennes lagunes
- **Extension de l'agriculture « vers l'extérieur »**, repoussée par l'extension du bâti vers des territoires auparavant non utilisés ou utilisés de façon extensive, comme les zones humides, les savanes arbustives ou les palmeraies de palmiers à huile<sup>8</sup>, phénomène qui va de pair avec une dégradation ou une destruction de formations végétales naturelles ou proches de la nature.

Les transformations vastes de surfaces agricoles n'entraînent pas toujours de modifications de la surface totale en culture, car il s'agit le plus souvent d'un « déplacement » des cultures. Cela montre que la comparaison des surfaces totales ne permet de donner que des indications sur l'évolution de l'occupation des sols et ne peut pas remplacer des analyses spatialement différenciées.

Nous pouvons affirmer que dans l'arrondissement d'Avlékété, au moment des deux prises de vue, la majorité des terres sont dévolues à l'agriculture. La plus grande partie ne connaît pas de modification (carte 24). Une dynamique de changement relativement importante est à observer au nord. Là, les surfaces utilisées pour l'agriculture augmentent et prennent la place de terres occupées auparavant essentiellement par des palmeraies de palmiers à huile. Dans le même temps, nous pouvons constater une restructuration de l'espace due à l'extension des surfaces bâties évoquée plus haut et qui se traduit par la perte de terres autrefois agricoles. Dans les espaces au nord de la lagune de l'arrondissement d'Èkpè, nous avons constaté une utilisation agricole importante du sol lors des trois prises de vue, avec une mise en valeur croissante de terres auparavant non exploitées, tandis que l'activité agricole recule là où les surfaces bâties s'étendent. En outre, des zones humides au bord du lac Nokoué au nord et dans l'ancienne lagune sont désormais utilisées pour l'agriculture, en particulier durant la saison sèche. Pour chacun des deux transects, les surfaces utilisées pour l'agriculture augmentent jusqu'en 2007. Le long de la route principale qui mène de Cotonou à Porto Novo et à Lagos et vers le sud, nous avons observé des pertes parfois importantes de surfaces agricoles, liées à l'extension des surfaces d'activités (voir la partie consacré aux espaces bâtis).

Ce processus d'extension des surfaces agricoles, qui va de pair avec un recul de la végétation de friches, de la végétation arbustive, des palmeraies de palmiers à huile (par ex. à Avlékété) ainsi que de la forêt humide dans la lagune ensablée (par ex. à Èkpè), se retrouve aussi dans d'autres parties du Bénin, comme par exemple au Bénin central (par ex. Judex 2007), et n'est pas un phénomène exclusivement béninois (par ex. Nigéria – Salami 1999, ouest du Sénégal – Tappan et al. 2000).

<sup>8</sup> En ce qui concerne les palmeraies de palmiers à huile, il n'est pas possible de différencier dans les données image s'il s'agit de plantations dans un état proche de la nature, de plantations abandonnées et envahies par une végétation naturelle ou de friches comme dans d'autres espaces de la zone côtière (par ex. Bohlinger 1998), car dans notre territoire d'étude les palmiers cohabitent toujours avec des espèces de forêt dense et ne sont pas organisés selon une plantation ordonnée.

A cause des longues périodes qui séparent les différentes prises de vue, mais aussi à cause de l'absence de données images prises en différentes saisons d'une même année, nous ne pouvons tirer aucune conclusion quant à l'augmentation ou la diminution des surfaces en friche, ou quant à une éventuelle réduction des périodes de jachère. Le fait que les prises de vue aient été réalisées durant la saison sèche empêche d'établir quelle est la part de végétation de friches dans les surfaces cultivées (méthode intégrée d'extraction de données de Bohlinger, 1998). Floquet (1990) avait déjà constaté une diminution des surfaces en friche dans le sud du Bénin, plus précisément dans le secteur d'Abomey-Calavi, pour la période 1960–1985. Des données de télédétection de haute résolution et prises à intervalles plus rapprochés – également au cours d'une même année – sont nécessaire pour mener des recherches plus approfondies concernant les surfaces réellement mises en cultures au cours d'une année ainsi que les périodes de jachère et leur évolution.

Une exploitation agricole intensive peut avoir plusieurs conséquences: un phénomène de salinisation (Schachtschabel 1998, Hillel 2003), la raréfaction de la faune vivant dans le sol et par conséquent de la macroporosité des sols (Giertz et al. 2003, cité dans Giertz & Steup 2008) ainsi que l'érosion des sols par le vent et par l'écoulement des eaux. De plus, Paeth et al. (2008) s'attendent à une diminution des précipitations annuelles et du nombre de jours de pluie jusqu'à la période 2041–2050 dans les espaces côtiers du Bénin sous l'effet du changement climatique. Cela aurait des conséquences graves, en particulier sur l'agriculture. Une recherche future sur l'évolution des surfaces agricoles devra également prendre en considération ces risques.

### Processus de déplacement du tracé de la côte

De nombreux auteurs ont étudié l'érosion côtière et les risques qui en sont la conséquence dans les espaces côtiers du Bénin (par ex. Dossou & Gléhouenou-Dossou 2007, Kaki & Oyédé 2000, Kaki et al. 2001). D'après Kaki et al. (2001), un processus d'érosion est en cours dans l'arrondissement d'Èkpè depuis la période 1981–1984. L'arrondissement d'Avlékété est considéré comme relativement stable. Il manque cependant des données quantitatives, en particulier pour la période récente.

Dans ce présent travail, nous avons analysé les variations dans l'espace et dans le temps du déplacement du tracé de la côte. Dans ce but, le terrain d'étude a été étendu au-delà des transects pour couvrir toute la zone couverte par les données images, à Avlékété pour la période 1995–2006 (13,4 km) et à Èkpè pour la période 1995–2007 (8,8 km) (cartes 25 et 26).

A cause des différents états de la mer, des marées, etc., il n'est pas possible d'établir clairement la ligne de côte. Dans le cadre de ce travail, nous avons pris en compte trois différents indicateurs de la ligne de côte (*Küstenlinienindikator* = KLI): la ligne d'escarpement (*Abbruchkante* = AK), la ligne d'interface entre sable sec et sable mouillé (*Nass-Trocken-Linie* = NTL) et la ligne d'eau (*Wasserlinie* = WL) (voir figure 15). La AK marque l'extension maximale de l'action des vagues ainsi que la limite actuelle de la zone d'érosion du sable. Là où elle est présente, il s'agit de la ligne qui a le plus de sens d'un point de vue socio-économique, car elle entraîne l'effondrement des constructions et des infrastructures (voir figure 47). La NTL est caractérisée par le passage du sable sec au sable humide – passage du clair au foncé. Elle est moins dépendante de l'état de la mer au moment de la prise de vue que le WL. Sur la côte du Bénin, le WL est visible avant tout comme le côté tourné vers la plage des vagues écumeuses. Le WL est utilisé, bien que des trois KLI il soit le plus dépendant de l'état de la mer, car dans les données multispectrales, par ex. les données QuickBird, il peut être déterminé relativement facilement par un seuillage NDVI et doit en conséquence servir de référence pour les recherches futures.

Les KLI peuvent différer parfois nettement l'un de l'autre: tandis que, par exemple dans un secteur de plantations en bord de mer, les lignes sont proches les unes des autres ou se confondent (figure 48 a). Elles peuvent se trouver relativement loin les unes des autres sur le site d'une carrière de sable, qu'elle soit ou non en activité aujourd'hui (figure 48 b), car dans ce cas la AK est clairement en retrait. Le tracé de la NTL, au contraire, ne dépend que peu de l'extraction de sable. En conséquence, l'écart entre AK et NTL est plus faible en 1995 qu'en 2002 et qu'en 2007 (carte 29, tableau 28).

Les analyses qui comparent les NTL dans l'arrondissement d'Avlékété durant la période 1995-2006 ne montrent pour l'ensemble du terrain d'étude que de très faibles variations (carte 30). Dans la partie ouest, nous pouvons

observer un léger phénomène d'accrétion et dans la partie ouest une légère érosion (image 87). Il s'agit d'un secteur côtier relativement stable (tableau 31), ce qui confirme et complète les observations de Kaki et al. (2001).

A la différence d'Avlékété, les résultats des analyses dans l'arrondissement d'Èkpè montrent une érosion caractérisée sur l'ensemble du secteur côtier observé (cartes 33–36). L'évolution du tracé des traits de côte atteste d'un phénomène d'érosion qui va en s'accroissant vers le centre de notre terrain d'étude pour ensuite diminuer en direction de l'est. Dans la plupart des endroits, la côte recule de plus de dix mètres par an; dans certains secteurs, le recul atteint 20 à 30 m/an. Nous avons toutefois remarqué que l'érosion dans la partie ouest a diminué de moitié durant la période 2002–2007. Dans le même temps, le secteur central, c'est-à-dire la partie marquée par les rythmes d'érosion les plus élevés (entre 20 et 30 m/an), s'est étendu de la période 1995–2002 à la période 2002–2007. Durant les deux phases d'observation, de 1995 à 2002 et de 2002 à 2007, les effets d'un fort processus d'érosion se font sentir dans l'arrondissement d'Èkpè avec des rythmes allant jusqu'à 28 m/an; le rythme moyen de l'érosion est d'environ 15 m/an (tableau 32). La perte annuelle de terres est de l'ordre de 1,5 ha par kilomètre de côte.

Nous avons observé pour l'année 2002 en différents points de la côte une augmentation de l'extraction de sable de la grève, ce qui a entraîné une régression plus importante de la AK; la NTL suit cette régression avec un temps de retard. De 2002 à 2007, les données image nous ont toutefois permis de constater un ralentissement de l'extraction de sable. Comme la NTL continue de progresser au même rythme, les deux KLI se rapprochent. Nous pouvons donc affirmer que c'est en grande partie l'exploitation du sable qui est responsable du recul de la côte par érosion observé dans le secteur d'Èkpè (cartes 38, 39), ce qui confirme les observations faites par ex. par Appeaning Addo (2010) et par Blivi et al. (2002). Parmi d'autres causes figurent la baisse de l'apport en sédiments, ce qui est dû à des ouvrages côtiers comme des ports (à Lomé au Togo et à Cotonou) ou des ouvrages de protection inadaptés du littoral, mais aussi à des barrages (en particulier sur la Volta au Ghana).

L'érosion affecte les plantations, les zones d'activités et l'agriculture ainsi que les espaces bâtis qui ont été construits sur la grève (carte 45). À l'ouest de l'arrondissement d'Èkpè il s'agit le plus souvent de bâtiments isolés dont la destruction a toutefois été décrite dans de nombreux documents (figure 47). À l'inverse, ce sont pour la plupart des hameaux qui ont été touchés dans nos transects observés. L'érosion a entraîné, autant entre 1995 et 2002 qu'entre 2002 et 2007, la destruction complète et le déplacement d'implantations humaines décrits déjà plus haut (carte 20).

Des projets visant à limiter l'érosion à l'est de Cotonou ont été élaborés en 2003 (MEHU 2003, McGillis et al. 2003, cartes 41 et 42). Le territoire d'étude du présent travail couvre la partie orientale du secteur concerné par cette planification – il s'agit du secteur qui connaît l'érosion la plus faible. Les secteurs situés davantage à l'ouest et qui ne bénéficieraient pas d'une protection du littoral sont touchés par une érosion nettement plus forte. Les projets se basent sur la situation en 2002 mais n'ont à ce jour pas été réalisés, si bien que, du fait de la poursuite de l'érosion côtière, une partie des ouvrages prévus se trouvent aujourd'hui dans la mer (voir carte 46). De tels ouvrages entraîneraient un renforcement important de l'érosion, qui surpasserait de beaucoup la force de l'érosion actuelle. Cette conséquence est qualifiée par McGillis et al. (2003) d'« inconvénient mineur » (minor disadvantage, p.15), car les espaces côtiers situés plus à l'est sont dépeints comme « pour l'essentiel non-développés » (undeveloped to a larger degree). Les secteurs concernés sont certes moins développés que ceux situés plus près de Cotonou. Les recherches ont cependant montré qu'il se trouve là des espaces bâtis, des espaces d'activités et des plantations. Par ailleurs, il est probable que l'érosion ainsi provoquée se poursuive au-delà de la période prise en compte dans les prévisions et ait des effets davantage à l'est, jusque dans les espaces côtiers du Nigeria – de telle sorte que les infrastructures présentes là-bas risquent d'être détruites.

Il sera nécessaire de procéder à davantage d'observations du trait de côte. Il est important de définir clairement quelle KLI sera utilisé dans les observations futures, parce que les indicateurs, comme nous l'avons montré, diffèrent nettement les uns des autres et que l'utilisation de deux indicateurs à deux périodes différentes peut entraîner une sur- ou sous-estimation du taux d'accumulation ou d'érosion. Nous recommandons par ailleurs d'avoir recours aux interprétations et aux classifications opérées par ceux qui ont déjà effectué des recherches sur le sujet et d'utiliser les données images dont ils se sont servis, pour parvenir à comprendre pleinement leur analyse. Pour le relevé du taux d'érosion dans le territoire d'étude d'Èkpè – en particulier pour des périodes longues d'observation – la NTL et le WL nous ont donné des résultats similaires et ont pu être utilisés de façon interchan-

geable. En conséquence, une observation continue dans ce territoire d'étude pourra être à l'avenir également basée sur la détection du WL. Les surfaces d'eau, dans les données image en canal infrarouge proche (IRP; *near infra red* = NIR) – comme les ensembles de données QuickBird – peuvent être classifiées par algorithmes par seuillage (NDVI<0); cela est rendu possible par l'absence de réflexion en IRP. La surface maritime ainsi classifiée peut ensuite générer le WL. La carte 43 compare une classification des surfaces d'eau avec un WL interprété visuellement. Les différences sont très faibles (tableau 33). Par ailleurs, dans une section du périmètre d'étude, les surfaces d'eau et celles de sable sec et humide ont été classifiées par eCognition dans une approche par segmentation. La carte 44 en présente le résultat avec un extrait de la classification par seuillage. Il en ressort qu'il est possible de classifier très précisément les surfaces d'eau et en conséquence de déterminer le WL; la classification du sable sec et humide et donc la détermination de la NTL et de la FC est plus difficile. Pour des images en IRP prises à des niveaux de marée semblables, un relevé automatisé nous semble être une technique appropriée, en particulier pour le relevé des surfaces en eau – bien que la NTL soit moins dépendante de l'état de la mer. Nous suggérons que lors des observations futures seule une différence d'au moins 10 m entre des prises de vue à deux dates différents soit considérée comme une véritable différence, en raison de possibles imprécisions lors du traitement des données et du décalage entre NTL et WL.

### Liens entre les processus étudiés

Comme cela a déjà été évoqué, les processus étudiés ne se déroulent pas de façon isolée, mais s'influencent réciproquement. C'est ainsi que l'expansion du bâti repousse les espaces agricoles ainsi que les savanes, les palmeraies de palmiers à huile et la végétation des zones humides; l'expansion des surfaces agricoles repousse également les savanes et palmeraies et la végétation des zones humides. L'espace disponible est, de plus, diminué là où des terres disparaissent du fait de l'érosion côtière. La figure 56 montre quelles peuvent être les transformations de l'usage du sol.

Dans les cartes 45 (arrondissement d'Èkpè) et 46 (arrondissement d'Avlékété), les différents types d'utilisation du sol sur un même territoire à différents moments d'observation sont superposés. Cela met en évidence les liens décrits plus haut entre les processus étudiés dans leur dimension spatiale. La comparaison des deux arrondissements montre que l'arrondissement d'Èkpè est soumis à des mutations plus profondes que l'arrondissement d'Avlékété.

Les processus analysés avec leurs liens réciproques spatiaux pourraient être intégrés dans un modèle qualitatif et y être mis en rapport avec d'autres liens (figure 57). Seuls les liens démontrés ici entre les processus étudiés forment un réseau d'interaction complexe.

### Perspective

Une caractéristique particulière du présent travail est que, malgré les lacunes des données image disponibles, des analyses détaillées des processus de transformation de l'espace ont pu être menées. Pour cela nous avons développé une approche méthodologique adaptée aux conditions des pays en développement. Celle-ci est valable en premier lieu pour les espaces côtiers du Bénin, pour lesquels nous avons rendu disponible pour nos terrains d'étude des données spatiales quantitatives concernant les processus étudiés et leurs interactions durant la période 1995–2007. Les résultats peuvent contribuer à l'élaboration d'une planification spatiale intégrée et de prévisions. Avec l'approche méthodologique décrite, les ensembles de données et les analyses des processus pourront être complétés à l'avenir et être étendus à d'autres espaces. Les territoires d'étude présentent des structures paysagères et des processus typiques du Golfe de Guinée; l'approche méthodologique appliquée peut de ce fait être utilisée sur l'ensemble de la région. Nous suggérons d'utiliser l'approche méthodologique présentée ici pour mener l'analyse quantitative des processus sur d'autres territoires, de façon à obtenir des résultats comparables.

L'observation du terrain joue un rôle fondamental dans l'interprétation et la compréhension de données image et est nécessaire pour éviter des contre-sens, comme le montrent les exemples suivants. Dans les données images, des bâtiments de tailles différentes ont été détectés et c'est l'observation de terrain qui permet de reconnaître leur utilisation; nous avons pu confirmer la présence au cœur d'un espace bâti de surfaces agricoles qui n'étaient pas clairement visibles sur les images; par ailleurs, nous avons pu constater sur les données image que des traces

d'utilisation agricoles restaient dans certaines circonstances très longtemps visibles. Ainsi, dans l'ancienne lagune d'Avlékété, des surfaces étaient marquées par des sillons et des bil-lons, traces d'une utilisation ancienne. C'est seulement une fois sur le terrain que nous avons pu nous rendre compte qu'elles n'étaient plus cultivées « depuis très longtemps »<sup>9</sup> à cause de la salinisation.

Nous avons pu montrer que les données image disponibles se prêtent à une analyse des processus – quoi que seuls les résultats de l'interprétation visuelle soient réellement fiables. L'interprétation visuelle des images présente en effet de nombreux avantages: la possibilité de d'intégrer des caractéristiques très différentes et l'intégration des connaissances des analystes, en particulier quand les objets sont difficiles à reconnaître à cause d'un contraste trop réduit ou de la couverture végétale. Elle permet en outre de vérifier la position et la plausibilité des objets reconnus en opérant une comparaison avec des prises de vue acquises à une autre date. En ce qui concerne la facilité d'interprétation des images, une résolution géométrique élevée s'est révélée être très importante pour reconnaître clairement les différentes structures. L'information spectrale fournit un complément important quoique de second ordre. C'est pour cette raison que les données QuickBird se laissent le mieux interpréter, suivies par les images aériennes PAN et enfin par les données image RGB, dont la résolution spatiale est inférieure à celle des images aériennes PAN.

Sur nos territoires d'étude, des données sont seulement disponibles à deux ou trois dates différentes. En conséquence, les possibilités d'analyser le déroulement des processus sont limitées. Des données de télédétection offrant une meilleure couverture spatiale et temporelle seront nécessaires à une poursuite de l'analyse spatiale des processus en cours.

Comme l'interprétation manuelle nécessite beaucoup de temps est n'est de ce fait possible que pour des territoires réduits, nous avons testé à titre d'exemple des procédés basés sur des algorithmes de classification. À l'exemple des bâtiments et des surfaces caractéristiques des côtes la pertinence et le succès de procédés de classification par segmentation ont été étudiés. Il en est ressorti que, à partir des données disponibles, les résultats de la classification des bâtiments étaient insuffisants pour permettre une poursuite de l'analyse. La classification algorithmique de ces données va continuer de poser des problèmes, même si d'autres caractéristiques sont extraites pour être intégrées dans la segmentation et dans la classification. À l'avenir, ce sont au moins des données multispectrales et multitemporelles et recouvrant l'ensemble du territoire étudié qui doivent être disponibles pour générer une classification significative et donc pour pouvoir mener à bien l'analyse des processus à l'échelle d'un territoire – bien qu'une classification algorithmique restera difficile dans les situations où il est nécessaire que l'analyste fasse appel à son expérience du terrain pour obtenir des résultats fiables – par exemple lorsque les bâtiments sont partiellement cachés par des palmiers ou dans le cas de similitudes spectrales, où il est nécessaire de vérifier la plausibilité des résultats en effectuant une comparaison avec d'autres prises de vue. Les surfaces caractéristiques des côtes n'ont pu être classifiées que dans les données QuickBird, et pas dans les autres données image, car dans les données PAN et RGB, les vagues constituaient une accumulation de lignes qui a gêné l'analyse. Dans les données multitemporelles QuickBird disponibles, une analyse basée sur des algorithmes de classification serait de ce fait envisageable, qui aurait comme base la NTL ou le WL.

Certes, le choix d'une interprétation manuelle des données a eu pour conséquence de limiter spatialement l'analyse à cause de l'important investissement en temps qu'elle représente; cependant, pour les raisons évoquées précédemment, les approches de classifications ne constituaient pas une alternative. Nous avons montré que l'approche présentée ici, basée sur une interprétation visuelle des catégories étudiées, est apte à traiter des données image de différentes résolutions spectrales et de différentes qualités pour analyser des processus à un niveau élevé de résolution spatiale. Pour l'analyse des transformations des surfaces agricoles et du tracé de la côte, les résultats de l'interprétation (résultats primaires) ont pu être directement utilisés, tandis que l'analyse des processus de développement de l'espace bâti a été complétée par des résultats secondaires tels que la surface bâtie déduite et la densité du bâti.

Avec l'aide des valeurs de référence et des valeurs des modifications, issues des résultats de l'interprétation, il a été possible d'évaluer et d'analyser quantitativement les processus ainsi que, par exemple, grâce à la superposition de surfaces, de visualiser la densité des noyaux et les lignes de changement. La méthode de détermination des

---

<sup>9</sup> D'après les informations des habitants.

densités de points en fonction du noyau, que nous avons adaptée à l'analyse des processus de développement de l'espace bâti, peut également être appliquée à d'autres données spatiales sous forme de points. De plus, dans le cadre de l'analyse du trait de côte, nous avons mené le relevé d'une ligne de transformation continue, à l'inverse de la procédure par transect habituelle (par ex. Thieler et al. 2009) car cela nous a permis d'éviter toute lacune dans l'analyse. En outre, des variations de l'intensité des transformations le long de la ligne observée ont pu être révélées. La méthode d'analyse des transformations des lignes de délimitation peut donc être employée.

Si le travail de classification est poursuivi – ce qui serait souhaitable en particulier au vu des nouvelles données satellitaires de haute résolution – il serait souhaitable d'une part de viser une amélioration des résultats de la segmentation, sur laquelle la classification est bâtie, et d'autre part d'intégrer d'autres caractéristiques pour prendre en compte en particulier les propriétés structurelles et contextuelles des différentes catégories. Par ailleurs, il serait opportun de vérifier comment d'autres connaissances du contexte et d'autres contrôles de plausibilité – comme ce qui est possible dans l'interprétation visuelle – peuvent être intégrés dans les algorithmes et comment les bases de connaissances peuvent être traitées informatiquement. De plus, davantage de recherches concernant les algorithmes de classification et de segmentation sont nécessaires, car une concordance des limites des objets de l'image lors d'une procédure par segmentation échoue souvent dès la phase de segmentation. De ce fait, les conséquences des écarts dus à la classification ainsi que les modifications apparentes qui en résultent lors d'une procédure basée sur des algorithmes doivent être analysées. Les bâtiments, surfaces agricoles et KLI relevés peuvent servir de training et de contrôle pour le développement de procédures implicites et explicites de classification.

En ce qui concerne les données satellite commerciales de haute résolution, nous avons constaté que leur couverture temporelle dans les archives est en augmentation. Cela rend possible une poursuite des analyses de processus. Il faut toutefois tenir compte du fait que la zone équatoriale ne figure pas actuellement parmi les régions prioritaires pour le relevé de données. La couverture nuageuse souvent importante limite également la fréquence des relevés. Avec le lancement de NigeriaSat-2 le 17 août 2011, un satellite d'observation africain se trouve désormais dans l'espace; il fournit des données de 2,5 m de GSD en canal PAN et de 5m pour les canaux multispectraux. Des recherches doivent encore être menées pour savoir dans quelle mesure les données qu'il fournira seront aptes à apporter des réponses aux problématiques portant sur l'habitat dans notre territoire d'étude, car la résolution géométrique n'est utilisable que de façon limitée pour de petits bâtiments comme ceux présents sur notre terrain (figures 33 et 34). La résolution géométrique est également insuffisante pour représenter les structures agricoles. Ce manque peut cependant être compensé par une couverture temporelle élevée – si tant est qu'elle concerne le Bénin. Ce type de résolution devrait en revanche convenir au relevé des KLI.

Des informations qualitatives et quantitatives concernant les processus sectoriels agissant sur un espace donné peuvent être tirées des données image, informations qui peuvent à leur tour être interprétées pour servir d'indicateurs des forces sociétales en action dans les régions côtières. La télédétection ne peut fournir que partiellement des explications concernant les transformations et les forces à l'œuvre dans les processus en cours. Une coopération entre différentes disciplines est de ce fait particulièrement importante, par exemple entre les sciences socio-économiques, de l'environnement et de la télédétection. Elle rend possible une évaluation des risques posés par les évolutions en cours dans le territoire d'étude, pour permettre de réagir par des politiques publiques. Il est encore nécessaire d'évaluer les possibilités de telles coopérations visant à étudier un même espace, en particulier en ce qui concerne la définition de mesures spatiales communes. Le traitement de données de télédétection de haute résolution est dans ce cadre un travail primordial et de plus en plus indispensable.





# Kurzfassung

Küstenräume stellen häufig stark besiedelte Gebiete dar. Zahlreiche Prozesse laufen dort mit hoher Dynamik ab und führen zu räumlichen Veränderungen und Nutzungskonflikten. Insbesondere in Entwicklungsländern geschieht dies zumeist ohne staatliche planerische Interventionen oder gar integrierte Managementkonzepte. Dabei sind es gerade die Küstenräume, die beispielsweise aufgrund des hohen Nutzungsdruckes und des Klimawandels mittel- und langfristig vorausschauendes Handeln erfordern, um eine angepasste Entwicklung in Gang zu setzen und Risiken zu vermindern. Dazu bedarf es verlässlicher raumbezogener Datengrundlagen, an denen es jedoch in Entwicklungsländern oftmals mangelt. Dort kommen daher der Fernerkundung besondere Aufgaben zur Erfassung räumlicher Veränderungen als Indikatoren raumrelevanter Prozesse zu, denn Aufnahmebedingungen am Boden gestalten sich schwierig und für große Räume zu aufwändig. Zudem bietet die Fernerkundung die Möglichkeit, Prozesse auch in der Retrospektive aufzudecken. Die Fernerkundung stößt allerdings dann an enge Grenzen, wenn es um kurzfristige Prozesse geht, Landnutzungsstrukturen sehr kleingliedrig sind, die Detektionsmöglichkeiten aufgrund unscharfer Grenzen problematisch sind und die algorithmengestützte Auswertung durch das Vorliegen oftmals heterogener, zeitlich und räumlich lückenhaft verfügbarer Bilddaten nur begrenzt möglich ist – wie dies in vielen tropischen und subtropischen Küsten der Fall ist.

In der vorliegenden Dissertation wird ein methodischer Ansatz vorgestellt, der es erlaubt, unter diesen speziellen und doch für Entwicklungsländer typischen Bedingungen raumverändernde Prozesse zu analysieren. Dazu werden beispielhaft Teilräume der Küstenzone des westafrikanischen Landes Benin, die einem extremen Nutzungsdruck und -wandel ausgesetzt ist, untersucht.

Für die Untersuchungsräume liegen heterogene optische Fernerkundungsdaten unterschiedlicher räumlicher und spektraler Auflösung, d.h. panchromatische Luftbilder, RGB-Luftbildscans sowie QuickBird- und vorverarbeitete SPOT-Satellitendaten für zwei bzw. drei Zeitpunkte innerhalb des Zeitraums 1995–2007/08 vor. Diese werden, gestützt durch Untersuchungen am Boden, ausgewertet. Der Schwerpunkt der Bildauswertung liegt dabei auf der visuellen Auswertung, um zum einen über die heterogenen Daten hinweg vergleichbare Ergebnisse zu erhalten und zum anderen bestmögliche Aussagen über die Verwertbarkeit von Fernerkundungsdaten zur Prozessanalyse treffen zu können. Des Weiteren stellt der durch visuelle Interpretation manuell erstellte Datensatz eine Referenz für algorithmengestützte Klassifizierungsverfahren dar. Exemplarisch wird geprüft, inwiefern segmentbasierte Klassifizierungsverfahren erfolgreich sind. Die Ergebnisse der visuellen Interpretation werden in einem Geoinformationssystem jeweils für die Einzelzeitpunkte und in ihrer Veränderung räumlich analysiert. Dabei werden Begründungen der Veränderungen eingeschlossen.

Zahlreiche raumverändernde Prozesse laufen im Küstenraum Benins ab, von denen Siedlungsentwicklungen, Veränderungen landwirtschaftlicher Nutzflächen und Küstenerosion als besonders bedeutsam herausgegriffen und hinsichtlich ihrer räumlichen Entwicklung und Interaktionen detailliert untersucht werden. In allen untersuchten Teilräumen zeigt sich hohe Siedlungsaktivität, die sich durch Siedlungsverdichtung, Siedlungserweiterung und Zersiedlung sowie durch die Entstehung neuer Siedlungsbereiche ausdrückt. Sie wirkt direkt und indirekt auf die Verteilung anderer Landbedeckungs- und -nutzungsklassen. Die aufgrund ihrer sozioökonomischen Relevanz untersuchten landwirtschaftlich genutzten Flächen werden beispielsweise innerhalb und im direkten Umkreis von Siedlungen verdrängt und u.a. in zuvor ungenutzte Bereiche verlagert. Die in den Untersuchungsgebieten durchgängig analysierten Küstenlinien zeigen in Teilräumen mehr oder weniger starke Erosion, welche die Verfügbarkeit von Flächen im Küstenraum zusätzlich vermindert.

Ein besonderes Merkmal der vorliegenden Arbeit ist es, dass trotz problematischer Bilddatenlage detaillierte Analysen raumverändernder Prozesse durchgeführt wurden, die in ihrer räumlichen, sozioökonomischen sowie ökologischen Relevanz diskutiert werden. Dies gilt zumal für den Küstenraum Benins, für den damit für die untersuchten Teilräume erstmalig quantitative flächenhafte Daten bezüglich der untersuchten Prozesse vorliegen. Die Ergebnisse können zu integrierten Planungsmaßnahmen und Prognosen beitragen. Mit der beschriebenen Methodik könnten die Datenreihen und die Prozessanalyse weiter vervollständigt, zeitlich fortgeführt und für andere Gebiete erweitert werden.



# Abstract

Coastal zones are among the most densely populated areas worldwide. In these zones, numerous high dynamic processes take place that lead to spatial changes and conflicts regarding land use. Especially in developing countries, such processes and changes often happen without governmental planning interventions or integrated management strategies. However, particularly in coastal areas, enormous pressure from land use, as well as pressures from climate change, call for medium- and long-term action in order to begin adapted development and to reduce risks. Such action requires reliable spatial data bases that are often lacking in developing countries. In such countries, because conditions for mapping on site are difficult and too costly for large areas, remote sensing plays an important role in the detection of spatial changes that indicate space-altering processes. Moreover, remote sensing offers the possibility of uncovering processes retrospectively. However, remote sensing methods are limited if such processes are very short-term and land use structures are very small. In addition, poorly-defined boundaries make detection difficult, and algorithm-based analysis has its limits, due to heterogeneous, and temporally and spatially fragmentary image data – a condition typical for many tropical and subtropical coastal areas.

The thesis at hand introduces a methodological approach that allows for the analysis of space-altering processes under such special conditions typical for developing countries. As examples, areas within the coastal zone of the Western African country Benin are investigated.

For the investigation areas, heterogeneous optical remote sensing data in variable spatial and spectral resolution are on hand for two and respectively three dates between 1995 and 2007/08, and are comprised of panchromatic aerial photographs, scans of RGB aerial photographs, and QuickBird and preprocessed SPOT satellite images. These data are analyzed and are supported by ground truth data. The emphasis in the image analysis lies on visual interpretation in order to achieve comparable results throughout the heterogeneous data set and to be able to make the best possible statement about the usability of remote sensing data for process analysis. Furthermore, the results obtained by visual interpretation can serve as a reference for algorithm-based classification. By way of example, this thesis will test the extent to which segment-based classification approaches are successful. The results of the visual interpretation are spatially analyzed within a geoinformation system for each point in time and throughout the relevant changes. Reasons for these changes are integrated into the analysis.

Numerous space-altering processes take place in the coastal zone of Benin, among which settlement development, changes in agrarian areas, and coastal erosion are chosen as particularly significant. These processes are analyzed in detail regarding their spatial development and interactions.

In all investigation areas, high settlement activity can be shown, which is expressed by settlement densification, expansion, and spread, as well as by the development of new population areas. These developments affect directly or indirectly the distribution of other land use and land cover classes. For example, agrarian areas that are examined, due to their socio-economic relevance, are displaced within settlements, and their vicinity and are relocated in newly cultivated e.g. in formerly unused areas. The availability of land is further being reduced by the coastal erosion of greater or lesser strength that is observed in parts of the areas investigated.

A particular characteristic of the presented thesis is the detailed analysis of spatially relevant processes that was conducted despite of the problematic image data situation; in addition, the processes' spatial, socio-economic, and ecological relevance is discussed. This study is of special significance since it makes available for the first time for the investigation area quantitative spatial data regarding the observed processes. The results of this study can contribute to integrative planning measures and prognoses. Using the described methodology, the data time series and process analysis could be completed, updated and expanded in other areas that could potentially be investigated.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Motivation, Problemstellung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
1.1	Küsten als Nutzungsschwerpunkte und Anziehungsräume	1
1.2	Prozessidentifikation und -analyse als Voraussetzungen für planerische Steuerungen und Zukunftsabschätzungen	2
1.3	Erfassung raumverändernder Prozesse in Entwicklungsländern mit Hilfe der Fernerkundung	3
1.4	Raumverändernde Prozesse in der Küstenregion eines Entwicklungslandes der Tropen – der Küstenraum Benins	4
1.6	Ziel der Arbeit und allgemeine Forschungsfragen	6
1.7	Gliederung der Arbeit	6
<b>2</b>	<b>Charakterisierung des Untersuchungsraumes</b>	<b>7</b>
2.1	Geographische Einordnung des Untersuchungsraumes	7
2.1.1	Arrondissement Avlékété	7
2.1.2	Arrondissement Èkpè	8
2.2	Geomorphologie	9
2.3	Klima	11
2.4	Vegetation	12
2.5	Zonierung der Untersuchungseinheiten	12
2.6	Bevölkerung und Migration	16
2.7	Wirtschaft	17
<b>3</b>	<b>Bearbeitete Daten</b>	<b>19</b>
3.1	Fernerkundungsdaten	19
3.1.1	Datenaufbereitung: Aufbau einer digitalen Datenbasis	21
3.1.1.1	Festlegung des Datums auf WGS 84 UTM 31 N	21
3.1.1.2	Panschärfung der QuickBird-Satellitenbilddatensätze	22
3.1.1.3	Georeferenzierung der Luftbilder	22
3.1.1.4	Zusatz: Erstellung von Anaglyphenbildern für die Interpretation	22
3.2	Geodaten	23
3.3	Geländedaten	24
<b>4</b>	<b>Konkretisierung der Untersuchungen</b>	<b>25</b>
4.1	Auswahl maßgeblicher raumverändernder Prozesse zur weiteren Analyse	25
4.2	Konkretisierte Fragestellungen	27
4.3	Anforderungen an die Methodik	27
<b>5</b>	<b>Grundlagen und Stand der Forschung</b>	<b>29</b>
5.1	Interpretation und Klassifizierung in der Fernerkundung	29
5.1.1	Interpretation und Klassifizierung im Siedlungskontext	32

5.1.2	Erfassung landwirtschaftlicher Flächen	33
5.1.3	Extraktion von Küstenlinien	34
5.2	Methoden zur räumliche Analyse – Verteilungen und Muster	35
5.2.1	Räumliche Statistik	35
5.2.2	Dichteanalyse	36
5.2.3	Räumliche Analyse von Siedlungen	38
5.2.4	Räumliche Analyse landwirtschaftlicher Flächen	38
5.2.5	Räumliche Analyse von Küstenlinien	38
5.3	Methoden zur Erkennung, Beschreibung und Quantifizierung von Veränderungen	38
5.3.1	Ansätze visueller Veränderungserfassung	38
5.3.2	Ansätze algorithmengestützter Veränderungserfassung	39
5.3.2.1	Methoden der Bild-zu-Bild-Analyse	39
5.3.2.2	Post-Klassifizierungs-Analysen	39
5.3.3	Analyse abgeleiteter Ergebnisse aus Klassifizierungsergebnissen	40
5.3.4	Analyse von Siedlungsprozessen	40
5.3.5	Analyse von Veränderungen landwirtschaftlicher Flächen	41
5.3.6	Analyse von Veränderungen von Küstenlinien	41
5.4	Folgerungen	42
<b>6</b>	<b>Gesamtansatz der Prozessanalyse</b>	<b>43</b>
6.1	Bildinterpretation und Klassifizierung	43
6.1.1	Visuelle Interpretation	44
6.1.2	Klassifizierung	44
6.2	Räumliche Analyse	45
6.3	Erarbeitung der Veränderungsergebnisse	45
<b>7</b>	<b>Analyse von Siedlungsprozessen im Küstenraum</b>	<b>47</b>
7.1	Methodik	47
7.1.1	Erfassung von Gebäuden	47
7.1.1.1	Visuelle Gebäudeinterpretation	48
7.1.1.2	Segmentbasierte Gebäudeklassifizierung	50
7.1.2	Räumliche Analyse der Siedlungen	55
7.1.2.1	Statistische Auswertung der Gebäudeerfassungen	55
7.1.2.2	Bestimmung der Siedlungsfläche	56
7.1.2.3	Bestimmung der Siedlungsdichte	57
7.1.3	Erkennung, Beschreibung und Quantifizierung der Siedlungsveränderungen	58
7.1.3.1	Vergleich der Globalwerte	59
7.1.3.2	Veränderungen der Siedlungsdichte	59
7.2	Ergebnisse der Gebäudeerfassung	60
7.2.1	Ergebnisse der visuellen Gebäudeinterpretation	60
7.2.2	Ergebnisse der segmentbasierten Gebäudeklassifizierung	62
7.2.2.1	Ergebnisse der Segmentierung und ihre Bewertung	62
7.2.2.2	Ergebnisse der segmentbasierten Klassifizierungen und ihre Bewertung	63
7.3	Ergebnisse der Analyse räumlicher Siedlungsstrukturen und ihrer Veränderungen	64

7.3.1	Qualitative Beschreibung der räumlichen Siedlungsstrukturen und ihrer Veränderungen	64
7.3.2	Auswertung der statistischen räumlichen Analysen	66
7.3.3	Ergebnisse der Veränderungsanalyse der Siedlungsausdehnung und -dichte	68
7.4	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse	73
7.4.1	Diskussion und Bewertung der Interpretation und der Klassifizierungen	73
7.4.2	Diskussion und Bewertung der Analyse räumlicher Strukturen und ihrer Veränderungen	74
7.5	Ausblick	76
<b>8</b>	<b>Veränderungsprozesse landwirtschaftlicher Nutzflächen</b>	<b>79</b>
8.1	Methodik	79
8.1.1	Aufnahmezeitpunkte im Vergleich mit den Agrarkalendern	79
8.1.1.1	Agrarkalender für die Region Avlékété	80
8.1.1.2	Agrarkalender für die Region Èkpè	81
8.1.2	Visuelle Interpretation landwirtschaftlicher Flächen	83
8.1.3	Analyse der raum-zeitlichen Veränderungen landwirtschaftlicher Flächen	84
8.2	Ergebnisse der visuellen Interpretation landwirtschaftlicher Flächen	85
8.2.1	Ergebnisse der Testinterpretationen	85
8.2.2	Sicherheit der Interpretationsergebnisse	86
8.3	Ergebnisse der Veränderungsanalyse landwirtschaftlich genutzter Flächen	88
8.4	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse	89
8.4.1	Diskussion und Bewertung der Interpretations- und Veränderungsergebnisse	89
8.4.2	Mögliche Konsequenzen der Zunahme landwirtschaftlicher Nutzflächen unter Verdrängung natürlicher Vegetation	91
8.5	Ausblick	91
<b>9</b>	<b>Veränderungsprozesse des Küstenverlaufes</b>	<b>93</b>
9.1	Methodik	93
9.1.1	Erfassung der Küstenlinien	94
9.1.1.1	Festlegung der verwendeten Küstenlinienindikatoren	94
9.1.1.2	Einfluss der Gezeiten auf die Küstenlinienindikatoren	96
9.1.1.3	Visuelle Interpretation der Küstenlinienindikatoren und von ihnen begrenzter Flächen	97
9.1.2	Berechnung von Liniendifferenzen – zur räumlichen Analyse und zur Veränderungsbestimmung der Küstenlinienindikatoren	97
9.1.3	Erfassung der Flächenveränderungen durch Küstenlinienverschiebungen	98
9.2	Ergebnisse der Küstenlinienerfassung	98
9.3	Räumliche Analyse der Küstenlinienindikatoren	99
9.3.1	Abstände zwischen Abbruchkante und Nass-Trocken-Linie	99
9.3.2	Abstände zwischen Nass-Trocken-Linie und Wasserlinie	101
9.4	Veränderungen des Küstenverlaufes	102
9.4.1	Veränderungen des Küstenverlaufes im Arrondissement Avlékété	102
9.4.2	Veränderungen des Küstenverlaufes im Arrondissement Èkpè	103
9.5	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse	105
9.5.1	Technische Diskussion	105
9.5.2	Abhängigkeit des Verlaufes der Küstenlinienindikatoren vom Bearbeiter	106

9.5.3	Diskussion der räumlichen Analyse der Küstenlinienindikatoren	106
9.5.4	Diskussion der Küstenlinienveränderungen	106
9.5.4.1	Entwicklungen im Untersuchungsgebiet Avlékété	107
9.5.4.2	Entwicklungen im Untersuchungsgebiet Èkpè	107
9.5.4.3	Diskussion der Ergebnisse im planerischen Kontext	109
9.6	Ausblick	109
<b>10</b>	<b>Zusammenhänge zwischen den untersuchten Prozessen</b>	<b>111</b>
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>117</b>
<b>12</b>	<b>Verzeichnisse</b>	<b>117</b>
12.1	Literatur	123
12.2	Abbildungsverzeichnis	134
12.3	Kartenverzeichnis	136
12.4	Tabellenverzeichnis	138
12.5	Liste des figures	139
12.6	Liste des cartes	141
12.7	Liste des tableaux	143
<b>13</b>	<b>Anhang</b>	<b>145</b>



# Abkürzungsverzeichnis

ABE	Agence Bénonoise pour l'Environnement
AK	Abbruchkante
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CENATEL	Centre National de Télédétection et de surveillance du couvert forestier (Benin)
DED	Deutscher Entwicklungsdienst (seit 2011 GIZ)
DGM	Digitales Geländemodell
DG EAU	Direction Générale de l'Eau du Bénin
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DOM	Digitales Oberflächenmodell
dpi	dots per inch
GCP	ground control point
GIS	Geographisches Informationssystem
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
GPS	Global Positioning System
GSD	ground sampling distance = Bodenauflösung
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (seit 2011 GIZ)
IGN	Institut Geographique National (Benin, Frankreich)
IITA Benin	International Institute of Tropical Agriculture Benin
IKZM	Integriertes Küstenzonenmanagement
IRD	Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (Frankreich)
IMPETUS	Integratives Management-Projekt für einen effizienten und tragfähigen Umgang mit Süßwasser in Afrika
INSAE	Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (Benin)
IPCC	International Panel on Climate Change
ITCZ	inter-tropical convergence zone
KLI	Küstenlinienindikator
LB	Luftbild
LEI	Landscape Expansion Index
LiDAR	light detection and ranging
LUCC	Land Use/Cover Change
MAUP	modifiable areal unit problem
MEHU	Ministère de l'Environnement, de l'Habitat et de l'Urbanisme (Benin)
MEPN	Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature (zuvor MEHU; Benin)
MOMS	Modular Optoelectronic Multispectral Stereo Scanner

MS	multispektral
NDVI	normalized differenced vegetation index
NS	Streifen nassen Sandes zwischen WL und NTL
NTL	Nass-Trocken-Linie
OB	OptimalBox (Prototyp innerhalb der Software eCognition Developer 8.0)
O.R.S.T.O.M.	Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (1998 umbenannt in IRD; Frankreich)
PAN	panchromatisch
PAZH	Programme d'Aménagement des Zones Humides (Benin)
RGB	rot-grün-blau
RGPH2	Deuxième Recensement Général de la Population et de l'Habitation (Benin)
RGPH3	Troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitation (Benin)
RMS	root mean square
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
TIN	triangulated irregular network
TS	Streifen trockenen Sandes zwischen NTL und AK
UN	United Nations (Vereinte Nationen)
UTM	Universal Transverse Mercator
WA	Wissensbasierter Ansatz
WF	Wasserfläche zur zur WL
WGS 84	World Geodetic System 1984
WL	Wasserlinie

# 1 Motivation, Problemstellung und Zielsetzung

## 1.1 Küsten als Nutzungsschwerpunkte und Anziehungsräume

Weltweit laufen zahlreiche raumverändernde Prozesse ab. Migration, Urbanisation, Aus- und Umbau von Infrastrukturen, Verlegung von Wirtschaftszweigen, Veränderungen und Degradierung natürlicher sowie naturnaher Flächen sind vielfach zu beobachten. Vielfältige Ursachen können diese Prozesse bedingen, ob wachsende Bevölkerungszahlen, gesellschaftliche Umgestaltungen, Globalisierung, Wirtschaftswachstum, -rezession oder Kriege.

Küstenräume sind von solchen Prozessen besonders betroffen, da sie weltweit seit jeher eine enorme Anziehungskraft haben. Sie sind oftmals Wirtschafts- und Administrationszentren, besitzen die am besten ausgebaute Infrastruktur und werden daher bevorzugt. Es sind die am dichtesten besiedelten Gebiete der Erde, die in vielen Ländern Zuwanderungsräume darstellen. Nach Angaben der Vereinten Nationen wurde die Bevölkerung der weltweiten Küstenräume innerhalb eines 100 km breiten Streifens zwischen Meer und Binnenland im Jahre 1990<sup>10</sup> auf ca. 2 Mrd. geschätzt, d.h. 37 % der Weltbevölkerung auf 15 % der Erdoberfläche (UN 2001). 2000<sup>11</sup> waren es rund 40 % (UN 2007)<sup>12</sup>. Small & Nicholls (2003) schränken die Angaben von UN (2001) ein – sie berücksichtigen diejenige Bevölkerung innerhalb des 100 km breiten Streifens, die unterhalb 100 m ü. NN lebt. Dies waren 1990 1,2 Mrd. Menschen, d.h. 23 % der damaligen Weltbevölkerung<sup>13</sup>. McGranahan et al. (2007) können auf verfeinerte Daten zurückgreifen und berechnen diejenige Bevölkerung, die unterhalb von 10 m ü. NN<sup>14</sup>, den *Low Elevation Coastal Zones (LECZ)*, leben. Basierend auf Projektionen waren dies für das Jahr 2000<sup>15</sup> 10 % der Weltbevölkerung auf 2 % der Landoberfläche. Obgleich die Angaben schwanken, zeigen sie doch die Gewichtung der Küste. Oftmals konzentrieren die Küstenzonen auch die urbanen Zentren der jeweiligen Staaten. Vogt (2010) spricht im Zusammenhang der weltweiten Urbanisierung im Kontext der Tropen und Subtropen von einer „Urbanisierung der Küstenräume“. Entlang des Golfs von Guinea beispielsweise liegen dort die größten Städte der Region: Abidjan in Côte d’Ivoire, Accra in Ghana, Lomé in Togo, Cotonou in Benin, Lagos und Port Harcourt in Nigeria. Schon 1998 lebten dort mehr als 25 % der Bevölkerung ihrer Staaten (Adam 1998a). Städte sind zwar im Verhältnis zur globalen Landbedeckung recht klein, beherbergen jedoch nach UN-HABITAT<sup>16</sup> (2010) mehr als die Hälfte der weltweiten Bevölkerung und verändern signifikant u.a. Klima, Hydrologie, biogeochemische Kreisläufe und Biodiversität; dies sowohl auf lokaler, regionaler als auch auf globaler Ebene. Wachsende urbane Räume fordern zunehmend Ökosystemleistungen in ihrem Umfeld (Grimm et al. 2008), sie haben Einfluss auf die wirtschaftliche, politische sowie kulturelle Entwicklung und beherbergen den Hauptanteil globaler Produktionsstandorte (Kaplan et al. 2009 zit. n. Yang 2011a). In Küstenräumen treffen Raumannsprüche zahlreicher Landnutzungen auf begrenztem Raum aufeinander: Als Beispiele seien hier Siedlungen, Infrastrukturen, Industrie, Handel, Verwaltung und Administration, Hafen, Tourismus und Landwirtschaft genannt. Dadurch ergibt sich eine starke Veränderungsdynamik und Konkurrenz der Flächennutzungen und Landbedeckung, was zu Konflikten führen kann und oftmals schon geführt hat. Unregulierte Entwicklungen, ob durch Spontansiedlungen oder Urbanisation allgemein, durch Tourismus oder andere Sektoren, führen zu Überschreitung der Tragfähigkeit der Küstenzone und zerstören Naturressourcen, Landschaften, Lebensqualität und umweltabhängige Sektoren, wie beispielsweise Landwirtschaft oder die Küstenfischerei (z.B. Agardy et al. 2005; Nicholls et al. 2007; Vogt et al. 2010).

---

<sup>10</sup> Die Studie basiert auf dem *Gridded Population of the World Model 2 (GPW2)*, das Zensusdaten auf das Jahr 1990 als gemeinsame Basis projiziert – veröffentlicht durch das *Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC)*, das am *Center for International Earth Science Information Network (CIESIN)* des *Earth Institutes* der *Columbia University* angesiedelt ist.

<sup>11</sup> Die Studie basiert auf *GPW3*, einer Erweiterung des *GPW2*, das durch die Bevölkerungsprojektion bis 2000 erweitert ist. *CIESIN & Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)* (2005): *Gridded Population of the World, Version 3 (GPWv3)*. Palisades, NY: *Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC)*, Columbia University. <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw>. (02.11.2011).

<sup>12</sup> Auf diese Angaben stützt sich der Bericht des *Millennium Ecosystem Assessment (MEA)* (Agardy et al. 2005).

<sup>13</sup> Auf diese Angaben bezieht sich der Bericht des *International Panel on Climate Change (IPCC)* von 2007 (Nicholls et al. 2007).

<sup>14</sup> Eine hohe Bevölkerungskonzentration unterhalb 10 m ü. NN erhöht nach UN (2001) die Vulnerabilität eines Landes u.a. bezüglich Meeresspiegelanstieg und Sturmfluten.

<sup>15</sup> Die Studie basiert auf *Global Rural–Urban Mapping Project*, alpha version (GRUMP alpha); *CIESIN*, *International Food Policy Research Institute (IFPRI)*, *The World Bank*, *CIAT* (2004): “*Global Rural–Urban Mapping Project (GRUMP)*, alpha version: urban extents grids”, *SEDAC*, Columbia University, Palisades, NY, <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw> (02.11.2011)

<sup>16</sup> *United Nations Human Settlements Programme UN-HABITAT*

Entlang des Golfs von Guinea waren 1998 mehr als 60 % der wichtigsten Industrieunternehmen der Anrainerstaaten angesiedelt, die nach Adam (1998a) als die Hauptverursacher von Degradierungen gelten.

Insbesondere in Entwicklungsländern kann beobachtet werden, dass raumverändernde Prozesse oft ungesteuert bzw. unkoordiniert ablaufen. Zudem ist die Datengrundlage über ablaufende Prozesse in den meisten Entwicklungsländern gering und vielfach nicht aktuell; quantitative Kenntnisse über die Prozesse sind daher lückenhaft.

## 1.2 Prozessidentifikation und -analyse als Voraussetzungen für planerische Steuerungen und Zukunftsabschätzungen

Kenntnisse über die räumliche Dynamik und das Verständnis der zu Grunde liegenden Prozesse sind Voraussetzung für ein angepasstes, effektives und nachhaltiges Land- und Ressourcenmanagement einer Region. Dazu gehören multi- und interdisziplinäre Kenntnisse zum Zustand einer Region – d.h. naturräumlichen, aber auch kulturellen, sozioökonomischen und institutionellen Gegebenheiten, zu Antriebskräften<sup>17</sup>, Historie und Tendenzen von Entwicklungen, aber auch Kenntnisse zur persönlichen Wahrnehmung (z.B. Lambin et al. 2001, Yang 2011a, Fox et al. 2003, Nelson 2005). Im Hinblick auf angepasste Managementstrategien werden für Küstenräume seit einigen Jahren Ansätze des Integrierten Küstenzonenmanagement (kurz IKZM) diskutiert (z.B. Salomons et al. 1999). Wesentlich im Zusammenhang mit IKZM ist, dass insbesondere der hohen Komplexität der Küstenzonen Rechnung getragen wird. Die Analyse des Küstensystems stellt einen grundlegenden Bestandteil des IKZM dar (u.a. EC 1999, RIKZ 2004, Daschkeit 2007, Adam 1998a). Dies bedeutet u.a. die Notwendigkeit der Sammlung insbesondere raumbezogener Daten und die Erzeugung relevanter Information und Indikatoren. Auch zur Modellierung und Prognose von Entwicklungen in der Folgenabschätzung ist eine fundierte Kenntnis ablaufender Prozesse unabdingbar. Dabei muss beachtet werden, dass Veränderungen insbesondere Folgen von Entscheidungen sind – ob politischer oder persönlicher Art – und daher nicht notwendigerweise Linearität und (direkte) Kausalität beim Verlauf von Entwicklungen gegeben ist.

Der Begriff *Veränderung* kann in zwei Bedeutungen verwendet werden: zum einen beschreibt er die *Differenz* zwischen zwei Zuständen, zum anderen aber auch den *Vorgang*, der von einem Zustand zu einem anderen Zustand führt. Konkret wird in dieser Arbeit im Sinne der ersten Bedeutung weiterhin von Veränderungen gesprochen. Ist der Vorgang gemeint, werden die Begriffe *Veränderungsprozess* oder *verändernder Prozess* verwendet. Da die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Veränderungen und verändernden Prozesse Raumbezug besitzen, wird entsprechend von *räumlichen Veränderungen* bzw. *raumverändernden Prozessen* gesprochen.

Zusammenhänge zwischen Veränderungen und Prozessen sowie die Möglichkeit der Aufdeckung durch die Fernerkundung sind in Abbildung 1 in einem einfachen Veränderungs-Prozess-Modell dargestellt. Beobachtungen am Boden vor Ort (*ground truth*) lassen Momentaufnahmen zu. Mehrmalige Beobachtungen erlauben die Schilderung von Veränderungen. Dabei handelt es sich jedoch zumeist um räumliche und zeitlich eingeschränkte Punkterhebungen. Die Fernerkundung<sup>18</sup> ist daher bei der flächenhaften qualitativen und quantitativen Erfassung raumverändernder Prozesse – auch in der Retrospektive – eine Technik von größter Bedeutung. Durch visuelle Bildinterpretation<sup>19</sup> oder algorithmengestützte Klassifizierung<sup>20</sup> von Satelliten- und Luftbilddaten kann, abhängig vom Sensor, die in den Daten abgebildete aktuelle Situation zum jeweiligen Aufnahmezeitpunkt erfasst werden ①, um daraus über Veränderungen ② raumverändernde Prozesse ③ abzuleiten. Diese erfolgen durch sie antreibende, z.B. sozioökonomische, ökologische, gesellschaftliche und institutionelle Prozesse ④ sowie deren Zusammen-

---

<sup>17</sup> In der Literatur oft auch als *driving forces* oder *antreibende Kräfte* im Rahmen des *Driving forces-Pressures-States-Impacts-Responses (DRSIR)-Ansatzes* aufgeführt (Erweiterung des PSR-Modells, das durch die OECD entwickelt wurde; <http://glossary.eea.europa.eu/EEAGlossary/-D/DPSIR>; 07. 12. 2011)

<sup>18</sup> DIN 18716/3 (DIN 1997) definiert Fernerkundung folgendermaßen: „Fernerkundung ist die Gesamtheit der Verfahren zur Gewinnung von Informationen über die Erdoberfläche durch Messung und Interpretation der von ihr ausgehenden (Energie-)Felder. Als Informationsträger dient dabei die von der Erde reflektierte oder emittierte elektromagnetische Strahlung.“

<sup>19</sup> Die *visuelle Bildinterpretation* stellt im Rahmen dieser Arbeit ein manuelles Verfahren dar, d.h. visuell interpretierte Klassen werden manuell am Bildschirm abdigitalisiert. Werden im Folgenden die Begriffe Bildinterpretation bzw. Interpretation verwendet, ist dieser Vorgang gemeint. Näher dazu: Kapitel 5.1.

<sup>20</sup> Bei einem *algorithmengestützten Klassifizierungsverfahren* wird die „Zuordnung unbekannter Muster zu bekannten Begriffen (Bähr 2005a, S. 84)“ durch Rechner realisiert. Der Begriff *algorithmengestützt* wird hier verwendet, da die in der Literatur verwendeten Begriffe *automatisch* bzw. *automatisiert* eine größere Selbständigkeit der Verfahren implizieren; Der Begriff *rechnergestützt* wird als zu allgemein angesehen, da z.B. auch visuelle Interpretation heutzutage nicht mehr ohne Unterstützung eines Rechners durchgeführt wird. Werden im Folgenden die Begriffe Klassifizierung oder Klassifizierungsverfahren verwendet, ist der hier erläuterte Vorgang gemeint. Näher dazu: Kapitel 5.1.

wirken. Die Erkennung räumlicher Muster der Veränderungen und Veränderungsprozesse ist ein notwendiger Schritt, um diese Zusammenhänge genauer zu fassen und möglicherweise daraus Rückschlüsse auf die verursachenden Prozesse bzw. deren Antriebskräfte zu ermöglichen (5). Dies ist durch die fortschreitende messtechnische Entwicklung mit zunehmender räumlicher, spektraler, radiometrischer und zeitlicher Auflösung möglich. Da sich auch die Antriebskräfte verändern können (Nelson 2005) und sich Veränderungsprozesse dadurch oftmals nicht stetig zeigen, verbessert die Verwendung möglichst vieler Aufnahmezeitpunkte das Verständnis der ablaufenden raumverändernden Prozesse. Im zeitlichen Vergleich von Luft- und Satellitenbilddaten lassen sich – je nach zeitlicher Abdeckung – langfristige Prozesse, z.B. die Sukzession auf Flächen über mehrere Jahrzehnte, aber auch kurzfristige Prozesse, wie z.B. die Ausdehnung und Wirkung von Überschwemmungen nach Starkregenereignissen, aufdecken.

Somit eignet sich die Fernerkundung zur Erfassung flächenhafter Daten und Generierung notwendiger Informationen und kann damit als Ansatzpunkt zur Analyse raumverändernder Prozesse dienen. Sie kann dazu beitragen, Prozesse in ihrer räumlichen Ausprägung und ihrer raumverändernden Wirkung zu analysieren und Lücken in der Raumanalyse zu schließen. Auf dieser Grundlage ist es dann für ein vollständiges Prozessverständnis erforderlich, die Beobachtung der Flächennutzung und ihrer Dynamik mit sozialwissenschaftlichen Daten, die sich nicht unmittelbar in den Flächennutzungsmustern finden, zu koppeln. Methodische Grundsatzüberlegungen und Beispiele solcher Ansätze sind unter anderem in Liverman et al. (1998) und Fox et al. (2003) vorgestellt und diskutiert. In der vorliegenden Arbeit wird vornehmlich die fernerkundliche Komponente für solch eine Kopplung geschaffen.

### 1.3 Erfassung raumverändernder Prozesse in Entwicklungsländern mit Hilfe der Fernerkundung

Während in Hochtechnologieländern die Erfassung von Landnutzungs- sowie -bedeckungsdynamik und sozio-ökonomischen Prozessen durch die Instrumente der amtlichen Statistik und des Raummonitorings festgeschrieben ist, fehlen diese Voraussetzungen zumeist gerade in denjenigen Ländern, in denen die genannten Risiken räumlicher Prozesse in besonderer Weise vorhanden sind, den Niedrigtechnologieländern der Tropen und Subtropen. Die raumbezogene Datengrundlage, auf der planerische Steuerung aufgebaut werden kann, ist in diesen Ländern oftmals zu gering, unzureichend und oft nicht aktuell (Lechtenböcker 1997, Amisshah-Arthur & Miller 2002, Teka 2010). Daher kommen dort der Fernerkundung besondere Aufgaben zur Erfassung raumverändernder Prozesse zu, denn Aufnahmebedingungen am Boden gestalten sich oft schwierig und sind für große Räume zu aufwändig. Aber auch hinsichtlich der Verfügbarkeit von Fernerkundungsdaten stehen Entwicklungsländer, insbesondere in Afrika (Abidoun 2000, Huang et al. 2007, Amisshah-Arthur & Miller 2002) oftmals vor Problemen. Zum einen ist die Akquise durch fehlende finanzielle Ressourcen begrenzt (Adam 1992, Abidoun 2000). Zum anderen befinden sich viele dieser Länder geographisch in den Tropen und Subtropen. Dort sind aufgrund starker Bewölkung nur eingeschränkt optische Daten verfügbar. Dies macht die Detektion und Analyse kurzfristiger Prozesse extrem schwierig oder aber gar unmöglich. Des Weiteren sind Detektionsmöglichkeiten durch unscharfe Grenzen teilweise problematisch (z.B. Amisshah-Arthur 2002, Honecker & Löffler 2001).

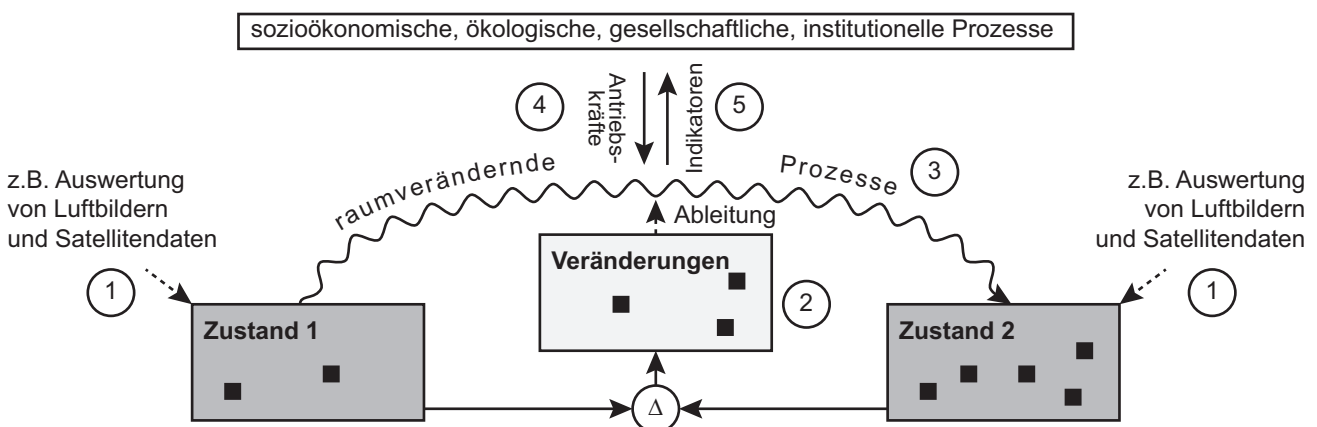


Abbildung 1: Veränderungs-Prozess-Modell

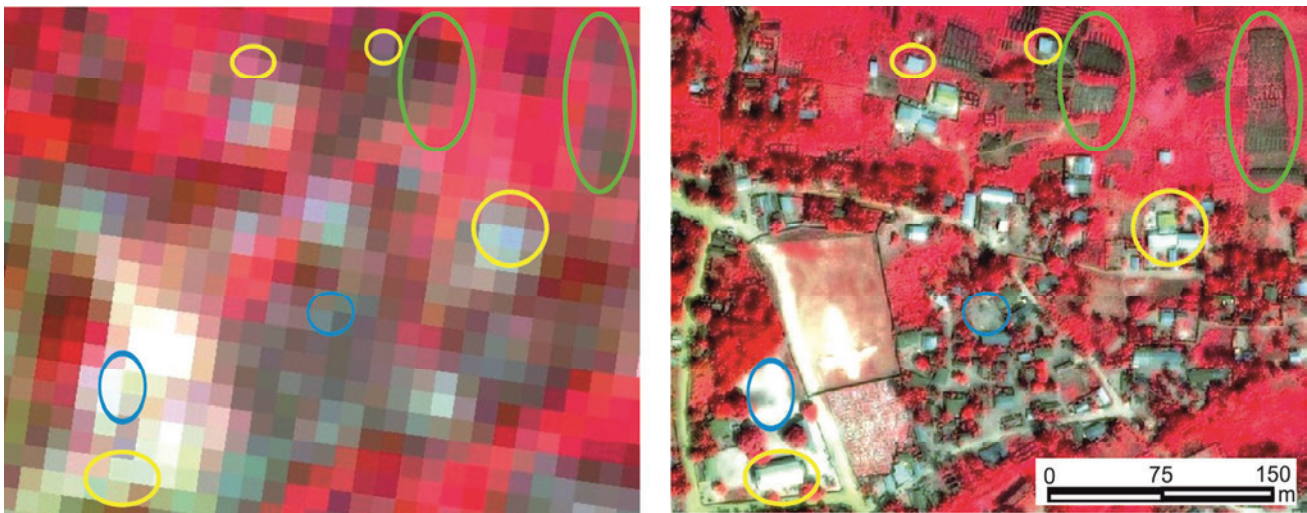


Abbildung 2: Vergleich der Darstellung von Siedlung bzw. Gebäuden (gelb umrahmt), Freiflächen (türkis) und Feldern (grün) in ASTER-Daten (links, GSD: 15 m) und QuickBird-Daten (rechts, GSD: 0,6 m PAN, bzw. pangeschärft)  
– Darstellung als Falschfarbenkomposite NIR-R-G

Zudem steht die Fernerkundung dort vor der Herausforderung, dass Landnutzungsstrukturen, die wesentliche, am Boden beobachtete Prozesse abbilden, oft extrem kleinräumig sind und dadurch nach sehr hoher räumlicher Auflösung verlangen (z.B. Lechtenböcker 1996, 1997, Honecker & Löffler 2001). Lange waren solche – nach Ehlers et al. (2002) höchst aufgelösten – Fernerkundungsdaten mit einer Bodenauflösung (auch *ground sampling distance* = GSD) um einen Meter nur als analoge Schwarz-Weiß- bzw. Farbluftbilder verfügbar (Jensen & Cowen 1999). Großflächige Auswertungen digitaler multispektraler Daten konnten kleine Strukturen nicht erfassen, da sie mit Daten wie LANDSAT (15 m GSD in PAN, 30 m GSD in Multispektraldaten) oder ASTER (15 m GSD) geometrisch nicht hoch genug aufgelöst waren (Bsp. in Abbildung 2 links). Mit räumlich höher aufgelösten Daten wie SPOT<sup>21</sup> (Jensen & Cowen 1999) und MOMS (4,5 m GSD) konnten schon Verbesserungen erreicht werden (Lechtenböcker 1997). Im Zuge der Verfügbarkeit höchst aufgelöster multispektraler Daten mit räumlichen Auflösungen  $\leq 1$  m, wie sie seit 1999 mit IKONOS und zunehmend auch mit anderen Plattformen (z.B. QuickBird, Worldview) erfasst werden können, ist es möglich, sich diesen kleinen Strukturen zu nähern (Abbildung 2 rechts<sup>22</sup>). An dieser Stelle zeigt sich abermals eine Einschränkung für Entwicklungsländer: Die vorgenannten Satelliten sind kommerziell und registrieren nur nach Auftrag Daten. Dadurch liegen insbesondere in Entwicklungsländern solche Daten flächendeckend oftmals weder mono-, geschweige denn multitemporal vor.

Um raumverändernde Prozesse quantitativ zu erfassen, sind multitemporale Fernerkundungsdaten notwendig. Bei eingeschränkter Verfügbarkeit von Multispektraldaten in Meterauflösung muss mit heterogenen Daten, insbesondere auch analogen Luftbildern, gearbeitet werden. Dies ist zumal dann nötig, wenn man Prozesse vor 1999 erfassen möchte. Der Mangel homogener fernerkundlicher Datensätze macht algorithmengestützte Ansätze nur begrenzt möglich. Die Fernerkundung stößt somit in Entwicklungsländern an einige Grenzen. Im Untersuchungsgebiet liegen Fernerkundungsdatentypen unterschiedlicher spektraler, geometrischer und radiometrischer Auflösungen vor. Diese werden in Kapitel 3.1 vorgestellt.

#### 1.4 Raumverändernde Prozesse in der Küstenregion eines Entwicklungslandes der Tropen – der Küstenraum Benins

Als ein Beispiel für die Problematik tropischer Küstenzonen wird im Rahmen dieser Arbeit der Küstenraum Benins untersucht. Er zeigt typische Probleme der Küstenregionen, wie sie speziell in Entwicklungsländern auftreten wie hohe und sich erhöhende Bevölkerungszahlen, unregelmäßige Landnutzungen, hohe Veränderungsdynamik, Zerstörung natürlicher oder naturnaher Lebensräume, unregelmäßige Ressourcennutzung, zunehmende Landnutzungsansprüche und -konflikte, zudem aber gleichzeitig Küstenerosion und wiederkehrende Hochwasserereignisse (INSAE 2003, Domingo 2007, Teka 2010, Kaki & Oyede 2000, Vogt et al. 2007, CEDA 2007). Dies

<sup>21</sup> Seit 1986: 10 m GSD in PAN und 10 m GSD in MS bei den Missionen 1–4; seit 2002: 5 m GSD in PAN, 10–20 m GSD in MS bei Mission 5

<sup>22</sup> Für alle in dieser Arbeit verwendeten QuickBird-Bilddaten gilt: QuickBird Products © DigitalGlobe TM, distributed by e-GEOS

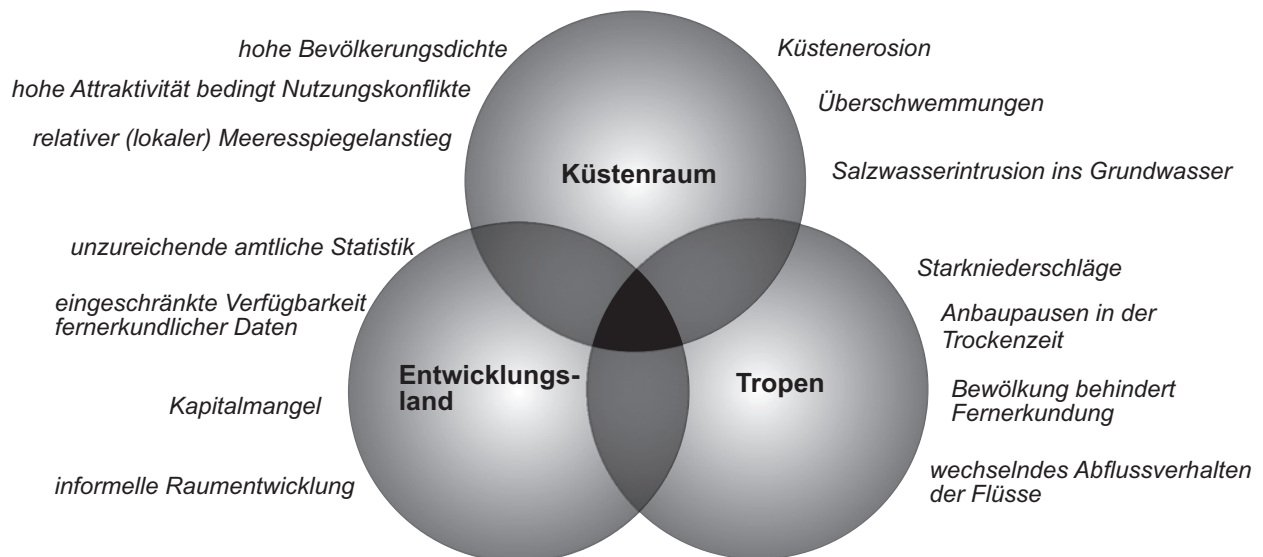


Abbildung 3: Problemfelder des Küstenraumes von Benin

geschieht alles im Kontext eines tropischen Lebensraumes, der näher in Kapitel 2 beschrieben wird. Abbildung 3 fasst den Problemrahmen zusammen.

Der Küstenraum beheimatet mit Cotonou das Verwaltungs-, Wirtschafts- und Ausbildungszentrum des Landes und verfügt damit über starke Pull-Faktoren für Migrationsprozesse. Aufgrund von Migration und Bevölkerungswachstum (Doevenspeck 2005, INSAE 2003, Teka 2010) ist die Küstenzone von Landnutzungswandel und einer Zunahme von Nutzungskonflikten betroffen (Vogt et al. 2007, Domingo 2007). Auch die Globalisierung und ihre Auswirkungen tragen dazu bei. So führen beispielsweise Veränderungen der Beschäftigungsstruktur (Vogt et al. 2010) zu veränderten Raumnutzungsansprüchen.

Während für Mittelbenin zahlreiche quantitative Arbeiten zur Landnutzungsdynamik vorliegen<sup>23</sup>, ist dies im Küstenraum Benins nicht der Fall. Im Rahmen einiger Projekte wurde räumlich differenziert u.a. die Landnutzungssituation erfasst – jedoch nicht ihre Veränderungen. Die monotemporalen Auswertungen liegen kartographisch vor – in kleinen Maßstäben zwischen 1:250.000 und 1:600.000 (siehe PAZH 2001, ABE 2001<sup>24</sup>). Des Weiteren existieren Berichte staatlicher sowie nichtstaatlicher Organisationen, z.B. der *Plan d'Action Environnemental du Bénin* (MEHU 1993), oder *Rapport National sur l'Environnement Marin et Côtier du Bénin* (CEDA 2007).

Verschiedene Autoren weisen auf eine Dynamik im Küstenraum hin (z.B. N'Bessa 1997, Domingo 2007, CEDA 2007). Teka (2010) erfasst raumrelevante Prozesse sozialwissenschaftlich sowie damit zusammenhängende sozioökonomische und planerische Probleme im Küstenraum Benins.

Eine multitemporale Erfassung der Auswirkungen raumverändernder Prozesse, wie sie mit fernerkundlichen Daten realisiert werden kann, ist aktuell für den Küstenraum Benins nicht verfügbar.

<sup>23</sup> Insbesondere im Rahmen des Projektes IMPETUS (<http://www.impetus.uni-koeln.de/>)

<sup>24</sup> Karten, die für den Schema directeur d'aménagement du littoral erarbeitet wurden

## 1.6 Ziel der Arbeit und allgemeine Forschungsfragen

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, raumverändernde Prozesse durch Auswertung zur Verfügung stehender heterogener Fernerkundungsdatensätze qualitativ aufzudecken, quantitativ zu analysieren und durch Kombination mit regionalwissenschaftlichen Daten zu interpretieren.

Mit Hilfe der Fernerkundungsdaten sollen Antworten auf folgende Fragenkomplexe gefunden werden:

- Welche maßgeblichen raumverändernden Prozesse lassen sich den vorliegenden heterogenen Daten interpretativ entnehmen? Durch welche Klassen lassen sich diese beschreiben?
- Wo laufen die raumverändernden Prozesse ab? Wie lassen sie sich qualitativ beschreiben, quantitativ analysieren und wie lassen sie sich visualisieren?
- Welche räumlichen Zusammenhänge zeigen sich zwischen den untersuchten Einzelprozessen?

Daraus abgeleitetes Ziel ist es, eine Kombination von Methoden und Arbeitstechniken zu entwickeln und anzuwenden, die der besonderen Problematik solcher tropisch-subtropischen Küstenräume angemessen ist und die zur flächenhaften Analyse von als relevant auszuwählenden Prozessen geeignet ist.

## 1.7 Gliederung der Arbeit

Die Arbeit ist in elf Kapitel unterteilt. Nach Kapitel 1 mit Motivation, Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit, stellen die Kapitel 2 und 3 den Rahmen der Arbeit vor: Kapitel 2 führt in das Untersuchungsgebiet und Kapitel 3 in die bearbeiteten Daten ein. In Kapitel 4 wird die Auswahl der für den Küstenraum als wesentlich identifizierten und weiter analysierten Prozesse vorgestellt. Außerdem werden die daraufhin konkretisierten Fragestellungen und die sich damit ergebenden Anforderungen an die Methodik aufgeführt. Kapitel 5 zeigt Grundlagen und den Stand der Forschung bezüglich der Klassifizierung, räumlichen Analyse und Veränderungserkennung und vertieft diese jeweils speziell für die analysierten raumverändernden Prozesse. Kapitel 6 stellt den Gesamtansatz vor, bevor in den Kapiteln 7–9 für die analysierten Prozesse jeweils die angewendete Methodik vorgestellt sowie die Ergebnisse präsentiert und diskutiert werden. Kapitel 10 führt Zusammenhänge und Interaktionen der Prozesse zusammen. In Kapitel 11 schließen die Zusammenfassung und ein Ausblick mit weiterem Forschungsbedarf die Arbeit ab.



## 2 Charakterisierung des Untersuchungsraumes

Naturräumliche, wirtschaftliche, politische und gesellschaftliche Gegebenheiten eines Raumes beeinflussen einander; teilweise bedingen sie sich sogar. So sind sie direkt und indirekt treibende Kräfte von Veränderungen als auch deren Resultat. Um die in dieser Arbeit untersuchten raumverändernden Prozesse besser einordnen zu können, umreißt dieses Kapitel den naturräumlichen und sozioökonomischen Rahmen, in den sie eingebettet sind.

### 2.1 Geographische Einordnung des Untersuchungsraumes

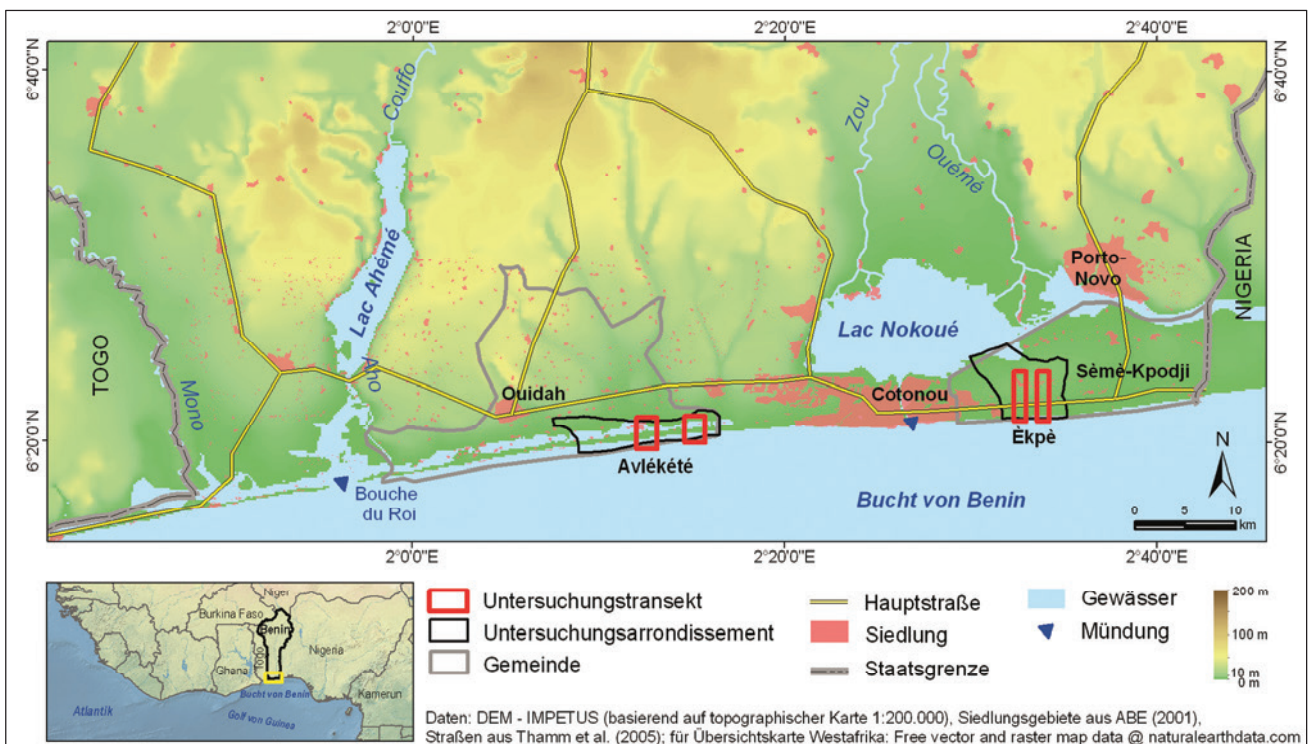
Die Küstenzone Benins grenzt bei 1°35' ö. L. im Westen an Togo und 2°30' ö. L. im Osten an Nigeria. Die Küstenlinie als südliche Begrenzung verläuft über rund 120 km nahezu in West-Ost-Richtung (6°14' n. Br. bis 6°22' n. Br.) entlang der Bucht von Benin im Golf von Guinea.

In dieser Küstenzone wurden im Süden zwei Arrondissements ausgewählt, in denen multitemporale Fernerkundungsdaten zur Verfügung stehen: Avlékété, ein ländliches Arrondissement sowie Èkpè, ein suburban geprägtes (Karte 1). Innerhalb der ausgewählten Arrondissements dienen jeweils zwei Transekte zur Erfassung ablaufender Prozesse. Die Transekte verlaufen in Nord-Süd-Richtung und schneiden somit orthogonal die küstenparallel verlaufenden Vegetations- und Landnutzungseinheiten, die im Kapitel 2.5 näher erläutert werden. Damit ist eine Erfassung der typischen Einheiten möglich.

#### 2.1.1 Arrondissement Avlékété

Das ländlich geprägte Arrondissement *Avlékété* liegt in der Gemeinde Ouidah, westlich von Cotonou (Karte 1). Es erstreckt sich über rund 15 km entlang der Bucht von Benin, wird im Süden vom Meer begrenzt und reicht zwischen 2 bis maximal 3,5 km ins Landesinnere hinein. Folgende *Transekte* wurden zur Prozessanalyse gewählt (siehe Karte 2 auf der Folgeseite):

- Im Westen das Transekt „Avlékété“ (2000 m x 3100 m);
- Im Osten das Transekt „Hio“ (2000 m x 2600 m)

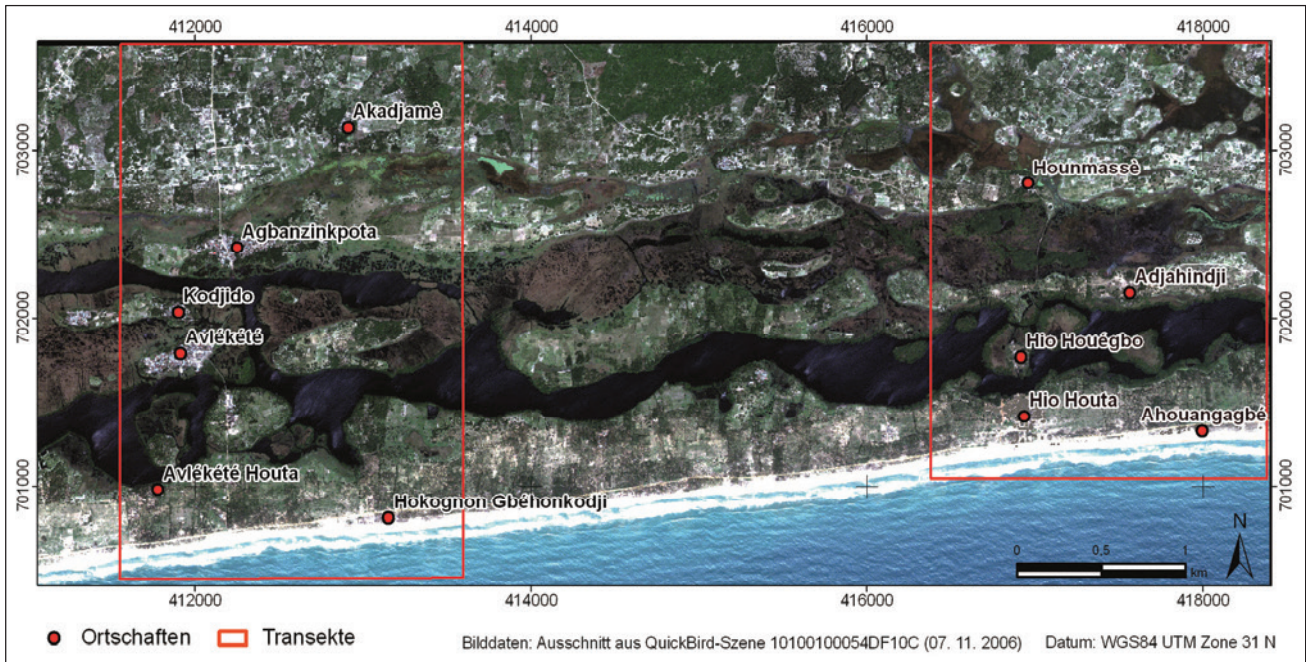


Karte 1: Küstenzone Benins mit den Untersuchungsräumen

### 2.1.2 Arrondissement Èkpè

Das ausgewählte suburbane Arrondissement Èkpè befindet sich in der Gemeinde Sémé-Kpodji im Osten Cotonous. Die südliche Grenze des Arrondissements wird über rund 6,5 km vom Meer gebildet. Èkpè reicht zwischen 6 und 7,5 km nach Norden. Folgende *Transekte* wurden zur Prozessanalyse gewählt (siehe Karte 3):

- Im Westen das *Tansekt „Èkpè“* (1200 m x 4900 m);
- Im Osten das *Transekt „Djéffa“* (1200 m x 4900 m).



Karte 2: Lage der Transekte im Arrondissement Avlékété

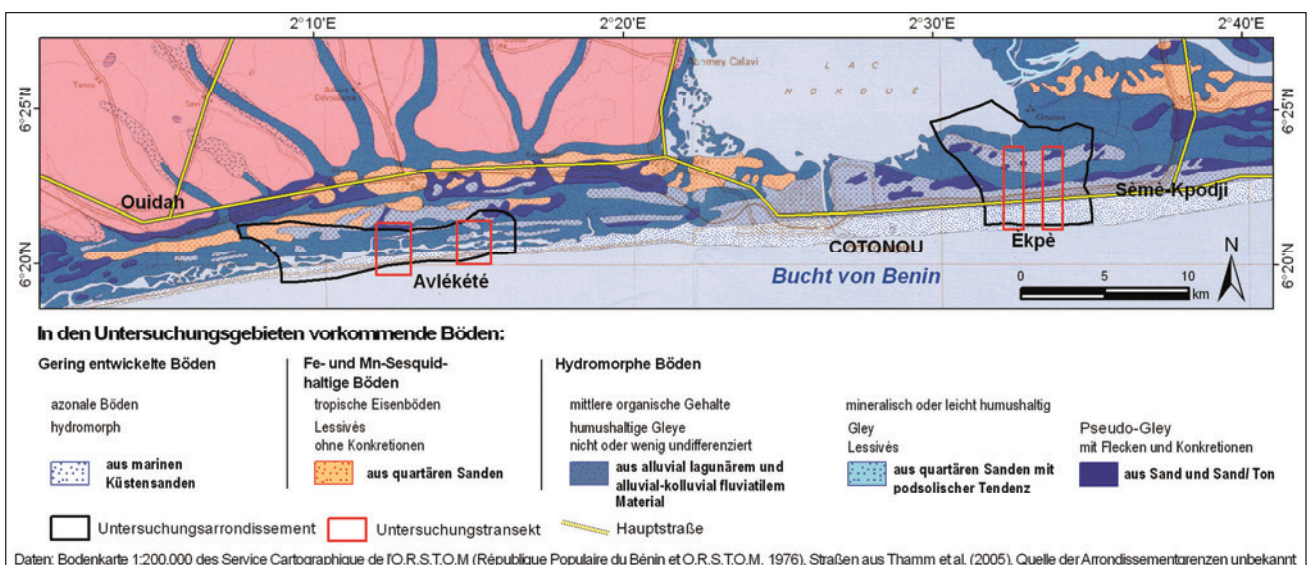


Karte 3: Lage der Transekte im Arrondissement Èkpè

## 2.2 Geomorphologie

Benins Küste ist morphologisch eine Ausgleichsküste mit geringer Gezeitenwirkung sowie Nehrungen und Lagunen, die in Benin besonders westlich von Cotonou ausgeprägt sind. Sie gehört zu einem der längsten Ausgleichs-Lagunen-Küstensysteme der Welt, das sich nahezu ununterbrochen – bis auf wenige Ästuarmündungen – über rund 300 km von Ost-Ghana bis West-Nigeria erstreckt (Blivi et al. 2002). In Benin hat die Küstenebene entlang der Bucht von Benin eine mittlere Breite von 4 km und grenzt im Norden an die *Terre de Barre du Bas-Bénin*. Westlich von Cotonou beträgt die Breite der Küstenebene ca. 3 km; zwischen dem Atlantik und der Lagune von Porto Novo weitet sie sich auf 10 km auf (Adam & Boko 1993). Die Ebene weist Höhen bis 10 m ü. NN und ein sehr geringes Gefälle auf (Adam & Boko 1993), was den Abfluss des Regenwassers erschwert.

Entlang der Küsten von Ghana bis Nigeria dominieren fluvio-marine Sande aus dem Quartär, die Strandwälle bilden, welche sich durch mehrere Zyklen regressiver und transgressiver Sedimentation gebildet haben (Adam & Boko 1993, Oyede 1991 zit. n. Blivi et al. 2002). Die küstenparallelen Strandwälle sind durch Lagunen und fossile Lagunen – heute sumpfige Senken – voneinander separiert. Westlich von Cotonou liegen die Lagunen (Lagune von Ouidah und Lagune von Grand Popo) meeresnah hinter dem ersten Strandwall; östlich von Cotonou ist die Lagune von Porto-Novo hinter dem zweiten Strandwall anzutreffen, während die vordere Lagune heute als verlandete fossile Lagune anzutreffen ist. Verbreitet sind zudem abflusslose flache Senken (*bas-fonds*). Bedeutend sind die drei großen Flüsse *Ouémé*, *Mono* und *Couffo*, die für den Wasser- und Stoffhaushalt der Gewässer wichtig sind. Der *Mono* mündet als einziger dieser drei Fließgewässer am *Bouche de Roi* direkt in die Bucht von Benin. Der *Couffo* durchfließt den Ahémé-See (*Lac Ahémé*), der bis in die Küstenebene hineinreicht; der *Ouémé* mündet in die Lagune von Porto-Novo, an die sich westlich der Nokoué-See (*Lac Nokoué*), anschließt (siehe Karte 1). Beim Auslauf des Nokoué-Sees handelt es sich um einen künstlichen Durchstich, der in der Kolonialzeit angelegt wurde, um Überflutungen Cotonous während der Regenzeit zu vermindern. Drei Strandwalltypen existieren nach Kaki & Oyede (2000) in Benin: (i) die inneren Wälle aus gelben Sanden im Norden der Ebene am Rand des Plateaus *Terre de barre*; (ii) die mittleren Wälle aus grauen Sanden nördlich der Küstenlagune und (iii) die vorderen Wälle aus braunen und weißen Sanden zwischen der Küstenlagune und dem Atlantik. Die Morphologie der letzteren ist im Allgemeinen flach bis leicht gewellt. In Karte 4 sind die Bodengesellschaften<sup>25</sup> der Küstenebene im Überblick dargestellt. Auf den Strandwällen stehen wenig entwickelte Sandböden mit geringer Bodenfruchtbarkeit an (Adam und Boko 1993). In den Senken und den Flussauen finden sich hydromorphe Böden. Sie sind schwarz, haben einen hohen Tonanteil und sind tiefgründig. Adam & Boko (1993) beschreiben sie als Vertisole. Bei den beobachteten Böden innerhalb der ehemaligen Lagune im Arrondissement Èkpè kann es sich jedoch nicht um Vertisole handeln, denn sie sind zu nass und zeigten auch am Ende der Regenzeit keine Trockenrisse. Die Böden entlang der Lagunen und in den ehemaligen Lagunen weisen unterschiedlich hohe Salzgehalte auf.



Karte 4: Bodenübersichtskarte (Bénin & O.R.S.T.O.M. 1975)

<sup>25</sup> Die Bezeichnungen sind rein beschreibend und entsprechen keiner Nomenklatur.

Paradis (1976 zit. n. Bohlinger 1998) teilt den Saum entlang des Atlantiks (Litoralzone) nach jahreszeitlichen Wasserstandsschwankungen in fünf Sub-Zonen ein: a) sandige Böden, die nicht oder selten überflutet werden, b) sandige Böden, die periodisch überflutet werden, c) tonige Böden, die länger überflutet werden, d) von Süßwasser überflutete Bereiche entlang der Flussläufe und e) von Brackwasser überflutete Bereiche, z.B. Mangroven. Während der Trockenzeit zwischen Dezember und Mai ist der Abfluss der Flüsse sehr gering, steigt jedoch stark in der Regenzeit an, was zu einer Wasserspiegelerhöhung in den Seen und Lagunen führt (Blivi 2002). Die Gezeiten spielen an der Küste von Benin eine untergeordnete Rolle: Für die Station Lagos, 80 km östlich Benins, wird ein mittlerer Gezeitengang von 0,79 m angegeben (Wolfram|Alpha, 2011). Die Gezeitenströmung entlang der Küste ist somit schwach.

Verantwortlich für die Ausbildung der Ausgleichsküste ist eine starke ostwärts gerichtete küstenparallele Driftströmung. Sie wird nach Guilcher (1954) und Sitarz (1960, beide zit. n. Blivi et al. 2002) verursacht durch die südwestliche Dünung, die das Jahr hindurch konstant und mit niedriger bis mittlerer Energie ( $H = 0,5\text{--}1,5\text{ m}$ ) und langer Periode ( $T = 10\text{--}15\text{ s}$ ) vom Atlantik kommend auf die Küste trifft. Die Dünungsenergie steigt von Juni bis Oktober an auf Wellen mittlerer bis hoher Energie ( $1,5\text{--}4\text{ m}$ ) (Guilcher 1954, Sitarz 1960, beide zit. n. Blivi et al. 2002). Nach McGillis et al. (2003) werden die Wellen durch entfernte Stürme im Südatlantik verursacht und sind durch ihre Kontinuität sowie ihren Winkel zur beninischen Küste verantwortlich für den sehr hohen küstenparallelen Sedimenttransport. Die Dünung trifft zwischen  $4^\circ$  und  $9^\circ$  (im Mittel  $6^\circ$ ) auf die Küste (Kaki & Oyede 2000). Dadurch werden von Lomé bis Cotonou nach Angaben von McGillis et al. (2003) jährlich  $1\text{ Mio m}^3$  bzw. nach Kaki & Oyede (2000)  $1,5\text{ Mio m}^3$  Sand verfrachtet. Mit bis zu  $1\text{ Million m}^3$  Sediment pro Jahr wurde die Bucht von Benin allein durch das Volta-Delta in Ghana versorgt, bis der Akosomba-Staudammes  $110\text{ km}$  stromaufwärts  $1967$  fertiggestellt wurde. Nach Kaki & Oyede (2000) ergibt sich durch den Damm ein jährliches Defizit von  $100.000\text{ m}^3$ . Der Mono, der einzige Fluss dieser Küste, der neben dem Volta direkt ins Meer entwässert, lieferte im Westen Benins rund  $100.000\text{ m}^3$  Sand während seines Hochwassers (von August bis Oktober<sup>26</sup>). Der Mono wurde  $1987$  durch den Nangbeto-Staudamm  $160\text{ km}$  nördlich seiner Mündung aufgestaut. Fehlende Sedimentfracht verändert die Massebilanz der betroffenen Küste und führt zu Küstenerosion, die zu großen Schäden entlang des gesamten Küstenkomplexes führt. Der konkrete Einfluss auf das Erosionsgeschehen ist jedoch nach Kaki & Oyede (2000) noch nicht vollständig geklärt. Des Weiteren haben Küstenbauwerke Einfluss auf das Sedimentations- und Erosionsgeschehen entlang der Küste. Hafengebäuden in Lomé, Cotonou und Lagos haben westlich ihrer Einrichtung zu Sedimentation und östlich zu verstärkter Küstenerosion geführt. Auch durch Küstenschutzmaßnahmen, z.B. Molen, wie in Kpémé und Anébo in Togo oder östlich des Hafens von Cotonou kommt es in Strömungsrichtung zu Sedimentdefiziten. Im Westen Benins wurden beispielsweise von  $1985$  bis  $1991$  durch die erwähnten Maßnahmen in Togo Landverluste verzeichnet (Kaki & Oyede 2000). Östlich solcher Molen kommt es des Weiteren durch Wellenbrechung (Kaki & Oyede 2000) zu verstärkter Erosion.

Tabelle 1: Küstenentwicklung von  $1954\text{--}1997$  (nach Kaki et al. 2001)

(„=“=lokale Stabilität; „+“=Sedimentation; „-“=Erosion) (oberer markierter Abschnitt: Avlékété; unten Èkpè)

Gebiete von West nach Ost (km)	1954- 1964	1964- 1969	1969- 1975	1975- 1981	1981- 1984	1984- 1990	1990- 1995	1995- 1997
I Togo – Grand-Popo (0-23)	=	=	=	=	=	-	=/-	=/-
II Grand-Popo – Bouche de Roi (23-33)	=	=	=	=	=	=	=	=
III Bouche de Roi – Djondji (33-39)	=	=	=	=	=	=	=/-	-
<b>IV Djondji – Ouidah – Togbin (39-76)</b>	=	=	=	=	=	=	=	=
V Togbin – Bah (76-81)	=	=	=	=	=	=	=/-	=/-
VI Bah – Jacquot – Hafen Cotonou (81-90)	=	=/+	=	+	+	+	+	+
VII Hafen Cotonou – PLM Alédjo (90-94)	=	+	+/=	=	=/+	=	=	=
VIII PLM Alédjo – Zone des Ambassadeurs (ZdA) (94-100)	=	=/-	-	-	-	-	-	-
<b>IX ZdA – PK 11 (100-111)</b>	=	=	=	=	=/-	-	-	-
X PK 11 – Nigeria (Klaké) (111-120)	=	=	=	=	=	=	-	-

<sup>26</sup> Abflussmessungen an der Station Athieme,  $111\text{ km}$  oberhalb der Mündung (UNH/GRDC, University of New Hampshire, <http://www.grdc.sr.unh.edu/html/Polygons/P1732100.html>; (abgerufen am 17. 05. 2011)

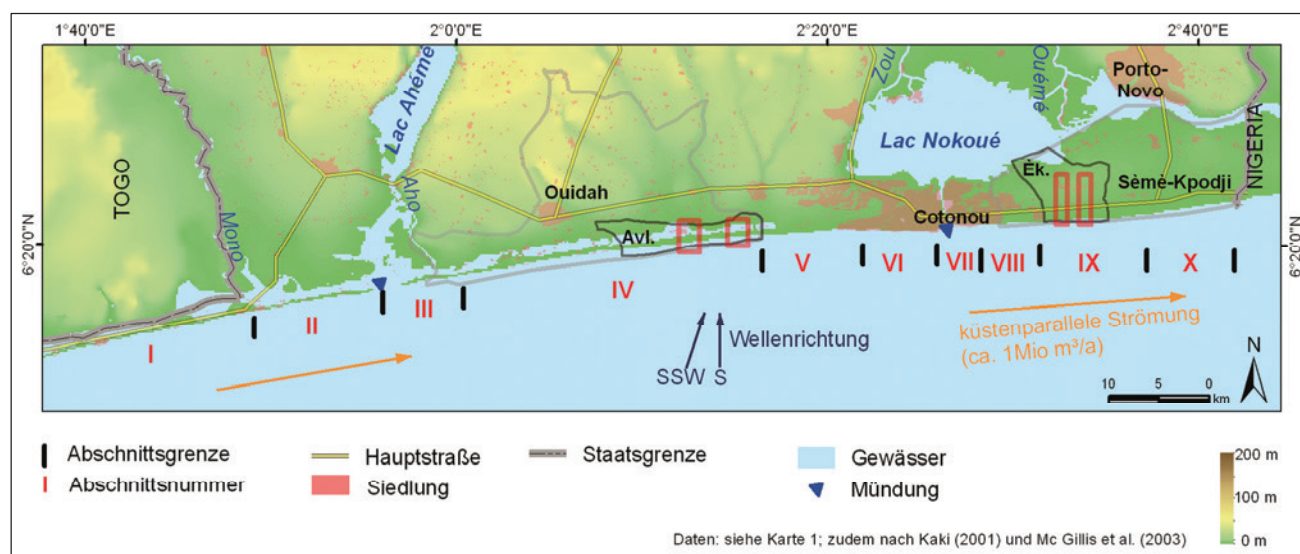
Ein weiterer Grund für Küstenerosion ist Sandabbau<sup>27</sup> an der Küste, was insbesondere lokal zu verstärkter Erosion führt. Kaki & Oyede (2000) schätzen 1 Mio m<sup>3</sup> aktuellen Sandabbau pro Jahr. Schätzungen von Dossoumou (2004) sprechen von rund 1,2 Mio m<sup>3</sup>. Aktuell gilt ein Verbot des Sandabbaus, welches aber nicht konsequent durchgesetzt wird. Es zeigt sich, dass zahlreiche Faktoren Einfluss auf die rezente Küstenmorphologie haben, deren jeweiliger Anteil noch nicht endgültig geklärt ist. Sozioökonomisch problematisch wirkt sich die Küstenerosion aus, durch die Land verloren geht und Infrastrukturen zerstört werden. Erosion ist entlang der gesamten Ausgleichsküste des Golfs von Guinea zu beobachten (z.B. Degbe 2009).

Tabelle 1 zeigt *qualitativ* die historische Entwicklung in Abschnitten (Karte 6) entlang der gesamten beninischen Küste. In Abschnitt IV liegt das Arrondissement Avlékété. Dieser Abschnitt gilt bis 1997 als überwiegend stabil. Abschnitt IX repräsentiert den Abschnitt innerhalb des Arrondissement Èkpe. Während für den Abschnitt westlich des Arrondissement Erosion schon im Zeitraum 1964–1969 dokumentiert wird, ist es im Untersuchungsgebiet erstmalig der Zeitabschnitt 1981–84. In den drei Teilbereichen VIII, IX und X wird deutlich, wie die Erosion nach Osten fortschreitet und weiterhin aktiv ist.

Die hier vorgelegte Arbeit liefert im Kapitel 9 erstmalig *quantitative* Ergebnisse für die Veränderung des Küstenverlaufs in den Untersuchungsgebieten im Zeitraum 1995–2007.

### 2.3 Klima

Benin befindet sich in der Übergangszone zwischen äquatorialen tropischen Klimaten im Süden und trockenem Savannenklima im Norden. Das wechselfeuchte Klima Benins wird durch die relativ kühlen feuchten Luftmassen des Südwestmonsuns und den trockenheißen saharischen Nordostpassat (*Harmattan*) beeinflusst (Adam & Boko 1993, Fink 2006). Im Januar liegt die Grenze zwischen diesen Luftmassen bei ca. 7° n. Br. und wandert durch die Verschiebung der Innertropischen Konvergenzzone (ITCZ) mit dem Sonnenstand bis 20° n. Br. im August. Die Küstenzone Benins befindet sich dadurch das gesamte Jahr im Bereich der feuchten südwestlichen Monsunströmung, und die relative Luftfeuchtigkeit zeigt eine sehr geringe Variabilität bei Werten über 60 % (Ermert & Brücher 2008, siehe Abbildung 4 links, S. 12). Nur an einigen Tagen zwischen Dezember und März reicht der *Harmattan* bis in diese Region. Verbunden mit der Wanderung der ITCZ treten zwei Regen- und zwei Trockenzeiten in der Küstenregion bis 7° 30' n. Br. auf (Fink et al. 2008). Diese bestimmen maßgeblich den Rhythmus in der Landwirtschaft. Die Große Regenzeit dauert von April bis Juli, gefolgt von der Kleinen Trockenzeit von Juli/August bis September. Von Oktober bis November schließt die Kleine Regenzeit an. Die Große Trockenzeit dauert von Dezember bis März. Im Klimadiagramm und den monatlichen Niederschlagsverteilungen (Abbildung 4, S. 12) ist dieser Wechsel deutlich zu erkennen. Boxplots verdeutlichen die Variabilität der Niederschläge.



Karte 5: Beobachtungsabschnitte der Küstenentwicklung (Beobachtungen innerhalb der Abschnitte in Tabelle 1)

<sup>27</sup> Der Sandabbau wird manuell betrieben.

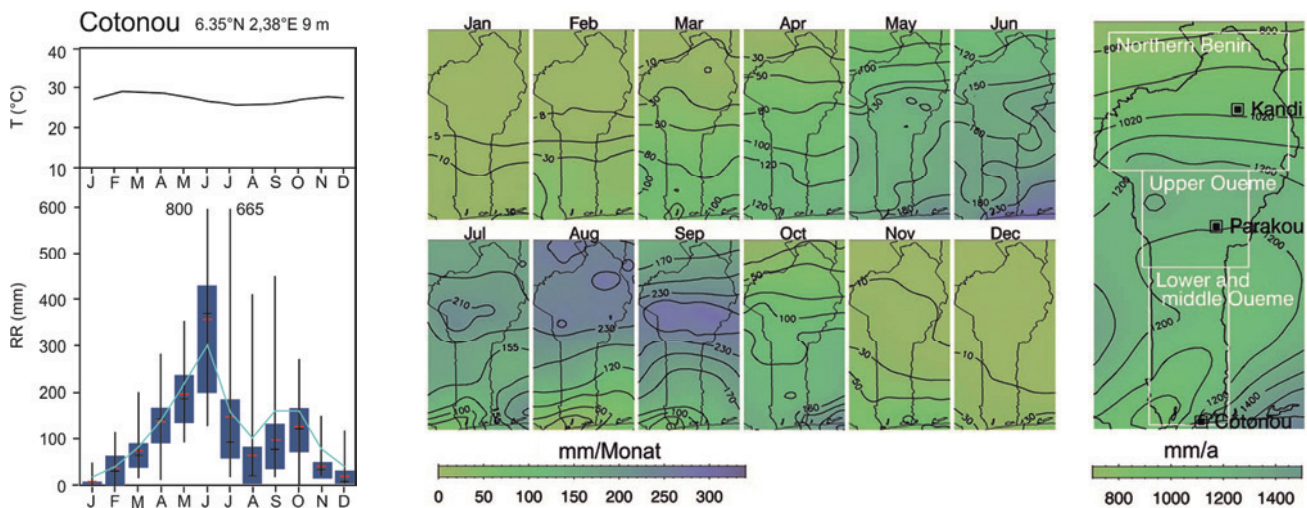


Abbildung 4: links: Klimadiagramm (Ermert & Brücher 2008)<sup>28</sup>; Mitte: mittlerer monatlicher Niederschlag 1921–2004 und rechts: mittlerer jährlicher Niederschlag 1921–2004 (Diederich & Simmer 2008)

Neben dem meridionalen Niederschlagsgradienten kann entlang der Küste ein West-Ost-Gradient der Niederschlagsverteilung beobachtet werden mit einer trockeneren Zone an der Grenze zu Togo mit Niederschlägen < 1000 mm/a und ansteigenden Niederschlägen bis zu den höchsten Werten mit 1485 mm/a in Sèmè nahe der nigerianischen Grenze im Osten (Fink et al. 2008, siehe Abbildung 4 Mitte und rechts). In Cotonou fallen durchschnittlich 1313 mm während 80–120 Tagen (Kaki & Oyede 2000). Die trockenere Zone im Südwesten Benins ist der nordöstliche Zipfel der sogenannten „Dahomey Gap“, eine Niederschlagsanomalie im tropischen Westafrika, deren mögliche Ursachen in Vollmert et al. (2003) ausführlich diskutiert werden. Die Evapotranspiration liegt bei 3,33 mm/Tag im Juli (Übergang der Großen Regenzeit zur Kleinen Trockenzeit) und bis zu 5,33 mm/Tag im Februar (Große Trockenzeit). Das jährliche Mittel liegt bei 4,24 mm/Tag bei rund 1700 Sonnenstunden jährlich (Kaki & Oyede 2000). Die höchsten Temperaturen werden im März, die niedrigsten im August gemessen. Sie schwanken jedoch lediglich mit einer Amplitude von weniger als 5 K. In der Systematik nach Troll wird die Küstenzone den tropisch-sommerhumiden Feuchtklimaten (Weller 2002) zugeordnet.

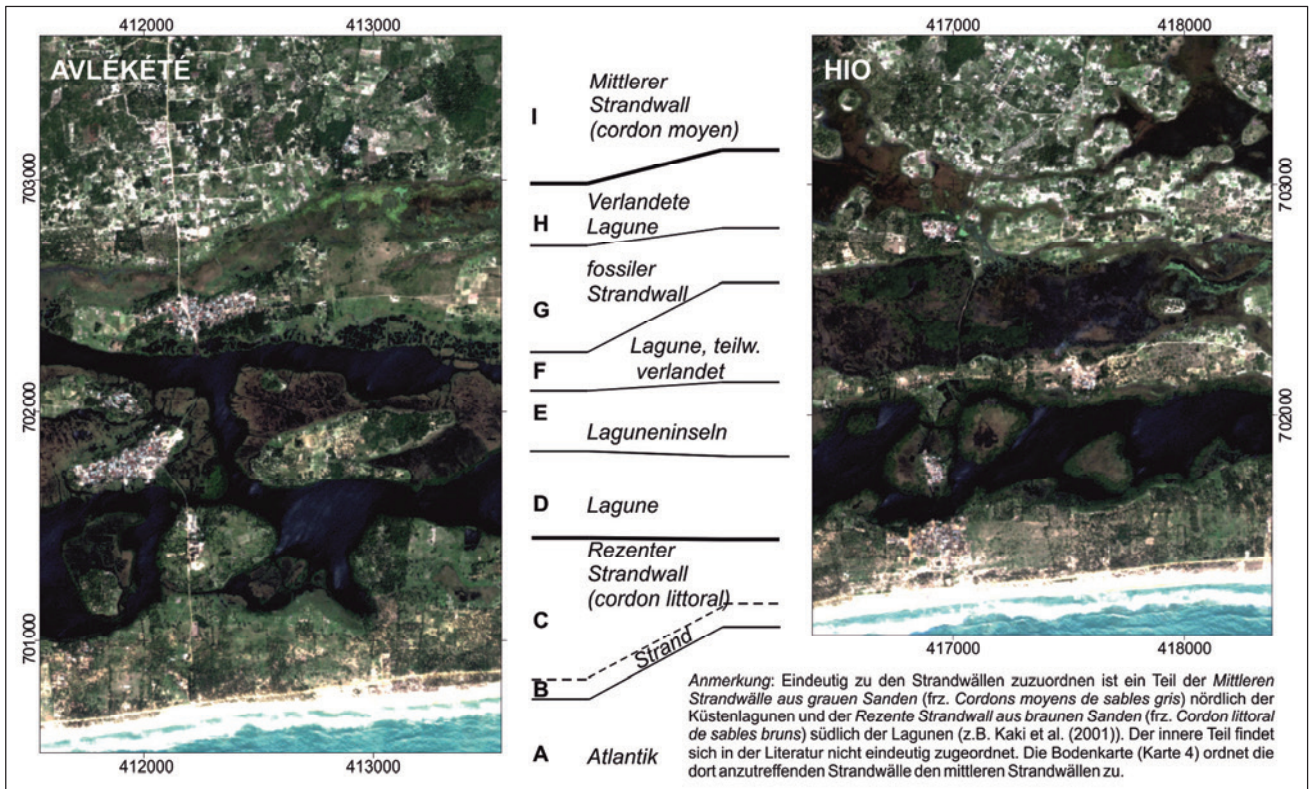
## 2.4 Vegetation

Die Küstenregion Benins wird in ihrem nördlichen Bereich nach Adjanohoun et al. (1989 zit. n. Bohlinger 1998) durch die *Guinea-Kongo-Zone* geprägt, während südlich ein schmales Band Küstenvegetation den Atlantik säumt (*Küstenzone* oder *Litoralzone*). Im südlichen Bereich befinden sich die Untersuchungsgebiete. Nach Adam & Boko (1993) existiert in der Küstenregion keine Primärvegetation mehr. Vielmehr handelt es sich um ein Mosaik aus Kulturen, Brachen und Relikten naturnaher Vegetation. Letztere stellt sich in Form von Inseln immergrüner oder laubwerfender Wälder, von Wald- und Strauchsavanne sowie Feuchtgebieten dar. Waldinseln, u.a. um Ouidah, sind nach Adam und Boko (1993) möglicherweise Relikte der Vegetationsbedeckung der Region. Die Vegetationsperiode erstreckt sich in den Regenzeiten über ca. 240 Tage (Kaki & Oyede 2000). In Untersuchungen von Bohlinger (1998, S. 142) ist bei kleinwüchsigen Straucharten, bei Savannenarten und bei ein- bis dreijährigen Sträuchern in der Trockenzeit totaler Blattfall zu beobachten; ansonsten findet ein kontinuierlicher Übergang von Blattfall und Neuaustrieb statt. Im folgenden Kapitel wird näher auf die Vegetation innerhalb der Transekte eingegangen.

## 2.5 Zonierung der Untersuchungseinheiten

Die in Kapitel 2.1 vorgestellten Untersuchungseinheiten repräsentieren in Nord-Süd-Richtung die küstenparallel verlaufenden Landschaftseinheiten der ersten 2,6 km bis 3,1 km der Küstenzone im Arrondissement Avlékété bzw. der ersten 4,9 km im Arrondissement Èkpe. Auf den folgenden Doppelseiten zeigen Karte 6 und Karte 7 die Unterteilungen am Beispiel der Transekte; Tabelle 2 und Tabelle 3 erläutern die jeweiligen Abschnitte.

<sup>28</sup> *Climatologic Normals* (CLINO) der World Meteorological Organization (1961–1990): Temperaturen T [°C]: Mittel; Monatliche Niederschlagsmengen RR [mm] für Mittel, Median, 25- und 75-Perzentil sowie Absolutwerte.



Karte 6: Zonierung der Lagunenküste im Arrondissement Avlékété – am Beispiel der Transekte (Erläuterungen in Tabelle 2)

Tabelle 2: Erläuterungen zur Zonierung der Lagunenküste (von Nord nach Süd)<sup>29</sup>

**Abschnitt Charakteristische Eigenschaften**

<b>I (Nord)</b>	Mosaik zerstreuter Siedlungen, Brache, Feldern, Strauchsavanne und <i>Fourré arbustive</i> ; von Ölpalmen ( <i>Elaeis guineensis</i> <sup>30</sup> ), Feldmosaik und anthropogen überprägter Savanne charakterisiert; Relikte von <i>Fôret dense</i> , insbesondere im Nordosten des Arrondissement ( <i>Fôret Classée de Pahou</i> <sup>31</sup> )		
<b>H und östl. Teil F</b>	Feuchtsavanne ( <i>Savanne herbeuse humide</i> ); von <i>Typha australis</i> , <i>Loudetia simplex</i> und <i>Cyperus articulatus</i> gebildet, am Rand wie westlicher Teil von F/D		
<b>G und E</b>	Mosaik aus zerstreuten, teils sehr dicht bebauten Siedlungen, Brache, Feldern und Grassavanne		

<sup>29</sup> Fotos: Ulrike Sturm-Hentschel

<sup>30</sup> Die Ölpalme (*Elaeis guineensis*) stammt aus der Region.

<sup>31</sup> Thematische Karte « Domaines Protégés et Palmerais Industrielles » aus dem Schema Directeur d'Aménagement du Littoral (CENATEL 2001)

**Abschnitt Charakteristische Eigenschaften**

**westlicher Teil von F und D** Lagune, stellenweise mit Mangroven am Rand, verbreitet Salzgewinnung; Mangroven bestehen aus *Rhizophora racemosa*, *Avicennia germinans*, des Weiteren großflächig *Paspalum vaginatum*



**C** Grassavannen und/oder kultivierte Brache mit unterschiedlich dichtem Bestand an Kokos oder Ölpalmen; *Waltheria indica*, *Annona senegalensis* und *Canavalia rosea* in solchen Pflanzformationen am häufigstem; bis zur Küstenlagune; Kokosplantagen (*Coco nucifera*); Krauttepich durch die in B erwähnten Rasenarten beherrscht

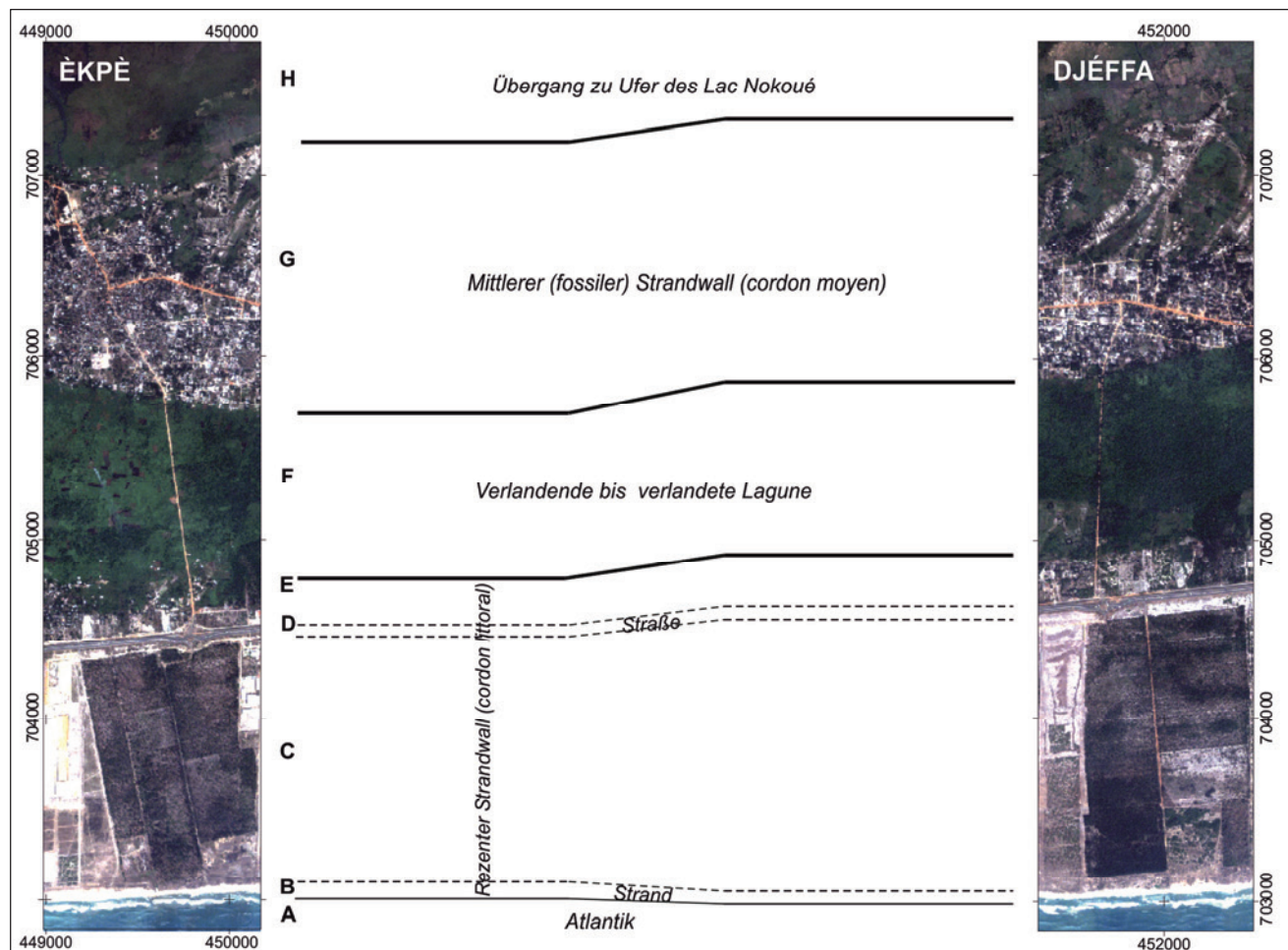


**B** Wassernah nur Sand (B1); darauf folgend Strandrasenfläche (B2) dominiert von *Remirea maritima*, *Canavalia rosea*, *Ipomoea pes caprae* und *Ipomoea stolonifera* – B1 und B2 wechselnde Breite



**A (Süd)** Meer mit starker W-E-Strömung

Nachfolgend wird die Zonierung der Küste östlich von Cotonou vorgestellt.

















Karte 7: Zonierung der Küste östlich von Cotonou im Arrondissement Ékpè – am Beispiel der Transekte (Erläuterungen in Tabelle 3)



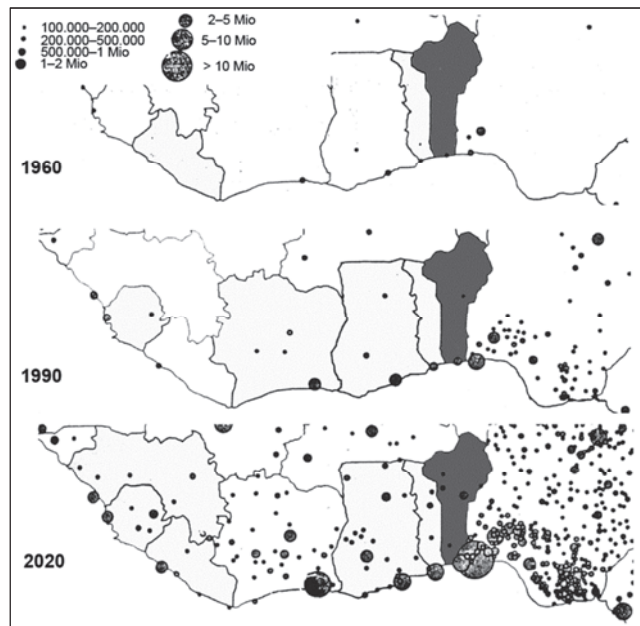
Tabelle 3: Erläuterungen zur Zonierung der Ostküste Benins (von Nord nach Süd)

**Abschnitt Charakteristische Eigenschaften**

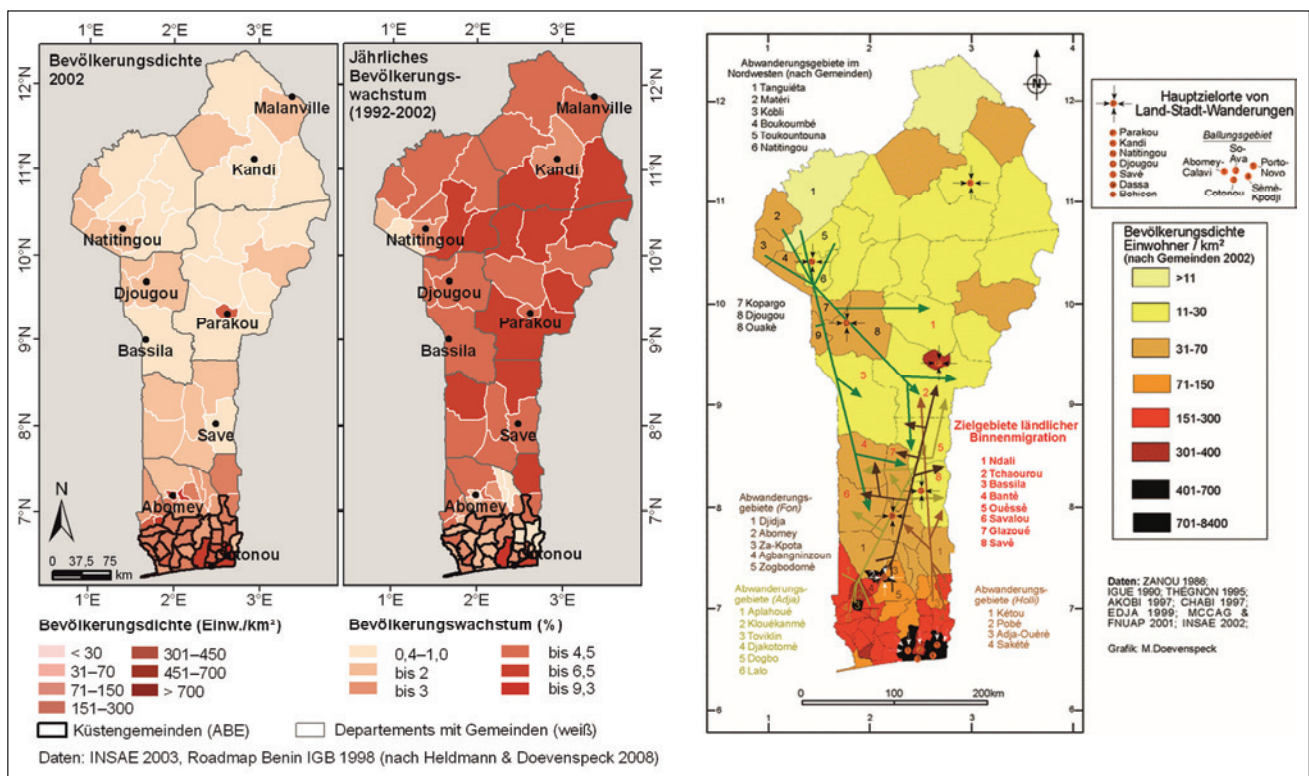
<b>H (Nord)</b>	Im NW Mangrovenrelikte (u.a. <i>Rhizophora racemosa</i> ); Feuchtsavanne mit <i>Typha australis</i> , großflächig auch <i>Paspalum vaginatum</i> ; Feldbau (Tomaten, Zuckerrohr, Amaranth), teils unter Ölpalmen		
<b>G</b>	Im N Wechsel trockener Sandböden und feuchter Senken: Wechsel aus Siedlung und Feldern; auf trockenem Sandboden Maniok, Bohnen, Mais – teils unter Ölpalmen, Öl- und Kokosplantagen; in Senken wie H; im Südbereich trockene Sandböden – hauptsächlich Besiedlung; am Südrand Hineinbauen in die verlandete Lagune		
<b>F</b>	Im W <i>Lac Nokoué</i> – nach E Abnahme Bodenfeuchte; weiterhin Feuchtgebiet. Wechsel aus reliktschen Feuchtwäldern, Flächen mit <i>Thalia spec.</i> , Ölpalmen, Feldbau (Zuckerrohr, Tomaten, Amaranth); im W trotz hohem Grundwasserspiegel und mehrerer Monate Überflutung Besiedlung durch Nähe zu Cotonou		
<b>E</b>	zwischen Straße und fossiler Lagune; geprägt durch Wechsel großer Gebäude mit Plantagen, Siedlung und Landwirtschaft		
<b>D</b>	Straße Cotonou nach Porto-Novo, teils gesäumt von Verkaufsständen		
<b>C</b>	S der Hauptstraße im Schema Directeur d'Amenagement du Littoral als „ <i>Fôret Classée de Littorale</i> “ bzw. <i>Fôret Classée de l'Atlantique</i> “ – jedoch Wechsel von: Platagen von Kokos, Eukalyptus, Akazien und Kanguruhbaum ( <i>Casuarina equisetifolia</i> ); Gewerbeflächen – insb. Autoparks; wenn nicht mehr genutzt: Wiederbewuchs durch <i>Annona senegalensis</i> , <i>Schrankia leptocarpa</i> und Kakteen; teils leerstehende Flächen für Gemüsebau: Salat, Amaranth, Bohnen; <i>Fourré arbustiv</i> u./od. Brache mit <i>Flacourtia flavescens</i> , <i>Chrysobalanus icaco</i> , <i>C. orbicularis</i> , <i>Annona senegalensis</i> , <i>Waltheria indica</i> , <i>Zanthoxylum xanthoxyloides</i> ; im W durchgängig besiedelt; in den Transekten: Siedlungen – insbesondere wassernah und von Erosion betroffen;		
<b>B</b>	Sand teilweise besiedelt durch <i>Capavalia rosea</i> , <i>Ipomoea pes caprae</i> , <i>Ipomoea stolonifera</i> , <i>Cynodon dactylon</i> ; Strand; teilweise genutzt für (ehemaligen) Sandabbau		
<b>A Süd)</b>	Atlantik		

### 2.6 Bevölkerung und Migration

Im Zensus von 2002 (RGPH3) wurden in Benin ca. 6.780.000 Einwohner gezählt (INSAE 2003), von denen 61,1 % auf dem Land und 38,9 % in Städten lebten. Beim Zensus im Jahre 1992 (RGPH2) waren es nach INSAE (2003) noch 36 % Stadtbevölkerung gewesen. Diese Urbanisierung ist vor allem eine Urbanisierung der Küstenzone, in der die Wirtschaftszentren des Landes liegen. Wie in allen westafrikanischen Staaten ist die Bevölkerung insbesondere in der Küstenzone gewachsen (Karte 8). So zeigt sich der Süden Benins – insbesondere um Cotonou herum – am dichtesten besiedelt (siehe Karte 9 links): In den 39 Gemeinden der südlichen 100 km des Landes leben 3.662.000 Menschen. Das ist rund die Hälfte der nationalen Bevölkerung auf 10,5 % der Landesfläche. Außerdem ist dieses Gebiet neben der Region um Parakou in Zentralbenin Ziel interner und externer Migration (Doevenspeck 2005, Teka 2010). Cotonou selbst weist mit 8100 Einwohnern/km<sup>2</sup> die höchste durchschnittliche Bevölkerungsdichte auf. Auch in der Peripherie um die wirtschaftliche Hauptstadt Cotonou bleiben die Bevölkerungsdichten mit ca. 950 Einwohner/km<sup>2</sup> sehr hoch. Nach INSAE (2003) lag das durchschnittliche jährliche Bevölkerungswachstum Benins seit 1992 bei rund 3,25 %. Die Stadtbevölkerung vergrößerte sich in diesem Zeitraum um den Faktor 1,52. Seit dem ersten Zensus im Jahre 1979 hat sich die Bevölkerung verdoppelt. Die meisten der Küstengemeinden (dunkel umrandet in Karte 9 Mitte) wachsen jedoch mit Raten unter dem mittleren Bevölkerungswachstum. Eine Ausnahme bilden Sèmè-Kpodji im Osten Cotonous mit 6 % und Abomey-Calavi im Westen Cotonous mit 9,3 % jährlichem Zuwachs. Die Städte haben einen höheren Anteil der Altersgruppe der Berufstätigen (15–59 Jahre) als der ländliche Raum.



Karte 8: Prognostizierte Stadtentwicklung in Westafrika 1960–2020 (nach ADAM 1986)



Karte 9: links: Bevölkerungsdichte 2002 und -wachstum 1992–2002 (Heldmann & Doevenspeck 2008); rechts: Migrationsbewegungen innerhalb Benins (Doevenspeck 2005)

Sie ziehen in die Städte auf der Suche nach Arbeit und Ausbildung (Teka 2010). Cotonou verzeichnet den größten Anteil der Erwerbsbevölkerung (62,7 % nach INSAE 2003) durch die sozioökonomische, kulturelle und administrative Zentralität der Stadt. Die Urbanisierung führt zu einer Ausweitung der Bebauungen und zu einem Zusammenwachsen der Städte – beispielsweise in der Küstenregion. N'Bessa (1997) hatte im Zusammenhang mit Porto-Novo und Cotonou vom einem „doublet urbain“ gesprochen. Nach CEDA (2007) bilden Cotonou mit ihren umliegenden Siedlungen, Ouidah und Pahou im Westen Cotonous, Abomey-Calavi im Norden sowie Sèmè-Kpodji im Osten Cotonous einen großen littoralen Ballungsraum (z.B. Domingo 2007). Zwischen Ouidah und Cotonou und damit im Arrondissement Avlékété sind nach CEDA (2007) *Fon, Xula, Xuéla*, zu denen die *Aïzo, Toffin, Wémè* und *Aja* gehören, zu finden (CEDA 2007). Im Zentrum – um Cotonou – ist die Bevölkerung sehr gemischt. Richtung Nigeria – und damit im Arrondissement Èkpè – trifft man *Toffin, Èkpè, Aïzo* und *Xula*. Die Fischer Benins sind *Pédah, Toffin* und *Plah* und Ghanaer *Kéta, Fanti, Awlan* und *Adan*. Die Differenzierung der Ethnien ist dahingehend von relevanter Bedeutung, als dass die unterschiedlichen Gruppen sich unter anderem in den Erwerbstätigkeiten unterscheiden und somit unterschiedlich von Veränderungen betroffen sind bzw. diese bewirken (z.B. Teka 2010).

Bevölkerungszuwachs hat zumeist raumverändernde Wirkungen. Im Rahmen dieser Arbeit werden Auswirkungen der Bevölkerungszunahme auf Siedlungsstrukturen in Kapitel 7 und auf landwirtschaftlich genutzte Flächen in Kapitel 8 räumlich differenziert untersucht.

## 2.7 Wirtschaft

Die Wirtschaft der Küstenzone ist stark durch Cotonou geprägt (N'Bessa 1997, Domingo 2007). Cotonou ist das ökonomische und administrative Zentrum Benins, das zahlreiche Verdienstmöglichkeiten bietet oder erhoffen lässt (Bourhis 2004, Teka 2010). Dort befinden sich der Hafen und Flughafen Benins sowie die meiste Industrie, die Verwaltung, Ministerien und alle Botschaften, außerdem große Handelszentren, mit dem Dantokpa-Markt gar der größte Markt Westafrikas. Östlich von Cotonou sind große Gewerbeparks angesiedelt, in denen aktuell v.a. mit Gebrauchtwagen für Benin und die Nachbarländer gehandelt wird. Kokos- und Ölpalmplantagen prägen ansonsten das Landschaftsbild. Zudem wurden östlich von Cotonou die in vorderen Kapiteln erwähnten Akazien-, Eukalyptus- und Känguruhbaum-Plantagen zur Feuerholzgewinnung angelegt (z.B. CEDA 2007, Vogt et al. 2007). In allen Küstenabschnitten wird zu unterschiedlichen Anteilen, teils unter Palmen, Landwirtschaft betrieben. In einigen Bereichen werden Wechselnutzungen beobachtet: So werden Plantagen im Ostteil des Küstensaumes zu Gewerbeflächen und nach Gewerbeaufgabe auch wieder, meist ungeplant und ungeordnet, für Landwirtschaft genutzt. Hauptbeschäftigung außerhalb der Metropole Cotonou ist die Landwirtschaft, Meeres- und Lagunenfischerei, Viehzucht, Sandabbau, Salzgewinnung, Verarbeitung landwirtschaftlicher Produkte und Kleinhandel, stellenweise Tourismus; zahlreiche Küstenbewohner in Reichweite von Cotonou pendeln in die Stadt zur Arbeit (CEDA 2007, Teka 2010).

Das Arrondissement Èkpè zeigt eine Vielfalt wirtschaftlicher Aktivitäten, u.a. durch die Nähe zu Cotonou und die damit verbundene starke Urbanisation. Die Bevölkerung widmet sich teilweise der Landwirtschaft, vereinzelt noch der Meeresfischerei, der Viehzucht, dem Viehverkauf, stärker dem Handel mit landwirtschaftlichen und anderen Gütern. Landwirtschaft wird auf den trockengelegenen Strandwällen, aber auch insbesondere in der Trockenzeit in den Senken und Feuchtgebieten betrieben. Angebaut werden Mais, Maniok, Zuckerrohr, Erdnuss, Bohnen und Gemüse wie in Avlékété – Tomaten, Peperoni und Amaranth. Die Verbindungsstraße von Cotonou nach Porto-Novo wird gesäumt von Kokos- und Feuerholzplantagen – Eukalyptus, Akazien und Känguruhbaum – sowie den oben erwähnten Gewerbegebieten und (Klein-)Industrie. Am Strand wird stellenweise Sand abgebaut. Viele Bewohner pendeln nach Cotonou, wo sie verschiedenen Berufen nachgehen.

Das Arrondissement Avlékété ist von Landwirtschaft, der Nutzung natürlicher Ressourcen – Salz, Mangroven und Fisch, deren Weiterverarbeitung und Verkauf geprägt. Genutzt werden Öl- und Kokospalmen, deren Plantagen weite Teile des Küstensaumes prägen. Auf den Feldern werden Mais, Maniok, Bohnen, Erdnuss – teils unter Palmen – sowie unterschiedliche Gemüse wie in Èkpè (s.o.) kultiviert. Vereinzelt existieren heilige und dadurch geschützte Wälder. Die in Kapitel 2.6 beschriebene Diversität der Ethnien und ihrer oftmals spezifischen Tätigkeiten sei am Beispiel Avlékétés aufgezeigt: Avlékété besteht aus zwei Teildörfern: *Avlékété Houta* und *Avlékété Île*. *Avlékété Houta* liegt zwischen der Lagune und dem Meer. Sie besteht in der Mehrheit aus *Ewe* und *Gun* aus Togo

sowie den *Kéta* aus Ghana, die Fischerei betreiben (Vogt et al. 2007). *Avlékété Île* umfasst die Siedlungen Avlékété und Agbanzinkpota mit den *Houeda* und den *Fôn*, die sich mehr der Lagunenfischerei, der Landwirtschaft, der Salzproduktion, der Bearbeitung landwirtschaftlicher Produkte, der Viehzucht sowie dem Kleinhandel widmen.

Viele der ökonomischen Aktivitäten sind nicht ortsfest, sondern wechseln sehr kurzfristig; auch erfolgt die Flächeninanspruchnahme häufig nicht festen Katastergrenzen, so dass die räumliche Dimension sehr schwer bestimmbar ist.

# 3 Bearbeitete Daten

Dieses Kapitel präsentiert die Daten, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit genutzt wurden: hauptsächlich Fernerkundungsdaten (Kapitel 3.1); Geodaten (Kapitel 3.2) eignen sich bedingt für die Bearbeitung der Fragestellungen. Weitere wesentliche Quellen für die Auswertungen sind Fotos und Aufzeichnungen im Gelände während dreier Aufenthalte in Benin: 2007, 2008 und 2010 (Kapitel 3.3). Außerdem werden Karten, Planungsvorhaben und oft nur in „grauer Literatur“ vorliegende Informationen im Kontext der untersuchten Prozesse einbezogen.

## 3.1 Fernerkundungsdaten

Während des ersten explorativen Geländeaufenthaltes 2007 wurde festgestellt, dass sich Landnutzungsstrukturen vor allem in suburbanen und ländlichen Gebieten in Benins Küstenzone vielfach äußerst kleingliedrig darstellen. Außerdem zeigte sich im Gelände, dass Nutzungsübergänge sich nicht immer scharf abgrenzen. Diese Beobachtungen bestätigten sich auch bei der visuellen Analyse der Bilddaten, die während des Aufenthaltes vor Ort und im Anschluss zusammengetragen wurden. So sind beispielsweise Felder oftmals sehr klein<sup>32</sup> und teilweise in Randbereiche von Siedlungen eingestreut; Siedlungen wiederum streuen ins Umland und sind nicht durchgängig als kompakte Gebilde erfassbar. In Abbildung 2 auf S. 4, bzw. Abbildung 5 auf S. 20 sind sie, wenn überhaupt, in QuickBird-Daten<sup>33</sup> und in Luftbildern auszumachen. In den ASTER-Daten sind insbesondere Einzelgebäude, aber auch Felder nicht einfach oder gar nicht abzugrenzen; es kommt zu Konfusionen zwischen Freiflächen (türkis umrahmt in Abbildung 2) und Gebäuden (gelb), wie zwischen Gebäuden und Feldern (grün). Für die Erfassung solch kleinräumiger Landnutzungseinheiten sind also Daten mit sehr hoher geometrischer Auflösung (1–4m GSD) bzw. höchster geometrischer Auflösung (<1m GSD nach Ehlers 2002) notwendig. Geometrisch hoch- bzw. höchst aufgelöste Daten wie die vorgestellten QuickBird-Daten oder Luftbilder liegen in der Küstenregion Benins weder monotemporal geschweige denn multitemporal flächendeckend, sondern nur für Teilbereiche vor. Somit wurden die in Kapitel 2.1 vorgestellten Arrondissements bzw. die darin angelegten Transekte als räumliche Stichproben ausgewählt, in denen die Prozessanalyse erarbeitet wird. Die Bilddatenrecherche ergab, dass für die Arrondissements Avlékété und Èkpè multitemporale Fernerkundungsdatensätze des gleichen Datentyps lediglich für ASTER zur Verfügung stehen. Aus den oben erläuterten Gründen waren jedoch hoch- und höchst aufgelöste Daten notwendig. In Tabelle 4 werden die zur Verfügung stehenden geometrisch höchst aufgelösten Fernerkundungsdaten vorgestellt. Sie zeigt, dass die Daten unterschiedliche spektrale wie auch geometrische Auflösungen aufweisen.

Tabelle 4: Zur Verfügung stehende Fernerkundungsdaten<sup>34</sup>

Bilddaten <sup>35</sup>	Avlékété	Èkpè		Maßstab/geometrische Auflösung
<b>PAN-Luftbild-Kontaktabzüge</b> (nachträgl. digitalisiert)	10.03.1995 15:45 Uhr	09.03.1995 15:30 Uhr	<i>Zeitschnitt I</i>	1:25.000; gescannt mit 1600 dpi, d.h. ~0,32 m GSD
<b>QuickBird: MS und PAN</b> (als Standard Ortho-ready Bundle)		23.12.2002 10:20 Uhr	<i>Zeitschnitt II</i>	MS: 2,4 m GSD PAN: 0,6 m GSD
	07.11.2006 10:47 Uhr		<i>Zeitschnitt III</i>	
<b>RGB-Luftbilder<sup>36</sup></b>	25.03.2007 ~14:25 Uhr	02.05.2006 <sup>37</sup> ~9:30 Uhr 25.03.2007 ~14:35 Uhr		1:20.000; erhalten als Scan mit 400 dpi, d.h. ~1,27 m GSD 1:20.000; erhalten als Scan mit 600 dpi, d.h. ~0,85 m GSD
<b>SPOT<sup>38</sup></b> (pangeschärft RGB)		05.03.2008		2,5 m GSD

<sup>32</sup> Bedeckungswechsel sind oftmals innerhalb < 10 m zu beobachten.

<sup>33</sup> QuickBird Products © DigitalGlobe™, distributed by e-GEOS

<sup>34</sup> Weiterhin existieren IKONOS-Daten vom 30.12.2002, die den Bereich Avlékété abdecken – diese standen im Rahmen des Promotionsprojektes jedoch nicht zur Verfügung.

<sup>35</sup> PAN = panchromatischer Datensatz; MS = multispektraler Datensatz; RGB = Bilddaten im sichtbaren Bereich (Rot-Grün-Blau)

<sup>36</sup> Stehen nicht als Originaldaten, sondern nur in digitalisierter Form als Scans zur Verfügung.

<sup>37</sup> Im Norden der Transekte

<sup>38</sup> Steht nicht als Originaldatensatz zur Verfügung.

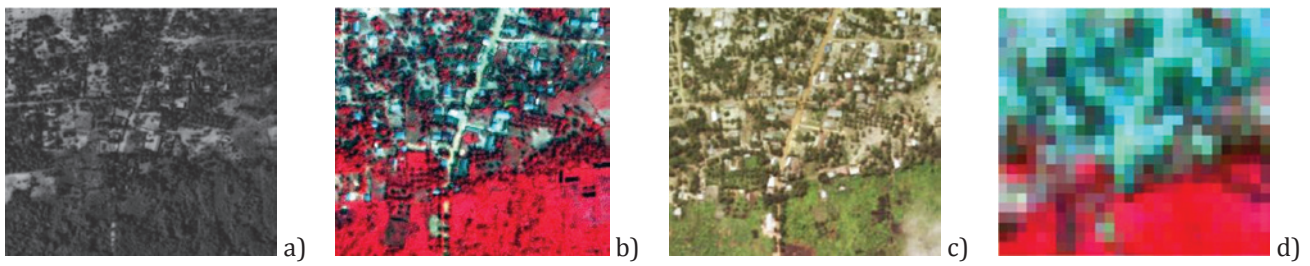
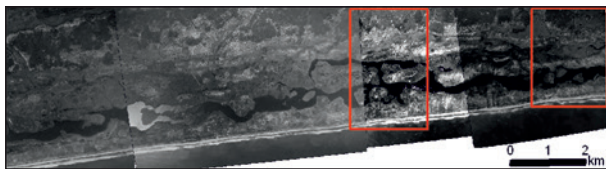


Abbildung 5: Multisensorale Fernerkundungsdaten unterschiedlicher spektraler und geometrischer Auflösung derselben Fläche (a: PAN-Luftbild; b: QuickBird-Datensatz (432); c: RGB-Luftbild; d: ASTER-Bilddatensatz. 400 m x 400 m)

In Abbildung 5 werden die multisensoralen Fernerkundungsdaten<sup>39</sup> für einen Ausschnitt in der Ortslage Djéffa vorgestellt. Die zeitliche Abdeckung der untersuchten Arrondissements bzw. der Untersuchungstransekten durch Fernerkundungsdaten ist in Abbildung 6 aufgezeigt. Für Èkpè zeigt sich für den Zeitraum 2006–2008 eine lückenhafte Abdeckung. Damit ergibt sich die Notwendigkeit der Kombination der Bilddaten in diesem Zeitraum. In Avlékété werden zwölf Jahre in drei Zeitpunkte durch höchstauflösende Bilddaten abgedeckt: 1995, 2006 und 2007. Die Aufnahmen 2006 und 2007 liegen in derselben Trockenzeit und werden daher je nach Anwendung auch als ein Zeitschnitt betrachtet. Außerdem decken die Aufnahmen von 2007 nur den Ostteil des Arrondissements ab (Abbildung 6).

**BILDDATEN AVLÉKÉTÉ**

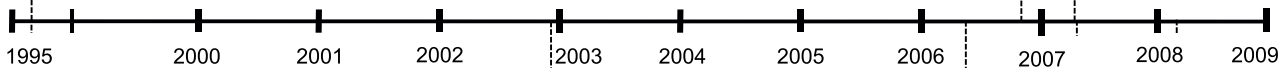
Luftbilder – 10.03.'95



QuickBird – 07.11.'06



RGB-Luftbild-Scans – 25.03.'07



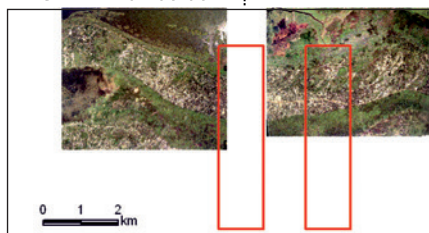
Luftbilder – 09.03.'95



QuickBird – 23.12.'02



RGB-LB – 02.05.06



SPOT 05.03.'08



**BILDDATEN ÈKPÈ**

Abbildung 6: Zeitliche Auflösung vorliegender Luft- und Satellitenbilddaten für Avlékété und Èkpè

<sup>39</sup> Die SPOT-Daten ähneln im vorgestellten Maßstab den RGB-Luftbildern und werden daher nicht getrennt gezeigt.

In Èkpè liegen höchstauflösende Aufnahmen für das gesamte Transekt für 1995 und 2002 vor. Ein dritter Zeitschnitt wird im Arrondissement zeitlich unterschiedlich abgedeckt, so dass unterschiedliche Daten kombiniert werden mussten: Der Nordteil des Arrondissements wurde 2006 befliegen, der Südteil 2007; im Nordstreifen existiert eine Lücke, die durch SPOT-Daten aus dem Jahre 2008 überbrückt wurde.

Eine Herausforderung des Flächenmonitorings in derartigen Untersuchungsgebieten besteht darin, Änderungen aus multitemporalen Daten unterschiedlicher räumlicher, spektraler und radiometrischer Auflösung zu detektieren und Prozessen zuzuordnen. Dies wird in seiner Gesamtheit durch visuelle Interpretation manuell erarbeitet, um bestmögliche Aussagen über die Verwertbarkeit von Fernerkundungsdaten zur Prozessanalyse treffen zu können. Des Weiteren stellt der manuell erstellte Datensatz die Referenz für Klassifizierungsverfahren dar, deren Einsatz exemplarisch untersucht wird.

### 3.1.1 Datenaufbereitung: Aufbau einer digitalen Datenbasis

Die Luft- und Satellitenbilddaten mussten für die weitere Bearbeitung aufbereitet werden. Der Ablauf wird in Abbildung 7 schematisch dargestellt und in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

#### 3.1.1.1 Festlegung des Datums auf WGS 84 UTM 31 N

Für die Bilddaten muss ein gemeinsames Datum festgelegt werden. Dieses ist für den Untersuchungsraum WGS 84 UTM 31 N. Auf diese Basis müssen alle Daten transferiert werden, um sie untereinander vergleichen zu können.

Die vorliegenden topographischen Karten können nicht als Georeferenz hinzugezogen werden, da das Originaldatum und die Projektion nicht präzise genug angegeben bzw. verfügbar sind. Nach mündlichen Aussagen des IGN Cotonou handelt es sich um das Datum *Point 58*. Bei einer Transformation nach WGS 84 UTM 31 N verbleibt jedoch eine Verschiebung von ca. 400 m. Bei der Begehung vor Ort stellte sich heraus, dass sich die QuickBird-Datensätze, die geocodiert im System WGS 84 UTM 31 N geliefert wurden, als Referenz eignen: Im Untersuchungsgebiet Avlékété zeigte sich eine systematische Verschiebung um 1 m nach Osten und 8 m nach Süden im Vergleich mit den aufgenommenen GPS-Positionen. Dafür stand eine GPS-mouse (GPSlim 236) in Kombination mit einem IBM ThinkPad sowie ein Garmin eTrex zur Verfügung. Da es sich beim Untersuchungsraum um ein ebenes Gebiet handelt (siehe Kapitel 2.2), konnte der Datensatz durch eine Translation korrigiert werden. Somit bleiben auch die spektralen Eigenschaften unverändert. Im Untersuchungsgebiet Èkpè wurde keine systematische Translation festgestellt. Dort lagen Abweichungen bei maximal 4 m in alle Himmelsrichtungen, so dass dieser Datensatz unverändert belassen wurde. Der SPOT-Datensatz steht wie die QuickBird-Daten im System WGS 84 UTM 31 N zur Verfügung. Er liegt zu den QuickBird-Daten lediglich verschoben vor; über den Vergleich von markanten Punkten im Gelände und Straßenkreuzungsmitten konnte die Verschiebung bestimmt und korrigiert werden.

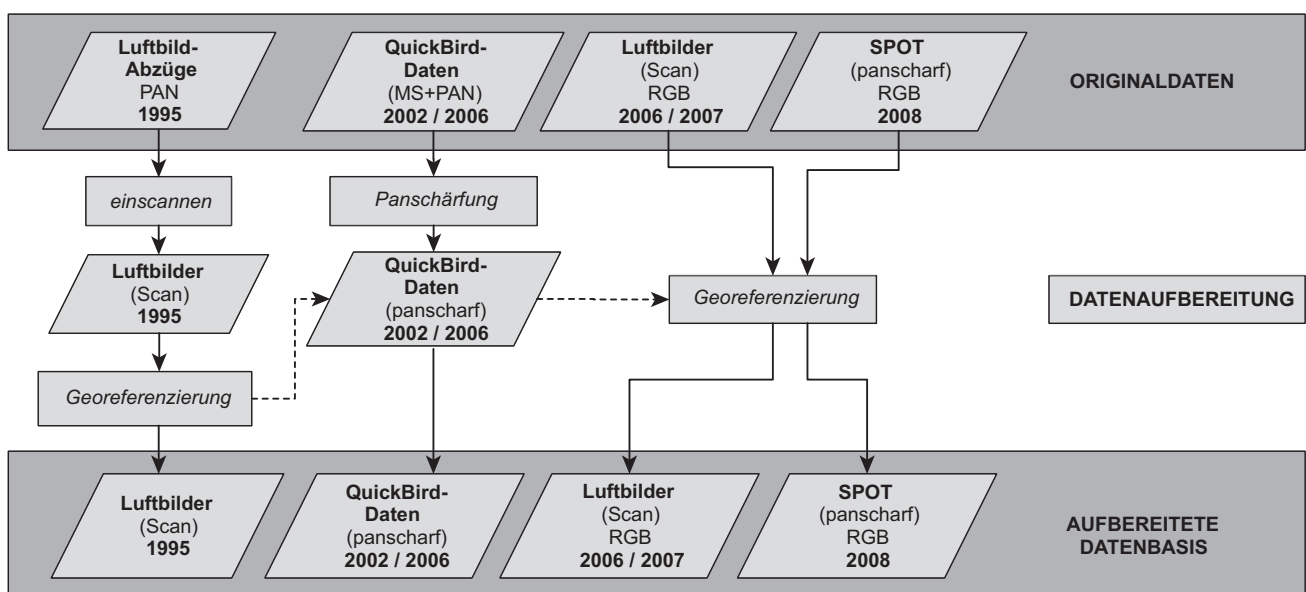


Abbildung 7: Aufbau der digitalen fernerkundlichen Datenbasis

### 3.1.1.2 Panschärfung der QuickBird-Satellitenbilddatensätze

Der vorliegende QuickBird-Datensatz besteht aus den Multispektral- sowie den PAN-Daten. Um die höhere spektrale Auflösung der Multispektraldaten mit der höheren geometrischen Auflösung der PAN-Daten zu kombinieren, wurden die Daten pangeschärft. Zahlreiche Ansätze existieren dazu (siehe Alparone et al. 2007, Weidner & Centeno 2009). Die meisten Verfahren führen jedoch zu einer Veränderung der spektralen Information. Anforderung für die digitale Weiterverarbeitung ist dahingegen eine Konsistenz der spektralen Kanäle. Diese Anforderung kann in hohem Maße der durch Weidner & Centeno (2009) vorgeschlagene sogenannte *PanshLapl*-Ansatz erfüllen, der auf linearer Filterung basiert. Aus diesem Grund wurde die Panschärfung der QuickBird-Daten nach diesem Ansatz realisiert. Dabei erhält man jeden pangeschärften Kanal  $C_{i,pansh}$  durch:

$$C_{i,pansh} = C_i \frac{C_{mWSI} - \Delta}{C_{mWSI}} \quad (1)$$

mit  $C_i$  = Multispektralkanal,  $C_{mWSI}$  = gewichtete Summe der Multispektralkanäle und  $\Delta$  = Laplacefilter, mit Gaußkernel gefaltet.

Die pangeschärften QuickBird-Daten dienen als Georeferenzierungsmaster.

### 3.1.1.3 Georeferenzierung der Luftbilder

Um die Luftbilder in die Prozessanalyse einzubeziehen, mussten sie zunächst georeferenziert werden. Parametrische Verfahren (Albertz 2009) konnten für die Georeferenzierung nicht realisiert werden, da für die Luftbilder von 1995 Angaben zur inneren wie auch äußeren Orientierung fehlen; bei den Luftbildern von 2006 und 2007 fehlen diejenigen zur äußeren Orientierung. Zudem steht kein Digitales Geländemodell (DGM) zur Verfügung. Da das Gelände jedoch relativ eben ist, konnten die Luftbilder mit Hilfe von Polynomansätzen innerhalb der Software ArcGIS georeferenziert werden. Als Kontrollpunkte (engl.: *ground control points* – GCPs) wurden zwölf bis 30 Punkte in möglichst guter räumlicher Verteilung gewählt, die sowohl in den QuickBird-Daten als auch in den Luftbildern sichtbar sind. Als Transformationsgleichungen wurden Polynome zweiten und dritten Grades gewählt; Entscheidungskriterien waren dabei der RMS und der visuelle Vergleich. Allgemein wurden nach Möglichkeit die Randbereiche der Luftbilder abgeschnitten, denn durch die Zentralperspektive der Kamera sind die Bereiche nach außen hin zunehmend vom Umklappeffekt betroffen. Dies war jedoch nicht durchgängig möglich, da insbesondere die Küstenlinie in Teilbereichen lediglich im Randbereich der Luftbilder vorlag. Insbesondere an der direkten Wasserfront standen durch die starke Erosion vergleichbare GCPs nur eingeschränkt zur Verfügung. Mit dem Umklappeffekt verbundene Probleme für die Auswertung werden in den entsprechenden Kapiteln behandelt.

### 3.1.1.4 Zusatz: Erstellung von Anaglyphenbildern für die Interpretation

Bei den Luftbildern von 1995 liegen für Teilbereiche Stereopaare vor. Für 2007 stehen beinahe flächendeckend sich überdeckende Luftbildstreifen zur Verfügung. Aus den Stereopaaren wurden mit Hilfe der Freeware *Stereo-Photo Maker*<sup>40</sup> Anaglyphenbilder gerechnet, die durch den 3D-Eindruck bei der Interpretation helfen.

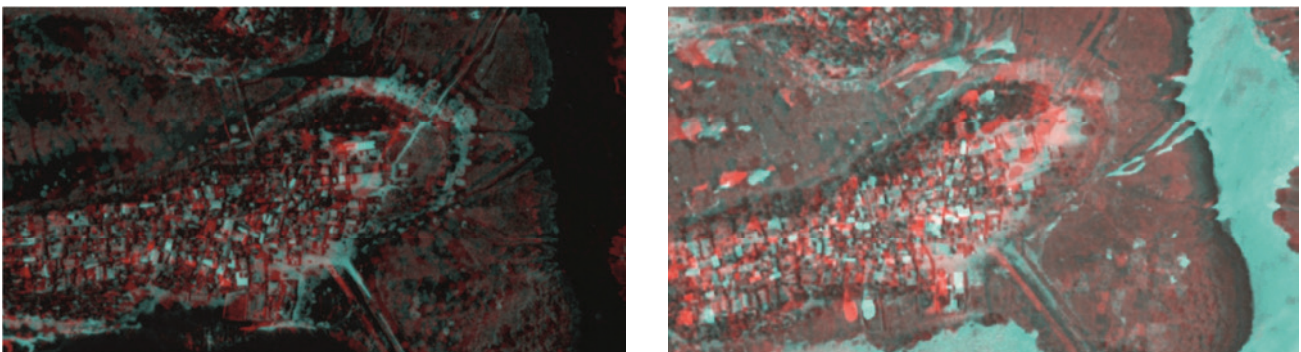


Abbildung 8: Anaglyphenbilder des Dorfes Avlékété – links: 1995; rechts: 2007; mit Hilfe einer rot-cyan-Brille dreidimensional erfassbar

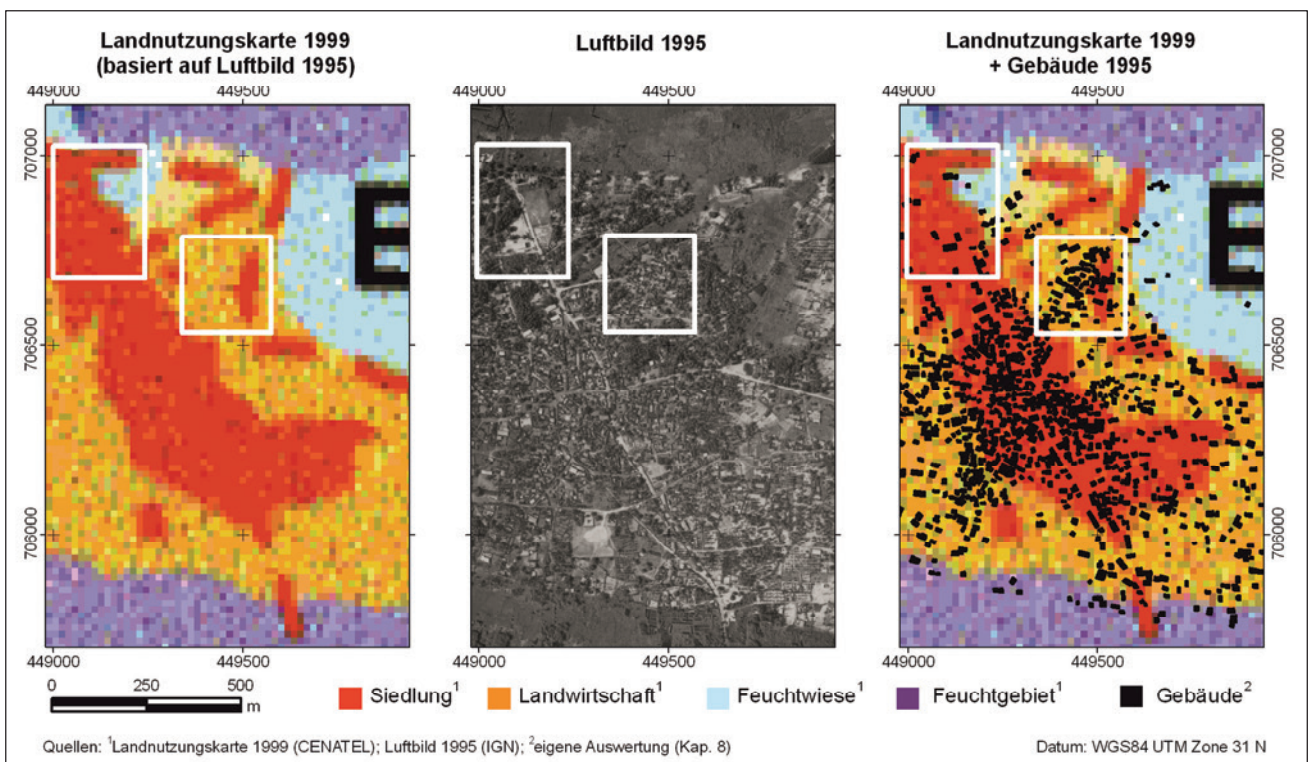
<sup>40</sup> Unter <http://stereo.jp.org/ger/stphmkr/index.html> (31. 12. 2011)



### 3.2 Geodaten

Für das Untersuchungsgebiet liegen topographische Karten im Maßstab 1:25.000<sup>41</sup> für das Arrondissement Avlékété und im Maßstab 1:50.000<sup>42</sup> für beide Arrondissements vor. Eine Landnutzungskarte im Maßstab 1:100.000<sup>43</sup> deckt die Küstenzone bis 6°30' n.Br. ab. Weitere thematische Geodaten sind digital in kleinerem Maßstab verfügbar: Sie liegen im Rahmen der Erarbeitung des *Schema directeur d'aménagement du littoral* (ABE 2001) und des *Programme d'aménagement des zones humides* (PAZH 2001) in Maßstäben 1:250.000 bis 1:600.000 vor. Für die Geodaten gilt die in Kapitel 3.1.1 beschriebene Problematik des geodätischen Datums und der dadurch existierenden Abweichungen.

Es stellte sich die Frage, ob vorhandene Landnutzungsdaten in die Prozessanalyse integriert werden könnten. Die kleinen Maßstäbe eignen sich jedoch nicht zur Erarbeitung mikroskaliger Prozesse. Zudem zeigt sich beispielsweise im Vergleich der Landnutzungskarte von 1999 mit dem Luftbild von 1995 in Karte 10 eine deutliche Abweichung – hier am Beispiel des Zentrums von Èkpè, obgleich die Landnutzungskarte zeitnah und teilweise sogar auf Basis der gleichen Luftbilddaten erarbeitet wurde (SPOT XS 64-337 vom 21.3.1993 und Luftbildbefliegung *Afrique Aéro Photo 1995–1996*). In der Landnutzungskarte zieht sich der Siedlungsbereich länglich von SE nach NW. Die Auswertung des Luftbildes hingegen zeigt, dass die Siedlung wesentlich mehr in die Breite geht. In der Landnutzungskarte sind Bereiche als Siedlung ausgewiesen, die beispielsweise Freiflächen sind (linkes Beispielgebiet in Karte 10). Zum anderen gelten Bereiche, die deutliche Bebauung aufweisen, als landwirtschaftliche Fläche (rechtes Beispielgebiet in Karte 10). Ein möglicher Grund für die Abweichung wäre die Zugrundelegung unterschiedlicher Definitionen der Klasse *Siedlung*. Somit scheiden die vorliegenden Landnutzungsdaten als Vergleichsdaten aus.



Karte 10: Diskrepanzen zwischen Landnutzungskarte und Bilddaten (Beispielgebiete weiß umrahmt)

<sup>41</sup> Ausgabe: 1991; Basis: Luftbilder 1981 (Mission 81 BEN 10/200); Quelle: IGN Paris/IGN Benin; Ellipsoid: Clarke 1880, UTM 31, point origine: Hôtel Babo, Cotonou (keine weiteren Angaben). Die Blätter Quidah 1c 1-2 und Abomey-Calavi 1d 3-1 decken das Arrondissement Avlékété ab; der Bereich von Cotonou bis zur Grenze mit Nigeria war während der Erstellung dieser Arbeit noch in Bearbeitung.

<sup>42</sup> Ausgabe: 1968; Basis: Luftbilder 1956/57; Quelle: IGN Paris; Ellipsoid: Clarke 1880m UTM 31 (keine weiteren Angaben). Komplette Küstenzone abgedeckt; Porto-Novo 1c, und Porto-Novo 2c decken die Untersuchungsräume ab.

<sup>43</sup> Ausgabe: 1999; Basis Westteil (Blatt 6): Topographische Karte 1:50.000; Luftbilder Mission IAPau 1:20.000 1994; SPOT XS 63-337 13.1.1995; Geländebegehung Nov. 1999. Basis Ostteil (Blatt 7): Topographische Karte Porto-Novo 1d 1:50.000; Luftbilder Mission Afrique Aéro Photo 1:20.000 1995–1996; SPOT XS 64-337 21.3.1993; Geländebegehung Nov. 1999; Quelle: CENATEL; komplette Küstenzone bis ca. 25 km ins Landesinner abgedeckt.

### 3.3 Geländedaten

Dynamische und im Nachhinein kaum nachvollziehbare Landnutzungsänderungen erschweren die Korrelation von Bild- und Boden-Daten und die Ableitung sowie Anwendung allgemeingültiger Regeln. Zudem sind zusätzliche Daten nicht transparent verfügbar. Die potentiell vorhandene, erforderliche und geeignete Datengrundlage muss daher in einem längeren Suchprozess ermittelt werden, wie nachfolgend verdeutlicht wird.

An dieser Stelle stellt sich die Frage nach *Wahrheit* bezüglich der Landbedeckung bzw. -nutzung. Zum einen besteht die aktuelle Situation vor Ort, die *Bodenwahrheit* (engl.: *ground truth*), zum anderen die Situation im Bild zu dessen Aufnahmezeitpunkt, die *Bildwahrheit*. Insbesondere Aufnahmezeitpunkte, die länger zurückliegen, sind eine Herausforderung. In ihnen kann zumeist nur die Bildwahrheit bestimmt werden, wenn keine Geländedaten zum Aufnahmezeitpunkt vorliegen. Bei unsicher im Bild zu interpretierenden Phänomenen kann auch die Bildwahrheit nicht immer sicher festgelegt werden. Zur Bestimmung der Bildwahrheit hilft jedoch auch bei Zeitversatz oftmals ein Geländevergleich, da entweder das zu deutende Phänomen noch im Gelände gefunden werden kann, bei Veränderungen gleiche bzw. ähnliche Erscheinungen eine indirekte Deutung möglich machen oder aber Ortskundige hinzugezogen werden können. Diskrepanzen zwischen Bodenwahrheit und Bildwahrheit zeigen sich auch bei zeitnahen Geländebegehungen dann, wenn Erscheinungen jahreszeitlich oder jährlich wechseln, wie dies beispielsweise bezüglich der Vegetation und insbesondere in der Landwirtschaft der Fall ist. So wurden unter anderem in den Untersuchungsgebieten die Agrarkalender erfragt.

Während eines ersten Aufenthaltes vor Ort von Februar bis April 2007 wurden Literatur- und Datenrecherchen durchgeführt. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, zeigte sich im Gelände, dass Bilddaten in hoher bis höchster räumlicher Auflösung akquiriert werden müssen. Daher wurden zufällig verteilt im Gelände Notizen züglich der aktuellen Bodenwahrheit sowie Fotos zum späteren Vergleich mit Fernerkundungsdaten aufgenommen. Am Ende des Aufenthaltes gelang die Akquise der Luftbilder aus dem Jahre 1995. In ersten Geländevergleich zeigte sich, wie stark sich die Küstenregion verändert – allein das Auffinden eindeutiger Punkte im Gelände gestaltete sich schwierig. Im Nachgang des ersten Geländeaufenthaltes wurden Lizenzen für die aktuellsten verfügbaren QuickBird-Daten erworben: für das Arrondissement Avlékété vom 07. 11. 2006 sowie für das Arrondissement Èkpè vom 23. 12. 2002. Im Februar 2008 wurden systematisch Geländedaten erfasst. Dabei wurde die QuickBird-Satellitenbilddaten von Èkpè und Avlékété als Basis genutzt. Die Zeitdifferenz von sechs Jahren im Bereich von Èkpè war aufgrund der hohen Dynamik in diesem Bereich teilweise sehr herausfordernd. In Avlékété gestaltete sich der Geländevergleich durch die kürzere zeitliche Differenz zwischen Aufnahmedatum und Geländeaufenthalt einfacher. Hilfreich war in beiden Fällen, dass die Aufnahmezeitpunkte wie auch die Geländebegehung in der großen Trockenzeit lagen. Diskrepanzen zwischen Bildwahrheit und Bodenwahrheit wurden vermerkt – dies war durch die Möglichkeiten eines Tablet-PC direkt im Bild möglich. Vor Ort wurden außerdem Fotos aufgenommen und an relevanten Stellen Panoramen, die per GPS verortet wurden. Dabei wurde die Himmelsrichtung des Startfotos und die Drehrichtung notiert, um das Bild später ausrichten zu können. Am Ende des Aufenthaltes 2008 wurden die Luftbildscans von 2007 zur Verfügung gestellt, im Nachhinein des Weiteren die Luftbildscans von 2006 sowie die vorverarbeiteten SPOT-Daten von 2008 für Èkpè. Unsicher zu interpretierende Phänomene in diesen Bilddaten konnten daher nicht mehr direkt vor Ort abgeklärt werden. Zur Interpretation eigneten sich jedoch die Fotos und Notizen der Ortsbegehungen 2007 und 2008 relativ gut.



Abbildung 9: Erste Geländeerkundungen 2007 (links) und Geländeabgleich mit Satellitendaten 2008 (rechts)  
(Fotos: S. Schneider, H. P. Sagbo)

## 4 Konkretisierung der Untersuchungen

Insbesondere die Datenlage verlangt nach einer Konkretisierung der Untersuchungen. Dazu werden zunächst maßgebliche raumverändernde Prozesse zur weiteren Analyse ausgewählt (Kapitel 4.1). Daraus ergeben sich konkrete Fragestellungen (Kapitel 4.2) und spezifische Anforderungen an die Methodik (Kapitel 4.3).

### 4.1 Auswahl maßgeblicher raumverändernder Prozesse zur weiteren Analyse

Im Küstenraum Benins lassen sich zahlreiche raumverändernde Prozesse identifizieren. Im Gelände sichtbare Indikatoren deuten auf ihren *aktuellen Vollzug* hin. So zeigt beispielsweise rege Bautätigkeit in weiten Teilen der Zone Veränderungen in der Siedlungsstruktur an (Abbildung 10); entlang der Küste westlich von Cotonou lässt sich Küstenerosion durch abbrechende Gebäude, umkippende Bäume und Palmen identifizieren. In Nutzung befindliche oder stillgelegte Sandgruben weisen auf Sandabbau hin, beispielsweise am Strand westlich von Cotonou und inlands östlich von Ouidah (Abbildung 11). In den Lagunen zeigen Mangrovenstümpfe bzw. transportierte oder lagernde Mangrovengehölze deren Abholzung an (Abbildung 12).



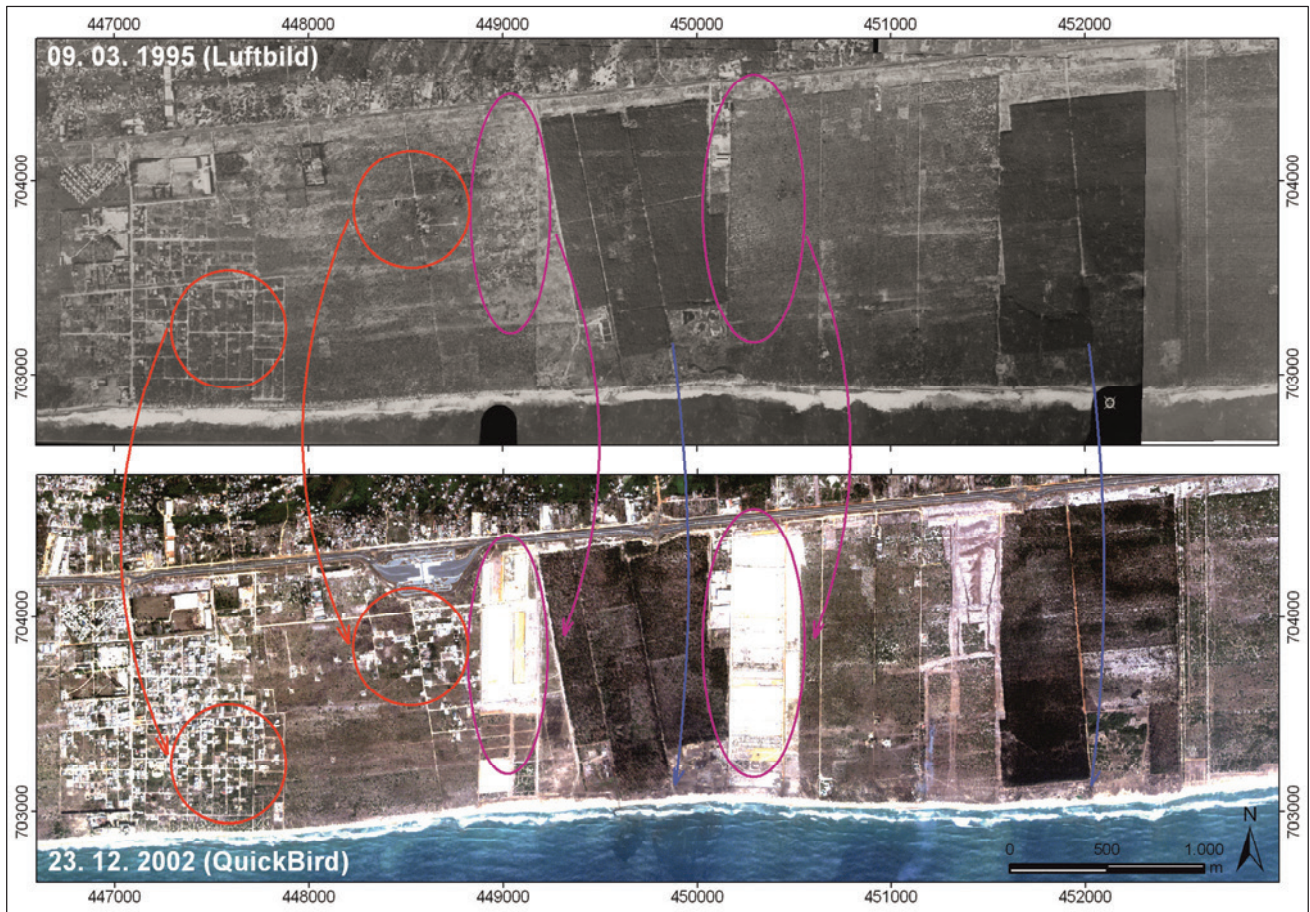
Abbildung 10: Bautätigkeiten in der Küstenzone (links: trockenes Bauland; rechts: im Feuchtgebiet; Fotos: Sturm-Hentschel)



Abbildung 11: Sandabbau (links: am Strand; rechts: im Inland; Fotos: Sturm-Hentschel)



Abbildung 12: Mangrovennutzung (Fotos: Sturm-Hentschel)



Karte 11: Beispiele ablaufender raumverändernder Prozesse in der Küstenzone Benins im Osten Cotonous  
(pink: Entstehung von Gewerbeflächen; rot: Siedlungserweiterungen; blau: Küstenerosion)

Schon abgeschlossene Prozesse lassen sich zumeist nicht direkt im Gelände belegen, insbesondere Vorzustände und zeitlicher Ablauf lassen sich nicht zuverlässig erschließen. Bei der Erfassung der Historie von raumverändernden Prozessen helfen Fernerkundungsdaten. Manche Veränderungen, die auf raumverändernde Prozesse schließen lassen, sind überhaupt erst *im Vergleich von Luft- und Satellitenbildern* erkennbar. Beispiele dafür sind Entstehungen von Gewerbeflächen, Siedlungserweiterungen durch Gebäudezunahme, Küstenerosion, die sich nicht direkt durch Indikatoren wie abbrechende Gebäude oder fallende Bäume zeigt – wie sie in Karte 11 gezeigt werden, aber auch räumliche Veränderungen landwirtschaftlicher Nutzflächen, von Plantagen, Wechselnutzungen, Ausbau des Wegenetzes oder verlorene oder regenerierte Mangrovenbestände.

Mehrere Autoren beschreiben Veränderungen und raumverändernde Prozesse in der Küstenregion (siehe Kapitel 1.4). Auf einige raumverändernde Prozesse deuten *sozioökonomische Erhebungen* hin: so hat beispielsweise Tekka (2010) Prozesse insbesondere bezüglich ihrer Akteure, Ursachen und möglicher Folgen untersucht: Migration in den und im Küstenraum, die Degradierung von Naturressourcen, Veränderungen und Vulnerabilität bäuerlicher Betriebe und in der Fischerei. Die räumliche Dimension mit Angaben zu Stärke, genauer Verortung und Richtung der aufgeführten Prozesse fehlt jedoch in den Ausführungen.

Aus den Begehungen vor Ort, der Literaturanalyse und der visuellen Interpretation ergibt sich eine qualitative Kenntnis ablaufender Prozesse. Es stellt sich also die Frage, in welchem Maße raumverändernde Prozesse im Küstenraum Benins ablaufen.

Quantität, geographische Verortung und Richtung raumverändernder Prozesse lassen sich durch den Vergleich fernerkundlicher Daten feststellen. Der Vergleich mit topographischen oder thematischen Karten versagt leider, da kein aktuelles Material für den Untersuchungszeitraum existiert oder die Situation nicht zuverlässig wiedergibt (vgl. hierzu Kapitel 3).

Folgende raumverändernden Prozesse wurden durch ihre weitreichenden räumlichen und damit u.a. sozioökonomischen und ökologischen Konsequenzen als besonders bedeutsam identifiziert. Aus diesem Grund werden im Rahmen dieser Dissertation untersucht. Dabei handelt es sich um:

- Siedlungsprozesse
- Veränderungsprozesse der Verteilung landwirtschaftlicher Nutzflächen
- Veränderungsprozesse der Küstenmorphologie

Siedlungsprozesse werden untersucht, da die Küstenzone stark besiedelt ist und Bevölkerungsveränderungen, u.a. durch Migration dokumentiert sind (siehe Kapitel 2.6). Siedlungsprozesse können sich sehr unterschiedlich in der Fläche ausdrücken, beispielsweise durch Erweiterung, Verdichtung oder aber auch Verlagerung.

Siedlungsprozesse wirken direkt oder indirekt auf die Verteilung anderer Landbedeckungs- und nutzungsklassen – so auch auf landwirtschaftliche Flächen. Zusätzlich beeinflussen weitere Prozesse die Landwirtschaft und damit u.U. die Verteilung der genutzten Flächen. Bei Vogt et al. (2010) wurden beispielsweise Veränderungen in der Küstenfischerei untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass viele Fischer ihren Beruf aufgeben und beispielsweise in die Küstenlandwirtschaft wechseln. Da die Mehrheit der Küstenbewohner außerhalb der Städte von der Landwirtschaft lebt (INSAE 2003), ist es von Interesse, flächenhafte Veränderungen in der Landwirtschaft zu untersuchen. Daher wird analysiert, inwiefern sich die Gesamtfläche verändert, ob und wo landwirtschaftlich genutzte Flächen ab- oder zunehmen.

Seit den 60er Jahren wird Küstenerosion in Benin dokumentiert (siehe Tabelle 1 in Kapitel 2.2). Aufgrund des oben beschriebenen Landbedarfs ist dies von erheblicher Bedeutung. Da jedoch quantitative Daten nicht verfügbar sind, um räumlich differenziert Abschätzungen von Flächenverlust und jährlichen Erosionsraten treffen zu können, sollen diese auf der Basis von Fernerkundungsdaten erhoben werden.

## 4.2 Konkretisierte Fragestellungen

Aus den Randbedingungen, die sich aus den räumlichen Gegebenheiten im Küstenraum Benins und den besonderen Problemen der Anwendung von Fernerkundungsdaten ergeben, können die allgemeinen Fragestellungen aus Kapitel 1 folgendermaßen konkretisiert werden:

- Wie lassen sich die für die zu untersuchenden Prozesse relevanten Klassen aus den vorliegenden heterogenen Daten erfassen?
- Inwiefern lassen sich die relevanten Klassen algorithmengestützt klassifizieren? Können weiterführende Untersuchungen auf Resultate der Klassifizierungen aufbauen?
- Lassen sich die Prozesse durch die extrahierten Klassen (*Primärergebnisse*) direkt aufzeigen oder müssen weitere Auswertungen bzw. Bewertungen (*Sekundärergebnisse*) aus diesen Klassen erfolgen? Welche solcher Sekundärauswertungen sind relevant?

## 4.3 Anforderungen an die Methodik

Es ist eine Methodik zu entwickeln, mit deren Hilfe raumverändernde Prozesse in der Küstenregion aus einem heterogenen Datensatz bestimmt und untersucht werden können. Das bedeutet, dass vergleichbare Zustandsgrößen für jeden betrachteten Zeitpunkt abgeleitet werden müssen.

Dazu sollen

- 1. relevante Objekt- bzw. Landnutzungsklassen aus den Bilddaten erfasst,**
- 2. die Klassen zum Zeitpunkt  $t_x$  räumlich analysiert,** d.h. räumlich differenzierte Maßzahlen erarbeitet,
- 3. Veränderungsprozesse** mit Veränderungsraten und -richtung herausgearbeitet und **analysiert** werden.

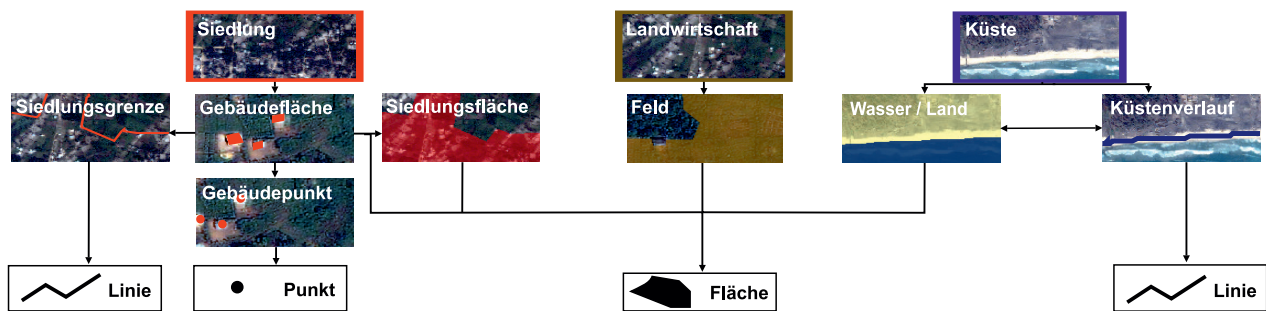


Abbildung 13: Landnutzungs- bzw. Objektklassen und die sie repräsentierenden Vektormodelle

Objekte im zweidimensionalen georeferenzierten Raum können durch unterschiedliche Datenmodelle als Rasterdaten oder Vektordaten beschrieben werden. Rasterdaten sind *per se* Flächendaten, da jedes Pixel eine definierte Fläche abbildet; Vektordaten können Punkte, Linien oder Flächen (Polygone) repräsentieren. Im Untersuchungsfall sind die Objektklassen, die die zu untersuchenden Prozesse beschreiben, nicht nur Flächen, sondern unterschiedlichen Datenmodellen zugehörig (Abbildung 13). Sie sind entweder als solche zu erfassen oder müssen abgeleitet werden.

Im Rahmen der Untersuchungen von Siedlungsprozessen werden Gebäude als *Gebäudeflächen* erfasst, aus denen über die *Gebäudepunkte* die *Siedlungsfläche* und die entsprechende *Siedlungsgrenze (Linie)* abgeleitet werden.

Zur Untersuchung der Veränderungsprozesse landwirtschaftlicher Nutzflächen werden Felder als *Flächen* erfasst.

Der Küstenverlauf kann als Aneinandergrenzung der *Flächen* von Wasser und Land oder als die sie trennende *Linie* beschrieben werden.

# 5 Grundlagen und Stand der Forschung

Das folgende Kapitel stellt – bezogen auf die Fragestellungen – den Stand der Forschung bezüglich der Klassifizierung von Bilddaten (Kapitel 5.1), der darauf aufbauenden monotemporalen räumlichen Analyse (Kapitel 5.2) sowie der anschließenden Beschreibung und Quantifizierung von Veränderungen bzw. Veränderungsprozessen (Kapitel 5.3) vor.

## 5.1 Interpretation und Klassifizierung in der Fernerkundung

Die Klassifizierung allgemein, d.h. Kategorisierung, Taxonomie, Systematisierung, Zu- bzw. Einordnung beispielsweise von Begriffen oder Objekten ist ein alltäglicher Vorgang und hat eine lange Tradition in der Wissenschaft. Behnisch (2008) fasst zahlreiche Fachgebiete zusammen, in denen Klassifizierungen gebräuchlich sind. Die *physikalische Welt*, teilweise auch als „reale Welt“ bezeichnet, soll beschrieben und geordnet werden. Um Objekte zu erkennen bzw. zu erfassen, d.h. sie Klassen zuzuordnen (Abbildung 14 links) und um Veränderungen nachzuvollziehen, muss Wissen über die Objekte vorhanden sein; bei der Extraktion aus Bilddaten (Abbildung 14 rechts) wird zudem Wissen über die zur Datenerfassung eingesetzten Sensoren sowie die beobachteten Daten benötigt (Hommel 2010). Zunächst nimmt der Mensch physikalische Objekte, beispielsweise Gebäude, in seiner Umwelt wahr – durch die Einschränkung der Sinne jedoch nicht in ihrer Ganzheit (Abbildung 14 links). Er erfasst durch Projektion, z.B. ins Auge, nur *Abbildungen* der physikalischen Objekte (Bähr 2005b). Elektromagnetische Strahlung außerhalb des sichtbaren Spektrums beispielsweise kann vom Menschen nicht visuell erfasst werden. Im *Objektmodell*, einem Denkmodell über das spezifische physikalische Objekt, werden Eigenschaften dieses einen Objektes zusammengefasst. Dazu gehören geometrische, physikalische, topologische und semantische Eigenschaften. Beim Übergang von solch einem spezifischen Modell hin zu generischen Modellen kann dieses Objektmodell schlussendlich einer *Klasse*, einer Kategorie zugeordnet werden. Diese Klasse besitzt wiederum Eigenschaften: „Alle wesentlichen Merkmale einer Objektklasse, ohne jedoch bestimmte Ausprägungen eines einzigen Objektes festzulegen (Sester 1995, 95)“. Auch hier sind unterschiedliche Abstraktionsstufen möglich: z.B. Gebäude als Objektklasse, Siedlung als Landnutzungsklasse oder Versiegelung als Landbedeckungsklasse.

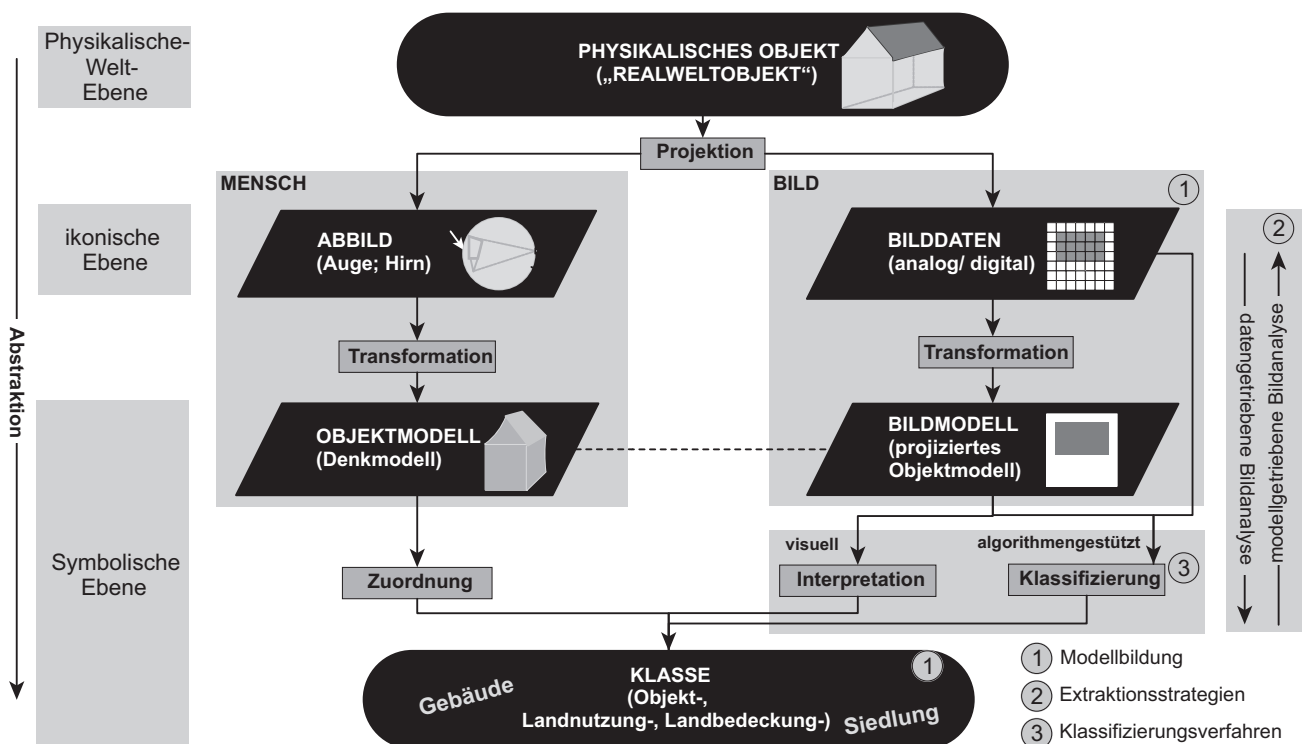


Abbildung 14: Repräsentation der physikalischen Welt (verändert nach Hinz 2004, Bähr 2005b, Hommel 2010)

All diese Schritte sind zunächst unabhängig von der Bildanalyse gültig, werden aber bei der Betrachtung derselben weiter unten wieder aufgegriffen werden. Im Rahmen der Bildanalyse<sup>44</sup>, d.h. auch in der Fernerkundung, sollen schließlich Bildinhalte der physikalischen Welt zugeordnet werden. „Bildanalyse geschieht modellbasiert und quantitativ (Bähr 2005a, S. 81).“ Da eine Modellbildung (① in Abbildung 14) immer eine gewisse Vereinfachung (Generalisierung) darstellt, muss diese stets hinsichtlich einer bestimmten Fragestellung bzw. Anwendung erfolgen (Rapp, 1995). Charakteristische Eigenschaften, durch die das Modell eines Objektes vollständig (nach Bähr 2005b) beschrieben wird, müssen so ausgewählt werden, dass sie in den Daten tatsächlich feststellbar sind (Hommel 2010). Vollständigkeit sei hier nicht als Absolutum zu verstehen, sondern „in Bezug auf den Suchbereich und die jeweils zu beschreibenden Objekte (Bähr 2005b, S. 216).“ Umgekehrt müssen wiederum Daten so ausgewählt sein, dass die zu untersuchenden Objekte feststellbar sind (siehe Kapitel 3). In der Fernerkundung werden nun physikalische Objekte nicht direkt vom Menschen betrachtet, sondern ihre Abbildung in *Bilddaten*. Diese Abbildung bzw. Projektion auf eine zweidimensionale Bildfläche (in der optischen Fernerkundung) ist abhängig vom verwendeten Sensor. Die von einem Sensor aufgenommenen Bilddatensätze bestehen zunächst aus Bildelementen. In analogen Bilddatensätzen beschreibt ein Korn das kleinste Bildelement, in digitalen Bilddatensätzen das Pixel. Werden mehrere Bildelemente unter bestimmten Kriterien zusammengefasst, erhält man Bildsegmente – ob visuell (Bähr 2005a) oder mittels Segmentierungsalgorithmen (Review z.B. in Duy et al. 2010). Das *Bildmodell* fasst Eigenschaften des Objektes in den Bilddaten zusammen, entspricht der Projektion des *Objektmodells*. Diese Eigenschaften beschreiben die das Bildmodell bildenden Bildelemente – bei entsprechend hoher geometrischer Auflösung. Das projizierte Objektmodell ist die 2d-Repräsentation der physikalischen Welt im Bild bzw. ist assoziiert mit dessen Objektmodell, das der Mensch wahrnimmt und einer *Objektklasse* zuordnet. Hier schließt sich der Kreis zur bildunabhängigen (menschlichen) Zuordnung, die oben beschrieben wurde. Die Zuordnung eines Bildmodells zu einer Klasse kann nun durch *visuelle Interpretation* oder aber durch *algorithmensbasierte Klassifizierung*, d.h. die „Zuordnung unbekannter Muster zu bekannten Begriffen (Bähr 2005a, S. 84)“ erfolgen. Bei abnehmender geometrischer Auflösung ist eine Abtrennung von abgegrenzten Objektmodellen schwieriger bis unmöglich, so dass man sich vom Objekt löst und Bildelemente bzw. -segmente direkt Landbedeckungs- bzw. -nutzungsklassen zugeordnet werden. Abhängig von der gewählten Extraktionsstrategie (② in Abbildung 14, siehe dazu z.B. Hinz 2004, Hommel 2010) werden Klassifizierungsverfahren ③ gewählt, um Bildelemente bzw. -segmente „den im Modell vorgegebenen Begriffen (Klassen) mittels ihrer charakteristischen Eigenschaften (Hommel 2010, S. 17)“ zuzuordnen.

Praktische Anwendungen der Fernerkundung ergeben sich seit Anfang des 20. Jahrhunderts mit dem Aufkommen von Flugzeugen und insbesondere seit der Einführung der klassischen Reihenaufnahme durch Oskar Messter (Albertz 2009). Die topographische Kartierung nutzt seitdem standardmäßig Luftbilder. Seit dem zweiten Weltkrieg sind auch Farb-, Infrarot- und Farbinfrarotfilme im Einsatz, wodurch die Einbindung spektraler Information in die Bildinterpretation möglich wird. 1972 werden die ersten LANDSAT-Satelliten ins All gebracht. Zwar verringert sich die geometrische Auflösung im Vergleich zu Luftbildern, es erweitern sich jedoch die Einsatzmöglichkeiten durch die Abdeckung größerer Flächen in kürzeren Überflugintervallen und multispektrale Kanäle. Das digitale Vorliegen der Bildinformation macht nun eine digitale Bildverarbeitung bzw. -analyse, d.h. die Klassifizierung, möglich (siehe z.B. in Albertz 2009). Seither sind Tendenzen in Richtung höherer *spektraler Auflösung* (Hyperspektraldaten) und höherer *geometrischer Auflösung* von 1 m oder weniger bei Satellitensystemen seit der Jahrtausendwende zu verzeichnen. IKONOS machte 1999 den Anfang (MS 4 m, PAN 1 m), QuickBird wurde 2001 gestartet (MS 2,44 m, PAN 0,61 m); nach einer Pause folgte 2007 WorldView-1 (PAN 0,5 m), 2008 GeoEye-1 (MS 1,65 m, PAN 0,42 m), 2009 WorldView-2 (MS 2 m, PAN 0,5 m), am 17. August 2011 startete die erste afrikanische Mission, die geometrisch höchstauflösende Daten liefert: NigeriaSat-2 (MS 5 m, PAN 2,5 m). Auch digitale Luftbildkameras stehen heutzutage zur Verfügung, z.B. die HRSC-AX mit vier Spektral- und fünf PAN-Kanälen (DLR 2011), wodurch die Aufnahmeeinschränkung auf drei Kanäle entfällt und die Möglichkeiten zur Auswertung verbessert werden. Die Verfügbarkeit solcher Daten ist jedoch weltweit unterschiedlich und besonders in Entwicklungsländern sehr limitiert.

Hinsichtlich der Bildauswertung existieren *analoge* und *digitale* Verfahren. Die *visuelle Bildinterpretation* erfolgt analog durch einen Bearbeiter, der Bereiche – Bildsegmente nach Bähr (2005a) – im Bilddatensatz aufgrund ihrer

<sup>44</sup> Nach Bähr (2005a) umfasst die Bildanalyse digitale und analoge Verfahren.



Merkmale interpretativ erkennt, einer Klasse zuordnet und manuell markiert – zumeist durch Abgrenzung. Seit den Anfängen der Fernerkundung und auch noch heute wird dieses Verfahren praktiziert (z.B. Albertz 2009, Lillesand et al. 2008). Bei der visuellen (manuellen) Bildsegmentierung, wie sie bei Bähr (2005a) auch bezeichnet wird, handelt es sich um einen heuristischen Vorgang: Der menschliche Auswerter durchmustert und interpretiert visuell das Bild und gelangt unmittelbar zum Klassifizierungsergebnis, d.h. er teilt Bildbereiche ab, die er aufgrund ihrer Merkmale ausgewählt hat, und benennt sie nach einem festgelegten Interpretationsschlüssel, in dem die Klassen mit ihren Merkmalen beschrieben sind. Bei diesem interpretativ-manuellen Verfahren ist es möglich, punkthafte, linienhafte und flächenhafte Objekte zu erfassen. Heute werden dabei relevante Klassen aus georeferenziertem Bildmaterial standardmäßig in einem GIS digitalisiert. Können Merkmale genutzt werden, die mathematisch, möglicherweise statistisch, zu beschreiben sind, ist eine *algorithmengestützte Klassifizierung* möglich. Im Fachjargon lassen sich auch die Begriffe digital (z.B. Bähr 2005a), rechnergestützt (z.B. Ringle & Sties 1996), automatisch (z.B. Hinz 2004) oder automatisiert finden. Je nach Einfluss eines Bearbeiters wird des Weiteren von nutzergeführten Ansätzen (Hinz 2004), auch als semi-automatisch oder halb-automatisch bezeichnet, gesprochen. Der Begriff algorithmengestützt sei hier als Überbegriff für Klassifizierungsansätze zu verstehen, bei denen Algorithmen integriert sind. Im Folgenden werden vereinfachend für algorithmengestützte Verfahren lediglich die Begriffe Klassifizierung oder Klassifizierungsverfahren verwendet. Im Kontext der *Klassifizierung* können zwei generelle Ansätze unterschieden werden:

- Pixelbasierte Klassifizierung
- Segmentbasierte Klassifizierung.

Die *pixelbasierte* Klassifizierung beruht ausschließlich auf der Auswertung der einzelnen Bildelemente. Bei *segmentbasierten* Ansätzen wird der eigentlichen Klassifizierung eine Segmentierung des Bildinhaltes vorgeschaltet. Dadurch können neben Spektralmerkmalen andere Merkmale in die Klassifizierung einfließen, wie Form und Nachbarschaftsbeziehungen. Bei einer Segmentierung wird die Bildmatrix zunächst in zusammenhängende homogene Regionen unter Verwendung vom Bearbeiter festgelegter Homogenitätskriterien eingeteilt (Weidner & Lemp 2005). Ziel dieses Ansatzes ist die Zuordnung dieser homogenen Regionen zu Objekten in der physikalischen Welt (Bähr 2007). In der Literatur werden neben dem Begriff der *segmentbasierten* Klassifizierung auch *objektorientierte* Klassifizierung (z.B. Weidner & Lemp 2005, Lillesand et al. 2008), *object-based image analysis* (=OBIA; Lang & Blaschke 2006) bzw. *geographic object-based image analysis* (=GEOBIA; Hay & Castilla 2008) verwendet. Die Segmente decken jedoch nicht zwangsläufig ein Objekt ab. Teilweise werden nur Teilbereiche eines Objektes als Segmente repräsentiert (Übersegmentierung) oder Segmente reichen über das zu erfassende Objekt hinaus (Untersegmentierung). Daher wird an dieser Stelle von dem Begriff des Objektes Abstand genommen und in der Folge von *Segmenten* und damit von *segmentbasierter Klassifizierung* gesprochen. Mit der segmentbasierten Klassifizierung wurden aufgrund der Einbindungsmöglichkeit weiterer Merkmale hohe Erwartungen verbunden. Insbesondere bei der Klassifizierung höchst aufgelöster Bilddaten können Klassifizierungsergebnisse dadurch verbessert werden (z.B. Gao & Mas 2008). Noch kann jedoch auch sie in vielen Bereichen nicht die Qualität visueller Interpretation erreichen. Dies liegt zum einen an der Herausforderung, Segmente und die Bildmodelle, die sie repräsentieren sollen, einander anzupassen – Segmentierungsergebnisse sind oftmals nicht gut genug (siehe Unter- oder Übersegmentierung z.B. bei Sturm & Weidner 2009); zum anderen ist die Auswahl passender Merkmale und ihre mathematische Formulierung noch nicht ausreichend realisiert. Die Qualität der segmentbasierten Klassifizierung ist wesentlich von der Qualität der Segmentierung abhängig, insbesondere dann, wenn Formkriterien in die Klassifizierung integriert werden. Die Beurteilung der Segmentierungsqualität ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen (siehe z.B. Review in Sturm & Weidner 2009, Lübker & Schaab 2009, Blaschke et al. 2008). Im Bereich der Klassifizierung, ob nun pixelbasiert oder segmentbasiert, ist eine Flut an Verfahren und entsprechender Software zu verzeichnen (Zusammenfassungen z.B. bei Lu & Weng 2007, Grundlagen z.B. bei Canty 2010). Bei diesen kann wiederum in *implizite* und *explizite* Verfahren unterschieden werden. Bei *impliziten* Verfahren leiten sich die Klassifizierungsregeln z.B. aus Trainingsgebieten ab (z.B. Position und Varianz der Verteilungsfunktion bei Maximum Likelihood-Verfahren, Bähr 2005a). Eine in der pixelbasierten Klassifizierung traditionell eingesetzte Methode ist die Maximum-Likelihood-Klassifizierung. Dieser statistische, implizite Ansatz hat jedoch den Nachteil, dass „es sich [bei der Likelihood-Funktion] um eine sogenannte klassenbedingte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (class conditional probability density function) [handelt], welche die Bedingungen, die an Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen gestellt werden, erfüllen muss (z.B. Kreyszig, 1998, S. 81, zit. n.

Hommel 2010, S. 19)“. Der Einsatz für die segmentbasierte Klassifizierung ist eingeschränkt, da nicht für alle Merkmale Funktionen geschätzt werden können, die diese Bedingungen erfüllen. In den meisten Softwaretools (z.B. Matlab, PCI, ENVI, Erdas) wird sogar lediglich die Normalverteilung angenommen. Mit künstlichen neuronalen Netzen lassen sich auch Daten klassifizieren, deren Trainingsdaten, aus denen implizit die Klassifizierungsregeln abgeleitet werden, keine Normalverteilung aufweisen (z.B. Lillesand et al. 2008). Weitere implizite Verfahren, die in pixel- oder segmentbasierten Verfahren eingesetzt werden können, sind beispielsweise Support Vector Machines (Tax & Duin 1999) und Ensemble Klassifizierung (Gomah et al. 2010). *Explizite* Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass die Integration von Expertenwissen durch Regeln und Parameter in das Klassifizierungsmodell möglich ist. Das eingebrachte Wissen liegt somit *a priori* im Modell vor (Bähr 2005a). Dazu gehören wissensbasierte Klassifizierungsverfahren (vgl. Liedtke & Ender 1989, zit. n. Bähr 2005a). Werden die Regeln explizit formuliert, gehört auch die Fuzzy-Klassifizierung in diese Kategorie. Manche Ansätze können als Mischformen mit impliziten und expliziten Komponenten betrachtet werden: So lassen sich beispielsweise in der segmentbasierten Software *eCognition Developer* aus den Trainingsgebieten bzw. Trainingssegmenten implizit Zugehörigkeitsfunktionen ableiten. Diese können dann wiederum durch explizites Wissen angepasst und auch mit explizit formulierten Funktionen ergänzt werden. Die Zugehörigkeitsfunktionen können dabei als Fuzzy-Funktionen oder auch scharf formuliert werden. Ebenso wird die Kombination der Zugehörigkeitsfunktionen im Klassifizierungsansatz durch Regeln explizit formuliert.

Die vorangestellten Ausführungen gelten für die Bildinterpretation und Klassifizierung allgemein und damit auch für die Erfassung von Klassen, die für die Analyse von Siedlungsprozessen, Veränderungsprozessen landwirtschaftlicher Nutzflächen sowie der Veränderung der Küstenlinie relevant sind. Der Stand der Forschung, der jeweils spezifisch die Klassen betrifft, die für die Prozessanalyse notwendig sind, wird im Folgenden vorgestellt und diskutiert.

### 5.1.1 Interpretation und Klassifizierung im Siedlungskontext

Oftmals wird eine Charakterisierung von Siedlungen und ihrer Veränderungen über die Klasse *versiegelte Fläche* erarbeitet (z.B. Jat et al. 2008). Diese Flächen lassen sich im Allgemeinen zuverlässig klassifizieren. Damit kann jedoch nicht Wohnbebauung von anderen versiegelten Flächen getrennt werden. Eine andere Möglichkeit ist die Unterscheidung zwischen *bebautem* bzw. *urbanem* und *ruralem* Gebiet. Hierbei ist die Definition dessen, was unter *urban* verstanden ist, von entscheidender Bedeutung (Herold et al. 2003), um die bebauten Fläche zu interpretieren oder zu klassifizieren. Die Grenze kann unscharf sein und wird bei Herold et al. (2003) beispielsweise mittels visueller Interpretation zwischen durchgehend bebauter Fläche und dem ruralen Umland gezogen.

Die Unterscheidung zwischen urbanem Gebiet und Umland kann insbesondere dann sehr schwierig zu klassifizieren sein, wenn eine starke Durchmischung mit unbedecktem Boden und Vegetation vorliegt oder Gebäude in Teilbereichen sehr vereinzelt auftreten, wie dies im Untersuchungsgebiet beobachtet werden kann. In solchen Fällen kann es sinnvoll und zielführend sein, *Einzelgebäude* zu erfassen – denn auch bei dünner Besiedlung sind anthropogene Aktivitäten und ihre Wirkungen wie beispielsweise der Ausbau von Wegenetzen oder Waldfragmentierung zu beobachten (Sturm 2003, Hammer et al. 2004). Auch Siedlungsfläche als versiegelte Fläche im Untersuchungsraum zu erfassen, ist nicht zielführend, da lediglich Gebäude und einige Straßen versiegelte Oberflächen aufweisen. Der überwiegende Teil der Freiflächen und Ortsstraßen zeigt unversiegelten Boden oder Vegetationsbedeckung. Dies ist für zahlreiche andere Entwicklungsländer bzw. dünn besiedelte Gebiete weltweit ein typischer Zustand. Die Erfassung versiegelter Fläche würde also hier der besiedelten Fläche nicht entsprechen. Auch eine primäre Erfassung *urbanen* Gebietes würde vereinzelt Häuser unterschlagen. Da solche Häuser jedoch auch Besiedlungsaktivitäten anzeigen und von weiteren Häusern gefolgt werden können, sollen sie mit erfasst werden.

Die Detektion einzelner Gebäude in optischen Datensätzen ist nur mit geometrisch höchst aufgelösten Bilddaten zu leisten. Der Frage, was solche Fernerkundungsdaten für die Stadtentwicklung leisten, gehen Fina et al. (2010) nach, während Gamba et al. (2011) einige der Grenzen und Probleme zusammentragen, die aus dem Einsatz geometrisch höchst aufgelöster Daten in der urbanen Fernerkundung resultieren, wie geometrische Probleme, verminderte spektrale Auflösung oder die bidirektionale Reflektanz urbaner Materialien. Die *Klassifizierung von Gebäuden* ist eine der Herausforderungen in Photogrammetrie, Fernerkundung und Computer Vision. Hier kommen besonders segmentbasierte Ansätze zum Einsatz, um beispielsweise Formparameter mit einzubeziehen.

Segl (1998) setzt künstliche neuronale Netze zur Gebäude-Klassifizierung in Simbabwe aus MOMS-Bilddaten mit einer geometrischen Auflösung von 4,5 m am Boden ein. Hinz (2008) stellt aktuelle Fragestellungen und Herausforderungen in der automatischen Objektextraktion zusammen. Festgestellt werden muss jedoch, dass es sich bei den in der Literatur vorgestellten Daten oftmals um quasi-perfekte Daten in Bezug auf u.a. Auflösung, Überlappung, Wiederholrate handelt. Wie in vielen Entwicklungsländern ist die Datenverfügbarkeit in unserem Fall gering, so dass die Methodik an diese Situation angepasst werden muss.

Die Erfassung von Einzelgebäuden kann auch für Abschätzungen demographischer Daten herangezogen werden, wenn Zensusdaten fehlen, lückenhaft vorliegen oder veraltet sind, wie dies in Entwicklungsländern der Fall sein kann (z.B. Lechtenböcker 1996, 1997, Herold et al. 2003) oder wenn es nicht ausreicht, Bevölkerungsdaten in aggregierter Form vorliegen zu haben. Dann kann nach der Einzelgebäudeerfassung eine Disaggregation der Daten vorgenommen werden (z.B. Nolte 2010). Über die Erfassung von Einzelgebäuden sind zudem anschließende Analysen wie die Bestimmung der Gebäudedichte bzw. Hausgrößenverteilungen möglich. Bei den oben genannten Erfassungen versiegelter oder urbaner Flächen wird lediglich überprägte Fläche bestimmt. Wie dicht diese bebaut ist und wie sich die Bebauungsfläche innerhalb der Gesamtfläche verändert, kann im Nachhinein nicht mehr bestimmt werden und bleibt unbekannt. Im Gegensatz dazu ist es nach der Interpretation oder Klassifizierung von Einzelgebäuden möglich, im Nachhinein urbane bzw. besiedelte Fläche zu bestimmen – entweder über die Hausdichte oder eine definierte Gebäudenachbarschaft. Aus den eben genannten Gründen sollen im Rahmen der vorgelegten Arbeit Einzelgebäude erfasst werden.

### 5.1.2 Erfassung landwirtschaftlicher Flächen

Für viele Fragestellungen – auch und insbesondere in Afrika – ist die Erfassung landwirtschaftlicher Flächen von großer Bedeutung – z.B. bzgl. der Ernährungssicherung (z.B. Amisshah-Arthur & Miller 2002, Thenkabail 2000), der Kartierung landwirtschaftlicher Potentiale (z.B. Röhrig 2008), des Zustandes der Feldfrüchte, im Rahmen von Landbedeckungs- und -nutzungsstudien (z.B. Lübker & Schaab 2010) oder im Rahmen des Monitorings von Landnutzungs- und -bedeckungsänderungen (z.B. Amisshah-Arthur & Miller 2002, Horning et al. 2010, Tappan 2000) und nachfolgenden Modellierungsansätzen (z.B. Thamm et al. 2003). Zahlreiche fernerkundliche Anwendungen und Ansätze lassen sich finden. Insbesondere Bilddaten, die den Spektralbereich des nahen Infrarot (NIR) umfassen, sind in diesem Zusammenhang von großer Bedeutung, da Vegetation in diesem Spektralbereich stark reflektiert. Insbesondere mittels des NDVI<sup>45</sup> können Aussagen über die landwirtschaftliche Bedeckung bis hin zu Fruchtarten (z.B. Bühler et al. 2007, Helmholz et al. 2007, Helmholz & Rottensteiner 2009) und deren Zustand gemacht werden. Oftmals werden landwirtschaftliche Flächen im Rahmen von Landnutzungskartierungen erhoben (z.B. Igue et al. 2006). Die Bedeckung landwirtschaftlicher Flächen kann je nach Jahreszeit bzw. dem Wechsel von Trocken- und Regenzeit phänologisch entweder Grünland, Savanne oder auch unbedecktem Boden ähneln bis gleichen. Aus diesem Grund werden für die Interpretation und Klassifizierung dieser Flächen multitemporale Bilddaten innerhalb eines Jahreslaufes benötigt. Nicht selten werden im Zusammenhang mit landwirtschaftlichen Anwendungen immer noch interpretative Ansätze angewendet (Lillesand et al. 2008, Amisshah-Arthur & Miller 2002). Ist nur ein Datensatz innerhalb eines Jahres verfügbar, zumal in den Tropen oftmals in der Trockenzeit – wie in unserem Fall – so muss mit Einschränkungen und Qualitätseinbußen bei der Interpretation und Klassifizierung gerechnet werden. Sind feldtypische Anbaustrukturen durch ausreichende geometrische Auflösung der Bilddaten interpretierbar oder klassifizierbar, können beispielsweise auch feldfruchtlose Felder in der Trockenzeit als landwirtschaftliche Fläche erfasst werden. Die Frage, ob es sich jedoch um ein Feld in aktueller Bewirtschaftung oder um ein Brachestadium innerhalb einer Brachewechselwirtschaft handelt, kann unter Umständen nicht beantwortet werden. Die Herausforderung im Rahmen dieser Arbeit ist die, Aussagen zu landwirtschaftlichen Flächen mit geringer spektraler Information und nur einem Datensatz in den Beobachtungsjahren zu machen. Bei der Interpretation wie auch Klassifizierung von landwirtschaftlichen Flächen kann eine vorgeschaltete Segmentierung helfen, die Bereiche homogener Bodenbedeckung, z.B. Fruchtarten, trennt. Besonders in der Trockenzeit verschwimmen im Untersuchungsgebiet jedoch Flächen visuell, was ein Problem für eine interpretative wie auch algorithmengestützte Segmentierung ist.

<sup>45</sup>  $NDVI = (NIR - R)/(NIR + R)$ ; R = rot und NIR = nahes Infrarot

### 5.1.3 Extraktion von Küstenlinien

Zur Beschreibung des Küstenverlaufes wird zumeist der Begriff der *Küstenlinie*<sup>46</sup> verwendet, jedoch in der Regel ohne Definition, wo diese genau verläuft. Allgemein wird darunter der Übergang von Wasser zu Land gemeint. Durch Gezeiten, Meeresströmungen, Sedimenttransport und Wellengang ist dieser Übergang jedoch räumlich und zeitlich variabel. Daher muss beachtet werden, welche Linie als Annäherung an die „wahre“ Küstenlinie verwendet, d.h. wie der jeweils verwendete Küstenbegriff definiert ist und dass auch dieser unter Umständen zeitlichen und räumlichen Schwankungen unterliegen kann. Bei ungenügender Festlegung des verwendeten Küstenbegriffes kann es beim Vergleich mehrerer Zeitpunkte zur künstlichen Verringerung bzw. Vergrößerung von Erosions- oder Akkumulationsraten kommen. Nach Boak & Turner (2005) muss es daher ein Ziel sein: „to identify a robust and repeatable shoreline indicator feature for shoreline investigation (S. 700).“ Boak & Turner (2005) legen in ihrem Artikel einen Review der unterschiedlichen Definitionen für Küstenlinien vor und sprechen dabei auch von sogenannten *Küstenlinienindikatoren*. An dieser Stelle sollen einige in Fernerkundungsdaten sichtbare Linien betrachtet werden, die in Abbildung 15 skizziert sind.

Die *Vegetationslinie*, d.h. die seewärtige Vegetationsgrenze (VL in Abbildung 15) lässt sich aus dem Grauwert- bzw. Spektralunterschied relativ leicht identifizieren. Boak & Turner (2005) führen mehrere Beispiele der visuellen Interpretation aus Luftbildern an. Gonçalves (2010) basiert seine Modellierung der Küstenlinienveränderungen in Matinhos (Brasilien) u.a. auf der Erfassung der Vegetationsgrenze in Luftbildern und in GPS-Feldkampagnen. Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurde von der Verwendung der Vegetationsgrenze Abstand genommen, da sie durch anthropogene Einflüsse im Untersuchungsraum in weiten Teilen stark degradiert ist und daher zwischen den Zeitschnitten kein zuverlässiger Vergleich möglich ist. Als zweite betrachtete prägnante Linie zeigt sich die *Abbruchkante* (AK in Abbildung 15, auch Erosionskante nach Boak & Turner 2005). Es handelt sich hierbei um einen geometrischen Indikator, der abhängig von der Steilheit auch visuell aus Fernerkundungsdaten extrahiert werden kann. Dies ist dann der Fall, wenn sich der Sand an der Flanke visuell unterscheidet. Die dritte betrachtete Definition betrifft die *Nass-Trocken-Linie*, die durch den sichtbaren Übergang von nassem (dunklem) zu trockenem (hellem) Sand charakterisiert ist (NTL in Abbildung 15). Bei Boak & Turner (2005) werden zahlreiche Beispiele eines Übergangs genannt, wobei es zu unterschiedlichen Deutungen kommt: Einige Autoren beziehen sich auf die letzte Flutlinie (*high-water line* bei Boak & Turner 2005), die jedoch schwächer sichtbar ist, da der Sand schon stärker abgetrocknet ist. Dolan, Hayden & Heywood (1978) verwenden ebenfalls den Begriff der *high water line*, jedoch in dem bei Overton et al. (1999) unter dem Begriff *wet/dry line* und im hier verstandenen, erkannten und genutzten Sinn. Es ist der Bereich eines Sandstrandes, der durch die letzten Wellenschläge nass gehalten und dadurch dunkel gefärbt wurde. Als vierte Linie kann die aktuelle *Wasserlinie* (WL in Abbildung 15; auch *instantaneous water line* bei Boak & Turner 2005) erhoben werden. Sie bezeichnet die aktuelle Trennungslinie zwischen Wasser und Land. Stafford & Langfelder (1971) verwenden diese Linie ebenfalls. Im Vergleich zwischen Nass-Trocken-Linie und Wasserlinie ist die Nass-Trocken-Linie die sich stabiler abbildende Linie, während die Wasserlinie stärker von der aktuellen Wellenposition beim Aufnahmezeitpunkt abhängt, wie schon Dolan, Hayden & Heywood (1978) festgestellt haben.

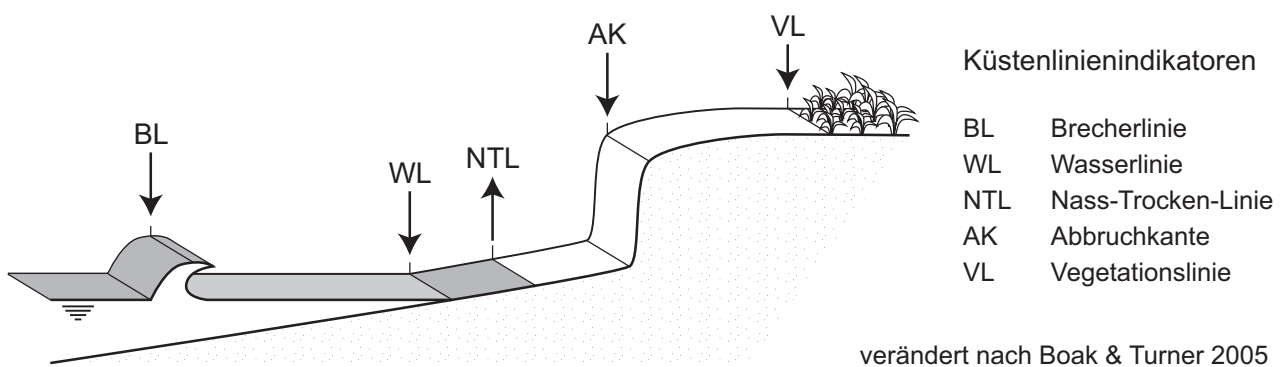


Abbildung 15: Räumliche Beziehung zwischen gebräuchlichen, in Fernerkundungsdaten sichtbaren Küstenlinienindikatoren (verändert nach Boak & Turner 2005)

<sup>46</sup> In der internationalen Literatur auch *coast-line*, *shoreline* (z.B. Boak & Turner 2005), *linha de costa* (z.B. Gonçalves 2010)

Als fünfte Linie sei die *Brecherlinie* (*BL* in Abbildung 15, *shorebreak maximum intensity* bei Boak & Turner 2005) vorgestellt, die sich bei entsprechenden Bedingungen klar in den Bilddaten abbilden kann. Sie lässt sich jedoch nicht immer eindeutig als eine Linie, sondern oftmals eher als Linienschar, erfassen.

Unterschiedliche Methoden werden zur Gewinnung der jeweils zu bestimmenden Küstenlinie eingesetzt. Dabei ist zwischen *Feldmethoden* (z.B. GPS-Trajektorien) und *Fernerkundungsmethoden* (optisch, LiDAR, hyperspektral, Radar) zu unterscheiden. Bei Boak und Turner (2005) findet sich im Rahmen der Definition der Küstenlinien eine Zusammenstellung solcher Methoden. Von ihnen ist im Bereich der optischen Daten die visuelle Interpretation panchromatischer Luftbilder die älteste.

Mit dem Aufkommen multispektraler Luft- und Satellitenbildern werden auch diese nutzbar und damit zunehmend digitale Bildauswertetechniken einsetzbar. Nach Boak und Turner (2005) ist die visuelle Auswertung von Luftbildern jedoch (immer noch) die am meisten verbreitete Methode der Küstenliniendetektion. Ein Nachteil der visuellen Küstenlinienbestimmung ist die Abhängigkeit von der Subjektivität und Fähigkeit des Bearbeiters. Der von Boak und Turner (2005) gegenüber der Klassifizierung aufgeführte Nachteil der Notwendigkeit von Kenntnissen vor Ort für die visuelle Interpretation kann nicht geteilt werden, da auch für Klassifizierungsansätze Kenntnisse dessen, was erfasst werden soll, sicher sein müssen. In Boak und Turner (2005) vorgestellte Klassifizierungsansätze reichen von Schwellwerteinsatz bei Grauwertbildern oder Farbbildern bis hin zum Einsatz neuronaler Netzwerke. White & Asmar (1999) wie auch Bayram et al. (2008) stellen Regionenwachstumsansätze vor.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich Küsten stark unterscheiden können, z.B. hinsichtlich ihrer Materialien und somit ihrer Morphologie, dem Wellenverhalten und den Gezeiten. Im Untersuchungsgebiet wird beispielsweise der Einsatz von Schwellwerten bei Grauwert- oder RGB-Bildern nicht zielführend sein, da die deutlich ausgeprägten Schaumkronen auf den Wellenbergen teilweise auf den weißen Sand des Strandes auflaufen und eine automatische Linienextraktion praktisch unmöglich machen. In den QuickBird-Daten ist jedoch der Spektralbereich des NIR abgedeckt. Dieser Kanal eignet sich für Schwellwertbildung, da Wasser nahes Infrarot beinahe nicht reflektiert – ob nun als Schaumkrone oder ruhiges Wasser.

## 5.2 Methoden zur räumliche Analyse – Verteilungen und Muster

Aus Interpretations- oder Klassifizierungsergebnissen sind Angaben über die Lage der Klassen vorhanden. Weitere Größen, wie beispielsweise Fläche und Anzahl, können daraus abgeleitet und verglichen werden. Für viele Fragestellungen ist es jedoch auch wesentlich, die räumliche Verteilung oder Strukturen und möglicherweise das Verhältnis zu anderen Klassen zu untersuchen – um diese möglicherweise dann auch multitemporal im Rahmen von Prozessuntersuchungen zu vergleichen. Erste Untersuchungen räumlicher Muster wurden nach Krisp et al. (2009) von Gleason (1920) und Svedberg (1922) zur Beschreibung ihrer botanischen und ökologischen (Punkt)-Daten durchgeführt. Seitdem nutzen weitere wissenschaftliche Felder solche Punktmusteranalyse und erweitern diese auf Linien und Flächen. Die *Verteilung von Punkten, Linien und Flächen* kann entweder bezogen auf eine geographische Einheit, freie Untersuchungseinheiten wie Raster bzw. Grids oder direkt vom Objekt selbst aus bestimmt werden. Dabei ist die Größe der Untersuchungseinheiten oder deren weitere Unterteilung von entscheidender Bedeutung. Es wird hier auch vom *Modifiable Areal Unit Problem* (MAUP) gesprochen, das beachtet werden muss (Wong & Lee 2005). Nicht immer lässt es sich vermeiden, auf Untersuchungseinheiten Bezug zu nehmen. Es wäre jedoch in manchen Fällen günstiger, einen Ansatz zu wählen, der unabhängig von Untersuchungseinheiten von den jeweiligen geographischen Phänomenen selbst ausgeht.

### 5.2.1 Räumliche Statistik

Im Zusammenhang mit Untersuchungen räumlicher Muster sind in der Literatur die Begriffe *räumliche Analyse* (*spatial analysis*, nach Wong & Lee 2005 von Berry & Marble 1969 eingeführt) und *räumliche Statistik* (*spatial statistics*) gebräuchlich<sup>47</sup>. Zur Charakterisierung der *Verteilungsmuster* (*pattern, landscape pattern*) flächenhafter Einzel- oder Landschaftselemente, d.h. „je nach Erfassungs- und Betrachtungsmaßstab als weitestgehend homogen anzusehender Einzelelemente (Walz & Berger, 2004, S. 255)“ werden verbreitet *räumliche Strukturmaße*

<sup>47</sup> In der Literatur werden beide Begriffe teils mit gleicher, teils unterschiedlicher Bedeutung verwendet.

(*spatial metrics*) angewendet, die ihren Ursprung in den Landschafts- oder Landschaftsstrukturmaßen (*landscape metrics*) der Landschaftsökologie haben (Walz & Berger 2004, Turner und Gardner 1991, Mc Garigal et al. 2002, Herold et al. 2003, Herold 2004, Jat et al. 2008, Gustafson 1998, O'Neill et al. 1988, Horning et al. 2010). Diese räumlichen Strukturmaße ergeben dabei Werte für eine gesamte Untersuchungseinheit. Sollen also Untersuchungsgebiete in ihrer Gesamtheit untereinander oder über einen Zeitraum verglichen werden, so eignen sich dazu diese *Globalwerte*. Soll jedoch eine differenzierte räumliche Unterscheidung innerhalb des Untersuchungsgebietes möglich sein, eignen sie sich nicht. Räumliche Beziehungen zwischen Einzelpunkten, Linien oder Flächen bzw. deren Tendenzen können mittels *zentrografischer Maße*<sup>48</sup> (*centnographic measures*; Kellerman 1981) beschrieben, dargestellt und verglichen werden. Ob aber beispielsweise mehrere Schwerpunkte existieren, kann damit nicht festgestellt werden. Aus diesem Grund kommen diese Maße nicht zum Einsatz. Zur Beschreibung der *Verteilung* bzgl. der Dispersion – gleichmäßig oder zufällig, bzw. Konzentration – zentral oder dezentral, können *Punkt-Distanzmaße* (Kramer 2000, Wong & Lee 2005)<sup>49</sup> berechnet werden. Der Nachteil dieser Maße ist wiederum ihre Eigenschaft als Globalwert: Sie sagen nichts darüber aus, wo welche Erscheinung auftritt.

### 5.2.2 Dichteanalyse

Eine Möglichkeit, räumlich differenzierte Aussagen über Konzentrationen von Objekten zu erhalten, ist die Dichteanalyse. Daher soll sie eingesetzt und hier näher vorgestellt werden.

Die meisten Dichtemaße beziehen sich auf *Bezugseinheiten*, respektive Bezugsflächen. Oftmals sind dies administrative Einheiten. Ist jedoch die Abgrenzung derselben schwierig oder gar unmöglich, oder sollen kleinräumigere Untersuchungen realisiert werden, können die Untersuchungseinheiten auch regelmäßigen Mustern einer definierten Maschenweite folgen. Üblich sind Raster bzw. Grids. Aber auch Wabenstrukturen sind eingesetzt worden (z.B. in Schaab et al 2010). Bezogen auf die Größe der Untersuchungseinheiten wurde oben die Problematik der Bezugsflächenabhängigkeit thematisiert und diskutiert. Bei Wong & Lee (2005) wurde bezüglich der Auswahl der Rastergröße eine Optimierung der Rastergröße für das jeweilige Untersuchungsgebiet vorgeschlagen. Dies erschwert jedoch den Vergleich zwischen unterschiedlichen Gebieten. Daher wird hier ein Raster mit der Kantenlänge von 100 m zu Grunde vorgeschlagen.

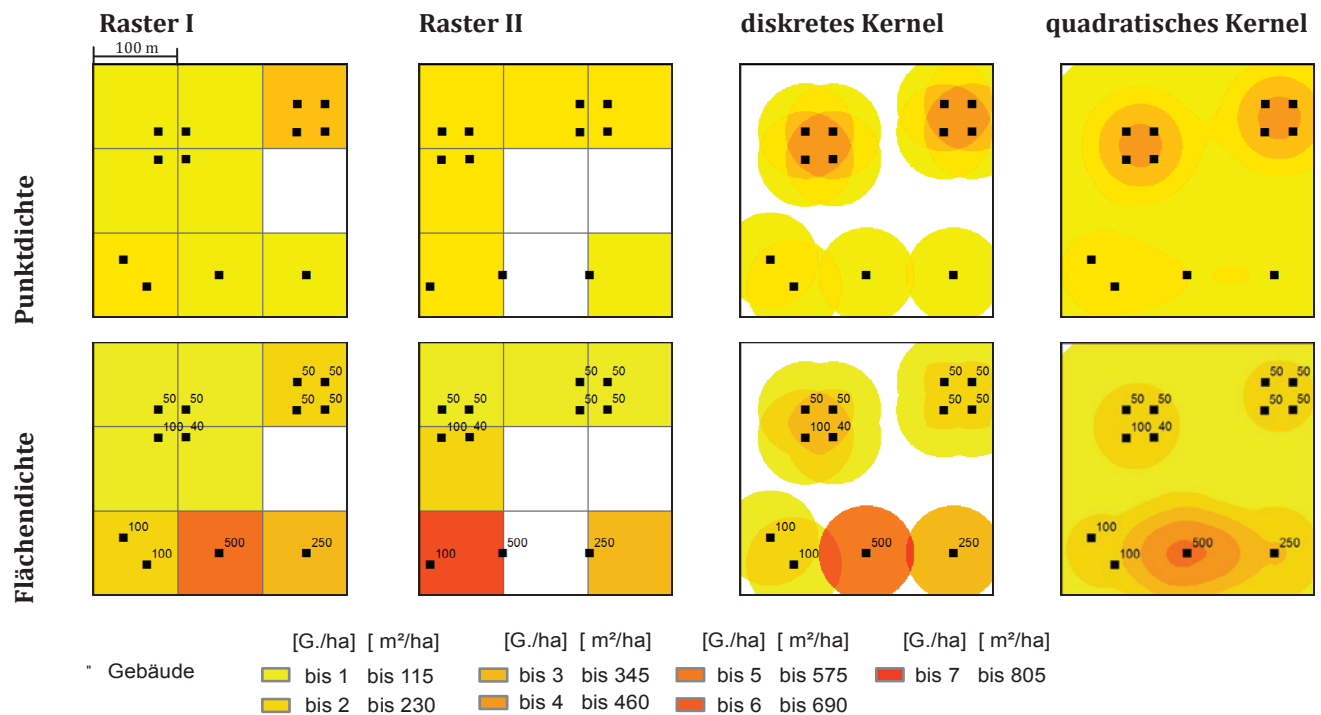


Abbildung 16: Dichteberechnungen (G./ha = Gebäude / ha)

<sup>48</sup> Auch als Lageparameter (Bähr et al. 1992), Punkt-Distanzindizes (Kramer 2000), *point pattern descriptors* (Wong 2005, Wong & Lee 2005) bezeichnet

<sup>49</sup> *point pattern analysers* (Wong & Lee 2005)

Somit sind Angaben pro Hektar möglich und vergleichbar. Abbildung 16 stellt beispielhaft Dichteberechnungen auf Punkte (oben) bzw. auf Flächen dar (unten); es können auch andere Parameter auf die Bezugsfläche bezogen berechnet werden. Abbildung 16 zeigt aber auch die Abhängigkeit der Dichte von der Lage der Rasterzellen anhand zwei leicht verschobener Raster (Raster I und II). Abgesehen von diesen Einschränkungen sind rasterbasierte Werte einfach interpretierbar und leicht im Rahmen einer Veränderungsanalyse zu verrechnen.

Eine Möglichkeit, *direkt* von Objekten auszugehen, bieten *kernelbasierte Ansätze* – mit den Objekten als Zentren der Kernels. Somit geht die Lage der Einzelobjekte direkt in die Berechnung ein. In den daraus hervorgehenden isometrischen Karten zeigt eine Isolinie eine Kurve mit konstantem Punktdichtewert (Krisp et al. 2009). Es stehen zahlreiche *Kerneldichte*-Funktionen zur Verfügung (Smith et al. 2009). Abbildung 16 zeigt zwei häufig verwendete Ansätze:

- das *diskrete Kernel* – zur Berechnung der sogenannten *Point Density* und
- das *quadratische Kernel* – zur Berechnung der sogenannten *Kernel Density*.

Bezogen auf Linien findet sich in ArcGIS 10 die sogenannte *Line Density*, die ebenfalls mit einem *quadratischen Kernel* berechnet wird.

Im Falle des *diskreten Kernels* wird innerhalb des Kernels derselbe Wert angenommen. Schneiden sich zwei Kreise, wird für die Schnittfläche die Summe angegeben. Die Entscheidung, ob ein Haus innerhalb oder außerhalb der betrachteten Fläche liegt, fällt hier aber auch wie beim Raster scharf. Daher wird darauf nicht weiter eingegangen. Differenzierter ist die sogenannte *Kernel Density*, bei der nach der ESRI (2010) für jeden Punkt eine *quadratische Kernelfunktion* berechnet wird, die auf Silverman (1986, S. 76, Gleichung 4.5) beruht. Dabei berechnet sich nach O’Sullivan (2003) die Dichte  $K(d_{ij})$  an einer Stelle  $K$  zunächst bezogen auf ein Objekt:

$$K(d_{ij}) = \frac{3}{\pi r^2} \left( 1 - \left( \frac{d_{ij}}{r} \right)^2 \right)^2 = \frac{3}{A} \left( 1 - \left( \frac{d_{ij}}{r} \right)^2 \right)^2 \quad (2)$$

für  $d_{ij} < r$ , und 0 für  $d_{ij} \geq r$

mit  $d_{ij}$  = Abstand eines Standortes  $j$  zum Kernelzentrum  $i$ ;  $r$  = Kernelradius;  $A$  = Kernelgrundfläche

$K(d_{ij})$  ist abhängig vom gewählten Kernelradius  $r$  (*band width*). Bezogen auf mehrere Objekte errechnet sich die Dichte an einer beliebigen Stelle aus der Summe der Werte  $K(d_{ij})$ , die für diese Objekte an jeder Stelle gelten. Das Volumen unter einer Kerneloberfläche ergibt den Wert 1 bzw. bei einer Gewichtung, beispielsweise durch die Fläche, den Gewichtungswert. In ArcGIS 10 werden Bezugsflächen angeboten, auf die sich die Dichte beziehen soll, z.B. ha oder km<sup>2</sup>. Dementsprechend werden die resultierenden  $K(d_{ij})$  umgerechnet. Dadurch sind die Ergebniswerte oftmals schwer zu interpretieren, da sie also zum einen von  $r$  und zusätzlich von der Bezugsfläche abhängen. So sind Ergebnisse solcher Untersuchungen lediglich qualitativ von „niedrig“ bis „hoch“ interpretierbar (siehe auch Mitchel 1999, ESRI 2010, Krisp et al. 2009). Ein Lösungsversuch zu der hier beschriebenen Problematik der Interpretierbarkeit der Ergebnisse wird in 7.1.2.3 vorgestellt. Vergleicht man den rasterbasierten Ansatz und den kernelbasierten Ansatz (Abbildung 16), zeigt sich bei den Rastern, dass die Vierergruppen abhängig von der relativen Lage des Rasters so aufgeteilt werden, dass sie teilweise gar nicht als Ballung erkennbar sind – beispielsweise fallen alle vier Punkte im linken oberen Bereich in Raster I in unterschiedliche Rasterzellen. Im Gegensatz dazu lassen sich in beiden Kernelansätzen Ballungen direkt aufzeigen und interpretieren. Zu beachten sei bei den Dichtemaßen, dass nicht nur die Bezugsflächen (bei Raster) bzw. die Variablen (bei Kerneldichte) bei der Berechnung einen Einfluss auf das Ergebnis haben. Im zweiten Schritt – bei der Darstellung – beeinflusst schließlich die Wahl der darzustellenden Gruppen-/Klassenanzahl und die Auswahl der Klassengrenzen die Interpretation (siehe u.a. Kramer 2000).

Eine weitere Möglichkeit, direkt vom Objekt – jedoch pixelbasiert – vorzugehen, wird bei Sudhira et al. (2004) vorgestellt: Sie nutzen den von Murphy (1985) vorgestellten Ansatz, innerhalb eines *Moving Window Filters* die Klassendichte- bzw. -heterogenität zu berechnen. Hierbei ist die Größe des Fensters ergebnisentscheidend. Weiter soll an dieser Stelle auf diese Methodik nicht eingegangen werden.

Für die räumliche Analyse von Siedlungen, landwirtschaftlichen Flächen und Küstenlinien werden im Folgenden gezielt Anwendungen zusammengetragen.

### 5.2.3 Räumliche Analyse von Siedlungen

Zur Charakterisierung urbaner flächenhafter Strukturen werden verbreitet *Räumliche Strukturmaße* (s. Kapitel 5.2.1) angewendet (z.B. Mc Garigal et al. 2002; Herold et al. 2003; Herold 2004; Jat et al. 2008). Da Siedlungen zumeist flächenhaft und zudem als versiegelte Fläche untersucht werden, gibt es bezüglich der Untersuchung von Siedlungsdichte bezogen auf Einzelgebäude kaum Untersuchungen. Die Bestimmung der *Gebäudedichte* (s. Kapitel 5.2.2) ermöglicht eine lokale Differenzierung von Siedlungsbereichen. Zudem können daraus Bevölkerungsverteilungen abgeleitet werden. Zumeist werden Gebäudedichteangaben auf administrative Einheiten, Straßenzüge, Stadtquartiere oder Blöcke bezogen. Diese liegen jedoch in Benin nicht genau genug kartographisch vor. Zudem sind diese Einheiten zu groß, um die Siedlungsstruktur lokal zu differenzieren. Somit bieten sich oben vorgestellte Ansätze zur Dichteanalyse für die Charakterisierung von Siedlungen an. Bezogen auf Untersuchungen mit Gebäuden ist festzuhalten, dass Gebiete mit wenigen, dafür jedoch großflächigen Gebäuden, z.B. Gewerbegebäuden, bei solch einer punktbasierten Betrachtungsweise unterbewertet werden. Sie sind jedoch durch höheren Flächenverbrauch und dadurch bedingte Versiegelung gekennzeichnet. Zu diesem Zweck kann zusätzlich zur Punktdichte die Flächendichte bestimmt werden. Zur Berechnung der Flächendichte können die tatsächlichen Hausflächen mit dem Berechnungsraster verschnitten (*intersect*) werden (Fläche pro Rasterzelle) oder beim kernelbasierten Ansatz als Gewichtung in die Berechnung eingebracht werden (ESRI 2010).

### 5.2.4 Räumliche Analyse landwirtschaftlicher Flächen

Landwirtschaftliche Flächen können mittels unterschiedlicher räumlicher (statistischer) Maße charakterisiert werden (z.B. William 1982). Oftmals kommen auch hier *räumliche Strukturmaße* (s. Kapitel 5.2.1) zum Einsatz. Dabei gibt es Untersuchungen, die sich lediglich landwirtschaftlichen (Unter)-Klassen widmen (z.B. Fu & Chen 2000, Voß 2004) und solche, die landwirtschaftliche Flächen im Verhältnis zu anderen Klassen untersuchen (z.B. Walz & Berger 2004).

### 5.2.5 Räumliche Analyse von Küstenlinien

Die räumliche Analyse von Küstenlinien ist weit weniger verbreitet als diejenige der vorgenannten Klassen. Wenige Anhaltspunkte lassen sich in der Literatur finden. Zur räumlichen Analyse von Küstenlinien stellt Phillips (1986) geostatistische Ansätze vor, in denen Teilabschnitte der Küstenlinie bezüglich verschiedener Maße untersucht wurden, um mit ihnen Erosionsmuster zu erklären.

## 5.3 Methoden zur Erkennung, Beschreibung und Quantifizierung von Veränderungen

Die Erkennung, Beschreibung und möglicherweise Quantifizierung von Veränderungen (*change detection*) sind als Indikatoren für die Wirkung von Prozessen notwendig. Im Zusammenhang mit Landbedeckungs- und Landnutzungswandel wird oftmals auch im deutschen Sprachraum die Abkürzung *LUCC*, die für den englischen Begriff *Land Use/Cover Change* steht, verwendet. Zahlreiche Ansätze sind entwickelt worden. Überblicke lassen sich beispielsweise bei Lu et al (2004), Horning et al (2010), Coppin et al. (2004) und Canty (2010) finden. Unterschiedliche Faktoren können dabei die Güte der Ergebnisse beeinflussen: beispielsweise unterschiedliche Auflösungen der Daten, unterschiedliche Tages- oder Jahreszeiten der zu vergleichenden Aufnahmen, Effekte unterschiedlicher Projektion von Daten, wenn keine orthorektifizierten Daten vorliegen (siehe Umklappungseffekte bei Gebäuden), zudem Schattenwurf, möglicherweise Hintergrund, bidirektionale Reflektanz von Materialien u.s.w. (z.B. Gamba et al. 2011, Radke et al. 2005, Lu et al 2004, Rindfuss et al. 2004).

### 5.3.1 Ansätze visueller Veränderungserfassung

Bei der visuellen Veränderungserfassung können die Bilddaten verglichen werden – analog oder digital. Liegen die Bilddaten georeferenziert vor, können zudem die Bilddaten der unterschiedlichen Zeitpunkte als Farbkomponente dargestellt werden. Veränderungen lassen sich so farblich erkennen (siehe z.B. Hornig et al 2010). Außerdem können Interpretations- bzw. Klassifizierungsergebnisse visuell verglichen und qualitativ bewertet werden.



### 5.3.2 Ansätze algorithmengestützter Veränderungserfassung

Neben dem *visuellen* Vergleich multitemporaler Daten können algorithmengestützte Ansatz-Kategorien gebildet werden, die im Folgenden mit Beispielen vorgestellt werden.

#### 5.3.2.1 Methoden der Bild-zu-Bild-Analyse

Ansätze der Bild-zu-Bild-Analyse vergleichen direkt die multitemporalen Bilddaten. Es müssen dafür jedoch vergleichbare Bilddaten – üblicherweise des gleichen Sensors – vorliegen. Als Beispiele seien vorgestellt:

- *Algebra* (z.B. Image Differencing, Image Ratios) und Transformationen (z.B. Hauptkomponentenanalyse): Hierbei werden die Bilddaten miteinander verrechnet. Bereiche mit Veränderungen werden herausgehoben. Man kann sie aber nicht immer eindeutig einem Veränderungstyp zuordnen, geschweige denn erhält man eine vollständige Veränderungsmatrix.
- *Multitemporale Klassifizierung*: Die Multitemporaldaten gehen gemeinsam in die Klassifizierung ein. Hier können pixelbasierte wie auch segmentbasierte Ansätze zum Einsatz kommen. Pakzad (2001) erweitert den segmentbasierten Ansatz zu einem wissensbasierten Ansatz, indem Wissen über die Veränderungstypen und ihre Wahrscheinlichkeiten einfließen. Auch die Ergebnisse der Algebra oder Transformationen können als multitemporaler Datensatz klassifiziert werden. Hierbei treten aber auch die schon oben erwähnten Einschränkungen bei der Klassifizierung der Veränderungstypen auf, wie z.B. Richter (2007) in seiner multitemporalen Analyse von Landsat-TM- und ASTER-Daten zeigt.

Wie in Kapitel 3.1 erläutert, liegen die für die Untersuchungen eingesetzten Daten zwar in sehr hoher, aber abweichender geometrischer und zudem unterschiedlicher spektraler und radiometrischer Auflösung vor. Damit versagen LUCC-Verfahren, die auf gleichen oder zumindest vergleichbaren Datentypen aufbauen.

Liegen heterogene Datentypen vor, bei denen Bild-zu-Bild-Analysen versagen, werden die relevanten Klassen in den Bilddatensätzen zunächst einzeln bestimmt. Nachfolgend werden dann die einzelnen Interpretations- oder Klassifizierungsergebnisse bzw. daraus abgeleitete Sekundärergebnisse genutzt, um raum-zeitliche Veränderungen zu analysieren.

#### 5.3.2.2 Post-Klassifizierungs-Analysen

Post-Klassifizierungs-Ansätze vergleichen Interpretations- bzw. Klassifizierungsergebnisse unterschiedlicher Zeitpunkte. Sie sind dadurch nicht an gleiche Bilddaten gebunden:

- *Statistische Auswertungen*: Hierbei werden die Flächenverhältnisse statistisch ausgewertet, wodurch Globalwerte geliefert werden. Dadurch ist bei solchen statistischen Auswertungen keine räumliche Differenzierung bzw. Differenzierung der Veränderungen möglich. Veränderungen können sich zudem ausgleichen und damit in einer summarischen Betrachtungsweise „verloren gehen“.
- *Veränderungsmatrizen*: Unter dieser Rubrik finden sich pixelbasierte Verfahren, aus denen Veränderungsmatrizen durch pixelweisen Vergleich von Klassifizierungsergebnissen resultieren. So können auch Sekundärergebnisse verglichen werden, wie sie z.B. mit der in Kapitel 5.2.2 vorgestellten Methode von Sudhira (2004) erhalten werden. Des Weiteren können pixel-, segment- oder auch GIS-basierte Verfahren Daten unterschiedlicher Herkunft z.B. Luftbilder, unterschiedliche Satellitendaten, thematische Karten, verglichen werden, bzw. deren Klassifizierungsergebnisse. Dabei muss auf mögliche Unterschiede in der Semantik von Klassen geachtet werden, da andernfalls Veränderungen detektiert werden könnten, die keine sind. Petit & Lambin (2001) legen hierzu Vorschläge einer räumlichen und thematischen Generalisierung vor.
- *Verschneidung von Primärergebnissen*: Für flächenhafte Daten kann die Verschneidung zu den oben genannten Veränderungsmatrizen führen. Aber auch *linien- und punkthafte* Daten können, z.B. in einem GIS, verschnitten werden. Dabei können Objekte, die sich nicht verändert haben, von solchen getrennt werden, die entweder hinzugekommen sind, oder im nächsten Zeitpunkt fehlen.
- *Linienverschiebungen*: Wenn sich Linien, wie beispielsweise Küstenlinien oder Siedlungsfronten verschieben, sollen die Verschiebungsraten erhoben werden, um zum einen den Veränderungsprozess nachzuvollziehen und zum anderen diese Ergebnisse in Modellierungen zu integrieren, um zukünftige Veränderungen abschätzen zu können.

zen zu können. Thieler et al. (2009) stellen einen generischen Ansatz zur Verfügung, der ursprünglich für die Küstenlinienanalyse entwickelt wurde, aber auch für andere Veränderungen eingesetzt werden kann. Dabei wird vom Bearbeiter eine Basislinie generiert, von der orthogonale Linientransekte in einem gewählten Abstand durch die zu untersuchenden Linien verlaufen (Transektmethode). Mittels der Abstände zwischen den Linien wird die Veränderungsrate berechnet. Gonçalves (2010) nutzt als Basislinie eine der extrahierten Linien, verfolgt aber auch den Ansatz der Linientransekte.

- *Räumliche Strukturmaße*: Für räumliche Strukturmaße sei hier der Landscape Expansion Index (LEI) von Liu et al. (2010) vorgestellt. Der LEI beschreibt, inwieweit ein neues Einzelelement von alten Elementen umschlossen ist (*Infilling*), an alte Elemente anschließt (*edge-expansion*) bzw. unangebunden neue „Inseln“ bildet (*outlying*).

Bei den Post-Klassifizierungs-Analysen ist die Qualität der Interpretations- bzw. Klassifizierungsergebnisse auf die Aussagen der Veränderungsanalysen wesentlich für die Ergebnisse. Tang et al. (2005) schlagen als mögliche Lösung die Integration von Unsicherheiten – falls bekannt – als *fuzzy settings* vor; auch Koukoulas (2010) integriert Unsicherheit in die Veränderungsanalyse. Ebenso kann die Implementierung einer *Übergangszone* (*Indeterminate Transition Zone* bei Schiewe et al., 2009) zwischen Klassen oder einem *Puffer* um extrahierte Objekte (Anwendung des Ansatzes von Sturm & Weidner 2009) eingeführt werden.

### 5.3.3 Analyse abgeleiteter Ergebnisse aus Klassifizierungsergebnissen

So wie Klassifizierungsergebnisse lassen sich auch die abgeleiteten Ergebnisse (Sekundärergebnisse) vergleichen:

- *Vergleich räumlicher (monotemporaler) Strukturmaße*: Hierbei werden die Werte räumlicher Strukturanalysen (*spatial metrics*, siehe Kapitel 5.2.1) von unterschiedlichen Zeitpunkten verglichen (z.B. in Jat et al. 2008, Furberg & Ban 2008). Munsu et al (2009) kombinieren Veränderungen räumlicher Strukturwerte mit Veränderungen statistischer Auswertungen. Generelle Trends in dem betrachteten Untersuchungsgebiet lassen sich damit möglicherweise ablesen – so sie sich nicht gegenseitig aufheben. Wo sich diese Trends im Gelände zeigen, lässt sich jedoch nicht zeigen.
- *Vergleich der Werte räumlicher Statistik*: Zentrographische Maße (Kapitel 5.2.1), die als Punkte in einer Karte dargestellt werden können, ermöglichen einen Vergleich (siehe z.B. Kramer 2000) – mit den in Kapitel 5.2.1 genannten Einschränkungen der Aussagekraft. Auch können die im selben Kapitel vorgestellten Globalwerte verglichen werden mit den schon beschriebenen Einschränkungen der Aussagekraft für Globalwerte.
- *Vergleich der Dichteanalysen*: Die Werte innerhalb von Untersuchungseinheiten – egal ob es sich dabei um administrative Einheiten oder gleichmäßig verteilte Untersuchungsraaster handelt – können multitemporal miteinander verglichen werden. Das gilt für Punkt-, Linien- sowie Flächendichten (Kapitel 5.2.2). Entscheidend für die Aufdeckung von Veränderungen kann die Größe und Lage der Rasterzellen sein. So ist es möglich, dass die Verschiebung einer Fläche, einer Linie oder eines Punktes nicht auffällt, wenn die Veränderung innerhalb der Zelle geschieht. Auch wenn sich summarisch die Veränderungen ausgleichen, fällt eine Veränderung nicht auf.

Nachfolgend werden Anwendungen auf die drei zu betrachtenden Prozesse vorgestellt.

### 5.3.4 Analyse von Siedlungsprozessen

Siedlungswachstum und Veränderungen der Siedlungsverteilung sind Forschungsgegenstand zahlreicher Disziplinen. Je nach Datentyp und Fragestellung kommen dabei oben erläuterte Ansätze zum Einsatz. Bhatta (2010) fasst gezielt Ansätze zum Siedlungswachstum zusammen.

Sind die Nutzungen bekannt, die durch Besiedlung verdrängt wurden bzw. werden, können Angaben über den quantitativen Verlust von Lebensräumen in die Analyse eingehen – bei der Verschneidung vorliegender Interpretations oder Klassifizierungsergebnisse auch räumlich differenziert. Bei zahlreichen Autoren werden Siedlungsprozesse durch Post-Klassifizierungs-Analysen oder räumliche Strukturmaße erarbeitet. Konventionelle Strukturmaße charakterisieren aber, wie oben erläutert, einen Zeitpunkt. Es können also keine direkten Aussagen

über die Veränderung gemacht werden, sondern die Werte müssen miteinander verglichen werden (z.B. Herold 2004, Walz & Berger 2004, Jat et al. 2008).

Auch die Einordnung und Bewertung der durch Siedlungszunahme entstehenden Formen werden in der Literatur diskutiert, da sie Indikator für die Art der Siedlungsprozesse sind. Dabei werden im Englischen die Begriffe des *urban growth* und/oder *urban sprawl* in verschiedenen Bedeutungen diskutiert (siehe hierzu Bhatta 2010). Im Rahmen dieser Arbeit soll nicht die direkte Übersetzung, sondern der allgemeinere Begriff *Siedlungswachstum* verwendet werden. Darunter wird Wachstum in all seinen Facetten verstanden. Der Begriff des *urban sprawl*, hier übersetzt als *Zersiedlung*, hingegen ist nach Galster (2001) „lost in a semantic wilderness“. In der Bewertung der Siedlungsprozesse in Kapitel 7 wird folgende Definition, die sich an Bhatta (2010, S. 9) anlehnt, Verwendung finden: „Urban sprawl is the less compact outgrowth of a core urban area [...] having a refusal character or impact on sustainability of environment and human.“ Dabei soll zunächst die Beobachtung selbst, die Form und Art und Weise des Wachstums und nicht die Begründung im Vordergrund stehen, wie sie z.B. bei Sudhira & Ramachandra (2007) mit in die Definition hineingebracht wird, wenn sie in Bhatta (2010, S.9) zitiert wird: „Urban sprawl refers to the outgrowth of urban areas caused by uncontrolled, uncoordinated and unplanned growth. This outgrowth seen along the periphery of cities, along highways, and along roads connecting a city, lacks basic amenities like sanitation, treated water supply, primary health centre, etc. as planners were unable to visualize such growth during planning, policy and decision-making.“

Zur Bewertung des Siedlungswachstums, bzw. der Zersiedlung ist außerdem zu beobachten, dass Maße zu deren Bewertung oftmals nicht den Prozess im Vergleich von Bildern, sondern das Resultat in einem Bild bewerten, z.B. anhand der Ausdehnung, der Fragmentierung oder Kompaktheit (z.B. in Bhatta 2010). Der oben erwähnte *Landscape Expansion Index* (LEI), der von Liu et al. (2010) im Rahmen der Untersuchung urbaner Expansion vorgestellt wird, kann, da er *Infilling*, *Edge-Expansion* und *Outlying* von Einzelobjekten (s.o.) beschreibt, auch für die Charakterisierung der Siedlungsveränderungen hinsichtlich Verdichtung und Ausbreitung eingesetzt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen zwar die Einzelstadien betrachtet werden, für die Beurteilung der Prozesse sollen aber die Veränderungen bewertet werden. Die dafür verwendeten Ansätze werden in Kapitel 7.1 vorgestellt.

### 5.3.5 Analyse von Veränderungen landwirtschaftlicher Flächen

Landwirtschaftliche Flächen sind weltweit räumlichen Verschiebungen unterworfen, in dem sie auf der einen Seite verdrängt werden – z.B. durch Siedlungen (siehe z.B. Judex 2008, Walz & Berger 2004), auf der anderen Seite in bislang ungenutzte Räume vordringen – z.B. in Wälder oder Naturreservate (z.B. ebenfalls bei Judex 2008, Tappan et al. 2000). Neben den beispielhaft genannten Publikationen gibt es zahlreiche andere. Ein Vergleich *räumlicher Strukturmaße* kann dabei beispielsweise Fragmentierung landwirtschaftlicher Flächen (z.B. bei Walz & Berger 2004) oder Flächenzusammenlegungen aufdecken. Welche Landbedeckungen und -nutzungen nun die Landwirtschaft verdrängen und welche der Landwirtschaft weichen müssen, lässt sich in *Veränderungsmatrizen* quantitativ auswerten (z.B. Judex 2008). Statistische Auswertungen, die die Landbedeckungen summarisch betrachten und das Saldo bewerten (z.B. in Tappan et al. 2000), eignen sich nur bedingt, da sich die Verdrängung durch andere Klassen und das Verdrängen von anderen Klassen aufheben kann. Hier muss zumindest ein visueller Vergleich durch das Nebeneinanderstellen der einzelnen Landnutzungs- bzw. -bedeckungskarten möglich sein, wie in Tappan et al. (2000) gezeigt wird. Des Weiteren kann eine kartographische Darstellung der Verschneidungsergebnisse eingesetzt werden. Diese lässt die Verschiebungen schneller visuell erfassen.

### 5.3.6 Analyse von Veränderungen von Küstenlinien

Küstenmorphologische Veränderungen werden zumeist durch die Verschiebung der Küstenlinie bzw. des entsprechenden Küstenlinienindikators (KLI, s. Abbildung 15) und nachrangig durch verlorene oder hinzugewonnene Flächen charakterisiert. Damit werden hier, außer bei der Bestimmung der verlorenen oder hinzugewonnenen Flächen, linienbasierte Ansätze zur Änderungserkennung und -quantifizierung zum Einsatz kommen. Küstenlinien erodieren oder akkumulieren nicht gleichmäßig. Somit verlaufen die Linien verschiedener Zeitpunkte nicht notwendigerweise parallel. Daher ist es für das Monitoring wie auch eventuelle Modellierungen und Simulationen zukünftiger Entwicklungen wesentlich, Raten der Küstenlinienverschiebung *entlang* des Küstenverlaufes zu

bestimmen. In den schon erwähnten Ansätzen von Thieler et al. (2009) und Gonçalvez (2010) (Kapitel 5.3.2.2), die hier beispielhaft angeführt werden, werden auf dem Kurvenzug, der als Referenzlinie fungiert, Punkte mit gleichmäßigem Abstand definiert; durch diese werden zur Referenzlinie senkrecht stehende Geraden gelegt. Ausgehend von dem jeweiligen Punkt auf der Referenzlinie wird der Abstand bestimmt, an dem die Orthogonale die Auswertungslinie des zu vergleichenden Zeitpunktes schneidet. Basierend auf den Abstandswerten können die Veränderungsrate entlang der Küste berechnet und möglicherweise Regressionsmodelle entwickelt werden. Vorteile der Transektmethoden sind die Erfassung positiver und negativer Veränderungsrate sowie die relativ einfache Erweiterung der Erosionsratebestimmung zu einem Regressionsmodell entlang der Linientransekte. Nachteile sind auf der anderen Seite, dass keine durchgängigen Veränderungswerte für die Linien bestimmt werden und die Ratebestimmung abhängig ist von der Lage der Basislinie und den daraus folgenden Transekten. Zudem wird die Veränderung der Küstenlinie ausgehend von einer Basislinie in Richtung des Transekts berechnet, d.h. bei Veränderung der Erosionsrichtung wird diese nicht integriert.

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Methode entwickelt werden, die die Abweichungen zwischen zwei Linien durchgehend berechnet.

#### **5.4 Folgerungen**

Die meisten der aufgezeigten algorithmengestützten Verfahren zur Erfassung derjenigen Klassen, die für die Prozessanalyse notwendig sind, benötigen multispektrale Daten. Diese sind nur mit QuickBird-Daten für jeweils einen Zeitpunkt in den Untersuchungsgebieten vorhanden. Eine Hoffnung für die Auswertung von PAN- oder RGB-Fernerkundungsdaten besteht in segmentbasierten Ansätzen, die neben der spektralen Information zusätzliche Merkmale, wie Form und Textur integrieren können. Die visuelle Bildauswertung ist dabei aber immer noch, insbesondere bei kleinräumigen Strukturen und schwierigen Abgrenzungen üblich. Durch den Bearbeiter können damit vergleichbare Ergebnisse über unterschiedliche Datentypen hinweg erhoben werden.

Für die Analyse der raumverändernden Prozesse reichen nicht immer die aus der Interpretation oder Klassifizierung erhaltenen Ergebnisse, sondern räumliche Analysen müssen folgen. Die räumliche Statistik bietet dazu Methoden. Diese liefern Globalwerte und können somit bei Vergleich lediglich Gesamtänderungen anzeigen. Für die räumlich differenzierte Analyse eignen sie sich nicht. Dazu eignen sich beispielsweise Dichteanalysen, die jedoch angepasst werden müssen.

Aus der komplexen Aufgabenstellung ergibt sich die Notwendigkeit, Methoden und Arbeitstechniken zu kombinieren. In den folgenden Kapiteln werden die jeweils angepassten Methodiken jeweils gezeigt.

# 6 Gesamtansatz der Prozessanalyse

Die Bearbeitung der ausgewählten raumverändernden Prozesse geschieht in drei jeweils auf die Prozesse angepassten Schritten, die in Abbildung 17 vorgestellt werden:

- ① *Bildinterpretation / Klassifizierung*: Zunächst werden die für den betrachteten Prozess relevanten Klassen aus den georeferenzierten Bilddaten für jeden Zeitpunkt erfasst (Kapitel 6.1).
- ② *Räumliche Analyse*: Die Interpretationsergebnisse<sup>50</sup> (Primärergebnisse) fließen teilweise nachfolgend pro Zeitpunkt in eine räumliche Analyse (Kapitel 6.2).
- ③ *Veränderungsanalyse*: Im dritten Schritt werden Veränderungen basierend auf den Primärergebnissen sowie den Ergebnissen der räumlichen Analyse (Sekundärergebnissen) erarbeitet (Kapitel 6.3).

Abschließend werden aus den Veränderungen raumverändernde Prozesse abgeleitet und im Zusammenhang mit regionalwissenschaftlichen Daten qualitativ interpretiert.

## 6.1 Bildinterpretation und Klassifizierung

Ziel der Interpretation bzw. Klassifizierung ist es, aus den georeferenzierten Bilddaten Ergebnisse zu erhalten, um Veränderungsprozesse in ihrer Raumwirkung zuverlässig nachvollziehen und analysieren zu können.

Zunächst werden die Klassen *manuell* mittels *visueller Interpretation* in einem GIS, hier ArcGIS, erfasst. Die Interpretation sichert zuverlässige Ergebnisse mit hohen Detektionsraten, die über die heterogenen Daten hinweg vergleichbar sind. Da sie zeitintensiv ist und sich daher nicht für große Untersuchungsgebiete eignet, wird im Rahmen der Untersuchung der Siedlungs- und küstenmorphologischen Prozesse exemplarisch die *segmentbasierte Klassifizierung* in eCognition Developer 8 als Beispiel eines Klassifizierungsansatzes getestet und bewertet. Für die Bewertung dienen dann die Ergebnisse der visuellen Interpretation.

Nach der Interpretation bzw. Klassifizierung ① liegen die definierten Klassen für jeden Zeitpunkt einzeln als Primärergebnisse vor, die entweder zunächst in eine räumliche Analyse ② oder direkt in die Veränderungsanalyse ③ einfließen können.

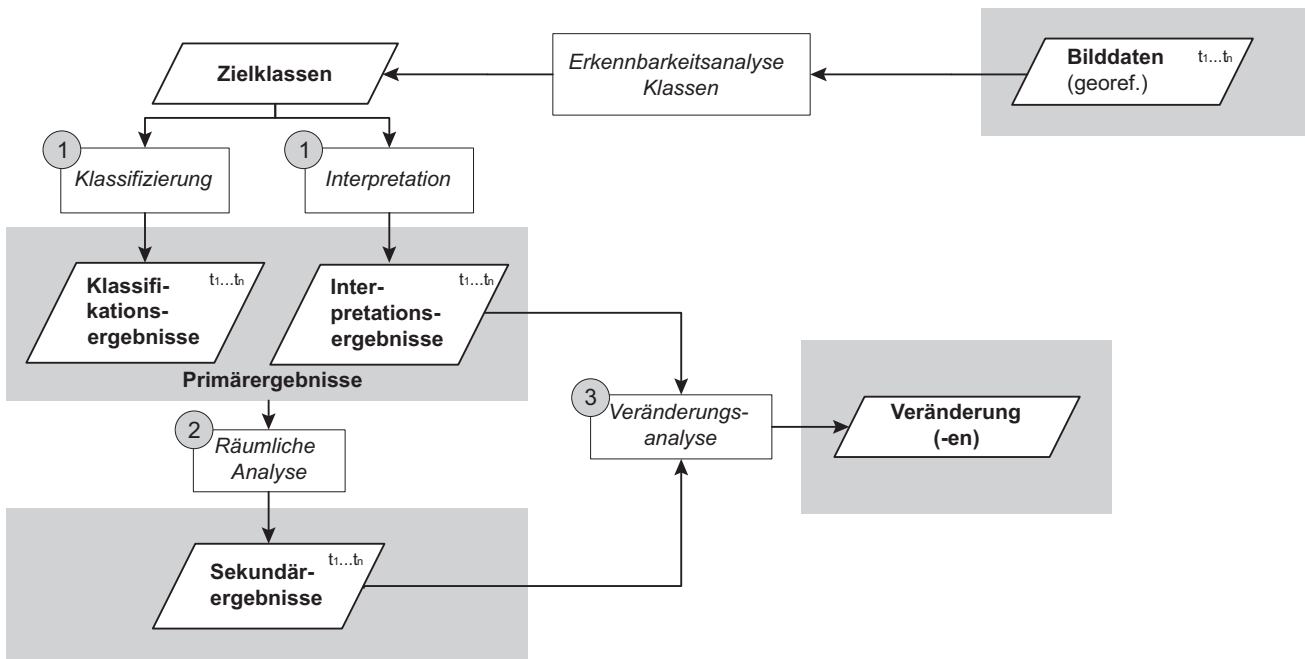


Abbildung 17: Allgemeiner Ansatz der Prozessanalyse

<sup>50</sup> Es wird sich zeigen, dass sich die Klassifizierungsergebnisse nicht zur weiteren Analyse eignen.

### 6.1.1 Visuelle Interpretation

Im Rahmen der visuellen Interpretation werden die relevanten Objektklassen für die betrachteten Prozesse in den Nord-Süd-verlaufenden Transekten (siehe Kapitel 2.1) interpretiert und manuell in ArcGIS digitalisiert.

Neben den Bilddaten aus Kapitel 3 stehen für die Interpretation sowie die Trainingsgebietsausweisung für die Klassifizierung folgende Interpretationshilfen zur Verfügung:

- Anaglyphenbilder in Teilbereichen für die Jahre 1995 und 2007
- Einzelfotos bzw. 360°-Panoramen aus dem Gelände, die durch GPS georeferenziert sind
- Geländenotizen, die durch GPS-Punkte verortet sind oder direkt im Tablet-PC die Bilddaten überlagern.

Der Gesamtinterpretation wurde ein methodischer Pretest zur Sensibilitätsanalyse der visuellen Interpretation vorangestellt, denn die räumliche Analyse wie auch Veränderungsdetektionen sind sensibel bezüglich der Lage der Interpretationsergebnisse. Daher ist die Qualität der Interpretation von großer Bedeutung.

Um einen Hinweis auf die *Sensibilität der Interpretationsergebnisse* vom Bearbeiter zu liefern, werden innerhalb eines *Teststreifens im Transekt Djéffa* von drei Bearbeitern Gebäude, Felder und Küstenlinien digitalisiert und verglichen. Dieser Teststreifen ist 100 m breit und verläuft über die gesamte Nord-Süd-Ausdehnung des Transektes Djéffa.

Auf die Erfahrungen des Pretests erfolgt die visuelle Interpretation der Bilddaten. Durch die in Kapitel 3.1.1 beschriebene unterschiedliche Sensor- und Aufnahmegeometrie der bildgebenden Verfahren und aufgrund verbleibender Residuen aus der Georeferenzierung können Objekte in den Bilddatensätzen leicht versetzt erscheinen. Werden sie in jedem Datensatz einzeln erfasst, können diese Versätze bei der nachfolgenden Veränderungsdetektion als „Pseudoveränderungen“ erscheinen. Um dies zu vermeiden, dienen die erfassten Klassen eines Datensatzes als Basis. Im Pretest stellte sich heraus, dass die Interpretationsergebnisse QuickBird-Daten von 2002 (Èkpè) bzw. 2006 (Avlékété) zwischen den Testbearbeitern am wenigsten voneinander in der Lage abweichen, da sich die Klassen dort aufgrund der höheren geometrischen Auflösung sowie der Spektralinformation aus vier Kanälen besser von ihrer Umgebung unterscheiden lassen als in den PAN-Luftbildern von 1995 bzw. den RGB-Bilddaten (Luftbildscans von 2006/07 bzw. SPOT 2008). Daher werden im ersten Schritt die QuickBird-Bilddaten ausgewertet. Diese Ergebnisse (Zeitpunkt II) werden auf die anderen Datensätze übertragen. Objekte, die in den Bilddatensätzen der Zeitpunkte I und III nicht enthalten sind, werden gelöscht und fehlende Objekte hinzudigitalisiert. Zudem erwies sich, dass ein Vergleich des ausgewerteten Bilddatensatzes mit den anderen Bilddaten während der Digitalisierung bei Interpretationszweifeln helfen kann.

Neben der höheren Belastbarkeit der Ergebnisse bietet die visuelle Interpretation einen weiteren Vorteil: Es können Objekte direkt als Punkte, Linien oder Flächen (Polygone) erfasst werden.

Das Ergebnis der Interpretation dient zum einen als Input für die Veränderungsanalyse und zum anderen als Grundlage für die Qualitätsevaluierung der Klassifizierung.

### 6.1.2 Klassifizierung

Im Rahmen dieser Arbeit wird zur Klassifizierung von Gebäuden und derjenigen Klassen, die auf die verschiedenen Küstenlinienindikatoren schließen lassen, die segmentbasierte Klassifizierung eingesetzt, die in der Software eCognition Developer implementiert ist. In den entsprechenden Kapiteln wird auf die jeweilige Umsetzung eingegangen. Sie wird eingesetzt, da sie generisch genug ist, aber auch die Integration struktureller Bildinformationen wie die Form zulässt. Zudem unterstützt der Ansatz das Einführen von Wissen.

- a) *Segmentierungsschritt*: Vorbereitungsschritt der segmentbasierten Klassifizierung: An dieser Stelle sei der in eCognition Developer implementierte Regionenwachstums-Algorithmus (*region growing algorithm*) kurz erläutert, da diese Software in dieser Arbeit zum Einsatz kommt. Jedes Pixel dient hier als Startsegment und wird mit Nachbarsegmenten so lange verschmolzen, bis der vom Bearbeiter gesetzte Schwellwert erreicht ist. Bei eCognition kann im Gegensatz zu anderen Verfahren nicht nur die spektrale Homogenität benutzt werden, sondern auch geometrische Eigenschaften – die Kompaktheit (*compactness*) und die Glattheit

der Segmentränder (*smoothness*). Die Segmentierung in eCognition wird grundlegend in Baatz & Schäpe (2000) vorgestellt.

- b) *Klassifizierungsschritt*: Im Rahmen dieser Arbeit wird die Software eCognition Developer eingesetzt. Die realisierten Ansätze werden in den entsprechenden Kapiteln ausgeführt.
- c) *Qualitätsevaluierung* der Segmentierungen und Klassifizierungen: Die Evaluierung der Segmentierungs- und Klassifizierungsergebnisse erfolgt außerhalb von eCognition in ImageJ. Die Evaluierungsparameter werden an entsprechender Stelle vorgestellt. Bei den Gebäuden entscheidet dabei zum einen die Repräsentation der Gebäude in Segmenten und die Übereinstimmung der Begrenzung. Zur Evaluierung der Küstenlinienerfassung entscheidet die Differenz zwischen der aus dem Klassifizierungsergebnis abgeleiteten Linie und der digitalisierten Linie über die Qualität. Auf die verwendeten Verfahren der Qualitätsevaluierung wird in den jeweiligen Kapiteln näher eingegangen.

## 6.2 Räumliche Analyse

Für die Beschreibung von Prozessen reicht es nicht immer aus, Interpretations- bzw. Klassifizierungsergebnisse, d.h. die *Primärergebnisse* direkt zu verwenden. Räumliche Analysen im GIS und der anschließende Vergleich können verschiedene Phänomene aufdecken. Als Beispiel sei hier Verdichtung von punkthaften Objekten genannt, der eine Erarbeitung der Dichte in den betrachteten Zeitpunkten vorangehen muss. Die Ergebnisse der räumlichen Analyse werden in Folge auch als *Sekundärergebnisse* bezeichnet. In den Kapiteln der betrachteten Prozesse wird auf die jeweils angewendeten Verfahren der räumlichen Analysen dezidiert eingegangen.

## 6.3 Erarbeitung der Veränderungsergebnisse

Veränderungen lassen sich oft schon im visuellen Vergleich der monotonalen Primärergebnisse bzw. Sekundärergebnisse qualitativ feststellen. Es sollen jedoch auch quantitative Angaben über die Veränderungen der Siedlungen, landwirtschaftlichen Flächen und Küstenlinien erhoben werden. Dies wird durch vergleichende Analysen der Primär- bzw. Sekundärergebnisse der Einzelzeitpunkte realisiert.

Zusammengefasst lassen sich folgende Ansätze finden:

- *Flächenveränderungen* werden durch Verschneidung der Polygone bestimmt. So können Flächenverluste wie auch -zugewinne visualisiert und quantitativ erfasst werden.
- *Punktdichteveränderungen* werden durch Subtraktion der Dichtewerte errechnet.
- *Linienveränderungen* werden durch die Bestimmung der euklidischen Distanz zwischen den Linien bestimmt.

Die jeweils eingesetzten Methoden bei den betrachteten Prozessen werden in den jeweiligen Kapiteln beschrieben. Beim Vergleich globaler Maßzahlen muss beachtet werden, dass ein globales Gleichbleiben nicht notwendigerweise bedeutet, dass innerhalb des beobachteten Raumes keine Veränderungen passieren, denn beispielsweise kann die Gesamtfläche einer Nutzung zwar quantitativ gleichgeblieben sein, sich jedoch räumlich verschoben haben.

Der in diesem Kapitel vorgestellte Gesamtansatz ist auf beliebige Prozessanalysen übertragbar. Die nun anschließenden Kapitel zeigen die jeweils angepasste Methodik für die in Kapitel 4 vorgestellten Prozesse, präsentieren die Ergebnisse und deren Diskussion.





# 7 Analyse von Siedlungsprozessen im Küstenraum

Durch die in den Einleitungskapiteln bereits erwähnte überproportionale Bevölkerungszunahme in der Küstenregion durch Migrationsbewegung in diesen Raum hinein ist starkes Siedlungswachstum zu erwarten. Wo dieses Siedlungswachstum auftritt, in welcher Form und Geschwindigkeit, ist im Küstenraum Benins noch nicht räumlich erfasst und quantifiziert worden. Dazu soll dieses Kapitel, auch methodisch, einen Beitrag leisten. Kapitel 7.1 stellt die Methodik vor. In Kapitel 7.2 schließen die Ergebnisse der Gebäudeerfassung an. Kapitel 7.3 stellt die Ergebnisse der Analyse räumlicher Siedlungsstrukturen und ihrer Veränderungen vor. Die Diskussion und Bewertung der Ergebnisse folgt in Kapitel 7.4, bevor in Kapitel 7.5 ein Ausblick gegeben wird.

## 7.1 Methodik

Siedlungsprozesse werden im Rahmen dieser Arbeit bezüglich Siedlungsgröße und -dichte untersucht. Dazu werden zunächst Gebäude detektiert. Auf diesen basierend werden die Siedlungsgröße und -dichte sowie deren Veränderung bestimmt, interpretiert und diskutiert.

### 7.1.1 Erfassung von Gebäuden

Für die weiterführende Prozessanalyse ist eine möglichst vollständige, zuverlässige und vergleichbare Erhebung von Gebäuden in den heterogenen Multitemporaldaten erforderlich. Herausfordernd ist dabei unter anderem, dass Gebäude im Untersuchungsgebiet ein unterschiedliches Erscheinungsbild hinsichtlich ihrer Dachmaterialien aufweisen. Sie können dadurch in den Bilddaten – je nach spektraler und geometrischer Auflösung dieser Daten – visuell mit der Umgebung verschmelzen, oder mit anderen Flächen ähnlicher Größe und Form verwechselt werden. Auf der folgenden Seite werden unterschiedliche Dachtypen und deren Erscheinungsbild in den vorliegenden Fernerkundungsdaten vorgestellt.

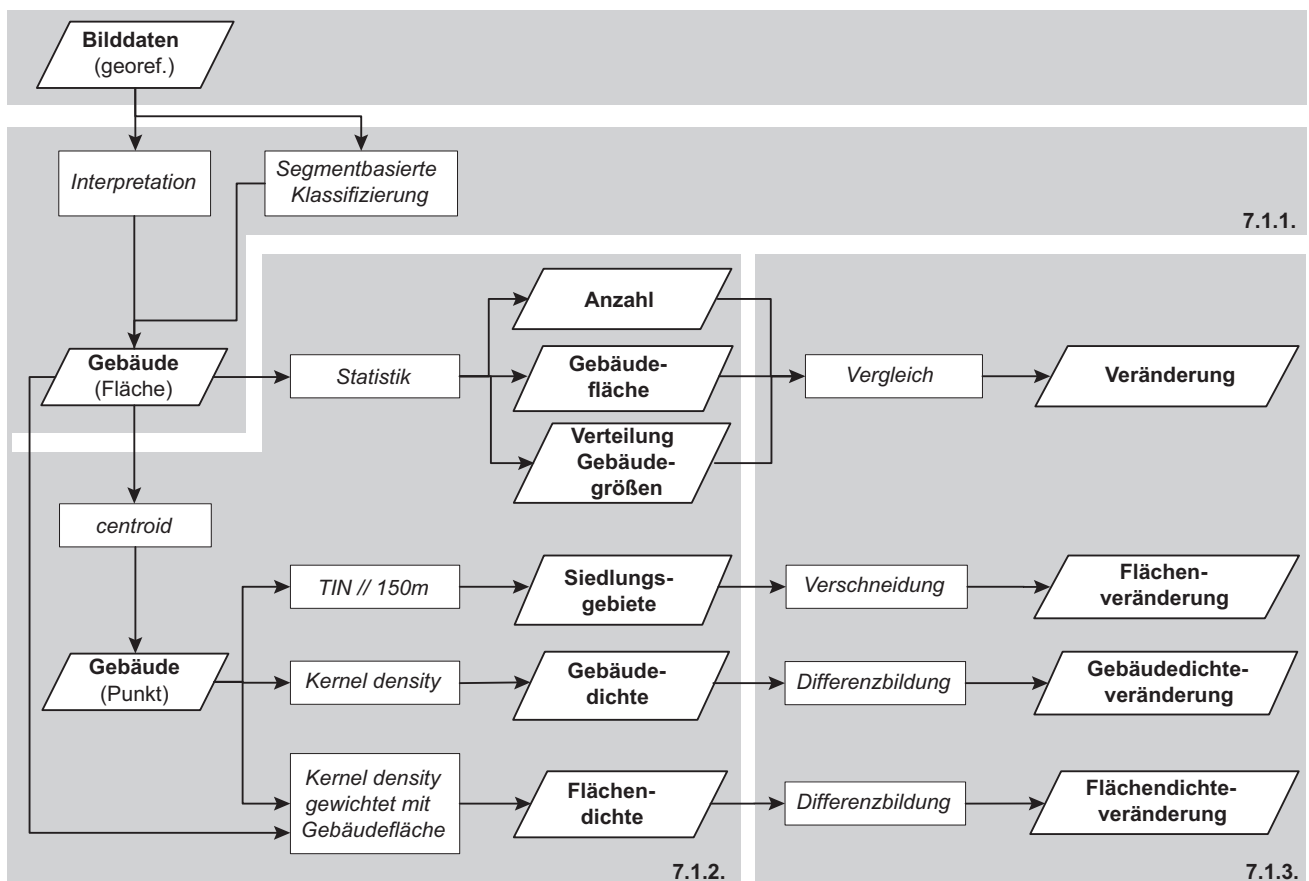


Abbildung 18: Methodik zur Analyse von Siedlungsprozessen



Abbildung 19: Erscheinungsbild von Gebäuden und ihrer Dächer – a) freistehendes Haus mit neuem Asbestdach; b) Gebäude unter Palmen mit einem Mosaik aus alten und neuen Metallplatten und Vegetationsbedeckung; c) vegetationsgedeckte Häuser, nur leicht von Gehölzen überdeckt



Abbildung 20: a) PAN-Luftbild 1995; b) RGB-Komposit QuickBird 2002; c) Falschfarben-Komposit QuickBird 2002; d) Farbluftbild-Scan 2007

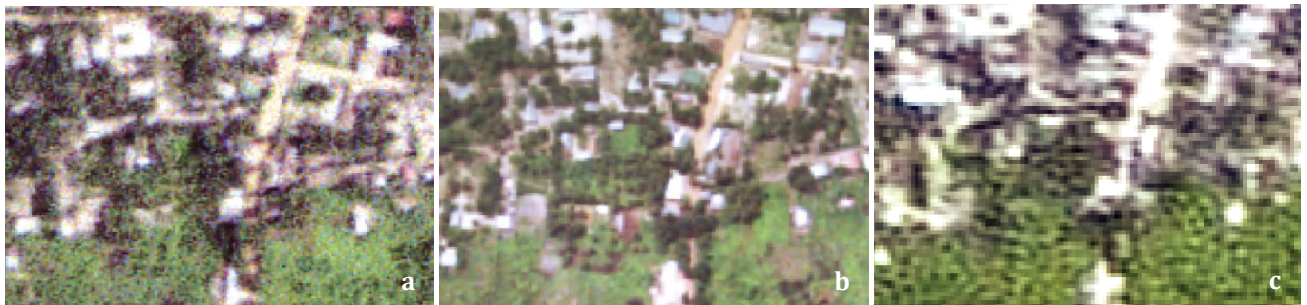


Abbildung 21: Bilddatenausschnitte aus der Ortslage Djéffa für die vorliegenden Daten des Zeitraums 2006–2008 (links: LB-Scan 2006, Mitte: LB-Scan 2007, rechts: pangeschärfter SPOT-Datensatz 2008)

In Abbildung 19 werden einige Dachmaterialien und Gebäudekonstellationen vorgestellt. Abbildung 20 zeigt Gebäude in den Bilddaten zu den einzelnen Zeitpunkten: Neue Asbestdächer und neue Metalldächer erscheinen beispielsweise sehr hell – ebenso wie der offenliegende Sandboden auf Dünenwällen bzw. auf kleineren Feldern zwischen Gebäuden, insbesondere bei Reflektion auf Dachflächen in Richtung der Sensoren. So sind beispielsweise verrostete Dächer, die im RGB-Komposit so dunkelbraun erscheinen wie die trockene Vegetation, von dieser zu trennen. In den PAN-Luftbildern fehlt die Spektralinformation, in den Farbluftbild-Scans von 2007 fehlt NIR, und die geometrische Auflösung ist reduziert. Da bei den Daten von 2007 Lücken in Èkpè auftraten, wurden Luftbild-Scans von 2006 und SPOT-Daten von 2008 herangezogen. Abbildung 21 zeigt sie im Vergleich mit den Daten von 2007 für einen Ausschnitt aus der Ortslage Djéffa im Osten Cotonous, wo alle drei Datentypen vorliegen. Dabei wird deutlich, dass die Gebäude in den Daten von 2006 und 2008 aufgrund von Bildrauschen noch schwieriger zu interpretieren sind. Die Beispiele zeigen, dass schon eine interpretative Erfassung der Gebäude herausfordernd sein kann. Aus diesem Grund werden Gebäude zunächst manuell durch visuelle Interpretation erfasst. Die Ergebnisse dienen als Input für die Veränderungsanalyse und als Referenzdaten für die segmentbasierte Gebäudeklassifizierung.

#### 7.1.1.1 Visuelle Gebäudeinterpretation

Im Rahmen der visuellen Interpretation werden die Gebäude am Bildschirm im Maßstab 1:1.000 bis 1:2.000 mithilfe der Software ArcGIS digitalisiert. In einem ersten Schritt werden alle Gebäude erfasst. Danach werden diese in Gebäudeklassen unterteilt. Zunächst werden die QuickBird-Bilddaten von 2002 (Èkpè) bzw. 2006 (Avlékété) ausgewertet. Dort lassen sich Gebäude im Vergleich zu den anderen Datensätzen besser von ihrer Umgebung unterscheiden. Durch die in Kapitel 3.1.1 beschriebene unterschiedliche Sensor- und Aufnahmegeometrie der

bildgebenden Verfahren können Gebäude in den drei ausgewerteten Bilddatensätzen leicht versetzt erscheinen. Dies soll an zwei Beispielen im Beispielschlüssel (Tabelle 5) gezeigt werden: Palmen überragen im Beispiel *Wohnhaus* 1995 das Gebäude in der Nordwestecke nur unwesentlich. 2002 und 2007 ist dessen Westseite soweit überdeckt, dass man möglicherweise eine andere Gebäudeform digitalisieren würde; bei *Gewerbegebäuden* 1995 erkennt man die westliche Gebäudefront, während die Ostseite über die Begrenzungsmauer hinauszuragen scheint. Des Weiteren können sich Restfehler aus der Georeferenzierung in einer Verschiebung ausdrücken. Werden nun Gebäude in jedem Datensatz einzeln erfasst, können diese Versätze bzw. Verschiebungen bei der nachfolgenden Veränderungsdetektion als „Pseudoveränderungen“ erscheinen. Um dies zu vermeiden, werden die digitalisierten Gebäude aus der QuickBird-Auswertung zunächst auf die anderen Datensätze übertragen. Nach der Übertragung der Ergebnisse aus der QuickBird-Auswertung werden die Gebäude, die im Bilddatensatz 1995 bzw. 2007 nicht enthalten sind, gelöscht. Fehlende Gebäude werden hinzudigitalisiert. Ein Vergleich zwischen den Jahren erlaubt in einigen Fällen das Ausräumen von Zweifeln bzw. eine Anpassung der Gebäudeform wie im oben beschriebenen Fall des Wohngebäudes, das von Palmen überragt wird. Anaglyphenbilder (Kapitel 3.1.1.4), die für die Jahre 1995 und 2007 teilweise vorliegen, helfen als Interpretationshilfe, da sich in ihnen Gebäude und Freiflächen ähnlicher Erscheinung durch den Höheneindruck besser unterscheiden lassen. Auch Schattenverläufe dienen als Indikator für Gebäude. Außerdem können Geländefotos aus den Jahren 2007 und 2008 insbesondere in jungen Siedlungsgebieten die Interpretation unterstützen.

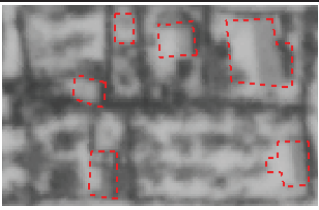
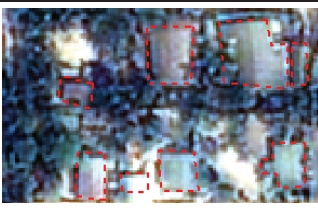

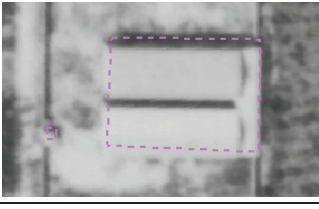
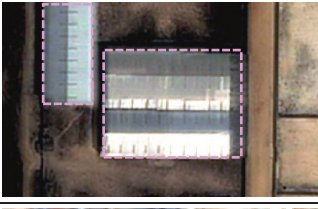
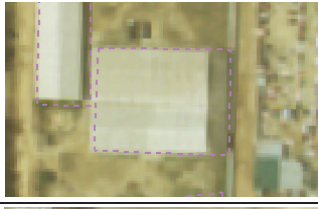






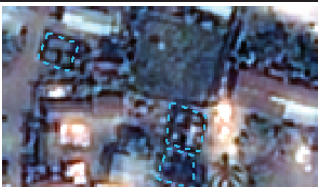
### Einteilung in Gebäudeklassen

Es können mehrere Gebäudeklassen unterschieden werden, die für weiterführende Untersuchungen wesentlich werden: So ist es beispielsweise notwendig, für einen Vergleich mit demographischen Daten möglichst nur Wohngebäude zu erfassen. Anderweitig genutzte Gebäude, sollen in solche Untersuchung nicht mit einbezogen und daher abgetrennt werden. Ihre Erfassung und deren Veränderung zeigt jedoch an, inwiefern wirtschaftliche Veränderungen Überbauung beeinflusst.

Folgende Gebäudeklassen werden unterschieden, die in Tabelle 5 auf der folgenden Seite als Beispielschlüssel gezeigt werden:

- **Wohnhäuser:** Hierunter zählen zunächst tatsächliche Wohngebäude. Aber auch Gebäude gleicher Erscheinung, die als Stallgebäude, Restaurant, Ladengeschäft oder gemischt genutzt werden, fallen in diese Klasse, wenn sie in den Bilddaten aufgrund ihres gleichen Erscheinungsbildes nicht unterschieden werden können. Ihr Anteil ist jedoch vernachlässigbar.
- **Gewerbegebäude:** Hierbei handelt es sich um Gebäude, die entweder deutlich größer erscheinen oder im Zusammenhang mit beispielsweise Fahrzeugverkaufsgeländen stehen. Es kann sich dabei jedoch auch um überdachte Gewerbeflächen handeln. Aus der Luft ist keine Unterscheidung möglich.
- **Verkaufsstände:** Sehr kleine Erscheinungen entlang der Hauptstraße oder auf Verkehrsinseln in den Transekten des Arrondissement Èkpe gehören zu dieser Klasse. Dort werden Waren wie z.B. Brot, Zuckerrohr, Kokosnüsse oder Benzin angeboten.
- **Sonstige Gebäude:** hierunter fallen Gebäude, die deutlich größer als Wohnhäuser sind, aber nicht Gewerbegebäuden zugeordnet werden können. Dazu gehören beispielsweise Schulen, Gesundheitszentren, Hotels, Verwaltungsgebäude. Auch überdachte Gewerbegebiete können in diese Klasse fallen, da sie aus der Luft nicht als solche zu erkennen sind.
- **Gebäude im Bau:** Durch das fehlende Dach können bei entsprechender geometrischer Auflösung der Bilddaten Zwischenwände erkannt werden. Diese Klasse zeigt sich in den PAN-Bilddaten von 1995 und den QuickBird-Daten recht deutlich, in den RGB-Bilddaten von 2007 jedoch eingeschränkter.

Tabelle 5: Beispielschlüssel für erfasste Gebäude

Gebäudeklasse	Pan-Luftbild 1995	QuickBird-Daten 2002/06	RGB-Luftbild 2007
<b>Wohnhäuser</b> (1:1.000)			
<b>Gewerbegebäude</b> (1:2.000)			
<b>Verkaufsstände</b> (1:1.000)	<i>nicht in den Bilddaten erkennbar</i>		
<b>Sonstige; hier Beispiel Schule</b> (1:2.000)			
<b>Gebäude im Bau</b> (1:1.000)			<i>nicht in den Bilddaten erkennbar</i>

### Sensibilitätsbewertung der visuellen Gebäudeinterpretation

In Kapitel 6.1.1 wurde bereits darauf eingegangen, dass innerhalb eines Teststreifens im Transekt Djéffa durch drei Bearbeiter die unterschiedlichen Objektklassen erfasst werden. Bezogen auf die Gebäude wird dieser Test auf die Gesamtklasse der Gebäude und nicht die Einzelklassen angewendet. Die Ergebnisse werden a) bezüglich der Vollständigkeit evaluiert und b) bezüglich ihrer Lageunterschiede. Die Evaluierung der Lageunterschiede kann später in der Qualitätsevaluierung der Segmentierung und der segmentbasierten Klassifizierung in einen Puffer um die Referenzobjekte eingeführt werden, damit sich die durch die Bearbeiter bedingten Ungenauigkeiten möglichst wenig auf die Qualitätsevaluierung auswirken. Die Ergebnisse der visuellen Gebäudeinterpretation und der Sensibilitätsbewertung werden in Abschnitt 7.2.1 ab S. 60 vorgestellt.

#### 7.1.1.2 Segmentbasierte Gebäudeklassifizierung

Die manuelle Erfassung bei der visuellen Interpretation zeigt einen hohen Grad an Genauigkeit. Sie ist jedoch zeitaufwendig und daher nur für begrenzte Gebiete einsetzbar. Aus diesem Grund soll untersucht werden, inwieweit Klassifizierungsansätze eingesetzt werden können. Aufgrund der Einschränkung der spektralen Auflösung der vorliegenden Daten auf ein bis maximal vier Spektralkanäle müssen vor allem Formmerkmale in die Klassifizierung integriert werden. Diese Möglichkeit bieten segmentbasierte Ansätze. Es werden segmentbasierte Ansätze innerhalb der Software eCognition Developer entwickelt bzw. getestet, die übertragbar auf unterschiedliche Datentypen sein sollen.

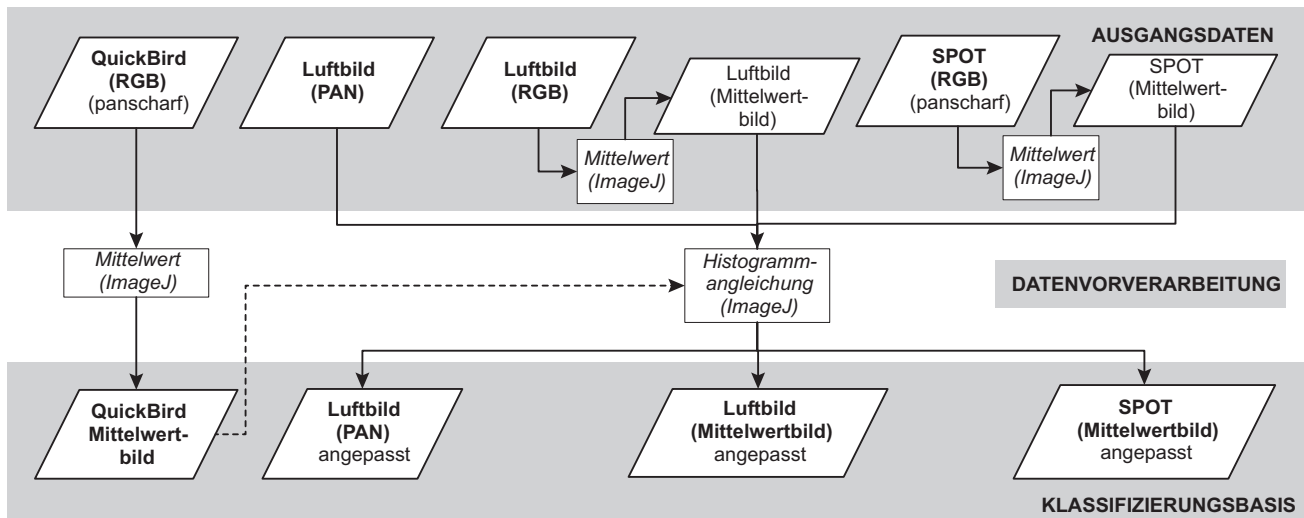


Abbildung 22: Vorverarbeitung der Bilddaten für die Klassifizierung

### Bilddatenaufbereitung für die Klassifizierung

Die den vorliegenden Bilddaten gemeinsamen Eigenschaften sind die Intensität und die Geometrie (siehe auch Sturm-Hentschel et al. 2011 und Sturm et al. 2011). Um übertragbare Klassifizierungsregeln zu erstellen, wird die spektrale Information aller Daten auf die Intensität angeglichen. Die vorliegenden PAN-Luftbilder umfassen in ihrem PAN-Kanal den visuellen Spektralbereich (RGB). Aus den verbleibenden Bilddaten wird jeweils ein Mittelwertbild mit den Kanälen RGB gerechnet. Um einen vergleichbaren Grauwertumfang zu erhalten, werden die Histogramme dieser Intensitätsbilder auf das Histogramm des QuickBird-Mittelwertbildes angepasst (siehe Abbildung 22). Basierend auf den angepassten Mittelwertbildern erfolgt die segmentbasierte Klassifizierung. Diese teilt sich in einen Segmentierungsschritt und die anschließende eigentliche Klassifizierung. In den nachfolgenden Abschnitten wird die Methodik entwickelt.

### Segmentierung der Bilddaten

Um Formmerkmale anzuwenden, werden zunächst spektral homogene Bereiche zu Segmenten zusammengefasst (siehe auch Kapitel 5.1). In der genutzten *Multiresolution Segmentation* von eCognition Developer ist dazu der *region growing algorithm* implementiert (siehe dazu Kapitel 6.1.2). In Tabelle 6 werden die gewählten Segmentierungsparameter vorgestellt. Zur Definition der Parameter sei an dieser Stelle auf Definiens (2009a und 2009b) verwiesen. Das Ergebnis der *Multiresolution Segmentation* ergibt aufgrund der Beschränkung durch den *Scale Parameter* stets Segmente mit einer Größenbeschränkung. Große homogene Flächen bestehen dadurch aus mehreren Segmenten. Um diese zusammenzuführen und damit leichter von den verhältnismäßig kleinen Gebäuden zu trennen, wurden die entstandenen Segmente anschließend durch die *Spectral Difference Segmentation* (siehe Definiens 2009a und 2009b) weiter zusammengeführt.

Tabelle 6: Empirisch gewählte Segmentierungsalgorithmen und dazugehörige Parameter

Segmentierungsalgorithmen	Gewählte Parameter
<b>Multiresolution Segmentation</b>	Scale Parameter = 30 Shape = 0,5 Compactness = 0,8
<b>Spectral Difference Segmentation</b>	Maximum Spectral Difference = 10

### Qualitätsevaluierung der Segmentierung

Segmente bilden die Grundlage für die Klassifizierung. Dadurch wirkt sich die Qualität der Segmente wesentlich auf die Qualität der anschließenden Klassifizierung aus. Streng genommen müsste ein Gebäude-Bildobjekt durch ein Segment oder mehrere Segmente (*Übersegmentierung*) gebildet werden können, die dann mittels Abbildungsvorschriften diesem Bildobjekt zugeordnet werden. Verschmelzen Segmente mit der Umgebung (*Untersegmentierung*) zu einem Segment, das über das Bildobjekt hinausgeht, so kann es möglicherweise durch die Klassifizierung nicht dem Bildobjekt zugeordnet werden. In Abbildung 23 c wird an Beispielen solche Übersegmentierung (*oversegmentation* = o) und Untersegmentierung (*undersegmentation* = u) gezeigt.

Innerhalb einer Qualitätsbeurteilung soll also die mögliche Zuordnung eines Segmentes bzw. von Segmenten zu einem Bildobjekt durch einen Vergleich des Segmentes bzw. der Segmente mit einem visuell interpretierten Gebäude, d.h. der Zuordnung eines manuell erstellten Segmentes zum Bildobjekt, bewertet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Qualität der Segmentierung innerhalb der Software ImageJ mit den in Sturm & Weidner (2009) vorgeschlagenen Bewertungsgrößen evaluiert.

Verglichen werden also *manuell erfasste Gebäude*, die als *Referenzsegmente* der Klasse *Gebäude* ( $\mathcal{R}_{i[\text{Gebäude}]}$ ) dienen, mit den durch die Segmentierung erhaltenen Segmenten  $\mathcal{S}_j$ . Da eine optimale Segmentierung, bei der Referenzen und Segmente deckungsgleich vorliegen, nicht zu erwarten ist, werden diejenigen Segmente  $\mathcal{S}_j$  als potentielle Gebäudesegmente  $\mathcal{S}_{i[\text{Gebäude}]}$  bewertet, die zu mindestens 50% mit einem Referenzsegment  $\mathcal{R}_{i[\text{Gebäude}]}$  überlappen, d.h. diejenigen der Menge der Referenzsegmente

$$\mathcal{R}_{i[\text{Gebäude}]} = \bigcup_{\mathcal{S}_j \in \mathcal{I}_{\text{Gebäude}}} \mathcal{S}_j \quad (3)$$

durch das Kriterium

$$\mathcal{I}_k = \left\{ \mathcal{S}_j \text{ mit } \frac{|\mathcal{S}_j \cap \mathcal{R}_{i[\text{Gebäude}]}|}{|\mathcal{S}_j|} \right\} > 0,5 \quad (4)$$

zugeordnet werden. Dabei beschreibt  $|\mathcal{A}|$  die Pixelanzahl von  $\mathcal{A}$  (<sup>51</sup>) bzw. die entsprechende Fläche, die sich überschneidet.  $\#\mathcal{A}$  steht für die Segmentanzahl von  $\mathcal{A}$ . Im Folgenden wird zur Vereinfachung der Lesbarkeit auf die Verwendung von Indizes verzichtet.

Entscheidend für die Qualität einer Segmentierung sind folgende Merkmale:

- a) Möglichst alle Referenzen sollen durch Segmente repräsentiert sein und Bedingung (4) erfüllen:

Die *Vollständigkeit* wird angegeben durch die *Detektionsrate*  $\rho_d$ :

$$\rho_d = \frac{\#(\mathcal{S} \cap \mathcal{R})}{\mathcal{R}} \text{ mit } \rho_d \in [0,1] \quad (5)$$

$\rho_d = 1$  bedeutet, dass alle Referenzen durch Segmente zu mindestens 50% überlappt sind, während  $\rho_d = 0$  bedeutet, dass kein potentielles Gebäudesegment das Zuordnungskriterium (3) erfüllt.



Abbildung 23: a) Ausschnitt des Mittelwertbildes 2002; b) digitalisierte Referenzgebäude (rot) sowie c) Segmentierung (gelb) und den durch Bedingung (4) zugeordneten Segmenten (blau)

<sup>51</sup>  $\mathcal{A}$  steht allgemein für ein Segment.

b) Die Form der Segmente soll möglichst mit der Form der Referenz übereinstimmen:

Die sich somit ergebende gewichtete Qualitätsrate  $\rho_{qw}^*$  nach Weidner (2008) stellt sich folgendermaßen dar:

$$\rho_{qw}^* = 1 - \frac{\mathcal{A}^*}{|\mathcal{S} \cap \mathcal{R}| + \mathcal{A}^*} = \frac{|\mathcal{S} \cap \mathcal{R}|}{|\mathcal{S} \cap \mathcal{R}| + \mathcal{A}^*} \text{ mit } \rho_{qw}^* \in [0,1] \quad (6)$$

mit

$$\mathcal{A}^* = \sum_{x \in (\mathcal{S} \setminus \mathcal{R})} w(d(x, \mathcal{R})) + \sum_{x \in (\mathcal{R} \setminus \mathcal{S})} w(d(x, \mathcal{R}^c)) \quad (7)$$

und

$$d(x, \mathcal{A}) = \inf \{\rho(x, a) : a \in \mathcal{A}\} \quad (8)$$

$d(x, \mathcal{A})$  beschreibt den Abstand eines Pixels von der Referenzgrenze und  $w(x)$  eine Gewichtungsfunktion. Hierbei werden abweichende Pixel eines Segments, je weiter sie vom Rand der Referenz abweichen – egal, ob nach innen oder nach außen – mit einem ansteigenden Gewicht  $w$  bestraft. Es wird eine lineare Gewichtungsfunktion genutzt:

$$w(d(x, \mathcal{A})) = \frac{1}{\Delta_d} d(d, \mathcal{A}) \quad (9)$$

oder

$$w_T(d(x, \mathcal{A})) = \begin{cases} 0 & d \leq d_T \\ \frac{1}{\Delta_d} (d(x, \mathcal{A}) - d_T) & \text{sonst} \end{cases} \quad (10)$$

bei der  $\Delta_d$  die *ground sampling distance* (GSD) eines Pixels beschreibt. Die Funktion (10) erlaubt die Einführung eines Puffers  $d_T$  um die Referenz. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass auch die Referenzen durch einen Bearbeiter nicht immer optimal sind und solche Ungenauigkeiten sich nicht negativ auf das Evaluierungsergebnis auswirken sollen. So lange die Segmentgrenze innerhalb dieses Puffers  $d_T$  liegt, ist  $\mathcal{A}^* = 0$  und damit  $\rho_{qw}^* = 1$ .

c) Die Referenzen sollen möglichst zusammenhängend durch ein Segment dargestellt werden, also nicht übersegmentiert sein:

Dies wird durch den *Zusammenhangskoeffizienten* (*connectivity coefficient*)  $\rho_{cc}$  nach Cardenes et al. (2007) bewertet

$$\rho_{cc} = \frac{2 \min(\#\mathcal{S}, \#\mathcal{R})}{\#\mathcal{S} + \#\mathcal{R}} \quad (11)$$

### Klassifizierungsschritt

Bei der auf die Segmentierung aufbauenden Klassifizierung sollen entsprechende Segmente der Klasse *Gebäude* zugeordnet werden. Dazu werden innerhalb der Software *eCognition Developer 8.0* ein *wissensbasierter Ansatz* (WA) verwendet sowie der neu in *eCognition Developer 8.0* integrierte *OptimalBox Prototyp* (OB) getestet und beide verglichen.

Wäre davon auszugehen, dass die Segmentierung die Gebäudekonturen zuverlässig erfasst, könnte man die Merkmale, die die Bildobjekte hinreichend genau beschreiben, streng aus den manuell digitalisierten Gebäudeumrissen ableiten und explizit in die Klassifizierung einführen. Dies ist jedoch bei den vorliegenden Daten nicht möglich. Es wird daher festgelegt, dass diejenigen Segmente, die zu mindestens 50 % mit digitalisierten Gebäudepolygonen überlappen und damit Bedingung (3) (s.o.) erfüllen, als potentielle Haussegmente gelten und in als Trainingsdaten (*Samples*) der Klasse *Gebäude* in die Klassifizierungen eingehen. Sie wurden im Rahmen der Segmentierungsevaluierung bereits selektiert. In Abbildung 23 sind sie zur Unterscheidung von den manuell digitalisierten Gebäuden blau dargestellt. Die Trainingssegmente werden nach *eCognition Developer 8.0* importiert (*Creating Samples Based on a Shapefile*; Definiens 2009b, S. 117ff) und sind in Abbildung 24 (nächste Seite) rot dargestellt.



Abbildung 24: Referenzdaten zur Klassifizierung von Gebäuden in der Ortslage Djéffa a) 1995, b) 2002, c) 2007  
(rot = Gebäude; türkis = Nicht-Gebäude)

Zusätzlich werden in eCognition direkt für jeden Zeitpunkt Referenzdaten für die Klasse *Nicht-Gebäude* zufällig verteilt ausgewählt (blau in Abbildung 24). Abbildung 24 zeigt einen Ausschnitt der Referenzdaten in der Ortslage Djéffa für die drei Zeitschnitte. Im *wissensbasierten Ansatz (WA)* werden zur Bestimmung relevanter Merkmale und deren Zugehörigkeitsfunktionen zunächst in eCognition implementierte und zusätzlich angepasste Geometrie- sowie Spektral- bzw. Texturmerkmale<sup>52</sup> (siehe Tabelle 36 im Anhang) für die Trainingsdaten berechnet<sup>53</sup>. In einem zweiten Schritt werden die Merkmale auf ihre Anwendbarkeit und ihren Beitrag zur Klassifizierung getestet. Dazu werden die Histogramme für die Klassen *Gebäude* und *Nicht-Gebäude* geplottet. Im Rahmen der Entwicklung eines auf alle Daten übertragbaren *wissensbasierten Ansatzes (WA<sub>transfer</sub>)* werden die Histogramme der Klassen *Gebäude* und *Nicht-Gebäude* für die drei Jahre synchron gegeneinander verglichen. Die Zugehörigkeitsfunktionen werden dann für diejenigen Merkmale explizit als einfache Wertebereiche aus den Histogrammen abgeleitet, bei denen sich die Histogramme für die Komplementärklassen nicht zu stark überlappen (Tabelle 7).

Tabelle 7: Eingesetzte Merkmale und deren Wertebereiche für die Klassifizierungen

Merkmale	Wissensbasiert (WA)	OPTIMAL BOX (OB)		
	Für alle Zeitpunkte (WA <sub>transfer</sub> )	1995	2002	2007
Area	[65; 800]	[47; 1050]	[8; 977]	[34; 1529]
Shape Index	[0,99; 2.1]	[1,044; 3,606]	-	[1; 3,69]
Mean INT 95	-	[239,27;414,23]	-	-
Lenght/Width	-	[1; 5,448]	[1; 9,5]	[1; 7,25]
Length	[4; 40]	[8; 68]	[3; 66]	[7; 85]
Width	[4; 30]	[4; 37]	[2; 39]	[3; 46]
Equivalence diameter	-	[7,736; 36,564]	-	[6,580; 44,122]
$1/(4*((A)^{(1/2)}))$	-	[1,044; 3,606]	-	[1; 3,69]
1/A	[0,135; 0,8]	[0,169; 1,333]	[0,182; 2,133]	[0,147; 1,425]
Borderlength	-	[32; 288]	-	[26; 376]
Lenght of longest edge (polygon)	-	-	[3; 53,235]	-
Extent	-	-	[0,214; 1]	[0,136; 1]
Radius of largest enclosed ellipse	-	-	-	[0,005; 1]
Density	-	-	-	[0,811; 2,186]
Asymmetry	-	-	-	[0,00012; 0,97]
Compactness	[0,87; 4,5]	-	-	-

<sup>52</sup> \*basierend auf den *regionprops* von Matlab; \*\* direkt in eCognition implementiert

<sup>53</sup> Die genauen Definitionen der Merkmale können Definiens (2009a) und MathWorks (2011) entnommen werden.



*OptimalBox (OB)* wählt Merkmale und generiert Zugehörigkeitsfunktionen automatisch basierend auf den Trainingsdaten. Auch hier handelt es sich bei den Zugehörigkeitsfunktionen um die Abgrenzung von Wertebereichen. Dabei werden diejenigen Merkmale ausgesucht, die am besten die Klassen *Gebäude* und *Nicht-Gebäude* trennen (Definiens 2009b). Leider handelt es sich um ein *black box*-Verfahren, da in der Definiens-Dokumentation keine Informationen über die Trennungskriterien gefunden werden können<sup>54</sup>. Zunächst wird *OB* lediglich auf Basis der Intensitäts-Daten von 2002 trainiert. Die gewählten Merkmale und Zugehörigkeitsfunktionen werden daraufhin auf die Daten von 1995 sowie 2007 zur Klassifizierung übertragen. In einem weiteren Schritt wird *OB* auch mit den Daten von 1995 und 2007 trainiert. Die Ergebnisse der Einzelklassifizierungen werden mit den übertragenen Klassifizierungen verglichen, die durch Training mit den Intensitätsdaten von 1995 und 2007 erreicht wurden.

### Qualitätsevaluierung der Klassifizierung

In die Bewertung der Klassifizierungsgüte gehen nun nur solche Segmente ein, die als potentielle Gebäudesegmente gelten (mindestens 50% Überschneidung mit den Interpretationsergebnissen). Diese werden pixelbasiert mit den Klassifizierungsergebnissen verglichen und bezüglich der *overall accuracy*, des *F-scores*, *Youden's Index*, *True Positive Rate*, *True Negative Rate*, *Positive Predictive Value* und *Negative Predictive Value* bewertet.

#### 7.1.2 Räumliche Analyse der Siedlungen

In die räumliche Analyse der Siedlungen fließen die Primärergebnisse ein. Im Rahmen dieser Arbeit sind dies die Interpretationsergebnisse, da die Klassifizierungsergebnisse unbefriedigend sind, wie sich in Kapitel 7.2.2 zeigen wird.

Aus den Interpretationsergebnissen lassen sich unmittelbar für jeden untersuchten Zeitpunkt statistische Größen zusammentragen, die sich auf den gesamten Untersuchungsraum oder Unterräume beziehen, obwohl sie für das jeweilig betrachtete Gebiet Globalwerte darstellen. Behält man zudem das Gesamtziel dieser Arbeit im Blick – die Prozessanalyse – so eignen sich diese Größen nur bedingt: Sie geben zum einen nur beschränkt über den Vollzug von Prozessen Aufschluss, da sie lediglich zur Erstellung von globalen Saldi herangezogen werden; zum anderen ermöglicht die schlichte Erfassung statistischer Größen keine Aussage über die Lage von Siedlungen und deren Veränderungen. Ebenso wenig ist differenzierbar, wie dicht eine Bebauung vorgenommen wurde und ob bzw. wo im zeitlichen Verlauf eine Verdichtung oder Zersiedlung abläuft. Für eine solche räumlich differenziertere Charakterisierung der Siedlungen ist die Bestimmung abgeleiteter lokaler Merkmale der Siedlungen notwendig. Diese sind im Rahmen dieser Arbeit *Siedlungsfläche* und *Siedlungsdichte*.

##### 7.1.2.1 Statistische Auswertung der Gebäudeerfassungen

Als statistische Größen lassen sich unmittelbar aus den Interpretationsergebnissen für jeden Zeitpunkt folgende Größen ermitteln:

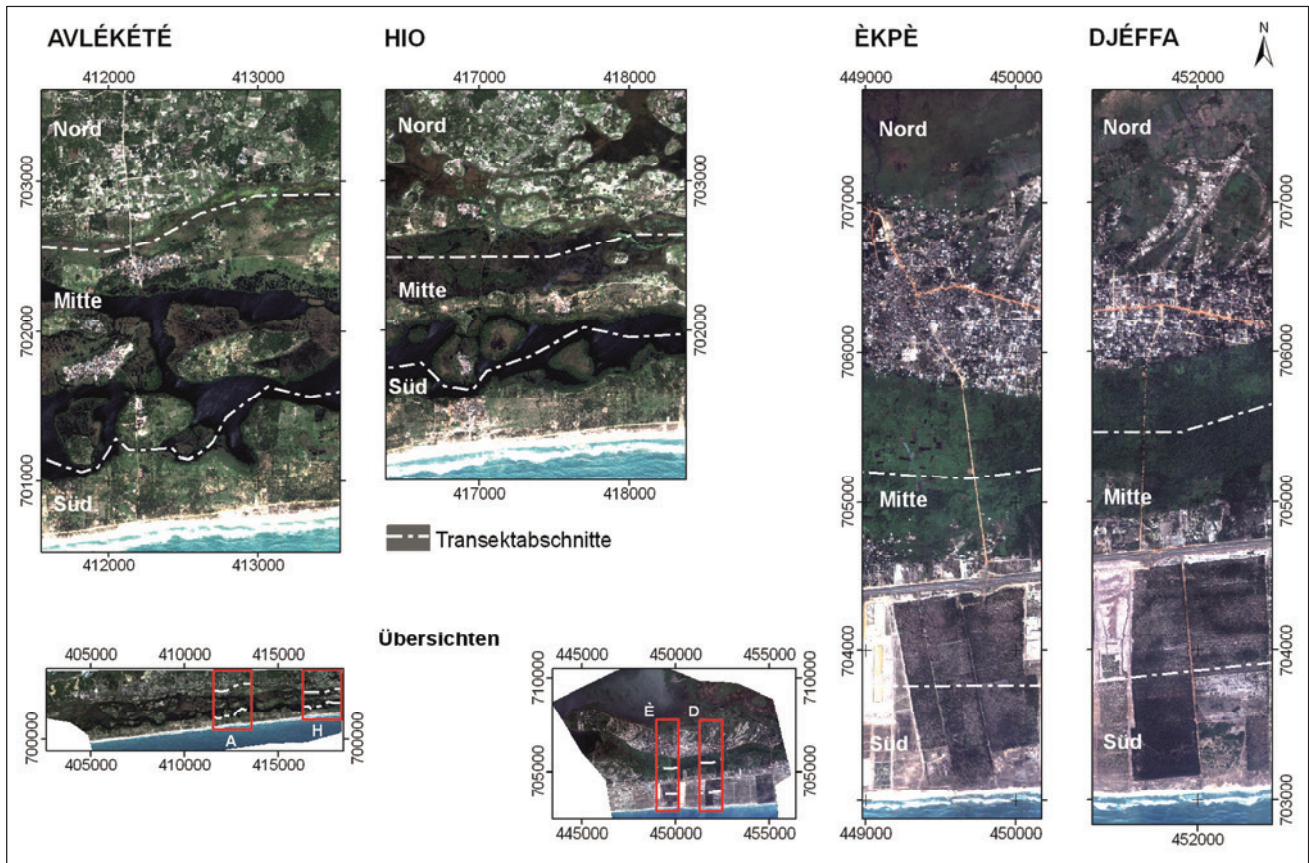
- die Gebäudefläche

und, soweit Gebäude als zusammenhängende und separierbare Bildobjekte interpretiert werden können, auch die

- Gebäudeanzahl sowie
- Gebäudegrößenverteilung.

In Kapitel 2.5 wurde vorgestellt, dass die Untersuchungsgebiete eine Zonierung in Nord-Süd-Richtung erfahren. Rezente sowie ehemalige Lagunen trennen Siedlungsgebiete. Somit werden die Transekte entlang dieser Lagunen für eine getrennte statistische räumliche Analyse dieser Siedlungsgebiete in Abschnitte unterteilt. In Karte 12 werden diese Transektabschnitte gezeigt. Randgebiete der Lagunen sowie ehemalige Lagunen stellen jedoch trotz ihrer hohen Bodenfeuchte nicht überall Siedlungshindernisse dar.

<sup>54</sup> Bis zum Zeitpunkt der Einreichung dieser Arbeit.



Karte 12: Unterteilungen der Transekte

So wird auch im Arrondissement Èkpè in mehreren Bereichen in der ehemaligen Lagune, die nur in der Regenzeit oder heutzutage nicht mehr überflutet sind, Besiedlung beobachtet. Im Arrondissement Èkpè erfolgt außerdem eine gesonderte Betrachtung der Besiedlung entlang der Nationalstraße und des direkten Küstenstreifens, da diese in den Untersuchungsräumen (noch) durch Plantagen bzw. Gewerbeflächen voneinander getrennt sind. Die als gestrichelte Linie dargestellten Linien müssen daher zwischen allen drei Abschnitten als unscharf betrachtet werden; sie können durch Siedlungen, die aufeinander zu wachsen, in Teilbereichen überwunden werden.

In *Avlékété* und *Hio* werden die Siedlungen nördlich des Lagunenkomplexes (Nord), innerhalb des Lagunenkomplexes (Mitte) sowie zwischen Lagunenkomplex und Atlantik (Süd) getrennt betrachtet. In *Èkpè* sowie *Djéffa* erfolgt die Aufteilung nach Siedlungsgebieten nördlich der ehemaligen Lagune (Nord), südlich der ehemaligen Lagune entlang der Nationalstraße (Mitte) und entlang des Atlantiks (Süd).

### 7.1.2.2 Bestimmung der Siedlungsfläche

Um die Siedlungsverteilung und später innerhalb der Veränderungsanalyse die Siedlungsausbreitung erarbeiten zu können, werden Siedlungsflächen bestimmt. Im Gegensatz zu beispielsweise Herold et al. (2003) (siehe Kapitel 5.1.1) wird die Grenze um bebautes Gebiet dabei nicht interpretatorisch gezogen, sondern basiert auf der Nachbarschaft der erfassten Gebäude.

Als Siedlungsfläche wird im Rahmen dieser Arbeit jene definiert, in der Gebäude maximal 150 m auseinander stehen. Der Abstand wurde bestimmt, um auch Gebäude zu integrieren, die in Randbereichen liegen und zwischen denen sich beispielsweise Felder befinden. Diese sollen noch zur Siedlung befindlich gelten, um Veränderungen in der Siedlungsgrenze aufzuzeigen, außerhalb der sich tatsächlich nur noch vereinzelt Gebäude befinden. Der Wert wurde empirisch bestimmt und visuell bewertet. Zur Gewinnung der Fläche wird im ersten Schritt basierend in *ArcGIS 10* ein *TIN*<sup>55</sup> generiert. Dieses spannt zwischen allen Häusern Dreiecke auf.

<sup>55</sup> TIN = *Triangulated Irregular Networks*, d.h. dreiecksvermaschte Daten

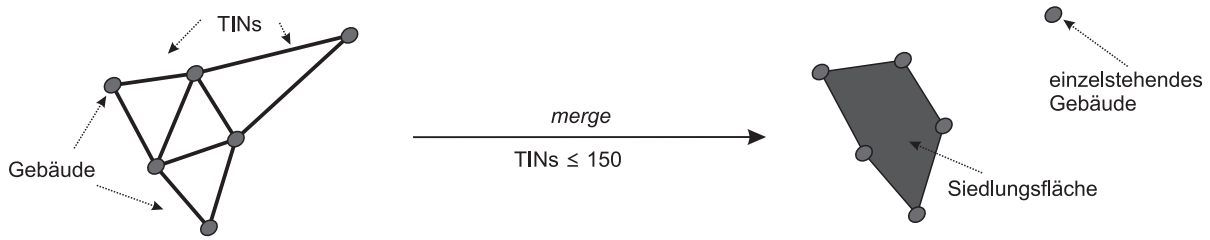


Abbildung 25: Bestimmung der Siedlungsfläche

Kanten mit einer Länge von mehr als 150 m werden entfernt. Die verbleibenden Dreiecke werden daraufhin verbunden (*merge*), so dass eine Gesamtfläche entsteht, die als Siedlungsfläche betrachtet, bewertet und verglichen werden kann (Abbildung 25).

### 7.1.2.3 Bestimmung der Siedlungsdichte

Die Siedlungsdichte wird zunächst bezogen auf die Gebäudeanzahl berechnet – als Gebäudedichte. In die Bestimmung dieser punkthaften Gebäudedichte geht die Anzahl der Hausmittelpunkte ein, welche in ArcGIS als sogenannte *centroids* bestimmt werden können. In Kapitel 5.2.2 wurden die rasterbasierte und kernelbasierte Dichteberechnung verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass der Vorteil der kernelbasierten Betrachtung die Unabhängigkeit von der Lage und Größe eines Rasters ist und die Möglichkeit, direkt von den Objekten auszugehen. An dieser Stelle sei die Gleichung für die Berechnung der quadratischen Kerneldichte wiederholt:

$$K(d_{ij}) = \frac{3}{\pi r^2} \left( 1 - \left( \frac{d_{ij}}{r} \right)^2 \right)^2 = \frac{3}{A} \left( 1 - \left( \frac{d_{ij}}{r} \right)^2 \right)^2 \quad (12)$$

für  $d_{ij} < r$ , und 0 für  $d_{ij} \geq r$

mit  $d_{ij}$  = Abstand eines Standortes  $j$  zum Kernelzentrum  $i$ ;  $r$  = Kernelradius;  $A$  = Kernelgrundfläche

Die Herausforderung besteht in der Tatsache, dass der dargestellte Dichtewert an einem beliebigen Punkt in der Karte – der projizierte Wert der Kerneloberfläche  $K(d_{ij})$  – abhängig vom gewählten Kernelradius  $r$  und bei ArcGIS von der gewählten Bezugsfläche  $A^*$  ist.

Um also im Kernelzentrum, d.h. direkt am Gebäude, dem Wert „1“ und damit innerhalb des Kernelradius  $r$  den Wert „bis 1“ zu erhalten, wird postuliert, dass

$$K(0) = 1, \quad (13)$$

$$\text{d.h. } \frac{3}{\pi r^2} = 1 \quad (14)$$

Dies gilt, wenn:

$$r = \sqrt{\frac{3}{\pi}} \quad (15)$$

Zu beachten ist, dass die Ausgabewerte in ArcGIS auf eine zu wählende Bezugsfläche  $A^*$  umgerechnet werden. Somit ist  $K(d_{ij})$  auch anhängig von  $A^*$ .

Daher gilt:

$$r = \sqrt{\frac{3A^*}{\pi}} \quad (16)$$

mit  $A^*$  = Bezugsfläche

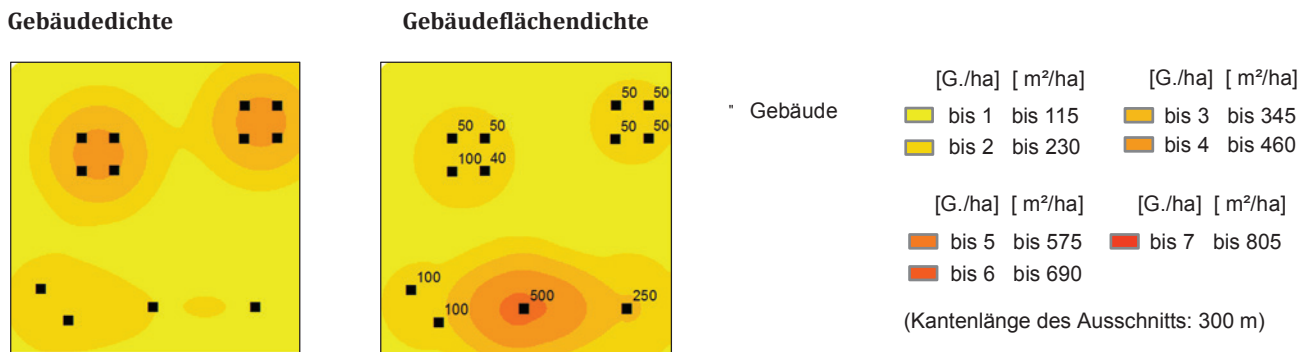


Abbildung 26: Dichteanalyse

Die Bezugsfläche  $A^*$  ist in ArcGIS frei wählbar. Zur Angabe der Gebäudedichten in *Gebäude/ha* empfiehlt sich jedoch durch Einsetzen der Bezugsfläche *Hektar* in Gleichung (16) für den zu wählenden Radius:

$$r = \sqrt{\frac{3 * 10000 \text{ m}^2}{\pi}} \quad (17)$$

$$r = 97,72 \text{ m}$$

wodurch sich am Gebäude im Kernelzentrum der Wert *1 Gebäude/ha* ergibt. Nach außen hin nimmt der Wert ab. Bewegt man sich innerhalb dieses Radius, kann die Gebäudedichte mit: „bis 1 Haus/ha“ angegeben werden. ArcGIS stellt das Ergebnis in einem Raster mit frei wählbarer Rasterweite dar. Somit können Klassengrenzen („Schwellwerte“) gewählt werden. An dieser Stelle werden sie gebäudeweise gesetzt. Die Kerneldichten werden für alle Gebäude berechnet und die Werte werden dann an jeder Stelle im Untersuchungsgebiet aufsummiert. Abbildung 26 a zeigt das kartographisch dargestellte Ergebnis.

Um nun Flächenverbrauch und dadurch bedingte Versiegelung zu charakterisieren, versagt die punktbasierte Gebäudedichte, da Gebiete mit wenigen, dafür jedoch großflächigen Gebäuden, z.B. Gewerbegebäuden, unterbewertet würden. Zur Unterscheidung von Gebieten kleinerer Gebäude von denen mit großen Gewerbegebäuden kann eine Gebäudeflächendichte berechnet werden. Dazu geht jeder Gebäudepunkt mit der zugeordneten Gebäudeflächengröße in die Kerneldichteberechnung ein. In Abbildung 26 wird zum Beispiel deutlich, dass die zwei einzeln stehenden Gebäude rechts unten in der Punktdichte nahezu untergehen. In der Flächendichte hingegen treten sie deutlich in Erscheinung. Die Gebäudeflächendichte wird dabei mit den gleichen Klassengrenzen („Schwellwerten“) dargestellt wie die Gebäudedichte. Umrechnungsfaktor von der Gebäudeflächendichte zur Gebäudedichte ist die mittlere Gebäudedichte aller Gebäude im Untersuchungsgebiet. In diesem Beispielgebiet sind dies  $115 \text{ m}^2$ . Damit entspricht also die Gebäudeflächendichte am großen Gebäude unten in der Mitte „bis zu 5 mittleren Häusern/ha“. Dahingehend entspricht die Gebäudeflächendichte an den Vierergruppen oben „bis zu 2 mittleren Häusern/ha“.

### 7.1.3 Erkennung, Beschreibung und Quantifizierung der Siedlungsveränderungen

Am Anfang der Analyse der Siedlungsprozesse steht der visuelle Vergleich der drei Zeitpunkte. Er vermittelt einen ersten Eindruck veränderter Verteilungen der Gebäude wie auch Veränderungen der Zusammensetzung der Gebäudetypen. Dieser qualitativen Erfassung folgt die quantitative Erarbeitung der Prozesse. Dazu wird der Vergleich der Sekundäresultate, d.h. der Ergebnisse der räumlichen Analyse, präferiert, da klarere Aussagen getroffen werden können.

### 7.1.3.1 Vergleich der Globalwerte

An den visuellen Vergleich schließt sich in einem ersten Schritt innerhalb der Transekte beziehungsweise der in Karte 12 (S. 56) vorgestellten Transektabschnitte der Vergleich der global erfassten Größen

- Gebäudeanzahl
- Gesamte überbaute Fläche
- Gebäudegrößenverteilung

an. Dies ermöglicht eine erste Aussage über den globalen quantitativen Vollzug oder Nichtvollzug von Veränderungen und Disparitäten der Entwicklung zwischen Untersuchungseinheiten. Veränderungen innerhalb der betrachteten Raumeinheit bleiben dadurch jedoch unbeachtet. Dies kann beispielsweise durch Gebäudeverlust und -neubau geschehen, wie im Falle der im Südosten Benins beobachteten Küstenerosion, wodurch sich die Zahlen gegenseitig aufheben.

Der soeben beschriebene Fall zeigt, dass die schlichte Erfassung statistischer Größen keine Aussage über die Lage von Siedlungen und deren Veränderungen ermöglichen kann. Ebenso wenig ist differenzierbar, ob bzw. wo im zeitlichen Verlauf eine Verdichtung oder Zersiedlung abläuft. Daher wird der Vergleich der Globalwerte gefolgt von der Veränderungserfassung der Siedlungsflächen und einer Veränderungserfassung der Gebäudedichte- bzw. Gebäudeflächendichte.

### 7.1.3.2 Veränderungen der Siedlungsdichte

Bereiche, in denen es zu Dichteveränderungen gekommen ist, können lokal durch Differenzbildung der Kerndichten, ob nun als Gebäudedichte oder Gebäudeflächendichte, detektiert werden:

$$Dichte_{Gebäude(\Delta t, r_i)} = Dichte_{Gebäude(t_2, r_i)} - Dichte_{Gebäude(t_1, r_i)} \quad (18)$$

Durch den Vergleich der Gebäudedichte zeigt sich dezidiert, wo Gebäudeverlust auftritt bzw. wo und wie dicht Gebäude hinzukommen. Abbildung 27 zeigt die kartographische Aufbereitung.

Der angewendete kernbasierte Ansatz ist in der Lage, kleinräumige Veränderungen aufzuzeigen. Beispielsweise treten der Abriss der Gebäude oben rechts und unten rechts sowie Neubauten im Gebiet deutlich in Erscheinung. Zum Vergleich wurde in Abbildung 27 die gridbasierte Veränderung an einem Hektargrid gezeigt. Durch die summarische Zusammenfassung innerhalb einer Gridzelle scheint die Veränderung in den drei betroffenen Zellen gleich – als Zunahme um ein Gebäude. Unbeachtet bleibt dabei, dass in der rechten oberen Rasterzelle ein Gebäude abgerissen wurde und zwei neue hinzukamen, während in den anderen beiden tatsächlich nur ein Gebäude entstand. Die rechte untere Zelle scheint dagegen unverändert, obwohl ein Gebäude abgerissen und ein neues entstanden ist. Damit wird der Vorteil des kernbasierten Ansatzes auch für die Beschreibung und Quantifizierung der Veränderungsprozesse deutlich.

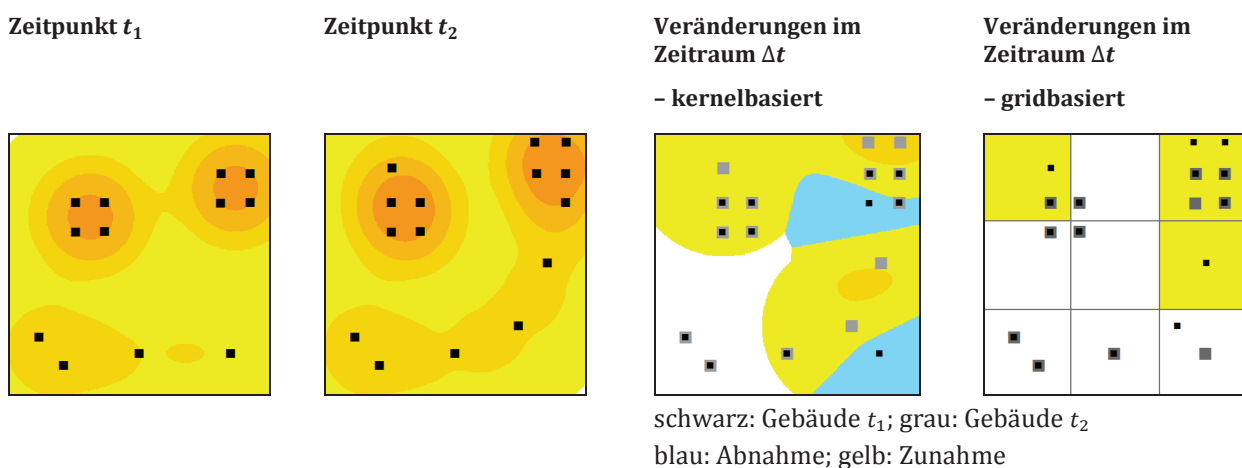


Abbildung 27: Analyse der Veränderung der Siedlungsdichte

## 7.2 Ergebnisse der Gebäudeerfassung

Die Ergebnisse der Gebäudeerfassung werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt und bewertet. Sie dienen anschließend als Grundlage der Prozessanalyse.

### 7.2.1 Ergebnisse der visuellen Gebäudeinterpretation

Als Ergebnis der visuellen Interpretation liegen für die untersuchten Zeitpunkte die definierten Gebäudeklassen als Vektoren vor.

Der finalen Gebäudeinterpretation war ein Test vorangegangen, in dem neben der Autorin von zwei weiteren Bearbeitern innerhalb eines Teststreifens im Transekt Djéffa Gebäude interpretiert wurden (siehe Kapitel 6.1.1). In Abbildung 28 werden Beispielausschnitte der Ergebnisse vorgestellt für den nördlichen Bereich, in dem Gebäude vereinzelt in der Feldflur stehen, für einen Ausschnitt aus der Ortsmitte und einen Bereich aus dem Süden. Für den Norden und die Mitte werden die gleichen Ausschnitte über die drei Zeitpunkte verglichen; im Süden mussten aufgrund fortschreitender Küstenerosion und der daraus resultierenden Verlagerung von Siedlungen unterschiedliche Ausschnitte gewählt werden.

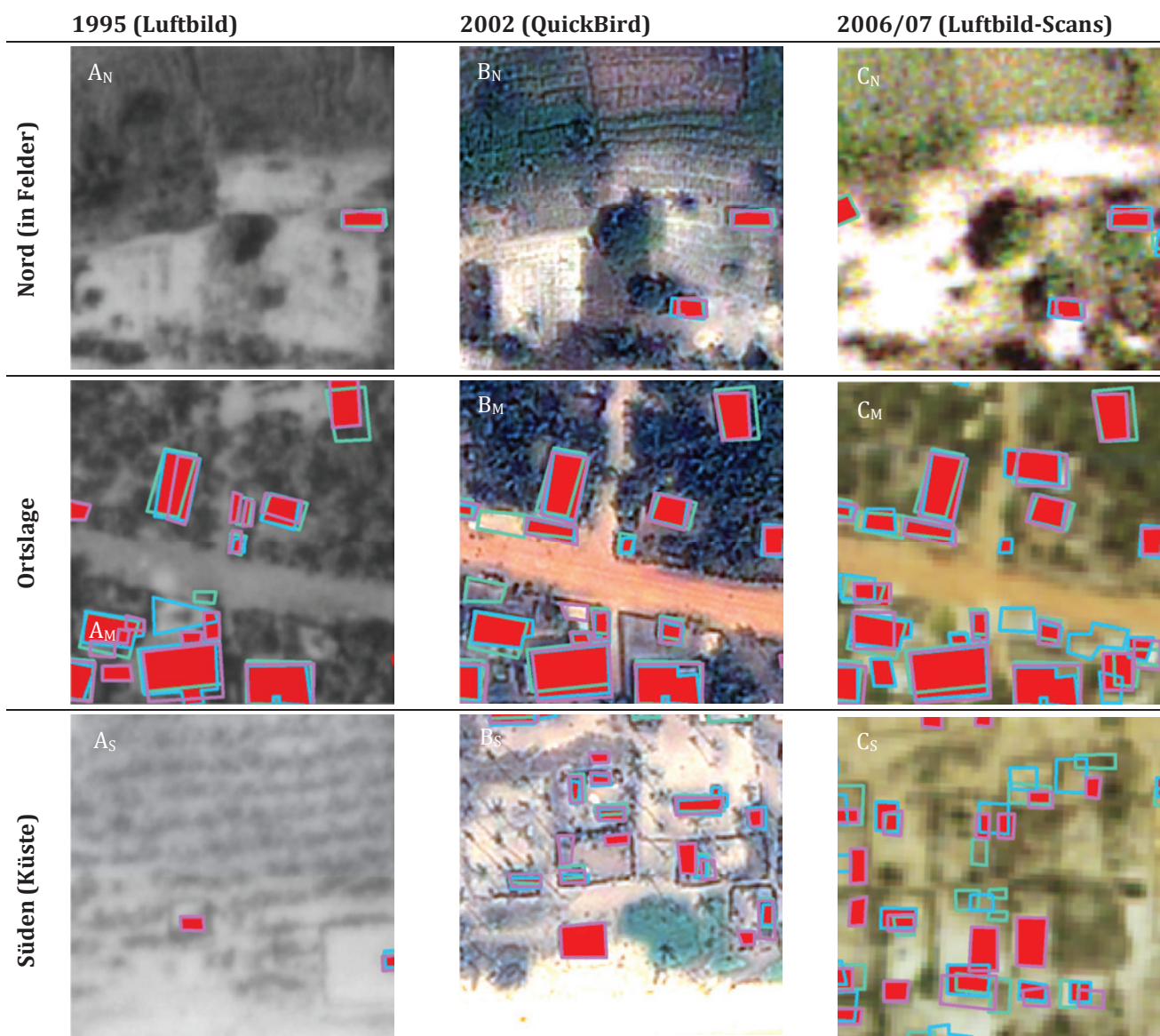


Abbildung 28: Testinterpretationen (Linien: Testbearbeiter; rot: Finalerfassung)  
(Kantenlänge der Bildausschnitte jeweils 100 m)

Tabelle 8: Gebäudeanzahl (bearbeiterabhängig und Finalerfassung)

	1995	2002	2006/07
Bearbeiter 1	30	99	172
Bearbeiter 2	31	106	144
Bearbeiter 3	38	115	161
<b>Final</b>	<b>44</b>	<b>123</b>	<b>183</b>

In Abbildung 28 fällt auf, dass die Gebäude zum einen bezüglich ihrer Lage unterschiedlich stark voneinander abweichen und dass nicht alle Gebäude von allen Bearbeitern detektiert wurden. Letzteres schlägt sich im Ergebnis von Tabelle 8 nieder, die die Anzahl aller Gebäude, die von den jeweiligen Bearbeitern im gesamten Testtrakt interpretiert wurden, vorgestellt. Dabei stimmen die Ergebnisse der Interpretation der QuickBird-Daten von 2002 weitaus stärker überein als die Ergebnisse der Interpretation der Luftbilder von 1995. Die Interpretationsergebnisse der Luftbild-Scans von 2007 unterscheiden sich am stärksten. Während in den PAN-Luftbildern von 1995 zwar die Spektralinformation fehlt, die Häuser sich aber relativ gut geometrisch abbilden, ist die geometrische Auflösung der Scans vermindert, und besonders im Norden erschwert Bildrauschen die Interpretation. Abweichungen der Gebäudeformen zeigen sich besonders dort – in allen Bilddaten – wo Bäume und Palmen Gebäude teilweise überdecken und so die Hausform teilweise abgeschätzt werden muss. Aus den genannten Gründen wurden die Bilddaten zur Erstellung der finalen Datensätze mehrfach durchmustert und vor der Weiterverarbeitung durch einen zweiten Bearbeiter kontrolliert. Tabelle 8 zeigt außerdem das Ergebnis der nachkorrigierten Interpretation „Final“. Es wird deutlich, dass die Anzahl erkannter Gebäude ansteigt, wenn zwei Bearbeiter die Datensätze bearbeiten. Die Tendenz ist aber überall gleich, so dass auch bei nur einem Bearbeiter eine stabile Aussage möglich ist. In Abbildung 29 werden Ausschnitte – wiederum aus dem Transekt Djéffa – mit den verschiedenen Gebäudeklassen dargestellt. Die kompletten Interpretationsergebnisse werden in Kapitel 7.3 vorgestellt, da man bei der Beschreibung und Charakterisierung der einzelnen Abschnitte unweigerlich die Ergebnisse vergleicht und somit in die qualitative Änderungsbeschreibung mündet.

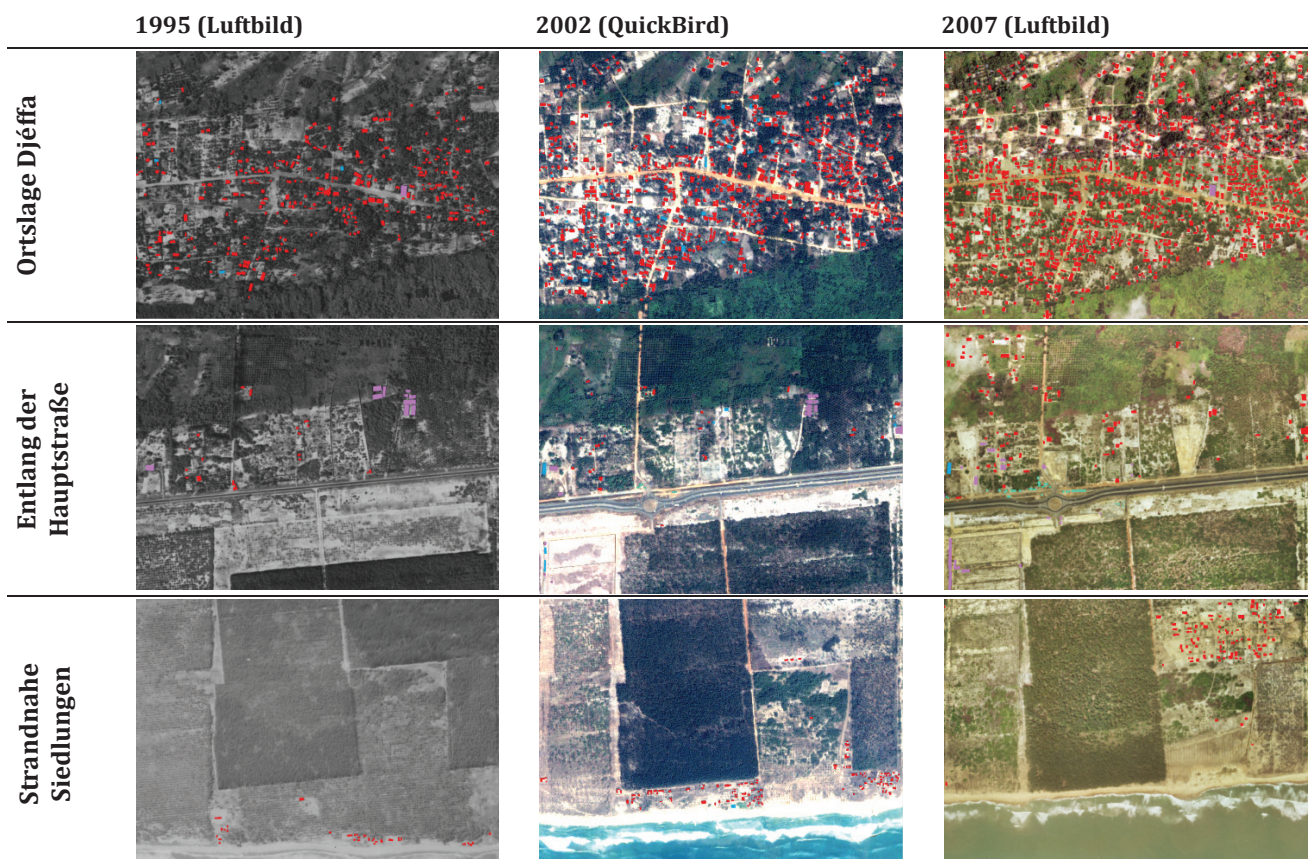


Abbildung 29: Beispiele der manuellen Gebäudeerfassung in Djéffa

(rot: Wohngebäude, rosa: Gewerbegebäude, blau: Gebäude im Bau; grün: Straßenstände)

## 7.2.2 Ergebnisse der segmentbasierten Gebäudeklassifizierung

Aufgrund des Zwischschritts der segmentbasierten Klassifizierung werden zunächst die Ergebnisse und Bewertung des Segmentierungsschrittes vorgestellt, nachgefolgt von denjenigen des Klassifizierungsschrittes.

### 7.2.2.1 Ergebnisse der Segmentierung und ihre Bewertung

In Abbildung 30 sind die Ergebnisse der Segmentierungen für die drei Zeiträume im gleichen Bildausschnitt dargestellt: Ergebnisse der *Multiresolution Segmentation (MRS)* und der nachgeschalteten *Spectral Difference Segmentation (SDS)*. Die SDS zeigt dabei die Zusammenführung spektral ähnlicher Segmente aus der MRS. Es zeigen sich Unterschiede zwischen den Daten trotz der Histogrammangleichung (siehe S. 51), die durch unterschiedliche räumliche Originalauflösung, durch Strukturunterschiede aber auch unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse verursacht werden. Die Luftbilder von 1995 wurden 15:30 Uhr bzw. 15:45 aufgenommen, diejenigen von 2007 ca. 14:35 Uhr und verzeichnen möglicherweise durch den schrägeren Lichteinfall der Sonne einen stärkeren Kontrast als die QuickBird-Daten, die 10:20 Uhr aufgenommen wurden. So zeichnen sich beispielsweise Palmen im Luftbild von 1995 kontrastreicher ab als im QuickBird-Datensatz von 2002. Folglich ergeben sich unterschiedliche Größen der Segmente (gelb dargestellt). Rot dargestellt sind die manuell digitalisierten Gebäude der visuellen Interpretation und blau-violett diejenigen Segmente, die zu mindestens 50 %<sup>56</sup> mit einem digitalisierten Gebäude überlappen.

Schon die visuelle qualitative Evaluierung der Segmentierungsergebnisse in Abbildung 30 zeigt, dass sich nicht alle Referenzen, d.h. die manuell digitalisierten Gebäude (rot), von ihrer Umgebung als Segment abtrennen lassen. Die Ergebnisse der quantitativen Evaluierung der getesteten Segmentierungen sind in Tabelle 9 dargestellt. Die *Connectivity* hat für alle Segmentierungen gute Werte. Dagegen ist die Detektionsrate (*Recall*) sehr niedrig.

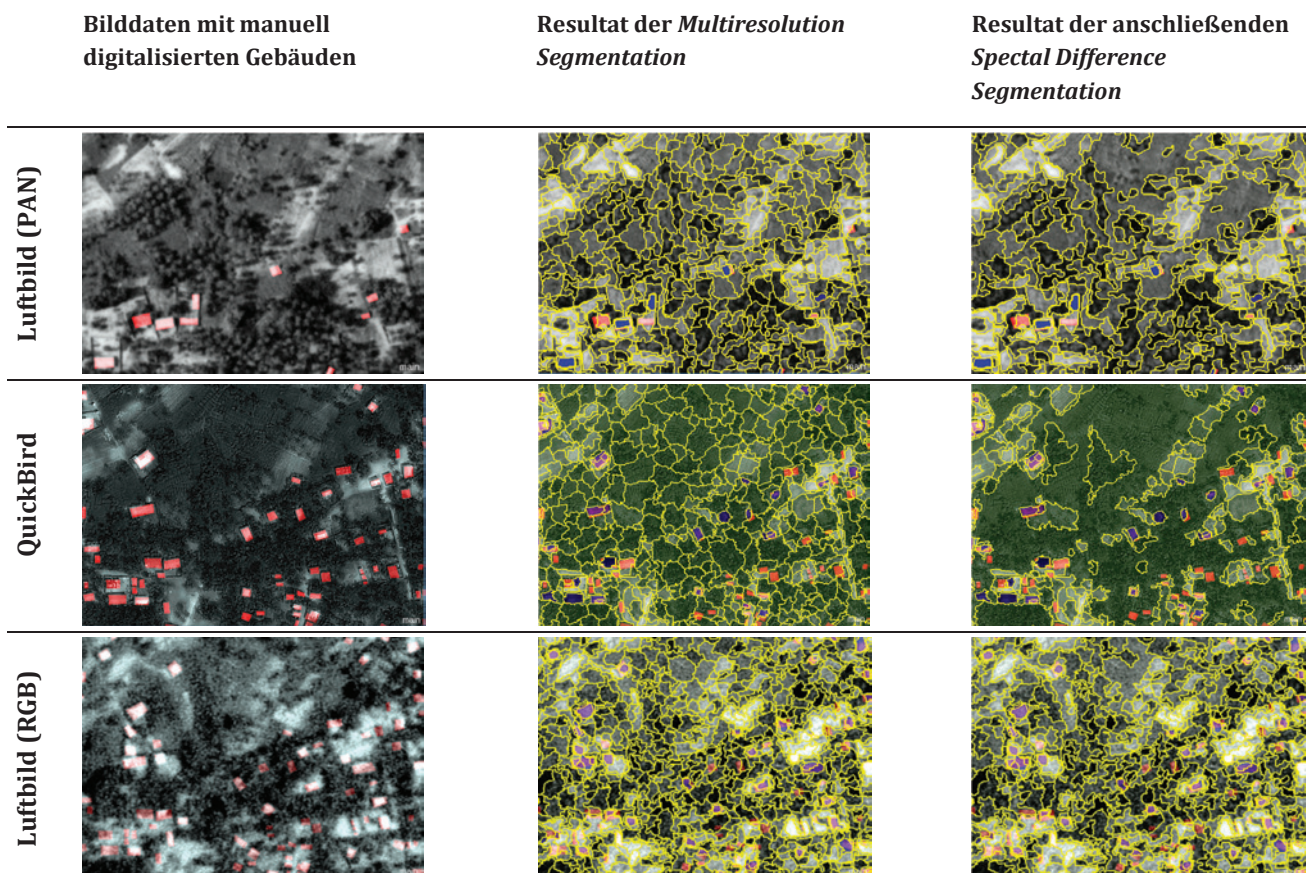


Abbildung 30: Segmentierungsergebnisse für *scale parameter 30* (gelb: Segmentgrenzen; rot: manuell digitalisierte Gebäude; blau/violett: Segmente, die zu mind. 50 % mit digitalisierten Gebäuden überlappen)

<sup>56</sup> Begründung für die 50%-Überschneidung findet sich in Kapitel 7.1.1.2.



Tabelle 9: Quantitative Qualitätsevaluierung der Segmentierungsergebnisse

Segmentierung	Anzahl Referenzen	Referenzen mit Zuordnung eines Segmentes	Anzahl Segmente	zugeordnete Segmente	Connectivity (der zugeordneten Segmente)	Detektionsrate	FN / P
1995	380	155	15244	173	0,945	0,408	0,592
2002	1101	403	9886	567	0,831	0,366	0,634
2007	1542	659	22507	786	0,912	0,427	0,573

Bei kleineren Segmenten ist die Detektionsrate höher (siehe Sturm & Weidner 2009). Wäre die spektrale Information ein zur Verfügung stehender Merkmalskomplex, der in die Klassifizierung eingehen kann, würde man sich möglicherweise für eine Segmentierung mit kleinerem *Scale Factor* entscheiden, damit möglichst viele Segmente als potentiell Klassifizierungsergebnis zur Verfügung stehen. Da im Falle der vorliegenden Datenlage jedoch die Klassifizierung auf Formmerkmalen aufbauen soll, ist die *Connectivity* das höher zu wertende Entscheidungskriterium. In den vorbereitenden Tests für Sturm-Hentschel et al. 2011 und Sturm et al. 2011 wurden die unterschiedlichen Segmentierungen in die Klassifizierung eingeführt. Dabei erwies sich trotz der offensichtlichen Defizite die hier vorgestellte Segmentierung als die geeignetste.

### 7.2.2.2 Ergebnisse der segmentbasierten Klassifizierungen und ihre Bewertung

Die Ergebnisse der Segmentierung zeigten, dass nur ca. 40 % der digitalisierten Gebäude durch ein oder mehrere Segmente repräsentiert wurden (siehe Detektionsrate in Tabelle 9). Somit können auch nur diese in die Klassifizierung eingehen. Die Merkmale und deren Wertebereiche wurden im wissensbasierten Ansatz so gewählt, dass die Trainingssegmente möglichst vollständig klassifiziert wurden. Nach welcher Entscheidung OptimalBox die Wertebereiche festlegt, ist seitens Definiens bedauerlicherweise nicht dokumentiert. Alle Klassifizierungsansätze ordnen der Klasse „Gebäude“ zu viele Segmente zu. Dabei lässt sich Folgendes beobachten:

- d) In den Intensitätsdaten des QuickBird-Bildes werden in allen Ansätzen zumindest in den vegetationsbedeckten Gebieten im Norden (Senken), im Zentrum (verlandete Lagune) und im Süden (Plantagen) weniger Segmente fälschlich als *Gebäude* klassifiziert als in den Intensitätsdaten der Luftbilder. In der Segmentierung hatte sich schon gezeigt (s.o.), dass sich die Vegetationsflächen in den QuickBird-Daten homogener zeigten, dadurch größere Segmente bildeten und somit allein über das Formmerkmal „Flächengröße“ abgetrennt werden können.
- e) Alle OptimalBox-Ergebnisse zeigen mehr Falschpositive als die Ergebnisse der wissensbasierten Klassifizierung, obwohl sie prinzipiell als objektiver im Vergleich zu den wissensbasierten Ansätze gelten.
- f) Der Hauptgrund der hohen Raten an Falschpositiven ist die Ähnlichkeit mit Vegetationsflächen, Sandflächen und Gebäudeflächen ähnlicher Form: So zeigen beispielsweise Segmente innerhalb der verlandeten Lagune durch Felder und Büsche hausähnliche Formen; oder die Straße durch die verlandete Lagune, die durch „Alleepalmen“ teilweise überdeckt wird und somit kein durchgängiges Segment bilden kann, sondern kleine Abschnitte; oder Flächen innerhalb der Plantagen im Süden zeigen gebäudeähnliche Formen aufgrund der regelmäßigen Anordnung der Bäume.

Die quantitative Bewertung der Klassifizierung ist in Tabelle 10 auf der Folgeseite aufgeführt. Zwar zeigt die *Overall Accuracy* hohe Werte. Die vielen Falschpositiven schlagen sich jedoch im sehr geringen *F-Score* wider. Die Ergebnisse des wissensbasierten Ansatzes (*WA*) sind besser sind als die der OptimalBox-Klassifizierungen (*OB*). Im Vergleich der *OB*-Klassifizierungen fällt auf, dass das Ergebnis, das aus dem direkten Training mit den Daten von 2007 resultierte, schlechter ist als das Ergebnis mit den Zugehörigkeitsfunktionen, die aus dem Training mit den Daten von 2002 hervorgehen. Es ist nicht klar, wie der *OB*-Ansatz die Zugehörigkeitsfunktionen im Training optimiert. Hier existiert noch Verbesserungspotential bei den OptimalBox-Prototypen von Definiens.

Tabelle 10: Quantitative Qualitätsbewertung der segmentbasierten Klassifizierungen

	<b>Overall accuracy</b>	<b>F-Score</b>	<b>Youden's Index</b>	<b>True Positive Rate</b>	<b>True Negative Rate</b>	<b>Positive Predictive Value</b>	<b>Negative Predictive Value</b>
<b>WA 1995</b>	<b>0,88</b>	<b>0,03</b>	0,55	0,68	0,88	0,02	0,99
<b>OB 1995 (training 2002)</b>	<b>0,77</b>	<b>0,02</b>	0,59	0,82	0,77	0,01	0,99
<b>OB 1995</b>	<b>0,80</b>	<b>0,02</b>	0,68	0,88	0,80	0,01	0,99
<b>WA 2002</b>	<b>0,93</b>	<b>0,13</b>	0,74	0,81	0,93	0,07	0,99
<b>OB 2002</b>	<b>0,87</b>	<b>0,08</b>	0,87	0,99	0,87	0,04	0,99
<b>WA 2007</b>	<b>0,82</b>	<b>0,09</b>	0,63	0,81	0,82	0,05	0,99
<b>OB 2007 (training 2002)</b>	<b>0,67</b>	<b>0,06</b>	0,62	0,95	0,67	0,03	0,99
<b>OB 2007</b>	<b>0,61</b>	<b>0,05</b>	0,58	0,98	0,60	0,03	0,99

Die segmentbasierte Klassifizierung wurde exemplarisch am Transekt Djéffa durchgeführt. In den Ausführungen wurde deutlich, dass die Ergebnisse zu schlecht sind, um in weiterführenden Untersuchungen zu einer verlässlichen Charakterisierung von Untersuchungsgebieten geschweige denn ihrer Veränderungen hinzugezogen zu werden. Aus diesem Grund wurden die anderen Transekte nicht segmentbasiert klassifiziert, und die weiteren Analysen werden ausschließlich basierend auf den Ergebnissen der visuellen Interpretation fortgeführt.

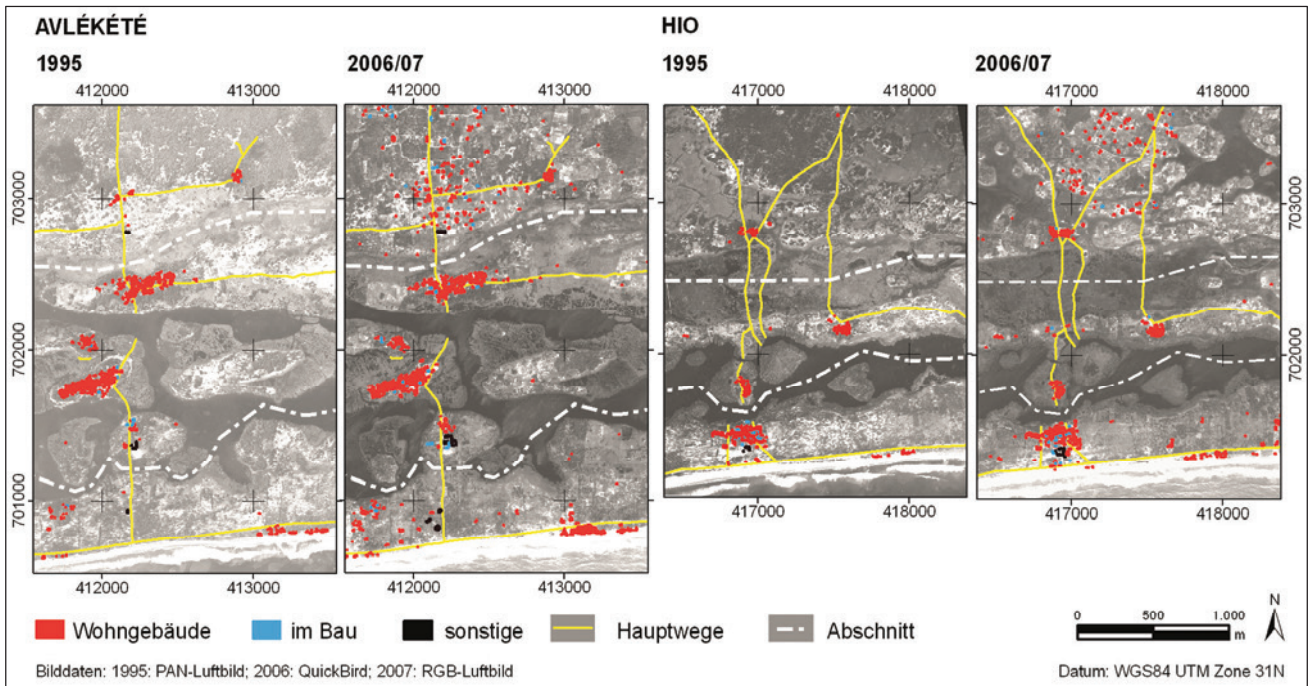
### 7.3 Ergebnisse der Analyse räumlicher Siedlungsstrukturen und ihrer Veränderungen

Schon bei der Kurzpräsentation der Ergebnisse der Gebäudeinterpretation aus den drei Jahren in Kapitel 7.2.1 wurde festgestellt, dass der Betrachter bei einer Präsentation der Ergebnisse nebeneinander unverzüglich einen Vergleich beginnt und somit in eine qualitative Änderungserkennung übergeht. Dies gilt auch für die Ergebnisse räumlicher Analysen. Daher werden die Ergebnisse der Interpretation sowie diejenigen der räumlichen Analyse in diesem Kapitel vorgestellt, um mit einer qualitativen Veränderungsbetrachtung zu beginnen und diese in eine quantitative Veränderungsanalyse münden zu lassen.

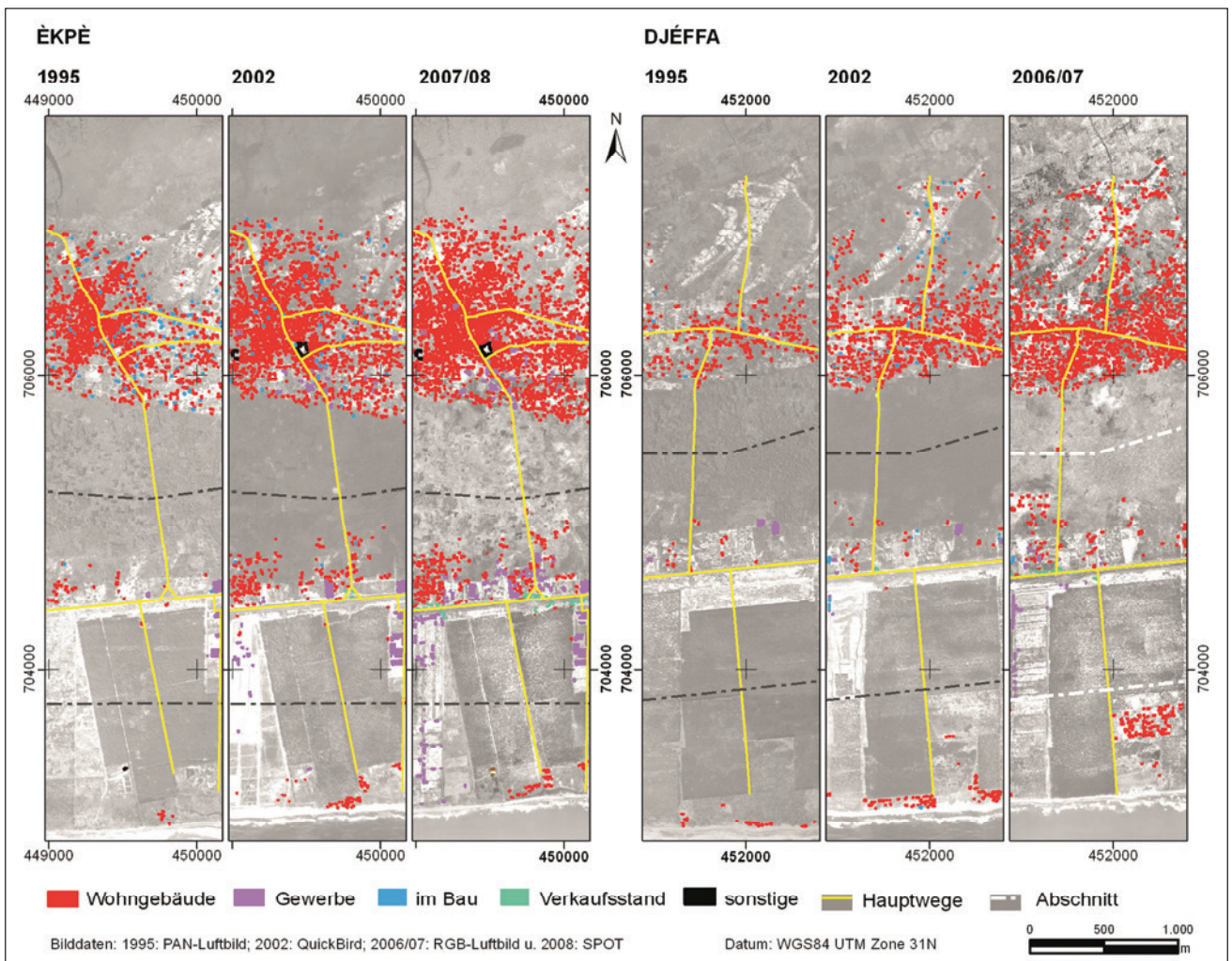
#### 7.3.1 Qualitative Beschreibung der räumlichen Siedlungsstrukturen und ihrer Veränderungen

Die Ergebnisse der visuellen Interpretation werden in Karte 13 und Karte 14 vorgestellt. In den *Transekten Avlékété und Hio* (Karte 13) werden die Gebäudeklassen *Wohnhaus*, *Gebäude im Bau* und *Sonstige* angetroffen. Die Klasse *Sonstige* enthält größere Gebäudekomplexe wie Hotels, Schule, Gesundheitszentrum und Arrondissementverwaltung. Es werden die Interpretationsergebnisse von 1995 gezeigt sowie die Synthese der Interpretationen von 2006 und 2007: Zwischen den Aufnahmen von 2006 und '07 liegen vier Monate. Daher sind Veränderungen, die in diesem Zeitraum auftreten, im Maßstab von Karte 13 nicht erkennbar. Außerdem sind in den QuickBird-Daten von 2006 *im Bau* befindliche Gebäude zu sehen, in den Luftbild-Scans von 2007 aufgrund der geringeren Auflösung jedoch nicht. Die *Transekte Èkpè und Djéffa* (Karte 14) weisen neben den auch in den Transekten im Arrondissement Avlékété existenten Gebäudeklassen zusätzlich die Klassen *Gewerbegebäude* und *Verkaufsstand* auf – hauptsächlich südlich der verlandeten Lagune. Gewerbeklassen lassen sich oftmals durch ihren Kontext einer größeren Gewerbefläche interpretieren. Alle Bereiche der Untersuchungsräume zeigen Besiedlung, die ausnahmslos zunimmt. Es lassen sich zum einen kompakte Dörfer und Ortschaften erkennen; außerdem Streusiedlungen. Innerhalb der Siedlungsprozesse sind folgende Tendenzen erkennbar, die später auch quantitativ erfasst werden:

- Verdichtungen innerhalb schon existenter Siedlungen
- Erweiterungen existenter Siedlungen und Zersiedelung
- Entstehung neuer Siedlungs- und Gewerbebereiche
- Verlagerung der Siedlungen durch fortschreitende Küstenerosion im Süden des Arrondissements Èkpè



Karte 13: Gebäudeklassen in den Transekten Avlékété und Hio



Karte 14: Gebäudeklassen in den Transekten Èkpè und Djéffa

Alle Transekte werden von *Wohngebäuden* dominiert, die sich in allen Transekten ausbreiten. In den Auswertungen von 1995, 2002 (Arrondissement Èkpè) und 2006 (Arrondissement Avlékété) sind innerhalb und außerhalb der Siedlungen verstreut *Gebäude im Bau* anzutreffen – Indizien für Siedlungswachstum. Die meisten dieser Gebäude sind zum nachfolgenden Zeitpunkt fertiggestellt, was diesen Prozess bestätigt. Gebäude breiten sich ansonsten besonders entlang der Hauptverbindungswege aus: entlang der Küstenstraße (*Route de Pêche*) in Avlékété und Hio, entlang der Verbindungsstraße in Èkpè und Djéffa, die Cotonou mit Porto-Novo bzw. Nigeria verbindet sowie entlang der Nord-Süd-Verbindungen in den Transekten. Gleichzeitig ist zu beobachten, dass sich das Wegenetz ausbreitet. Durch die langen Zeiträume zwischen den Beobachtungen lässt sich jedoch nicht sicher feststellen, ob der Ausbau des Wegenetzes dem Siedlungswachstum folgt – zumal es sich meist um einfache Pfade, Sandwege oder Pisten handelt. Vergleicht man die beiden suburbanen Transekte, fällt auf, dass die Ortslage Èkpè schon 1995 relativ kompakt den nördlichen Bereich einnimmt, während Djéffa noch eine lockere und kleine Siedlung darstellt. 2007 ist auch Djéffa zu einer deutlich sichtbaren Siedlung herangewachsen. Im mittleren Teil entlang der Straße sind in Djéffa und besonders in Èkpè zunehmend gewerblich genutzte Gebäude erkennbar. In beiden Gebieten ist zwischen den Zeitpunkten eine Zunahme an Verkaufsständen entlang der Straße erkennbar. Insbesondere Èkpè verzeichnet im mittleren Bereich eine starke Zunahme an großen Gewerbegebäuden bzw. überdachten Gewerbeflächen sowie an Verkaufsständen. Für das Arrondissement Èkpè wirkt sich aus, dass Cotonou im Westen – das ökonomische und administrative Zentrum – und Porto-Novo im Osten – die politische Hauptstadt – gemeinsam eine Bevölkerungskonzentration zeigen und die dazwischen liegenden Orte Standortvorteile haben, die zu einem relativ beschleunigten Wachstum führen. Daher wird bei N'Bessa (1997) in diesem Zusammenhang auch von einer *Doppel-Stadt (doublet urbain)* gesprochen. Domingo (2007) nutzt den Begriff des *entre-deux villes*. Im Arrondissement Avlékété fallen besonders die Siedlungszunahmen im Norden auf. Domingo (2007) nutzt den Begriff des *entre-deux villes* auch für den Bereich Cotonou-Ahozon entlang der Route Cotonou-Ouidah. Dieser Bereich liegt nördlich des Arrondissement Avlékété und scheint in dieses hineinzuwirken, was die Zunahme von Siedlung im Norden der Untersuchungstransekte indiziert. In Avlékété führt die Straße von Pahou im Norden ins Untersuchungsgebiet hinein. Die beiden Siedlungsgebiete wachsen aufeinander zu, was während der Ortsbegehung bestätigt werden konnte.

### 7.3.2 Auswertung der statistischen räumlichen Analysen

Die signifikante Siedlungszunahme kann auch in den quantitativen Analysen der Gebäudeanzahlen und der überbauten Flächen aufgezeigt werden, wie in Tabelle 11 deutlich wird.

Die suburbanen Transekte *Djéffa* und *Èkpè* verzeichnen die höhere Gebäudezunahme. Djéffa fällt durch seinen starken Zuwachs um über 300% ins Auge. Das Cotonou-nähere Èkpè zeigt die höchsten absoluten Gebäudezahlen; die Gebäude haben sich im gleichen Zeitraum in ihrer Anzahl und der überbauten Fläche jedoch „nur“ etwas mehr als verdoppelt. Die ruralen Transekte *Avlékété* und *Hio* verzeichnen einen geringeren Zuwachs bei Gebäuden als die suburbanen. Dabei verzeichnet hier jedoch das Cotonou-nähere Transekt Hio den höheren Zuwachs.

Nach der visuellen Beschreibung, die im vorigen Abschnitt realisiert wurde, ist zu erwarten, dass das Siedlungswachstum nicht in allen Transektabschnitten gleich ist. Die Diagramme in Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen die unterschiedlichen Siedlungszuwächse in den Abschnitten der vier Transekte<sup>57</sup>.

Tabelle 11: Gesamtzunahme der Gebäude im Zeitraum 1995–2007

	Gebäudeanzahl			Überbaute Fläche (ha)		
	1995	2007	Anstieg (in %)	1995	2007	Anstieg (in %)
<b>Avlékété</b>	562	893	<b>59</b>	2,7	5,2	<b>94</b>
<b>Hio</b>	252	527	<b>109</b>	1,2	2,6	<b>110</b>
<b>Èkpè</b>	1237	2771	<b>124</b>	11,7	25,7	<b>119</b>
<b>Djéffa</b>	380	1614	<b>325</b>	2,9	12,5	<b>336</b>

<sup>57</sup> Die Werte der einzelnen Zeitpunkte sind getrennt zu betrachten – die gepunkteten Linien dienen lediglich der Verdeutlichung. Informationen über den Verlauf des Prozesses zwischen den Zeitpunkten können aus den wenigen Aufnahmepunkten nicht abgeleitet werden.

Im *Arrondissement Avlékété* wachsen in beiden Transekten die nördlichen Abschnitte am stärksten, wie schon qualitativ beobachtet wurde. Die mittleren Abschnitte sind relativ konstant, zeigen lediglich eine schwache Zunahme. Der Bereich südlich der verlandeten Lagune zeigt deutliches, jedoch geringeres Wachstum als der Norden.

Im *Arrondissement Èkpè* sind die Nordbereiche mit den Ortschaften Èkpè und Djéffa deutlich stärker besiedelt als die Bereiche südlich der verlandeten Lagune. In Djéffa ist der nördliche Abschnitt im Zeitraum 2002–2007 sogar stärker gewachsen als im Zeitraum 1995–2002.

Wesentliche Faktoren, die zur Bebauung von Flächen führen, scheinen neben individuellen Entscheidungsprozessen Überschwemmungssicherheit und -risiko in der Regenzeit bzw. die Verkehrsanbindung.

Der Vergleich der Gebäudeanzahl mit derjenigen der überbauten Fläche hat in Tabelle 11 gezeigt, dass die überbaute Fläche in allen Transekten bis auf Èkpè einen stärkeren Anstieg verzeichnet als die Anzahl. Dies lässt darauf schließen, dass entweder die Gebäude durch größere ersetzt werden oder größere Gebäude hinzukommen. Die Analyse der Gebäudegrößenverteilungen, wie sie an Hand der Histogramme in Abbildung 33 und Abbildung 34 auf der Folgeseite vorgestellt werden, kann darüber Aufschluss geben.

In beiden Transekten des *Arrondissement Avlékété* haben in allen Jahren Gebäude ihr Maximum in der Verteilung bei 20–40 m<sup>2</sup> Fläche. 2006/07 nimmt der Anteil ab zugunsten größerer Gebäude. In Hio ist in diesem Zusammenhang ein Anstieg von fast 5% der Klasse der Gebäude mit 40–60 m<sup>2</sup> Grundfläche zu verzeichnen.

Im *Arrondissement Èkpè* zeigen sich Unterschiede zwischen den Transekten. In Djéffa ist die Dominanz der Klasse der 20–40 m<sup>2</sup>-Gebäude nicht so stark wie in den vorgenannten Transekten – die Anteile größerer Gebäude sind nur wenig geringer; insbesondere 2007 nimmt ihr Anteil deutlich zu und zeugt von einer Veränderung der Bebauung mit größeren Gebäuden. 2007 hat die Klasse der 40–60m<sup>2</sup>-Gebäude ihr Maximum in Djéffa. In Èkpè bleibt der Anteil der Größenklassen durchweg nahezu gleich.

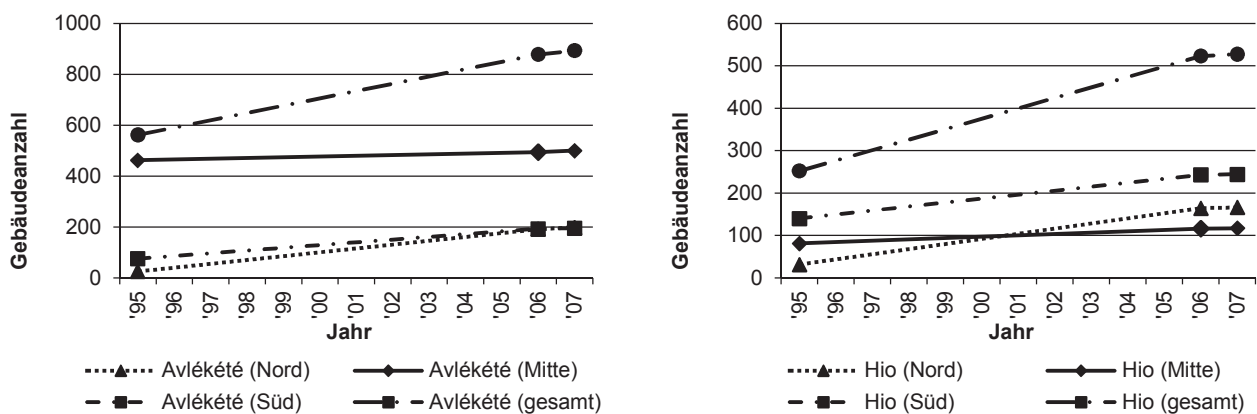


Abbildung 31: Gebäudezunahme im Arrondissement Avlékété

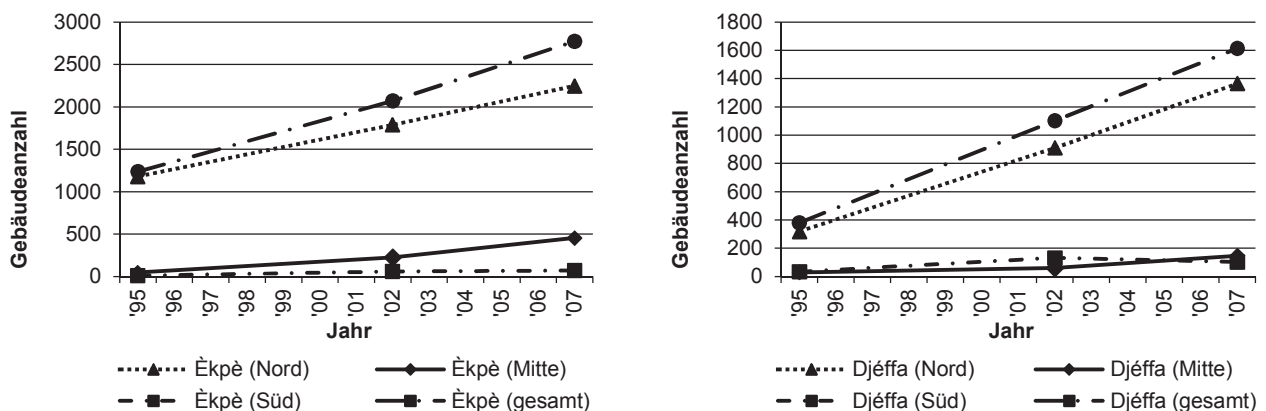


Abbildung 32: Gebäudezunahme im Arrondissement Èkpè

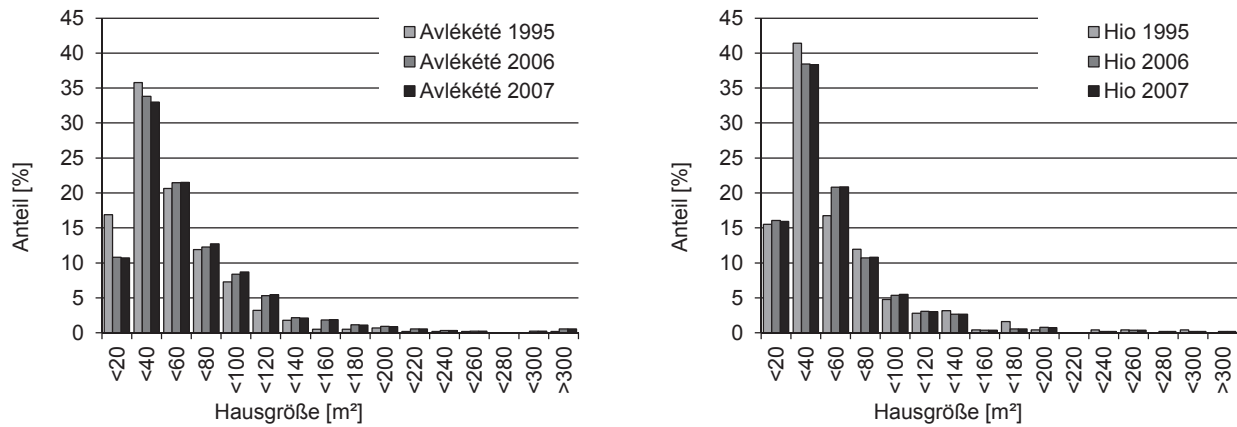


Abbildung 33: Gebäudegrößenverteilung im Arrondissement Avlékété

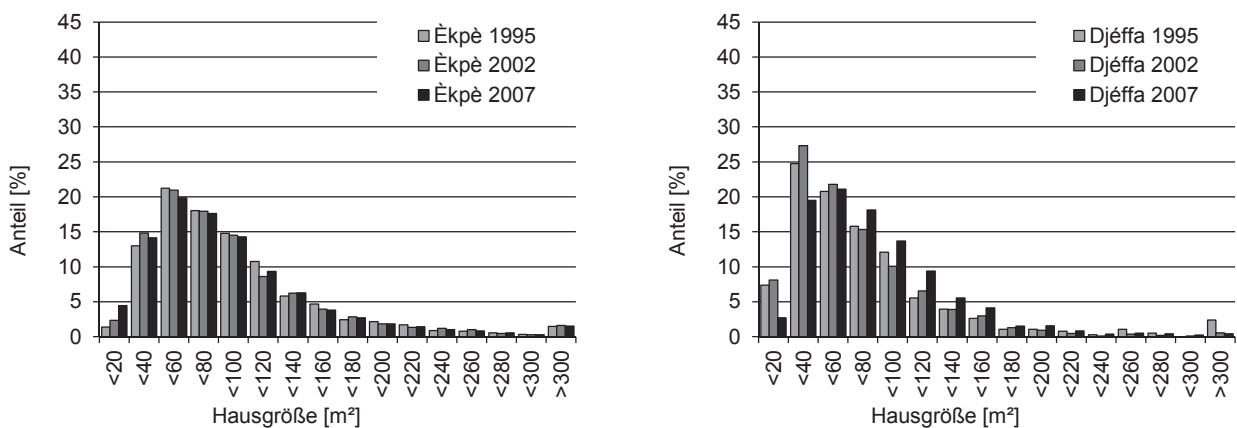


Abbildung 34: Gebäudegrößenverteilung im Arrondissement Èkpè

In allen Jahren haben die Gebäude mit 40–60m<sup>2</sup> ihr Maximum in der Verteilung – ein mögliches Zeichen für länger gewachsene urbane Strukturen. Die Kurve fällt in Èkpè zu den größeren Gebäuden hin weniger steil ab.

Die qualitative Beurteilung der Interpretationsergebnisse aus Karte 13 und Karte 14 hat einen ersten Eindruck vermittelt, welche Siedlungsprozesse ablaufen und in welchen Teilabschnitten dies geschieht. Die statistischen Ergebnisse haben dazu eine quantitative Ergänzung geliefert. Da jedoch visuell Siedlungsfronten und Siedlungsdichten nicht genau erfasst werden können, wird mit Hilfe der Bestimmung der Siedlungsfläche und ihrer Verschneidung in der Folge gezeigt, wo und in welche Richtung Siedlungswachstum auftritt; Dichteanalysen zeigen Verdichtungen auf.

Bezüglich der Analyse der Gebäudegrößenverteilungen in den Transekten hat sich gezeigt, dass insbesondere im Arrondissement Èkpè die Gebäude in ihrer Fläche eine große Streubreite aufweisen, darunter sehr flächengroße Gewerbegebäude. Daher wird dort später neben der Gebäudedichte auch die Flächendichte untersucht, um Gebiete unterschiedlicher Bebauung zu differenzieren.

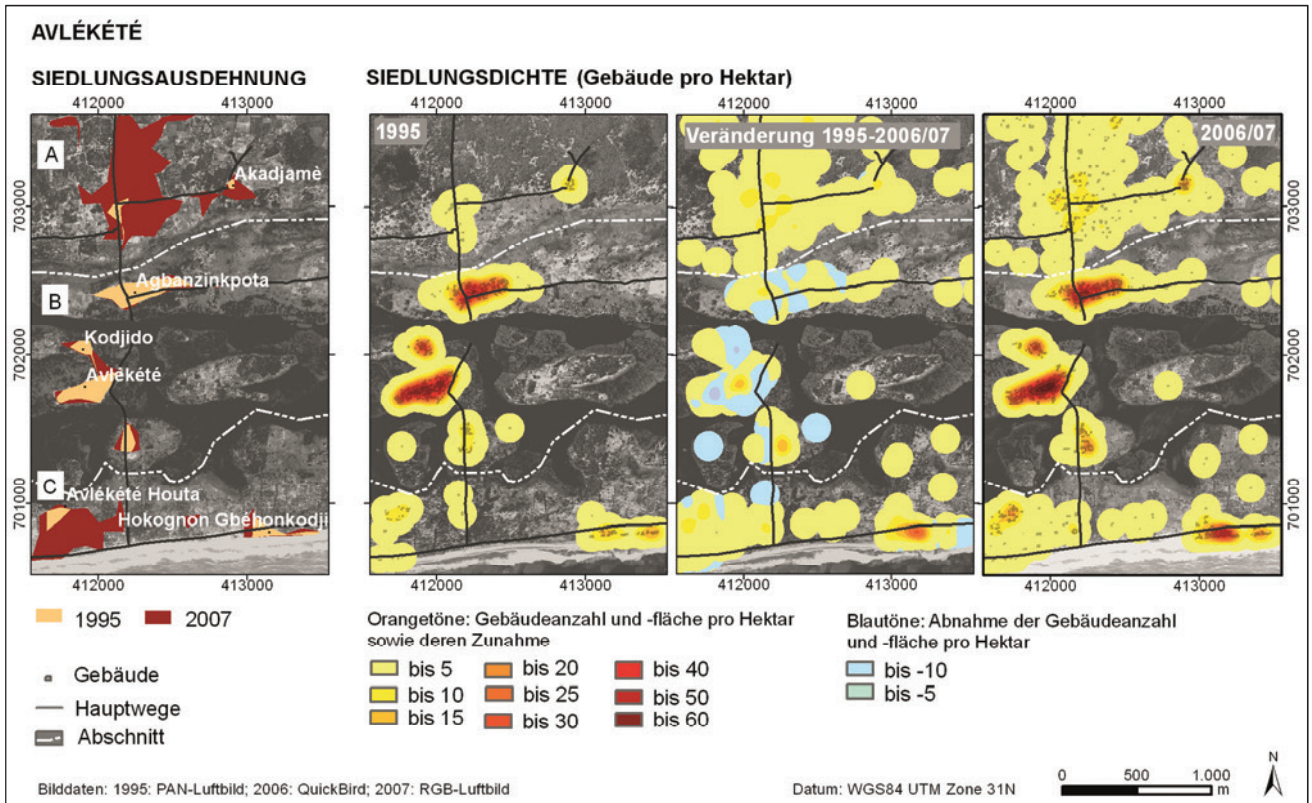
### 7.3.3 Ergebnisse der Veränderungsanalyse der Siedlungsausdehnung und -dichte

In Karte 15 bis Karte 19 werden die Siedlungsausdehnungen, Siedlungsdichten sowie deren Veränderungen zwischen 1995 und 2006/07/08 aufgezeigt. Für die vier Transekte gilt, dass die schon 1995 existenten Ortschaften in allen Bereichen und zu allen Zeitpunkten die höchsten Dichten aufweisen und zusätzlich Ausdehnung und Verdichtung zeigen. Außerdem bilden sich weitere Siedlungsgebiete.

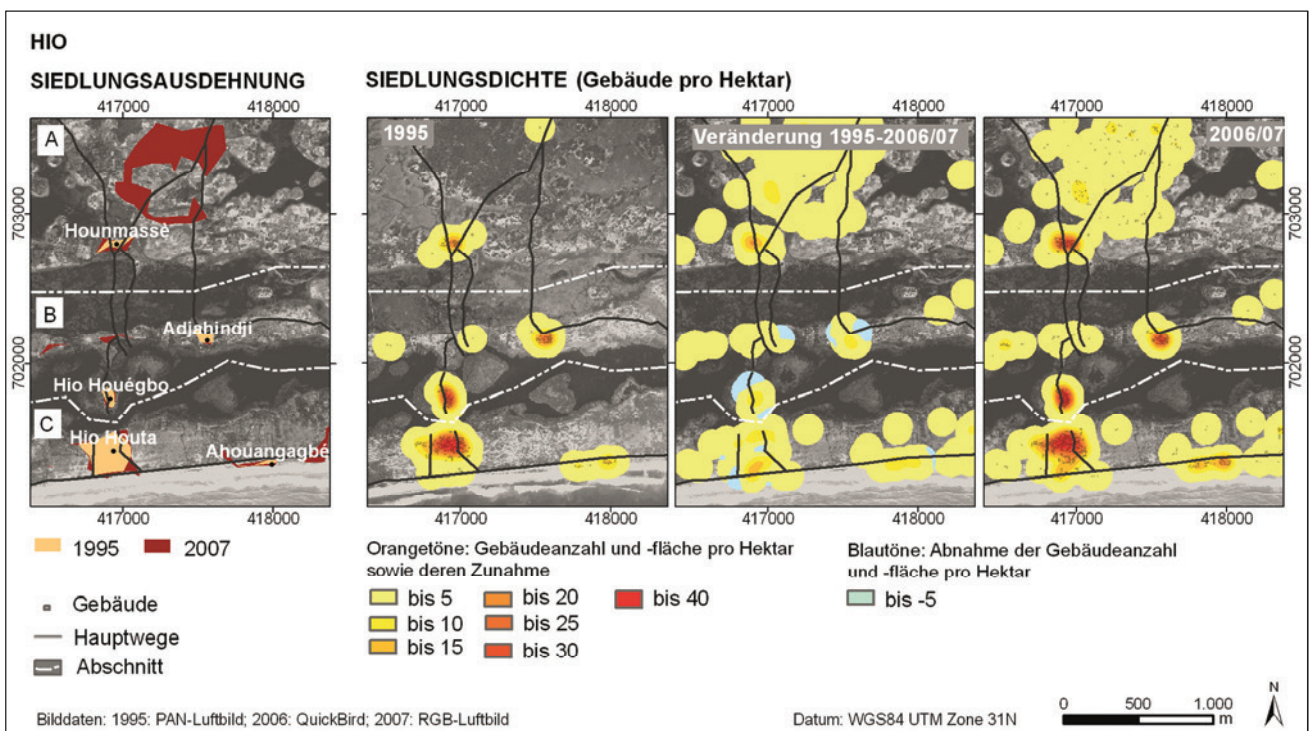
In den Transekten des *Arrondissement Avlékété* werden die Ergebnisse des Jahres 1995 den gemeinsamen Ergebnissen der Auswertungen 2006/07 gegenübergestellt (Karte 15 und Karte 16). Der Vergleich der Ausdehnungen der zusammenhängenden Siedlungsflächen zeigt in beide Transekten deutlich die großflächigen Erweiterungen

im Norden (Abschnitt A) und Ausdehnungen entlang der *Route de Pêche* im Süden (C) inklusive der Entstehung neuer Siedlungsflächen. Während in Avlékété die mittleren Siedlungen (B) sich nur leicht erweitern, entstehen in Hio in diesem Transektabschnitt zwei neue Siedlungskerne auf weiteren Lagunen(halb)inseln.

Die Siedlungszunahme geschieht in beiden untersuchten Transekten in Bereichen, die das ganze Jahr trocken liegen. In beiden Transekten verzeichnen die Nordabschnitte ausschließlich und die Südabschnitte mit wenigen Ausnahmen Verdichtung.



Karte 15: Siedlungsentwicklung im Transekt Avlékété



Karte 16: Siedlungsentwicklung im Transekt Hio

Im mittleren Bereich zeigt sich ein durchwachseneres Bild: teilweise wurden Gebäude abgerissen, verändert und neu gebaut. Im Veränderungsbild machen sich solche Verschiebungen bemerkbar. Während die Siedlungsausdehnung tatsächlich nur diejenigen Gebiete aufzeigt, in der mehrere Häuser zusammen stehen, zeigt die Siedlungsdichteauswertung auch Gebiete, in denen die Lage der Gebäude so gestreut ist, dass keine zusammenhängende Siedlungsfläche entsteht. Solch einzeln stehende Gebäude haben deutlich zum zweiten Beobachtungszeitpunkt (2006/07) hin in beiden Transekten im Arrondissement zugenommen – ersichtlich aus dem Vergleich des Siedlungsausdehnungs- und Dichteveränderungsbildes. Besonders im Nordbereich der Transekte zeigen sich die neuen Gebäude verstreut. Diese Siedlungsbereiche unterscheiden sich durch diese Zersiedelung deutlich von den älteren, kleineren und kompakteren Dörfern.

Ein Vergleich der Gebäudedichte und der Gebäudeflächendichte ist im Arrondissement Avlékété unauffällig – die Flächendichtekarten ergeben ein nahezu identisches Bild wie die Gebäudedichtekarten und werden aus diesem Grund nicht aufgeführt. Dies zeigt, dass dort Gebäude- und Gebäudeflächendichte korrelieren.

Für das Arrondissement Èkpè werden die Ergebnisse der Auswertungen der Jahre 1995, 2002 und 2007/08 (Transekt Èkpè) bzw. 2006/07 (Transekt Djéffa) in Karte 17 und Karte 19 gegenübergestellt. Der Vergleich der zusammenhängenden Siedlungsflächen zeigt in beiden Transekten die Ausweitung der Ortschaften im nördlichen Abschnitt (A), die Verbreiterung des Siedlungsstreifens entlang der Verbindungsstraße nach Porto Novo bzw. Lagos (Abschnitt B) sowie die teilweise komplette Verlagerung der Siedlungsflächen am Meer durch die Küstenerosion (Abschnitt C). In beiden Transekten weiten sich die Ortschaften in Abschnitt A besonders nach Norden in Richtung des Randbereiches des Lac Nokoué aus. Der Ausweitungsbereich wird zunächst locker besiedelt und dann nachverdichtet. Dabei ist die Verdichtung innerorts etwas stärker als in den Randbereichen. Zunächst werden die trocken liegenden Dünenzüge besiedelt. In Djéffa folgen die Siedlungstendenzen zunächst dem nordweisenden Pfad, der im Norden in ein Gerinne mündet, das eine Verbindung zum Lac Nokoué darstellt. Die Nordbereiche zeigen eine Attraktivität durch die Kombination der Nähe zu Cotonou mit der Möglichkeit, Landwirtschaft zu betreiben<sup>58</sup>. Die Erweiterungen der besiedelten Bereiche in den Abschnitten A und B betreffen auch die dazwischen liegende Lagune. Deutlich zeigt sich in beiden Zeitabschnitten eine Erweiterung der Siedlungsfläche in die Lagune hinein. Dafür werden auch zunehmend feuchtere Standorte besiedelt, da das Land dort weniger kostet<sup>59</sup>.

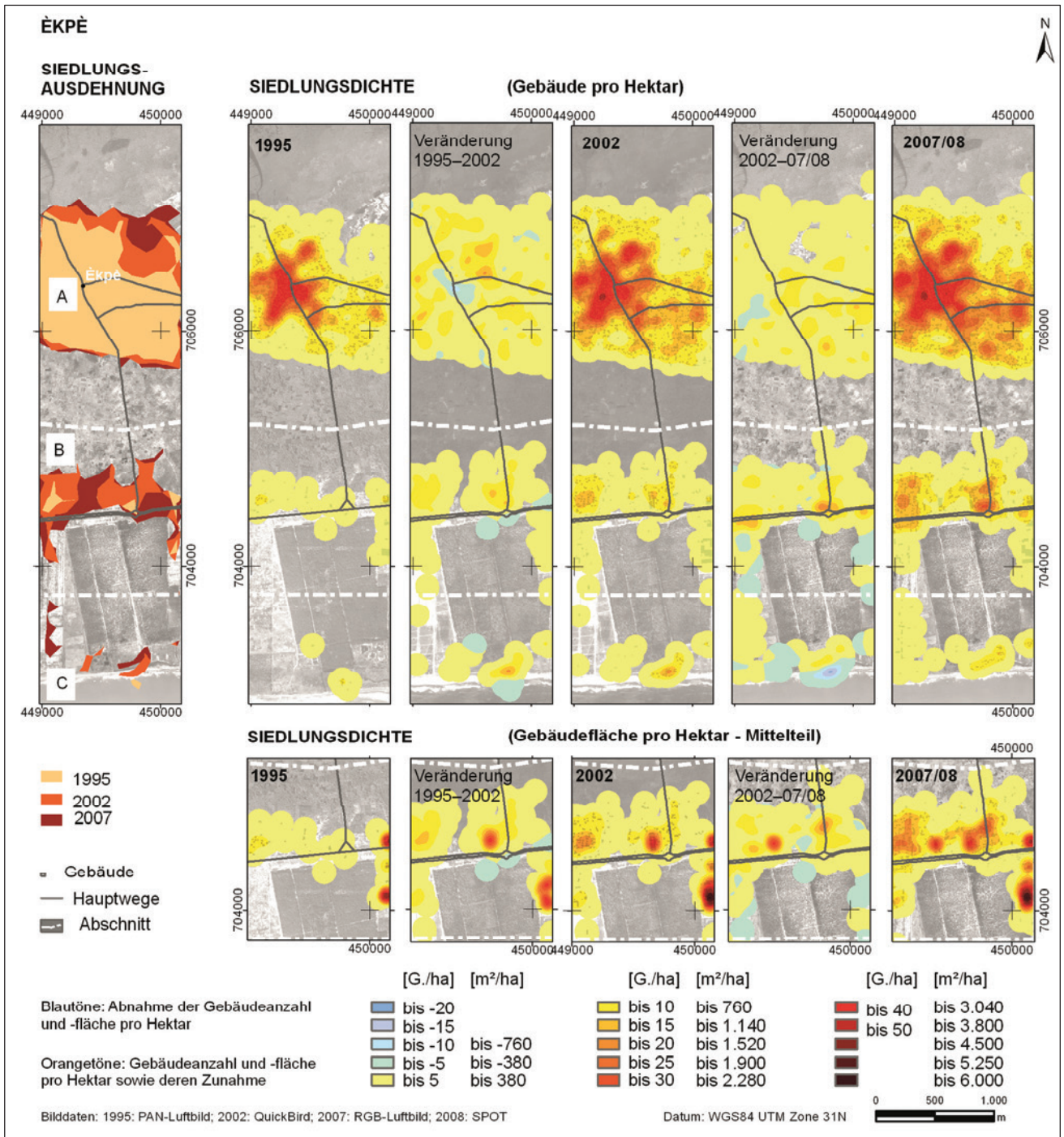
In Kapitel 7.3.2 war schon gezeigt worden, dass im Arrondissement Èkpè die Größen der Gebäude stark variieren. Zudem legt die Beobachtung räumlicher Unterschiede der Nutzungstypen im Arrondissement Èkpè – z.B. vermehrt Gewerbegebäude im mittleren Abschnitt – den Schluss nahe, dass diese Unterschiede sich auch in den Dichtekarten zeigen müssten. Der Vergleich der Gebäudedichte mit der Gebäudeflächendichte zeigt in Èkpè besonders im mittleren Bereiche solche Unterschiede auf, die in Karte 18 herausgegriffen werden: Kleine Verkaufsstände an der Kreuzung bewirken eine hohe Gebäudedichte, während sie in der Flächendichte geringe Werte erreichen. Im Kontrast dazu weisen die Gebiete mit Gewerbegebäuden geringe Gebäudedichten auf, fallen aber in der Flächendichte durch hohe Werte auf. In Djéffa zeigen sich insbesondere 2002 und 2007 im Zentrum des Ortes Djéffa Auffälligkeiten sowie 2002 am Strand: hohe Gebäudedichten verbunden mit niedrigen Flächendichten durch viele kleine Gebäude. Eine Dominanz der Flächendichte im Mittelteil wie im Transekt Èkpè bestätigt sich in Djéffa nicht – weniger Gewerbe mit großen Hallen ist ansässig.

Insgesamt lässt sich beobachten, dass trockene Bereiche für die Besiedlung bevorzugt werden. Diese waren vor der Siedlungsnutzung zum Teil landwirtschaftlich genutzt (dazu mehr in Kapitel 8); auch Ölpalmflächen bzw. Mischflächen aus Ölpalmen und natürlicher Vegetation – im Norden des Arrondissement Avlékété – werden umgenutzt. Bei der zerstreuten Besiedlung im Norden der Untersuchungsgebiete ist zu beobachten, dass oftmals die Gebäude zunächst innerhalb der bestehenden Feldflur gebaut werden. Die Felder um das Haus herum bleiben weiter in Nutzung.

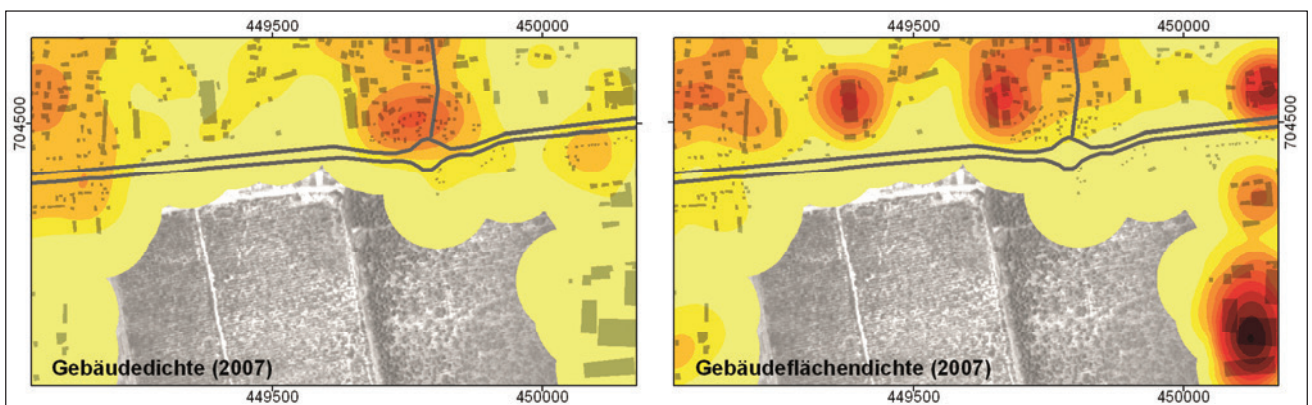
<sup>58</sup> Diese Information stammt aus eigenen Gesprächen mit Frauen, die angaben, zunächst nach Cotonou migriert zu sein, aber nochmals ihren Wohnort gewechselt hatten, um die Möglichkeit einer gewissen Selbstversorgung im Untersuchungsgebiet zu ergreifen.

<sup>59</sup> Beobachtungen und Auskünfte vor Ort.

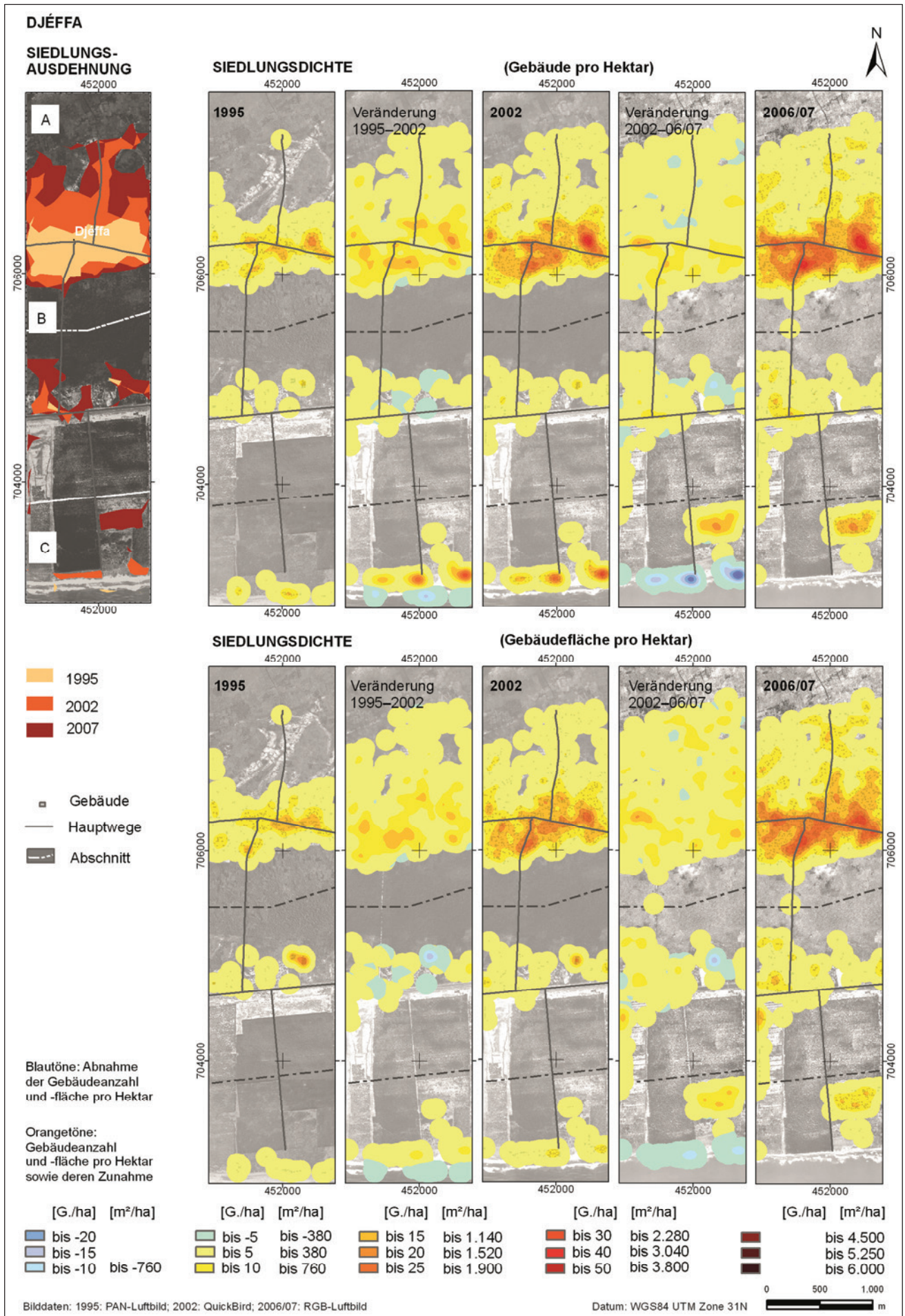




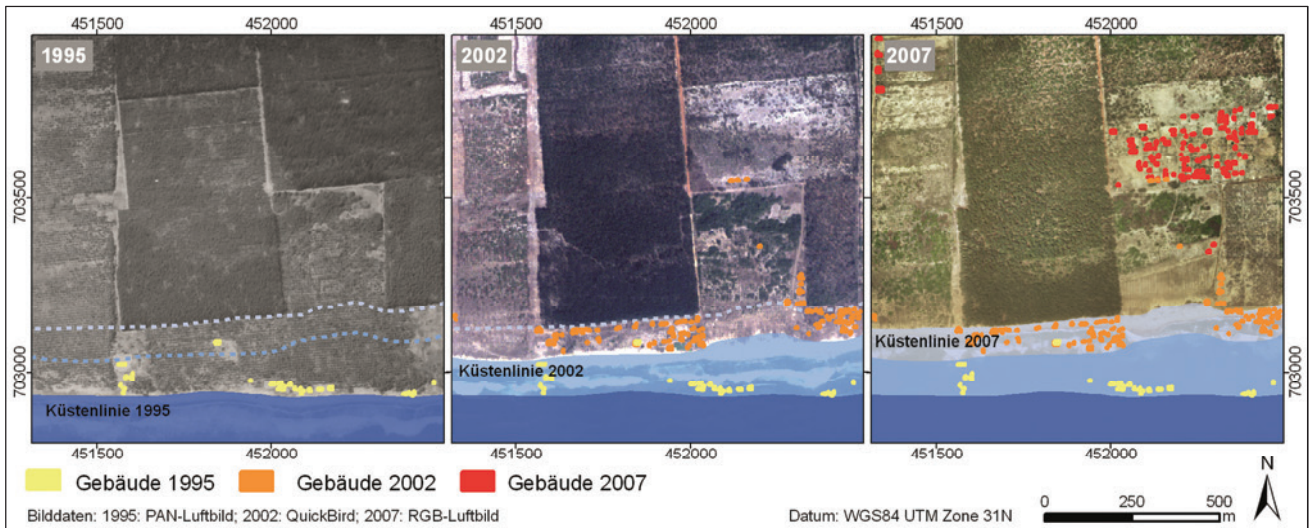
Karte 17: Siedlungsentwicklung im Transekt Ékpe



Karte 18: Vergleich der Gebäudedichte (links) und Gebäudeflächendichte (rechts)



Karte 19: Siedlungsentwicklung im Transekt Djéffa



Karte 20: Siedlungsverschiebung durch Küstenerosion

Im Küstengebiet existieren drei unterschiedliche Arten natürlicher Siedlungsbarrieren:

- *Senken (bas-fonds) und Feuchtgebiete* – zumeist ehemalige Lagunen im Ost- und Westteil der Küstenzone
- *Lagunen* – im Westteil des Litoral
- *Meer* – im Süden.

Diese Grenzen sind jedoch nicht überall ein Absolutum: Senken und ehemalige Lagunen stellen immer weniger ein Siedlungshindernis dar und werden in den letzten Jahren zunehmend besiedelt, insbesondere aus der Richtung bestehender, dichter Siedlungscluster. Aus der Auswertung der Transekte im Arrondissement Èkpè zeigt sich beispielsweise die zunehmende Besiedlung von Senken zwischen den leichten Dünenzügen im Norden des Arrondissement Èkpè und von Feuchtgebieten – zumeist naturnahe Habitate – am Rand des Lac Nokoué und in der ehemaligen Lagune. Auch außerhalb der Untersuchungsgebiete – vor allem westlich von Èkpè – zeigt sich dieses Phänomen, insbesondere mit zunehmender Nähe zu Cotonou. Es handelt sich dort überwiegend um temporär bewohnte Gebäude. Die Bewohner der Trockenzeit wohnen in der Regenzeit an anderen Standorten.

Die Siedlungsbarriere Meer ist nicht in allen Küstenabschnitten konstant. Bei ihrer Verschiebung durch Küstenerosion führt sie zu Umsiedlungen – das bedeutet Verlust ganzer Siedlungscluster und Situierung neuer Siedlungsgebiete (Karte 20).

## 7.4 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

### 7.4.1 Diskussion und Bewertung der Interpretation und der Klassifizierungen

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurde durch die Notwendigkeit der Detektion von Einzelgebäuden ein Hauptaugenmerk auf möglichst hohe geometrische Auflösung der Bilddaten gelegt. In den verfügbaren multitemporalen Luft- und Satellitendaten, die diese Vorbedingung erfüllen, ist – wie schon beschrieben – eine starke Einschränkung der spektralen wie auch radiometrischen Auflösung vorhanden. IKONOS- und QuickBird-Daten mit zumindest vier Spektralkanälen in 11bit-Auflösung existieren im Archiv zwar schon seit 2001, aber für die Anfangsjahre nur vereinzelt. Die ersten RGB-Luftbilder sind überhaupt erst – und räumlich eingeschränkt – für das Jahr 2006/07 verfügbar. Multitemporal vergleichende Arbeiten werden im Küstenraum Benins daher stets mit PAN-Luftbildern arbeiten müssen, wenn sie auf Zeiträume vor den genannten Jahren zurückgreifen. Somit ist die Auswertung multisensoraler Daten mit eingeschränkter spektraler Information auch zukünftig notwendig. Es konnte gezeigt werden, dass die visuelle Interpretation in Bezug auf die Qualität der Ergebnisse am zuverlässigsten ist und daher im Rahmen weitergehender Analysen gewählt werden sollte.

Tabelle 12: Vergleich des eigenen wissensbasierten Ansatzes (*WA*) mit der in Sturm et al. (2011)<sup>60</sup> vorgestellten Ensemble Klassifizierung (*E*) sowie der Klassifizierung unter Nutzung Morphologischer Parameter (*MP*)

	Overall accuracy	F-Score	Youden's Index	True Positive Rate	True Negative Rate	Positive Predictive Value	Negative Predictive Value
<b>WA 1995</b>	<b>0,88</b>	<b>0,03</b>	0,55	0,68	0,88	0,02	0,99
E 1995	0,98	0,26	0,38	0,39	0,99	0,19	0,95
MP 1995	0,92	0,06	0,88	0,96	0,92	0,03	0,99
<b>WA 2002</b>	<b>0,93</b>	<b>0,13</b>	0,74	0,81	0,93	0,07	0,99
E 2002	0,98	0,26	0,38	0,39	0,99	0,19	0,99
MP 2002	0,94	0,16	0,85	0,91	0,94	0,08	0,99
<b>WA 2007</b>	<b>0,82</b>	<b>0,09</b>	0,63	0,81	0,82	0,05	0,99
E 2007	0,98	0,17	0,15	0,16	0,99	0,18	0,99
MP 2007	0,90	0,17	0,80	0,89	0,90	0,09	0,99

Für die Auswertung größerer Flächen besteht jedoch immer noch Bedarf der Entwicklung eines Klassifizierungsansatzes. In Sturm et al. (2011) wurden mit Ensemble Klassifizierung (*E*) sowie der Klassifizierung unter Nutzung Morphologischer Parameter (*MP*) weitere Ansätze getestet. In Tabelle 12 werden die Ergebnisse des eigenen wissensbasierten Ansatzes (*WA*) mit den Ergebnissen aus Sturm et al. (2011) verglichen. *E* und *MP* liefern im Vergleich bessere Ergebnisse, was sich besonders im höheren *F-Score* ausdrückt, sind jedoch auch bei weitem noch nicht zuverlässig und daher für eine praxisorientierte Anwendung noch nicht einsetzbar.

#### 7.4.2 Diskussion und Bewertung der Analyse räumlicher Strukturen und ihrer Veränderungen

Allgemein lässt sich in den untersuchten Transekten mit Hilfe der manuell extrahierten Ergebnisse aus der visuellen Interpretation durchgehend eine Siedlungszunahme feststellen. Alle Siedlungen, die zu einem Zeitpunkt in den Bilddaten gefunden werden, verdichten sich bis zum nächsten Aufnahmezeitpunkt durch Auffüllung von Freiflächen. Außerdem breiten sie sich aus. Die Zentralbereiche sind zumeist die dichtesten Bereiche. Von dort aus nimmt die Dichte zum Rand von Siedlungen hin, jedoch nicht homogen, ab. Außerdem entstehen neue Siedlungsgebiete. Expansion von Siedlungen zeigt sich entlang von Straßen; aber auch die Besiedlung in die Feldflur, Savanne und in Feuchtgebiete kann vielfach beobachtet werden. Das heißt, Straßen bzw. Pisten sind expansionsfördernd, aber im Untersuchungsraum keine Vorbedingung für Siedlungswachstum. Vergleicht man diese Beobachtungen beispielsweise mit dem von Bhatta (2010) beschriebenen Siedlungswachstumsmuster, so kann festgestellt werden, dass bis auf den geclusterten Ast alle Formen in den Transekten beobachtet werden können. Als Erweiterung des isolierten Musters kann die beobachtete Bildung neuer Siedlungsgebiete gewertet werden. Die Zunahme der Siedlungen führt zu oben beschriebenen Verdrängungen anderer Landnutzungen und -bedeckungen.

Folgen der Umnutzung landwirtschaftlicher Flächen werden im folgenden Kapitel untersucht. Die zunehmende Besiedlung der Feuchtgebiete kann problematische Folgen für die Siedler wie auch die betroffenen Lebensräume haben: zum einen die Gefährdung einer wachsenden Bevölkerungszahl durch Hochwasser und damit verbundene Krankheiten, zum anderen die Veränderung der Feuchtgebiete in ihrer Habitatstruktur und ihrem Abflussverhalten – letzteres durch das Einbringen von Müll und Schutt zur Aufschüttung vor dem Hausbau, wie vielerorts beobachtet werden konnte. Die Siedlungsaktivität im Untersuchungsraum zeugt von dessen Charakteristik als Anziehungsraum des Landes, die in den einleitenden Kapiteln umrissen wurde.

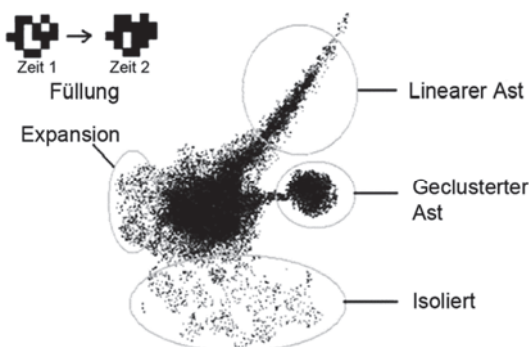


Abbildung 35: Schematisches Diagramm von Siedlungswachstumsmustern (*urban growth pattern*; nach Bhatta 2010, S.11)

<sup>60</sup> Realisierungen der *E*- und *MP*-Klassifizierungen durch Andreas C. Braun, IPF, KIT

Eine Zunahme der Wohnbebauung weist auf Migration hin; die Zunahme von Gewerbegebäuden sowie Verkaufsständen zeigt eine Ausweitung wirtschaftlicher Aktivitäten.

Der durchschnittliche jährliche Bevölkerungszuwachs lag für Gesamtbenin insgesamt nach Angaben von INSAE (2003) bei 3,25 % zwischen den Zensuserhebungen von 1992 und 2002; seither beläuft er sich nach IndexMundi (2010) auf rund 2,9 % jährlich. Innerhalb Benins zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede, wie schon in Kapitel 2.6 gezeigt wurde. Nachfolgend soll ein Vergleich der Interpretationsergebnisse mit Daten aus den Bevölkerungszählungen 1992 (aus INSAE 1994a, b) und 2002 (INSAE 2004a, b) diskutiert werden. Bei Versuchen, Interpretationsergebnisse und demographische oder sozioökonomische Daten zu koppeln, muss beachtet werden, dass die Untersuchungseinheiten – in ihrer Semantik, räumlichen Lage und Abgrenzung – vergleichbar sein müssen (siehe dazu auch Liverman et al. 1998 oder Fox et al. 2003). Angaben vieler demographischer oder sozioökonomischer Daten beziehen sich auf Individuen, Individuengruppen oder Haushalte. Diese sind nur indirekt über Gebäude detektierbar, denn per se sind Haushalte und Menschen beweglich. In Fernerkundungsdaten können nun Gebäude erfasst werden, ohne zu wissen, ob ein oder mehrere Haushalte zu einem Gebäude gehören, ob ein Haushalt mehreren Gebäuden zugeordnet werden kann und wie viele Familien bzw. Personen einem Haushalt zugeordnet werden. Eine Zuordnung von Haushalt zu Gebäuden ist in den INSAE-Daten nicht enthalten. Somit sind Bevölkerungsabschätzungen bzw. -vergleiche mit Fernerkundungsdaten im Untersuchungsraum nur genähert und nicht gesichert möglich. Lechtenböcker (1997) hat zu solchem Zweck beispielsweise intensive Erhebungen vor Ort in Simbabwe durchgeführt. Diese Frage im Untersuchungsraum zu klären, wäre eine Aufgabenstellung für weitere Forschung. Auch die Abgrenzung der Gebiete, in denen die Bevölkerungs- und Haushaltszahlen 1992 und 2002 erhoben wurden, ist nicht dokumentiert oder kartiert.

Im Folgenden wird trotz der soeben beschriebenen Probleme das Wachstum der Haushalte und der Bevölkerung aus den INSAE-Daten mit den Gebäudezuwachs in Beziehung gesetzt (siehe dazu Tabelle 13 und Tabelle 14). Dabei wird aus Gründen der einfacheren Vergleichbarkeit die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate errechnet, obwohl dies strenggenommen nicht zulässig ist – Bebauung und Zuwachs geschehen nicht gleichmäßig.

Das *Arrondissement Avlékété* verzeichnet nach den Daten von INSAE (1994a) und INSAE (2004a) ein durchschnittliches jährliches Wachstum (DJW) von lediglich 0,8 % (Tabelle 13). Die Ortschaften Avlékété und Hio verzeichnen im Vergleich der Werte gar einen Bevölkerungsschwund. In den Auswertungen der Interpretationen konnte jedoch beobachtet werden, dass sowohl Avlékété als auch Hio in ihrer Gebäudezahl zunehmen, in Hio gar deutlich um insgesamt rund 63 % zwischen 1995 und 2007, was einem DJW von 4,2 % entsprechen würde – wenn für Vergleichszwecke ein gleichmäßiges Wachstum angenommen wird. Wird davon ausgegangen, dass es sich bei Kpota (in INSAE 1994a) bzw. Agbanzinkpota (INSAE 2004a) um ein und dieselbe Ortschaft handelt, was von Ortskundigen bestätigt wurde, dann wäre nach INSAE (1994a) und INSAE (2004a) nur dort Bevölkerungszuwachs zu verzeichnen. Werden Agbanzinkpota und Avlékété zusammengefasst, so ist der DJW der Haushalte mit der DJW der Wohngebäude vergleichbar. Ob darin eine Korrelation besteht, kann nicht sicher gesagt werden, da die anderen Werte überhaupt nicht vergleichbar sind.

Tabelle 13: Vergleich des errechneten Wachstums aus den Bevölkerungszählungen 1992 (INSAE 1994a) und 2002 (INSAE 2004a) <sup>(1)</sup> für das Arrondissement Avlékété mit den Interpretationsergebnissen <sup>(2)</sup> (Gesamtzuwachs = GZ; Durchschnittliche jährliche Wachstumsrate = DJW)

	Haushalte <sup>1</sup>		Bevölkerungszahl		Wohngebäude <sup>2</sup>		
	GZ [%]	DJW [%]	GZ [%]	DJW [%]	GZ [%]	DJW [%]	
Arrondissement Avlékété	11,2	1,1	8,7	0,8			
Avlékété	-36,1	-4,4	-34,9	-4,2			
Kpota (1992)/ Agbanzinkpota (2002)	80,8	6,1	108,1	7,6			
<b>Avlékété + Kpota</b>	<b>24</b>	<b>2,2</b>	<b>31,5</b>	<b>2,8</b>	<b>Avlékété + Agbanzinkpota (B+C)</b>	<b>29,4</b>	<b>2,2</b>
					<b>Transekt Avlékété</b>	<b>53,5</b>	<b>3,6</b>
<b>Hio</b>	<b>-15</b>	<b>-1,6</b>	<b>-11,6</b>	<b>-1,2</b>	<b>Hio – nur B+C</b>	<b>63,3</b>	<b>4,2</b>
					<b>Transekt Hio</b>	<b>112,2</b>	<b>6,5</b>

Tabelle 14: Vergleich des errechneten Wachstums aus den Bevölkerungszählungen 1992 (INSAE 1994b) und 2002 (INSAE 2004b) <sup>(1)</sup> für das Arrondissement Èkpè mit den Interpretationsergebnissen <sup>(2)</sup> (Gesamtzuwachs = GZ; Durchschnittliche jährliche Wachstumsrate = DJW)

	Haushalte <sup>1</sup>		Bevölkerungszahl <sup>1</sup>		Wohngebäude <sup>2</sup>	
	GZ[%]	DJW [%]	GZ [%]	DJW [%]	GZ [%]	DJW [%]
Arrondissement Èkpè	147,2	9,5	123,5	8,4		
Èkpè I	116,8	8	103,8	7,4		
Èkpè II	313,1	15,2	270,5	14		
Èkpè III	118,7	8,1	81	6,1		
<b>Èkpè gesamt</b>	<b>191,7</b>	<b>11,3</b>	<b>162,1</b>	<b>10,1</b>	<b>Transekt Èkpè</b>	<b>116,4</b> <b>6,6</b>
Djéffa-Hetegbonou (1992) Glegbonou (2002)	-21,8	-2,4	-32,7	-3,9		
Djéffa-Houedome	732	23,6	696,3	23,1		
<b>Djéffa gesamt</b>	<b>89,5</b>	<b>6,6</b>	<b>69,3</b>	<b>5,4</b>	<b>Transekt Djéffa</b>	<b>324,7</b> <b>12,8</b>

Das *Arrondissement Èkpè* verzeichnet auf allen Maßstabsebenen – bis hin zu den Untereinheiten der Ortschaften einen deutlichen Zuwachs (Tabelle 14). Welcher der Abschnitte nun dem Transekt Èkpè zugeordnet werden kann, ist jedoch nicht sicher – vermutlich Èkpè I. Ebenso konnte bislang nicht geklärt werden, ob es sich bei Djéffa-Hetegbonou und Djéffa-Glegbonou um denselben Ortsteil handelt. Die Einheiten wurden jeweils zu einem Gesamt- raum zusammengefasst.

Die Beobachtung der zum Teil großen Differenzen in den Zuwächsen der Haushalte und damit zusammen in der Bevölkerung zeugt von sehr unterschiedlichen Voraussetzungen der Regionen. Die Küstenregion gilt zwar als Einwanderungsraum – jedoch nicht gleichmäßig. Mit Hilfe der Fernerkundung konnten regionale Disparitäten von Siedlungstätigkeiten aufgedeckt werden, die es möglich machen, räumlich differenziertere Entwicklungen, die in den demographischen Daten nicht sichtbar werden, in die Analyse mit einzubeziehen – wie zum Beispiel die hohen Siedlungsaktivitäten in den Nordabschnitten Avlékétés und Hios.

Die untersuchte Siedlungsexpansion und -verdichtung sind also Resultat und Indikator von Migration innerhalb der Küstenzone und in sie hinein, wie sie bezüglich ihrer treibenden Kräfte beispielsweise von Teka (2010) untersucht wurde.

Bezüglich der Migration in die Küstenzone geben 55 % der befragten Männer bessere Arbeits- und Studienbedingungen im Küstenraum als Migrationsgrund an. Bei den Frauen sind mit rund 63 % familiäre Gründe bzw. der Zusammenzug mit dem Partner Beweggründe zum Wohnortwechsel. Bezüglich der internen Migration hat Teka (2010) in seinen Untersuchungen Veränderungen in Landwirtschaft und Fischerei beobachtet, die dazu führen, dass Fischer beispielsweise in die Landwirtschaft wechseln, zum anderen aber Landwirte in die Städte abwandern. Solche internen Migrationen müssen nicht notwendigerweise eine sichtbare Spur in der Siedlungsstruktur hinterlassen. Inwiefern sich innerhalb unveränderter Bereiche beispielsweise Aus- und Einwanderung vollziehen, ist durch Fernerkundung nicht zu erfassen. Hierzu müssten weitere sozialwissenschaftliche Erhebungen vor Ort durchgeführt werden.

## 7.5 Ausblick

Bezüglich der Auswertung der vorliegenden optischen Bilddaten konnte gezeigt werden, dass sie sich zur Prozessanalyse eignen. Die algorithmengestützte Klassifizierung von Intensitätsbildern wird problematisch bleiben, auch wenn weitere Merkmale extrahiert werden, um sie in die Segmentierung und Klassifizierung zu integrieren und diese zu verbessern. In der Zukunft müssen flächendeckend multitemporal zumindest Multispektraldaten erhoben werden, um aussagekräftige Klassifizierungsergebnisse zu generieren und so flächendeckend in der Prozessanalyse arbeiten zu können. Für die Klassifizierung weiterer Daten können die Interpretationsergebnisse als Grundlage für die Gewinnung von Trainingsdaten herangezogen werden. Bezüglich der kommerziellen höchstauflösenden Satellitendaten kann beobachtet werden, dass ihre zeitliche Abdeckung in den Archiven zunimmt. Das

macht weitere prozessorientierte Untersuchungen möglich. Bezüglich aktueller Daten ist zu bedenken, dass der Äquatorialbereich nicht mit höchster Priorität bearbeitet wird. Durch die hohe Bewölkungshäufigkeit kann es zu weiteren Limitierungen kommen. Durch den Start von NigeriaSat-2 am 17. 08. 2011 befindet sich nun auch ein afrikanischer Satellit im All, der Daten mit 2,5 m GSD im PAN und 5 m in den Multispektralkanälen liefert. Inwiefern sich dessen Daten für die Beantwortung siedlungsrelevanter Fragestellungen im Untersuchungsraum eignen, muss dann untersucht werden, da die geometrische Auflösung für kleine Gebäude, wie sie im Untersuchungsgebiet vorliegen, nur eingeschränkt verwendbar ist. Hyperspektraldaten könnten möglicherweise in der Unterscheidung der unterschiedlichen Dachmaterialien von den Umgebungsmaterialien helfen, wobei jedoch ihre geometrische Auflösung noch relativ gering ist.

Die räumlich heterogenen Wachstumsmuster und ihre jeweiligen unterschiedlichen Zuwächse machen es schwierig, kommende Entwicklungen zu modellieren. Unter den genannten Vorbedingungen müssten in prozessbasierte Ansätze entwickelt werden, in die Interpretations- bzw. verbesserte Klassifizierungsergebnisse integriert werden könnten. Für die Entwicklung eines prozessbasierten Ansatzes wäre es aber notwendig, weitere Komponenten mit zu berücksichtigen. In diesem Sinne wäre es empfehlenswert, die Antriebskräfte der Besiedlung weiter und zudem räumlich genau zugeordnet zu erforschen und mit Fernerkundungsdaten zu korrelieren.





# 8 Veränderungsprozesse landwirtschaftlicher Nutzflächen

In Kapitel 2.7 wurde bereits auf die wesentliche Rolle der Landwirtschaft für die Wirtschaft im Untersuchungsraum eingegangen. Insbesondere vor dem Hintergrund der im Vorkapitel bearbeiteten – teils migrationsbedingten – Siedlungszunahme, aber auch im Kontext beruflicher Umgestaltungen durch Rückgang von Fischfang (siehe Vogt et al. 2010) ist es wichtig zu erfassen, ob, wo und in welcher Quantität sich landwirtschaftliche Flächen verändern, ob sie zu- oder abnehmen. Dabei werden solche Flächen betrachtet, die zum Anbau von Feldfrüchten genutzt werden. Plantagen fallen an sich nicht in diese Kategorie. Plantagenflächen werden nur dann erhoben, wenn innerhalb dieser Plantagen Feldfrüchte angebaut werden – dann aber in ihrer Funktion als Feld – was im Küstenraum Benins durchaus üblich ist.

Bisher liegen keine multitemporalen Untersuchungen der Landwirtschaftsdynamik für den Küstenraum Benins vor. In Kapitel 8.1 wird dazu in die Methodik eingeführt. Kapitel 8.2 stellt die Ergebnisse der visuellen Interpretation landwirtschaftlicher Flächen vor. Die Ergebnisse der Veränderungsanalyse folgen in Kapitel 8.3. In Kapitel 8.4 werden die Ergebnisse diskutiert, bevor in Kapitel 8.5 ein Ausblick gegeben wird.

## 8.1 Methodik

Die Dynamik landwirtschaftlich genutzter Flächen wird mittels des Vergleichs der Flächen zu den jeweiligen Aufnahmezeitpunkten untersucht. Zur Einschätzung der Klassifizierbarkeit werden im ersten Abschnitt die Aufnahmezeitpunkte den Jahreszeiten und dementsprechend den Agrarkalendern zugeordnet. Daraufhin werden landwirtschaftliche Klassen definiert, erfasst und ihre Gesamtflächen im Anschluss multitemporal analysiert (Abbildung 36).

### 8.1.1 Aufnahmezeitpunkte im Vergleich mit den Agrarkalendern

Der Vergleich der Aufnahmezeitpunkte mit dem Agrarkalender im Kontext der Jahreszeiten zeigt, welche Bearbeitungsphasen, Feldfrüchte und Phänologie auf landwirtschaftlichen Flächen bei der Interpretation zu erwarten wären. Dazu wurden mit Bauern Gespräche geführt, die im Folgenden für die Untersuchungsgebiete vorgestellt werden, um eine Grundlage zu erhalten, auf der die Bilddaten interpretiert werden können. Es handelt sich um allgemeine Angaben; je nach Einsetzen der ersten Regen und Verlauf der Regen- und Trockenzeiten können sich Verschiebungen ergeben. Aus diesem Grund werden die Niederschlagsverläufe der Aufnahmejahre vorgestellt.

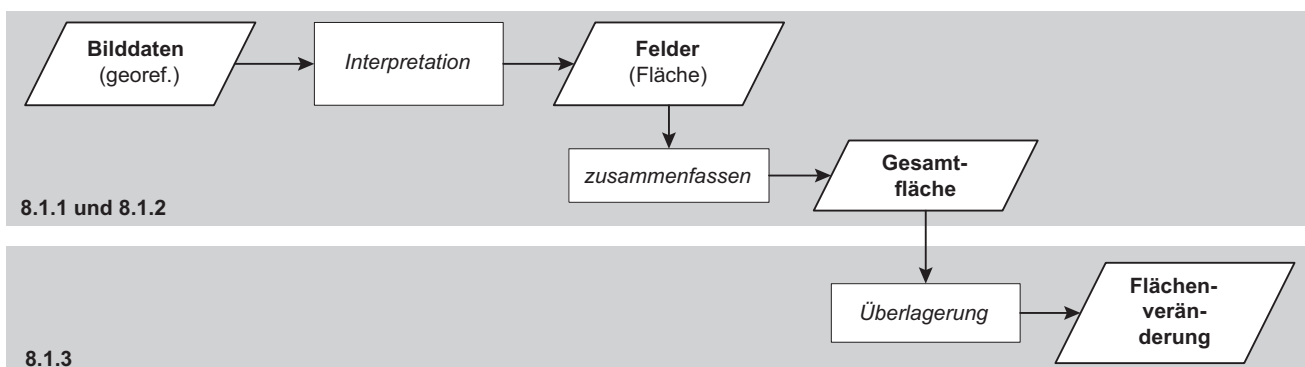


Abbildung 36: Methodik zur Analyse von Veränderungsprozessen landwirtschaftlicher Flächen

**8.1.1.1 Agrarkalender für die Region Avlékété**

In Tabelle 15 sind die Aufnahmezeitpunkte im Kontext der Jahreszeiten aufgezeigt: 1995 und 2007 wurden die Bilddaten am Ende der sogenannten großen Trockenzeit im März<sup>61</sup> und 2006 am Ende der kleinen Regenzeit im November<sup>62</sup> aufgenommen. Ein Vergleich mit den tatsächlichen Niederschlagsverläufen der Aufnahmejahre in Abbildung 37 zeigt, dass 1995 im März die ersten Regen einsetzen.

Zur Erfassung des Agrarkalenders wurden in den Dörfern Avlékété und Hio Gespräche mit Bauern geführt. In beiden Dörfern wurden Angaben zur Nutzung der trockenen Sandflächen gemacht. In Avlékété konnten Informationen zur Nutzung der ehemaligen Lagune erhalten werden. Dort werden die Ränder der ehemaligen Lagune aktuell genutzt. In den Bilddaten sind jedoch Nutzungsspuren auch innerhalb der Zentralbereiche zu finden. Von jüngeren Bauern konnten dazu keinerlei Angaben gemacht werden, da sie die Nutzung nicht mehr kennen. Ein Bauer gab jedoch Auskunft, dass seine Eltern die Bereiche noch nutzten, aber aufgrund höherer Salzgehalte heute keine Nutzung mehr möglich sei.

Tabelle 15: Aufnahme (Pfeile) der Bilddaten im Arrondissement Avlékété im Vergleich zu den Jahreszeiten

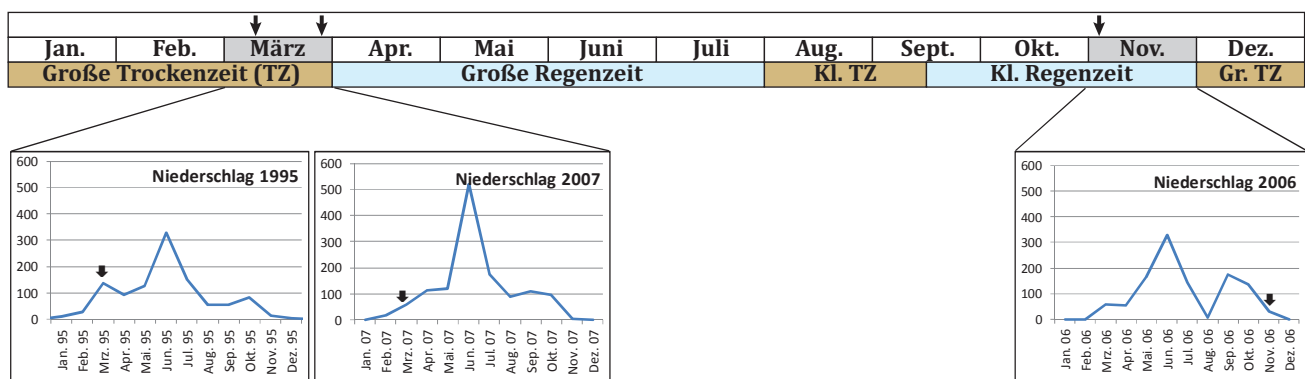


Abbildung 37: März-Niederschlagskurven 1995 (Station Ouidah) und 2007 (IITA)<sup>63</sup>; November-Niederschlagskurve 2006 (Station Cotonou)

**Landwirtschaft am Rand von Feuchtgebieten**

Im Vergleich mit dem Agrarkalender können zum Aufnahmezeitpunkt März (1995, 2007) in den Bilddaten möglicherweise Anzeichen für Feldarbeiten erwartet werden. Im November (2006) sind keine Feldfrüchte mehr auf den Feldern – im September haben die Ernten stattgefunden; Feldstrukturen können aber auch später auf deren Existenz hinweisen. Innerhalb der Feuchtgebiete werden aber auch stellenweise Pflanzen wie *Typha australis* und *Cyperus articulatus* zur Herstellung von Matten geschnitten. Solche Stellen können in den Bilddaten nicht verlässlich von Feldern unterschieden werden und werden möglicherweise als landwirtschaftliche Flächen erfasst.

Tabelle 16: Agrarkalender für die Ränder der Feuchtgebiete in Avlékété – erfasst im Transekt Avlékété

	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
<b>Feldarbeit</b>			***								***	
<b>Melone</b>	ca. 1,5–2 Monate							ca. 2 Monate				
<b>Chili</b>								2–3 Monate				
<b>Tomate</b>								2–3 Monate				

\* Vorbereiten/ Schneiden/ Brennen; \*\* Unkrautbekämpfung und Anlegung von Dammreihen auf den Feldern

<sup>61</sup> 10. 03. 1995, 25. 03. 2007

<sup>62</sup> 07. 11. 2006

<sup>63</sup> 2006 und 2007 liegen keine Niederschlagswerte für Ouidah vor. Daher werden 2006 die Werte der Station Ouidah und 2007 der Station des IITA genutzt. IITA = *International Institute for Tropical Agriculture* in Abomey-Calavi.

### Landwirtschaft auf trockenen Sandböden

Die Angaben in Avlékété und Hio (Tabelle 17) zeigen, dass Feldfrüchte auf den trockenen Landflächen von April bis August angebaut werden. Gepflanzt wird nach den ersten Regen. Auch hier liegen die Aufnahmezeitpunkte außerhalb der Wachstumsperiode, und lediglich Feldstrukturen weisen landwirtschaftliche Flächen aus.

Tabelle 17: Agrarkalender für Felder auf trockenen Sandböden – erfasst in den Transekten Avlékété und Hio

	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
<b>Feldarbeit</b>			*							**		
<b>Bohnen</b>						ca. 2 Monate						
<b>Erdnuss</b>						ca. 3 Monate						
<b>Gombo</b>					2-4 Monate							
<b>Amaranth</b>									2 Wo. <sup>64</sup>			
<b>Mais</b>					ca. 3 Monate							
<b>Maniok</b>					ca. 3 Monate							
<b>Wassermelone</b>					2 Monate							
<b>Chili</b>				ca. 2 Monate								
<b>Tomate</b>							2 Monate					

\* Vorbereiten/ Schneiden/ Brennen; \*\* Unkrautbekämpfung und Anlegung von Dammreihen auf den Feldern

#### 8.1.1.2 Agrarkalender für die Region Èkpè

In Èkpè liegen Bilddaten für die Monate März<sup>65</sup>, Mai<sup>66</sup> und Dezember<sup>67</sup> vor. Sie liegen damit bis auf die Maiaufnahme im Nordteil Djéffas in den Trockenzeiten (Tabelle 18). Ein Vergleich mit den tatsächlichen Niederschlagsverläufen der Aufnahmejahre in Abbildung 38 zeigt aber, dass der Aufnahmezeitpunkt 02. 05. 2006 am Beginn der Regenzeit des betrachteten Jahres liegt. Für das Jahr 2008 liegen für Èkpè keine Niederschlagswerte vor.

Befragungen zum Agrarkalender wurden aufgeteilt bezüglich der Einheiten a) Feuchtgebiete am Rand des Lac Nokoué im Norden und ehemalige Lagune, b) Senken auf dem mittleren Strandwall und c) trocken liegende Flächen. Dabei sind die Angaben der Befragungen in den Orten Èkpè und Djéffa vergleichbar.

Tabelle 18: Aufnahmezeitpunkte (Pfeile) der Bilddaten im Arrondissement Èkpè im Vergleich zu den Jahreszeiten

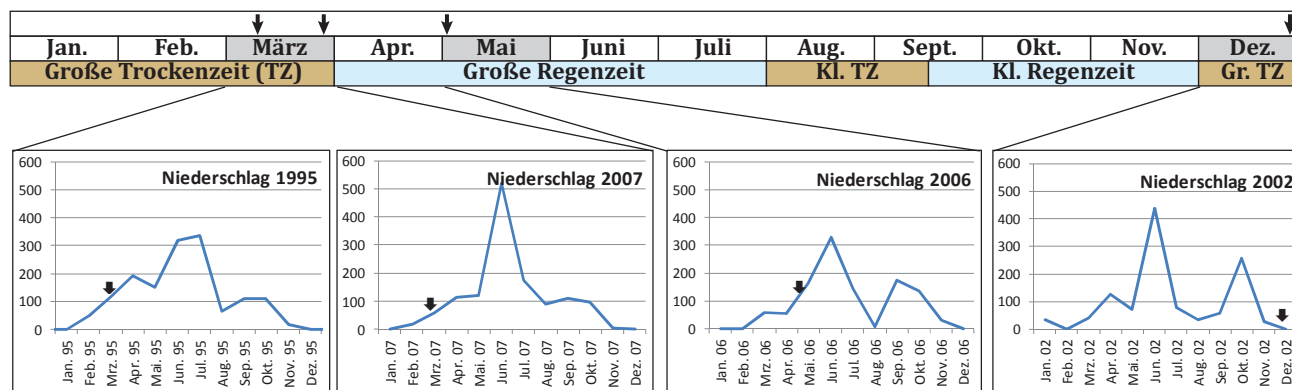


Abbildung 38: März-Niederschlagskurven 1995 (Station Sèmè-Kpodji) und 2007 (IITA); Mai-Niederschlagskurve 2006 und Dezember-Niederschlagskurve (Cotonou<sup>68</sup>)

<sup>64</sup> Als Blattgemüse

<sup>65</sup> 09. 03. 1995; 25. 03 2007 (Süden der Transekte bis Nordrand der ehemaligen Lagune) und 05.03.2008 (Nordteil im Transekt Èkpè)

<sup>66</sup> 02. 05. 2006 (Nordteil im Transekt Djéffa)

<sup>67</sup> 23. 12. 2002

<sup>68</sup> Die Stationen Cotonou und IITA

### Landwirtschaft in Feuchtgebieten

Feuchtgebiete im Arrondissement Èkpè erlauben den Anbau landwirtschaftlicher Produkte in der Trockenzeit. Je nach Wasserstand variieren die Anbauzeitpunkte. So wurde angegeben, das Wasser sinke in Èkpè früher als in Djéffa, so dass dort „*schon ab 1–2 Monate vor Neujahr*“ mit den Feldvorbereitungen begonnen werden könne. Die Feldvorbereitungen sind abhängig vom jeweiligen Wasserstand im Feuchtgebiet. Tabelle 19 kann zur Orientierung dienen. Für die Aufnahmen im März (1995, 2007) und Mai (2006) kann davon ausgegangen werden, dass die unter landwirtschaftlicher Nutzung stehenden Parzellen als solche erkannt werden können. Im Dezember (2002) ist dies je nach Standort unterschiedlich. Neben der landwirtschaftlichen Nutzung werden auch hier, wie in Avlékété, Pflanzen geschnitten, wie *Thalia spec.* für die Zubereitung von Akassa, einem Maisgericht, oder *Typha australis* für die Herstellung von Matten.

Tabelle 19: Agrarkalender für Feuchtgebiete im Arrondissement Èkpè

	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
<b>Feldarbeit</b>	*											*
<b>Amaranth</b>		Pflanzen			Ernte							
<b>Occra</b>		Pflanzen			Ernte							
<b>Tomate</b>		Pflanzen			Ernte							
<b>Zuckerrohr</b>	Pflanzen Ernte nach 11 Monaten											

\* Feldvorbereitungen

### Landwirtschaft in Senken auf dem mittleren Strandwall

Die Senken bieten – wie die Feuchtgebiete – die Möglichkeit zum Betreiben von Landwirtschaft auch in den trockenen Monaten. Im Vergleich zu den Feuchtgebieten wird eine etwas längere Nutzung angegeben. Auf Aufnahmen im März und Mai werden Felder unter Bewirtschaftung erwartet, im Dezember Bearbeitungsspuren.

Tabelle 20: Agrarkalender für Senken (*bas-fonds*) im Arrondissement Èkpè

	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
<b>Feldarbeit</b>			*								*	*
<b>Mais</b>												
<b>Occra</b>		1. Zyklus			2. Zyklus							
<b>Tomate</b>		1. Zyklus			2. Zyklus							
<b>Zuckerrohr</b>	Pflanzen ab Januar, Ernte nach 11 Monaten											

\*Feldvorbereitungen; \*\*Unkrautbekämpfung

### Landwirtschaft auf den trockenen sandigen Flächen

Die Bewirtschaftung der trockenen sandigen Flächen richtet sich auch hier, wie in Avlékété, nach der großen Regenzeit. Auf Bilddaten im März und Dezember sind daher keine Felder unter Bewirtschaftung, jedoch Bewirtschaftungsspuren zu erwarten.

Tabelle 21: Agrarkalender für trockene Flächen im Arrondissement Èkpè

	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
<b>Feldarbeit</b>	*											*
<b>Bohnen</b>						ca. 3 Monate						
<b>Chili</b>								2–3 Monate				
<b>Mais</b>												
<b>Maniok</b>						Ernte nach einem Jahr						
<b>Tomate</b>								2–3 Monate				

\*Feldvorbereitungen ab Dezember

### 8.1.2 Visuelle Interpretation landwirtschaftlicher Flächen

Felder im Küstenraum Benins haben unterschiedliche Charakteristiken und sind dadurch in Fernerkundungsdaten unterschiedlich gut sichtbar. Feldfrüchte werden nicht immer getrennt angebaut, sondern teils auch mehrere Früchte in Mischnutzungen, z.B. Zuckerrohr mit Amaranth, Tomate und Chili. Zudem werden Felder in der Küstenregion Benins, insbesondere im Westen und so auch im untersuchten Arrondissement Avlékété, stellenweise unter Öl- und Kokospalmen angelegt. Hier können nur solche Flächen als landwirtschaftliche Nutzflächen (im Sinne eines Feldfruchtanbaus) erfasst werden, wenn sie unter den Palmen in den Bilddaten erkennbar sind. Zudem sind nicht alle Felder deutlich in ihren Grenzen zu erkennen, sondern gehen teilweise visuell fließend in die umgebende Vegetation über. Dies ist besonders auf den trockenen Flächen mit *Savanne herbeuse* zu beobachten. Ein Grund hierfür mag die manuelle Bewirtschaftungsweise vor Ort sein. Als sichtbare Indikatoren für Felder – auch in der Trockenzeit – helfen Dammreihen, die insbesondere für Maniok angelegt werden müssen (Abbildung 39). In Feuchtgebieten können breitere Dammreihen für Zuckerrohr (Abbildung 40) – teils gemischt mit anderen Feldfrüchten (Abbildung 41 rechts) als Indikatoren genutzt werden<sup>69</sup>. Der in Kapitel 8.1.1 vorgestellte Vergleich der Aufnahmezeitpunkte mit den Niederschlagsverläufen und den Agrarkalendern gibt einen Hinweis auf zu erwartende Nutzungen und die Phänologie landwirtschaftlicher Flächen. Es hat sich aber auch gezeigt, dass durch die Aufnahmen hauptsächlich in der Trockenzeit diese Anwendung stark eingeschränkt ist und Feldstrukturen – so vorhanden – als Indikatoren für landwirtschaftliche Nutzung hinzugezogen werden müssen. Auch Feldvorbereitungen sind in den Bilddaten zu erkennen. Ihre Dauer ist jedoch teilweise variabel, abhängig von der verfügbaren Arbeitskraft. Somit sind die Angaben in den Agrarkalendern – dort, wo sie gegeben wurden – lediglich eine Orientierung. Des Weiteren sei vermerkt, dass Angaben zu Brachezeiten stark variieren. Innerhalb der Feuchtgebiete werden solche Flächen zudem durch das starke Vegetationswachstum, insbesondere innerhalb der ehemaligen Lagunen, in den Bilddaten mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht als landwirtschaftliche Flächen erkannt werden. Im Gegensatz dazu sind Brachflächen dort, wo Nutzungsspuren zu erkennen sind, nicht von landwirtschaftlich genutzten Flächen zu unterscheiden. Dazu müssten multitemporale Daten innerhalb eines Jahresganges für die untersuchten Jahre vorliegen. Somit muss damit gerechnet werden, dass landwirtschaftliche Flächen in Feuchtgebieten unterschätzt, auf trockenen Flächen überschätzt werden. Von daher wird im Rahmen dieser Arbeit von *sichtbaren landwirtschaftlichen Flächen* gesprochen. Eine Unterscheidung in verfügbare und genutzte Ackerflächen, wie in sozioökonomischen Erhebungen in der Küstenzone durch Teka (2010), ist nicht möglich.

Es lässt sich zusammenfassen, dass Felder in der vorliegenden Arbeit insbesondere mit Hilfe struktureller Merkmale erfasst werden. Zur Gewinnung vergleichbarer Datensätze geschieht dies durch visuelle Interpretation. Abbildung 39 bis Abbildung 42 zeigen diverse Erscheinungsbilder landwirtschaftlicher Flächen.



Abbildung 39: Landwirtschaft auf Trockenflächen



Abbildung 40: Landwirtschaftliche Flächen in Feuchtgebieten – Beobachtungen im April

<sup>69</sup> Innerhalb der ehemaligen Lagunen in Avlékété sind zwar auch Dammreihen erkennbar; durch die Auskünfte vor Ort (s. S. 80) wurde jedoch deutlich, dass dort durch Versalzung schon sehr lange keine Nutzung mehr möglich ist. Somit werden diese Fläche in keinem Bilddatensatz, auch nicht von 1995, erfasst.



Abbildung 41: Nutzung der Senken (links), Schilfnutzung (Mitte), Mischnutzungen (rechts)



Abbildung 42: Schwierigkeiten in der Unterscheidung zwischen Feldern und Umland oder Landwirtschaft unter Palmen

Die in den Fotos gezeigten landwirtschaftlichen Flächen bilden sich unterschiedlich deutlich in den Luft- und Satellitenbilddaten ab. Abbildung 43 zeigt Landwirtschaft auf Trockenflächen, in Senken und in Feuchtgebieten. Für die Beantwortung der Fragestellung wurden alle Flächen in einer gemeinsamen Klasse behandelt.

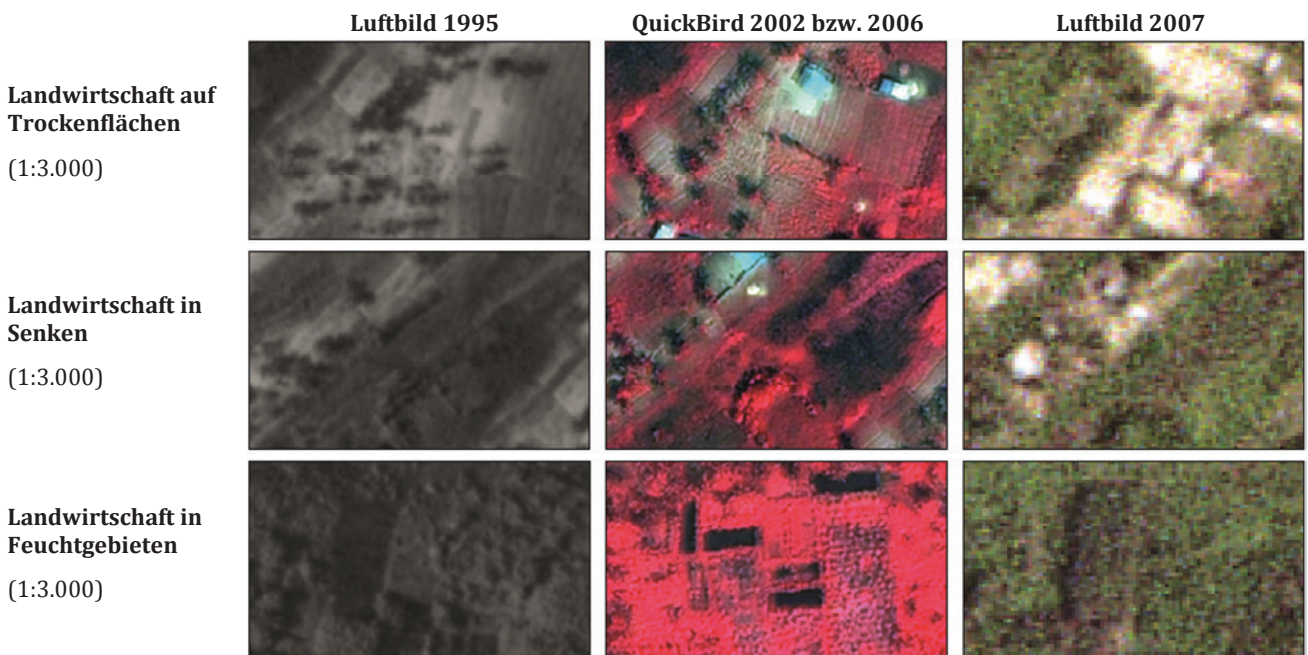


Abbildung 43: Beispielschlüssel für erfasste landwirtschaftliche Flächen

### 8.1.3 Analyse der raum-zeitlichen Veränderungen landwirtschaftlicher Flächen

Die Veränderungsanalyse der landwirtschaftlichen Flächen folgt direkt der Erfassung für die einzelnen Zeitpunkte. Da die Grenzen landwirtschaftlicher Flächen teilweise schwer zu erkennen sind, werden nicht einzelne Felder, sondern die Gesamtflächen miteinander verschnitten. So wird bestimmt, wo Flächen unverändert bleiben, wo neue Flächen in landwirtschaftlich genutzt werden bzw. verloren gehen (Abbildung 44 ).

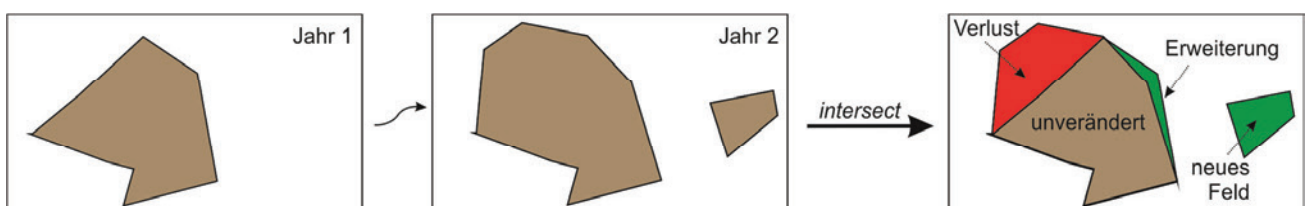


Abbildung 44: Schematische Darstellung der Veränderungsanalyse landwirtschaftlicher Flächen

## 8.2 Ergebnisse der visuellen Interpretation landwirtschaftlicher Flächen

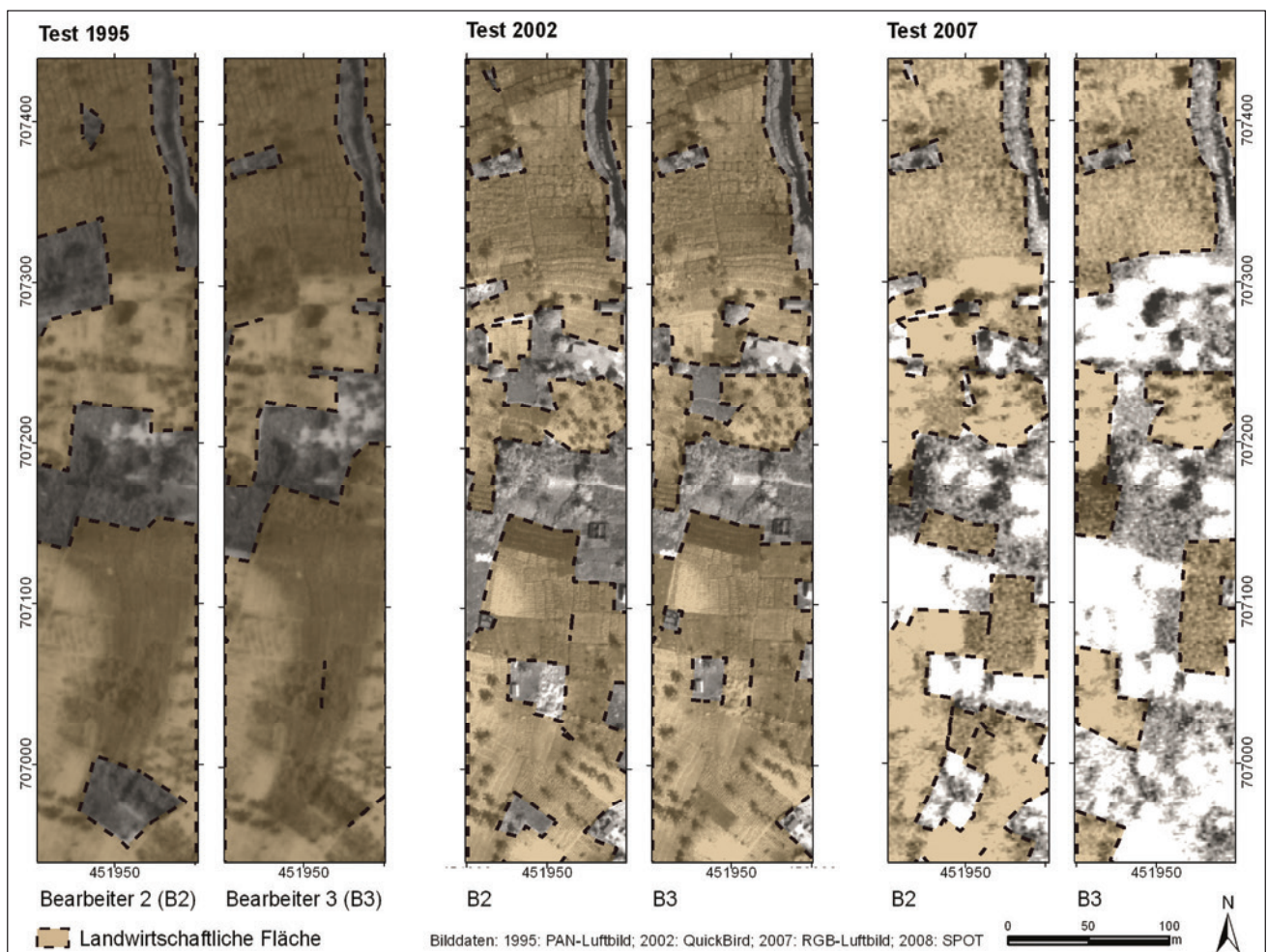
Die Ergebnisse der interpretativen Erfassung landwirtschaftlicher Flächen bilden die Grundlage der Prozessanalyse und werden im Folgenden zunächst für die Bearbeitertests vorgestellt.

### 8.2.1 Ergebnisse der Testinterpretationen

Der Vergleich der Testergebnisse der landwirtschaftlich genutzten Flächen zeigt, dass die Gesamtflächen teils erheblich voneinander abweichen (Tabelle 22). In Karte 21 sind Ergebnisse der Bearbeiter 2 und 3 exemplarisch für einen Ausschnitt vorgestellt. Die als Landwirtschaft interpretierten Flächen sind transparent über die Bilddaten gelegt, um einen Eindruck davon zu vermitteln, in welchen Bereichen Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen auftreten. Abweichungen zeigen sich insbesondere bei unsicher zu interpretierenden Flächen – durch undeutliche Grenzen oder schwierig erkennbare Strukturen.

Tabelle 22: Landwirtschaftliche Nutzflächen im Testtransekt (bearbeiterabhängig)

	1995	2002	2006/07
<b>Bearbeiter 1</b>	75.000 m <sup>2</sup>	95.600 m <sup>2</sup>	61.600 m <sup>2</sup>
<b>Bearbeiter 2</b>	100.200 m <sup>2</sup>	84.800 m <sup>2</sup>	74.800 m <sup>2</sup>
<b>Bearbeiter 3</b>	130.600 m <sup>2</sup>	108.800 m <sup>2</sup>	80.000 m <sup>2</sup>



Karte 21: Testinterpretationen landwirtschaftlicher Flächen – Vergleich zweier Testbearbeiter

### 8.2.2 Sicherheit der Interpretationsergebnisse

Die beschriebenen Charakteristika der Landwirtschaft Benins in Kombination mit den vorliegenden Bilddaten bedingen teilweise Schwierigkeiten in der Identifizierung und Abgrenzung landwirtschaftlicher Flächen. Zudem strahlt der Sandboden einiger Felder, insbesondere im Norden der Transekte im Arrondissement Èkpè, in den Bilddaten so stark zurück, dass Boden- und neue Metall- bzw. Asbest-Dachflächen verwechselt werden können.

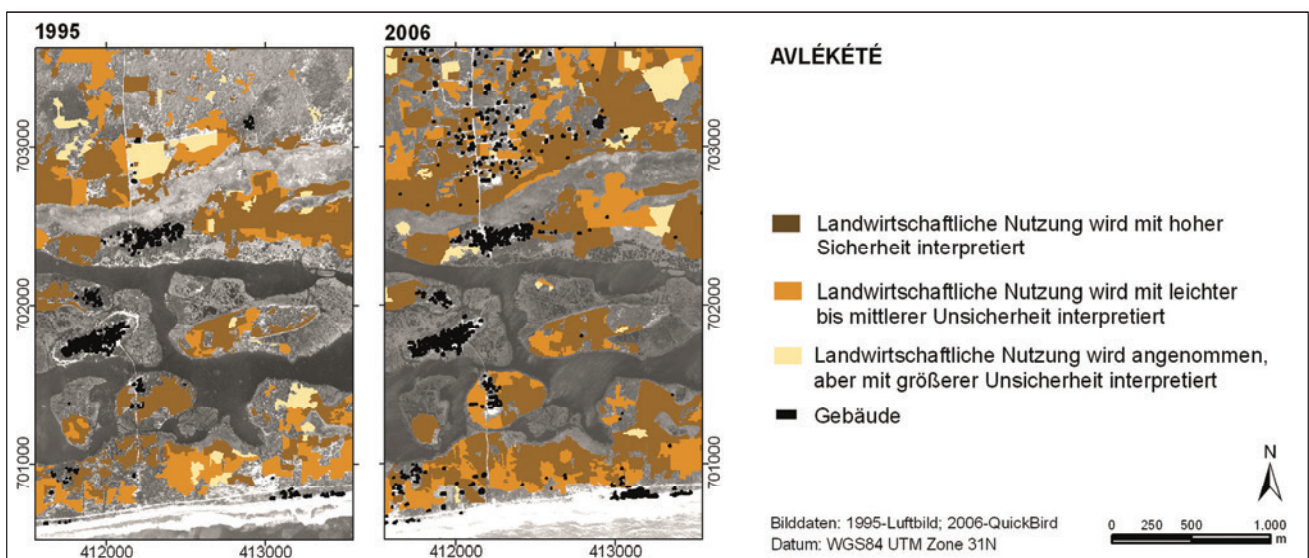
Die Ergebnisse der Testinterpretationen bestätigen die Herausforderungen. Aus diesem Grund wird, wie zuvor bei den Gebäuden, eine mehrfache Durchmusterung und Kontrolle eines zweiten Bearbeiters zur Finalerfassung durchgeführt. Um die Sicherheit der Interpretation, insbesondere hinsichtlich der weiteren Analyse, einschätzen zu können, werden für das Transekt Avlékété und Transekt Djéffa drei Bewertungsklassen eingeführt:

- Klasse 1: Landwirtschaftliche Nutzung wird mit hoher Sicherheit interpretiert, d.h. die Fläche ist in ihrer Begrenzung und im Inhalt sicher zu interpretieren
- Klasse 2: Landwirtschaftliche Nutzung wird mit leichter bis mittlerer Unsicherheit interpretiert, da Strukturen nicht so eindeutig zu erkennen sind wie in Klasse 1
- Klasse 3: Landwirtschaftliche Nutzung wird angenommen, aber mit größerer Unsicherheit interpretiert

In Karte 22 sind am Beispiel des Transektes Avlékété, in Karte 23 am Beispiel des Transektes Djéffa die Interpretationsergebnisse mit ihren jeweiligen Interpretationssicherheiten dargestellt. Die Diagramme in Abbildung 45 führen die Ergebnisse quantitativ zusammen.

In *Avlékété* (Karte 22) zeigen sich niedrigere Sicherheiten in den Ölpalmflächen im Norden und im Süden, wo Landwirtschaft auch unter Kokospalmen praktiziert wird. Deutlichere Nutzungsspuren in Form von texturreicheren Strukturen zwischen den Palmen führen zu höherer Interpretationssicherheit, wohingegen homogen durchscheinender Untergrund zwischen lückigen Palmbeständen auf Landwirtschaft hinweist, aber als weniger sicher angenommen werden kann. Die Interpretationssicherheit bei den PAN-Luftbildern und QuickBird-Daten sind vergleichbar (Abbildung 45).

In *Djéffa* (Karte 24) zeigen sich die meisten Unsicherheiten innerhalb der ehemaligen Lagune. In anderen Bereichen sind Unsicherheiten zu verzeichnen, wenn Nutzungsspuren nur schwach sichtbar sind. Im Vergleich der Interpretationen und in Abbildung 45 spiegelt sich die schlechtere Qualität der RGB-Luftbildscans im Ergebnis für 2006<sup>70</sup>/07<sup>71</sup> wider. Dies erschwert die Interpretation der Felder, insbesondere innerhalb der ehemaligen Lagune und der sich nach Norden ausdehnenden Siedlung. Die Interpretierbarkeit der PAN-Luftbilder und QuickBird-Daten ist auch hier vergleichbar.



Karte 22: Einschätzung der Interpretationssicherheit landwirtschaftlicher Flächen am Beispiel des Transektes Avlékété

<sup>70</sup> Nordteil des Transektes

<sup>71</sup> Südteil des Transektes



Die Existenz landwirtschaftlich genutzter Flächen innerhalb des erweiterten Siedlungsgebietes im Norden des Transektes Djéffa konnte in der Feldbegehung 2008 dokumentiert werden, so dass die Interpretationsgenauigkeit lediglich um eine Stufe heruntersetzt wird, obwohl die Feldstrukturen undeutlich sichtbar und Abgrenzungen dadurch schwierig sind. Für die Erarbeitung der Veränderungen werden alle Interpretationsergebnisse verwendet. Werden lediglich die sichersten Ergebnisse weiter verwendet, wird Überprägung durch die Landwirtschaft unterschätzt, insbesondere dann, wenn das Bildmaterial keine absolute Sicherheit in der Interpretation erlaubt.

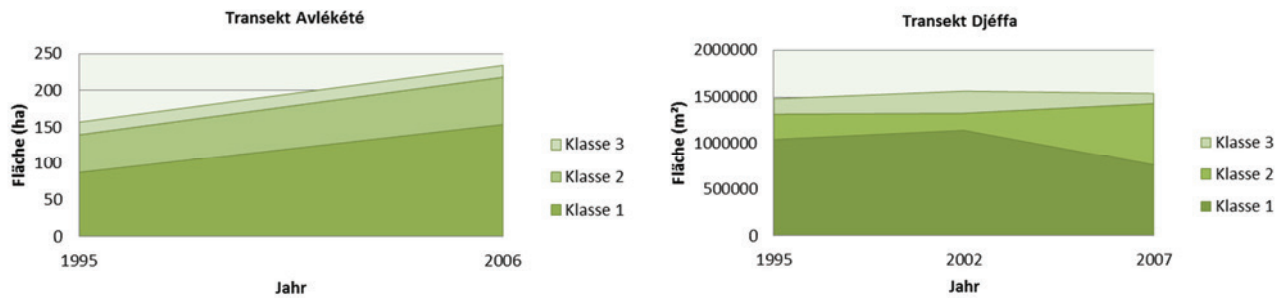
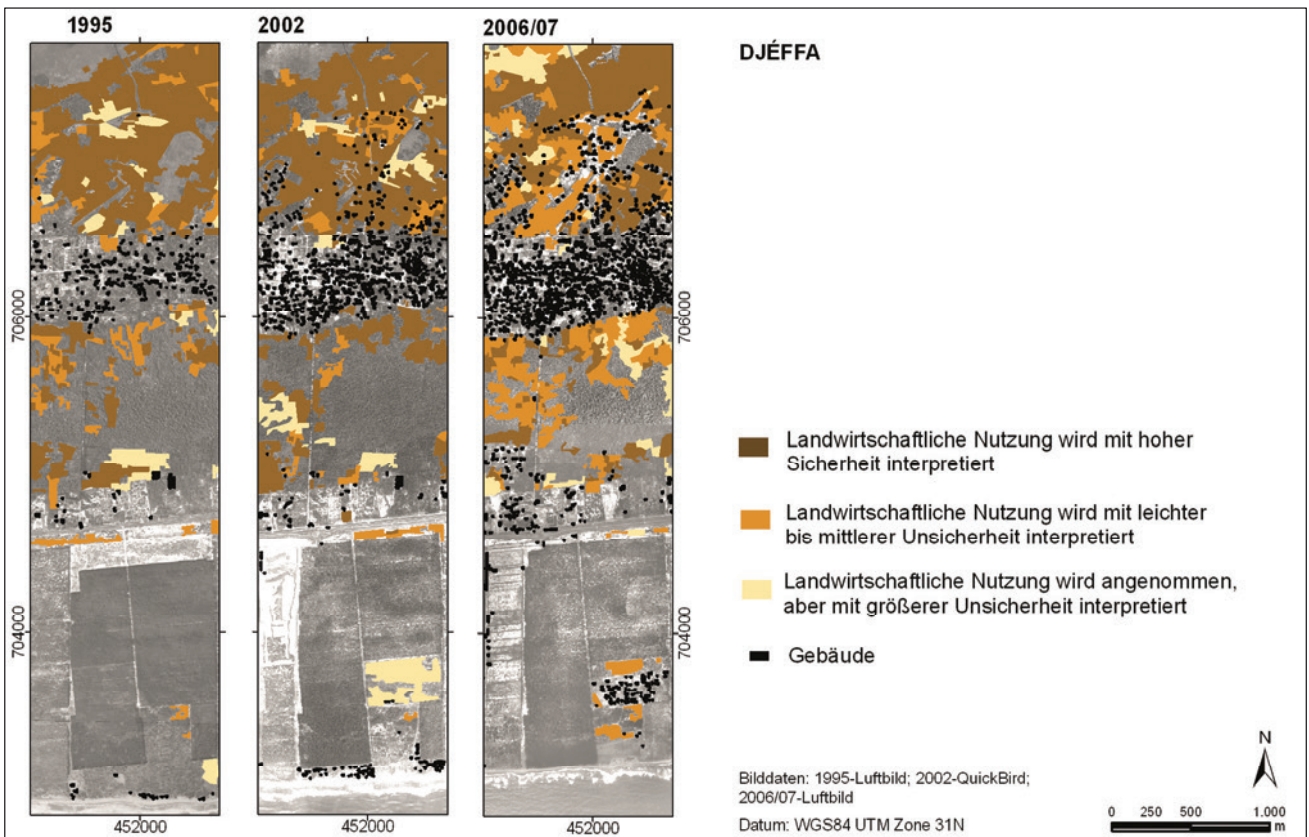


Abbildung 45: Landwirtschaftlich genutzte Fläche nach Interpretationssicherheit (1 = sicher)



Karte 23: Einschätzung der Interpretationssicherheit landwirtschaftlicher Flächen am Beispiel des Transektes Djéffa

### 8.3 Ergebnisse der Veränderungsanalyse landwirtschaftlich genutzter Flächen

In allen betrachteten Transekten haben sich die sichtbaren landwirtschaftlich genutzten Flächen verändert. In Abbildung 46 sind die Gesamtveränderungen<sup>72</sup> aufgetragen, während Karte 24 die Veränderungen in den Flächenverteilungen darstellt. In der summarischen Betrachtung der sichtbaren landwirtschaftlichen Flächen (Abbildung 46) sind in beiden Transekten des *Arrondissement Avlékété* (Avlékété und Hio) deutliche Flächenzuwächse von 1995 zu 2006/7<sup>73</sup> zu verzeichnen, insbesondere in Avlékété. In den Transekten des *Arrondissement Èkpè* sind nur leichte Veränderungen in der Flächensumme zu beobachten. In Djéffa ist nach einem leichten Wachstum zwischen 1995 und 2002 eine Stagnation bzw. ein geringer Flächenverlust bis 2007 zu erkennen, der in der Summe aber leicht über dem Wert von 1995 liegt. Èkpè zeigt zwischen 1995 und 2007 einen leichten Rückgang mit einem geringeren Zwischenwert 2002.

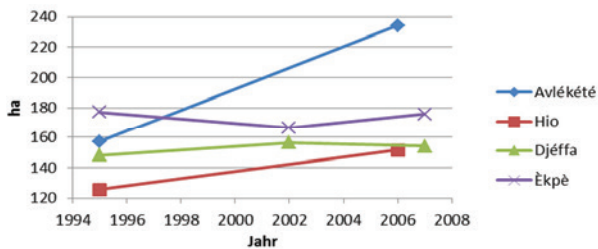
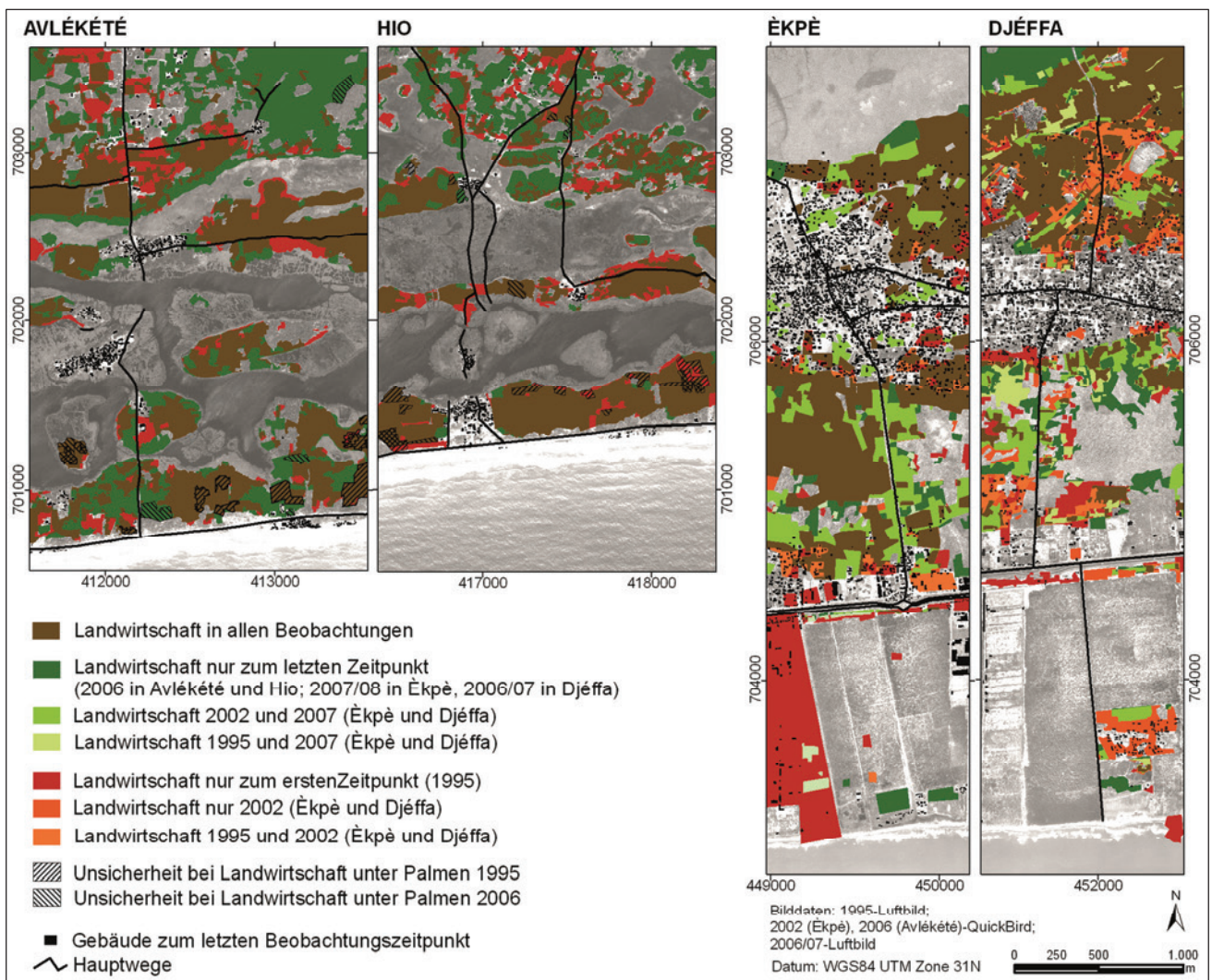


Abbildung 46: Veränderung der Flächensummen landwirtschaftlicher Flächen über die Beobachtungszeiträume



Karte 24: Überblick über die raum-zeitlichen Veränderungen landwirtschaftlich genutzter Flächen

<sup>72</sup> Die Linien dienen nur zur Verdeutlichung; eine lineare Entwicklung kann nicht angenommen werden.

<sup>73</sup> Die Bilddaten von März 2007 werden nicht als Extrazeitpunkt aufgeführt, da Agrarstrukturen in den Aufnahmen November 2006 besser interpretierbar sind.

Karte 24 zeigt hohe landwirtschaftliche Aktivität in allen Untersuchungstransekten. Es zeigen sich aber auch zum Teil starke lokale Differenzen in der Veränderung der landwirtschaftlichen Flächen. Nur wenige Bereiche sind nicht von landwirtschaftlicher Aktivität betroffen: Im *Arrondissement Avlékété* sind dies Randgebiete an den rezenten Lagunen, die Zentralbereiche der ehemaligen Lagunen, dichte Siedlungsbereiche und der Streifen entlang der Uferstraße. Im *Arrondissement Èkpè* werden Randbereiche des Lac Nokoué im Norden, Feuchtwaldgebiete innerhalb der ehemaligen Lagunen, dichtere Siedlungsbereiche, gewerblich genutzte Flächen und die großen Akazien-Eukalyptus-Plantagen im Süden nicht landwirtschaftlich genutzt.

Im *Arrondissement Avlékété* kann allgemein festgestellt werden, dass zu beiden Aufnahmezeitpunkten weite Teile der Landoberfläche von landwirtschaftlicher Nutzung geprägt sind – der größte Teil gleichbleibend (braune Einfärbung). Eine relativ hohe Änderungsdynamik ist jedoch im Norden zu verzeichnen. Dort zeigt sich insgesamt eine deutliche Zunahme (grün) landwirtschaftlich genutzter Flächen, die zumeist Ölpalmflächen verdrängen. Gleichzeitig zeigen sich durch Siedlungswachstum Umstrukturierungen, die mit Flächenverlusten landwirtschaftlich genutzter Flächen verbunden sind (rot) (vgl. hierzu auch Kapitel 7.3.3).

Im *Arrondissement Èkpè* zeigt sich – gestützt durch die Existenz eines dritten Beobachtungszeitpunktes – eine stärkere Dynamik. Die Bereiche nördlich der Lagune zeigen in großen Bereichen Nutzung zu allen drei Zeitpunkten (braun) und eine mit der Zeit zunehmende Nutzung der bis dahin nicht genutzten Bereiche (grün), während v.a. im nördlichen Teil von Djéffa landwirtschaftliche Nutzung in den Bereichen abnimmt, die besiedelt werden (Rottöne). Neben dem Norden ist die ehemalige Lagune ein landwirtschaftlich genutzter Raum, insbesondere in den Trockenzeiten, wie die Agrarkalender in Kapitel 8.1.1 gezeigt haben. Sie wird im stärker besiedelten Transekt Èkpè schon 1995 in weiten Teilen genutzt. Aber auch dort nimmt die Nutzung neben Dauerbereichen (braun) bis 2007 zu (Grüntöne). In Djéffa ist der Anteil an dauerhaft erkennbaren Feldern geringer; ein höherer Wechsel zeigt sich durch einen Mosaikeffekt in der Transekmitte. Insgesamt nimmt jedoch auch hier die Nutzung zu. Entlang der Straße und nach Süden hin sind zum Teil hohe Verluste landwirtschaftlicher Flächen (Djéffa) zu beobachten, die im Zusammenhang mit dem Ausbau von Gewerbeflächen stehen. Im Süden sind nochmals Wechsel in der landwirtschaftlichen Nutzung zu finden.

## 8.4 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Nach einer technischen Diskussion werden die Ergebnisse in Kapitel 8.4.1 inhaltlich diskutiert und in Kapitel 8.4.2 mögliche Konsequenzen der Landnutzungsveränderungen aufgezeigt.

### 8.4.1 Diskussion und Bewertung der Interpretations- und Veränderungsergebnisse

Auf die Sicherheit der Interpretation, die Auswirkungen auf die Veränderungsergebnisse haben kann, wurde in Kapitel 8.2.2 bereits eingegangen. An dieser Stelle werden daher zunächst die Gründe und Konsequenzen für die Gesamtinterpretation diskutiert. Am besten waren – wie bei den Siedlungen – die QuickBird-Daten zu interpretieren, da sie durch ihre räumliche Auflösung im PAN-Kanal von 0,6 m Feldstrukturen wie Dammreihen und Feldgrenzen gut auflösen. Sind diese Dammreihen breit genug, sind sie auch in den Luftbildern von 1995 zu sehen. In den Bilddaten 2006–2008 in Èkpè sind solche Strukturen aufgrund der niedrigeren räumlichen Auflösung der Daten nicht erkennbar. Dort helfen lediglich Grauwertunterschiede, um Felder abzugrenzen. In Avlékété sind in den QuickBird-Daten zudem Salzgewinnungsflächen deutlich zu erkennen, da sie teilweise geflutet sind. In den anderen Aufnahmen können sie dann, wenn sie nicht aktuell genutzt werden, unter Umständen leichter mit Feldern verwechselt werden, da sie auch geometrische Formen aufweisen. Zur Interpretation wurden also auch hier zunächst die QuickBird-Ergebnisse auf die weiteren Bilddaten übertragen, bevor sie mit den jeweiligen Bilddaten abgeglichen und ergänzt wurden. Des Weiteren können unscharfe Abgrenzungen der Felder und daraus resultierende abweichende Formen zu Scheinveränderungen führen.

Im *Arrondissement Avlékété* überwiegen in den Aufnahmen von 1995 die Felder innerhalb der Ölpalmflächen, während sie 2006 auf freien Flächen vorherrschen. Innerhalb der Ölpalmflächen kann Ihr Anteil aufgrund eingeschränkter Sichtbarkeit unterschätzt sein. Da jedoch die landwirtschaftliche Ausdehnung so deutlich ist, ist dieser Anteil vernachlässigbar. Bezüglich der Ölpalmflächen kann in den Bilddaten nicht unterschieden werden, ob es sich um naturnahe oder aufgegebene, mit natürlicher Vegetation durchsetzte Ölpalmpflanzungen oder Ölpalm-

brachen wie in anderen Gebieten der Küstenzone (z.B. Bohlinger 1998) handelt, da die Ölpalmflächen im Untersuchungsgebiet stets mit Arten des *Fôret dense* durchsetzt sind und keine geordnete Plantagenstruktur aufweisen. Südlich der Lagune ist landwirtschaftliche Nutzung unterhalb der dort angesiedelten Kokospalmpflanzungen anzutreffen. Dies konnte vor Ort verifiziert werden. Für 1995 wird diese Praktik ebenfalls angenommen. Bei Nichtzutreffen der Annahme kann dieser Anteil überschätzt sein. Bereiche, in denen Landwirtschaft unter Kokospalmen angenommen wird, aber nicht sicher interpretiert werden kann, sind zur Einschätzung der Ergebnisse in Karte 24 daher schraffiert dargestellt. Ihr Anteil beträgt 1995 maximal 6,5 % und 2006 3 % der gesamten interpretierten landwirtschaftlichen Nutzfläche<sup>74</sup>. Im *Arrondissement Èkpè* bergen die Feuchtgebiete und landwirtschaftlich genutzte Flächen innerhalb von Siedlungen, insbesondere in den Aufnahmen 2006/07/08, Herausforderungen. Sie ziehen dann geringere Sicherheiten nach sich, wenn die Flächen sehr klein oder mit unscharfen Grenzen vorliegen. Die Aufnahmen aus dem Jahr 2002 wurden daher in die Interpretation einbezogen und konnten manche schwach gedeutete Fläche bestätigen.

Trotz der diskutierten technischen Schwierigkeiten können im Kontext der räumlichen Veränderungen landwirtschaftlicher Nutzflächen folgende Trends beobachtet werden:

Zum einen zeigt sich in allen Untersuchungsgebieten kleinräumiger Wechsel. Zum anderen ist Verdrängung der Landwirtschaft durch Siedlungsausdehnung zu beobachten, nachdem Gebäude zunächst einzeln in landwirtschaftliche Flächen einstreuen. Weiterhin breitet sich Landwirtschaft von Siedlungen her oder durch neue Siedlungen verdrängt „nach außen“ in zuvor ungenutzte Gebiete, wie Feuchtgebiete, Strauchsavanne, bzw. Ölpalmflächen<sup>75</sup> aus – zumeist verbunden mit der Degradierung oder dem Verlust natürlicher bzw. naturnaher Vegetationsformationen.

Kleinräumiger Wechsel kann brachebedingt sein. Zwar werden Bracheflächen aus schon beschriebenen Gründen zumeist als landwirtschaftliche Flächen interpretiert. Wenn sie sich in den Bilddaten jedoch nicht strukturell abzeichnen, werden sie nicht als landwirtschaftliche Fläche identifiziert. Dies trifft insbesondere in den Feuchtflächen der ehemaligen Lagune zu, die sich durch starkes Wachstum auszeichnen. Bezüglich der im Transekt *Èkpè* dauerhafter beobachteten Landwirtschaft wäre zukünftig abzuklären, aus welchen Gründen dort die Nutzungsintensität höher ist. Eine Hypothese ist die nähere Anbindung an Cotonou.

Bezüglich der Ausbreitung der Landwirtschaft bzw. ihrer Verdrängung durch Siedlungen stellt sich die Frage nach den Grenzen der Ausbreitung. Im *Arrondissement Èkpè* zeigt sich nach Abbildung 46 ein Einpendeln der Gesamtfläche. Im *Arrondissement* konnte ein starkes Wachstum beobachtet werden, aber damit verbunden auch eine Nutzung des Großteiles der Landoberfläche im Jahr 2006, so dass das Wachstum in der beobachteten Stärke dort in Zukunft nicht weiter erwartet werden kann. Die Ausweitung landwirtschaftlicher Flächen kann räumlich mit dem dort beobachteten Siedlungszuwachs in Verbindung gebracht werden. Inwiefern aber möglicherweise auch Bauern aus dem Süden dort Flächen bewirtschaften, wäre zu untersuchen. In Teka (2010) und Vogt et al. (2010) wurde darauf eingegangen, dass Fischer durch Rückgang der Fänge zusätzlich oder im Vollerwerb in der Landwirtschaft aktiv werden. Wo sich deren Flächen befinden und welchen Anteil dieser Wandel auf die Struktur und Verteilung landwirtschaftlich genutzter Flächen hat, kann aus diesen Daten nicht beantwortet werden.

Oben wurde aufgezählt, wo freie Flächen beobachtet werden. Im Gegensatz zum versalzungsbedingten Ausbleiben landwirtschaftlicher Nutzung in den Zentralbereichen der ehemaligen Lagunen und Randbereichen der Lagunen im *Arrondissement Avlékété* wäre im *Arrondissement Èkpè* durch weitere Beobachtungen in der Zukunft zu erarbeiten, inwiefern die Feuchtgebiete im Norden und in der ehemaligen Lagune bzw. die noch vorhandenen, jedoch abnehmenden Flächen des reliktschen *Fôret dense humide* tatsächliche Nutzungsgrenzen darstellen.

Die Zunahme landwirtschaftlicher Flächen mit gleichzeitigem Zurückdrängen von Gebieten mit Brachevegetation sowie holziger Bedeckung wie Buschbrache- bzw. Ölpalmflächen (*Avlékété*) sowie des Feuchtwaldes in den verlandeten Lagunen (*Èkpè*) kann auch in anderen Teilen Benins, wie Mittelbenin (z.B. Judex 2007) beobachtet werden, ist aber nicht nur ein beninisches Phänomen. Untersuchungen in Nigeria (Salami 1999) haben dort in Zeitschnitten 1963–1973–1991 jeweils Zunahmen von Landwirtschaft und die Zurückdrängung von primärem Tieflandregenwaldes und Sekundärformationen gezeigt. Tappan et al. (2000) konnten im Vergleich von Ferner-

<sup>74</sup> 1995: 5 % in *Avlékété* und 6,5 % in *Hio*; 2006: 3 % in *Avlékété* und 3 % in *Hio*

<sup>75</sup> im Norden des *Arrondissement Avlékété*

kundungsdaten für die Zeitspanne 1963–1990 in West-Senegal ebenfalls starke Ausdehnung landwirtschaftlicher Flächen und Degradierung von Buschland, Savanne und Waldformationen feststellen und quantifizieren.

#### **8.4.2 Mögliche Konsequenzen der Zunahme landwirtschaftlicher Nutzflächen unter Verdrängung natürlicher Vegetation**

Neben dem Verlust natürlicher bzw. naturnaher Formationen und einer damit verbundenen Biodiversitätsabnahme bzgl. der Arten- und Habitatvielfalt sind für die weitere Nutzung auch Konsequenzen durch Boden-degradation möglich. Durch die Zunahme landwirtschaftlicher Flächen nimmt der Anteil frei liegenden Bodens zu: Felder auf trockenen Sandböden liegen in der Trockenzeit zumeist brach; in den Feuchtgebieten und Rändern der Lagune liegt der Boden während der Feldvorbereitung frei. Der unbedeckte Boden ist so ungehindert Sonneneinstrahlung und Wind – der in Meeresnähe durchgängig weht – ausgesetzt. Durch das Fehlen von Palmen, Bäumen und Sträuchern kann organisches Material durch den Wind verblasen werden.

Neben der Austrocknung des Bodens ist Versalzung eine mögliche Gefahr von verstärkter Verdunstung (Hillel 2003). Versalzung wurde, wie oben erwähnt, bereits als Grund für die Aufgabe von Landwirtschaft innerhalb ehemaliger Lagunen in Avlékété angegeben. Versalzung kann u.a. auftreten, wenn der Grundwasserspiegel hoch ansteht, Intrusion von Meerwasser ins Grundwasser erfolgt oder Regen- bzw. Beregnungswasser nicht ausreicht, um das durch Kapillaraufstieg nach oben transportierte Salz nach unten auszuwaschen (Schachtschabel 1998; Hillel 2003). Leider liegen keine Daten vor, die den Versalzungsprozess quantitativ fassen und erklären könnten. Es stellt sich daher die Frage, ob dieses Phänomen zukünftig auf den aktuell landwirtschaftlich genutzten Feuchtflächen auftreten kann.

Weitere Folgen landwirtschaftlicher Nutzungen konnten im Rahmen des IMPETUS-Projektes im Mittleren Ouémé-Einzugsgebiet festgestellt werden: Es zeigte sich, dass bearbeitete Flächen im Gegensatz zu natürlicher Vegetation durch reduzierte Bodenfauna über weniger Makroporen verfügen (Giertz et al. 2003, zit. n. Giertz & Steup 2008). Gleichzeitig erhöht sich der Oberflächenabfluss durch reduzierte Durchlässigkeit der Bodenoberfläche auf Feldern. Weitere Folgen sind nach Giertz et al. 2005) der Rückgang in der Evaporation durch die geringere Vegetationsdichte und ein Rückgang in der Wasserspeicherung des Bodens, die durch Erosion abnimmt.

### **8.5 Ausblick**

Durch die langen Zeiträume zwischen den Aufnahmen, insbesondere für den Untersuchungsraum Avlékété, aber auch durch das Fehlen multitemporaler Bilddaten innerhalb der Beobachtungsjahre können keine Aussagen über Zu- oder Abnahme von Bracheflächen, bzw. über Verkürzungen von Brachezeiten gemacht werden. Auch lassen sich durch die Aufnahmezeitpunkte der Bilddaten in der Trockenzeit keine Aussagen zum Anteil von Brachevegetation innerhalb von Anbauflächen machen (siehe dazu integrierte Abbaumethode bei Bohlinger 1998). Die Abnahme von Bracheflächen in Südbenin wurde schon von Floquet (1990) im Bereich Abomey-Calaci für den Zeitraum 1960–1985 beobachtet. Für weitere Untersuchungen wäre daher zu untersuchen, wieviel Fläche tatsächlich im Laufe eines Jahres landwirtschaftlich genutzt wird, wie sich Brachezeiten verhalten und verändern. Dazu bedarf es jedoch einer höheren zeitlichen Abdeckung höchst aufgelöster Fernerkundungsdaten – auch innerhalb eines Jahres. Bezüglich der Ausbreitungsgrenzen wäre weiter zu untersuchen, inwiefern sich Faktoren, z.B. der Abstand zu Städten, aber auch ökologische Faktoren wie Bodenqualität, Feuchtedaten, Höhe und Dauer der Wasserstände, Nährstoffgehalte aus Fernerkundungsdaten ableiten lassen, und welche am Boden gewonnenen Informationen damit korreliert werden können.

Des Weiteren kann im Zusammenhang mit Veränderungsprozessen in der Landwirtschaft untersucht werden, inwiefern sich Veränderungen in der Verteilung landwirtschaftlicher Flächen, die durch höhere sozioökonomische Resilienz bzw. Vulnerabilität von Landwirten bedingt sind (siehe Teka 2010) auf die Nutzung, ihre Intensität und Feldgrößen auswirken. Dazu bedarf es jedoch weiterer, möglichst multispektraler Fernerkundungsdaten mit höherer zeitlicher Abdeckung, wie dies durch NigeriaSat-2 für Nigeria erfolgen soll. Hier wäre abzuwarten, inwiefern auch für Benin Daten verfügbar sein werden. Zwar ist die geometrische Auflösung mit 2,5 m im PAN und 5 m im MS nicht ausreichend, um Strukturen der oft sehr kleinen Felder im Untersuchungsgebiet aufzudecken. Dieses

Manko kann jedoch wahrscheinlich durch die hohe zeitliche Auflösung – so diese denn auch Benin betraf – teilweise ausgeglichen werden.

Die Untersuchungen haben die Ausbreitung und Verschiebung von Landwirtschaft durch zunehmende Besiedlung gezeigt. In zahlreichen Ansätzen wird zudem eine Beeinflussung der landwirtschaftlichen Aktivitäten durch veränderte klimatische Bedingungen modelliert. So folgern Fink et al. (2008) für die gesamte Guineazone aus hoher Niederschlagsvariabilität in Kombination mit dem Klimawandel eine Gefahr für nachhaltige Entwicklung in Westafrikanischen Ländern, in denen der Agrarsektor bis zu 80 % der Wirtschaft ausmacht. Agbahoungba et al. (2001) nehmen für Benin nach GCM MAGICC SCENGEN-Simulationen Temperaturzunahmen von +1°C – +2,5°C bis 2100 an. Simulationen des Penman-Monteith Evapotranspirationsmodells würden evaporationsbedingte Wasserverluste von 6–19,5 % vorhersagen. Je nach Station könne dies eine Verlängerung der Trockenzeit von 1–2 Monaten nach sich ziehen. Für die Küstenregion Benins errechnen Paeth et al. (2008) eine Abnahme der Gesamtniederschläge und Regentage bis zur Periode 2041–2050. Dies alles hätte problematische Folgen, insbesondere für die Landwirtschaft. Unter diesen Bedingungen wäre zukünftig zu untersuchen, inwiefern sich die landwirtschaftlichen Flächen verändern, auch im Hinblick auf die oben erwähnten Brachezeiten.

## 9 Veränderungenprozesse des Küstenverlaufes

Sandstrände, wie sie an der Küste Benins vorzufinden sind, machen das Wirken der Ozeane sichtbar und werden oft in vielfältiger Weise umgestaltet. Dabei sind akkumulative und erosive Prozesse zu beobachten. Erosive Prozesse stellen an dieser Stelle eine – insbesondere sozioökonomische – Problematik dar, weil damit Landverluste, aber auch Verluste an Gebäuden und Infrastrukturen einhergehen.

Entlang der Küste von Benin dominieren erosive Prozesse, wahrscheinlich durch hydrologische Eingriffe in die Zuflüsse anthropogen bedingt oder verstärkt (z.B. Blivi et al. 2000). Für Benin tragen Kaki & Oyédé (2000) Ergebnisse bezüglich küstenmorphologischer Prozesse für den Zeitraum 1954–1997 zusammen. Darin werden erste Erosionserscheinungen an der Grenze zu Togo zwischen 1964 und 1969 dokumentiert. Das Untersuchungsgebiet westlich von Cotonou – das Arrondissement Avlékété – wird darin als verhältnismäßig stabil eingeordnet. Für das östliche Untersuchungsgebiet – das Arrondissement Èkpè – dokumentiert die zitierte Quelle seit dem Zeitraum 1981–1984 Erosion (siehe auch Tabelle 1 in Kapitel 2.2). Folgen der Küstenerosion östlich von Cotonou sind unübersehbar, wie die Fotos in Abbildung 47 zeigen oder wie in Kapitel 7 durch Siedlungsumlagerungen aufgezeigt wird. Zahlreiche Autoren weisen auf die Küstenerosion und damit verbundene Gefahren hin (z.B. Kaki & Oyédé 2000, Dossou & Gléhouenou-Dossou 2007). Quantitative Daten zur Untersuchung und Charakterisierung küstenmorphologischer Prozesse, insbesondere neuerer Datums, fehlen jedoch. Dazu soll eine geeignete Methodik entwickelt und an der Küstenlinie von Benin getestet werden.

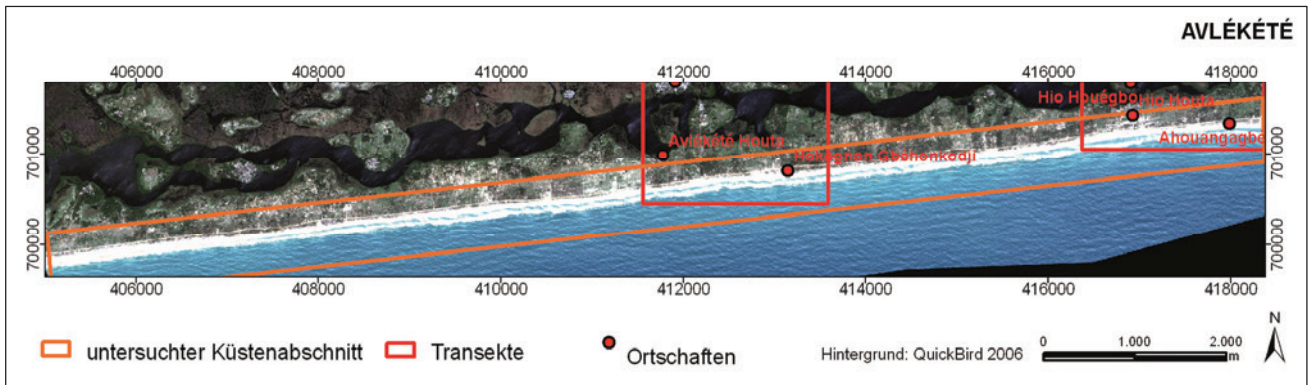
### 9.1 Methodik

Küstenveränderungen werden im Rahmen dieser Arbeit bezüglich ihrer räumlichen und zeitlichen Differenzierung entlang der Küstenlinie untersucht. Dafür werden die Untersuchungsgebiete über die Transekte hinaus für den Bereich erweitert, der in den optischen Daten für den Zeitraum 1995–2007 vorliegt. Karte 25 und Karte 26 stellen die erweiterten Untersuchungsgebiete vor, die für die Küstenlinienuntersuchungen gelten. In Avlékété wird nur der Zeitraum 1995–2006 untersucht, da 2007 für die Westhälfte keine Luftbilder vorliegen. In Èkpè können alle drei dort vorliegenden Zeitschnitte einbezogen werden.

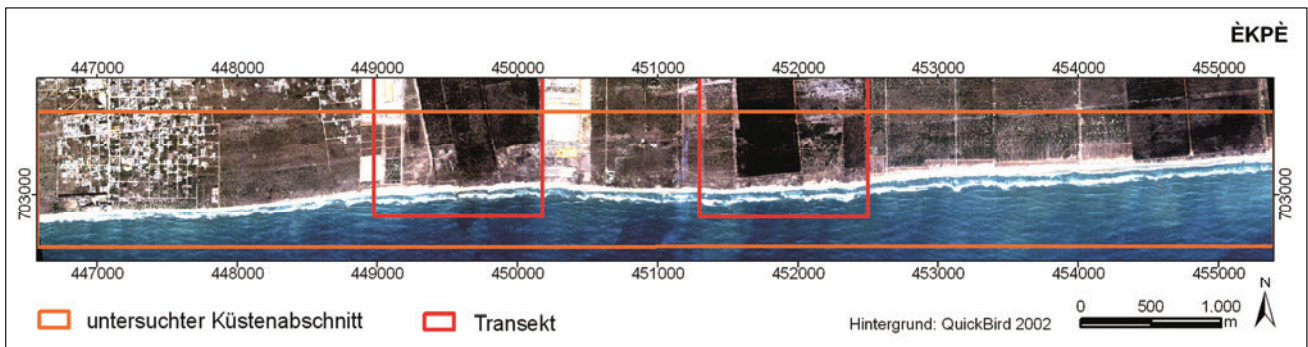
In Kapitel 5.1 wurde darauf eingegangen, dass es verschiedene Operationalisierungen der Küstenlinie gibt, die als Küstenlinienindikatoren (siehe Boak & Turner 2005) bezeichnet werden. Zu Beginn werden die verwendeten Küstenlinienindikatoren vorgestellt und dann aus den Bilddaten extrahiert. Nachfolgend werden die Abstände dieser Küstenlinienindikatoren zueinander zu den einzelnen Zeitpunkten zur Charakterisierung der Küstenabschnitte untersucht. Zur Untersuchung der ablaufenden Prozesse werden anschließend die einzelnen Küstenlinienindikatoren jeweils multitemporal verglichen.



Abbildung 47: Küstenerosion 2002–2007–2008–2010 (links CEDA 2007; weitere Fotos: U. Sturm-Hentschel)



Karte 25: Erweitertes Untersuchungsgebiet (13,4 km) für die Untersuchung des Küstenverlaufes im Bereich Avlékété



Karte 26: Erweitertes Untersuchungsgebiet (8,8 km) für die Untersuchung des Küstenverlaufes im Bereich Èkèpè

### 9.1.1 Erfassung der Küstenlinien

#### 9.1.1.1 Festlegung der verwendeten Küstenlinienindikatoren

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Küstenlinienindikatoren (KLI) Abbruchkante (AK), Nass-Trocken-Linie (NTL) und Wasserlinie (WL) untersucht und dazu hier im lokalen Kontext vorgestellt. In Abbildung 48 werden diese anhand von Fotos vorgestellt. Aus den Fotos wird deutlich, dass die KLI deutlich voneinander abweichen können. Während die KLI im Bereich von ans Meer grenzenden Plantagen wie in Abbildung 48 a dicht beieinander liegen, können sie im Bereich (ehemaliger) Sandgruben wie in Abbildung 49 b relativ weit voneinander differieren. Abbildung 49 zeigt das Erscheinungsbild der zu untersuchenden KLI in den jeweiligen Bilddaten.

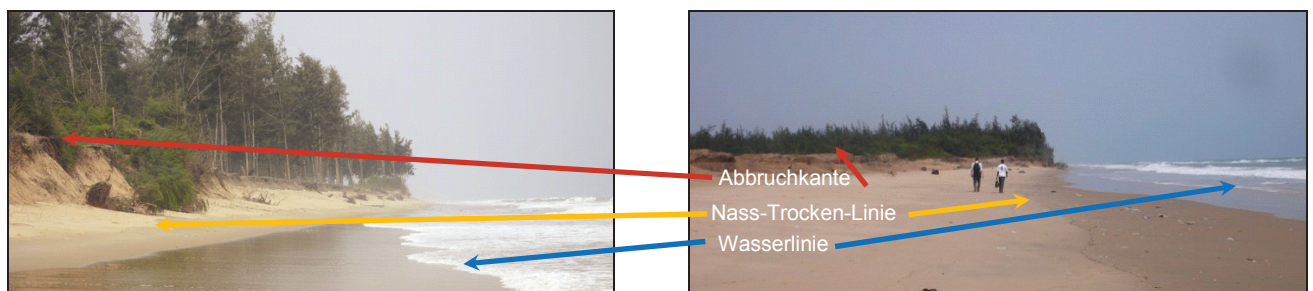


Abbildung 48: Küstenlinienindikatoren im Feldvergleich (Arrondissement Èkèpè; Fotos: U. Sturm-Hentschel)

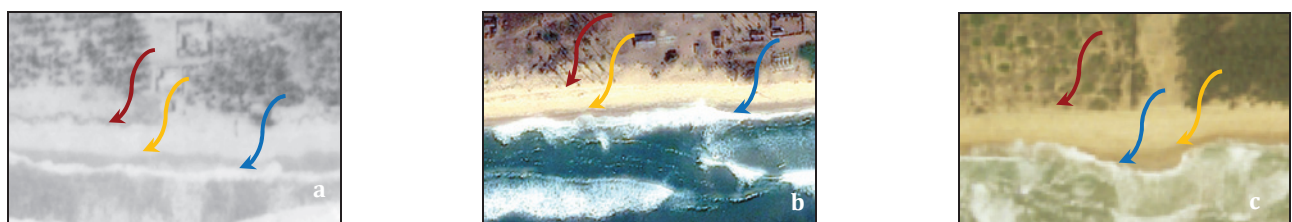
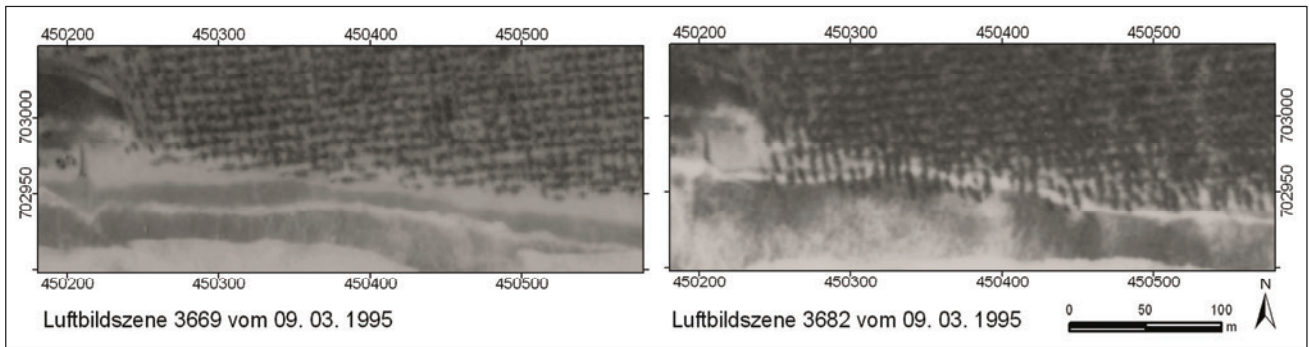


Abbildung 49: Küstenlinienindikatoren in den zur Verfügung stehenden Bilddaten: a) Luftbilder 1995; b) QuickBird 2002 bzw. 2006; c) Luftbilder 2007 – braun: AK, gelb: NTL, blau: WL





Karte 27: Beeinflussung der Sichtbarkeit der Küstenlinienindikatoren durch Umklappeffekt  
(gleicher Aufnahmetag; links: Kamera im Süden; rechts: Kamera im Norden)

Erschwerend für die Interpretation können sich Umklappeffekte bei den Luftbildern von 1995 auswirken: Der Küstenverlauf liegt in den Luftbildern des Jahres 1995 entweder am oberen oder unteren Rand der Bilddaten. Dadurch kommt es zum optischen Umklappeffekt erhöhter Objekte wie Palmen. Liegen die KLI am unteren Rand, werden sie in einigen Abschnitten durch Palmen teilweise verdeckt (Karte 27).

### Abbruchkante

Die Abbruchkante (AK) stellt den Zustand der maximalen Wellenwirkung bzw. der aktuellen Situation des Sandabbaus dar. Sie ist die sozioökonomisch relevanteste Linie, da sie zum Einsturz von Bauwerken und Infrastrukturen führt (Abbildung 47). Im Untersuchungsgebiet Avlékété ist diese Linie oftmals undeutlich oder nicht existent, da der Strand dort flacher ist (Abbildung 50). Daher wird sie in diesem Bereich nicht weiter untersucht. In den vorliegenden Bilddaten des Untersuchungsgebietes Èkpè dagegen ist die AK recht gut erkennbar (Abbildung 49). Die nach Süden zeigende AK zeigt sich durch einen relativ deutlichen lokalen Kontrast je nach Sandfärbung, da der Sand immer wieder frisch abbricht und sie zudem von Süden besonnt wird und dadurch heller wirkt. Teilweise ist ihre Erkennbarkeit jedoch auch in den hier verwendeten Bilddaten gering. Gründe dafür können sein:

- Sandabbau: Er hinterlässt nicht immer eine eindeutige Linie, sondern teilweise ein wellenförmiges Muster durch Spuren von einfahrenden Fahrzeugen, wie Abbildung 51 entnommen werden kann
- Umklappeffekt bei Luftbildern: dadurch kann die AK verkürzt erscheinen

Insbesondere auf Grund ihrer sozioökonomischen Relevanz wird die AK in der vorliegenden Untersuchung im Untersuchungsgebiet Èkpè erfasst.



Abbildung 50: Küstenverlauf im Arrondissement Avlékété – nicht überall zeigt sich die AK (Fotos: U. Sturm-Hentschel)

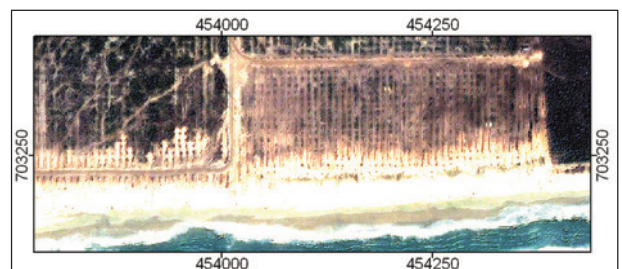


Abbildung 51: Beeinflussung des Verlaufes der AK durch Sandabbau (links: U. Sturm-Hentschel; rechts: QuickBird 2002)

**Nass-Trocken-Linie**

Die Nass-Trocken-Linie (NTL) ist durch den als Hell-Dunkel-Grenze sichtbaren Übergang von trockenem zu nassem Sand charakterisiert. Damit ist sie in ihrem Verlauf abhängig vom Heranreichen und dadurch bedingten Durchfeuchten der Wellen, das eine Zeitlang sichtbar bleibt. Sie ist jedoch weniger vom aktuellen Wellenschlag abhängig als die WL, wie sich in Abbildung 49 zeigt.

**Wasserlinie**

Die Wasserlinie (WL) zeigt sich an der beninischen Küste mehrheitlich durch die dem Strand zugewandte Seite einer weißschäumenden Welle und ist dort somit mit der in Kapitel 5.1 vorgestellten Brecherlinie identisch (siehe Abbildung 49). In einigen Bereichen ist das Wasser klar. Dort sind leichte Grauwertunterschiede zu interpretieren. Die WL wird erhoben, obwohl sie am meisten vom Wellenschlag abhängt. In Multispektraldaten, wie in QuickBird-Daten, kann sie aber sehr einfach durch einen NDVI-Schwellwert bestimmt werden und damit für zukünftige Untersuchungen als Referenz dienen.

**9.1.1.2 Einfluss der Gezeiten auf die Küstenlinienindikatoren**

Bei den an die Wasserfront gebundenen KLI wie WL und NTL ist als weiterer Faktor der Gezeitenstand von variierender Bedeutung. Für Cotonou liegen keine Tidendiagramme vor, jedoch für Lomé (Togo) und Lagos (Nigeria). Wie aus dem Vergleich der Tidendiagramme (Abbildung 52) ersichtlich ist, sind die Tiden für die beiden Stationen gleichphasig, somit ist davon auszugehen, dass die Tide dazwischen mit der gleichen Phase verläuft und man dadurch die Werte der beiden Stationen als Äquivalent heranziehen kann. Abbildung 52 zeigt dies beispielhaft für den 09. 03. 1995. Des Weiteren ist festzustellen, dass zu allen Aufnahmezeitpunkten die Tiden nahe am Minimum liegen<sup>76</sup>. Somit schwanken die absoluten Wasserstände zu den Aufnahmezeitpunkten um wenige Dezimeter, wie auch Tabelle 23 zu entnehmen ist. Da die Wellenhöhen diesen Unterschied um ein Mehrfaches übersteigen, sind die Einflüsse der Gezeiten auf die Küstenlinienindikatoren in diesem Fall vernachlässigbar.

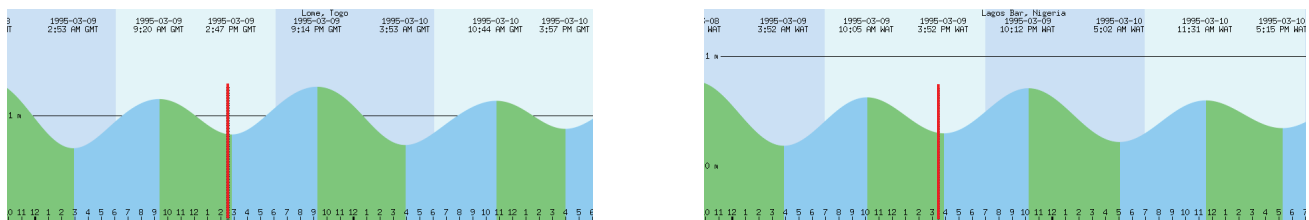


Abbildung 52: li.: Tidenhubverlauf am 09. 03. 1995 in Lomé, Togo; re.: Tidenhubverlauf am 09. 03. 1995 in Lagos, Nigeria (Quelle: MobileGeographers 2011); Aufnahmezeitpunkt um 14:30 GMT<sup>77</sup> bzw. 15:30 Uhr WAT<sup>78</sup> ist rot markiert

Tabelle 23: Tidenhöhen zu den Aufnahmezeitpunkten der Bilddaten am Beispiel der Tidenmessstation Lagos, Nigeria (WolframAlpha 2011)

	Avlékété		Èkpe	
Bilddaten	Überflug	Meeresstand	Überflug	Meeresstand
<b>Zeitpunkt I (Luftbild)</b>	10.03.1995 15:45	0,85 m	09.03.1995 15:30	0,8 m
<b>Zeitpunkt II (QuickBird)</b>	07.11.2006 10:47	0,5 m	23.12.2002 10:20	0,8 m
<b>Zeitpunkt III (Luftbild)</b>	25.03.2007 ~14:25	0,8 m	25.03.2007 ~14:35	0,8 m

<sup>76</sup> Bei MobileGeographers (2011) und WolframAlpha (2011) kann auf die Tideninformationen zu jedem gewünschten Zeitpunkt zurückgegriffen werden.

<sup>77</sup> GMT = Greenwich Mean Time

<sup>78</sup> WAT = Western Africa Time

### 9.1.1.3 Visuelle Interpretation der Küstenlinienindikatoren und von ihnen begrenzter Flächen

Für die Analyse der Küstenlinienveränderungen werden zuverlässige und vergleichbare Erfassungen der KLI aus den heterogenen Daten benötigt. Aus diesem Grund wird die visuelle Interpretation der Indikatoren gewählt, einer auch in der Literatur als weitverbreitet aufgezeigten Methode (siehe z.B. Boak & Turner 2005). Die KLI werden im Maßstab 1:2.000–1:5.000 aus den Luft- und Satellitenbilddaten am Bildschirm digitalisiert. Zur Erfassung der Flächenverluste durch Erosion oder Flächengewinne durch Akkumulation werden die von den Linien begrenzten Flächen mit Hilfe der digitalisierten Linien als Polygone generiert. Tabelle 24 stellt die KLI und die davon begrenzten Küstenflächen vor.

Tabelle 24: Küstenlinienindikatoren und davon begrenzte Küstenflächen

Küstenlinienindikatoren	Korrespondierende Küstenflächen
AK: <u>A</u> bbruch <u>k</u> ante	TS: Streifen <u>t</u> rockenen <u>S</u> andes bis zur Abbruchkante
NTL: <u>N</u> ass- <u>T</u> rocken- <u>L</u> inie	NS: Streifen <u>n</u> assen <u>S</u> andes zwischen Wasserlinie und Nass-Trocken-Linie
WL: <u>W</u> asser <u>l</u> inie	WF: gesamte <u>W</u> asser <u>f</u> läche bis zur Wasserlinie

### 9.1.2 Berechnung von Liniendifferenzen – zur räumlichen Analyse und zur Veränderungsbestimmung der Küstenlinienindikatoren

Um entweder räumliche Differenzen zwischen Linien zu einem Zeitpunkt zu berechnen oder um Veränderungen einer Linie über eine Zeitspanne zu erfassen, müssen die Entfernungen zwischen den zwei betrachteten Linien berechnet werden. Im Rahmen der hier realisierten Untersuchungen wird von den untersuchten Linien direkt ausgegangen. Dabei fungiert eine der beiden zu vergleichenden Linien ( $L_1$ ) als Referenzlinie. Bei zeitlichem Vergleich ist dies die Linie des ersten betrachteten Zeitpunktes. An diese wird in ArcGIS ein Pufferraster mit einer Rasterweite von 1 m generiert, für das in jede Rasterzelle die euklidische Distanz geschrieben wird. Dieses ergibt das Distanzraster. Die zweite betrachtete Linie ( $L_2$ ) wird direkt gerastert mit einer Rasterweite von 1 m. Dieses gilt als Nullraster<sup>79</sup>. In einem weiteren Schritt werden beide Raster verschnitten und die Zellen des Nullrasters werden mit den Werten aus dem Distanzraster überschrieben. Daraus ergibt sich eine gerasterte Entfernungslinie am Ort der  $L_2$ , die beim Vergleich zweier KLI deren Abstand zueinander oder beim Vergleich zweier Zeitpunkte die zeitlichen Veränderungen darstellt. Zur Prozessanalyse wird jeweils bestimmt, um wie viel sich der KLI seit dem vorherig betrachteten Zeitpunkt verändert hat. Viele Verfahren beziehen sich auf eine feste Referenzlinie, beispielsweise die erste betrachtete Linie. Gegenüber diesen Verfahren bietet der hier vorgestellte Ansatz den Vorteil, dass landwärtige Richtungsänderungen des Erosionsprozesses einfließen können. Zur Bestimmung der Veränderungsrichtung wird ein Richtungskoeffizient eingeführt. So kann zwischen Verschiebung nach Norden, d.h. Erosion, und Verschiebung nach Süden, d.h. Akkumulation, unterschieden werden. Um zeitliche Veränderungen als jährliche Angabe und damit untereinander vergleichbar zu erhalten, kann der Wert durch die verstrichene Zeit geteilt werden, um die Veränderungslinie zu erhalten. Abbildung 53 zeigt den methodischen Ablauf.

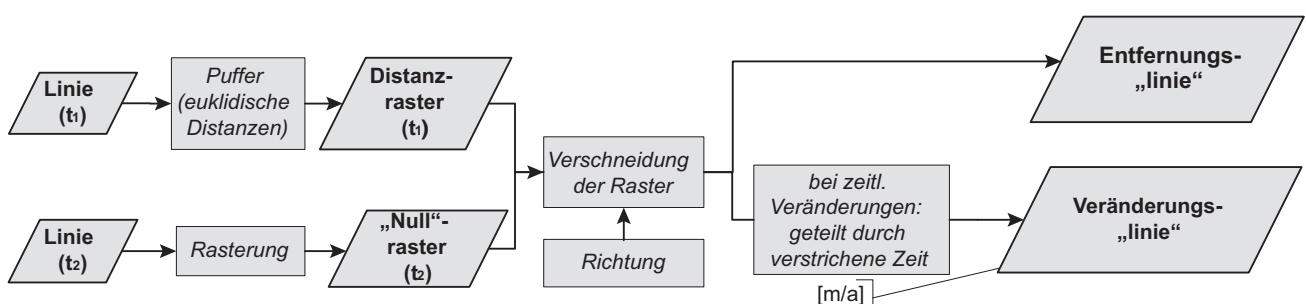


Abbildung 53: Bestimmung von Liniendifferenzen

<sup>79</sup> Anmerkung: Die Software ArcGIS definiert am Ort der Linie im Raster den Wert 0, an allen anderen Stellen ist der Rasterwert „ungültig“ gesetzt.

Vorteil dieser Methode gegenüber den in Kapitel 5.3 vorgestellten Transektmethoden sind a) kontinuierliche Veränderungswerte entlang des Küstenverlaufes, b) die Unabhängigkeit von einer einzigen Basislinie, da zu jedem Zeitpunkt die Linienpaare, zwischen denen die Abstände errechnet werden, bestimmt werden und damit c) die Integration von Richtungsänderungen.

### 9.1.3 Erfassung der Flächenveränderungen durch Küstenlinienverschiebungen

Im Zusammenhang mit Küstenlinienverschiebungen ist neben der räumlich differenzierte Veränderungsrate die durch Erosion verlorene oder durch Akkumulation hinzugewonnene Landfläche von Interesse. Der Flächenverlust oder -gewinn kann durch die Verschneidung der Flächen zu den Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$  errechnet werden. Zum Vergleich der Veränderungsgeschwindigkeit in verschiedenen Zeiträumen wird durch Einrechnung der verstrichenen Zeit die jährliche Landflächenveränderungsrate errechnet.

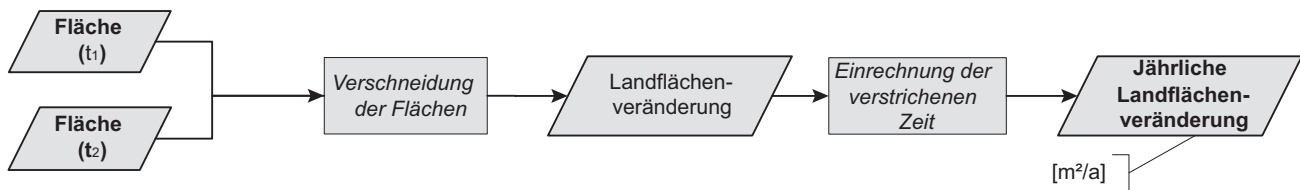


Abbildung 54: Bestimmung der Landflächenveränderungen

## 9.2 Ergebnisse der Küstenlinienerfassung

Für einen Abschnitt im Transekt Djéffa wurden die Küstenlinienindikatoren AK, NTL und WL durch drei Testbearbeiter erfasst, deren Ergebnisse in Tabelle 25–Tabelle 27 sowie Karte 28 vorgestellt werden. Die Werte in den Tabellen beziehen sich jeweils auf die Abweichungen zwischen Testperson 1 und jeweils einer der beiden anderen Testpersonen (2 bzw. 3). Unabhängig von der digitalisierenden Person wird deutlich, dass die WL und NTL in ihrem Verlauf eng aneinander gekoppelt und mit geringem Abstand voneinander verlaufen. Die AK weicht in ihrem Verlauf teils deutlich – insbesondere im Bereich von Sandabbau – von den erstgenannten Linien ab. Beide Beobachtungen sind durch die Beobachtungen vor Ort, wie es Abbildung 48 a und b auf S. 94 zeigen, zu erwarten gewesen. Die Interpretationen der AK differieren am stärksten. Dabei ist festzustellen, dass dies insbesondere dann der Fall ist, wenn durch Sandabbau die Linearität der AK nicht mehr gegeben und ihre Zuordnung schwierig ist (2002 und 2007). Trotz der Differenzen wird jedoch ihr tendenzieller Verlauf in allen Interpretationsergebnissen deutlich. In allen drei Testinterpretationen zeigt sich der gleichmäßigere Verlauf der NTL. Für die folgenden Untersuchungen wird analog zur Herangehensweise bei Gebäuden und landwirtschaftlichen Flächen ein durch einen weiteren Bearbeiter kontrollierter Datensatz an KLI genutzt. Die gesamten Untersuchungsräume mitsamt ihren KLI werden in Kapitel 9.3 parallel vorgestellt.

Tabelle 25: Wasserlinien – Abweichungen zwischen den drei Testbearbeitern

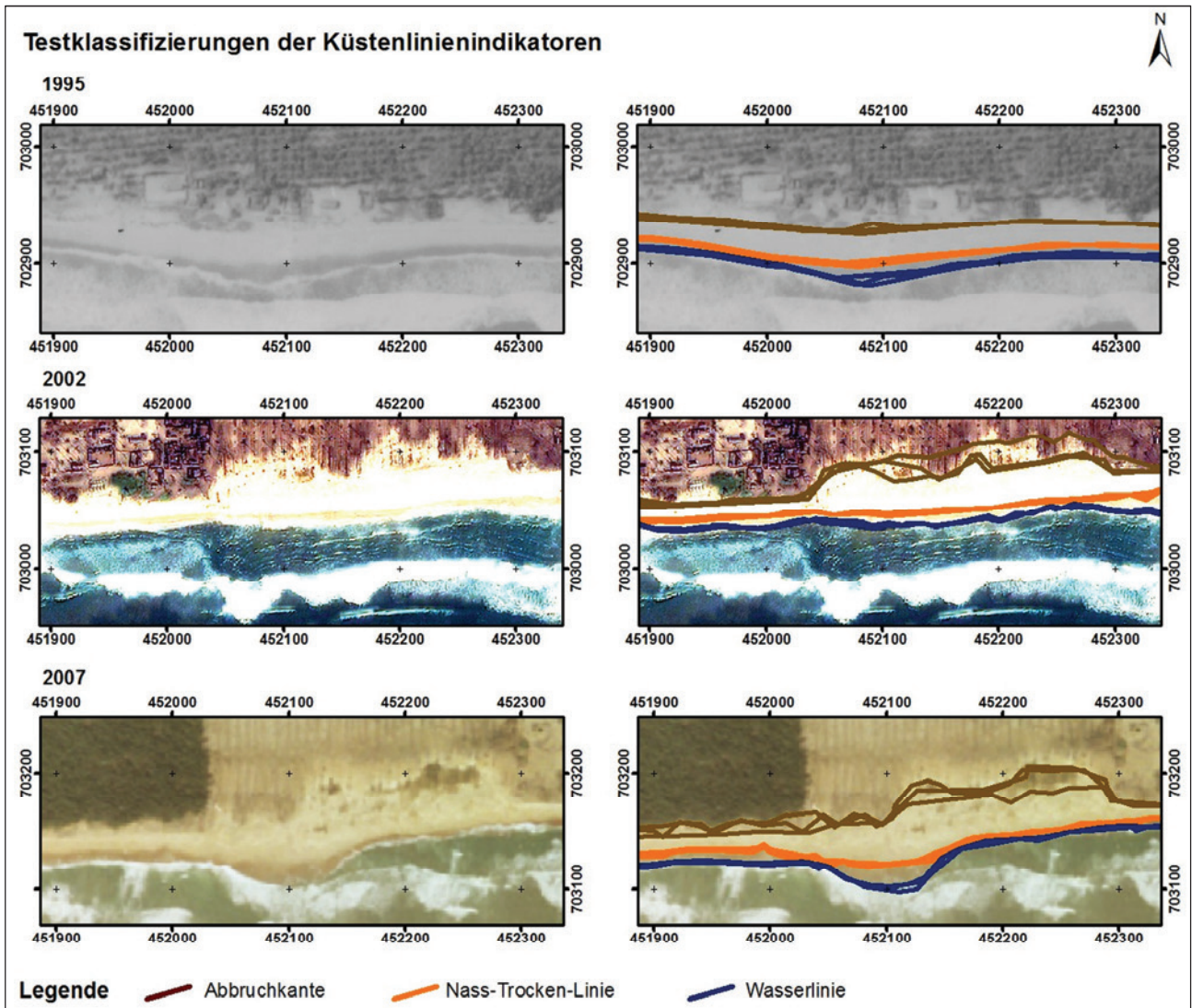
	1-2			1-3		
	'95	'02	'07	'95	'02	'07
Minimum	0,0 m	0,0 m	0,0 m	0,0 m	0,0 m	0,0 m
Maximum	7,1 m	4,1 m	3,0 m	7,0 m	4,0 m	6,7 m
<b>Mittelwert</b>	<b>1,6 m</b>	<b>1,2 m</b>	<b>0,7 m</b>	<b>3,1 m</b>	<b>1,2 m</b>	<b>2,0 m</b>
Median	1,0 m	1,0 m	1,0 m	3,0 m	1,0 m	2,0 m

Tabelle 26: Nass-Trocken-Linien – Abweichungen zwischen den drei Testbearbeitern

	1-2			1-3		
	'95	'02	'07	'95	'02	'07
Minimum	0,0 m	1,0 m	1,0 m	0,0 m	1,0 m	1,0 m
Maximum	4,0 m	5,0 m	4,2 m	5,0 m	6,0 m	7,3 m
<b>Mittelwert</b>	<b>1,1 m</b>	<b>1,9 m</b>	<b>2,4 m</b>	<b>1,6 m</b>	<b>2,7 m</b>	<b>3,2 m</b>
Median	1,0 m	2,0 m	2,4 m	1,0 m	3,0 m	3,0 m

Tabelle 27: Abbruchkanten – Abweichungen zwischen den drei Testbearbeitern

	1-2			1-3		
	'95	'02	'07	'95	'02	'07
Minimum	0,0 m	0,0 m	0,0 m	0,0 m	0,0 m	0,0 m
Maximum	20,2 m	23,0 m	17,0 m	8,0 m	15,2 m	22,0 m
<b>Mittelwert</b>	<b>3,5 m</b>	<b>7,2 m</b>	<b>3,9 m</b>	<b>1,8 m</b>	<b>2,7 m</b>	<b>5,6 m</b>
Median	2,0 m	5,0 m	2,8 m	1,4 m	2,0 m	3,6 m

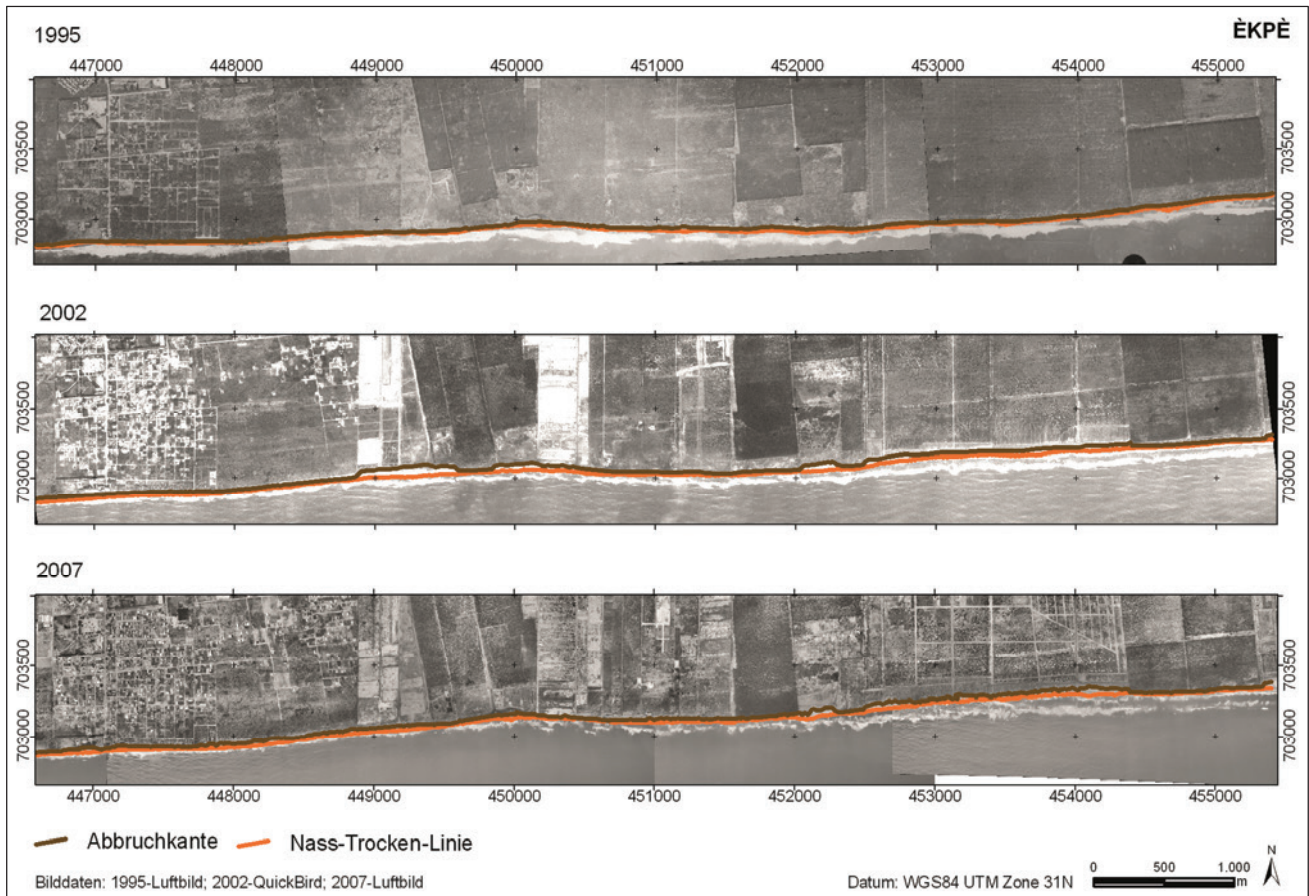


Karte 28: Ergebnisse der Testinterpretationen der Küstenlinienindikatoren zu den Aufnahmezeitpunkten

### 9.3 Räumliche Analyse der Küstenlinienindikatoren

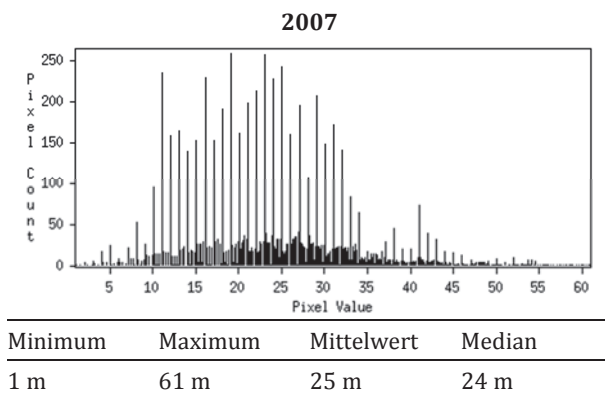
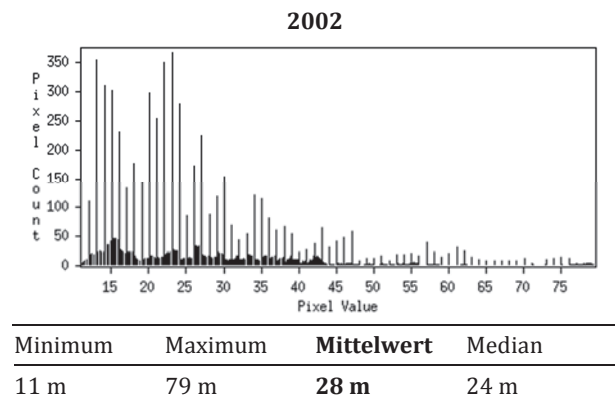
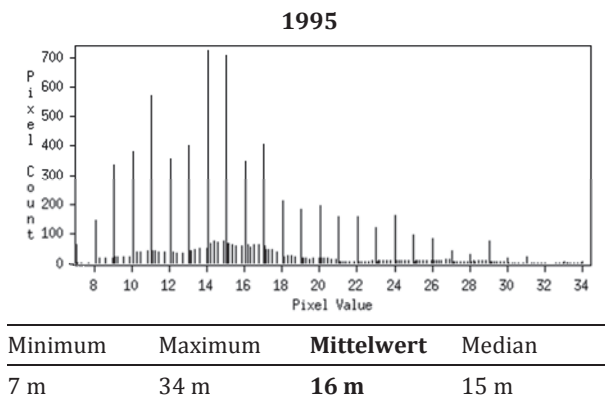
#### 9.3.1 Abstände zwischen Abbruchkante und Nass-Trocken-Linie

In Karte 29 zeigen sich Unterschiede im Verlauf der AK (braun) und der NTL (gelb). Die Unterschiede aus dem Jahr 1995 sind dabei weniger ausgeprägt als 2002 und 2007. Es zeigt sich ein starkes Zurückweichen der AK von der NTL besonders in einigen Bereichen, die als (ehemalige) Sandabbaugebiete identifiziert werden können. Die NTL zeigt einen weniger starken Einfluss des Sandabbaus auf ihren Verlauf. Der quantitative Vergleich der beiden KLI (Tabelle 28) bestätigt diesen Befund. Zwischen AK und NTL besteht in allen Zeitpunkten ein wesentlicher Unterschied. Es lassen sich auch hier deutlich Veränderungen zwischen den Aufnahmen feststellen. Während 1995 die Abweichung im Mittel 16 m und maximal 34 m beträgt, liegen die Werte 2002 wesentlich höher mit einem Mittelwert von 28 m und einem Maximalwert von 79 m. 2007 liegen die Werte leicht niedriger: im Mittel bei 25 m und maximal bei 61 m.



Karte 29: Vergleich zwischen Abbruchkante und Nass-Trocken-Linie

Tabelle 28: Beträge der Abweichungen zwischen Abbruchkante und Nass-Trocken-Linie im Untersuchungsgebiet Èkpè



### 9.3.2 Abstände zwischen Nass-Trocken-Linie und Wasserlinie

Bei der Untersuchung der Abstände zwischen NTL und WL im Untersuchungsgebiet Avlékété zeigen sich im Mittel ähnliche Werte: 7,3 m im Jahre 1995 und 8 m im Jahre 2006.

Aus Tabelle 30 geht hervor, dass die WL und NTL im Untersuchungsgebiet Èkpè 1995 im Mittel 6 m voneinander abweichen, 11 m im Jahr 2002 und 8 m im 2007. Diese Beobachtung ist analog der Entwicklung der Abstände zwischen AK und NTL.

Tabelle 29: Beträge der Abweichungen zwischen NTL und WL im Untersuchungsgebiet Avlékété

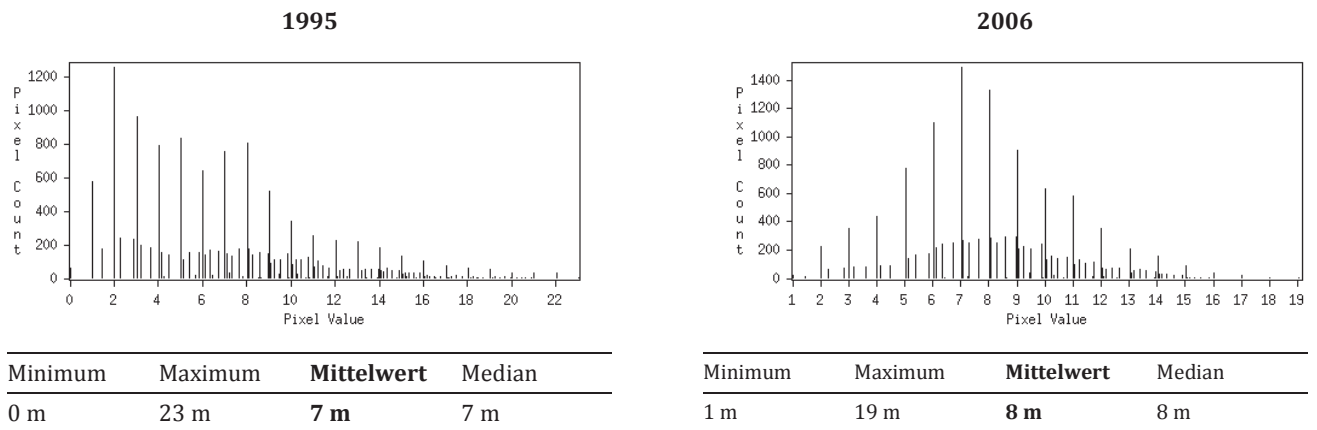
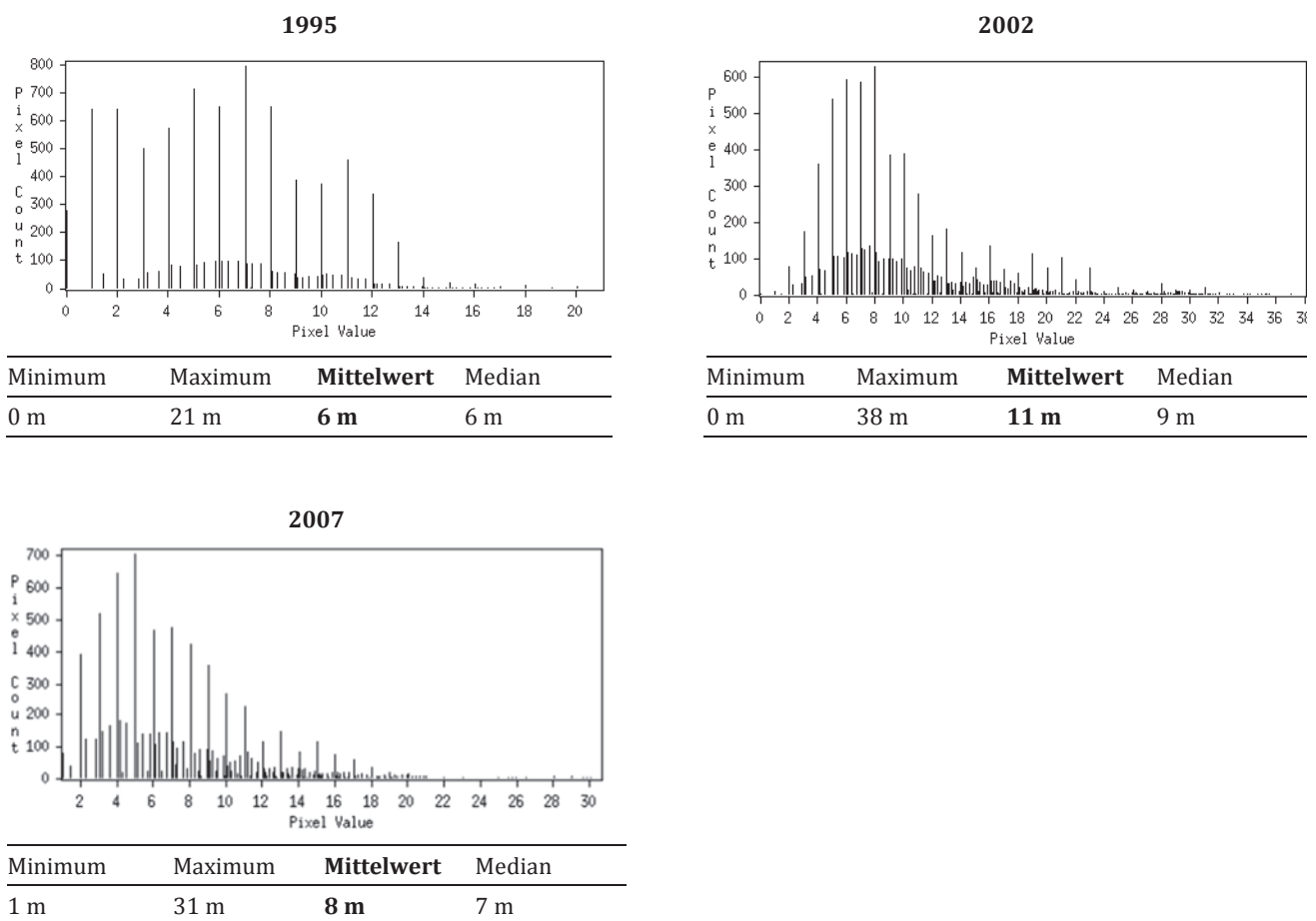


Tabelle 30: Beträge der Abweichungen zwischen NTL und WL im Untersuchungsgebiet Èkpè



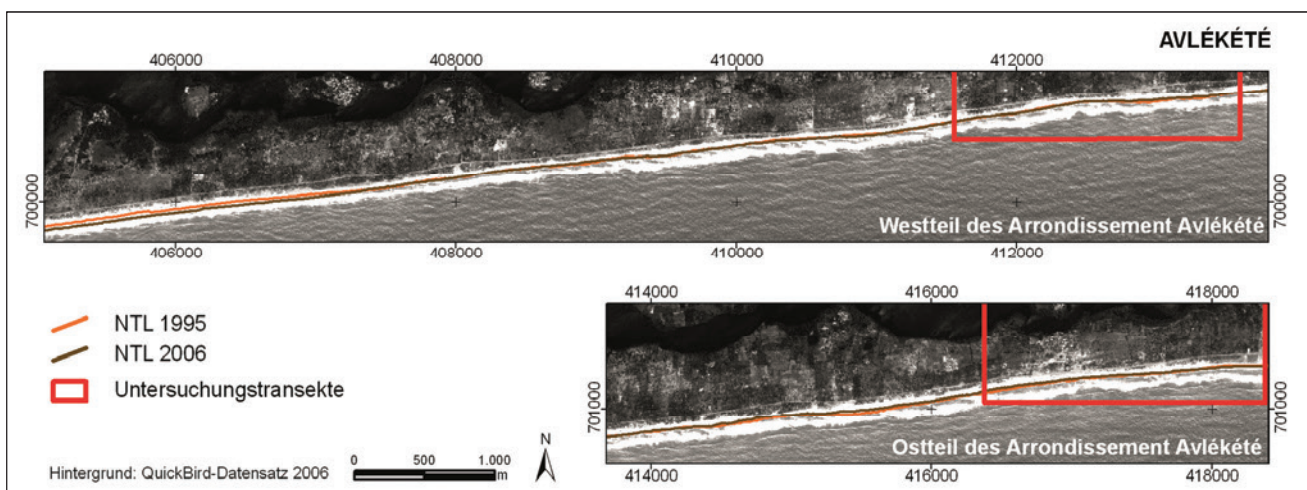
## 9.4 Veränderungen des Küstenverlaufes

### 9.4.1 Veränderungen des Küstenverlaufes im Arrondissement Avlékété

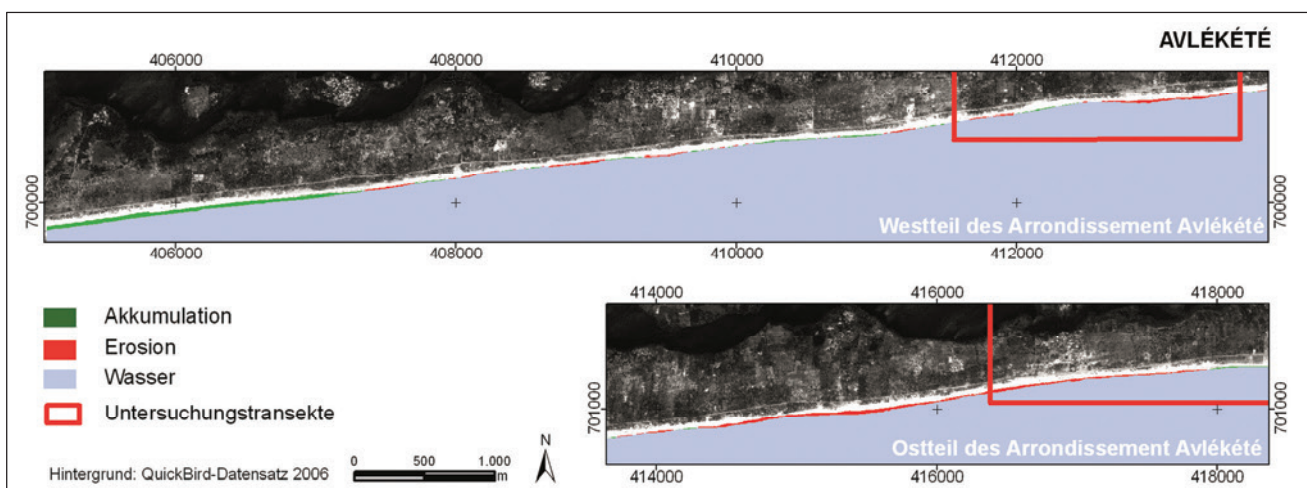
Die Untersuchungen im *Arrondissement Avlékété* im Zeitraum 1995–2006, die die NTL vergleichen, zeigen für den gesamten Untersuchungsraum sehr geringe Veränderungen: beide Linien liegen dicht beieinander (Karte 30). Die westlichen zwei Kilometer zeigen leichte Akkumulationserscheinungen, der Zentralbereich verhält sich relativ stabil, und im Osten dominiert leichte Erosion, die am Schluss wieder in Akkumulation übergeht (Karte 31).

Da davon ausgegangen wird, dass durch Georeferenzierung und Digitalisierungen die digitalisierten Linien nicht lagegenau dargestellt sind, werden in Karte 32 lediglich diejenigen Küstenabschnitte als verändert dargestellt, in denen die Linien mindestens 5 m bzw. 10 m voneinander abweichen. Auch unter dieser Einschränkung fällt die Akkumulation im Osten des Untersuchungsgebietes, die relative Stabilität im Zentralbereich und die Erosion im östlichen Bereich auf. Die Akkumulation im äußersten Ostbereich fällt nur bei einer Kategorisierung zwischen 5 und 10 m Liniendifferenz auf.

Die Gesamtwerte der Küstenverlaufsänderungen werden in Tabelle 31 vorgestellt. Insgesamt wurden im Beobachtungszeitraum 73 ha Land akkumuliert, während 53 ha erodiert wurden. Dadurch ergibt sich ein Landgewinn von 20 ha, was im Mittel einer Gesamtverschiebung der NTL von lediglich 0,9 m nach Süden im beobachteten Zeitraum von 11,7 Jahren entspricht. Die Werte reichen von 37 m Verschiebung nach Süden (Akkumulation) bis 26 m Verschiebung nach Norden (Erosion). Die Jahresraten liegen damit zwischen 2,25 m Erosion bis 3,20 m Akkumulation pro Jahr, im Mittel heben sich Erosion und Akkumulation im untersuchten Abschnitt.

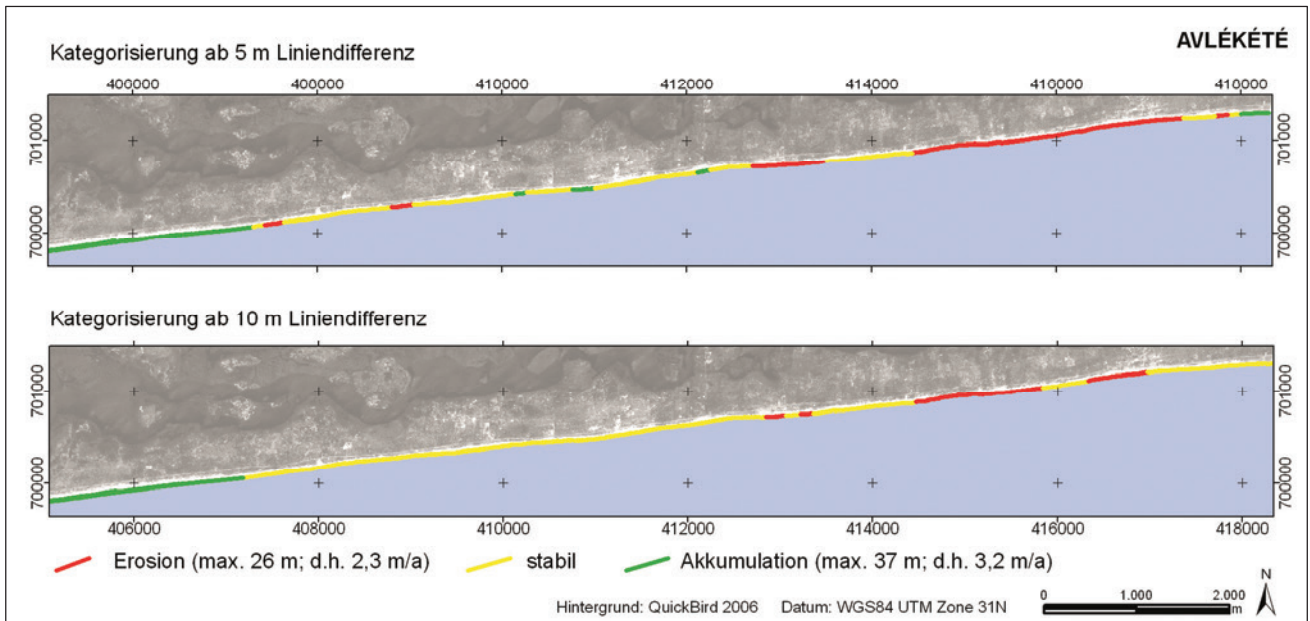


Karte 30: Vergleich der NTL 1995 und 2006 im Untersuchungsgebiet Avlékété



Karte 31: Küstenflächenveränderungen zwischen 1995 und 2006 im Untersuchungsgebiet Avlékété





Karte 32: Entwicklung der Küstenlinien im Arrondissement Avlékété

Tabelle 31: Küstenveränderungen in Avlékété für den Zeitraum 1995–2006 bezogen auf den untersuchten Küstenabschnitt von ca. 13,4 km Länge (pos.: Verlagerung nach Süden = Akkumulation; neg.: nach Norden = Erosion)

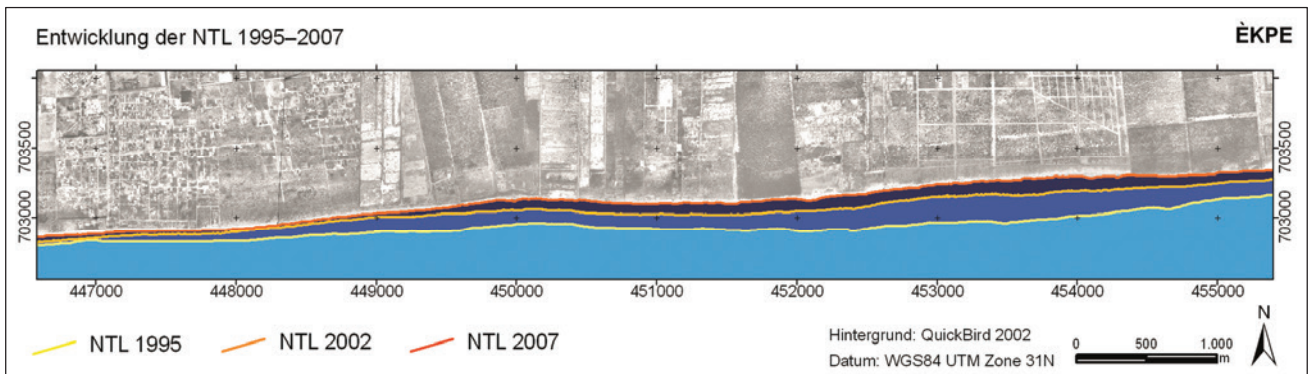
	<b>1995–2006</b>
<b>Akkumulation</b>	<b>73 ha</b>
<b>Erosion</b>	<b>-53 ha</b>
Landflächenveränderung (gesamt)	20 ha
<b>Durchschnittliche jährliche Landflächenveränderung</b>	<b>1,7 ha/a</b>
Minimale Küstenverlagerung (total)	37 m
Maximale Küstenverlagerung (total)	-26 m
Durchschnittliche Küstenverlagerung (gesamt)	0,9 m
Minimale jährliche Küstenverlagerung (gemittelt)	3,2 m
Maximale jährliche Küstenverlagerung (gemittelt)	2,25 m
<b>Durchschnittliche Küstenverlagerung (pro Jahr)</b>	<b>~0 m</b>

#### 9.4.2 Veränderungen des Küstenverlaufes im Arrondissement Èkpè

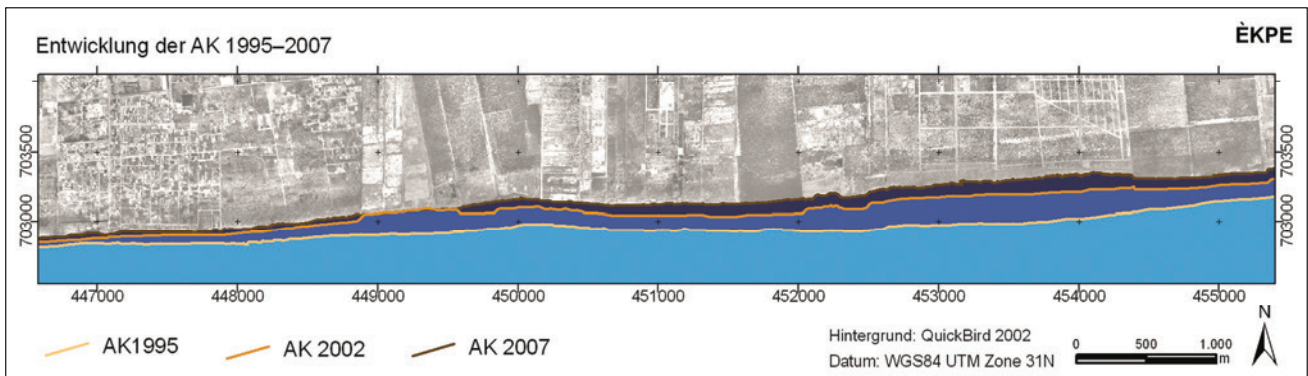
Im Vergleich zu Avlékété zeigen die Ergebnisse der Veränderungsanalyse im Untersuchungsgebiet Èkpè eindeutig Erosion für den untersuchten Küstenabschnitt östlich von Cotonou in seiner gesamten Länge (8830m). Es werden die Ergebnisse für die Jahre 1995, 2002 und 2007 verglichen. Im Gegensatz zu Avlékété werden hier AK und NTL analysiert.

Karte 33 zeigt die Entwicklung der NTL, Karte 34 dokumentiert die Verlagerung der AK im Untersuchungszeitraum. Beide Linienklassen zeigen eine sich zur Mitte des Untersuchungsabschnittes verstärkende und nach Osten

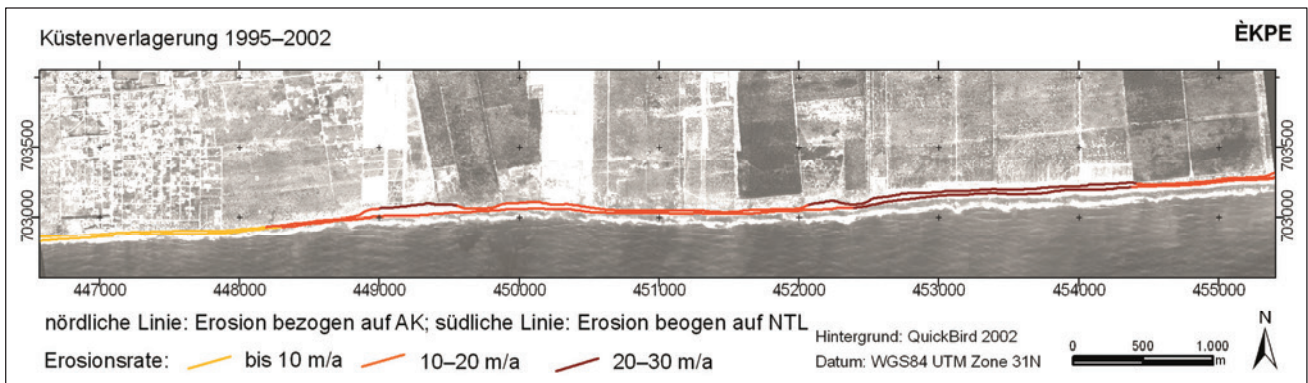
wieder abnehmende Erosionstätigkeit durch Aufweitung der Linien an. Dabei zeigt sich ein unterschiedlicher Verlauf der NTL und AK sowie deren unterschiedliche Dynamik in der Verlagerung. Die NTL verlagert sich durchgehend nach Norden. Die AK dagegen zeigt bei 449000 E eine stärkere Verlagerung nach Norden bis 2002, dann aber einen Ausgleich bis 2007.



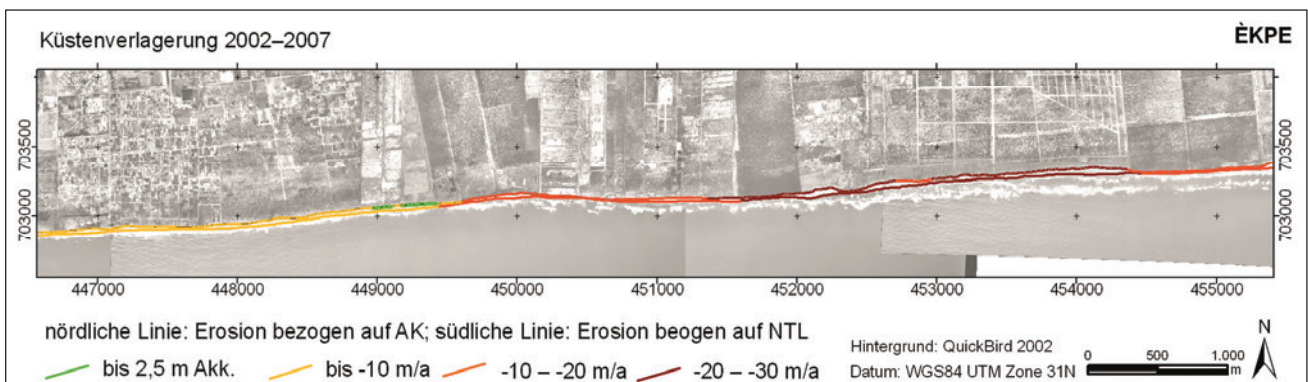
Karte 33: Verlagerung der Nass-Trocken-Linie



Karte 34: Verlagerung der Abbruchkante



Karte 35: Küstenerosion 1995–2002; durchschnittliche jährliche Erosionsrate



Karte 36: Küstenerosion 2002–2007; durchschnittliche jährliche Erosionsrate

Die Erosionsraten von 1995–2002 entlang des Küstenverlaufes bezogen auf die beiden KLI (AK und NTL) lassen sich aus Karte 35 ablesen; Karte 36 zeigt die Raten für den Zeitraum 2002–2007. Dabei werden jeweils die Werte der AK und diejenigen der NTL dargestellt. Zumeist wird die Küste um mehr als zehn Meter pro Jahr erodiert; in Teilbereichen sind es sogar zwischen 20 und 30 m – in allen Bereichen deutlich mehr als im Arrondissement Avlékété. Lediglich die AK zeigt die oben erläuterte Anomalie. Im Westen sind die geringsten Erosionsraten zu finden, die sich nach Osten hin verstärken. Dabei ist zu beobachten, dass sich die Erosion im Westen zur Mitte hin im Zeitraum 2002–2007 abgeschwächt hat. Gleichzeitig weitet sich jedoch der Bereich, welcher Erosionsraten zwischen 20 und 30 m pro Jahr anzeigt, vom Beobachtungszeitraum 1995–2002 zum Beobachtungszeitraum 2002–2007 aus.

Anhand der Verschneidungen der Küstenflächen, die in Karte 33 und Karte 34 unterlegt wurden, können die Flächenverluste für den untersuchten Küstenabschnitt in seiner Gesamtheit errechnet werden. In Tabelle 32 werden die quantitativen Angaben aus der Küstenlinien- und -flächenbetrachtung zusammengetragen und für den Küstenabschnitt insgesamt dargestellt. Im Gesamtzeitraum 1995–2002 wurden bezogen auf die AK ca. 166 ha und auf die NTL 158 ha Land erodiert. Das heißt, die AK hat sich stärker nach Norden verlagert; der Streifen trockenen Sandes (TS) bis zur AK hat sich somit um 8 ha vergrößert. Insgesamt liegt der jährliche Landflächenverlust bei rund 1,5 ha pro Küstenkilometer. Dabei zeigt sich, dass die Erosion bezogen auf die AK abgenommen hat, während die Verlagerung der NTL zunahm.

Tabelle 32: Erosionswerte in Èkpè für die Zeiträume 03/1995–12/2002 und 12/2002–03/2007 bezogen auf den untersuchten Küstenabschnitt von ca. 8,8 km Länge (pos.: Verlagerung nach Süden = Akkumulation; neg.: nach Norden = Erosion)

	1995–2002		2002–2007	
	Bezogen auf AK	Bezogen auf NTL	Bezogen auf AK	Bezogen auf NTL
Erosion (gesamt)	-111 ha	-101 ha	-55 ha	-57 ha
Durchschnittliche jährliche Erosion	-14,5 ha/a	-13 ha/a	-13 ha/a	-13,5 ha/a
<b>Durchschnittlicher jährlicher Landflächenverlust pro km</b>	<b>-1,6 ha/a*km</b>	<b>-1,47 ha/a*km</b>	<b>-1,5 ha/a*km</b>	<b>-1,53 ha/a*km</b>
Minimale Küstenverlagerung (total)	-31 m	-13 m	11 m	-13 m
Maximale Küstenverlagerung (total)	-210 m	-199 m	-118 m	-117 m
Durchschnittliche Küstenverlagerung (gesamt)	-127 m	-115 m	-63 m	-65 m
Minimale jährliche Küstenverlagerung (gemittelt)	-4 m	-2 m	2,5 m	-3 m
maximale jährliche Küstenverlagerung (gemittelt)	-27 m	-26 m	-28 m	-28 m
<b>Durchschnittliche Küstenverlagerung (pro Jahr)</b>	<b>-16,5 m</b>	<b>-15 m</b>	<b>-15 m</b>	<b>-15,5 m</b>

## 9.5 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

### 9.5.1 Technische Diskussion

Das im Methodenteil angesprochene Problem des radialen Versatzes in den Luftbildern von 1995 hat einen Einfluss im Westteil des Untersuchungsraumes Èkpè bis 448400E und im Ostteil ab 453000E, da für diese Bereiche lediglich Luftbilder vorliegen, in denen der Küstenverlauf am äußersten Südrand der Aufnahme verlaufen. Die daraus resultierenden Fehler (ca. 15 m) können jedoch im Angesicht der Größenordnung der Erosion im Arrondissement Èkpè und der Zeitspannen zwischen den Aufnahmen vernachlässigt werden.

Innerhalb von Sandabbauereichen sind die AK in ihrer Ausdehnung teilweise schwierig nachzuvollziehen. Auf die daraus resultierenden Fehler wird im folgenden Abschnitt im Rahmen des Bearbeitertests eingegangen.

### 9.5.2 Abhängigkeit des Verlaufes der Küstenlinienindikatoren vom Bearbeiter

Im Bearbeitervergleich wichen die WL der drei Bearbeiter bzw. die NTL im Mittel zwischen 1 und 3 m voneinander ab. Im Untersuchungsgebiet Avlékété liegen die Abweichungen der Bearbeiter somit weit über den mittleren Jahresraten ( $\sim 0,1$  m/a). Im Untersuchungsgebiet Èkpè stellen sie dagegen lediglich einen Bruchteil der jährlichen Erosionsraten ( $\sim 15$  m/a) dar. Bei den AK ergaben sich im Mittel bis zu 7 m Abweichungen zwischen den Bearbeitern.

Insgesamt zeigt sich, dass im Untersuchungsgebiet östlich von Cotonou die Erosionsraten die Bearbeitungenauigkeiten in solch einem Maße überschreiten, dass eine Verwendung von Beobachtungen mehrerer Bearbeiter ohne Probleme möglich ist. In Avlékété müssen mehrere Jahre zwischen den Beobachtungen liegen, um Aussagen treffen zu können. Bei der Fortführung der AK-beobachtung ist auf Grund der höheren Abweichungen zwischen den Testbearbeitern zu empfehlen, insbesondere im Bereich (ehemaliger) Sandabbaubereiche Vorgängerinterpretationen bzw. -klassifizierungen mitsamt den genutzten Bilddaten hinzuzuziehen, um die Interpretation des Bearbeiters nachzuvollziehen.

### 9.5.3 Diskussion der räumlichen Analyse der Küstenlinienindikatoren

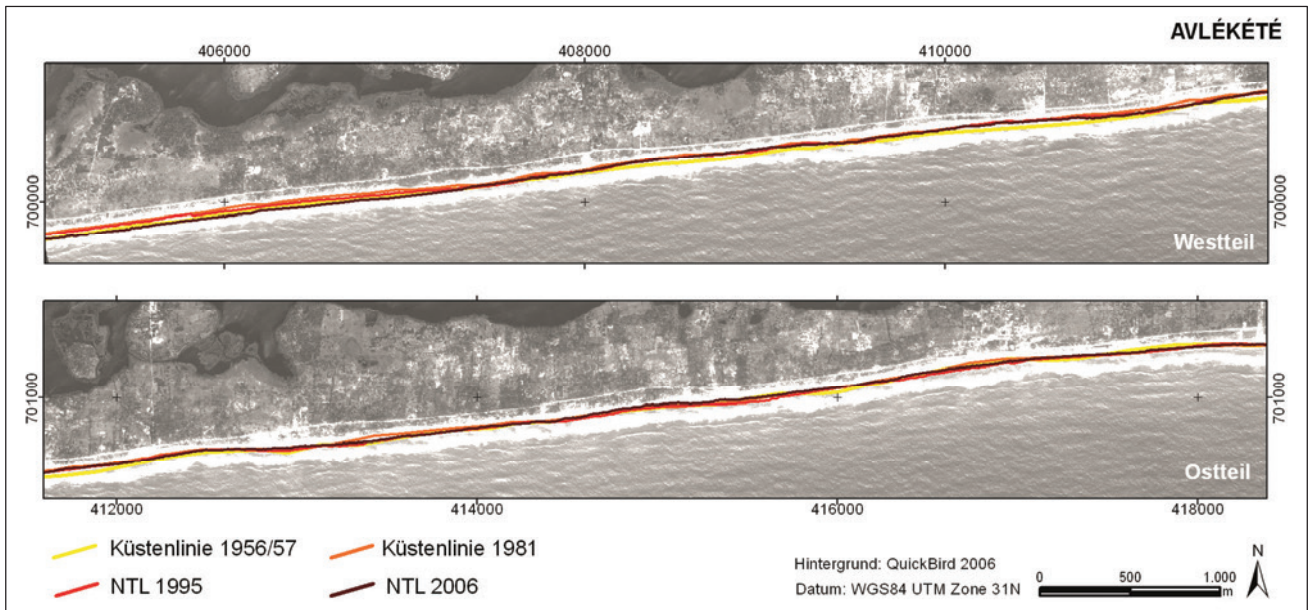
Die in Kapitel 9.3 vorgestellten Abweichungen der KLI liefern zum einen Hinweise auf die Charakteristik der Küstenabschnitte; zum anderen wird aus ihrem Vergleich mit dem Erosionsgeschehen vor Ort und den bearbeiterbedingten Abweichungen abgeleitet, wie sich die Verwendung unterschiedlicher KLI von Bearbeitern in einem zukünftigen Monitoring auf die Ergebnisse auswirken kann.

Im *Untersuchungsgebiet Avlékété* liegen die Abweichungen der NTL und WL 1995 mit 7,3 m und 2006 mit 8,1 m bei einem Mehrfachen der mittleren jährlichen Küstenlinienveränderung. Im *Untersuchungsgebiet Èkpè* liegen die mittleren Abweichungen der AK von der NTL bei 16–28 m, je nach Beobachtungszeitraum, und damit beim rund ein- bis zweifachen einer jährlichen Erosionsrate. WL und NTL weichen zwischen 6–11 m voneinander ab und liegen damit zwischen der Hälfte und dem Einfachen einer jährlichen Erosionsrate. 2002 bestand mit 28 m die höchste mittlere Abweichung zwischen AK und NTL, die bis 2007 leicht zurückging ( $q=25$  m), jedoch noch deutlich über den Werten von 1995 ( $q=16$  m) lagen. Diesem Trend folgte auch der Abstand NTL-WL mit  $q_{1995}=6$  m;  $q_{2002}=11$  m und  $q_{2007}=8$  m. Die verstärkte Regression der AK kann in den Sandabbautätigkeiten begründet sein, die 2002 im Vergleich zu 1995 zunehmend entlang der Küste beobachtet werden können. Zwischen 2002 und 2007 lässt sich bezogen auf die West-Ost-Ausstreckung ein Rückgang des Sandabbaus in den Bilddaten feststellen. Bei weiterem Fortschreiten der Regression der NTL nähern sich somit die beiden KLI wieder an.

Bezogen auf weiterführendes Monitoring zeigen die Abweichungen, dass eine Festlegung und Dokumentation des verwendeten KLI zur Fortführung notwendig ist, da bei einer unterschiedlichen Nutzung zwischen zwei Zeitpunkten eine Über- oder Unterschätzung der Erosions- oder Akkumulationsraten resultieren kann. Dies gilt insbesondere im Bereich geringer Küstenlinienveränderungen wie im Untersuchungsgebiet Avlékété. Dort kann schon die wechselnde Benutzung von NTL und WL zu Fehleinschätzungen führen. Bei jeglichen Erfassungen von Küstenlinien müssen daher die sie beschreibenden KLI dokumentiert werden. Bei den vorgefundenen Erosionsraten im Untersuchungsraum Èkpè sind die NTL und WL – insbesondere bei längeren Beobachtungszeiträumen – gleichberechtigt und auch im Wechsel nutzbar, so dass zukünftiges weiterführendes Monitoring auch basierend auf der Detektion der WL bzw. ihrer Generierung aus der Wasserfläche möglich ist. Es wird vorgeschlagen, dass bei weiterführenden Untersuchungen nach den Untersuchungen der Bearbeitergenauigkeit und der Abweichung der KLI erst eine Gesamtabweichung von mindestens 10 m zwischen zwei Bilddaten als tatsächliche Abweichung anerkannt wird.

### 9.5.4 Diskussion der Küstenlinienveränderungen

Dieses Kapitel diskutiert die Küstenlinienveränderungen in den beiden Untersuchungskapiteln. Dabei wird an dieser Stelle noch nicht auf Auswirkungen von Küstenlinienveränderungen auf Landnutzungen eingegangen. Dies geschieht anschließend in Kapitel 10.



Karte 37: Küstenentwicklung in Avlékété zwischen 1956/57 und 2006

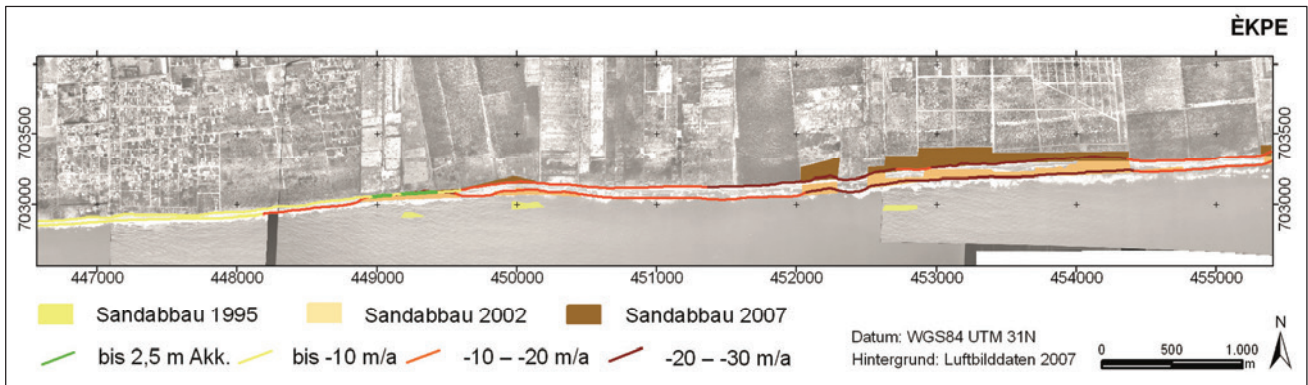
#### 9.5.4.1 Entwicklungen im Untersuchungsgebiet Avlékété

Bezogen auf die Küstenlinienentwicklung in Avlékété kann für den Beobachtungszeitraum 1995–2006 festgestellt werden, dass es sich im wesentlichen – insbesondere im Zentralteil – um einen stabilen Küstenabschnitt handelt, was die Beobachtungen von Kaki et al. (2001) bestätigt und weiterführen kann. Weshalb der Westteil leichte Akkumulationserscheinungen und der Ostteil tendenziell eher Erosion zeigt, kann aus der gegenwärtigen Datengrundlage nicht erklärt werden, da weder Küstenbauwerke noch Sandabbau in diesem Bereich vorhanden sind. Inwiefern weitere Faktoren wirken, die im einleitenden Kapitel zur Geomorphologie (2.2) auf S. 9 vorgestellt wurden, ist nicht ableitbar. Es kann sich auch um temporäre Entwicklungen handeln. Darauf weist der Vergleich mit der Küstenlinie von 1956/57, die aus den topographischen Karten von 1968 (Blatt NB-31-XV-1c und NB-31-XV-1d) und derjenigen Linie von 1981 hin, die aus den topographischen Karten von 1991 (Blatt NB-31-XV-1c 1-2 und NB-31-XV 1d 3-1)<sup>80</sup> extrahiert wurde (Karte 37). Dabei ist zu beachten, dass in beiden Fällen nicht dokumentiert wurde, um welchen KLI es sich handelt. Es wird aber deutlich, dass die Linien sich dicht beieinander bewegen.

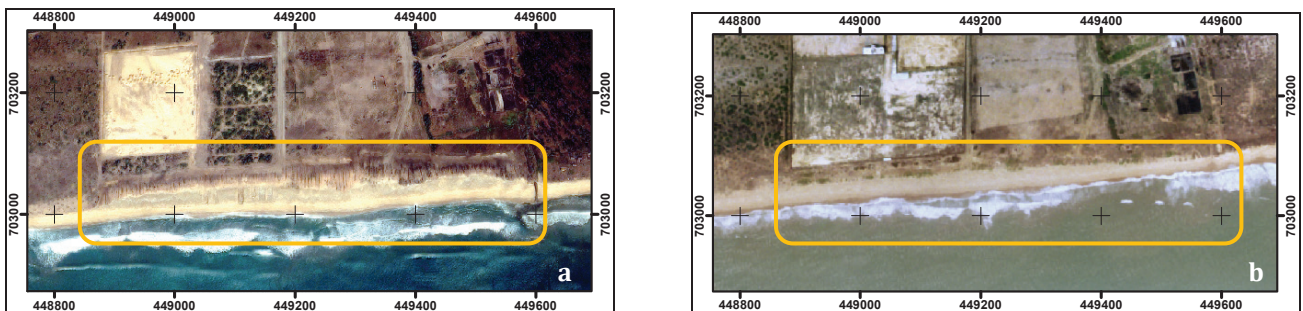
#### 9.5.4.2 Entwicklungen im Untersuchungsgebiet Èkpè

Schon im einführenden Kapitel 2.2 wurde auf die Wirkung anthropogener Einflüsse auf das Ausgleichsküstenregime eingegangen. Anthropogene Faktoren werden von Appeaning Addo (2010) und Blivi et al. (2002) als Hauptgründe für die Küstenerosion angeführt. Appeaning Addo (2010) schätzt beispielsweise den Anteil der anthropogenen Faktoren für die Erosion der Accra-Küste zu 70–90% mitverantwortlich. Für die beobachtete Küstenregression im Küstenabschnitt Èkpè kann zu einem wesentlichen Anteil der Sandabbau (Karte 38) verantwortlich gemacht werden. Die Beobachtungen im Untersuchungsraum Èkpè bezüglich der Abstandsanalyse der KLI (s.o.), aber auch die Erosionsraten weisen auf einen wesentlichen Einfluss dieses Faktors hin. Die beobachtete Abnahme der mittleren Erosionsraten bezogen auf die AK von 16,4 m/a (1995–2002) auf 14,7 m/a (2002–2007) und gleichzeitige Zunahme der Erosionsraten der NTL von 14,8 m/a auf 15,3 m/a bedeutet ein Nachhinken des Ausgleiches der NTL. Dies kann auch zu dem in Karte 36 aufgezeigten Phänomen eines Stillstandes der AK-Erosion mit weiter verlaufender NTL-Erosion führen. In Karte 39 ist dieser Ausschnitt vergrößert dargestellt. Bis 2002 wurde an dieser Stelle aktiv Sandabbau betrieben (Karte 39 a). Dieser wurde bis 2007 eingestellt (Karte 39 b). Die AK wurde an dieser Stelle somit nicht durch Sandabbau weiter rückverlegt. Im gleichen Zeitraum hat sich die NTL weiter zurück verlagert; ebenso die AK östlich und westlich dieser Stelle.

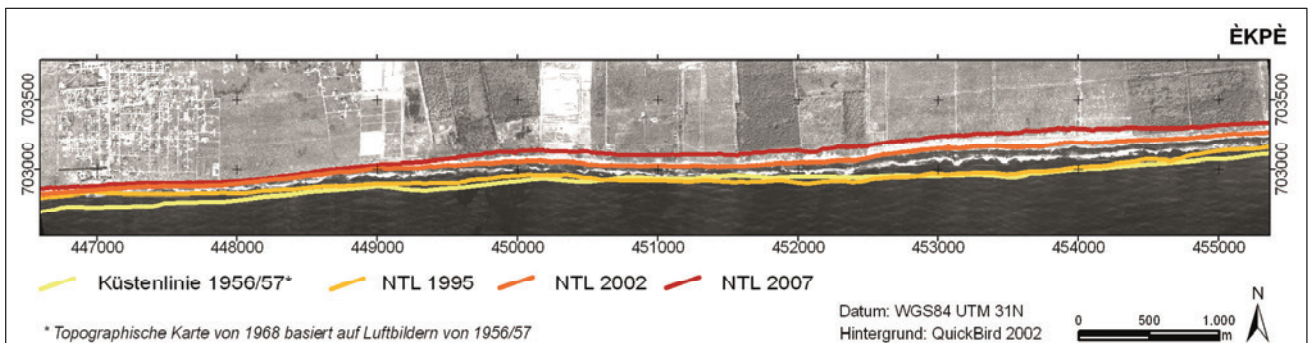
<sup>80</sup> Grundlage der topographischen Karten von 1968: Luftbilder 1956/56; Grundlage der topographischen Karten von 1991: Luftbilder 1981.



Karte 38: Entwicklung der Sandabbautätigkeiten und Vergleich mit den Erosionsraten im Untersuchungsgebiet Èkpe (nördliche Linie: AK; südliche Linie: NTL)



Karte 39: a) aktiver Sandabbau 2002; b) aufgegebener Sandabbau 2007

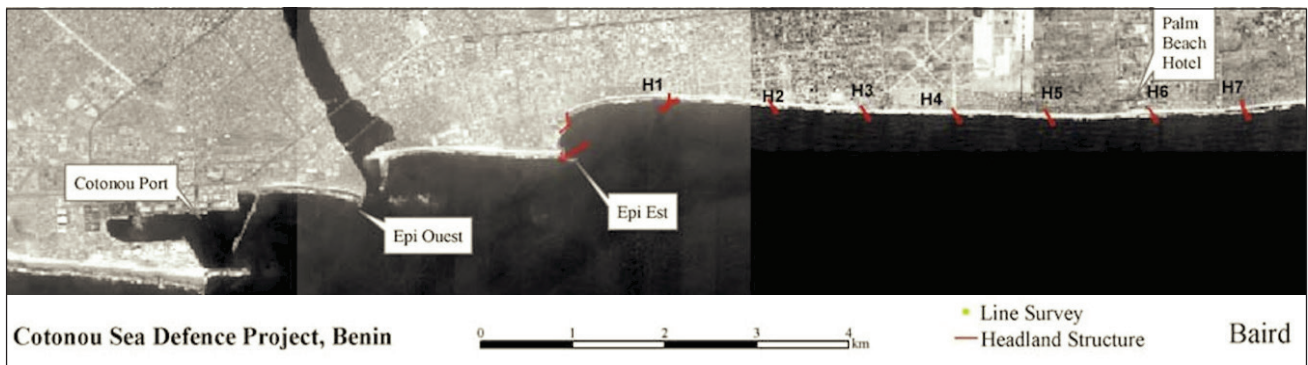


Karte 40: Küstenlinienveränderungen in Èkpe von 1956/57-2007

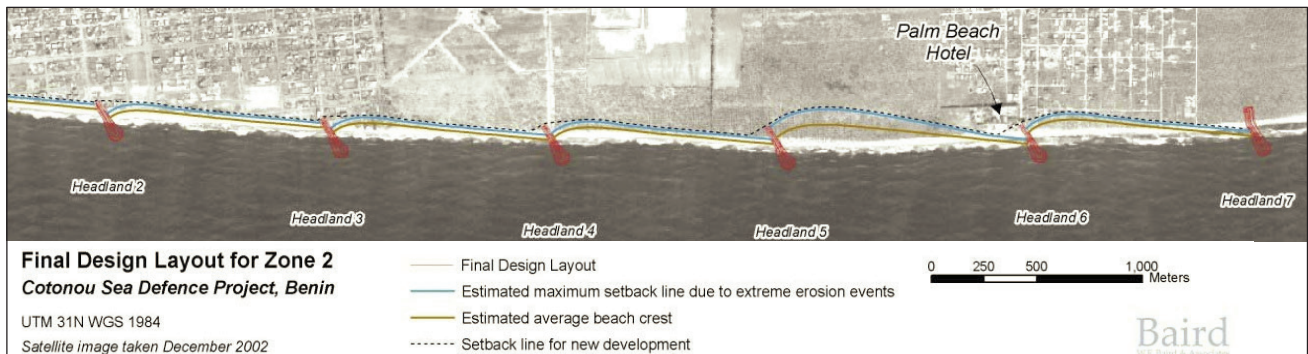
Aufgrund der Charakteristik als Ausgleichsküste kommt es zum Ausgleich von Abweichungen der Küstenlinie von einer Geraden. Somit wird die Einbuchtung wieder ausgeglichen und es kann davon ausgegangen werden, dass die Abbruchkante in diesem Bereich zukünftig wieder in die Erosionsprozesse integriert wird. Daraus ergibt sich jedoch auch, dass ein Einstellen des Sandabbaus nicht gleich mit einem Nachlassen der Küstenerosion beantwortet wird.

Der Abbau des Strandsandes ist kein rein beninisches Problem. Nach Appeaning Addo (2010) wird auch an der Accra-Küste (Ghana) Sand abgebaut und erhöht dort die Küstenerosion. So wie in Benin ist der Sandabbau attraktiv wegen des Bausandbedarfs für die wachsende Küstenbevölkerung und des Bedarfs an Arbeitsplätzen, obwohl er – auch wie in Benin – gesetzlich verboten ist. Sandabbau wirkt sich – wie beobachtet werden konnte – direkt sowie indirekt auf die Küstenerosion aus: a) es wird direkt Küstensand erodiert; b) der entnommene Sand fehlt im Sedimentfrachtbudget strömungsabwärts und führt dort zur Erosion.

Im Vergleich mit der Küstenlinie von 1956/58 aus der topographischen Karte von 1968 (Blatt NB-31-XV-2c) zeigt sich in Karte 40 trotz Nichtkenntnis des verwendeten KLI zur Kartenerstellung und trotz Digitalisierungsungenauigkeiten, dass die Erosion zwischen 1956/57 und 1995 stärker im Westen wirkte und die aus den Erhebungen zwischen 1995 und 2007 beobachtete Verschiebung der Erosionsfront nach Osten bestätigt.



Karte 41: Geplante Buhnen zum Küstenschutz (Mc Gillis et al. 2003, S. 2)



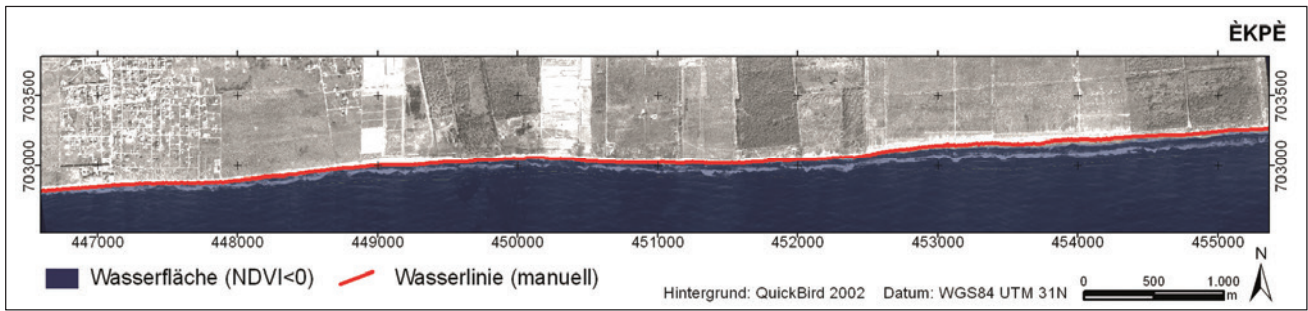
Karte 42: Projektierter Küstenschutzmaßnahme und projizierte Erosion innerhalb der Maßnahme (Mc Gillis et al. 2003, S. 10)

### 9.5.4.3 Diskussion der Ergebnisse im planerischen Kontext

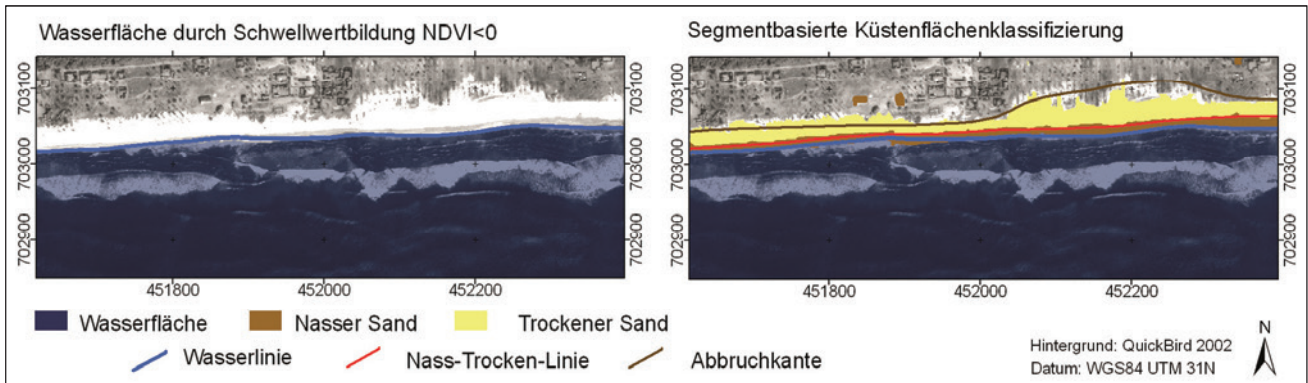
Die Ergebnisse zeigen, dass im Untersuchungsbereich Avlékété wesentlich geringere Veränderungsraten detektiert wurden. Im Gegensatz dazu ist die Erosion im Ostteil Benins auf jeden Fall planungsrelevant, da Erosion anhaltend und in einem hohen Maße zu beobachten ist und damit die Landfläche an sich und insbesondere Siedlungen, Plantagen und Infrastrukturen bedroht. Nach MEHU 2003 sind daher von der Ostbuhne (*Epi Est*) 7,5 km ostwärts sieben weitere Buhnen geplant (Karte 41), die in diesem Bereich die Erosion begrenzen sollen (Karte 42). Der Ostteil (ab H6) liegt im Untersuchungsgebiet dieser Arbeit – er hat sich im Rahmen der Untersuchungen als der in einem geringeren Maße erodierende Teil herausgestellt; die östlich daran angrenzenden Bereiche erodieren weitaus stärker. An den schon vorhandenen Küstenschutzbauten *Epi Ouest* und *Epi Est* kann jedoch beobachtet werden, dass es stets zu einer Verlagerung der Erosionsproblematik ostwärts kam. Damit ist auch jetzt zu rechnen.

## 9.6 Ausblick

Die Beobachtung von Küstenlinienverschiebungen ist in der Retrospektive kenntniserweiternd bezüglich der Quantifizierung der Prozesse und damit zusammen mit einem Monitoring Voraussetzung zur Abschätzung der Gefährdung genutzter Flächen. Sind auch die verursachenden Faktoren hinreichend bekannt, ist eine Prozessmodellierung und Prognose möglich. Eine Hoffnung bezüglich höherer zeitlicher Abdeckung durch Fernerkundungsdaten und damit einer zeitlich genauer aufgelösten Zeitreihe des Küstenverlaufes besteht durch den bereits erwähnten Start des NigeriaSat-2 der NASRDA am 17.8.2011. Diese verfügen wie QuickBird-Daten über den NIR-Kanal, der die Klassifizierung von Wasser zuverlässig ermöglicht. In diesem Zusammenhang wurde am QuickBird-Datensatz eine algorithmusgestützte Erfassung der KLI getestet, die im kommenden Absatz kurz umrissen und diskutiert werden soll. Bei den vorgestellten PAN-Luftbildern 1995 sowie den Scans der RGB-Bilddaten der eingescannten Luftbilder von 2006/07 und dem vorverarbeiteten SPOT-Datensatzes führen die Wellensäume zu Mehrfachlinien, die nicht zuzuordnen sind. Bei Vorliegen des NIR-Kanals ist zumindest die Klassifizierung des Wassers und damit der WL zuverlässig möglich.



Karte 43: Vergleich der detektierten Wasserfläche (NDVI-Schwelwert-Analyse; NDVI<0) mit der interpretierten Wasserlinie



Karte 44: Vergleich interpretativ erfasster Küstenlinienindikatoren und klassifizierter Küstenflächen

Tabelle 33: Abweichungen zwischen manuell digitalisierter und durch Schwellwertbildung (NDVI<0) erhaltener WL

Maximale Abweichung	Mittlere Abweichung	Standardabweichung
16 m	2 m	2 m

Durch die fehlende Reflektion im nahen Infrarot (NIR), können Wasserflächen (WF) im QuickBird-Datensatz mittels Schwellwertbildung (NDVI<0) klassifiziert werden. Die so klassifizierte WF dient im Anschluss zur Generierung der WL. Karte 43 zeigt das Ergebnis der WF-Klassifizierung durch Schwellwertbildung im Vergleich mit der interpretierten WL. Der Vergleich zeigt, dass die WL im QuickBird-Datensatz relativ genau gewonnen werden kann. Die interpretierte WL und die durch Schwellwertbildung gewonnene WL weichen im Mittel mit 2 m nur gering voneinander ab (Tabelle 33). Im Vergleich mit den manuellen Bearbeitern (mittlere Abweichung 1 m) liegt der Wert höher. In Untersuchungsgebieten mit höheren Erosionsraten ist der Einsatz jedoch unproblematisch möglich. Für einen Ausschnitt wurden zudem WF sowie nasser und trockener Sand in einem segmentbasierten Ansatz mit eCognition klassifiziert. Das Ergebnis wird mit einem Ausschnitt der Schwellwertklassifizierung in Karte 44 vorgestellt. Es zeigt sich, dass sich die WF und damit sekundär auch die WL am genauesten klassifizieren lassen. Die Klassifizierung nassen Sandes und trockenen Sandes und damit der TNL und AK ist schwieriger. Zwar ist der Einsatz von Glättungsalgorithmen möglich; mit Plausibilitätskontrollen und der Anpassung der Klassifizierungsparameter an die zu klassifizierenden Bilddaten ist der zeitliche Aufwand vor dem Hintergrund auch zukünftiger Arbeiten mit heterogenen Bilddaten mit großer Wahrscheinlichkeit höher als der Zeitaufwand zur manuellen Erfassung der KLI. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle keine quantitative Bewertung der Klassifizierung abgeschlossen. Bei homogenem Bildmaterial kann eine Automatisierung insbesondere der WF-Erfassung sinnvoll sein.

Die Anwendung der vorgestellten Methodik zur Identifizierung und Analyse küstenmorphologischer Veränderungsprozesse kann auch in anderen Küstengebieten angewendet werden, um erosionsgefährdete Gebiete zu identifizieren und Auswirkungen anthropogener Einflüsse zu dokumentieren. Diese Informationen können dann in Planungen von Eingriffen in den Küstenverlauf (z.B. Hafenanlagen, Küstenschutzmaßnahmen), aber auch bezüglich landseitiger Bautätigkeiten integriert werden.



# 10 Zusammenhänge zwischen den untersuchten Prozessen

In den vorangegangenen Kapiteln wurden Antworten auf die ersten beiden Fragenkomplexe aus Kapitel 1.5, die Identifizierung maßgeblicher raumverändernder Prozesse und ihrer Analyse, erarbeitet. So wurden Siedlungserweiterungen und -verdichtungen, Veränderungen in der Verteilung und der Zuwachs landwirtschaftlicher Nutzflächen sowie Küstenerosion analysiert – drei Prozesse, die den Untersuchungsraum stark prägen und sozio-ökonomisch relevant sind. Dabei wurde bereits auf Ursachen der mit Instrumenten der Fernerkundung beobachteten Veränderungen eingegangen. Es wurde deutlich, dass die Prozesse sich auch gegenseitig beeinflussen oder bedingen. Das jetzige Kapitel führt diese Prozesse explizit zusammen, um zur Beantwortung der dritten Fragestellung beizutragen: Welche räumlichen Zusammenhänge bestehen zwischen den untersuchten Einzelprozessen?

Bei der Analyse von Siedlungsprozessen in Kapitel 7 wurde herausgearbeitet, dass in allen Untersuchungsstrsekten Siedlungsverdichtung innerhalb schon existierender Siedlungsflächen auftritt, sich aber Siedlungsgebiete, und damit verbunden auch Gewerbegebiete, stark ausweiten und darüber hinaus neue Siedlungsgebiete entstehen. Dies wirkt direkt und indirekt auf die Verteilung anderer Landbedeckungs- und -nutzungsklassen. In den Kontext dieser Siedlungsprozesse können Veränderungen landwirtschaftlicher Nutzflächen eingeordnet werden, die in Kapitel 8 dargestellt und analysiert wurden. Zum einen breiten sich landwirtschaftliche Nutzflächen gemeinsam mit Siedlungen aus, solange die Siedlungen lockere Strukturen aufweisen. Zum anderen führen die erweiterten bzw. neuen Siedlungsgebiete oftmals zur Verdrängung und Verschiebung, in geringem Maße auch zur Ausweitung landwirtschaftlicher Nutzflächen.

So wie sich die Ausweitung der Siedlungen zumeist auf Kosten landwirtschaftlich genutzter Flächen vollzieht, so verdrängen landwirtschaftlich genutzte Flächen Savanne, Ölpalmflächen oder Feuchtvegetation. In den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass sich der Raum reduziert, den Siedlung und Landwirtschaft noch über den gegenwärtigen Stand hinaus nutzen können. Der zur Verfügung stehende Raum wird nun zusätzlich dort reduziert, wo durch Küstenerosion Landflächen verloren gehen (Kapitel 9). Dort konnten innerhalb der Untersuchungen Siedlungsverluste und -verlagerungen sowie Verluste landwirtschaftlicher Flächen erfasst werden. Durch Expansion der Siedlungs- und Landwirtschaftsflächen verändert sich also der gesamte Untersuchungsraum, durch Küstenerosion zusätzlich der östliche Untersuchungsraum. Dabei konnte eine unterschiedliche Dominanz der Prozesse relativ zueinander festgestellt werden: Dort, wo Küstenerosion auftritt, werden naturgemäß alle anderen Landbedeckungs- oder -nutzungsformen verdrängt; Entwicklungen müssen sich von der Küste weg orientieren. Das oben beschriebene Verhältnis zwischen Siedlungsprozessen und Landwirtschaft zeigt, dass Siedlungsprozesse sich gegenüber der landwirtschaftlichen Nutzung durchsetzen. Beide wiederum verdrängen natürliche bzw. naturnahe Flächen. Abbildung 55 führt mögliche Nutzungsübergänge zusammen. Dabei wird noch einmal verdeutlicht, welche Veränderungen nur in eine Richtung beobachtet wurden und welche in beide Richtungen möglich sind. Dabei verdeutlicht die Größe der Pfeilspitze, welche Richtung dominiert.

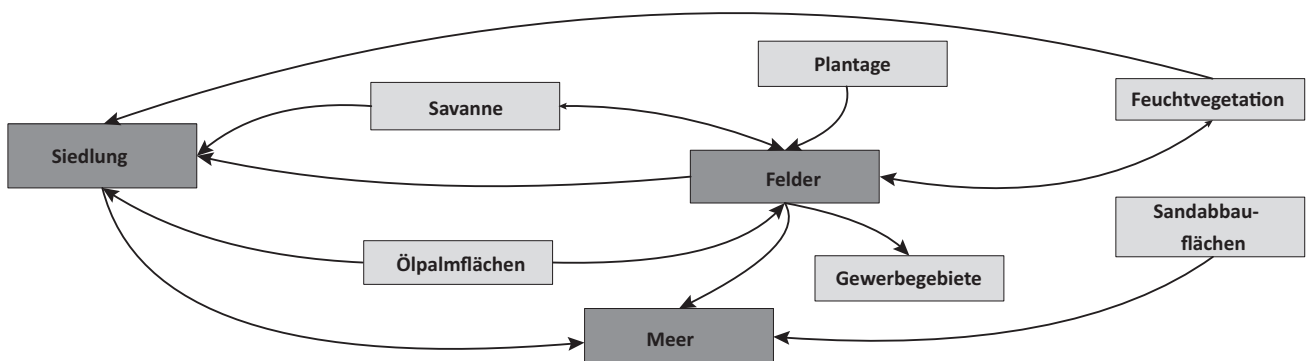
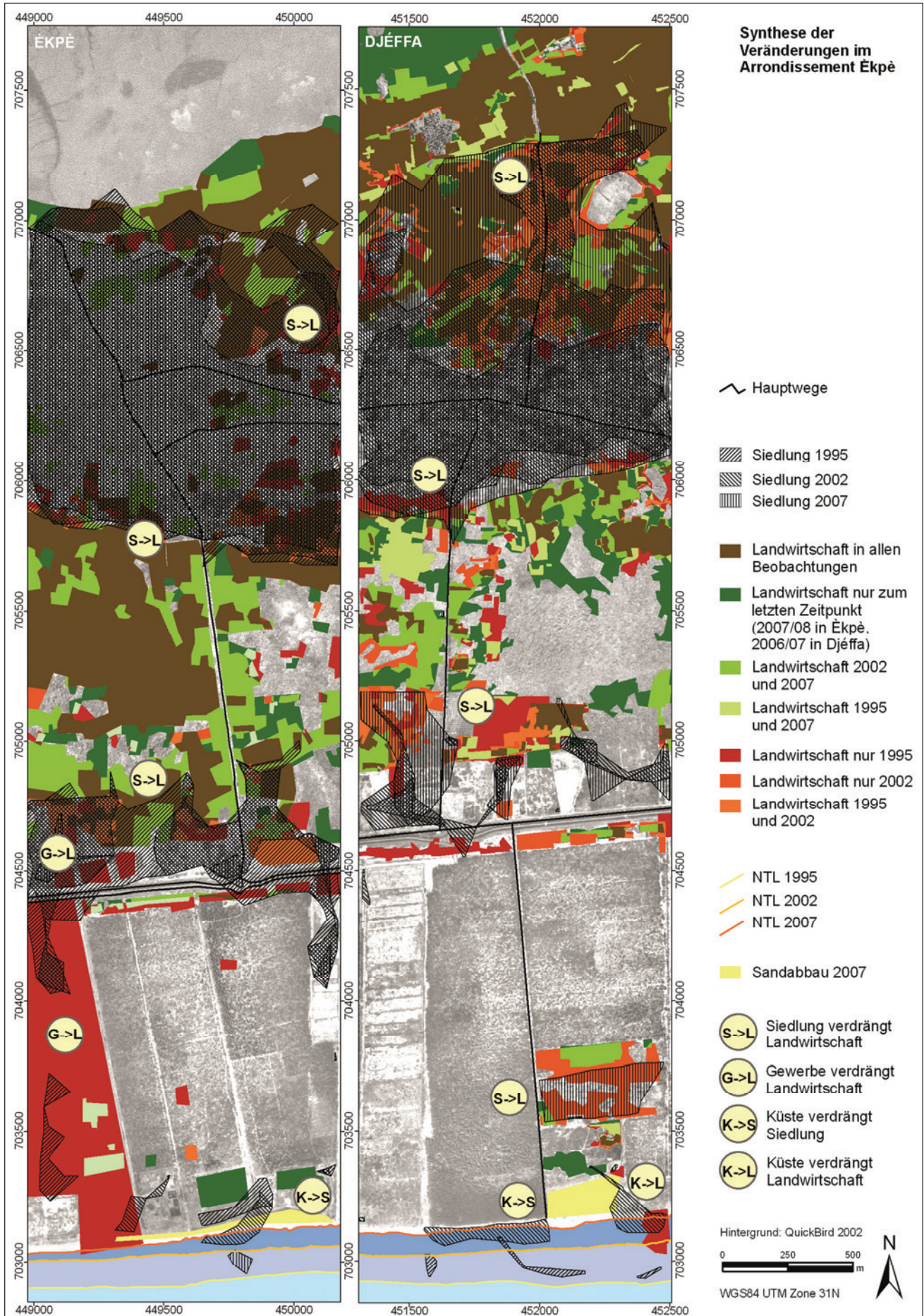


Abbildung 55: Beobachtete Nutzungsübergänge im Untersuchungsraum (dunkel sind diejenigen Klassen dargestellt, die quantitativ erfasst wurden)



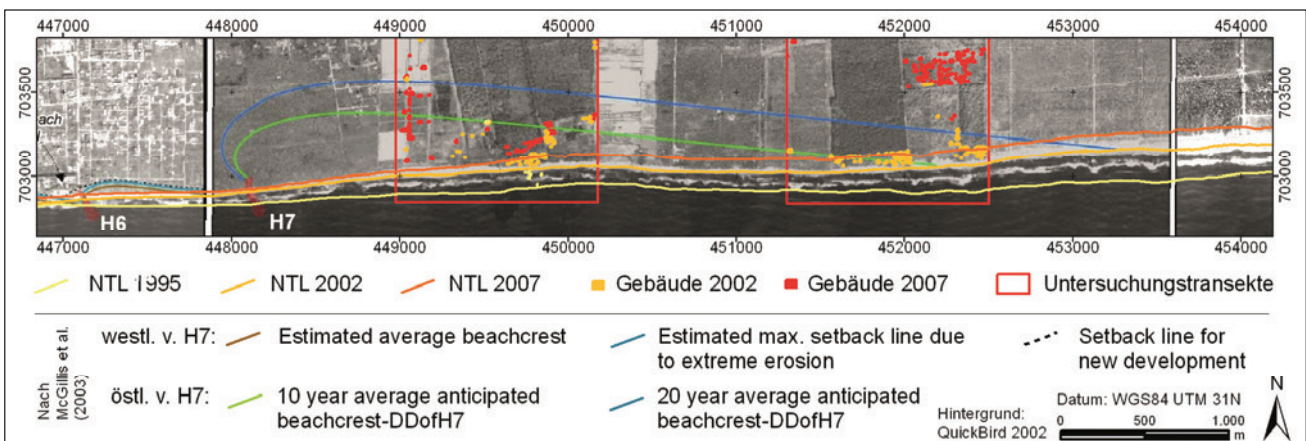
Karte 45: Zusammenführung der untersuchten Veränderungen im Arrondissement Ékpè zu einer prozessorientierten Synthese für den Zeitraum 1995–2007

Die Überlagerung der Nutzungsklassen aller Beobachtungszeitpunkte zu einer prozessorientierten Synthese in Karte 45 (Arrondissement Èkpè) und Karte 47 (Arrondissement Avlékété, S. 114) macht die oben beschriebenen Zusammenhänge der untersuchten Prozesse in ihrer räumlichen Dimension deutlich. Im Vergleich der beiden Arrondissements zeigt sich, dass das Arrondissement Èkpè einem tieferen Wandel unterworfen ist als das Arrondissement Avlékété. Die Betrachtung der einzelnen Prozesse wurde bereits in den Vorkapiteln durchgeführt.

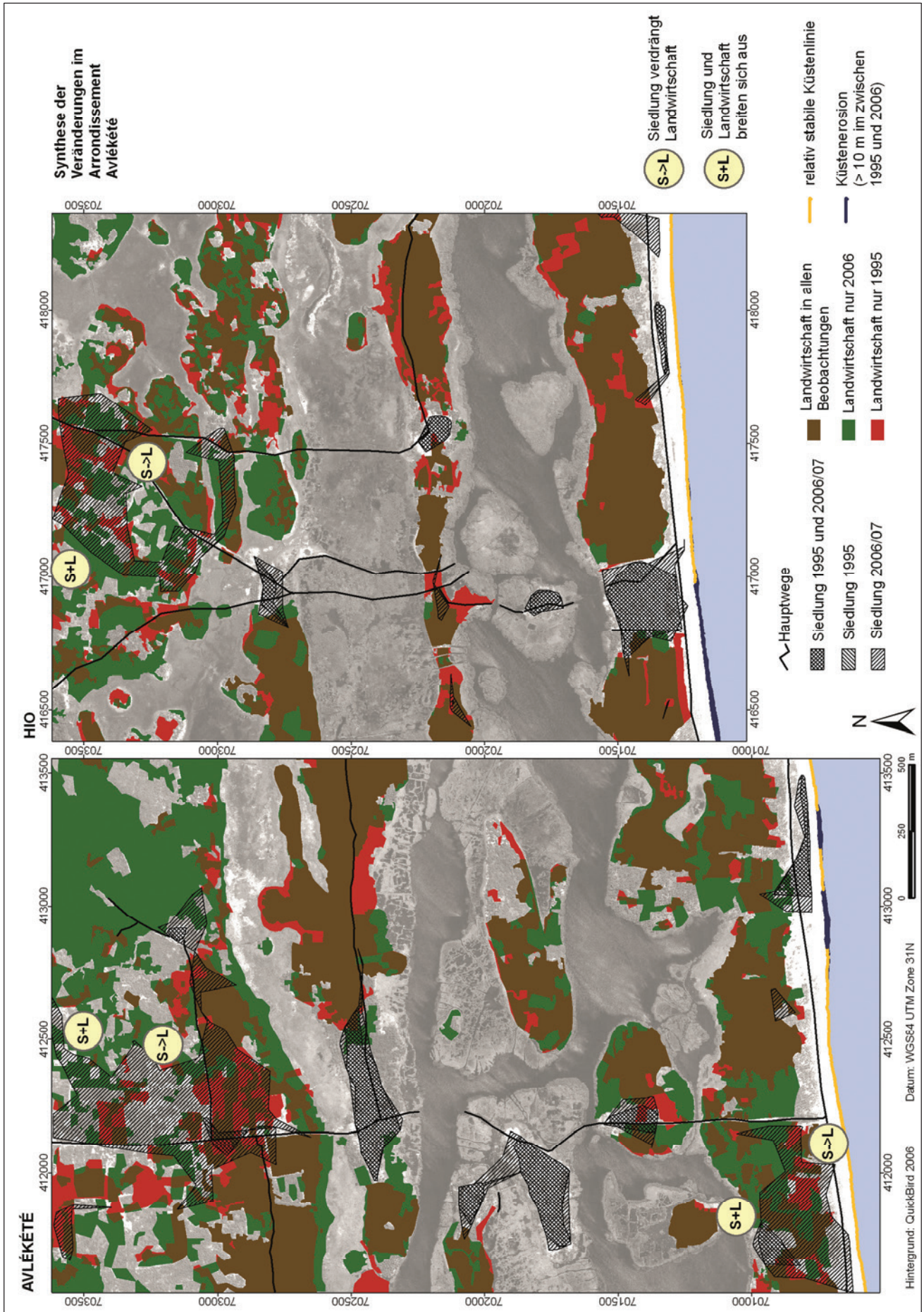
Bezüglich des Zusammenwirkens der beobachteten Prozesse ist im *Arrondissement Èkpè* verbreitet Verdrängung bzw. Verlagerung landwirtschaftlicher Flächen durch Siedlungs- und Gewerbegebietserweiterungen zu beobachten (S→L bzw. G→L in Karte 45 sowie Abbildung 56 links). Des Weiteren wird Siedlung – und in geringem Maße auch Landwirtschaft – im Süden des Arrondissements durch Küstenerosion verdrängt (K→S bzw. K→L in Karte 45 und Abbildung 56 rechts). Verluste weiterer Flächen, auch anderer Landbedeckungs- und -nutzungsklassen, wie der verschiedenen Plantagentypen und Gewerbeflächen durch Küstenerosion sind zu beobachten, wurden aber im Rahmen dieser Arbeit nicht quantitativ erarbeitet. Bezüglich der Küstenerosion wurden bereits in Kapitel 9 geplante Küstenschutzmaßnahmen erwähnt (siehe McGillis et al. 2003). Von ihnen liegen geplante zwei Buhnen (H6 und H7) innerhalb des untersuchten Küstenabschnitts (siehe Karte 46). Die Planungen sind auf Basis des Jahres 2002 gerechnet, jedoch bis heute nicht realisiert, so dass durch die fortschreitende Küstenerosion beispielsweise der geplante Standort von H6 bereits beinahe komplett im Meer liegt. Aus Karte 46 geht zudem eine äußerst starke Erosion von H7 aus, die die aktuelle Erosionsstärke mehrfach überschreitet. Sie gilt in der dargestellten Form unter der Bedingung, dass keine Sedimente oberhalb eingespeist werden. Bei Einspeisung von ca. 300.000 m<sup>3</sup>/a, die durch Ausbaggern des Hafens zur Verfügung stünden, würden die Werte nach McGillis et al. (2003) nicht schon nach 10 bzw. 20 Jahren, sondern erst nach 13 bzw. 26 Jahren erreicht werden. Die Erosion wird als „minor disadvantage (S. 15)“ eingeschätzt, da der östlich von H7 liegende Küstenbereich als „undeveloped to a larger degree“ charakterisiert wird. Zwar ist der betroffene Küstenabschnitt geringer entwickelt als der Cotonou-nähere Abschnitt. Es wären jedoch auch hier Siedlungen (siehe Abbildung 56 links), Gewerbeflächen und Plantagen betroffen – auch wenn das Verschwinden einfacher dörflicher Siedlungen nicht so eindrucksvoll wirkt wie Relikte von Betonbauten (Abbildung 56 rechts, im Hintergrund). Zudem ist nicht klar, wie weit die provozierte Erosion über die vorausberechnete Periode reicht, ob sie Siedlungen auch weiter nördlich betrifft und wie weit sie nach Osten hinausgeht – und somit dort befindliche Infrastrukturen, bis hinein nach Nigeria, zerstören kann.



Abbildung 56: Siedlungsentwicklung innerhalb landwirtschaftlich genutzter Flächen im Norden des Arrondissement Èkpè (links) und von Erosion bedrohte Siedlungen am Strand im Transekt Èkpè (rechts)



Karte 46: Küstenlinienentwicklung, erosionsbedingte Siedlungsumlagerungen, geplante Buhnen (H6 und H7) sowie daraus geschätzte zukünftige Erosion in Strömungsrichtung (nach McGillis et al. 2003, S. 10 und S. 12)



Karte 47: Zusammenführung der untersuchten Veränderungen im Arrondissement Avlékété zu einer prozessorientierten Synthese für den Zeitraum 1995–2007

Im *Arrondissement Avlékété* können ebenfalls Verdrängung von Landwirtschaftsflächen durch Siedlung (S → L in Karte 47) und gemeinsame Ausweitung (S+L) beobachtet werden. Es fehlen aber im Gegensatz zum Arrondissement Èkpè die Beeinflussungen durch Küstenerosion und Gewerbe. Wie in den Kapiteln 7 und 8 schon bei der Analyse der Siedlungsprozesse und Veränderungsprozesse landwirtschaftlicher Nutzflächen erarbeitet wurde, ist die größte Veränderung – und somit auch größte gegenseitige Beeinflussung – im Nordbereich erkennbar, der sich bis zur Verbindungsstraße Cotonou-Ouidah ausdehnt.

Die analysierten Prozesse können mit ihren räumlichen Zusammenhängen, wie sie in Karte 46 und Karte 47 dargestellt wurden, in ein qualitatives Modell eingebettet und darin durch weitere Zusammenhänge verknüpft werden. Abbildung 57 zeigt solch ein qualitatives Modell. Die analysierten Prozesse sind darin grau unterlegt. Fett sind all jene Faktoren, die im Zusammenhang mit diesen Prozessen direkt in den Bilddaten und vor Ort beobachtet werden können. In normaler Schrift sind solche Faktoren dargestellt, die sich nicht direkt aus den Bilddaten ableiten lassen, von denen aber davon ausgegangen wird, dass sie mit den Prozessen zusammen hängen. Dabei wird unterschieden, ob sich der Faktor bzw. Prozess auf einen anderen auswirkt (durchgehender Pfeil) oder Indikator für einen Faktor bzw. Prozess ist (gestrichelter Pfeil). Allein die aufgezeigten Zusammenhänge zwischen den ausgewählten untersuchten Prozessen zeigen komplexe Wirkungsgefüge. Aus den Bilddaten können qualitative und quantitative Hinweise auf flächenrelevante sektorale Prozesse erarbeitet werden, die als Indikatoren für die gesellschaftlichen Kräfte interpretiert werden können, welche im Küstenraum wirksam sind. Sie sind dazu um sozioökonomische Daten zu ergänzen, die auf empirischer Grundlage die Erklärungen für menschliche Handlungen geben und damit die erforderlichen kausalen Verknüpfungen herstellen können, die zwischen den detektierten flächenbezogenen Prozessen bestehen. Solche sozioökonomischen Daten wurden aktuell von Teka (2010) im Untersuchungsraum erhoben. Beide Untersuchungstechniken sind komplementär und beide gehen exemplarisch vor. Sie ermöglichen es, Risiken der Entwicklungen des Untersuchungsraumes abzuschätzen, um darauf mit staatlichen Maßnahmen zu reagieren. Die Aufbereitung von hochaufgelösten Fernerkundungsdaten ist dafür eine wichtige und zunehmend unverzichtbare Aufgabe.

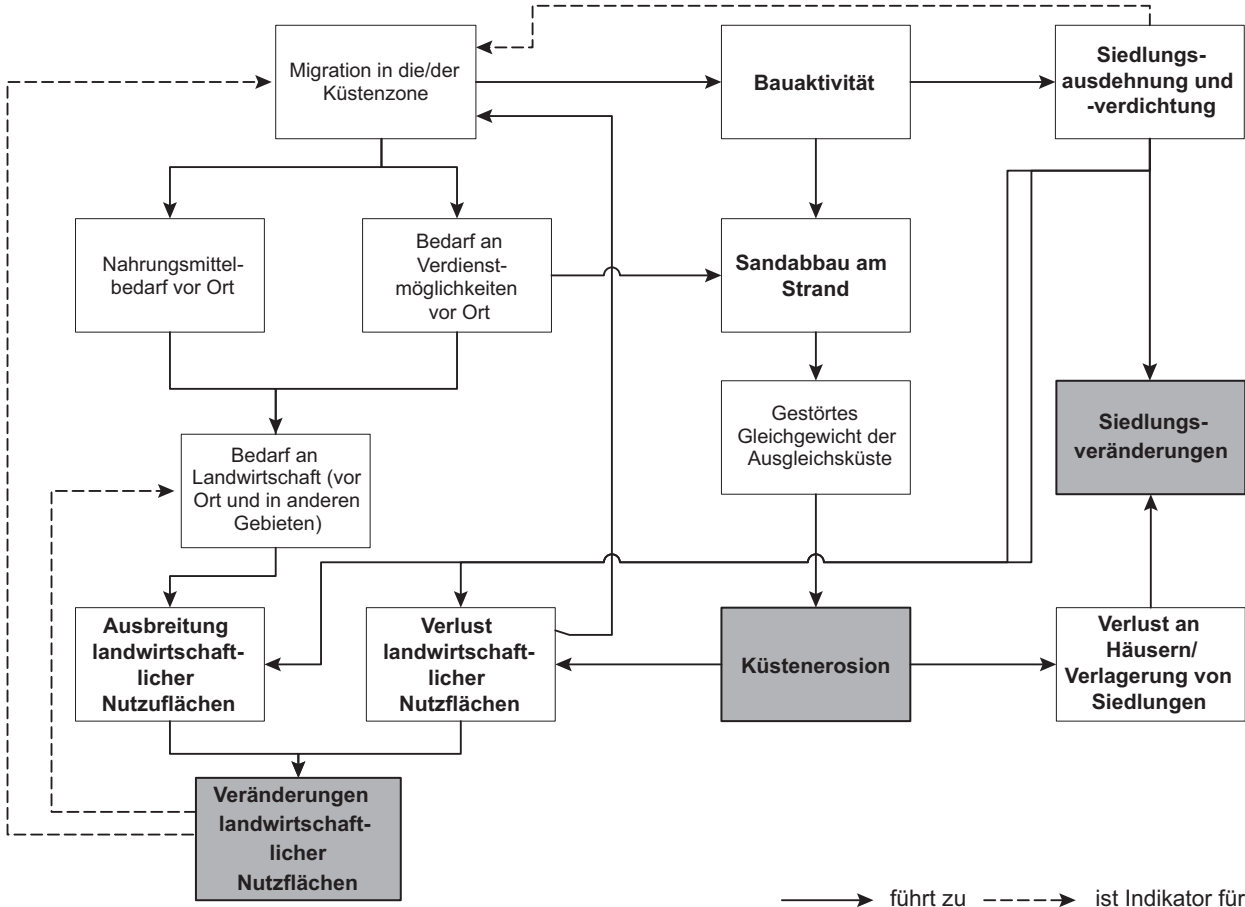


Abbildung 57: Qualitatives Modell der Zusammenhänge untersuchter Prozesse (grau unterlegt sind die untersuchten raumverändernden Prozesse)



# 11 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, raumverändernde Prozesse in der Küstenzone Benins in heterogenen optischen Fernerkundungsdatensätzen qualitativ aufzudecken, quantitativ zu analysieren und durch Kombination mit regionalwissenschaftlichen Daten zu interpretieren. Dazu wurde eine Kombination von Methoden und Arbeitstechniken entwickelt und angewendet, die der Problematik tropisch-subtropischer Küstenräume angemessen ist und die zur flächenhaften Analyse von als relevant ausgewählten Prozessen geeignet ist.

Kontext bilden in solchen Räumen – wie in der Küstenzone Benins – auf der einen Seite teils kurzfristige Prozesse und kleinräumige Landnutzungsstrukturen, die oftmals undeutliche Abgrenzungen aufweisen, auf der anderen Seite heterogene, zeitlich und räumlich lückenhafte Fernerkundungs-Daten, die den Einsatz algorithmengestützter Ansätze nur begrenzt möglich machen.

Folgende Prozesse wurden als maßgeblich identifiziert und analysiert: Siedlungsprozesse, Veränderungsprozesse landwirtschaftlich genutzter Flächen und Veränderungsprozesse des Küstenverlaufes. Als Grundlage zur fernerkundungsgestützten Prozessanalyse wurden Bilddaten mit sehr hoher geometrischer Auflösung benötigt, da sich die Prozesse nur sehr kleinräumig bzw. durch kleine Landbedeckungs- und -nutzungsstrukturen abbilden. Fernerkundungsdaten standen heterogen als PAN-Luftbildszenen (1995), QuickBird-Satellitenbilddaten (2002 bzw. 2006), Scans von RGB-Luftbildszenen (2006 und 2007) und ergänzend als eine vorprozessierte SPOT-Szene (2008) zur Verfügung. Für zwei Gebiete in der Küstenebene Benins, die als Beispielgebiete suburbaner und ländlicher Struktur gelten können, konnten Zeitreihen mit mindestens zwei Zeitpunkten akquiriert werden: das suburbane Arrondissement Èkpè im Osten (drei Zeitpunkte) und das ländliche Arrondissement Avlékété im Westen von Cotonou (zwei Zeitpunkte). Zur Analyse von Siedlungsprozessen dienten Gebäude. Veränderungsprozesse landwirtschaftlicher Nutzflächen wurden basierend auf Flächen durchgeführt, auf denen Feldfrüchte angebaut werden, d.h. Feldern und Feldern unter Palmen. Zur Analyse küstenmorphologischer Prozesse wurden die Küstenlinienindikatoren Wasserlinie, Nass-Trocken-Linie sowie Abbruchkante als Näherungen der Küstenlinie, bzw. die durch sie begrenzten Flächen extrahiert.

Die Fernerkundungsdaten wurden, gestützt durch Untersuchungen am Boden, ausgewertet. Der Schwerpunkt der Bildauswertung lag dabei aufgrund der heterogenen Bilddaten, die zum Großteil nur über geringe spektrale Informationen verfügen, auf manueller Auswertung mittels visueller Bildinterpretation, um zum einen über die Daten hinweg vergleichbare Ergebnisse zu erhalten und zum anderen bestmögliche Aussagen über die Verwertbarkeit von Fernerkundungsdaten zur Prozessanalyse treffen zu können. Des Weiteren stellt der durch visuelle Interpretation manuell erstellte Datensatz eine Referenz für algorithmengestützte Klassifizierungsverfahren dar. Wesentliche Vorteile bei der visuellen Interpretation der Bilddaten sind die Möglichkeit der Einbindung sehr unterschiedlicher Merkmale, das Einbringen des Wissens des Bearbeiters, insbesondere dann, wenn Objekte schwer zu erkennen sind, beispielsweise durch geringe Kontraste oder teilweise Überdeckung sowie die Möglichkeit, durch den Vergleich mit den anderen Zeitpunkten Lage und Plausibilität erfasster Objekte zu prüfen. Im Hinblick auf die Interpretierbarkeit der Bilddaten zeigte sich, dass insbesondere hohe geometrische Auflösung sehr wichtig ist, um Strukturen deutlich zu erkennen. Die spektrale Information ist dann eine wesentliche, aber nachrangigere Ergänzung. So eignen sich QuickBird-Daten am besten für die Interpretation, gefolgt von den PAN-Luftbildern und anschließend den RGB-Bilddaten, die eine geringere räumliche Auflösung als die PAN-Luftbilder aufweisen.

Da manuelle Auswertungen durch die zeitintensive Erfassung nur regional begrenzt erarbeitet werden können, wurden algorithmengestützte Verfahren exemplarisch getestet. Der Herausforderung der Auswertung von Fernerkundungsdaten mit höchster geometrischer Auflösung, aber geringer spektraler Auslösung sind keine pixelbasierten Verfahren gewachsen, sondern wenn überhaupt, dann segmentbasierte Verfahren. Am Beispiel von Gebäude- und Küstenflächen wurde getestet, inwiefern segmentbasierte Klassifizierungsverfahren erfolgreich sind. Es zeigt sich jedoch, dass die Ergebnisse der Gebäudeklassifizierung aus den vorliegenden Daten ungenügend für weitere Analysen sind. Küstenflächen konnten nur in den QuickBird-Daten klassifiziert werden, nicht aber in den anderen Bilddaten, da in PAN- und RGB-Bilddaten Wellen als Linienhäufung störend wirken. In den

QuickBird-Daten hingegen kann Wasser homogen durch den NIR-Kanal erfasst werden. Die aus den klassifizierten Küstenflächen abgeleiteten Küstenlinienindikatoren Wasserlinie und Nass-Trocken-Linie weichen in geringem Maße von den interpretierten Linien ab. Bei multitemporal vorliegenden QuickBird-Daten wäre ein algorithmengestützter Ansatz daher denkbar, der auf diesen Linien aufbaut. Nachteil algorithmengestützter Ansätze ist die Tatsache, dass nur solche Merkmale genutzt werden können, die für Rechner aufbereitet werden können. Zudem können Rechner bislang die Erfahrung eines Bearbeiters nicht ersetzen.

Im Gegensatz zu den Klassifizierungsergebnissen eignen sich also die Interpretationsergebnisse zur weiteren Verarbeitung im Rahmen der Prozessanalysen. Dabei konnten zur Analyse der Veränderungen landwirtschaftlicher Flächen und des Küstenverlaufes die Interpretationsergebnisse (Primärergebnisse) direkt eingehen, während Siedlungsprozesse ergänzend durch Sekundärergebnisse wie abgeleiteter Siedlungsfläche und Siedlungsdichte analysiert wurden. Die Ergebnisse der visuellen Interpretation wurden in einem Geoinformationssystem jeweils für die Einzelzeitpunkte und in ihrer Veränderung räumlich analysiert. Dabei wurden regionalwissenschaftliche Daten in die Interpretation der Veränderungen eingeschlossen. Mit Hilfe der aus den Interpretationsergebnissen abgeleiteten Maßzahlen und Veränderungswerte können Prozesse quantitativ beschrieben und analysiert werden sowie beispielsweise durch Flächenüberlagerungen, Kerneldichte und Änderungslinien visualisiert werden.

Alle Untersuchungsgebiete zeigen starke Veränderungsprozesse, die sich zudem gegenseitig beeinflussen oder bedingen. In allen untersuchten Teilräumen zeigt sich durch Migration und Bevölkerungswachstum hohe Siedlungsaktivität, die sich durch Siedlungsverdichtung, Siedlungserweiterung und Zersiedlung sowie durch die Entstehung neuer Siedlungsbereiche und Verlagerung von Siedlungsklustern ausdrückt. Dies geschieht vor allem im Umfeld schon existierender Siedlungen und Straßen, aber auch zerstreut ins Umland hinein. Siedlungsprozesse wirken direkt und indirekt auf die Verteilung anderer Landbedeckungs- und -nutzungsklassen. Die aufgrund ihrer sozioökonomischen Relevanz untersuchten landwirtschaftlich genutzten Flächen werden beispielsweise innerhalb und im direkten Umkreis von Siedlungen verdrängt und u.a. in zuvor ungenutzte oder extensiv genutzte Bereiche verlagert. Die großflächigen Veränderungen der landwirtschaftlichen Flächen machen sich durch ihre „Verschiebung“ nicht immer in der Flächensumme bemerkbar. Daran zeigt sich, dass der Vergleich von Gesamtflächen nur Hinweise auf die Flächenbilanz geben kann und keine räumlich differenzierten Aussagen ersetzen kann. Siedlungsprozesse sowie Verschiebung und Wachstum landwirtschaftlich genutzter Flächen bedingen wiederum große Verluste natürlicher bzw. naturnaher Flächen, wie Feuchtgebiete (*Savanne humide*, *Fôret dense humide*), Ölpalmflächen oder *Savanne herbeuse*. Die in den Untersuchungsgebieten durchgängig analysierten Küstenlinien zeigen in Teilräumen mehr oder weniger starke Erosion, welche die Verfügbarkeit von Flächen im Küstenraum zusätzlich vermindert. Küstenerosion wird in Benin seit den 60er Jahren beobachtet. Als Ursachen gelten veränderte Sedimentfrachten durch Küstenbauwerke wie Häfen (in Lomé, Togo und Cotonou) und unangepassten Küstenschutzbauwerke, Staudämme (insbesondere im Volta, Ghana) und Sandabbau am Strand. Der Vergleich der Küstenlinienindikatoren zeigt für das Arrondissement Avlékéte im Beobachtungszeitraum 1995–2006 kaum Veränderungen. Demgegenüber zeigt das Arrondissement Èkpè in beiden Beobachtungsspannen, 1995–2002 bzw. 2002–2007, die Wirkung starker Erosionsprozesse mit Raten bis zu 28 m/a; die mittlere Erosionsrate beträgt ca. 15 m/a. Betroffen davon sind neben Plantagen und Gewerbegebieten auch Siedlungen, die am Strand errichtet wurden. Im Westen des Arrondissements Èkpè sind dies oftmals eher einzelne Gebäude, deren Zerstörung in zahlreichen Dokumenten beschrieben wird. Im Gegensatz dazu sind in den Untersuchungsstransekten zumeist einfache dörfliche Siedlungen betroffen. Sowohl zwischen 1995 und 2002 als auch zwischen 2002 und 2007 ist es durch die Erosion zu Kompletterverlust und daher Verlagerungen der Siedlungen gekommen.

Durch die Erfassungen von Gebäuden, landwirtschaftlichen Nutzflächen und der Küstenlinienindikatoren im Zeitraum 1995–2007 sind im Untersuchungsraum erstmals räumliche Analysen der mit ihnen verbundenen sozioökonomisch relevanten Prozesse und deren Interaktionen möglich. Diese können als Basis für Planungen dienen, die die mit den detektierten Entwicklungen verbundenen Risiken vermeiden oder vermindern sollen. Die Untersuchungsgebiete erfassen typische Landschaftstrukturen und Prozesse im Golf von Guinea; die angewandte Methodik ist daher auf diese insgesamt anwendbar. Zwar müssen in anderen Regionen – auch in den jeweiligen Länderkontexten – die Prozesse quantitativ neu erfasst werden. Es kann jedoch angenommen werden, dass die oben beschriebenen Veränderungstendenzen auch in anderen Regionen zu beobachten sind und somit qualitativ übertragen werden können. Zur quantitativen Erfassung der Prozesse in anderen Räumen wird die Übertragung der vorgestellten Methodik vorgeschlagen, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.



Im Rahmen der Siedlungsprozessanalyse wurde die Methode zur kernelbasierten Punktdichtebestimmung angepasst, die auch auf andere räumlich punkthafte Daten übertragen werden kann. Des Weiteren wurde im Kontext der Küstenlinienanalyse die Erfassung einer durchgängigen Veränderungslinie im Gegensatz zu üblichen Transektverfahren durchgeführt, da dies eine lückenlose Analyse ermöglicht. Des Weiteren können auch Verschiebungen der Veränderungsintensität entlang der beobachteten Linie aufgedeckt werden. Allgemein kann die Methode zur Veränderungsanalyse von Begrenzungslinien angewendet werden.

Aus den beobachteten Nutzungserweiterungen und Intensivierungen entstehen wachsende Raumansprüche. So wurde beispielsweise beobachtet, dass Landwirtschaft und Siedlung in einigen Räumen gemeinsam existieren, Landwirtschaft aber in anderen Gebieten von Siedlung verdrängt wird. Zur Abschätzung der Raumansprüche wäre es wesentlich zu untersuchen, wo Grenzen der Ausbreitung – natürlicher oder anthropogener Art – von Landnutzungen liegen und ob sich diese Grenzen verschieben. Im Kontext der Siedlungsprozessanalyse wurde ein Zusammenhang mit Migration hergestellt. Dabei stellt sich die Frage, inwiefern sich Migration tatsächlich in Siedlungswachstum ausdrückt und welche Rolle dabei die beobachtete Verschiebung der Hausgrößen hin zu größeren Häusern spielt.

Die Interpretation landwirtschaftlicher Nutzflächen wurde durch die Aufnahmezeitpunkte (Trockenzeit) erschwert, so dass zumeist im Bild erkennbare Nutzungsspuren als Indikatoren für Landwirtschaft genutzt wurden. Nutzungsspuren sind aber unter Umständen sehr lange im Gelände sichtbar, was die Sicherheit von Aussagen erschwert. Die Erfassung der Bodenwahrheit hat aufgezeigt, dass Flächen innerhalb der ehemaligen Lagunen, die eindeutige Nutzungsspuren durch Dammlinien aufweisen, schon „sehr lange“ durch Versalzung ungenutzt sind. Dies zeigt die Bedeutung der Geländebegehung, da hier ansonsten eine Überbewertung der Feldflächen stattgefunden hätte.

Die Zunahme von – durch Siedlung und Landwirtschaft – intensiv genutzten Flächen und die damit verbundene beobachtete Abnahme von Vegetation in Feuchtgebieten sowie von dichter Vegetation auf den Strandwällen, wie *Forêt dense* und Ölpalmflächen, bedeutet Veränderungen und Verlust von Habitaten, Änderungen des Wasserhaushaltes und Bodendegradation. Bei Vorliegen von Untersuchungen dazu und der Möglichkeit einer räumlichen Kopplung können die Ergebnisse dieser Arbeit einen Beitrag zur Abschätzung dieser Phänomene liefern.

Als klare Nutzungsgrenzen konnten die Lagune und der Küstenverlauf festgestellt werden. Der Küstenverlauf reduziert zudem bei Erosion den für Nutzung zur Verfügung stehenden Raum. Zudem stellt sich die Frage der weiteren Entwicklung. Es hat sich gezeigt, dass sich die durchschnittlichen Raten der Küstenerosion von einem betrachteten Zeitraum zum nächsten geändert haben: der Küstenabschnitt mit der stärksten Erosion verschob sich nach Osten, und im Westen wurden insgesamt geringere Raten und ein Abklingen der Erosion beobachtet. Für Prognosen der weiteren Entwicklung bedarf es längerer und engerer Zeitreihen und ergänzende Daten, u.a. zu Sedimentmengen, Wellenregime und Strömungen.

Die Fernerkundung liefert flächenhafte Daten zu räumlichen Auswirkungen von Prozessen – im Gegensatz zur Kartierung im Gelände, die von der Zugänglichkeit der Untersuchungsgebiete abhängig ist oder einer Befragung, die im Verhältnis gesehen nur punkthaft durchgeführt werden kann. Bilddaten bleiben erhalten, halten den Zustand des Untersuchungsgebietes im Abbild fest, so dass auch wiederholt Ergebnisse überprüft und ergänzt werden können. Die Fernerkundung ist damit unabhängig von den bei der Ersterhebung definierten Untersuchungsfaktoren – solange diese nicht Voraussetzungen für Interpretation oder Klassifizierung darstellen. Historische Bilddaten ermöglichen daher die Erarbeitung von Zuständen in der Vergangenheit und somit die Erfassung und Analyse von Prozessen in der Retrospektive, wie dies im Rahmen dieser Arbeit auch realisiert wurde.

Bedingung für die fernerkundungsgestützte Prozessanalyse ist zu allererst die Notwendigkeit des Raumausdruckes eines Prozesses, um überhaupt identifiziert und nachfolgend analysiert werden zu können. Prozesse müssen sich daher im beobachteten Raum so auswirken, dass sie durch die Fernerkundung beobachtet und analysiert werden zu können. Ein Prozess ist mit fernerkundlichen Methoden nicht zu fassen, wenn er die Landbedeckung oder -nutzung nicht verändert oder diese zu den Aufnahmezeitpunkten gleich erscheint. Zudem muss der Raumausdruck durch den Sensor erfasst werden. Durch die messtechnischen Entwicklungen ist dies in zunehmender geometrischer, spektraler, radiometrischer und zeitlicher Auflösung möglich. Im Untersuchungsraum hat sich gezeigt, dass sich die ausgewählten Prozesse mit den vorhandenen Daten analysieren lassen. Insbesondere im

Rahmen der Analyse landwirtschaftlicher Flächen zeigte sich jedoch, dass sich neben der geometrisch-spektralen Auflösung insbesondere die zeitliche Auflösung beschränkend auf die Auswertbarkeit der Daten auswirkte. Da die Fernerkundungsdaten hauptsächlich aus der Trockenzeit vorliegen, wurden hauptsächlich Strukturmerkmale, wie Dammreihen und Feldabgrenzungen in die Interpretation integriert. Da die Abgrenzungen oftmals undeutlich sind, besteht hier Forschungsbedarf, Differenzierungen zwischen aktuellen Anbauflächen, Brache und Savanne zu treffen, insbesondere mit Daten höherer zeitlicher und spektraler Auflösung. Ursachen für Veränderungen und antreibende Kräfte von Prozessen können also nur bedingt durch die Fernerkundung erfasst werden. Wenn repräsentative, beispielsweise sozioökonomische Daten, geographisch verortbar sind und dadurch an Fernerkundungsdaten oder daraus extrahierte Ergebnisse gekoppelt werden können, ist es möglich, räumliche Korrelation zu identifizieren, zu analysieren und somit Erklärungsansätze für räumliche Prozesse zu liefern, die nicht allein aus Fernerkundungsdaten abgeleitet werden können. Dazu gehören sozioökonomische, soziologische oder kulturelle Daten zu Ursachen und Handlungsrationalitäten beteiligter Akteure, bzw. ökologische Daten zu Faktoren, die die beobachteten Prozesse antreiben und zu Veränderungen führen können. Daten dazu sowie zu Wahrnehmungen dieser Veränderungen durch Akteure müssten durch ergänzende Datenerfassung, z.B. Befragungen und Geländearbeiten aufgenommen werden. Bei Befragungen muss dabei beachtet werden, dass Angaben bezüglich der Vergangenheit mit zunehmendem zeitlichem Abstand zum erfragten Zeitpunkt durch die Erinnerung geprägt und verändert werden können. Trotzdem können – auch mit dieser Einschränkung – solche Untersuchungen vertiefende Einsichten in Abläufe und Wahrnehmung der beobachteten Prozesse ermöglichen. Dies macht die Bedeutung eines Zusammenarbeitens verschiedener Disziplinen, beispielsweise zwischen sozioökonomischer, umweltnaturwissenschaftlicher und fernerkundlicher Empirie im Finden von Erklärungsansätzen für Prozesse deutlich. Zu dieser Kopplung besteht noch Forschungsbedarf, insbesondere bezüglich des Findens gemeinsamer räumlicher Einheiten. So werden sozioökonomische Erhebungen oftmals haushaltsbezogen durchgeführt. Hier wäre grundsätzlich für den Untersuchungsraum zu klären, inwiefern Haushalte an Gebäude gekoppelt werden können oder es müssen andere – gemeinsame – Einheiten gefunden werden. Eine weitere Quelle sozioökonomischer Daten sind Zensusdaten. Für den Untersuchungsraum wirkt sich jedoch die unklare Abgrenzung der im Zensus erfassten Dörfer und daher die fehlende Möglichkeit einer genauen räumlichen Verknüpfung mit den Bilddaten aus. Auch hier werden verschiedene Angaben haushaltsbezogen gemacht. Es wird jedoch nicht definiert, wer zu einem Haushalt gehört.

Offene Forschungsfrage bleibt bei jeder räumlichen Korrelation, wenn – beispielsweise durch Untersuchungen vor Ort – eine Erklärung für ein Phänomen gefunden werden kann, ob die gekoppelten Informationen sich auch aus den Fernerkundungsdaten zurück ableiten lassen. So kann beispielsweise selbst bei räumlich differenzierten Erhebungen aus der Fernerkundung nicht für andere Gebiete abgeleitet werden, ob bei küstenerosionsbedingter Verlagerung von Gebäuden die neuen Gebäude durch Bewohner der vorher erodierten Gebäude oder durch neue Siedler errichtet werden.

Da für die Untersuchungsgebiete nur Daten von zwei bzw. drei Zeitpunkten zur Verfügung stehen, sind Aussagen über den Verlauf der Prozesse eingeschränkt. Bezüglich einer fortführenden Prozess- und Raumanalyse werden weitere Fernerkundungsdaten in höherer räumlicher und zeitlicher Abdeckung benötigt. Für zukünftige Analysen können neue Satellitendaten mit sehr hoher geometrischer Auflösung in Betracht gezogen werden: Durch den Start von NigeriaSat-2 am 17. 08. 2011 befindet sich nun auch ein afrikanischer Satellit im All, der Daten mit 2,5 m GSD im PAN und 5 m in den Multispektralkanälen liefert. Durch NigeriaSat-2 soll Nigeria alle vier Monate abgedeckt werden, der Ertragszustand sogar monatlich (SSTL 2011a). Inwiefern Benin als Nachbarland abgedeckt wird, bleibt noch abzuwarten. Damit würde die zeitliche Abdeckung in solch einer Weise zunehmen, dass die Wahrscheinlichkeit steigt, auch wolkenfreie Tage in der Regenzeit abdecken zu können und damit beispielsweise multitemporale Analysen innerhalb eines Jahreszykluses möglich zu machen. WorldView-2-Daten<sup>81</sup> werden in sehr hoher geometrischer Auflösung (2 m MS und 0,5 m PAN) mit acht Spektralkanälen im Multispektralbildsatz spektral höher aufgelöst erfasst als IKONOS- und QuickBird-Daten und decken ein breiteres Spektrum ab (400–900 nm; DigitalGlobe 2009). Im Hinblick auf die schwierige Trennbarkeit zwischen Dachflächen und unbedecktem Boden bei der Klassifizierung könnten in Zukunft möglicherweise auch hyperspektrale Daten hinzugezogen werden. Es ist jedoch fraglich, inwieweit die geometrische Auflösung sich überhaupt für diese Klassen

---

<sup>81</sup> Seit 8.10.2009

eignet: Die für 2015 angekündigte EnMAP-Mission liefert Daten mit 30 m GSD und wird sich dadurch nur eingeschränkt für Fragestellungen im kleinräumlich gegliederten suburbanen und ländlichen Raum eignen. Hinsichtlich der Klassifizierung von Gebäuden und landwirtschaftlichen Flächen können Höhendaten einen wertvollen Beitrag leisten. DGMS lagen jedoch nicht vor. Es stehen für die Küstenzone Benins digitale Oberflächenmodelle (DOM) der *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) mit 90 m GSD<sup>82</sup> und von ASTER GDEM V2 mit 30 m GSD zur Verfügung. Die DOM eignen sich jedoch nur eingeschränkt, da sie nicht die Geländeoberfläche zeigen, sondern die Oberfläche einschließlich aller darauf befindlichen Objekte. Zudem weisen sie Artefakte auf, die die Höheninformation regional verfälschen. Durch die TanDEM-X-Mission (*TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement*) wird in den kommenden Jahren ein globales, digitales Höhenmodell mit einer vertikalen Auflösung von zwei Metern und einer GSD von 12 m erstellt werden.

Der manuell-interpretative Ansatz zeigte sich zwar als räumlich begrenzt durch die zeitintensive Bearbeitung; Klassifizierungsansätze boten jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt aus erläuterten Gründen keine Alternative. Der hier vorgestellte Ansatz, der auf visueller Interpretation der zu untersuchenden Klassen beruht, hat gezeigt, dass er geeignet ist, Bilddaten unterschiedlicher spektraler Auflösung und Bildqualität<sup>83</sup> zu nutzen, um Prozesse in hoher räumlicher Auflösung zu analysieren.

Bezüglich der algorithmengestützten Auswertung besteht jedoch Forschungsbedarf: zum einen durch die Notwendigkeit der Analyse größerer Gebiete und zunehmender Fernerkundungsdaten und die damit verbundene größere Datenmenge, die ausgewertet werden muss, zum anderen durch die Tatsache, dass oftmals auch weiter heterogene Daten ausgewertet werden müssen – zumal auch in anderen Entwicklungsländern Daten wie die hier analysierten zu erwarten sind. Wird weiter auf eine Klassifizierung hingearbeitet – insbesondere auch im Hinblick auf die neuen höchstauflösten Satellitendaten –, wäre zum einen eine Verbesserung der Segmentierungsergebnisse anzustreben, auf denen die Klassifizierung aufbaut; zum anderen müssen weitere Merkmale integriert werden, um insbesondere die strukturellen und kontextuellen Eigenschaften der Klassen zu fassen. Zudem sollten alle verfügbaren Spektralinformationen der jeweiligen Daten ausgeschöpft werden, auch wenn dadurch keine Übertragbarkeit der beschreibenden Parameter, wie es bei der Klassifizierung von Gebäuden getestet worden war, zwischen den Datensätzen gewährleistet werden kann. Bei der visuellen Interpretation waren ein Lageabgleich der erfassten Objekte und eine Plausibilitätsprüfung der Zeitpunkte untereinander verhältnismäßig einfach möglich. Dazu wäre zu prüfen, wie weiteres Kontextwissen und Plausibilitätsprüfungen – wie sie bei der visuellen Interpretation möglich sind – in Algorithmen zu integrieren sind und wie Wissensbasen durch Rechner verarbeitbar gemacht werden können. So wurde im Rahmen der visuellen Interpretation beispielsweise jeweils das Ergebnis der am besten auszuwertenden Bilddaten zunächst auf die anderen Zeitpunkte übertragen, um dort leichter entscheiden zu können, ob die Objekte ebenfalls existieren, neu hinzugekommen sind, weggefallen sind oder sich verändert haben. Hierzu bedarf es weiterer Forschung zu Klassifizierungs-, aber auch Segmentierungsalgorithmen, denn eine Übereinstimmung von Bildobjektgrenzen scheidet bei segmentbasierten Verfahren mit großer Wahrscheinlichkeit schon an der Segmentierung. Daher müssten die Auswirkungen klassifizierungsbedingter Abweichungen und dadurch verursachter Scheinveränderungen bei Einsatz algorithmengestützter Verfahren geprüft werden. Die erfassten Gebäude, landwirtschaftlichen Flächen und Küstenlinienindikatoren können als Trainings- und Kontrollgebiete für die Entwicklung von impliziten und expliziten Klassifizierungsansätzen zur Verfügung stehen<sup>84</sup>. Dabei muss beachtet werden, dass die Klassen jeweils zunächst in den QuickBird-Bilddaten interpretiert, dann auf die anderen Bilddaten übertragen und dort ergänzt wurden. Dadurch stimmen die Grenzen zwar zwischen den Untersuchungszeitpunkten überein, in Beziehung zu den Bilddaten sind sie aber außerhalb der QuickBird-Daten verschoben.

Ein besonderes Merkmal der vorliegenden Arbeit ist es, dass trotz problematischer Bilddatenlage detaillierte Analysen raumverändernder Prozesse durchgeführt wurden, die in ihrer räumlichen, sozioökonomischen sowie ökologischen Relevanz diskutiert werden. Dies gilt zumal für den Küstenraum Benins, für den damit für die untersuchten Teilräume erstmalig quantitative flächenhafte Daten bezüglich der untersuchten Prozesse vorliegen. Die Ergebnisse können zu integrierten Planungsmaßnahmen und Prognosen beitragen. Mit der beschriebenen

<sup>82</sup> Die Küstenzone Benins wird nicht durch SRTM-Daten mit 30 m GSD abgedeckt

<sup>83</sup> Gemeint ist hier die Qualität, die abhängig ist von der Erstellung des analogen Luftbildkontaktabzugs bzw. vom Digitalisieren (Einscannen) der analogen Luftbilder.

<sup>84</sup> Für Auskünfte stehe ich zur Verfügung (ulrike.sturmhentschel@yahoo.de)

Methodik könnten die Datenreihen und die Prozessanalyse weiter vervollständigt, zeitlich fortgeführt und für andere Gebiete erweitert werden. Forschungsbedarf hat sich zum einen gezeigt hinsichtlich der Notwendigkeit, Klassifizierungsalgorithmen weiter zu entwickeln, um auch großflächig Analysen raumrelevanter Prozesse realisieren zu können und zum anderen hinsichtlich der Entwicklung von Ansätzen insbesondere bezüglich der räumlichen Kopplung zusätzlicher Daten zur Ableitung von Korrelationen für Erklärungsansätze.

# 12 Verzeichnisse

## 12.1 Literatur

- Abiodun, A. A. (2000): Development and utilization of remote sensing technology in Africa. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(6): 674–686.
- Adam, K. S. (1986): Man's impact on the geomorphological evolution of the Gulf of Benin Coastal Plain (West Africa). *Thalassas*, 4(1).
- Adam, K. S. (1988): L'évolution geomorphologique de la plaine côtière dans le Golfe du Bénin. *Cahiers Géologiques*, Université P. M. Curie, Paris: 935–943.
- Adam, K. S. (1990): Le littoral du Golfe du Bénin, atout stratigraphique, In: *Colloque International „Défense de côte et protection du littoral“*, Université nationale du Bénin, 15 S.
- Adam, K.S. (1992): La cartographie d'inventaire, un outil pour la gestion du littoral ouest-africaine: le cas du golfe du Bénin *L'Espace géographique*, 4: 333–342.
- Adam, K. S. (1998a): *Towards Integrated Coastal Zone Management in the Gulf of Guinea*. Les Editions du Flamboyant. UNIDO/UNDP-GEF.
- Adam, K. S. (1998b): Managing the coastal zone of Benin. In: Ibe, C. (Hrsg.): *Perspectives in Integrated Coastal Areas Management in the Gulf of Guinea*. UNIDO/UNDP-GEF.
- Adam, K.S. & Boko, M. (1993): *Le Bénin*. Les Éditions du Flamboyant, Cotonou / EDICEF, Vanves, 95 S.
- Adjanohoun E.J., Adjakidje, V., Ahyi, M.R.A., Ake Assi, L., Akoegninou, A., d'Almeida, J., Apovo, F., Boukef, K., Chadare, M., Gusset, G., Dramane, K., Eyme, J., Gassita, J.-N., Gbaguidi, N., Goudote, E., Guinko, S., Houngnon, P., Issa Lo, Keita, A., Kiniffo (1989): *Contribution aux études ethnobotaniques et floristiques en République Populaire du Bénin*. Agence de Cooperation Culturelle et Technique, Paris, 895 S.
- Agardy, T., Alder, J., Dayton, P., Curran, S., Kitchingman, A., Wilson, M., Catenazzi, A., Restrepo, J., Birkeland, C., Blaber, S., Saifullah, S., Branch, G., Boersma, D., Nixon, S., Dugan, P., Davidson, N., Vörösmarty, C. (2005): Chapter 19 – Coastal Systems, In: Hassan, R., Scholes, R., Ash, N. (hrsg.): *The Millenium Ecosystem Assessment (MEA) Series – Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends, Volume I*, Island press, Washington-Covelo-London: 513–549.
- Albertz, Jörg (2009): *Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*. 4. Auflage, WBG.
- Alparone, L., Wald, L., Chanussot, J., Thomas, C., Gamba, P., Bruce, L.M. (2007): Comparison of pansharpening algorithms: Outcome of the 2006 GRS-S data-fusion contest. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45 (10): 3012–3021.
- Amissah-Arthur, A. & Miller, R.B. (2002): Remote Sensing Applications in African Agriculture and Natural Resouces: Highlighting and Managing the Stress of Increasing Population Pressure. *Adv. Space Res.* 30 (11): 2411–2421.
- Baatz, M. & Schäpe, A. (2000): Multiresolution Segmentation: An Optimazation Approach for High Quality Multiscale Image Segmentation. In: *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII, Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000*, Heidelberg: 12–23.
- Bähr, Hans-Peter & Vögtle, Thomas (1999): *GIS for Environmental Monitoring*. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 360 S.

- Bähr, Hans-Peter (2005a): Sprache, ein Datentyp der Bildanalyse, In: Bähr, Hans-Peter und Vögtle, Thomas (Hrsg.): *Digitale Bildverarbeitung – Anwendungen in Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS*, 4. Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg: 81–105.
- Bähr, Hans-Peter (2005b): Ein Gerüst der Bildanalyse, In: Bähr, Hans-Peter und Vögtle, Thomas (Hrsg.): *Digitale Bildverarbeitung – Anwendungen in Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS*, 4. Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg: 211–228.
- Bähr, Hans-Peter (2007): Von Platon bis second life: Anschauung steuert Erkenntnis. *Allgemeine Vermessungsnachrichten*, Band 11–12: 369–374.
- Bayram, B., Acar, U., Seker, D., Ari, A. (2008): A Novel Algorithm for Coastline Fitting through a Case Study over the Bosphorus. *Journal of Coastal Research* 24: 983–991.
- Behnisch, M. (2008): *Urban Data Mining – Operationalisierung der Strukturerkennung und Strukturbildung von Ähnlichkeitsmustern über die gebaute Umwelt*. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Architektur, Universitätsverlag Karlsruhe, 303 S.
- Berry, B. J. L. & Marble, D. F. (Hrsg.) (1968): *Spatial analysis: a reader in statistical geography*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall.
- Bhatta, B. (2010): *Analysis of Urban Growth and Sprawl from Remote Sensing Data*, Springer-Verlag, Berlin.
- Blaschke, T., Lang, S., Hay, G. (Hrsg.) (2008): *Quality assessment of segmentation results devoted to object-based classification*. Springer-Verlag Berlin.
- Blivi, A.; Anthony, E. J. & Oyédé, L. M. (2002): Sand barrier development in the Bight of Benin, West Africa, *Ocean & Coastal Management*, 45: 185–200.
- Boak, E. H. & Turner, I. L. (2005): Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research* 21: 688–703.
- Bohlinger, Brigitte (1998): Die spontane Vegetation in traditionellen Anbausystemen Benins – ihre Bedeutung und Möglichkeiten des Managements. In Koch, Werner (Hrsg.): *PLITS 16* (1). 175 S.
- Bourhis, J. (2004): *L'Hypercentre de Cotonou, Benin: Fondements, Dynamiques et Acteurs. Autours du plus grand marché d'Afrique de l'Ouest*. Thèse de l'D.E.A. Géographie et Développement, Université de Provence, Aix-en-provence.
- Bühler, Y., Kneubühler, M., Bovet, S., Kellenberger, T. (2007): Anwendung von ADS40 Daten im Agrarbereich. In: *DGPF-Tagungsband 16 / 2007 – Dreiländertagung SGPBF, DGPF und OVG*: 381–390.
- Canty, M.J. (2010): *Image Analysis, Classification, and Change Detection in Remote Sensing – with Algorithms for ENVI/IDL*, 2. Auflage, CRC Press, Boca Raton.
- Cardenes, R., Bach, M., Chi, Y., Marras, I., de Luis, R., Anderson, M., Cashman, P., Bultuelle, M. (2007): Multimodal evaluation for medical image segmentation. In: *CAIP2007, LNCS*, Vol. 4673: 229–236.
- CEDA – Centre pour l'Environnement et de le développement en Afrique (2007): *Rapport National sur l'Environnement Marin et Côtier du Bénin*, Bericht des Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature (MEPN), Cotonou, 68 S.
- Chen, C., Pau, L.-F., Wang, S. (Hrsg.) (1999): *Handbook of Pattern Recognition & Computer Vision*. 2. Auflage. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. , Singapore.
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B. (2004): Digital Change Detection Methods in Ecosystem Monitoring: A Review. *International Journal of Remote Sensing* 25 (9): 1565–1596.
- Dahdouh-Guebas, F. (2002): The use of remote sensing and GIS in the sustainable management of tropical coastal ecosystems. *Environment, Development and Sustainability* 4: 93–112.

- Daschkeit, A., Beck, A., Sterr, H., Schuchardt, B., (2007): Indikatoren für Küstenmanagement – GIS-gestützte Verwendung von Geoinformationen. In: Traub, K.-P., Kohlus, J. (Eds.): *Geoinformationen für die Küstenzone*, Herbert-Wichman Verlag: 40–48.
- Definiens (2009a): *eCognition Developer 8 Reference Book*, Definiens AG, München.
- Definiens (2009b): *eCognition Developer 8 User Guide*, Definiens AG, München.
- DigitalGlobe (2009): *The Benefits of the 8 Spectral Bands of WorldView-2*. White Paper. [http://worldview2.digitalglobe.com/docs/WorldView-2\\_8-Band\\_Applications\\_Whitepaper.pdf](http://worldview2.digitalglobe.com/docs/WorldView-2_8-Band_Applications_Whitepaper.pdf) (Stand: 07. 01. 2012)
- Degbe, Cossi Georges Epiphane M. (2009): *Géomorphologie et érosion côtière dans le Golfe de Guinée*, Faculté des Sciences et Techniques (FAST) Université d'Abomey-Calavi (UAC) Cotonou, République du Bénin, ICMIPA Publishing, [http://www.nodc-benin.org/PROPAO/formation/Master2\\_MROPA\\_Benin/M2\\_oceano\\_TrainingPeriodreports/Degbe\\_M2oceano\\_2008-2009.pdf](http://www.nodc-benin.org/PROPAO/formation/Master2_MROPA_Benin/M2_oceano_TrainingPeriodreports/Degbe_M2oceano_2008-2009.pdf) (Stand: 22. 01. 2013)
- DESA – Department of Economic and Social Affairs (2007): *Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies, 3<sup>rd</sup> edition – Full set of methodology sheets*, <http://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=400&nr=108&menu=35> (Stand: 23. 01. 2013)
- Diederich, Malte & Simmer, Clemens (2008): In: Judex, M. und Thamm, H.-P. (Hrsg.): *IMPETUS Atlas Benin. Research Results 2000–2007*. 3rd edition. Department of Geography, University of Bonn, Germany: 19–20.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.) (1997): *DIN 18716-3, Juli 1997. Photogrammetrie und Fernerkundung, Teil 3: Begriffe der Fernerkundung*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 15 S.
- DLR (2011): *HRSC-A – Technologie*. [http://www.dlr.de/pf/desktopdefault.aspx/tabid-331/1198\\_read-2357/](http://www.dlr.de/pf/desktopdefault.aspx/tabid-331/1198_read-2357/) (Stand: 23. 01. 2013)
- Doevenspeck, Martin (2005): Migration im ländlichen Benin – Sozialgeographische Untersuchungen an einer afrikanischen Frontier. In: *Studien zur Geographischen Entwicklungsforschung*, Saarbrücken.
- Doevenspeck, M., Heldmann, M. (2008): Demography: Spatial Disparities and High Growth Rates. In: Judex, M. & Thamm, H.-P. (Hrsg.): *IMPETUS Atlas Benin. Research Results 2000–2007*, 3rd edition. Department of Geography, University of Bonn, Germany: 103–105.
- Dolan, R.; Hayden, B., Heywood, J. (1978): A new photogrammetric method for determining shoreline erosion. *Coastal Engineering* 2: 21–39.
- Domingo, E. (2007): *La région urbaine du littoral au Bénin: dynamiques urbanisantes et environnement, une géographie de l'aménagement du territoire*. Dissertation. 2 Bände. Université de Lomé
- Dossomou, Karen Stina O. (2004): *Exploitation du sable marin en carrières dans la commune de Sèmè-Podji – impacts socio-économiques et environnementaux*. Mémoire d'Ingénieur des Travaux en Aménagement et Protection de l'Environnement, Département Aménagement et Protection de l'Environnement/Ecole Polytechnique d'Abomey Calavi, Université d'Abomey-Calavi, Bénin.
- Duda, R. O., Hart, P. E., Stork, G. (2001): *Pattern classification*. 2. Ausgabe, Wiley, New York.
- Duin, R., Juszczak, P., Paclik, P., Pekalska, E., de Ridder, D., Tax, D., Verzakov, S. (2007): *PRTools 4 – a Matlab toolbox for pattern recognition. Version 4.1*. Delft University of Technology. <http://prtools.org/files/PRTools4.1.pdf> (Stand: 23. 01. 2013).
- Duy, V., Zhang, Y., Zhong, M. (2010): A Review on Image Segmentation Techniques with Remote Sensing Perspective. In: *ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS, Vienna, Austria, July 5–7 2010, IAPRS*, Vol. 28, Part 7A
- EC – European Commission. Directorate-General for Environment, Nuclear Safety, and Civil Protection, European Commission. Directorate-General for Fisheries, European Commission. Directorate-General for Regional Policy and Cohesion (1999): *Towards a European integrated coastal zone management (ICZM) strategy: general principles and policy options: a reflection paper*. Office for Official Publications of the European Communities, 31 S.

- Ermert, V. & Brücher, T. (2008): The Climate of Benin (1961 to 1990). In: Judex, M. und Thamm, H.-P. (Hrsg.): *IMPETUS Atlas Benin. Research Results 2000–2007*. 3rd edition. Department of Geography, University of Bonn, Germany: 17–18.
- ESRI (2010): *How Kernel density works. Release 9.3*, Last modified April 13, 2010. <http://webhelp.esri.com/arcgisDesktop/9.3/index.cfm?TopicName=How%20Kernel%20Density%20works> oder <http://help.arcgis.com/de/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z00000011000000.htm> (Stand: 23. 01. 2013)
- Fina, S., Taubenböck, H., Wurm, M., Siedentop, S. (2010): Planungsrelevante Messgrößen der Stadtentwicklung – was leisten hoch aufgelöste Fernerkundungsdaten? In: Taubenböck, H. & Dech, S. (Hrsg.): *Fernerkundung im urbanen Raum – Erdbeobachtung auf dem Weg zur Planungspraxis*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt: 129–143.
- Fink, Andreas H., Kotthaus, Simone, Pohle, Susan (2008): Rainfall Variability in West Africa. In: Judex, M. und Thamm, H.-P. (Hrsg.): *IMPETUS Atlas Benin. Research Results 2000–2007*. 3rd edition. Department of Geography, University of Bonn, Germany: 11–12.
- Floquet, A. (1990): Conservation of soil fertility by peasant farmers in Atlantic Province, Benin. In: Kotschi, J. (Hrsg.): *Ecofarming Practices for Tropical Smallholders*. Verlag J. Markgraf, Weikersheim: 29–53.
- Fox, Jefferson, Rindfuss, R. Ronald, Walsh, Stephen J., Mishra, Vinod (2003): *People and the Environment – Approaches for Linking Household and Community Surveys to Remote Sensing and GIS*. Kluwer Academic Publishers, 319 S.
- Fox, Jefferson und Vogler, John B. (2005): Land-Use and Land-Cover Change in Montane Mainland Southeast Asia, *Environmental Management* Vol. 36 (3): 394–403.
- Fu, B. & Chen, L. (2000): Agricultural landscape spatial pattern analysis in the semi-arid hill area of the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments* 44: 291–303.
- Furberg, D. & Ban, Y. (2008): Satellite Monitoring of Urban Sprawl and Assessing the Impact of Land Cover Changes in the Greater Toronto Area. *The International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Congress Beijing 2008. WG VIII/1: Human Settlements and Impact Analysis*: 131–136.
- Galster, G., Hanson, R., Wolman, H., Coleman, S., Freihage, J. (2001): Wrestling sprawl to the ground: defining and measuring an elusive concept. *Housing Policy Debate* 12(4): 681–717.
- Gamba, P., Dell'Acqua, F., Stasolla, M., Trianni, G., Lisini, G. (2011): Limits and challenges of optical very-high-spatial-resolution satellite remote sensing for urban applications. In: (Yang): *Urban Remote Sensing: Monitoring, Synthesis and Modeling in the Urban Environment*, John Wiley & Sons: 35–48.
- Gao, Y. & Mas, J. A (2008): Comparison of the Performance of Pixel-Based and Object-Based Classifications over Images with Various Spatial Resolutions, *IAPRSIS- GEOBIA 2008 – Pixels, Objects, Intelligence, Calgary, Alberta, Canada*, 38(4/C1).
- Gomah, M, Trinder, J., Shaker, A., Hamed, M. & Elsaygher, A. (2010): Integrating multiple classifiers with fuzzy majority voting for improved land cover classification. In: Paparoditis, N., Pierrot-Deseilligny, M., Mallet, C. & Tournaire, O. (Hrsg): *IAPRS*, 38 (3A): 7–12.
- Gonçalves, R. M. (2010): *Modelagem de tendência a curto-prazo da linha de costa através de dados geodésicos temporais utilizando regressão linear, estimativa robusta e redes neurais artificiais*. Dissertation. UFRP, Curitiba.
- Grimm, N.B., Faeth, S.H., Golubiewski, N.E., Redman, C.L., Wu, J., Bai, X., Briggs, J.M. (2008): Global change and ecology of cities. *Science* 319: 756–760.
- Guilcher, A. (1954): Dynamique et morphologie des cotes sableuses de l'Afrique Atlantique. *Cahiers d'Info Géog* 1: 57–68.
- Gustafson, E.J. (1998): Quantifying Landscape Spatial Pattern: What is the State of the Art? *Ecosystems* 1: 143–156.



- Hammer, R.B., Stewart, S.I., Winkler, R.L., Radeloff, V.C., Voss, P.R. (2004): Characterizing Dynamic Spatial and Temporal Residential Density Patterns from 1940–1990 across the North Central United States. *Landscape and Urban Planning* 69: 183–199.
- Haralick, R. M. u. Shapiro, L. G. (1985): Survey. Image Segmentation Techniques. *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 29: 100–132.
- Hay, G. J. & Castilla, G. (2008): Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA): A new name for a new discipline. In: Blaschke, Thomas, Lang, Stefan, Hay, Geoffrey, J. Hay (Eds.): *Object-Based Images Analysis. Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Helmholz, P., Gerke, M., Heipke, C. (2007): Automatic Discrimination of Farmland Types Using IKONOS Imagery. In: Stilla U et al. (Hrsg.) *PIA07. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (3/W49A).
- Helmholz, P., Rottensteiner, F. (2009): Automatic verification of agricultural areas using IKONOS satellite images. *IntArchPhRS XXXVI-1-4-7*.
- Herold, M., Goldstein, N.C., Clarke, K.C. (2003): The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. *Remote Sensing of the Environment* 86: 286–302.
- Herold, M. (2004): *Remote sensing and spatial metrics for mapping and modeling of urban structures and growth dynamics*. Dissertation, University of California Santa Barbara, Juni 2004, 353S.
- Herold, M., Roberts, D.A., Gardner, M.E., und Dennison, P.E. (2004): Spectrometry for urban area remote sensing – Development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm. *Remote Sensing and Environment* 91: 304–319.
- Hillel, Daniel (2003): *Introduction to Environmental Soil Physics*, Elsevier Academic Press; 1st edition.
- Hinz, Stefan (2004): *Automatische Extraktion urbaner Straßennetze aus Luftbildern*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 580, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- Hinz, S. (2008). Automatic Object Extraction for Change Detection and GIS Update. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Geoinformation Sciences*, 37 (B4): 277–284.
- Hommel, Miriam (2010): *Detektion und Klassifizierung eingestürzter Gebäude nach Katastrophenereignissen mittels Bildanalyse*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 653, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- Honecker, U. & Löffler, E. (2001): Visuelle und rechnergestützte Landnutzungskartierungen in einem komplexen tropischen Bergland – Ein Vergleich am Beispiel der West Usambara Berge in Tansania. *Erdkunde*, 55: 348–361.
- Horning, D., Robinson, J.A., Sterling, E.J., Turner, W., Spector, S. (2010): Remote Sensing for Ecology and Conservation – A Handbook of Techniques. In: Sutherland, W.J. (Hrsg.): *Techniques in Ecology and Conservation Series*. Oxford University Press, Oxford.
- Huang, J., Lu, X., Sellers, J. M. (2007): A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing, *Landscape and Urban Planning* 82: 184–197.
- Huq, S. & Reid, H. (2005): *Climate Change and Development in West Africa (Draft Report)*. In: *Climate Change and Development Consultation on Key Researchable Issues*. <http://pubs.iied.org/pubs/pdfs/G00061.pdf> (Stand: 23. 01. 2013).
- Igue, A.M., Houndagba, C.J., Gaiser, T., Stahr, K. (2006): Land Use/Cover Map and its Accuracy in the Oueme Basin in Benin (West Africa). In: *Proceedings des Tropentag 2006 – Conference on International Agricultural Research for Development, Bonn, 11. –13. 10. 2006*.
- IndexMundi (2010): Benin – Historische Daten, <http://www.indexmundi.com/g/g.aspx?v=27&c=bn&l=de> (Stand: 05. 08. 2010).

- INSAE (1994a): *Deuxième recensement general de la population et de l'habitation, février 1992 (RGPH2) – La population de l'Atlantique: Villages et Quartiers de Ville (cartes de Sous-Préfectures)*. Cotonou, Benin, 51 S.
- INSAE (1994b): *Deuxième recensement general de la population et de l'habitation, février 1992 (RGPH2) – La population de l'Ouémé: Villages et Quartiers de Ville (cartes de Sous-Préfectures)*. Cotonou, Benin, 48 S.
- INSAE (2003): *Troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitation de février 2002 (RGPH3) – Synthèse des Analyses*. Cotonou, Benin, 47 S.
- INSAE (2004a): *Troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitation de février 2002 (RGPH3) – Département de l'Ouémé: Cahiers des villages et quartiers de ville*. Cotonou, Benin, 34 S.
- INSAE (2004b): *Troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitation de février 2002 (RGPH3) – Département de l'Atlantique: Cahiers des villages et quartiers de ville*. Cotonou, Benin, 27 S.
- Jat, M.K., Garg, P.K., Khare, D. (2008): Modelling of urban growth using spatial analysis techniques: a case study of Ajmer city (India), *International Journal of Remote Sensing*, 29 (2): 543–567.
- Jensen, J.R., Cowen, D.C. (1999): Remote Sensing of Urban/Suburban Infrastructure and Socio-Economic Attributes, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 65 (2): 611–622.
- Judex, M. (2008): *Modellierung der Landnutzungsdynamik in Zentralbenin mit dem XULU-Framework*. Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bonn, 166 S.
- Judex, M. und Thamm, H.-P. (Hrsg.)(2008): *IMPETUS Atlas Benin. Research Results 2000–2007*. 3rd edition. Department of Geography, University of Bonn, Germany.
- Kaki, Christophe & Oyédé, Lucien Marc (2000): Implications of Accelerated Sea-Level Rise (ASLR) for Benin. In: de la Vega-Leinert, A.C., Nicholls, R.J., Nasser, A. and El-Raey, M. (Hrsg.): *Proceeding of the SURVAS Expert Workshop on African Vulnerability and Adaption of Accelerated Sea-Level Rise (ASLR), Cairo, Egypt, 5–8 November 2000*: 30–40.
- Kaplan, D.h., Wheeler, J.O., Holloway, S.R. (2009): *Urban Geography*, 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Kellerman, A. (1981): *Centographic measures in Geography: Concepts and Techniques in Modern Geography (CATMOG) No. 32*. Norwich: Geo Books. John Wiley & Sons, New York.
- Koukoulas, S. (2010): Change Detection under Uncertainty: Modeling the Spatial Variation of Errors. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Volume XXXVIII, Part 8, Kyoto Japan.
- Kramer, C. (2000): Regionale Ungleichheit: wie lässt sie sich messen, darstellen und in die Sozialberichterstattung integrieren? *ZUMA-Arbeitsbericht 2000–06*.
- Kreyszig, E. (1998): *Statistische Methoden und ihre Anwendungen*. 7. Auflage, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen.
- Krisp, J.M., Peters, S., Murphy C.E., Fan, H. (2009): Visual Bandwidth Selection for Kernel Density Maps. *PFG* 5/2009: 445–454.
- Kurz, F., Ehrich, S., Hinz, S. (2000): Möglichkeiten der Bildverarbeitung bei der Charakterisierung von Vegetationsheterogenitäten mit Fernerkundungsmethoden. *Berichte der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst-, und Ernährungswirtschaft (GIL)*, Band 13, Weihenstephan: 111–114.
- Lambin, Eric F., B.L. Turner, Helmut J. Geist, Samuel B. Agbola, Arild Angelsen, John W. Bruce, Oliver T. Coomes, Rodolfo Dirzo, Günther Fischer, Carl Folke, P.S. George, Katherine Homewood, Jacques Imbernon, Rik Leemans, Xiubin Li, Emilio F. Moran, Michael Mortimore, P.S. Ramakrishnan, John F. Richards, Helle Skånes, Will Steffen, Glenn D. Stone, Uno Svedin, Tom A. Veldkamp, Coleen Vogel, Jianchu Xu (2001): The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change* 11: 261–269.
- Lang, Stefan & Blaschke, Thomas (2006): Bridging Remote Sensing and GIS – What are the main supportive pillars? *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI-4/C42.
- Lechtenböcker, C. (1996): Der Einsatz von MOMS-02/D2-Satellitenbilddaten zur Bevölkerungsstatistik – Das Beispiel Chitungwiza / Zimbabwe, *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 2/96: 57–61.

- Lechtenböcker, C. (1997): Satellitengestützte Bevölkerungsstatistik – Ein neuer Weg der Volkszählung in Städten des Südlichen Afrikas? *Geographische Rundschau* 49 (7–8): 450–455
- Li, T., Pullar, D., Corcoran, J., Stimson, R. (2007): A comparison of spatial disaggregation techniques as applied to population estimation for South East Queensland (SEQ), Australia. *Applied GIS* 2 (9): 1–16.
- Liedtke, C.-E., Ender M. (1989): *Wissensbasierte Bildverarbeitung*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., Chipman, J.W. (2008): *Remote Sensing and Image Interpretation*, 6. Auflage, John Wiley & Sons, Inc., 755 S.
- Liu, X., Li, X., Chen, Y., Tan, Z., Li, S., Ai, B. (2010): A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data. *Landscape Ecology*, 25: 671–682
- Liverman, Diana, Moran, Emilio F., Rindfuss, Ronald R., Stern, Paul C. (1998): *People and Pixels – Linking Remote Sensing and Social Science*. National Research Press, Washington D.C., 244 S.
- Lu, D., Mausel, P., Brondízio, E., Moran, E. (2004): Change Detection Techniques. *International Journal of Remote Sensing* 25 (12): 2365–2407
- Lu D. & Weng, Q. (2007): A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing* 28 (5): 823–870.
- Lübker, T. & Schaab, G. (2009): Optimization of parameter settings for multilevel image segmentation in GEOBIA. In: *Proceedings (CD) of ISPRS Hannover Workshop 2009 «High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information»*, 2. –5.6.2009, Hannover; ed. HEIPKE, C., K. JACOBSEN, S. MÜLLER & U. SÖRCEL.
- Lübker, T. & Schaab, G. (2010): A work-flow design for large-area multilevel GEOBIA: Integrating statistical measures and expert knowledge. In: *ISPRS Proceedings (digital) of Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA 2010)*, Vol. XXXVIII-4/C7, 29.6. –2.7.2010, Gent (Belgien); ed. by Addink, E.A. & F.M.B. Van Coillie.
- Mansour, Majid (2003): Environnements littoraux et aménagement durable: Apport de l'information spatiale. 2<sup>nd</sup> FIG Regional Conference, Morocco, December 2–3, 2003. [http://www.fig.net/pub/morocco/proceedings/TS7-TS7\\_3\\_mansour.pdf](http://www.fig.net/pub/morocco/proceedings/TS7-TS7_3_mansour.pdf) (Stand: 23. 01. 2013)
- MathWorks (2011): *R2011b Documentation – Image Processing Toolbox*. <http://www.mathworks.com/help/toolbox/images/ref/regionprops.html> (Stand: 27. 07. 2011)
- McGarigal, K., SA Cushman, MC Neel, and E Ene. (2002): *FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps*. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html> (Stand: 15. 10. 2011)
- McGranahan, G., Balk, D., Anderson, B. (2007): The Rising Tide: Assessing the Risk of Climate Change and Human Settlements in Low Elevation Coastal Zones. *Environment & Urbanization* 19 (1): 17–37.
- McGillis, A., Dibajnia, M., Nairn, R.B., Hamdi, S. (2003): Cotonou Sea Defence Project, Benin, West Africa. In: *Proceedings der Canadian Coastal Conference 2003*: 1–16.
- MEHU – Ministère de l'Environnement, de l'Habitat et de l'Urbanisme (1993): *Plan d'Action Environnemental du Bénin – Résumé et Conclusions*. Première Version, Cotonou, 101 S.
- MEHU (2003): *La rapport final du design et les spécifications techniques de la section études / conceptions - Projet pour la protection côtière a l'est de l'epi de Sifato-Cotonou entre la Republique du Bénin et Infrastructure Project Development Ltd (IPD)*, Cotonou, Benin.
- Mitchel, Andy (1999): *The ESRI ® Guide to GIS Analysis Volume 1: Geographic patterns and relationships*. ESRI Press, Redlands.
- MobileGeographics (2011): XTide – Tide Prediction Server, <http://tides.mobilegeographics.com> (Stand: 23. 01.2013).
- Munsi, M., Malaviya, S., Oinam, G., Joshi, P.K. (2009): A Landscape Approach for Quantifying Land-Use and Land-Cover Change (1976–2006) in Middle Himalaya. *Regional Environmental Change* 10 (2): 145–155

- Murphy, D.L. (1985): Estimating neighborhood variability with a binary comparison matrix. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 51 (6): 667–674.
- Natural Earth (o.J.): Free vector and raster map data at 1:10 m, 1:50 m, and 1:110 m scales, <http://www.natural-earthdata.com/> (Stand: 23. 01.2013).
- N'Bessa (1997): *Porto-Novo et Cotonou (Benin): origine et evolution d'un doublet urbain*. Dissertation. Université de Bordeaux III. Presses Universitaires du Septentrion.
- Nelson, G. C. (2005): Drivers in Ecosystem Change: Summary Chapter. In: In: Hassan, R., Scholes, R., Ash, N. (Hrsg.): *The Millenium Ecosystem Assessment (MEA) Series – Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends, Volume I*, Island press, Washington-Covelo-London: 73–76.
- Nicholls, R.J., Wong, P.P., Burkett, V.R., Codignotto, J.O., Hay, J.E., McLean, R.F., Ragoonaden, S., Woodroffe, C.D. (2007): Coastal systems and low-lying areas. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (Hrsg.): *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK: 315–356.
- Nolte, Eike-Marie (2010): The application of optical satellite imagery and census data for urban population estimation: A case study for Ahmedabad, India. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften; Geophysikalisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie.
- O'Neill, R.V., Krummel, J.R., Gardner, R.H., Sugihara, G., Jackson, B., Deangelis, D.L., Milne, B.T., Turner, M.G., Zygmunt, B., Christensen, S.W., Dale, V.H., Graham, R.L. (1988): Indices of Landscape Pattern. *Landscape Ecology* 1: 153–162.
- O'Sullivan (2003): *Algorithm for kernel density estimation in Spatial Analyst*. Eintrag von David O'Sullivan am 15. 7. 2003 in das ESRI Support Center. <http://forums.esri.com/Thread.asp?c=93&f=995&t=98735> (Stand: 23. 01. 2013).
- Overton, M. F., Grenier, R. R., Judge, E. K., Fisher, J. S. (1999): Identification and analysis of coastal erosion hazard areas: Dare and Brunswick Counties, *North Carolina. Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 28: 69–84.
- Oyede, L. M. (1991): *Dynamique sédimentaire actuelle et messages enregistrés dans les séquences quarternaires et néogènes du domaine margino-littoral du Bénin (Afrique de l'Ouest)*, Université de Bourgogne-Université Nationale du Bénin.
- Paeth, Heiko, Born, Kai, Heuer, Kai Oliver (2008): Changes in Benin's Monsoon Climate. In: Judex, M. und Thamm, H.-P. (Hrsg.): *IMPETUS Atlas Benin. Research Results 2000–2007*. 3rd edition. Department of Geography, University of Bonn, Germany: 23–24.
- Pakzad, K. (2001): *Wissensbasierte Interpretation von Vegetationsflächen aus multitemporalen Fernerkundungsdaten*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 543, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.
- Pal, N. R. u. Pal, S. K (1993): A Review on Image Segmentation Techniques. *Pattern Recognition* 26 (9): 1277–1294.
- Paradis, G. (1976): Contribution à l'étude de la flore et de la végétation littorales du Dahomey. *Bulletin du Muséum National d'Histoire Naturelle, Botanique* 26: 33–67.
- Petit, C.C. & Lambin, E.F. (2001): Integration of Multi-Source Remote Sensing Data for Land Cover Change Detection. *International Journal for Information Science* 15 (8): 785–803.
- Phillips, J.D. (1986): Spatial Analysis of Shoreline Erosion, Delaware Bay, New Jersey. *Annals of the Association of American Geographers*. 76(1): 50–62.
- Radke, R. J., Andra, S., Al-Kofahi, O., Roysam, B. (2005): Image Change Detection Algorithms: A Systematic Survey. *IEEE Transactions on Image Processing* 14: 294–307.
- Rapp, F. (1995): Modell und Realität. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung ZPF* 63(6):220–223.

- Rashed, T. & Jürgens, C. (Hrsg.) (2010): Remote Sensing of Urban and Suburban Areas. In: van der Meer, F. (Hrsg.): *Remote Sensing and Digital Image Processing Series*. Springer-Verlag.
- Richter, D. (2007): Flächennutzungswandel in Tirana: Untersuchungen anhand von Landsat TM, Terra ASTER und GIS. Universitäts-Verlag Potsdam, 90 S.
- RIKZ Directorate-General of Public Works and Water Management - National Institute for Coastal and Marine Management (2004): *COMRISK evaluation of policies and strategies for coastal risk management: final report*. Amstelveen, Niederlande. 103 S.
- Rindfuss, R.R., Walsh, S.J., Turner, B.L., Fox, J., Mishra, V. (2004): Developing a Science of Land Change: Challenges and Methodological Issues. PNAS – Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America 101 (39): 13976–13981.
- Ringle, K., Sties, M. (1996): Vergleich verschiedener Methoden zu Bestimmung der Oberflächenbeschreibung besiedelter Gebiete für die Modellierung des Schmutzeintrags in das Abwasserkanalnetz, In: IAPRS, Vol. XXXI, Part B7, Wien: 589–593.
- Robert, P.C. (1997): Remote Sensing: A Potentially Powerful Technique for Precision Agriculture, In: Proceedings of the Conference Land Satellite Information in the Next Decade II: Sources and Applications, Washington, DC, 2.–5. 12. 1997, CD-ROM. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda MD: 19–25.
- Röhrig, Julia, Hiepe, Claudia, Diederich, Malte (2008): Natural Agricultural Marginality in Benin. In: Judex, M. und Thamm, H.-P. (Hrsg.): *IMPETUS Atlas Benin. Research Results 2000–2007. 3rd edition*. Department of Geography, University of Bonn, Germany, S. 95f.
- Rottensteiner, F.; Trinder, J.; Clode, S.; Kubik, K. & Lovell, B. (2004): Building detection by Dempster-Shafer fusion of LIDAR data and multispectral aerial imagery, *ICPR*: 339–342.
- Salami, A.T. (1999): Vegetation dynamics on the fringes of lowland humid tropical rainforest of south-western Nigeria – an assessment of environmental change with air photos and Landsat TM. *International Journal of Remote Sensing* 20 (6): 1169–1181.
- Salomons, W., Turner, K., de Lacerda, L. D., Ramachandran, S. (Hrsg.) (1999): *Perspectives on Integrated Coastal Zone Management*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Schaab, G., Khayota B., Eilu, G. & Wägele, W. (eds.) (2010): *The BIOTA East Africa Atlas: Rainforest Change over time*. Karlsruhe University of Applied Sciences, Faculty of Geomatics, Karlsruhe.
- Schachtschabel, P.; Blume, H.-P.; Brümmer, G.; Hartge, K. & Schwertmann, U. (Eds.) (1998): *Lehrbuch der Bodenkunde*, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart.
- Schiewe, J., Ehlers, M., Kinkeldey, C., Tomowski, D. (2009): Implementation of Indeterminate Transition Zones for Uncertainty Modeling in Classified Remotely Sensed Scenes. In: *Proceedings 12th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, Leibniz Universität Hannover, Germany.
- Seul M., O’Gorman, L., Sammon, M.J. (2000): *Practical Algorithms for Image Analysis: Description, Examples, and Code, Band 1*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Silverman, B.W. (1986): *Density estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman and Hall, New York.
- Sitarz, J. (1969): *Côtes Africaines - Études des profils d’équilibres des plages* Centre de Recherches et d’Etudes Océanographiques 3: 43–62.
- Segl, K. (1998): Klassifizierung mit neuronalen Netzen. In: Bähr & Vögtle (Hrsg): *Digitale Bildverarbeitung, Anwendungen in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung*, 3. Auflage, Wichmann Verlag, Hüthig GmbH, Heidelberg.
- Sester, M. (1995): *Lernen struktureller Modelle für die Bildanalyse*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 554, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.

- Shannon, C. E. (1948): A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27: 379–423, 623–656, <http://cm.bell-labs.com/cm/ms/what/shannonday/shannon1948.pdf> (Stand: 23. 01. 2013).
- Small, C. & Nicholls, R.J. (2003): A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research*, 19: 584–599.
- Smith, M.J. de, Goodchild, M., Langley, P.A. (2009): *Geospatial Analysis – a Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools*. 3. Auflage, 516 S., Matador. [www.spatialanalysisonline.com](http://www.spatialanalysisonline.com) (Stand: 23. 01. 2013).
- Spacemetric (2008): SSTL orders system for NigeriaSat-2 image management (Meldung vom 26.6.2008). <http://www.spacemetric.com/node/108> (Stand: 18. 08. 2011).
- SSTL (2011a): NigeriaSat-2 Mission Objectives. <http://www.sstl.co.uk/nigeriasat-2-mission-objectives> (Stand: 18. 08. 2011).
- SSTL (2011b): Systems & Services. <http://www.sstl.co.uk/divisions/systems-and-services/image-processing-and-sales> (Stand: 18. 08. 2011).
- Stafford, D. B. & Langfelder, J., (1978): Air photo survey of coastal erosion. *Photogrammetric Engineering*, 37 (6): 565–575.
- Sturm, U. (2003): *Nutzungskonflikt bei Uferstreifen in Südostbrasilien, erfasst durch objektorientierte Klassifizierung eines IKONOS-II-Satellitenbildes*. Unveröffentlichte Diplomarbeit an der Universität Karlsruhe (TH).
- Sturm, U., Teka, O., Vogt, J., Bähr, H.-P., Buttschardt, T. (2007): Analyse von Prozessen im Küstenraum Benins – Grundlage für planerische Steuerung. In: Gönnert, G., Pflüger, B., Bremer, J.-A. (Hrsg.): *Geographie der Meere und Küsten, Coastline Reports 9*: 185–195.
- Sturm, U., Weidner, U. (2009): Further investigations on segmentation quality assessment for remote sensing applications. In: *Proceedings of ISPRS Hannover Workshop 2009 „High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information“*.
- Sturm, U.; Braun, A.C.; Hinz, S.; Vogt, J. (2011): Characterizing Settlement Changes and its Implications in the Coastal Area of Benin using high resolution data. In *Proceedings: 3rd EOGC – Earth Observation on Global Changes*, on CD-ROM.
- Sturm-Hentschel, U., Braun, A.C., Hinz, S. and Vogt, J. (2011). Settlement Process Studies in developing countries using diverse remote sensing data types. In: Victoria Lenz-Wiedemann and Georg Bareth (eds.) (2011): *Proceedings of the ISPRS WG VII/5 Workshop, 18. –19.11.2010, Cologne*: 131–142.
- Sudhira, H.S., Ramachandra, T.V., Jagadish, K.S. (2004): Urban Sprawl: Metrics, Dynamics and Modelling Using GIS. *International Journal of Applied Earth Observation* 5: 29–39.
- Sudhira, H.S. & Ramachandra, T.V. (2007): Characterizing Urban Sprawl from Remote Sensing Data and Using Landscape Metrics. *Proceedings of 10<sup>th</sup> International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management*, Iguaçú, PR Brasilien, 11. –13. Juli 2007.
- Tang, X.M., Kainz, W., Fang, Y. (2005): Reasoning about Changes in Land Covers with Fuzzy Settings. *International Journal of Remote Sensing* 26 (14): 3025–3046.
- Tappan, G.G., Hadj, A., Wood, E.C., Lietzow, R.W. (2000): Use of Argon, Corona, and Landsat Imagery to Assess 30 Years of Land Resource Changes in West-Central Senegal. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 66 (6): 727–735.
- Taubenböck, H., Dech, S. (2010): *Fernerkundung im urbanen Raum – Erdbeobachtung auf dem Weg zur Planungspraxis*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt.
- Thamm, H.-P., Judex, M., Orekan, V. (2003): Linking Land Use / Land Cover Changes with Socio Economic Data to Set up Scenarios for a Sustainable Development Plan. In: *Proceedings Deutscher Tropentag “Technological and Institutional Innovations for Sustainable Rural Development*, 08. –10. Oktober 2003, Göttingen.

- Thamm, H.-P.; Schütz, O.; Christoph, M. (2005): (Hrsg.) *IMPETUS Atlas – Benin – Research Results*, University of Bonn, Remote Sensing Research Group.
- Thenkabail, P.S. & Nolte, C. (1995): Mapping and Characterizing Inland Valley Agroecosystems of West and Central Africa: A Methodology Integrating Remote Sensing, Global Positioning System, and Ground-Truth Data in a Geographic Information System Framework, *RCMD Monograph No. 16*, IITA, Ibadan, Nigeria, 62 S.
- Thenkabail, P.S., Nolte, C., Lyon, J.G. (2000): Remote Sensing and GIS Modeling for Selection of a Benchmark Research Area in the Inland Valley Agroecosystems of West and Central Africa. *PE & RS, Africa Applications Special Issue*, Juni 2000.
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., Ergul, A. (2009): Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0—An ArcGIS extension for calculating shoreline change: *U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278*. <http://pubs.usgs.gov/of/2008/1278/> (Stand: 02. 12. 2011).
- Troll, C (1965) Jahreszeitenklima der Erde. In: Rodenwaldt E, Juszat HJ (eds.) *Weltkarten zur Klimakunde*, 2nd edn. Springer: 7–18.
- Turner, M. G.; Gardner, R. H. (1991): *Quantitative Methods in Landscape Ecology*. Springer Verlag, New York.
- UN-HABITAT (2010): *State of the World's Cities 2010/2011 – Cities for All: Bridging the Urban Divide*. <http://www.unhabitat.org/pmss/listItemDetails.aspx?publicationID=2917> (Stand: 23. 01. 2013).
- Vogt, J., Sturm, U., Teka, O., Bähr, H.-P., Sinsin, B. (2007): Résultats Préliminaires de l'Analyse Evolutive de la Zone Côtière du Bénin: Cas Spécifiques des Arrondissements de Avlékété et de Sèmè. In: *Actes du 1er colloque de l'UAC des Sciences, Cultures et Technologies, Géographie*: 419–428.
- Vogt, J.; Teka, O.; Sturm, U. (2010): Modern issues facing coastal management of the fishery industry: A study of the effects of globalisation in coastal Benin on the traditional fishery community. In: *Ocean and coastal management* 53: 428–438.
- Vogt, J. (2010): Aufgabenfelder räumlicher Planung in Entwicklungsländern im Angesicht des Klimawandels. H. Megerle & L.-M. Vollmer (Hrsg.): *Angewandte Geographie – aktuelle Raumentwicklungsstrategien und Lösungsansätze umweltbezogener Problemfelder. Tübinger Geographische Studien 149*, Tübingen: 17–26.
- Vollmert, P., Fink, A. H., Besler, H. (2003): Ghana- und Dahomey-Trockenzone: Ursachen für eine Niederschlagsanomalie im tropischen Westafrika. *Erde*, 134 (4): 375–393.
- Voß, K. (2004): Remote sensing and landscape metrics in cultivation systems of Central Europe, *Erdkunde* 58 (4): 283–289.
- Weidner, U. & Lemp, D. (2005). Objektorientierte Klassifizierung. In: Bähr, H.-P. & Vögtle, T.: *Digitale Bildverarbeitung – Anwendungen in Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS*, 4. Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg: 106–122.
- Weidner, U. (2008): Contribution to the assessment of segmentation quality for remote sensing applications. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII, Part B7: 479–484.
- Weidner, U. & Centeno, J. (2009): Pansharpening – Simple Approaches and their Evaluation. *PFG* 4: 317–327.
- Walz, U. & Berger, A. (2004): Landschaftsmaße für eine Langzeituntersuchung von Flächennutzungsänderungen in Ostsachsen. In: Walz, U.; Lutze, G.; Schultz, A.; Syrbe, R.-U. (Hrsg.): *Landschaftsstruktur im Kontext von naturräumlicher Vorprägung und Nutzung – Datengrundlagen, Methoden und Anwendungen. IÖR-Schriften 43*, 333 S.; Dresden.
- Weller, U (2002) Land Evaluation and Land Use Planning for Southern Benin (Westafrika) – BENSOTER. *Hohenheimer bodenkundliche Hefte* 67. Universität Hohenheim.
- Wezel A., Bohlinger B. & Böcker R. (1999): *Vegetation zones in Niger and Benin – present and past zonation*. Department of Landscape and Plant Ecology, University of Hohenheim, Germany. [https://www.uni-hohenheim.de/~atlas308/a\\_overview/a3\\_1/html/english/a31ntext.htm](https://www.uni-hohenheim.de/~atlas308/a_overview/a3_1/html/english/a31ntext.htm) (Stand: 23. 01. 2013).

- White K. & El Asmar, H.M. (1999): Monitoring Changing Position of Coastlines using Thematic Mapper Imagery, an Example from the Nile Delta. *Geomorphology* 29: 93–105.
- William, W.T. (Hrsg.) (1982): *Pattern Analysis in Agricultural Science*. Intl. Specialized Book Service Inc.
- WolframAlpha (2011): Tide Lagos. <http://www.wolframalpha.com/input/?i=tide+lagos> (Stand: 30. 05. 2011).
- Wong, David W. S. (1999): Several Fundamentals in Implementing Spatial Statistics in GIS: Using Centographic Measures as Examples. *Geographic Information Sciences* 5 (2):163–174.
- Wong, David W. S. & Lee, Jay (2005): *Statistical Analysis of Geographic Information with ArcView GIS® and ArcGIS®*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- Wu, S., Qiu, X., Wang, L. (2005): Population estimation methods in GIS and remote sensing: a review. *GIScience & Remote Sensing* 42 (1): 58–74.
- Yang, X. & Liu, Z (2005): Use of satellite-derived landscape imperviousness index to characterize urban spatial growth. *Computers, Environment and Urban Systems* 29: 524–540.
- Yang, X. (2011a): What is urban remote sensing? In: Yang, X. (Hrsg.): *Urban Remote Sensing – Monitoring, Synthesis and Modeling in the Urban Environment*. Erste Ausgabe. John Wiley & Sons, Ltd.: 3–11.
- Yang, X. (Hrsg.) (2011b): *Urban Remote Sensing – Monitoring, Synthesis and Modeling in the Urban Environment*. Erste Ausgabe. John Wiley & Sons, Ltd.
- Yeh, A.G.O. und Li, X. (2001): Measurement and monitoring of urban sprawl in a rapidly growing region using entropy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67: 83–90. [http://www.asprs.org/a/publications/pers/2001journal/january/2001\\_jan\\_83-90.pdf](http://www.asprs.org/a/publications/pers/2001journal/january/2001_jan_83-90.pdf) (Stand: 23. 01. 2013).
- Zeug, G. & Kranz, O. (2010): Fernerkundungsbasierte Ermittlung der Bevölkerungsverteilung. *PFG* 1/2010: 33–46.

## 12.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Veränderungs-Prozess-Modell	3
Abbildung 2: Vergleich der Darstellung von Siedlung bzw. Gebäuden (gelb umrahmt), Freiflächen (türkis) und Feldern (grün) in ASTER-Daten (links, GSD: 15 m) und QuickBird-Daten (rechts, GSD: 0,6 m PAN, bzw. pangeschärft) – Darstellung als Falschfarbenkomposite NIR-R-G	4
Abbildung 3: Problemfelder des Küstenraumes von Benin	5
Abbildung 4: links: Klimadiagramm (Ermerit & Brücher 2008); Mitte: mittlerer monatlicher Niederschlag 1921–2004 und rechts: mittlerer jährlicher Niederschlag 1921–2004 (Diederich & Simmer 2008)	12
Abbildung 5: Multisensorale Fernerkundungsdaten unterschiedlicher spektraler und geometrischer Auflösung derselben Fläche (a: PAN-Luftbild; b: QuickBird-Datensatz (432); c: RGB-Luftbild; d: ASTER-Bilddatensatz. 400 m x 400 m)	20
Abbildung 6: Zeitliche Auflösung vorliegender Luft- und Satellitenbilddaten für Avlékété und Èkpè	20
Abbildung 7: Aufbau der digitalen fernerkundlichen Datenbasis	21
Abbildung 8: Anaglyphenbilder des Dorfes Avlékété – links: 1995; rechts: 2007; mit Hilfe einer rot-cyan-Brille dreidimensional erfassbar	22
Abbildung 9: Erste Geländeerkundungen 2007 (links) und Geländeabgleich mit Satellitendaten 2008 (rechts) (Fotos: S. Schneider, H. P. Sagbo)	24
Abbildung 10: Bautätigkeiten in der Küstenzone (links: trockenes Bauland; rechts: im Feuchtgebiet; Fotos: Sturm-Hentschel)	25
Abbildung 11: Sandabbau (links: am Strand; rechts: im Inland; Fotos: Sturm-Hentschel)	25
Abbildung 12: Mangrovennutzung (Fotos: Sturm-Hentschel)	25



Abbildung 13: Landnutzungs- bzw. Objektklassen und die sie repräsentierenden Vektormodelle	28
Abbildung 14: Repräsentation der physikalischen Welt (verändert nach Hinz 2004, Bähr 2005b, Hommel 2010)	29
Abbildung 15: Räumliche Beziehung zwischen gebräuchlichen, in Fernerkundungsdaten sichtbaren Küstenlinienindikatoren (verändert nach Boak & Turner 2005)	34
Abbildung 16: Dichteberechnungen (G./ha = Gebäude / ha)	36
Abbildung 17: Allgemeiner Ansatz der Prozessanalyse	43
Abbildung 18: Methodik zur Analyse von Siedlungsprozessen	47
Abbildung 19: Erscheinungsbild von Gebäuden und ihrer Dächer – a) freistehendes Haus mit neuem Asbest- dach; b) Gebäude unter Palmen mit einem Mosaik aus alten und neuen Metallplatten und Vegetationsbedeckung; c) vegetationsgedeckte Häuser, nur leicht von Gehölzen überdeckt	48
Abbildung 20: a) PAN-Luftbild 1995; b) RGB-Komposit QuickBird 2002; c) Falschfarben-Komposit QuickBird 2002; d) Farbluftbild-Scan 2007	48
Abbildung 21: Bilddatenausschnitte aus der Ortslage Djéffa für die vorliegenden Daten des Zeitraums 2006–2008 (links: LB-Scan 2006, Mitte: LB-Scan 2007, rechts: pangeschärfter SPOT-Datensatz 2008)	48
Abbildung 22: Vorverarbeitung der Bilddaten für die Klassifizierung	51
Abbildung 23: a) Ausschnitt des Mittelwertbildes 2002; b) digitalisierte Referenzgebäude (rot) sowie c) Segmentierung (gelb) und den durch Bedingung (4) zugeordneten Segmenten (blau)	52
Abbildung 24: Referenzdaten zur Klassifizierung von Gebäuden in der Ortslage Djéffa a) 1995, b) 2002, c) 2007 (rot = <i>Gebäude</i> ; türkis = <i>Nicht-Gebäude</i> )	54
Abbildung 25: Bestimmung der Siedlungsfläche	57
Abbildung 26: Dichteanalyse	58
Abbildung 27: Analyse der Veränderung der Siedlungsdichte	59
Abbildung 28: Testinterpretationen (Linien: Testbearbeiter; rot: Finalerfassung) (Kantenlänge der Bildausschnitte jeweils 100 m)	60
Abbildung 29: Beispiele der manuellen Gebäudeerfassung in Djéffa (rot: Wohngebäude, rosa: Gewerbegebäude, blau: Gebäude im Bau; grün: Straßenstände)	61
Abbildung 30: Segmentierungsergebnisse für <i>scale parameter</i> 30 (gelb: Segmentgrenzen; rot: manuell digitalisierte Gebäude; blau/violett: Segmente, die zu mind. 50 % mit digitalisierten Gebäuden überlappen)	62
Abbildung 31: Gebäudezunahme im Arrondissement Avlékété	67
Abbildung 32: Gebäudezunahme im Arrondissement Èkpè	67
Abbildung 33: Gebäudegrößenverteilung im Arrondissement Avlékété	68
Abbildung 34: Gebäudegrößenverteilung im Arrondissement Èkpè	68
Abbildung 36: Schematisches Diagramm von Siedlungswachstumsmustern ( <i>urban growth pattern</i> ; nach Bhatta 2010, S.11)	74
Abbildung 36: Methodik zur Analyse von Veränderungsprozessen landwirtschaftlicher Flächen	79
Abbildung 37: März-Niederschlagskurven 1995 (Station Ouidah) und 2007 (IITA); November-Niederschlagskurve 2006 (Station Cotonou)	80
Abbildung 38: März-Niederschlagskurven 1995 (Station Sèmè-Kpodji) und 2007 (IITA); Mai-Niederschlagskurve 2006 und Dezember-Niederschlagskurve (Cotonou)	81
Abbildung 39: Landwirtschaft auf Trockenflächen	83
Abbildung 40: Landwirtschaftliche Flächen in Feuchtgebieten – Beobachtungen im April	83
Abbildung 41: Nutzung der Senken (links), Schilfnutzung (Mitte), Mischnutzungen (rechts)	84

Abbildung 42: Schwierigkeiten in der Unterscheidung zwischen Feldern und Umland oder Landwirtschaft unter Palmen	84
Abbildung 43: Beispielschlüssel für erfasste landwirtschaftliche Flächen	84
Abbildung 44: Schematische Darstellung der Veränderungsanalyse landwirtschaftlicher Flächen	84
Abbildung 45: Landwirtschaftlich genutzte Fläche nach Interpretationssicherheit (1 = sicher)	87
Abbildung 47: Veränderung der Flächensummen landwirtschaftlicher Flächen über die Beobachtungszeiträume	88
Abbildung 47: Küstenerosion 2002–2007–2008–2010 (links CEDA 2007; weitere Fotos: U. Sturm-Hentschel)	93
Abbildung 48: Küstenlinienindikatoren im Feldvergleich (Arrondissement Èkpè; Fotos: U. Sturm-Hentschel)	94
Abbildung 49: Küstenlinienindikatoren in den zur Verfügung stehenden Bilddaten: a) Luftbilder 1995; b) QuickBird 2002 bzw. 2006; c) Luftbilder 2007 – braun: AK, gelb: NTL, blau: WL	94
Abbildung 50: Küstenverlauf im Arrondissement Avlékété – nicht überall zeigt sich die AK (Fotos: U. Sturm-Hentschel)	95
Abbildung 51: Beeinflussung des Verlaufes der AK durch Sandabbau (links: U. Sturm-Hentschel; rechts: QuickBird 2002)	95
Abbildung 52: li.: Tidenhubverlauf am 09. 03. 1995 in Lomé, Togo; re.: Tidenhubverlauf am 09. 03. 1995 in Lagos, Nigeria (Quelle: MobileGeographers 2011); Aufnahmezeitpunkt um 14:30 GMT bzw. 15:30 Uhr WAT ist rot markiert	96
Abbildung 53: Bestimmung von Liniendifferenzen	97
Abbildung 54: Bestimmung der Landflächenveränderungen	98
Abbildung 55: Beobachtete Nutzungsübergänge im Untersuchungsraum (dunkel sind diejenigen Klassen dargestellt, die quantitativ erfasst wurden)	111
Abbildung 56: Siedlungsentwicklung innerhalb landwirtschaftlich genutzter Flächen im Norden des Arrondissement Èkpè (links) und von Erosion bedrohte Siedlungen am Strand im Transekt Èkpè (rechts)	113
Abbildung 57: Qualitatives Modell der Zusammenhänge untersuchter Prozesse (grau unterlegt sind die untersuchten raumverändernden Prozesse)	111
Abbildung 58: Spektrale und geometrische Auflösung verwendeter Sensoren	145
Abbildung 59: Zeitliche Auflösung zur Verfügung stehender Fernerkundungsdaten für den Küstenraum Benins	146

### 12.3 Kartenverzeichnis

Karte 1: Küstenzone Benins mit den Untersuchungsräumen	7
Karte 2: Lage der Transekte im Arrondissement Avlékété	8
Karte 3: Lage der Transekte im Arrondissement Èkpè	8
Karte 4: Bodenübersichtskarte (Bénin & O.R.S.T.O.M. 1975)	9
Karte 5: Beobachtungsabschnitte der Küstenentwicklung (Beobachtungen innerhalb der Abschnitte in Tabelle 1)	11
Karte 6: Zonierung der Lagunenküste im Arrondissement Avlékété – am Beispiel der Transekte (Erläuterungen in Tabelle 2)	13
Karte 7: Zonierung der Küste östlich von Cotonou im Arrondissement Èkpè – am Beispiel der Transekte (Erläuterungen in Tabelle 3)	14
Karte 8: Prognostizierte Stadtentwicklung in Westafrika 1960–2020 (nach ADAM 1986)	16

Karte 9: links: Bevölkerungsdichte 2002 und -wachstum 1992–2002 (Heldmann & Doevenspeck 2008); rechts: Migrationsbewegungen innerhalb Benins (Doevenspeck 2005)	16
Karte 10: Diskrepanzen zwischen Landnutzungskarte und Bilddaten (Beispielgebiete weiß umrahmt)	23
Karte 11: Beispiele ablaufender raumverändernder Prozesse in der Küstenzone Benins im Osten Cotonous (pink: Entstehung von Gewerbeflächen; rot: Siedlungserweiterungen; blau: Küstenerosion)	26
Karte 12: Unterteilungen der Transekte	56
Karte 13: Gebäudeklassen in den Transekten Avlékété und Hio	65
Karte 14: Gebäudeklassen in den Transekten Èkpè und Djéffa	65
Karte 15: Siedlungsentwicklung im Transekt Avlékété	69
Karte 16: Siedlungsentwicklung im Transekt Hio	69
Karte 17: Siedlungsentwicklung im Transekt Èkpè	71
Karte 18: Vergleich der Gebäudedichte (links) und Gebäudeflächendichte (rechts)	71
Karte 19: Siedlungsentwicklung im Transekt Djéffa	72
Karte 20: Siedlungsverschiebung durch Küstenerosion	73
Karte 21: Testinterpretationen landwirtschaftlicher Flächen – Vergleich zweier Testbearbeiter	85
Karte 22: Einschätzung der Interpretationssicherheit landwirtschaftlicher Flächen am Beispiel des Transektes Avlékété	86
Karte 23: Einschätzung der Interpretationssicherheit landwirtschaftlicher Flächen am Beispiel des Transektes Djéffa	87
Karte 24: Überblick über die raum-zeitlichen Veränderungen landwirtschaftlich genutzter Flächen	88
Karte 25: Erweitertes Untersuchungsgebiet (13,4 km) für die Untersuchung des Küstenverlaufs im Bereich Avlékétés	94
Karte 26: Erweitertes Untersuchungsgebiet (8,8 km) für die Untersuchung des Küstenverlaufs im Bereich Èkpès	94
Karte 27: Beeinflussung der Sichtbarkeit der Küstenlinienindikatoren durch Umklappeffekt (gleicher Aufnahmetag; links: Kamera im Süden; rechts: Kamera im Norden)	95
Karte 28: Ergebnisse der Testinterpretationen der Küstenlinienindikatoren zu den Aufnahmezeitpunkten	99
Karte 29: Vergleich zwischen Abbruchkante und Nass-Trocken-Linie	100
Karte 30: Vergleich der NTL 1995 und 2006 im Untersuchungsgebiet Avlékété	102
Karte 31: Küstenflächenveränderungen zwischen 1995 und 2006 im Untersuchungsgebiet Avlékété	102
Karte 32: Entwicklung der Küstenlinien im Arrondissement Avlékété	103
Karte 33: Verlagerung der Nass-Trocken-Linie	104
Karte 34: Verlagerung der Abbruchkante	104
Karte 35: Küstenerosion 1995–2002; durchschnittliche jährliche Erosionsrate	104
Karte 36: Küstenerosion 2002–2007; durchschnittliche jährliche Erosionsrate	104
Karte 37: Küstenentwicklung in Avlékété zwischen 1956/57 und 2006	107
Karte 38: Entwicklung der Sandabbautätigkeiten und Vergleich mit den Erosionsraten im Untersuchungsgebiet Èkpè (nördliche Linie: AK; südliche Linie: NTL)	108
Karte 39: a) aktiver Sandabbau 2002; b) aufgegebener Sandabbau 2007	108
Karte 40: Küstenlinienveränderungen in Èkpè von 1956/57–2007	108
Karte 41: Geplante Buhnen zum Küstenschutz (Mc Gillis et al. 2003, S. 2)	109
Karte 42: Projektierte Küstenschutzmaßnahme und projizierte Erosion innerhalb der Maßnahme (Mc Gillis et al. 2003, S. 10)	109
Karte 43: Vergleich der detektierten Wasserfläche (NDVI-Schwellwert-Analyse; NDVI<0) mit der interpretierten Wasserlinie	110

Karte 44: Vergleich interpretativ erfasster Küstenlinienindikatoren und klassifizierter Küstenflächen	110
Karte 45: Zusammenführung der untersuchten Veränderungen im Arrondissement Èkpè zu einer prozessorientierten Synthese für den Zeitraum 1995–2007	112
Karte 46: Küstenlinienentwicklung, erosionsbedingte Siedlungsumlagerungen, geplante Bühnen (H6 und H7) sowie daraus geschätzte zukünftige Erosion in Strömungsrichtung (nach McGillis et al. 2003, S. 10 und S. 12)	113
Karte 47: Zusammenführung der untersuchten Veränderungen im Arrondissement Avlékété zu einer prozessorientierten Synthese für den Zeitraum 1995–2007	114

#### 12.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Küstenentwicklung von 1954–1997 (nach Kaki et al. 2001) („=“=lokale Stabilität; „+“=Sedimentation; „-“=Erosion) (oberer markierter Abschnitt: Avlékété; unten Èkpè)	10
Tabelle 2: Erläuterungen zur Zonierung der Lagunenküste (von Nord nach Süd)	13
Tabelle 3: Erläuterungen zur Zonierung der Ostküste Benins (von Nord nach Süd)	15
Tabelle 4: Zur Verfügung stehende Fernerkundungsdaten	19
Tabelle 5: Beispielschlüssel für erfasste Gebäude	50
Tabelle 6: Empirisch gewählte Segmentierungsalgorithmen und dazugehörige Parameter	51
Tabelle 7: Eingesetzte Merkmale und deren Wertebereiche für die Klassifizierungen	54
Tabelle 8: Gebäudeanzahl (bearbeiterabhängig und Finalerfassung)	61
Tabelle 9: Quantitative Qualitätsevaluierung der Segmentierungsergebnisse	63
Tabelle 10: Quantitative Qualitätsbewertung der segmentbasierten Klassifizierungen	64
Tabelle 11: Gesamtzunahme der Gebäude im Zeitraum 1995–2007	66
Tabelle 12: Vergleich des eigenen wissensbasierten Ansatzes ( <i>WA</i> ) mit der in Sturm et al. (2011) vorgestellten Ensemble Klassifizierung ( <i>E</i> ) sowie der Klassifizierung unter Nutzung Morphologischer Parameter ( <i>MP</i> )	74
Tabelle 13: Vergleich des errechneten Wachstums aus den Bevölkerungszählungen 1992 (INSAE 1994a) und 2002 (INSAE 2004a) <sup>(1)</sup> für das Arrondissement Avlékété mit den Interpretationsergebnissen <sup>(2)</sup> (Gesamtzuwachs = <i>GZ</i> ; Durchschnittliche jährliche Wachstumsrate = <i>DJW</i> )	75
Tabelle 14: Vergleich des errechneten Wachstums aus den Bevölkerungszählungen 1992 (INSAE 1994b) und 2002 (INSAE 2004b) <sup>(1)</sup> für das Arrondissement Èkpè mit den Interpretationsergebnissen <sup>(2)</sup> (Gesamtzuwachs = <i>GZ</i> ; Durchschnittliche jährliche Wachstumsrate = <i>DJW</i> )	76
Tabelle 15: Aufnahme (Pfeile) der Bilddaten im Arrondissement Avlékété im Vergleich zu den Jahreszeiten	80
Tabelle 16: Agrarkalender für die Ränder der Feuchtgebiete in Avlékété – erfasst im Transekt Avlékété	80
Tabelle 17: Agrarkalender für Felder auf trockenen Sandböden – erfasst in den Transekten Avlékété und Hio	81
Tabelle 18: Aufnahmezeitpunkte (Pfeile) der Bilddaten im Arrondissement Èkpè im Vergleich zu den Jahreszeiten	81
Tabelle 19: Agrarkalender für Feuchtgebiete im Arrondissement Èkpè	82
Tabelle 20: Agrarkalender für Senken ( <i>bas-fonds</i> ) im Arrondissement Èkpè	82
Tabelle 21: Agrarkalender für trockene Flächen im Arrondissement Èkpè	82
Tabelle 22: Landwirtschaftliche Nutzflächen im Testtransekt (bearbeiterabhängig)	85
Tabelle 23: Tidenhöhen zu den Aufnahmezeitpunkten der Bilddaten am Beispiel der Tidenmessstation Lagos, Nigeria (WolframAlpha 2011)	96
Tabelle 24: Küstenlinienindikatoren und davon begrenzte Küstenflächen	97
Tabelle 25: Wasserlinien – Abweichungen zwischen den drei Testbearbeitern	98



Figure 14: Représentation du monde physique (modifié d'après Hinz 2004, Bähr 2005b, Hommel 2010)	29
Figure 15: Relations spatiales entre les indicateurs de trait de côte usuels, visibles dans les données de télédétections (modifié d'après Boak & Turner 2005)	34
Figure 16: Calcul de densité (G/ha = bâtiment / ha)	36
Figure 17: Approche générale de l'analyse de processus	43
Figure 18: Méthodique pour l'analyse de processus d'habitat	47
Figure 19: Apparence de bâtiments et de leurs toits - a) maison isolée avec toit en amiante neuf; b) bâtiment sous palmiers avec couverture végétale et mosaïque de plaques métalliques anciennes et neuves; c) maisons couvertes par la végétation, très légèrement cachées par les arbres	48
Figure 20: a) PVA-PAN 1995; b) image composé RGB QuickBird 2002; c) image en fausse couleur QuickBird 2002; d) PVA couleur-Scan 2007	48
Figure 21: Extraits d'images de la localité Djéffa pour les données de la période 2006–2008 (gauche: PVA-Scan 2006; milieu: PVA-Scan 2007; droite: données SPOT affinées panchromatiquement 2008)	48
Figure 22: Pré-traitement des données images pour la classification	51
Figure 23: a) Extrait de l'image moyenne 2002; b) Bâtiments de référence digitalisés (rouge); c) segmentation (jaune) et segments assignés d'après condition (4) (bleu)	52
Figure 24: Données de référence pour la classification des bâtiments de la localité Djéffa a) 1995; b) 2002; c) 2007 (rouge = bâtiment; turquoise = non-bâtiment)	54
Figure 25: Détermination des surfaces bâties	57
Figure 26: Analyse de densité	58
Figure 27: Analyse des changements de densité du bâti	59
Figure 28: Interprétations test (lignes: opérateurs; rouge: solution finale retenue) (longueur des arrêtes: 100m)	60
Figure 29: Exemples de la digitalisation manuelle des bâtiments à Djéffa (rouge: bâtiment d'habitation, rose: bâtiment d'activités, bleu: bâtiment en construction, vert: étal de vente)	61
Figure 30: Résultats de la segmentation pour le paramètre d'échelle 30 (jaune: limite de segment; rouge: bâtiment digitalisé manuellement; bleu/violet: segments recouvrant au moins 50% des bâtiments digitalisés)	62
Figure 31: Augmentation du nombre de bâtiments dans l'arrondissement Avlékété	67
Figure 32: Augmentation du nombre de bâtiments dans l'arrondissement Èkpè	67
Figure 33: Distribution de la dimension des bâtiments dans l'arrondissement Avlékété	68
Figure 34: Distribution de la dimension des bâtiments dans l'arrondissement Èkpè	68
Figure 35: Diagramme schématique de modèles de croissance urbaine (engl. urban growth pattern, Bhatta 2010, p.11)	74
Figure 36: Méthodique pour l'analyse de processus de transformation des surfaces agricoles	79
Figure 37: Courbes des précipitations pour 1995 (Station Ouidah), 2006 (Station Cotonou), 2007 (IITA)	80
Figure 38: Courbes des précipitations pour 1995 (Station Sèmè-Kpodji); 2002 et 2006 (Cotonou); 2007 (IITA)	81
Figure 39: Agriculture en zones sèches	83
Figure 40: Surfaces agricoles des zones humides – Observations effectuées en Avril	83
Figure 41: Utilisation des cuvettes (gauche), utilisation de typha australis (centre), utilisation mixte des sols (droite)	84
Figure 42: Difficultés à différencier entre les champs et leur environnement ou à distinguer l'agriculture sous les palmiers	84

Figure 43: Exemple de surfaces agricoles référencées	84
Figure 44: Représentation schématique de l'analyse de changements des surfaces agricoles	84
Figure 45: Surfaces agricoles utiles selon certitude d'interprétation (1 = sûr)	87
Figure 46: Changement de la somme des aires de surfaces agricoles durant les périodes d'observation	88
Figure 47: Érosion de la côte 2002-2007-2008-2010 (gauche: CEDA 2007; autres Photos: U. Sturm-Hentschel)	93
Figure 48: Indicateurs de traits de côte en comparaison terrain (Arrondissement Èkpè; Photos: U. Sturm-Hentschel)	94
Figure 49: Indicateurs de traits de côte dans les données images disponibles: a) PVA 1995; b) QuickBird 2002 resp. 2006; c) PVA 2007 (marron: ligne d'escarpement = <i>Abbruchkante</i> -AK-, jaune: ligne d'interface entre sable sec et sable mouillé = <i>Nass-Trocken-Linie</i> -NTL-, bleu: ligne d'eau = <i>Wasserlinie</i> -WL-)	94
Figure 50: Tracé de la côte dans l'arrondissement Avlékété - la ligne d'escarpement n'est pas présente partout (Photos: U. Sturm-Hentschel)	95
Figure 51: Influence du tracé de la ligne d'escarpement due à l'extraction de sable (gauche: Photo U. Sturm-Hentschel; droite: Extrait des données QuickBird du 23.12.2002)	95
Figure 52: gauche: marnage le 09. 03. 1995 à Lomé, Togo; 14:30h GMT est mis en évidence; droite: marnage le 09. 03. 1995 à Lagos, Nigeria; 15:30h WAT est mis en évidence (MobileGeographers 2011)	96
Figure 53: Détermination des différences de lignes	97
Figure 54: Détermination de changement des surfaces (aire)	98
Figure 55: Sols en transition dans la région étudiée (les classes représentées en foncé ont été obtenues de manière quantitative)	111
Figure 56: Développement de l'habitat dans les surfaces utiles agricoles au nord de l'arrondissement Èkpè (gauche) et habitat menacé d'érosion sur la grève du transect Èkpè (droite)	113
Figure 57: Modèle qualitatif des relations entre les processus étudiés (les processus de modification de l'espace étudiés sont grisés)	111
Figure 58: Résolution spectrale et spatiale des capteurs utilisés	145
Figure 59: Résolution temporelle des données de télédétection disponibles pour la région côtière du Bénin	146

## 12.6 Liste des cartes

Carte 1: Zone côtière du Bénin avec les régions étudiées	7
Carte 2: Position des transects dans l'arrondissement Avlékété	8
Carte 3: Position des transects dans l'arrondissement Èkpè	8
Carte 4: Carte pédologique (Bénin & O.R.S.T.O.M. 1975)	9
Carte 5: Sections d'observations du développement de la zone côtière (Observations dans les domaines du tableau 1)	11
Carte 6: Zonage de la côte ouest du Bénin dans l'arrondissement Avlékété – à l'exemple des transects (détails dans le tableau 2)	13
Carte 7: Zonage de la côte à l'est de Cotonou dans l'arrondissement Èkpè – à l'exemple des transects (détails dans le tableau 3)	14
Carte 8: Développement urbain escompté en Afrique de l'ouest entre 1960 et 2020 (d'après ADAM 1986)	16

Carte 9: gauche: Densité de population en 2002 et croissance entre 1992 et 2002 (Heldmann & Doevenspeck 2008); droite: Mouvements de migration au sein du Bénin (Doevenspeck 2005)	16
Carte 10: Divergences entre le Plan d'Occupation des Sols (POS) et les données images (régions étudiées encadrée en blanc)	23
Carte 11: Exemples de processus de modifications de l'espace en cours dans la zone côtière du Bénin à l'est de Cotonou (rose: construction de zones d'activités; rouge: agrandissement de zones d'habitation; bleu: érosion de la côte)	26
Carte 12: Division des transectes	56
Carte 13: Classes de bâtiments dans les transectes Avlékété et Hio	65
Carte 14: Classes de bâtiments dans les transectes Èkpè et Djéffa	65
Carte 15: Développement de l'habitat dans le transect Avlékété	69
Carte 16: Développement de l'habitat dans le transect Hio	69
Carte 17: Développement de l'habitat dans le transect Èkpè	71
Carte 18: Comparaison de la densité du bâti (gauche) et de la densité spatiale de l'emprise au sol (droite)	71
Carte 19: Développement de l'habitat dans le transect Djéffa	72
Carte 20: Déplacement de l'habitat dû à l'érosion de la côte	73
Carte 21: Interprétations test des surfaces agricoles – Comparaison entre deux opérateurs	85
Carte 22: Estimation de la certitude de l'interprétation des surfaces agricoles à l'exemple du transect Avlékété	86
Carte 23: Estimation de la certitude de l'interprétation des surfaces agricoles à l'exemple du transect Djéffa	87
Carte 24: Aperçu des transformations spatio-temporelles des surfaces agricoles utiles	88
Carte 25: Elargissement du territoire (13,4 km) considéré pour l'étude du tracé de la côte dans la région Avlékété	94
Carte 26: Elargissement de territoire (8,8 km) considéré pour l'étude du tracé de la côte dans la région Èkpè	94
Carte 27: Influence de la visibilité des indicateurs de traits de côte due à la position de la prise de vue (même date d'acquisition; gauche: caméra au sud; droite: caméra au nord)	95
Carte 28: Résultats de l'interprétation test des indicateurs de ligne de côte au moment des dates d'acquisitions	99
Carte 29: Comparaison entre ligne d'escarpement (AK) et ligne d'interface entre sable sec et sable mouillé (NTL)	100
Carte 30: Comparaison entre NTL 1995 et 2006 dans la région étudiée Avlékété	102
Carte 31: Evolution des surfaces côtières entre 1995 et 2006 dans la région étudiée Avlékété	102
Carte 32: Développement des traits de côte dans l'arrondissement Avlékété	103
Carte 33: Déplacement de la ligne d'interface entre sable sec et sable mouillé (NTL)	104
Carte 34: Déplacement de la ligne d'escarpement (AK)	104
Carte 35: Erosion de la côte entre 1995 et 2002; taux d'érosion annuel moyen	104
Carte 36: Erosion de la côte entre 2002 et 2007; taux d'érosion annuel moyen	104
Carte 37: Développement de la zone côtière à Avlékété entre 1956/57 et 2006	107
Carte 38: Développement des activités d'extraction de sable et comparaison avec les taux d'érosion dans la région étudiée Èkpè (ligne nord: AK; ligne sud: NTL)	108
Carte 39: a) carrières de sable actives en 2002; b) carrières de sable abandonnée en 2007	108
Carte 40: Evolution des traits de côte à Èkpè entre 1956/57 et 2007	108
Carte 41: Implantation planifiée de brises-lames pour la protection de la côte (Mc Gillis et al. 2003)	109



Carte 42: Projets de protections de la côte et érosion attendue avec ces mesures (Mc Gillis et al. 2003)	109
Carte 43: Trait de côte détecté en 2002 (bleu foncé: résultat de l'analyse par valeur seuil du NDVI (NDVI <0); rouge: ligne d'eau (WL) interprétée)	110
Carte 44: Comparaison entre indicateurs de traits de côte obtenus par interprétation et surfaces côtières classifiées	110
Carte 45: Fusion des transformations étudiées dans l'arrondissement Èkpè en une synthèse orientée processus pendant la période 1995–2007	112
Carte 46: Développement des traits de côte, délocalisation de l'habitat dû à l'érosion, brises-lames planifiés (H6, H7) et érosion future correspondante, estimée dans la direction des courants (d'après McGillis et al. 2003)	113
Carte 47: Fusion des transformations étudiées dans l'arrondissement Avlékété en une synthèse orientée processus pendant la période 1995–2007	114

## 12.7 Liste des tableaux

Tableau 1: Développement de la zone côtière entre 1954 et 1997 (d'après Kaki et al. 2001) („="=stabilité locale; „+"=sédimentation; „-" =érosion) (partie mise en évidence haute: Avlékété; basse: Èkpè)	10
Tableau 2: Précisions sur le zonage de la côte ouest du Bénin (du nord au sud)	13
Tableau 3: Précisions sur le zonage de la côte est du Bénin (du nord au sud)	15
Tableau 4: Données de télédétection disponibles	19
Tableau 5: Exemple de bâtiment référencé	50
Tableau 6: Algorithmes de segmentation choisis empiriquement et paramètres correspondants	51
Tableau 7: Caractéristiques employées et leur domaine de valeurs pour la classification	54
Tableau 8: Nombre de bâtiments (dépendant de l'opérateur et nombre final retenu)	61
Tableau 9: Evaluation quantitative de la qualité de la segmentation	63
Tableau 10: Evaluation quantitative de la qualité de la classification basée sur les segments	64
Tableau 11: Augmentation globale du nombre de bâtiments pendant la période 1995–2007	66
Tableau 12: Comparaison entre l'approche basée sur la connaissance (WA) développée, la classification d'ensemble (E) présentée dans Sturm et al. (2011), et la classification utilisant les paramètres morphologiques (MP) présentée dans Sturm et al. (2011)	74
Tableau 13: Comparaison entre la croissance calculée à partir des recensements de population de 1992 (INSAE 1994a) et de 2002 (INSAE 2004a) <sup>(1)</sup> pour l'arrondissement de Avlékété et les résultats de l'interprétation <sup>(2)</sup> (croissance totale = GZ; taux de croissance annuel moyen = DJW)	75
Tableau 14: Comparaison entre la croissance calculée à partir des recensements de population de 1992 (INSAE 1994a) et de 2002 (INSAE 2004a) <sup>(1)</sup> pour l'arrondissement de Èkpè et les résultats de l'interprétation <sup>(2)</sup> (croissance totale = GZ; taux de croissance annuel moyen = DJW)	76
Tableau 15: Allocation des dates d'acquisitions (flèches) des données images dans l'arrondissement de Avlékété en fonction des saisons	80
Tableau 16: Calendrier agricole des limites des zones humides d'Avlékété (a) – répertorié dans le transect Avlékété	80
Tableau 17: Calendrier agricole des champs à sol sableux sec - répertorié dans les transects Avlékété et Hio	81
Tableau 18: Allocation des dates d'acquisitions (flèches) des données images dans l'arrondissement d'Èkpè en fonction des saisons	81

---

Tableau 19: Calendrier agricole des zones humides de l'arrondissement d'Èkpè	82
Tableau 20: Calendrier agricole pour les cuvettes (bas-fonds) de l'arrondissement d'Èkpe	82
Tableau 21: Calendrier agricole des surfaces sèches de l'arrondissement d'Èkpè	82
Tableau 22: Surfaces agricoles utiles (dépendant de l'opérateur)	85
Tableau 23: Hauteur des marées correspondant aux dates d'acquisitions des données images à l'exemple de la station de mesure des marées de Lagos, Nigeria (WolframAlpha 2011)	96
Tableau 24: Indicateur de traits de côte et surfaces côtières s'y rapportant	97
Tableau 25: Lignes d'eau (WL) – Ecart entre les trois opérateurs	98
Tableau 26: Ligne d'interface entre sable sec et sable mouillé (NTL) – Ecart entre les trois opérateurs	98
Tableau 27: Ligne d'escarpement (AK) – Ecart entre les trois opérateurs	99
Tableau 28: Valeur des écarts entre la ligne d'escarpement (AK) et la ligne d'interface entre sable sec et sable mouillé (NTL) dans la région Èkpè	100
Tableau 29: Valeur des écarts entre la ligne d'interface entre sable sec et sable mouillé (NTL) et la ligne d'eau (WL) dans la région Avlékété	101
Tableau 30: Valeur des écarts entre la ligne d'interface entre sable sec et sable mouillé (NTL) et la ligne d'eau (WL) dans la région étudiée Èkpè	101
Tableau 31: Evolution de la côte à Avlékété pour la période 1995–2006 relatives à la partie de la côte étudiée d'environ 13,4 km de long (pos.: déplacement vers le sud = accumulation; neg.: vers le nord = érosion)	103
Tableau 32: Valeurs de l'érosion à Èkpè pour les périodes 03/1995–12/2002 et 12/2002–03/2007 relatives à la partie de la côte étudiée d'environ 8,8 km de long (pos.: déplacement vers le sud = accumulation; neg.: vers le nord = érosion)	105
Tableau 33: Ecart entre ligne d'eau obtenue par digitalisation manuelle et par définition d'une valeur seuil (NDVI<0)	110
Tableau 34: Caractéristiques du capteur QuickBird	145
Tableau 35: Informations sur le pré-traitement par DigitalGlobe des données QuickBird utilisées (tiré de Bähr & Vögtle 2005)	145
Tableau 36: Caractéristiques utilisées pour la classification – Utilisation des désignations d'eCognition 8 (Definiens 2009a et MathWorks 2011)	147

# 13 Anhang

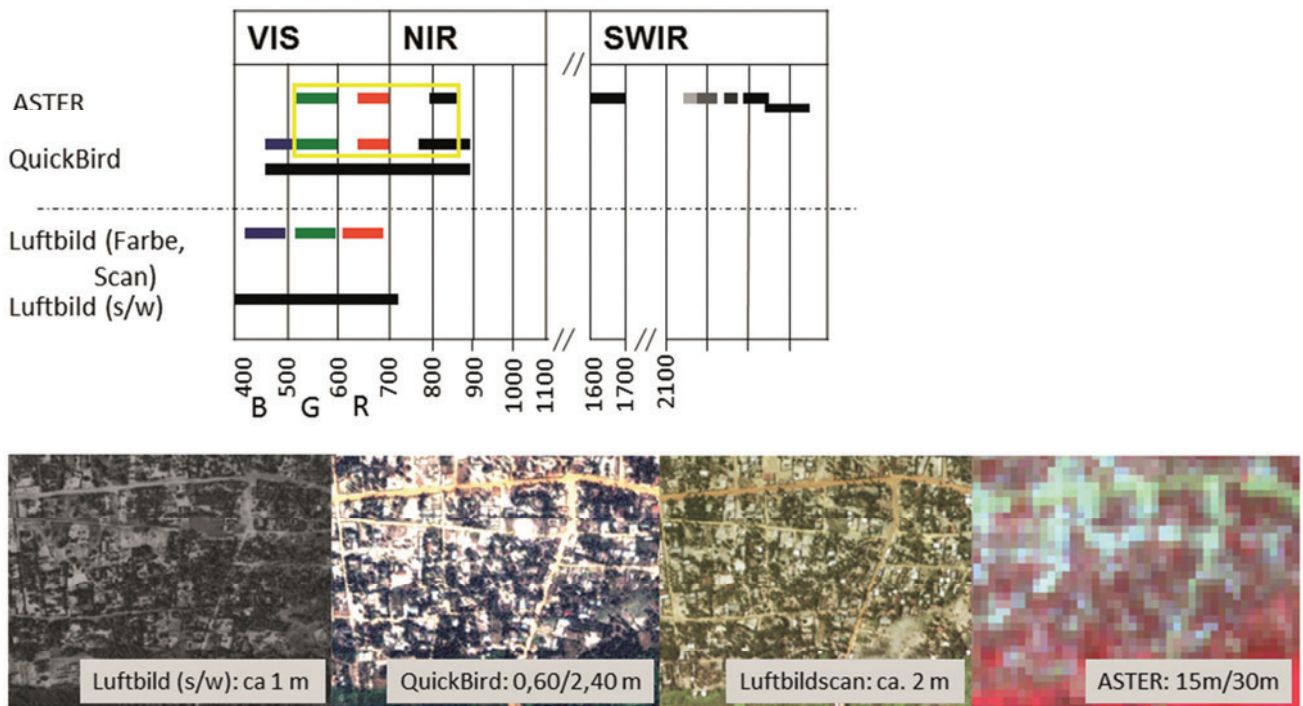


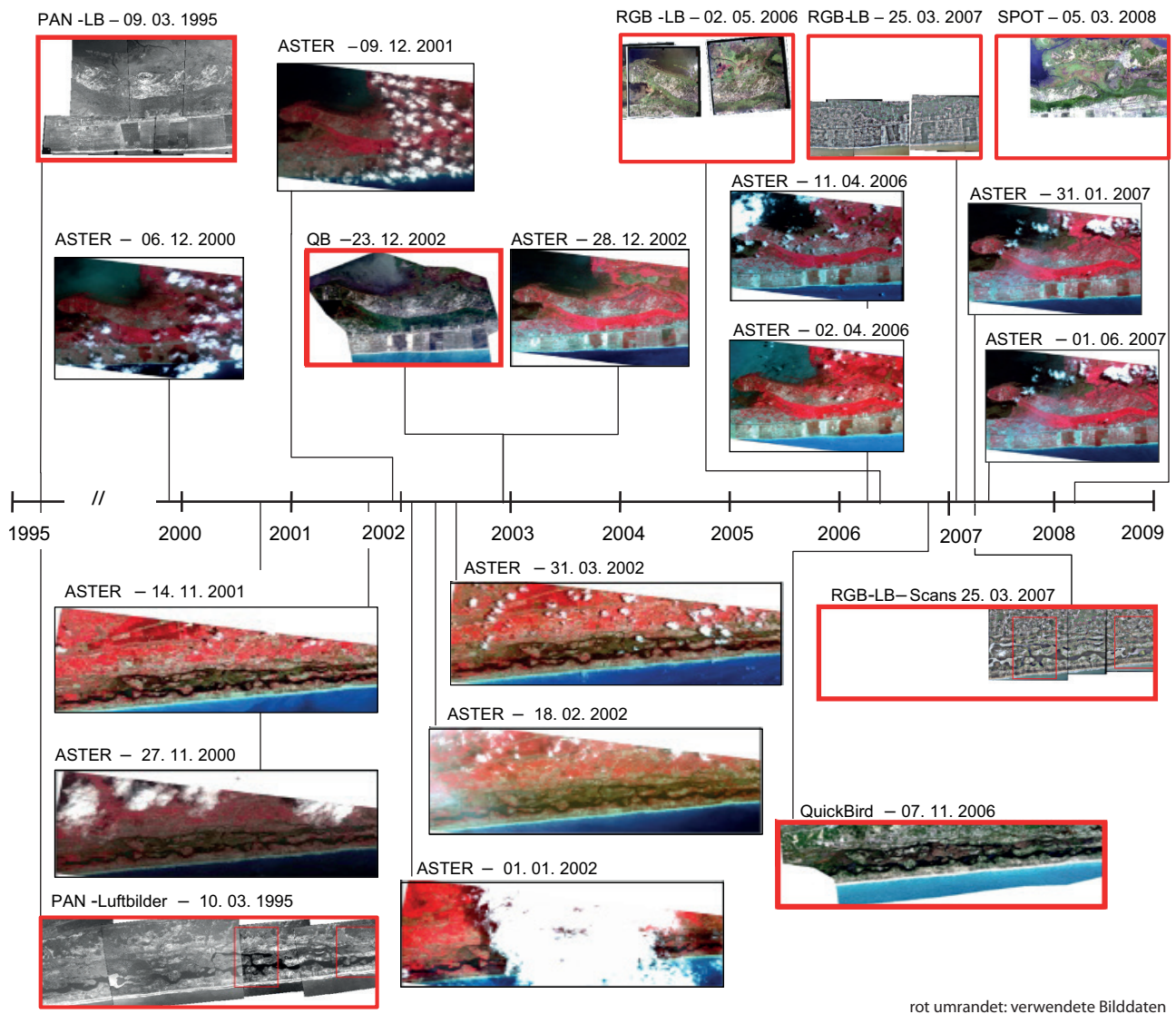
Abbildung 58: Spektrale und geometrische Auflösung verwendeter Sensoren

Tabelle 34: Charakteristika des QuickBird-Sensors

Merkmale			
Orbit	Höhe	450 km	
	Inklination	97,2°	
Schwadbreite	22 km		
Sensortyp	Lineare CCD		
Wellenlängenbereiche		Geometrische Auflösung	Radiometrische Auflösung
blau	450–520 nm	2,4 m	11 bit
grün	520–600 nm	2,4 m	11 bit
Rot	630–690 nm	2,4 m	11 bit
NIR	760–900 nm	2,4 m	11 bit
PAN	450–900 nm	0,6 m	11 bit

Tabelle 35: Angaben zur Vorverarbeitung der verwendeten QuickBird-Daten seitens DigitalGlobe (aus Bähr & Vögtle 2005)

Bezeichnung	Vorverarbeitung	Positionsgenauigkeit CE90/RMSE
<b>Ortho Ready Standard</b>	Radiometrische Korrekturen, geometrische Korrekturen von Abbildungsgeometrie, Erdrotation, -krümmung, Orbitvariation und Lage, Entzerrung auf Basis von Orbitdaten und weitmaschigem DHM	23 m / 14 m



rot umrandet: verwendete Bilddaten

Abbildung 59: Zeitliche Auflösung zur Verfügung stehender Fernerkundungsdaten für den Küstenraum Benins

Tabelle 36: Für die Klassifizierung genutzte Merkmale unter Verwendung der Bezeichnungen von eCognition 8 (Definiens 2009a und MathWorks 2011)

Geometriebasierte Merkmale		Intensitätsbasierte Merkmale
Border Index	$BI = \frac{BL}{2(l + w)}$	Mean: Mittelwert der Intensität des Segmentes
Compactness	$C = \frac{l * w}{\#P}$	Min. pixel value: Wert des Pixels mit der geringsten Intensität im Segment
Density	$SI = \frac{BL}{4 * \sqrt[2]{A}}$	
Asymmetry	$As = \frac{2\sqrt{\frac{1}{4}(\text{VarX} + \text{VarY})^2 + (\text{VarXY})^2 - \text{VarX} * \text{VarY}}}{\text{VarX} + \text{VarY}}$	
Shape Index	$SI = \frac{BL}{4 * \sqrt[2]{A}}$	Max. pixel value: Wert des Pixels mit der höchsten Intensität im Segment
Area	$A = \#P * u^2$	Mean of inner border: Der Mittelwert aller Pixel eines Segmentes, die zu einem anderen Segment benachbart sind
Length	$l = \sqrt{\#P * \gamma}$	Mean of outer border: Der Mittelwert aller Pixel außerhalb eines Segmentes, die an dieses Segment angrenzen
Width	$w = \frac{\#P}{\gamma}$	GLDV <sup>85</sup> Contrast bzw. GLCM <sup>86</sup> Contrast: $\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j}(i - j)^2$ gibt die Menge lokaler Streuung im Bild an.
Length/Width	$w/l$	GLCM Standard Deviation: kombiniert Referenz- und Nachbarpixel. Ist daher nicht dasselbe wie die einfache Standardabweichung der Grauwerte im Originalbild.
Border Length	$BL = b_o + b_i$	
Perimeter (Polygon)		
Compactness (Polygon) <sup>87</sup>	$C_p = \frac{4 * \Pi * A}{BL^2}$	
Length of longest edge (Polygon)		
Number of edges (Polygon)		
Radius of largest enclosed ellipse		
<b>Zusätzliche Merkmale<sup>88</sup>:</b>		
	$l/A^{(**)}$	
	$l/4 * \sqrt[2]{A}^{**}$	
Extent*	$E = \frac{A}{(x_{\max} - x_{\min}) * y_{\max} - y_{\min}}$	
Equivalence Diameter* ED	$ED = \sqrt[2]{4 * A / \Pi}$	

- #P: Anzahl der Pixel eines Segmentes  
u: Pixelgröße in Koordinatensystemeinheiten. Ist die Einheit ein Pixel, dann  $u = 1$   
 $\gamma$ : Länge/Breite-Verhältnis eines Segments  
 $2(l + w)$ : das kleinste Rechteck, das das Segment einschließt  
 $b_o$ : äußere Grenze des Segmentes  
 $b_i$ : innere Grenze des Segmentes (falls vorhanden)  
i: Zeilennummer  
j: Spaltennummer  
 $P_{i,j}$ : normalisierter Wert in Pixel i,j  
N: Anzahl der Zeilen und Spalten  
VarX: Varianz von X  
VarY: Varianz von Y

<sup>85</sup> GLDV: grey-level difference vector

<sup>86</sup> GLCM: grey-level co-occurrence matrix

<sup>87</sup> Verhältnis der Polygonfläche zu einem Kreis gleichen Umfangs.

<sup>88</sup> \*auf die *regionprops* von Matlab zurückgeführt