

**Fernerkundungsbasierte Modellierung und hydrologische Messungen
zur Analyse und Bewertung der landwirtschaftlichen Wassernutzung
in der Region Khorezm (Usbekistan)**

**Dissertation zur Erlangung des naturwissenschaftlichen Doktorgrades der
Bayerischen Julius-Maximilians-Universität Würzburg**

Vorgelegt von

Christopher Conrad

Eingereicht am: 24.10.2006

1. Gutachter: Prof. Dr. Stefan Dech

2. Gutachter: Prof. Dr. Paul Vlek

1. Prüfer: Prof. Dr. Stefan Dech

2. Prüfer: Prof. Dr. Jürgen Rauh

Tag der mündlichen Prüfung: 06.12.2006

Abstract

The recently founded states of Middle Asia face serious economical and ecological problems in irrigated agriculture. Thus, the introduction of the Integrated Water Resource Management (IWRM) is one of the major aims of the Interstate Commission for Water Coordination (ICWC) of Middle Asia. Among others, important tasks addressed by the ICWC are to improve the transparency in water distribution, to control the land use and water withdrawals, and to optimize the performance of the extensive irrigation and drainage systems in the arid to semi-arid Aral Sea Basin. In the past years inconsistent and unreliable hydrological data limited the calculation of the water balances for the river basins of the Amu Darya and Syr Darya. Percolation losses in the rivers or canals and unapproved withdrawals caused tremendous uncertainties when accounting for water amounts between and within different irrigation systems. One of the basic needs of the IWRM is to establish a monitoring system of water flows to understand the functioning of the different irrigation and drainage systems. Objective, consistent, and reliable data are prerequisites to achieve this goal.

This study focuses on the irrigation and drainage systems of Khorezm, located in the lower Amu Darya Basin. Serious ecological problems such as high groundwater levels, soil salinity, and non-sustainable use of land and water characterize the present situation in this region. The scientific goals were (1) to generate objective and consistent data to measure agricultural land use and water consumption in irrigated areas of the Khorezm region and (2) to analyze the functioning of the irrigation system to assess the use of land and water.

Remote sensing in combination with hydrological measurements and irrigation performance indicators were found suitable to achieve the aims of this study. A method was developed to classify agricultural land use for the entire Khorezm region by temporal segmentation of 8-day 250 m MODIS time series. Daily MODIS 1 km Land Surface Temperature (LST) data were used for modeling seasonal actual evapotranspiration (ET_{act}) of the summer vegetation period. The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) was slightly modified to account for the coarse spatial resolution of MODIS data and for semi-operational purposes. Furthermore, flow measurements were recorded for 2005 to generate a hydrological data set for balancing. The water balance was achieved by integrating the remotely sensed evapotranspiration. Additionally, widely accepted irrigation performance indicators such as relative evapotranspiration, drainage over inflow ratio, and depleted fraction were calculated on a monthly base to investigate the functioning of the canal network in Khorezm on regional scale.

The classification of agricultural land use from time series of MODIS Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) comprises two important steps: (1) the generation of an enormous

feature space by temporal segmentation of time series to consider the temporal variability within classes; (2) the application of the Recursive Partitioning And Regression Tree (RPART) algorithm to build a classification tree by selecting suitable features and generating threshold values. In Khorezm, cotton, rice, winter wheat, and crop rotations with winter wheat have the highest proportion in the regional crop production. Training and validation samples were extracted from high spatial resolution ASTER images and field data from 2004. The application of RPART on different feature sets enabled stable results and portability with 91% overall accuracy and a Kappa coefficient of 0.9 for both years, 2004 and 2005.

MODIS 1 km land products (LST, emissivity, albedo, NDVI, and leaf area index), and meteorological data were combined for modeling ET_{act} . The sensible heat flux was calculated according to the METRIC (Mapping EvapoTranspiration at High Resolution and Internalized Calibration) variant of SEBAL. Aggregated to MODIS 1 km scale, the land use classification was the determining parameter to select hot and cold anchor points needed to model sensible heat fluxes automatically. The probability to find completely dry or wet conditions within a 1 km grid is very low. Thus, classification results, NDVI, and ASCE-EWRI reference evapotranspiration (ET_{ref}) were used to adjust the estimations of the vertical temperature gradient at the best fitting anchor points (similar to METRIC).

The validation was done by exhaustive plausibility analyses of the input data, the intermediate results, and the final modeling output using crop coefficients and literature references. Measurements of ET_{act} over agricultural sites were not possible during field work. However, SEBAL has left the experimental stage and has been successfully applied and validated for ecozones and climatic regions including semi-arid environments. All input and output data showed plausible values. Cloud free conditions in Khorezm enabled to execute SEBAL more than 130 times within 215 days of each vegetation period in 2004 and 2005. Interpolation and compositing resulted in daily, ten-day, monthly and seasonal products of ET_{act} .

Hydrological discharge measurements at 21 measurement sites covered 82 % of the Khorezm irrigation system. The Palvan-Gazavat-Subsystem located in the distant portion of the canal system was studied in more detail. Automated gauge readings and stream-flow measurements applying the velocity-area method were used to measure the discharge throughout the vegetation period in 2005. The maximum errors of flow measurements were approximately 7 %.

The results show intensive agricultural land use in entire Khorezm dominated by cotton (58 % of the entire agricultural land, Uzbek state order). Rice (25 %) grows mainly close to the Amu Darya River and in vicinity to numerous lakes in the South. Furthermore, rice is traditionally the dominating land use in Gurlen Rayon. Crop rotations with winter wheat can be found in central Khorezm and in the downstream parts of the irrigation system. 2004 and 2005 depict similar land use patterns with a slight increase of wheat rotations and rice growing in 2005. The results are

suitable for regional water managers to analyze seasonal land use patterns of different Water Users Associations (WUAs) rather than for exact statistics due to the heterogeneity within the 250 m MODIS pixels.

Between April and October 2004 average values of ET_{act} exceeded 775 mm (2005: 750 mm). Homogeneous 1 km rice (>80 % proportion of rice) pixels achieved 1007 mm (2005: 877 mm). In 2004 and 2005, the modeled ET_{act} over cotton fields was 831 mm and 833 mm, respectively. Spatial and temporal variations of crop water consumption appeared throughout Khorezm. A negative tendency of ET_{act} towards the distal parts of the irrigation system indicated decreasing water availability on the field level. Relative evapotranspiration indicated an oversupply and therefore potentials for water savings in the upstream part. In the downstream part the water demand was not met.

For agricultural use, withdrawals of 5.38 km³ were measured in the vegetation period 2005. The values were on average 37% higher than the official data of the ICWC. Within the system boundaries water amounts of 22,782 m³/ha were available for irrigation. Comparisons between subsystems showed regional disparities of withdrawals ranging from 17,000 m³/ha to 30,000 m³/ha. The upstream-downstream gradient of irrigation water supply expected from the remote sensing modeling results could not be found at the regional water distribution level. In comparison with the remote sensing results it can be summarized that water consumption at the field level (MODIS pixel) or WUA level does not reflect the water intake at the upstream distribution nodes. High transportation losses and increasing groundwater levels during the vegetation period were concluded.

Monthly water balances and performance indicators highlighted similar results. During the leaching and the main irrigation period in 2005, an increase of soil moisture and groundwater was recorded. The discharge of groundwater followed the irrigation phase in September. However, even in the main irrigation season (July and August), the average drainage over intake ratio is 45% and in the upper part of the irrigation system almost reaches 60%. This concludes a high potential for water saving. Although high discharges in the regional drainage system were found poor drainage systems are reported at the field level. Evidently the main drainage canals of the region work as large scale groundwater collectors rather than fulfill their designated use to collect saline water from the field level. Further measurements including years with less water availability, and detailed analysis of groundwater levels in relation to the drainage canals are required to quantify and localize weak points of the collector system.

There were enormous discrepancies of system functioning inside the irrigated areas of Khorezm in 2005. Especially the Palvan-Gazavat-Subsystem showed high withdrawals and depleted fractions far below the critical value of 0.5. The latter clearly indicates the risk of groundwater and soil salinity in this distant part of the Khorezm region. One important contribution to the

situation is an improper irrigation practise in the beginning of the cotton growth period, which was shown by former studies on farm level. Drainage is blocked to rise the groundwater tables. This practise is also used in times of water scarcity. The role of the lakes located South of the Palvan-Gazavat-System remained unclear. Further investigations have to show if these lakes also drain the groundwater body of Khorezm (lateral outflow, in this study assumed to be zero) or if connections to the Ozerny Collector exist (flow to sinks, unaccounted in this study).

In summary, demand-oriented supply in Khorezm is a major challenge for regional water management. However, the usefulness to suggest alternatives like lined canals and small reservoirs inside the system to reduce water losses and to increase water reliability seem to be questionable regarding the poor financial situation of the region. With regard to water indicators of Middle Asia, in Khorezm high amounts of irrigation water were available in 2005. From an objective point of view, re-organization of water distribution should therefore also consider the situation downstream in Karakalpakstan and Tashauz.

The study proofed the importance to collect reliable and consistent data for hydrological analyses in Middle Asia. For the Khorezm region the presented remote sensing methods indicated their ability to supply data for hydrological monitoring on a regional scale. Remotely sensed crop rotation patterns and water consumption offered the view on field and WUA levels inside the irrigation water distribution administrations (UIS) and on larger subsystems of the canal network in Khorezm. Both methods are portable to regions with similar crops and good climatic conditions, for instance the middle and lower course of the Amu Darya and Syr Darya River. Therefore, remote sensing has a high potential as objective data source and to contribute to the needs of IRWM in Middle Asia.

Kurzfassung

Die Bewässerungslandwirtschaft in Mittelasien ist geprägt von schwerwiegenden ökologischen und ökonomischen Problemen. Zur Verbesserung der Situation auf dem hydrologischen Sektor wird daher seitens der mittelasiatischen *Interstate Commission for Water Coordination* (ICWC) die Einführung des *Integrated Water Resource Management* (IWRM) gefordert. Wichtige Herausforderungen zur Optimierung der Wassernutzung im Aralsee-Becken sind dabei die Schaffung von Transparenz sowie von Möglichkeiten zur Überwachung der Landnutzung und der Wasserentnahme in den Bewässerungssystemen. Diese Informationslücke wird von Unwägbarkeiten in den hydrologischen Datengrundlagen ausgelöst, die die Erstellung exakter Wasserbilanzen für die Einzugsgebiete des Amu Darya und des Syr Darya verhindern. Diese Unsicherheiten sind einerseits durch unkalkulierbare Versickerungsverluste der Kanäle, andererseits durch zunehmende nicht dokumentierte Wasserentnahmen auf regionaler Ebene zu begründen. Daher sind auch die Funktionsweise und Leistungsfähigkeit vieler Bewässerungsregionen für die verantwortlichen Wassermanager derzeit nicht messbar. Aus diesem Grund werden zur Umsetzung des IWRM an erster Stelle objektive, konsistente und glaubwürdige Daten für ein Monitoring benötigt, welches in der Lage ist, Einblicke über die Funktionsweisen der Bewässerungssysteme in Mittelasien zu geben.

In diesem Kontext fokussierte diese Arbeit auf das Bewässerungssystem der Region Khorezm im Unterlauf des Amu Darya südlich des Aralsees. Hohe Grundwasserstände, Bodenversalzung und eine nicht nachhaltige Nutzung der Land- und Wasserressourcen sind beispielhaft zur Charakterisierung der ökologischen Situation in dieser Region zu nennen. Die Arbeit zielte darauf ab, (1) objektive und konsistente Datengrundlagen zum Monitoring der Landnutzung und des Wasserverbrauchs innerhalb des Bewässerungslandes zu schaffen und (2) auf Basis dieser Ergebnisse die Funktionsweise des Bewässerungssystems zu verstehen sowie die Land- und Wassernutzung der Region zu bewerten. Um diese Ziele zu erreichen, wurden Methoden der Fernerkundung und der Hydrologie miteinander kombiniert.

Fernerkundliche Schlüsselgrößen der Arbeit waren die Kartierung der agrarischen Landnutzung und die Modellierung der saisonalen tatsächlichen Evapotranspiration. Es wurde eine Methode vorgestellt, die eine Unterscheidung verschiedener Landnutzungen und Fruchtfolgen der Region durch die temporale Segmentierung von Zeitserien aus 8-tägigen Kompositen von 250 m-Daten des MODIS-Sensors ermöglicht. Täglich von MODIS aufgezeichnete Landoberflächentemperaturen (LST) bildeten die Basis zur fernerkundungsbasierten Modellierung der saisonalen tatsächlichen Evapotranspiration (ET_{act}) für die sommerliche Vegetationsperiode. Aufgrund der hohen zeitlichen und groben räumlichen Auflösung der verwendeten MODIS-Daten von 1 km waren leichte Modifikationen des zur Modellierung eingesetzten *Surface Energy Balance Algorithm for*

Land (SEBAL) erforderlich. Weiterhin wurden umfassende Geländemessungen durchgeführt, um in der Vegetationsperiode 2005 die Zu- und Abflussmengen des Wasser von und nach Khorezm zu bestimmen. Die abschließende Bewertung der Land- und Wassernutzung basierte letztendlich auf der Bildung von Wasserbilanzen und der Berechnung anerkannter Performanceindikatoren wie der Ratio aus Drainage und Wasserentnahme oder der *depleted fraction*.

Das vorgestellte Klassifikationsverfahren basiert auf zwei wesentlichen Schritten: zunächst wird durch die zeitliche Segmentierung von NDVI-Jahresgängen ein sehr großer Merkmalsraum generiert. Die Zeitseriensegmente ermöglichen die Berücksichtigung der zeitlichen Variabilität innerhalb einzelner Klassen. Anschließend wird der sogenannte *Recursive Partitioning And Regression Tree* (RPART) Algorithmus angewendet, um geeignete Features und Schwellenwerte für die Klassifikation zu ermitteln. Für Khorezm wurden auf diese Weise die flächenhaft am weitesten in der Region vertretenen Nutzungen Baumwolle, Reis, Winterweizen sowie Fruchtfolgen mit Weizen klassifiziert. Die Referenzflächen wurden aus ASTER-Fernerkundungsdaten in Kombination mit Geländeerhebungen bestimmt. Durch die mehrfache Anwendung des RPART-Algorithmus konnte eine hohe Stabilität erzielt werden, wie eine konstante *overall accuracy* von 91 % und Werte des Kappa-Koeffizienten von 0,9 für die beiden Untersuchungsjahre 2004 und 2005 ausdrückt.

Zur Modellierung von ET_{act} wurden MODIS-Produkte (LST, Emissionsgrad, Albedo, NDVI und Blattflächenindex) und meteorologische Stationsdaten aus Khorezm verwendet. Die Modellierung des fühlbaren Wärmeflusses, einer Komponente der Energiebilanzgleichung an der Erdoberfläche, erfolgte mittels METRIC (*High Resolution and Internalized Calibration*), einer Variante des SEBAL. Die Landnutzungsklassifikation fungierte als zentraler Eingangsparameter, um eine automatisierte Auswahl der Ankerpunkte des Models sicherzustellen. Da innerhalb eines Quadratkilometers (entsprechend der MODIS-Auflösung) aufgrund der Mischpixelproblematik keine homogen feuchten oder trockenen Bedingungen im Bewässerungsgebiet gefunden werden konnten, wurden – ähnlich wie in METRIC – die Landnutzungsklassifikation, der NDVI und die ASCE-Referenz-Evapotranspiration zur Abschätzung des tatsächlichen Zustands an den Ankerpunkten herangezogen.

Die Validierung erfolgte in Form einer umfassenden Plausibilitätsstudie der Eingangsparameter, der Zwischenergebnisse und der Endprodukte der Modellierung, da keine Feldmessungen der tatsächlichen Evapotranspiration im Rahmen dieser Arbeit möglich waren. Dazu wurden *class-Apan*-Daten, die pflanzenspezifische potenzielle Evapotranspiration sowie Literaturquellen eingesetzt. Es konnten plausible Eingangsdaten und Resultate beobachtet werden. SEBAL kam aufgrund der guten atmosphärischen Bedingungen über Khorezm an mehr als 130 Tagen pro Vegetationsperiode (215 Tage) zur Anwendung. So konnten durch eine Interpolation Tageswerte, Zehntages-, Monats- und saisonale Komposite von ET_{act} gebildet werden.

Weiterhin wurden an 21 Messstellen Kanalwasserflüsse zur Be- und Entwässerung von 82 % der Gesamtfläche des Bewässerungsgebietes der Region Khorezm in der Vegetationsperiode 2005 ermittelt. Innerhalb dieser hydrologischen Grenzen wurde darüber hinaus das Palvan-Gazavat-Subsystem beprobt, das im Unterlauf des Bewässerungsnetzes von Khorezm liegt und keine direkte Anbindung an den Amu Darya hat. Die Messstellen wurden mit Drucksensoren ausgestattet, die halbstündig Pegelstände aufzeichneten. Vierzehntägig wurden Durchflussmessungen mithilfe eines Messflügels durchgeführt und der Gesamtdurchfluss aus den resultierenden Schlüsselkurven berechnet. Die Erfahrungswerte für die Verfahrensfehler liegen bei etwa 7 %.

Baumwolle ist infolge der Planwirtschaft die dominierende Landnutzung in Khorezm. In beiden Untersuchungsjahren wurde für Baumwolle ein Anteil von 58 % an der gesamten agrarischen Nutzfläche gemessen. Größere zusammenhängende Reisanbaugebiete (Reisanteil an der Gesamtfläche: 25 %) wurden in Flussnähe, im südwestlichen Seengebiet und im Rayon Gurlen, wo Reis traditionell eine populäre Anbaufrucht ist, lokalisiert. Fruchtfolgen mit Winterweizen finden sich überwiegend in der Nachbarschaft der großen Siedlungen, aber auch in den Unterlaufregionen der Bewässerungssysteme. 2005 deutete ein leichter Anstieg des Flächenanteils von Fruchtfolgen mit Winterweizen eine leichte Zunahme der Intensität der agrarischen Landnutzung im Jahresvergleich an. Die Ergebnisse dieses Verfahrens eignen sich zur Anwendung auf einer übergeordneten Planungsebene, wobei die *Water Users Associations* (WUAs) eine mögliche Bezugsebene darstellen. Für die Ableitung einer exakten Statistik ist dieses Verfahren aufgrund der Subpixelheterogenität innerhalb der 250 m-MODIS-Pixel ungeeignet.

Bei der Modellierung der ET_{act} konnte eine heterogene räumliche Verteilung nachgewiesen werden. Zwischen April und Oktober 2004 lagen die Durchschnittswerte im Khorezm Oblast bei 775 mm (2005: 750 mm). Auf homogenen Pixeln der Klasse „Reis“ (Flächenanteil im 1 km > 80%) wurden 1007 mm (2005: 877 mm) in der Summe der Wachstumsphasen ermittelt. Auf den Baumwollfeldern lagen die Werte von ET_{act} in der Vegetationsperiode in beiden Jahren bei etwa 830 mm. Es konnte ebenfalls in beiden Jahren ein negativer Trend des Wasserverbrauchs in den Unterläufen des Kanalnetzes festgestellt und auf schlechtere Wasserversorgung in diesen Bereichen auf Feldebene geschlossen werden. Offensichtlich wurde der Wasserbedarf dort unterboten.

Für die landwirtschaftliche Nutzung im Rayon Khorezm wurde für die Sommersaison 2005 eine Wasserentnahme von 5,38 km³ ermittelt. Damit übertrafen die Messergebnisse die offiziell verfügbaren Daten der ICWC um durchschnittlich 37 %. Auf die landwirtschaftliche Fläche bezogen ergab sich für Khorezm im Jahr 2005 eine mittlere Wasserentnahme von 22.782 m³/ha. In den Subsystemen schwankten diese Werte zwischen 17.000 m³/ha und 30.000 m³/ha. Allerdings konnte an den Systemgrenzen, an denen die Messungen durchgeführt werden, der aus den fernerkundungsbasierten Modellierungen auf WUA-Level erwartete abnehmende Gradient der Wasserentnahme zwischen Oberlauf und Unterlauf nicht nachvollzogen werden. Als Ursache für diese Diskrepanz sind vor allem die Versickerungsverluste in den Bewässerungskanälen zu

nennen, die zwar den Grundwasserkörper großräumig auffüllen, aber auf Feldebene nicht zur oberflächlichen Bewässerung zur Verfügung stehen.

Monatliche Wasserbilanzen und die Anwendung der Performanceindikatoren führten zu ähnlichen Ergebnissen. Während der Bewässerungsphasen 2005 wurden die Grundwasserspeicher großflächig aufgefüllt, eine Entwässerung setzte erst mit dem Ausbleiben des Bewässerungswassers im September ein. Dennoch wurden auch in der Bewässerungssaison sehr hohe Drainageanteile am Bewässerungswasser von durchschnittlich 45 % ermittelt (im Oberlauf sogar 60 %), was auf hohe Einsparpotenziale im Beobachtungszeitraum hindeutet. Auf Feldebene ist in Khorezm eine deutlich geringere Drainageleistung zu beobachten, was darauf schließen lässt, dass die großen Drainagekanäle dazu dienen, den künstlich vergrößerten Grundwasserkörper wieder abzubauen. Es ist zu erwarten, dass detaillierte Untersuchungen in wasserärmeren Jahren und Gegenüberstellungen der Ergebnisse mit den Grundwasserspiegeln die Schwachstellen im Drainagesystem besser lokalisieren lassen.

Der Vergleich zwischen dem Palvan-Gazavat-Subsystem und dem übrigen Bewässerungssystem zeigte in der Vegetationsperiode 2005 große regionale Unterschiede hinsichtlich der Wasserflüsse im Jahresgang. Im Palvan-Gazavat-System konnte über eine *depleted fraction* mit Werten von unter 0,5 eine erhöhte Gefahr der Boden- und Grundwasserversalzung festgestellt werden. Offensichtlich treten – trotz hoher Gesamtentnahmen – in dieser Region verstärkt Wasserunsicherheiten auf. Dadurch kommt es neben den Kanalverlusten auch durch das Blockieren der Drainage zu künstlichen Grundwasseranhebungen und damit zu einer erhöhten Wasserspeicherung im System. Offen bleibt allerdings, ob die größeren Seen südlich des Ozerny-Kollektors ebenfalls zur Entwässerung genutzt werden. Dies hätte eine Modifizierung der Bilanzen zur Folge.

Es kann zusammengefasst werden, dass die bedarfsgerechte Bereitstellung von Wasser in Khorezm eine der wesentlichen zukünftigen Aufgaben des regionalen Wassermanagements ist. Allerdings sind konkrete Vorschläge schwierig, da sich teure Kanalbefestigungen oder die Anlage von abgedichteten Wasserspeichern im Innern des Bewässerungssystems vor dem Hintergrund der schlechten finanziellen Situation kaum realisieren lassen. Grundsätzlich war für die Vegetationsperiode 2005 in Khorezm eine hohe Wasserverfügbarkeit an den Systemgrenzen festzustellen. Daher sollte eine Neuverteilung von Wasser in Khorezm auch die Situation der Unterlaufregionen Karakalpakstan und Tashauz berücksichtigen.

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass sich mit Methoden der Fernerkundung objektive und konsistente Daten der agrarischen Landnutzung und des Wasserverbrauchs durch Evapotranspiration für ein regionales Monitoring in Khorezm erstellen lassen. Die Methoden lassen sich auf benachbarte Regionen mit gleichen atmosphärischen Bedingungen und ähnlichen Anbausorten übertragen. Daher ist anzunehmen, dass beide Verfahren auch auf der Planungsebene in einem IWRM für die übrigen Mittel- und Unterläufe von Amu Darya und Syr Darya ein hohes Anwendungspotenzial besitzen.

Danksagung

Mit diesen Zeilen möchte ich den Leuten meinen Dank aussprechen, die auf unterschiedlichste Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ganz besonders herzlich möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Stefan Dech für seine fachkompetente Betreuung und konstruktiven Ratschläge in allen Phasen dieser Dissertation bedanken. Seine weit über das natürliche Maß hinaus reichende Förderung meiner persönlichen und beruflichen Weiterentwicklung ist maßgeblich in die Entstehung der Arbeit eingeflossen. Weiter gebührt besonderer Dank Herrn Prof. Dr. Paul Vlek für die fachkundige Betreuung, die intensiven kritischen Diskussionen und die Übernahme des zweiten Gutachtens.

Die vorliegende Arbeit wurde am Geographischen Institut der Universität Würzburg, am Lehrstuhl für Fernerkundung, einer Stiftung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), im Rahmen des deutsch-usbekischen Khorezm-Projekts erstellt, das am Zentrum für Entwicklungsforschung (ZEF) in Bonn angesiedelt ist. Dieses Netzwerk basiert auf einer engen Zusammenarbeit mit der Abteilung Umwelt- und Sicherheit (US) am Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des DLR. Die daraus resultierenden optimalen fachlichen und infrastrukturellen Rahmenbedingungen bildeten ein solides Fundament zum Gelingen der Arbeit. An dieser Stelle sei daher allen Personen gedankt, die dieses Umfeld ermöglicht haben.

Ich möchte mich insbesondere bei dem stellvertretenden Leiter der Abteilung US, Herrn Dr. Günter Strunz (DLR) sehr herzlich für die Übernahme der Mentorentätigkeit bedanken. Mit seinem hohen Sachverstand hat er gezielt wertvolle strukturelle und inhaltliche Impulse für den Fernerkundungsschwerpunkt meiner Arbeit gegeben. Herrn Dr. Mohsin Hafeez (wissenschaftlicher Mitarbeiter der Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO in Australien) und Herrn Dr. Bernhard Tischbein (wissenschaftlicher Mitarbeiter des ZEF) gilt für ihre fachkundige und geduldige Betreuung auf dem hydrologischen Sektor ebenso ein herzliches Dankeschön.

Weiterhin danke ich den Kollegen der ersten Stunde des Lehrstuhls für Fernerkundung, Herrn Dipl.-Geogr. Thilo Wehrmann und Herrn Dipl.-Geogr. Martin Bachmann, für die zahllosen konstruktiven Gespräche, die entgegengebrachte Hilfsbereitschaft und die hervorragende Teamarbeit. Ebenso gilt mein Dank allen anderen Kollegen des Teams Biodiversität und Ressourcenmanagement für das angenehme Arbeitsklima und die herzliche Atmosphäre. Zudem gebührt dem Teamleiter Herrn Dr. Michael Schmidt sowie Frau Dipl.-Geogr. Tanja Kraus (DLR) für die spürbare Entlastung während der Endphase der Arbeit mein besonderer Dank.

Ein herzliches Dankeschön möchte ich an die Leiter des Usbekistanprojekts, Herrn Dr. John Lamers und Herrn Dr. Christopher Martius, richten. Die hervorragende Organisation des Projekts in Deutschland und Usbekistan, unermüdliche Hilfsbereitschaft und persönlicher Einsatz der beiden Leiter und die fachlichen Diskussionen waren wichtige Grundsteine zum Gelingen dieser Arbeit. Auch gilt der Dank meinem Teamkollegen Herrn Dr. Gerd Rücker für den bereichernden intensiven fachlichen Austausch.

Mein Dank richtet sich auch an die usbekischen Partner, insbesondere an Frau Dr. Julia Shirokova (SANIIRI, Tashkent), Herrn Marimboy Saparboev (BWO-Amu Darya, Urgench) und Herrn Valentin Gregorievitsch (OGME, Urgench) für die hohe Kooperationsbereitschaft beim Datenaustausch und der Durchführung gemeinsamer Durchflussmessungen. Herrn Alimov Shavkat (Hydrogeologische Station in Urgench) und den Mitarbeitern der Deutschen Welthungerhilfe e.V. in Usbekistan möchte ich danken für die zeitintensive beratende Unterstützung bei der Planung und Errichtung der Pegelstellen in den Kanälen. Weiterer Dank gebührt den vielen fleißigen Menschen, ohne die die Geländearbeiten nur eingeschränkt umzusetzen gewesen wären. Hervorzuheben sind dabei insbesondere Frau Dipl.-Geogr. Susanne Blenk, Herr Björn Kaiser, Herr Tilman Zöllner sowie der usbekische Techniker Rashid Madrakhimov.

Für die zahllosen Übersetzungsarbeiten, aber auch für die Hinführung an die usbekische Mentalität und für die Hilfe beim Bewältigen administrativer und sozialer Hürden gilt mein herzlicher Dank meiner usbekischen Dolmetscherin Frau Nadira Khodjaeva sowie der Büroleiterin des Projekts in Urgench, Frau Liliana Sinn. Für die Unterstützung bei der Orientierung nach meiner Ankunft in Khorezm und die Herstellung von Kontakten zu Kooperationspartnern danke ich zudem ganz besonders Frau Dipl.-Geoök. Kirsten Kienzler und Herrn Tommaso Trevisani.

Unter einer Vielzahl an Korrektoren haben mir insbesondere Dipl.-Geogr. René Colditz, Dr. Christoph Schultz, Frau Carina Kübert, Herr Johannes Hetzel und mein Bruder, Herr Dipl.-Math. Florian Conrad beim Erreichen der Ziellinie geholfen, wofür ich mich ebenso sehr herzlich bedanken möchte.

Zuletzt möchte ich meinen Eltern Hildegard und Werner Conrad, meinem Großvater und in vielerlei Hinsicht Vorbild, Herrn Claus Palm, meinen Brüdern Dominik, Florian und Johannes, aber auch dem ganzen engeren Familien- und Freundeskreis, meine tiefe Anerkennung und Hochachtung aussprechen. Ohne ihren Rückhalt und ihre unermüdliche Unterstützung wären weder mein Studium noch diese Dissertation möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

ABSTRACT	III
KURZFASSUNG.....	VII
DANKSAGUNG	XI
INHALTSVERZEICHNIS	XIII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	XVII
TABELLENVERZEICHNIS	XXI
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	XXIII
1 HINFÜHRUNG, WISSENSCHAFTLICHE ZIELSETZUNG UND AUFBAU DER ARBEIT	1
1.1 WISSENSCHAFTLICHE ZIELSETZUNG UND AUFBAU DER ARBEIT	8
2 DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET	11
2.1 GEOGRAPHISCHE LAGE UND ABGRENZUNG	11
2.2 NATURGEOGRAPHISCHE CHARAKTERISIERUNG.....	13
2.2.1 <i>Klima</i>	13
2.2.2 <i>Relief und Geologie</i>	14
2.2.3 <i>Böden und Grundwasser</i>	15
2.2.4 <i>Natürliche Vegetation</i>	17
2.3 DIE USBEKISCHE VERWALTUNGSEINHEIT KHOREZM.....	17
2.4 ZUR LANDWIRTSCHAFT IN KHOREZM.....	18
2.5 DAS KANALSYSTEM	22
3 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	25
3.1 KLASSIFIKATION AGRARISCHER LANDNUTZUNG MIT METHODEN DER FERNERKUNDUNG	25
3.1.1 <i>Stand der Forschung</i>	26
3.1.2 <i>Klassifikations- und Regressionsbäume</i>	29
3.2 FERNERKUNDUNGSBASIERTE BESTIMMUNG DER TATSÄCHLICHEN EVAPOTRANSPIRATION	32
3.2.1 <i>Übersicht existierender methodischer Ansätze</i>	34
3.2.2 <i>Das SEBAL-Modell zur Bestimmung der tatsächlichen Evapotranspiration</i>	37
3.3 METHODEN ZUR ANALYSE UND BEWERTUNG DER NUTZUNG VON LAND UND WASSER IN BEWÄSSERUNGSGEBIETEN	45
3.3.1 <i>Das „Water Accounting“</i>	46
3.3.2 <i>Performanceindikatoren</i>	49
3.3.3 <i>Beiträge der Fernerkundung</i>	51

4	FERNERKUNDUNGSDATEN UND VORVERARBEITUNGEN	55
4.1	DER SATELLIT TERRA.....	57
4.2	MODIS.....	58
4.3	ASTER.....	60
4.4	CHARAKTERISIERUNG UND ÜBERSICHT EINGESETZTER NASA-MODIS DATENPRODUKTE	62
4.4.1	<i>Standardisierte Generierung der MODLand Produkte.....</i>	62
4.4.2	<i>Standardisierte Reflexionsgrade.....</i>	63
4.4.3	<i>Die Oberflächentemperatur und der Emissionsgrad</i>	65
4.4.4	<i>Der Vegetationsindex NDVI.....</i>	65
4.4.5	<i>Der Blattflächenindex</i>	67
4.4.6	<i>Die spektrale Albedo.....</i>	68
4.4.7	<i>Übersicht der verwendeten Datensätze.....</i>	69
4.5	REFLEXIONSGRADE AUS ASTER-DATEN	70
4.6	ASTER-MODIS-LAGEKORREKTUREN.....	72
4.7	QUALITÄTSANALYSE UND ZEITSERIENGENERIERUNG MIT MODIS-DATEN.....	73
4.7.1	<i>Methodik zur Qualitätsanalyse und Zeitseriengenerierung</i>	73
4.7.2	<i>Raumzeitliche Qualitätsanalyse.....</i>	75
4.7.3	<i>Zusammenstellung der Zeitserien und Interpolation.....</i>	77
4.8	NDVI-BERECHNUNGEN AUS MOD09Q1-DATEN	78
4.9	BERECHNUNG DER BLUE-SKY-ALBEDO AUS MOD43B3-PRODUKTEN.....	79
5	DIE KLASSIFIKATION DER AGRARISCHEN LANDNUTZUNG	81
5.1	CHARAKTERISIERUNG DES KLASSIFIKATIONSANSATZES	82
5.1.1	<i>Ableitung eines erweiterbaren Sets verschiedener Kurvenparameter</i>	83
5.1.2	<i>Ansatz der temporalen Segmentierung.....</i>	86
5.2	METHODIK UND UMSETZUNG	88
5.2.1	<i>Klassendefinition.....</i>	88
5.2.2	<i>Temporale NDVI-Signaturen der Referenzflächen</i>	90
5.2.3	<i>Erstellung des Merkmalsraums.....</i>	94
5.2.4	<i>Merkmalsauswahl und Klassifikation</i>	99
5.2.5	<i>Postklassifikation mittels GIS und Fuzzy-Logik.....</i>	110
5.3	ERGEBNISSE UND DISKUSSION DER KLASSIFIKATION	111
5.3.1	<i>Reduzierung des Merkmalsraums und Klassifikationsbäume</i>	111
5.3.2	<i>Validierung</i>	116
5.3.3	<i>Gesamtergebnis der Klassifikation</i>	117
5.3.4	<i>Zusammenfassung und Ausblick</i>	120
6	DIE MODELLIERUNG DER SAISONALEN TATSÄCHLICHEN EVAPOTRANSPIRATION.123	
6.1	VORVERARBEITUNGEN UND INITIALISIERUNGEN.....	124
6.1.1	<i>Meteorologische Daten.....</i>	125
6.1.2	<i>Aufbereitung der Landnutzungsklassifikation</i>	126
6.1.3	<i>Klassenbasierte Zuordnung der Rauheitslängen z_{0m}.....</i>	131
6.2	MODELLANPASSUNGEN	131
6.2.1	<i>Kalibrierung der Ankerpunkte</i>	131
6.2.2	<i>Automatisierung der SEBAL-Anwendung auf tägliche MODIS-Daten.....</i>	133

6.3	BERECHNUNG VON TAGESWERTEN UND KOMPOSITBILDUNG	134
6.4	VALIDIERUNG	135
6.4.1	<i>Plausibilitätskontrolle statischer Eingangsparameter</i>	135
6.4.2	<i>Plausibilitätsuntersuchungen für die Zwischenprodukte</i>	138
6.4.3	<i>Genauigkeitsabschätzung der Modellierungsergebnisse</i>	141
6.4.4	<i>Zusammenfassung der Validierungsschritte</i>	149
6.5	ERGEBNISSE UND DISKUSSION DER MODELLIERUNG.....	151
6.5.1	<i>Die tatsächliche Evapotranspiration der Sommersaison 2004 und 2005</i>	151
6.5.2	<i>Diskussion</i>	156
7	BESTIMMUNG DER WASSERFLÜSSE IM BE- UND ENTWÄSSERUNGSSYSTEM	159
7.1	DIE STRUKTUR DER BE- UND ENTWÄSSERUNGSSYSTEME VON KHOREZM	161
7.1.1	<i>Die Subsysteme des Bewässerungsnetzes</i>	162
7.1.2	<i>Die Drainagesysteme</i>	163
7.1.3	<i>Die relative Lage der Water Users Associations zu den Einlassbauwerken</i>	165
7.2	AUFBAU EINES HYDROLOGISCHEN MESSNETZES	166
7.2.1	<i>Das Gesamtmessnetz</i>	166
7.2.2	<i>Das Palvan-Gazavat-Subsystem</i>	168
7.2.3	<i>Ergänzend gewählte Subsysteme des Bewässerungsnetzes</i>	169
7.3	MESSMETHODIK	171
7.3.1	<i>Pegelmessungen</i>	172
7.3.2	<i>Durchflussmessungen</i>	174
7.4	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	176
7.4.1	<i>Schlüsselkurven aus Pegel- und Durchflussmessungen</i>	176
7.4.2	<i>Tägliche, monatliche und saisonale Zu- und Abflussmengen</i>	178
7.4.3	<i>Abschätzung der Gesamtwasserentnahme</i>	181
7.5	ERGEBNISVERGLEICH MIT OFFIZIELLEN STATISTISCHEN DATEN.....	183
8	RAUMZEITLICHE ANALYSE DER LAND- UND WASSERNUTZUNG IN KHOREZM.....	187
8.1	RÄUMLICHE MUSTER DER AGRARISCHEN LANDNUTZUNG UND DES WASSERVERBRAUCHS IN KHOREZM.	188
8.2	BILANZIERUNG DER WASSERFLÜSSE IM BEWÄSSERUNGSSYSTEM VON KHOREZM	192
8.2.1	<i>Wassernutzung in der Sommergevegetationsperiode 2005</i>	193
8.2.2	<i>Bilanzen und Indikatoren</i>	195
8.2.3	<i>Detailanalyse der „Depleted Fraction“ für die hydrologischen Subsysteme</i>	200
8.3	ZUSAMMENFASSENDE DISKUSSION DER ERGEBNISSE	201
9	FAZIT UND AUSBLICK.....	207
9.1	BESTIMMUNG DER LANDNUTZUNG UND MODELLIERUNG DER EVAPOTRANSPIRATION	207
9.2	ANALYSE UND BEWERTUNG DES BEWÄSSERUNGSSYSTEMS VON KHOREZM	210

ANHANG I	LITERATURVERZEICHNIS	A1
ANHANG II	EXKURSE	A21
II.1	FOURIERTRANSFORMATION ZUR GLÄTTUNG FERNERKUNDLICHER ZEITSERIEN	A21
II.2	DISKRIMINANZANALYSE.....	A22
II.3	DIE KORRELATIONSMATRIX	A24
ANHANG III	ERGÄNZENDE TABELLEN UND ABBILDUNGEN	A25
III.1	INDIKATOREN DER LAND- UND WASSERNUTZUNG IN KHOREZM	A34
<i>III.1.1</i>	<i>Das Klichnyasbay-System</i>	<i>A34</i>
<i>III.1.2</i>	<i>Das Daryalik-System</i>	<i>A34</i>
<i>III.1.3</i>	<i>Das Süd-System</i>	<i>A35</i>
	EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	A38
	CURRICULUM VITAE	A39

Abbildungsverzeichnis

Kapitel 2:

Abbildung 2-1:	Das Tiefland von Turan am 15. Juni 2006.....	12
Abbildung 2-2:	Charakterisierung der klimatischen Ausgangssituation in Khorezm.....	13
Abbildung 2-3:	Die räumliche Verteilung alluvialer Sedimente in Khorezm.....	15
Abbildung 2-4:	Der Nordteil des Rayons Khorezm im oberen Amu Darya Delta.....	18
Abbildung 2-5:	Darstellung statistischer Daten zu Wasserentnahme und Ernteerträgen in Khorezm.	21
Abbildung 2-6:	Die Hauptkanäle zur Be- und Entwässerung in Khorezm.....	22
Abbildung 2-7:	Wasserver- und entsorgung in Khorezm.....	24

Kapitel 3:

Abbildung 3-1:	Binärer Entscheidungsbaum (links) und tree map des Entscheidungsbaums.....	29
Abbildung 3-2:	Testweise Anwendung verschiedener potenzieller Schwellenwerte bei der Konstruktion von Entscheidungsbäumen für ein Merkmal.....	30
Abbildung 3-3:	Treppenbildung aufgrund orthogonaler Splits bei der Klassifikation durch <i>recursive partitioning and regression trees</i>	32
Abbildung 3-4:	Globale Anwendung des SEBAL-Modells.....	36
Abbildung 3-5:	Schematisierte Darstellung der Energiebilanz an der Erdoberfläche.....	37
Abbildung 3-6:	Schematischer Arbeitsfluss zur Datenprozessierung mittels des SEBAL-Ansatzes zur Berechnung der tatsächlichen Evapotranspiration.....	39
Abbildung 3-7:	Schematische Darstellung labiler, neutraler und stabiler Schichtungen in der Atmosphäre.....	42
Abbildung 3-8:	Bestimmung von dT aus der Landoberflächentemperatur.....	44
Abbildung 3-9:	Potenzielle Wasserflüsse in einem rein landwirtschaftlichen Bewässerungssystem.....	48

Kapitel 4:

Abbildung 4-1:	Scangeometrie des MODIS Sensors.....	60
Abbildung 4-2:	Auswirkungen des bow-tie Effekts an einer Küstenlinie.....	60
Abbildung 4-3:	BRD-Funktionen für unterschiedliche Oberflächen.....	64
Abbildung 4-4:	MODIS Level 2G, L3 und L4 “tiles“ (Kacheln).....	69
Abbildung 4-5:	<i>Footprints</i> der verwendeten ASTER-Daten im Untersuchungsgebiet.....	71
Abbildung 4-6:	Oberflächendiagramm der Pearson’schen Korrelationskoeffizienten in Abhängigkeit der Pixelverschiebung der ASTER-Daten.....	72

Abbildung 4-7:	Der TiSeG Workflow.....	74
Abbildung 4-8:	Zeitliche Qualitätsanalyse der MOD09 ρ -Zeitreihen mit TiSeG.....	75
Abbildung 4-9:	Räumliche TiSeG-Qualitätsanalyse der MOD09 ρ -Zeitreihen der Jahre 2004 und 2005.....	76
Abbildung 4-10:	MOD11A1 Qualitäten für die Sommersaison 2004 und 2005.....	77
Abbildung 4-11:	Differenzen zwischen 16-tägigen black-sky und white-sky Albedo-Produkten (MOD43B3) im Verlauf der Vegetationsperiode.....	80

Kapitel 5:

Abbildung 5-1:	NDVI-Jahresgänge zweier unterschiedlicher Nutzungen (optimiert).....	83
Abbildung 5-2:	Kurvengeglättete NDVI-Jahresgänge zweier unterschiedlicher Nutzungen.....	84
Abbildung 5-3:	Steigung der NDVI-Jahresgänge (erste Ableitung) zweier unterschiedlicher Nutzungen.....	85
Abbildung 5-4:	Charakteristische NDVI Jahresgänge landwirtschaftlicher und natürlicher Vegetationsklassen im Untersuchungsgebiet Khorezm.....	86
Abbildung 5-5:	Verallgemeinerter potenzieller Entscheidungsbaum zur Klassifikation temporaler NDVI-Signaturen typischer Vegetationsklassen im Untersuchungsgebiet.....	87
Abbildung 5-6:	Luftaufnahmen der häufigen Landnutzungen und Oberflächentypen in Khorezm.....	89
Abbildung 5-7:	Vorgehensweise zur Sammlung von Referenzflächen: Überlagerung der ASTER-Daten mit dem MODIS-Raster.....	91
Abbildung 5-8:	Temporale NDVI Signaturen der in Khorezm dominierenden Klassen der agrarischen Landnutzung (a-e) und weiterer häufiger Oberflächentypen (f-l).....	92
Abbildung 5-9:	Übersichtsdarstellung über die Ableitung der Kurvenparameter und die statistischen Parameter aus Segmenten der temporalen NDVI Signaturen.....	95
Abbildung 5-10:	Gegenüberstellung von Originaldaten und fouriertransformierten Schwingungen mit Tiefpassfilter für je einen Beispieldpixel der Klassen Baumwolle und Wüste.....	95
Abbildung 5-11:	Adjustierung der Zeitserien auf das Maximum.....	96
Abbildung 5-12:	Schematische Darstellung der Segmentierung der Zeitserien.....	97
Abbildung 5-13:	Hintereinanderschaltung von Verfahren zur Extraktion klassifizierender Merkmale aus dem gesamten Merkmalsraum.....	102
Abbildung 5-14:	Flussdiagramm zur Bildung der Merkmalsteilräume M2_A bis M2_D.....	105
Abbildung 5-15:	Flussdiagramm zur Bildung des Merkmalsteilraums M3.....	106
Abbildung 5-16:	Flussdiagramm zur Bildung des Merkmalsteilraums M4 aus dem Untermerkmalsraum M3.....	107
Abbildung 5-17:	Ergebnisse der Klassifikation der agrarischen Landnutzung in Khorezm für 2004 und 2005.....	118

Kapitel 6:

Abbildung 6-1:	Differenzen der potenziellen Evapotranspiration aus Messdaten der meteorologischen Stationen Khiva und Yangibazar.	125
Abbildung 6-2:	Ergebnisse der Weiterverarbeitung der Landnutzungsklassifikation.....	128
Abbildung 6-3:	Homogenitätsanalyse der auf 1 km Auflösung aggregierten Klassifikationsergebnisse.....	130
Abbildung 6-4:	Klassenweise zusammengefasste Emissionsgrade für Baumwolle (oben) und Wüste (unten) für Khorezm im Jahresgang 2004.	137
Abbildung 6-5:	Ableich modellierter und gemessener Netto-Strahlungsbilanzen [W/m ²] für die Station Khiva.	138
Abbildung 6-6:	Zeitlicher Verlauf der Rauheitslängen für den Impuls bezogen auf die agrarischen Landnutzungen und Fruchtfolgen in Khorezm.....	140
Abbildung 6-7:	Baumwollfelder in Khorezm, Aufnahmen aus der Erntezeit (Oktober).	141
Abbildung 6-8:	Die meteorologische Station in Khiva, im Vordergrund eine class-A-pan.....	142
Abbildung 6-9:	Streudiagramme der gemessenen Evaporation (Epan) und der aus den meteorologischen Daten ermittelten potenziellen Evapotranspiration (ET _{pot}) der Station Yangibazar.....	142
Abbildung 6-10:	Streudiagramme zur Validierung der ET-Modellierung.	143
Abbildung 6-11:	Gegenüberstellung 10-tägig summierter Modellergebnisse ET _{act} und pflanzenspezifischer ET _{crop} für Weizen (a und b) und Baumwolle (c und d) der Jahre 2004 und 2005.	147
Abbildung 6-12:	Häufigkeitsverteilungen der Modellergebnisse der saisonalen ET _{act} -Mengen im Untersuchungsraum 2004 und 2005.	152
Abbildung 6-13:	Räumliche Muster der modellierten saisonalen tatsächlichen Evapotranspiration.	153
Abbildung 6-14:	Tatsächliche Evapotranspiration in Khorezm, Mittel der 15-Tagessummen der generalisierten landwirtschaftlichen Saisonabschnitte.....	155

Kapitel 7:

Abbildung 7-1:	Hydrologische Grenzen der Teilbewässerungssysteme Khorezms.....	162
Abbildung 7-2:	Einzugsgebiete der großen Abwasser-Drainage-Systeme in Khorezm.	164
Abbildung 7-3:	Klassifizierung der Water Users Associations nach ihrem mittleren Abstand zu den Einlassbauwerken in Kanalkilometer.	166
Abbildung 7-4:	Das Messnetz zur Erfassung der Kanalwasserflüsse in Khorezm und seine hydrologischen Grenzen.	167
Abbildung 7-5:	Die Messstellen zur Bestimmung der Durchflussmengen im Palvan-Gazavat-Subsystem sowie die hydrologischen Grenzen.	169
Abbildung 7-6:	Messstandorte und hydrologische Grenzen der Teilbewässerungssysteme von Khorezm.....	170
Abbildung 7-7:	Beziehung zwischen dem Flussquerschnitt und dem Pegelschlüssel.	171
Abbildung 7-8:	Pegeldatenlogger mit Druckausgleichskabel.	172

Abbildung 7-9: Sowjetische Infrastruktur zur Installation von Schwimmpegeln (Turangi Saka, links) und zur Komplettierung des Messnetzes aus dem Projektbudget im Gelände errichtete Messstellen (Urgench Arna, rechts).	173
Abbildung 7-10: Prinzip der Durchflussbestimmung über die Messung der Strömungsgeschwindigkeit.	174
Abbildung 7-11: Hydrometrischer Messflügel, befestigt an einer mit metrischer Skalierung versehenen Stange für die Höhenmessung.	175
Abbildung 7-12: Vorbereitung (links) und Durchführung (rechts) einer Abflussmessung.	175
Abbildung 7-13: Schlüsselkurven, ermittelt aus Durchfluss- und Pegelmessungen an den Messstationen der Kanäle Tash Saka und Divankulsky-Kollektor.	177
Abbildung 7-14: Streudiagramm der Durchfluss- und Pegelmessungen.	178
Abbildung 7-15: Exemplarisch ausgewählte Abflussganglinien des Tash Saka (Bewässerung, oben) und des Divankulsky-Kollektors (Drainage, unten).	179
Abbildung 7-16: Schlüsselkurve, erstellt aus den Pegelständen des Klichbay Arna und den Summen des Durchflusses aus Turangi Saka und Klichbay Arna.	180
Abbildung 7-17: Ermittlung des täglichen Zuflusses des Klichnyasbay-System.	181
Abbildung 7-18: Tägliche Wasserentnahme und abgeführte Drainagemengen in Khorezm.	182
Abbildung 7-19: Tägliche Wasserentnahme und abgeführte Drainagemengen im Palvan-Gazavat-System, Sommersaison 2005.	182
Abbildung 7-20: Vergleich der offiziellen Statistiken des ICWC (SIC-ICWC, 2006) für die Region Khorezm mit den im Rahmen dieser Arbeit erzielten Messergebnissen.	184

Kapitel 8:

Abbildung 8-1: Räumliche Verteilung der landwirtschaftlichen Nutzung hinsichtlich des mittleren Abstands der beobachteten Fläche (WUA) im Bewässerungssystem von Khorezm.	189
Abbildung 8-2: Mittelwerte der modellierten ET_{act} für WUAs in unterschiedlicher Lage im Kanalsystem (Abstand zum Einlasspunkt in Kanalkilometern).	191
Abbildung 8-3: Monatswerte der gemessenen Wasserentnahme, der Drainagemengen und der Evapotranspiration sowie berechnete Veränderungen der Wasserspeicher (Bodenfeuchte und Grundwasser) für die Vegetationsperiode 2005 [m ³ /ha].	198
Abbildung 8-4: Monatliche Werte der Performanceindikatoren (Säulen: depleted fraction und Linien: Ratio „Drainage/Wasserentnahme“) in den beprobten Subsystemen von Khorezm in der Sommersaison 2005.	199
Abbildung 8-5: Detailanalyse der Monatswerte des Performanceindikators <i>depleted fraction</i>	200

Anhang:

Abbildung II-1: Drei einzelne Schwingungen mit den Frequenzen 1 (rot), 2 (grün), und 3 (blau). Phase und Amplitude sind für die rote Linie, also eine einfache Schwingung eingetragen.	22
Abbildung AII-2: Möglichkeiten zur Trennung eines zweidimensionalen Merkmalsraum mit zwei Klassen durch drei Diskriminanzfunktionen.	23

Tabellenverzeichnis

Kapitel 2:

Tabelle 2-1:	Indikatoren zur Land- und Wassernutzung in Khorezm nach der Unabhängigkeit Usbekistans im September 1991.	19
---------------------	--	-----------

Kapitel 3:

Tabelle 3-1:	Fernerkundliche und meteorologische Eingangsgrößen zur Modellierung der tatsächlichen Evapotranspiration mit SEBAL.	38
---------------------	--	-----------

Kapitel 4:

Tabelle 4-1:	Kurzprofile der im Thermalen Infrarot aufzeichnenden Sensoren.	56
Tabelle 4-2:	Wellenlängenbereiche und räumliche Auflösung der Bänder von MODIS.	59
Tabelle 4-3:	Eigenschaften der ASTER Aufnahmeinstrumente.	61
Tabelle 4-4:	Verwendete MODIS Produkte.	70
Tabelle 4-5:	Ergebnisse der Lagekorrekturen für die ASTER-Daten.	73
Tabelle 4-6:	Layerspezifische Einstellungen zur MODIS-Qualitätsanalyse und zur Interpolation.	76

Kapitel 5:

Tabelle 5-1:	Anzahl der erhobenen Trainings- und Validierungsgebiete pro Klasse.	94
Tabelle 5-2:	Übersicht über die berechneten Merkmale aus den NDVI Zeitserien.	99
Tabelle 5-3:	Beispiel für die klassen- und merkmalsbezogene Evaluierung des <i>density slice</i> für zwei Merkmale.	104
Tabelle 5-4:	Ergebnis einer Präevaluierung der Einzelverfahren und des gesamten Klassifikationsverfahrens am Beispiel der Trainingsgebiete für das Untersuchungsgebiet Khorezm (2004 und 2005).	109
Tabelle 5-5:	Klassenbezogene Aufschlüsselung der Klassifikationsgenauigkeiten 2004.	116
Tabelle 5-6:	Klassenbezogene Aufschlüsselung der Klassifikationsgenauigkeiten 2005.	117
Tabelle 5-7:	Flächenanteile der Ergebnisse der Landnutzungsklassifikation von Khorezm für die Jahre 2004 und 2005.	119

Kapitel 6:

Tabelle 6-1:	Zuordnung der eingesetzten MODIS-Parameter zu den SEBAL-Modulen.	124
Tabelle 6-2:	Dominierende landwirtschaftliche Nutzungen, aufgegliedert in Saisonabschnitte.	127
Tabelle 6-3:	Anzahl homogener Pixel (in der dominanten Landnutzungs-kategorie).	130
Tabelle 6-4:	Rauhigkeitslängen für den Impuls (z_{0m}).	131

Tabelle 6-5:	Kriterien und Rechenregeln zur automatisierten Bestimmung der Ankerpunkte für SEBAL/METRIC.	134
Tabelle 6-6:	Gegenüberstellung der MODIS-Albedo mit Literaturwerten für verschiedene Landnutzungsklassen.	136
Tabelle 6-7:	Wachstumsstadien und <i>crop coefficients</i> für Winterweizen, Reis und Baumwolle in Khorezm.....	145
Tabelle 6-8:	Zeitliche Zuordnungen des Beginns der vier Wachstumsphasen von Reis, Baumwolle und Winterweizen in Khorezm gemäß unterschiedlicher Quellen.	146
Tabelle 6-9:	Sortenspezifische Vergleichswerte von ET_{crop} und ET_{act} für die Gesamtsaison.	148
Tabelle 6-10:	Deskriptive Statistiken der Modellierung der saisonalen ET_{act} [mm] für die Jahre 2004 und 2005, integriert über das Bewässerungsgebiet von Khorezm.	151

Kapitel 8:

Tabelle 8-1:	Wasserentnahme und Landnutzung in den Teilbewässerungssystemen von Khorezm.	194
Tabelle 8-2:	Komponenten der Wasserbilanz sowie die Indikatoren <i>depleted fraction</i> und Ratio „Drainage/Wasserentnahme“ der drei Untersuchungsräume und auf das Gesamtbewässerungssystem extrapolierte Ergebnisse.....	196

Anhang:

Tabelle AIII-1:	Höherwertige MODLand MODIS Produkte (MODLAND, 2006).....	25
Tabelle AIII-2:	Ergebnisse der raumzeitlichen Auswertung der MODIS-Qualitätsflags (QA-SDS) der verwendeten MOD43-Daten für 2004 und 2005.....	26
Tabelle AIII-3:	Ergebnisse der raumzeitlichen Auswertung der MODIS-Qualitätsflags (QA-SDS) der verwendeten MOD13-Daten für 2004 und 2005.....	26
Tabelle AIII-4:	Ergebnisse der raumzeitlichen Auswertung der MODIS-Qualitätsflags (QA-SDS) der verwendeten MOD15-Daten für 2004 und 2005.....	27
Tabelle AIII-5:	Beispiel für die Segmentstatistiken der NDVI Jahresgänge.	27
Tabelle AIII-6:	Beispiel für die Segmentstatistiken zweier unimodaler NDVI Jahresgänge.	28
Tabelle AIII-7:	Der Merkmalsraum M2_A für die Jahre 2004 und 2005.	29
Tabelle AIII-8:	Der Merkmalsraum M2_B für die Jahre 2004 und 2005.	29
Tabelle AIII-9:	Der Merkmalsraum M2_C für die Jahre 2004 und 2005.	30
Tabelle AIII-10:	Der Merkmalsraum M4_A für die Jahre 2004 und 2005.....	30
Tabelle AIII-11:	Der Merkmalsraum M4_B für die Jahre 2004 und 2005.	31
Tabelle AIII-12:	Auflistung aller für das Klassifikationsverfahren verwendeter Merkmale, die durch die Klassifikationsbäume sowohl für 2004 als auch für 2005 ausgewählt wurden..	31
Tabelle AIII-13:	Auflistung aller Merkmale, die bezogen auf die Anwendung für Khorezm 2004 einmalig zur Klassifikation eingesetzt wurden.	32
Tabelle AIII-14:	Auflistung aller Merkmale, die bezogen auf die Anwendung für Khorezm 2005 einmalig zur Klassifikation eingesetzt wurden.	32
Tabelle AIII-15:	Kreuztabelle zur Genauigkeitsabschätzung der Landnutzungsklassifikation 2004..	33
Tabelle AIII-16:	Kreuztabelle zur Genauigkeitsabschätzung der Landnutzungsklassifikation 2005..	33

Abkürzungsverzeichnis

6S	Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum radiative code
α	Albedo
AATSR	Advanced Along-Track Scanning Radiometer
ADB	Asian Development Bank
AG	Arbeitsgemeinschaft
ASBP	Aral Sea Basin Program
ASCE-EWRI	American Society for Civil Engineers - Environmental & Water Resources Institute
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ATBD	The Algorithm Theoretical Basis Documents
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BOA	Bottom of Atmosphere
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
BUIS	Obere Bewässerungsmanagementbehörde
BWO	Basin Water Organization
CERES	Clouds' and Earth's Radiant Energy System
CIDA	Canadian International Development Agency
CMG	Climate Model Grid
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CV-MVC	Constraint View angle Maximum Value Compositing
DFD	Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum
DFT	Discrete Fourier Transform
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
DOY	Day Of Year
ϵ	Emissivity
EADS	European Aeronautic Defence and Space Company
EOS	Earth Observing System
EOS-AM1	Earth Observing System Ante Meridiem 1
EOS-PM1	Earth Observing System Post Meridiem 1
ET	Evapotranspiration
ET_{act}	Tatsächliche Evapotranspiration
ET_{crop}	Pflanzenspezifische potenzielle Evapotranspiration
ET_{pot}	Potenzielle Evapotranspiration
ET_{ref}	Referenzevapotranspiration (ASCE-EWRI)
ETM(+)	Enhanced Thematic Mapper (+)
ETOPO5	Earth Topography with a 5 minute resolution
EU	European Union
EVI	Enhanced Vegetation Index
FAO	Food and Agriculture Organization

FAPAR	Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation
FFT	Fast Fourier Transform
G	Bodenwärmefluss
GDAS	Global Data Assimilation System
GEF	Global Environment Facility
GIS	Geographisches Informationssystem
GMT	Greenwich Mean Time
GOME	Global Ozone Monitoring Experiment
H	Fühlbarer Wärmefluss
ICG	International Crisis Group
ICWC	Interstate Commission for Water Coordination
IFAS	International Fund of the Aral Sea
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme
IRS	Indian Remote Sensing Satellite
IWMI	International Water Management Institute
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LAI	Leaf Area Index
LPDAAC	Land Processes Distributed Active Archive Center
LST	Land Surface Temperature
LUT	Look-Up-Table
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry
METRIC	Mapping Evapotranspiration at high Resolution and with Internalized Calibration
MISR	Multi-angle Imaging SpectroRadiometer
MMS	Ministry of Macroeconomics and Statistics
MODIS	Moderate Resolution Image Spectroradiometer
MODLand	MODIS land (team, product)
MOPITT	Measurements of Pollution in the Troposphere
MSG	Meteosat Second Generation
MSU-SK	Multispectral Scanners with Conical Scanning
MVC	Maximum Value Compositing
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Nahes Infrarot (near infrared)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NPOESS	National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System
NRL	Naval Research Laboratory
OBLSTAT	Statistics of the Oblast (usb. Landesstatistik)
OGME	Hydromelioration expedition of the Oblast
PAR	Photosynthetically Active Radiation
QA-SDS	Quality Assessment Science Data Sets
R _n	Strahlungsbilanz
RESEP	Regional Evapotranspiration trough Surface Energy Partitioning

RMSE	Root Mean Square Error
RPART	Recursive Partitioning and Regression Trees
SANIIRI	Central Asian Research Institute of Irrigation
SDC	Swiss Agency for Development and Cooperation
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SEBS	Surface Energy Balance System
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager
SIC-ICWC	Scientific Information Center of the Interstate Commission for Water Coordination
SPECA	Special Program for the Economies of Central Asia
SPOT	Système Probatoire d'Observation de la Terre
SWIR	Kurzwelleninfrarot (Short Wave InfraRed)
TACIS	Technical Aid to the Commonwealth of Independent States
TIR	Thermales Infrarot (Thermal InfraRed)
TIROS	Television InfraRed Observing Satellite
TiSeG	Time Series Generator
TM	Thematic Mapper
TOA	Top Of Atmosphere
TOVS	TIROS Operational Vertical Sounder
UIS	Untere Bewässerungsmanagementbehörde
UN	United Nations
UNDP	United Nations Development Programme
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
UNEP	United Nations Environment Programme
UNESCAP	United Nations Economic Commission for Asia and the Pacific
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USA	United States of America
USAID	United States Agency for International Development
USDA	United States Department of Agriculture
USGS	United States Geological Survey
VI	Vegetation Index
VIS	Sichtbares Licht (VIsible Spectra)
VNIR	Sichtbares Licht und nahes Infrarot (Visible spectra and Near InfraRed)
WHO	World Health Organization
WPF	World Population Foundation
WUA	Water Users Association
WWDR	World Water Development Report
WWF	World Wide Fund For Nature
ZEF	Zentrum für Entwicklungsforschung

1 Hinführung, wissenschaftliche Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Seit mehreren Jahrzehnten wird weltweit eine intensive Diskussion über den nachhaltigen Umgang mit Wasser als Lebensgrundlage des Menschen geführt. Der Bevölkerungsanstieg und der erhöhte Bedarf an Trinkwasser und Nahrungsmitteln führen zu wachsendem Druck auf die Ressource (UNESCO, 2006). Dabei steht die Bewässerungslandwirtschaft auf der Liste der Konsumenten globaler Süßwasservorkommen mit einem Anteil von etwa 70 % an erster Stelle (FAO, 2003). Die Landwirtschaft unter künstlicher Bewässerung ist aber die wichtigste Einkommensquelle der ländlichen Bevölkerung in semi-ariden und ariden Gebieten. Ist in solchen Bewässerungsregionen ein erhöhter Anstieg der Bevölkerung zu verzeichnen, sind drastische Steigerungen des Wasserbedarfs die Folge. Erreichen derartige Konstellationen ihre Kapazitätsgrenzen, verursachen sie nicht selten erhebliche **ökologische und ökonomische Probleme** (UNDP, 1998) – so auch **in Mittelasien**¹.

In Mittelasien sind besonders die intensiv landwirtschaftlich genutzten Gebiete an den großen Wasseradern, dem Amu Darya und Syr Darya, infolge eines unangepassten Land- und Wassermanagements in den letzten 50 Jahren stark unter Druck geraten. Initiiert unter sowjetischer Vorherrschaft wurde in Mittelasien die bewässerte Fläche zwischen den Jahren 1950 und 2000 von 4,51 auf 7,99 Millionen ha vergrößert (ROLL et al., 2006). Gleichzeitig war in derselben Region eine Verdreifachung der Bevölkerung von 14,1 auf 41,5 Millionen Einwohner zu verzeichnen. Der Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche pro Kopf sank von 1950 bis 1990 von 0,42 ha auf 0,23 ha (IVANOV et al., 1996). Von den durchschnittlich 116 km³ Wasser, die im Einzugsgebiet des Aralsees jährlich verfügbar sind (GIESE, 1997), wurden im Jahr 1960 56 km³

¹ Der im russischen Sprachraum definierte Begriff Mittelasien umfasst die fünf Staaten Kasachstan, Usbekistan, Kirgisistan, Tadschikistan und Turkmenistan. Zentralasien ist geographisch weiter gefasst, wird häufig aber auch lokal synonym für die russischen Nachfolgestaaten verwendet. Eine einheitliche Regelung gibt es nicht (TIETZE, 1968-1972).

zur landwirtschaftlichen Bewässerung verwendet. Die 1990 erreichte Wasserentnahme von 112 km^3 verringerte sich nach der Unabhängigkeit der mittelasiatischen Länder nach den offiziellen Statistiken wieder leicht auf 95 km^3 (ROLL et al., 2006). Die Frischwasserressourcen waren in Mittelasien also schon 1990 fast vollständig ausgeschöpft, während die Bevölkerungsentwicklung ihren steigenden Trend beibehielt.

Über mehrere Jahrzehnte russischer Planwirtschaft hinweg wurde in Mittelasien der Bewässerungsfeldbau von Baumwolle als Monokultur betrieben und stetig ausgebaut (LÉTOLLE und MAINGUET, 1996)². Hoher Wasser-, Dünger- und Pestizideinsatz führte zu einer starken Versalzung und Belastung der Böden sowie des Drainage- und des Grundwassers (MICKLIN, 1996). Der Grundwasserflurabstand liegt in 31 % der acht Millionen ha unter zwei Metern (WORLD BANK, 1996), was zu Grundwasserbelastung sowie zu einer zunehmenden sekundären Versalzung der Böden und letztendlich zu erheblichen Ertragseinbußen in der Region führte (LÉTOLLE und MAINGUET, 1996). Zur Auswaschung des Salzes aus den Böden sind je nach Salzbelastung nach einer Bewässerungssaison mehrere Flutungen der Felder mit Frischwasser erforderlich. Werden bereits Wassermengen von teilweise über $11.900 \text{ m}^3/\text{ha}$ zum Anbau von Baumwolle benötigt (RESSL, 1999), kann in den betroffenen Gebieten durch den zusätzlichen Bedarf zur Auswaschung ein Gesamtwasserbedarf im Jahr von über $20.000 \text{ m}^3/\text{ha}$ erreicht werden (MURRAY-RUST et al., 2003). Für das Gesamteinzugsgebiet des Amu Darya standen dagegen um das Jahr 2000 lediglich $11.850 \text{ m}^3/\text{ha}$ zur Verfügung (ROLL et al., 2006), wobei ein Teil des Wasserbedarfs durch mehrfache Nutzung gedeckt wird.

Der steigende Wasserbedarf in den Landwirtschaftsgebieten Mittelasiens führte zu räumlichen Disparitäten der Wasserverfügbarkeit, wobei die Unterläufe der Flüsse Amu Darya und Syr Darya von den negativen Entwicklungen am stärksten betroffen sind (UNESCO, 2006). So sind die Bewässerungsgebiete in den Verwaltungseinheiten Khorezm und Karakalpakistan (Usbekistan), Tashauz (Turkmenistan) sowie Kyzyl-Orda (Kasachstan) hinsichtlich der Wasserverfügbarkeit und -qualität extrem abhängig vom Wasserverbrauch und dem Verschmutzungsgrad im Oberlauf (MICKLIN, 1996; IVANOV et al., 1996; RESSL, 1999). Weiterhin birgt gerade im Unterlauf die hohe zeitliche Variabilität der Wasserverfügbarkeit Risiken für die Produktivität der Landwirtschaft (DUKHOVNY et al., 2003)³. Kurzfristig kann dies in Jahren mit halbiertem Wasserzufuhr zu Dürren mit hohen Ertragseinbußen führen. Vor allem aber sind diese Gebiete durch die nicht nachhaltige Wasserbewirtschaftung im Oberlauf der Gefahr permanenter ökologischer Schäden und ökonomischer Probleme ausgesetzt (KLÖTZLI, 1997; VLEK et al., 2001).

² LÉTOLLE and MAINGUET (1996) sei als Überblicksliteratur stellvertretend für die Vielzahl existierender Forschungsarbeiten zu diesem Thema genannt.

³ Aus den statistischen Mittelwerten ist dieses Problem nicht abzulesen.

Die prominenteste Folge der intensiven Wasserentnahme aus den Flüssen in Mittelasien ist der seit den 1960er Jahren beobachtete Schrumpfungsprozess des Aralsees (MICKLIN, 1991; DECH, 1997). RESSL (1999) modellierte Verluste der Wasseroberfläche des einstmals viertgrößten Binnensees der Welt von 59 % seit 1960, wobei sich im gleichen Zeitraum das Volumen um 83 % verringerte. Die Prognosen für die fortschreitende Schrumpfung des Aralsees für das Jahr 2010 (DECH und RESSL, 1993) wurden bereits 2002 erreicht und von RESSL und MICKLIN (2004) angepasst. Dem enormen Rückgang der Seefläche wird eine Reihe von Effekten zugesprochen, die die Situation an den oben erwähnten Unterläufen des Amu Darya und Syr Darya noch verschärfen. Insbesondere eine Verstärkung des kontinentalen Klimas infolge des abnehmenden maritimen Einflusses des Aralsees wird dabei kontrovers diskutiert (vergleiche hierzu DUKHOVNY, 1996 und IVANOV et al., 1996). Unabhängig von der Ursache wurde eine Verkürzung der Periode frostfreier Tage (und damit der Vegetationsperiode) im Unterlauf des Amu Darya aufgezeichnet (VINOGRADOV und LANGFORD, 2001). Weniger umstritten sind die Transporte von Salz und Staub aus den trockengefallenen Gebieten (Aral Kum) in die stark bevölkerten Bewässerungsgebiete, denen die Zunahme von Lungenkrankheiten wie Tuberkulose (vor allem bei Kindern) zugesprochen wird (MICKLIN, 1996)⁴.

Die komplexe Wasserproblematik Mittelasiens wurde insgesamt seit Mitte der 1980er Jahre von Politik und Wissenschaft verstärkt wahrgenommen. Dies dokumentiert sich in internationalem Engagement der Vereinten Nationen (UN, UNDP, UNEP, UNESCO, UNECE, UNESCAP), der Weltbank, der Asiatischen Entwicklungsbank (ADB) und der Europäischen Union (EU) sowie nationaler Einrichtungen wie Agenturen für Internationale Entwicklung der USA (USAID), Kanadas (CIDA) und der Schweiz (SDC). Die Ausrichtungen und Verflechtungen verschiedener daraus resultierender Programme und Projekte werden bei MCCAULEY (2004) detailliert beschrieben.

Zwischenstaatliche und regionale Wasserverteilung, Verbesserung der Wasserqualität, der Bewässerungstechniken und der Infrastruktur sowie der Lebens- und Wirtschaftsbedingungen in den Bewässerungsgebieten sind die Inhalte des *Aral Sea Basin Program* (ASBP) der UNEP und der *Global Environment Facility* (GEF), des TACIS Programms der EU oder des *Special Program for the Economies of Central Asia* (SPECA) der UN (MCCAULEY, 2004). Im hydrologischen Sektor werden diese Projekte vor allem in Kooperation mit dem im Rahmen des ASPB gegründeten *International Fund of the Aral Sea* (IFAS) durchgeführt. IFAS setzt sich aus den mittelasiatischen Staaten zusammen und ist zuständig für die Programmkoordination vor Ort und die Mittelverteilung. Das exekutive Komitee des IFAS arbeitet hinsichtlich der Umsetzung mit der bereits 1992 eingeführten *Interstate Commission for Water Coordination* (ICWC) zusammen. Diese regelt die

⁴ Weitere schwere gesundheitliche Probleme werden vor allem durch herbizid- und pestizidbelastetes Trinkwasser ausgelöst (HERBST, 2005).

Wasserverteilung in den Anrainerländern des Syr Darya und Amu Darya mit Ausnahme von Afghanistan (GEF, 1998).

In diesen Programmen und Projekten zur Verbesserung der ökologischen und ökonomischen Situation wurden verschiedene Lösungsansätze von technokratischen Großvorhaben bis hin zu integrierten Veränderungsvorschlägen zur nachhaltigen Land- und Wasserwirtschaft entwickelt (LÉTOLLE und MAINGUET, 1996; GIESE et al., 2004)⁵. Ein oft genannter Vorschlag ist die Ersetzung des wasserintensiven Reis- und Baumwollanbaus durch ähnlich profitable Kulturen oder deren Verlagerung in wassersichere Abschnitte der Region (vergleiche beispielsweise RESSL, 1999). Ebenfalls wurde die Verminderung der Anbaufläche zur effizienten Bewirtschaftung weniger großer Flächen mit höheren Erträgen und Qualitäten vorgeschlagen (GIESE, 1997). Weiterhin sollen Optimierungen der Bewässerungspraxis auf Feldebene oder die Korrektur von Düngemittelpfehlungen helfen, Effizienz und Produktivität der Landwirtschaft auch mittelfristig zu erhöhen (VLEK et al., 2001).

Viele großmaßstäbliche Lösungsansätze scheiterten an politischen Umstrukturierungen, Geldmangel, hohen bürokratischen Hürden oder am Unwillen der postsowjetischen Länder, miteinander zu kooperieren (ICG, 2002). Die Reißbrettplanung selbst ignorierte häufig regionale Besonderheiten und ging an gewachsenen landwirtschaftlichen Strukturen vorbei. Auf lokaler Ebene konnten aber auch durch Training in den Bereichen Farm-, Land- und Wassermanagement in vielen Projekten Verbesserungen erreicht werden (vergleiche MARTIUS et al., 2004; NOBLE et al., 2006).

Innerhalb der genannten Fragestellungen bezeichnen die meisten der genannten Programme und Projekte die **Umstrukturierung der Verteilung und Nutzung von Wasser** als eine **zentrale Herausforderung Mittelasiens** (ICG, 2002, DUKHOVNY et al., 2004). Diese Fragestellung kann an alle Hierarchieebenen des Wassermanagements adressiert werden. Zentrale Themen sind die Sicherstellung des Wasserbedarfs, der Erhalt und die Bewirtschaftung der Kanalinfrastruktur (Wasserverteilung) sowie deren Optimierung (Reduzierung der Kanalverluste durch Versickerung, Steuerung des Wasserflusses). Neben der Überarbeitung des Verteilungsschlüssels werden mehr Transparenz, Kontrolle und auch Korrekturmöglichkeiten bei der Wasserverteilung gefordert (ICG, 2002; DUKHOVNY et al., 2004; UNECE/UNESCAP, 2004; ABDULLAEV et al., 2005). Dabei wird unter anderem der dauerhaften Erfassung und Überwachung des Wasserverteilungsprozesses (Monitoring) eine wichtige Rolle zur Sicherstellung der Systemfunktionalität und -operation in Bewässerungsgebieten und zum Erreichen von

⁵ Seit drei Jahrzehnten existieren beispielsweise Ideen, Wasser aus Sibirien, der Wolgaregion oder aus dem Kaspischen Meer zuzuführen, um den Wasserbedarf der Region zu decken und die Wasserbilanz des Aralsees auszugleichen.

Nachhaltigkeitszielen eingeräumt (PEREIRA et al., 2002), deren Definition in Mittelasien als dringlich einzustufen ist (DUKHOVNY et al., 2004).

Das Monitoring von Bewässerungssystemen basiert auf der ständigen Erhebung und der diagnostischen Einschätzung ökologischer und sozioökonomischer Variablen, welche die Wasserverteilung und die Wassernutzung im Untersuchungsgebiet beschreiben (BOS et al., 2005). Damit erhalten die Betreiber und Nutzer eines Bewässerungssystems neben einem systemweiten Überblick auch die Möglichkeit, Abweichungen des laufenden Betriebs von der geplanten Wasserverteilung und Wassernutzung zu quantifizieren, zu lokalisieren und ergriffene Maßnahmen auf ihren Erfolg zu untersuchen. Wichtige methodische Elemente sind die Bilanzierungen der Wasserflüsse und die Auswertung sogenannter Performanceindikatoren, die zur Kontrolle der Einhaltung von Prinzipien der Wasserverteilung in einem Bewässerungssystem eingesetzt werden (BOS et al., 2005).

In Mittelasien werden auf überregionaler Ebene Wasserbilanzen gebildet, Performanceindikatoren aus den statistischen Erhebungen und Messergebnissen der regionalen Wasseradministrationen zusammengestellt (ABDULLAEV, 2003; MURRAY-RUST et al., 2003) und Modelle der Wasserverteilung errechnet (MCKINNEY und CAI, 1997; DUKHOVNY et al., 2004). Allerdings werden die für solche wissenschaftlichen Auswertungen eingesetzten Daten in Bezug auf Exaktheit, Glaubwürdigkeit und Konsistenz in Frage gestellt (CHEMIN et al., 2004; MÜLLER, 2006; WEGERICHT, 2006).

Die Ursachen für die **Unwägbarkeiten in den vorhandenen Daten** reichen von der finanziellen und materiellen Ausstattung des datenerhebenden Personals über Übersetzungsprobleme bis hin zu gesellschaftlichen oder wirtschaftlichen Barrieren in der Zusammenarbeit mit den lokalen Partnern (FILCHAKOVA, 2005; WEGERICHT, 2006). Im Bereich des Wassermanagements werden diese Ursachen in den letzten Jahren interessanterweise in Veröffentlichungen mittelasiatischer Wissenschaftler konkretisiert. Ungenaue Wasserbilanzen werden nicht alleine den Kanalverlusten (durch Versickerung und Evapotranspiration) zugeschrieben, sondern die Ursachen seien auch in „*unaccounted diversions*“ oder „*local and sectoral egoism*“ zu finden (DUKHOVNY et al., 2003; DUKHOVNY et al., 2004)⁶. Es wird die Transparenz der Wasserverteilung gefordert, um auch „*less possibility for corruption and public interests neglecting*“ zu erreichen (DUKHOVNY et al., 2004).

Potenziale zur Bestimmung flächendeckender objektiver Daten **für ein Monitoring** großer Bewässerungssysteme liegen vor allem in der **Methodik der Fernerkundung** in Kombination

⁶ Einschränkung muss hinzugefügt werden, dass diese Probleme der *unaccounted diversions* insbesondere in der Dürreperiode 2000-2001 gesehen wurden (DUKHOVNY et al., 2004). Dennoch: Die Autoren der zitierten Artikel sind leitende Wissenschaftler des *Scientific Information Center* des ICWC Mittelasiens.

mit den **Analysemöglichkeiten Geographischer Informationssysteme** (DECH, 1997; BASTIAANSEN und BOS, 1999; SCHMUGGE et al., 2002; BOS et al., 2005). In verschiedenen Studien wurde der vielfältige Nutzen fernerkundlicher Ansätze in den Bewässerungsgebieten Mittelasiens gezeigt (DECH und RESSL, 1993; PTICHNIKOV, 1996; RESSL und DECH, 1997; RESSL et al., 1998; RESSL, 1999; EL MAGD und TANTON, 2003; EL MAGD und TANTON, 2005; NEZLIN et al., 2005; RÜCKER und CONRAD, 2003; SCHWEITZER et al., 2004; CONRAD et al., 2004; CONRAD et al., 2004b). Schwerpunkte der genannten Arbeiten liegen vor allem in der Ersterfassung der räumlichen Verteilung der Land- und Wassernutzung in unterschiedlichen Regionen Mittelasiens. Teilweise wurden diese Informationen dann in Geographischen Informationssystemen zusammengeführt und umfassend ausgewertet (RESSL et al., 1998).

Gerade seit den letzten zehn Jahren erlauben neuere Sensorsysteme und methodische Weiterentwicklungen eine kontinuierliche fernerkundungsbasierte Ableitung verschiedener hydrologischer Parameter (SCHMUGGE et al., 2002; BOS et al., 2005). Besonders die fernerkundungsbasiert modellierte tatsächliche Evapotranspiration eignet sich zur Bildung flächenhafter Indikatoren für die Bewertung der Effizienz und Produktivität der Bewässerungssysteme sowie für Nachhaltigkeitsstudien (BASTIAANSEN und BOS, 1999). Durch die Kombination mit weiteren hydrologischen Daten können auf diese Weise Wasserbilanzen und weitere Performanceindikatoren für Bewässerungssysteme berechnet werden (BOS et al., 2005). Die Potenziale zur Nutzung dieser objektiven flächenhaften Informationsebenen für das Wassermanagement Mittelasiens wurden erst in Ansätzen erschlossen (CHEMIN et al., 2004).

Eine der von Wasserunsicherheit betroffenen Regionen im Unterlauf des Amu Darya ist **die usbekische Verwaltungseinheit Khorezm**, wo jährlich über 230.000 ha Land zur landwirtschaftlichen Produktion bewässert werden. Dort werden im Wesentlichen Baumwolle, Reis und Winterweizen angebaut (MÜLLER, 2006). Die ökologischen Rahmenbedingungen sind aufgrund der Salzbelastung des hoch stehenden Grundwassers und der Böden als ungünstig einzustufen (IBRAKHIMOV, 2005; AKRAMKANOV, 2005). Die Infrastruktur des 16.233 km langen Kanalsystems ist marode (VLEK et al., 2003)⁷: Im überwiegend unbefestigten Bewässerungsnetz sind bis zu 40 % Wasserverluste durch Versickerung zu verzeichnen (MARTIUS et al., 2004). Die hieraus resultierenden ökonomischen Probleme sind groß (MARTIUS et al., 2006). Im dominierenden landwirtschaftlichen Sektor herrschen Planungsunsicherheiten hinsichtlich der verfügbaren Wassermengen (WEGERICHT, 2006), was nicht zuletzt in längeren Dürreperioden wie

⁷ Die Unterstützung zum Erhalt und zur Anpassung der Be- und Entwässerungskanäle seitens des Staates Usbekistan wird auf 50 Prozent des tatsächlichen Bedarfs eingeschätzt (FILCHAKOVA, 2005).

2000 und 2001 zu einschneidenden Ertrags- und damit Einkommensminderungen führt (FAO/WPF, 2000)⁸.

Das Wassermanagement in Khorezm ist zwar offensichtlich über die Einteilung der Agrarfläche in sogenannte Hydromodule klar geregelt, aber dennoch sind Wasserverteilung und Wasserverbrauch in Khorezm nicht transparent. Regionale Disparitäten und Abweichungen von den Grenzwerten der Wasserentnahme werden in Gesprächen bestätigt, im Gelände deutlich und in offiziellen statistischen Daten auch teilweise sichtbar. Sie sind jedoch nicht eindeutig quantifizierbar, da wie in ganz Mittelasien auch in Khorezm die Datenlage auf dem hydrologischen Sektor diffus erscheint: Bei regionalen Analysen in Khorezm konnte die Inkonsistenz unterschiedlicher Quellen hydrologischer Daten aufgedeckt werden (MÜLLER, 2006). Dazu mag beitragen, dass die infrastrukturelle Ausstattung zur hydrologischen Datenerfassung innerhalb der Verwaltungseinheit variiert und sich insbesondere nach der Unabhängigkeit Usbekistans verschlechtert hat (WEGERICHT, 2006). Es ist daher anzunehmen, dass sich die erwähnten Schwierigkeiten mit der Wasserverteilung auf den höheren Verwaltungsebenen bis nach Khorezm fortsetzen.

Die Region Khorezm ist im Fokus des deutsch-usbekischen Khorezm-Projekts des Zentrums für Entwicklungsforschung (ZEF), in dessen Rahmen diese Dissertation erstellt wurde. In diesem Projekt werden Forschungsarbeiten im ökologischen, ökonomischen und legal-administrativen wie sozialen Sektor durchgeführt. Damit sollen Lösungsansätze für den nachhaltigen Umgang mit den Ressourcen und zur Verbesserung der ökonomischen Situation in der Region integrativ erarbeitet und konkrete kleinräumige und regionale Implementierungen vor Ort möglich gemacht werden (VLEK et al., 2001; VLEK et al., 2003; MARTIUS et al., 2006). Das ZEF-Projekt ist gleichzeitig auch Fortführung der am Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) begonnenen Arbeiten im GIS- und Fernerkundungsbereich, die den Schrumpfungsprozess des Aralsees sowie die ökologischen Auswirkungen in den Bewässerungsregionen am Unterlauf des Amu Darya thematisierten (DECH und RESSL, 1993; DECH, 1997; RESSL und DECH, 1997; RESSL et al., 1998; RESSL, 1999).

⁸ Allerdings ist Khorezm durch seine relative Lage im Oberlauf des Bewässerungssystems des Amu Darya Delta den unterhalb gelegenen Regionen offensichtlich im Vorteil und kann Dürrephasen besser abfangen als beispielsweise Karakalpakstan (FAO/WPF, 2000).

1.1 Wissenschaftliche Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Dissertation verfolgt im Rahmen der Erforschung von Möglichkeiten zur Umstrukturierung der Land- und Wassernutzung in Khorezm zwei **übergeordnete Kernziele**:

1. Die Generierung von konsistenten und objektiven Daten zum Monitoring der agrarischen Landnutzung und des Wasserverbrauchs⁹ der im Unterlauf des Amu Darya gelegenen Region Khorezm
2. Die Analyse und die Bewertung des Bewässerungssystems von Khorezm hinsichtlich der Nutzung von Land und Wasser im regionalen Maßstab

Um diese Ziele zu erreichen, steht die Bestimmung flächenhafter Daten im Vordergrund, die aufzeigen,

- nach welchen zeitlichen und räumlichen Mustern der Anbau der dominierenden Feldfrüchte (Baumwolle, Weizen und Reis) in der Region Khorezm erfolgt,
- welche Wassermengen im Agrarsektor im Verlauf einer Bewässerungssaison durch die Evapotranspiration im Bewässerungssystem verbraucht werden und
- ob und nach welcher Systematik lokale Disparitäten des Wasserverbrauchs in Khorezm auftreten.

Weiterhin sollen hydrologische Daten über die saisonalen Kanalwasserflüsse in Khorezm gesammelt und mit den generierten Informationen über Landnutzung und Wasserverbrauch kombiniert werden, um

- die Funktionsweise des Bewässerungs- und Drainagesystems auf der regionalen Maßstabsebene durch die Bilanzierung der Kanalwasserflüsse und der Evapotranspiration zu erforschen,
- Schwachstellen der Land- und Wassernutzung im Bewässerungssystem zu lokalisieren,
- die Einhaltung von Grundsätzen (Gleichheit, Adäquatheit, Zuverlässigkeit) der Wasserverteilung (BOS et al., 2005) im Bewässerungssystem zu prüfen,
- zu untersuchen, ob die für viele Bewässerungssysteme typischen Unterschiede der Wasserverfügbarkeit zwischen oberen und unteren Kanalabschnitten auch in Khorezm anzutreffen sind und
- die Situation der Region Khorezm hinsichtlich der einleitend beschriebenen Wasserproblematik in Mittelasien einzuordnen.

⁹ Im Fortgang der Arbeit werden die Begriffe „Wasserverbrauch“ oder „agrarischer Wasserverbrauch“ im Sinne des Verbrauchs durch Evapotranspiration verwendet.

Abschließend soll diskutiert werden, inwieweit die flächenhaften Daten eine Basis zur Implementierung eines Monitoringsystems für die übergeordnete regionale räumliche Planung in Khorezm (und letztendlich in den Bewässerungsregionen Mittelasiens) darstellen können.

Schlüsselgrößen und gleichsam methodische Teilziele zur Klärung der zuvor aufgeführten Fragen sind die Bestimmung

- der **agrarischen Landnutzung** und
- der saisonal tatsächlich verdunsteten Wassermenge (**Evapotranspiration**).

Um eine flächenhafte Abdeckung sowie eine räumliche und zeitliche Übertragbarkeit dieser Variablen bei gleichzeitiger Minimierung von Zeit- und Kostenaufwand herzustellen, wird ein Ansatz verfolgt, der auf Methoden der Fernerkundung basiert.

Die Bestimmung der agrarischen Landnutzung soll mittels eines Verfahrens realisiert werden, das in der Lage ist, landwirtschaftliche Anbausorten und Fruchtfolgen in Khorezm aus Jahrgängen zeitlich sehr hoch aufgelöster Fernerkundungsdaten zu extrahieren. Zur Modellierung der tatsächlichen Evapotranspiration wird angestrebt, existierende fernerkundungsbasierte Modelle anzupassen, um den saisonalen Verlauf der Wasserverteilung in Khorezm nachzuzeichnen. Dafür sollen geeignete Komponenten des SEBAL-Modells (*Surface Energie Balance Algorithm for Land*; BASTIAANSEN et al., 1998) und dessen Weiterentwicklung METRIC (*Mapping Evapotranspiration at high Resolution and with Internalized Calibration*; ALLEN et al., 2005) herangezogen und integriert werden.

Grundlegender Baustein der hydrologischen Daten zur Bewertung der Land- und Wassernutzung ist ein **unabhängiger Messdatensatz der Kanalwasserflüsse** in Khorezm. Der Vergleich mit den amtlichen Statistiken ist dabei ein untergeordnetes Teilziel. Zur Datenerhebung werden der Aufbau und der Betrieb eines hydrologischen Messnetzes anvisiert, das möglichst alle Zu- und Abflüsse nach und aus Khorezm sowie verschiedene Subsysteme erfasst. Die Bestimmung von hydrologischen Grenzen der Subsysteme soll mit Routinen aus Geographischen Informationssystemen (GIS) umgesetzt werden. Die Erstellung von **Wasserbilanzen** und die Ableitung verschiedener (etablierter) **Performanceindikatoren** sind als methodische Ansätze vorgesehen, um eine Bewertung der Landnutzung, des Wasserverbrauchs und der Wasserverteilung in Khorezm zu erreichen (BOS et al., 2005).

Der Aufbau der Arbeit orientiert sich an ihren Zielsetzungen. Nach der geographischen Einführung in das Untersuchungsgebiet (Kapitel 2) werden in einem Grundlagenkapitel der Stand der Forschung sowie die theoretische Basis der im weiteren Verlauf eingesetzten Methoden und Auswertungsverfahren vorgestellt (Kapitel 3).

Dem Schwerpunkt in der fernerkundlichen Methodenentwicklung sind die darauffolgenden drei Kapitel zuzuordnen. Dabei werden zunächst die verwendeten Fernerkundungsdaten sowie die Vorverarbeitungsschritte vorgestellt (Kapitel 4). Diese bilden die Grundlage für die Klassifikation der agrarischen Landnutzung (Kapitel 5) sowie die Modellierung der saisonalen tatsächlichen Evapotranspiration (Kapitel 6).

Diese fernerkundungsbasierten Ergebnisse bilden mit den Messdaten der Kanalwasserflüsse, deren Erfassung in einem separaten Kapitel vorgestellt wird (Kapitel 7), die Grundlage für eine integrierende inhaltliche Interpretation der Situation des Bewässerungsgebiets (Kapitel 8).

Im Fazit und Ausblick werden die Ergebnisse hinsichtlich der in der Einleitung formulierten Zielsetzungen (Kapitel 1) bewertet und perspektivische Implikationen vorgeschlagen (Kapitel 9).

2 Das Untersuchungsgebiet

Im Unterlauf des Amu Darya liegt das Untersuchungsgebiet Khorezm, eine der Regionen Mittelasiens, die extremen Unwägbarkeiten der Wasserverfügbarkeit und großen Umweltproblemen ausgesetzt sind. In diesem Kapitel sollen die geographischen Merkmale des Untersuchungsgebiets, des Bewässerungsgebiets von Khorezm, herausgearbeitet werden. Neben der Literaturarbeit sind in diesem Kapitel vor allem die Beobachtungen aus Geländeerfahrungen eingegangen, die während dreier Aufenthalte (insgesamt sechs Monate) in der Region in den Jahren 2004 und 2005 gesammelt werden konnten.

Der geographischen Abgrenzung (Kapitel 2.1) und der naturgeographischen Übersicht über das Untersuchungsgebiet (Kapitel 2.2) folgen die Charakterisierungen der Verwaltungseinheit Khorezm (Kapitel 2.3) und der Landwirtschaft der Region (Kapitel 2.4). Abschließend werden das Kanalsystem von Khorezm (Bewässerung und Drainage) sowie die für den Fortgang der Arbeit relevanten, hydrologischen Subsysteme detailliert beschrieben (Kapitel 2.5).

2.1 Geographische Lage und Abgrenzung

Das Untersuchungsgebiet Khorezm liegt im Tiefland von Turan Abbildung 2-1, der reliefarmen¹⁰ und abflusslosen Senke Mittelasiens, deren Zentrum der Aralsee bildet. In den braun-grauen bis weißen Farben treten im Satellitenbild die Wüsten hervor: die Aral-Kum¹¹, der ehemalige

¹⁰ Der geologische Untergrund des Tieflands von Turan besteht aus weitgehend ungefalteten Sedimenten des Tethysmeers, die vom Spätpaläozoikum über das gesamte Mesozoikum bis ins Tertiär abgelagert wurden und ausgedehnte Plattformen bilden. Diese Plattformen werden lediglich von wenigen kleineren, weitgehend erodierten Gebirgsketten unterbrochen, die auf die Nordwärtsbewegungen der großen Kontinentalplatten (Afrika und Indien) zurückzuführen sind und demnach Auffaltungen der Sedimente des Tethysmeeres sind LÉTOLE und MAINGUET, 1996.

¹¹ Kum = Wüste (usbekisch)

Seeboden, im Süden und Südosten des Aralsees¹², weiter südöstlich die Kyzyl-Kum („Rote Wüste“) und im Westen das Ust-Urt Plateau (oder „Ust-Jurt“ Plateau). Im Norden gehen die Wüsten in die großen Steppengebiete Kasachstans über, südlich des Amu Darya schließt sich die Halbwüste Kara-Kum („Schwarze Wüste“) an.

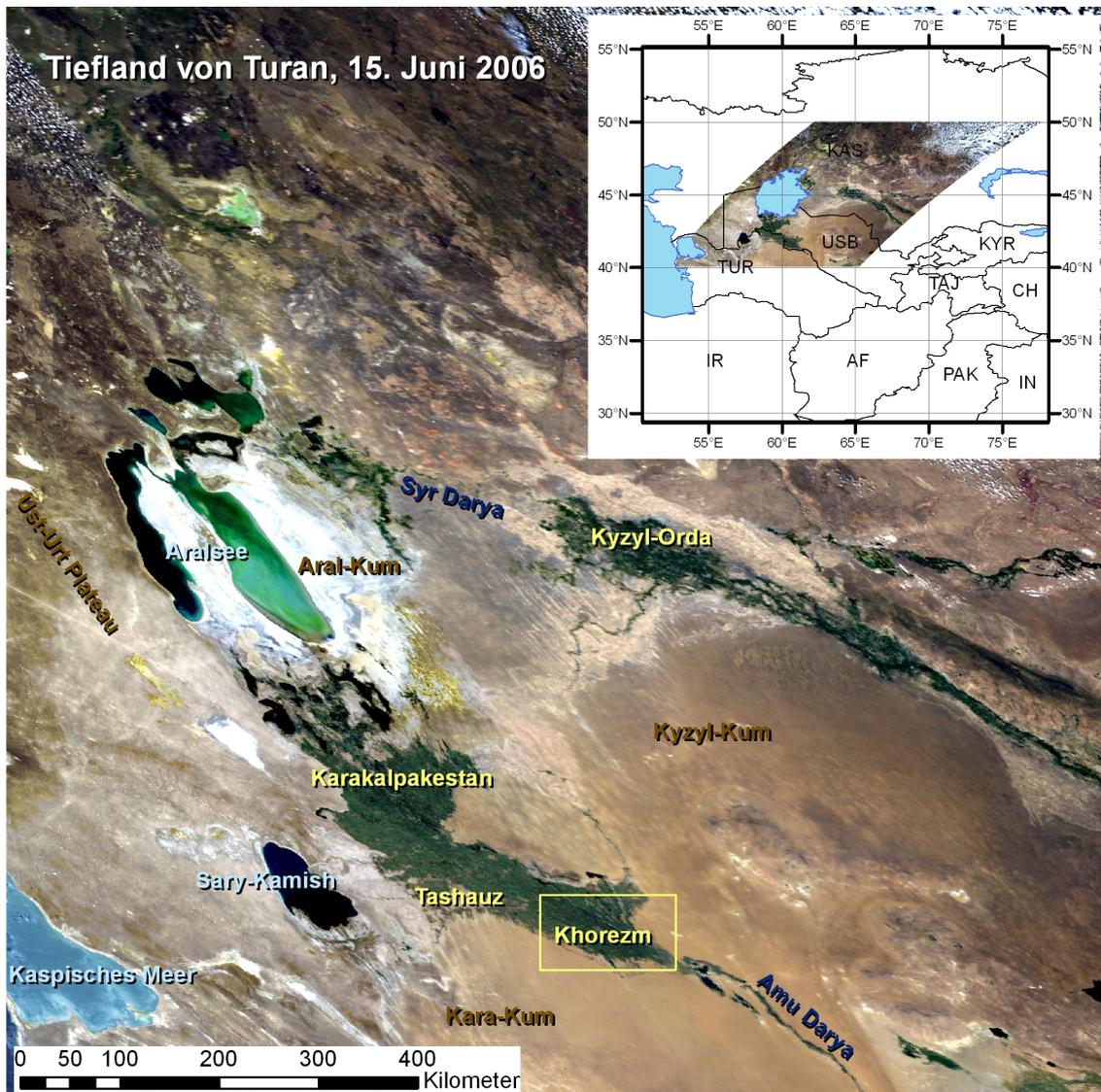


Abbildung 2-1: Das Tiefland von Turan am 15. Juni 2006, eine Aufzeichnung des Terra-MODIS Sensors, abgebildet in Echtfarben (rot: Kanal 1, grün: Kanal 4, blau: Kanal 3), das Untersuchungsgebiet Khorezm wird in gelber Farbe hervorgehoben; rechts oben zur Einordnung der Lage des Satellitenbildausschnitts die politischen Grenzen Mittelasiens.

Die gewählte Sinusoidalprojektion ist im Vergleich zu einer flächentreuen Projektion verzerrt (Beispielsweise Gauß-Krüger). Alle MODIS-Produkte, die Grundlage dieser Arbeit sind, werden in dieser Projektion vertrieben. Diese wurde nicht verändert, um eine Fehlerfortpflanzung durch Umprojizierung zu vermeiden. Daher wird dieser Darstellungstyp in allen nachfolgenden Abbildungen verwendet. Die politischen Grenzen (oben rechts) sind hingegen in geographischen Koordinaten dargestellt.

¹² Ehemalige Uferlinien werden durch geschwungene Bögen und häufige Farbwechsel gekennzeichnet, so dass sich das flächenhafte Ausmaß des anhaltenden Schrumpfungsprozesses visuell leicht erfassen lässt.

Die großen Ströme, der Syr Darya und der Amu Darya, die von Nordwesten und von Süden in den Aralsee münden, erscheinen als lineare Elemente im Satellitenbild. In ihren Mittel- und Unterläufen befinden sich große Bewässerungszonen. Sie sind durch die grünen Farben visuell meist scharfkantig gegen die Wüsten abzugrenzen und umfassen hier im Wesentlichen die Gebietseinheiten Kyzyl-Orda (Kasachstan), Karakalpakstan (Usbekistan), Tashauz (Turkmenistan) und Khorezm (Usbekistan).

Das Untersuchungsgebiet Khorezm liegt zwischen 60,05 und 61,39 Grad nördlicher Breite sowie 41,13 und 42,02 Grad östlicher Länge im Nordwesten Usbekistans (Abbildung 2-1). Die Region liegt am oberen Unterlauf des Amu Darya und ist etwa 350 km südlich vom heutigen Seeufer des Aralsees entfernt. Nach Nordwesten öffnet sich das von RESSL (1999) ausführlich charakterisierte Amu Darya Delta. Im Südwesten schließt sich die Kara-Kum an, die nordöstliche Grenze bildet der Fluss selbst¹³.

2.2 Naturgeographische Charakterisierung

Die geologischen und klimatischen Grundzüge des Untersuchungsgebiets werden durch seine großräumige Lage im Tiefland von Turan bestimmt. Die intensive landwirtschaftliche Nutzung, insbesondere des 20. Jahrhunderts, hat allerdings die Entwicklung der hydrologischen Verhältnisse, der Vegetation und der Böden erheblich beeinflusst.

2.2.1 Klima

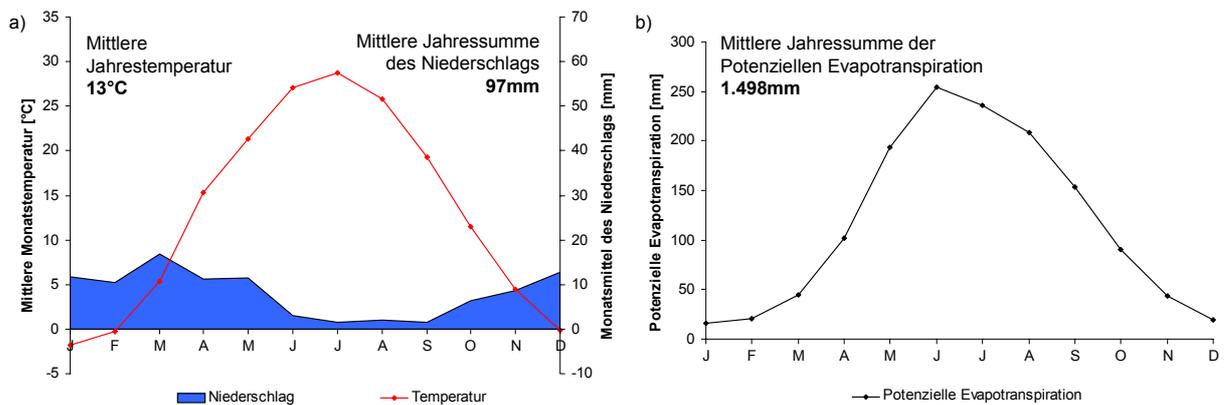


Abbildung 2-2: Charakterisierung der klimatischen Ausgangssituation in Khorezm. a) Klimadiagramm für die meteorologische Station Urgench (41°34' nördliche Breite; 60°34' östliche Länge); Beobachtungszeitraum 1980-2000 (GLAVGIDROMET, 2003); b) langjährige monatliche Mittelwerte der potenziellen Evapotranspiration der Station Khiva (41°24' nördliche Breite; 60°23' östliche Länge); Beobachtungszeitraum 1970-1980 (MUKHAMMADIEV, 1982).

¹³ In politischen Grenzen betrachtet wird Khorezm flächenmäßig zur Hälfte von der Kyzyl-Kum bedeckt. Dieser Teil des politischen Khorezm spielt keine Rolle in dieser Arbeit und ist daher nicht Teil des Untersuchungsgebiets (vergleiche Kapitel 2.3).

Lange heiße Sommer und kalte Winter charakterisieren das fast im gesamten Tiefland von Turan auftretende extrem kontinentale Klima (GLAZIRIN et al., 1999). Die Aufzeichnungen der Klimastation Urgench (Abbildung 2-2a) zeigen eine Jahresdurchschnittstemperatur von etwa 13°C, wobei extrem hohe Tageswerte in den Sommermonaten mit über 45°C extrem niedrigen Minima bis unter -25°C im Winter gegenüberstehen. Die durchschnittliche Jahressumme des Niederschlags der Station Urgench zwischen 1980 und 2000 beträgt unter 100 mm. Die mittlere potenzielle Evapotranspiration (jährlich circa 1.500 mm) übertrifft die Menge des Niederschlags fast in jedem Monat (Abbildung 2-2b). Nach der Köppen-Klassifikation ist das Klima in Khorezm zu den winterkalten Wüstenklimaten (*BWk*) zu rechnen und nach Penck fällt Khorezm damit in die ariden Klimazonen der Erde (zitiert nach HEYER, 1993).

Im langjährigen Mittel wurden 205 frostfreie Tage aufgezeichnet (GLAZIRIN et al., 1999; CHUB, 2000), allerdings ist ein rückläufiger Trend der Anzahl der frostfreien Tage auf etwa 170 Tage festzustellen (VINOGRADOV und LANGFORD, 2001). Die Aussaat der Baumwolle kann sich dadurch verzögern, so dass die Erntephase von Frost betroffen sein kann. Ebenfalls ist die Aussaat des Winterweizens durch das früher einsetzende Auftreten von Frösten gefährdet.

2.2.2 Relief und Geologie

Das Untersuchungsgebiet umfasst den oberen Teil der unteren Schwemmlandebene des Amu Darya. Die absolute Höhe über dem Meeresspiegel senkt sich von Südosten nach Nordwesten von circa 110 m bis 80 m langsam ab. Die Ebene weist keine nennenswerten Erhebungen auf, was auf die bereits erwähnte geologische Plattenstruktur des Tieflands von Turan zurückzuführen ist (LÉTOLLE und MAINGUET, 1996).

Weite Teile des Untersuchungsgebiets werden von einer Schicht alluvialer Sedimente bedeckt, deren Mächtigkeit wenige Zentimeter bis zumeist 20 m beträgt, an manchen Stellen auch bis 70 m. Neben dem heutigen Amu Darya transportierten vor allem seine Vorläufer, die ehemaligen Flüsse Dar'alik und Daudan die Sedimente nach Khorezm. TURSUNOV (in Vorbereitung) nennt drei verschiedene Sedimentations-Facies für die Schwemmlandbereiche Khorezms¹⁴: (1) das Flussbett, das überwiegend durch grobe Texturen gekennzeichnet ist, (2) den Auenbereich (*near river bed facies*) mit lehmig tonigen Ablagerungen, sowie (3) eine lakustrine Facies mit überwiegend schweren tonigen Texturen. Diese drei Facies prägen sowohl den rezenten Flusslauf, viel deutlicher aber die fossilen Fluss- und Deltabereiche des Daudan (südlich) und des Dar'alik.

¹⁴ Die Korngrößendurchmesser unterscheiden sich nach der in Usbekistan gültigen russischen Klassifikationsmethode (KACHINSKY, 1965) erheblich von deutschen oder amerikanischen Schlüsseln (AG BODEN, 1994; USDA, 2006). In Usbekistan werden folgende Korngrößen unterschieden: Kolloid: < 0,0001 mm; Ton: 0,0001 mm – 0,005 mm; Schluff: 0,005 mm – 0,05 mm; Sand: 0,05 mm – 1 mm.

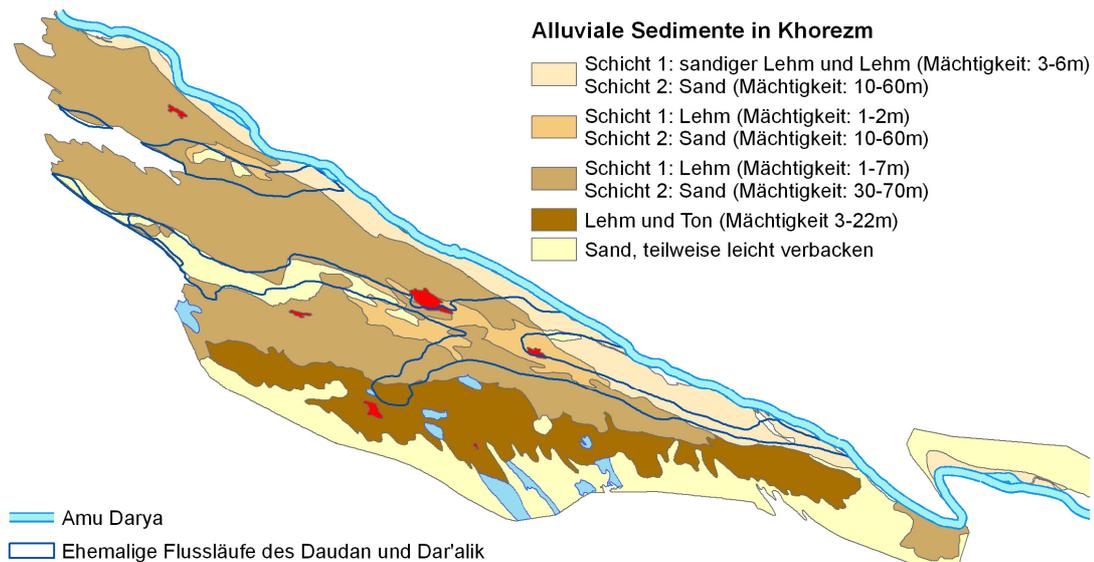


Abbildung 2-3: Die räumliche Verteilung alluvialer Sedimente in Khorezm (Quelle: Uzgipromeliovodkhoz Institut, Taschkent). Überlagert wurde ein GIS-Layer, der die Position der Flussläufe des Daudan (südlicher Arm) und Dar'alik (nördlicher Arm) nachzeichnet (RESSL, 1999).

Abbildung 2-3 zeigt zudem eine grobe Übersicht der in den oberen Sedimentschichten des Untersuchungsgebiets auftretenden Texturen. Im Süden wird das Schwemmland von den vertikal weitgehend quartären Sandablagerungen der Kara-Kum begrenzt. Nach Norden hin folgt eine Zone lehmiger und sandig lehmiger Tone, die abgelöst wird von etwas gröberen Texturen im Bereich des ehemaligen Daudan-Flussbetts. Nördlich des früheren Dar'alik-Verlaufs nimmt der Anteil grober Kornfraktionen dann wieder ab. Diese Einteilung beschreibt nicht deren tatsächliche vertikal und horizontal in Khorezm erfasste Variabilität der Sedimente (FAYSULLAEV, 1980) und dient daher der großräumigen Orientierung.

2.2.3 Böden und Grundwasser

In der globalen Verbreitung der Böden nach einem Schlüssel der USDA (*United States Department of Agriculture*) und FAO (*Food and Agriculture Organisation*) von 1960 (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1992) liegt das Untersuchungsgebiet in den *Yermosol-Solonchak-Yermic-Regosol*-Zone. Danach untergliedern sich die Böden Khorezms in Rohböden, kalkhaltige Auenböden und kalkhaltige Böden mit Grundwasseranschluss (FAO, 2003; SCHULTZ, 1995):

- Rohböden (*yermic regosols*) werden auf alluvialen Ablagerungen (*rock debris*) im Süden und Südosten, auf den Dünen der Kara-Kum außerhalb des Bewässerungslandes, gebildet. Minimale organische Substanz kennzeichnet diese Böden mit schwach ausgebildeten Horizonten: Nach dem FAO-Schlüssel enthalten die Böden mit dem Bezeichner *yermic* in den oberen 20 cm weniger als 0,6 % organischen Kohlenstoff (STOLBOVOI, 1998).

- Kalkhaltige Auenböden (*calcaric fluvisols*) sind im Bereich des Amu Darya anzutreffen (vor Eintritt in das Delta) und sind durch eine geringe Profilgliederung charakterisiert.
- Kalkhaltige Böden mit Grundwasseranschluss (*calcaric gleysols*) liegen im Bewässerungsland, und sind vor allem durch salzhaltiges Grundwasser geprägt und bilden häufig ein Maximum des Salzgehalts im Oberboden aus.

Nach einer feineren Untergliederung der FAO reflektieren im Bewässerungsland weitere Bodencharakteristika die hohe zeitliche Dynamik des Boden- und Grundwassers und der Salzgehalte (STOLBOVOI, 1998). In Khorezm kann den meisten Böden das Attribut *phreatic* assoziiert werden, da der Grundwasserspiegel nahezu überall oberhalb von fünf Metern liegt und die Gefahr einer Bodenversalzung durch kapillaren Aufstieg besteht. Sollte der erste Meter von einer Salzzakkumulation betroffen sein (die elektrische Leitfähigkeit der Bodenlösung muss dabei über 4,0 dS/m bei 25°C liegen), bezeichnet die FAO-Nomenklatur diesen Zustand als *salic*. Diese Eigenschaft kann aber durch das Bewässerungsmanagement stark variieren. Nicht selten trifft man in Khorezm auch auf Krustenbildung mit der Entstehung von Trockenrissen (*tacryric*) bei Austrocknung nach einem Bewässerungsereignis¹⁵.

Die natürliche Bodenfruchtbarkeit ist in Khorezm niedrig. Der zur intensiven Landwirtschaft genutzte Boden (insbesondere die oberen 30 cm) kann hinsichtlich der Kationenaustauschkapazität, des Humusgehalts (0,5-1,3 %) und der Anteile an Stickstoff (0,07-0,15 %), Phosphor (0,10-0,18 %) und Kalium (1,5-1,5 %) als nährstoffarm bezeichnet werden (KHAMZINA, 2006; KIENZLER et al., 2006)¹⁶.

Die Bewässerung führte im ohnehin durch flurnahes Grundwasser gekennzeichneten Khorezm (TURSUNOV, in Vorbereitung) zu künstlich erhöhten Grundwasserständen von durchschnittlich 1,2-1,5 m unter Geländeoberkante (IBRAKHIMOV, 2005). Die mittlere Salinität des Grundwassers in Khorezm schwankt im Jahr zwischen 1,68 g/l im Oktober und 1,81 g/l im April (IBRAKHIMOV, 2005). Die räumliche Variabilität der Grundwassersalinität ist sehr hoch und wird von Faktoren wie mangelnder Drainage, unsachgemäßer Düngergabe und ineffizienter Bewässerungstechnik negativ beeinflusst (IBRAKHIMOV, 2005).

¹⁵ Nach der russischen Klassifikation werden im Untersuchungsgebiet 20 verschiedene Bodentypen unterschieden. Den flächenhaft größten Anteil haben dabei die *irrigated alluvial meadow soils*. Der Namen deutet bereits an, dass die Klassifikation nach der Genese des Bodens erfolgt (TURSUNOV, in Vorbereitung). Entscheidend für die rezente Entwicklung sind das Stadium des Bodens, wenn der Boden erstmalig bewässert wird, und die Dauer, Intensität und Häufigkeit der Bewässerung seit der erstmaligen Bewässerung. Eine Übersicht der resultierenden Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Bodentypen, Texturen und Nutzungstypen wird bei FAYSULLAEV (1980) gegeben.

¹⁶ Daraus resultiert die Notwendigkeit verhältnismäßig hoher Düngergaben für die Landwirtschaft.

Texturbedingt findet nur eine sehr geringe laterale Bewegung des Grundwassers von 19-26 mm im Jahr statt (KATS, 1976). Durch das trocken-heiße Klima kommt es dadurch bei einem Anstieg des Grundwassers zu kapillarem Aufstieg und damit zu einer sekundären Versalzung der Böden (ABDULLAEV, 2003). Im südwestlichen Khorezm wurden auf Baumwoll-Feldern im zeitlichen Verlauf der Jahre 2002, 2003 und 2004 stark schwankende Salzgehalte von 1,0 dS/m - 14,8 dS/m im Oberboden gemessen (AKRAMKANOV, 2005; FORKUTSA, 2006)¹⁷.

2.2.4 Natürliche Vegetation

Vor der intensiven landwirtschaftlichen Inanspruchnahme¹⁸ bestand die natürliche Vegetation im Schwemmland des Amu Darya aus Tugaiwäldern und ausgedehnten Schilfbeständen (RESSL, 1999). Die dominante Baumart des Tugaiwaldes ist die *Populus euphratica* Oliv., untergeordnet sind auch *Elaeagnus angustifolia* L., and *Salix songarica* Anderss. anzutreffen (KHAMZINA, 2006). Heute lassen sich Refugien des Tugai-Waldes in Khorezm lediglich entlang des Flusses und in einem schmal begrenzten Gebiet nördlich der Hauptstadt Urgench finden. Rezente Schilfbestände und verschiedene Halophyten besiedeln die Uferbereiche von Seen im Südwesten Khorezms sowie die Entwässerungskanäle.

Für die Übergangsbereiche zur Kara-Kum sind insbesondere Weißer und Schwarzer Saxaul (*Haloxylon persicum* und *Haloxylon aphyllum*) als typische Vertreter zu nennen (RESSL, 1999). Unter den Straucharten treten häufig *Astrogalus*, *Calligonum* und *Salsola richteri* auf (KHAMZINA, 2006).

2.3 Die usbekische Verwaltungseinheit Khorezm

Der Oblast¹⁹ Khorezm ist mit einer Fläche von 5.600 km² der kleinste Verwaltungsdistrikt in Usbekistan. Er ist in elf administrative Einheiten (Rayone²⁰) gegliedert (Abbildung 2-4). 2002 lebten in Khorezm 1,4 Millionen Menschen (Tabelle 2-1), die Hauptstadt Urgench hatte zu diesem Zeitpunkt 136.000 Einwohner. Die Bevölkerungsdichte in Khorezm betrug im Jahr 2002 250 Personen pro km². Die mittlere Wachstumsrate der Bevölkerung wurde für die Zeit nach der Unabhängigkeit des Landes Usbekistan auf 2,8 % beziffert (MMS, 1999). 77% der Bevölkerung leben in ländlichen Siedlungen. Davon ist der überwiegende Anteil in der landwirtschaftlichen Produktion beschäftigt (DJALALOV et al., 2005).

¹⁷ Es muss hinzugefügt werden, dass hinreichende Wasserverfügbarkeit und eine gute Drainage zur Steuerung der Bodenversalzung beitragen können (FORKUTSA, 2006).

¹⁸ Die Geschichte der Bewässerungswirtschaft in Mittelasien und in Khorezm ist ausführlich bei LÉTOLLE and MAINGUET (1996) beschrieben.

¹⁹ Russische Bezeichnung für Bundesland

²⁰ Russische Bezeichnung für Landkreis

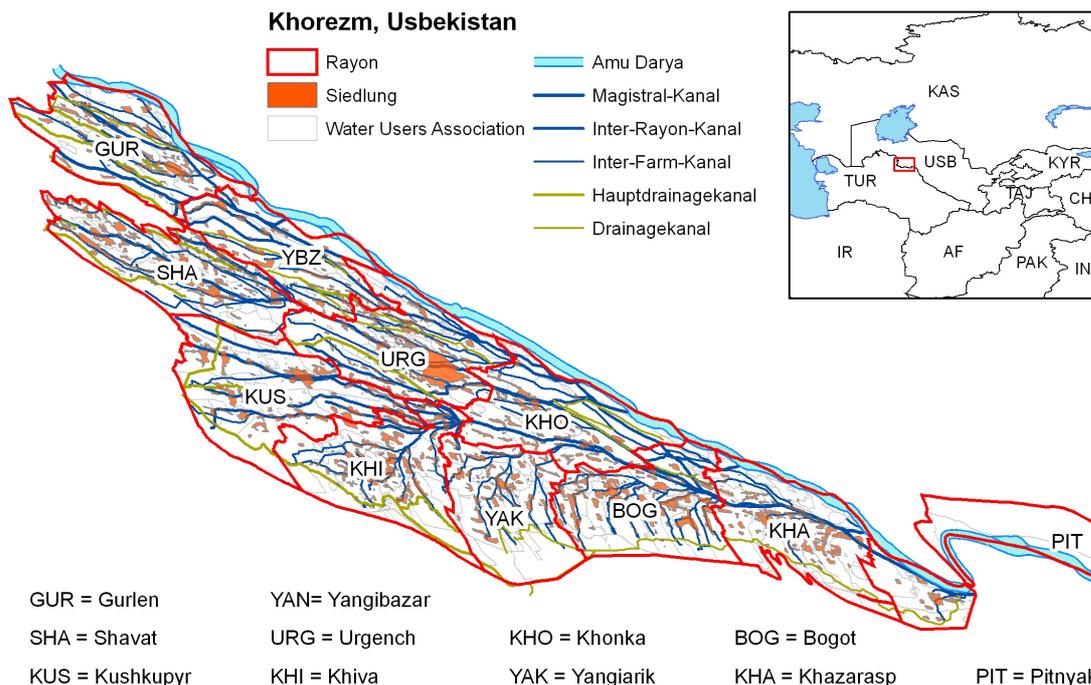


Abbildung 2-4: Der Nordteil des Rayons Khorezm im oberen Amu Darya Delta, Usbekistan. Rechts oben zur Orientierung das Untersuchungsgebiet in den politischen Grenzen Mittelasien²¹.

2.4 Zur Landwirtschaft in Khorezm

Die Landwirtschaft ist die Lebensgrundlage der Bevölkerung Khorezms. Sie ist aufgrund der Lage Khorezms im hochkontinentalen Mittelasien stark abhängig vom Bewässerungswasser (*irrigation water*) des Amu Darya und birgt vor allem in Jahren mit Wasserknappheit ein großes wirtschaftliches Risiko. Zuletzt trat in den Jahren 2000 und 2001 eine große Dürre auf (WHO, 2001), bei der im Vergleich zum Jahr 1999 die Erträge für Baumwolle um ein Drittel rückläufig waren und fast keine Reisproduktion stattfand²². Für die im Unterlauf gelegene Region Karakalpakstan wurden bereits Hilfsgelder zur Versorgung der dortigen Bevölkerung mit Nahrungsmitteln bereitgestellt (FAO/WPF, 2000). Solche Hilfsprogramme waren zwar für Khorezm aufgrund des besseren Wasserzugangs nicht nötig, dennoch sind ökologische und ökonomische Auswirkungen dieser Extremsituation erkennbar und zeigen die Notwendigkeit, die Bewässerungswirtschaft in der Region zu optimieren (MARTIUS et al., 2004).

Im Mittel werden in Khorezm nach statistischen Angaben 233.069 ha (2.331 km²; Tabelle 2-1) für die Bewässerungswirtschaft genutzt, wobei sich die Gesamtfläche seit 1990 nicht wesentlich verändert hat. Die Hauptanbauprodukte sind Baumwolle (*Gossypium hirsutum*; 54,2% der

²¹ Die Südhälfte Khorezms am Ostufer des Amu Darya wird überwiegend vom Sand der Kyzyl-Kum bedeckt. Sie gehört nicht mehr zum Untersuchungsgebiet.

²² Reis wird in Khorezm als zweite Währung angesehen.

Anbaufläche; OBLSTAT, 1990-2005), Winterweizen (*Triticum aestivum* L.; 9,4%) und Reis (*Oryza sativa*; 8,2%). Weiterhin werden in Khorezm Alfalfa, Mais, Kartoffeln, Gemüse, Melonen, Früchte und Weintrauben angebaut. Obwohl die Anbaufläche für Alfalfa anteilmäßig seit 1991 stark zurückgegangen ist (OBLSTAT, 1990-2005), wurde in den letzten Jahren verstärkt Viehzucht betrieben (MARTIUS et al., 2006). Alfalfa wurde durch Winterweizen abgelöst, der nach der Unabhängigkeit im September 1991 zur staatlichen Selbstversorgung in das landwirtschaftliche System Usbekistans eingeführt wurde (KIENZLER, 2005).

Das landwirtschaftliche System wurde nach dem politischen Umbruch stufenweise privatisiert. Die Kolchosenwirtschaft der Sowjetunion ging zunächst in ein ähnliches System aus staatlichen Farmen (*shirkats*), privaten Farmen (*private farms*) und kleine von Familien geführte Bewirtschaftungseinheiten (*dekhon farms*)²³ über (VLEK et al., 2001). Seit 2005 wurden die *shirkats* aufgelöst, die Betriebe in *private farms* zerlegt und anschließend in *Water Users Associations* (WUAs) zusammengefasst. Eine WUA ist eine Ansammlung von Privatbetrieben in einer Genossenschaft, die innerhalb eines Teilbewässerungssystems die Wasserressourcen verwalten soll (MARTIUS et al., 2006).

Tabelle 2-1: Indikatoren zur Land- und Wassernutzung in Khorezm nach der Unabhängigkeit Usbekistans im September 1991.

Variable / Indikator	Bevölkerung ¹	Bewässerungsland ²	Bewässertes Land pro Einwohner	Wasserentnahme ³	Wasserentnahme zur Bewässerung	Wasserverbrauch pro Kopf
Jahr	[Millionen Einwohner]	[ha]	[ha / Einwohner]	[km ³]	[m ³ /ha]	[m ³ / Einwohner]
1991	k.A.	234300	k.A.	4,99	21304	k.A.
1992	1,10	234800	0,213	5,11	21753	4642,11
1993	1,14	234900	0,207	5,10	21730	4495,30
1994	1,17	237800	0,203	5,11	21503	4372,36
1995	1,20	237400	0,198	4,36	18369	3638,77
1996	1,26	240700	0,196	4,92	20443	4013,88
1997	1,25	240000	0,192	k.A.	k.A.	k.A.
1998	1,28	239100	0,187	4,68	19584	3661,35
1999	1,30	237800	0,183	5,43	22832	4172,61
2000	1,33	223700	0,169	3,32	14820	2499,40
2001	1,35	210900	0,156	2,26	10701	1671,61
2002	1,37	226400	0,165	3,86	17044	2812,89
2003	1,39	232100	0,167	4,42	19026	3169,11
Mittelwert	1,26	233069	0,186	4.46	19092	3559,04

¹⁺² Quelle: OBLSTAT, 1990-2005, zusammengestellt aus den einzelnen Jahrgangsausgaben.

³ Quelle: 1990 – 2002, mündliche Mitteilung der BWO Amu Darya, 2001 – 2003 mündliche Mitteilung der regionalen Oblvodchos (Wasserwirtschaftsamt).

²³ Die maximale Flächengröße beträgt gesetzlich festgeschrieben 0,25 ha (IBRAKHIMOV, 2005).

Die WUAs stehen auf der unteren Hierarchiestufe der Wasserverteilung in Khorezm, wie in ganz Usbekistan. Sie sind den vier Managementbehörden für die Bewässerungssysteme (UIS) in Khorezm zugeordnet. Diese wiederum werden gemeinsam mit den UIS der Region Karakalpakstan von einer überregionalen Einrichtung in Nukus (BUIS) verwaltet. Darüber steht dann die internationale BWO Amu Darya, eines der beiden ausführenden Organe der ICWC (vergleiche Kapitel 1). Prinzipiell kann der Landwirt – unter Berücksichtigung der Zielerfüllung der staatlichen Planwirtschaft (*state order*)²⁴ – einen Teil seiner Felder frei bewirtschaften. Es existieren Normen zur Bestimmung des Wasserbedarfs vor der Bewässerungssaison. Dennoch orientiert sich die Wasserentnahme zum Anbau an den Limits, die in der oben skizzierten Hierarchie nach unten in die WUAs weitergegeben werden.

Die Bestimmung des Wasserbedarfs zur Bewässerung und zur Auswaschung des Salzes wird anhand eines Schemas sogenannter Hydromodulzonen durchgeführt. In Usbekistan werden neun Hydromodulzonen nach der Höhe des Grundwasserspiegels, den Kanalverlusten, den Bodeneigenschaften (darunter Salinität) und der zu erwartenden Evapotranspiration für die jeweiligen Anbauarten unterschieden (SOYUZNIXI., 1992). Für Khorezm, das anteilig mit über 90% der Fläche in den drei wasserintensivsten Hydromodulzonen liegt, beträgt der Wasserbedarf in der Vegetationsperiode²⁵ zwischen 4.900 und 6.400 m³/ha für Baumwolle, zwischen 3.200 und 4.000 m³/ha für Weizen und 26.200 m³/ha für Reis²⁶.

In Abhängigkeit des gesamten Wasserangebots im Einzugsgebiet des Amu Darya und zwischenstaatlichen Regularien folgend werden in Khorezm jährlich unterschiedliche Wassermengen bereitgestellt (Tabelle 2-1). Für die Vegetationsperiode liegt die Wasserentnahme für Khorezm im Mittel zwischen 3,5 und 4,0 km³ (im Winter dann noch mal 1,0 bis 1,5 km³). Die für das Aralseebecken beschriebene Dürre 2000 und 2001 (FAO/WPF, 2000) führte in Khorezm zur Halbierung dieser Werte. Danach konnten 2002 bis 2005 mit knapp 3,5 km³ im Sommer und 1,0 km³ im Winter (SIC-ICWC, 2006) die Mittel der 1990er Jahre nicht erreicht werden.

Dennoch: Bei einem Wasserverbrauch in der Sommersaison mit durchschnittlich 13.244 m³/ha (rechnet man anteilig 30 % Reisflächen aus der Gesamtsumme bleiben 11.088 m³/ha) wurde im Untersuchungsgebiet seit der Unabhängigkeit nur in den Dürre Jahren eine Wasserentnahme unterhalb des Bedarfs festgestellt. Ein ähnliches Ergebnis wurde im Einzugsgebiet des Syr Darya erzielt (MURRAY-RUST et al., 2003). Theoretisch standen also an den Systemgrenzen in allen Jahren hinreichende Wassermengen zur Verfügung.

²⁴ Für Baumwolle und Winterweizen, zu einem kleinen Teil auch für Reis.

²⁵ Mit Vegetationsperiode (Sommersaison) wird im Folgenden angelehnt an offizielle mittelasiatische Konventionen die Zeitspanne zwischen dem 1. April und dem 30. September eines Jahres bezeichnet (DUKHOVNY et al., 2003).

²⁶ Mündliche Mitteilung: Müller, 2006.

Mögliche Gründe für den über den Normen liegenden Wasserverbrauch reichen von starken zeitlichen Variationen des Wasserangebots über die traditionellen Bewässerungstechniken mit geringen Effizienzen auf Feldebene (FORKUTSA, 2006; IBRAKHIMOV, 2005) bis hin zu hohen Wasserverlusten in den Kanalsystemen, die nach MARTIUS et al. (2004) bei 40% einzuordnen sind²⁷. Nach eigenen Auswertungen offizieller statistischer Grundlagendaten betragen diese Wasserverluste bereits beim Transport vom Fluss zu den Rayonen 6%, bei der Verteilung auf die Farmen dann insgesamt 25%. Hierin sind die Verluste auf der Farmebene noch nicht enthalten. Unbekannt ist der Anteil dieser Verluste, der über das Grundwasser und den kapillaren Aufstieg in die Wurzelzone dem agrarischen System wieder zur Verfügung gestellt wird. Der Beitrag des auf diese Weise künstlich angehobenen Grundwassers zur Bewässerung wurde von lokalen Wissenschaftlern an unterschiedlichen Testflächen für die unterschiedlichen Bodentypen auf zwischen 17 % und 89 % der tatsächlichen saisonalen Evapotranspiration beziffert (FORKUTSA, 2006).

Wie bei der Bewässerung werden aus der Tradition sowjetischer Planwirtschaft heraus in Khorezm nach wie vor die Düngergaben nach staatlichen Normen durchgeführt (KIENZLER, 2005, KIENZLER et al., 2006). Trotz dieser Normen können sich fehlende finanzielle Mittel zum Erwerb von Dünger sowie mangelnde Wasserverfügbarkeit negativ auf die Ertragsentwicklung auswirken. Ebenfalls kann die fehlende Adäquatheit der Normen hinsichtlich der Düngergabe die Produktivität in Khorezm einschränken (KIENZLER et al., 2006).

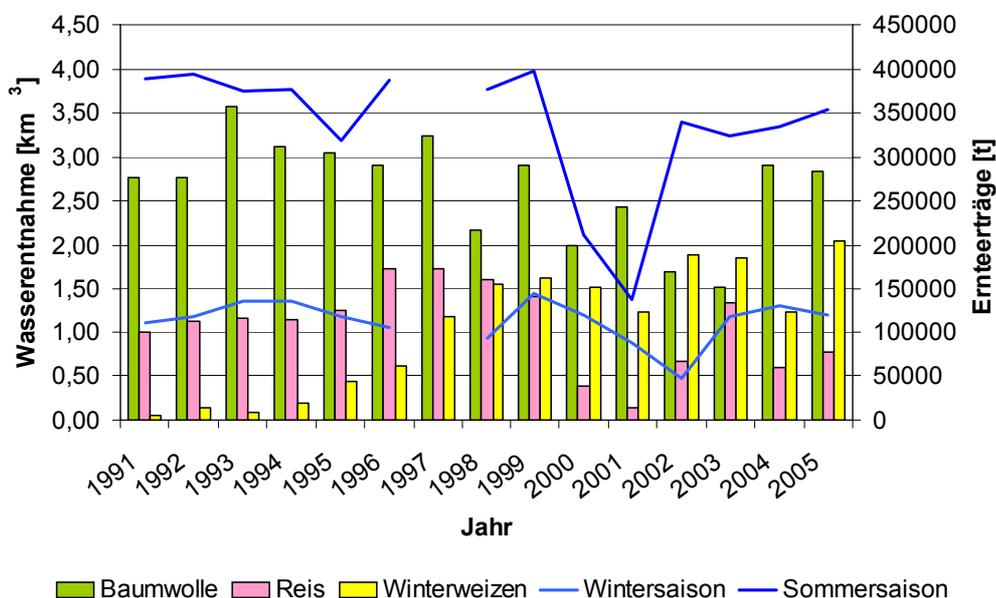


Abbildung 2-5: Darstellung statistischer Daten zu Wasserentnahme und Ernteerträgen in Khorezm. (Quellen: OBLSTAT, 1990-2005, zusammengestellt aus den einzelnen Jahrgangsausgaben; WEGERICHT, 2006; mündliche Mitteilung der Oblvodchos in Urgench; SIC-ICWC, 2006).

²⁷ Bis auf wenige Ausnahmen mit Betonbauten sind die Bewässerungskanäle unbefestigt (VODPROJECT, 1999).

Die Entwicklung der Gesamterträge für die Hauptanbaufrüchte und die verfügbaren Wassermengen seit der Unabhängigkeit Usbekistans zeigt Abbildung 2-5. Darin dokumentiert sich der zuvor erwähnte Anstieg der Winterweizenproduktion (gelbe Säulen). Der Einbruch der Wasserentnahme in den Jahren 2000 bis in die Wintersaison 2002 markiert die letzte große Dürreperiode, die auch einen merklichen Rückgang in der Baumwoll- und Reisproduktion auslöste. Erst 2004 scheint das Produktionssystem wieder an die Zeiten vor der Dürre anknüpfen zu können. Prinzipiell ist allerdings auf diese Weise kein Rückschluss von der Wasserentnahme auf die Erträge zu treffen, da weder Bezugsflächen, Variationen der *state order* (oder regionalpolitische Entscheidungen), saisonale Wasserverfügbarkeit, Bodenzustände (Verlauf der *leaching*-Periode, finanzielle Situation (Personal- und Düngemittelausstattung) noch klimatische Einflüsse in die Gegenüberstellung einfließen.

2.5 Das Kanalsystem

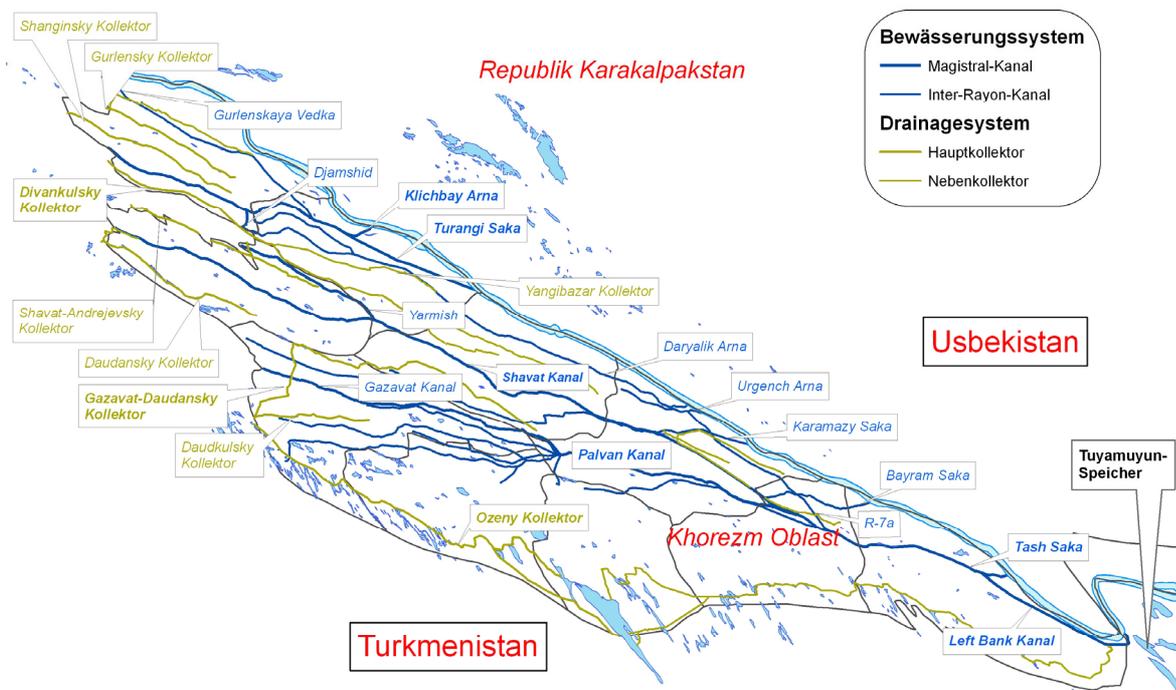


Abbildung 2-6: Die Hauptkanäle zur Be- und Entwässerung in Khorezm (Quelle: GIS-Center Urgench). Die fett gedruckten Namen weisen auf hohe Kanalkapazitäten hin.

Khorezm wird von einem insgesamt 16.233 km langen Kanalsystem zur Bewässerung durchzogen (Abbildung 2-6), womit nach offiziellen Statistiken seit der Unabhängigkeit Usbekistans im Jahr zwischen 3,5 und 5,0 km³ Wasser überwiegend für landwirtschaftliche Zwecke in der ganzen Region verteilt werden (SIC-ICWC, 2006). Das Wasserverteilungssystem ist hierarchisch aufgebaut. Über 291 km Hauptbewässerungskanäle (Magistral-Kanäle) mit maximalen Kapazitäten zwischen etwa 50 m³/s (*Bayram Saka*) und 500 m³/s (*Left-Bank-Kanal*) wird das Wasser in untergeordnete Inter-Rayon-Kanäle (Gesamtlänge: 479 km) verteilt

(Abbildung 2-7, a und b), wobei diese hinsichtlich ihrer Kanalkapazitäten mittleren und kleinen Magistral-Kanälen entsprechen können (Abbildung 2-7, c). Diese wiederum führen das Wasser über Inter-Farm-Kanäle (1.177 km) auf die Farmen, wo noch mal ein weit verzweigtes Kanalnetz mit einer Gesamtlänge von 14.286 km existiert, das zur Versorgung der Felder dient.

Der Wasserfluss wird für große Wassermengen über Regulierungsbauwerke (Abbildung 2-7, a, c und d), für kleinere Entnahmen (etwa unter $1 \text{ m}^3/\text{s}$) über Pumpanlagen realisiert (Abbildung 2-7, e und f). Die blauen Linien in Abbildung 2-6 verdeutlichen Lage und Ausrichtung des Hauptbewässerungsnetzes in Khorezm. Das Wasser wird nahezu parallel zum Amu Darya dem natürlichen Gefälle folgend in west-südwestlicher Richtung transportiert. Vom Tuyamuyum-Speicher führt der größte der Kanäle, der *Left-Bank-Kanal*, ins Innere von Khorezm. Dieser wird in den *Tash Saka* geleitet, der nach 34 km zwei große Bewässerungssysteme bedient. Im Süden zweigt das *Palvan-Gazavat-System* ab, das den ganzen Südwesten Khorezms mit Wasser versorgt.

Der *Gazavat-Kanal* kann ergänzend Wasser in das turkmenische Kanalsystem leiten. Ins Zentrum Khorezms führt die Verlängerung des *Tash Saka* der *Shavat-Kanal*, über den das Wasser potenziell ebenfalls bis über den Rayon Shavat nach Turkmenistan transportiert werden kann. Über den *Yarmish-Kanal* wird von Süden das nach Khorezm hineinragende Landstück Turkmenistans mit Wasser versorgt. Den Amu Darya stromabwärts folgen der *Bayram Saka* und der *Karamazji Saka*, die zur ergänzenden Wasserzufuhr für den *Tash Saka* und den *Shavat-Kanal* dienen. Nördlich schließen sich der *Urgench Arna* und der *Daryalik Arna* an, die beide kleinere Subsysteme versorgen können, aber nicht die ganze Saison betrieben werden. Große Einlassbauten befinden sich dann weiter nördlich, an den Kanälen *Turangi Saka* und *Klichbay Arna*, die Teile Yangibazars und dem Rayon Gurlen Wasser zuführen. Über den *Klichbay Arna* und den Kanal *Djamshid* wird Wasser nach Turkmenistan, über den *Gurlenskiya Vedka* nach Karakalpakstan geleitet.

Entsprechend des Gefälles im Gelände orientiert sich der Abfluss der Drainage (7.679 km) bis auf wenige Ausnahmen über sehr große Kollektoren nach Westen. Als Hauptentwässerungskanal markiert der der *Ozerny-Kollektor* („Ozer“ = russisch „See“) den südlichen Rand des Bewässerungssystems (hier wurden an der Grenze zu Turkmenistan maximal $135 \text{ m}^3/\text{s}$ Abfluss gemessen; Abbildung 2-7, h). Der *Gazavat-Daudansky-Kollektor* und der *Divankulsky-Kollektor* entwässern die Mittelläufe des Bewässerungsgebiets. Ihre Kapazitäten liegen über $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Untergeordnete Drainagekanäle sind der *Daudkulsky-Kollektor* in Kushkupyrt (dem *Gazavat-Daudansky-Kollektor* tributär), der *Daudansky-Kollektor* und der *Shavat-Andrejevsky* in Shavat sowie der *Shanginsky-Kollektor* und der *Gurlensky-Kollektor* (Abbildung 2-7, g) im nördlichen Gurlen, die beide in Karakalpakstan in den *Divankulsky-Kollektor* münden. Der Abfluss der letztgenannten Kollektoren liegt zwischen Null und $25 \text{ km}^3/\text{s}$ (der *Divankulsky-Kollektor* ist größer). Das Gefälle der größeren Kollektoren liegt im Durchschnitt unter $0,4 \text{ ‰}$



Abbildung 2-7: Wasserver- und entsorgung in Khorezm; a) Regulierungswerk am Left-Bank-Kanal in Khazarasp; b) Zusammenfluss von Left-Bank-Kanal (rechts) und Tash Saka (links) in Khazarasp; c) Einlasswerk am Daryalik-Kanal (Urgench Rayon); d) Inter-Farm-Kanal; e) und f) Pumpanlage im Oberlauf des Daryalik-Einlasswerkes; g) Kollektorsystem in Gurlen an der Grenze zu Karakalpakstan (Gurlensky-Kollektor im Vordergrund); h) Ozerny-Kollektor nahe der turkmenischen Grenze; a) Foto: Christopher Martius (ZEF); b)-h) eigene Aufnahmen.

3 Theoretische Grundlagen

Gemäß der Zielsetzung dieser Arbeit (Kapitel 1.1) stehen drei Schwerpunkte im Vordergrund:

- (1) Die Klassifikation der agrarischen Landnutzung mit Methoden der Fernerkundung,
- (2) die fernerkundungsbasierte Modellierung der saisonalen tatsächlichen Evapotranspiration und
- (3) die Analyse und Bewertung dieser beiden Variablen sowohl untereinander als auch hinsichtlich der Entnahme von Bewässerungswasser in Teilregionen von Khorezm.

Für alle drei Themenkomplexe existiert bereits eine Vielzahl theoretischer Grundlagen und methodischer Herangehensweisen, auf deren Basis die in den späteren Kapiteln vorgestellten Entwicklungen und Untersuchungen umgesetzt werden. Nachfolgend werden daher in jedem der genannten Arbeitsfelder sowohl der Stand der Forschung als auch die theoretischen Grundlagen der später verwendeten Verfahren detailliert dargelegt.

3.1 Klassifikation agrarischer Landnutzung mit Methoden der Fernerkundung

Im diesem Abschnitt wird zunächst der Stand der Forschung im anvisierten Arbeitsfeld der fernerkundungsbasierten Klassifikation dokumentiert, der letztendlich zur Auswahl der Zeitserien aus Fernerkundungsdaten des MODIS-Sensors als Eingangsdaten zur Klassifikation der agrarischen Landnutzung im Bewässerungssystem von Khorezm führte (Kapitel 3.1.1). Im Anschluss wird eine theoretische Einführung in Klassifikations- und Regressionsbäume gegeben, die im Rahmen der Literaturrecherchen als vielversprechende Kernmethodik zur Klassifikation der Zeitserien identifiziert wurde (Kapitel 3.1.2).

3.1.1 Stand der Forschung

Die Klassifikation der Bedeckung und Nutzung von Landoberflächen ist eine der originären Anwendungen der Fernerkundung. Daher existiert für praktisch alle Fernerkundungssensoren eine Vielzahl an Verfahren zu den unterschiedlichsten Fragestellungen auf allen Maßstabsebenen (JENSEN, 2000; RICHARDS und JIA, 2006). In Bewässerungsgebieten wurde die Fernerkundung vielfach erfolgreich eingesetzt, um ackerbaulich genutzte Flächen abzugrenzen (DROOGERS, 2002) und einzelne Anbaufrüchte oder Fruchtfolgen zu lokalisieren (THENKABAIL et al., 2005). Überwiegend wurden dazu optische Fernerkundungsdaten verwendet (LILLESAND et al., 2004).

Da Fruchtfolgen und phänologische Vegetationsentwicklungen in monotemporalen Fernerkundungsdatensätzen nicht erfasst werden können, haben sich besonders zeitlich höher aufgelöste Daten zur Klassifikation agrarischer Landnutzung als geeignet erwiesen (RESSL, 1999; VIERA et al., 2001; SCHWEITZER et al., 2004; THENKABAIL et al., 2005)²⁸. Ein weiterer Grund für die Verwendung mindestens bitemporaler Datensätze ist, dass sich verschiedene Feldfrüchte aufgrund ihrer spektralen Ähnlichkeit häufig nicht mit einem singulären Datensatz unterscheiden lassen (FULLER, 1998).

Multitemporale Klassifikationen geometrisch hoch auflösender Daten für agrarisch genutzte Räume wurden bereits mit verschiedenen Sensordaten und Algorithmen umgesetzt. Es kamen dabei sowohl unüberwachte und überwachte als auch kombinierte Verfahren zur Klassifikation zum Einsatz (vergleiche beispielsweise RESSL, 1999, SAKTHIVADIVEL et al., 1999, LOBELL und ASNER, 2004 oder SCHWEITZER et al., 2004). Hohe Datenkosten bei vergleichsweise geringer Gebietsabdeckung reduzieren allerdings die Praktikabilität der Verwendung solcher geometrisch höher aufgelöster Ansätze für große Untersuchungsräume (CIHLAR, 2000). Daher basieren kleinmaßstäbliche Klassifikationen (überregionaler, subkontinentaler und kontinentaler Maßstab) in der Regel auf temporal sehr hoch auflösenden Sensoren.

Für die Klassifikation mit Zeitserien stehen erst seit dem Ausgang der 1990er Jahre mehrere operationelle Sensorsysteme zur Verfügung. Vor dem Jahr 1998 waren die AVHRR-Sensoren auf den Satelliten TIROS-N und NOAA 8-15 die einzigen operationellen optischen Sensoren mit sehr hoher zeitlicher und geringer geometrischer Auflösung, deren Daten sich zur multitemporalen Klassifikation der Landoberfläche eigneten (JENSEN, 2000). Durch den Start von SPOT-Vegetation 1998 (CNES, 2006), der MODIS-Sensoren auf den Satelliten Terra (EOS-AM1; Start 1999) und Aqua (EOS-PM1; Start 2002) (SAVTCHENKO et al., 2004) und des Satellitensystems Envisat mit dem Sensor MERIS im März 2002 wurde diese Situation erheblich verbessert (RAST et al., 1999).

²⁸ Der Begriff multitemporal wird in dieser Arbeit, sofern nicht explizit modifiziert, synonym für Zeitserien aus temporal höchst auflösenden Daten wie AVHRR oder MODIS verstanden.

Insbesondere die Sensorcharakteristika des MODIS-Sensors bergen viele Vorteile für eine Klassifikation von Zeitserien. Die hohe spektrale Auflösung von MODIS (36 Kanäle) erlaubt beispielsweise eine verbesserte Atmosphärenkorrektur der Daten. Mit den aus atmosphärenkorrigierten MODIS-Daten abgeleiteten Reflexionsgraden (VERMOTE et al., 1997a) stehen damit standardisierte Input-Parameter für die Entwicklung höherwertiger Produkte zur Fernerkundung der Landoberfläche zur Verfügung, so auch für die Klassifikation der Landbedeckung (JUSTICE et al., 1998). Auflösungen von 250 m im roten Aufnahmespektrum und im nahen Infrarot (NIR) sowie 500 m im Bereich des sichtbaren Lichts (VIS) bis hin zum Kurzwelleninfrarot (SWIR) ermöglichen zudem Kartierungen mit einer höheren Detailstufe als mit AVHRR-, MERIS- oder SPOT-Vegetation-Daten, erscheinen also auch für regionale Studien geeignet.

Grundsätzlich finden alle genannten Systeme in zahlreichen Studien Eingang in die Kartierung und das Monitoring von Landoberflächen. Exemplarisch seien an dieser Stelle die Arbeiten von DE BEURS und HENEBRY (2004), JAKUBAUSKAS et al. (2002), TOTTRUP und RASMUSSEN (2004) mit dem AVHRR-Instrument, HUANG und SIEGERT (2006) mit SPOT-Vegetation sowie ARNDT et al. (2001) und GEBNER (2005) mit MERIS genannt.

Ebenso ist die Palette der eingesetzten Verfahren zur Klassifikation fernerkundlicher Zeitserien groß und umfasst sowohl unüberwachte als auch überwachte Verfahren. Neben klassischen, in der multispektralen Fernerkundung häufig eingesetzten Verfahren (beispielsweise *Maximum Likelihood*, *Minimum Distance*, Clusteranalyse) existieren aber neue, auf die Eigenschaften fernerkundlicher Zeitserien optimierte Verfahren wie etwa Klassifikations- und Regressionsbäume.

Unüberwachte Clustering-Verfahren wurden beispielsweise auf *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) Zeitserien aus AVHRR-Daten zur Ableitung der Landbedeckung angewendet (LOVELAND et al., 2000). VIOVY (2000) verfolgte dasselbe Ziel, wobei die NDVI Zeitreihen zuvor mittels der Fourieranalyse geglättet wurden. Die Ergebnisse der unüberwachten Klassifikation von 500 m-MODIS-Daten und weitere Merkmale, die den zeitlichen Verlauf unterschiedlicher Reflexionsgrade in einer Wachstumsperiode charakterisieren, wurden mittels eines manuell abgeleiteten Entscheidungsbaums zur Unterscheidung verschiedener Feldfrüchte und Fruchtfolgen eingesetzt (THENKABAIL et al., 2005). LOBELL und ASNER (2004) übertrugen die spektrale Entmischungsmethode aus der hyperspektralen Fernerkundung auf die Auswertung fernerkundlicher Zeitreihen (*temporal unmixing*).

Eine relativ junge Methode zur Klassifikation von Zeitserien aus AVHRR- und MODIS-Daten sind überwacht generierte Klassifikationsbäume (DEFRIES et al., 1995; DEFRIES et al., 1998; HANSEN et al., 2000). Durch die Auswertung temporaler Merkmale auf den Trainingsgebieten

werden dabei optimale Schwellenwerte zur Gruppierung der Daten in möglichst reine Klassen generiert. Klassifikations- oder Regressionsbäume werten Metriken der Zeitserien (der Mittelwert des Jahresgangs wird beispielsweise als Merkmal definiert) rekursiv aus und münden in eine Baumstruktur.

DEFRIES et al. (1998) leiteten mittels dieser Technik aus 8 km-AVHRR-GAC-Daten (*global area coverage*) 17 globale Landbedeckungsklassen ab. Eine globale Klassifikation mit zwölf Klassen wurde aus monatlichen 1 km-AVHRR-Daten mithilfe einer Hintereinanderschaltung mehrerer Klassifikationsbäume erreicht (HANSEN et al., 2000). HANSEN et al. (2003) verwendeten Regressionsbäume zur Bestimmung des Baumanteils in 500 m-MODIS-Daten. Ebenfalls eine Auswertung von spektralen Informationen aus 500 m-MODIS-Daten und GIS-basierten Merkmalen in rekursiven Klassifikationsbäumen diente zur Ableitung von Landnutzung und zur Vorhersage der Waldentwicklung in Kolumbien (ETTER et al., 2006). Eine Verfeinerung dieser nicht-parametrischen Klassifikationstechnik erreichten MCIVER und FRIEDL (2006) durch die Einführung von *a priori* Wahrscheinlichkeiten.

In Mittelasien existieren nur wenige fernerkundliche Klassifikations- oder Monitoringanwendungen. Dieses Defizit ungenutzter Potenziale merkten bereits DECH (1997) und RESSL (1999) in ihren Arbeiten über das Amu Darya Delta an. PTICHNIKOV (1996) interpretierte visuell Desertifikationsprozesse aus den spektralen Bändern des Landsat MSS und daraus abgeleiteten Vegetationsindizes im Amu Darya Delta. Langzeitanalysen des Verhältnisses von Vegetation und Niederschlag wurden für die gesamte Aralseeregion mit AVHRR NDVI-Zeitserien untersucht (NEZLIN et al., 2005). AVHRR NDVI-Monatskomposite wurden ebenfalls zum Monitoring des agrarischen Pflanzenwachstums in den Bewässerungsgebieten des Amu Darya Delta eingesetzt (RESSL, 1999).

EL MAGD und TANTON (2003) klassifizierten fünf landwirtschaftliche Klassen und sieben weitere Oberflächentypen mittels des Maximum-Likelihood-Verfahrens in der Kyzyl-Kum Bewässerungsregion am Unterlauf des Syr Darya. Auf dieselbe Weise leiteten RÜCKER und CONRAD (2003) die Landnutzung für den nördlichen Teil von Khorezm aus Landsat 7 ETM+ Datensätzen ab, die zu vier verschiedenen Zeitpunkten im Jahr aufgenommen wurden. SCHWEITZER et al. (2004) optimierten auf denselben Daten die Bestimmung verschiedener Klassen unter Zuhilfenahme von 250 m MODIS NDVI-Zeitreihen. Insbesondere bei großen landwirtschaftlichen Schlägen erlaubten phänologische Feinheiten aus diesen Zeitseriendaten eine Vorklassifikation. Großflächige Klassifikationen mit hoher räumlicher Abdeckung wurden allerdings bislang in Mittelasien selten durchgeführt. Hier ist insbesondere eine Maximum-Likelihood-Klassifikation russischer Resurs-O1 MSU-SK-Daten (geometrische Auflösung: 170 m) des Amu Darya Deltas aus dem Jahr 1995 zu nennen, die großräumig die landwirtschaftliche Nutzung im gesamten Amu Darya Delta aufschlüsselte (RESSL, 1999).

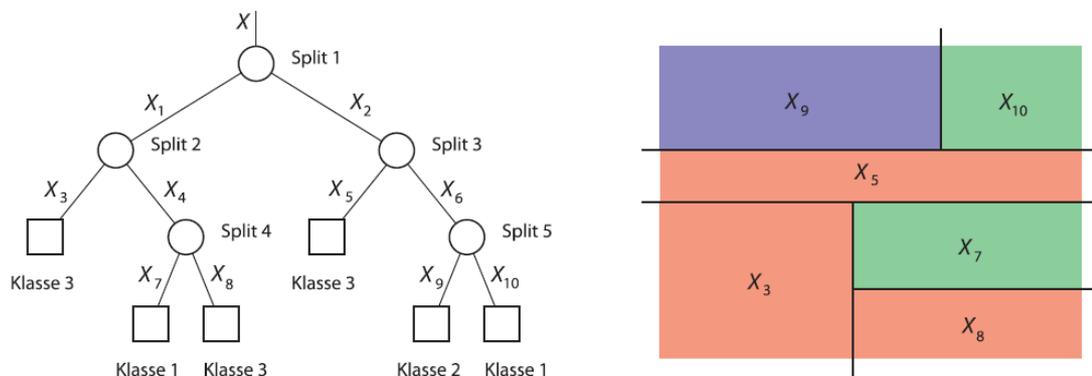
3.1.2 Klassifikations- und Regressionsbäume

Die von DEFRIES et al. (1995) und HANSEN et al. (2000) verwendeten *Recursive Partitioning and Regression Trees* (RPART) stammen aus einer Algorithmenfamilie zur Klassifikation durch Entscheidungsbaume und werden insbesondere im Bereich des maschinellen Lernens auf dem Sektor der künstlichen Intelligenz eingesetzt. Sie wurden erstmals 1984 von BREIMAN et al. (1984) ausführlich beschrieben und eignen sich zur Klassifikation sowohl kontinuierlicher als auch kategorialer Variablen. Das Verfahren umfasst zuerst die Generierung eines großen Entscheidungsbaums und darauf folgend das Wegschneiden (*pruning*) von aussageschwachen Ästen, um den Baum auf ein interpretierbares Maß zu kürzen.

Eine Klassifikation lässt sich als eine Funktion $f: X \rightarrow C$ des Merkmalsraums X in eine Menge von Klassen C (die Anzahl der Klassen sei J) oder eine Partitionierung von X in disjunkte Teilmengen A_j verstehen, wobei gilt (LETTMAN, 2006):

$$X = \bigcup_{1 \leq j \leq J} A_j \quad \text{mit} \quad A_j := \{x \in X \mid f(x) = j\}$$

Die Zerlegung des Merkmalsraums erfolgt rekursiv in einem Entscheidungsbaum, ausgehend von der Wurzel des Baumes, die den Gesamttraum im Falle von RPART in zwei Teilmengen (Knoten) auftrennt (binärer Split). Diese Knoten werden erneut von einem Split-Kriterium getrennt oder sie bleiben als Blätter des Baums (Enden) bestehen und bekommen eine Klasse der Klassenmenge C zugeordnet (Abbildung 3-1). Die zweidimensionale „Karte“ des Baumes (*tree map*) zeigt, wie die Entscheidungsbaume im zweidimensionalen Merkmalsraum funktionieren. Die horizontale Halbierung des Merkmalsraums ist das Ergebnis von Split 1. Die vertikale Trennlinie im unteren Sektor ist auf Split 2, die horizontale Trennung über X_5 auf Split 3 zurückzuführen. Nachher können dann auch ganz unterschiedlich im Merkmalsraum positionierte Teilmengen (Blattknoten), wie X_7 und X_{10} , in eine zusammengehörige Klasse überführt werden.



$$X = X_3 \cup X_7 \cup X_8 \cup X_5 \cup X_9 \cup X_{10} :$$

$$A_1 = X_7 \cup X_{10}, A_2 = X_9, A_3 = X_3 \cup X_8 \cup X_5$$

Abbildung 3-1: Binärer Entscheidungsbaum (links) und *tree map* des Entscheidungsbaums (rechts, LETTMAN, 2006).

Ein binärer Split trennt (bei metrischen Daten) mittels eines Schwellenwertes, der auf ein Merkmal angewendet wird, die betrachtete Teilmenge in zwei Gruppen. Abbildung 3-2 zeigt drei Klassen (rot, grün, gelb) und ihre Merkmalsausprägungen (Werte in den Kreisen). Es werden zwei Schwellenwerte vorgeschlagen: 0,15 und 0,29. Offensichtlich trennt der Schwellenwert 0,15 etwas besser, da eine Klasse von den übrigen abgetrennt wird. Im Gegensatz dazu schafft der Schwellenwert 0,29 zwar die Abtrennung der Klassen gelb und grün, doch schafft der Split keine Separierung der roten Klasse. Das Beispiel zeigt schnell, dass die Hauptaufgabe des Algorithmus für einen Entscheidungsbaum in der Auswahl gut trennender Merkmale und Schwellenwerte liegt.

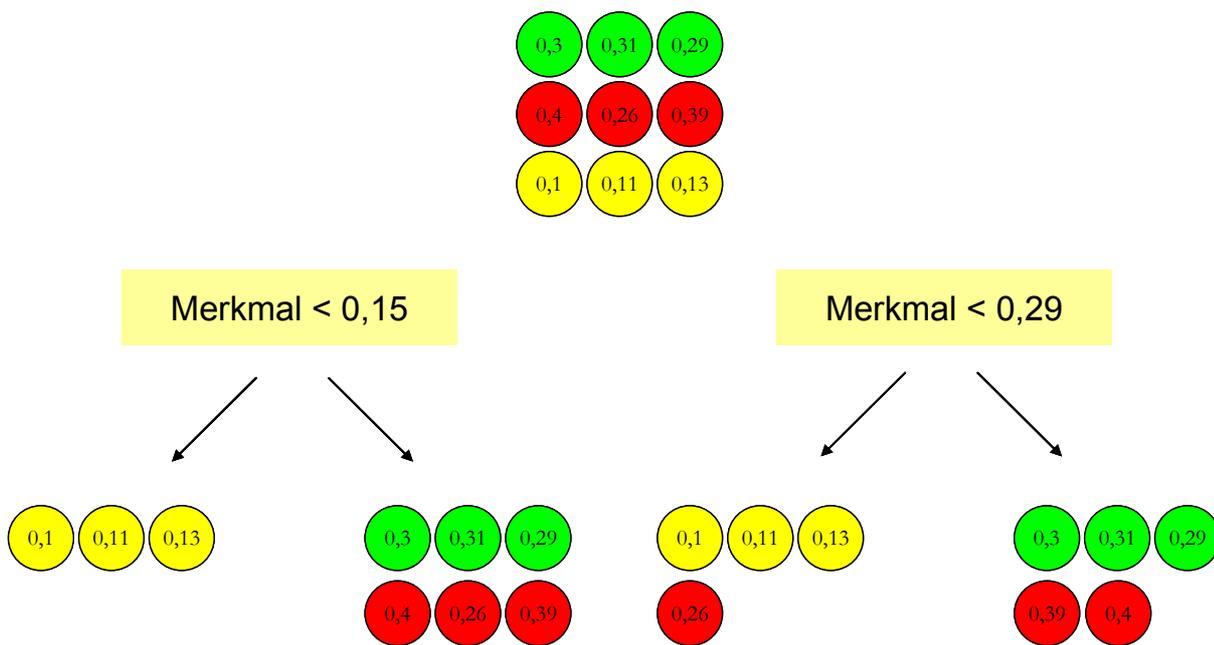


Abbildung 3-2: Testweise Anwendung verschiedener potenzieller Schwellenwerte bei der Konstruktion von Entscheidungsbäumen für ein Merkmal. Rote, grüne und gelbe Kreise markieren Klassenzugehörigkeiten, in den Kreisen sind Werte für das Beispielmerkmal eingetragen.

Ein Entscheidungsbaumalgorithmus testet für jedes Merkmal durch Sortierung nach den Gruppenmittelwerten Schwellenwerte (THEUS, 2004). Als Maß für die Güte des Splits werden sogenannte *impurity*-Funktionen herangezogen, die bewerten, wie ein Split die Unreinheit des übergeordneten Knotens reduziert. Dabei ist die *impurity* als ein Maß im Wertebereich zwischen Null und Eins definiert. Die bekanntesten Maßgrößen sind dazu die Missklassifikation, der Gini-Index oder die Devianz (Entropie). Setzt man *a priori* Wahrscheinlichkeiten $p(j)$ für eine Klasse j ($j = 1..J$) aus der Anzahl N_j der Trainingsgebiete der Klasse im Verhältnis zur Gesamtheit N der Trainingsdaten ($p(j) = N_j/N$), ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Klassenelements aus j im Knoten t durch (LETTMAN, 2006):

$$p(j|t) = \frac{N_j(t)}{N}$$

Eine Schätzung für die Wahrscheinlichkeit, dass ein Element der Trainingsdaten in einen bestimmten Knoten fällt, wird dann wie folgt berechnet:

$$p(t) = \sum_{j=1}^J p(j|t)$$

Die Schätzung des Anteils der Klasse j im Knoten t folgt dann aus:

$$\hat{p}(j|t) = \frac{N_j(t)}{N(t)}$$

Diese Anteilsschätzung wird bei der Berechnung des *Gini-Index* aufgegriffen:

$$i(t) = \sum_{\substack{k \neq j \\ j, k \in \{1..C\}}} \hat{p}(k|t) \hat{p}(j|t)$$

Für die Güte des Splits s wird die Verbesserung der Unreinheit (Δi) der untergeordneten Knoten (t_L und t_R) im Verhältnis zum übergeordneten Knoten (t) wie folgt berechnet (LETTMAN, 2006):

$$\Delta i(s, t) = i(t) - \frac{p(t_L)}{p(t)} i(t_L) - \frac{p(t_R)}{p(t)} i(t_R)$$

Theoretisch kann man den Entscheidungsbaum immer weiter aufspalten, bis nachher jedes einzelne Element klassifiziert wurde. Es ist durchaus möglich, dass ein Merkmal in einem Baum häufiger auftaucht, da Bäume immer den optimalen Split für die gerade vorliegende Datenmenge liefern (BREIMAN et al., 1984).

Sehr tiefe Klassifikationsbäume sind in der Regel allerdings nicht mehr interpretierbar (*overfitting*; THEUS, 2004). Sinnvollerweise werden nun *Abbruchkriterien* benötigt, um zu verhindern, dass der Baum unlesbar wird. Dies kann in RPART relativ einfach durch eine untere Grenze für die maximale Güte des Splittings festgelegt werden (LETTMAN, 2006) oder indem eine Anzahl von Elementen vorgegeben wird, die ein Knoten mindestens enthalten muss (THEUS, 2004). Eine weitere Möglichkeit ist das Kürzen der Bäume (*pruning*): Durch Aufteilung eines Datensatzes in Gruppen und Testen der Baumstruktur werden die Splits entfernt, welche die Klassifikationsgenauigkeit am geringsten verschlechtern (*cross validation*).

Ein Vorteil des RPART-Algorithmus liegt in der intuitiven Nachvollziehbarkeit der resultierenden Baumstruktur, worin das Verfahren sich von anderen Varianten aus der künstlichen Intelligenz abhebt: Im Gegensatz zur Generierung eines neuronalen Netzwerkes wird keine Black Box geschaffen. Weiterhin ist das Verfahren zur Vorhersage, also nicht nur zur Merkmalssondierung sondern auch zur Klassifikation geeignet. Grundlegender Nachteil von

Klassifikationsbäumen im Allgemeinen ist die Klassifizierung in Treppenfunktionen (Abbildung 3-3). Durch die Einführung der Splittings auf je einem Merkmal wird der ganze Merkmalsraum lediglich orthogonal getrennt (THEUS, 2004). Diagonale Trennlinien wie etwa bei einer Diskriminanzanalyse (Anhang AII.2) können nicht eingeführt werden. Weitere Nachteile sind die starke Datenorientiertheit (unterschiedliche Sets an Trainingsdaten resultieren in verschiedenen Bäumen), die Vorwärtsiteration (die Hierarchie wird immer von oben aufgebaut, ein Schritt zurück ist nicht möglich) und die Folge, dass Entscheidungen in den oberen Hierarchien des Baums starke Veränderungen nach unten bewirken (BREIMAN et al., 1984).

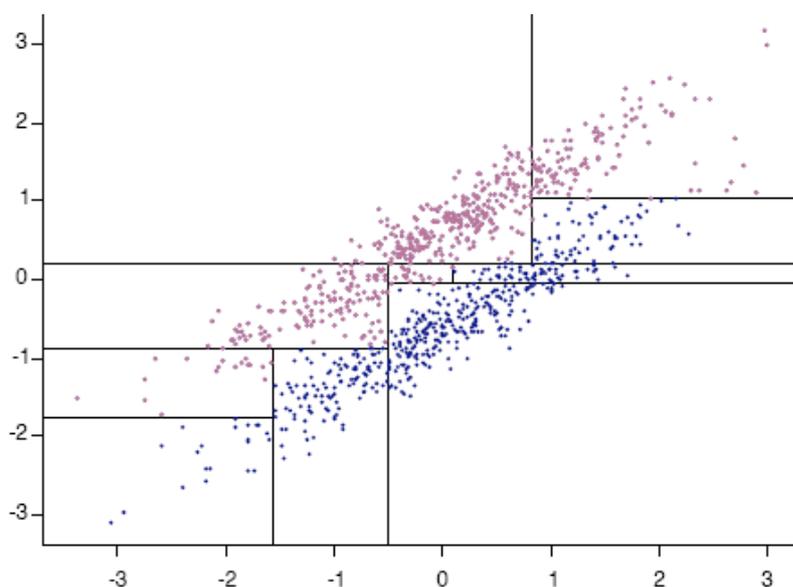


Abbildung 3-3: Treppenbildung aufgrund orthogonaler Splits bei der Klassifikation durch *recursive partitioning and regression trees* (THEUS, 2004).

3.2 Fernerkundungsbasierte Bestimmung der tatsächlichen Evapotranspiration

Die Modellierung der tatsächlichen Evapotranspiration (ET_{act}) aus Fernerkundungsdaten rückte in den letzten fünfzehn Jahren in den Fokus der Forschung. Mittlerweile haben sich verschiedene empirische und semiempirische Herangehensweisen etabliert, die meist Fernerkundungsparameter mit meteorologischen Eingangsdaten verknüpfen (KITE und DROOGERS, 2000). Im Folgenden sollen die verschiedenen Ansätze der fernerkundungsbasierten Modellierung der Evapotranspiration vorgestellt werden (Kapitel 3.2.1). Anschließend wird eine theoretische Einführung über das häufig genutzte SEBAL-Modell (BASTIAANSEN et al., 1998) sowie einige spätere Anpassungen (METRIC; ALLEN et al., 2005) gegeben, was nach der Literatursichtung für das Erreichen der Zielsetzung dieser Dissertation geeignet erschien (Kapitel 3.2.2).

Begriffsbestimmungen Evapotranspiration

Evapotranspiration (ET):	Gesamte Verdunstung einer Pflanzendecke und Bodenoberfläche sowie einer offenen Wasserfläche, zusammengesetzt aus Evaporation und Transpiration
Verdunstung:	Übergang von Wasser aus festem oder flüssigem Zustand unterhalb des Siedepunktes in den gasförmigen Zustand
Evaporation:	Verdunstung von der Bodenoberfläche, von offenen Wasserflächen oder von der Pflanzenoberfläche (Interzeptionswasser)
Interzeption:	Gefallener oder abgesetzter Niederschlag, der kurzfristig an Pflanzenoberflächen gespeichert wird.
Transpiration:	Verdunstung durch lebende Organismen (bei Vegetation überwiegend durch die Blattoorgane)

Tatsächliche Evapotranspiration (*actual evapotranspiration*, ET_{act}):

Zu einem bestimmten Zeitpunkt real über einer Oberfläche verdunstete Wassermenge. Saisonale tatsächliche Evapotranspiration (*seasonal actual evapotranspiration*, saisonale ET_{act}) bezeichnet die im Saisonverlauf summierte tatsächliche Evapotranspiration. Die tatsächliche Evapotranspiration liegt in der Regel unterhalb der potenziell möglichen Evapotranspiration.

Potenzielle Evapotranspiration (ET_{pot}):

Maximal mögliche Evapotranspiration einer Oberfläche (Land oder Wasser) in Abhängigkeit der klimatischen Gegebenheiten. In dieser Arbeit verwendet als potenzielle Evapotranspiration über einer optimal mit Wasser versorgten geschlossenen niedrigen Grasdecke (Wuchshöhe: 12 cm) und berechnet nach dem Penman-Monteith Ansatz (ALLEN ET AL., 1998).

Referenzevapotranspiration (ET_{ref}):

Maximal mögliche Evapotranspiration einer bestimmten Vegetationsdecke (eines bestimmten Vegetationstyps) in Abhängigkeit der klimatischen Gegebenheiten. Meiste Anwendung findet die ET_{ref} für Alfalfa (Wuchshöhe: 50 cm). In der Literatur wird eine Normierung der Begriffsbestimmung in die Referenzevapotranspiration für kleine Wuchshöhen (vorher ET_{pot} einer Grasdecke) und für größere Wuchshöhen (ET_{ref} für Alfalfa) angestrebt (ASCE-EWRI, 2005).

Pflanzenspezifische potenzielle Evapotranspiration (ET_{crop}):

In der Landwirtschaft die maximal mögliche Evapotranspiration einer Vegetationstyps unter Berücksichtigung des Wachstumsstadiums (Anteil der Bodenbedeckung, Pflanzenhöhe, Wuchs- und Blattform). Wird über ET_{pot} und einen sogenannten Pflanzenwachstumskoeffizienten (K_c -Wert) bestimmt, der sich für verschiedene Wachstumsphasen je nach Anbaufrucht unterscheidet (vergleiche ALLEN ET AL., 1998):

$$ET_{crop} = K_c * ET_{pot}$$

Relative Evapotranspiration:

Performanceindikator, der ET_{act} mit ET_{pot} vergleicht. Gibt die Wassermenge an, die auf einem Feld im Verhältnis zum Erwartungswert (ET_{crop}) tatsächlich durch ET verbraucht wird.

3.2.1 Übersicht existierender methodischer Ansätze

Eine simple indirekte Bestimmung der tatsächlichen Evapotranspiration kann durch Abschätzung der Pflanzenwachstumscoeffizienten (*crop coefficients*, K_c -Werte) im Vergleich zum tatsächlichen Pflanzenwachstum erfolgen. Die K_c -Werte werden zur Berechnung der pflanzenspezifischen Evapotranspiration (ET_{crop}) unter einer optimalen Bewässerungssituation ermittelt (ALLEN et al., 1998). Das tatsächliche Pflanzenwachstum wird dann mittels spektraler Daten oder fernerkundlicher Vegetationsindizes abgeleitet. An optimalen Wachstumsbedingungen für bestimmte Feldfrüchte, die im Gelände lokalisiert werden müssen, kann dieser Ansatz kalibriert werden (RAY und DADHWAL, 2001).

Andere Verfahren basieren auf der Abschätzung wesentlicher Komponenten der Penman- oder der Penman-Monteith-Gleichung (ALLEN et al., 1998). GRANGER (1997; 2000) bestimmte das Dampfdruck-Sättigungsdefizit und die Strahlungsbilanz mittels thermaler und spektraler Fernerkundungsdaten. Das Sättigungsdefizit wird in diesem Ansatz über eine nachgewiesene empirische Relation zur mittleren täglichen Oberflächentemperatur, die Albedo über die Integration der Reflexionsgrade im kurzwelligen Spektrum ermittelt. CHOUDHURY (2000) konkretisiert die Verdunstungsabschätzung durch Berechnung weiterer Variablen des Penman-Monteith-Ansatzes, wobei der fernerkundliche Schwerpunkt bei der Integration von Vegetationsparametern liegt. Zum einen wird der Anteil der Vegetationsbedeckung für eine Bezugsfläche zur Abschätzung der Evaporation des Bodens herangezogen, zum anderen wird der Stomata-Widerstand über dessen empirische Relation zur Kohlenstoffassimilation ermittelt. Diese Abschätzung basiert dann wesentlich auf fernerkundlich ermittelten Strahlungsmengen, die zur Photosynthese genutzt werden (PAR, *Photosynthetically Active Radiation*).

Verschiedene operationelle Ansätze beruhen auf der Berechnung eines Evapotranspirationsindizes (*evaporative fraction*)²⁹ zum Monitoring der Feuchtigkeitsverhältnisse an der Erdoberfläche. Dabei wird eine Relation zwischen fernerkundlichen Strahlungs- und Temperaturparametern genutzt (NEMANI und RUNNING, 1989). Im Streudiagramm wird bei einem reinen Bodensignal ein geringer NDVI, dafür aber eine hohe Oberflächentemperatur (*Land Surface Temperature*, LST) erwartet. Bei einer hohen Vegetationsbedeckung sind gegenteilige Verläufe anzunehmen, da durch die Evapotranspiration eine kühlere Temperatur hervorgerufen wird (Verdunstungskälte). Diese Technik wird von NISHIDA et al. (2003) bei der Entwicklung eines 8-tägigen globalen Produkts aus MODIS-Daten (*evaporation index*) verwendet³⁰. VERSTRAETEN et al. (2005) benutzen anstelle des Vegetationsindizes die Albedo, die im Falle hoher Feuchtigkeit an der Oberfläche in der Regel geringer ist als bei trockenen Verhältnissen.

²⁹ Anteil der verfügbaren Energiemenge an der Erdoberfläche, die für die Evapotranspiration verwendet wird (ohne Bodenwärmeflüsse).

³⁰ Bisher ist dieses MOD16-Produkt lediglich global definiert und nicht realisiert.

Eine weit verbreitete Anwendung ist SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), der von BASTIAANSEN (1995) entwickelt wurde (vergleiche BASTIAANSEN et al., 1998). Der Ansatz basiert auf der Berechnung thermodynamischer Energieflüsse an der Erdoberfläche, wobei die latente Verdunstungsenergie (-wärme) als Residuum der Energiebilanzgleichung abgeleitet werden kann. Von der Strahlungsbilanz, welche eine Quantifizierung der verfügbaren Energiemenge ermöglicht, werden dazu fühlbare Wärmeflüsse und Bodenwärmeflüsse subtrahiert (BASTIAANSEN, 2000). Eingangsparemeter sind neben der Landoberflächen-temperatur der Emissionsgrad, die Albedo, und der NDVI. Sehr ähnlich aufgebaut sind das RESEP (*Regional Evapotranspiration through Surface Energy Partitioning*; AMBAST et al., 2002) oder das SEBS-Modell (*Surface Energy Balance System*; SU, 2002), die vor allem bei der Berechnung des fühlbaren Wärmeflusses variieren.

Eine Weiterentwicklung hinsichtlich einer Operationalisierung stellt das auf SEBAL basierende METRIC Modell (*Evapotranspiration at high Resolution and with Internalized Calibration*) dar, das für Landsat Daten entworfen wurde (ALLEN et al., 2005). METRIC erweitert SEBAL für gebirgiges Relief und erreicht durch die Hinzunahme der Referenzverdunstung für Alfalfa (ASCE-EWRI, 2005) eine stärkere Anpassung an regionale Verhältnisse. TASUMI et al. (2005) zeigten die interne Kalibrierung von SEBAL und METRIC. In einer Sensitivitätsstudie wurde die Unabhängigkeit der Modelle von atmosphärischen Einflüssen auf unkorrigierte Thermaldaten demonstriert³¹.

Einschränkend muss erwähnt werden, dass SEBAL eigentlich für trockene Klimate entwickelt worden ist. Die tatsächliche Verdunstung wird für die beim Satellitenüberflug vorherrschende meteorologische Situation aufgezeichnet. Die Kalibrierung erfolgt über die Existenz von Extremwerten, also absolut trockener und feuchter Oberflächen. Selbst wenn aride oder semiaride Verhältnisse gegeben sind, kann sich diese Situation in Abhängigkeit des Klimas schnell ändern, so dass Korrekturen vorgenommen werden müssen (vergleiche hierzu den Ansatz in METRIC, MORSE et al., 2001). Hinzu kommt, dass bei der Modellierung der saisonalen Evapotranspiration zeitliche Lücken in der Regel durch Interpolation geschlossen werden. Diese Interpolationen basieren auf der Annahme konstanter Bedingungen für den Interpolationszeitraum. Nun kann aber die meteorologische Situation in einem solchen Zeitraum beträchtlich variieren³²: Ein Niederschlagsereignis ändert die Bodenfeuchte und die Feuchtigkeit auf den Pflanzen (Interzeption), so dass generell ein Anstieg des Energieumsatzes für die Evaporation zu erwarten ist, der nicht erfasst werden kann. Mit höherer zeitlicher Auflösung, also durch häufigere Anwendung der Modellierung kann folglich die Genauigkeit bei der zeitlichen Aggregation (Berechnung der saisonalen Evapotranspiration) gesteigert werden.

³¹ Vor allem die fehlende Atmosphärenkorrektur der Fernerkundungsdaten ist eine fundamentale und häufig auftretende Kritik an der Umsetzung des Modells in den meisten Studien seitens der Fernerkundungs-Community.

³² Eine Einschränkung, die nicht alleine für SEBAL, sondern für alle fernerkundliche Ansätze zur Modellierung der Evapotranspiration gilt (VERSTRAETEN et al., 2005).

SEBAL kam in mehr als 30 Fallstudien für alle Fernerkundungssensoren mit thermalen Bändern zur Anwendung (unter anderem Landsat TM and ETM, NOAA, ASTER, MODIS und Meteosat; BASTIAANSEN et al., 2005). In verschiedenen Klimatypen wurde SEBAL in der ganzen Welt eingesetzt und mittels Lysimeterversuchen, Scintillometern, *Bowen Ratio Towers* oder *Eddy Correlation* Methoden validiert³³ (Abbildung 3-4). Die gemessenen Genauigkeiten auf Feldebene sind hoch und schwanken zwischen Abweichungen von 1 und 33 % bei täglichen Aufzeichnungen und zwischen 2 und 30 % bei einer zehntägigen Aggregation der Daten. Bei der Integration über größere Einzugsgebiete und einer Gegenüberstellung mit der Wasserbilanz wurde zudem ein sehr niedriger Gesamtfehler von unter 11 % im gesamten Saisonverlauf ermittelt (BASTIAANSEN et al., 2005).

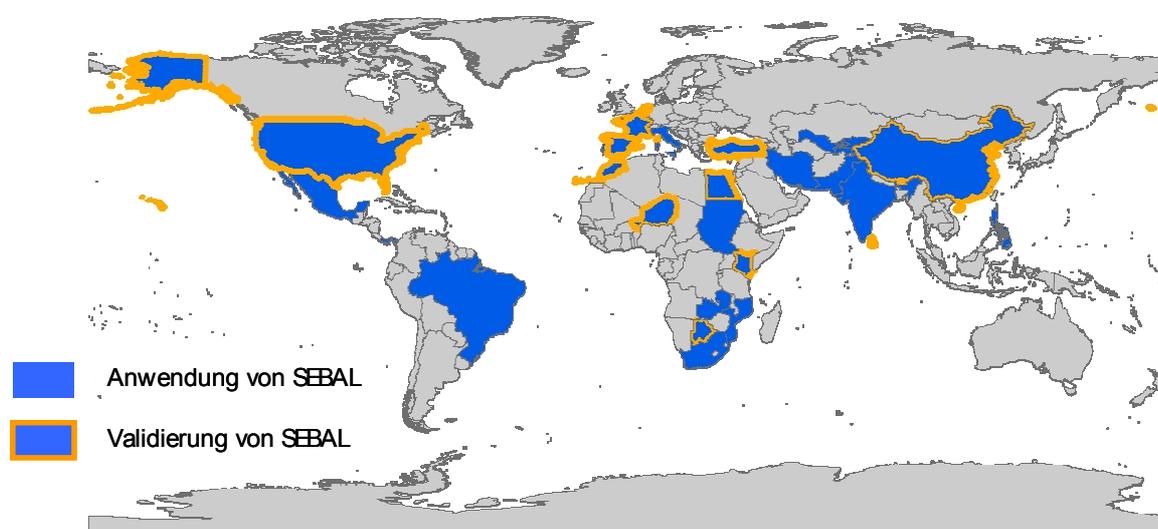


Abbildung 3-4: Globale Anwendung des SEBAL-Modells. Die Länder, in welchen SEBAL bereits eingesetzt wurden, sind blau eingefärbt. Der orangefarbene Rand hebt die Länder hervor, in denen das Modell bereits erfolgreich validiert wurde.

Für die vorliegende Dissertation wurden das SEBAL-Modell und die Integration einiger in METRIC enthaltenen Komponenten hinsichtlich der Geländeanbindung und der Operationalisierbarkeit als geeignet angesehen: SEBAL wurde für flaches Terrain in semiariden und ariden Regionen entwickelt, was auf das gesamte Bewässerungsland im Unterlauf des Amu Darya zutrifft. Durch die weite Verbreitung des Modells bis hin zu Operationalisierungen und den Stand der Validierung für verschiedene Klimatypen hat SEBAL darüber hinaus seinen experimentellen Charakter verloren. Dieser Umstand kam vor allem der Situation zugute, dass keine direkten Evapotranspirationmessungen auf Feldniveau in der laufenden Projektphase vorgesehen waren. Für eine SEBAL/METRIC Kombination sprach weiterhin, dass lediglich meteorologische Daten zu den Fernerkundungsdaten hinzugezogen werden mussten. Viele

³³ Zur Berechnung und Validierung der momentanen tatsächlichen Verdunstung beim Satellitenüberflug spielt der Klimatyp gegenüber der meteorologischen Situation eine untergeordnete Rolle.

weitere Parameter, wie etwa im Ansatz von CHOUDHURY (2000), mussten nicht durch zeitintensive Geländeerhebungen zusammengetragen werden.

In Mittelasien gibt es nur wenige bekannte Anwendungen für die fernerkundungsbasierte Bestimmung der tatsächlichen Evapotranspiration. In der Arbeit von EL MAGD und TANTON (2005) wurde auf der Basis von Daten des Landsat 7 ETM+ die saisonale Evapotranspiration für einen Teil der Kyzyl-Orda Region abgeleitet. Weiterhin wurde bereits eine Vorstudie der Modellierung der saisonalen tatsächlichen Evapotranspiration auf Basis 16-tägiger MODIS-Produkte durchgeführt (CONRAD et al., 2004b).

3.2.2 Das SEBAL-Modell zur Bestimmung der tatsächlichen Evapotranspiration

Der *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) ist ein fernerkundungsbasierter Ansatz zur Quantifizierung tatsächlich verdunsteter Wassermengen an der Erdoberfläche. Wie bereits durch seinen Namen impliziert, löst dieses Modell die Energiebilanzgleichung an der Erdoberfläche (BASTIAANSEN, 1995; BASTIAANSEN et al., 1998; BASTIAANSEN, 2000). Dabei werden latente Wärmeflüsse (λET , *latent heat flux density*) als Differenz zwischen der an der Erdoberfläche verfügbaren Strahlungsenergie (R_n , *net radiation*, resultierend aus der Strahlungsbilanz) und der Summe aus dem Bodenwärmefluss (G , *ground heat flux density*) und dem fühlbaren Wärmefluss (H , *sensible heat flux density*) gebildet (Abbildung 3-5)³⁴.

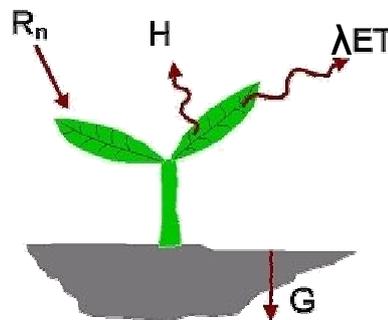


Abbildung 3-5: Schematisierte Darstellung der Energiebilanz an der Erdoberfläche (R_n = Verfügbare Strahlungsenergie; G = Bodenenergiefluss; H = Fühlbarer Wärmefluss; λET = Latenter Wärmefluss).

Die drei Komponenten R_n , H und G werden in SEBAL nacheinander berechnet. Davon werden R_n und H größtenteils physikalisch basiert hergeleitet, die Ermittlung von G beruht allein auf empirischen Relationen. Nach der Definition von BASTIAANSEN et al. (1998) gehen in das

³⁴ Physikalisch korrekt ausgedrückt handelt es sich – wie die zur Übersetzung ins Englische gewählten Begriffe andeuten – um Watt pro Quadratmeter (W/m^2). Die Begrifflichkeiten sind in der Literatur sehr unscharf gewählt. Auch BASTIAANSEN et al. (2000) spricht von *sensible*, *ground* und *latent heat flux*, und gibt als Einheit W/m^2 an. Laut WEISCHET (1994) sind international getroffene Konventionen Ursache für die Unsicherheit in der Verwendung der strahlungsphysikalischen Begriffe.

Modell vier verschiedene fernerkundliche Parameter und die Windgeschwindigkeit ein. SEBAL ist unabhängig von Landoberflächentypen (also der Landnutzung) anwendbar³⁵. METRIC ist adjustiert an die Existenz verschiedener Landnutzungsklassen³⁶. Es verwendet zusätzlich den LAI und fügt weitere meteorologische Eingangsgrößen hinzu, um das Modell enger an die regional vorherrschenden Bedingungen anzupassen und damit die Genauigkeit zu steigern (ALLEN et al., 2005). Letztgenannter Ansatz wurde hier angewendet, so dass sechs fernerkundliche Eingangsparameter sowie fünf meteorologische Messgrößen gemäß Tabelle 3-1 in die Modellierung einbezogen wurden.

Tabelle 3-1: Fernerkundliche und meteorologische Eingangsgrößen zur Modellierung der tatsächlichen Evapotranspiration mit SEBAL (schwarze Schriftfarbe) und METRIC (schwarze und blaue Schriftfarbe).

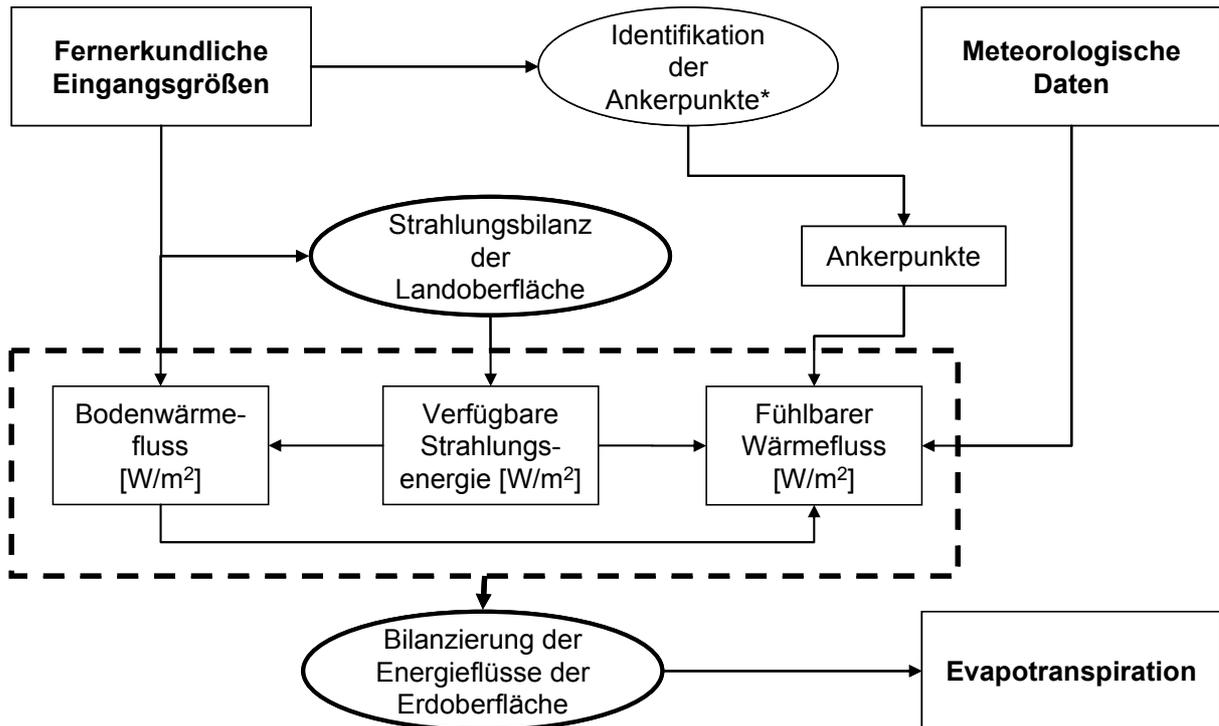
Die Oberfläche charakterisierende fernerkundliche Eingangsgrößen	Meteorologische Eingangsgrößen
Landoberflächentemperatur (LST)	Windgeschwindigkeit
Emissionsgrad (ϵ)	Lufttemperatur
Albedo (α)	Relative Feuchte
Vegetationsindex (NDVI)	Niederschlag
Blattflächenindex (LAI)	Netto-Strahlungsenergie
Landnutzung oder Landbedeckung	

Mit Ausnahme der meteorologischen Daten ist das Schema des Ablaufs der Datenprozessierung für beide Modelle gleich (Abbildung 3-6). Zunächst wird mittels physikalischer Parameter aus Satellitendaten (ergänzt mit der Beleuchtungsgeometrie, den atmosphärischen Verhältnissen und der Solarkonstanten) die Strahlungsbilanz berechnet und die verfügbare Energiemenge pro Fläche bestimmt (R_n). Die Bodenwärmeflüsse (G) werden aus Elementen der zur Berechnung der Strahlungsbilanz der Landoberfläche herangezogenen Parameter Landoberflächentemperatur und Albedo, sowie dem NDVI als Maß für die Dichte der Vegetation abgeleitet³⁷. Ein iteratives Verfahren, das die Stabilität der Atmosphäre berücksichtigt, erlaubt die Berechnung des fühlbaren Wärmeflusses (H). Dabei werden die Energiemengen an sogenannten Ankerpunkten für extrem trockene und extrem feuchte Standortbedingungen bestimmt. In diese Berechnung gehen in METRIC zusätzlich die meteorologischen Daten mit ein, um die Annahmen, die für die feuchten Ankerpunkte getroffen wurden, mittels der sogenannten Referenzevapotranspiration für Alfalfa (ASCE-EWRI, 2005) an die lokale meteorologische Situation anzupassen.

³⁵ Die Idee, die dahinter steht, sollte ermöglichen, dass die Landnutzung später als unabhängige Variable zur Auswertung der Modellierungsergebnisse verwendet werden konnte.

³⁶ Ein essenzieller Eingangsparameter für METRIC. Deshalb ist eine exakte Klassifikation für eine Anwendung dieses Modells ein besonders wichtiges Kriterium zur Verbesserung der Genauigkeit.

³⁷ In Metric wird hierzu anstelle des NDVI die Landnutzung und der LAI verwendet (MORSE et al., 2001).



* Die Ankerpunkte sind Extremwerte für besonders trockene und besonders feuchte Konditionen an der Erdoberfläche und dienen zur Kalibrierung der modellierten fühlbaren Wärmeflüsse.

Abbildung 3-6: Schematischer Arbeitsfluss zur Datenprozessierung mittels des SEBAL-Ansatzes zur Berechnung der tatsächlichen Evapotranspiration (MORSE et al., 2001).

Im Folgenden werden die gerade skizzierten Modellierungsansätze zur Bestimmung der einzelnen Komponenten der Energiebilanzgleichung detailliert vorgestellt.

3.2.2.1 Modellierung der Strahlungsbilanz

Die Berechnung der Strahlungsbilanz quantifiziert die an der Erdoberfläche verfügbare Energiemenge. Der positive Anteil setzt sich aus kurzwelliger und langwelliger an der Oberfläche ankommender Strahlung (R_s und R_l) zusammen. Die Albedo (α) bestimmt den reflektierten Anteil von R_s , während es für die langwellige Strahlung R_l keine solche Reflexionsgrade gibt. Hier beruft man sich auf das Kirchhoffsche Gesetz, über welches man die rückgestrahlte Energiemenge (im langwelligen Spektralbereich) durch Multiplikation von R_l mit dem Emissionsgrad (ε) berechnen kann. Die thermale (also langwellige) von der Erdoberfläche emittierte Strahlung (R_{Le}) wird negativ in der Bilanzgleichung verbucht:

$$R_n = (1 - \alpha)R_s + \varepsilon R_l - R_{Le}$$

Dabei werden α , ε und R_{le} mittels der Fernerkundungsdaten modelliert³⁸. ε und LST werden zur Bestimmung der Energiemengen von R_{le} über die Stefan-Boltzmann-Gleichung herangezogen:

$$R_{le} = \varepsilon * \sigma * LST^4$$

$$\sigma = 5,67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4 \text{ (Stefan-Boltzmann-Konstante)}$$

Zur Bestimmung der eingehenden langwelligigen Strahlung (R_l ; Ausstrahlung der Atmosphäre) wird ebenfalls die Stefan-Boltzmann-Gleichung angewendet, wobei hier der Emissionsgrad der Atmosphäre und die Lufttemperatur als Variablen benötigt werden. Nach BASTIAANSEN (1995) kann der atmosphärische Emissionsgrad mittels einer empirischen Relation über den Transmissionsgrad der Atmosphäre im kurzwelligen Strahlungsbereich (τ_s) bestimmt werden. Für diesen existiert eine stark vereinfachte Gleichung nach ALLEN et al. (1998), die unter der Annahme eines klaren Himmels und trockener Konditionen Gültigkeit hat³⁹. Er erreicht damit nahezu konstante Werte und ist lediglich von der Wegstrecke der Nadir gerichteten Strahlung durch die Atmosphäre abhängig. Die Strecke wird dabei mittels der Höhe des Untersuchungsgebiets über dem Meeresspiegel abgeschätzt. Als Lufttemperatur wird in SEBAL und METRIC stark vereinfachend (BASTIAANSEN et al., 1998; MORSE et al., 2001) die Oberflächentemperatur an einem feuchten Pixel herangezogen. Dieser ist einer der Ankerpunkte, die bei der Ermittlung des fühlbaren Wärmeflusses noch beschrieben werden. An diesem Punkt wird angenommen, dass Luft- und Oberflächentemperatur gleich sind.

Die durch die Atmosphäre eingehende kurzwellige Strahlung wird über den Stand der Sonne zum Beobachtungsobjekt und die atmosphärischen Bedingungen nach folgender Gleichung abgeschätzt (ALLEN et al., 1998; FAO-56):

$$R_s = S * dist_r * \cos \theta * \tau_s$$

Die Solarkonstante (S) von 1.367 W/m^2 wird mit dem Quadrat der Inversen des relativen Abstands zwischen Erde und Sonne ($dist_r$) adjustiert⁴⁰ (ALLEN et al., 1998). Über den Kosinus des Sonnenzenitwinkels (θ) wird die Weglänge der Strahlung durch die Atmosphäre berücksichtigt, die bei zunehmendem θ den oben beschriebenen Grad der Durchlässigkeit der Atmosphäre für kurzwellige Strahlung (τ_s) senkt.

3.2.2.2 Modellierung der Bodenwärmeflusses

Diese SEBAL-Modellkomponente geht auf einen Ansatz von CHOUDHURY et al. (1984) zurück. Diese erkannten, dass die Oberflächentemperatur (LST) und die aktuelle Albedo (a) als Variablen aufzufassen sind, die das Verhältnis zwischen Bodenwärmefluss und Strahlungsbilanz (G/R_n)

³⁸ Sofern diese nicht als Produkte existieren, müssen Sie sensorspezifisch zunächst über verschiedene Algorithmen abgeleitet werden. Daher wurde der Einsatz der weit vorverarbeiteten MODIS-Produkte für diese Arbeit als geeignet angesehen.

³⁹ Diese günstigen atmosphärischen Bedingungen liegen im Untersuchungsgebiet fast ganzjährig vor.

⁴⁰ Der Wertebereich von des relativen Abstands der Erde von der Sonne ($dist_r$) liegt zwischen 0,97 und 1,03.

bestimmen. Für unbedeckten Boden wurde eine empirische Relation aufgestellt, die mittels der durchschnittlichen Tagesalbedo die Bodenwärmeflüsse ableiten lässt (BASTIAANSEN et al., 1998). Nach BASTIAANSEN (1995) weicht die aktuelle Albedo um die Mittagszeit nicht signifikant von der durchschnittlichen Albedo im Tagesgang ab, so dass bei Sensorüberflügen um die Mittagszeit die durchschnittliche Albedo durch die tatsächliche Albedo (a) ersetzt werden kann.

Der auf diese Weise gebildete Faktor, der sogenannte *proportionality factor*, wurde durch einen *extinction factor* ergänzt, der die Verminderung der Bodenwärmeflüsse durch zunehmende Vegetationsbedeckung beschreiben kann (CHOUDHURY et al., 1984). Zur Formulierung von SEBAL stellten BASTIAANSEN et al. (1998) verschiedene Daten zusammen, auf deren Basis diese Widerstandsfaktoren mit dem NDVI korreliert wurden, und führten eine erneute Regressionsanalyse durch. Die Verminderung der Bodenwärmeflüsse steigt nämlich mit ansteigender Bodenbedeckung und damit mit dem NDVI. Letztendlich ergibt sich daraus folgende Gesamtgleichung für die Modellierung des Bodenwärmeflusses (G):

$$\frac{G}{R_n} = \frac{LST}{\alpha} (0,0038 + 0,0074\alpha)(1 - 0,978NDVI^4)$$

3.2.2.3 Modellierung des fühlbaren Wärmeflusses

Der fühlbare Wärmefluss (H) wird im Wesentlichen über zwei Variablen bestimmt:

- (1) eine vertikale Temperaturdifferenz der Lufttemperatur in Oberflächennähe und der umgebenden Lufttemperatur (vertikaler Temperaturgradient, dT) und
- (2) den aerodynamischen Wärmetransportwiderstand (r_{ah}), der die vertikale Ausbreitungsgeschwindigkeit des Wärmeflusses beeinflusst.

Zur Bestimmung von H wird die Energiemenge (W), die notwendig ist, um die Temperatur einer Masseneinheit Luft (1,0 kg) um 1,0 Kelvin zu erhöhen (spezifische Wärme der Luft, c_p), mit der Dichte der Luft (ρ_{air} in kg/m^3)⁴¹ und dem vertikalen Temperaturgradienten (dT) multipliziert. Das Produkt wird dann durch den aerodynamischen Wärmetransportwiderstand (r_{ah}) dividiert:

$$H = \frac{\rho_{air} * c_p * dT}{r_{ah}}$$

Entscheidenden Einfluss auf r_{ah} hat die Stabilität der Atmosphärenschichtung. Je nachdem, ob eine stabile, neutrale oder labile Luftschichtung vorherrscht, verringert sich der vertikale Luftmassenaustausch, bleibt unverändert, oder steigt (Abbildung 3-7).

⁴¹ Das Teilprodukt ergibt die spezifische Wärme umgerechnet auf die Volumeneinheit (WEISCHET, 1994).

Vertikale Luftbewegung in Bodennähe bei einem trockenadiabatischen Temperaturgradienten von 6.5°C/km

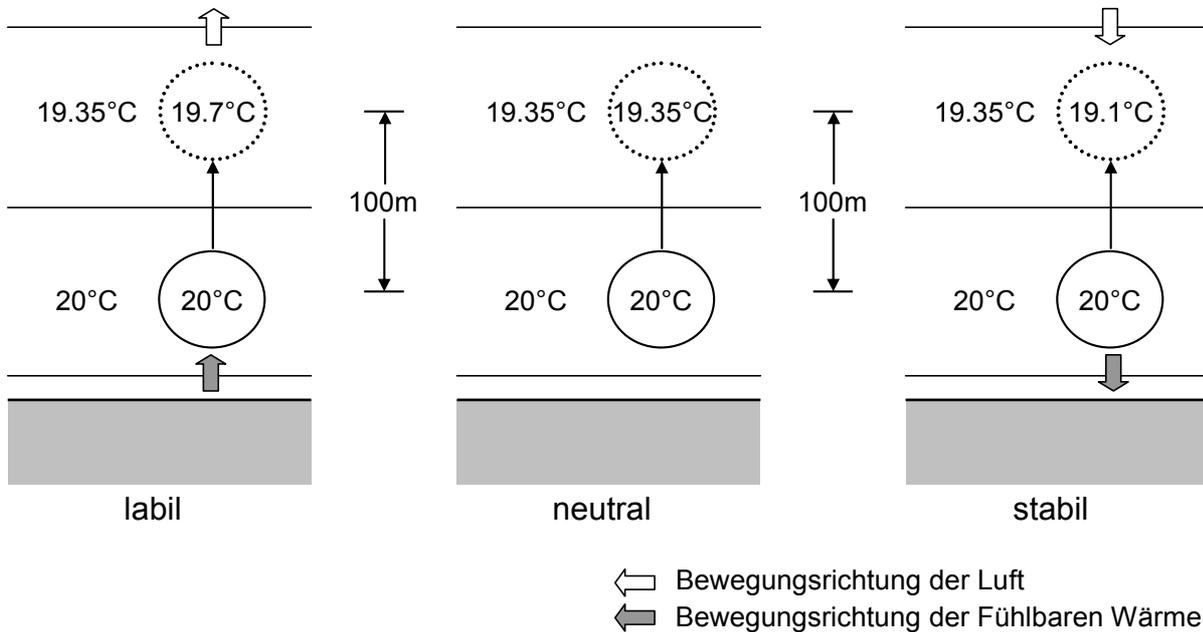


Abbildung 3-7: Schematische Darstellung labiler, neutraler und stabiler Schichtungen in der Atmosphäre (ALLEN et al., 2002).

Bei neutralen Verhältnissen der atmosphärischen Luftschichtung hängt r_{ah} in erster Linie von der Windgeschwindigkeit sowie den sogenannten Rauigkeitslängen für den Impuls (z_{0m}) und die Wärme (z_{0h}) ab. Die Rauigkeitslängen weisen dabei folgenden formellen Zusammenhang auf (ALLEN et al., 1994):

$$z_{0h} = 0,1 * z_{0m}$$

Für r_{ah} (neutrale Bedingungen der atmosphärischen Luftschichtung vorausgesetzt) gilt dann nach ALLEN et al. (2002):

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_m - d}{z_{0m}}\right) \ln\left(0,1 \frac{z_h - d}{z_{0m}}\right)}{k^2 u_{z_m}},$$

wobei

- z_m, z_h : Messhöhen der Windgeschwindigkeit und der Temperatur [m]
- d : Verdrängungshöhe [m] (vergleiche ALLEN et al., 2002)
- z_{0m} : Rauigkeitslänge für den Impuls [m]
- u_{z_m} : Windgeschwindigkeit in Höhe z_m [m/s]
- k : von Karman-Konstante ($k=0,41$).

Für stabile und labile Luftschichtungen fließen noch Korrekturfaktoren für z_{0m} und z_{0h} in die Berechnung von r_{ah} mit ein. Dazu wird die sogenannte Monin-Obhukov-Länge (L) ermittelt. Die Eingangsgrößen H , u (Windgeschwindigkeit), z_{0m} und LST werden als bekannt voraussetzt.

$$L = \frac{\rho c_p u_*^3 LST}{gkH},$$

wobei

- c_p : spezifische Wärme der Luft [J/kg/K]
- ρ_{air} : Dichte von Luft [kg/m³]
- u_* : Schubspannungsgeschwindigkeit (*friction velocity*) [m/s]
- g : Schwerebeschleunigung [m/s²]
- k : von Karman-Konstante ($k=0,41$).

Die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* ergibt sich aus der Windgeschwindigkeit und der Rauheitslänge z_{0m} (ALLEN et al., 2002). Diese kann über die Pflanzenhöhe oder, im Fall anderer Oberflächenbedeckungen wie Wasser oder Siedlung, mittels empirischer Werte aus der Literatur abgeschätzt werden. Die Pflanzenhöhe (h) kann nach Studien von TASUMI et al. (2002) für Vegetationsklassen mit dem Blattflächenindex (LAI) entweder klassenspezifisch oder verallgemeinert in folgendes Verhältnis gesetzt werden:

$$h = 0,018LAI$$

$$z_{0m} = 0,12h$$

Daraus folgen die oben genannten Korrekturfaktoren und die Berechnung von r_{ab} . Dieser Prozess wird von ALLEN et al. (2002) detailliert beschrieben. Nun ist aber H nur für wenige Pixel in einer Satellitenszene überhaupt abschätzbar, so dass in SEBAL zur pixelweisen Berechnung von H verschiedene Annahmen getroffen werden:

- (1) Bis zur Messhöhe der Windgeschwindigkeit herrscht in der Atmosphäre über der Oberfläche eine neutrale Schichtung.
- (2) Die Windverhältnisse in einer 200 m hoch gelegenen Schicht variieren in einer Umgebung der meteorologischen Station nicht.
- (3) Das Verhältnis zwischen dT und der Oberflächentemperatur ist linear (BASTIAANSEN et al., 1998)⁴².
- (4) An mindestens zwei Punkten ist H bekannt.

⁴² Wichtigste Voraussetzung zur Anwendung von SEBAL

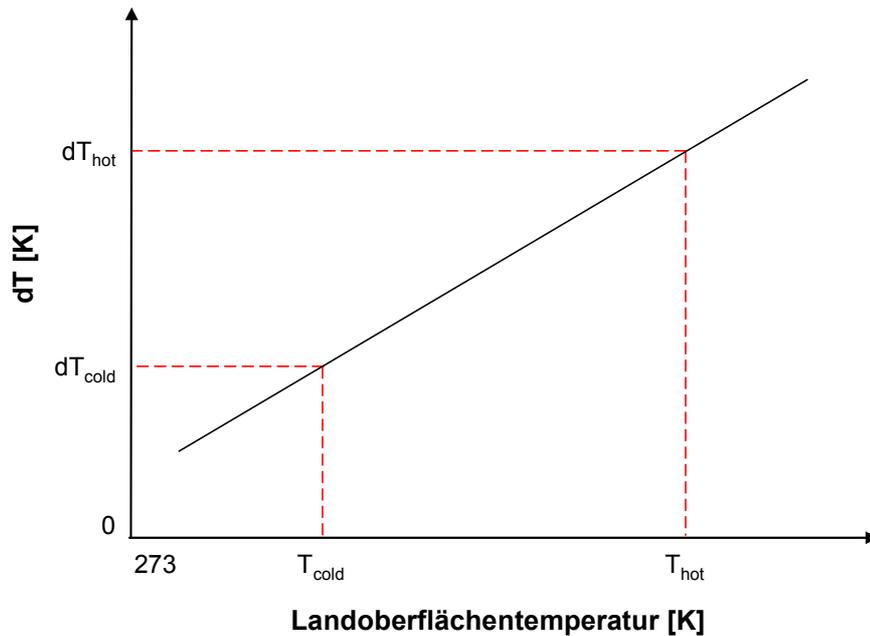


Abbildung 3-8: Bestimmung von dT aus der Landoberflächentemperatur (LST; ALLEN et al., 2002).

Durch (1) und (2) kann die Berechnung von r_{ah} für jedes Pixel, zunächst unter Annahme neutraler Bedingungen durchgeführt werden (MORSE et al., 2001). Der zur Bestimmung von H fehlende vertikale Temperaturgradient dT wird aus (3) für jedes Pixel aus der LST ermittelt. Abbildung 3-8 verdeutlicht diese Idee und zeigt, dass die Linearität günstigerweise aus zwei Extremwerten abgeleitet wird, an denen H bekannt ist (4) und dT direkt abgeleitet werden kann. Daraus folgt, immer noch unter der Annahme neutraler Bedingungen, für jedes Pixel ein Wert für H . In einem iterativen Verfahren können dann L , die beiden Korrekturfaktoren für r_{ab} , r_{ah} selbst und für die beiden Extremwerte (Ankerpunkte) dT erneut berechnet werden. Dieser Schritt wird so lange wiederholt, bis die Veränderung der Steigung und der Verschiebung nicht mehr signifikant ist (Abbruchkriterium für Iterationsverfahren; ALLEN et al., 2002).

3.2.2.4 Theorie zur Bestimmung der Ankerpunkte von SEBAL

Eine grundlegende theoretische Annahme von SEBAL und METRIC ist eine lineare Beziehung zwischen dem vertikalen Gradienten der Lufttemperatur und der Oberflächentemperatur (BASTIAANSEN et al., 1998; ALLEN et al., 2005). Diese lineare Beziehung wird in den Extremwerten, die unter sehr trockenen („heiße“) und sehr feuchten („kalte“) Oberflächenverhältnissen zu erwarten sind, verankert:

- (1) Für extrem trockene Verhältnisse wird λET auf Null geschätzt (also keine latenten Wärmeflüsse angenommen), so dass H direkt aus der Energiebilanzgleichung durch R_n und G folgt. Durch die Umstellung der Gleichung zur Berechnung von H lässt sich dann der Maximalwert für dT ableiten.

- (2) Für extrem feuchte Verhältnisse wird angenommen, dass die gesamte verfügbare Energie, die nicht in G eingeht, zur Verdunstung verwendet wird und dass dabei der Vertikalgradient der Lufttemperatur nahe bei Null liegt⁴³.

BASTIAANSEN (2000) schlägt vor, die extrem trockenen Werte H_{bot} für H aus vegetationslosen, trockenen Flächen (Pixeln) zu extrahieren. Dies schränkt ALLEN et al. (2002) auf Brachflächen im Untersuchungsgebiet ein und lässt beispielsweise keine Wüstenbereiche oder versiegelte Plätze zu, da möglicherweise die Grundannahme des linearen Verhaltens zwischen dT und LST für diese nicht mehr gegeben ist.

Als kalte Oberflächenverhältnisse repräsentierende Pixel eignen sich nach BASTIAANSEN (2000) Wasserflächen, wobei auch gut bewässerte Landwirtschaftsflächen herangezogen werden können (falls keine Wasserflächen vorliegen). Den letzten Gedanken priorisiert METRIC. Für gut bewässerte und dicht vegetationsbestandene landwirtschaftliche Nutzflächen werden ET-Werte im Bereich der ASCE-EWRI Referenzevapotranspiration (ET_{ref}) für Alfalfa (ASCE-EWRI, 2005) angenommen (ALLEN et al., 2005). Darüber hinaus lassen feuchte Bodenverhältnisse unter der Vegetationsdecke noch einen geringfügig höheren Wert als ET_{ref} voraussetzen (ALLEN et al., 2005).

Beide Ankerpunkte sind günstigerweise in der näheren Umgebung der meteorologischen Station zu suchen (ALLEN et al., 2002). Die Bestimmung entsprechender Pixel in den Fernerkundungsdaten wird bei der Umsetzung und Anpassung des Modells detailliert aufgegriffen (Kapitel 6.2.1), da ein Vorschlag zu deren automatisierten Identifikation gemacht werden soll. Umfassende Erklärungen zur Extraktion der Ankerpunkte finden sich auch bei MORSE et al. (2001).

3.3 Methoden zur Analyse und Bewertung der Nutzung von Land und Wasser in Bewässerungsgebieten

Nach BOS et al. (2005) zählen die Bilanzierung von Wasserflüssen sowie der Einsatz der Fernerkundung zu den wichtigsten Methoden, um einen Überblick über ein Bewässerungssystem zu gewinnen, was eine Bewertung der Funktionalität in einer ersten Näherung erlaubt⁴⁴. Dabei

⁴³ An dieser Stelle variiert METRIC von SEBAL, was in Kapitel 6.2.1 wieder aufgenommen wird.

⁴⁴ Weiterhin werden die Erhebung von Gender-Performanceindikatoren und sozioökonomische Befragungen vorgeschlagen. Erstere sollen die geschlechterspezifischen Entscheidungszusammenhänge im Verwaltungs- und Bewirtschaftungsprozess eines landwirtschaftlichen Bewässerungssystems bewerten. Letztere dienen der Erhebung von Variablen aus den unterschiedlichen Disziplinen. So können Ernteerträge, Verständnis der Geschäftsprozesse eines Farmers oder einer WUA oder die Beschäftigungsstruktur der Betriebe ermittelt werden (BOS et al., 2005). Beide Methoden spielen für den Fortgang der Arbeit keine Rolle und sind nur der Vollständigkeit halber angegeben.

eignet sich zur Bilanzierung von Wasserflüssen in Flusseinzugs- und Bewässerungsgebieten die Konzeption des sogenannten *water accounting* (MOLDEN, 1997; MOLDEN and SAKTHIVADIVEL, 1999), da Zu- und Abflüsse von Wasser dabei nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ unterteilt werden.

Mithilfe der Basisvariablen des *water accountings* lassen sich beispielsweise durch Indikatoren weitere Nutzungspotenziale des Wassers aufzeigen und Produktivitätsanalysen durchführen (vergleiche beispielsweise HAFEEZ, 2003 und BANDARA, 2006). Ein Teil dieser Indikatoren kann zur Aufschlüsselung der Funktionsweise eines Bewässerungssystems und zur Identifizierung von regionalen Disparitäten herangezogen werden. Diese sogenannten Performanceindikatoren für landwirtschaftliche Bewässerungssysteme implizieren die genaue Kenntnis der agrarischen Landnutzung innerhalb der betrachteten hydrologischen Grenzen.

Der Einsatz von Methoden der Fernerkundung eignet sich insbesondere zur Bestimmung flächenhafter Daten zur Durchführung des *water accounting* und zur Ableitung von Performanceindikatoren, die eine häufige Erfassung (Monitoring) der Qualität des Betriebs des Kanalsystems erlauben (BOS et al., 2005). Daher wurden fernerkundliche Parameter bereits in zahlreichen Studien zur Bewertung landwirtschaftlicher Bewässerungssysteme erfolgreich eingesetzt (BASTIAANSEN und BOS, 1999).

In diesem Abschnitt sollen diese Gedanken vertieft und daher im Sinne der Zielsetzung dieser Dissertation der Stand der Forschung hinsichtlich des *water accounting* und der Performanceindikatoren in Bewässerungsgebieten unter besonderer Berücksichtigung fernerkundungsbasierter Datengrundlagen dargelegt werden (Kapitel 3.3.3). Zunächst werden allerdings relevante Definitionen des *water accounting* eingeführt (Kapitel 3.3.1) und die zur Bewertung und zum Monitoring des Kanalsystems (Zu- und Abwasser) großer Bewässerungsgebiete geeigneten Performanceindikatoren vorgestellt (Kapitel 3.3.2).

3.3.1 Das „Water Accounting“

Ein grundlegendes Konzept zur Berechnung von Wassernutzung in Flusseinzugs- und Bewässerungsgebieten wird im Englischen als *water accounting*⁴⁵ bezeichnet (MOLDEN, 1997; MOLDEN und SAKTHIVADIVEL, 1999). Es soll aufschließen, in welchen zeitlichen Mustern von welchen Konsumenten das Wasser in einem durch hydrologische Grenzen markierten Untersuchungsgebiet zu welchem Zweck verwendet wird. Dabei kann eine klein- (Haushalt und Farmebene), mittel- (Ebene der Wasserversorgung) und großräumige (Gesamtsystem)

⁴⁵ Dieser Terminus und die damit verbundene Terminologie werden weiterhin in Englisch verwendet. Es erschien nicht sinnvoll, die deutsche Übersetzung zu verwenden, da *water accounting* mehr als die Erstellung der Wasserbilanz umfasst.

Betrachtungsweise eingenommen werden. Dadurch werden innerhalb dieser Grenzen Wasserflüsse transparent sowie Einspar- und Umverteilungsmöglichkeiten quantifizierbar. Weiterhin dient dieses Konzept der Vereinheitlichung der Sprache über die Wassernutzung für die unterschiedlichen Nutzer innerhalb bestimmter hydrologischer Grenzen (IWMI, 2006).

Es lassen sich folgende wichtige Variablen zur Erstellung der Wasserbilanzen und zu Bildung von Indikatoren definieren⁴⁶:

Water storage: Die Speichervariablen innerhalb der hydrologischen Grenzen des Untersuchungsgebiets. Im Bewässerungsgebiet sind dies potenziell die Bodenfeuchte, das Grundwasser sowie Wasserspeicherseen.

Inflow: Einkommende Wassermengen in ein Untersuchungsgebiet. Man unterscheidet den *gross inflow* als die Summe aus dem oberflächlichen Zufluss und dem Niederschlag vom *net inflow*, der zusätzlich die Veränderungen des *water storage* berücksichtigt.

Outflow: Wassermenge, die aus dem Untersuchungsgebiet herausfließt. *Committed outflow* ist die Wassermenge, die nach gesetzlichen Vorgaben im Unterlauf der hydrologischen Grenzen des Untersuchungsgebiets zur Verfügung gestellt werden muss. *Uncommitted outflow* beziffert die Wassermenge, die zusätzlich zum *committed outflow* das Untersuchungsgebiet verlässt und potenziell noch genutzt werden kann.

Water depletion: Der Wasserverbrauch eines Systems. Im Bewässerungssystem umfasst es also die Wassermengen, die entweder durch Evapotranspiration ganz aus dem System verschwinden oder die durch Schadstoffe (zum Beispiel Düngemittel- oder Salzbelastungen) so kontaminiert werden, dass sie nicht weiter verwendet werden können; ebenfalls ist der Wasserabfluss in Senken (abflusslose Seen ohne weitere Nutzung) als *water depletion* aufzufassen.

⁴⁶ Hier wird lediglich der Teil der Terminologie eingeführt, der für das Verständnis und zur besseren Einordnung der Ergebnisse in den abschließenden Kapiteln der Arbeit von Relevanz ist.

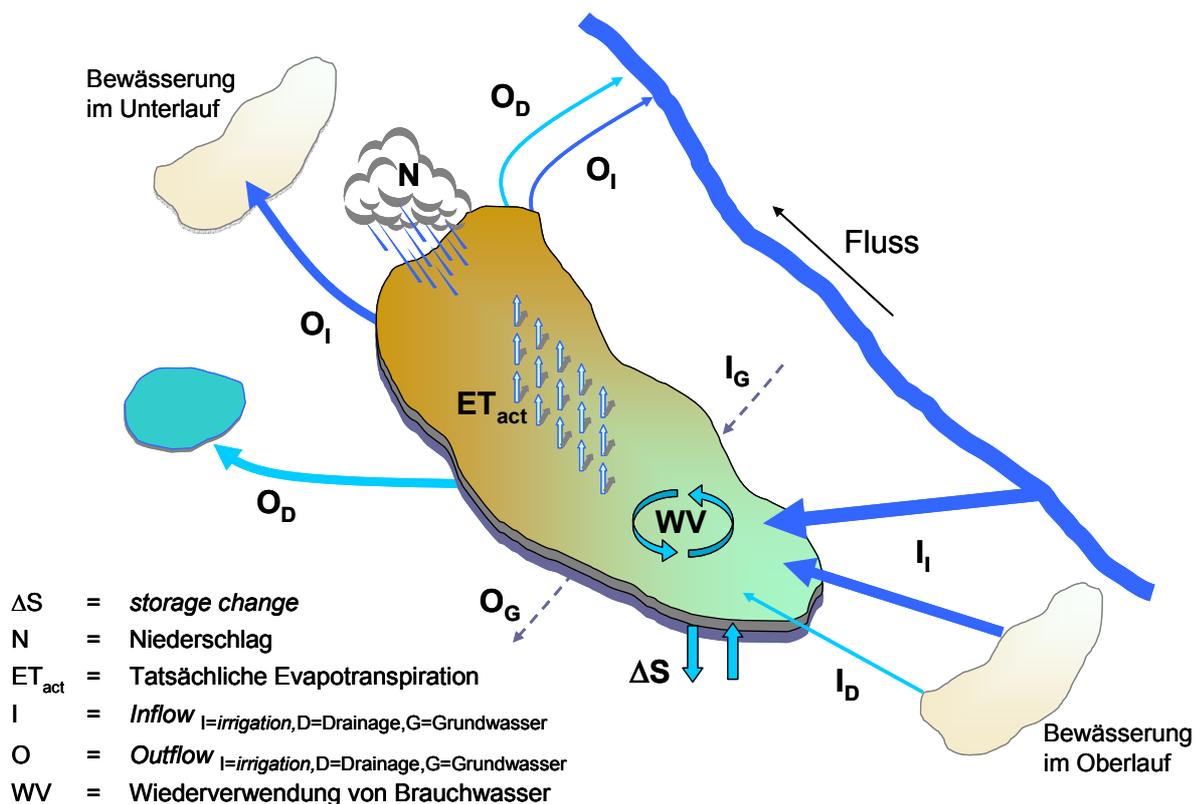


Abbildung 3-9: Potenzielle Wasserflüsse in einem rein landwirtschaftlichen Bewässerungssystem (BOS, 2004, an die Situation in Khorezm angepasst).

Auf ein Bewässerungssystem zugeschnitten ergibt sich die Bilanzierung der saisonalen Wasserflüsse (Abbildung 3-9) aus der Differenz zwischen *inflow* und der Summe aus *outflow* und *depleted water*. Der *inflow* berechnet sich aus der Summe der Bewässerungs- (I_I) und Drainagezuflüsse (I_D) sowie des Niederschlags (N). Der *outflow* wird im Bewässerungsgebiet allein durch das abfließende Bewässerungswasser bestimmt (O_I). Die verbrauchten Wassermengen (*depleted water*) setzen sich gemäß der Definition des *water accounting* aus den Drainageabflüssen (O_D) und der tatsächlichen Evapotranspiration zusammen (ET_{act}). Das Resultat ist die Veränderung der Speichervariablen (*storage change*, ΔS):

$$\Delta S = (I_I + I_D + N) - (O_I + O_D + ET_{act})$$

Existieren innerhalb des Bewässerungsgebiets noch andere Wassernutzer (beispielsweise Haushalte oder Industrie) oder gibt es einen Zu- oder Abstrom von Grundwasser, sind diese in der Gleichung ebenfalls zu berücksichtigen.

Die Kernvariable des *water accounting* bildet das genutzte Wasser (*water depletion*): Man unterscheidet nach *process depletion*, bei der Wasser zur Generierung von Profit (Ertrag) verwendet wird, von *non-process depletion*, bei der Wasser verbraucht wird, ohne einen monetären Nutzen daraus zu gewinnen. Ersteres wird in der Landwirtschaft hart definiert durch die Transpiration der

Pflanzen, letzteres ist durch Boden, Unkraut und Drainagewasser bestimmt. Durch die Gegenüberstellung mit den zur Nutzung verfügbaren Wassermengen kann die sogenannte *depleted fraction* für die Bewertung des Wasserverbrauchs gebildet werden. Aus Praktikabilitätsgründen wird diese Definition letztendlich zur Bildung des Indikators etwas abweichen, worauf im nachfolgenden Abschnitt näher eingegangen wird.

Der volle Umfang der Leistungsfähigkeit des Ansatzes wird an dieser Stelle nicht dargestellt⁴⁷, da er keine Grundlage zum Fortgang der Arbeit ist. Teilaspekte werden – allerdings schwerpunktmäßig vor dem Hintergrund des Einsatzes der Fernerkundung – im abschließenden Abschnitt dieses Unterkapitels (Kapitel 3.3.3) gegeben.

3.3.2 Performanceindikatoren

Performanceindikatoren zur Analyse und Bewertung der Funktionalität von Bewässerungssystemen zielen darauf ab, Kriterien wie Gleichheit, Adäquatheit und Zuverlässigkeit der Wasserverteilung, Effizienz (welche Menge des eingebrachten Wassers wird tatsächlich genutzt), Produktivität (im Vergleich zum Ertrag) und Rentabilität der Bewässerung zu untersuchen (BOS et al., 2005). Sie dienen einer objektiven Betrachtung eines Bewässerungssystems. Die Bewertung erfolgt durch vergleichende Analysen solcher Indikatoren oder die Abfrage von allgemeinen Schwellenwerten und Gegenüberstellungen mit langjährigen Erfahrungswerten (beispielsweise statistische Mittelwerte) aus dem Untersuchungsgebiet. Ideale oder kritische Werte sind also von Bewässerungssystem zu Bewässerungssystem unterschiedlich. Aus der Literatur herangezogene Werte können daher lediglich zur Orientierung dienen und die Aussagekraft eines Performanceindikators bestimmen, sofern sie nicht über dieselbe Untersuchungsregion erstellt worden sind.

Die Wasserentnahme (Frischwasser) und die Drainagemengen (belastetes Wasser) innerhalb hydrologischer Grenzen eines Bewässerungssystems sind wichtige Kenngrößen zur Bildung der Indikatoren. Die Wasserentnahme (WE) berechnet sich nach der Terminologie des *water accounting* aus der Bilanzierung von zugeführtem Bewässerungswasser (I_I), aus dem Gebiet herausgeleitetem Bewässerungswasser (O_I) und dem Niederschlag (N). Die Drainagemengen (D) bilanzieren zugeführtes (I_D) und abgeleitetes (O_D) landwirtschaftliches Abwasser:

$$WE = I_I - O_I + N \quad \text{und} \quad D = O_I - I_D$$

Der Indikator **Wasserentnahme pro Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche** soll aufschließen, wie viel Wasser für Bewässerungslandwirtschaft zur Verfügung steht. Das

⁴⁷ Ebenfalls ist die Gegenüberstellung von hydrologisch-ökologischen Variablen mit ökonomischen Variablen (im Agrarsektor beispielsweise Einkommen oder Erträge, BASTIAANSEN, 2000) eine Kernaufgabe des *water accounting*. Auf diese Weise können Einschätzungen zur Produktivität der Wassernutzung im Untersuchungsgebiet getroffen werden.

Verhältnis stellt im Betrieb des Bewässerungssystems eine zu planende Größe dar, bestimmt in erster Annäherung die Adäquatheit der Wasserverteilung und kann während und nach der Saison als Kontrollvariable eingesetzt werden. Der Indikator ist weit verbreitet und eignet sich daher für regionale und überregionale Vergleiche, auch wenn unterschiedliche Werte nur Indizien für regionsspezifische Verhältnisse geben (homogene geoökologische Ausgangssituation in Bezug auf Klima, Boden und Hydrologie).

Die **Ratio zwischen Drainage und Wasserentnahme** (absolute Volumina werden dividiert) gibt – wenn sie niedrig ist – beispielsweise Potenziale der Wassermengen an, die insbesondere in trockenen Jahren oder hinsichtlich der Einbindung neuer Wassernutzer noch genutzt werden können. Nach BOS und VAN AART (1996) wird verallgemeinert 0,15 als kritischer Wert der Ratio angegeben, bei dessen Unterschreitung die Gefahr einer sekundären Bodenversalzung allein durch die Bewässerung einsetzt. Er kann ebenso gut als Indikator für eine übermäßige Drainage und damit für Wasserverschwendung angesehen werden, weswegen BANDARA (2006) auch ein systemspezifisches Maximum vorschlägt.

Depleted fraction wird direkt aus dem *water accounting* abgeleitet und beschreibt den Anteil des genutzten Wassers (*depleted water*), der gänzlich aus dem System verschwindet (ET_{act} = tatsächliche Evapotranspiration), im Verhältnis zur Wasserentnahme (BOS, 2004):

$$depleted\ fraction = \frac{ET_{act}}{WE}$$

Streng genommen müsste dieser Performanceindikator den zur Pflanzenproduktion direkt verwendeten Anteil des Bewässerungswassers ausdrücken (Transpiration). Gerade in großräumigen Herangehensweisen mit Fernerkundungsdaten lässt sich aber keine Unterscheidung zwischen Evaporation und Transpiration vornehmen. Diese würde beispielsweise dann notwendig, wenn man unterschiedliche Bewässerungstechniken in einem Bewässerungssystem miteinander vergleichend auf deren Effizienz untersuchen wollte.

BOS (2004) gibt einen verallgemeinerten Toleranzraum zwischen 0,5 und 0,9 für den Indikator *depleted fraction* an. Unterhalb (und auch oberhalb) besteht die Gefahr der Versalzung von Grund- und Bodenwasser durch Überversorgung. Die Schwellenwerte variieren ebenfalls zwischen einzelnen Bewässerungsgebieten (BANDARA, 2006)

Die **Relative Evapotranspiration** erlaubt die Bewertung der tatsächlichen Evapotranspiration (ET_{act}) gegenüber der potenziellen pflanzenspezifischen Evapotranspiration (ET_{crop} ; BASTIAANSEN und BOS, 1999). Letztere ist der Erwartungswert bei optimaler Pflanzenversorgung im Bewässerungssystem. Dieser hängt im Wesentlichen von der Fruchtart (Landnutzung) und den

ökologischen Rahmenbedingungen des Anbaus (darunter Böden und Klima) ab (ALLEN et al., 1998).

$$\text{Relative Evapotranspiration} = \frac{ET_{act}}{ET_{crop}}$$

Dieser Indikator erlaubt die Lokalisierung von Wasserüberangeboten und – viel häufiger – von Wasserunterversorgung einer Bewässerungseinheit (Pflanzenwasserstress, Hinweis auf eingeschränkte Wachstumsverhältnisse). Also indiziert die Relative Evapotranspiration die Adäquatheit der Wasserversorgung. Als Richtwert für ein kritisches Minimum ist für die Relative Evapotranspiration 0,8 (BANDARA, 2006) in der Literatur zu finden.

Nach BOS et al. (2005) zählt dieser Indikator zu den aussagestärksten Fernerkundungsindikatoren, da er potenziell – ohne aufwändige Geländemessungen – bis in die Situation auf Feld- oder WUA-Ebene „hineinzoomen“ und selbst kleinräumige Disparitäten aufdecken kann.

3.3.3 Beiträge der Fernerkundung

Die Beiträge der Fernerkundung zur Bilanzierung oberirdischer Wasserflüsse und zur diagnostischen Bewertung (Analyse von Performanceindikatoren) eines Bewässerungsgebietes sind vielfältig und können bis in die Bereiche Planung und Wasserrecht hineinragen. Fernerkundung liefert in erster Linie flächenhafte Variablen (MENENTI, 2000), die zur Berechnung einer Vielzahl diagnostischer Indikatoren herangezogen werden können (BOS et al., 2005). BASTIAANSEN und BOS (1999) geben eine umfassende Übersicht der Fernerkundungsindikatoren zur Überwachung der in Kapitel 3.3.2 genannten Performancekriterien.

Einen besonderen Stellenwert für hydrologische Analysen, besonders in Bewässerungsgebieten⁴⁸, besitzt die fernerkundungsbasiert bestimmte tatsächliche Evapotranspiration, die im weitesten Sinne den agrarischen Wasserverbrauch in einem landwirtschaftlichen Untersuchungsraum quantifiziert (BASTIAANSEN et al., 2000). Gerade diese Variable wird vielfältig zur Berechnung des *depleted water* zur Bildung regionaler Wasserbilanzen in landwirtschaftlich geprägten Gebieten (BASTIAANSEN und CHANDRAPALA, 2003; HAFEEZ, 2003) oder bei der Ableitung von Performanceindikatoren zum Monitoring der Bewässerung (BASTIAANSEN und BOS, 1999; BOS et al., 2005) eingesetzt.

Landnutzungsklassifikationen werden darin in erster Linie sogenannten Nachhaltigkeitskriterien zugeordnet, die beispielsweise auf der flächenhaften Messung der landwirtschaftlichen Intensität beruhen (THIRUVENGADACHARI und SAKTHIVADIVEL, 1997). SAKTHIVADIVEL et al. (1999)

⁴⁸ Bewässerung findet häufig in trockenen, und daher wolkenfreien Regionen statt, was als geeignete Voraussetzung für den Einsatz der Fernerkundung angesehen werden kann.

evaluierten die Intensität des Weizenanbaus in Bewässerungsgebieten Indiens. In der gleichen Untersuchung wurden die Ergebnisse der Landnutzungsklassifikation im GIS mit dem Kanalsystem, den Pumpstationen (Kapazitäten) sowie Grundwasserqualitäten überlagert, um anhand räumlicher Muster des Weizenanbaus potenzielle Erweiterungsmöglichkeiten der Anbaufläche aufzuzeigen. Eine ähnliche Arbeit in der gleichen Region wurde von BASTIAANSEN et al. (1999) durchgeführt.

Detaillierte und räumlich verteilte Informationen zur Landnutzung sind aber auch immer essentieller Bestandteil bei der Analyse der Wasserflüsse in Bewässerungsgebieten, da sie hinsichtlich der Bestimmung der Relativen Evapotranspiration erlauben, Erwartungswerte festzulegen und Eingangsparameter für hydrologische Modellierungen abzuleiten. Ein Beispiel ist die Modellierung der tatsächlichen Evapotranspiration (ALLEN et al., 2005).

Die Bildung von Performanceindikatoren mittels der pixelweise modellierten tatsächlichen Evapotranspiration kann aufgrund der hohen räumlichen Auflösung der Fernerkundungsdaten zur Aufdeckung lokaler Disparitäten des Wasserverbrauchs im Bewässerungssystem beitragen (BASTIAANSEN et al., 1996). Verschiedene Studien (beispielsweise BASTIAANSEN et al., 2001 oder EL MAGD und TANTON, 2005) nutzten die tatsächliche Evapotranspiration sowie die Landnutzungsklassifikation zur Bestimmung des Pflanzenwasserdefizits (vergleichbar mit der Relativen Evapotranspiration). Die Gegenüberstellung der Menge des in der Landwirtschaft verbrauchten Wassers (tatsächliche Evapotranspiration) mit der bereitgestellten Menge an Bewässerungswasser (*depleted fraction*) erlaubte den Vergleich verschiedener Rayone im usbekischen Teil des Ferghana-Tals am Syr Darya (CHEMIN et al., 2004). BASTIAANSEN et al. (1999) zeigten auf dieselbe Weise einen sehr hohen Nutzungsanteil von Bewässerungswasser (82%) in einem Bewässerungssystem in Indien. Die Anwendung von SEBAL auf AVHRR-Zeitreihen ermöglichte ein Monitoring der tatsächlichen Evapotranspiration und damit des zeitlichen Verlaufs des Wasserkonsums, wodurch die Zuverlässigkeit der Verfügbarkeit von Bewässerungswasser in einer großen Bewässerungseinheit in Pakistan untersucht werden konnte (ALEXANDRIDIS et al., 1999).

BASTIAANSEN und CHANDRAPALA (2003) konnten mittels der Integration der modellierten Evapotranspiration in den Prozess des *water accounting* aufzeigen, dass etwa 7 % des verfügbaren Wassers in Sri Lanka für die Bewässerung verwendet werden. Weiterhin wurde durch die Einbindung der Fernerkundungsdaten die Identifikation von Verteilungsdefiziten in Ober- und Unterlauf eines Bewässerungsgebiets ermöglicht (BASTIAANSEN und BOS, 1999)⁴⁹. Auf die gleiche Weise zeigte HAFEEZ (2003) durch den Vergleich von Subsystemen die Wiedernutzung

⁴⁹ Feststellungen von Ungleichheiten im Wasserverbrauch implizieren ohne einen Vergleich der Produktivität noch keine Handlungsempfehlung (IWMI, 2006).

von Bewässerungswasser (*re-use of water*) für die Reisproduktion auf den Philippinen. Durch den Vergleich der Erträge mit dem Wasserverbrauch konnten gemäß des Konzepts in zahlreichen Studien Produktivitätsabschätzungen vorgenommen werden (unter anderem: HAFEEZ, 2003; BASTIAANSEN et al., 2005)

Weiterhin erlaubt das Konzept des *water accounting* die Unterscheidung zwischen einem „nützlichen“ (*beneficial*) und einem „unnützlichen“ (*non-beneficial*) Wasserverbrauch. Durch die Verschneidung der fernerkundlich bestimmten Landnutzung mit der auf Basis von Fernerkundungsdaten modellierten Evapotranspiration konnten HAFEEZ und KHAN (2006) in einem chinesischen Bewässerungsgebiet die „Wasserverschwendung“ auf Brachflächen quantifizieren. Dies ermöglichte die Identifizierung von Einsparmöglichkeiten durch Änderung der Landnutzungsmuster⁵⁰.

Nur erwähnt werden soll eine Reihe weiterer fernerkundungsbasierter Variablen, die in die Indikatorenbildung eingehen können. Dazu zählen beispielsweise die Abschätzung von Ernteerträgen (Produktivität) oder die Lokalisierung und Quantifizierung von Bodenversalzung (Nachhaltigkeit; MEIJERINK und MANNAERTS, 2000; SCHMUGGE et al., 2002). Diese spielen allerdings keine Rolle im Fortgang dieser Arbeit und werden daher nicht vertieft.

⁵⁰ Das Untersuchungsgebiet war gekennzeichnet durch einen hohen Beitrag des Grundwassers zur Bewässerung infolge des kapillaren Aufstiegs –auf den Brachflächen verdunstete also Wasser ungenutzt.

4 Fernerkundungsdaten und Vorverarbeitungen

Die Anforderungen von Landnutzungsklassifikation (Kapitel 5) und Modellierung der saisonalen tatsächlichen Evapotranspiration (Kapitel 6) an ihre Eingangsgrößen bestimmten die Wahl der Fernerkundungsdaten. Dabei begründete der für beide Verfahren angestrebte multitemporale Ansatz die Notwendigkeit der Nutzung zeitlich hochaufgelöster Datensätze⁵¹. Eingangsdaten zur hydrologischen Modellierung waren weiterhin eine Reihe fernerkundungsbasierter bio- und geophysikalischer Datensätze wie die Landoberflächentemperatur (*Land Surface Temperature*, LST), der Emissionsgrad (*emissivity*, ϵ), der *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), der Blattflächenindex (*Leaf Area Index*, LAI) sowie die Albedo (BASTIAANSEN et al., 1998; ALLEN et al., 2005). Es erschien daher vorteilhaft, sogenannte „veredelte“ Fernerkundungsprodukte mit einem hohen Grad dokumentierter Vorverarbeitung zu verwenden, um die anwendungsorientierte Zielsetzung der Arbeit zu erreichen. Günstigerweise sollten solche Produktpaletten zum Einsatz kommen, die möglichst viele der genannten bio- und geophysikalischen Parameter und Indizes bereitstellten, damit der Aufwand der Vorverarbeitung reduziert werden konnte.

Weitere wichtige Aspekte bei der Identifizierung geeigneter Fernerkundungsdaten waren die räumliche Abdeckung von ganz Khorezm, deren Aktualität und kostengünstige Verfügbarkeit. Komplementär erforderte die Ableitung von Trainings- und Validierungsgebieten zur Klassifikation neben Erhebungen *in situ* Fernerkundungsdaten höherer geometrischer Auflösung. Optimal erschien bei der Datenwahl also eine Kombination vorprozessierter Fernerkundungsprodukte operationeller Sensorsysteme mit unterschiedlichen geometrischen und temporalen Auflösungseigenschaften.

⁵¹ Ohne den multitemporalen Ansatz wäre eine Klassifikation nicht möglich geworden, da die Feldfrüchte im Untersuchungsgebiet alleine spektral nur schwer unterschieden werden können, wie bereits RESSL (1999) und SCHWEITZER et al. (2004) gezeigt haben.

Der limitierende Faktor zur Modellierung der Evapotranspiration war dabei die notwendige Existenz mindestens eines Thermalkanals, was potenziell geeignete Sensoren auf eine geringe Anzahl reduzierte (Tabelle 4-1). Gemessen an den oben genannten Kriterien schieden Meteosat-Daten (*Meteosat Second Generation*, MSG) aufgrund der ungenügenden geometrischen Auflösung im thermalen Bereich von 3 km (EADS-SPACE, 2006) aus. AATSR-Daten (*Advanced Along-Track Scanning Radiometer*) würden sich durch die geometrische Auflösung von 1 km prinzipiell eignen, allerdings liegen sie nur im 35-Tage-Rhythmus vor (LLEWELLYN-JONES et al., 2001). Weiterhin existieren keine dokumentierten Verfahren zur Generierung der für die Modellierung benötigten Variablen LAI und Albedo. NOAA-AVHRR Produkte sind zwar operationell, jedoch intern nicht kalibriert. Daher weisen sie starke Schwankungen im zeitlichen Verlauf auf (VERMOTE und KAUFMAN, 1995). Landsat-Daten standen für den Untersuchungszeitraum nicht zur Verfügung, da Landsat 7 ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper +*) seit dem 30.5.2003 einen mechanischen Defekt am Sensor aufweist (USGS, 2006). Daten der letzten erfolgreichen Vorläufermission Landsat 5 standen ebenso für den anvisierten Untersuchungszeitraum nicht zur Verfügung. ASTER-Daten werden nicht kontinuierlich empfangen und decken für den Untersuchungszeitraum nicht das ganze Untersuchungsgebiet ab. Sie eignen sich aber für monotemporale Detailanalysen oder, wie oben angesprochen, zur Generierung von Trainings- und Validierungsgebieten.

Tabelle 4-1: Kurzprofile der aktuell im Thermalen Infrarot aufzeichnenden Sensoren.

Sensor*	Plattform*	Temporale Auflösung	Geometrische Auflösung	Veredelte Produkte**	Operationeller Modus
SEVIRI	Meteosat MSG	Sehr hoch	3 km	Nein	Ja
MODIS	Terra (EOS-AM1) Aqua (EOS-PM1)	1-2 Tage	1 km	Ja***	Ja
AVHRR	NOAA/TIROS	täglich	1,1 km	Teilweise	Ja
AATSR	Envisat	35 Tage	1 km	Teilweise	
TM	Landsat 5	16 Tage	90 m	Nein	Ja
ETM+	Landsat 7	16 Tage	60 m	Nein	Ja
ASTER	Terra (EOS-AM1)	****	90 m	Teilweise	Ja****

* Die ausgeschriebenen Namen nicht weiter betrachteter Satelliten und Sensoren finden sich im Abkürzungsverzeichnis.

** hinsichtlich der Anforderung des Evapotranspirations-Modells

*** Ausnahme: Albedo bei Strahlungsverhältnissen zur Überflugszeit (tatsächliche Albedo)

**** Einschränkung: Die Aufnahmeintervalle sind nicht determiniert, also keine Datensicherheit.

Letztendlich wurden für beide Anwendungen höherwertige Fernerkundungsprodukte des auf dem Satelliten Terra (Kapitel 4.1) installierten *MODerate Imaging Spectroradiometer* (MODIS; Kapitel 4.2) gewählt, da sie als einzige alle oben spezifizierten Anforderungen erfüllen. Besondere Vorteile liegen vor allem in der Kalibrierung der Daten, die unter anderem bereits am Sensor

erfolgt (*inflight calibration*). So können über einen längeren Zeitraum vergleichbare Zeitserien aufgebaut werden (JENSEN, 2000). Ein weiteres positives Merkmal des MODIS-Sensors ist in der operationellen Prozessierungskette zu finden. An deren Ausgang ist eine breite Produktpalette anzutreffen, die fast alle oben genannten für die Modellierung der Evapotranspiration benötigten Eingangparameter inklusive pixelgenauer Qualitätseinschätzungen enthält (JUSTICE et al., 1998); Kapitel 4.4). Lediglich die Ableitung der tatsächlichen (*blue-sky*) Albedo aus den Albedo-parametern der MODIS-Produkte war erforderlich (Kapitel 4.9). Zur Klassifikation stellte sich die zeitliche Auflösung der NDVI-Produkte als nicht hinreichend heraus, so dass NDVI-Zeitserien aus temporal höher aufgelösten Kompositen spektraler MODIS-Reflexionsdaten errechnet wurden (Kapitel 4.8).

Für den multitemporalen Klassifikationsansatz wären grundsätzlich alle zwischen 10 m und 30 m geometrisch auflösende optische Sensordaten geeignet. Zusätzlich hätte mit Hilfe der höheren geometrischen Auflösung sicherlich auch die niedrigere zeitliche Wiederholrate (häufig beträgt diese 16 Tage) kompensiert werden können. Diese Systeme wie Landsat TM, ETM+, SPOT oder IRS wurden aber aufgrund ihres Mangels an Aktualität beziehungsweise räumlich unzureichender Abdeckung und aufgrund hoher Kosten hinsichtlich späterer Anwendbarkeit nicht in die Untersuchung einbezogen. Zur Identifikation von Trainingsgebieten und zur Validierung wurden ASTER-Daten (*Advanced Spaceborn Thermal Emission and reflection Radiometer*; Kapitel 4.3) gewählt. Diese deckten zwar ebenfalls nicht das ganze Untersuchungsgebiet ab, konnten aber durch ihre räumliche Auflösung von 15 m im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts und Nahen Infrarots (Kapitel 4.5) zur visuellen Abgrenzung von landwirtschaftlichen Nutzungen herangezogen werden⁵². Eine geometrische Lagekorrektur zwischen MODIS und ASTER-Daten war vor der Weiterverarbeitung der Daten erforderlich (Kapitel 4.6).

Weitere Vorverarbeitungen wurden anwendungsspezifisch für die MODIS-Daten durchgeführt. Sie umfassten die Qualitätsanalyse und die anschließende Zeitserienerstellung (Kapitel 4.7). Für die Klassifikation waren 8-tägige, für die Evapotranspirations-Modellierung tägliche Auflösungen erforderlich. Die MODIS-Produktpalette beinhaltet zwar tägliche thermale Daten (Grundlage für die tägliche Modellrechnung), die Albedo-Parameter sowie die Variablen zur Vegetationsbedeckung (NDVI und LAI) sind aber mehrtägige Komposite, weshalb die Daten vor der Modellierung zusätzlich interpoliert werden mussten (ebenfalls Kapitel 4.7).

4.1 Der Satellit Terra

Das *Earth Observing System* (EOS) ist Kernbestandteil der zweiten Phase der *Earth-Sun-System-Mission* der US-amerikanischen Luft- und Raumfahrtbehörde NASA (*National Aeronautics and Space Administration*; (NASA, 1993). Zu Beginn der 1990er Jahre wurde das EOS-Programm zur

⁵² Hierzu waren zudem die Geländeerfahrungen und die 2004 genommenen Felddaten hilfreich.

satellitengestützten, integrativen Erfassung und Analyse von Ausbreitungen, Ursachen und regionalen Auswirkungen des globalen Klimawandels ins Leben gerufen. Seitdem wurde eine Reihe sich ergänzender Plattformen und Sensorkonstellationen definiert, die schließlich durch den Start des experimentellen Satelliten Terra (EOS-AM1; KAUFMAN et al., 1998) im Jahr 1999 erfolgreich initiiert wurde (NASA, 2006).

Neben MODIS und ASTER, die im Folgenden noch detailliert beschrieben werden, trägt der Satellit Terra drei weitere Sensoren, die überwiegend im Atmosphärenbereich eingesetzt werden: *Clouds and Earth's Radiant Energy System* (CERES), *Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer* (MIRS), und *Measurements Of Pollution In The Troposphere* (MOPITT). Die Daten dieser Sensoren werden unter anderem zur Vorprozessierung (Atmosphärenkorrektur) der MODIS-Daten herangezogen (KAUFMAN et al., 1998).

Die Sensorplattform Terra wurde mit einer anvisierten Lebenszeit von sechs Jahren gestartet und umkreist seit 1999 die Erde mit einer Inklination von $98,2^\circ$ in einem fast-polaren sonnensynchronen Umlauf (WOLFE, 2002). Die Plattform befindet sich auf einer Flughöhe von 705 km und überquert den Äquator um 10:30 Uhr Ortszeit von Norden kommend (im absteigenden Modus), wobei der Aufnahmezeitpunkt zur Ortszeit bis zu 15 Minuten abweichen kann (GUENTHER et al., 2002).

4.2 **MODIS**

Der Aufgabenbereich der MODIS Sensoren⁵³ ist die langfristige Erforschung globaler Prozesse auf der Erdoberfläche und in der unteren Atmosphäre (JENSEN, 2000). So wurde der Sensor für terrestrische (Klassifikation und Monitoring der Landbedeckung, Parametrisierung der Landoberfläche), marine (Ozeanfarbe, Phytoplanktion, Seeoberflächentemperaturen) und atmosphärische (Wolkenbedeckung, Wasserdampf, Aerosolgehalte) Anwendungen spezifiziert (NASA, 1993).

Die Charakteristika des MODIS Sensors wurden hinsichtlich ihrer Aufgabenstellung definiert und zeichnen insbesondere durch eine hohe temporale, spektrale und radiometrische sowie eine mittlere bis niedrige geometrische Auflösung aus. MODIS misst die von der Erde reflektierte und emittierte Strahlung in 36 spektralen Kanälen und deckt dabei den Wellenlängenbereich von 0,4 bis $14,5\mu\text{m}$ ab (Tabelle 4-2). Die räumliche Auflösung der Kanäle liegt im Nadir bei 250m (Rot und Nahes Infrarot), 500 m (Sichtbares Licht bis Kurzwelleninfrarot) und 1000m (Sichtbares

⁵³ Ein baugleicher MODIS befindet sich auf dem Satelliten Aqua (EOS-PM1) und liefert seit 2002 mit einer leichten zeitlichen Verschiebung exakt die gleichen Daten wie MODIS auf Terra. Perspektivisch sind diese Daten für die in dieser Arbeit entwickelten Anwendungen ebenfalls geeignet und lassen spätere Optimierungsmöglichkeiten zu.

Licht bis Thermales Infrarot; (GUENTHER et al., 2002)⁵⁴. Über den 30. Breitengraden wird die Erdoberfläche täglich, in niedrigeren Breiten alle zwei Tage komplett abgedeckt (WOLFE, 2002). Die radiometrische Auflösung lässt mit zwölf Bit eine sehr genaue Quantisierung der gemessenen Daten zu.

Tabelle 4-2: Wellenlängenbereiche und räumliche Auflösung der Bänder des Sensors MODIS.

Band	Wellenlängenbereich (µm)	Räumliche Auflösung	Band	Wellenlängenbereich (µm)	Räumliche Auflösung
1	0,620 – 0,670	250 x 250m	19	0,915 – 0,965	1 x 1km
2	0,841 – 0,876	250 x 250m	20	3,660 – 3,840	1 x 1km
3	0,459 – 0,479	500 x 500m	21	3,929 – 3,989	1 x 1km
4	0,545 – 0,565	500 x 500m	22	3,929 – 3,989	1 x 1km
5	1,230 – 1,250	500 x 500m	23	4,020 – 4,080	1 x 1km
6	1,628 – 1,652	500 x 500m	24	4,433 – 4,498	1 x 1km
7	2,105 – 2,155	500 x 500m	25	4,482 – 4,549	1 x 1km
8	0,405 – 0,420	500 x 500m	26	1,360 – 1,390	1 x 1km
9	0,438 – 0,448	1 x 1km	27	6,535 – 6,895	1 x 1km
10	0,483 – 0,493	1 x 1km	28	7,175 – 7,475	1 x 1km
11	0,526 – 0,536	1 x 1km	29	8,400 – 8,700	1 x 1km
12	0,546 – 0,556	1 x 1km	30	9,580 – 9,880	1 x 1km
13	0,662 – 0,672	1 x 1km	31	10,780 – 11,280	1 x 1km
14	0,673 – 0,683	1 x 1km	32	11,770-12,270	1 x 1km
15	0,743 – 0,753	1 x 1km	33	13,185 – 13,785	1 x 1km
16	0,862 – 0,877	1 x 1km	34	13,485 – 13,785	1 x 1km
17	0,890 – 0,920	1 x 1km	35	13,785 – 14,085	1 x 1km
18	0,931 – 0,941	1 x 1km	36	14,085 – 14,385	1 x 1km

MODIS ist ein *whiskbroom scanner*⁵⁵ und tastet im sogenannten *cross track scanning* Verfahren mit Hilfe eines rotierenden Spiegels die Erdoberfläche seitlich zur Flugrichtung ab (Abbildung 4-1). Ein Abtaststreifen enthält zehn Pixel mit je 1 km Auflösung, 20 Pixel mit 500 m und 40 Pixel mit 250 m (WOLFE, 2002). Der maximale Sensorwinkel liegt bei 55° beidseits des Nadirs und das Sichtfeld (*field of view*) somit bei 110°, die Schwadbreite beträgt 2.330km (GUENTHER et al., 2002). Das Verfahren führt zu einer Überlappung der Aufnahmestreifen (*scan*) an den Rändern des Aufnahmestreifens (*off-nadir*). Diese beträgt ab einem Scanwinkel von 24° 10 %, am Rand bei ca. 55° sogar knapp über 50 %. Dies hat am Streifenrand eines Überflugs (*track*) die dreifache Aufzeichnung eines Punktes auf der Erdoberfläche zur Folge. Dieses Phänomen wird als *bow-tie* Effekt bezeichnet, der sich insbesondere an scharfen Begrenzungen wie beispielsweise einer Küste deutlich bemerkbar macht (Abbildung 4-2, WOLFE, 2002). Der *bow-tie* Effekt wird bei der Umprojizierung der Daten weitgehend beseitigt.

⁵⁴ Folgende Abkürzungen werden verwendet: Sichtbares Licht = VIS, Nahes Infrarot = NIR, Kurzwelleninfrarot = SWIR, thermales Infrarot = TIR.

⁵⁵ *Scanner*-Typen werden ausführlich bei JENSEN (2000) beschrieben

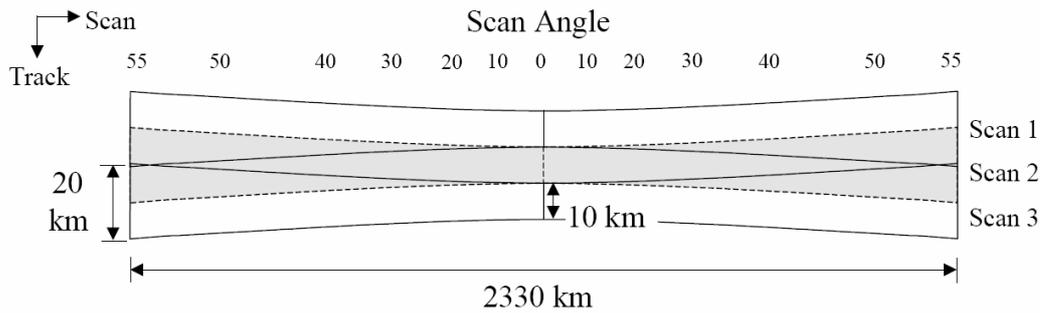


Abbildung 4-1: Scangeometrie des MODIS Sensors. Die graue Einfärbung zwischen den gestrichelten Linien entspricht dem zweiten Aufnahmestreifen (*scan*). Er zeigt die Überlappung zwischen dem zweiten und den beiden benachbarten Aufnahmestreifen und erklärt so das Auftreten des *bow-tie* Effekts (WOLFE, 2002, leicht verändert).

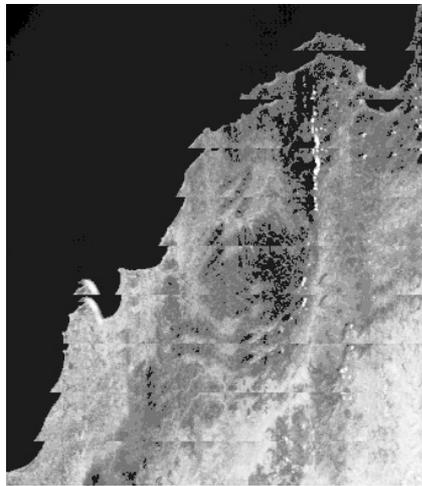


Abbildung 4-2: Auswirkungen des *bow-tie* Effekts an einer Küstenlinie (in einem Aufnahmestreifen werden immer zehn 1 km, 20 500 m und 40 250 m Pixel aufgezeichnet; DSRS, 2006).

Ein wichtiges Merkmal des MODIS Aufnahmeapparates ist die *onboard* Kalibrierung, die eine Genauigkeit bis auf 2 % im Verhältnis zur Sonnenstrahlung erreicht (GUENTHER et al., 2002). Die Sensoren der AVHRR Reihe haben keine solche Funktionalität (JUSTICE et al., 1998).

4.3 ASTER

Die ASTER-Mission ist eine Kooperation zwischen der NASA und dem Japanischen Industrie- und Wirtschaftsministerium (*Ministry of Economy, Trade and Industry, METI*). Als Teil des EOS Programms liegen die Einsatzbereiche ebenfalls im Umweltsektor, genauer im Bereich der geometrisch detaillierten Erfassung und Kartierung der Landoberfläche. Hier spielen vor allem die Klimatologie und Meteorologie über Landflächen, die mineralogische Kartierung (Geologie und Bodenkunde), der Einsatz in der Hydrologie sowie die Erstellung von hochaufgelösten digitalen Geländemodellen eine herausragende Rolle (YAMAGUCHI et al., 1998; WELCH et al.,

1998). Fünf Kanäle im thermalen Bereich ermöglichen zudem den Einsatz von ASTER für ökologische Anwendungen, unter anderem in der Vulkanologie (YAMAGUCHI et al., 1998).

Der ASTER Sensor hat 15 spektrale Bänder (Tabelle 4-3), die sich vom sichtbaren Licht bis in den thermalen Bereich erstrecken (LPDAAC, 2006a). Im Nahen Infrarot (*Near Infrared*, NIR; 0.78 – 0.86 μm) ermöglicht neben einem Nadir-gerichteten Kanal ein rückwärts gerichteter Kanal die Aufzeichnung von Stereobildern, die zur Orthorektifizierung der Daten und zur Generierung von Höhenmodellen verwendet werden können (WELCH et al., 1998). Die sechs Bänder im Kurzwelleninfrarot sind für die mineralogische Kartierung besonders geeignet (YAMAGUCHI et al., 1999). Die geometrische Auflösung der vier Bänder im sichtbaren Bereich des Spektrums und im Nahen Infrarot (*Visible and Near Infrared*, VNIR) beträgt 15 m. 30 m ist die Kantenlänge der Kanäle im Kurzwelleninfrarot (*ShortWave InfraRed*, SWIR). Die thermalen Informationen (*Thermal InfraRed*, TIR) liegen in einem 90 m-Raster vor (Tabelle 4-3). Im Gegensatz dazu ist die radiometrische Auflösung im TIR mit 12 Bit wesentlich höher als die der übrigen Kanäle (8 Bit). Durch die Schwenkbarkeit des Sensors liegt die potenzielle zeitliche Wiederholrate je nach geometrischer Auflösung zwischen vier und 16 Tagen. Die Datenaufzeichnung erfolgt nicht operationell, standardmäßig ist ein Rückgriff auf Archivdaten möglich. Es können auch Anträge zur Aufzeichnung gestellt werden (ABRAMS, 2000).

Tabelle 4-3: Eigenschaften der ASTER Aufnahmeinstrumente (ABRAMS, 2000).

Sensoreigenschaft	Sichtbares und Nahes Infrarot (VNIR)	Kurzwelleninfrarot (SWIR)	Thermales Infrarot (TIR)
Spektrale Abdeckung	Band 1: 0.52 - 0.60 μm	Band 4: 1.600 - 1.700 μm	Band 10: 8.125 - 8.475 μm
	Band 2: 0.63 - 0.69 μm	Band 5: 2.145 - 2.185 μm	Band 11: 8.475 - 8.825 μm
	Band 3 (Nadir): 0.76 - 0.86 μm	Band 6: 2.185 - 2.225 μm	Band 12: 8.925 - 9.275 μm
	Band 3 (backward): 0.76 - 0.86 μm	Band 7: 2.235 - 2.285 μm	Band 13: 10.25 - 10.95 μm
		Band 7: 2.235 - 2.285 μm	Band 14: 10.95 - 11.65 μm
		Band 8: 2.295 - 2.365 μm	
	Band 9: 2.360 - 2.430 μm		
Geometrische Auflösung	15 m	30 m	90 m
Schwadbreite	60 km	60 km	60 km
Quantisierung (Bit)	8	8	12

Entsprechend seiner Spezifikation besteht ASTER aus vier verschiedenen Aufnahmesystemen. Im VNIR Spektrum zeichnen ein Nadir-gerichteter und ein rückwärts gerichteter *Pushbroom Scanner* (Kanal 3B) auf. Für die Kanäle im SWIR steht ebenfalls ein *Pushbroom Scanner* zur Verfügung. Die Thermaldaten werden mittels eines *Whiskbroom Scanners* aufgenommen (JPL,

2006). Der Aufnahmestreifen der Nadir-gerichteten Aufnahmegeräte hat eine Breite von 60m. Die Instrumente wurden wie MODIS vor dem Start mit simulierten Daten kalibriert (*preflight calibration*; ARAI, 1999) und haben verschiedene *inflight* Korrekturmöglichkeiten (BUTLER und BARNES, 1998).

4.4 Charakterisierung und Übersicht eingesetzter NASA-MODIS Datenprodukte

Mit der Zielsetzung, ökologische Prozesse und Zusammenhänge auf der Erdoberfläche zu erforschen, wurde seitens des so genannten *MODLand Science Team* eine Palette höherwertiger Produkte auf den MODIS-Basisdaten aufgebaut (MASUOKA et al., 1998; JUSTICE et al., 1998)⁵⁶. Aus dieser sogenannten *MODLand Product Suite* (MODLAND, 2006) haben die kalibrierten Reflexionsgrade (*surface reflectance*, MOD09⁵⁷), die Vegetationsindizes (MOD13), der Blattflächenindex (MOD15), die Landoberflächentemperatur und der Emissionsgrad (beide MOD11) sowie die Albedo (MOD43) in die vorliegende Dissertation Eingang gefunden. Die Eigenschaften und die Algorithmen zur Erstellung dieser Datensätze werden im Folgenden beschrieben. Zum Abschluss dieses Unterkapitels erfolgt die Auflistung der prozessierten Daten.

4.4.1 Standardisierte Generierung der MODLand Produkte

Die Generierung der Strahlungs- und biophysikalischen Parameter der *MODLand Product Suite* erforderte eine standardisierte Vorverarbeitungskette (MASUOKA et al., 1998). Sie umfasst die Kalibrierung der am Sensor aufgezeichneten Strahldichten (VERMOTE und KAUFMAN, 1995), die Ableitung von Atmosphärenparametern wie der Wolkenmaske oder der Aerosolgehalte sowie die Dokumentation der Aufnahme- und Beleuchtungswinkel, die Atmosphärenkorrektur selbst (Strahldichten am Boden) und die Überführung der Überflugstreifen in ein einheitliches Grid.

Die MODLand Produkte liegen in einem Sinusoidal Grid vor (Level-2 Grid), wozu die Daten gerastert und in die Sinusoidalprojektion umgewandelt wurden (WOLFE et al., 1998). Der sogenannte L2G-Algorithmus zur Geocodierung der Daten berücksichtigt die Systemeigenschaften des Sensors im All und erreicht unter Verwendung einer globalen Passpunktdatenbank eine Genauigkeit von 50 m (einfache Standardabweichung *along/across-track*; WOLFE, 2002). In der gleichen Gridform werden die Anzahl der Aufnahmen eines Punkts, die Aufnahme- und Beleuchtungsgeometrien sowie die Aufnahmezeit in einem eigenen MODLand-Produkt gespeichert (MODLAND, 2006).

Ausgehend von den atmosphärenkorrigierten standardisierten Reflexionsgraden (MOD09) werden dann alle weiteren Produkte erzeugt. Jedes Produkt hat – je nach den benötigten Kanälen

⁵⁶ Eine einführende Charakterisierung aller MODIS Produkte inklusive solcher für Ozean- und Atmosphärenanwendungen findet sich bei MASUOKA et al. (1998)

⁵⁷ Die Bezeichner für Terra MODIS Produkte beginnen immer mit „MOD“.

zur Bildung des Produkts und seinem Anwendungsfeld – 250 m, 500 m, 1 km, 0,05° oder 0,25° geometrische Auflösung. In der Regel sind die Produkte Komposite aus den MODIS-Überflügen von einem⁵⁸, acht, 16 oder 32 Tagen (MODLAND, 2006). Alle bisher implementierten MODLand-Produkte sind in Tabelle AIII-1 aufgelistet. Neben den eingangs erwähnten Produktfamilien gibt es zusätzlich noch Daten zur Landbedeckung (MCD12 und MOD44), zur Feuerdetektion und -beobachtung (Thermale Anomalien, MOD14) und zur Nettoprimärproduktion (MOD17). Für jedes dieser globalen Produkte wurde vom *MODLand Science Team* ein bestimmter Algorithmus aufgestellt und seine Dokumentation dem Nutzer zugänglich gemacht (MODLAND, 2006).

Neben den Datenwerten werden für jedes MODLand-Produkts protokollierte Informationen zur Datenqualität eines jedes Pixels mitgeliefert, die auf negative Einflüsse wie Wolken, Aerosole oder ungünstige Aufnahme- oder Sonnenwinkel in den Daten hinweisen. Diese Informationsebenen werden als *Quality Assessment Science Data Sets* (QA-SDS) bezeichnet und ergeben sich aus den vorigen Prozessierungsschritten. Durch die Auswertung dieser Zusatzinformationen lässt sich die Eignung jedes Pixels für wissenschaftliche Studien bewerten (JUSTICE et al., 1998). Die QA-SDS sind in einzelnen Bits kodiert. Sie wurden bei der Vorprozessierung zur Einschätzung der Datenqualität analysiert und werden daher bei der folgenden Vorstellung der verwendeten MODIS-Produkte aufgelistet. Die für diese Arbeit gewählten Datenqualitäten werden in Kapitel 4.7 genannt und ausgewertet.

4.4.2 Standardisierte Reflexionsgrade

Standardisierte Reflexionsgrade (MOD09, MOD43B4) sind Eingangsparameter für die im Weiteren verwendeten VI-, LAI-, und Albedo-Produkte. Diese ρ Produkte liegen als tägliche, 8-tägige und 16-tägige (MOD43B4) Komposite vor (MODLAND, 2006). In dieser Arbeit wurden davon lediglich die 8-tägigen Produkte mit 250 m Bodenauflösung (MOD09Q1) verwendet.

Für die Kanäle, welche die Wellenlängen des sichtbaren Lichts bis zum Kurzwelleninfrarot (Band 1–7) abbilden, werden kalibrierte Strahlungsmengen mittels eines für Operationalisierungszwecke vereinfachten 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum radiative code*) Strahlungstransfermodells (VERMOTE et al., 1997b) in Reflexionsgrade (ρ) umgewandelt. Dem 6S-Modell liegt das in der Natur sehr selten auch nur angenäherte Modell der Lambertschen Oberfläche zugrunde (JUSTICE et al., 1998). Die Eingangsparameter stammen, wenn sie verfügbar sind, aus den MODIS Aerosol-, Wasserdampf-, Ozon- und Geolokationsprodukten sowie der Wolkenmaske. Zudem fließen Daten weiterer Sensoren ein (für Ozon beispielsweise GOME). Als Rückfallposition werden standardisierte Werte aus Klimamodellen herangezogen. VERMOTE

⁵⁸ In Abhängigkeit der geographischen Lage sind mehrere Aufnahmen eines Punktes auf der Erde pro Tag möglich.

et al. (2002) beschreiben die erfolgreiche Implementierung der Aerosolquantifizierung mittels der MODIS-Daten.

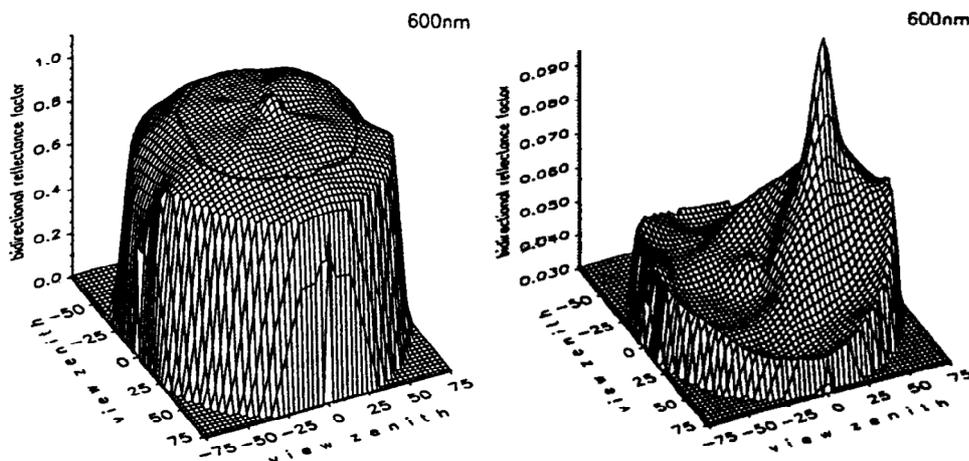


Abbildung 4-3: BRD-Funktionen für unterschiedliche Oberflächen, links: „Spectralon“ (Material nahe dem Lambert’schen Reflektor), rechts: Grasfläche (SANDMEIER et al., 2000)

Mittels je einer *bi-directional reflectance distribution function* (BRDF) für die Erdoberfläche und die Atmosphäre sowie durch Eliminierung von Nachbarschaftseffekten werden die nach dem Lambertschen Modell errechneten ρ in optimierte ρ umgewandelt, die die gerichtete Reflexion berücksichtigen (VERMOTE et al., 1997a). Dabei sind Klassifikationen der Landoberflächenbedeckung wichtige Eingangsgröße zur Abschätzung des geeigneten BRDF-Modells, da diese BRDF-Funktionen zwischen unterschiedlichen Oberflächentypen stark variieren (Abbildung 4-3). Bis heute sind allerdings nur zur Erstellung der 16-tägigen ρ -Produkte BRDF-Korrekturen eingegangen, da je nach Algorithmus fünf Aufnahme- und Sonnenwinkelkonstellationen zur Ableitung der BRDF notwendig sind (VERMOTE und VERMEULEN, 1999; vergleiche Kapitel 4.4.6).

Die gespeicherten Qualitätsmerkmale der 8-tägigen MOD09 Daten enthalten für jedes Band:

- (1) eine allgemeine Qualitätsabschätzung (*mandatory flag*),
- (2) den Wolkenbedeckungsgrad,
- (3) eine Angabe über mögliche Zirruswolken,
- (4) die Quelle der Aerosolangaben (aus MODIS-Daten oder einem Klimamodell),
- (5) den bestimmten Aerosolgehalt,
- (6) die Quelle der Wasserdampfinformationen (MODIS oder Klimamodell),
- (7) die Quelle der Ozonangaben (MODIS oder Klimamodell) und
- (8) Maskeninformationen für Land oder Wasser (VERMOTE und VERMEULEN, 1999).

4.4.3 Die Oberflächentemperatur und der Emissionsgrad

Die aus MODIS-Daten operationell bestimmten Landoberflächentemperaturen (LST) und Emissionsgrade (ϵ) werden in den MOD11-Produkten abgelegt. Die geometrischen Auflösungen liegen bei 1 km, 5 km und 0,05 Grad, wobei tägliche und 8-tägige Komposite von der NASA angeboten werden. Ebenso existiert ein MOD11-Produkt, das direkt aus einem Überflug abgeleitet und nicht in ein Grid umgewandelt wird. Für diese Arbeit wurden 1 km-Produkte (MOD11A1) verwendet. Zur Anwendung dieses LST- und ϵ -Produkts war entscheidend, dass die Aufnahmezeitpunkte pro Pixel in einem eigenen Layer (*day view time*) standardmäßig archiviert sind und somit das bereits erstellte Komposit erfolgreich wieder in Einzelaufnahmen zerlegt werden konnte (vergleiche Kapitel 4.7).

Verschiedene Verfahren kommen bei der Generierung von LST und ϵ aus MODIS-Daten zur Anwendung (JUSTICE et al., 1998). Bei den mit 1 km am höchsten aufgelösten Grid-Daten wird ein verallgemeinerter Split-Window-Ansatz verfolgt, wobei die LST aus der linearen Differenz der Helligkeitstemperaturen der benachbarten Thermalkanäle (MODIS Band 31 und 32, beide atmosphärenkorrigiert; WAN, 1999) berechnet wird (WAN und DOZIER, 1996; WAN et al., 2002). Zur Lösung dieser Gleichung werden Koeffizienten benötigt, die vom Beobachtungswinkel des Sensors und der Lufttemperatur nahe der Erdoberfläche abhängen. Diese werden in Look-Up-Tables gespeichert (WAN und DOZIER, 1996). Für die Generierung von ϵ mittels dieser verallgemeinerten Split-Window-Methode werden bereits vorklassifizierte Oberflächentypen (v.a. Vegetation) herangezogen (SNYDER et al., 1998).

Sowohl für die LST als auch für die Emissionsgrade werden als Qualitätsmerkmale

- (1) die allgemeine Qualitätseinschätzung des Algorithmus und
- (2) Genauigkeitsschranken, in deren Rahmen der maximale Fehler der Berechnung zu erwarten ist,

mitgeliefert.

4.4.4 Der Vegetationsindex NDVI

Wichtige Basisindikatoren über den Grad der Vegetationsbedeckung und die Grünheit der Vegetation liefern die MOD13 Vegetationsindex-Produkte (HUETE et al., 1997). Diese enthalten zwei Vegetationsindizes (VI), die aus den spektralen Reflexionsgraden ermittelt werden: den *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) und den *Enhanced Vegetation Index* (EVI)⁵⁹. Da die VIs in erster Linie aus den Aufzeichnungen im Wellenlängenbereich des roten Lichts und des nahen Infrarots gebildet werden, haben die VI-Produkte geometrische Auflösungen von 250 m, 500 m und 1 km. VI-Produkte sind 16-tägig oder monatlich zu erhalten (Tabelle AIII-1). Für die Anwendung von SEBAL wurden 16-tägige 1 km NDVI-Daten (MOD13A2) gewählt.

⁵⁹ Details zur Bedeutung und Berechnung des NDVI werden in Kapitel 4.8 aufgegriffen.

Traditionell wurde zur Bestimmung des NDVI das *Maximum Value Compositing* (MVC) Verfahren eingesetzt. Das MVC-Verfahren basiert auf der theoretischen Überlegung, dass der am wenigsten gestörte Zeitschnitt und der maximale NDVI Wert zusammenfallen (HOLBEN, 1986). Es diente gerade bei atmosphärisch unkorrigierten Daten, z.B. für die NDVI-Produkte aus NOAA-AVHRR-Daten zur Kompositbildung (JENSEN, 2000; DECH et al., 1998). Da zur Generierung der MODIS-Produkte bereits atmosphärenkorrigierte Daten verwendet werden, haben theoretisch die anisotropen Reflexionseigenschaften der Oberfläche einen größeren Einfluss auf die Qualität und Exaktheit der berechneten Vegetationsindizes (HUETE et al., 2002). Daher basiert der VI-Algorithmus auf mehreren Verfahren, die einen Nadir-korrigierten und daher einen hinsichtlich der Vergleichbarkeit optimierten VI erreichen sollen (HUETE et al., 2002).

Die Wahl des Kompositverfahrens ist abhängig von der Anzahl der ρ -Produkte hoher Qualität im 16-tägigen Beobachtungszeitraum. Sind im Messintervall von 16 Tagen mehr als fünf ungestörte Aufzeichnungen eines Pixels in den entsprechenden Spektralkanälen verfügbar, wird das *BRDF Compositing* angewendet und ein Nadir-NDVI aus MOD43B3-Produkten erstellt. Bei ein bis fünf gültigen Observationen kommt das *Constraint View angle Maximum Value Compositing* (CV-MVC) zum Einsatz. Bei nur einer qualitativ hochwertigen Aufzeichnung im Kompositzeitraum wird nur diese zur Berechnung des NDVI herangezogen (Kapitel 4.8). Fehlt selbst diese, wird auf das MVC-Verfahren zurückgegriffen. In der Praxis werden die Daten derzeit jedoch ausschließlich mit der MVC-Methode erstellt, da Schwierigkeiten bei der Vorprozessierung der Daten existieren, beispielsweise bei der Erstellung der Wolkenmaske. Die dabei entstehenden Fehler können sich negativ bei der Prozessierung der Nadir-NDVIs aus der BRDF-Methode und auch bei der Berechnung der NDVIs aus den Tageswerten der Reflexionsgrade auswirken (HUETE et al., 2002).

Die Qualitätsmerkmale werden aus den Qualitätswerten der ρ -Eingangsdaten sowie den Aufnahmegeometrien übernommen oder bei der Kompositbildung ermittelt. Sie umfassen:

- (1) den *Mandatory Flag*,
- (2) den sogenannten *usefulness-index* (16 Stufen, die alle folgenden Merkmalskriterien gewichten, addieren und zu einer Gesamteinschätzung führen),
- (3) den Aerosolgehalt,
- (4) die Wolkenbedeckung,
- (5) einen Flag für (Wolken-)Schatten,
- (6) einen Flag für Schnee oder Eisbedeckung sowie
- (7) Maskeninformationen für Land und Wasser.

4.4.5 *Der Blattflächenindex*

Aussagen über die Photosyntheseaktivität und das Pflanzenwachstum werden durch die Anwendung des MOD15-Produkts ermöglicht. Für dieses Produkt werden Strahlungsparameter zur Generierung des LAI und des Anteils absorbierter photosynthetisch aktiver Strahlung (*fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*, fAPAR) verarbeitet. Das MOD15-Produkt liegt nur als 8-tägiges Produkt mit 1 km geometrischer Auflösung vor (MOD15A2). Da fAPAR im weiteren Verlauf der Arbeit keine Rolle spielt, wird nachfolgend nur der Algorithmus zur Bestimmung des LAI beschrieben und die mitgelieferten Qualitätsmerkmale aufgezählt.

Der LAI ist definiert als die einseitige Blattfläche je Einheit Bodenfläche und wird als dimensionsloses Maß (m^2 Blattfläche auf m^2 Grundfläche) angegeben (JONCKHEERE et al., 2004). Er lässt sich auch als Integral mathematisch beschreiben und kann dadurch basierend auf Strahlungstransfermodellen physikalisch abgeleitet werden (KNYAZIKHIN et al., 1998). Bei der Verwendung der Strahlungstransfermodelle spielen die Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel eine besondere Rolle, die je nach Vegetationstyp (beispielsweise stehende, länglich dünne oder breite und liegende Blätter) einen unterschiedlichen Einfluss auf das Reflexionsverhalten haben können. Daher wurden strukturelle Typen von Vegetationsoberflächen detailliert charakterisiert und aus den Datensätzen von LOVELAND et al. (2000)⁶⁰ und HANSEN et al. (2000) zu einer globalen Biome-Karte zusammengestellt (MYNENI et al., 1997). Die für diese Untersuchung wichtigen Biome-Klassen sind *grassland/cereal crops* und *broadleaf crops* (Klasse I und III). In sogenannten *Look-Up-Tables* (LUT) werden die Modellergebnisse gespeichert. Eingehende spektrale Reflexionsgrade werden dann – nach Einordnung des aktuell betrachteten Pixels in ein Biom – mit Hilfe dieser LUT einem LAI-Wert zugeordnet.

Für das MOD15-Produkt sollten *per definitionem* alle sieben Kanäle des VNIR und SWIR zur Erstellung des LAI herangezogen werden (KNYAZIKHIN et al., 1999). Da aber beispielsweise die atmosphärischen Störungen im blauen Kanal meist sehr hoch sind, würden bei seiner Verwendung die ermittelten LAI-Werte stark absinken. Daher fließen derzeit nur der rote und Nahe Infrarotkanal in die Berechnung des LAI ein. Bei der Produkterstellung kann es darüber hinaus vorkommen, dass die eingehenden Reflexionswerte außerhalb der in den LUT abgelegten Bandbreiten liegen, also unwahrscheinlich für die Generierung des LAI sind. Weiterhin kann die Zahl der Aufzeichnungen unter ungünstigen atmosphärischen Bedingungen zur BRDF-Korrektur nicht hinreichend sein. Für diese Fälle kommt als Rückfallposition die Anwendung einer empirischen Relation zwischen dem Vegetationsindex, der fAPAR und dem LAI zum Einsatz (Regression; MYNENI et al., 2002).

⁶⁰ Daten des *International Geosphere-Biosphere Programme* (IGBP)

Die mitgelieferten Qualitätsmerkmale im LAI Produkt (gültig sowohl für LAI als auch für fAPAR) umfassen:

- (1) den *Mandatory Flag*,
- (2) den Grad der Wolkenbedeckung,
- (3) den verwendeten Algorithmus (indiziert ob das Strahlungstransfermodell oder die Rückfallposition eingesetzt wurden),
- (4) *dead detectors* (Kanäle mit minderwertigen Daten) und
- (5) Modellierungseinschätzungen für jeden einzelnen Pixel (KNYAZIKHIN et al., 1999).

4.4.6 Die spektrale Albedo

Das MODIS MOD43B3 Albedo Produkt gehört zur Gruppe der BRDF/Albedo Produkte (MOD43; SCHAAF et al., 2002). Es enthält das gerichtete (*black-sky* Albedo) und diffuse (ungerichtete, *white-sky* Albedo) Reflexionsvermögen für jedes Pixel, also den Reflexionsgrad der direkten Einstrahlung und den Anteil reflektierter diffuser ankommender Strahlung⁶¹. Die Werte sind für den Sonnenstand um zwölf Uhr mittags lokaler Ortzeit berechnet und umfassen ein zeitliches Integral von 16 oder 32 Tagen (Tabelle AIII-1). Albedoprodukte werden in einer räumlichen Auflösung von 1 km vorgehalten. Für diese Arbeit wurden 16-tägige 1 km-Daten verwendet.

Als Algorithmus zur Berechnung der Albedo für die einzelnen spektralen Bänder kommt das *RossThickLiSparse-Reciprocal* Modell – ein lineares BRDF Modell – zum Einsatz, welches verschiedene Kernelmodelle kombiniert (LUCHT et al., 2000). Für den Integrationszeitraum wird versucht, möglichst viele störungsfreie MODIS Aufzeichnungen unter variierenden Aufnahme- und Beleuchtungswinkeln zusammenzutragen. Mittlerweile gibt es zu diesem Zweck bereits einen Produkttyp, der die Daten des am Nachmittag aufzeichnenden baugleichen MODIS Sensors auf der Plattform Aqua, sowie Daten des *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer* (MISR) auf Terra in die Berechnungen mit einbezieht (SCHAAF et al., 2002; MODLAND, 2006). Ausgehend vom Reflexionsvermögen der Einzelbänder (MODIS Kanäle 1-7) wird die integrierte Gesamtreflexion von 0,3 bis 4,0 μm nach der Methode von LIANG et al. (1999) berechnet. Aufgrund ihrer breiten Wellenlängenabdeckung im Bereich der maximalen Sonneneinstrahlung kann diese als Albedo verstanden werden.

Die Qualitätsmerkmale für Albedoprodukte sind sehr ausführlich und umfassen:

- (1) das *Mandatory Flag*,
- (2) den Kompositzeitraum,
- (3) Maskeninformationen für Land und Wasser,
- (4) Sensoren der verwendeten Eingangsdaten (EOS-AM1, EOS-PM1, MISR),

⁶¹ Die Berechnung der tatsächlichen Albedo (*blue-sky-albedo*) bleibt dem Anwender überlassen (Kapitel 4.9)

- (5) den angenommenen Sonnenzenitwinkel (Mittag, Ortszeit) und
- (6) einen Schnee-Flag.

4.4.7 Übersicht der verwendeten Datensätze

Für diese Dissertation wurden die in den vorigen Unterkapiteln vorgestellten MODIS-Produkte eingesetzt (Tabelle 4-4). Die anvisierten Untersuchungszeiträume für die Modellierung der saisonalen Evapotranspiration waren die Sommersaison 2004 und 2005. Nach der amtlichen usbekischen Statistik beginnt die Sommersaison am 1. April und endet mit am 30. September (SIC-ICWC, 2006). Da aber die Baumwolle bis in den Oktober hinein wächst und geerntet wird, wurden zusätzlich die Daten des gesamten Oktobers verarbeitet. Für die Klassifikation wurden weiterhin Zeitserien aufgebaut, die das ganze Jahr umfassen, um Fruchtfolgen mit Winterweizen aufzudecken. Das Untersuchungsgebiet liegt vollständig in der Kachel mit dem Bezeichner „h22v04“ (Abbildung 4-4).

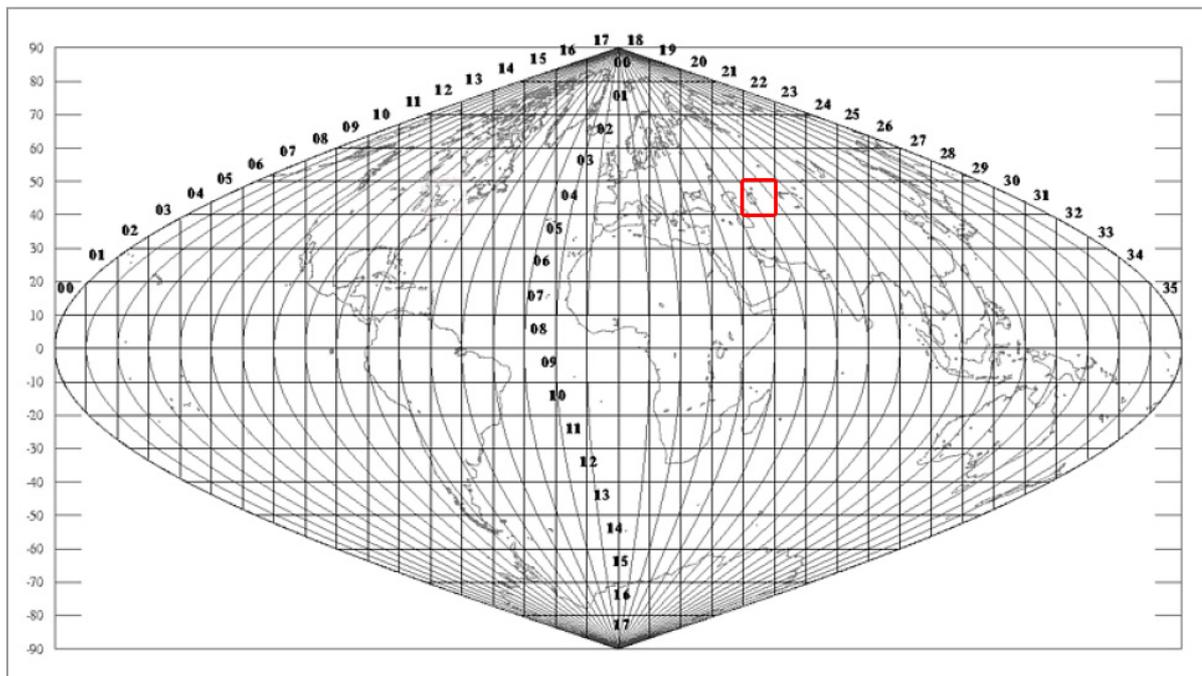


Abbildung 4-4: MODIS Level 2G, L3 und L4 “tiles“ (Kacheln). Die Kachel „h22v04“ (rot umrandet) deckt das Untersuchungsgebiet vollständig ab (WOLFE, 2002, ergänzt).

Tabelle 4-4: Verwendete MODIS Produkte in der Zeitspanne vom 1. April zum 31. Oktober 2004 (DOY* 92 - DOY* 305) und 2005 (DOY* 91 - DOY* 303). Nur MOD09Q1-Daten wurden für das ganze Jahr beschafft.

Produktname	Benötigte Informationsebenen	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung	Dateigröße des Produktes
MOD11A1	LST	1 km	Täglich	19,9 MB
	Emissionsgrad	1 km	Täglich	
	Aufnahmezeitpunkt	1 km	Täglich	
MOD13A2	NDVI	1 km	16-tägig	5,7 MB
MOD15A2	LAI	1 km	8-tägig	5,7 MB
MOD43B3	<i>White-sky</i> Albedo <i>Black-sky</i> Albedo	1 km	16-tägig	67,6 MB
MOD09Q1	ρ (Rot) ρ (Nahes Infrarot)	250 m	8-tägig	135,3 MB

* DOY (*Day Of Year*) = Julianischer Tag⁶² im Jahr

Die Daten wurden vom *Earth Observing System Data Gateway* der NASA heruntergeladen (LPDAAC, 2006b; Tabelle 4-4). Aus der das Untersuchungsgebiet enthaltenden Ausgangskachel wurde je ein Subset des Untersuchungsgebietes ausgeschnitten. Dabei wurde die beim Download angefallene Datenmenge von 9,94 auf 2,47 Gigabyte pro Untersuchungsjahr zu reduziert. Selbige wurde bei der Zeitseriengenerierung (Kapitel 4-7) durch die Auswahl der relevanten Datenlayer (gemäß Tabelle 4-4), der NDVI-Bildung aus MOD09-Reflexionsgraden sowie der Berechnung der *blue-sky* Albedo aus den MOD43B3-Daten dann weiter auf 0,38 Gigabyte pro Untersuchungsjahr verkleinert.

4.5 Reflexionsgrade aus ASTER-Daten

Die für diese Dissertation genutzten ASTER-Daten wurden über dem westlichen Teil von Khorezm am 26.7.2004 und am 13.7.2005 aufgezeichnet (Abbildung 4-5)⁶³. Zur Generierung von Trainings- und Validierungsgebieten wurden die Reflexionsgrade der Kanäle 1-3 (VNIR; Tabelle 4-3) mit 15 m geometrischer Auflösung verwendet, das AST07VD-Produkt (THOME, 1999). Dieses soll nachfolgend kurz vorgestellt werden.

Für die Berechnung dieses ASTER-Produkts durchlaufen die Rohdaten ähnlich wie die MODIS-Daten eine Prozesskette. Der sogenannte ASTER Level-1-Prozessor kalibriert zunächst die am Sensor empfangene Strahlungsleistung (Level-1A-Daten) zu *Top Of Atmosphere* (TOA) Strahldichten und führt eine geometrische Lagekorrektur der Daten durch (Level-1B-Daten; FUJISADA, 1998). Der Unsicherheitsfaktor bei der Kalibrierung wird für die VNIR-Kanäle mit einem Wert von 1,5% (einfache Standardabweichung) angegeben (THOME et al., 1998a).

⁶² Julianische Tage werden von 1 (für den 1. Januar) bis 365 (für den 31. Dezember), im Schaltjahr bis 366, durchgezählt.

⁶³ Die Datenaufzeichnungen wurden im Vorfeld bei der NASA beantragt.

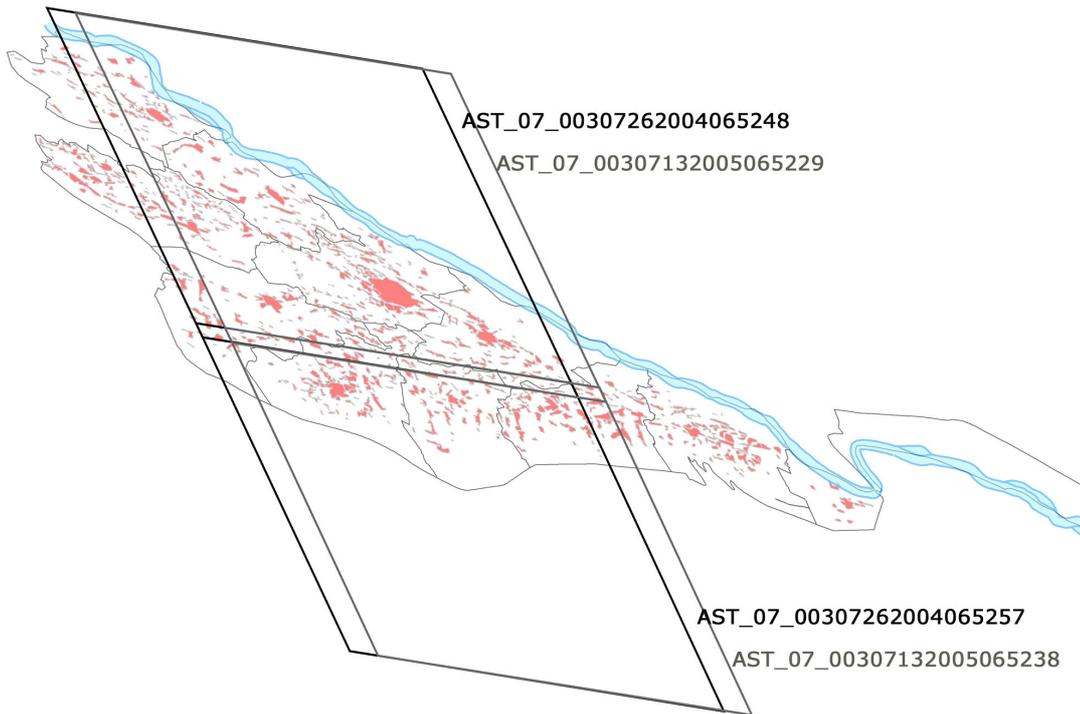


Abbildung 4-5: *Footprints* der verwendeten ASTER-Daten im Untersuchungsgebiet. Die farblich und räumlich angepassten Bezeichner beinhalten den Produktnamen, die Versionsnummer (hier: 003), das Aufnahmedatum (MMDDYYYY) und die Aufnahmezeit (HHMMSS) nach GMT (*Greenwich Mean Time*).

Zur Atmosphärenkorrektur kommt ein lineares Strahlungstransfer-Modell zum Einsatz, das die Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel, Streu- und Absorptionsverhalten der Atmosphäre sowie die Oberflächeneigenschaften berücksichtigt. Optimalerweise sollen diese von ebenfalls auf Terra installierten MODIS und MISR Sensoren bezogen werden (THOME et al., 1998b). Derzeit werden für die Ozondaten *Operational Vertical Sounder* (TOVS) von NOAA-Satelliten verwendet. Lufttemperaturen, Luftdruck und Luftfeuchte stammen aus dem GDAS (*Global Data Assimilation System*) des NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*; LPDAAC, 2006a). Die Alternativen für die vorgenannten Größen und alle Aerosoldaten sind Mittelwerte aus einem Datenset des Naval Research Laboratory (NRL; LPDAAC, 2006a). Mittels des Gauß-Seidel-Verfahrens⁶⁴ werden Look-Up-Tables (LUT) generiert, auf deren Basis die Korrektur der Daten erfolgt. Die TOA-Strahldichten werden mit Hilfe der LUT atmosphärenkorrigiert und zunächst in *Bottom Of Atmosphere* (BOA) Strahldichten überführt (THOME, 1999). Ebenso werden diese Strahldichten mittels einer Simulation des tatsächlichen Strahlungsdargebotes durch die Hinzunahme eines Höhenmodells (ETOPO5) in Reflexionsgrade umgewandelt. (THOME et al., 1998b).

⁶⁴ Iteratives Einzelschrittverfahren zur Annäherung an die Lösung linearer Gleichungssysteme.

4.6 ASTER-MODIS-Lagekorrekturen

Zur visuellen Extraktion der Trainingsgebiete für die 250 m MODIS-Daten aus ASTER-Szenen wurde zunächst eine Methode zum Lageabgleich der beiden Datensätze definiert und umgesetzt. Dabei sollten die ASTER-Daten auf die MODIS-Daten koregistriert werden. Die grundsätzliche Überlegung war, mittels statischer Berechnungen Hauptachsen der Daten-Verschiebung zu erfassen. Dazu wurde der geometrisch höher aufgelöste Datensatz (ASTER) kanal- und pixelweise in alle Richtungen über dem Datensatz mit der geringeren Pixelauflösung (MODIS) verschoben. Danach wurden die ASTER-Pixelwerte im MODIS-Pixel aggregiert und sowohl der Pearsonsche Korrelationskoeffizient und der RMSE (*Root Mean Square Error*) für die Datensätze berechnet (BAHRENBERG et al., 1999). Es wurde angenommen, dass der exakte Lagebezug zwischen ASTER und MODIS durch die höchste Korrelation und den niedrigsten RMS-Fehler der gemessenen Reflexionsgrade einzelner Bänder hergestellt werden kann.

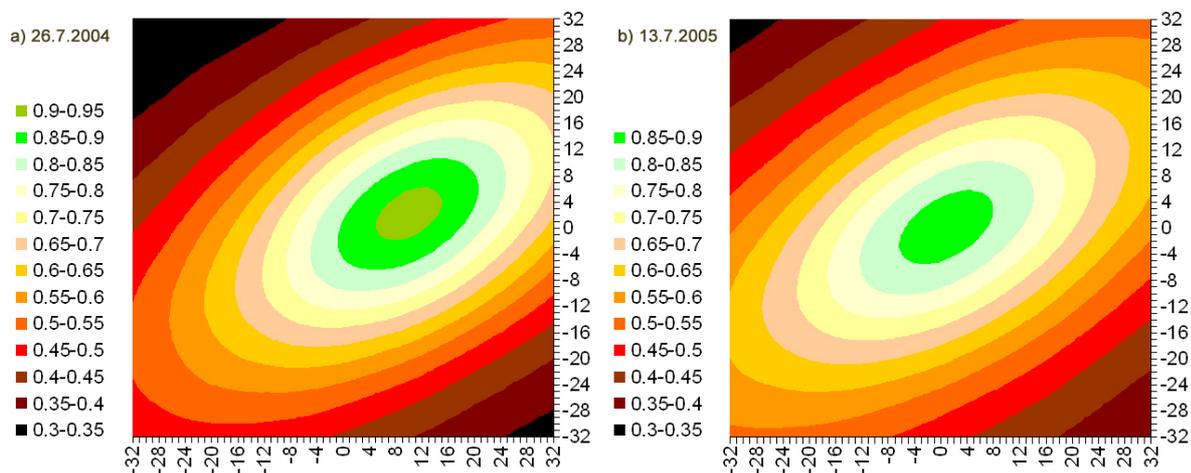


Abbildung 4-6: Oberflächendiagramm der Pearson'schen Korrelationskoeffizienten in Abhängigkeit der Pixelverschiebung der ASTER-Daten, auf den Achsen die Größe und die Richtung der Pixelverschiebung. Die hellgrüne Fläche markiert den Bereich mit den höchsten Übereinstimmungen zwischen den roten Spektralbändern der Sensoren. (Skalierungen wurden zur besseren Visualisierung unterschiedlich vorgenommen).

Zur Durchführung des Verfahrens wurden zeitgleich aufgenommene 250 m MODIS- ρ -Daten (MOD09GQK-Produkte⁶⁵, 26.7.2004 und 13.7.2005) herangezogen. Dann wurden jeweils die das nordwestliche Khorezm abbildenden ASTER-Daten (AST_07_00307262004065248 und AST_07_00307132005065229) in die Sinusoidalprojektion der MODIS-Daten überführt (Anpassung der Projektionen). Weiterhin wurde ein Subset für den Bereich gebildet, in dem sich die Szenen überlagern. Es wurden jeweils die roten Kanäle der beiden Sensoren miteinander verglichen, da diese mit 0,62-0,67 μm (MODIS) und 0,63-0,69 μm eine deutlich größere spektrale Überlagerung aufwiesen als die nahen Infrarotkanäle (MODIS: 0,841-0,876 μm ; ASTER: 0,76-0,86 μm).

⁶⁵ Vergleiche Tabelle AIII-1

Sowohl der Pearson'sche Korrelationskoeffizient wie auch der RSME zeigten für das Jahr 2004 eine Fehllage der Daten um zehn Pixel in x-Richtung (150 m) und zwei Pixel in y-Richtung (30 m) an (Tabelle 4-5). Für 2005 liegen diese Werte für die Verschiebung der Daten bei zwei (30 m) und einem Pixel (15 m). Abbildung 4-6 verdeutlicht, dass die Korrelationen ausgehend von diesen Zentren kleinster Abweichung ellipsenförmig abnehmen. Daher wurde eine entsprechende Lagekorrektur der ASTER-Pixel vorgenommen.

Tabelle 4-5: Ergebnisse der Lagekorrekturen für die ASTER-Daten

Aufnahmedatum	Verschiebung in x-Richtung	Verschiebung in y-Richtung	RMSE*	Korrelationskoeffizient**
26.7.2004	150 m	30 m	3,34	0,92
13.7.2005	30 m	15 m	3,57	0,88

* Minimaler Wert, ** Maximaler Wert

Interne Verzerrungen oder Drehungen wurden bei dieser Vorgehensweise nicht berücksichtigt. Diese hätten durch eine polynomiale Entzerrung der Daten mit Passpunkten erreicht werden können.

4.7 Qualitätsanalyse und Zeitseriengenerierung mit MODIS-Daten

Die Weiterverarbeitung vor der endgültigen Nutzung der MODLand-Produkte (Klassifikation, Kapitel 5, Modellierung, Kapitel 6) beinhaltet die Generierung qualitativ hochwertiger und lückenloser Zeitreihen. Dies wurde unter Anwendung einer für MODIS-Produkte entwickelten Software umgesetzt (Kapitel 4.7.1). Die Auswertungen im Untersuchungsgebiet (Kapitel 4.7.2) und die datensatzabhängige Interpolation (Kapitel 3.7.3) werden anschließend detailliert beschreiben. Da die Modellierung der tatsächlichen Evapotranspiration für tägliche MOD11A1-Daten anvisiert wurde, mussten die übrigen Fernerkundungsvariablen hinsichtlich ihrer verschiedenen temporalen Auflösungen angepasst werden.

4.7.1 Methodik zur Qualitätsanalyse und Zeitseriengenerierung

Kernelement der Datenvorverarbeitung ist die Analyse der mit den MODIS-Produkten gelieferten QA-SDS. Damit sollten ungeeignete Pixel bereits vor der eigentlichen Erstellung der Zeitserie eliminiert werden. Im zweiten Schritt konnte, wenn erforderlich und möglich, eine Interpolation erfolgen. Dieser Ansatz wurde am DLR Stiftungslehrstuhl für Fernerkundung an der Universität Würzburg schon in Arbeiten von CONRAD et al. (2004a und 2004b) verfolgt, was schließlich zur Erstellung des *Time Series Generator* (TiSeG) führte, einer Software zur Erstellung von Zeitserien aus MODIS-Produkten der MODLand-Datensuite (COLDITZ et al., 2005 und 2006). Das Kernstück von TiSeG bildet die raumzeitliche Analyse der Qualitätsmerkmale. So wird dem Anwender interaktiv ermöglicht, die beste Datenqualität auszusuchen und zu große zeitliche Lücken zunächst mit minder qualitativen Daten zu verkleinern und dann gegebenenfalls durch eine Interpolation zu schließen (CONRAD et al., 2005).

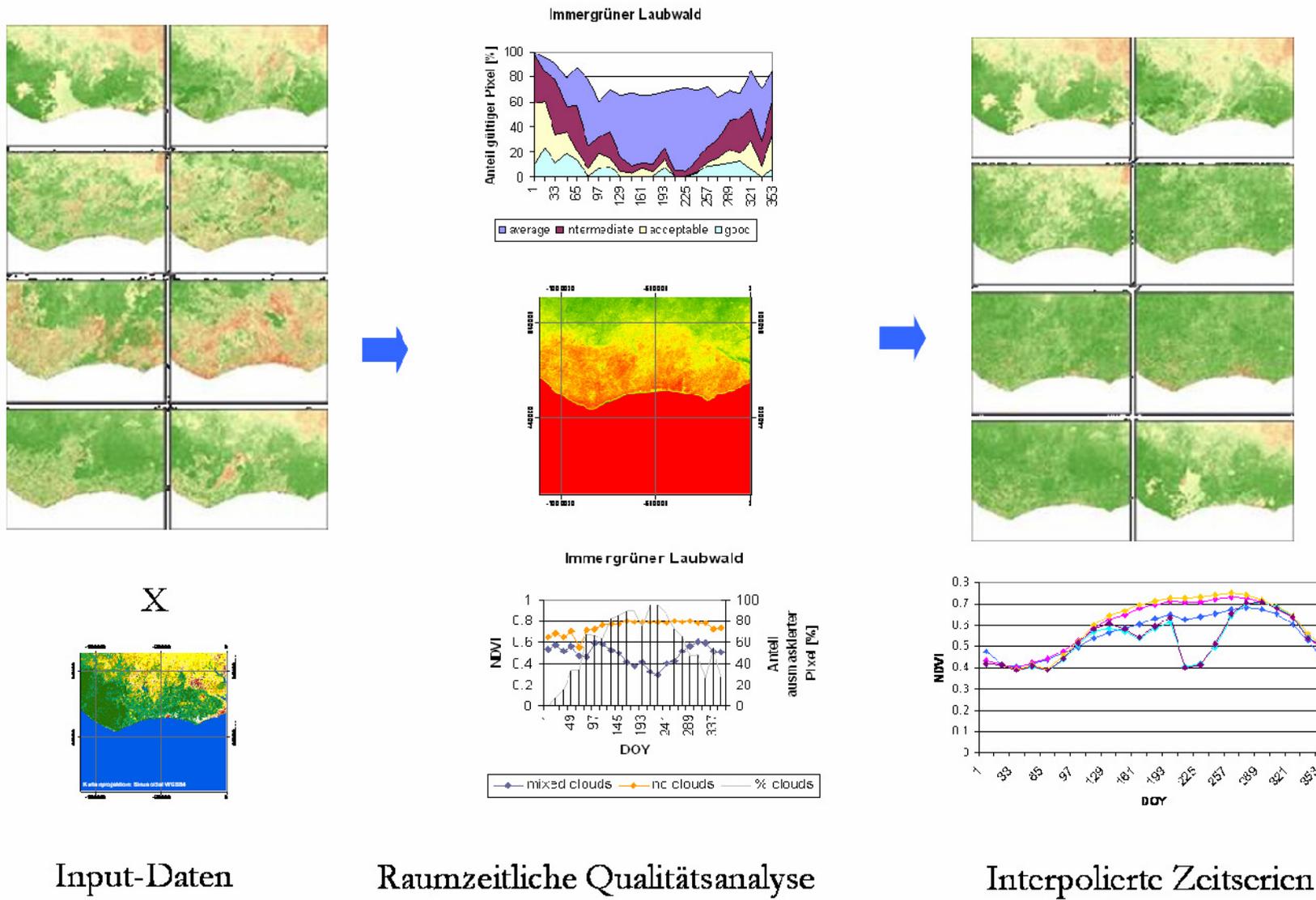


Abbildung 4-7: Der TiSeG Workflow (CONRAD et al., 2005).

Abbildung 4-7 verdeutlicht den Ablauf von TiSeG. Unkorrigierte MODIS-Zeitserien werden in TiSeG eingeladen, optional können auch räumliche Klassen hinzugefügt werden. Dann werden Qualitätseinstellungen getroffen, die für unterschiedliche räumliche Klassen und für einzelne Zeitschritte verschieden ausfallen können. Beispielsweise können während einer Regenzeit mit hoher Bewölkungswahrscheinlichkeit auch Pixel niedrigerer Qualität zugelassen werden, um eine Mindestanzahl von Stützwerten für diese Zeitspanne zu generieren. Außerhalb der Regenzeit können höhere Qualitätsmaßstäbe gesetzt werden. Für eine temporale Interpolation lassen sich so kleinere zeitliche Lücken generieren und daher die Realität der fernerkundlichen Parameter annähern (CONRAD et al., 2005).

4.7.2 Raumzeitliche Qualitätsanalyse

Für das Untersuchungsgebiet wurden aus allen verwendeten höherwertigen MODIS-Produkten (Tabelle 4-4) geeignete Qualitätsmerkmale durch die raumzeitliche Qualitätsanalyse mittels TiSeG ermittelt. Abbildung 4-8 zeigt die Anzahl gültiger Pixelwerte der MOD09- ρ -Daten. Ausgewählt wurden alle Werte, deren QA-SDS die höchste Bandqualität und keine Wolkenbedeckung erkennen ließen. Generell liegen die Werte im Winter zwischen 60 und 80 % deutlich schlechter als in den Sommermonaten, in welchen dauerhaft fast 100 % hochwertige Daten über Khorezm aufgezeichnet wurden. Das trockene kontinentale Klima ermöglicht klare atmosphärische Bedingungen in den Sommermonaten, während im Winter die Wahrscheinlichkeiten für Bewölkung höher liegen. Von November bis März kann Schnee die Datenqualität beeinflussen. Da die landwirtschaftlichen Aktivitäten vor allem in den Sommermonaten ablaufen, sind für diese Arbeit im Wesentlichen unbeeinflusste Daten und damit Jahrgänge der MODIS-Daten zu erwarten, die eine Klassifikation und die Modellierung der Evapotranspiration begünstigen.

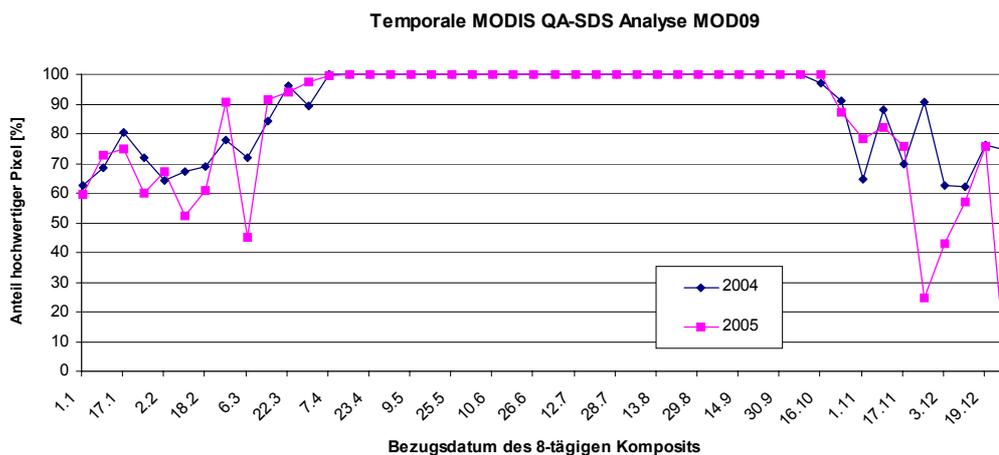


Abbildung 4-8: Zeitliche Qualitätsanalyse der MOD09 ρ -Zeitserien mit TiSeG - Anteil gültiger MOD09-Pixel des gesamten Untersuchungsgebiets im Jahresgang.

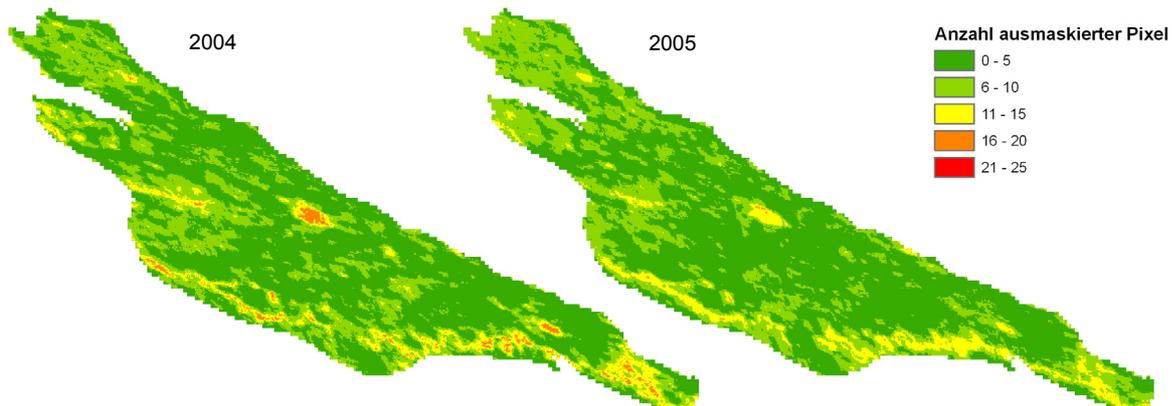


Abbildung 4-9: Räumliche TiSeG-Qualitätsanalyse der MOD09 ρ -Zeitserien der Jahre 2004 und 2005 - Anzahl ausmaskierter Werte im Jahresgang (insgesamt 46 Zeitschnitte) pro Pixel.

Tabelle 4-6: Layerspezifische Einstellungen zur MODIS-Qualitätsanalyse und zur Interpolation.

Produkt	Layer	MODIS QA-SDS* Analyse (gültige Qualitätsflags)	Linear interpoliert
MOD11A1	LST		Nein
	Emissionsgrad ϵ Aufnahmezeitpunkt	General quality: good & acceptable	Nein
	NDVI	Usefulness: perfect – good Mixed clouds: no	Ja
	LAI	General quality: good & acceptable Cloud state: clear & assumed clear	Ja
	<i>White-sky</i> Albedo	General quality: good & acceptable, Snow: no	Ja
	<i>Black-sky</i> Albedo		Ja
	ρ (Rot)	General quality: good Clouds: Clear	Ja
	ρ (Nahes Infrarot)	Band quality: highest	Ja

* QA-SDS = *Quality Assessment Science Data Set*

In der räumlichen Dimension ergibt sich so eine durchweg akzeptable Menge verwertbarer Datenwerte (Abbildung 4-9). In weiten Teilen Khorezms liegt die Anzahl der ausmaskierten Pixel zwischen null und fünf oder, gerade im Nordwesten zwischen sechs und zehn. Das Auftreten der Fehlwerte liegt nach Abbildung 4-8 größtenteils in den Wintermonaten. Lediglich der Übergang zur Wüste sowie die Siedlungsgebiete erreichen streifen- sowie punktiert geringere Datenqualitäten im Jahresgang. Die höhere Anzahl ausmaskierter Pixel zeigt offensichtlich die Auswirkungen der Korrekturen des *bow-tie* Effekts an scharfen großmaßstäblichen Übergängen. Tabelle 4-6 dokumentiert die nach den Analysen ausgewählten Qualitätseinstellungen für das Untersuchungsgebiet für jedes der eingesetzten MODLand-Produkte. Eine Unterscheidung in saisonale Abschnitte wurde nicht vorgenommen, da für den Untersuchungszeitraum fast ausschließlich sehr gute Datenqualitäten vorlagen, so dass die Lücke, die durch eine mögliche

Interpolation zu schließen war, klein gehalten werden konnte. Die Resultate der Qualitätsuntersuchungen befinden sich im Anhang (Tabelle AIII-2 – AIII-4).

4.7.3 Zusammenstellung der Zeitserien und Interpolation

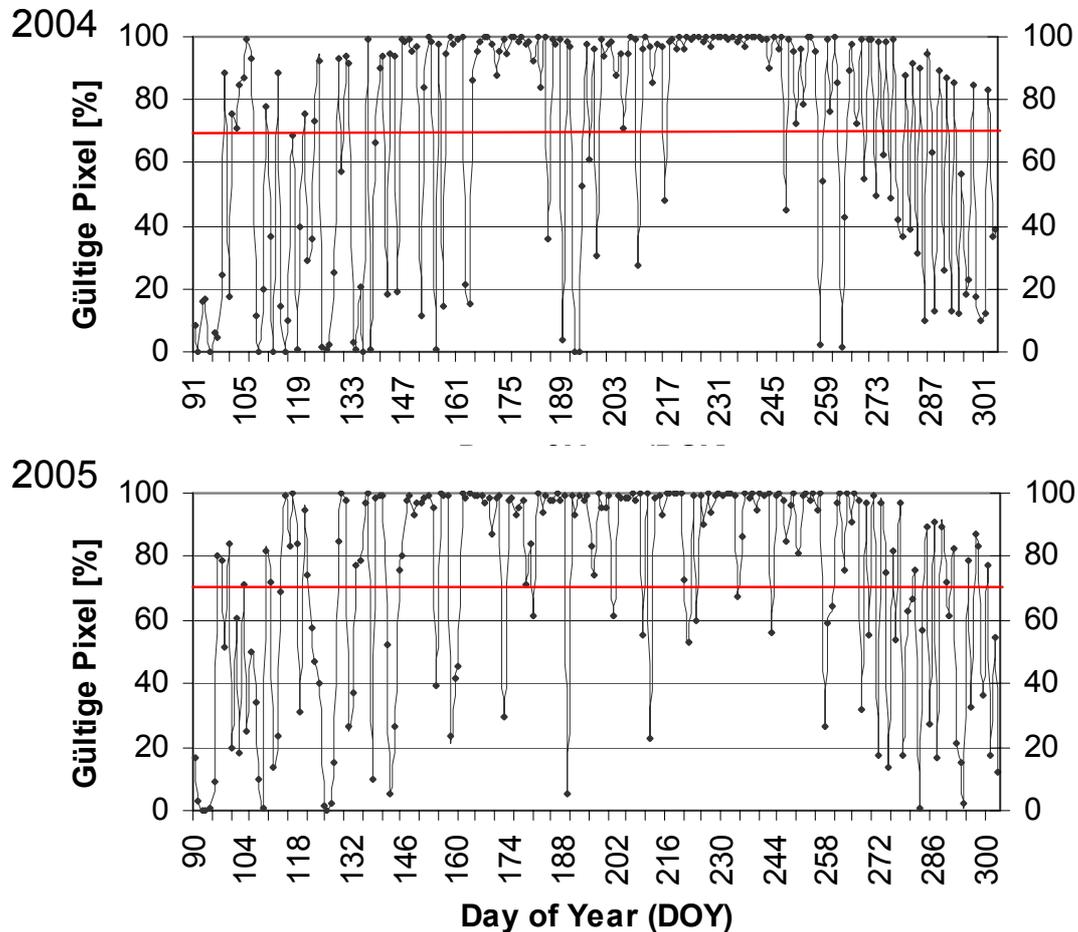


Abbildung 4-10: MOD11A1 Qualitäten für die Sommersaison 2004 und 2005 (Oktober eingeschlossen). Alle Datensätze mit einer Datenqualität über 75% (rote Linie) wurden in die Auswertung mit einbezogen.

Für die Anwendung von SEBAL (und METRIC) zur Bestimmung der tatsächlichen Evapotranspiration sind Daten eines Überflugs notwendig, um die Daten mit den meteorologischen Parametern exakt zu verbinden (ALLEN et al., 2005). Die Landoberflächentemperatur ist je nach Wetterlage und Feuchte des Bodens so variabel, dass eine zeitliche Interpolation der Landoberflächentemperatur zwischen einzelnen Tagen selbst unter Annahme einer gleichen Überflugszeit für die Modellierung nicht akzeptabel sein konnte. Erschwerend kam hinzu, dass bereits die täglichen LST-Produkte Tageskomposite, also aus zu verschiedenen Uhrzeiten aufgenommenen Daten zusammengesetzt sind. Günstigerweise wird beim MOD11A1-Produkt aber eine Informationsebene mitgeliefert, die jedem Pixel über die Aufnahmezeit einen Überflug zuordnen lässt. Für jedes Aufnahmedatum wurde daher der

Modalwert der Aufnahmezeitpunkte im Untersuchungsgebiet bestimmt und alle abweichenden Pixel ausmaskiert. Erst ab einer gültigen Pixelmenge (aus der QA-SDS Analyse und der Untersuchung der Aufnahmezeitpunkte) von 75% wurde ein MODIS LST-Produkt zur Modellierung zugelassen. Damit ergaben sich für das Jahr 2004 133 und für das Jahr 2005 136 gültige LST Eingangsdatensätze (aus je 214 täglichen MOD11A1-Produkten; Abbildung 4-10). So konnten fast der gesamte Juli und August der beiden Jahre in die Berechnung der saisonalen tatsächlichen Evapotranspiration einfließen. Zu Saisonbeginn und in der Reife- und Erntezeit der Baumwolle (September und Oktober) entstanden aufgrund ungünstiger atmosphärischer Bedingungen größere Datenlücken. Diese wurden nach der Modellierung geschlossen (Kapitel 6).

Im Gegensatz zur LST konnten bei den übrigen Parametern im Normalverlauf eines Jahresgangs kontinuierliche Veränderungen der Oberflächenbedeckung angenommen werden. Daher wurden die Albedo und die Vegetationsparameter (NDVI und LAI) mittels TiSeG temporal linear interpoliert, wobei die Werte für den zeitlichen Mittelpunkt des jeweiligen 8- oder 16-tägigen Komposits verstanden wurden. Für die Modellierung der tatsächlichen Evapotranspiration wurden für diese Parameter mittels linearer zeitlicher Interpolation tägliche Daten simuliert.

4.8 NDVI-Berechnungen aus MOD09Q1-Daten

Für die Klassifikation der Landnutzung wurden NDVI-Zeitserien verwendet (Kapitel 5). Obwohl 16-tägige MODLand Produkte des *Normalized Difference Vegetation-Index* zur Verfügung standen (Kapitel 4.4.4), wurde für die Klassifikation eine höhere zeitliche Auflösung benötigt, um kurzfristige vegetationspezifische Merkmale zu erfassen. Diese wurden aus den spektralen Reflexionsgraden der 8-tägigen MOD09Q1-Daten gewonnen.

Der Vegetationsindex NDVI ist ein standardisiertes Maß zur Messung von Grünheit und Dichte der Vegetationsdecke innerhalb eines Pixels, das bereits 1979 eingeführt wurde (TUCKER, 1979, zitiert nach HUETE et al., 1997). Im Laufe der Zeit hat sich herausgestellt, dass der NDVI gegen Bodensignale (Bodenfarbe, Textur und Feuchtigkeit) bei nicht geschlossener oder dünner Vegetationsdecke (HUETE, 1988) und teilweise gegen hohe Aerosolgehalte in der Atmosphäre (KAUFMAN und TANRE, 1992) anfällig ist. Dennoch ist der NDVI bis heute der gebräuchlichste Vegetationsindex in der Fernerkundung (LILLESAND et al., 2004; HUETE et al., 2002).

Der NDVI berechnet sich aus dem Verhältnis der Reflexionsgrade im roten Licht (RED) und im nahen Infrarot (NIR) und erreicht durch folgende Normalisierung Werte zwischen -1 und 1:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Niedrige RED-Werte indizieren eine hohe Chlorophyllabsorption, hohe NIR-Werte den Zellstoffanteil von Blättern. Diese physikalisch basierten Eigenschaften der Vegetation lassen den

NDVI gemäß der dargestellten Formel mit zunehmender Blattmasse ansteigen und heben Vegetation so gegen alle in der Natur vorkommenden Oberflächentypen (Boden und Wasser) deutlich ab (JENSEN, 2000). Ergänzend kann bemerkt werden, dass der NDVI von Sensor zu Sensor variiert, da die Lage der Bänder im Spektrum und deren Bandbreite sensorspezifisch sind (HUETE et al., 2002). Für diese Arbeit spielt letzteres allerdings keine Rolle, da schlussendlich nur der MODIS-NDVI zur Anwendung kommt.

4.9 Berechnung der Blue-Sky-Albedo aus MOD43B3-Produkten

Für die Modellierung der Evapotranspiration bildet die Albedo die Grundlage zur Berechnung der Strahlungsbilanz (Kapitel 3.2.2). MOD43B3-Produkte enthalten jedoch lediglich für jedes Pixel das gerichtete (*black-sky* Albedo; α_{bs}) und das diffuse, ungerichtete (*white-sky* Albedo) Reflexionsvermögen (α_{ws} ; Kapitel 4.4.6; SCHAAF et al., 2002). Um die tatsächliche (*blue-sky*) Albedo (α) für die Mittagszeit abzuschätzen, muss man den Anteil des diffusen Himmelslichts (S) für diesen Zeitpunkt kennen. Dieser ist wiederum abhängig von der aerosol-optischen Dicke (τ), dem Sonnenzenitwinkel (θ) und der Wellenlänge (λ ; SCHAAF et al., 2002), woraus sich für die *blue-sky* Albedo folgende Formel ergibt:

$$\alpha(\theta, \lambda) = [1 - S(\theta, \tau(\lambda))] \alpha_{bs}(\theta, \lambda) + S(\theta, \tau(\lambda)) \alpha_{ws}(\theta, \lambda)$$

Für MOD43B3-Produkte finden sich im Internet zur Berechnung der *blue-sky* Albedo LUT (MOD43, 2006), die wellenlängenabhängig, auch für die Gesamtalbedo, für unterschiedliche Sonnenzenitwinkel (1 - 89°) und unterschiedliche aerosol-optische Dicken (0,00 – 0,98) verallgemeinerte Werte für S enthält. Diese wurden aus dem 6S-Strahlungstransfermodell errechnet (VERMOTE et al., 1997b). Die Sonnenzenitwinkel waren einfach aus den mit den MODIS-Produkten gelieferten Metadaten auszulesen.

Komplexer gestaltete sich die Bestimmung der aerosol-optischen Dicke⁶⁶. Um eine Herangehensweise zur Berechnung der *blue-sky* Albedo festzulegen, wurde daher an dieser Stelle zunächst der Wirkungsgrad errechnet, der mit einer Synthese zwischen α_{bs} und α_{ws} erreicht werden kann.

⁶⁶ Die aerosol-optische Dicke ist ein Maß für den Aerosolgehalt und die Verteilung von Aerosolen in der Atmosphäre (JENSEN, 2000).

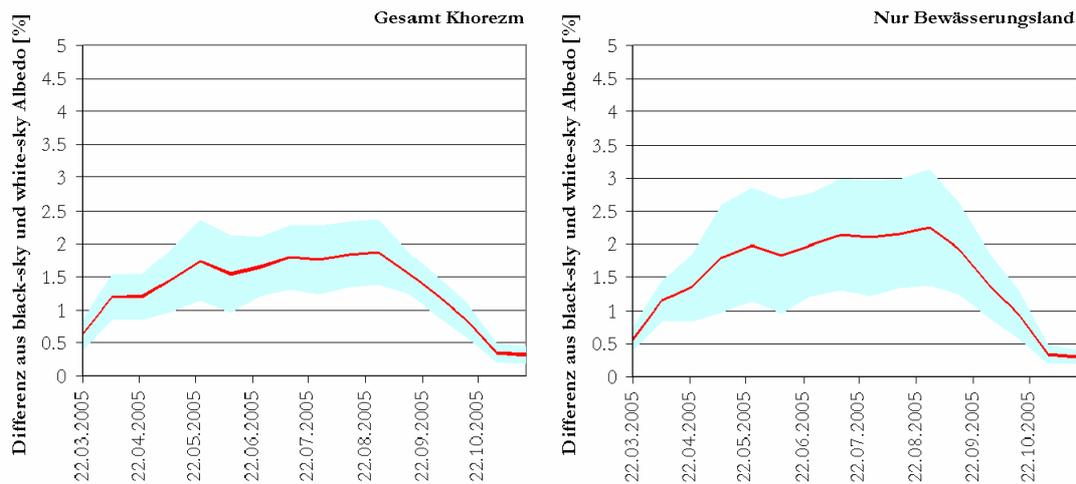


Abbildung 4-11: Differenzen zwischen 16-tägigen *black-sky* und *white-sky* Albedo-Produkten (MOD43B3) im Verlauf der Vegetationsperiode, links für das Untersuchungsgebiet, rechts für einen Ausschnitt aus dem Bewässerungsland.

α_{bs} und α_{ws} sind in MOD43B3-Daten für 12 Uhr Ortszeit abgeleitet. Für Khorezm unterscheiden sie sich im Mittel des Jahresgangs um Albedowerte von 1,31 % (absolutes Minimum = 0,2 absolutes Maximum 7,7, maximale Standardabweichung 0,6; Abbildung 4-11, links). Im Bewässerungsgebiet⁶⁷ liegen diese Mittel mit Werten um 1,48 % (absolutes Minimum = 0,3, absolutes Maximum 4,8, maximale Standardabweichung 0,9; Abbildung 4-11, rechts) nur etwas höher. Wegen dieser geringen Schwankungen wurde zunächst der Einfluss auf die Modellierung als gering eingeschätzt, was aber noch weiter geprüft wurde.

Mittlere Werte für die aerosol-optische Dicke wurden aus MODIS-Atmosphärenprodukten ermittelt, die nicht als Grid, sondern als Originalaufnahmestreifen vorlagen (REMER et al., 2006). 20 Tageswerte des Jahresgangs wurden stichprobenartig aus dem Netz heruntergeladen (LPDAAC, 2006b), in die MODIS-spezifische Sinusoidal-Projektion umprojiziert und mit dem Untersuchungsgebiet Khorezm überlagert. Für die aerosol-optische Dicke konnte daraus – trotz leichter, allerdings unregelmäßiger Schwankungen von rund 0,15 – ein Mittel von 0,3 abgelesen werden. Die Sonnenzenitwinkel um die Mittagszeit schwankten zwischen 11° und 38° . Aus den LUT ergaben sich daher absolute Minima und Maxima für den Anteil der diffusen Streuung der Atmosphäre (S) von 0,196 und 0,440. Aus der Implementierung der oben zitierten (linearen) Formel folgt, dass die Differenzen unter Annahme der Extremwerte für die tatsächliche Albedo im Mittel immer unter 0,5 % lagen. Daher wurde zur Berechnung der *blue-sky* Albedo ein konstanter Wert der aerosol-optischen Dicke von 0,3 über das ganze Jahr angenommen.

⁶⁷ Für ein Subset offensichtlich bewässerten Landes wurden dazu die Statistiken berechnet.

5 Die Klassifikation der agrarischen Landnutzung

Das Klassifikationsverfahren ist eine methodische Entwicklung dieser Dissertation. Es soll ermöglichen, auf der mittleren Maßstabebene (250 m Pixelauflösung) den jährlichen Verlauf der Landbedeckung im agrarischen Raum und damit insbesondere die agrarische Landnutzung aus Jahresgängen, also aus temporalen Signaturen von Fernerkundungsdaten zu extrahieren. Das Verfahren wurde auf 8-tägigen MODIS NDVI-Kompositen (Kapitel 4.8) der Region Khorezm für die Jahre 2004 und 2005 entwickelt, angewendet und ausgewertet. NDVI-Zeitserien erschienen hierfür besonders geeignet, da sie den Jahresgang der Dichte von Vegetation und deren Grünheit bezogen auf eine gemeinsame Grundfläche (das Pixel) abbilden (HUETE et al., 2002). Ebenso wurden NDVI-Zeitserien auch in verschiedenen anderen Studien zur Klassifikation der Landnutzung erfolgreich eingesetzt (Kapitel 3.1.1). Das Klassifikationsverfahren ist überwacht, soll die inter- und intra-annuelle temporale Variabilität von NDVI-Zeitserien berücksichtigen sowie zeitlich und räumlich möglichst stabile Ergebnisse für unterschiedliche Jahre liefern. Es basiert auf folgenden vier Arbeitsschritten:

- (1) **Ableitung eines erweiterbaren Sets verschiedener Kurvenparameter** aus dem Jahresgang des NDVI (beispielsweise Glättung, Steigung, Krümmung) zur optimierten mathematischen Erfassung klassenspezifischer Merkmale des Kurvenverlaufs;
- (2) **Abschnittsweise Charakterisierung der Vegetationsbedeckung** über deskriptive Statistiken, die für temporale Segmente der NDVI-Zeitserien (und des Sets erweiterbarer Kurvenparameter) berechnet werden;
- (3) **Verknüpfung von Algorithmen zur Klassifikation sowie Auswahl klassifizierender Merkmale** (aus den abschnittsweise berechneten deskriptiven Statistiken);
- (4) **Mehrfachklassifikation jedes Pixels und Einführung eines Rankings** zur Erhöhung der Verfahrensgenauigkeit und seiner Stabilität.

5.1 Charakterisierung des Klassifikationsansatzes

Nahezu sämtliche etablierte Klassifikationsverfahren untersuchen die Fernerkundungsdaten auf ihre spektralen Merkmale, beispielsweise bestimmte Absorptionsbanden, die sich im elektromagnetischen Spektrum exakt lokalisieren lassen. Die Anwendung dieser Methoden erscheinen zur Klassifikation von Zeitserien aber als ungeeignet, da Zeitserien von Vegetationssignalen (NDVI-Zeitserien) in der zeitlichen Dimension innerhalb einer einzelnen Klasse deutlich variieren.

Es gibt viele Möglichkeiten der Charakterisierung von Zeitserienverläufen, wie etwa die Kurvenglättungen oder die Kurvendiskussion. Eine allgemeingültige Parametrisierung von Zeitserien zur Klassifikation wird aber aufgrund der hohen Variabilität selbst in Daten einer Klasse stets mit gewissen Schwierigkeiten verbunden sein. Daher baut der vorgestellte Ansatz darauf, zunächst möglichst viele Kurvencharakterisierungen zu erreichen. Es soll daraus ein umfassender Merkmalsraum erzeugt werden, der für eine spätere Auswertung Variablen (Merkmale) enthält, deren Bedeutung eindeutig nachvollziehbar ist. Jedes Merkmal soll immer ein zeitliches Intervall einer Zeitserie umfassen, um zeitlichen Verschiebungen klassencharakteristischer Kurveneigenschaften gerecht zu werden. Da man im Vorfeld nicht weiß, welche der Nuancen sich als „nützlich“ zur Klassifikation herausstellen, sollen auch redundante Merkmale generiert werden dürfen. Der Nachteil dabei ist, dass auf diese Weise ein sehr großer Merkmalsraum entsteht, der zu einem erhöhten Rechenaufwand führen kann.

Weiterhin sind aufgrund der Größe des zu erwartenden Merkmalsraums Klassen, die häufig erst durch eine Merkmalskombination von anderen optimal abgegrenzt werden können, als Nutzer nicht auf den ersten Blick zu erfassen. Daher werden zwei aufeinander folgende Schritte vorgeschlagen, verschiedene Algorithmen zur sinnvollen Reduzierung des Merkmalsraums anzuwenden und zu kombinieren:

- (1) zunächst soll ein erstes Verfahren die Bewertung jedes Merkmals für einzelne Klassen ermöglichen und eine Vorauswahl aussagekräftiger Merkmale erlauben;
- (2) zur endgültigen Klassifizierung aller Klassen sollen dann auf dieser Vorauswahl die in der theoretischen Einführung (Kapitel 3.1.2) beschriebenen *Recursive Partitioning and Regression Trees* (RPART) eingesetzt werden.

Durch die Klassifikation mit RPART erfolgt eine weitere Merkmalsauswahl, da solche Verfahren alle Merkmale auf ihre Fähigkeit, Klassen zu trennen, untersuchen und nur wenige Merkmale für die Klassifikation auswählen. Wichtige Prämisse ist dabei, die Nachvollziehbarkeit der Entscheidungen sowohl zur Merkmalsauswahl als auch zur Klassifikation beizubehalten.

Weiterhin wird anvisiert, die Stabilität des Verfahrens zu stärken: Ein unkritisches Pixel, das nicht Mischpixel ist, wird mit hoher Wahrscheinlichkeit unabhängig vom Klassifikationsverfahren der richtigen Klasse zugeordnet. Gerade bei einer niedrigen geometrischen Auflösung führt aber das Mischpixelproblem zu Ungenauigkeiten in der Klassifikation, die sich mitunter auf ganze Klassen auswirken. Um diesem Problem entgegenzutreten wird in diesem Ansatz die Mehrfachklassifikation jedes Pixels und Einführung eines Rankings und die Klassenbildung durch gewichtete Summation von Klassenzugehörigkeiten eingeführt. Die Mehrfachklassifikation soll immer nach dem zuvor beschriebenen Zweischrittverfahren erfolgen, wobei nur der erste Schritt, also die Merkmalsauswahl variiert werden kann (Kapitel 5.2.4). Es wird erwartet, durch verschiedene Verfahrenskombinationen zur Reduzierung des Merkmalsraums die Genauigkeit der Klassifikation erhöhen zu können.

Im Folgenden sollen beispielhaft sinnvolle beschreibende Kurvenparameter und ihre erwarteten Einflüsse auf eine Klassifikation vorgestellt werden (Kapitel 5.1.1). Dies ermöglicht, anschließend die Idee der abschnittsweise berechneten Statistiken (Kapitel 5.1.2) detailliert zu beschreiben.

5.1.1 Ableitung eines erweiterbaren Sets verschiedener Kurvenparameter

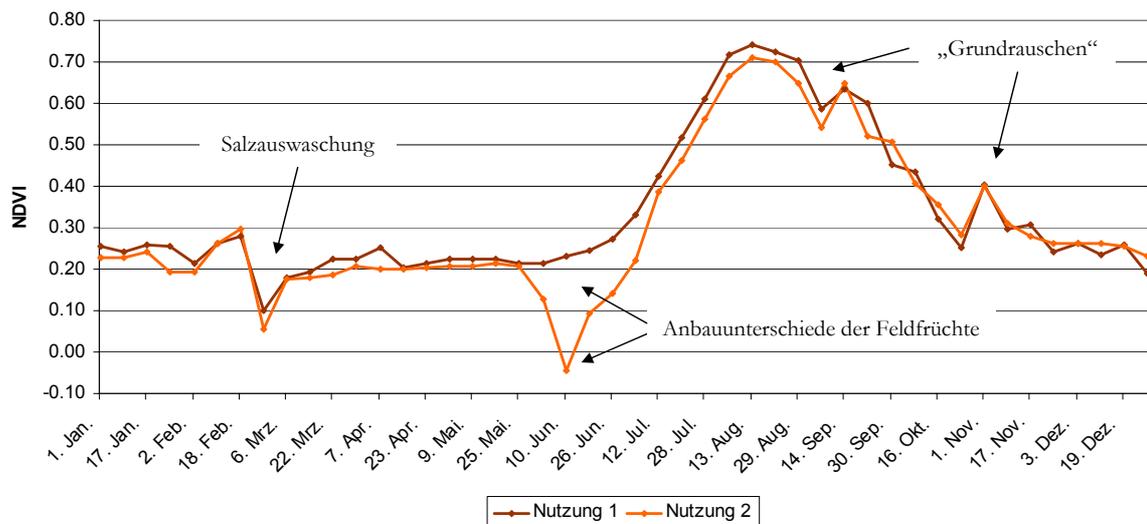


Abbildung 5-1: NDVI-Jahresgänge zweier unterschiedlicher Nutzungen (optimiert).

In Abbildung 5-1 wird die temporale NDVI-Entwicklung zweier Landnutzungen illustriert. Im Frühjahr zeigt sich ein Bodensignal, das zu einem bestimmten Zeitpunkt durch die Flutung der Felder zur Auswaschung des Salzes kurzzeitig in ein Wassersignal (sehr niedrige NDVI-Werte) übergeht. Im Fall der ersten Landnutzung folgt nach kurzer Stagnation im Bodensignalebene ein steiler Anstieg. Dieser ist bei der zweiten Landnutzung auch zu beobachten, allerdings ist noch einmal ein Einbruch des NDVI auf Werte unter Null vorgeschaltet, der auf die periodische Flutung des Feldes mit Wasser hindeutet. Dann verlaufen die NDVI-Kurven parallel, um nach

der Vegetationsperiode wieder in ein Bodensignal überzugehen. Bewusst wurden exemplarisch zwei Klassen gewählt, die einander sehr ähnlich sind und nur über den Einbruch des NDVI vor dem Anstieg zur Jahresmitte unterschieden werden können. Die grundsätzliche Frage ist, welche Merkmale zur automatisierten Trennung dieser Klassen herangezogen werden sollten. Dazu ist es notwendig, sich zunächst einmal allgemein mit den NDVI-Signalen im Jahresgang zu befassen.

Im Jahresgang des NDVI verbergen sich sensorunabhängig Schwankungen unterschiedlicher Ursache. Sie können bedingt durch Fehler beim Datenempfang und der Datenvorverarbeitung in einzelnen Datensätzen (Ausreißer) oder in einem gesamten Bildausschnitt auftreten (extreme atmosphärische Bedingungen, Daten außerhalb der LUT bei der Vorverarbeitung, ungünstige Beleuchtungseffekte, fehlende Winkelkorrekturen). Abbildung 5-1 zeigt solche Schwankungen – bezeichnet als „Grundrauschen“ – in den typischen NDVI-Verläufen, die unabhängig vom Oberflächentyp auftreten. Um solche Fehler zu dämpfen, werden vor einer Klassifikation beispielsweise Ausreißeranalysen oder Kurvenglättungen vorgenommen (Abbildung 5-2).

Allerdings kann eine Glättung für bestimmte Oberflächentypen bedeutsame Details eliminieren, wie etwa anthropogene Eingriffe, die sich auf den Signalverlauf des NDVI auswirken. Diese treten gerade im landwirtschaftlichen Sektor auf und haben erheblichen Einfluss auf die temporale Entwicklung eines NDVI-Signals, was sich neben dem Rauschen in Abbildung 5-1 wiederfinden lässt: Die Auswaschung des Salzes von den Feldern im Frühjahr und die offensichtlich extreme Zufuhr von Wasser vor dem eigentlichen Vegetationswachstum in der zweiten Nutzung. Letztere ist durch die Kurvenglättung visuell nicht mehr eindeutig abgrenzbar und kann im rechnergestützten Klassifikationsprozess – verwendet man nur die geglättete Kurve – nicht mehr erfasst werden.

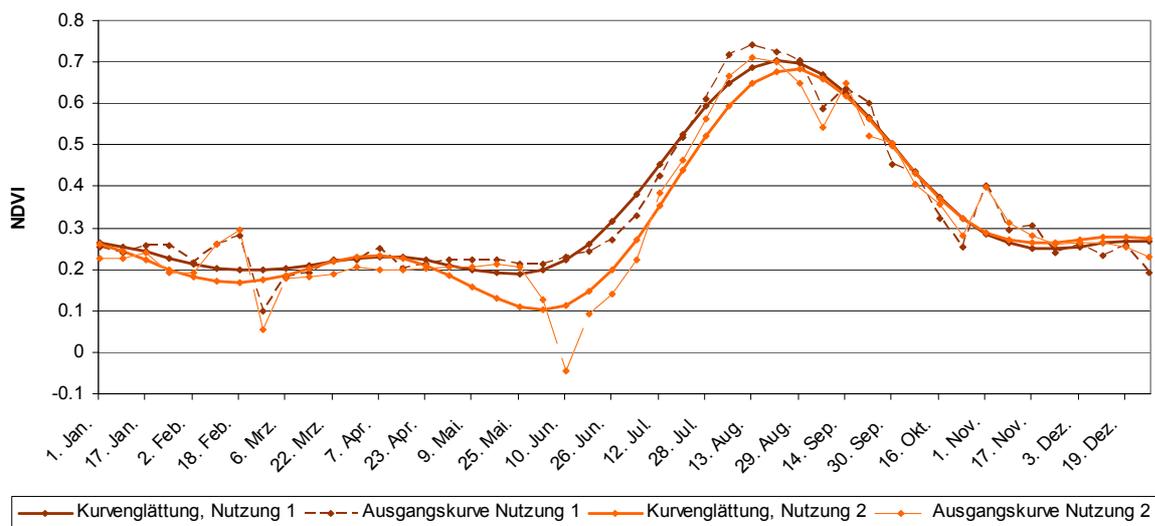


Abbildung 5-2: Kurvenglättete NDVI-Jahresgänge zweier unterschiedlicher Nutzungen, gestrichelt die Ausgangskurven.

Es gibt noch eine Vielzahl von Alternativen zur Charakterisierung von Klassen, beispielsweise die Steigung der NDVI-Zeitserie (Abbildung 5-3), zu deren Generierung die Differenzen je zweier benachbarter Werte berechnet werden. Welche Zeitreihe ist für eine Klassifikation besser geeignet? Die geglättete Reihe kann zwar ein Grundrauschen unterdrücken, kann sie aber noch zur Unterscheidung ähnlicher Klassen dienen? Diese Fragen lassen sich nicht pauschal beantworten, wie Arbeiten von HANSEN et al. (2000) oder VIOVY (2000) zeigen (Kapitel 3.1.1).

Eine weitere Frage muss nach der Allgemeingültigkeit einer möglichen Aussage gestellt werden: Liefert in jedem Jahr derselbe Kurventyp (Original-Zeitreihe, geglättete Kurve, die Ableitung oder ein anderes Derivat) ein gleich gutes Ergebnis? Hier ist anzunehmen, dass gerade Variationen in verschiedenen Jahren hinsichtlich der Phänologie sowie atmosphärischer und meteorologischer Bedingungen (vergleiche COLDITZ et al., 2005 und COLDITZ et al., 2006), unterschiedliche Kurvenausprägungen hervorrufen.

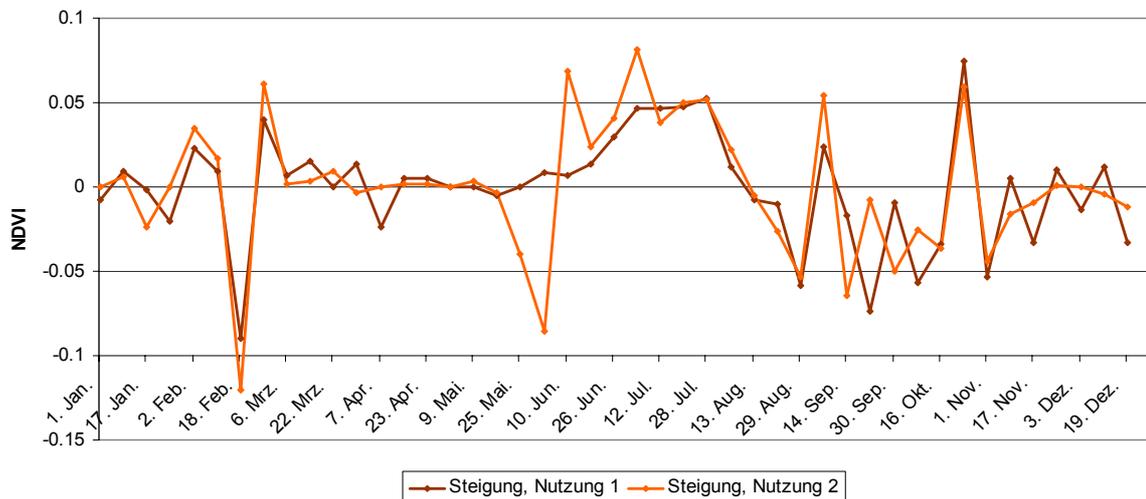


Abbildung 5-3: Steigung der NDVI-Jahresgänge (erste Ableitung) zweier unterschiedlicher Nutzungen.

Aus diesen Vorüberlegungen und dem Wissen, dass es diverse Methoden gibt, die zur Reduzierung eines Merkmalsraums geeignet sind, wurde der Ansatz abgeleitet, für die Klassifikation so viele Eingangskurven wie möglich zu generieren. Die Auswahl geeigneter Merkmale bleibt dann Auswahlmethoden wie dem RPART-Algorithmus überlassen. Eine Obergrenze braucht nicht gesetzt zu werden, so lange die aus der Ausgangszeitserie gebildeten Variablen begründet werden können und die Rechnerkapazitäten nicht überschritten werden. Dieses ist durch den überwachten Ansatz gewährleistet, da der komplette Merkmalsraum lediglich auf den Trainingsgebieten errechnet werden muss. Nur die letztendlich zur Klassifikation geeigneten Merkmale werden für alle Eingangsdaten abgeleitet. Es wird erwartet, dass in verschiedenen Jahren unterschiedliche Merkmalsausprägungen zur Klassifikation ausgewählt werden.

5.1.2 Ansatz der temporalen Segmentierung

Die eigentliche Hauptidee des Verfahrens ist die temporale Segmentierung der Zeitserie. Wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, sind häufig deskriptive Statistiken zur Klassifikation von Zeitserien verwendet worden. Weiterhin wurde in Kapitel 5.1.1 bereits deutlich, dass bei der Unterscheidung verschiedener Klassen einzelne Abschnitte im zeitlichen Kurvenverlauf ausschlaggebend sind. Daher sollen nun temporale Muster fernerkundlicher Zeitserien (hier des NDVI) durch abschnittsweise statistische Beschreibungen der Kurvenentwicklung erfasst und charakteristischen Klassen zugeordnet werden.

Abbildung 5-4 zeigt typische NDVI-Jahresgänge für verschiedene Klassentypen der Vegetationsbedeckung und agrarischen Landnutzung, die im Untersuchungsgebiet auftreten. Zum einen gibt es non-modale Jahresgänge mit höheren NDVI-Werten (dunkelgrün), die auf ganzjährig dichte und meist grüne Vegetation hinweisen. Daneben treten unimodale (gold und braun) und bimodale Verläufe (hellgrün) des Vegetationsindex auf, die insbesondere in agrarisch genutzten Gebieten auf eine beziehungsweise zwei Anbauphasen schließen lassen. Dabei können durch verschiedene Anbaufrüchte saisonale Unterschiede in der NDVI-Entwicklung auftreten, so dass der unimodale Verlauf beispielsweise in der Frühjahrssaison oder in der Sommersaison sein Maximum erreicht. Außerhalb dieser Anbauphasen liegen diese Felder brach (Das Bodensignal des NDVI liegt hier zwischen 0,1 und 0,2).

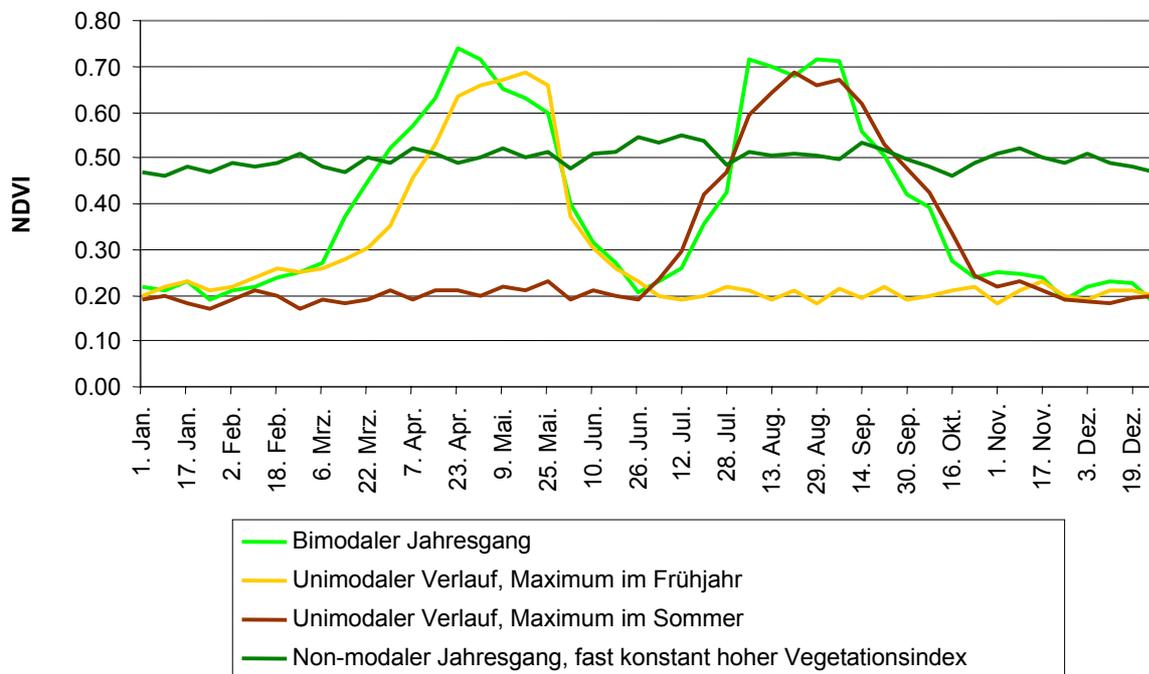


Abbildung 5-4: Charakteristische NDVI Jahresgänge landwirtschaftlicher und natürlicher Vegetationsklassen im Untersuchungsgebiet Khorezm.

Die mathematische Charakterisierung dieser vier NDVI-Zeitserien wird mittels deskriptiver Statistiken (hier Maximum, Minimum, Spannweite, Mittelwert und Standardabweichung) ermöglicht (Tabelle AIII-5). Unimodale Verläufe besitzen in der Regel hohe Maxima, die Mittelwerte des gesamten Jahresgangs fallen niedriger aus. Diese liegen bei non-modalen Zeitserien mit fast konstant hohen NDVI-Werten sowie in den bimodalen Verläufen deutlich höher. Non-modale Jahresgänge streuen nur wenig und erreichen damit eine deutlich geringere Standardabweichung als die übrigen Klassen. Die beiden uni-modalen Verläufe lassen sich allerdings erst durch die statistische Beschreibung der Halbjahresverläufe des NDVI (insbesondere der Maxima) voneinander trennen.

Berechnet für alle drei Zeitseriensegmente (Jahresgang, erste Jahreshälfte, zweite Jahreshälfte) bilden die fünf deskriptiven Statistiken nun einen 15-dimensionalen Merkmalsraum. Eine offensichtliche Variante zur Klassifizierung ist nun die Analyse des Mittelwerts und der Standardabweichung des NDVI-Jahresgangs sowie des Maximums der zweiten Jahreshälfte der NDVI-Zeitreihe gemäß der Baumstruktur in Abbildung 5-5. Von oben nach unten gelesen werden nun zunächst die Gruppen der uni-modalen Verläufe von den übrigen Verlaufsmustern durch einen Grenzwert (GW₁), angewendet auf das Merkmal „Mittelwert des Jahresgangs“, getrennt. Dann sorgen weitere Grenzwerte (GW₂ und GW₃) in den beiden anderen Merkmalen für die weitere Aufspaltung in die vier beispielhaft betrachteten Zielklassen. Die restlichen Merkmale gehen nicht in die Klassifikation ein.

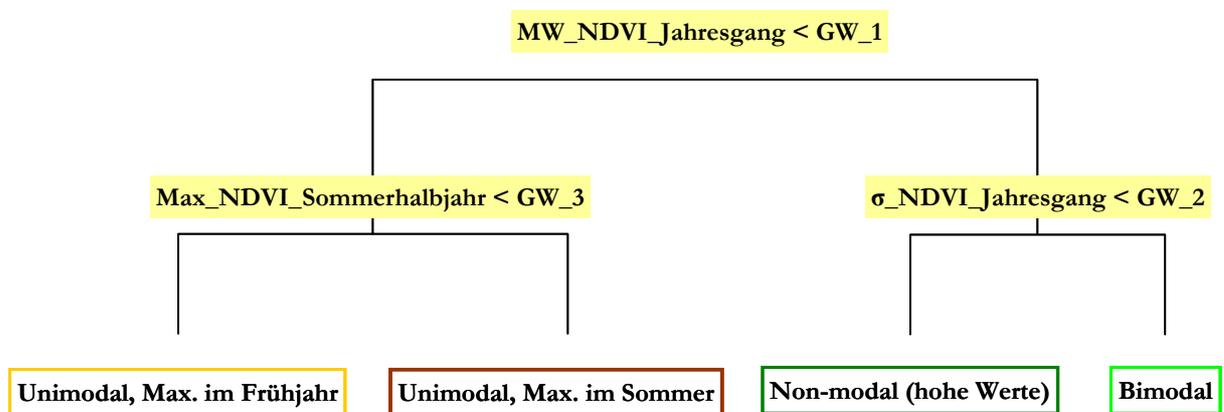


Abbildung 5-5: Verallgemeinerter potenzieller Entscheidungsbaum zur Klassifikation temporaler NDVI-Signaturen typischer Vegetationsklassen im Untersuchungsgebiet; MW = Mittelwert, Max = Maximum, σ = Standardabweichung, GW = Grenzwert.

Spezifiziert man diese Klassen nun weiter, können auch zwei sehr ähnliche Zeitreihenmuster verschiedene Klassen beschreiben, die sich nur in Nuancen unterscheiden (vergleiche Abbildung 5-1 in Kapitel 5.1.1). NDVI-Werte kleiner als Null zeugen von der Wasserbedeckung einer landwirtschaftlichen Nutzfläche (Nutzung 2). Manche Arten brauchen diese in der Initialphase des Wachstums, andere dürfen nur durch eine erhöhte Bodenfeuchte bewässert

werden (Nutzung 1). Charakteristisches Merkmal ist der markante Einbruch des NDVI auf Werte unter Null direkt vor dem schnellen Anstieg zum Maximum im zweiten Drittel der Zeitserie der zweiten Nutzung (Tabelle AIII-6). Dabei kann das Maximum des zweiten Drittels wieder als Merkmal verstanden werden.

Im Musterbeispiel kann es andere Merkmalskombinationen geben, die eine Klassifizierung der gezeigten Kurven ermöglichen. In der Realität lassen sich solche aussagekräftigen Merkmale nicht aus der visuellen Interpretation und der Geländekenntnis erstellen, da die gezeigten Kurven nahe am Idealzustand liegen. Diese Verhältnisse werden nur für einen geringen Anteil der Grundgesamtheit der Daten angetroffen. In Fernerkundungsdaten mittlerer Auflösung bilden fast alle Pixel Mischsignale der Reflexion unterschiedlicher Oberflächentypen ab. Daher werden im vorgestellten Ansatz auch deskriptive Statistiken von Kurvensegmenten des in Kapitel 5.1.1 vorgeschlagenen Sets aus Kurvenderivaten der NDVI-Zeitserien erzeugt und zu einem großen Merkmalsraum zusammengefügt. Anschließend ist es entscheidend, Klassifikationsverfahren einzusetzen, die beispielsweise die angedeutete Baumstruktur aus dem Merkmalset eigenständig erstellen können und so eine Merkmalsauswahl treffen können, wie nachfolgend eingehend beschrieben wird.

5.2 Methodik und Umsetzung

Der Aufbau des Gesamtverfahrens ist „klassisch“ (RICHARDS und JIA, 2006): Nach der Bestimmung der Zielklassen im Untersuchungsgebiet (Kapitel 5.2.1), der Wahl der Trainings- und Validierungsgebiete (Kapitel 5.2.2) sowie der Generierung des Merkmalsraums (Kapitel 5.2.3) erfolgen die Evaluierung der Merkmale auf ihre Eignung zur Klassifikation und Klassifikation selbst (Kapitel 5.2.4). Abschließend wird eine Postklassifikation zur Optimierung des Ergebnisses (Kapitel 5.2.5) nachgeschaltet.

5.2.1 Klassendefinition

In der Sommersaison 2004 wurden umfassende Geländearbeitungen in Khorezm durchgeführt, die in einen ersten Klassifikationsschlüssel mündeten. Dabei bestimmte die Auswahl der fernerkundlichen Datengrundlagen (MODIS) hinsichtlich der räumlichen, spektralen und temporalen Auflösung maßgeblich die Definition potenzieller Zielklassen. Daneben spielen sowohl räumliche Ausdehnung als auch spektrale Trennbarkeit der Untersuchungsobjekte eine zentrale Rolle.

Die verwendeten MODIS Zeitserien haben eine geometrische Auflösung von 250 m. Daher ist zu erwarten, dass in Khorezm große landwirtschaftliche Schläge und homogen genutzte Gebiete von Baumwolle, Reis und Winterweizen, die Fruchtfolgen aus Weizen mit Reis oder anderen

Früchten klassifiziert werden können (Abbildung 5-6, a-c). Allerdings treten weitere Anbaufrüchte wie Mais, Sonnenblumen oder Luzerne in Khorezm seltener und meist auf kleineren Parzellen auf, so dass einzelne Pixel mit einer solchen Abdeckung nicht erfasst werden dürften. In weitaus geringerem Umfang wird anstelle des Winterweizens auch Gerste angebaut, eine Trennung wird jedoch kaum möglich sein.

Die vegetationsarme Wüste und ausgedehnte Wasserflächen (Amu Darya sowie Seen) sind weitere großflächige Einheiten in Khorezm (Abbildung 5-6, d-f). Bereits die großen Kanäle und kleinere Teiche sind durch die 250 m-Auflösung der verwendeten MODIS-Daten nicht mehr als einzelne Pixel zu erfassen, es werden Mischpixel erwartet. Schilfgebiete an Kanälen, Kollektoren und Seen, die RESSL (1999) zur Klassifikation des Amu Darya Deltas berücksichtigt hat, treten in Khorezm nur in unbedeutender Menge auf und wurden daher nicht als Klasse einbezogen.

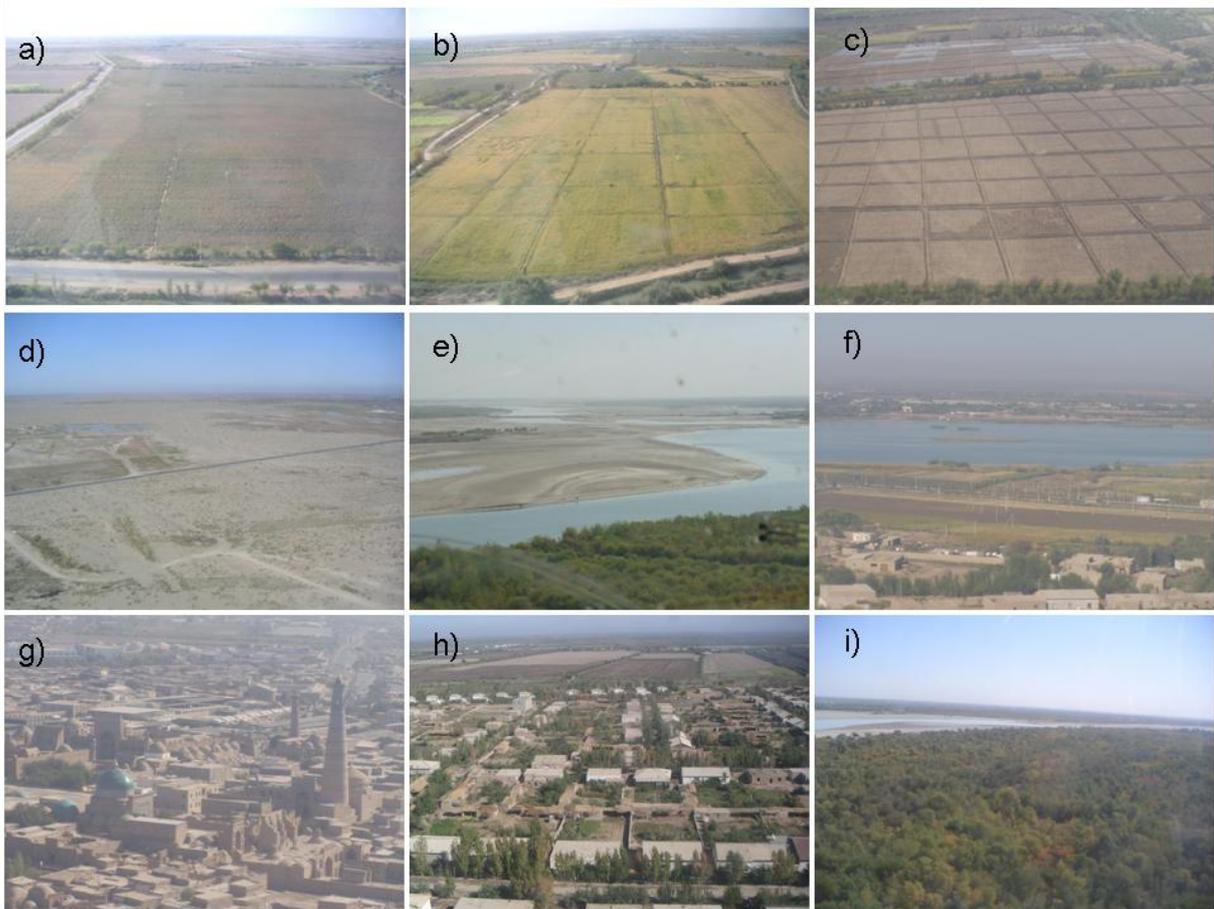


Abbildung 5-6: Luftaufnahmen der häufigen Landnutzungen und Oberflächentypen in Khorezm: a) Baumwolle b) Reis, c) Winterweizen (Feldvorbereitungen), d) Wüste und unbedeckter Boden, e) teilweise wassergefülltes Flussbett, f) See, g) städtische Siedlung (Khiva), h) ländliche Siedlung, i) Tugaiwald. Die Schrägluftaufnahmen entstanden während einer Helikopterbefliegung über Khorezm am 1.10.2004. Durch die teilweise stark beschmutzte Verglasung konnte keine bessere Qualität erreicht werden.

Gärten, Baum- und Waldgebiete sowie städtische und ländlichen Siedlungen weisen im Untersuchungsgebiet eine sehr heterogene Grundstruktur auf (Abbildung 5-6, g-i). Im zentralen Khorezm werden häufig lockere Baumplantagen (der Abstand zwischen den Bäumen beträgt eine Traktorbreite) zur Gewinnung von Brennholz auf Feldern oder in Gärten angelegt. Gärten umfassen neben Zwiebeln, Melonen, Sonnenblumen, Weizen und Mais, Fruchtbäume sowie Weintrauben (Selbstversorgung mit Essig). Jedes Haus im ländlichen Raum ist mit einem kleinen Garten versehen, es finden sich aber auch größere, von mehreren Farmern genutzte Gärten in Siedlungsnähe. Vor allem an ländlichen Straßenzügen oder entlang der Kanäle stehen Baumreihen, die einen Subpixelanteil von wenigen Prozent annehmen können.

Als Zielklassen wurden die landwirtschaftlichen Klassen „Baumwolle“, „Reis“, „Weizen mit folgender Brache“ sowie die Fruchtfolgen „Weizen-Reis“ und „Weizen-Folgenutzung“ unterschieden. „Bäume und Gärten“ wurden als weitere Klasse mit Vegetationsbedeckung in den Klassifikationsschlüssel aufgenommen. Eine Differenzierung nach dem Grad der Oberflächenversiegelung führte zu den Klassen „Ländliche Siedlung“ und „Städtische Siedlung“. Die Klassen „Wasser“ und „Wüste“ repräsentieren die übrigen dominanten nicht-agrarischen Oberflächenbedeckungen. Diese Klasseneinteilung entspricht im weitesten Sinne den zur Klassifikation mit Landsat-Daten von RÜCKER und CONRAD (2003) sowie SCHWEITZER et al. (2004) eingeführten Klassifikationsschlüsseln für Khorezm. Sie wurde bei der Erfassung der Trainingsgebiete und durch umfangreiche Analysen der MODIS-NDVI-Zeitserien ergänzt, was im folgenden Kapitel konkretisiert wird.

5.2.2 Temporale NDVI-Signaturen der Referenzflächen

Die Referenzdaten wurden mittels eines Sets von *in-situ* Daten (140 Gebiete agrarischer Nutzung) aus dem Jahr 2004 und einer visuellen Auswertung von ASTER-Datensätzen abgeleitet⁶⁸. Dazu wurden die ASTER-Daten des VNIR-Bereichs (15m Bodenauflösung) mit dem MODIS-Raster überlagert und nur solche MODIS Rasterpunkte einer Klasse zugeordnet, die visuell eingeschätzt zu mehr als 80 % homogen einer Nutzung zuzuordnen waren (Abbildung 5-7). Gestützt sind diese Annahmen durch Vorarbeiten (CONRAD et al., 2004b; BLENK, 2005), und durch umfassende Geländekenntnis des Bearbeiters.

Auf diese Weise konnten zeitliche Verläufe des NDVI für die einzelnen Klassen aus den MODIS-Daten extrahiert werden, für die analog zur Bezeichnung „Spektrale Signatur“ der Begriff „Temporale Signatur“ eingeführt wird. Weiterhin erfolgte eine stichprobenartige Untersuchung des Klassifikationsgebietes auf die Existenz möglicher nicht im Gelände erfasster Klassen. Dabei wurden häufig auftretende Zeitreihen, die nicht mit Hilfe der Trainings- oder der ASTER Daten erklärt werden konnten, als weitere Klassen zusammengefasst. Abbildung 5-8

⁶⁸ Diese Sammlung von Trainings- und Validierungsdaten aus Fernerkundungsdaten höherer geometrischer Auflösung ist nach RICHARDS und JIA (2006) unter den angegebenen Voraussetzungen durchaus legitim.

zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung, wobei die roten Linien die Mittelwerte einer Klasse an einem Zeitschnitt und die blau gefärbten Umgebungen die einfache Standardabweichung beschreiben, in der statistisch betrachtet 68% der betrachteten Fälle enthalten sind (BAHRENBERG et al., 1999).

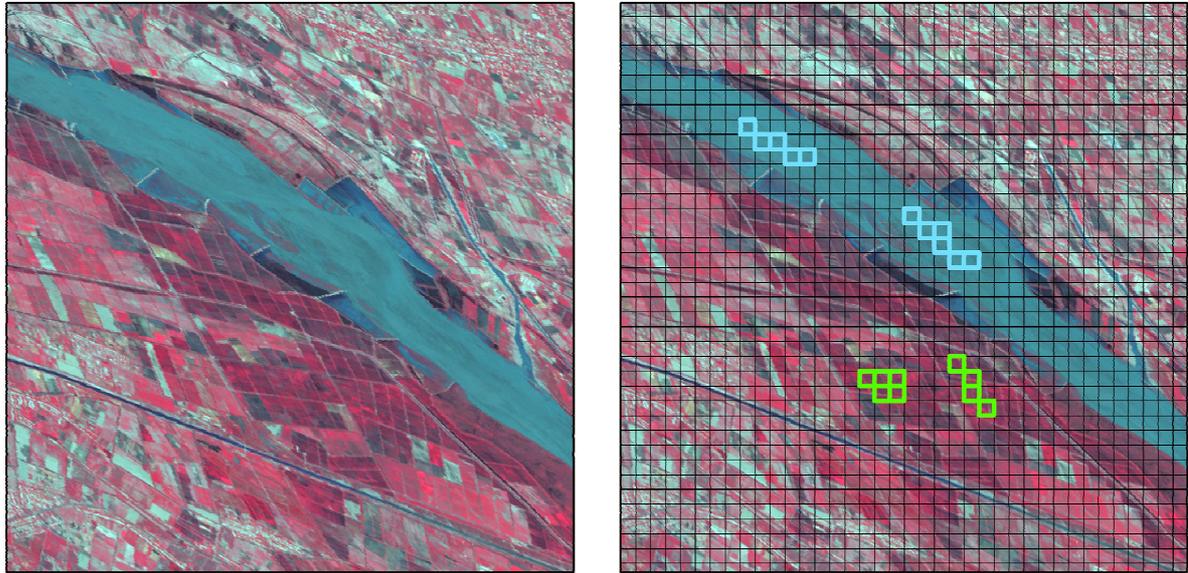


Abbildung 5-7: Vorgehensweise zur Sammlung von Referenzflächen: Überlagerung der ASTER-Daten mit dem MODIS-Raster; grün umrandet sind Trainingsdaten für Reis-Flächen, blau wurden Flusspixel markiert.

Bei den landwirtschaftlichen Klassen (Abbildung 5-8, a-e) erlaubte die zeitliche Auflösung von acht Tagen eine visuelle Trennung Anbaufrüchte Reis und Baumwolle, die beide durch einen unimodalen NDVI-Jahresgang gekennzeichnet sind. Charakteristisches Merkmal zur Trennung dieser beiden Klassen ist das Absinken des NDVI auf den Reisflächen, sobald die Becken zur Aussaat unter Wasser gesetzt werden. Auch der das Wachstum charakterisierende Anstieg verläuft bei Reis im Mittel etwas schneller als bei Baumwolle. In den Wintermonaten liegen diese Flächen meist brach, sofern nicht Winterweizen angebaut wird. Dieser hat sein Maximum im Frühjahr und bewirkt einen unimodalen NDVI-Verlauf, wenn eine Brache folgt und einen bimodalen Verlauf, wenn eine weitere Frucht angebaut wird, die zu einem erneuten An- und Abstieg des Vegetationsindex führt. Diese zweite Frucht kann sowohl Reis als auch eine andere wie Sonnenblume oder Mais sein, wobei deren Trennung im temporalen Verlauf des NDVI nicht mehr möglich war. Unterscheiden lässt sich die Fruchtfolge Weizen-Reis erneut am Besten durch den tiefen Einbruch des NDVI-Signals nach der Weizenernte. Da der Reis auf diese Flächen gepflanzt wird, liegt ein reines Wassersignal seltener vor als ein von Wasser beeinflusstes Vegetationssignal, was aber ebenfalls niedrige NDVI Werte hervorruft. Wie schon bei den Schilfgebieten wurden aufgrund des vernachlässigbaren Anteils oder zu kleiner Parzellengrößen in Khorezm die bei RESSL (1999) mit den 170 m aufgelösten Daten des russischen Resurs-01

MSU-SK erfassten landwirtschaftlichen Klassen Mais, Apfel, Hirse und Luzerne nicht berücksichtigt.

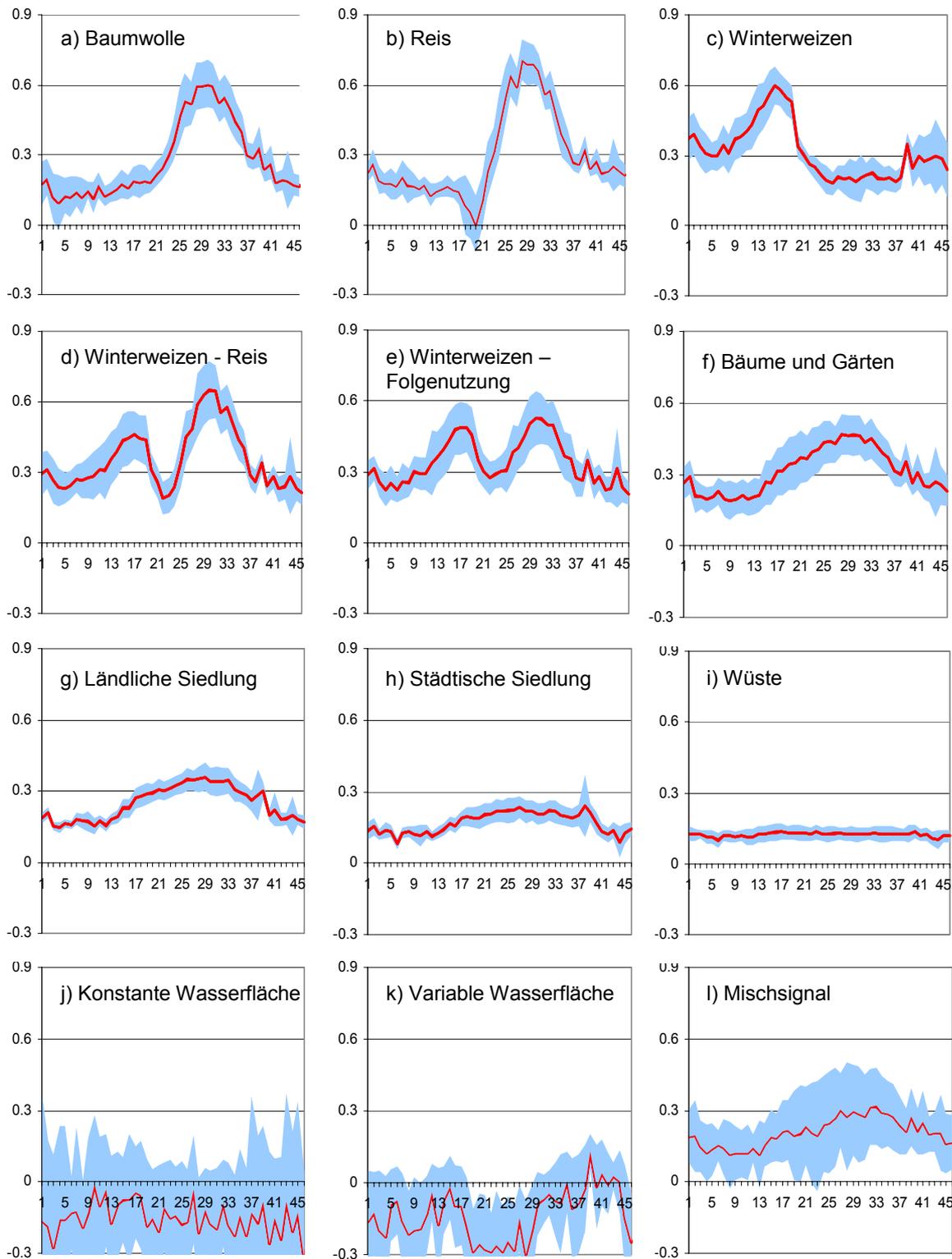


Abbildung 5-8: Temporale NDVI Signaturen der in Khorezm dominierenden Klassen der agrarischen Landnutzung (a-e) und weiterer häufiger Oberflächentypen (f-l).

Wie erwartet ähneln sich die temporalen NDVI-Signaturen für Bäume und Gärten, die auch den Tugai Wald umfassen, sowie für ländliche und städtische Siedlungen (Abbildung 5-8, f-h). Im Falle der Bäume und Gärten werden in den Wintermonaten nur schwache Vegetationssignale empfangen, die aber mit dem Anstieg der Temperaturen ab April und der Zufuhr von Wasser ins Bewässerungssystem zur Entsalzung der Felder schell auf mittlere bis hohe NDVI-Werte um 0,5 ansteigen. Erst zum Jahresende wird durch die Kälte und das Abwerfen der Blätter dieses Niveau wieder verlassen. Genau dasselbe Bild wird in ländlichen Siedlungen erzeugt. Versiegelte Flächen, deren Reflexionsverhalten dem unbedeckten Bodens ähnelt (häufig sind Straßen nicht geteert, Dächer aus Lehm), senken die Absolutwerte. Je nach Anteil versiegelter Fläche nimmt das Vegetationssignal ab, wobei die Übergänge nahezu fließend sind. Für die Siedlungsklassen werden aufgrund der Heterogenität im MODIS-Pixel die meisten Fehlklassifikationen erwartet, weshalb an dieser Stelle die Postklassifikation (Kapitel 5.2.5) einsetzen soll.

Als vegetationslose Flächen wurden die Klassen Wüste und Wasser identifiziert (Abbildung 5-8, i-k), wobei die Wüste durch ein ganzjährig konstantes Bodensignal bestimmt ist. Die NDVI-Werte lagen hier konstant um 0,15. Im Fall von Wasser konnten zwei unterschiedliche Jahresgänge ausgemacht werden, was zu den Klassen „Konstante Wasserfläche“ und „Variable Wasserfläche“ führte. Einerseits liegen in konstant wasserführenden Seegebieten die mittleren NDVI-Werte trotz starker Variation ganzjährig negativ um -0,1. Andererseits unterliegen die NDVI-Daten der am Amu Darya entnommenen Trainingsgebiete starken Variationen durch die unterschiedliche Wasserführung des Stromes. Diese erreichen aufgrund der hohen Wasserführung einen konstant tiefen Gang in den Sommermonaten, um dann gegen Herbst infolge Wassermangels in Richtung des Bodensignals zu steigen. Dies dokumentiert sich durch den Anstieg der NDVI-Mittelwerte zum Teil über die Nullmarke.

Bemerkenswert ist vor allem am Wüstenrand, in Flussnähe sowie an Seeufern das Auftreten von Zeitserien, die extrem im Jahresgang variieren. Teilweise alternieren die NDVI-Werte zwischen zwei Zeitschritten um 0,4 (zwischen 0,0 und 0,5; Abbildung 5-8, l). Diese Mischsignale können aufgrund ihrer räumlichen Verteilung nur als Folgen des in Kapitel 4.2 beschriebenen *bon-tie* Effekts begründet werden. Sie sind keiner eindeutigen Klasse zuzuordnen und werden daher durch die Einführung einer gesonderten Mustersignatur (Klasse „Mischsignal“) abgefangen. Diese Pixel sollen in der Postklassifikation in ihre wahrscheinlichste semantische Bedeutung überführt werden.

Von allen zwölf definierten Oberflächentypen wurden je 30 Stichproben zu Trainings- und Überwachungszwecken anvisiert, was sich teilweise durch eine niedrige Anzahl eindeutiger Flächen nicht realisieren lies (Tabelle 5-1). So wurden für Bäume und Gärten, die Mischpixelklasse und die nicht eindeutig der Fruchtfolge Weizen-Reis zuzuordnende Pixel (Fruchtfolge Weizen-Folgenutzung) sowohl für 2004 als auch für 2005 nur wenige eindeutige

Pixel gefunden. Zur Optimierung des Verfahrens wurde die Anzahl der Trainingsgebiete teilweise etwas reduziert, um die Klassentrennbarkeit zu erhöhen. Die Reduzierung war erforderlich, da die temporalen Signaturen mancher Pixel einen nicht erwarteten Kurvenverlauf aufzeigten. Die Gründe hierfür sind vielschichtig und reichen von geometrischen Verzerrungen bis hin zu Problemen, die durch die Sangeometrie von MODIS im Off-Nadir-Bereich verursacht werden (*bow-tie*-Effekt; vergleiche Kapitel 4.2). Die Pixelgröße nimmt mit zunehmender Entfernung der Nadir-Sicht zu, so dass die Rasterung in das 1 km- oder das 250 m-Raster Einflüsse der Nachbarflächen beinhalten kann und so Verzerrungen im Kurvenverlauf entstehen können. Für das Trainieren des Klassifikationsverfahrens wurden jedoch störungsfreie temporale NDVI-Signaturen bevorzugt.

Tabelle 5-1: Anzahl der erhobenen Trainings- und Validierungsgebiete pro Klasse.

	2004		2005	
	Training	Validierung	Training	Validierung
Baumwolle	21	30	25	30
Reis	30	30	30	30
Weizen-Reis	30	30	30	30
Weizen-Folgenutzung	10	10	14	10
Weizen	28	30	22	30
Ländliche Siedlung	26	30	25	30
Städtische Siedlung	21	30	21	30
Wüste	27	30	27	30
Mischpixel	10	10	9	10
Bäume und Gärten	14	20	20	20
Variable Wasserfläche	23	30	30	30
Konstante Wasserfläche	24	30	20	30
Gesamt	264	310	273	310

5.2.3 Erstellung des Merkmalsraums

Entsprechend des Verfahrensansatzes wurden zur Erstellung des Merkmalsraums Kurvenparameter zur optimierten Charakterisierung der NDVI-Zeitserien berechnet (Kapitel 5.1.1). Um möglichst alle charakterisierende Kurveneigenschaften für eine Klasse zu ermitteln, erschien es sinnvoll, zunächst eine möglichst große Menge an Kurvenparametern der NDVI-Zeitserien auf Basis der Trainingsgebiete zu generieren. Dazu wurde der Eingangsdatensatz zunächst mittels einer Fouriertransformation⁶⁹ geglättet. Weiter wurde jeder Zeitseriensatz an die Position des Kurvenmaximums adjustiert, um potenzielle phänologische Variationen innerhalb einer Klasse abzufangen. Von diesen vier Ausgangskurven wurden die Steigung und das Krümmungsverhalten sowie deren Absolutbeträge abgeleitet. Dann wurden Kurvensegmente gebildet und darauf die Standardstatistiken berechnet (Abbildung 5-9).

⁶⁹ In dieser Arbeit kommt die diskrete Fouriertransformation zum Einsatz, die das Signal in Einzelschwingungen zerlegt. Ein Synonym ist der Begriff „Harmonische Analyse“, der in den signalanalytischen Analysen fernerkundlicher Zeitserien häufig Verwendung findet (beispielsweise bei JAKUBAUSKAS ET AL., 2001, MÜLLER, 2004).

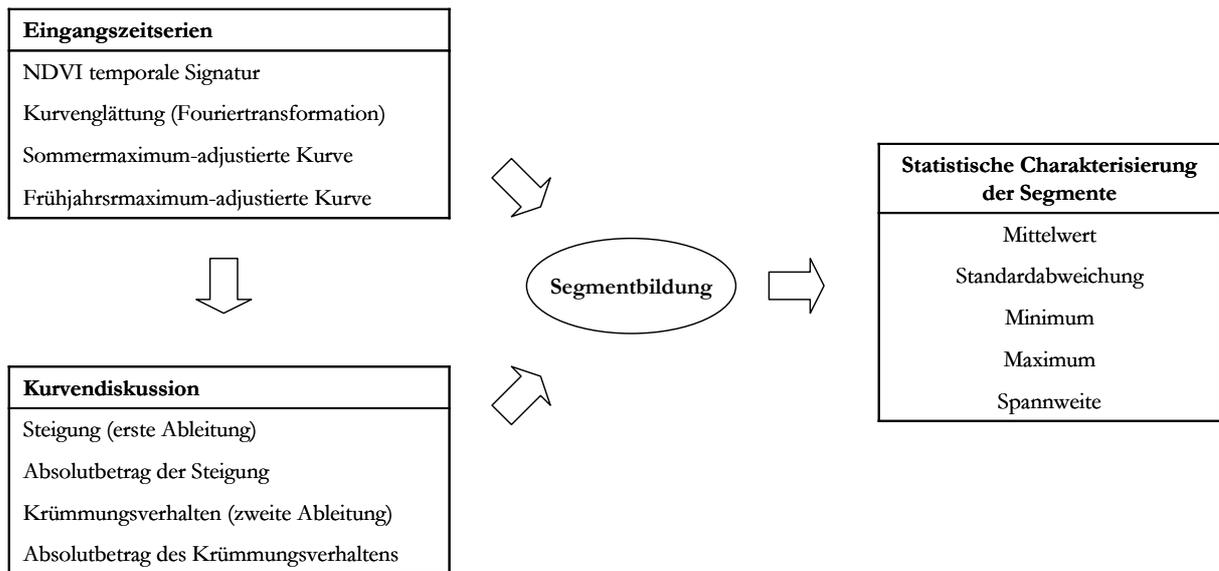


Abbildung 5-9: Übersichtsdarstellung über die Ableitung der Kurvenparameter und die statistischen Parameter aus Segmenten der temporalen NDVI Signaturen.

Kurvenglättung

Zur Kurvenglättung wurde die *Fouriertransformation* (Harmonische Analyse) eingesetzt, deren Grundzüge im Anhang detaillierter beschrieben werden (Anhang AII.1). Sie diente zur Minimierung von Variationen, die beispielsweise durch die Aufnahmegeometrien erzeugt und bei der Erstellung der 8-tägigen MOD09Q1-Produkte nicht korrigiert wurden (Kapitel 4.7). Abbildung 5-10 zeigt dies an exemplarisch ausgewählten Einzelrepräsentanten der gegensätzlichen Klassen Baumwolle und Wüste (in Mittelwertskurven werden diese Zusammenhänge verwischt).

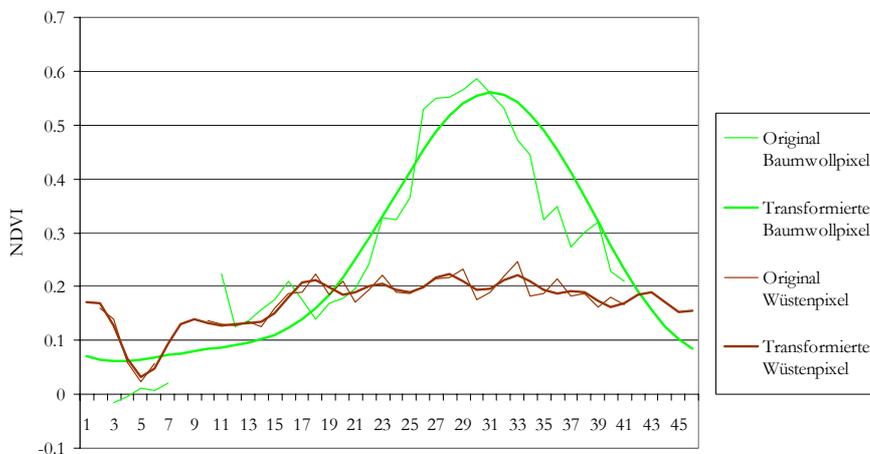


Abbildung 5-10: Gegenüberstellung von Originaldaten und fouriertransformierten Schwingungen mit Tiefpassfilter für einen Beispieldata der Klassen Baumwolle und Wüste.

Die Rücktransformation aus dem Frequenzraum erfolgte, wenn mit der zehnten Schwingung noch kein kummulierter erklärter Varianzanteil von 90 % erreicht war. Betrag der summierte erklärte Varianzanteil bereits bei einer niedrigeren Schwingung 90 %, wurde die Rücktransformation bereits vorher durchgeführt. Dieser Varianzanteil sowie die Anzahl der in die Rücktransformierten eingehenden Schwingungen wurden als Merkmale mitprotokolliert, weil diese sich als klassenspezifisch herausstellten. Zur Erklärung eines Varianzanteils an der Ausgangskurve von über 90 % genühten bei einem Baumwollpixel beispielsweise lediglich die ersten beiden Fourierschwingungen. Für ein „Wüstenpixel“ wurden im Mittel fast immer zehn Fourierschwingungen benötigt und dabei die 90 % kumulierter Varianzanteil zumeist knapp verfehlt. Neben der rücktransformierten Kurve wurden für jede harmonische Schwingung⁷⁰ die Amplitude, die Phase und der erklärende Varianzanteil in den Merkmalsraum aufgenommen.

Maximum-Adjustierung der Kurven

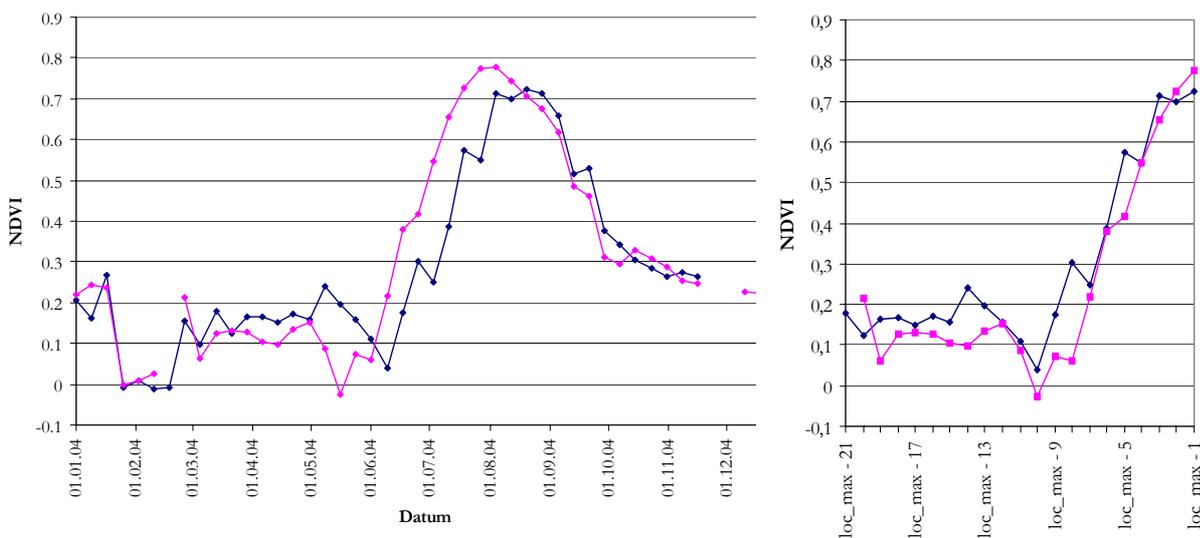


Abbildung 5-11: Adjustierung der Zeitserien auf das Maximum am Beispiel zweier Pixel der Klasse „Reis“ (blaue und rosafarbene Linie). Dabei wird für jede Zeitserie die Lage des Maximums ermittelt (links) und die bis zum Maximum vorwärts abgebildet (rechts). Loc_max bezeichnet die Position im Jahresgang, an der das Maximum der Zeitserie eines Pixels auftritt.

Landwirtschaftliche Vegetationsklassen zeigen im NDVI-Jahresgang einen unimodalen oder einen bimodalen phänologischen Verlauf. Dieser Verlauf kann je nach Saatzeitpunkt auf der zeitlichen Achse variieren, wobei anschließend ein klassentypisches Muster des NDVI zu erwarten ist. Um solchen phänologischen Variationen gerecht zu werden, sollen Verschiebungen der Kurve auf der Zeitachse durchgeführt werden. Es wird angenommen, dass die Position des Maximums der entscheidende Zeitpunkt in der Zeitserie ist, an der diese phänologischen

⁷⁰ Die Nummer der Schwingung beschreibt die Anzahl der Oszillationen im Untersuchungszeitraum.

Verschiebungen erfasst werden können. Daher wurden die Zeitserien aller Pixel von der Position ihres Maximums ausgehend umgebaut, also eine zeitliche Adjustierung an das Kurvenmaximum durchgeführt. Dieser Vorgang wird im Folgenden beschrieben.

Exemplarisch zeigt Abbildung 5-11 zwei Pixel der Klasse Reis, deren Phänologie aufgrund eines unterschiedlichen Anbaubeginns um vier Wochen variiert, was an dem Einbruch des Signals Mitte Mai beziehungsweise Mitte Juni deutlich wird. Ihr Maximum (im weiteren zeitlichen Verlauf) erreicht die blaue Zeitreihe ebenfalls später. Nach der Adjustierung (Abbildung 5-11, rechts) erscheinen die Kurven einander angepasst, die Steigung verläuft nahezu identisch.

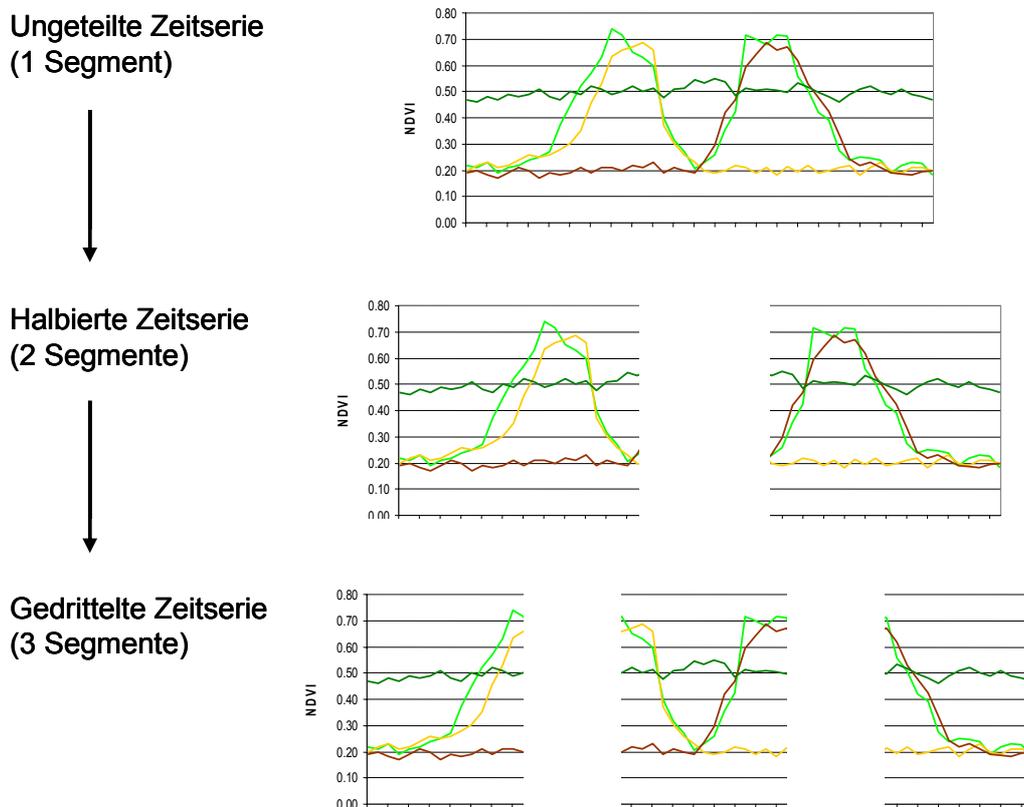


Abbildung 5-12: Schematische Darstellung der Segmentierung der Zeitserien. Die Gesamtreihe (oben) zerlegt in zwei Hälften (Mitte) und in drei Segmente (unten).

Je nach Pixel kann das Maximum nun im Frühjahr (erste Jahreshälfte: Winterweizen) oder im Sommer (zweite Jahreshälfte) auftreten. Daher wurden sowohl die Maxima der ersten Jahreshälfte als auch der zweiten Jahreshälfte gesucht (*loc_max*). Für die erste Jahreshälfte wurden die Zeitschnitte nach *loc_max*, bei der zweiten Jahreshälfte die vorhergehenden Beobachtungen gewählt. Es wurden also insgesamt zwei neue NDVI-Kurven gebildet, *NDVI_fwd* (*fwd* = *forward*, Grundlage: das Maximum der ersten Jahreshälfte) und *NDVI_bwd* (*bwd* = *backward*, Grundlage: das Maximum der zweiten Jahreshälfte). Die jeweilige Auswahl der

Richtung (*forward, backward*) war vorgegeben, da eine Bildung der Zeitserie in die jeweils andere Richtung durch die Datenmenge nicht realisierbar war.

Kurvendiskussion

Eine numerische Differentiation erlaubte die Berechnung von Steigung und Krümmung der Ausgangskurven (STOER, 2004). Wie in Kapitel 5.1.1 skizziert, werden durch die Segmentstatistiken aus diesen Kurvenparametern geeignete Merkmale zur Klassifikation erwartet.

Temporale Segmentierung

Nach der Kurvengenerierung wurden alle Kurven in Segmente zerlegt (Abbildung 5-12), von welchen letztendlich die deskriptiven Statistiken als Merkmale in die Klassifikation eingingen. Durch die Berechnung der deskriptiven Statistiken auf allen Kurvenparametern erreichte der Merkmalsraum eine Größe von 1.572 Variablen (Tabelle 5-2). Es lassen sich eine Reihe von Parallelen in der Bedeutung der Variablen erarbeiten. Beispielsweise kann sich eine stark schwankende Kurve entweder durch einen hohen Mittelwert des Absolutbetrags der zweiten Ableitung (indiziert einen permanenten Wechsel des Krümmungsverhaltens) oder durch einen hohen Varianzanteil einer sehr stark schwingenden Fourierschwingung ausdrücken. Wie in Kapitel 5.1.2 im Detail begründet, wurde die Auswahl geeigneter Merkmale den Verfahren zur Merkmalsreduzierung überlassen.

Die Namensgebung der eingeführten **Merkmalsbezeichner** ist im Folgenden aus mehreren Komponenten zusammengesetzt:

„Ausgangszeitserie_Statistik_Anzahl-der-Segmente_Nummer-des-Segments_Ableitung“

Beispiele:

- 1) „ndvi_stddev_1_1_0“: Original-Zeitserie, Standardabweichung auf dem Gesamtsegment
- 2) „ndvi_ha_max_5_4_2“: Geglättete Kurve, Maximum des vierten Fünftels, zweite Ableitung
- 3) „ndvi_bwd_range_3_1_1“: Sommermaximum-adjustierte Kurve, Spannweite des ersten Drittels, erste Ableitung

Tabelle 5-2: Übersicht über die berechneten Merkmale aus den NDVI Zeitserien.

Eingangszeitserien	Kurvendiskussion und Merkmale aus der Fouriertransformation	Kurvenabschnitte	Statistiken	Anzahl Merkmale
NDVI	NDVI	15	5	75
	NDVI'	15	5	75
	abs(NDVI)	15	5	75
	NDVI''	15	5	75
	abs(NDVI'')	15	5	75
	Location of Maximum	-	-	1
Harmonische Analyse (NDVI_{ha})	NDVI _{ha}	15	5	75
	NDVI _{ha} '	15	5	75
	abs(NDVI _{ha})	15	5	75
	NDVI _{ha} ''	15	5	75
	abs(NDVI _{ha} '')	15	5	75
	Amplitude	-	-	23
	Phase	-	-	23
	Varianz	-	-	23
	Erklärter Varianzanteil	-	-	1
	Anzahl der rücktransformierten Schwingungen	-	-	1
Sommermaximum adjustierte Kurve (NDVI_{bwd})	NDVI _{bwd}	15	5	75
	NDVI _{bwd} '	15	5	75
	abs(NDVI _{bwd})	15	5	75
	NDVI _{bwd} ''	15	5	75
	abs(NDVI _{bwd} '')	15	5	75
Wintermaximum adjustierte Kurve (NDVI_{fwd})	NDVI _{fwd}	15	5	75
	NDVI _{fwd} '	15	5	75
	abs(NDVI _{fwd})	15	5	75
	NDVI _{fwd} ''	15	5	75
	abs(NDVI _{fwd} '')	15	5	75
Gesamt				1572

5.2.4 Merkmalsauswahl und Klassifikation

Zur Rückführung des Merkmalsraums auf eine überschaubare und prozessierbare Anzahl an Variablen und zur anschließenden Klassifikation wurden mehrere Verfahren eingesetzt, angepasst und kombiniert. Dabei wurden folgende in Kapitel 5.1. aufgeführte Prämissen berücksichtigt:

- 1) Semantisch begründete Merkmalsauswahl hinsichtlich des Klassifikationsverfahrens und interpretierbarer Ergebnisse
- 2) Sicherstellung hoher Klassifikationsgenauigkeit und Übertragbarkeit;

Ad 1)

Eine semantisch begründete Merkmalsauswahl kann durch Vorüberlegungen erfolgen, welche zu Schwellenwerten führen, die dann erlauben, für den Benutzer nachvollziehbar Klassen oder Klassengruppen voneinander abzuspalten⁷¹. Zur Klassifikation wurden daher in diesem Ansatz Entscheidungsbäume ausgewählt, die durch einen *Recursive Partitioning And Regression Trees (RPART)*-Algorithmus generiert werden, dessen theoretische Grundlagen in Kapitel 3.1.2 bereits beschrieben wurden. Dieser Algorithmus ist in der Lage, aus einem großen Merkmalsraum eine Teilmenge geeigneter Merkmale auszuwählen, also den Merkmalsraum zu reduzieren. Es ist aber nicht zu erwarten, dass die Menge der generierten Merkmale die Klassifikationsgenauigkeit beeinflusst. Der Ergebnisbaum wird lediglich verändert.

Es wird allerdings erwartet, dass durch eine geeignete Vorauswahl an Merkmalen, Klassifikationsbäume mit einer hohen Klassifikationsgenauigkeit abgeleitet werden können. Die Vorauswahl sollte dazu auf folgende Eigenschaften des Klassifikationsalgorithmus zugeschnitten sein (Kapitel 3.1.2):

- Knoten von Klassifikationsbäume klassifizieren jeweils ein Merkmal mittels eines Schwellenwertes;
- Diese Trennung kann also nur durch orthogonale Trennlinien erfolgen; eine diagonale Trennlinie durch mehrere Merkmale ist nicht möglich (Treppenfunktion: Abbildung 3-3, Kapitel 3.1.2).

Die eingesetzten Verfahren zur Merkmalsauswahl sollten genau an diesen Eigenschaften der Klassifikationsbäume ansetzen. In dieser Arbeit wurden der *density slice*, die Korrelationsmatrix und die Diskriminanzanalyse als geeignete Verfahren zur Merkmalsreduktion für den späteren Einsatz des Klassifikationsalgorithmus ausgewählt.

Ad 2)

Würde man lediglich ein einzelnes Entscheidungsbaumverfahren durchführen, bekäme man als Ergebnis eine einzelne Klassenzugehörigkeit für jedes Pixel. Es stellte sich nun die Frage, ob damit alle Klassen korrekt erfasst werden und ob eine Stabilität hinsichtlich der mehrfachen Anwendung für verschiedene Jahre erreicht werden kann. Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurde folgende Annahme aufgestellt: Wendet man die Klassifikationsbäume auf unterschiedliche, sinnvoll begründete Merkmalssets des gesamten Merkmalsraums an und gewichtet die verschiedenen Ergebnisse, kann durch die Verknüpfung der Resultate insgesamt die Stabilität der Klassifikation erhöht werden. Zudem kann eine Aussage über die Stabilität und Robustheit des Verfahrens getroffen werden.

Es wurde erwartet, durch die Mehrfachklassifikation und die Summation der prognostizierten Klassenzugehörigkeiten für die verschiedenen Bäume für jedes Pixel eine „wahrscheinlichste“

⁷¹ Dieser Gedanke spielt beispielsweise bei Vorklassifikationen spektraler Datensätze in die relativ einfach unterscheidbaren Klassen Vegetation, Nicht-Vegetation und Wasser eine wichtige Rolle.

Klassenzugehörigkeit zu erhalten. Damit kann dann auch eine unscharfe Komponente (im Sinne der Fuzzy-Logik) eingeführt werden, die eine Postklassifikation ermöglicht.

Die Frage, wie eine Vorauswahl von Merkmalen für die mehrmalige Anwendung des RPART-Algorithmus aussehen könnte, wurde mit einem komplexen zweistufigen Verfahren beantwortet, das nachfolgend vorgestellt werden soll. In der ersten Stufe werden geeignete Methoden zur Vorselektierung von Merkmalen angewendet, die möglichst auf die Anwendung von Klassifikationsbäumen optimiert wurden. Die zweite Stufe der Merkmalsauswahl erfolgt dann durch die Anwendung der Klassifikationsbäume (Ergebnis der Klassifikation der Trainingsdaten) auf diese Merkmalsräume.

Auf den ersten Blick entsteht ein komplexes Verfahren. In Abbildung 5-13 ist die Aufeinanderfolge der zur Klassifikation verwendeten Verfahren und der daraus entstehenden Teilräume beschrieben und durchnummeriert. Die Abkürzung „M“ ist der Bezeichner für „Merkmalsraum“, die folgende Nummer gibt das Verfahren an, mit dem ein Teilraum oder eine Gruppe von Teilräumen gebildet wurde. Vom Merkmalsraum M1, der alle 1.572 Variablen enthielt, wurden zunächst acht weitere Teilräume (M2_A-D, M3, M4_A-C) generiert (insgesamt neun Räume). Vier davon (M2_A-D) wurden mittels eines aus der *Maximum-Likelihood*-Analyse abgeleiteten *density slice* erzeugt, die Auswertung der Korrelationsmatrix führte ebenfalls zu einer Teilmenge (M3) des Gesamtraums M1. Drei weitere Teilräume (M4_A-C) sind das Ergebnis einer auf je zwei Klassen und je zwei Merkmale angewendeten Diskriminanzanalyse. Insgesamt existieren am Ende der ersten Stufe neun Merkmalsräume (Stufe 1, Abbildung 5-13).

In einer zweiten Stufe der Merkmalsreduktion wurden aus allen diesen Teilräumen durch die Anwendung des RPART-Algorithmus klassifizierende Merkmalsets herausgefiltert (zusammengefasst werden diese als Merkmalsraum M5 bezeichnet). Diese neun Entscheidungsbäume fungierten dann jeder als Klassifikationsverfahren für je ein überschaubares Set an Merkmalen. Dementsprechend wurden neun Gewichtungsfaktoren bestimmt, um aus diesen Klassifikationsergebnissen eine Zuordnung jedes Pixels zu einer Klasse zu erreichen und eine unscharfe Komponente zur Klassifikation einzuführen (Kapitel 5.2.4.2).

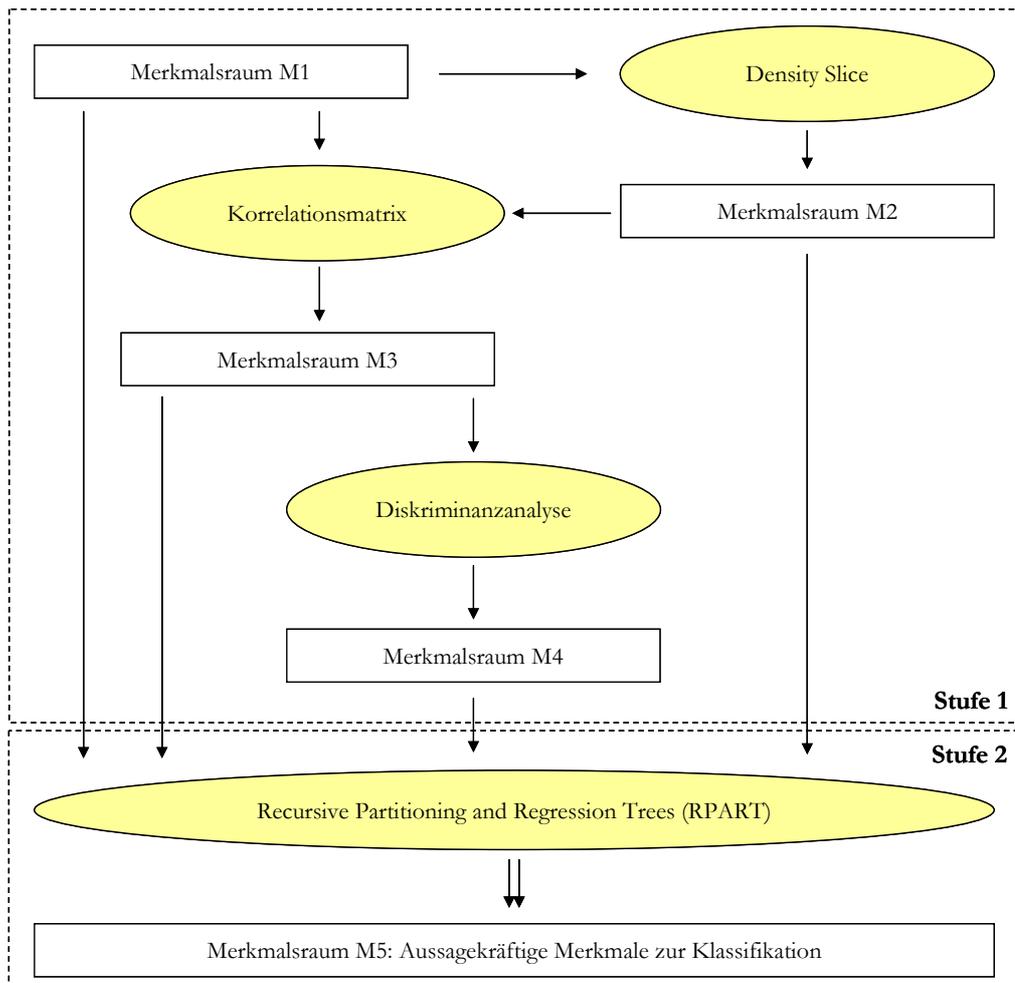


Abbildung 5-13: Hintereinanderschaltung von Verfahren zur Extraktion klassifizierender Merkmale aus dem gesamten Merkmalsraum M1. Einzelne Bewertungsverfahren (gelbe Ellipsen, Stufe 1) liefern Teilräume (M2 – M4). Die für die Klassifikation relevanten Merkmale enthält Merkmalsraum M5, der mittels des RPART-Algorithmus ermittelt wird (Stufe 2). Merkmalsraum M2 wird partiell zu Eliminierungsentscheidungen einzelner Merkmale bei der Analyse der Korrelationsmatrix (ergibt M3) hinzugezogen:

M1: Gesamttraum

M2: Teilraum (Merkmale, die beim *density slice* für einzelne oder mehrere Klassen hohe Klassifikationsgenauigkeiten erzielen, vier Unterräume)

M3: Teilraum (unkorrelierte Merkmale)

M4: Teilraum (Merkmalspaare, die über die Anwendung einer Diskriminanzfunktion für einzelne oder mehrere Klassen eine hohe Klassifikationsgenauigkeit erzielen, drei Unterräume)

M5: Ergebnis (Reduzierter Merkmalsraum für die Klassifikation, aus neun Klassifikationsbäumen)

In dem folgenden Abschnitt wird die in Abbildung 5-13 skizzierte Aufeinanderfolge der Verfahren zur Bildung der Teilmerkmalsräume detailliert erläutert und Gewichtungsfaktoren zur Bildung der unscharfen Komponente eingeführt. Abschließend wird die mögliche Steigerung der Genauigkeit dieses Ansatzes mittels der Anwendung des Verfahrens auf die Trainingsgebiete analysiert und bewertet.

5.2.4.1 Die Bildung der Merkmalsräume

Dieser Ansatz ist durch den Einsatz beliebiger merkmalsreduzierender Methoden erweiterbar. Das Ergebnis dieser Methoden muss lediglich mindestens ein Teilraum aus allen Merkmalen sein, der für den Einsatz der Klassifikationsbäume geeignet erscheint (wie oben beschrieben).

Der Merkmalsraum M2

Die Generierung des Merkmalsraums M2 (Subräume M2_A bis M2_D) umfasste zwei Schritte (Abbildung 5-14): Zunächst wurde für jedes Merkmal aus M1 ein sogenannter *density slice* durchgeführt. Dann wurden optimale Ergebnisse hinsichtlich einzelner oder mehrerer Klassen extrahiert und zu den Teilräumen zusammengefasst.

Wissensgestützte Entscheidungsbäume klassifizieren über die Abgrenzung einer Klasse von allen anderen durch einen Schwellenwert für ein bestimmtes Merkmal (siehe beispielsweise SCHWEITZER et al., 2004). Dabei wird vom Bearbeiter jedes Merkmal auf seine Trennbarkeit für jede einzelne Klasse (Zielklasse) untersucht. Dies sollte hier durch den Computer durchgeführt werden⁷². Pro Merkmal wurden die Klassen nach ihren statistischen Gruppenmittelwerten (der Trainingsgebiete) geordnet. Die Klassen, deren Mittelwerte unterhalb oder oberhalb der Zielklasse lagen, wurden zu je einer neuen Klasse zusammengefasst. Es wurden also im Normalfall drei, im günstigeren Fall zwei Klassen gebildet. Zum *density slice* wurden die Klassenstatistiken (Mittelwert μ und Varianz var) berechnet und in folgende Distanzgleichung eingesetzt (WALZ et al., accepted):

$$dist_k = \ln(var_k) + var_k^{-1}(x - \mu_k)^2$$

Die Gleichung berechnet die Distanz (*dist*) für jedes Pixel (x) zu jeder Klasse k . Diese Gleichung ist aus der *Maximum-Likelihood* Klassifikationsmethode abgeleitet, indem die *a priori* Wahrscheinlichkeiten für jede Klasse auf den Wert Eins gesetzt sind⁷³.

Um die Herangehensweise zur Bewertung der Ergebnisse des *density slice* zu verdeutlichen, sind in Tabelle 5-3 exemplarisch die Bewertung von zwölf Klasse/Merkmal – Paaren und die Gesamtbewertung für zwei Merkmale aufgelistet. Die Bewertung erfolgte mittels der Kappa-Koeffizienten (RICHARDS und JIA, 2006). Die als Merkmal gespeicherte Lage des Maxima (*ndvi_loc_max*) konnte nur für die Klasse Weizen eine Klassifikationsgenauigkeit (auf den

⁷² Annahme war, dass Merkmale, die einzelne Klassen gegenüber allen anderen abgrenzen konnten, günstig für die spätere Klassifikation mittels des RPART-Algorithmus waren. In diesem Algorithmus erfolgt nämlich wie beim *density slice* die Klassentrennung ebenfalls über Schwellenwerte, die auf Einzelmerkmale angewendet werden. Hypothetisch könnte damit eine Baumstruktur erreicht werden, die jeweils eine Klasse von allen anderen abtrennt. Allerdings konnte diese mit dem angewendeten Algorithmus nicht erreicht werden.

⁷³ Durch Einsetzen lediglich eines zu klassifizierenden Merkmals wird die Varianz-Kovarianz-Matrix des *Maximum-Likelihood* Verfahrens lediglich durch die Varianz ausgedrückt. Die Determinante einer eindimensionalen Matrix ist der Zahlenwert der Matrix selbst (vergleiche JENSEN, 2000).

Trainingsgebieten) größer als Null erreichen⁷⁴. Der niedrige Kappa-Koeffizient von 0,2821 dokumentiert allerdings, dass häufig Fehlklassifikationen auftreten und dass dieses Merkmal eigentlich zur Klassifikation ungeeignet ist. Für alle anderen Klassen wirkte dieses Merkmal überhaupt nicht trennend. Entsprechend wurde das Merkmal durch die Summe der Kappa-Koeffizienten als wenig aussagekräftig eingestuft, im Gegensatz zu *ndvi_bwd_stddev_1_1_0*.

Tabelle 5-3: Beispiel für die klassen- und merkmalsbezogene Evaluierung des *density slice* für zwei Merkmale mittels der Kappa-Koeffizienten. Zunächst werden die Einzelergebnisse für die Klasse/Merkmal – Paare aufgelistet, dann durch die Summe eine Gesamtbewertung des Merkmals ermöglicht.

Klasse \ Merkmal	Kappa-Koeffizienten	
	<i>ndvi_loc_max*</i>	<i>ndvi_bwd_stddev_1_1_0**</i>
Baumwolle	0	0
Reis	0	0,64866
Weizen-Reis	0	0
Weizen-Folgenutzung	0	0
Weizen	0,2821	0
Ländliche Siedlung	0	0,7140
Städtische Siedlung	0	0,6581
Wüste	0	0,9220
Mischsignal	0	0
Bäume und Gärten	0	0
Variable Wasserfläche	0	0
Konstante Wasserfläche	0	0
Summe der Kappa-Koeffizienten	0,2821	2,9427

* Lage des Maximums

** Streuverhalten der Sommermaximum-adjustierten Gesamtkurve

Die an das Sommermaximum adjustierte Kurve kann in der Gesamtsumme der Kappa-Koeffizienten das Zehnfache verbuchen (Tabelle 5-3). Insbesondere zeigt sich das Potenzial dieses Merkmals zur Trennung der Wüste. Aber auch ein Großteil von Pixeln der beiden Siedlungs- und der Reisklasse sind mit diesem Merkmal gut zu unterscheiden.

Diese Evaluierung mittels des *density slice* wurde für alle 1.572 Variablen durchgeführt (Abbildung 5-14). Anschließend wurden die Merkmale nach ihrer Aussagekraft (Summe der Kappa-Koeffizienten) sortiert und vier Unterräume gebildet, die zusammen Merkmalsraum M2 darstellen. Der erste der vier Unterräume enthielt die 24 Merkmale⁷⁵, deren klassenweise addierte Kappa-Koeffizienten die höchsten Summen ergaben (*M2_4*). Es wurde angenommen, dass ein Merkmal mit höherer Summe besser für eine Klassifikation geeignet ist. Es wurde hierbei nicht

⁷⁴ Die Klasse Weizen ist die einzige Klasse, für die das Kurvenmaximum des NDVI-Jahresgangs im Frühjahr erwartet werden konnte.

⁷⁵ Die Auswahl basierte auf der Annahme, dass unter den am höchsten gewerteten 24 Merkmalen (zweimal die Klassenanzahl) jede Klasse mindestens einmal günstig vertreten ist.

darauf geachtet, welche Klassen günstig klassifiziert werden konnten. Dann wurde für jede Klasse das am Besten trennende Merkmal, also das Maximum der Kappa-Koeffizienten gesucht und in einen weiteren Unterraum ($M2_B$) eingeordnet. Dieser bestand aus zwölf Merkmalen. Im Falle gleicher Bewertungen für zwei Merkmale wurde das Merkmal mit dem höheren summierten Kappa-Koeffizienten gewählt. Im Gegensatz dazu wurden in $M2_C$ nur die Merkmale gespeichert, die für eine einzelne Klasse die besten Ergebnisse auf den Trainingsgebieten simulierten. Im letzten Unterraum aus $M2$ ($M2_D$) wurden die Merkmalsmengen $M2_B$ und $M2_C$ vereinigt. Er umfasst also 24 Merkmale.

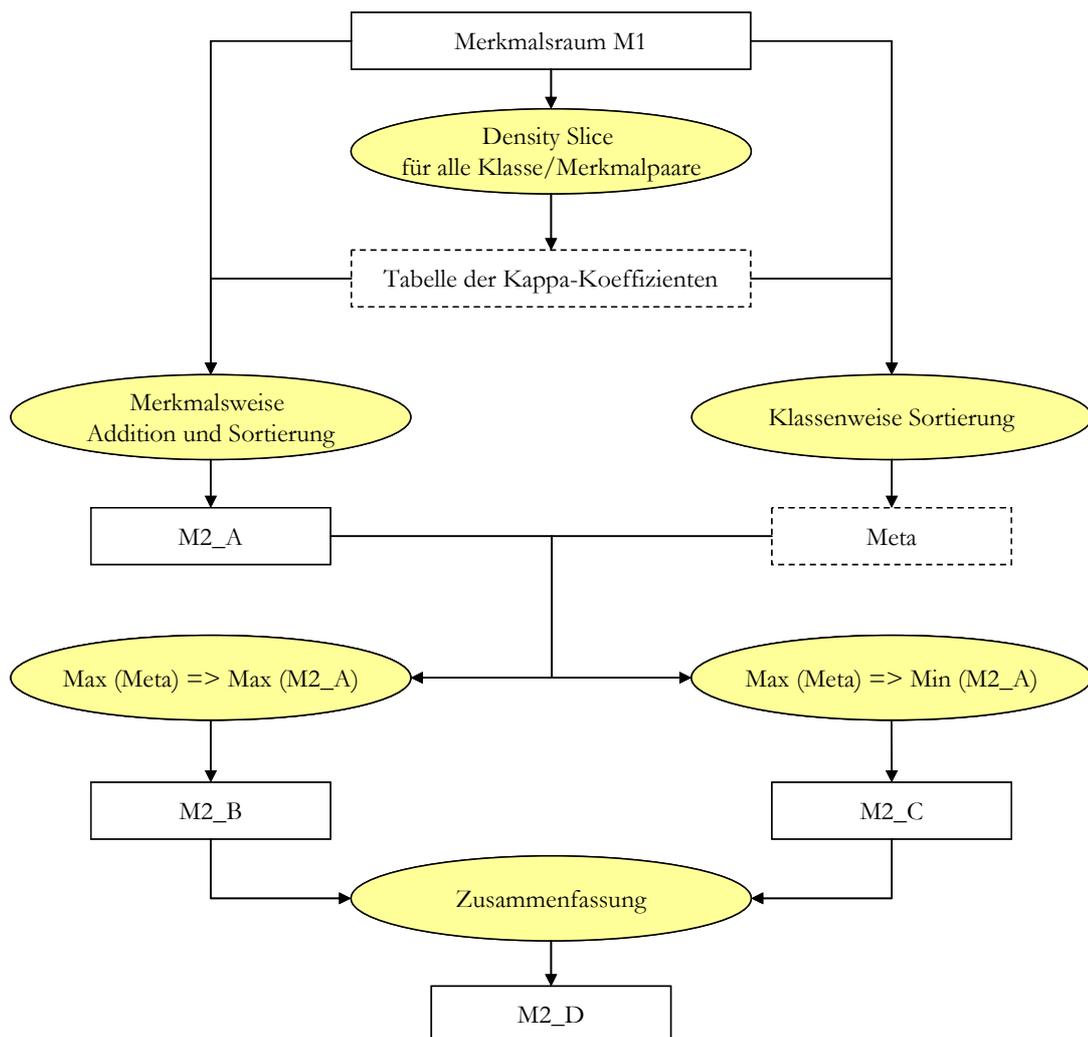


Abbildung 5-14: Flussdiagramm zur Bildung der Merkmalsteilräume $M2_A$ bis $M2_D$ aus dem Gesamtmerkmalsraum $M1$. $Meta$ ist eine Tabelle, in der für jede Klasse ein Ranking der Merkmale anhand der Kappa-Koeffizienten durchgeführt wurde.

Der Merkmalsraum $M3$

Die Erfassung und Eliminierung potenzieller Kollinearitäten je zweier Variablen aus $M1$ vor der Anwendung der Diskriminanzanalyse war das Ziel der Generierung von Merkmalsraum $M3$. In Merkmalsraum $M1$, der 1.572 Merkmale aus einer Zeitserie mit lediglich 46 Messwerten enthält,

waren sehr verwandte Variablen zu erwarten: beispielsweise waren Minima des ersten Drittels, Viertels und Fünftels der NDVI-Zeitreihe häufig in fast allen Fällen gleich und erreichten ein Korrelationskoeffizienten nahe bei einem Wert von eins. Es wurde daher eine 1.572^2 Komponenten umfassende Korrelationsmatrix errechnet, um in Fällen mit einer Korrelation von über 0,8 eine Variable auszuschließen. Beim Vergleich zweier Variablen wurde zunächst das Merkmal erhalten, das im Unterraum M2_A auftrat. Bei zwei Variablen aus M2_A wurde die höher eingestufte Variable beibehalten. War ein Merkmal in M2_B enthalten, wurde es generell gegenüber der korrelierten Variable bevorzugt. Auf diese Weise wurden die Ergebnisse des *density slice* in die Auswertung der Korrelationsmatrix einbezogen (Abbildung 5-15). Es blieben 241 (2004) und 245 (2005) Merkmale übrig.

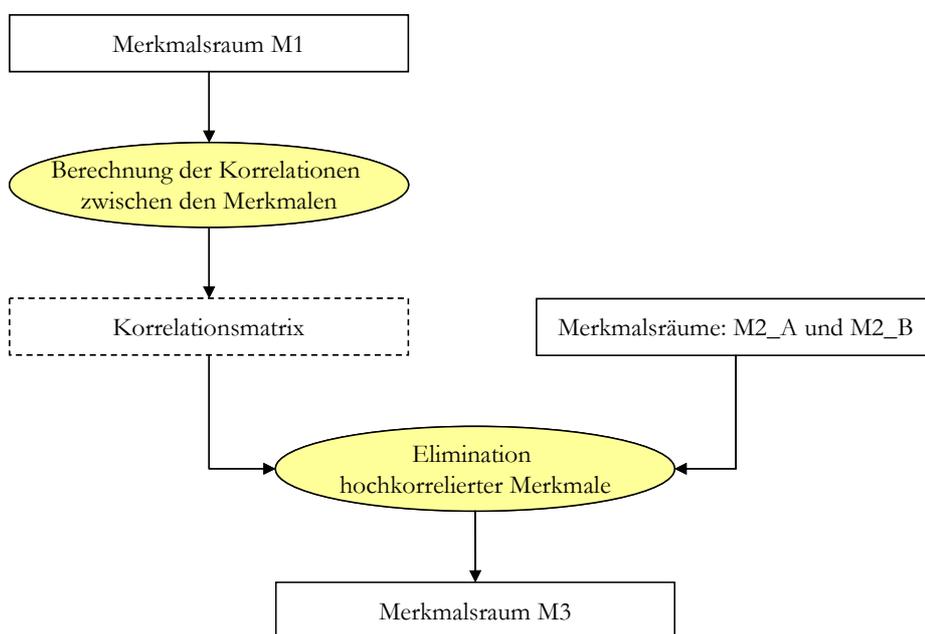


Abbildung 5-15: Flussdiagramm zur Bildung des Merkmalsteilraums M3 aus dem Gesamtmerkmalsraum M1 mit Unterstützung der Unterräume M2_A und M2_B.

Merkmalsraum M4

Eine Diskriminanzanalyse mit allen paarweise unkorrelierten Variablen wurde bereits bei Tests als nicht hinreichend verworfen. Es wurde aber für den Fall mit zwei Klassen und zwei Variablen die Filterung weiterer aussagekräftiger Variablen erwartet. Dieser Fall erlaubt es, diagonal verlaufende Trennfunktionen zwischen zwei Klassen für zwei Merkmale abzuleiten (vergleiche hierzu auch Anhang AII.2). Die Hypothese war, durch die Hinzunahme dieser Diagonalen, die mittels der Diskriminanzfunktion berechnet werden kann, die Schwäche des RPART-Algorithmus auszugleichen, nur achsenparallele Trennlinien einzuführen (vergleiche hierzu auch Kapitel 3.1.2, Abbildung 3-3). Jede Klasse wurde separiert und die Diskriminanzanalyse für alle Merkmalspaare (2004 = 241^2 , 2005 = 245^2 Kombinationen) angewendet. Auf die Bewertung der Diskriminanzanalyse über Wilk's Lambda (BAHRENBURG et al., 2003) wurde zugunsten des Tests

der Diskriminanzfunktion auf den Trainingsgebieten und der Auswertung mittels des Kappa-Koeffizienten verzichtet.

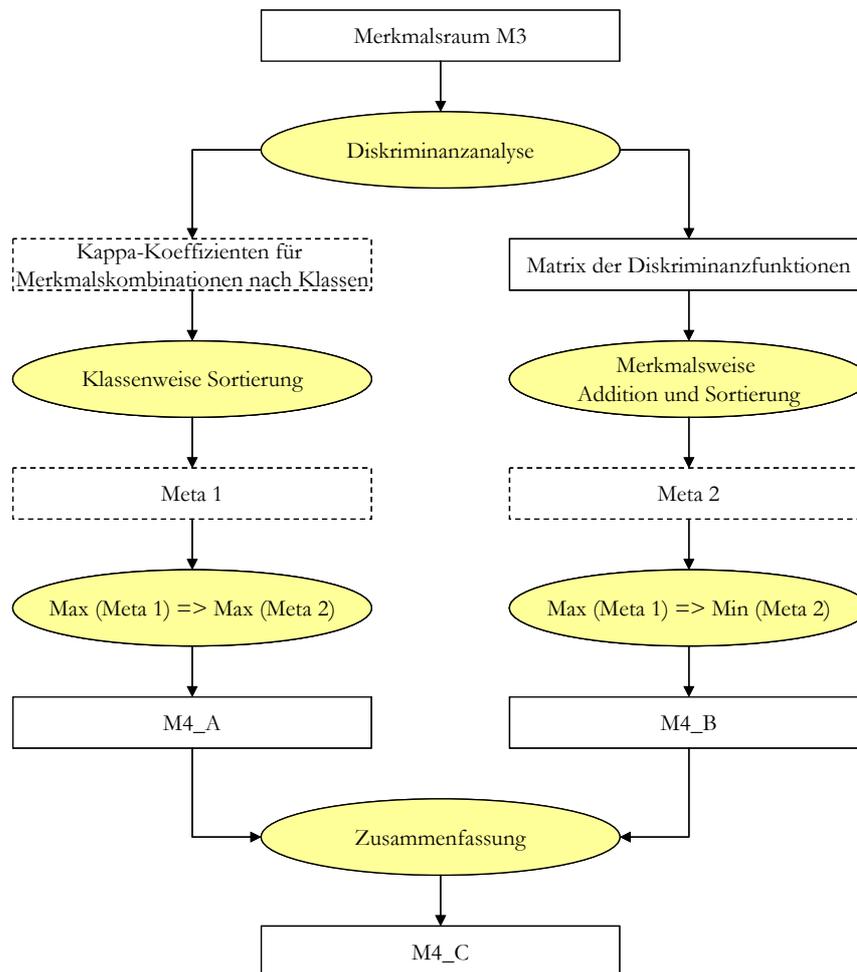


Abbildung 5-16: Flussdiagramm zur Bildung des Merkmalsteilraums M4 aus dem Untermerkmalsraum M3 mit Unterstützung der Unterräume M2_A und M2_B.

Wie bereits beim *density slice* wurden auch zur Generierung des Merkmalsraum M4 Matrizen erstellt, die für jedes Merkmalspaar und jede Klasse den Kappa-Koeffizienten enthielten (Abbildung 5-16). Daraus resultierten Merkmalspaare, für die eine bestimmte Klasse die höchste Bewertung erzielen und die für die übrigen Klassen ebenfalls einen günstigen Klassifikator darstellen konnten (vergleiche die Rechenregeln in Abbildung 5-16). Diese wurden in Merkmalset M4_A zusammengefasst. Unterraum M4_B wurden analog Merkmale zugeordnet, welche lediglich eine Klasse optimal trennen, also keinerlei oder nur geringe Trennmöglichkeiten für andere Klassen aufwiesen. M4_C ist die Summe aus M4_A und M4_B. Wichtig hierbei ist, dass neben den Merkmalspaaren noch die Diskriminanzfunktionen gespeichert wurden, also die Rechenregeln für die Überführung des zweidimensionalen Raums auf die Diskriminanzachse (in den eindimensionalen Raum). Das bedeutet, dass für die später angewendeten

Klassifikationsbäume zwei Variablen, die durch eine Diagonale mittels der Diskriminanzanalyse eine Klassentrennung erlauben, in eine Zielvariable umgewandelt werden.

Der Merkmalsraum M5

Stufe 2 (Abbildung 5-13) diente zur weiteren Reduzierung aller Teilräume aus Stufe 1 und zur Ableitung von Gewichten zur Einführung der unscharfen Komponente, die eine Art „Wahrscheinlichkeit“ für die Zuordnung eines jedes Pixels zu jeder Klasse ermitteln lassen sollte. Die Teilraumreduzierung von M2_A bis M2_D, M3 und M4_A bis M4_C auf den Merkmalsraum M5 erfolgte jeweils mittels RPART. Als *a-priori* Wahrscheinlichkeit für eine Klasse wurde das Verhältnis der Trainingsgebiete zur Gesamtmenge der Trainingsdaten verwendet. Der *Gini-Index* fungierte als Impurity-Funktion zur Bewertung eines Baumknotens. Ein weiteres Abbruchkriterium für die Splits war die minimale Knotengröße von fünf Elementen. Ein *Pruning* wurde nicht durchgeführt. Diese Grundeinstellungen waren für alle Anwendungen des RPART-Algorithmus gleich.

Die Merkmalsreduktion wurde komplett mit dem Open Source Softwarepaket R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2005) durchgeführt. Die Funktion RPART wurde von RIPLEY (1996) nach BREIMAN et al. (1984) in R implementiert.

5.2.4.2 Einführung von Gewichtungsfaktoren und Beschreibung des Gesamtverfahrens

Aus den neun Unterräumen wurden neun Klassifikationsbäume B im speziellen Anwendungsfall (Khorezm) definiert. Für jeden der Bäume wurden die Trainingsgebiete getestet, die Konfusionsmatrix erstellt (RICHARDS und JIA, 2006) und daraus der Kappa-Koeffizient berechnet. Dieser soll nun als Gewichtungsfaktor für die Klassifikation eingeführt werden, in der jedes Pixel alle neun Klassifikationsbäume durchlaufen soll. Dabei fungiert ein Klassifikationsbaum B_i ($i = 1..9$) gleichsam als Funktion, der jedem Pixel x eine Klasse k zuweist:

$$B_i(x) = k$$

mit:

$$i = 1..I \text{ (I = Anzahl der Klassifikationsbäume) und}$$

$$k \in \{1..K\} \text{ (K = maximale Klassenzahl)}$$

Dann ergibt sich für jedes Pixel x die Zugehörigkeit zu einer Klasse – für jeden Klassifikationsbaum. Diese Zugehörigkeit kann auch für jedes Pixel durch eine zweidimensionale Matrix mit den Einträgen f_{ik} ausgedrückt werden. Dann gilt:

$$f_{ik}(x) = 0, \text{ für } B_i(x) \neq k \text{ und}$$

$$f_{ik}(x) = 1, \text{ für } B_i(x) = k$$

Multipliziert man die Klassenzugehörigkeit mit dem Kappa-Koeffizienten ergibt sich für jedes Pixel eine Art „Wahrscheinlichkeit“ der Zugehörigkeit zu einer bestimmten Klasse k durch die

Klassifikation mit einem Klassifikationsbaum (B_j). Durch die Aufsummierung dieses Produkts für jeden Klassifikationsbaum kann für das Gesamtverfahren ein Zugehörigkeitswert zu einer Klasse (S_k) berechnet werden:

$$S_k = \sum_{i=1}^I f_{ik} * Kappa_{B_i} \quad (I = \text{Anzahl der Klassifikationsbäume})$$

Die letztendliche Zuordnung erfolgt durch die Wahl der Klasse mit dem höchsten aufsummierten Wert.

Weiterhin werden die Summen S_k zum Aufbau der unscharfen Komponente (Fuzzy-Logik) genutzt. Hier geht es darum, Wahrscheinlichkeiten der Zugehörigkeit eines Pixels zu jeder Klasse zu sortieren. Ist trotz Klassifikationsergebnis die Klasse k mit der höchsten Summe S_k unwahrscheinlich, muss eine andere Zuordnung erfolgen. Die zweite potenzielle Klasse ist dann im zweithöchsten Wert, die dritte im dritthöchsten Wert abgespeichert, und so weiter.

5.2.4.3 Präevaluierung der Klassifikation auf den Trainingsdaten

Tabelle 5-4: Ergebnis einer Präevaluierung der Einzelverfahren und des gesamten Klassifikationsverfahrens am Beispiel der Trainingsgebiete für das Untersuchungsgebiet Khorezm (2004 und 2005).

Entscheidungsbaum aus	2004			2005		
	Merkmale bei Eingabe	Merkmale bei Ausgabe (in M5)	Kappa-Koeffizient	Merkmale bei Eingabe	Merkmale bei Ausgabe (in M5)	Kappa-Koeffizient
M1	1.572	12	0.8571	1.572	11	0.9805
M3	241	11	0.8832	245	10	0.9375
M2_A	24	9	0.8909	24	11	0.9259
M2_B	12	6	0.9117	12	8	0.9182
M2_C	12	8	0.8510	12	8	0.8561
M2_D	24	9	0.9357	24	9	0.8948
M4_A	12*2	8*2	0.8796	12*2	8*2	0.9064
M4_B	12*2	8*2	0.8713	12*2	7*2	0.9103
M4_C	24*2	8*2	0.7746	24*2	10*2	0.8206
Gesamtverfahren	1.572	60	0.9718	1.572	66	0.9807

Unabhängig von der Betrachtung der Merkmalsräume, die im Ergebnisteil vorgestellt wird, wurde vor der Klassifikation eine Präevaluierung der Klassifikationsgüte jedes Klassifikationsbaums und des Gesamtverfahrens vorgenommen. Dabei wurden die Werte der Trainingsdaten mit Hilfe der Klassifikationsbäume klassifiziert und der Kappa-Koeffizient wie zuvor als Gütemaß herangezogen. Hiermit wurde nicht nur der Baum an sich sondern auch überprüft, ob die zuvor durchgeführte Reduzierung der Merkmalsräume ebenfalls sinnvolle Merkmale für eine Klassifikation extrahiert hat. Des Weiteren sollte untersucht werden, ob ein Stabilitätsgewinn durch die Anwendung verschiedener Klassifikationsverfahren (hier unterscheiden sich diese nur durch die Merkmalsräume) und das durch das Summationsverfahren der

Klassifikationszugehörigkeiten stattgefunden hat. Letztere Aussage ist allerdings ebenfalls nur auf die Trainingsgebiete beschränkt.

In Tabelle 5-4 sind für jeden Entscheidungsbaum die Anzahl der eingegebenen und ausgewählten Merkmale sowie die auf den Trainingsgebieten erzielten Kappa-Koeffizienten für die Jahre 2004 und 2005 notiert. Gelb hinterlegt wurden die Verfahren, die mit den höchsten Klassifikationsgenauigkeiten auf den Trainingsgebieten ausgezeichnet waren. Dabei zeigt sich deutlich der Stabilitätsgewinn, der durch die Verfahrenskombination im Gegensatz zur Anwendung eines einfachen Verfahrens erreicht werden konnte. Für das Jahr 2005 spielt es offensichtlich keine Rolle, ob die Auswertung des Gesamtmerkmalsraums M1 oder die Verfahrenskombination angewendet wird, da beide Resultate bei sehr hohen 0,98 liegen. Dagegen fällt die Evaluierung von M1 (Kappa = 0,86) beim Vergleich mit dem Gesamtverfahren im Jahr 2004 (Kappa = 0,97) wesentlich schwächer aus. Hier liefern andere Merkmalsauswertungen höhere Beiträge (gelb unterlegt), keines für sich alleine erreicht jedoch die Genauigkeit des Gesamtverfahrens. Es bleibt zu überlegen, ob die Evaluierungen von M2_C und M4_C weiterhin im Verfahren belassen werden sollten, da in beiden Jahren nur geringe Bewertungen vorlagen. Eine endgültige Bewertung des Verfahrens ist allerdings erst durch das *Accuracy Assessment* auf Validierungsgebieten möglich (Kapitel 5.3.2).

5.2.5 Postklassifikation mittels GIS und Fuzzy-Logik

Die Ziele der Post-Klassifikationsverfahren waren die Nachbearbeitung der schwer einer Klasse zuzuordnenden Pixel und die nachträgliche Zuordnung einer wahrscheinlichen semantischen Bedeutung der als Klasse „Mischsignal“ erfassten Pixel. Dazu wurde zum einen die Möglichkeit der Verschneidung von Zusatzinformationen aus dem GIS⁷⁶, zum anderen die Gewichtungsfaktoren der neun Entscheidungsbäume herangezogen. Im landwirtschaftlichen Bereich konnte eine Nachbearbeitung aufgrund fehlender Hintergrundinformationen nicht durchgeführt werden. Die Wassermaske aus den GIS-Daten erwies sich als nicht aktuell und daher für diese Anwendung unbrauchbar. Daher fokussierte die Postklassifikation mittels GIS die Siedlungsklassen.

Zur Verschneidung mit der Siedlungsfläche wurde aus dem Polygonlayer eine Rastermaske generiert, die dem MODIS-Pixelformat entsprach. Ein Pixel wurde einer Siedlung zugeordnet, wenn mehr als 50% der Pixelfläche durch ein oder mehrere Siedlungspolygone abgedeckt wurden. Nun wurde das Klassifikationsergebnis mit der Siedlungsmaske verschnitten und alle Mischpixel, die in der neuen Rastermaske als Siedlung identifiziert wurden, als Siedlung maskiert. Pixel, die als Siedlung eingestuft waren, aber nicht in der Siedlungsmaske enthalten waren, bekamen die Klasse mit der zweithöchsten Wahrscheinlichkeit zugeordnet. Handelte es sich

⁷⁶ Die GIS-Daten stammen aus dem GIS-Labor des deutsch-usbekischen ZEF/UNESCO Projekts in Urgench.

dabei um die alternative Siedlungsklasse oder das Mischsignal, wurde die dritthöchste Wahrscheinlichkeit für diesen Fall angenommen und der Pixel entsprechend klassifiziert (Fuzzy-Logik). Die Eliminierung der Klasse Mischsignal verlief analog, so dass letztendlich elf Zielklassen in Khorezm kartiert wurden.

5.3 Ergebnisse und Diskussion der Klassifikation

Im Ergebnisteil dieses Kapitels werden zunächst die Verfahrenseigenschaften beleuchtet. Dazu zählen die Ergebnisse der Merkmalsreduzierung sowie die Einschätzung der Klassifikationsgenauigkeit nach Anwendung des Verfahrens (Validierung). Ebenfalls erfolgt eine erste inhaltliche Interpretation der Ergebnisse vor dem Hintergrund der geowissenschaftlichen Fragestellung. Weitere Analysen und Bewertungen finden sich in Kapitel 8.

5.3.1 Reduzierung des Merkmalsraums und Klassifikationsbäume

Die Untersuchung der reduzierten Merkmalsräume spielte eine wichtige Rolle zur Einschätzung der bei der Erstellung des Merkmalsraums formulierten Hypothesen an das Verfahren. Folgende Fragen konnten damit beantwortet werden:

- (1) Welche der angewendeten Kurvenparameter für die Klassifikation waren zu welchem Grad für die Klassifikation dienlich?
- (2) Welche Statistiken oder Kurvensegmente gingen zu welchen Anteilen in die Klassifikation ein?
- (3) Welche Klassen konnten durch den Verfahrensansatz möglicherweise besser, welche schlechter erfasst werden?

Dazu werden Ergebnisse der verschiedenen Verfahren zur Merkmalsreduzierung sowie die Klassifikationsbäume und der daraus entstehende Merkmalsraum, auf dem die Klassifikation durchgeführt wurde, im Folgenden vorgestellt und analysiert.

Die Teilräume M2 und M4 des ursprünglichen Merkmalsraums sind in den Tabellen des Anhangs (Tabelle AIII-7 bis AIII-11) aufgelistet. Sofern das Verfahren zur Merkmalsreduktion klassenorientiert war, wurden für die jeweiligen Klasse/Merkmal-Paare ebenfalls die Klassifikationsgenauigkeiten (Kappa-Koeffizienten) des jeweiligen Verfahrens in diesen Tabellen aufgeführt. Die Größe der entstandenen Merkmalsräume für jedes einzelne Verfahren ist in Tabelle 5-4 abgebildet.

Nach dem *density slice* wurden in beiden Untersuchungsjahren vier gemeinsame Merkmale unter den 24 am Besten gerankten Merkmalen identifiziert (Bildung von Merkmalsraum M2_A). Während 2004 neben 11 von 24 Segmentstatistiken der Ausgangskurve die Merkmale aus der mittels Fouriertransformation geglätteten Kurve (11 von 24) am häufigsten auftreten, dominieren 2005 die Kurven, die an das Winter- oder das Sommermaximum adjustiert sind (12 von 24). Die

ersten Ableitungen spielen offensichtlich eine untergeordnete (2004: 2 von 24 und 2005: 3 von 24), die zweiten Ableitungen gar keine Rolle bei diesen Untersuchungen. Innerhalb eines Jahres erscheinen manche Kurvenparameter wie die Standardabweichung der Ausgangskurve und die Standardabweichung der an das Sommermaximum adjustierten Kurve eng miteinander verwandt. Zur Eliminierung redundanter Merkmale erscheint es daher günstig, diesem Verfahren bei einer möglichen Weiterentwicklung eine Korrelationsanalyse beizustellen.

Der *density slice*, der auch zu den Merkmalsräumen M2_B bis M2_D führte, ermöglichte Klassifikationsgenauigkeiten für einzelne Merkmale über 60 %. Lediglich für die Klasse „Weizen-Folgefrucht“ konnten in beiden Untersuchungsjahren konstant schlechte Werte von etwa 31 % registriert werden, was für eine geringere Eignung des Verfahrens zur Unterscheidung dieser Klasse spricht. Dies wird durch bei der Suche nach geeigneten Merkmalspaaren für die Diskriminanzanalyse, aus der Merkmalsraum M4 hervorging, noch unterboten. Hier wurde in beiden Jahren kein geeignetes Merkmalspaar zur Klassifikation gefunden. Ein Grund hierfür liegt in der geringen Zahl der Trainingsgebiete (2004, 2005) dieser Klasse, ein anderer aber in der hohen Ähnlichkeit der temporalen NDVI-Signatur mit der Fruchtfolge Weizen-Reis.

Die Korrelationsanalyse, die eine Reduzierung der 1.572 Merkmale auf 241 (2004) und 245 (2005) erlaubt (gespeichert in Merkmalsraum M3), zeigt die großen inhaltlichen Überschneidungen in den Daten. Die Redundanzen liegen – wie zu Beginn des Klassifikationskapitels vermutet - vor allem in ähnlichen Segmenten, wo insbesondere Maxima und Minima, sowie die Spannweite (*range*) zu hohen Korrelationen führen. Hohe Korrelationskoeffizienten wurden auch zwischen den Segmentstatistiken der zweiten Ableitungen und der Varianzen auf Segmenten aller Eingangskurven festgestellt.

Insgesamt wurden durch die neun Klassifikationsbäume 60 (2004) und 66 (2005) Merkmale aus den je 1.572 Eingangsvariablen extrahiert (Tabelle AIII-12-14). Knapp ein Drittel (17) aller ausgewählten Merkmale kamen in beiden Jahren zur Anwendung, andere variierten. Insbesondere wurden häufig die Kurvenparameter aus der Fouriertransformation ausgewählt. 2004 stellten die Amplituden, die Phasen oder die erklärten Varianzanteile einzelner Fourierschwingungen 22 von 60 Merkmalen, 2005 waren es 17 von 66. Dies stellt die zur Klassifikation eingangs formulierte Hypothese in Frage, da diese Kurvenparameter die ganze temporale NDVI-Signatur repräsentieren und nicht auf Segmenten gebildet wurden. Die Hypothese stützend kann hingegen angeführt werden, dass zwei Drittel der letztendlich zur Klassifikation beitragenden Variablen aus den Segmentstatistiken gebildet wurden.

Segmentstatistiken aller Kurvenableitungen (Glättung, Steigung, Krümmung, Maximum-Adjustierung) erschienen unter den ausgewählten Merkmalen wieder, wobei der geringste Beitrag durch die zweite Ableitung erreicht wurde (2004: 1 Merkmal, 2005: 6 Merkmale). Die Statistiken

der zweiten Ableitung sind von der Aussagekraft sehr verwandt mit den Amplitudenparametern höherer Fourierschwingungen, so dass möglicherweise auf die Bildung der zweiten Ableitung bei einer Weiterentwicklung des Verfahrens verzichtet werden kann. Die Kurven der ersten Ableitungen sowie deren Absolutbeträge wurden hingegen sehr häufig in die Teilmerkmalsräume aufgenommen und durch den RPART-Algorithmus letztendlich als zur Klassifikation geeignete Merkmale eingestuft.

Von den Standardstatistiken wurde der Mittelwert von Kurvensegmenten am häufigsten genutzt (2004: 15 von 38, 2005: 23 von 49). Zur Klassifikation herangezogen wurden auch die Maxima von acht (2004) und neun (2005) Segmenten, bei den Minima wurden fünf (2004) beziehungsweise vier (2005) ausgewählt. Range und Standardabweichung tauchen hingegen selten auf.

Diese Zahlen sagen aber noch nichts aus über die Rolle der Merkmale in den einzelnen Klassifikationsbäumen oder ob der RPART-Algorithmus eine sinnvolle Auswahl der Merkmale getroffen hat. Exemplarisch soll ein Klassifikationsbaum gezeigt werden, der aus Merkmalsraum M2_B für das Jahr 2004 mittels des Algorithmus errechnet wurde (Abbildung 5-16).

Der erste Entscheidungsknoten (von oben nach unten betrachtet) trifft besonders leicht nachvollziehbare Unterscheidungen. Im Beispiel wird die zu Beginn des Klassifikationskapitels motivierte Unterscheidung nach Modalitäten der NDVI-Verläufe aufgegriffen. So differenziert ein Schwellenwert von 0,4802 für das Maximum des dritten Viertel im NDVI-Jahresgang Klassen mit einem eindeutigen Vegetationsmaximum im Sommer von den übrigen Klassen. Zur ersten Gruppe gehören sowohl die unimodalen Verläufe von Baumwolle, Reis und der Klasse „Bäume und Gärten“ sowie die bimodalen Kurven, zu denen die Fruchtfolgen mit Weizen gehören. Auf der linken Seite des Baumes finden sich die unimodalen Kurven mit einem Maximum im ersten Halbjahr (Winterweizen), alle Klassen mit einem niedrigen (weniger eindeutigen) Maximum im dritten Viertel des Jahresgangs (die Siedlungsklassen) sowie die nonmodalen NDVI-Verläufe der Wasserklassen und von Wüste.

Auch in der Hierarchie nach unten gehend bleiben die Splits (Merkmal und Schwellenwert) zunächst verständlich. In der linken Baumhälfte werden (wiederum durch das Maximum im dritten Viertel der Ausgangszeitreihe) die Nicht-Vegetationsklassen (Wasser und Wüste) von den teilweise vegetationsbedeckten Klassen (Siedlungen) sowie vom Winterweizen unterschieden. Auf der dritten Ebene werden über die Mittelwerte der gesamten Ausgangsreihe („ndvi_mean_1_1_0“) – ebenso wie es das menschliche Auge intuitiv erfassen würde – Wüsten von Pixeln der Klasse „Wasser“ getrennt, da das Bodensignal ganzjährig höher ist als das Wassersignal des NDVI. Die Wasserflächen werden wiederum – wie schon durch ihren Bezeichner („konstante Wasserfläche“ und „variierende Wasserfläche“) erwartet werden konnte

– über die Standardabweichungen, also ein Streumaß, klassifiziert. Wieder auf der dritten Hierarchieebene wird durch die mittleren Absolutbeträge der ersten Ableitung in der ersten Jahreshälfte („ndvi_mean_abs_2_1_1“) die Klasse Winterweizen von den in demselben Zeitraum moderat ansteigenden Kurven der Siedlungen abgegrenzt. Auf diese Weise wird die Eigenschaft der NDVI-Zeitserien für die Klasse Winterweizen genutzt, die durch einen starken Anstieg (schnelles Vegetationswachstum) und abrupten Abfall (Ernte) gekennzeichnet sind. Die Mittelwerte im NDVI-Jahresgang erlaubten dann die Trennung der beiden Siedlungstypen (ländlich, urban) untereinander.

In der rechten Baumhälfte werden zunächst die unimodalen von den bimodalen Verläufen getrennt (Ausnahme: „Bäume und Gärten“). Die Trennung wurde durch den RPART-Algorithmus anhand eines Schwellenwertes von 0,2591 für den Mittelwert des zweiten Viertels der Zeitreihe vorgenommen. Zur Separierung der Klassen Baumwolle und Reis, die sich im unimodalen NDVI-Verlauf ähneln, wurden die Abweichungen insbesondere am Anfang ihrer Wachstumsphase durch das zweite Fünftel der Zeitserie, die auf das Sommermaximum adjustiert war, charakterisiert. In diesem Zeitraum findet die Flutung der Reisflächen statt. Das NDVI-Signal sinkt also meist für einen kurzen Zeitraum unter Null, was sich auch deutlich auf den Mittelwert der Zeitserie in diesem Segment auswirkt („ndvi_fwd_mean_5_2_0“). Ebenso werden die bimodalen Klassen durch den für Reis typischen Einbruch des NDVI zu Beginn der Wachstumsperiode erfasst. Dabei wird ein Pixel der Klasse „Weizen-Reis“ zugeordnet, wenn sein Minimum im dritten Viertel („ndvi_min_4_3_0“) unter 0,2280 fällt.

Die Klasse „Mischpixel“ war nicht eindeutig klassifizierbar und erscheint nicht als singuläres Blatt im gezeigten Klassifikationsbaum. Durch Streumaße wie Fourierschwingungen höherer Ordnung, Varianzen (Standardabweichung) oder die zweite Ableitung konnten diese Pixel von „ähnlichen“ Signaturen abgetrennt werden. Ebenso konnte diese Nachvollziehbarkeit in allen anderen abgeleiteten Klassifikationsbäumen wieder vorgefunden werden.

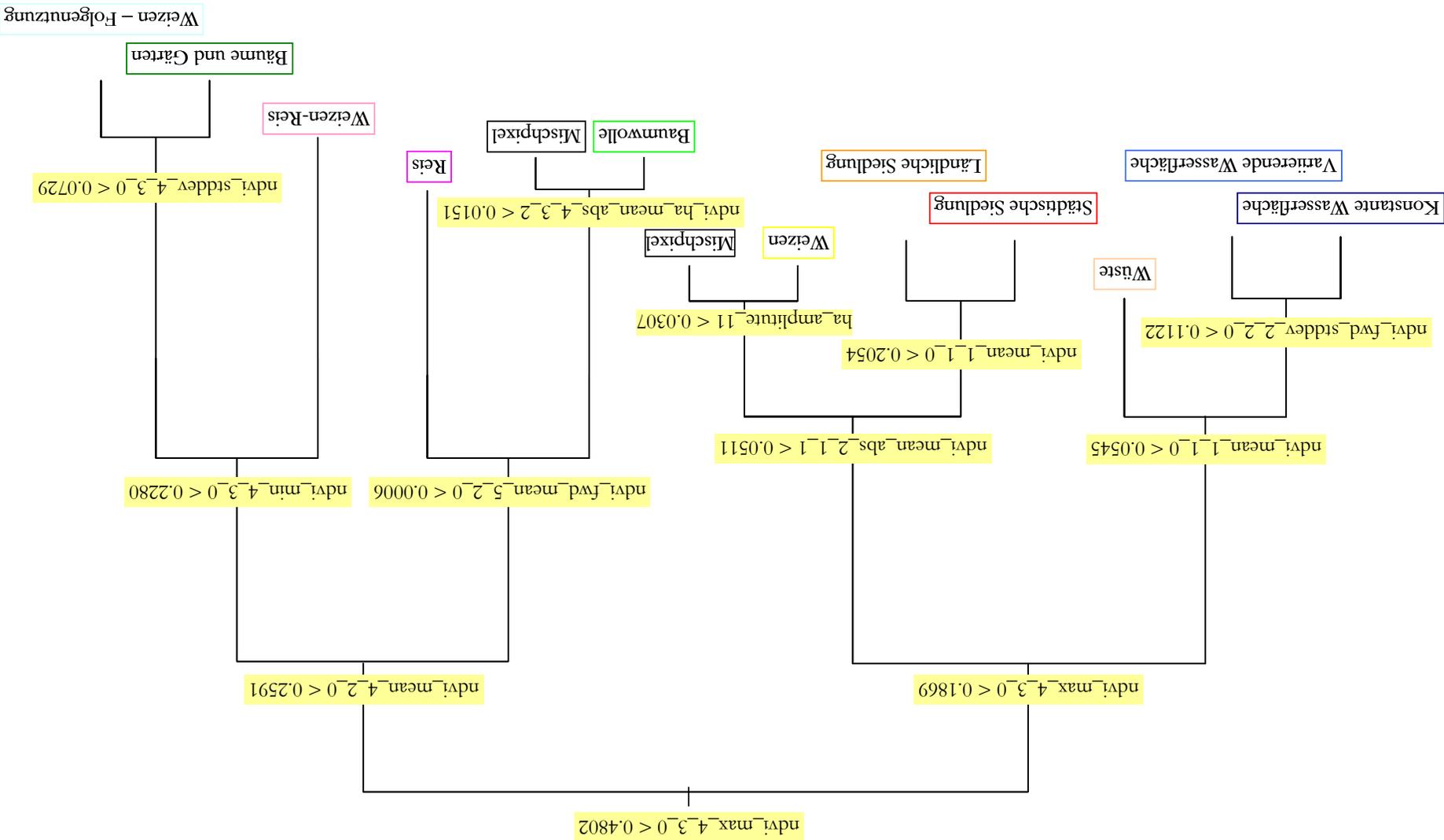


Abbildung 5-16: Exemplarisch ausgewählter Entscheidungsbaum für das Jahr 2004, klassifiziert Merkmalsraum M2_B. Die Blätter wurden den Zielklassen zugewiesen.

5.3.2 Validierung

Zur Validierung wurden die Ergebnisse des Gesamtverfahrens anhand der aus ASTER-Daten extrahierten Validierungsgebiete auf ihre allgemeine Gültigkeit überprüft (Kapitel 5.2.2). Vorweg ist zu sagen, dass hier keine vollkommen unabhängige Genauigkeitseinschätzung im Sinne von CONGALTON (1991) zur Anwendung kam, sondern dass die Stichproben für solche Pixel durchgeführt wurden, die bei der Überlagerung mit den ASTER-Daten eine homogene Bedeckung oder Nutzung enthielten. Daher sind die Genauigkeitsanalysen nur für Pixel mit weitgehend homogener Bedeckung gültig. Weiterführende Analysen auf Subpixelniveau sind zwar theoretisch möglich, wurden aber in dieser Arbeit aufgrund der Zielorientierung in der Anwendung der Ergebnisse auf die geowissenschaftliche Fragestellung nicht im Detail berücksichtigt.

Für beide Untersuchungszeiträume konnte eine vergleichbare absolute Genauigkeit von 91 % erzielt werden. Die Kappa-Koeffizienten unterscheiden sich mit 0,8975 und 0,9060 nur geringfügig. Mit den oben getroffenen Einschränkungen wurden demnach sehr gute Ergebnisse erzielt. Klassenbezogenen lassen sich die Klassifikationsgenauigkeiten nach CONGALTON und GREEN (1999) durch die sogenannte *User's Accuracy* und die *Producer's Accuracy* aufschlüsseln.

Tabelle 5-5: Klassenbezogene Aufschlüsselung der Klassifikationsgenauigkeiten 2004.

Klasse	User's Accuracy	Producer's Accuracy
Baumwolle	0,92	0,88
Reis	0,97	0,97
Weizen-Reis	0,85	0,85
Weizen-Folgefrucht	0,56	0,71
Weizen-Brache	0,97	0,97
Ländliche Siedlung	0,87	0,87
Städtische Siedlung	0,87	1,00
Wüste	1,00	0,93
Mischpixel	0,67	1,00
Bäume und Gärten	0,94	0,76
Variierende Wasserfläche	1,00	0,91
Kontinuierliche Wasserfläche	0,89	0,94

Für die landwirtschaftlichen Klassen liegen die Klassifikationsgenauigkeiten 2004 (Tabelle 5-5) zumeist über der *Overall Accuracy*. Einzige Ausnahme bildet die Klasse „Weizen-Folgefrucht“, die für die *User's Accuracy* und für die *Producer's Accuracy* niedrige Werte von 0,56 und 0,71 erreicht. Die Kreuztabelle (Tabelle AIII-15) zeigt an, dass zum einen die Zahl der Validierungsgebiete mit lediglich neun sehr niedrig ist, zum anderen überwiegend Verwechslungen mit der Klasse „Weizen-Reis“ auftraten, die in ihrer temporalen NDVI-Signatur sehr ähnlich ist (Abbildung 5-8). Für die übrigen Klassen liegen die Genauigkeiten auch sehr hoch. Pixel, die eigentlich zur Klasse „Ländliche Siedlung“ zuzuordnen waren, wurden häufig als „Bäume und Gärten“

klassifiziert, was schon bei der Identifikation der Zielklassen als problematisch eingeschätzt wurde (Kapitel 5.2.1). Die zeitliche Variabilität der Wasserflächen konnte mit 0,89 oder 0,91 im Bereich der Gesamtgenauigkeit klassifiziert werden. Durch die Zusammenfassung der beiden Wasserklassen konnte dann ein Wert nahe 1,0 erreicht werden.

Tabelle 5-6: Klassenbezogene Aufschlüsselung der Klassifikationsgenauigkeiten 2005.

Klasse	User's Accuracy	Producer's Accuracy
Baumwolle	0,92	0,79
Reis	0,89	0,94
Weizen-Reis	0,84	0,96
Weizen-Folgefrucht	0,82	0,56
Weizen-Brache	0,96	0,92
Ländliche Siedlung	1,00	1,00
Städtische Siedlung	0,96	1,00
Wüste	1,00	1,00
Mischpixel	1,00	1,00
Bäume und Gärten	0,88	1,00
Variierende Wasserfläche	0,93	0,85
Kontinuierliche Wasserfläche	0,79	0,90

Im Jahr 2005 ergibt sich bei der Betrachtung der *User's* und *Producer's Accuracies* für die einzelnen Klassen ein ähnliches Bild. Zusätzlich treten Verwechslungen zwischen den Klassen Baumwolle und Reis auf (Tabelle AIII-16), was die verhältnismäßig niedrige *Producers-Accuracy* für Baumwolle erklärt (Tabelle 5-6). Insgesamt liegen die Genauigkeiten für Klassen im landwirtschaftlichen Bereich 2005 etwas niedriger als für 2004.

Zusammenfassend lässt sich ein als sehr gut zu validierendes Klassifikationsergebnis festhalten. Die Variationen zwischen den Jahren sind gering, wobei als einzige schwierig erfassbare Klasse die Fruchtfolge von Weizen und einer weiteren Frucht identifiziert werden konnte. Zu einer Vertiefung dieser Analyse bietet sich an, die einzelnen Klassifikationsbäume genauer zu untersuchen.

5.3.3 Gesamtergebnis der Klassifikation

Die Anwendung der Klassifikationsregeln erlaubt eine Klassenzuordnung für jedes Pixel der Ausgangsdaten. Dabei ergibt sich für 2004 und 2005 hinsichtlich der räumlichen Verteilung der landwirtschaftlichen Nutzungen jeweils ein sehr ähnliches Ergebnis (Abbildung 5-17). Dies wird durch die Flächenstatistiken bestätigt (Tabelle 5-7), wobei im oberen Teil der Tabelle die klassenspezifischen Ergebnisse, im unteren Teil nur die agrarische Landnutzung aufgeführt sind. Dabei wurden die Fruchtfolgen aufgelöst, und absolute Flächenbeträge für Reis, Weizen und weitere Nutzungen aufgeführt.

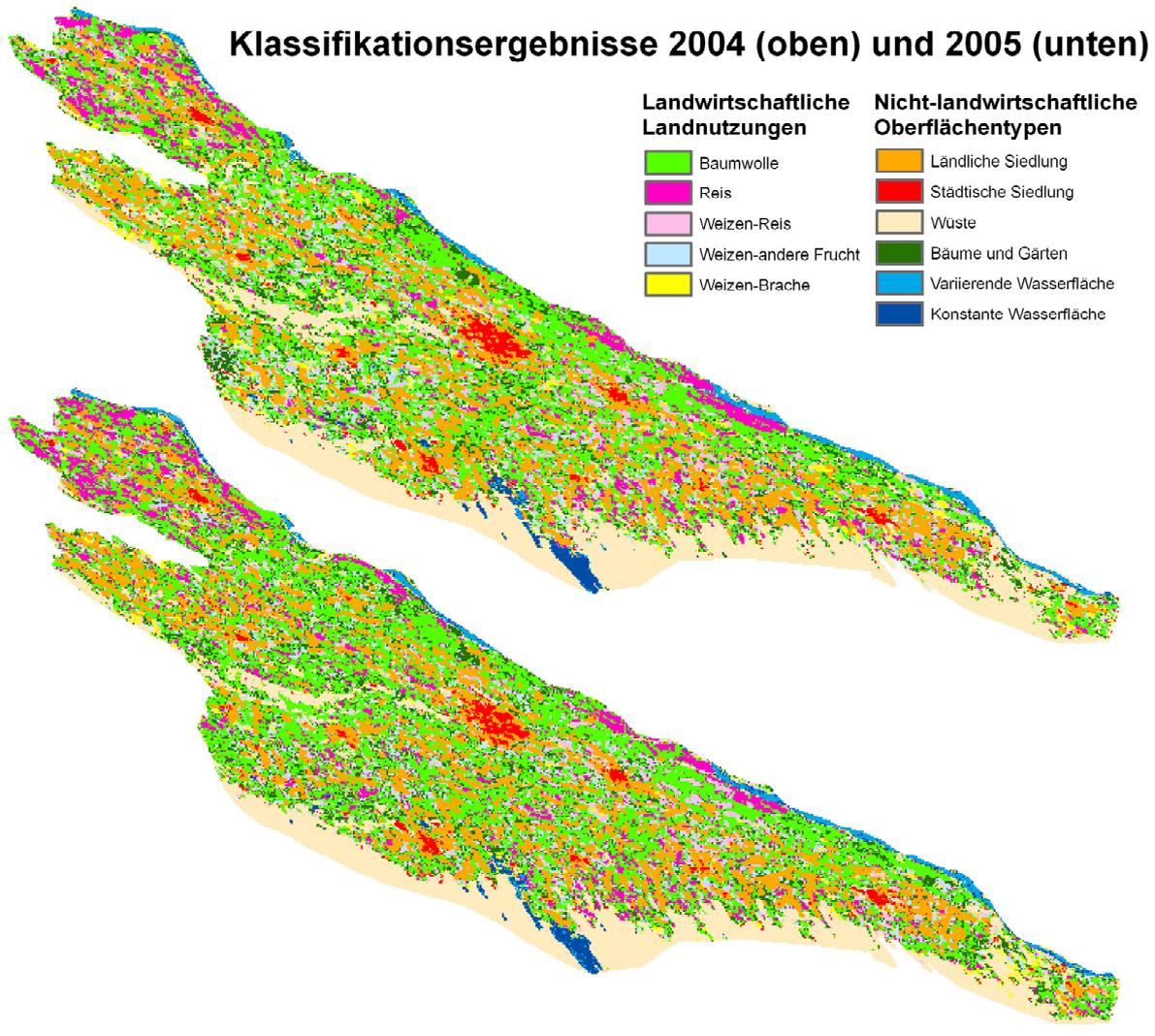


Abbildung 5-17: Ergebnisse der Klassifikation der agrarischen Landnutzung in Khorezm für 2004 und 2005.

Erwartungsgemäß war die Baumwolle in beiden Jahren in Bezug auf die Flächen und deren räumliche Verteilung am weitesten in Khorezm verbreitet. 2004 wurden mit 148.190 ha 6.000 ha Baumwolle mehr angebaut als 2005. In Flussnähe, sowie in der südlichen Peripherie und insbesondere im nördlichsten Rayon Gurlen (GUR, vergleiche Abbildung 2-4) dominierte die Reisanutzung. In Flussnähe und unweit der großen Einlassbauwerke an den großen Kanälen im Süden wurde der Reisanbau in beiden Jahren durch den offensichtlich sicheren Zugang zu Wasser begünstigt. In der Peripherie erlauben vor allem die vielen kleinen Seen alljährlich den Reisanbau, da in Phasen von Wasserknappheit mittels Pumpen dieses Wasser zur Reisanbau (wieder-) verwendet werden kann. Im Jahr 2004 nahm der Reisanbau knapp 60.000 ha Land in Anspruch. 2005 betrug die Reisanbaufläche 64.000 ha, wovon auf 26.011 ha zuvor Weizen angebaut wurde. Im Jahr 2004 wurden in Khorezm nur lediglich 12.799 ha mit der Furchfolge Weizen-Reis genutzt. Insgesamt hatte der Weizenanbau im Jahr 2005 einen Flächenzuwachs von 33.000 ha im Vergleich zu 2004 zu verzeichnen.

Die landwirtschaftlich genutzte Fläche variierte in den beiden Untersuchungsjahren um 14.000 ha, was eine intensivere landwirtschaftliche Nutzung in 2005 andeutet. Insgesamt wurde 2004 eine Fläche von 239.747 ha für landwirtschaftlichen Anbau verwendet, 2005 erreichte die landwirtschaftliche Nutzung 251.993 ha. Diese Flächensummen liegen durchaus im Bereich des Mittelwertes der amtlichen Statistiken bezüglich der agrarischen Nutzfläche von 233.000 ha (Kapitel 2.4). Allerdings liegt diese Zunahme von 5,1 % (absolut 12.246 ha) im Vergleich zu 2004 noch im Bereich eines Klassifikationsfehlers. Dieser Eindruck wird dadurch verstärkt, dass im Jahr 2005 parallel ein bemerkenswerter Rückgang bei der Klasse Bäume und Gärten zu verzeichnen war. Gerade bei dieser eigentlich als konstant zu erwarteten Klasse, waren derart hohe interannuelle Schwankungen nicht zu erwarten. Die Ursachen können also zum einen in einer Fehlklassifikation des Algorithmus zu Gunsten der Baumwolle oder den Fruchtfolgen mit Weizen liegen. Dabei ist nicht zu identifizieren, ob der Fehler 2004 und 2005 aufgetreten ist. Letztendlich kann lediglich durch die zu erwartende Konstanz von Lage und Flächenanteil der Klasse „Bäume und Gärten“ bei der Anwendung des Verfahrens für weitere Jahre Gewissheit gewonnen werden.

Tabelle 5-7: Flächenanteile der Ergebnisse der Landnutzungsklassifikation von Khorezm für die Jahre 2004 und 2005.

Klasse	Fläche [ha]	
	2004	2005
Baumwolle	148.190	142.233
Reis	47.026	38.880
Weizen-Reis	12.799	26.011
Weizen-Folgefrucht	19.722	33.283
Weizen-Brache	12.010	11.586
Ländliche Siedlung	85.665	85.654
Städtische Siedlung	9.359	9.327
Wüste	52.387	52.366
Mischpixel	13.443	13.116
Bäume und Gärten	51.153	39.363
Variierende Wasserfläche	6.225	6.220
Kontinuierliche Wasserfläche	5.372	5.313
Agrarische Landnutzung		
Baumwollanbau	148.190	142.233
Weizen	44.531	70.880
Reisanbau	59.825	64.891
Sonstige Landwirtschaftliche Flächen	19.722	33.283

Dennoch ist im Jahr 2005 eine Intensivierung der Nutzung festzustellen: Durch die Auflösung der Fruchtfolgen in die einzelnen Anbaufrüchte (Tabelle 5-10, unten) wurden in Khorezm 2004 272.268 ha, 2005 hingegen 311.287 ha für eine landwirtschaftliche Nutzung in Anspruch genommen, hier betrug der Zuwachs 14,3 %.

Die übrigen Klassen verhalten sich sehr ähnlich, was wegen der Eindeutigkeiten der temporalen Signaturen und der Postklassifikation, die insbesondere für die Siedlungsklassen durchgeführt wurden, nicht weiter verwundert. Resümierend können die großen Ähnlichkeiten der Klassifikationsergebnisse als Indikatoren für die Stabilität des durch die Klassifikationsbäume induzierten Schwellenwertverfahrens angesehen werden.

5.3.4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel wurde ein allgemeiner Entwurf für ein Klassifikationsverfahren von Fernerkundungsdaten von Zeitserien vorgestellt. Im ersten Schritt des Verfahrens werden Zeitserienderivate (Kurvendiskussion oder Kurvenglättung) gebildet. Daraus werden Segmente entnommen und deskriptive Statistiken berechnet, um einen umfassenden Merkmalsraum zu generieren. Mittels mehrerer, sich ergänzender Verfahren werden Teilräume gebildet, die zur Klassifikation geeignete Merkmale enthalten. *Recursive partitioning and regression trees* werden dann zur Bildung von Klassifikationsbäumen und geeigneten Schwellenwerten eingesetzt. Jedes Pixel wird mehrfach klassifiziert und die Klassenzugehörigkeit im Gesamtschritt wird über die Summierung der Klassenzugehörigkeiten der Teilverfahren ermittelt.

Dieser Ansatz wurde für das Untersuchungsgebiet Khorezm umgesetzt und für die spätere Anwendung um eine Postklassifikation erweitert. Dabei wurde eine hohe Eignung von 8-tägigen 250 m MODIS-MOD09Q1 NDVI-Zeitserien zur Unterscheidung agrarischer Landnutzungsklassen festgestellt, deren temporale Signaturen sehr feine Klassentrennungen erlauben.

Die Resultate der Merkmalsreduzierung variierten für die Untersuchungsjahre 2004 und 2005. Dennoch konnten bei der Klassifikation letztendlich für beide Jahre ähnliche Klassifikationsgenauigkeiten und auch in der räumlichen Verteilung plausible Ergebnisse erzielt werden, die sich mit den Geländebeobachtungen decken.

Der Ansatz der mehrfachen Klassifikation und der klassenweise durchgeführten Summenbildung für jedes Pixel demonstrierte daher nachweislich sein Potenzial, eine hohe Stabilität gegenüber temporalen Variationen des Zeitserienverlaufs erreichen zu können. Um die Robustheit des Verfahrens zu messen, wird eine Analyse über einen längeren Zeitraum vorgeschlagen. Weiterhin empfiehlt sich ein Vergleich der Ergebnisse mit Resultaten alternativer Verfahren zur Rechtfertigung der Komplexität des vorgestellten Ansatzes. Aus dem Gesichtspunkt einer anwendungsorientierten Arbeit heraus standen die erreichten Klassifikationsgenauigkeiten und die erreichte Übertragbarkeit des Verfahrens im Vordergrund.

Neben potenziellen Abgrenzungen gegenüber anderen Verfahren, die die Qualität des Ansatzes einordnen lassen, birgt eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes an sich noch sehr viele

Möglichkeiten – auch hinsichtlich seiner Verallgemeinerung. Im Folgenden seien von datentechnischer Seite verschiedene Formen der Weiterentwicklung genannt:

- Hinzunahme gleichartiger Aqua-Daten zum Schließen von Datenlücken und zur Minimierung von ungünstigen Aufnahmewinkeln.
- Einbindung von Zeitserien weiterer Spektralkanäle in den Merkmalsraum (möglicherweise auch MODIS-Daten mit 500 m geometrischer Auflösung)
- Erweiterung und Kalibrierung des Verfahrens durch Daten vergleichbarer geometrisch und temporal auflösender Sensoren (beispielsweise Envisat MERIS) oder durch Zeitserien geometrisch höher auflösender Sensorkonstellationen (Beispiel: Rapid Eye)

Methodisch sind ebenfalls verschiedene Forschungsbereiche angeschnitten, die in folgenden Punkten durch eine Weiterentwicklung optimiert werden könnten:

- Detailanalysen der Teilmerkmalsräume auf Effizienz (Klassifikationsgenauigkeit, Redundanzen) oder konstant auftretende klassifizierende Merkmale
- Modifizierung oder Optimierung von Verfahren zur Merkmalsraumreduzierung
- Steuerung der Einstellungen der RPART hinsichtlich der *a priori* Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Klassen, der Baumtiefe (*split criterion*), dem nachträglichen Entfernen wenig effektiver Äste (*pruning*)
- Einführung von Analysen auf Subpixelniveau (auch mittels Weiterentwicklung und Anwendung der unscharfen Komponente)

Besondere Möglichkeiten des gezeigten Ansatzes werden in der Prognose der landwirtschaftlichen Nutzung in Khorezm gesehen. Dabei kann getestet werden, ab welchem Zeitpunkt im Jahresgang welche Genauigkeit bei der Klassifizierung der verkürzten Kurve zu erreichen ist. Allerdings sollte der Verfahrensansatz vor dieser Weiterentwicklung nach den oben genannten Gesichtspunkten optimiert und stabilisiert werden.

Auf der inhaltlichen Ebene wurde insbesondere die Klassifikation der agrarisch genutzten Gebiete durch die Auswertung der abschnittsweise berechneten Statistiken der NDVI-Zeitserien ermöglicht. Für das Jahr 2005 wurden eine intensivere landwirtschaftliche Nutzung (Zunahme der Fruchtfolgen mit Winterweizen) und eine Zunahme der Reisanbauflächen gegenüber 2004 konstatiert (letzteres allerdings noch im Toleranzbereich der Klassifikationsgenauigkeit). Die Daten dienen nachfolgend als Grundlage für die Modellierung der saisonalen tatsächlichen Evapotranspiration. Eine vertiefte raumzeitliche Analyse der agrarischen Landnutzung (Bildung von Performanceindikatoren) zur Bewertung der Wassernutzung erfolgt in Kapitel 8.

Perspektivisch erlaubt der Ansatz für das Untersuchungsgebiet langfristige Detailanalysen, die in der Extraktion und Quantifizierung der regionalen Fruchtfolgenzyklen münden können. Ebenfalls erscheinen räumliche Übertragungen auf benachbarte Regionen im Amu Darya Delta aufgrund ähnlicher optimaler atmosphärischer Bedingungen in der Vegetationsperiode möglich. Offen bleibt, ob dieser Ansatz beispielsweise in Regionen mit tropischen Klimabedingungen aufgrund der dort anzutreffenden niedrigen (MODIS-) Fernerkundungsdatenqualitäten zu übertragen ist.

6 Die Modellierung der saisonalen tatsächlichen Evapotranspiration

Die Modellierung der saisonalen tatsächlichen Evapotranspiration (ET_{act}) wurde den Grundsätzen des SEBAL-Modells entsprechend (Kapitel 3.2.2) mit den in Kapitel 4 vorgestellten Zeitserien aus MODIS Fernerkundungsprodukten umgesetzt. Dabei traten zwei Schwierigkeiten hinsichtlich der Datenwahl und der operationellen Durchführung auf, die mit diesem Teil der Dissertation gelöst werden sollten:

- (1) Die verwendeten MODIS-Daten haben eine räumliche Auflösung von etwa 1 km und enthalten im landwirtschaftlichen Khorezm fast ausschließlich Mischpixel. SEBAL und METRIC wurden aber auf Landsat-Daten entwickelt, deren geometrische Auflösung im thermalen Bereich 60 m beträgt. Während auf dem Maßstab der Landsat-Daten noch eindeutige Ankerpunkte (homogen trockene und feuchte, also „heiße und kalte“ Oberflächen) mit den notwendigen Eigenschaften (Kapitel 3.2.2) zur Modellierung gefunden werden können, mussten auf dem MODIS-Skalenniveau Anpassungen hinsichtlich der Mischpixel vorgenommen werden.
- (2) SEBAL erfordert eine möglichst genaue Identifikation der Ankerpunkte, wobei von BASTIAANSEN et al. (1998), MORSE et al. (2001), ALLEN et al. (2002) verschiedene Vorschläge zur visuellen Extraktion dieser Extremwerte gemacht werden (Kapitel 3.2.2). Für eine mehrfache Anwendung⁷⁷ ist diese Herangehensweise sehr zeitintensiv, weshalb eine Automatisierung der Pixelselektion erforderlich wurde.

In diesem Kapitel erfolgt zunächst eine Zuordnung verwendeter MODIS-Daten zu den einzelnen Modulen des Modells. Daraufhin werden die meteorologischen Eingangsdaten vorgestellt. Kapitel 6.1 zeigt ferner die Aggregation der Landnutzungsklassifikation (aus Kapitel 5) in den 1 km-Modellierungsmaßstab und weitere klassenbezogene Initialisierungen zur

⁷⁷ Für 2004 waren 133, für 2005 bereits 136 Modellanwendungen vorgesehen.

Modellierung. Der Kern des Kapitels beinhaltet die Beschreibungen der eingeführten Modellanpassungen (Kapitel 6.2). Kapitel 6.3 umfasst die darauf folgende Generierung von Tageswerten sowie zehntägiger und saisonaler Summenkomposite aus den Modellierungsergebnissen. Es folgen Plausibilitätsuntersuchungen zur Validierung der Ergebnisse (Kapitel 6.4). Abschließend werden die Resultate der Modellierung für die Jahre 2004 und 2005 vorgestellt und diskutiert (Kapitel 6.5).

Neben der Sommersaison im statistischen Sinne (1. April bis 30. September) wird noch der Oktober analysiert, da die Vegetationsperiode der Baumwolle in diesen Monat hineinragt.

6.1 Vorverarbeitungen und Initialisierungen

Die Komponenten von SEBAL (Netto-Strahlungsbilanz R_n , Bodenwärmefluss G , Fühlbarer Wärmefluss H) wurden nacheinander auf Basis fernerkundlicher MODIS-Produkte implementiert (Tabelle 6-1). Als Eingangsdaten fungierten die gemäß Kapitel 4 zusammengestellten Zeitserien der LST, des Emissionsgrads (ϵ), der tatsächlichen (*blue-sky*) Albedo (α), der NDVI und der LAI der Monate April bis Oktober aus den Jahren 2004 und 2005.

Tabelle 6-1: Zuordnung der eingesetzten MODIS-Parameter zu ihrem Verwendungszweck in SEBAL.

MODIS Produkttyp	Verwendung	SEBAL Komponente	Spezifikation der Verwendung
LST	<i>proportionality factor*</i>	R_n	Basisvariable zur Bestimmung der von der Erdoberfläche ausgestrahlten langwelligen Strahlung
		G	Abschätzung des Temperaturgradienten im Boden
		H	Berechnung der Relation zum vertikalen Temperaturgradienten
E	R_{Le}	R_n	Eigenständige Variable zur Abschätzung der reflektierten langwelligen Strahlung
		R_n	Basisvariable zur Bestimmung der von der Erdoberfläche ausgestrahlten langwelligen Strahlung
A	<i>proportionality factor*</i>	R_n	Berechnung der kurzwelligen Strahlungsmenge an der Erdoberfläche
		G	Abschätzung der verfügbaren Energiemenge an der Bodenoberfläche
NDVI	<i>extinction factor*</i>	G	Simulation der Vegetationsdichte
	dT	H	Simulation der Vegetationsdichte und eines Vergleichswertes für Boden
LAI	z_{0m}	H	Abschätzung der Pflanzenhöhe zur Korrelation mit z_{0m}

dT : Vertikaler Temperaturgradient; z_{0m} : Rauigkeitslänge für den Impuls.

6.1.1 Meteorologische Daten

Zur Initialisierung der Modellierung des fühlbaren Wärmeflusses werden in der ursprünglichen Variante von SEBAL die Windgeschwindigkeit und im hier verfolgten Ansatz (METRIC) weitere meteorologische Eingangsparameter benötigt. Zur Bestimmung der Schubspannungsgeschwindigkeit (*friction velocity*) dient die Windgeschwindigkeit bei Überflugszeit. Diese und die weiteren meteorologischen Daten (Lufttemperatur, Relative Luftfeuchte, Nettostrahlungsbilanz, Niederschlag) gehen in die Berechnung der Referenzevapotranspiration zur Abschätzung fühlbarer Wärmeflüsse über dem „kalten“ Ankerpunkt ein (ALLEN et al., 2002). Hierzu konnten Daten verwendet werden, die 2004 und 2005 an zwei meteorologischen Stationen im Untersuchungsgebiet Khorezm halbstündig aufgezeichnet wurden⁷⁸. Die Station Yangibazar liegt im Inneren des Bewässerungsgebietes bei 60°37'12" östlicher Länge und 41°39'10" nördlicher Breite (KHAMZINA, 2006), die Station Khiva liefert Daten aus der Peripherie des bewässerten Landes nahe der Kara-Kum (60°19'00" östliche Länge, 41°20'39" nördliche Breite; FORKUTSA, 2006).

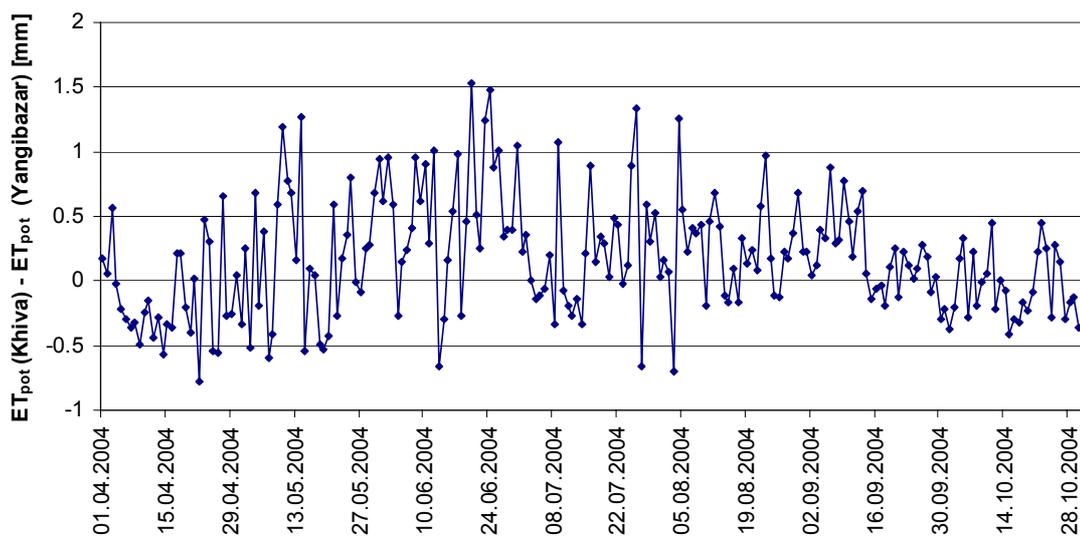


Abbildung 6-1: Differenzen der potenziellen Evapotranspiration aus Messdaten der meteorologischen Stationen Khiva und Yangibazar.

Mittels des ASCE-Penman-Monteith-Ansatzes wurden stündliche Werte der potentiellen Evapotranspiration (ET_{pot}) ermittelt (ALLEN et al., 1998). Den Vorschlag von ALLEN et al. (2005) zur Ermittlung der tatsächlichen Evapotranspiration (mm) aus den modellierten latenten Wärmeflüssen (W/m^2) aufgreifend, wurde zusätzlich die Berechnung der sogenannten ASCE standardisierten Referenzevapotranspiration (ET_{ref}) für Alfalfa durchgeführt (ASCE-EWRI,

⁷⁸ Diese Daten wurden seitens des deutsch-usbekischen ZEF/UNESCO Projekts für diese Arbeit zur Verfügung gestellt und auf Ausreißer gefiltert.

2005)⁷⁹. Für die Nettostrahlungsbilanz lagen an der Station Yangibazar ab dem 9. September 2005 keine Daten vor, so dass diese nicht zur Berechnung von ET_{pot} und ET_{ref} herangezogen werden konnten.

Die potenzielle Evapotranspiration beider Stationen unterscheidet sich aufgrund ihrer Lage im Untersuchungsgebiet an manchen Tagen des Jahres 2004 mit Spitzenwerten von 1,5 mm deutlich (Abbildung 6-1). Dabei liegen die Werte von ET_{pot} in Khiva in den meisten Fällen höher als in Yangibazar. Die Station Yangibazar im Inneren des Bewässerungssystems unterliegt offensichtlich nicht den Einflüssen der Wüste, denen die Station in Khiva ausgesetzt ist. Dort beginnt nur wenige Kilometer entfernt die Wüste, was mit einer höheren Lufttemperatur zusammenfällt, so dass ET_{pot} ebenfalls höhere Werte annimmt. Für die vorliegende Arbeit wird angenommen, dass die meteorologische Station Yangibazar außer für einen schmalen Wüstenrand repräsentativere Daten liefert als die Station Khiva. Daher wurde die Modellierung auf den Daten der Station Yangibazar durchgeführt. Lediglich für den Zeitraum ab dem 9. September 2005 wurden Daten der Station Khiva herangezogen.

Im Jahresmittel beträgt die Abweichung von ET_{pot} zwischen den beiden meteorologischen Stationen 0,17 mm (2004) beziehungsweise 0,18 mm (2005) zugunsten der Station Khiva. Im Wüstenrandbereich (unter der Voraussetzung, dass die in Khiva aufgezeichneten Verhältnisse auf diesen Bereich gänzlich übertragbar sind) müssten die Modellierungsergebnisse für die saisonale tatsächliche Evapotranspiration entsprechend in der Vegetationsperiode (1. April bis 31. Oktober) um etwa 60 mm nach oben korrigiert werden. Dies würde gelten, wenn ET_{pot} täglich der nutzungsspezifischen Evapotranspiration (ET_{crop}) entspräche. ET_{crop} liegt aber faktisch wesentlich niedriger (vergleiche Kapitel 6.4.3.2), so dass auch eventuelle Abweichungen geringere Werte als 60 mm annehmen würden.

6.1.2 Aufbereitung der Landnutzungsklassifikation

Bei der Modellierung der tatsächlichen Evapotranspiration spielten die Ergebnisse der Landnutzungsklassifikation eine zentrale Rolle: Sie wurden zur Parametrisierung der Rauigkeitslänge z_{0m} und zur Vorauswahl bei der automatisierten Bestimmung der Ankerpunkte benötigt, die besonders trockene und feucht-kühle Oberflächenverhältnisse widerspiegeln. Darüber hinaus dienten sie der Validierung, um in der Umgebung der meteorologischen Stationen möglichst eindeutig einer Klasse zuzuordnende Pixel auszuwählen. Ebenso sollten sie zur klassenspezifischen Auswertung der Modellierungsergebnisse eingesetzt werden.

⁷⁹ Die Berechnung zweier Referenzwerte der potenziellen Evapotranspiration war nicht zu vermeiden, da für die Validierung mittels der pflanzenspezifischen Verdunstung (ET_{crop}) ET_{pot} der gut bewässerten Grasoberfläche benötigt wurde, für die Initialisierung der Ankerpunkte gemäß METRIC aber ET_{ref} für Alfalfa verwendet werden musste.

Tabelle 6-2: Dominierende landwirtschaftliche Nutzungen in Khorezm, aufgegliedert nach Saisonabschnitten (SCHWEITZER et al., 2004).

Periode	Brache	Weizen	Baumwolle	Folge- nutzung	Reis
1. April – 15. April	X	X			
16. April – 15. Mai	X	X	X		
16. Mai – 15. Juni		X	X	X	X
15. Juni – 30. September	X		X	X	X
1. Oktober – 31. Oktober	X		X		

Aus der Landnutzungsklassifikation, deren Pixelauflösung bei 250 m lag, musste nun eine Klassenzuweisung für die 1 km-Auflösung zur Modellierung erfolgen. Dabei war insbesondere die Bestimmung der Fruchtfolgen von hohem Wert, da über den Anbaukalender Zeitpunkte des Brachliegens der Felder ermittelt werden konnten. Diese Informationen waren wichtige Voraussetzungen zur Identifikation der „heißen“ Ankerpunkte und zur Abschätzung des Anteils brachliegender Fläche unterhalb des Pixels. Daher wurden die agrarischen Klassen durch Einsatz des Anbaukalenders in aktuell genutzte (Winterweizen, Baumwolle, Reis oder eine andere Frucht) und brachliegende Flächen aufgelöst.

Nach dem Anbaukalender ergaben sich fünf Masken der landwirtschaftlichen Nutzung in Khorezm, die jeweils für den in Tabelle 6-2 vermerkten Saisonabschnitt Gültigkeit hatten⁸⁰. Vor dem 15. April findet sich in Khorezm auf großen Nutzflächen lediglich der Winterweizen, ab Mitte April kommt die Baumwolle hinzu. Die intensivste Phase der landwirtschaftlichen Nutzung ist zwischen Mai und Juni (Winterweizen, Reis, Baumwolle und Folgenutzungen). Nachdem die Ernte von Winterweizen Mitte Juni vollständig abgeschlossen ist, steigt ab diesem Zeitraum bis Ende September die Zahl der Brachflächen geringfügig. Bis auf das Baumwollpflücken ist der Großteil der Ernte Ende September eingebracht.

Anschließend wurde im MODIS 1 km-Raster für jedes Pixel der Anteil jeder Klasse aus dem 250 m-Raster der Landnutzungsklassifikation berechnet. Die Klassenzuweisung erfolgte über die im groben Raster (enthält je 16 Pixel) am häufigsten vertretene Klasse (Abbildung 6-2, oben). Im mittleren Teil von Abbildung 6-2 wird die Basis dieser Entscheidung der Klassenzuweisung aufgeschlüsselt, indem der Prozentanteil der dominanten Klasse innerhalb des übergeordneten 1 km-Pixels zugeordnet wird.

⁸⁰ Diese dienten dann zur Bestimmung des „heißen“ und des „kalten“ Ankerpunktes, Kapitel 6.2.1 und 6.2.2.

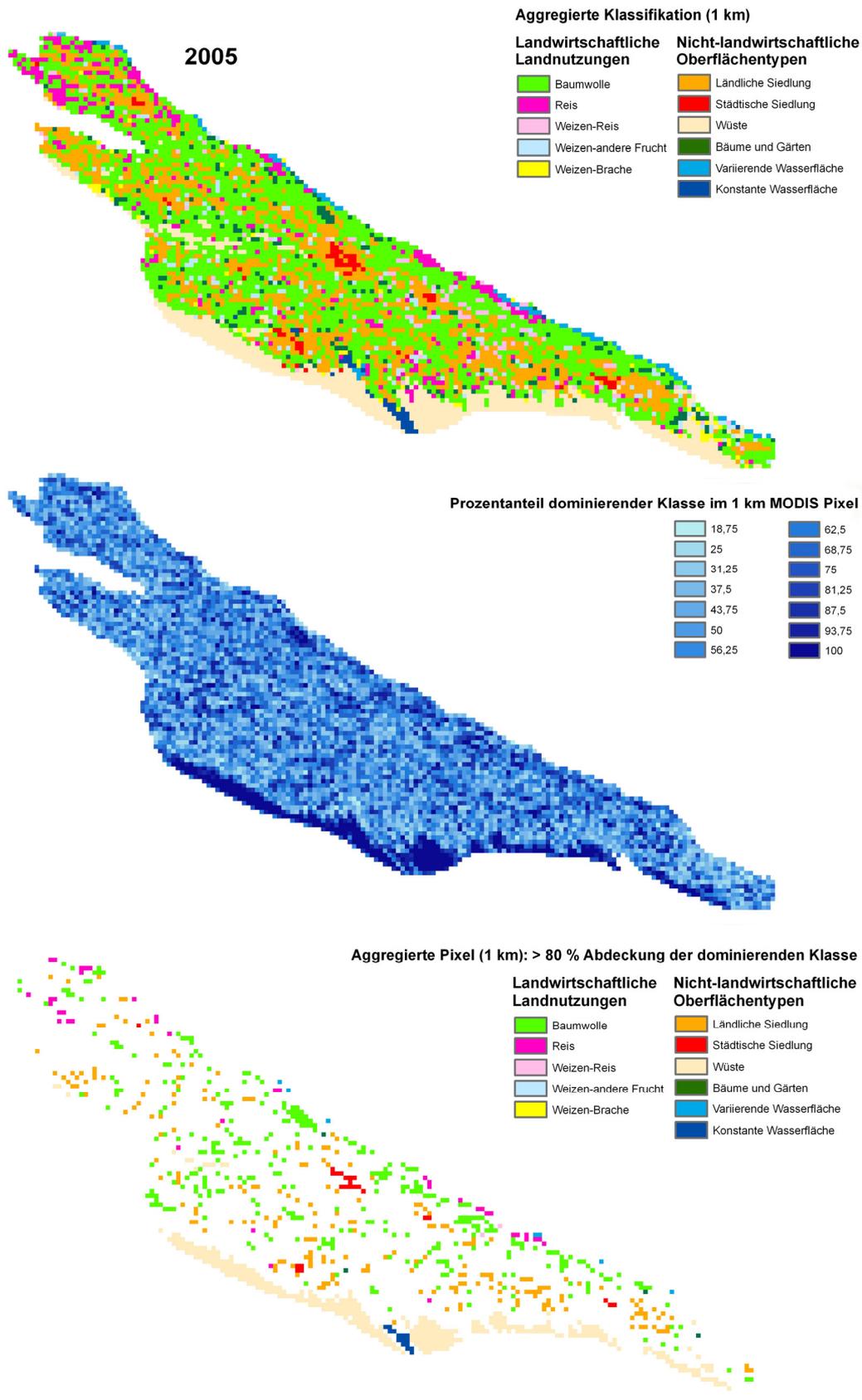
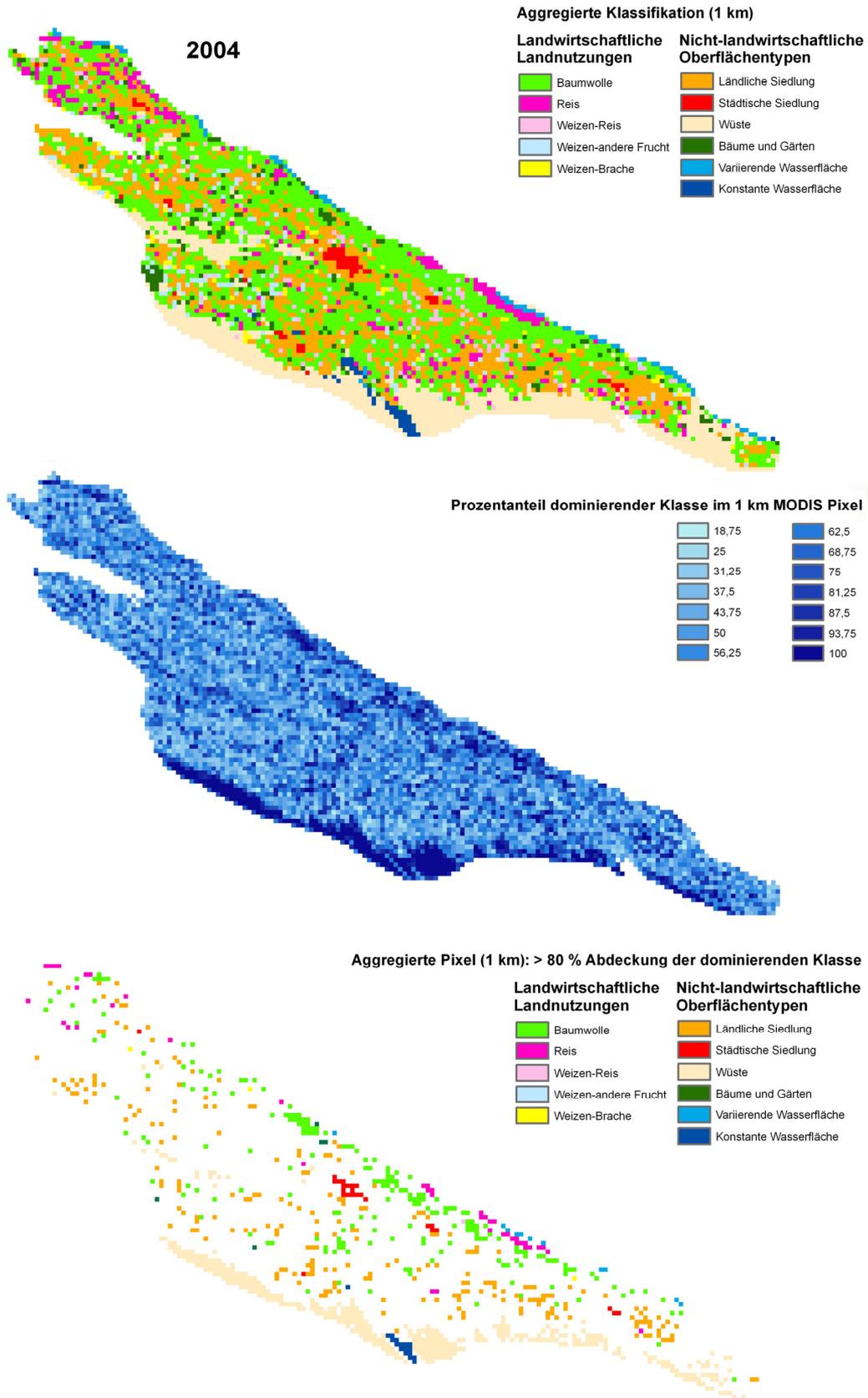


Abbildung 6-2: Ergebnisse der Weiterverarbeitung der Landnutzungsklassifikation (links 2004, rechts 2005): Oben die aggregierten Klassen, darunter in den blauen Farbtönen die Homogenität hinsichtlich der im 1 km-Raster der MODIS Daten zugewiesenen Klasse, unten die Pixel, deren Homogenität über 80 % erreichte.



Deutlich ist die Heterogenität der Landnutzung von Khorezm zu erkennen. Die dunkelblauen Bereiche, die auf Homogenität hindeuten, treten lediglich im Bereich städtischer Agglomerationen, der Wüste und größerer zusammenhängender Gewässer auf. Abbildung 6-3 quantifiziert den Anteil dieser homogenen Pixel⁸¹ auf unter 15% des Flächenanteils von Khorezm. In dieser Graphik wurden Prozentanteile der dominanten Pixel aus Abbildung 6-2 summiert und als Anteil der Gesamtmenge wiedergegeben. Danach sind weiterhin knapp 50 % aller 1 km Pixel einer Klasse zugeordnet worden, deren Flächenanteil im Pixel unter 50 % liegt. Bei der klassenspezifischen Auswertung der Modellierungsergebnisse ist dies zu berücksichtigen.

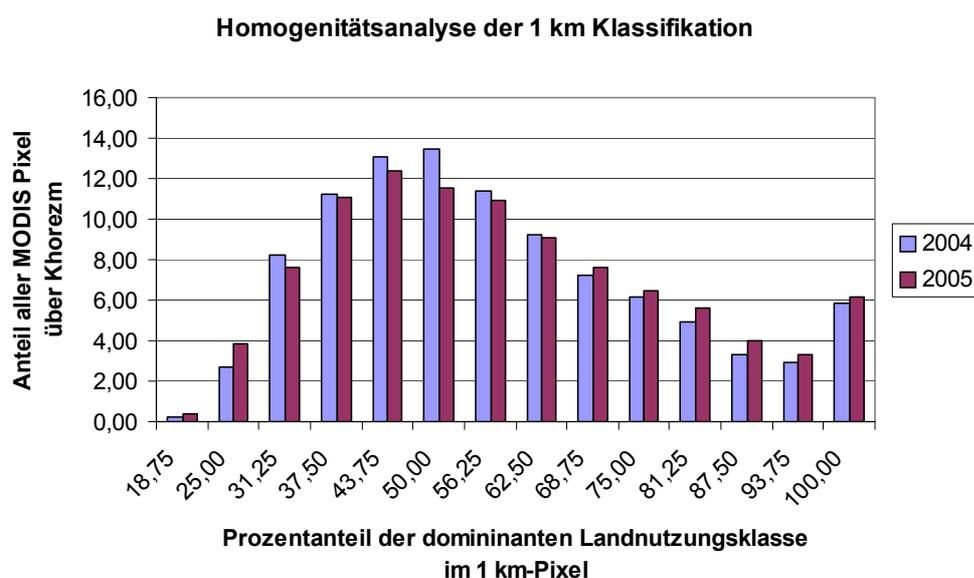


Abbildung 6-3: Homogenitätsanalyse der auf 1 km Auflösung aggregierten Klassifikationsergebnisse: Histogramm der Klassenanteile der dominanten Klasse in Khorezm für 2004 und 2005.

Tabelle 6-3: Anzahl homogener Pixel (Prozentanteil der dominanten Landnutzungs-kategorie > 80 %)

Klasse	2004	2005
Baumwolle	205	334
Reis	42	41
Weizen-Reis	1	2
Weizen-Folgenutzung	-	-
Weizen	3	-
Ländliche Siedlung	232	223
Städtische Siedlung	25	24
Wüste	370	364
Bäume und Gärten	5	4
Variierende Wasserfläche	11	7
Konstante Wasserfläche	17	15

⁸¹ Ab einer 80 %-igen Abdeckung mit einer Klasse wurde ein Pixel als homogen angesehen.

Zur Validierung und zur Analyse der Modellierungsergebnisse wurden daher für jede Klasse einzelne Pixel mit einem Homogenitätsanteil von über 80% ausgewählt (Homogenitätskriterium; Abbildung 6-2, unten). Danach ergab sich – allerdings nicht für jede Klasse – eine hinreichende Menge geeigneter Pixel zur Interpretation (Tabelle 6-3). Für die in dieser Arbeit relevanten Klassen konnten 2004 (2005) lediglich 205 (334) Pixel der Klasse „Baumwolle“ und 42 (41) Pixel der Klasse „Reis“ extrahiert werden.

6.1.3 Klassenbasierte Zuordnung der Rauigkeitslängen z_{0m}

Die aggregierte Landnutzungsklassifikation wurde erstmalig bei der Modellierung der Rauigkeitslängen für den Impuls (z_{0m}) eingesetzt. Für die nicht-landwirtschaftlichen Oberflächenklassen wurden dazu Literaturwerte aus verschiedenen Quellen herangezogen (Tabelle 6-4). Diese Abschätzungen blieben allerdings repräsentative Annäherungen, da die Werte für z_{0m} nur vom Klassennamen ausgehend, nicht aber seiner exakten semantischen Bestimmung, eingesetzt werden konnten. Die Abschätzung von z_{0m} auf landwirtschaftlichen Flächen erfolgte unter Ausnutzung des Zusammenhangs zwischen LAI und Pflanzenhöhe.

Tabelle 6-4: Rauigkeitslängen für den Impuls (z_{0m}), empirische Werte verschiedener Oberflächentypen und Zuordnung zu den Ergebnissen der Landnutzungsklassifikation

Klasse	z_{0m} [m]	Zuordnung	Klasse	z_{0m} [m]	Zuordnung
Wasser ¹	0,0005	Beide Wasserklassen	Grasland ¹	0,02	Kontrolle
Wald ¹	0,5		Luzerne ²	0,03	Kontrolle
Zitrusfrüchte (Plantage) ²	0,31-0,4	„Bäume und Gärten“	Wüste (mit Vegetationsbestand) ¹	0,1	Wüste
Siedlungen und Städte ²	0,4-0,5	„Städtische Siedlung“	Wüste (ohne Vegetation) ²	0,003	
Städtische Flächen ¹	0,2	„Ländliche Siedlung“	Gepflügter Boden ²	0,002-0,006	Brachen (temporär)

¹ALLEN et al., 2002, ²CAMPBELL und NORMAN, 1998

6.2 Modellanpassungen

Die Modellierung der fühlbaren Wärmeflüsse (H) ist hinsichtlich der theoretischen Grundlagen und der methodischen Umsetzung der komplexeste Teil des SEBAL-Modells, sobald alle fernerkundlichen Eingangsparameter bereitstehen. Wie Eingang dieses Kapitels bereits ausgeführt, waren aufgrund der räumlich niedrigen Auflösung der verwendeten MODIS-Daten und durch die vorgesehene multitemporale Anwendung des SEBAL-Modells Optimierungen notwendig. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

6.2.1 Kalibrierung der Ankerpunkte

SEBAL und METRIC wurden für thermale Landsat-Daten mit einer Auflösung von 60 m (ETM+) und 90 m (TM) entwickelt und optimiert (TASUMI et al., 2005). Für diese geometrischen

Auflösungen ist es verhältnismäßig leicht, homogene Pixel einer Klasse, zum Beispiel vegetationslose Flächen zur Bestimmung trocken-heißen Verhältnisse („heißer“ Ankerpunkt), zu finden. Infolge des Mischpixelproblems (LILLESAND et al., 2004) gestaltet sich diese Suche bei den MODIS-Daten mit 1 km Auflösung schwieriger. Weiterhin, wie bereits einleitend formuliert, wurde zur Bestimmung von H am „kalten“ Ankerpunkt (H_{cold})⁸² bei der Modellumsetzung die METRIC-Variante gewählt (ALLEN et al., 2005). Dazu waren gut bewässerte und komplett mit Vegetation bestandene Flächen zu bestimmen. Diese Verhältnisse existieren während einer Vegetationsperiode auf einer landwirtschaftlichen Fläche aber nur in der späten Wachstums- und in der Reifephase. Der Vorschlag zur Anpassung des SEBAL-Modells auf die Anwendung mit täglichen MODIS-Daten fokussiert daher die Bestimmung von H und dT für die beiden Ankerpunkte unter Berücksichtigung des Mischpixelproblems und der jeweils aktuellen Wachstumsphase.

In METRIC wird dT_{cold} bestimmt durch

$$dT_{cold} = H - G - k * ET_{ref}$$

Dabei werden die Verhältnisse der feucht-kühlen Oberfläche am „kalten“ Ankerpunkt durch die Referenzevapotranspiration für Alfalfa (ET_{ref} , ASCE-EWRI, 2005) und einen k-Faktor, der bei gut bewässerten Bedingungen noch die hohe Bodenfeuchte berücksichtigen soll, ausgedrückt. Der k-Faktor soll weiterhin ermöglichen, das ausgewählte Feld gegenüber Feldern abzugrenzen, die zwar ebenfalls eine geschlossene und vitale Vegetationsdecke dafür aber weniger gute Bewässerungskonditionen aufzeigen. Der Wert wird von ALLEN et al. (2005) mit 1,05 angegeben. Dieser k-Faktor kann variiert werden, um die Situationen zu Beginn der Vegetationsperiode und zur Erntezeit zu berücksichtigen (ALLEN et al., 2005).

Durch die geringe räumliche Auflösung von MODIS ist es gerade im landwirtschaftlich genutzten Khorezm schwer, ein 1 km² umfassendes homogenes Pixel zu finden, der günstigerweise zum Aufnahmezeitpunkt optimal bewässert ist. In der Regel befinden sich innerhalb eines 1 km MODIS-Pixels, das überwiegend landwirtschaftlich genutzt wird, Straßen oder Wege, möglicherweise Häuser, kleinere Bewässerungs- und Entwässerungskanäle und eine schwankende Anzahl von Bäumen. Daher kann es schnell zu einer Über- oder Unterschreitung von ET_{ref} kommen, selbst wenn die Klassifikation an diesem Pixel einen hohen Grad an Homogenität aufweist (vergleiche Abbildung 6-2 und 6-3).

Zudem liegen homogene, vegetationslose und trockene Bedingungen aufweisende Pixel mit einer Flächenabdeckung von 1 km² nicht im Bewässerungsgebiet selbst, sondern in der angrenzenden Wüste. Da diese aber durch abweichende meteorologische Bedingungen gekennzeichnet ist,

⁸² Die Variablenwerte von H und dT am „heißen“ und „kalten“ Ankerpunkten werden nachfolgend analog mit „hot“ und „cold“ indiziert.

stellen MORSE et al. (2001) in diesem Fall die Gültigkeit der Linearitätsbeziehungen für dT und LST in Frage. Innerhalb des bewässerten Systems von Khorezm gibt es zwar Brachen, diese sind aber lediglich vegetationsarm und erreichen auch nie die Flächenabdeckung eines MODIS-Pixels. Selbst wenn ein Pixel durch große Brachflächen dominiert sein sollte, wird es teilweise doch von Kanälen und möglicherweise von Schilf oder Baumreihen durchzogen, die alle eine gewisse Verdunstung aufweisen.

Zusammenfassend wurden daher der von ALLEN et al. (2005) vorgestellte k-Faktor für “kalte” Ankerpunkte (k_{cold}) modifiziert und ein weiterer k-Faktor (k_{hot}) vorgestellt, der die Vegetationsbedeckung einer verhältnismäßig trockenen Oberfläche im Bewässerungsland abschätzen soll, die in einem Pixel integriert wird. Dieser k-Faktor integriert den NDVI und geht davon aus, dass sobald dieser den Wert der Wüste übersteigt (trotz leicht dunklerer Bodenfarbe im Bewässerungsgebiet), eine Vegetationsbedeckung zu finden ist. Bei einem NDVI unter 0,15 wird das Pixel als vegetationslos eingestuft. Da der NDVI für die an Khorezm angrenzende Kara-Kum (voll aride Oberfläche) im Schnitt 0,15 beträgt, wurde k_{hot} für einen NDVI größer als 0,15 definiert durch

$$k_{hot} = NDVI - 0,15.$$

Anderenfalls ist k_{hot} gleich Null. Für H ergab sich dann:

$$H = R_n - G - k_{hot}(NDVI) * \lambda ET_{ref}$$

Für k_{cold} wurde der von ALLEN et al.(2005) vorgeschlagene Wert von 1,05 eingesetzt. Es musste aber ausgeschlossen werden, dass auf Subpixelniveau Reis, Wasser oder eine andere landwirtschaftliche Nutzung zu finden ist. Dazu wurden die Ergebnisse der 250 m aufgelösten Landnutzungsklassifikation genutzt. Der Faktor wurde ebenfalls mittels des NDVI in den Randphasen der Vegetationsperiode angepasst, so dass zur Bestimmung von H folgende allgemeine Gleichung gilt, die k_{cold} als Funktion des NDVI und der Landbedeckung charakterisiert:

$$H = R_n - G - k_{cold}(NDVI, landcover) * \lambda ET_{ref}$$

6.2.2 Automatisierung der SEBAL-Anwendung auf tägliche MODIS-Daten

Die Auswahl der Ankerpunkte zur Anwendung von SEBAL werden in der Literatur als aufwändig beschrieben (BASTIAANSEN et al., 1998; MORSE et al., 2001). Häufig stehen mehrere Pixel zur Auswahl, wobei die Lage des Pixels im Verhältnis zur meteorologischen Station und der Repräsentativität einer möglichst großen Fläche zu erreichen versucht wird. Häufig stellen in einem Pixel integrierte Oberflächen, die sehr trocken und stark aufgeheizt oder feucht und kühl erscheinen (beispielsweise alleine aus der LST) nicht die optimalen Ankerpunkte für die Modellierung dar. Die Vegetationsdecke ist ebenfalls bei der Auswahl zu berücksichtigen (ALLEN et al., 2002).

Tabelle 6-5: Kriterien und Rechenregeln zur automatisierten Bestimmung der Ankerpunkte für SEBAL/METRIC.

„Kalte“ – feuchte Oberfläche		„Heiße“ – trockene Oberfläche	
Kriterium	Rechenregel	Kriterium	Rechenregel
Agrarisch genutztes Land	Wähle agrarische Landnutzungsklassen	Agrarisch genutztes Land	Wähle agrarische Landnutzungsklassen
Kein Wasser	Landnutzung ≠ „Reis“ Tatsächliche Landbedeckung ≠ „Wasser“	Kein Wasser	Tatsächliche Landbedeckung ≠ „Wasser“
Hoher Grad der Vegetationsbedeckung	Maximum (LAI)	Niedriger Grad der Vegetationsbedeckung	Landnutzung = „Brache“ Minimum (LAI)
Vermutete Evapotranspiration ist hoch	Minimum (LST)	Vermutete Evapotranspiration ist niedrig	Maximum (LST)

Zur automatisierten Bestimmung der Evapotranspiration über Waldgebieten in Europa benutzen VERSTRAETEN et al. (2005) eine Kombination aus NDVI und LST, um die Vegetationsbedeckung und Feuchtebedingungen auf ihre Extremwerte hin zu untersuchen. Dabei wird vom Kühlungseffekt der Evapotranspiration auf die Oberflächentemperatur ausgegangen. Ähnlich verhält es sich mit dem LAI, zu dem der Grad der Vegetationsdichte eine empirische Relation aufweist HUETE et al., 2002. ALLEN et al. (2002) ziehen zur Bestimmung der Ankerpunkte ebenfalls den LAI als Maß für die Dichte der Vegetationsdecke heran.

Für diese automatisierte Suche der beiden Ankerpunkte für den SEBAL/METRIC-Ansatz wird daher zum einen die Art der Oberflächenbedeckung mittels der Ergebnisse der Landbedeckungsklassifikation, zum anderen die Verdunstungskälte und der Vegetationsbedeckungsgrad über LST und LAI abgeschätzt (Tabelle 6-5). Die Werte dürfen lediglich agrarischen Landnutzungsklassen entstammen, wobei für das trockene Pixel Brachflächen aus der temporalen Analyse der Fruchtfolgen und dem Anbaukalender entnommen werden können. Reisfelder werden ebenfalls ausgeschlossen, da diese Flächen in der Initialphase von offenem Wasser dominiert sind. Für den Fall, dass eine Wasserfläche ausgesucht wird, verliert der Ansatz, die ET_{ref} von Alfalfa einzusetzen, seine Gültigkeit.

6.3 Berechnung von Tageswerten und Kompositbildung

Zunächst wird mittels SEBAL die latente Wärmeflussdichte in W/m^2 beim Überflug des Satelliten berechnet. Mittels der Verdunstungswärme, die besagt, wie viel Energie notwendig ist, um Wasser bei einer bestimmten Temperatur und unter einem bestimmten Druck zu verdunsten (Weischet, 1994), wurden die Modellierungsergebnisse in eine äquivalente Wassermenge transferriert. Dieser Ansatz wird von ALLEN et al. (2002) und von TASUMI et al. (2005) vorgeschlagen. An dieser Stelle besteht ein grundsätzliches Problem von SEBAL: Luftdruck und Temperatur sind nur an den meteorologischen Stationen bekannt. Bei der Überführung der

latenten Wärmeflüsse in Wassermengen werden diese Werte für jedes Pixel angenommen⁸³, obwohl deren Gültigkeit nur für ein bestimmtes Umfeld der meteorologischen Stationen besteht.

Es ergibt sich nun ein Verhältnis vom Modellierungsergebnis (ET_{act}) zur Referenzevapotranspiration (ET_{ref}). Dieses kann nach TASUMI et al.(2005) und ALLEN et al. (2005) für den Zeitraum eines Tages, aber auch bis zu einem halben Monat als fast konstantes Verhältnis angenommen werden. Die Annahme dieses konstanten Verhältnisses für einen Tag führte zunächst zur Ermittlung von Tagesmengen der Evapotranspiration (ET_{24}). Dazu wurden die Tagessummen der Referenzevapotranspiration (ET_{ref24}) mit ET_{act}/ET_{ref} multipliziert:

$$ET_{24} = ET_{ref24} * ET_{act} / ET_{ref}$$

Wie bereits in Kapitel 4.7 beschrieben, herrschten an 133 (2004) und 136 (2005) von 215 Tagen gute atmosphärische Bedingungen vor, die eine Modellierung der tatsächlichen Evapotranspiration erlaubten. An den übrigen Tagen fehlten geeignete Eingangsdaten, so dass eine Interpolation vorgenommen werden musste. Dazu wurde zunächst das Verhältnis von ET_{act}/ET_{ref} linear zwischen zwei Tagen interpoliert, für die Modellierungsergebnisse vorlagen. Mittels ET_{ref24} für die Tage, für die kein Modellergebnis vorlag, wurden dann Tageswerte der tatsächlichen Evapotranspiration berechnet und so die Lücken geschlossen.

Nach der Interpolation lagen nun auf MODIS-Eingangsdaten beruhende, tägliche Evapotranspirationsprodukte vor. Zum Einsatz der Ergebnisse für den Fortgang der Arbeit wurden 10-tägige, monatliche und saisonale Ergebnisse durch Summation der Tageswerte erzielt. Die saisonalen Ergebnisse wurden ein weiteres Mal unterteilt in eine Gesamtsumme für den Zeitraum vom 1. April bis zum 30. September und saisonale Teilsummen gemäß Anbaukalender (Tabelle 6-2).

6.4 Validierung

Zur Validierung eines Modellergebnisses bestehen grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten. Im optimalen Fall liegen *in situ* Messdaten für eine repräsentative Stichprobe der zu modellierenden Größe vor. Diese Messdaten sollten dabei dieselbe geometrische Abdeckung erfüllen wie das Modell. Beide Voraussetzungen waren für diese Dissertation nicht erfüllt, so dass als Alternative die Validierung mittels einer umfassenden Plausibilitätskontrolle der Eingangsgrößen sowie der Zwischen- und Endprodukte erfolgte und abschließend diskutiert wurden.

6.4.1 **Plausibilitätskontrolle statischer Eingangsparameter**

Um die Zielsetzung der Arbeit zu erreichen, war ein hoher Vorverarbeitungsgrad der Fernerkundungsdaten wünschenswert, was zur Auswahl der MODIS MODLand Produkte

⁸³ Würde man diese beiden Größen für jedes Pixel kennen, wäre man nicht auf die komplexe Berechnung des vertikalen Temperaturgradienten angewiesen

geführt hatte (Kapitel 4). Darunter fallen auch die von der NASA vorprozessierten Daten wie Albedo (α) und Emissionsgrad (ϵ), die für nicht-dynamische Oberflächentypen⁸⁴ als relativ konstante Eingangsparameter angesehen werden können. Durch die Ergebnisse der Landnutzungsklassifikation konnten diese Eingangsdaten vor der Modellierung klassenweise auf ihre Plausibilität untersucht werden. Grundsätzlich ist aber bei solchen Vergleichen darauf zu achten, dass die 1 km MODIS-Daten fast ausschließlich Mischpixel sind (Kapitel 6.1.2) und nur für einige Klassen, wie die kontinuierliche Wasserfläche oder die Wüste, als homogen betrachtet werden dürfen. Daher kamen klassenweise nur die homogenen 1 km-Pixel ($> 80\%$ einer Nutzung, Tabelle 6-3) bei der Plausibilitätskontrolle zum Einsatz.

Tabelle 6-6: Gegenüberstellung der MODIS-Albedo mit Literaturwerten für verschiedene Landnutzungsklassen.

Durchschnittliche Albedo aus MODIS-Daten	Landnutzungsklasse	Klassenbezeichner (Literatur)	Albedo (Literatur)
0,17	Baumwolle		
0,16	Reis	Reis ¹	0,17-0,22
0,17	Weizen & Reis		
0,18	Weizen & Folgenutzung		
0,18	Weizen	Weizen ¹ Weizen ²	0,14-0,22 0,16-0,22
0,18	Ländliche Siedlung		
0,19	Städtische Siedlung	Städtisches Gebiet ²	0,15
0,24	Wüste	Grauweißer Sand ¹ Weißgelber Sand ¹	0,18-0,23 0,34-0,4
0,17	Bäume und Gärten	Laubwald ¹ Laubwald ²	0,15-0,2 0,1-0,2
0,11	Variierende Wasserfläche		
0,08	Kontinuierliche Wasserfläche	Wasser ¹	0,025 – 0,2

Quellen: ¹ = ALLEN et al., 2002; ² = CAMPBELL und NORMAN, 1998

Literaturangaben aus unterschiedlichen Quellen für bestimmte Oberflächentypen erlaubten im Fall der Albedo einen Wertevergleich. Dazu wurden Mittelwerte der Albedo-Daten gebildet, die im zeitlichen Verlauf in einer Klasse erzielt und den Literaturwerten gegenübergestellt wurden (Tabelle 6-6). Die Ergebnisse sind akzeptabel, da leichte Variationen erklärt werden können. Bei Reis liegt die mittlere Albedo leicht unter den Literaturwerten, was darauf zurückzuführen ist, dass in der Literatur die frühen Wachstumsstadien nicht berücksichtigt wurden. In dieser Zeit dominiert das Wassersignal die Oberfläche von Reisfeldern, so dass wesentlich niedrigere Albedowerte zu erwarten sind. Für städtisches Gebiet liegen die fernerkundlich gemessenen Albedowerte höher als die Literaturangaben, was durch hellen Lehm als häufig verwendetes

⁸⁴ Nicht-dynamische Oberflächentypen umfassten hier solche Oberflächen ohne bedeutsame Änderung der Vegetationsbedeckung im Jahresgang, beispielsweise Wüste.

Baumaterial zu begründen ist. Für Pixel der Klasse „Wüste“ liegt die mittlere MODIS-Albedo zwischen den Literaturwerten von grauweißem und weißgelbem Sand. Aufgrund der unkonkreten Literaturspezifikationen der Farbe haben sie eine niedrige Aussagekraft. Da die Albedo-Werte sich aber innerhalb dieses Intervalls aufhalten, werden sie als plausiblen akzeptiert.

Für den Emissionsgrad lassen sich solche klassenweise durchgeführten Einschätzungen nur schwierig treffen. Ein Grund dafür liegt in der hohen Integrationsbreite der MODIS-Bänder 31 und 32 von je etwa $0,5 \mu\text{m}$, aber einer doch insgesamt sehr geringen Abdeckung des thermalen Spektrums. Dazu kommt, dass bei der Umrechnung der Strahldichten in Emissionsgrade bestimmte Landbedeckungsklassen vorausgesetzt wurden (Kapitel 4.4.3). Diese werden aber im Jahrgang nicht verändert, so dass lediglich leichte Anpassungen von ϵ an die gemessenen Strahldichten zu erwarten sind, nicht aber moderate Veränderungen durch die Vegetationsbedeckung.

Daher wurden lediglich zwei Klassen untersucht: Baumwolle als Vertreter einer im Jahrgang zum Teil von Boden, zum Teil von Vegetation bedeckten Klasse, und Wüste, von der wenige Veränderungen im Jahrgang erwartet wurden. Zusätzlich kann noch bemerkt werden, dass nach OGAWA et al. (2002) Vergleiche der MODIS-Produkte mit aus spektralen Bibliotheken gewonnenen Emissionsgraden (100 Datensätze) zu einer Differenz von 0,01 geführt haben und die Genauigkeit des Produkts als hoch eingeschätzt wurde.

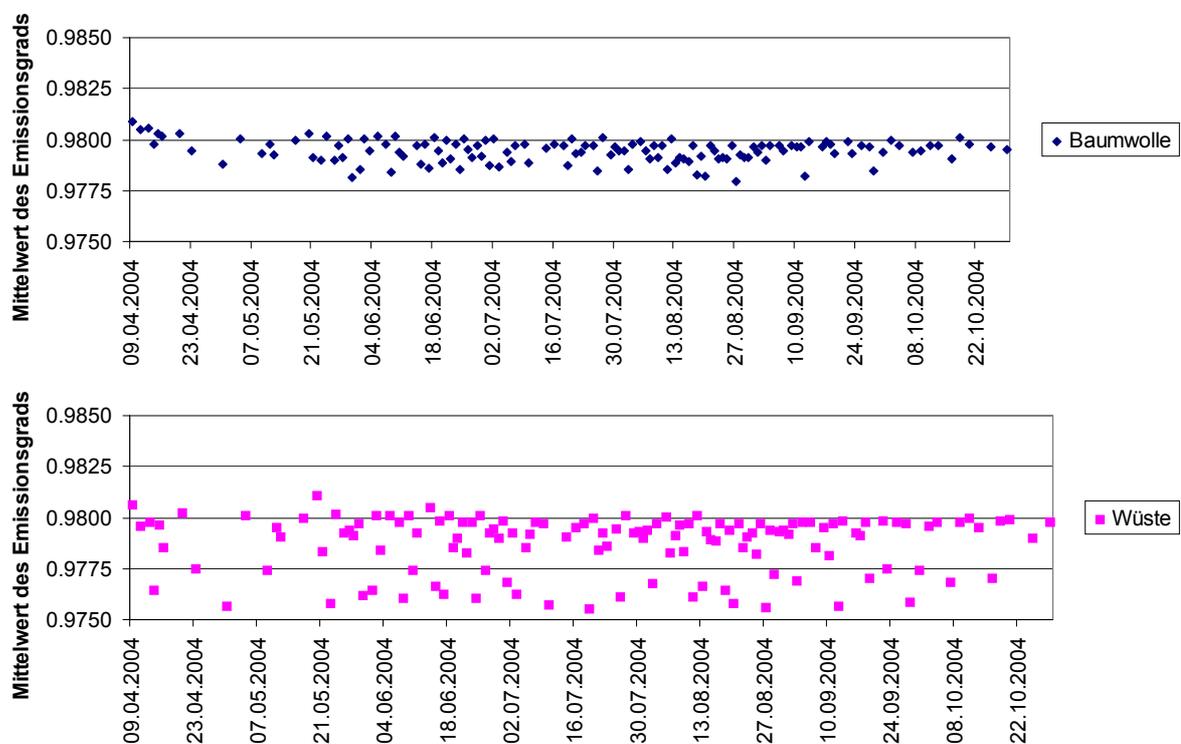


Abbildung 6-4: Klassenweise zusammengefasste Emissionsgrade für Baumwolle (oben) und Wüste (unten) für Khorezm im Jahrgang 2004, abgeleitet aus täglichen MOD11-Produkten und der Landnutzungsklassifikation.

Abbildung 6-4 zeigt die Mittelwerte der Emissionsgrade für Pixel der Klassen „Baumwolle“ und „Wüste“. Die Variation im Fall von Baumwolle liegt unter 0,002 %. Im Jahresgang ist aber keine merkliche Reaktion von einem Boden- zum Vegetationssignal zu sehen. Das mag an der Ähnlichkeit der Emissionsgrade für beide Oberflächentypen liegen, wahrscheinlich liegt die Ursache aber, wie erwähnt, im Prozessieralgorithmus für MOD11A1-Daten. Für die Emissionsgrade der Wüste wurde hingegen (materialabhängig) ein konstanter Jahresgang erwartet (OGAWA und SCHMUGGE, 2003), allerdings zeigt diese Klasse höhere Schwankungen als die Baumwolle. Insgesamt wurden die Variationen im Jahresgang daher entweder als Kalibrationsprobleme oder als eine unzureichende Korrektur der schwankenden atmosphärischen Einflüsse (Aerosole) bei der Produkterstellung interpretiert.

Allerdings sind die Variationen vernachlässigbar, da ihr Einfluss auf die Strahlungsbilanz und auf die Evapotranspirationsmodellierung als gering einzuschätzen ist. Selbst wenn ein Fehler von 0,004 % für ϵ angenommen werden würde, läge bei einer maximalen langwelligen Einstrahlung von 500 W/m^2 (ALLEN et al., 2002) die äquivalente Menge des Stundenwertes ET_{act} unter 0,001 mm. Daher wurden auf eventuell mögliche Korrekturen dieser Eingangsdaten verzichtet.

6.4.2 Plausibilitätsuntersuchungen für die Zwischenprodukte

Zur Untersuchung der Zwischenprodukte der Modellierung auf ihre Plausibilität eignete sich zum einen das Ergebnis der modellierten Netto-Strahlungsbilanz, da für ein Pixel, in dem eine meteorologische Station gelegen ist, Modellergebnis und Messwert verglichen werden können. Andererseits konnten die Rauigkeitslängen für den Impuls (z_{0m}), die aus dem Verhältnis zwischen LAI und Pflanzenhöhe hervorgingen und zur Berechnung des fühlbaren Wärmeflusses dienten (Kapitel 3.2.2), mittels Literaturwerte auf deren Plausibilität analysiert werden. Für die Bodenwärmeflüsse oder die fühlbare Wärme bestanden keine Validierungsmöglichkeiten.

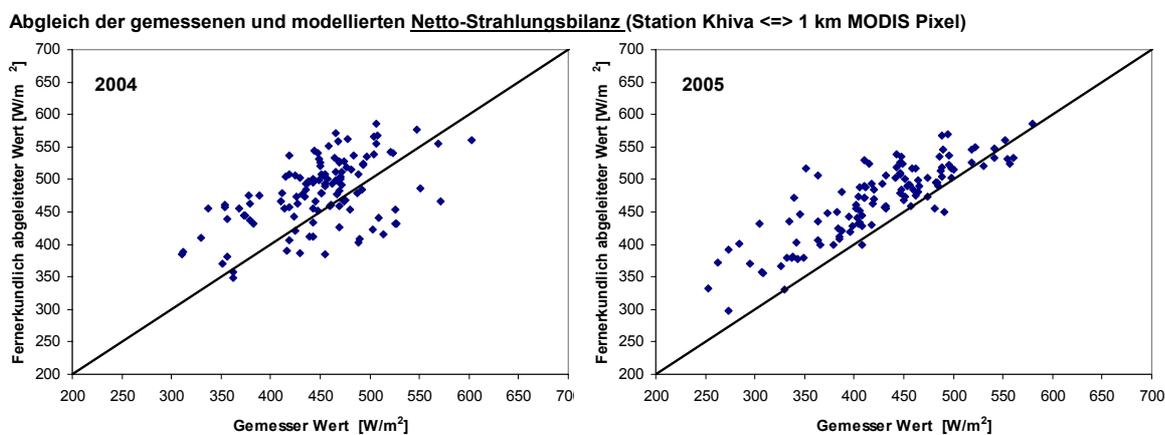


Abbildung 6-5: Abgleich modellierter und gemessener Netto-Strahlungsbilanzen [W/m^2] für die Station Khiva. Zur Vergleichbarkeit wurde die Winkelhalbierende eingetragen.

Zur Untersuchung der Netto-Strahlungsbilanz wurden die Daten der Station Khiva verwendet, da für diese Daten vollständige Zeitreihen vorlagen (Kapitel 6.1.1). Abbildung 6-5 zeigt die Streudiagramme der gemessenen und modellierten Werte für die Jahre 2004 und 2005 an der Station Khiva. Weiter ist die Winkelhalbierende in die Diagramme eingetragen, die bei absoluter Gleichheit der Ergebnisse alle Punkte umfassen müsste. Für die Jahre 2004 und 2005 konnten im Mittel Überschätzungen bei der Modellierung von 45 W/m^2 und 29 W/m^2 festgestellt werden.

Die Abweichungen beim Vergleich der Strahlungsbilanzen basierten auf verschiedenen Ursachen: Zum einen repräsentierten die Ergebnisse der Modellierung einzelnes Pixel mit 1 km^2 Grundfläche im Gegensatz zur Punktmessung an der meteorologischen Station; zum anderen variierten die Aufnahmezeitpunkte der beiden Vergleichsgrößen, da bei den meteorologischen Stationen Integrale über halbstündige Messungen aufgezeichnet wurden, während bei Satellitenüberflug nur eine momentane Situation erfasst werden kann. Um letzterem entgegenzuwirken, wurden die halbstündigen Messwerte auf den Zeitpunkt der Satellitenaufnahme interpoliert. Dies kann aber nur als Annäherung an den tatsächlichen Zustand zum Aufnahmezeitpunkt verstanden werden. Viel wichtiger erschien, dass für das die meteorologische Station umgebende Pixel aufgrund des niedrigen Vegetationsanteils höhere Albedowerte zu erwarten waren als für die dort angenommene Grasbedeckung. Daher wurden die Modellierungsergebnisse der Netto-Strahlungsbilanz als plausibel angenommen, auch wenn eine leichte Überschätzung des Strahlungsangebotes und damit der modellierten ET_{act} nicht gänzlich ausgeschlossen werden konnte.

Mittels der Landnutzungsklassifikation wurden für die agrarischen Landnutzungen die modellierten Oberflächenrauigkeiten (z_{0m}) für die Vegetationsperiode abgeleitet (Abbildung 6-6). Insbesondere die zeitliche Entwicklung der Oberflächenrauigkeiten für Reis im Jahr 2004 zeigt sehr deutlich die Zunahme der Rauigkeit mit steigender Vegetationsbedeckung. Bis Ende Juni liegen die Werte für z_{0m} bei $0,02 \text{ m}$, was in diesen Daten die Bodenverhältnisse repräsentieren soll. Dann steigt der Wert bis Ende August sehr schnell auf über $0,09 \text{ m}$ an, um dann im Mittel zur Erntezeit wieder in den Wertebereich der Oberflächenrauigkeiten für Boden zu fallen. Die Fruchtfolgen mit Winterweizen zeigen zwei Anstiege, wobei die Maximalwerte für den Winterweizen knapp unter $0,05 \text{ m}$ liegen. Für Baumwolle wurden im Mittel maximale Werte für die Rauigkeitslänge von $0,075 \text{ m}$ erreicht.

Wiederum spielt die räumliche Integration von 1 km^2 des MODIS-Pixels eine wichtige Voraussetzung zum Abgleich dieser Daten mit den Literaturquellen für z_{0m} unterschiedlicher agrarischer Oberflächentypen. Für einen 50 cm hohen, dichten Gräserbestand wurde nach HANSEN (1993) z_{0m} mit Werten von $0,09 \text{ m}$ empirisch ermittelt. Potenziell vergleichbare Werte für Reis (mittleres Maximum 2004 = $0,741 \text{ m}$), aber auch für Weizen (mittleres Maximum 2004 = $0,45 \text{ m}$) unterschreiten diese Wertmarke. Aus den Abbildungen 6-2 und 6-3 und Tabelle 6-3 geht

allerdings hervor, dass die Landnutzung innerhalb eines Pixels, insbesondere mit Winterweizen, nur selten 80% der Pixelabdeckung erreicht.

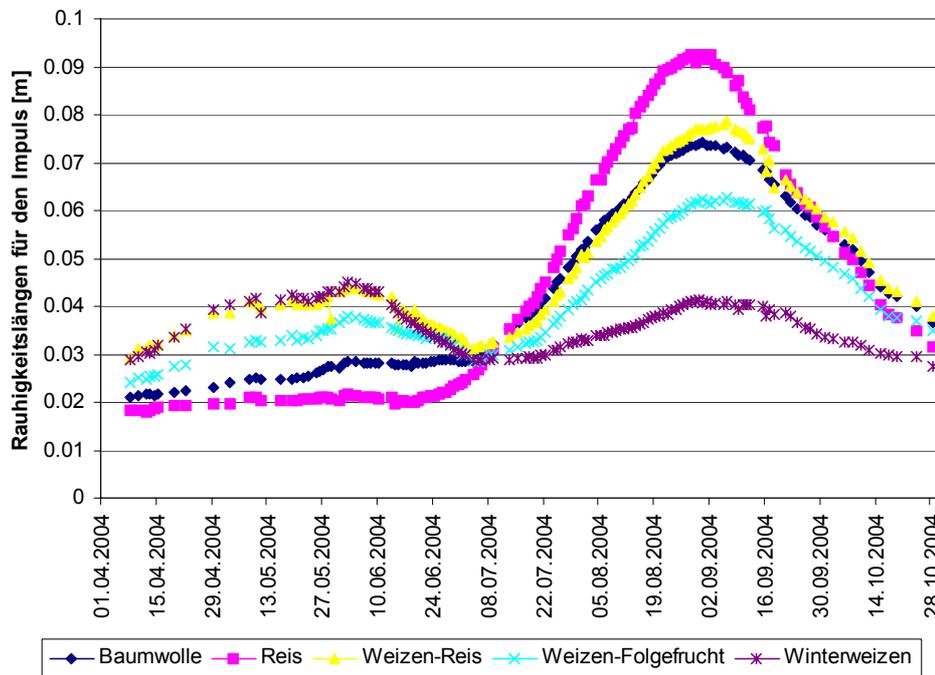


Abbildung 6-6: Zeitlicher Verlauf (exemplarisch Vegetationsperiode 2004) der Rauigkeitslängen für den Impuls bezogen auf die agrarischen Landnutzungen und Fruchtfolgen in Khorezm.

Für die Werte von z_{0m} des Bodens, die auf Baumwoll- und Reisfeldern in der ersten Jahreshälfte, in auf Winterweizen folgender Brache in der zweiten Jahreshälfte angenommen werden müssen, werden in der Literatur mit 0,002 m bis 0,006 m geringfügig niedrigere Werte als modelliert angegeben (HANSEN, 1993). Hier scheint die eingesetzte Gleichung (Kapitel 3.2.2) schnell zu Überschätzungen zu führen. Allerdings existiert innerhalb eines MODIS-Pixels immer ein gewisser Grünanteil (Baumreihen, Unkraut oder Gärten), so dass bis auf wenige Ausnahmen kein reiner Bodenwert vorausgesetzt werden kann. Einer mit dünnem Gras bestandene Fläche wird bei ALLEN et al. (2002) ein Wert für z_{0m} von 0,02 m zugewiesen.

Für eine 1,3 m hohe Baumwolle werden in der Literatur Rauigkeitslängen von 0,13 m eingesetzt (HANSEN, 1993), was bei der Modellierung im Mittel stark unterschätzt wurde (mittleres Maximum $z_{0m} = 0,741$). Allerdings repräsentieren die Pixel der Klasse „Baumwolle“ mehr als 50 % der Fläche von Khorezm. Die Literaturwerte setzen eine geschlossene Vegetationsdecke voraus, die aber in Khorezm nur in seltenen Fällen angetroffen werden kann (Abbildung 6-7). Ebenso wurde die Wuchshöhe von 1,3 m in Khorezm nicht konstant erreicht (vergleiche BLENK, 2005).



Abbildung 6-7: Baumwollfelder in Khorezm, Aufnahmen aus der Erntezeit (Oktober), links sehr heterogene Wechsel zwischen Vegetation und Boden, rechts homogene Vegetationsbedeckung.

6.4.3 Genauigkeitsabschätzung der Modellierungsergebnisse

Für eine Validierung der Modellierungsergebnisse sollten also insbesondere Messdaten für landwirtschaftliche Flächen untersucht werden. Dafür lagen – wie bereits erwähnt – für diese Arbeit allerdings keine Aufzeichnungen vor. Alternativ kamen daher Plausibilitätsuntersuchungen zum Einsatz. Zunächst wurden die Punktmessdaten sogenannter *class-A*-Evaporationspfannen mit den Modellierungsergebnissen (ET_{act}) über Wasserflächen verglichen. Die Bestimmung der pflanzenspezifischen potenziellen Evapotranspiration (ET_{crop}) wurde auf Basis der Landnutzungs-klassifikation durchgeführt, um einen Vergleich mit ET_{act} zu ermöglichen.

6.4.3.1 Vergleich von ET_{act} über Wasseroberflächen mit *in-situ* Evaporationsmessdaten

Zur Validierung der Modellierungsergebnisse, die über Wasserflächen erzielt wurden, standen in dieser Arbeit täglich aufgezeichnete Punktdaten aus Evaporationspfannen (*class-A-pan*) zur Verfügung, die an den zwei meteorologischen Stationen in Khorezm positioniert waren (Kapitel 6.1.1). Diese Daten wurden im Untersuchungszeitraum in parallel laufenden Arbeiten erhoben und für diese Arbeit zur Verfügung gestellt (KHAMZINA, 2006; FORKUTSA, 2006).

Class-A-pans (Abbildung 6-8) haben gewöhnlich eine Wasseroberfläche von $1,14 \text{ m}^2$ und eine mittlere Tiefe von 20 cm (SCHÖNINGER und DIETRICH, 2004). Die Evaporation wird durch mehrmalige visuelle Aufzeichnung des Pegels in der Evaporationspfanne protokolliert. Das Verfahren ist einfach, führt aber zu unsicheren Ergebnissen. Eine Fehlerquelle dieser Messmethodik liegt bereits in der Größe der Verdunstungspfanne: Durch den sogenannten Oaseneffekt (SCHÖNINGER und DIETRICH, 2004) wird ET_{pot} überschätzt, da zu kleine Flächen einen erhöhten Wasserumsatz mit sich führen. Weitere Messfehler können durch trinkende Tiere oder durch vom Regen verursachte Splash-Effekte entstehen. Ablesefehler führen ebenfalls zu einer ungünstigen Beeinflussung der Messwerte.



Abbildung 6-8: Die meteorologische Station in Khiva, im Vordergrund eine *class-A-pan* (Foto: FORKUTSA, 2006).

Es ist aber grundsätzlich anzunehmen, dass – insbesondere bei großräumig stabilen Wetterlagen – ein gleich bleibendes Verhältnis zwischen den Messwerten der beiden meteorologischen Stationen in Khorezm bestehen sollte. Ebenfalls wird ein statistischer Zusammenhang Pfannenevapotranspiration (E_{pan}) und ET_{pot} erwartet, die in einen Umrechnungsfaktor münden (ALLEN et al., 1998). Beides war für die ermittelten Fälle nicht gegeben: Die E_{pan} -Daten der beiden meteorologischen Stationen variierten untereinander für einzelne Tage sehr stark. Auch ein Zusammenhang zwischen E_{pan} und ET_{pot} konnte für die vorhandenen Messwerte ebenfalls nicht gefunden werden. Daher erschien ein Datenabgleich der mittels der beiden Evaporationspfannen aufgezeichneten Messdaten untereinander und mit den meteorologischen Daten sinnvoll, um Inkonsistenzen aus den Daten für die Validierung zu entfernen.

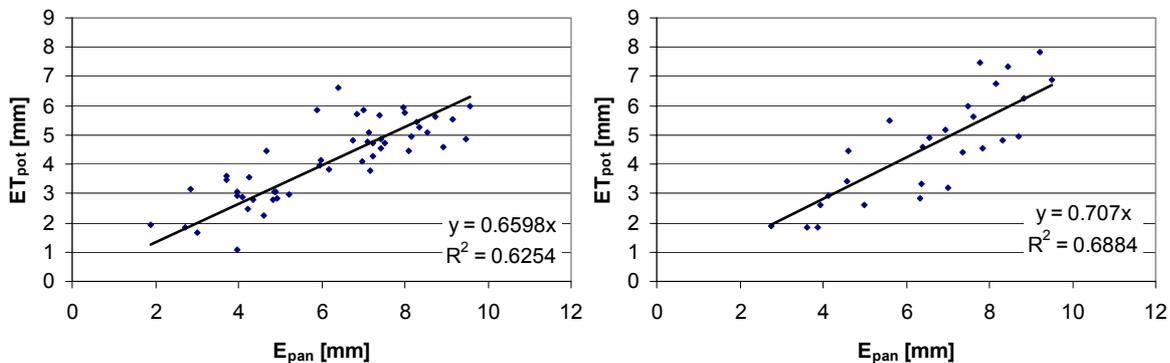


Abbildung 6-9: Streudiagramme der gemessenen Evaporation (E_{pan}) und der aus den meteorologischen Daten ermittelten potenziellen Evapotranspiration (ET_{pot}) der Station Yangibazar (60°37'12" Ost und 41°39'10" Nord, links 2004, rechts 2005).

Zur Reduktion von Fehlern gingen nur die Werte in die Validierung ein, für die zwischen den Messergebnissen der Stationen Khiva und Yangibazar eine Korrelation vorlag. Für das Jahr 2004 ergaben sich so 50, für das Jahr 2005 lediglich 30 „gültige“ E_{pan} -Messwerte. Statistisch überprüft wurde diese Annahme durch ein Streudiagramm und die erneute Korrelation der ausgewählten E_{pan} -Daten mit ET_{pot} (Abbildung 6-9). Eine statistisch signifikante, mittlere Korrelation ($r^2 = 0,63$

für 2004, $r^2 = 0,69$ für 2005) konnte gefunden werden. Der Umrechnungskoeffizient zwischen E_{pan} und ET_{pot} (entspricht dem Steigungsfaktor in Abbildung 6-9) variierte zwischen den beiden Beobachtungsjahren nur schwach (2004: 0,66; 2005: 0,71), was die Plausibilität der gefundenen Relation verstärkt.

Nach dieser umfangreichen Filterung akzeptabler Messergebnisse der Evaporationspfannen wurden nun die E_{pan} und die ET_{pot} -Daten den Modellierungsergebnissen (ET_{act}) gegenübergestellt (Abbildung 6-10). Dazu wurden mittels der Ergebnisse der Landnutzungsclassifikation im GIS die Pixel der Klasse „Wasser“ extrahiert, die innerhalb einer 15 km-Umgebung der meteorologischen Station lagen. Die Korrelationskoeffizienten zwischen den jeweils verglichenen Variablen wurden berechnet und auf ihre Signifikanz untersucht (BAHRENBERG et al., 1999). Danach waren für beide Jahre mittlere, aber signifikante Zusammenhänge anzunehmen.

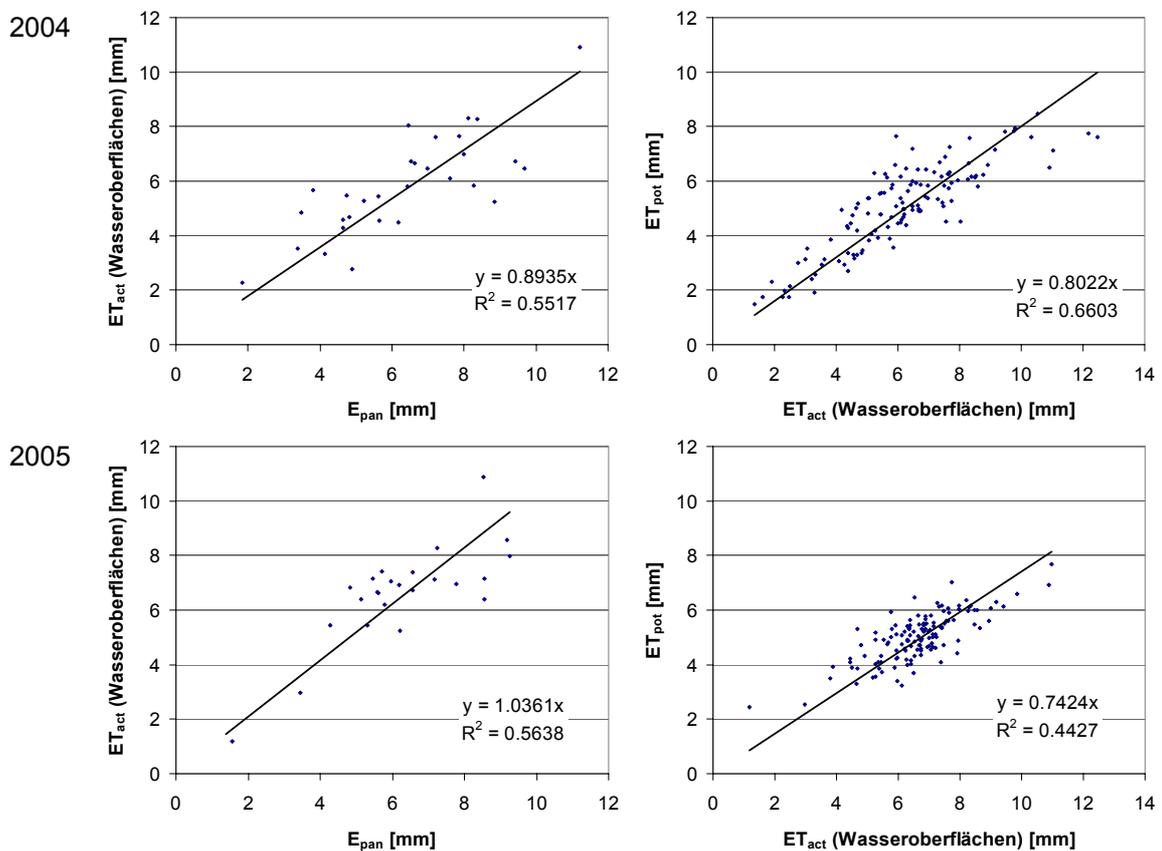


Abbildung 6-10: Streudiagramme zur Validierung der ET-Modellierung. Gegenüberstellung der modellierten ET_{act} mit E_{pan} (links) und ET_{pot} (rechts) für die Jahre 2004 (oben) und 2005 (unten).

Die Steigung der Trendlinie (Abbildung 6-10, links oben) zeigt, dass im Jahr 2004 die über Wasseroberflächen niedrigere Werte modelliert als gemessen wurden. 2005 wurden hingegen vergleichbare Werte modelliert und gemessen (links unten). Die Abweichungen von der Trendlinie lagen bis auf zwei Ausnahmen 2004 alle unter 2,5 mm. Erwartungsgemäß liegt die

modellierte ET_{act} über Wasseroberflächen in beiden Jahren um etwa ein Drittel über ET_{pot} (Abbildung 6-10, rechts). Vereinzelt konnten Abweichungen um mehr als 2 mm vom Erwartungswert (Trendlinie) aufgezeichnet werden.

Obwohl diese Ergebnisse akzeptabel erscheinen, kann dieser Vergleich mit Wasseroberflächen aber aus verschiedenen Gründen nur bedingt als angemessene Validierung der SEBAL-Modellierungsergebnisse angesehen werden, denn:

- *Class-A*-Evaporationspfannen liefern unsichere Ergebnisse. Weiterhin repräsentieren sie auch nicht die tatsächlichen Verhältnisse über einem natürlichen Wasserkörper, da sie flach sind und in realen Gewässern ein wesentlich höherer Wärmeaustausch in die Tiefe existiert (Oaseneffekt der *class-A-pan*, SCHÖNINGER und DIETRICH, 2004).
- SEBAL und METRIC sind für landwirtschaftliche Flächen optimiert. Die Energieflüsse zur Erwärmung der Gewässer basieren überwiegend auf Literaturwerten.

6.4.3.2 Vergleiche über agrarischen Nutzflächen

Die Evapotranspiration über einer Vegetationsoberfläche steigt – vereinfacht formuliert – bei optimaler Wasserversorgung mit zunehmender Höhe und Blattmasse eines Bestandes. Über die Saison hinweg entwickelt sich bei ungestörtem Wachstum ein Verlauf der Evapotranspiration, der sich an der potenziellen Evapotranspiration (ET_{pot}) orientiert. Nach den Standards der *Food and Agriculture Organization* (FAO-56, ALLEN et al., 1998) kann die pflanzenspezifische potenzielle Evapotranspiration (ET_{crop}) innerhalb einer Vegetationsperiode daher durch die ET_{pot} und sogenannte *crop coefficients* (K_c) ermittelt werden:

$$ET_{crop} = K_c * ET_{pot}$$

Die K_c -Werte sind pflanzenspezifisch (hinsichtlich Oberflächengestalt und Pflanzenphysiognomie) und schwanken je nach Wachstumsstadium und der geographischen Lage. Die Vegetationsperiode wird nach ALLEN et al. (1998) in vier Stadien unterteilt:

- 1) Initialphase (*initial stage*): Sehr frühes Wachstumsstadium, Austreiben der Keime. Der *crop coefficient* wird überwiegend durch Bodenverdunstung bestimmt.
- 2) Entwicklungsphase (*crop development*): Vegetative Phase der Pflanzenentwicklung. Der Pflanzenbedeckungsgrad sowie die Bewässerung bestimmen die Anteile der Evaporation des Bodens und der Transpiration der Pflanzen. Es kann vereinfacht ein linearer Anstieg der K_c -Werte angenommen werden.
- 3) Mittlere Wachstumsphase (*mid-season*): Stadium der vollständigen Bodenbedeckung über die Ertragsbildung bis zum Beginn der Reifezeit. Hier erreichen die K_c -Werte ihren Höchststand und werden als konstant angenommen.
- 4) Reifezeit und Ernte (*late season*): Reifezeit und Ernte. Die *crop coefficients* sinken stark ab.

Für die Untersuchungen in Khorezm wurden die in Tabelle 6-6 aufgeführten Werte sowohl für die Dauer des Pflanzenwachstums als auch für die *crop coefficients* angenommen. Sie beruhen auf experimentell für Khorezm erhobene Daten, die dem GIS-Labor in Urgench von SANIIRI in Tashkent zur Verfügung gestellt wurden, sowie auf Ergänzungen aus im Jahre 2003 durchgeführten Untersuchungen auf Baumwollfeldern im Rayon Khiva (FORKUTSA, 2006) und internationalen Standards (ALLEN et al., 1998).

Sowohl für die Dauer der Wachstumsphasen als auch für die Pflanzenwachstumskoeffizienten zeigt Tabelle 6-7 deutliche Unterschiede. Für Reis liegen die von SANIIRI ermittelten K_c -Werte deutlich unterhalb der von der FAO angegebenen Standards und die Wachstumsphasen sind verschoben. Beispielsweise wird für die wasserintensive *mid-season* in den FAO-Standards eine doppelte Wachstumsdauer im Vergleich zu den regional erhobenen Daten angegeben⁸⁵. Hinsichtlich der *crop coefficients* kommt hinzu, dass die Bewässerungsbecken in der initialen Wachstumsphase fast ausschließlich von Wasser bedeckt sind. Für diesen Zeitraum müssten bereits theoretisch ET_{crop} -Werte von über 1,0 erreicht werden (ALLEN et al., 1998). Nach der FAO werden für die initiale Phase des Pflanzenwachstums von Reis sogar je nach Windgeschwindigkeit in aridem Klima K_c -Werte von bis zu 1,2 angenommen (ALLEN et al., 1998).

Tabelle 6-7: Wachstumsstadien und *crop coefficients* für Winterweizen, Reis und Baumwolle in Khorezm

Name	Dauer der Wachstumsphase [Tage]				Crop coefficients		
	Initial stage	Crop development	Mid-season	Late-season	Initial stage	Mid-season	Late-season
Winterweizen ¹	20	185	30	25	0,3	1,15	0,25
Reis ¹	50	25	30	30	0,8	1,15	0,6
Reis ²	30	30	60	30	1,05	1,20	0,90 – 0,60
Baumwolle ¹	60	50	60	55	0,35	1,2	0,7
Baumwolle ²	30	50	55	45	0,35	1,15	0,7
Baumwolle ³	24	47	55	35	0,2	1,15	0,65

Quellen: ¹: mündliche Mitteilung von SANIIRI, Tashkent; ²: ALLEN et al., 1998; ³: FORKUTSA, 2006

Weiterhin deckten sich die von FORKUTSA (2006) ermittelten Wachstumsphasen für Baumwolle leichter mit den Standardwerten der FAO als mit den von SANIIRI angegebenen Werten. Die eingesetzten K_c -Werte sind im Gegensatz dazu gemäß Tabelle 6-7 wieder vergleichbar (geringfügig niedriger). Dennoch machten sich diese Unterschiede letztendlich in der Bestimmung von ET_{crop} deutlich bemerkbar.

⁸⁵ Dieser Unterschied konnte auch mit Hilfe anderer Studien nicht bewertet werden. MOHAN und ARUMUGAM (1994) geben bei einer Untersuchung in Indien (humides Klima) für den Anbau in der Trockenzeit beispielsweise Wachstumsphasen an, die mit den SANIIRI-Daten vergleichbar sind, für die Regenzeit ähneln die Werte den FAO-Standards.

Tabelle 6-8: Zeitliche Zuordnungen des Beginns der vier Wachstumsphasen von Reis, Baumwolle und Winterweizen in Khorezm gemäß unterschiedlicher Quellen.

Name	<i>Initial stage</i>	<i>Crop development</i>	<i>Mid-season</i>	<i>Late-season</i>
Winterweizen¹	03. Oktober	23. Oktober	25. April	25. Mai
Reis¹	10. Mai	01. Juli	26. Juli	25. August
Reis²	10. Mai	09. Juni	09. August	07. September
Baumwolle¹	01. April*	01. Juni	25. Juli	25. September
Baumwolle²	15. April	15. Mai	09. Juli	01. September
Baumwolle³	24. April	18. Mai	05. Juli	31. August

* Der Zeitpunkt für den Beginn des Baumwollanbaus wurde für die SANIIRI-Daten auf 1. April gelegt, da ansonsten bis in den November Baumwolle angebaut würde, was temperaturbedingt gar nicht möglich ist.

Quellen ¹: mündliche Mitteilung von SANIIRI, Tashkent; ²: ALLEN et al., 1998; ³: FORKUTSA, 2006)

Tabelle 6-8 enthält die pflanzenspezifische Zuordnung der Wachstumsphasen für die Anbaufrüchte in Khorezm (in Anlehnung an den Anbaukalender, vergleiche Kapitel 6.1.2, und die oben getroffenen Unterscheidungen von regionalen Studien und FAO-Standardwerten). Die Anbauzeitpunkte können in Khorezm innerhalb eines Jahres um mehrere Wochen variieren (vergleiche BLENK, 2005), so dass sie lediglich als Richtwerte herangezogen werden konnten. Die Ableitung von ET_{crop} erfolgte nach obiger Gleichung durch die Verknüpfung mit der aus meteorologischen Daten berechneten ET_{pot} .

Nach Berechnung der pflanzenspezifischen Evapotranspiration (Erwartungswert) dienten zwei Ansätze zur Validierung des Modellierungsergebnisses. Zunächst wurden für die Dekadenwerte (10-tägige Komposite) der mit Baumwolle und Weizen als dominanter Nutzung bestandenen Pixel im 1 km-Raster die Ergebnisse der ET-Modellierung (ET_{act}) der pflanzenspezifischen ET_{crop} gegenübergestellt. Die Extraktion der Pixelwerte erfolgte in einem 15 km Umkreis zur meteorologischen Station in Yangibazar aufgrund der Annahme, dass durch den Lagebezug die Modelliergenauigkeit am höchsten liegt. Im zweiten Ansatz wurde für ganz Khorezm durch Summation täglicher Modellierungsergebnisse die saisonale ET_{act} berechnet, wobei die in Tabelle 6-7 angenommenen Vegetationsperioden für die Anbausorten zugrunde gelegt wurden. Diese ET-Summen mit saisonalen Werten für ET_{crop} verglichen. Dieser Schritt wurde für die Klassen Reis, Baumwolle und Winterweizen durchgeführt und auch anhand der Literaturwerte diskutiert.

Bei der Gegenüberstellung der zehntägigen Komposite lagen für Winterweizen (Abbildung 6-11; a...2004 und b...2005) die aggregierten ET_{act} lediglich Anfang April 2004 noch über ET_{pot} ansonsten wurde ET_{crop} unterboten. Die Ergebnisse sind plausibel, da zum einen die Flächen für Winterweizen selten eine Ausdehnung von 1 km² (MODIS-Pixel) erreichten und zum anderen die Weizenflächen in Geländebeobachtungen heterogene Bedeckungsgrade aufwiesen. Diese waren entweder auf mangelnde Düngergabe, unsachgemäßes Planieren und Entsalzen der Felder vor Aussaat oder auf mangelnde Wasserverfügbarkeit zurückzuführen⁸⁶. Die Summation der ET_{act}

⁸⁶ Mündliche Mitteilung einiger Farmer im Untersuchungsgebiet.

im Untersuchungszeitraum (Tabelle 6-9) ergab dasselbe Bild: Der modellierte tatsächliche Wasserverbrauch durch Evapotranspiration auf Weizenflächen rangierte bei 85 % (2004) und bei 79 % (2005) des erwarteten Ergebnisses.

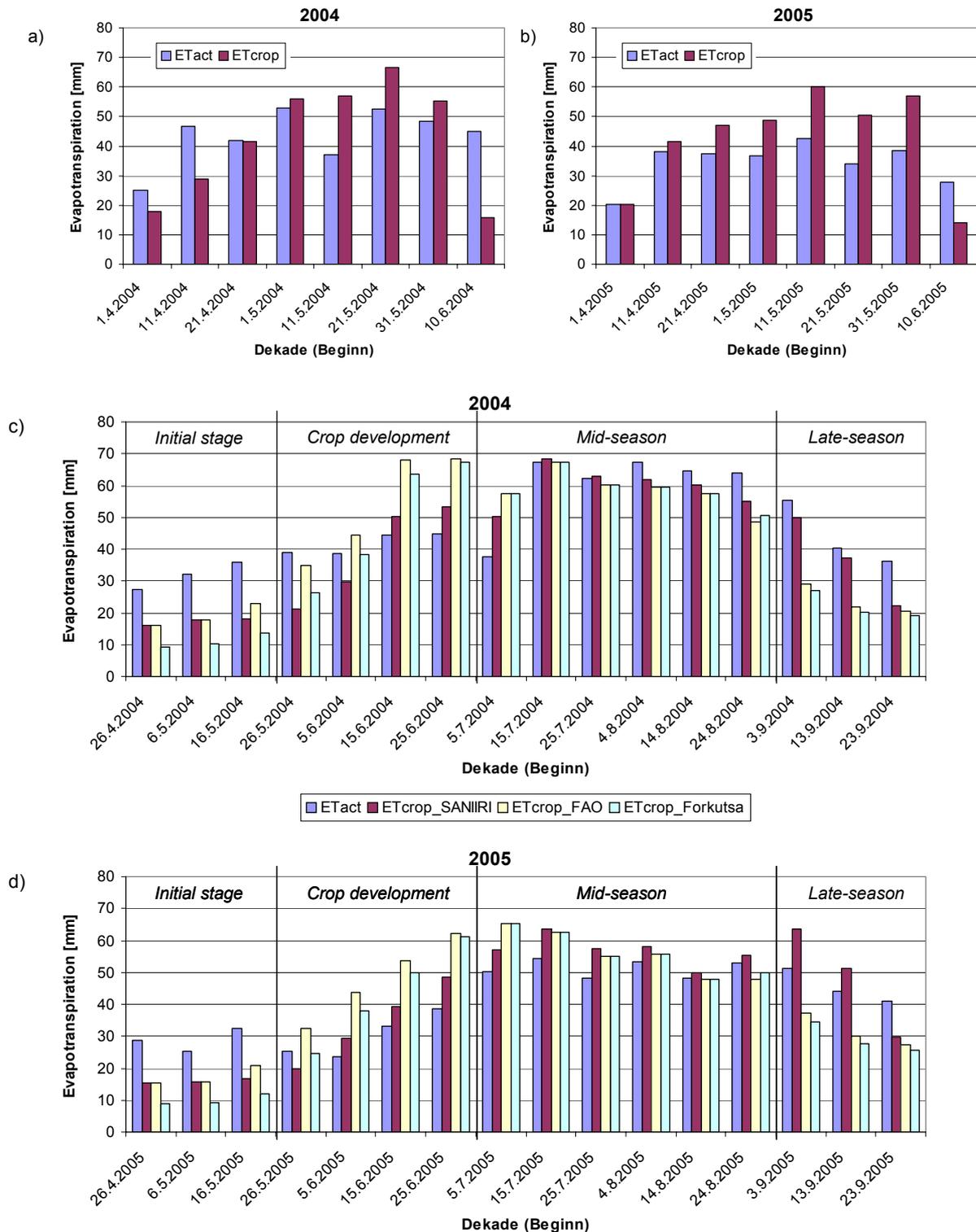


Abbildung 6-11: Gegenüberstellung 10-tägig summierter Modellergebnisse ET_{act} und pflanzenspezifischer ET_{crop} für Weizen (a und b) und Baumwolle (c und d) der Jahre 2004 und 2005. ET_{act} wurde aus Mittelwerten für die jeweiligen landwirtschaftlichen Nutzungen im nahen Umkreis der meteorologischen Station Yangibazar extrahiert.

Für die Baumwollflächen in der Umgebung der meteorologischen Station Yangibazar wurde der Vergleich mit den von SANIIRI bereitgestellten Pflanzenwachstumscoeffizienten, den FAO-Standards und den Ergebnissen der zitierten regionalen Studie durchgeführt (Abbildung 6-11; c...2004 und d...2005). Die Validierung basierte dabei auf der Annahme, dass die regional erhobenen *crop coefficients* die tatsächliche Situation im Untersuchungsgebiet repräsentierten, die FAO-Standards wurden wegen der Inkonsistenzen der regionalen Daten als Diskussionsgrundlage hinzugezogen.

Grundsätzlich zeigten die Modellierungsergebnisse (ET_{act}) für die ersten drei Dekaden der Sommersaison (2004 und 2005) eine deutliche Überschätzung (minimal 45 % im Vergleich mit den SANIIRI-Daten, maximal 300 % im Vergleich mit FORKUTSA, 2006) der berechneten ET_{crop} . Im Großteil der vegetativen Phase (erste bis letzte Junidekade) blieben die Modellergebnisse unter den Erwartungswerten. Dies deckte sich mit den Resultaten der Studie von FORKUTSA (2006). Darin konnten diese Ergebnisse bei Untersuchungen auf Feldebene mit einer zu spät einsetzenden Bewässerung der Baumwolle begründet werden⁸⁷. Für die *mid-season* waren ab der zweiten Julidekade im statistischen Mittel innerhalb der Umgebung der meteorologischen Station Yangibazar nur geringe Abweichungen der Modellierungsergebnisse von ET_{crop} für Baumwolle festzustellen. Im Jahr 2004 übertrafen die Modellierungsergebnisse ET_{crop} geringfügig, 2005 lagen sie knapp darunter. Insgesamt wurde in beiden Jahren eine hohe Ähnlichkeit der Modellierungsergebnisse mit den auf SANIIRI-Daten basierenden Erwartungswerten konstatiert, wie spätestens durch den Vergleich der *late-season* (September) verdeutlicht werden konnte.

Tabelle 6-9: Sortenspezifische Vergleichswerte von ET_{crop} und ET_{act} für die Gesamtsaison.

	2004			2005		
	ET_{crop} [mm]	ET_{act} (MW*) [mm]	ET_{act} (MW* für homogene Pixel) [mm]	ET_{crop} [mm]	ET_{act} (MW*) [mm]	ET_{act} (MW* für homogene Pixel) [mm]
Weizen, ab 1.4.	339	327	288	338	268	k.A.
Reis ¹	670	693	1007	647	778	877
Reis ²	809	725	1046	784	824	924
Baumwolle ¹	736	818	831	768	853	833
Baumwolle ²	727	793	809	726	774	773
Baumwolle ³	659	742	786	645	705	701

* MW = Mittelwert

Quellen ¹: mündliche Mitteilung von SANIIRI, Tashkent; ²: ALLEN et al., 1998; ³: FORKUTSA, 2006)

⁸⁷ Dieser Gedanke wird bei der Ergebnisauswertung und der Gegenüberstellung mit den verfügbaren Wassermengen in Kapitel 8 erneut aufgegriffen.

Im Vergleich der saisonalen Gesamtsummen für Baumwolle konnten grundsätzlich Überschätzungen des Modellierungsergebnisses mit der potenziellen pflanzenspezifischen Evapotranspiration (ET_{crop}) festgehalten werden (Tabelle 6-9). Die mittleren und maximalen Abweichungen der über die Sommersaison aufsummierten ET_{act} -Werte für Baumwolle lagen bei 10,1 % beziehungsweise bei 20,1 % (für beide Untersuchungsjahre).

Für Reis erfolgte die Validierung lediglich über die saisonalen Gesamtsummen, da sehr stark variierende Anbauzeitpunkte im Dekadenvergleich zu großen Verzerrungen führten. In Tabelle 6-9 zeigt sich, dass die Modellierungsergebnisse nur schwer mit ET_{crop} zu vergleichen waren, die auf den *crop coefficients* von SANIIRI beruhen. Für die homogenen Pixel der Klasse „Reis“ ergaben sich ET_{act} -Überschätzungen von 50,3 % (2004) und 35,5 % (2005). Hier wurde, wie bereits diskutiert, die Gültigkeit der K_c -Werte für die initiale Wachstumsphase von Reis in Frage gestellt. Geringere Abweichungen (2004: 29,2 %, 2005: 17,9 %) wurden durch die Anwendung der FAO-Standards erzielt. Grundsätzlich ist hierzu anzumerken, dass in anderen Studien für bewässerte Reisanbaugebiete noch einmal höhere *crop coefficients* als die Standards der FAO berechnet wurden. Untersuchungen von MOHAN und ARUMUGAM (1994) für Reisgebiete in Indien ergaben beispielsweise für die Entwicklungsphase und die *mid-season* wesentlich höhere *crop coefficients* mit Werten von 1,6 und 1,4. Daher erscheinen die Ergebnisse plausibel, was dadurch gestützt wird, dass die homogenen Pixel der Klasse „Reis“ fast alle in unmittelbarer Nähe zum Amu Darya lagen (Abbildung 6-2), was eine sehr hohe Wasserverfügbarkeit erwarten lässt.

Insgesamt konnte mittels der eingesetzten Methoden ein nachvollziehbares Validierungsergebnis für die landwirtschaftlichen Nutzflächen erzielt werden. Einzig die hohe Überschätzung der erwarteten Evapotranspiration über Baumwollflächen nach Aussaat konnte nicht plausibel erklärt werden und ist möglicherweise auf Schwächen in der Modellierung zurückzuführen.

6.4.4 Zusammenfassung der Validierungsschritte

Häufiger als mit den *class-A*-Evaporationspfannen werden die fernerkundungsbasierten ET-Modellierungen entweder durch exaktere Methoden wie Lysimetermessungen (TASUMI et al., 2005) oder Instrumenten wie Scintillometern, *Bowen Ratio Towers* oder *Eddy Correlation* durchgeführt (BASTIAANSEN et al., 2005)⁸⁸. Alle diese Methoden standen für diese Arbeit jedoch nicht zur Verfügung. Daher soll nun aus den umfassenden Genauigkeitsuntersuchungen eine Einschätzung der Qualität der modellierten ET_{act} erfolgen.

Zur Validierung des SEBAL/METRIC-Modells allgemein und hinsichtlich der Eingangsgrößen, Zwischenprodukte und Endergebnisse wird konstatiert:

⁸⁸ Letztgenannte Instrumente dienen zur Messungen der tatsächlichen Evapotranspiration über mehrere Kilometer Entfernung (Scintillometer) beziehungsweise über einem mehrere ha großen Vegetationsbestand.

- Das SEBAL/METRIC-Modell ist ein Algorithmus zur Berechnung der Evapotranspiration, der für verschiedene Klimatypen weltweit erfolgreich angewendet wurde (Kapitel 3.2.2). Daher ist zu erwarten, dass aus exakten Eingangsparametern mit hoher Wahrscheinlichkeit ein genaues Ergebnis auch für mittelasiatische Untersuchungsräume hervorgeht.
- Die Landnutzungsklassifikation wurde erfolgreich für Flächen validiert, die nicht als Mischpixel aufgefasst wurden und wird damit als glaubwürdiger Eingangsparameter für die Modellierung angesehen (Kapitel 5).
- Die im Jahresgang quasi-statischen Eingangsgrößen Albedo und Emissionsgrad zeigten plausible Ergebnisse; durch den Prozessieralgorithmus ausgelöste Schwankungen waren hinsichtlich ihres Einfluss auf das Ergebnis zu vernachlässigen (Kapitel 6.4.1).
- Ebenfalls erscheinen die modellierten Oberflächenrauigkeiten (z_{0m}) hinsichtlich der heterogenen Ausprägung eines 1 km MODIS-Pixel als akzeptabel (Kapitel 6.4.2).
- Die Gegenüberstellungen der Netto-Strahlungsbilanz zum Aufnahmezeitpunkt wiesen tendenziell eine Überschätzung der fernerkundungsbasierten Methode im Vergleich zu den Messergebnissen auf. Es werden aber Punktdaten mit Modellierungsergebnissen von 1 km geometrischer Auflösung verglichen, so dass diese Tendenz als plausibel akzeptiert wurde. Eine leichte Fehlerfortpflanzung ist dennoch zu erwarten, kann aber nicht quantifiziert werden (Kapitel 6.4.2).
- Der Vergleich zwischen der mittels *class-A*-Evaporationspfannen gemessenen Verdunstung und modellierter ET_{act} über Wasserflächen zeigte akzeptable Ergebnisse an; diese können aber aufgrund der in Kapitel 6.4.3.1 genannten Gründe durchaus in Frage gestellt und somit nur als ein Indiz für die Plausibilität der Modellierungsergebnisse gewertet werden.
- Die Resultate des Vergleichs der Modellierungsergebnisse (ET_{act}) mit den Erwartungswerten (ET_{crop}) zeigten zwar teilweise hohe, aber plausible Abweichungen (Kapitel 6.4.3.2). Die für Winterweizen modellierten Wassermengen konnten mit der starken Heterogenität und der geringen Größe der Felder, die Überschätzungen für Reis durch das Hinzuziehen weiterer Literaturstudien begründet werden. Unklar bleiben die zu großen Unterschiede zwischen Erwartungswert und Modellierungsergebnis in den Initialstadien der Baumwollbewässerung.

Insgesamt waren die Eingangsparameter, die betrachteten Zwischenprodukte sowie die Ergebnisse im Vergleich zu Literaturwerten und Geländemessungen konsistent und plausibel. Daher wurden sie im Rahmen der bereitstehenden Möglichkeiten für die folgenden

Untersuchungen als validiert betrachtet. Eine absolute Fehlerschranke konnte aus den in den jeweiligen Abschnitten genannten Gründen nicht getroffen werden.

6.5 Ergebnisse und Diskussion der Modellierung

Während zu Validierungszwecken (Kapitel 6.4) bereits nutzungsspezifische Ergebnisse (Reis, Baumwolle und Weizen) herangezogen wurden, fokussiert dieses Kapitel die saisonalen Veränderungen räumlicher Muster der erzielten Ergebnisse. Dabei werden insbesondere die Aussagen der saisonalen Produkte hinsichtlich der in Kapitel 1.1 formulierten Ziele vorgestellt und reflektiert (Kapitel 6.5.1). Abschließend erfolgt eine Gesamtdiskussion des Verfahrens, die eine kritische Betrachtung der eingeführten Anpassungen und Möglichkeiten zum Einsatz der Methodik für die Wasseradministration in Khorezm beinhaltet (Kapitel 6.5.2).

6.5.1 Die tatsächliche Evapotranspiration der Sommersaison 2004 und 2005

Im Jahr 2004 konnte für die erweiterte Sommersaison⁸⁹ in der Summe und damit auf dieselbe Fläche bezogen im Mittel eine leicht höhere saisonale tatsächliche Evapotranspiration (ET_{act}) modelliert werden als 2005 (Tabelle 6-10). Der Wertebereich war allerdings für beide Jahre sehr ähnlich und rangierte zwischen Null und circa 1.600 mm. Die Variation im Wertebereich war statistisch sehr hoch, was neben der Standardabweichung von über 300 mm für beide Jahre auch die Histogramme zeigen, die aus den Ergebnissen der Modellierung für das Untersuchungsgebiet extrahiert werden konnten (Abbildung 6-12).

Tabelle 6-10: Deskriptive Statistiken der Modellierung der saisonalen ET_{act} [mm] für die Jahre 2004 und 2005, integriert über das Bewässerungsgebiet von Khorezm.

Jahr / ET_{act}	Min	Max	Mittelwert	Standardabweichung
2004	0,0	1634,1	775,6	317,0
2005	7,8	1597,6	750,2	300,7

Die Häufigkeitsverteilungen erscheinen normalverteilt, zeigen aber in beiden Untersuchungsjahren einen leichten Sockel zwischen 200 mm und 400 mm an, der von den im Histogramm enthaltenen Siedlungs- und Brachflächen verursacht wurde. Im Jahr 2004 treten im agrarischen Bereich oberhalb einer ET_{act} von 700 mm meist geringfügig höhere Häufigkeiten auf als 2005, unterhalb der 700 mm-Marke überwiegt in den meisten Fällen die Anzahl der Nennungen aus dem Jahr 2005. Das bedeutet, dass auf den landwirtschaftlichen Flächen in Khorezm 2004 kontinuierlich mehr Wasser durch Evapotranspiration verbraucht wurde als 2005.

⁸⁹ Die erweiterte Sommersaison umfasst neben der Zeitspanne vom 1. April bis 31. September, die statistisch als Sommersaison geführt wird, noch den Monat Oktober, da die Baumwollanbauzeit bis in diesen Monat hineinragt.

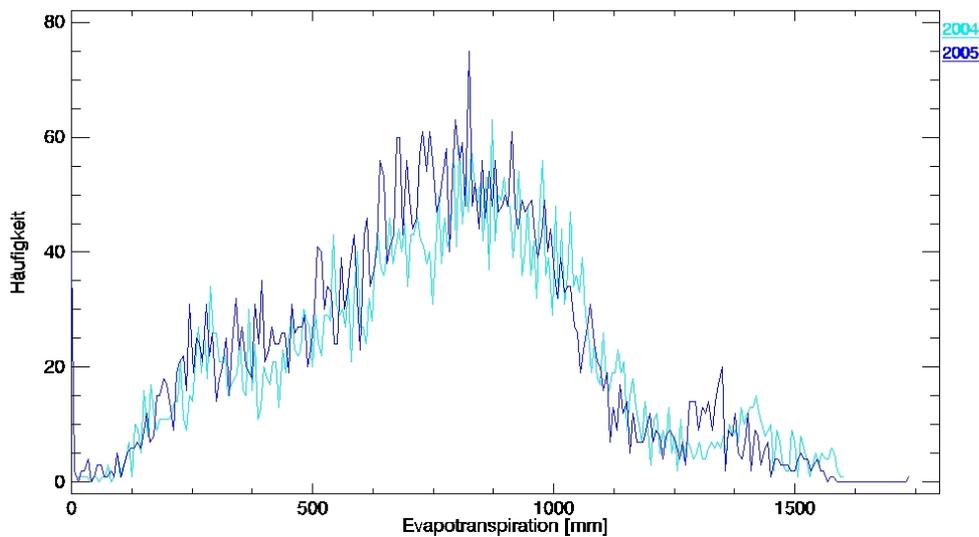


Abbildung 6-12: Häufigkeitsverteilungen der Modellergebnisse der saisonalen ET_{act} -Mengen im Untersuchungsraum 2004 und 2005.

Die Ursachen für die Variationen zwischen den Jahren 2004 und 2005 können vielfältig sein. Insgesamt wurde nach den statistischen Daten (SIC-ICWC, 2006) 2005 eine höhere Wassermenge für die Gesamtregion ($3,54 \text{ km}^3$) im Gegensatz zu 2004 ($3,41 \text{ km}^3$) entnommen. Dies würde unter der Annahme, dass ein höheres Angebot einen höheren Verbrauch bedingt, ein gegensätzliches Ergebnis erwarten lassen⁹⁰. Vielmehr deuten aber die im Jahr 2005 niedrigeren Werte für ET_{crop} bereits an, dass auch die Erwartungswerte der Evapotranspiration 2004 wesentlich höher lagen als 2005 (Tabelle 6-9). Daher können also unterschiedliche meteorologische Voraussetzungen als eine Ursache für diese annualen Schwankungen festgehalten werden. Sicherlich liegt eine weitere Ursache dieser Variationen potenziell in Modellierungsungenauigkeiten, was im Detail aber nicht nachgewiesen werden konnte.

In der gesamtsaisonalen Betrachtung traten für beide Untersuchungsjahre nahezu identische räumliche Muster der Evapotranspiration auf (Abbildung 6-13). Erwartungsgemäß bildeten die Siedlungen und die Wüstenbereiche Inseln oder nach Khorezm hineinragende Keile niedriger saisonaler ET_{act} ($0-400 \text{ mm}$)⁹¹. Die höchsten Modellergebnisse spiegeln die Seeflächen und die Seitenarme des Amu Darya wieder ($1.300-1.600 \text{ mm}$). Landwirtschaftliche Nutzflächen dominierten den mittleren Wertebereich der modellierten Skala.

⁹⁰ Diese Annahme kann aber nur dann gelten, wenn verschiedene andere Rahmenbedingungen sichergestellt sind. Es ist ebenso möglich, dass 2005 der Anteil des Drainagewassers, das aus Khorezm herausgeführt wurde, ebenfalls höher lag als 2004. Weiterhin ist ein Auffüllen der Wasserspeicher wie Boden oder im Untergrund als Erklärung denkbar (vergleiche Kapitel 7 und 8).

⁹¹ Die unerwartet hohen Modellergebnisse in der Wüste sind auf längere Datenlücken in einzelnen MODIS-Parametern (Albedo) zurückzuführen. Da sie aber außerhalb des Bewässerungsgebietes lagen und damit ohnehin nicht in die weitere Auswertung Eingang fanden, wurden sie an dieser Stelle nicht vertiefend analysiert oder beseitigt.

Saisonale tatsächliche Verdunstung in Khorezm 2004 (links) und 2005 (rechts)

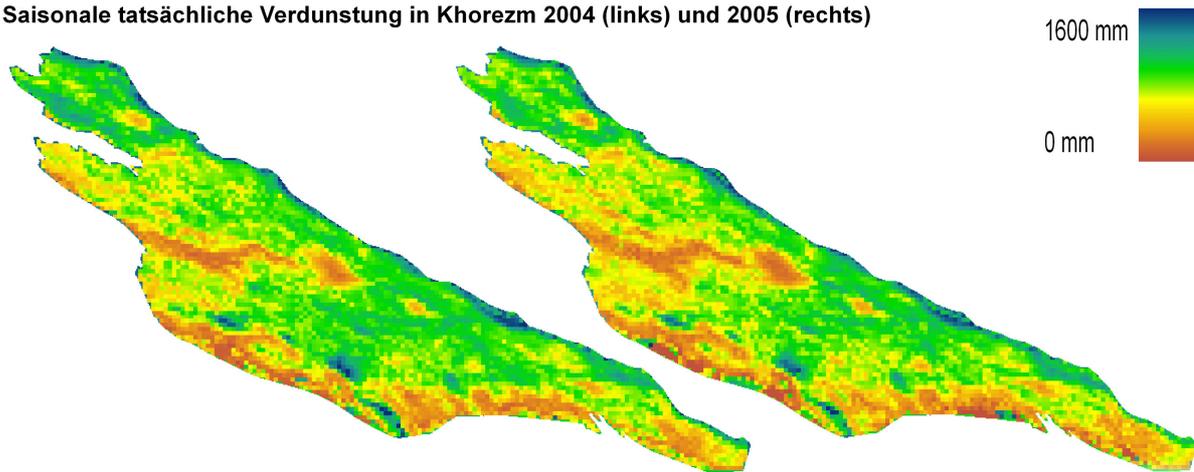


Abbildung 6-13: Räumliche Muster der modellierten saisonalen tatsächlichen Evapotranspiration (ET_{act}) für den Beobachtungszeitraum zwischen dem 1. April und dem 31. Oktober 2004 und 2005.

Auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen waren die Disparitäten von ET_{act} und damit des Wasserverbrauchs im Untersuchungsgebiet eindeutig nachzuzeichnen. Im nördlichen Rayon Gurlen, also einem Großteil des Klichnyasbay-Bewässerungssystems, wurden in beiden Jahren durchschnittlich über 880 mm erreicht. Dies ist durch den verstärkten Reisanbau in dieser Region zu begründen, wie die Ergebnisse der Klassifikation gezeigt haben (Kapitel 5).

Höhere ET_{act} -Durchschnittswerte wurden lediglich in manchen Teilen der Außenbereiche des Bewässerungssystems (Flussnähe) und teilweise im zentralen Südsystem nachgewiesen. Zwischen den Rayonen Bogot und Urgench sowie in Yangiarik und im östlichen Khiva wurden innerhalb des bewässerten landwirtschaftlichen Gebietes, auch in über 50 Kanalkilometern Entfernung zum Amu Darya, über 1.000 mm modelliert, wobei diese Situation im Jahr 2004 deutlich flächendeckender erschien (Abbildung 6-13). Die Rayone Kushkopyr und Shavat fielen durch vergleichsweise niedrige ET_{act} (Gazavat-Subsystem: 531 mm, Palvan 575 mm) auf. Sie liegen in weit entlegenen Bereichen des Bewässerungssystems (vergleiche Kapitel 2.3 und 2.5). Aus der Diskrepanz wird geschlossen, dass der niedrige Wasserverbrauch durch Evapotranspiration in diesen Regionen durch Limitierungen des Wasserangebots ausgelöst wurde.

Der multitemporale Ansatz der Evapotranspirationsmodellierung erlaubte die Analyse der zeitlichen Variationen des Wasserverbrauchs im Bewässerungssystem von Khorezm. Durch die weitgehend ungestörte Atmosphäre konnten in einer Untersuchungszeitspanne von 215 Tagen Modellierungen von 133 (2004) beziehungsweise 136 Tageswerten (2005) vorgenommen werden. Entsprechend des Anbaukalenders (SCHWEITZER et al., 2004) wurden mittels dieser Ergebnisse für unterschiedliche Saisonabschnitte die verdunsteten Wassermengen interpoliert, aufsummiert und räumlich visualisiert (Abbildung 6-14).

In der ersten Aprilhälfte (Abbildung 6-14a), in der lediglich Winterweizen angebaut wird, konnten für das Jahr 2005 im Gegensatz zum Jahr 2004 unregelmäßige Muster mit vergleichsweise hohen Evapotranspirationsmengen ermittelt werden. Im Jahr 2005 dauerte die Frostperiode bis in die erste Märzwoche, so dass das *leaching* der Felder relativ spät begonnen und erst Anfang April beendet werden konnte⁹². Während des *leaching* beträgt die Wasserauflage mehrere Zentimeter bis Dezimeter und bildet deshalb freie Wasserflächen, die ungeschützt der Sonneneinstrahlung und somit der Verdunstung ausgesetzt sind.

Für den darauf folgenden Saisonabschnitt (Abbildung 6-14b), in dem neben Winterweizen die Vegetationsperiode der Baumwolle beginnt, wurden über ganz Khorezm verbreitete Flächen mit höherer Evapotranspiration in dunkelgelben (2004) oder grünen (2005) Farbtönen abgebildet. Die mittlere ET lag zwischen dem 16. April und dem 15. Mai im Jahr 2004 bei 95 mm, 2005 bei 120 mm. Das oben für die Gesamtsaison beschriebene Gefälle des Wasserverbrauchs zu den peripheren Räumen wurde zu diesem Saisonabschnitt noch nicht deutlich. Vielmehr erreichte das Wasser in vergleichbarem Umfang zum Oberlauf des Bewässerungssystems den entlegenen Rayon Kushkopyr, was die homogenen Evapotranspirationsraten im gesamten Oblast belegen.

Dieser gleichmäßige Verbrauch änderte sich in beiden Beobachtungsjahren im dritten Saisonabschnitt (16. Mai bis 15. Juni), wo neben dem Winterweizen und der Baumwolle noch der Anbau von Reis oder anderen Fruchtsorten (Mais oder Sonnenblume) hinzukommt (Abbildung 6-14c). Zu diesem Zeitpunkt wurden insbesondere im Jahr 2005 die regionalen Disparitäten des Wasserverbrauchs deutlich. Braune Flecken mit unter 100 mm ET_{act} kennzeichnen die hinsichtlich der Kanalkilometer (Kapitel 2.5.3) weit von den Einlassstationen entfernten Regionen des Südsystems und des Daryalik-Systems. Im Oberlauf des Bewässerungssystems wurden zur selben Zeit stellenweise 200 mm überschritten.

Die Hauptwachstumsphase von Reis und Baumwolle liegt nach dem Anbaukalender im vierten betrachteten Saisonabschnitt (Abbildung 6-14d). In den dreieinhalb Monaten zwischen dem 16. Juni und dem 30. September wurden 2004 und 2005 im Mittel jeweils über 500 mm ET_{act} modelliert. Die räumlichen Muster waren fast identisch. Eine Ausnahme bildete das Daryalik-System nordwestlich von Urgench, wo 2005 ein leicht höherer Wasserverbrauch modelliert wurde. Möglicherweise wurde in diesem Subsystem 2004 früher mit der Bewässerung begonnen als 2005, so dass die Maxima der ET_{act} in unterschiedlichen generalisierten Saisonabschnitten auftraten.

⁹² Eigene Geländebeobachtungen und mündliche Kommunikation mit Wassermanagern der BWO Amu Darya

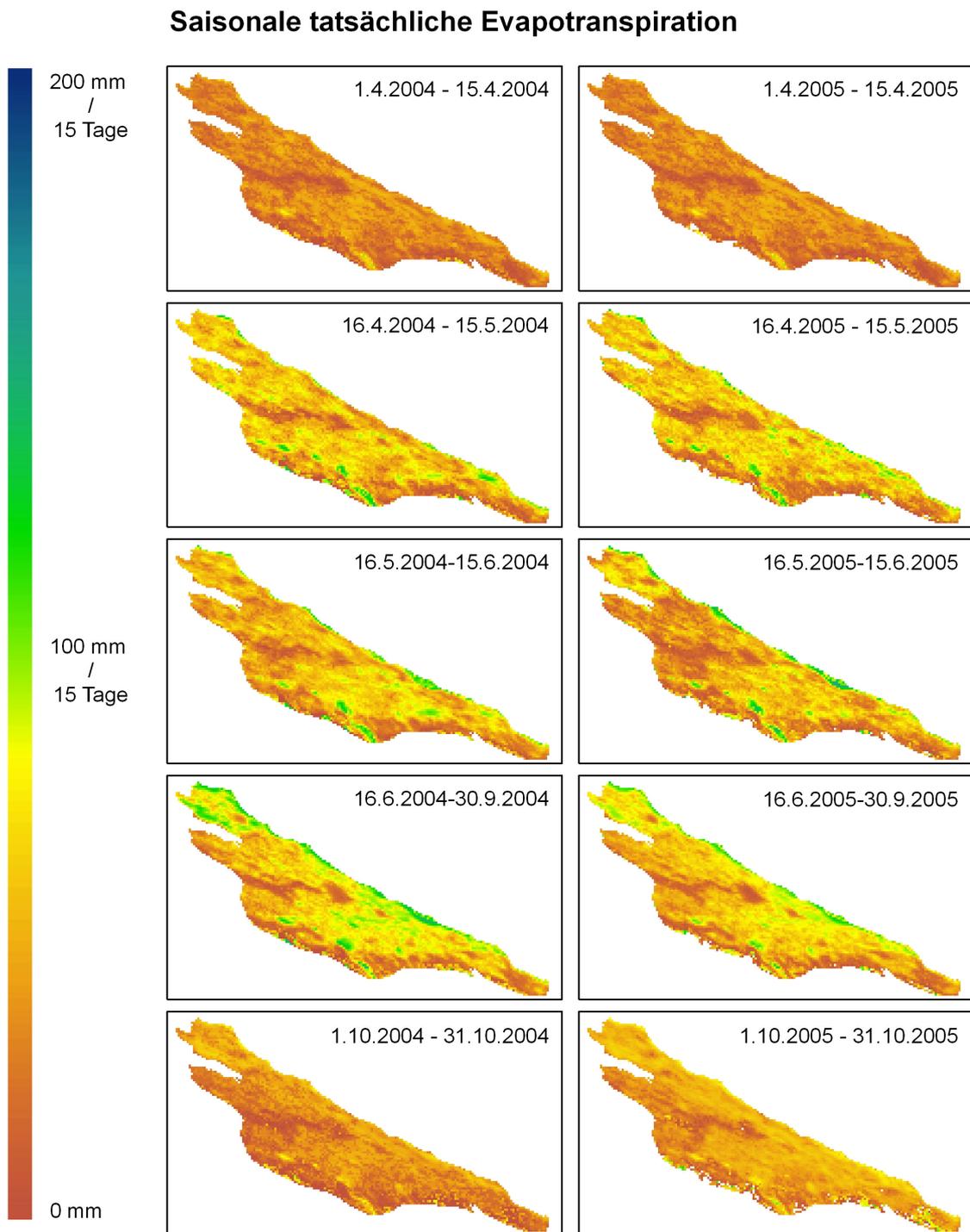


Abbildung 6-14: Tatsächliche Evapotranspiration in Khorezm, Mittel der 15-Tagessummen der generalisierten landwirtschaftlichen Saisonabschnitte der Sommersaison und des Oktobers der Jahre 2004 (links) und 2005 (rechts).

Für die Beobachtungszeiträume ergaben sich innerhalb des jeweiligen Oktobers räumlich relativ homogene Muster der ET_{act} , wobei die räumlichen Disparitäten der vorigen Saison bestehen blieben (Abbildung 6-14e). Die Mittelwerte betragen im Jahr 2004 67 mm, 2005 waren es 125 mm und lagen für diesen Monat in einem Bereich knapp unterhalb von ET_{pot} . Diese

vergleichsweise hohen tatsächlichen Evapotranspirationsmengen des Oktobers begründen sich in der Vorbereitung und der ersten Bewässerung des Winterweizens sowie im einsetzenden *leaching* zur Auswaschung des Salzes aus dem Boden. Eine weitere Interpretationsmöglichkeit besteht darin, dass möglicherweise noch eine sehr starke Evaporation aufgrund des kapillaren Aufstiegs des Grundwassers in die Bodenzone stattfindet und die Speicher nicht alleine über die Kollektoren leer laufen, sondern auch über die Evaporation des Bodens entwässern. Dies wäre allerdings ein Hinweis auf zu hohe Grundwasserstände nach der Bewässerungssaison und damit auf die Gefahr der post-saisonalen sekundären Versalzung der Böden, wofür im Fortgang der Arbeit weitere Indizien gesammelt werden.

Die Ergebnisse der saisonalen tatsächlichen Evapotranspiration werden in Kapitel 8 der im Gelände gemessenen Wasserentnahme gegenübergestellt. Damit sollen weitere Indizien zur Stärkung oder Widerlegung der getroffenen Interpretationsvarianten hinsichtlich Wasserverteilung und -verbrauch gesammelt werden.

6.5.2 Diskussion

In diesem Kapitel wurden Module des SEBAL und METRIC-Modells zur Modellierung der tatsächlichen Evapotranspiration miteinander kombiniert und erweitert, um für die Vegetationsperioden der Beobachtungsjahre 2004 und 2005 den saisonalen Wasserverbrauch in Khorezm zu ermitteln. Die Modellierungen wurden auf Basis von Fernerkundungsdaten des MODIS-Sensors, genauer auf Zeitserien täglicher LST-Daten (MOD11A1), umgesetzt und über Plausibilitätsuntersuchungen der Eingangsdaten, der Zwischenprodukte und der Endergebnisse validiert.

Das Kalibrierungsproblem für den vertikalen Temperaturgradienten, das auf die niedrige geometrische Auflösung des MODIS-Sensors von 1 km zurückzuführen ist, wurde durch die Definition der Korrekturfaktoren k_{hot} und k_{cold} behoben. Wesentliche Neuerung war die Änderung der Modellannahme, dass λET am „heißen“ Ankerpunkt gleich Null ist, weil solche Verhältnisse im 1 km-Raster für das Untersuchungsgebiet nicht anzutreffen waren. Durch die Integration der höher aufgelösten aktuellen Landnutzungsinformation konnten potenziell sehr trockene Flächen identifiziert werden, deren Vegetationsbedeckungsgrad durch einen Vergleich mit dem NDVI-Bodensignal abgeschätzt wurde. Die Kalibrierung erfolgte dann mittels der Referenzevapotranspiration.

Das vorgeschlagene Regelwerk zur Automatisierung der Selektion der Ankerpunkte berücksichtigt die Temperatur der Oberfläche (LST) und die Vegetationsbedeckung (LAI und Landnutzungsklassifikation), wobei die ausgewählten Punkte im Umkreis der meteorologischen Station verortet sein müssen. Die Daten der Landnutzungsklassifikation fungieren dabei zur Filterung von Störsignalen, die beispielsweise durch das Vorhandensein von Wasser- oder

Vegetationsflächen im Subpixelbereich ausgelöst werden können. Perspektivisch kann dabei die Einbindung von Nachbarschaftseffekten bei der automatisierten Wahl der Ankerpunkte als Optimierungsmöglichkeit angesehen werden.

Der Wert einer genauen Landnutzungsklassifikation für die Modellierung in einem bekannten Untersuchungsraum ist sehr hoch: Einerseits kann damit bei der Parametrisierung der Eingangswerte die Modellierungsgenauigkeit verbessert werden. Andererseits wird durch eine akkurate Landnutzungsklassifikation – neben den oben genannten weiteren Vorzügen – eine detaillierte Analyse der Modellergebnisse ermöglicht.

Bei den Untersuchungen der Eingangsparameter sowie der Zwischen- und Endprodukte konnten keine großen Abweichungen von den erwarteten Werten ermittelt und daher auf die Plausibilität der Modellumsetzung mittels der verwendeten MODIS-Produkte geschlossen werden. Weiterhin waren keine Auffälligkeiten in den Daten erkennbar, die auf größere Fehleinschätzungen der getroffenen Modellanpassungen haben schließen lassen. Trotz der umfangreichen Plausibilitätsuntersuchungen ist jedoch eine echte Validierung in ausgewählten Referenzpixeln mit anerkannten Verfahren (BASTIAANSEN et al., 2005) als Voraussetzung für eine Weiterentwicklung des Ansatzes zu sehen.

Die Ergebnisse lassen die räumlichen Muster der saisonalen tatsächlichen Evapotranspiration nachzeichnen und auf Disparitäten der Wasserverteilung zwischen Ober- und Mittellauf und den entlegenen Regionen im Unterlauf schließen. Bis weit in das Bewässerungssystem hinein übertreffen in den Untersuchungsjahren 2004 und 2005 die Werte der ET_{act} teilweise 1.000 mm, während in Kushkupyry und Shavat mittlere Gesamtsummen von unter 550 mm ET_{act} gemessen wurden.

Für den operationellen Einsatz in Khorezm kann mittels des gezeigten Ansatzes ein postsaisonales Produkt erstellt werden, das zur Einschätzung des agrarischen Wasserverbrauchs auf Rayonebene einsetzbar ist. Aus der Sicht des Bewässerungsmanagement können damit Rückschlüsse auf den Effizienzgrad der Wasserverteilung erfolgen und Optimierungsmöglichkeiten für die folgende Bewässerungssaison abgeleitet werden. Wünschenswert ist sicherlich ein halbmonatliches ET_{act} -Produkt, das zum zeitnahen Monitoring in der Saison abgerufen werden kann. Voraussetzung hierzu ist allerdings die Vorhersage der Landnutzung für die Modellberechnung, die nach dem gezeigten Ansatz nicht zur Verfügung steht

Prinzipiell wird auch eine räumliche Übertragbarkeit des Ansatzes auf die übrigen Unterlaufregionen von Amu Darya und Syr Darya erwartet, die die klimatische Ausstattung der

Räume vergleichbar ist. Für einen Test fehlten allerdings die Trainingsdaten für die Landnutzungsklassifikation und die meteorologischen Eingangsdaten.

Weitere Optimierungsmöglichkeiten sind vergleichende Analysen der Modellierungsergebnisse auf Subpixelniveau, die beispielsweise durch die parallele Modellierung der ET_{act} mit MODIS- und ASTER-Daten erreicht werden kann, da die Aufzeichnungen zeitgleich durchgeführt werden. Ebenfalls besteht in der Hinzunahme weiterer meteorologischer Stationen die Möglichkeit, die Variationen der meteorologischen Daten genauer zu untersuchen und damit das Modell zu verfeinern. Beispielsweise kann auf diese Weise der in Kapitel 6.1.1 angesprochene Einfluss der Wüstenrandlage ermittelt werden.

7 Bestimmung der Wasserflüsse im Be- und Entwässerungssystem

In der Einleitung (Kapitel 1) wurde bereits detailliert auf die hydrologische Datenlage in Mittelasien eingegangen und die Notwendigkeit objektiver und konsistenter Grundlagendaten dargelegt. Grundsätzlich sind die Wassermengen, die aus dem Amu Darya nach Khorezm zum größten Teil zu Bewässerungszwecken eingespeist werden, in offiziellen Statistiken des ICWC verfügbar, die auch im Internet bereitgestellt werden (SIC-ICWC, 2006). Ebenfalls lagen für diese Arbeit regionale Statistiken für hydrologische Subsysteme (unterschieden nach Einlasskanälen) und administrative Bezugsgrößen (nach Rayonen) vor, die in der Summe mit den ICWC-Statistiken übereinstimmten. Allerdings wurden auf Basis anderer Quellen auch Inkonsistenzen in den hydrologischen Daten aufgedeckt (MÜLLER, 2006).

Eine Gegenüberstellung von *in-situ* Messungen mit den offiziell verfügbaren statistischen Daten zur Prüfung der Plausibilität der amtlichen Grundlagendaten erschien unter den bereits charakterisierten Rahmenbedingungen für die vorgesehenen weiterführenden hydrologischen Analysen sinnvoll. Daher wurden neben der flächenhaften Erfassung der Landnutzung und der Evapotranspiration im Rahmen dieser Dissertation umfassende Geländemessungen oberirdischer Zu- und Abflussmengen in Khorezm vorgenommen. Mit den Geländemessungen sollte die Datengrundlage komplettiert werden, die zur Erfüllung folgender Teilziele der Arbeit vorgesehen waren:

- (1) Berechnung verschiedener Indikatoren zur verbesserten Einschätzung der Wassernutzung des Bewässerungssystems und von Teilsystemen in Khorezm während einer Bewässerungssaison (Ratio „Drainage/Wasserentnahme“, *depleted fraction*, Wasserentnahme pro Bezugsfläche)
- (2) Bilanzierung der Wasserflüsse in Khorezm, um Variationen der Speichervariablen (Bodenfeuchte und Grundwasser zusammengefasst) im saisonalen Verlauf abzuschätzen

und regionale Unterschiede des Wassermanagements herauszuarbeiten (raumzeitliche Analyse)

Bereits im Sommer 2004 wurde daher ein hydrologisches Messnetz aufgebaut, das über die komplette Sommersaison 2005 (April bis September) beprobt wurde⁹³. In der Konzeption zur Bestimmung der Wasserbilanz nach MOLDEN (1997) zielen die durchgeführten Messungen auf die Bestimmung der linearen Oberflächenabflüsse, die anteilig in die Variablen *inflow* und *outflow* eingehen (vergleiche Kapitel 3.3.1).

Die Zu- und Abflussbestimmungen sind Messungen linearer Flüsse an einem Punkt, die in Bezug zu einer Flächeneinheit stehen. Diese Fläche wird entweder vom Messpunkt aus mit Wasser versorgt (Zufluss an einem Einlasspunkt) oder entwässert in selbigem (Abfluss eines Einzugsgebiets)⁹⁴. Zufluss und Abfluss können in Form von Be- und Entwässerungswasser erfolgen. Der Zufluss gelangt aus dem Oberlauf ins Bewässerungssystem, der Abfluss beschreibt die Wasserbewegung in den Unterlauf. Man unterscheidet also vier unterschiedliche Arten der Kanalwasserflüsse in einem Bewässerungsgebiet: Zufluss-Bewässerung, Abfluss-Bewässerung, Zufluss-Drainage, Abfluss-Drainage (vergleiche Abbildung 3-8, Kapitel 3.3.1). Insgesamt waren daher folgende methodische Schritte zur Bestimmung linearer Wasserflüsse nach und aus Khorezm notwendig:

1. Festlegung der Bezugsfläche (Untersuchungsräume)
2. Aufbau eines hydrologischen Messnetzes (Bestimmung der Einlass- und Drainagepunkte sowie der hydrologischen Grenzen⁹⁵)
3. Durchführung und Auswertung kontinuierlicher Punktmessungen (Aufbau von Messreihen)
4. Bilanzierung der Zu- und Abflüsse zur Ermittlung der Wasserentnahme für eine Bezugsregion

Im Folgenden wird die Umsetzung der methodischen Schritte sowie die Auswertung der Ergebnisse detailliert beschrieben. Unter einem Rückgriff auf die Erfassung der Kanalinfrastruktur des 3.900 km² großen Untersuchungsgebiets (Kapitel 2.5) erfolgt zunächst eine detaillierte Charakterisierung der Be- und Entwässerungssystem von Khorezm (Kapitel 7.1). Durch diese Vorkenntnisse wurde zum einen die Auswahl hydrologischer Subsysteme (Kapitel

⁹³ Der Aufbau des Messnetzes 2004 konnte erst gegen Ende der Sommersaison fertiggestellt werden, so dass für das Jahr 2004 keine vollständigen Messreihen vorlagen und die Analyse lediglich auf der Sommersaison 2005 basiert.

⁹⁴ Bei der Ermittlung der in einer Zeiteinheit den Querschnitt passierenden Wassermenge spricht man von Durchflussmessung (HERSCHY, 1995)

⁹⁵ Als hydrologische Grenze wird im Folgenden die Umgrenzung der landwirtschaftlichen Flächen betrachtet, die von einem Einlasspunkt aus bewässert werden können.

7.2), zum anderen umfassende Analysen und Interpretationen ermöglicht (Kapitel 8). Zur Auswahl der Subsysteme (Kapitel 7.2) fällt auch die Festlegung der Observationspunkte zur Messung des linearen *inflow* (Zufluss) und *outflow* (Abfluss). Auf die Messmethodik wird in Kapitel 7.3 eingegangen. Anschließend folgen die Vorstellung und Interpretation der Messergebnisse (Kapitel 7.4). Abschließend werden die quantifizierten Wasserflüsse auf das gesamte Bewässerungssystem von Khorezm extrapoliert und in der Diskussion den amtlichen Statistiken der Wasserversorgung in der Region gegenübergestellt (Kapitel 7.5).

7.1 Die Struktur der Be- und Entwässerungssysteme von Khorezm

Das Bewässerungssystem Khorezms wurde seit den 1960er Jahre ausgebaut und unterliegt seither immer wieder neuen Anpassungen auf unterschiedlichen Maßstäben. Ein zweites ebenfalls weit verzweigtes Kanalsystem dient der Entwässerung, also der Drainage zur Abfuhr der Salzakkumulationen aus dem Bewässerungsgebiet. Das Design des in russischer Zeit entworfenen Bewässerungssystems orientiert sich nicht grundsätzlich an den administrativen Grenzen, wodurch die hydrologischen Grenzen der Zuflussgebiete auch Teilgebiete mehrerer ehemaliger Kolchosen enthalten können. Da die WUAs *de facto* trotz einiger Zusammenlegungen außer im Rayon Yangibazar noch den alten Kolchosengrenzen entsprechen⁹⁶, erweisen sich die administrativen Grenzen als hydrologische Gebietsgrenzen zur Charakterisierung des Kanalsystems als ungeeignet.

Zur Charakterisierung des Be- und Entwässerungssystems standen sowohl von den übergeordneten Behörden (SANIIRI) oder der BWO Amu Darya erhältliche Schemata des Bewässerungssystems (veralteter Stand) als auch die GIS-Datensätze des Kanal- und Drainagesystems zur Verfügung⁹⁷. Die Bewässerungskanäle konnten mit den Attributtabelle und den bereitgestellten Schemata des Bewässerungsnetzes ihrer administrativen Bedeutung zugeordnet werden. Ein günstiger Aspekt war, dass die Daten bereits in Fließrichtung digitalisiert waren, so dass Netzwerkanalysen im GIS zur Bestimmung von Subsystemen und Einzugsbereichen der Drainage sowie zur Identifikation struktureller Merkmale (Vernetzungen, Rückläufe des Drainagewassers ins Bewässerungssystem) durchgeführt werden konnten.

Allerdings waren in den digitalen Daten keine Attribute wie Kanalkapazitäten assoziiert, um die Bedeutung einzelner Kanäle für das System mit hoher Bestimmtheit abzuschätzen. Daher wurden neben GIS-Analysen umfassende Geländebegehungen, Diskussion mit Wissenschaftlern der Universität Urgench und Mitarbeitern der BWO Amu Darya, der *Hydromelioration Expedition* (OGME) von Khorezm und des 2004 noch existierenden regionalen Wasserwirtschaftsamtes

⁹⁶ Mündliche Mitteilung des Wasserwirtschaftsamtes in Urgench

⁹⁷ Diese wurden vom GIS-Labor des Deutsch-Usbekischen Khorezm-Projekts digitalisiert, mit dem GIS-Center in Nukus abgeglichen, aktualisiert und für diese Arbeit zur Verfügung gestellt.

durchgeführt. Die Zusammenhänge der makroskaligen Strukturen (Hauptbe- und Entwässerung) wurden nachgezeichnet, um den schematischen Aufbau des Gesamtsystems nachzuvollziehen. Zu den Geländebegehungen wurden Fernerkundungsdaten des ASTER-Sensors (Kapitel 4.5) aus dem Jahr 2001 in Karten aufbereitet, da größere Kanäle durch die 15 m-Auflösung in den spektralen Bändern des visuellen Lichts und des nahen Infrarots im Bild sichtbar waren.

7.1.1 Die Subsysteme des Bewässerungsnetzes

Das Bewässerungssystem Khorezms lässt sich anhand der hydrologischen Grenzen und seines Designs in ein großes und drei kleine Bewässerungssysteme untergliedern (Abbildung 7-1). Dazu kommen noch flussparallele Bereiche, die von Pumpen im Fluss oder in Kanälen außerhalb der großen Einlasswerke mit Wasser versorgt werden. Das Südsystem umfasst eine Gesamtfläche von 2.949,1 km² und besitzt vier Hauptzuflüsse, wovon allein der Left-Bank-Kanal im Süden nahezu ganzjährig geöffnet ist. Die nördlich anschließenden Bauwerke werden nur saisonal nach Bedarf geöffnet. Das sehr kleine Pitnyak-System im Süden (97,8 km²) wird gemäß GIS-Daten durch einen kleineren Zulauf aus dem Fluss gespeist. Das Nordsystem (Klichnyasbay-System) ist ebenfalls in sich abgeschlossen. Der Turangi Saka und der Klichbay Arna bilden die großen Hauptzuflüsse des 496,4 km² großen Areal, die überdies einen Teil der Wasserversorgung der Tashauz-Region und Karakalpakstans sicherstellen.

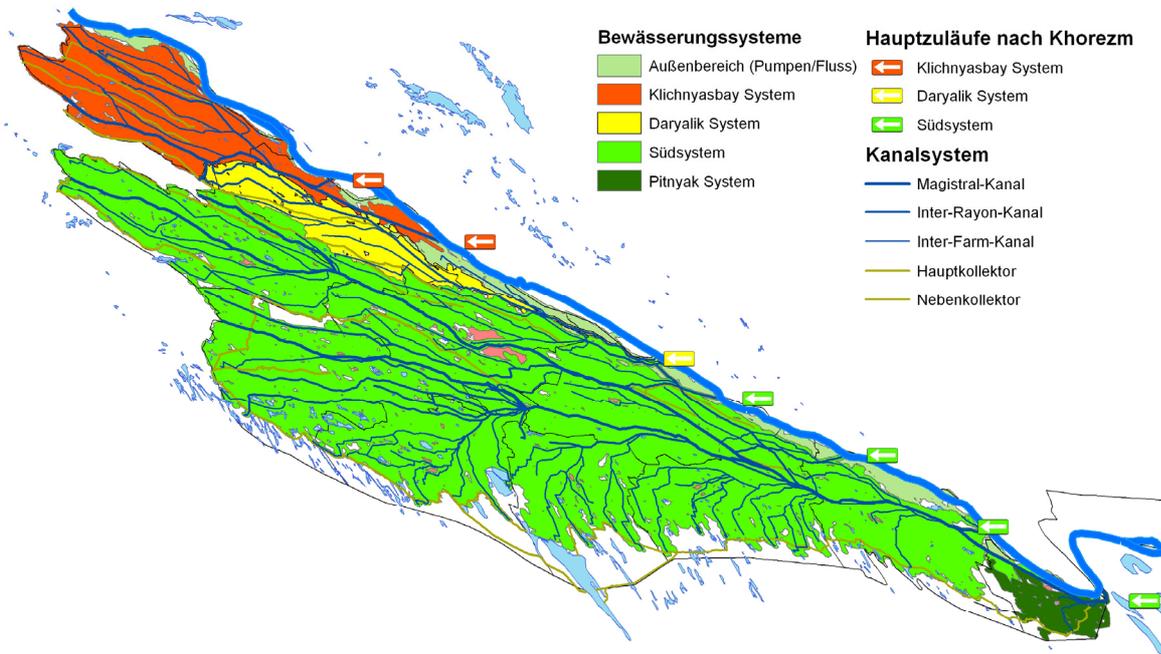


Abbildung 7-1: Hydrologische Grenzen der Teilbewässerungssysteme Khorezms (Datenquelle: GIS-Center Urgench, eigene Erhebungen).

Das Daryalik-System (256,4 km³) bildete bis zur Inbetriebnahme des *Tashauz Branch* des *Left-Bank-Kanals*⁹⁸ ein direkt an den Fluss angeschlossenes Subsystem. Gleiches gilt für den Urgench Arna (vergleiche Abbildung 2-6), der ebenfalls direkt mit dem Fluss in Verbindung stand und nach Angaben der BWO Amu Darya seit mehreren Jahren durch einen provisorischen Sanddamm vom Flusswasser getrennt ist⁹⁹. Die Inbetriebnahme des *Tashauz Branch* sorgte allerdings dafür, dass der Gazavat-Kanal und der Shavat-Kanal an der turkmenischen Grenze fast das ganze Jahr über geschlossen sind. Dies hatte zur Folge, dass die Zubringerkanäle nach Khorezm überdimensioniert waren. Das Wasser wird seitdem über den ausgebauten R-7a-Kanal (vergleiche Abbildung 2-6) vom Südsystem zum Urgench Arna und über einen Überlauf zum Daryalik Arna gebracht. Bis auf die Monate Juli und August, in denen der Wasserbedarf im System am höchsten ist, genügt diese Wasserzufuhr aus dem Südsystem. Daher existiert vor dem Einlassbauwerk des Daryalik¹⁰⁰ ebenfalls ein Sanddamm, der nur im Bedarfsfall entfernt wird. Das Daryalik-System kann so einerseits als eigenständiges Bewässerungssystem, andererseits als Teil des Südsystems angesehen werden.

7.1.2 Die Drainagesysteme

Prinzipiell lassen sich zwei große und zwei kleine Entwässerungssysteme in Khorezm erkennen (Abbildung 7-2), wobei der Shavat-Kanal über weite Strecken die Trennmarke (quasi die Wasserscheide) darstellt. Die in verschiedenen grünen Farbtönen dargestellten Systeme münden alle kurz vor oder kurz hinter der Grenze nach Turkmenistan in den Ozerny-Kollektor (Einzugsgebiet 2506,0 km²), die gelblich-braun eingefärbten Systeme nördlich des Shavat-Kanals fließen in Karakalpakstan zusammen (Einzugsgebiet 1389,4 km²). Davon bildet das von Amu-Darya, Bayam Saka, und Shavat-Kanal (teilweise auch Tash Saka) eingeschlossene Gebiet von 274,8 km² eine Untereinheit, die ehemals in den Divankulsky-Kollektor entwässerte. Das Drainagewasser dieser nahe am Fluss gelegenen Flächen wird allerdings direkt wieder in das Bewässerungssystem eingeleitet. Die größten Kollektorzuflüsse zum Bewässerungssystem wurden kurz vor der Mündung des Bayram Saka und des Karamazi Saka in den Shavat-Kanal angetroffen. Kleinere Dimensionen haben die rosa abgebildeten Kollektorsysteme des Rayons Shavat, wo es auch wieder einen Nordstrang (zum Shavat-Andrejevsky-Kollektor; 187,2 km²) und einen Südteil gibt (zum Daudansky-Kollektor; 189,6 km²).

Der Ozerny-Kollektor fließt durch verschiedene Seen im Süden der Region Khorezm, die durch nahe unter der Geländeoberkante anstehendes Grundwasser gekennzeichnet ist. Die markanteste

⁹⁸ Der *Tashauz Branch* führt vom Tuyamuyunspeicher aus südlich von Khorezm durch die Wüste nach Turkmenistan und dient der von Usbekistans Wasserpolitik unabhängigen Versorgung der Tashauz-Region.

⁹⁹ Dieser Sanddamm war 2004 bereits mit Gräsern und vereinzelt von Sträuchern bewachsen, so dass eine längere Existenz vorausgesetzt werden kann.

¹⁰⁰ Alle Einlassbauten befinden sich aufgrund der Hochwassergefahr mehrere km entfernt vom Amu Darya im Inneren von Khorezm.

Unterbrechung des Wasserflusses ist der Ulukshurkul-See im Süden Khorezm, der weit bis nach Turkmenistan hineinreicht. In dem bis dahin als Oberlauf bezeichneten Teilsystem Khorezms (958,8 km²) verlaufen die Kollektoren wie die Bewässerungskanäle in Nord-Süd-Richtung. Hier markieren die Kollektoren häufig exakt die Grenzen der ehemaligen Kolchosen. In seinem weiteren Verlauf nach Westen fließen im Ozerny-Kollektor die agrarisch bereits genutzten Wasser großer Teile der Rayone Yangiariq, Khiva und Kushkupyry zusammen (647,7 km²). Zwischen dem Shavat-Kanal und dem Palvan-Gazavat-Kanal und dessen nördlicher Verzweigung, dem Gazavat-Kanal reicht das Einzugsgebiet des Gazavat-Daudansky-Kollektors (627,9 km²) weit nach Khorezm hinein. Auf der turkmenischen Grenze mündet der Daudkulsy-Kollektor (mit 217,3 km² Flächenabdeckung) in den Gazavat-Daudansky-Kollektor. Südlich schließt sich ein namenloses System mit einer Fläche von 54,2 km² an, das dem Ozerny-Kollektor tributär ist.

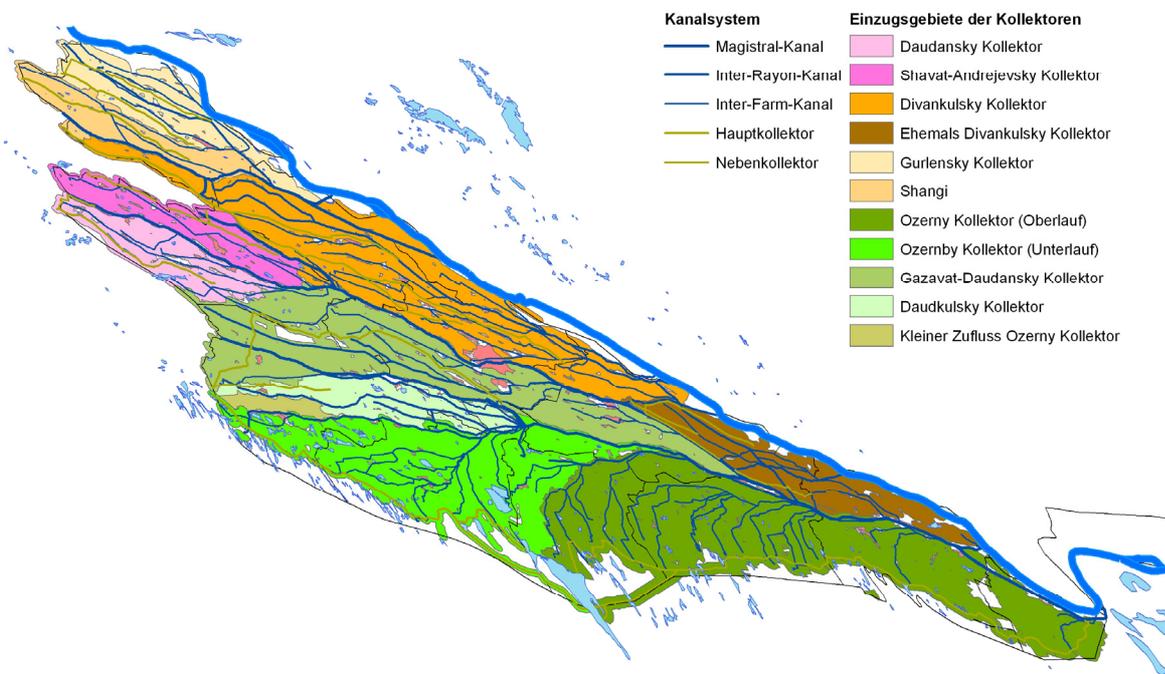


Abbildung 7-2: Einzugsgebiete der großen Abwasser-Drainage-Systeme in Khorezm (Datenquelle: GIS-Center Urgench, eigene Erhebungen).

Eine relativ unbekannte Größe in Khorezm ist die Wiederverwendung von Drainagewasser in der Bewässerung, die nicht in die Wasserbilanzen eingeht. Diese wurde nach mündlichen Mitteilungen der *Hydromelioration Expedition* von Khorezm (OGME), der für das Grundwassermonitoring und die Bewirtschaftung des Kollektorsystems zuständige Behörde, vor allem für trockene Jahre bestätigt, konnte aber nicht quantifiziert werden. Im Oberlauf des Bewässerungssystems wurden einige große Drainagekanäle kartiert, die belastetes Wasser wieder in die Frischwasserkanäle einleiten. Weiterhin finden sich gerade an großen Seen auch Pumpensysteme, die das häufig belastete Wasser in das Bewässerungssystem zurückführen. Auch existieren fest

installierte Pumpen in Kollektoren in Kushkopyr, die große Reisgebiete nahe der turkmenischen Grenze mit Wasser versorgen. Das Kollektorwasser wird mit Bewässerungswasser gemischt auf die Felder geleitet.

Um temporärem Wassermangel (Wasserunsicherheit) entgegenzutreten, werden teilweise in abgelegenen Teilen Khorezms Drainagekanäle aufgestaut (FORKUTSA, 2006). Damit kann über einen erhöhten Grundwasserstand unterirdisch bewässert werden. Die Gefahr dieser Art der Wiederverwendung von Bewässerungswasser ist eine Erhöhung sekundärer Bodenversalzung durch kapillaren Aufstieg infolge des erhöhten Grundwasserstandes. Zur großflächigen Regulierung des Grundwasserspiegels stehen fünf im Verlauf des Hauptentwässerungskanal (Ozerny-Kollektor) angelegte Regulierungsbauwerke zur Verfügung¹⁰¹.

7.1.3 Die relative Lage der Water Users Associations zu den Einlassbauwerken

Durch das Verschneiden der WUA-Grenzen mit den Kanalinformationen im GIS konnten die Einlasspunkte der Kanäle zu den WUAs ermittelt werden. Über die Kanallängen erfolgte so die Zuordnung einer mittleren Distanz zwischen jedem WUA und den dazugehörigen Einlassbauwerken. Verfolgt man den Weg vom WUA zum Einlassbauwerk zurück, kann es vorkommen, dass man auf Zusammenflüsse von Bewässerungskanälen und damit auf die Frage nach der Herkunft des Wassers trifft. Je nachdem, welcher Zuflusskanal geöffnet ist, kann das Wasser einen längeren oder einen kürzeren Weg von der Quelle, dem Amu Darya, bis zur betrachteten WUA zurücklegen. Mittels Gewichtungsfaktoren (abgeschätzte Kapazität und Anzahl der Monate mit Zufluss aus den offiziellen Statistiken und gemessenen Daten) wurden die Zusammenflüsse solcher Zubringerkanäle gewichtet.

Abbildung 7-3 zeigt die Ober- und Unterlieger des Bewässerungssystems, also die Klassifikation der WUAs nach ihrem Kanalabstand zu den Einlassbauwerken. Im Südsystem ist die Abstufung nach Westen sichtbar, wobei die Funktion der beiden ergänzenden Zuflüsse hinsichtlich der Sicherstellung der Wasserversorgung in den entlegenen Bereichen deutlich wird. Trotz der relativen Nähe zu Einlassbauwerken am Daryalik Arna wurden die Kanäle des Daryalik-Systems in die Kategorien der Unterlieger der Wasserversorgung eingeordnet (bis zur Klasse 85-95 km). Die Ursache ist die bereits erwähnte Umstellung des Kanalsystems, so dass überwiegend Wasser aus dem Südsystem zur Versorgung dieses Systemabschnitts beiträgt. Ein eigenes System bildet das Klichnyasbay-System, wo insgesamt maximal 45 km Abstand zu den Einlassbauwerken gemessen werden konnten.

¹⁰¹ Mündliche Kommunikation mit der Leitung der OGME Khorezm.

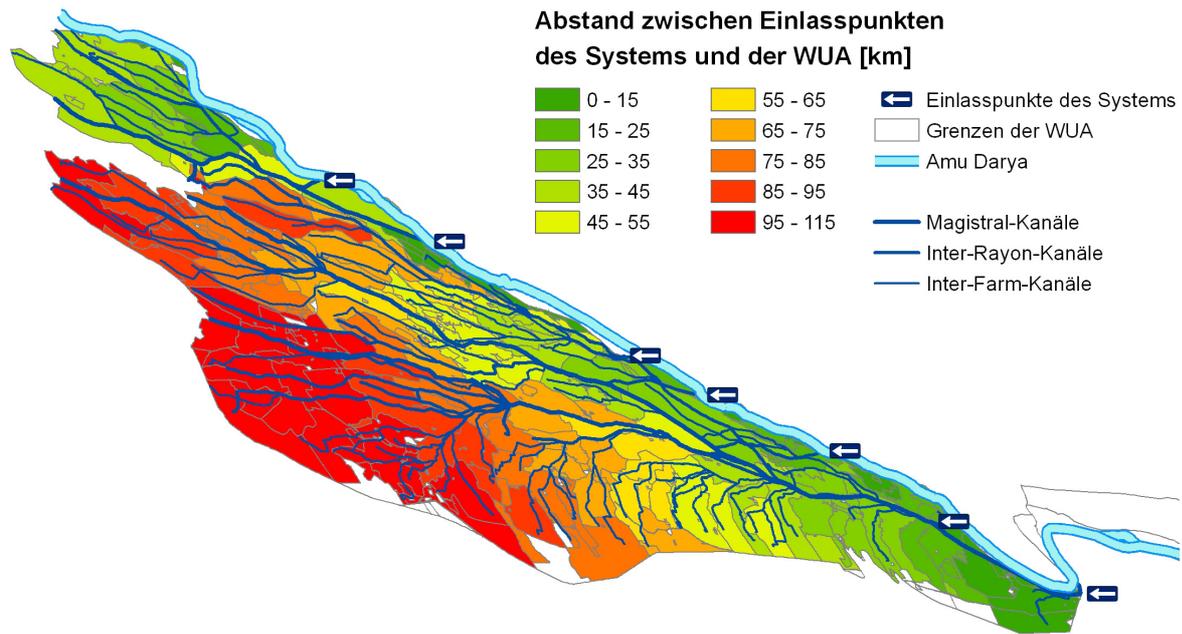


Abbildung 7-3: Klassifizierung der *Water Users Associations* nach ihrem mittleren Abstand zu den Einlassbauwerken in Kanalkilometer.

Diese umfassende Charakterisierung der Be- und Entwässerungssysteme von Khorezm diente sowohl als Grundlage für die Einrichtung der hydrologischen Messstandorte als auch für die abschließende Integration aller Mess- und Modellierdaten (Kapitel 8).

7.2 Aufbau eines hydrologischen Messnetzes

Die Festlegung der hydrologischen Untersuchungsräume unterlag einer Vielzahl von technischen, finanziellen und politischen Rahmenbedingungen. Wünschenswert wäre eine möglichst weitreichende Erfassung aller oberflächlichen Flüsse für (1) das gesamte Bewässerungssystem von Khorezm, (2) die großen hydrologischen (kanalbezogenen) Subsysteme (Klichnyasbay, Daryalik, Pitnyak und das Südsystem) und (3) alle administrativen Subsysteme (Rayone, UIS und WUA) gewesen. Aus diesen optimalen Anforderungen und den Limitationen ergab sich für alle drei Bereiche ein Kompromiss, der nachfolgend erläutert werden soll.

7.2.1 Das Gesamtmessnetz

Die auf den ersten Blick günstigste Bezugsfläche zur Erstellung einer Wasserbilanz bildete zunächst das Gesamtbewässerungssystem von Khorezm (vergleiche Abbildung 2-6 und Abbildung 7-1). Die hydrologischen Grenzen sind hier durch den Amu Darya (beziehungsweise durch die leicht ins Landesinnere vorgeschobenen Einlassbauwerke) und den Ozerny-Kollektor sowie die Grenzübergänge nach Turkmenistan und Karakalpakstan eindeutig vorgegeben. Der

Ozerny-Kollektor sammelt innerhalb der Grenzen des Untersuchungsgebietes lediglich von den Feldern Khorezms stammendes Drainagewasser, da im Süden direkt die Wüste und keine weitere Bewässerung anschließt, die dem Kollektor ebenfalls Wasser zuführen könnte. Die Entwässerung verläuft insgesamt ausschließlich nach Westen. Daher konnten wenige Messpunkte im Kollektorsystem für eine Gesamtbilanzierung als hinreichend angesehen werden.

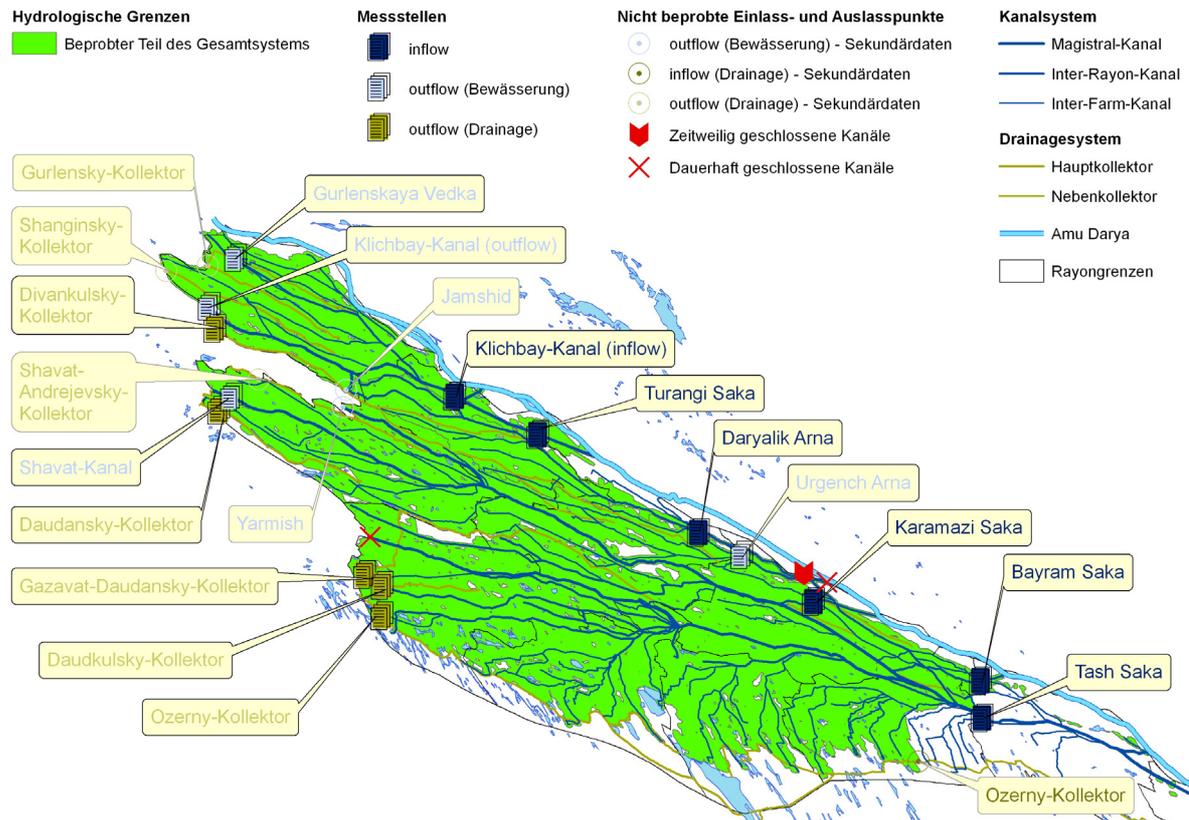


Abbildung 7-4: Das Messnetz zur Erfassung der Kanalwasserflüsse in Khorezm und seine hydrologischen Grenzen.

Außen vor blieben bei diesem Ansatz aus Praktikabilitätsgründen lediglich die direkt aus dem Amu Darya bewässerten Systeme im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes. Dort wird das Wasser über eine nicht überprüfbare Vielzahl von Pumpenanlagen unterschiedlicher Größe in flussnahe Kanalnetze eingespeist. Problematisch gestaltete sich zudem die Zusammenarbeit mit den örtlichen Behörden (BWO Amu Darya)¹⁰², die eine Genehmigung zur Einrichtung einer Messstelle am Left-Bank-Kanal ablehnten, der das Wasser direkt aus dem Tuyamuyun-Speicher nach Khorezm leitet. Aus diesem Grund konnte im Südsystem erst 19 km im Inneren des Bewässerungssystems am Tash Saka ein Messpunkt eingerichtet werden (Abbildung 7-4).

¹⁰² Die BWO Amu Darya ist für die Bewirtschaftung der Magistral-Kanäle und einiger Inter-Rayon-Kanäle in Khorezm zuständig.

Abbildung 7-4 zeigt alle zur Bestimmung der Kanalwasserflüsse in Khorezm beprobten Messstellen sowie die sich daraus ergebenden hydrologischen Grenzen. Insgesamt wurden an sechs Zuflüssen (dunkelblau), vier Frischwasserabflüssen (hellblau) und fünf großen Drainagekanälen (hellgrün), die das Wasser aus Khorezm herausführen, Messstationen eingerichtet. Für drei aus dem System herausfließende Kollektoren (Gurlensky-, Shanginsky- und Shavat-Andrejevsky-Kollektor) sowie den Zufluss des Ozerny-Kollektors ins Messsystem im Südosten (dunkelgrün) wurde von lokalen Behörden Sekundärdaten zur Verfügung gestellt. Mit diesem Messnetz wurden insgesamt die Wasserflüsse von etwa 3.200 km² des knapp 3.900 km² umfassenden Bewässerungssystems (~82 %) gemessen.

7.2.2 Das Palvan-Gazavat-Subsystem

Schwieriger gestaltete sich die Beprobung der identifizierten Subsysteme des Bewässerungsnetzes (Südsystem, Daryalik-System, Pitnyak-System oder Klichnyasbay-System, Abbildung 7-1). Dort bilden die Kollektoren die hydrologischen Grenzen des Versorgungsnetzes. Um die Abflüsse in den Hauptkollektoren hinsichtlich ihrer Herkunft eindeutig der Versorgungseinheit zuordnen zu können, hätten die Mündungsbereiche aller kleineren Nebenkollektoren beprobt werden müssen. Solche intensiven Messungen waren im Rahmen dieser Arbeit weder von der materiellen Ausstattung noch vom Personalaufwand her zu leisten.

Dennoch konnte ein Teil des Südsystems, das Palvan-Gazavat-System, das keinen direkten Anschluss zum Fluss hat, als ein zur Bilanzierung der Wasserflüsse geeignetes untergeordnetes Bewässerungssystem identifiziert werden. Ein positiver Aspekt der Wahl dieses Subsystems war, dass viele der für das Gesamtsystem relevanten Messstellen ebenfalls zur Bestimmung der Durchflussmengen herangezogen werden konnten. Ebenfalls entspricht dieses in Abbildung 7-5 abgesteckte Gebiet etwa der gleichnamigen regionalen Wasserversorgungseinheit (UIS „Palvan-Gazavat“), wodurch perspektivisch die Ergebnisse auch einer administrativen Ebene in Khorezm zur Bewertung des Managements dienen können.

Die Fläche des Palvan-Gazavat-Subsystems beträgt 830 km². Abzweigend vom Tash Saka werden nach Süden teilweise der Rayon Khanka und überwiegend die Rayone Khiva und Kushkupyrt über den Palvan-Gazavat-Kanal mit Wasser versorgt. Später verzweigt das System: der Palvan-Kanal bringt das Wasser in die südwestlichen Regionen, der Gazavat-Kanal in die nordwestlichen Teilgebiete. Nach Süden versorgt ein weiterer Kanal die östlich von Khiva gelegene Fischfarm von Khorezm, in der das ganze Jahr über etwa 8,7 km² Beckenfläche mit Wasser versorgt werden können.

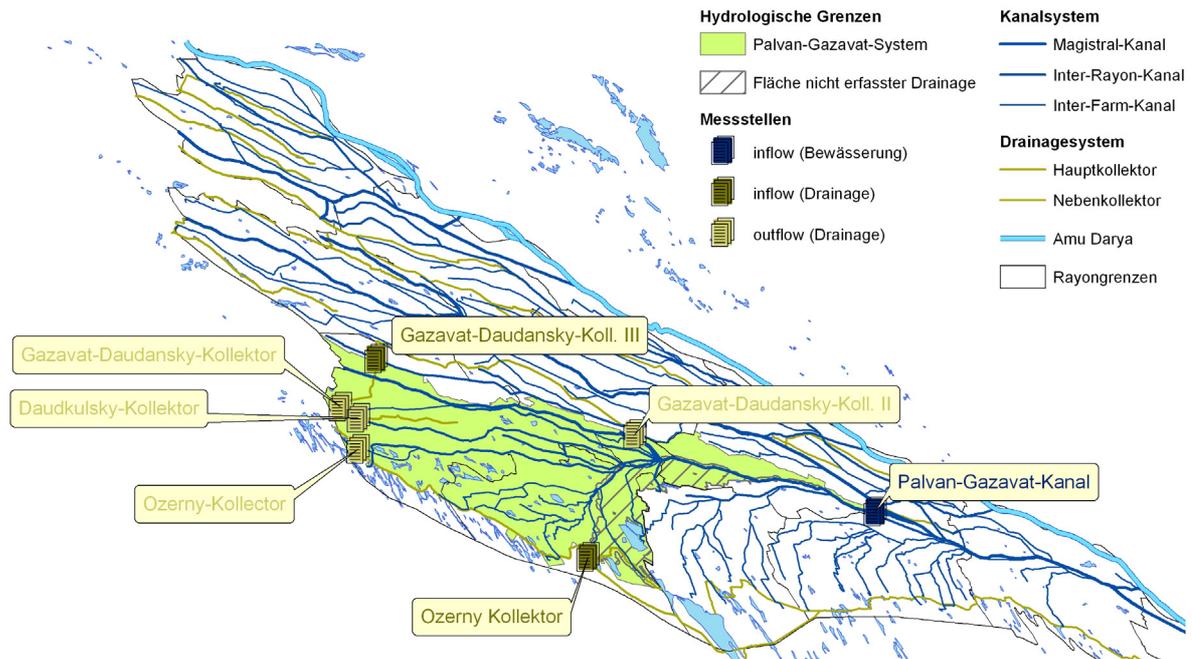


Abbildung 7-5: Die Messstellen zur Bestimmung der Durchflussmengen im Palvan-Gazavat-Subsystem sowie die hydrologischen Grenzen.

Bis auf eine sind alle WUAs innerhalb der Grenzen des Palvan-Gazavat-Systems durchschnittlich mehr als 55 km von den großen Einlassbauwerken und vom Fluss entfernt. Es wurde neben den für das Gesamtsystem installierten Messstellen noch der Einlasspunkt am Palvan-Gazavat sowie das dem System zufließende Kollektorwasser des Ozerny- und des Gazavat-Daudansky-Kollektors (Messpunkt Gazavat-Daudansky-Kollektor III) quantifiziert (Abbildung 7-5). Ebenfalls wurden die Abflussmengen der Drainagesysteme im Oberlauf (Gazavat-Daudansky-Kollektor II) an einer weiteren Messstation gemessen.

7.2.3 Ergänzend gewählte Subsysteme des Bewässerungsnetzes

Unabhängig von politischen Systemen und von der Zielsetzung, die Drainagemengen exakt zu bestimmen, wurden an markanten Gabelungen auf unterschiedlichen Hierarchieebenen des Bewässerungssystems Messstellen alleine zur Messung der Wasserentnahme betrieben (Abbildung 7-6). Durch Indikatorenbildung aus diesen Messdaten und den Ergebnissen der Landnutzungsklassifikation sowie der Evapotranspirationsmodellierung wurden Rückschlüsse auf die Wasserverteilung und die Wassernutzung in Teilbereichen des Gesamtmessnetzes und des Palvan-Gazavat-Systems erwartet. Daher wurden zusätzlich Messstationen am R-8-Kanal, am Palvan- sowie am Gazavat-Kanal installiert. Der R-8-Kanal ist ein Seitenarm des Tash Saka, der überwiegend die Wasserversorgung des Rayons Yangiariq sicherstellen soll.

Insgesamt konnten auf diese Weise Messdaten der Zuflussmengen für sieben Subsysteme im Gesamtmessnetz erhoben werden. Für das Palvan-Gazavat-Subsystem konnten die Oberlaufregion (Palvan-Gazavat; Abbildung 7-6) und zwei Unterlaufregionen (Palvan und Gazavat) unterschieden werden. Ebenfalls ermöglichte die Hinzunahme des R-8-Systems und des Tash-Saka-Messnetzes eine Einschätzung für das in sich abgeschlossene Südsystem. Die Bestimmung des Zuflusses des Klichnyasbay- und des Daryalik-Systems wurde dabei bereits durch die für das Gesamtsystem eingerichteten Stationen sichergestellt.

Wie bereits in der Einleitung dieses Kapitels erwähnt, war die Wahl der Messstandorte letztendlich ein Kompromiss zwischen den Anforderungen der Zielsetzung dieser Arbeit, der vorgefundenen Infrastruktur, den verfügbaren Sachmitteln sowie der Zusammenarbeit mit den örtlichen Behörden. Insgesamt wurden bereits im Jahr 2004 21 Messstellen (nach der russischen Terminologie „Gidropost – Hydropost“ genannt) eingerichtet, wobei teilweise existierende Infrastruktur, die von der BWO Amu Darya bewirtschaftet wurde, genutzt werden konnte.

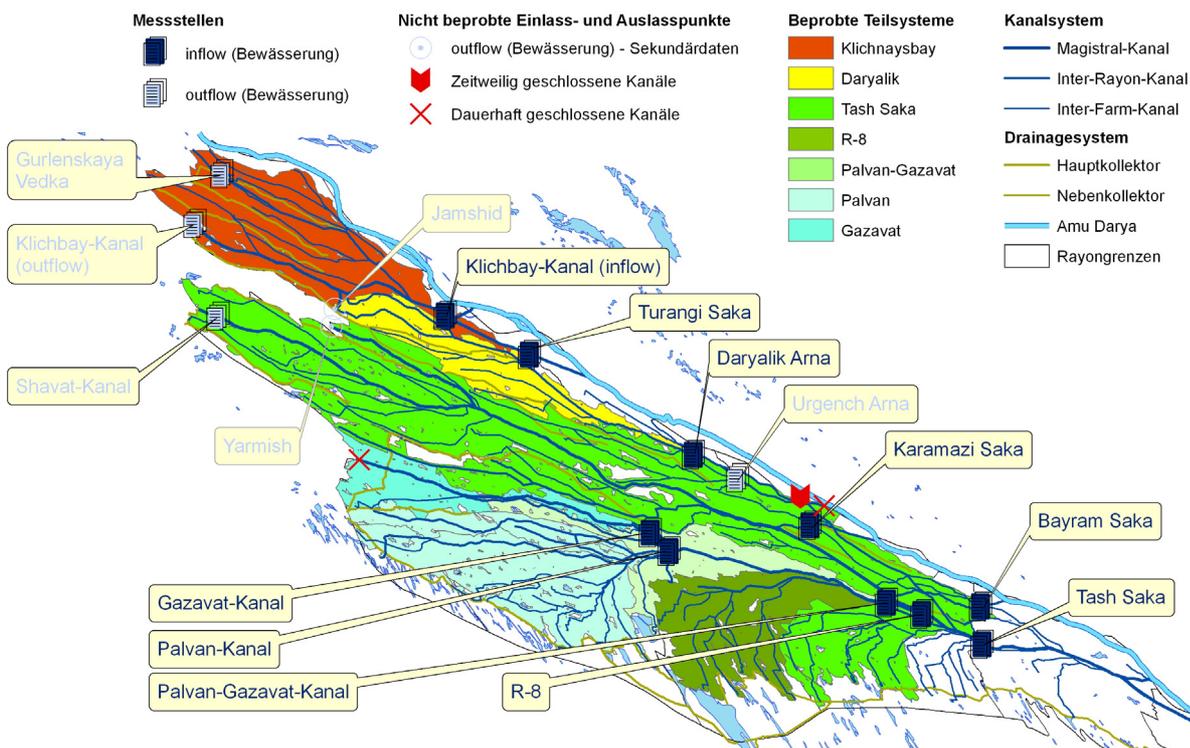


Abbildung 7-6: Messstandorte und hydrologische Grenzen der Teilbewässerungssysteme von Khorezm.

Die Gesamtflächen der nicht beprobten Systeme des Gesamtbewässerungssystems betragen für den Oberlauf des Südsystems 440 km², für das Pitnyak-System 85 km² und für die oben angesprochenen flussnahen Außenbereiche 162 km². Vollständige Messungen wurden für die Sommermonate des Jahres 2005 aufgezeichnet, so dass nur diese Ergebnisse in die späteren

Analysen miteinbezogen wurden. Zunächst sollen aber die Methoden zur Bestimmung der Durchflusssummen vorgestellt werden.

7.3 Messmethodik

Bei einem Fließgewässer existiert – zumindest bei niedrigen und mittleren Wasserständen – ein statistischer Zusammenhang zwischen Wasserstand (Pegel) und Durchflussmenge (VISCHER und HUBER, 1993). Er drückt sich in der sogenannten Schlüsselkurve aus (Abbildung 7-7). Die Voraussetzung für die Bestimmung der Pegel-Durchfluss-Beziehung ist ein unveränderliches und repräsentatives Pegelprofil am Messstandort:

- (1) Es wird über den Beobachtungszeitraum ein konstanter Flussquerschnitt erwartet. Die Veränderungen des Querprofils – auch ober- und unterhalb der Messstelle – dürfen sich nach hohen Wasserständen nicht bedeutend verändern.
- (2) Das Fließverhalten sollte im gesamten Querprofil auch bei größeren Durchflussmengen optimaler Weise nur geringfügig turbulent sein. Dies ist ebenfalls eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz eines Messflügels.
- (3) Ebenfalls wird erwartet, dass die Messungen unbeeinflusst von Rückstauwirkungen oder anderen Änderungen des Gefälles (etwa eines Vorfluters oder anderer Regulierungsbauwerke) erfolgen. Schnelle Durchflussschwankungen (nicht-stationärer Abfluss) kann insbesondere während der Messungen zur Unter- oder Überschätzung des Abflusses führen (Abflusshysteresis; BAUMGARTNER und LIEBSCHER, 1990).
- (4) Die Messstelle sollte über den ganzen Beobachtungszeitraum zugänglich sein, damit auch zu allen Wasserstandsextremen Durchflussmessungen durchgeführt können.

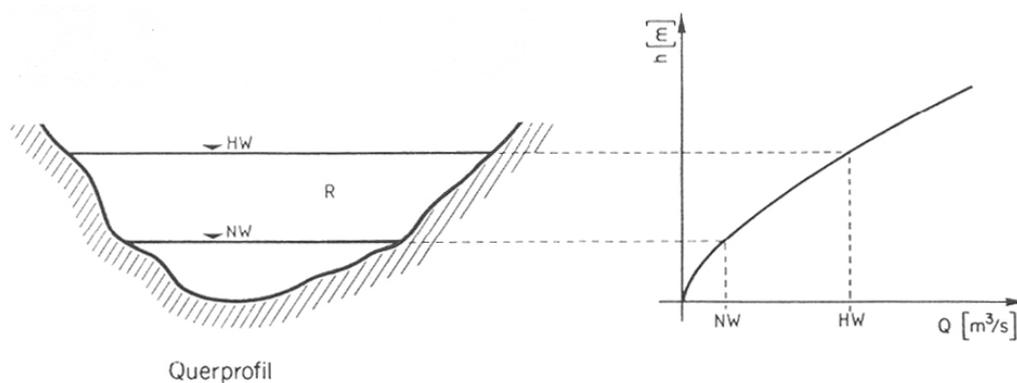


Abbildung 7-7: Beziehung zwischen dem Flussquerschnitt und dem Pegelschlüssel (VISCHER und HUBER, 1993).

Die Voraussetzungen (1) und (2) konnten im Untersuchungsgebiet in sicherem Abstand im Unterlauf der großen Regulierwerke angenommen werden¹⁰³. Sobald behördliche Genehmigungen schriftlich vorlagen, war die Zugänglichkeit (4) ebenfalls gewährleistet. Für die Kollektoren spielten Rückstaueffekte (Voraussetzung 3) ebenfalls keine besondere Rolle, was allerdings für die Bewässerungskanäle nicht immer ausgeschlossen werden konnte. Auf diese Weise entstehen für verschiedene Systemkonfigurationen Unterschiede im Fließgefälle und damit mehrere Schlüsselkurven, die jeweils für den Zeitraum einer bestimmten Konfiguration Gültigkeit haben.

7.3.1 Pegelmessungen

An den 21 Messstandorten in Khorezm wurden mittels Drucksonden halbstündige Pegelmessungen durchgeführt. Dabei kamen Drucksondenpegel mit integriertem Datenlogger der Firma Ecotech zum Einsatz (ECOTECH, 2006). Mit diesen Geräten wird der Druck der Wassersäule oberhalb eines Sensors bestimmt. Das Unterwasserteil (mit Drucksonde, Abbildung 7-8) ist über ein sogenanntes Druckausgleichskabel mit dem Oberwasserteil verbunden. Damit wird eine Adjustierung an die Luftdruckschwankungen vorgenommen, um lediglich Veränderungen der der Pegelsonde auflastenden Wassersäule zu messen.

Die Messgenauigkeit der Drucksonde liegt bei 0,25 % für Messtiefen bis 5 m. Die Messintervalle können zwischen 0,5 Sekunden und 24 Stunden festgelegt werden. Über den im Oberwasserteil eingebauten Datenlogger konnten die Daten über mehrere Monate aufgezeichnet werden, wobei zur Kontrolle die Auslesung der Daten etwa monatlich erfolgte.



Abbildung 7-8: Pegeldatenlogger mit Druckausgleichskabel (Foto: ECOTECH, 2006).

¹⁰³ Allerdings gab es Probleme wenn dem Kanal Sanddämme vorgelagert waren, die während des Jahres geschlossen wurden (Daryalik Arna, Turangi Saka), da bei der Aufschüttung zunächst viele Sedimente vom Wasser transportiert wurden, die sich in ruhiger fließenden Bereichen wieder absetzten und das Profil veränderten.

Dabei wurden die Drucksonden wenn möglich in der existierenden Infrastruktur der BWO Amu Darya installiert, die auf eine spätsowjetische Bestückung der Kanäle mit Schwimmpegeln zurückgeht¹⁰⁴. Zu diesem Zweck wurden Ende der 1980er Jahre an den Hauptmesspunkten im Bewässerungssystem große Metallröhren in den Kanälen errichtet und über kleine Metallbrücken zugänglich gemacht (Abbildung 7-9, links) und darin automatische Pegelmesser installiert¹⁰⁵. Diese Instrumente wurden nicht gewartet, so dass 2004 nur noch an sieben von 21 vorgesehenen Messstellen intakte und zugängliche Metallröhren zur Installation der Drucksonden vorgefunden wurden¹⁰⁶. In den übrigen 14 Fällen waren eigene Konstruktionen erforderlich, um die Drucksensoren zu installieren. Diese wurden bei der Hydrogeologischen Station in Khorezm in Auftrag gegeben (Abbildung 7-9, rechts).



Abbildung 7-9: Sowjetische Infrastruktur zur Installation von Schwimmpegeln (Turangi Saka, links) und zur Kompletzierung des Messnetzes aus dem Projektbudget im Gelände errichtete Messstellen (Urgench Arna, rechts); beide Stationen sind auch offizielle Messpunkte der BWO Amu Darya.

Die exakte Standortwahl orientierte sich nach bester Möglichkeit an den in Kapitel 7.2 beschriebenen Kriterien. Leider traten an den Messstellen am Tash Saka, Turangi Saka und Klichbay Arna aufgrund der Nähe (15 km, 9 km und 5 km) zu den benachbarten Regulierungsbauwerken Änderungen im Fließgefälle auf (beispielsweise Rückstau), die nicht in den Pegeldata dokumentiert werden. Ein Datenvergleich mit den Pegelschwankungen des im Unterlauf des nächstgelegenen Verteilers im Tash Saka gelegenen Palvan-Gazavat-Kanals ließ aber annehmen, dass die Veränderungen der Wehrkonfigurationen während der Sommersaison 2005 nur geringfügig waren. Im Unterlauf des Einlassbauwerks des R-8-Kanals musste ab mittleren Wasserständen mit stärkerem turbulentem Fließen gerechnet werden. An diesem

¹⁰⁴ Mündliche Kommunikation mit Personal der BWO Amu Darya, April 2004.

¹⁰⁵ Mit diesen Messsystemen sollte noch in russischer Zeit die frühere Methode, die Pegel dreimal täglich durch Personal an den Messstellen ablesen zu lassen, abgelöst werden, um eine größere Detailschärfe der Wasserstandsmessungen zu erzielen.

¹⁰⁶ Die Genehmigung zur Nutzung der intakten Teile dieser Infrastruktur wurde Anfang Juni 2004 von der BWO Amu Darya und dem lokalen Wasserwirtschaftsamt erteilt.

Messpunkt wurden die Messfahrten bei Zuflussmessungen bei starken Ungenauigkeiten in den Daten wiederholt.

7.3.2 Durchflussmessungen

An allen Messstandorten wurde der Durchfluss über die mittlere Fließgeschwindigkeit im Durchflussquerschnitt bestimmt. Dieses Verfahren wird in der Literatur auch als Durchflussmessung über die räumlich abgestufte Fließgeschwindigkeit im Querschnitt bezeichnet (FÜRST, 2006). Die Durchflussmenge Q wird dabei durch die Bildung des Oberflächenintegrals der Fließgeschwindigkeiten v über den Durchflussquerschnitt A ermittelt.

$$Q = \iint_A v \, dA$$

Da eine kontinuierliche Ermittlung von v messtechnisch nicht durchführbar ist, wird der Querschnitt des Messprofils in diskrete Intervalle zerlegt (Abbildung 7-10). An in der Vertikalen festgelegten Referenzpunkten werden dann auf jedem Intervall repräsentative Durchflussmessungen vorgenommen. Die Ergebnisse werden zu einem Gesamtdurchfluss aufsummiert.

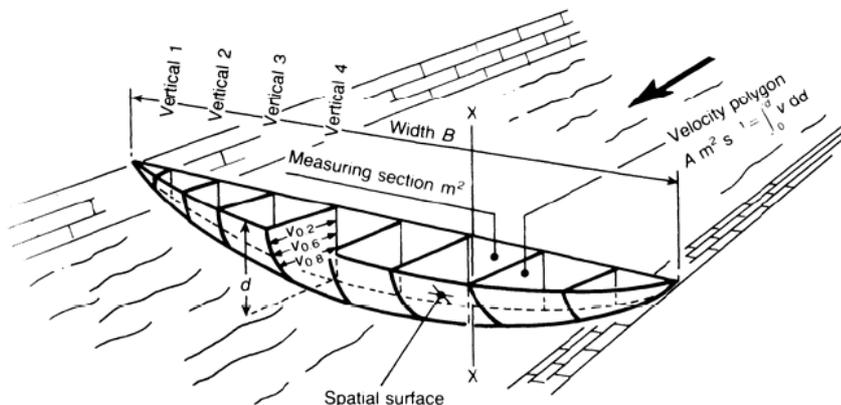


Abbildung 7-10: Prinzip der Durchflussbestimmung über die Messung der Strömungsgeschwindigkeit (HERSCHY, 1995).

Im Vertikalprofil werden zur Messung des Durchflusses sogenannte hydrometrische Messflügel (Abbildung 7-11) in unterschiedlichen Messhöhen eingesetzt (HERSCHY, 1995). Auf der einen Seite ist eine möglichst große Anzahl der Messpunkte zu wählen, um die Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt so genau wie möglich zu erfassen. Auf der anderen Seite dürfen während einer Durchflussmessung für das gesamte Profil keinesfalls deutliche Änderungen der Wasserführung an der Messstelle auftreten. Dies setzt eine möglichst kurze Messdauer und damit eine angepasste Zahl an Einzelmessungen voraus.

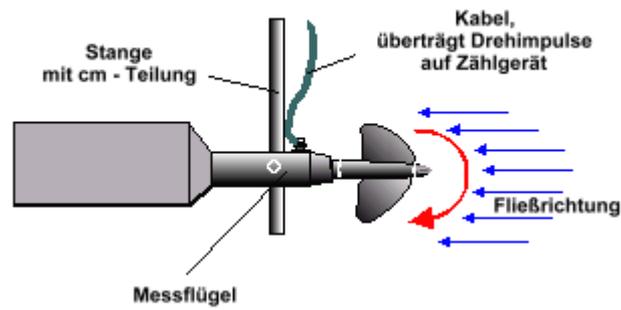


Abbildung 7-11: Hydrometrischer Messflügel, befestigt an einer mit metrischer Skalierung versehenen Stange für die Höhenmessung. Über die Anzahl der Umdrehungen pro Zeiteinheit wird die Fließgeschwindigkeit des Wassers bestimmt.

In Khorezm kam ein ecoTech RHCM-Flügelmesser mit Teleskopstab (450 cm) zum Einsatz (ECOTECH, 2006). Der Messbereich des Instruments erlaubt die Quantifizierung von Fließgeschwindigkeiten zwischen 0,1 und 9,99 m/s. Seine Genauigkeit wird vom Hersteller mit maximal 1,0 % und 5,0 % Abweichung bei Fließgeschwindigkeiten über beziehungsweise unter 0,5 m/s angegeben. Um der Voraussetzung konstanter Durchflussmengen gerecht zu werden, wurden die Intervalle der Durchflussmessung vom Querschnitt und der Breite des Kanals festgelegt. Nachdem anfänglich verschiedene Intervallabstände getestet wurden, schwankten diese letztendlich je nach Kanal zwischen 3,0 m und 5,0 m. Die Durchflussmessungen innerhalb einer Stromröhre wurden nach der Zweipunktmethode in 20 % und 80 % der im Vertikalprofil gemessenen Tiefe durchgeführt (FÜRST, 2006). Die Messfahrt (Abbildung 7-12, rechts) wurde an jedem Standort einmal wiederholt, so dass Ungenauigkeiten einer Einzelmessung durch Mittelwertbildung in einem Querschnittssegment minimiert werden konnten.



Abbildung 7-12: Vorbereitung (links) und Durchführung (rechts) einer Abflussmessung.

Die Fehlerquellen dieses Verfahrens umfassen Kalibrationsprobleme der Messflügel, Verwirbelungen bei den Einzelmessungen, unregelmäßige Querschnitte, unangepasste Messabstände.

Exakte Fehlergrenzen sind daher nur schwierig zu bestimmen. Erfahrungswerte liegen – bei günstiger Messstellenwahl – in einem Abweichungsbereich bis maximal 10 % (HERSCHY, 1995).

Es existieren weit mehr Verfahren zur Messung des Abflusses in einem Fließgewässer (USDA, 2001; FÜRST, 2006), die auch in Khorezm alternativ hätten eingesetzt werden können. Sicherlich wären an den Einlassbauwerken physikalisch basierte Berechnungen des Abflusses, über die Wehrkonfiguration und den Wasserstand angepasst, möglich gewesen (USDA, 2001). Allerdings hätte zur Anwendung dieses Verfahrens grundsätzlich sichergestellt werden müssen, dass die Veränderungen der Wehrkonfigurationen mitdokumentiert werden, was nicht erreicht werden konnte¹⁰⁷. Für andere Verfahren wie die Einrichtung von Messwehren oder die Anwendung der neu entwickelten Doppler- oder Laufzeitverfahren (FÜRST, 2006) waren entweder die Kanäle oder die Kosten zu groß.

7.4 Ergebnisse und Diskussion

Die Pegel- und Durchflussmessungen wurden während der ganzen Sommersaison 2005 durchgeführt. Dieses Kapitel beschreibt zunächst die aus den Messergebnissen resultierenden Schlüsselkurven und konkretisiert Problemlösungen, die bei wechselndem Fließverhalten der Kanäle angewendet wurden (Kapitel 7.4.1). Danach werden exemplarisch Abflusskurven für Bewässerungs- und Drainagekanäle in Khorezm vorgestellt und diskutiert (Kapitel 7.4.2). Diese Ergebnisse ermöglichen die Quantifizierung des Wasserentnahme und der Drainagemengen im saisonalen Verlauf (Kapitel 7.4.3).

7.4.1 Schlüsselkurven aus Pegel- und Durchflussmessungen

In der Sommersaison 2005 wurden an den 21 beschriebenen Messstellen bei unterschiedlichen Wasserständen Durchflussmessungen durchgeführt, um das Verhältnis zwischen Pegel und Durchfluss zu ermitteln. Wichtig war dabei, vor allem die extrem niedrigen und hohen Wasserstände einzubeziehen, da die Veränderungen des Wasserstandes nicht absolut, sondern relativ gemessen wurden. Für 18 von 21 Messstationen konnten die daraus resultierenden Schlüsselkurven ohne Komplikationen errechnet werden. Abbildung 7-13 zeigt die Beispiele für zwei unterschiedlich dimensionierte Kanäle, den Tash Saka und den Divankulsky-Kollektor.

¹⁰⁷ Auch für die letztendlich angewendete Messtechnik hätten insbesondere bei den Bewässerungskanälen Wehrkonfigurationen im Ober- und Unterlauf vor und nach den Messungen abgefragt werden müssen um Auswirkungen von Änderungen des Gefälles zur Messzeit abzuschätzen und potenzielle Messfehler zu verkleinern. Allerdings wäre der logistische Aufwand für derartige Untersuchungen zu groß geworden.

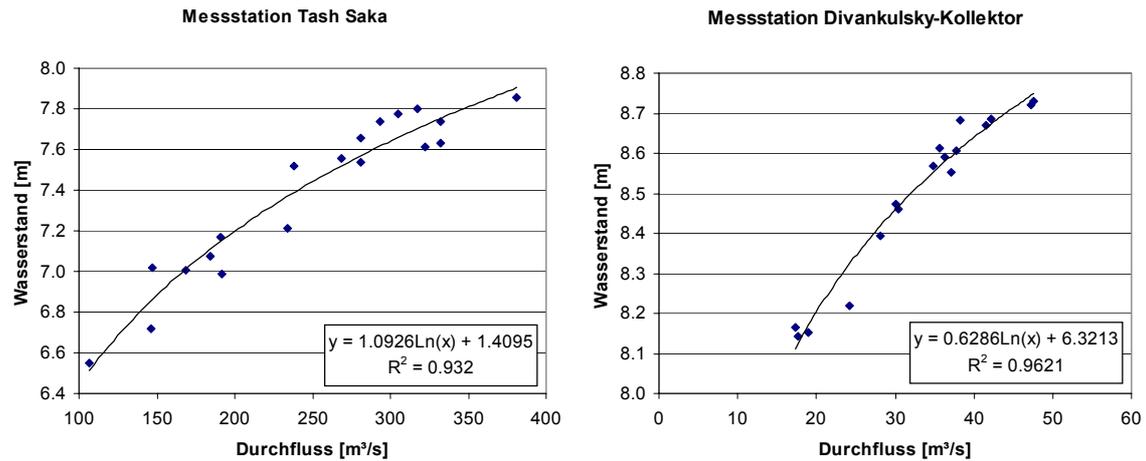


Abbildung 7-13: Schlüsselkurven, ermittelt aus Durchfluss- und Pegelmessungen an den Messstationen der Kanäle Tash Saka und Divankulsky-Kollektor.

Problematischer gestaltete sich die Erstellung der Schlüsselkurven für die Messstellen am Überlauf des Urgench Arna (Messstelle Urgench Arna) sowie die Kanäle Klichbay Arna und Turangi Saka, die sich durch den Zusammenfluss unmittelbar hinter den Messstellen beeinflussen. In beiden Fällen führten Änderungen des Fließgefälles durch verschiedene Systemkonfigurationen zu mindestens zwei Schlüsselkurven. Für manche kürzere Zeitspannen mussten Abschätzungen vorgenommen werden. Obwohl die Veränderungen der Systemkonfigurationen durch Befragungen des Personals an den Wehranlagen ermittelt werden konnte, wurden in den Übergangszeiten, in denen sich die neuen Systemkonfigurationen einpendelten, plausible Abschätzungen des Durchflusses notwendig. Diese nicht quantifizierbaren Ungenauigkeiten im Datensatz spielten aber eine untergeordnete Rolle, da, wie erwähnt, entweder die Zeiträume dieser Übergänge kurz waren, oder in diesem Messzeitraum generell vernachlässigbare Wassermengen zu beobachten waren.

Von April bis Anfang Mai war der Daryalik Arna in unmittelbarer Flussnähe durch einen Sanddamm geschlossen, so dass über diesen Kanal keine Wasserzufuhr nach Khorezm möglich war. Der Überlauf des Urgench Arna bildet zu diesem Zeitpunkt den einzigen Zulauf in das Daryalik-System. Für diese Konfiguration des Bewässerungssystems konnte eine lineare Schlüsselkurve errechnet werden (Abbildung 7-14, rechts; „Konfiguration 1“). Von Anfang Juni bis Mitte August 2005 wurde der Sanddamm entfernt, um in der wasserintensiven Zeit das Wasser direkt aus dem Amu Darya ins Daryalik-System einzuspeisen („Konfiguration 2“; Abbildung 7-14). Durch die Neuerrichtung des Sanddamms wurde die ursprüngliche Systemkonfiguration wieder hergestellt.

Durch Datenvergleiche und Befragung des BWO-Personals an den Wehranlagen („Hydrometer“) konnte ermittelt werden, dass der Überlauf in der Sommerperiode nur dann geöffnet wird, wenn

zuviel Wasser aus dem Südsystem zum Urgench Arna kommt oder wenn das Wasser des Amu Darya nicht ausreicht, um den Zufluss zum Daryalik-System sicherzustellen. Ersteres ist gerade in den wasserintensiven Monaten sehr unwahrscheinlich. Es wurde daher zunächst eine fallende Schlüsselkurve angenommen (aus dem Streudiagramm in Abbildung 7-14, links), die direkt aus den Messdaten dieses Untersuchungszeitraums abgeleitet werden konnte, um das „Auffüllen“ fehlender Wassermengen aus dem Fluss nachzuzeichnen.

Die Ergebnisse konnten als plausibel angenommen werden, da sie mit den während der „Konfiguration 2“ unabhängig durchgeführten Messungen der BWO-Amu Darya vergleichbar waren; die Abweichungen lagen mit einer Ausnahme unter 20 %. Ohnehin spielt dieser Systemüberlauf zu diesem Zeitraum in der Gesamtbilanzierung der Wasserflüsse keine besondere Rolle. Die beobachteten Durchflussmengen von Null bis 20 m³/s liegen bei einem Gesamtzufluss von über 350 m³/s am Tash Saka zwischen Null beziehungsweise 8,0 % (hier müsste der Irrtum der getroffenen Annahme 100 % betragen).

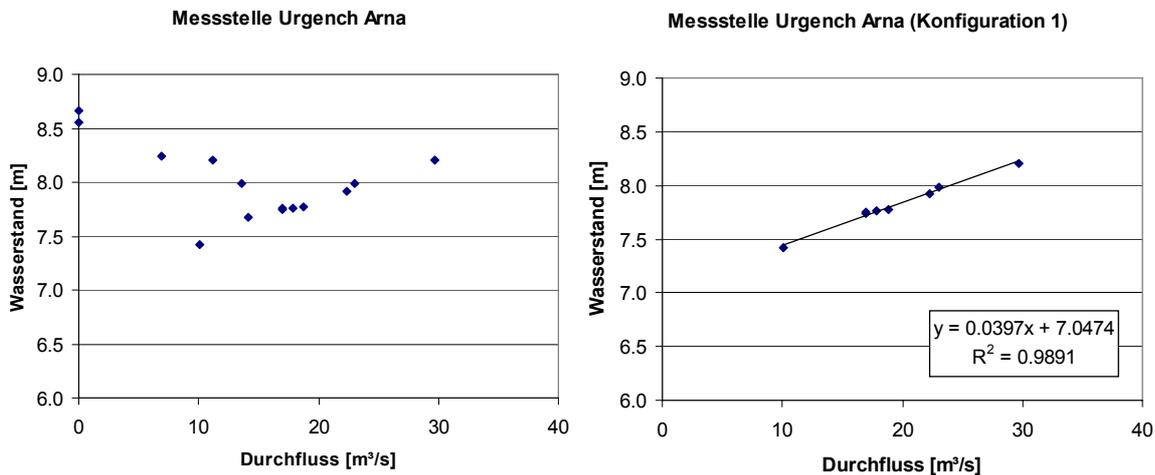


Abbildung 7-14: Streudiagramm der Durchfluss- und Pegelmessungen am Überlauf des Urgench Arna (links) und Schlüsselkurve für die Periode mit konstantem Fließgefälle (Konfiguration 1, mit Sperrung des Amu Darya-Zuflusses zum Daryalik Arna; eine Schlüsselkurve für Konfiguration 2 ergibt sich theoretisch aus den übrigen, nicht in Konfiguration 1 verwendeten Messpunkten).

7.4.2 Tägliche, monatliche und saisonale Zu- und Abflussmengen

Aus den Schlüsselkurven wurden – jeweils für den zeitlichen Gültigkeitsbereich der Kurve – die halbstündig aufgezeichneten Pegelmessungen in Durchflussmengen umgewandelt und für das Zeitintervall einer halben Stunde als konstant angenommen. Auf dieser Basis erfolgte die Berechnung der halbstündigen abgeflossenen Volumina. Diese wurden dann zu Tages-, Dekaden- und Monatswerten addiert. Abbildung 7-15 zeigt exemplarisch die zu saisonalen Abflussganglinien zusammengestellten Tagessummen für einen Bewässerungs- und einen Drainagekanal.

In den Abflussganglinien des Tash Saka (Abbildung 7-15, oben) werden die unterschiedlichen Konfigurationen und die Regulierungsprozesse der Einlassbauwerke im Oberlauf deutlich. Nach ein paar Tagen relativ konstanter Durchflussmengen kommt es zu einem sprunghaften Anstieg oder Absinken der Durchflussmengen, die sich dann aber zumeist wieder auf einem quasikonstanten Niveau einpendeln. Anfang April sieht man noch die letzten Zuflussspitzen der *leaching*-Periode, also der vor-saisonalen Auswaschung des Salzes von den Feldern. Die Maxima des Zuflusses ($34.000.000 \text{ m}^3/\text{Tag}$) liegen im zeitlichen Verlauf, wie überall im Bewässerungssystem von Khorezm, zwischen Juni und Juli. Bis Ende August halten sich die zugeführten Wassermengen auf hohem Niveau, um danach rasch auf unter $10.000.000 \text{ m}^3/\text{Tag}$ zu sinken. Der erneute Anstieg Ende September zeigt den Beginn einer post-saisonalen *leaching*-Periode zur Vorbereitung der Weizenfelder und die erste Bewässerung.

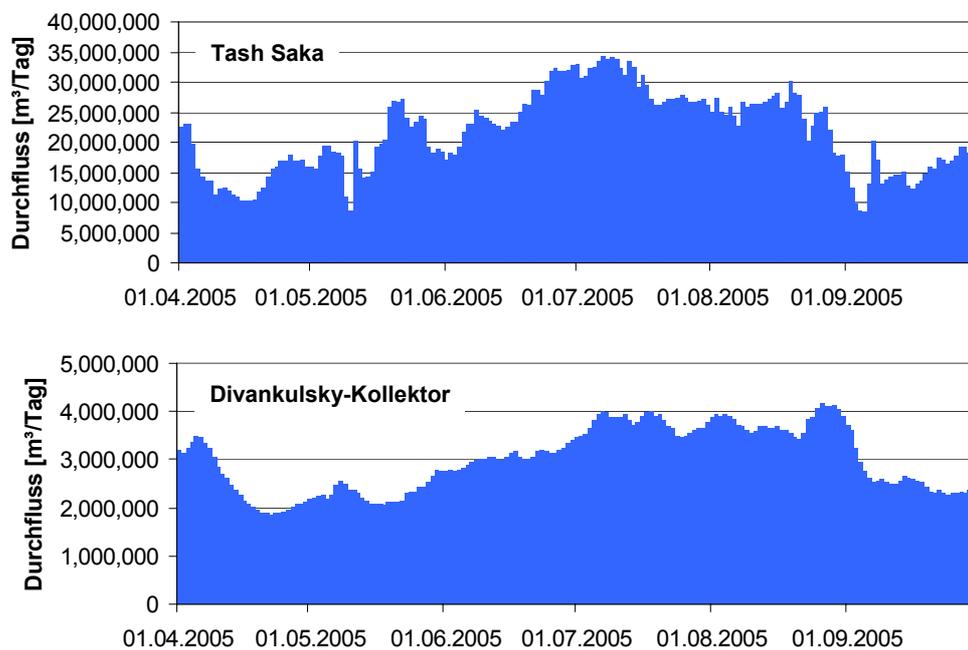


Abbildung 7-15: Exemplarisch ausgewählte Abflussganglinien des Tash Saka (Bewässerung, oben) und des Divankulsky-Kollektors (Drainage, unten).

Für den Divankulsky-Kollektor (Abbildung 7-15, unten) liegen die Gesamttagesmengen um eine Zehnerdimension niedriger, zeigen aber weniger sprunghafte Änderungen als ein regulierter Bewässerungskanal. Insgesamt ist der Kurvenverlauf im Jahresgang wesentlich flacher, die Spitzen treten im Vergleich zum Tash Saka etwa fünf bis zehn Tage später auf. Die Ende August verzeichnete Abflussspitze ist möglicherweise auf das Ablassen des Wassers von den Reisfeldern zwei Wochen vor der Ernte zurückzuführen, wobei dies im Mittel nach dem landwirtschaftlichen Anbaukalender erst in der Mitte des Septembers zu erwarten gewesen wäre.

Wie bereits in Kapitel 7.4.1 beschrieben, führte der Zusammenfluss von Turangi Saka und Klichbay Arna nach wenigen Kilometern zu Veränderungen des Fließgefälles und so zu

unterschiedlichen oder undefinierbaren Schlüsselkurven. Günstigerweise war während der gesamten Sommersaison bis auf wenige Wochen (24 Tage) lediglich einer der beiden Kanäle geöffnet. Es stellte sich heraus, dass sich aber für den gesamten Beobachtungszeitraum für die Summe der beiden Durchflussmengen (beide Messungen wurden direkt nacheinander vorgenommen) und dem Pegel am Klichbay Arna eine gemeinsame Schlüsselkurve berechnen lässt (Abbildung 7-16).

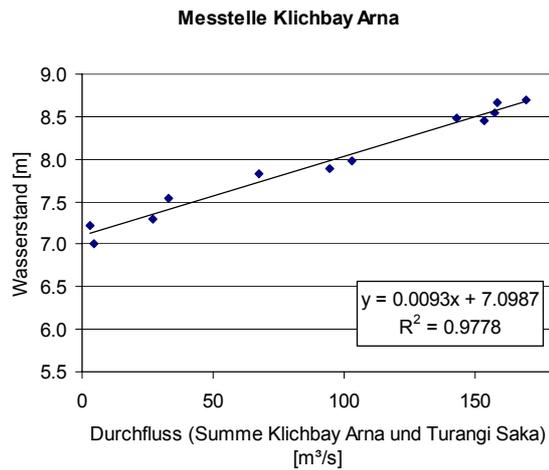


Abbildung 7-16: Schlüsselkurve, erstellt aus den Pegelständen des Klichbay Arna und den Summen des Durchflusses aus Turangi Saka und Klichbay Arna.

Die Anwendung der Schlüsselkurve auf die Pegel des Klichbay Arna ist in Abbildung 7-17 durch die blauen Säulen visualisiert. Gegenübergestellt werden die Zuflussmengen am Turangi Saka (rote Linie) und am Klichbay Arna (orange Linie), die sich aus den Schlüsselkurven ergeben, wenn das jeweils andere Einlassbauwerk geschlossen ist. Es ist eine leichte, zu Beginn des Septembers sogar eine starke Überschätzung (35 %) der Abflüsse am Turangi Saka zu verzeichnen. Die Ursache hierfür liegt in der Distanz zwischen Durchflussmessungen und Pegelmessungen. Für den Klichbay Arna liegen die beiden Linien aufgrund der räumlichen Nachbarschaft wiederum sehr nah zusammen. Daher wurde für die betroffenen 24 Tage der Sommersaison 2005 der Zufluss zu Klichnyasbay-System unter der Annahme der Gültigkeit des Zusammenhangs der summierten Durchflussmengen mit dem Pegel am Klichbay Arna berechnet.

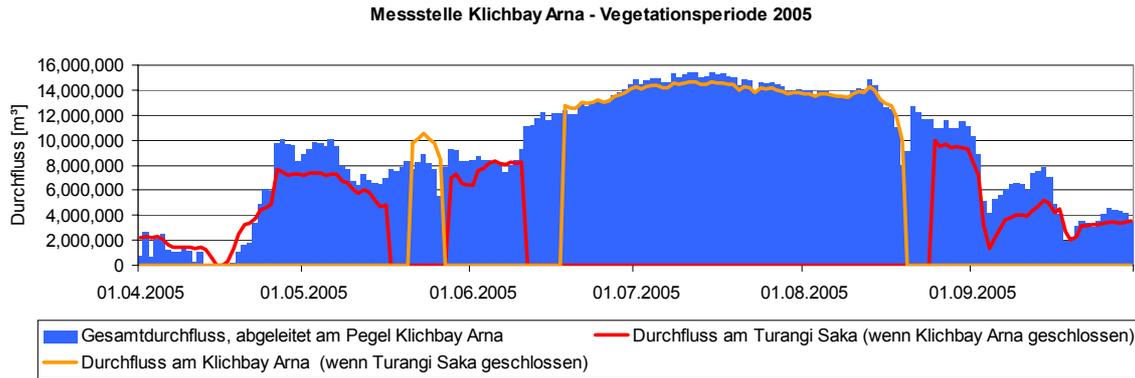


Abbildung 7-17: Ermittlung des täglichen Zuflusses des Klichnyasbay-System. Abstimmung der am Pegel Klichbay Arna errechneten Schlüsselkurve für die Durchflusssummen aus Klichbay Arna und Turangi Saka.

7.4.3 Abschätzung der Gesamtwasserentnahme

Wie in Kapitel 7.2 beschreiben, wurden für zwei Untersuchungsräume durch hydrologische Messnetze alle zu- und abfließenden Wassermengen ermittelt. Dazu wurden die täglichen Abflussmengen der jeweiligen involvierten Messstellen bilanziert, die in Kapitel 7.2.1. und 7.2.2 benannt wurden. Die daraus resultierenden Ergebnisse für den beprobten Teil des Gesamtbewässerungssystems und das Palvan-Gazavat-System sollen im Folgenden vorgestellt und die Verläufe der täglichen Daten diskutiert werden, um verschiedene Wirkungszusammenhänge zwischen Bewässerung und Drainage in Khorezm aufzudecken. Eine gebietsbezogene Auswertung und die Gegenüberstellung mit den Variablen der Landnutzung und des Wasserverbrauchs (saisonale tatsächliche Evapotranspiration) erfolgt in Kapitel 8.

Das äußere hydrologische Messnetz umfasst etwa 82 % des Bewässerungsgebietes. Wie in Kapitel 7.2.1 beschrieben, konnten nur die Außenbereiche (überwiegend Pumpanlagen am Amu Darya), das Pitnyak-System und der dem Einlass nächste Teil des Südsystems nicht beprobt werden. Innerhalb dieses Gesamtmessnetzes ähnelt der Verlauf der Wasserentnahme dem in Kapitel 7.4.2 beschriebenen täglichen Zufluss im Tash Saka (Abbildung 7-18). Nach dem Ende der *leaching*-Periode gingen die Zuflussmengen stark zurück, um dann – bis auf einen ersten größeren Wasserschub in der zweiten Maihälfte – kontinuierlich anzusteigen und gegen Juli dann den Höhepunkt zu erreichen (vegetative Phase von Reis und Baumwolle). Von einem hohen Plateau, das bis Ende August reichte, sanken dann die Zuflüsse kurz bevor die Reisfelder abgelassen wurden. Im September wurde die Wasserzufuhr stark reduziert mit ansteigenden Tendenzen zum Monatsende, welche die einsetzende *leaching*-Phase und den Anbau von Winterweizen andeuten.

Die Drainage folgte der Bewässerung mit einer leichten Verzögerung. Die Grundwasserspeicher waren durch die *leaching*-Periode aufgefüllt, so dass in der beginnenden Sommersaison zunächst diese Wasser abgeleitet wurden (hier ist der Abfluss teilweise höher als der Zufluss). Mit steigender Wasserzufuhr stiegen auch mit einer leichten Verzögerung die Mengen des

Kollektorwassers. In der Zeit zwischen Mai und August wurde das meiste Wasser auf den Feldern verbraucht oder dem Boden- und Grundwasser zugeführt. Kurz nach dem Rückgang der Bewässerungswassermengen im September sanken auch die Abflüsse durch die Drainage, blieben aber dennoch auf hohem Niveau, was andeutet, dass nach den intensiven Bewässerungsphasen überschüssiges Wasser aus Khorezm abgeführt wird.

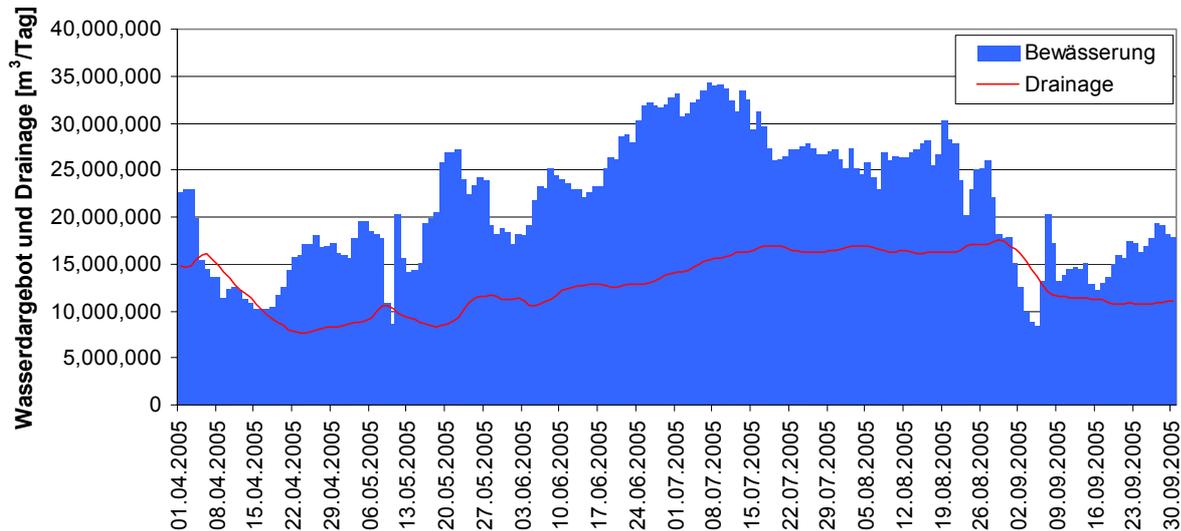


Abbildung 7-18: Tägliche Wasserentnahme und abgeführte Drainagemengen in Khorezm bezogen auf das äußere hydrologische Messnetz, Sommersaison 2005.

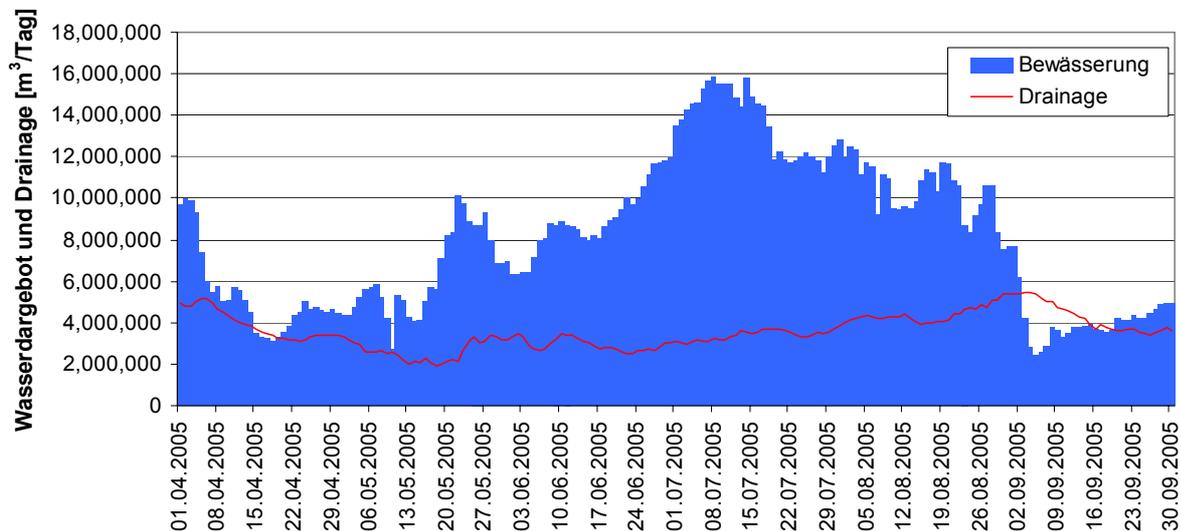


Abbildung 7-19: Tägliche Wasserentnahme und abgeführte Drainagemengen im Palvan-Gazavat-System, Sommersaison 2005.

Das Palvan-Gazavat-System verhält sich sowohl hinsichtlich Bewässerung als auch Drainage ähnlich wie das äußere hydrologische Messnetz. Allerdings weisen unterschiedliche Verhältnisse von Drainage und Wasserentnahme auf Besonderheiten des Systems hin (Abbildung 7-19). Der Anteil des Drainagewassers war 2005 im Palvan-Gazavat-System wesentlich niedriger als im Gesamtsystem, was einerseits auf eine höhere Nutzung des Wassers hindeutet, andererseits eine schlechtere Qualität der Drainagesysteme vermuten lässt. Dies ist an dieser Stelle noch nicht eindeutig zu beantworten, da hierzu ein Vergleich mit den Verbrauchs- und Speichervariablen (ET_{act} sowie Boden- und Grundwasser) notwendig wird. Die Vermutung schlechterer Drainagesysteme lässt sich allerdings durch das wesentlich länger anhaltende „Leerlaufen“ des Drainagesystems während des Septembers im Vergleich zum Gesamtsystem stützen. Darüber hinaus ist die absolute Schwankungsbreite der Drainagewassermengen wesentlich geringer als im Gesamtsystem. Allerdings folgt auch hieraus nicht unbedingt eine schlechtere Drainage im Palvan-Gazavat-System, da es umgekehrt auch bedeuten kann, dass in den übrigen Teilsystemen mehr Wasser fast ungenutzt ins Kollektorsystem gelangen kann. Es wird erwartet, dass durch die Bildung geeigneter Indikatoren die Klärung der Situation ermöglicht wird (Kapitel 8).

7.5 Ergebnisvergleich mit offiziellen statistischen Daten

Wie einleitend in diesem Kapitel erwähnt, wurden die hydrologischen Messungen in Khorezm unter anderem deshalb durchgeführt, um die offiziellen Statistiken, die seitens des ICWC (SIC-ICWC, 2006) oder der lokalen Behörden in Khorezm für diese Arbeit zur Verfügung standen, auf Plausibilität zu untersuchen.

Problematisch für diesen direkten Vergleich der Messdaten waren zunächst die unterschiedlichen Bezugsräume. Die offiziellen Statistiken umfassen alle Subsysteme, so auch die Außenbereiche am Fluss, das Pitnyak-System und die nicht-beprobten Teile des Südsystems. Das hydrologische Messnetz umfasste lediglich 82 % dieses Gesamtsystems. Daher wurden die Daten unter der Annahme extrapoliert, dass sich die flächenbezogenen Mittelwerte aus dem hydrologischen Messnetz auf den äußeren Bereich übertragen lassen.

Dieser Schritt war auf den ersten Blick plausibel, da die Ergebnisse der Modellierung der saisonalen tatsächlichen Evapotranspiration (ET_{act}) im hydrologischen Messnetz 83 % der für das gesamte Bewässerungssystem aufsummierten Werte enthielten. Berücksichtigt man allerdings die bereits in Kapitel 6 aufgezeigten regionalen Disparitäten des Wasserverbrauchs, ist der Schluss zulässig, dass die Extrapolation die tatsächlichen bereitgestellten Wassermengen unterschätzt. Der Grund hierfür ist, dass die betroffenen Gebiete (Außenbereich, Pitnyak-System und nicht-beprobter Teil des Südsystems) alle im Oberlauf des Bewässerungssystems oder in Flussnähe liegen. Daher ist anzunehmen, dass die dort distribuierten Wassermengen höher sind als ein Mittelwert, der für das Gesamtbewässerungssystem angenommen wird.

Abbildung 7-20 zeigt das Ergebnis der vergleichenden Untersuchung. Dekadensummen des Zuflusses werden nach Datenquellen unterschieden. Die rosafarbene untere Fläche repräsentiert die offiziellen Daten. Da die extrapolierten Messdaten für jede Dekade oberhalb der statistischen Daten lagen, markiert der blaue Bereich die Differenz zwischen den in dieser Arbeit tatsächlich gemessenen und den offiziellen Daten. Die blaue Linie stellt die innerhalb der für diese Arbeit definierten hydrologischen Grenzen gemessenen Zuflüsse dar, entsprechend 82 % des Gesamtbewässerungssystems.

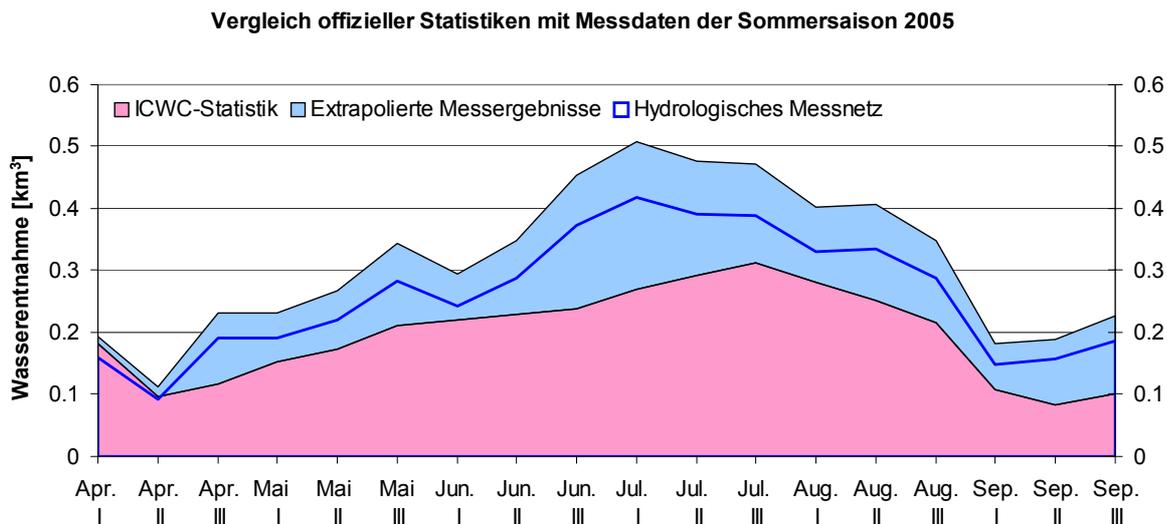


Abbildung 7-20: Vergleich der offiziellen Statistiken des ICWC (SIC-ICWC, 2006) für die Region Khorezm mit den im Rahmen dieser Arbeit erzielten Messergebnissen; die rosafarbenen Fläche beschreibt die Wasserentnahme der amtlichen Statistik in km³ pro Dekade in der Sommersaison 2005 laut ICWC; die blaue Linie entspricht der für jede Dekade gemessenen Wasserentnahme für das hydrologische Messnetz dieser Arbeit, entsprechend 82% des Gesamtbewässerungssystems; die Obergrenze der blauen Fläche stellt die im Rahmen dieser Arbeit auf das Gesamtbewässerungssystem Khorezms extrapolierte Wasserentnahme dar.

Im vergleichsweise kurzen Messzeitraum unterschätzen die offiziellen Statistiken die gemessenen Abflussmengen um durchschnittlich 37 %. Die Ursachen für diese Differenz sollen an dieser Stelle nicht diskutiert werden. Grundsätzlich zeigen diese Resultate, dass Forschungsergebnisse allein auf Basis der allgemein zugänglichen sekundären Daten hinterfragt werden sollten, worauf ja auch bereits in den Arbeiten von MÜLLER (2006) hingewiesen wurde. Die die vorliegenden Ergebnisse reichen jedoch nicht aus, um Regelmäßigkeiten in den Datenunstimmigkeiten festzustellen. Dazu wären mehrjährige regionale Detailanalysen und Vergleiche mit Ober- und Unterlaufregionen Khorezms erforderlich¹⁰⁸.

¹⁰⁸ Partiiell ist für solche Studien das Datenmaterial vorhanden, wurde aber nicht in die Arbeit integriert, da dies nicht Ziel dieser Arbeit war.

Kritisch diskutiert werden sollten dennoch die Vorzüge und Nachteile der gewählten Methodik zur Bestimmung der Wasserentnahme in Khorezm. Insgesamt haben 21 Messstationen zur Abdeckung von 82 % des gesamten Bewässerungsnetzes von Khorezm ausgereicht. Sicherlich konnten damit nicht sämtliche Wasserflüsse in und aus der Region ohne Abweichungen dokumentiert werden, da Veränderungen in den nichtbeprobten untergeordneten Kanalsystemen im operationellen Betrieb sowie nicht erfasste kleinere Zuläufe oder Abflüsse sicher zu Variationen der exakten Datenmengen geführt haben. Eine nahe 100%-ige Exaktheit hätte durch eine vollständige Abdeckung mit Messstationen auf einer niedrigeren Hierarchieebene der Kanäle erreicht werden können. Ebenfalls hätten aufwändige Erfassungen der entnommenen Wassermengen an den Pumpenanlagen entlang der großen Wasserkanäle eine Gegenkontrolle der Messergebnisse ermöglicht. Eine weitere Option zur Prüfung und Steigerung der Genauigkeit wäre die zusätzliche Erhebung von hydraulischen Daten an den Wehranlagen gewesen, um die Variationen des Fließgefälles genau zu quantifizieren.

Gegenmessungen oder zusätzliche Datenaufzeichnungen hätten allerdings den Rahmen dieser Arbeit gesprengt. Ebenfalls ist zu erwarten, dass kleinere Zu- oder Abflussmengen sich die Waage halten und nicht ins Gewicht fallen, so dass mit den 21 Messstellen durchaus ein praktikabler Kompromiss zur Quantifizierung der Wasserflüsse in Khorezm gefunden werden konnte. Ein ausschlaggebendes Argument für die angewendete Methodik ist, dass die Bestimmungen der Wasserflüsse seitens der BWO Amu Darya und der OGME Khorezm an denselben Messstellen mit derselben Technik durchgeführt werden, so dass auf diese Weise eine Vergleichbarkeit der Messdaten hergestellt werden konnte.

Vier gemeinsame Durchflussmessungen wurden mit Mitarbeitern der BWO Amu Darya und der OGME Khorezm durchgeführt (Tash Saka, Daryalik Arna, Divankulsky-Kollektor, Gazavat-Daudansky-Kollektor), wobei keine erheblichen Abweichungen der Messergebnisse über 2 % herausgefunden werden konnten. Damit konnte einerseits die Genauigkeit der eigenen Messmethodik untermauert, aus einer anderen Sicht die Kalibrierung der usbekischen Messinstrumente als zufriedenstellend angenommen werden.

Zusammenfassend konnte mit diesem Vergleich ein Beitrag zur Stützung einer wesentlichen, in der Hinführung (Kapitel 1) beschriebenen Hypothese hinsichtlich der Datenlage im hydrologischen Sektor in Mittelasien erbracht werden. Mit den hydrologischen Messungen wurde also ein Grundlagendatensatz aufgezeichnet, der eine genaue Synthese mit den fernerkundlichen Modellierungsergebnissen hinsichtlich der angewandten Fragestellungen erlaubte, womit sich das nachfolgende Kapitel 8 beschäftigt.

8 Raumzeitliche Analyse der Land- und Wassernutzung in Khorezm

Die vorangegangenen Kapitel umfassten die Bestimmung und Interpretation der agrarischen Landnutzung, der saisonalen tatsächlichen Evapotranspiration und der gemessenen linearen Zu- und Abflüsse in Khorezm. Landwirtschaftlich genutzte Flächen konnten verortet und Muster der Landnutzung abgeleitet werden (Kapitel 5). Ebenfalls wurden bereits lokale Disparitäten des Wasserverbrauchs in Khorezm anhand der Modellierungsergebnisse für die saisonale tatsächliche Evapotranspiration festgestellt und diskutiert (Kapitel 6). In Kapitel 7 wurden mit dem oberflächlichen Abfluss temporale Muster der Wasserversorgung und der Drainage für größere Subsysteme des Untersuchungsgebietes bestimmt und erörtert.

Dieses Kapitel greift diese vorangegangenen Ergebnisse auf und fokussiert auf die Analyse von Zusammenhängen zwischen den einzelnen Variablen, um räumliche und zeitliche Muster der Wasserverteilung und des Wasserverbrauchs in der Landwirtschaft Khorezms aufzuzeigen. Im Vordergrund stehen dabei die entsprechend der Zielsetzung (Kapitel 1.1) formulierten Fragen:

- Lassen sich die bereits in Kapitel 6 und Kapitel 7 angedeuteten regionalen Disparitäten der Wassernutzung zwischen den agrarischen Systemen Khorezms im Jahresgang aufschlüsseln? Können Ursachen für regionale Tendenzen (Lage der betrachteten Subeinheit im Bewässerungssystem) benannt und quantifiziert werden?
- In welchem Verhältnis stehen die eingesetzten Wassermengen zur Land- und Wassernutzung in den Bewässerungssystemen Khorezms und in seinen Subsystemen? In welchem Umfang werden Grundsätze der Wasserverteilung in Khorezm eingehalten?
- Wie ist Khorezm im Verhältnis zur Situation im Einzugsgebiet des Aralsees einzuordnen?

Auf allen in Kapitel 7 angegebenen Subsystemen und den nach Kanaldistanzen zu den Einlassbauwerken klassifizierten WUAs wurden Indizien zur Beantwortung dieser Fragen

gesammelt. Dabei wurde die Terminologie des *water accounting* verwendet¹⁰⁹ und Abweichungen davon konkretisiert. Die ermittelten Indikatoren basierten auf den in Kapitel 3.3.2 dargelegten theoretischen Grundlagen.

Die Analysen, die allein auf Fernerkundungsergebnissen (Klassifikation, Modellierung der tatsächlichen Evapotranspiration) beruhen, konnten für beide Untersuchungszeiträume (erweiterte Sommersaison: 1. April bis 31. Oktober 2004 und 2005) umgesetzt werden. Sobald die gemessenen linearen Wasserflüsse in die Analyse einbezogen wurden, reduzierte sich der Untersuchungszeitraum auf die Sommersaison (1. April bis 30. September) des Jahres 2005, da nur für diesen Zeitraum vollständige hydrologische Messungen vorlagen (Kapitel 7). Offizielle statistische Daten konnten aufgrund der aufgedeckten Inkonsistenzen (vergleiche Kapitel 7.5) – trotz Verfügbarkeit – ohne vertiefende Aufschlüsselung von Zusammenhängen keine weitere Anwendung finden¹¹⁰. Es wurden auch Geländebeobachtungen im Jahr 2004 durchgeführt¹¹¹ und Argumentationsketten im Rückgriff auf frühere Arbeiten aufgebaut (beispielsweise FORKUTSA, 2006; IBRAKHIMOV, 2005). Verallgemeinerungen der Erkenntnisse konnten aber nur qualitativ getroffen werden.

8.1 Räumliche Muster der agrarischen Landnutzung und des Wasserverbrauchs in Khorezm

In diesem Kapitel werden nun die fernerkundlichen Ergebnisse, die Landnutzungsklassifikation und die Modellierung der tatsächlichen saisonalen Evapotranspiration genutzt, um mögliche Zusammenhänge des Wasserverbrauchs mit der Lage der beobachteten Fläche im Bewässerungsgebiet festzustellen. Hier wurde insbesondere von dem exakten Lagebezug der Fernerkundungsdaten ohne Berücksichtigung hydrologischer Grenzen ein besonderer Vorteil erwartet. Im Rückgriff auf Kapitel 7.1.3 wurde die Klassifizierung der WUA nach ihrer Entfernung zum zugehörigen Einlassbauwerk (vergleiche Abbildung 7-3) herangezogen, um die Hypothese möglicher Disparitäten zwischen dem Ober- und dem Unterlauf des Bewässerungssystems von Khorezm zu untersuchen.

¹⁰⁹ Die Umsetzung der Techniken des *water accounting* war nicht das Ziel dieser Dissertation. Allerdings sollen sich die Ergebnisse an der Terminologie dieses Konzepts orientieren, um zukünftige Detailanalysen zu ermöglichen. Das Bewässerungsgebiet Khorezm entspricht danach einem offenen System mit *outflow*. Die erhobenen Variablen ermöglichen ein *service level accounting* (MOLDEN, 1997), welches sich in Khorezm fast mit dem *water accounting* auf Systemebene deckt, da die Hauptwassermengen durch die Bewässerung gebunden sind (industriell genutztes Wasser gibt es bis auf wenige Ausnahmen nicht).

¹¹⁰ Aus demselben Grund konnten keine Produktivitätsabschätzungen im Sinne des *water accounting* in dieser Arbeit erreicht werden.

¹¹¹ Für einige Monate lagen für das hydrologische Messnetz (außer Palvan-Gazavat-System) vollständige Messreihen vor.

In einem vorverarbeitenden Schritt wurden die Flächenanteile der agrarischen Nutzungen an der Gesamtfläche für die Jahre 2004 und 2005 innerhalb der Distanzklassen aggregiert und addiert (Abbildung 8-1). Weiterhin wurden innerhalb dieser Distanzklassen alle MODIS-Pixel selektiert, die eine landwirtschaftliche Nutzung von über 75 % aufwiesen (vergleiche den methodischen Ansatz aus Kapitel 6.1.2) und die potenzielle pflanzenspezifische Evapotranspiration (ET_{crop} nach den Berechnungen aus Kapitel 6.4.3.2) unter Berücksichtigung der Landnutzungsklassen berechnet. Für dieselben Pixel wurden die Modellergebnisse der saisonalen tatsächlichen Evapotranspiration (ET_{act}) extrahiert. Abbildung 8-2 zeigt die Resultate der Sommersaison 2004 und 2005, die sich aus der Aggregation von ET_{crop} und ET_{act} innerhalb der Distanzklassen ergaben. Damit konnten mittlere Werte der relativen Evapotranspiration abgeschätzt werden.

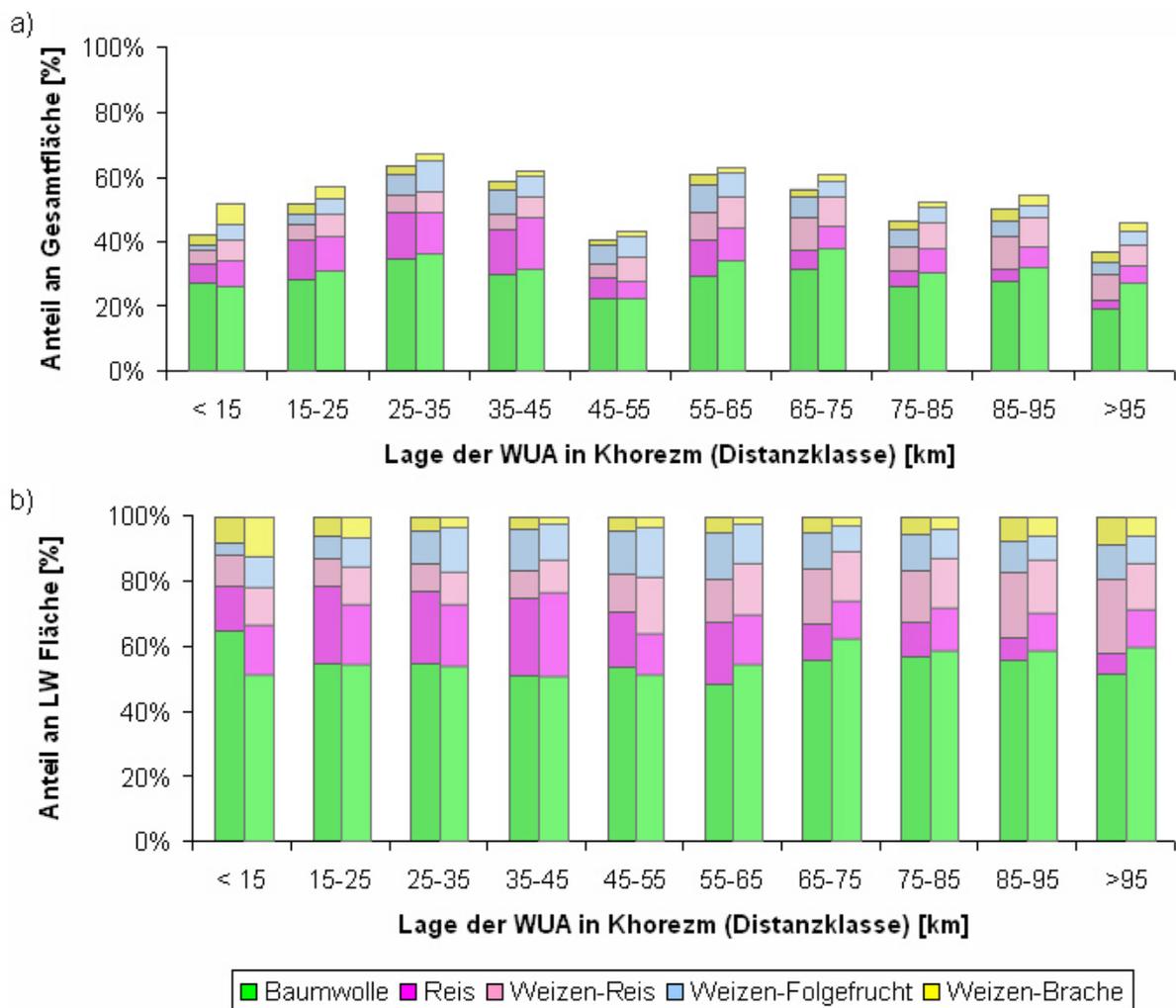


Abbildung 8-1: Räumliche Verteilung der landwirtschaftlichen Nutzung hinsichtlich des mittleren Abstands der beobachteten Fläche (WUA) im Bewässerungssystem von Khorezm, gemessen zwischen den Einlasspunkten des Systems und der WUA [km] für die Jahre 2004 (links, dunkel) und 2005 (rechts, hell). a) Anteil der landwirtschaftlichen Nutzung an der Gesamtfläche, b) Anteile in Bezug auf die agrarische Nutzfläche.

Im Bewässerungssystem wurden 2004 und 2005 vergleichbare Muster der Landnutzung erzielt (Abbildung 8-1). Die intensivsten Anbauregionen (> 60 % ackerbauliche Nutzfläche) waren in beiden Jahren entgegen möglicher Erwartungen etwas zurückgesetzt im Landesinneren anzutreffen (ab durchschnittlich 25 Kanalkilometer Entfernung der betrachteten WUAs zu den Einlassbauwerken; Abbildung 8-1a). Flussabschnitte, Uferbereiche, Altarme mit Tugaibeständen (Kapitel 2.2.4) und Wüstenbereiche im Süden (Pitnyak) nehmen große Flächen der Farmen in den oberen Abschnitten des Bewässerungsgebiets ein, so dass dort der Anteil an der landwirtschaftlichen Nutzfläche geringer war. Die Klasse mit WUAs in einer durchschnittlichen Entfernung von 45-55 km erreichte ebenfalls einen geringeren Anteil landwirtschaftlicher Nutzfläche, da die Hauptstadt Urgench in diese Analyse einbezogen wurde. Auch nach 85 km Transportweg nutzten die Farmer der WUAs ihre Flächen intensiv für die Landwirtschaft. Erst in den WUAs, zu denen das Wasser einen Transportweg von über 95 km zurücklegen musste (wie in Shavat, Kushkupyry und teilweise auch in Khiva), dünnte der Anteil der ackerbaulichen Nutzfläche 2004 deutlich aus (38 %). Im Jahr 2005 wurde die Fläche allerdings offensichtlich intensiver genutzt (46 %).

Die Baumwolle war die dominierende Anbauart (zwischen 49 % und 65 % der gesamten Anbaufläche; Abbildung 8-1b), 2005 sank der Baumwollanteil in Flussnähe zugunsten des Reises. Die Ursache dieser Verschiebung liegt vor allem in einem Verbot des Reisanbaus, das im Jahr 2004 für verschiedene Regionen seitens der Verwaltung des Oblasts ausgesprochen worden war. Der Winterweizen bedeckte in beiden Jahren homogen etwa 20 % der agrarischen Nutzfläche, wobei die Doppelnutzung durch Fruchtfolgen insbesondere in den Unterlaufbereichen des Bewässerungsgebietes die höchsten Werte erzielten (maximal 40 %). Wasserintensiver Reisanbau erreichte auch in den entlegenen WUAs einen Flächenanteil von über 30 % im Verhältnis zur gesamten agrarisch genutzten Fläche. Beispiele sind die Seengebiete in Kushkupyry sowie Gebiete in der Nähe zu den großen Kanälen (Shavat-Kanal) und Kollektoren (Wassersicherheit). Die anteilig intensivste Reissbewirtschaftung ist dennoch in den Oberlaufbereichen des Untersuchungsgebiets zu finden.

Die Verteilung der landwirtschaftlichen Nutzung erlaubte die Ableitung von Erwartungswerten des Wasserverbrauchs (Wasserbedarf¹¹²) der betrachteten Subsysteme und fungierte im Folgenden somit als Diskussions- und Bewertungsgrundlage. Ein leichtes, aber dennoch klar erkennbares Gefälle des agrarischen Wasserverbrauchs (tatsächliche Evapotranspiration der agrarischen Pflanzen = ET_{act} ; Abbildung 8-2) war für die erweiterte Sommersaison 2004 (dunkelgrauer Balken links) und – etwas deutlicher – 2005 (hellgrauer Balken rechts) mit zunehmendem Kanalabstand von den Einlassbauwerken zu verzeichnen. Dieser Gradient deutet auf eine

¹¹² Bei Reis wird der Wasserbedarf nur teilweise über den Verbrauch durch Evapotranspiration definiert (Wasserzirkulation in den Bewässerungsbecken).

abnehmende Wasserverfügbarkeit mit größer werdendem Abstand von den Einlassbauwerken hin.

Im Inneren des Bewässerungssystems (ab der Klasse von 25 km) verhalten sich ET_{act} und der Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche (Abbildung 8-1) sehr ähnlich, was darauf schließen lässt, dass der absolute Betrag von ET_{act} durch den Anteil der landwirtschaftlichen Nutzung in einem Gebiet bestimmt wird. Das wird insbesondere in den durchschnittlichen Werten für ET_{act} in den WUAs zwischen 45-55 km und 85-95 km deutlich. Die Ursache hierfür kann aber auch technischer Natur sein: In Regionen mit einem höheren Anteil landwirtschaftlicher Nutzfläche existiert auch eine Vielzahl an Pixeln, die weit mehr als 75 % Abdeckung mit landwirtschaftlicher Nutzfläche aufweisen. Grundsätzlich konnte also durch diese singuläre Betrachtung der Variable ET_{act} nicht geklärt werden, ob diese aufgezeigten räumlichen Disparitäten des Wasserverbrauchs auch Rückschlüsse auf die großmaßstäbliche Wasserverteilung in Khorezm zulassen.

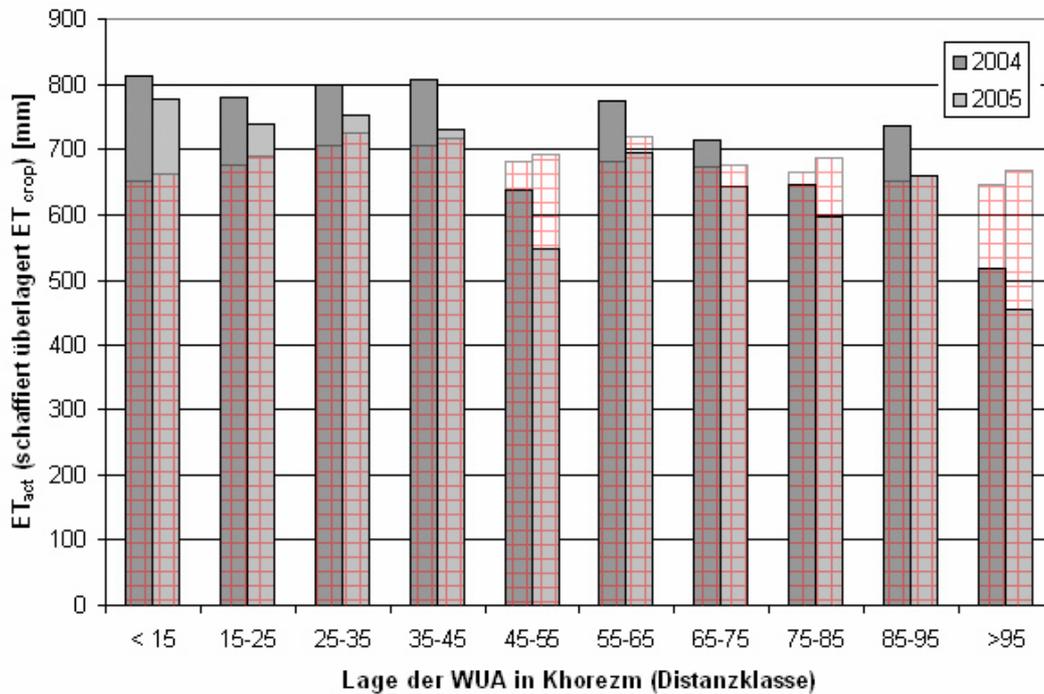


Abbildung 8-2: Mittelwerte der modellierten ET_{act} für WUAs in unterschiedlicher Lage im Kanalsystem (Abstand zum Einlasspunkt in Kanalkilometern) zwischen dem 1. April und dem 30. September der Jahre 2004 (grauer Balken links) und 2005 (hellgrau rechts). Es wurden nur Pixel mit einem Anteil landwirtschaftlicher Nutzfläche über 75 % ausgewählt. Die rote Schraffur erlaubt einen Vergleich mit der aus der Landnutzungs-klassifikation abgeleiteten pflanzenspezifischen potenziellen Evapotranspiration (ET_{crop}).

Entscheidender Vorteil dieser pixelbasierten Ergebnisse ist aber eine Überprüfung der bedarfsgerechten Wasserverteilung (Kapitel 3.3.2). Abbildung 8-2 zeigt für die Untersuchungs-jahre jeweils in roter Schraffur die potenzielle pflanzenspezifische Evapotranspiration (ET_{crop}), also den Erwartungswert für ET_{act} . Der Performanceindikator

„Relative Evapotranspiration“ im Sinne von BOS (2004) oder BANDARA (2006) wurde an dieser Stelle aus folgenden Gründen nicht explizit ausgerechnet:

- (1) Ein MODIS 1 km-Pixel integriert 16 Pixel mit einer Auflösung von 250 m und potenziell unterschiedlicher Nutzung. Für alle Nutzungen lässt sich ET_{crop} für die Vegetationsperiode errechnen und theoretisch können die Ergebnisse im 1 km-Raster auch integriert werden. Problematisch sind aber die unterschiedlichen Zeitpunkte des Einsetzens und die unterschiedliche Dauer der Vegetationsperiode innerhalb eines Pixels. Das bedeutet, dass auf diese Weise *leaching*-Aktivitäten nicht separat erfasst werden, also in die Berechnung von ET_{act} eingehen können.
- (2) Es wurden aufgrund des Auswahlkriteriums von 75 % landwirtschaftlicher Nutzung nicht alle Pixel für jede Abstandskategorie erfasst. Das bedeutet, dass überwiegend heterogen geprägte Gebiete in den Untersuchungsräumen nicht erfasst werden konnten, auch wenn sie ein völlig anderes Bild aufzeigten als die homogenen Bereiche.
- (3) Das Homogenitätskriterium von 75 % landwirtschaftlicher Nutzung im betrachteten 1 km-Pixel birgt die Möglichkeit, dass die übrigen 25 % einerseits Wasserfläche (hohe Werte von ET_{act}) andererseits Wüste (niedrige ET_{act}) sein können. Für diese Oberflächenbedeckungen lassen sich gegebenenfalls noch Werte für ET_{pot} annehmen (beispielsweise null und eins), für eine Siedlung, einen Baumbestand oder Garten ist dies aber *ad hoc* nicht möglich. Die getroffenen Berechnungen sind also nicht fehlerlose Abschätzungen.

Nach BOS et al. (2005) ist diese Herangehensweise allerdings für kleinmaßstäbliche Untersuchungen akzeptabel¹¹³, da großräumige Trends in den Daten ablesbar sind. Abbildung 8-2 lässt daher den Schluss zu, dass insbesondere in den Oberlaufregionen der Bewässerungsgebiete in den Jahren 2004 und 2005 der Wasserverbrauch durch Evapotranspiration den Wasserbedarf deutlich überstieg. Eine defizitäre Situation wurde im Mittel in WUAs ab einer Distanz von 45 Kanalkilometern vom Systemeinlasspunkt am Amu Darya ermittelt. Die Erwartungswerte der ET_{act} wurden dort insbesondere im Jahr 2005 nicht erfüllt. Einzige Ausnahme bilden dabei die WUAs, die 85-95 Kanalkilometer weit (meist im Oberlauf des Palvan-Gazavat-Systems) im Unterlauf des Bewässerungssystems liegen. Eine Erklärung für diese Ausnahme konnte unter Anwendung der dargestellten Methoden nicht gegeben werden.

8.2 Bilanzierung der Wasserflüsse im Bewässerungssystem von Khorezm

In diesem Abschnitt werden die oberflächlichen linearen Wasserflüsse in Khorezm (Zu- und Abflussmengen), die bereits in Kapitel 7 für die Grenzen des hydrologischen Messnetzes sowie

¹¹³ Für Detailanalysen auf WUA-Ebene ist diese Herangehensweise aber nicht aussagekräftig, da die Fehleranfälligkeit aus den genannten Gründen zu hoch ist.

für das Palvan-Gazavat-System auf täglicher Basis vorgestellt und diskutiert wurden, in die Auswertung der Ergebnisse integriert. Die drei Untersuchungsgebiete, für die vollständige Messreihen vorlagen, waren (1) das gesamte Messnetz, (2) das Palvan-Gazavat-System und (3) die hydrologischen Grenzen des Gesamtmessnetzes ohne das Palvan-Gazavat-System. Ergänzend wurden die auf das ganze Bewässerungssystem von Khorezm extrapolierten Wassermengen in die Analyse einbezogen.

Um die in der Landwirtschaft bereitstehenden Wassermengen zu quantifizieren, wurden zunächst die aus amtlichen Statistiken angegebenen $0,19 \text{ km}^3$ Trinkwasserentnahme prozentual zur betrachteten Fläche von der Gesamtwasserentnahme abgezogen. Im ersten Analyseschritt wurden die Entnahmen in Bezug auf die landwirtschaftliche Nutzfläche (Kapitel 5) berechnet und miteinander verglichen. Zur Bilanzierung der saisonalen Wasserflüsse wurden weiterhin die Wasserentnahmen und die Drainagemengen für die genannten Subsysteme berechnet (vergleiche Kapitel 3.3.1 und Kapitel 7.3). Abschließend wurden mit der Ratio von Drainagewasser zu Bewässerungswasser und der *depleted fraction*¹¹⁴ zwei Performanceindikatoren zur Aufschlüsselung der Funktionalität des Bewässerungssystems bestimmt und ausgewertet.

8.2.1 Wassernutzung in der Sommergevegetationsperiode 2005

In Khorezm wurden im Jahr 2005 61 % der Fläche innerhalb der Grenzen des Bewässerungsgebiets landwirtschaftlich genutzt¹¹⁵. Die Wasserentnahme für die Gesamtfläche betrug alleine in der Vegetationsperiode $22.782 \text{ m}^3/\text{ha}$, wobei das Palvan-Gazavat-Subsystem mit $29.834 \text{ m}^3/\text{ha}$ im Vergleich zum Gesamtmessnetz deutlich besser gestellt war. Allerdings liegt dieses Subsystem im Unterlauf des Bewässerungslandes, so dass von den Systemgrenzen betrachtet hinsichtlich der Wassermengen im Sommer 2005 auf der überregionalen Ebene kein klassisches Oberlauf-Unterlauf-Verteilungsproblem festgestellt werden konnte.

Eine deutliche Diskrepanz zeigte sich hingegen innerhalb des Palvan-Gazavat-Systems, da in dessen Oberlauf $52.500 \text{ m}^3/\text{ha}$ bereitstanden, während in den Unterlaufregionen $24.320 \text{ m}^3/\text{ha}$ beziehungsweise lediglich $17.562 \text{ m}^3/\text{ha}$ verbucht wurden. Diese hohe Wasserentnahme im Oberlauf dieses Subsystems erklärt zwar den ermittelten hohen Wasserverbrauch (ET_{act}) für die WUAs mit einer mittleren Entfernung zu den Einlasspunkten des Systems von 85-95 km im Jahr 2005 (Kapitel 8.1), eine plausible Erklärung für die absoluten Werte konnte aber nur bedingt gefunden werden.

¹¹⁴ Gemäß der Definition nach BOS et al. (2005; Kapitel 3.3.2) gingen in die Berechnung der *depleted fraction* lediglich die Werte von ET_{act} ein, die Drainagemengen wurden nicht berücksichtigt.

¹¹⁵ Dies stellt nicht das Verhältnis zwischen landwirtschaftlich genutzter und potenziell landwirtschaftlich nutzbarer Fläche dar, da die übrige Fläche überwiegend von ländlichen Siedlungen mit vielen kleinparzellierten Nutzgärten eingenommen wird (Kapitel 5).

Ein mögliche methodische Ursache für die Höhe der Wasserentnahme im Oberlauf des Palvan-Gazavat-Systems sind Veränderungen im Bewässerungssystem, die nicht im GIS vermerkt waren und so zu einer erhöhten Bezugsfläche führten. Eine alternative Erklärungsmöglichkeit sind extrem hohe Wasserverluste im unbefestigten Verlauf des Palvan-Gazavat-Kanals. Weiterhin wurde im Jahr 2005 aus dem Oberlauf des Palvan-Gazavat-Systems die Fischfarm der Region Khorezm im Süden des Rayons Khiva mit Wasser versorgt, deren in offiziellen Daten vermerkte Wassernutzung¹¹⁶ bezogen auf die Fläche des Subsystems mit 1.200 m³/ha quantifiziert werden konnte. Die Gesamtmenge entnommenen Kanalwassers wird dabei also nicht relativiert. Letztendlich ist davon auszugehen, dass nicht alle Konsumenten mit der angewendeten Methode erfasst werden konnten, da eine derart hohe Wasserverfügbarkeit von dem landwirtschaftlichen System gar nicht verarbeitet werden kann.

Tabelle 8-1: Wasserentnahme und Landnutzung in den Teilbewässerungssystemen von Khorezm.

Sommersaison 2005	Fläche [ha]	LW Nutzflächen [ha]	Wasserentnahme/ Gesamtfläche [m ³ /ha]	Wasserentnahme/ LW Nutzfläche [m ³ /ha]
Gesamtbewässerungsgebiet*	389.610	240.011	14.034	22.782
Davon Messgebiete:				
Hydrologisches Messnetz	337.541	204822	14.960	23.933
Palvan-Gazavat-Subsystem	83.163	49.820	17.872	29.834
Hydrologisches Messnetz ohne Palvan-Gazavat-Subsystem	254.378	155.002	11.858	19.460
Südsystem (nur Anteil des Hydrologischen Messnetzes):				
Gesamt	254.378	155.003	15.192	24.932
Tash Saka (ohne R-8 und Palvan-Gazavat-S.)	140.020	84.992	13.395	22.067
R-8	31.195	20.190	16.114	24.898
Palvan-Gazavat (ohne Palvan und Gazavat)	20.000	12.270	32.185	52.463
Palvan	47.000	27.102	14.024	24.320
Gazavat	16.163	10.449	11.353	17.562
Weitere Sub-Systeme (nur Anteil des hydrologischen Messnetzes)				
Daryalik-System	21.359	13.155	17.989	29.207
Klichnyasbay-System	43.978	32.382	12.525	17.010

Weitere regionale Unterschiede hinsichtlich der Wasserentnahme werden bei Betrachtung der Teilsysteme des Bewässerungsnetzes deutlich. Zur besseren Interpretation befindet sich im Anhang zu jedem Subsystem neben den Indikatoren noch die Aufschlüsselung der Landnutzung innerhalb seiner hydrologischen Grenzen (Anhang III.4). Im Klichnyasbay-System, das generell durch den Reisanbau (38 % der Gesamtfläche) und damit hohen Wasserbedarf geprägt ist,

¹¹⁶ Mündliche Mitteilung des Wasserwirtschaftsamtes in Khorezm

standen mit $17.562 \text{ m}^3/\text{ha}$ in der Sommersaison 2005 verhältnismäßig geringe Wassermengen zur Verfügung¹¹⁷. Im südlich gelegenen, aber nicht mit dem Klichnyasbay- verbundenen Daryalik-System¹¹⁸ sind hingegen $29.207 \text{ m}^3/\text{ha}$ gemessen worden, obwohl durch die niedrigen Reisannteile (17 %) ein geringerer Wasserbedarf zu erwarten gewesen wäre.

Der durchschnittliche Wasserbedarf, der aus den für die Hydromodule festgelegten Normen für die einzelnen Feldfrüchte (Kapitel 2.4) und der Landnutzungsklassifikation abgeschätzt wurde¹¹⁹, liegt für das Jahr 2005 bei $9.329 \text{ m}^3/\text{ha}$. Wassermengen für das Spülen der Felder (*leaching*) und räumliche Disparitäten wurden dabei nicht berücksichtigt. Mit den getroffenen Einschränkungen bedeutet dies, dass die Erwartungswerte für Khorezm in der Sommersaison 2005 um mehr als das doppelte übertroffen wurden. Ein vergleichbares Ergebnis wurde im Bewässerungsland am Syr Darya ermittelt (ABDULLAEV et al., 2003), woraus sich die Schlussfolgerung ableiten lässt, dass die praktische Bedeutung der aus der Sowjetzeit stammenden Normen sehr begrenzt ist.

Absolut und relativ betrachtet war die Wasserentnahme im Sommer 2005 in Khorezm sehr hoch. Es wurden regionale Disparitäten ermittelt, die aber nicht mit der klassischen Oberlauf-Unterlauf-Diskrepanz von Bewässerungsgebieten begründet werden konnten.

8.2.2 Bilanzen und Indikatoren

Die Bilanzen für die Sommersaison des Jahres 2005 (Tabelle 8-2) zeigen für die drei Untersuchungsgebiete einen sehr hohen Drainageanteil im Vergleich zu den durch die Evapotranspiration verbrauchten Wassermengen. Innerhalb der hydrologischen Grenzen des Gesamtsystems ohne das Palvan-Gazavat-Subsystem betrug der Anteil der Drainage an der Wasserentnahme in diesem Zeitraum 65 % (Gesamtsystem 58 %). Einerseits mag das mit dem großflächigen Reisanbau begründet werden, für den das Wasser in den Bewässerungsbecken zirkulieren muss und somit viel Wasser über die Drainage wieder abgeführt wird¹²⁰. Andererseits lässt sich die überwiegende Ursache in hohen Versickerungsverlusten in den Kanälen und grundwassererzeugenden Bewässerungspraktiken infolge ungünstiger Wasserverteilung sehen.

¹¹⁷ Unbekannt ist allerdings der Anteil des mehrfach genutzten Wassers. Da es sich um eine Oberlaufsituation handelt, wird vermutlich wie im Südsystem ein Großteil des Drainagewassers wieder zur Bewässerung verwendet.

¹¹⁸ Vereinzelt konnten Verbindungen der Systeme im GIS, aber auch im Gelände nachvollzogen werden. Diese sind an dieser Stelle nicht quantifizierbar, werden aber aufgrund des betrachteten Maßstabs vernachlässigt.

¹¹⁹ Gemäß Kapitel 4.2 wurden für Reis $26.200 \text{ m}^3/\text{ha}$, für Baumwolle $6.400 \text{ m}^3/\text{ha}$ und für Weizen $2.500 \text{ m}^3/\text{ha}$, also Werte der oberen Kategorie angenommen. Die übrigen Feldfrüchte, die in der Sommersaison angebaut wurden (Sonnenblumen und Mais) wurden mit $3.500 \text{ m}^3/\text{ha}$ veranschlagt, da hier keine offiziellen Zahlen vorlagen.

¹²⁰ Diese Situation ist typisch für Reisanbaugebiete (BANDARA, 2006) und kann daher für Khorezm angenommen werden.

Nach BOS et al. (2005) besteht ab einem Verhältnis von Drainage zur Bewässerung unterhalb von 0,15 die Gefahr der sekundären Bodenversalzung¹²¹. Dieses kritische Minimum wird in Khorezm nicht erreicht, so dass genug Wasser vorhanden sein müsste, das Salz auszuwaschen. Trotzdem sind aber sehr hohe Grundwasserstände in der Bewässerungsphase (IBRAKHIMOV, 2005) und sekundäre Bodenversalzung sehr große Probleme der Region (FORKUTSA, 2006). Hohe Drainagemengen können aber auch durch eine direkte Verbindung der Bewässerung mit der Drainage verursacht werden, die von Grundwasseranhebungen und Lecks in den Bewässerungskanälen oder auf dem Feld ausgelöst werden. Nach dieser Auffassung assoziiert BANDARA (2006) dem Indikator „Drainage/Wasserentnahme“ ein kritisches Maximum. Danach darf in einem Reisanbaugebiet Sri Lankas ein Wert von 0,1 nicht überschritten werden.¹²²

Tabelle 8-2: Komponenten der Wasserbilanz sowie die Indikatoren *depleted fraction* und Ratio „Drainage/Wasserentnahme“ der drei Untersuchungsräume und auf das Gesamtbewässerungssystem extrapolierte Ergebnisse.

Messzeitraum: 1.4.2005 – 30.9.2005	Einheit	Innerhalb der Grenzen des hydrologischen Messnetzes	Khorezm (extrapoliert)*	Palvan- Gazavat- Subsystem	Hydrologisches Messnetz (ohne Palvan- Gazavat- Subsystem)
<i>Wasserentnahme</i>	[km ³]	4,80	5,47	1,49	3,02
<i>Wasserentnahme (Landwirtschaft)</i>	[km ³]	4,73	5,38	1,46	2,97
<i>Drainage</i>	[km ³]	2,73	2,97	0,80	1,93
N	[km ³]	0,07	0,09	0,02	0,05
<i>ET_{act}</i>	[km ³]	2,21	2,64	0,56	1,64
ΔS	[km ³]	-0,14	-0,13	0,12	-0,55
<i>Drainage / Wasserentnahme</i>	[m ³ /m ³]	0,58	0,55	0,55	0,65
<i>Depleted fraction</i>	[m ³ /m ³]	0,46	0,48	0,38	0,54

* Graue Schrift, da nicht auf Messwerten beruhend, sondern aus den Messwerten räumlich extrapoliert.

Indikatorenwerte der *depleted fraction* von unter 0,5 (Zielwert: 0,6; kritische Werte: 0,5 und 0,9; BOS, 2004) deuten die Auffüllung der Grundwasserspeicher und eine Erhöhung der Bodenfeuchte und damit die Gefahr der sekundären Bodenversalzung an. Hier zeigte sich für die Vegetationsperiode 2005 mit 0,38 ein besonders negativer Trend im Palvan-Gazavat-System, das im Unterlauf des Bewässerungssystems gelegen ist. Darauf weist auch die über die gesamte Sommersaison gemessene Wasserzunahme im Speicher dieses Subsystems hin. Weiterhin lassen

¹²¹ Die kritischen Werte aus der Literatur wurden als Richtwerte aufgefasst.

¹²² Je nach Fragestellung und Bewässerungsgebiet kann die Interpretation der Indikatoren unterschiedliche erfolgen: Die von Bandara (2006) zitierte Sicht kann für Gebiete herangezogen werden, die nur durch Reisanbau geprägt sind.

Werte der *depleted fraction* unterhalb des kritischen Wertes auch auf eine Überversorgung mit Wasser beziehungsweise auf eine unsachgemäße Wassernutzung schließen (BANDARA, 2006). Im übrigen Messnetz wurde unter Annahme der genannten kritischen Werte in Bezug auf die Gesamtsaison ein akzeptabler Wasserverbrauch festgestellt.

Die kleinmaßstäbliche Funktionsweise der drei betrachteten Subsysteme von Khorezm konnte durch die Berechnung monatlicher Wasserbilanzen und Performanceindikatoren aufgezeigt werden. Abbildung 8-3 ist dreigliedert und enthält Säulendiagramme der Komponenten der Wasserbilanz für je ein Subsystem. Die Ratio „Drainage/Wasserentnahme“ sowie der Indikator *depleted fraction* wurden für alle Subsysteme in ein Diagramm abgetragen, um den direkten Vergleich im saisonalen Verlauf zu ermöglichen (Abbildung 8-4). Diese Werte werden im Bedarfsfall zur Interpretation der Systemfunktionalität hinzugezogen.

Im äußeren Messnetz hielten sich im April des Jahres 2005 Wasserentnahme und Drainage die Waage. Der verhältnismäßig hohe Wasserverbrauch durch die Evapotranspiration lässt sich durch das ausgehende *leaching* zu Beginn des Aprils ebenso erklären wie der Rückgang der Speicherwerte: Durch das *leaching* waren die Böden wassergesättigt und die Grundwasserstände sehr hoch. Dadurch wurden auch auf den nicht mit Vegetation bestandenen Flächen große Evaporationsmengen gemessen (Verdunstung von der Bodenoberfläche). Gleichzeitig ging die Wasserentnahme aus dem Amu Darya zurück und das salzhaltige Wasser konnte über die Drainage abgeführt und der Grundwasserspiegel abgesenkt werden.

Im Mai 2005 kehrte sich dieser Prozess um: Die Wasserentnahme überstieg den Anteil von Drainage und Evapotranspiration. Offensichtlich wurden während der Hauptwachstumsphase von Reis und Baumwolle die Speicher (Grundwasser und Bodenfeuchtigkeit) aufgefüllt. Bis Ende Juli 2005 hielt dieser Trend an, erst ab August kam es wieder zur kleinmaßstäblichen Rückgang von Bodenfeuchte und Grundwasser, im September liefen dann die Speicher weiter leer. Die Begründung ist einfach: In der Erntezeit wird eine geringe Bodenfeuchte angestrebt, weswegen Bewässerungen unterbleiben. Beispielsweise wird die Wasserzufuhr zu den Reisbecken bereits zu Beginn des Septembers (zwei Wochen vor der Ernte) eingestellt. Die Drainagekanäle führen das überschüssige Wasser ab.

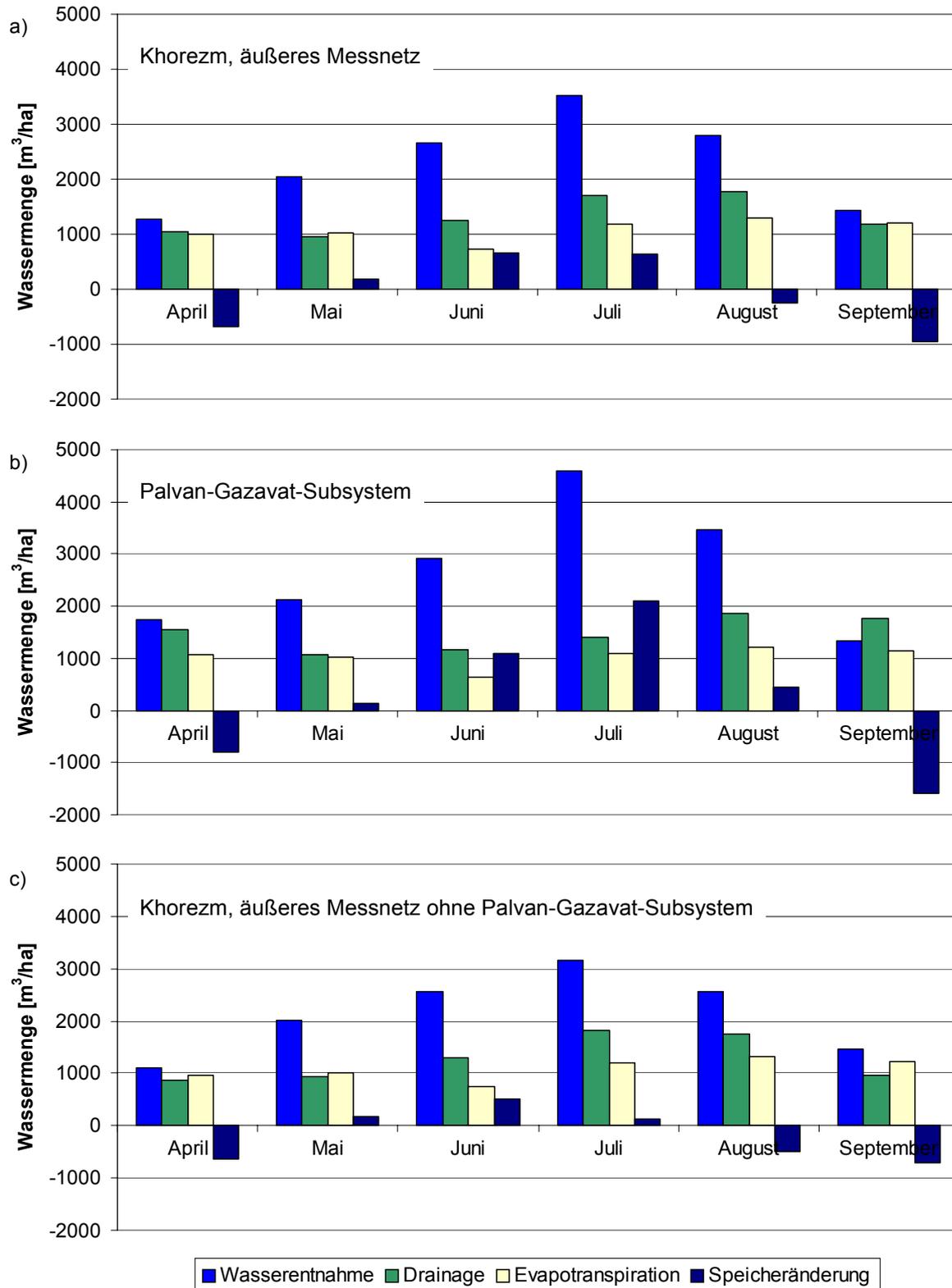


Abbildung 8-3: Monatswerte der gemessenen Wasserentnahme, der Drainagemengen und der Evapotranspiration sowie berechnete Veränderungen der Wasserspeicher (Bodenfeuchte und Grundwasser) für die Vegetationsperiode 2005 [m³/ha] (a) im äußeren hydrologischen Messnetz, (b) im Palvan-Gazavat-System, sowie (c) außerhalb des Palvan-Gazavat-Systems.

Ebenfalls konnten räumliche Disparitäten dieser Funktionalität des Bewässerungssystems aufgezeigt werden, wobei das Palvan-Gazavat-System als defizitär und teilweise als Ursache für die bereits beschriebene mäßige Gesamtindikation identifiziert werden konnte: Im Gegensatz zum äußeren System (Abbildung 8-3c) wurde im Palvan-Gazavat-System (Abbildung 8-3b) bereits im Juni 2005 mehr Wasser zum Auffüllen der Wasserspeicher verwendet als auf den Feldern durch Evapotranspiration verbraucht. Im Juli erreichte der Betrag der Speicherauffüllung sogar knapp die Gesamtsumme aus Zufluss und Drainage. Außerhalb des Palvan-Gazavat-Systems überwog der Verbrauch im Bewässerungsgebiet in allen Monaten der Vegetationsperiode 2005 klar die Speicherauffüllung. Der Speicherrückgang setzte im Palvan-Gazavat-System erst im September 2005 ein. Außerhalb hingegen war bereits im August 2005 ein Rückgang der Speichervolumina zu verzeichnen.

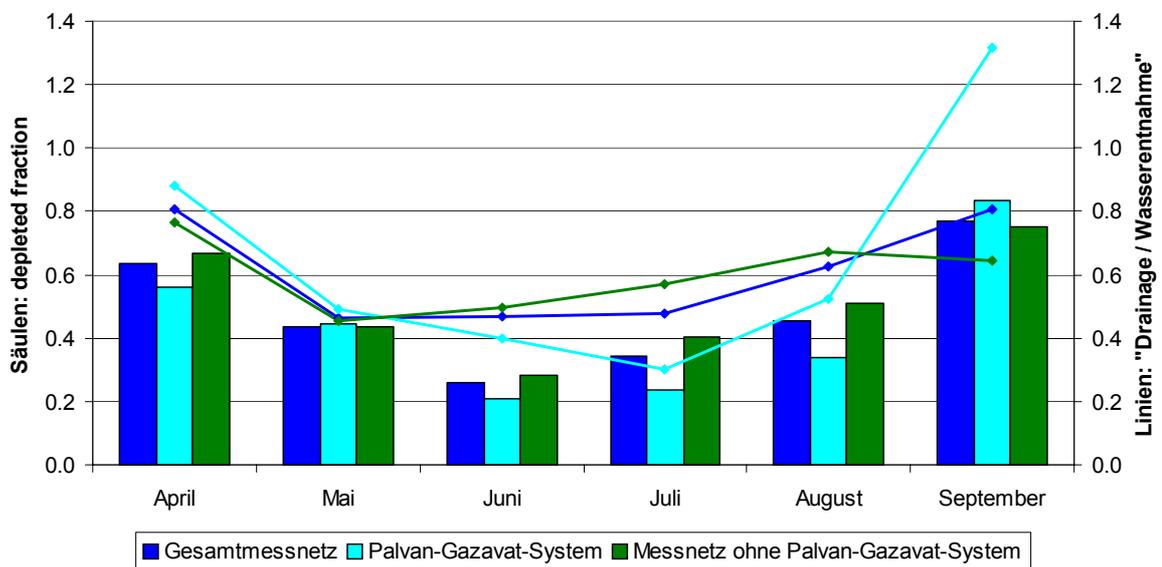


Abbildung 8-4: Monatliche Werte Performanceindikatoren (Säulen: *depleted fraction* und Linien: Ratio „Drainage/Wasserentnahme“) in den beprobten Subsystemen von Khorezm in der Sommersaison 2005.

Die Monatswerte der Indikatoren verdeutlichen ebenfalls klar diese Gegensätzlichkeit (Abbildung 8-4):

- Während außerhalb des Palvan-Gazavat-Systems Werte für die *depleted fraction* von 0,4 nur im Juni unterschritten werden, kann das Subsystem selbst zwischen Juni und August diese Marke in keinem Monat erreichen. Die *depleted fraction* unterbot dort auch im Juli 2005 mit einem Wert von 0,23 den Rest des Systems deutlich.
- In den Randmonaten (April und September) flossen mit einer hohen Ratio „Drainage/Bewässerung“ (Maximum: 132%) anteilig sehr hohe Wassermengen aus dem Palvan-Gazavat-System ab. Im äußeren System dagegen ging die Ratio im Vergleich zum August 2005 im folgenden September sogar wieder ein Stück zurück.

- In der Hauptbewässerungsphase (Juni bis August) wurde eine hohe Diskrepanz der Drainageanteile beider Teilsysteme im Juli und August 2005 beobachtet. Außerhalb des Palvan-Gazavat-Systems wurden in diesen Monaten etwa 60 % des zugeführten Wassers über die Drainage abgeleitet, im Palvan-Gazavat-System hingegen trotz niedriger *depleted fraction* nur zwischen 30 % und 50 %.

8.2.3 Detailanalyse der „Depleted Fraction“ für die hydrologischen Subsysteme

Zur Vertiefung der Einblicke in die regionalen Unterschiede der skizzierten Funktionsweise des Systems wurden nachfolgende Detailuntersuchungen innerhalb der Subsysteme durchgeführt. Dabei wurden auch die hydrologisch voneinander getrennten Systeme aufgegriffen. (Südsystem, grüne Farbskala; Daryalik-System, gelb; Klichnyasbay-System, rot-orange; vergleiche Kapitel 7.1.1; Abbildung 7-1).

Im Südsystem (Abbildung 8-5, grüne Balken), wurde insbesondere außerhalb des Palvan-Gazavat-Systems (Tash-Saka ohne Subsysteme) vergleichsweise günstige Wertebereiche des Performanceindikator *depleted fraction* ermittelt. Lediglich die Juni-Werte unterschritten die kritische Marke von 0,5. Im April, August und September des Jahres 2005 lagen die Werte in dem nach BOS (2004) vorgegebenen akzeptablen Bereich zwischen 0,5 und 0,9.

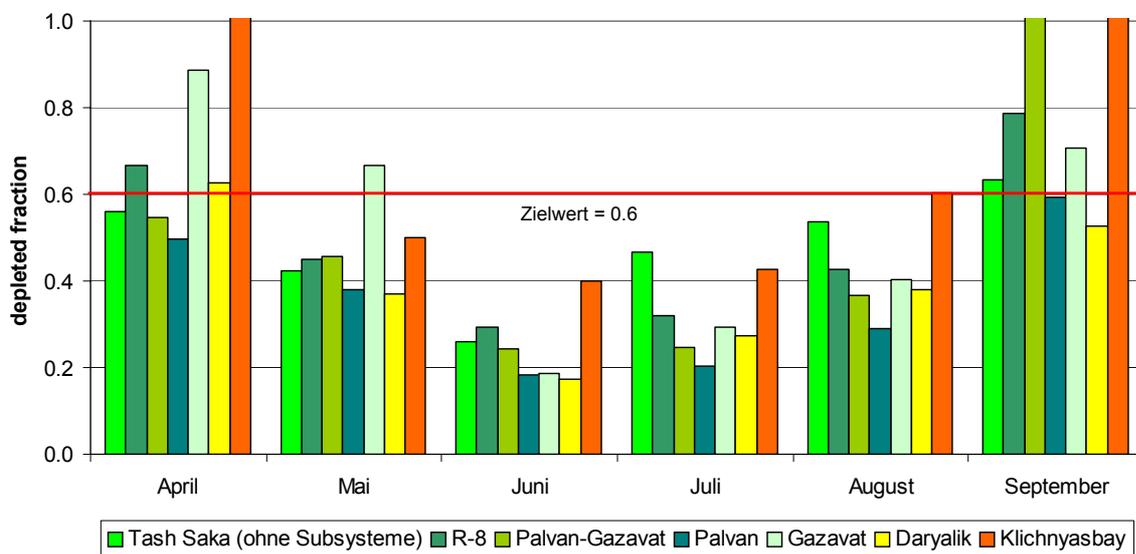


Abbildung 8-5: Detailanalyse der Monatswerte des Performanceindikators *depleted fraction* innerhalb der betrachteten Sub-Bewässerungssysteme. Der Zielwert von 0,6 stammt aus der Literatur (BOS, 2004).

Die Variationen im Palvan-Gazavat-System, das einen Teil des Südsystems bildet, wurden oben bereits diskutiert und konnten vor diesem Hintergrund weiter vertieft werden. Im verhältnismäßig kleinen Palvan-System (47.000 ha) war zu Beginn und zum Abschluss der Sommersaison 2005 ein sehr hoher agrarischer Wasserverbrauch im Verhältnis zur

Wasserentnahme zu verzeichnen. Teilweise übertraf der Verbrauch den Nachschub an Frischwasser (Septemberwert *depleted fraction* = 1,4). Dort wurde offensichtlich – wie auch im Oberlauf des Palvan-Gazavat-Kanals¹²³ und aus den bereits ausgeführten Gründen – während der leaching-Phase und in den Sommermonaten der Grundwasserspiegel sehr stark angehoben. Entweder waren die Kanalverluste hoch und die Drainage überlastet oder das Wasser wurde bewusst zur unterirdischen Speicherung und dann – bei rückläufigen Frischwassergaben – zur Bewässerung verwendet (Wassersicherheit).

Die Indikatorwerte dokumentieren für die Monate Mai bis August im reisdominierten Klichnyasbay-System eine relativ akzeptable Umsetzung des Bewässerungsbetriebs, obwohl der kritische Wert für die *depleted fraction* von 0,5 im Juni und im Juli unterschritten wurde¹²⁴. Allerdings lag der Wasserverbrauch nach dem *leaching* und zum Ende der Sommersaison oberhalb der entnommenen Wassermengen, was aber offensichtlich aber seitens der Verantwortlichen bewusst gesteuert wurde. Die Aprilwerte fielen mit dem der intensiven *leaching*-Periode zusammen und waren durch eine sehr hohe Evapotranspiration gekennzeichnet. Dies erlaubt einen Rückschluss auf hohe Grundwasserstände. Die genutzte Ackerfläche im April (nur Winterweizen) betrug lediglich 19 % der Gesamtfläche, womit im Falle gleicher Wasserentnahme und ohne Rückkopplung mit dem Grundwasser ein niedrigerer Indikatorwert (*depleted fraction*) zu erwarten gewesen wäre¹²⁵.

Die Werte des Daryalik-Systems (rot-orange Säulen) erreichten für die Sommersaison 2005 das Niveau des Palvan-Gazavat-Systems, wobei aber aufgrund der nicht gemessenen Drainagemengen keine Analogien auf das Wassermanagement hergestellt werden konnten. Vielmehr indiziert der niedrige Wasserverbrauch ebenfalls eine hohe Wassergabe in den Speicher und damit eine erhöhte Risiko hinsichtlich der sekundären Versalzung.

8.3 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel wurden die gemessenen und modellierten Wasserflüsse in Khorezm durch Bilanzierungen sowie die Bildung von Performanceindikatoren in der zeitlichen und räumlichen Dimension analysiert. Die Untersuchungen hinsichtlich der Landnutzung und der tatsächlichen Evapotranspiration wurden für die Jahre 2004 und 2005 durchgeführt. Die Datenlage ermöglichte Detailanalysen unter Einschluss der linearen Oberflächenwasserflüsse lediglich für das Jahr 2005, das seitens der lokalen Behörden als ein sehr gutes Jahr hinsichtlich der

¹²³ Unter Berücksichtigung der oben genannten Unsicherheiten hinsichtlich der Bezugsfläche.

¹²⁴ In Reisanbaugebieten kann durchaus auch ein niedrigerer Wert als kritisches Minimum für die *depleted fraction* angenommen werden (BANDARA, 2006). Das Klichnyasbaysystem ist durch einen hohen Reisananteil gekennzeichnet.

¹²⁵ Im Klichnyasbay-System ist aufgrund der hohen Indikatorwerte nach dem *leaching* im April eine wieder einsetzende sekundäre Versalzung zu erwarten.

Wasserversorgung von Khorezm bezeichnet wurde. Durch das Hinzuziehen existierender Ergebnisse anderer Forschungsarbeiten (vergleiche Kapitel 2) im Untersuchungsgebiet konnten einige qualitative Verallgemeinerungen getroffen werden.

Nachfolgend werden zunächst Zusammenhänge zwischen dem Wasserverbrauch auf Feldebene und der Wasserverfügbarkeit an den Einlassbauwerken der beobachteten Subsysteme dargestellt. Daraufhin werden die Bilanzierungen und Indikatoren auf der Ebene des Gesamtsystems, des Palvan-Gazavat-Systems und des Gesamtsystems ohne das Palvan-Gazavat-System zusammengefasst und interpretiert.

In den beiden Untersuchungsjahren 2004 und 2005 ist unabhängig von der Lage einer WUA im Bewässerungsgebiet eine konstant hohe Landnutzung zu beobachten, auch mit hohen Anteilen des wasserintensiven Reisanbaus. Dennoch zeigen die Ergebnisse für die Sommersaisons 2004 und 2005 einen abnehmenden Gradienten des Wasserverbrauchs in Richtung des Unterlaufs. Dabei wurden die Erwartungswerte für den Wasserverbrauch durch Evapotranspiration im Oberlauf übertroffen, wodurch mögliche Einsparpotenziale für eine Detailanalyse mittels der Ergebnisse lokalisiert werden können. Im Unterlauf bestand ein Defizit, das möglicherweise durch Einsparungen im Oberlauf hätte ausgeglichen werden können.

Mit durchschnittlich $22.782 \text{ m}^3/\text{ha}$ alleine für die Sommermonate 2005 erreichte Khorezm, trotz der in der Einleitung beschriebenen Lage im Unterlauf des Amu Darya, die doppelte Menge des zehnjährigen Mittels der amtlichen Statistik für das Aralseebecken um $11.850 \text{ m}^3/\text{ha}$ (ROLL et al., 2006)¹²⁶. Ebenfalls stand im Vergleich mit dem aus den Hydromodulen berechneten Wasserbedarf der Region mehr als die doppelte Wassermenge an Frischwasser zur Verfügung.

Die regionalen Disparitäten der Wasserentnahme waren hoch und folgen nicht zwangsläufig einem Oberlauf-Unterlauf-Gradienten. Die Variationen schwankten in der Sommersaison 2005 zwischen $17.010 \text{ m}^3/\text{ha}$ (Klichnyasbay-System) und $52.463 \text{ m}^3/\text{ha}$ (Oberlauf des Palvan-Gazavat-System). Die intensive Wasserentnahme im Oberlauf des Palvan-Gazavat-Systems hatte zwar den hohen Wasserverbrauch (ET_{act}) in diesem Subsystem zur Folge, eine Begründung für diesen ungewöhnlich hohen Wert konnte nicht gefunden werden. Für das Klichnyasbay-System konnte eine effiziente Nutzung des Wassers aufgezeigt werden. Dort wurden die höchsten Werte für den Indikator *depleted fraction* mit 0,64 erreicht (Durchschnitt = 0,44).

Zusammenfassend konnte ein Gradient des Wasserverbrauchs und damit der Wasserverfügbarkeit auf Feldebene berechnet werden. Damit ist aber kein Rückschluss auf die Wasserverfügbarkeit an den Einlasspunkten im Subsystem zu treffen. Offensichtlich erreicht ein Teil des Wassers nicht die Felder (Verluste in den Kanälen). Eine alternative plausible Erklärung

¹²⁶ Zudem beziehen sich diese amtlichen Werte auf jeweils ein ganzes Jahr.

ist, dass so viel bewässert wird, dass ein Teil des Wassers auf den Feldern ins Grundwasser versickert und auf diese Weise den Wasserspiegel anhebt oder direkt in der Drainage abgeführt wird (Versickerungsverluste auf Feldebene). Im Folgenden wird plausibel, dass beides der Fall ist, wobei die Anteile nicht nach der Art des Wasserverlustes quantifiziert werden können. Diese können nur durch ein feineres Messnetz im Kanalsystem und die Ableitung weiterer Indikatoren (BOS et al., 2005) ermittelt werden.

Interpretation des Gesamtsystems

Nach dem *leaching* wurde im Verlauf der Bewässerungssaison im Mittel zunächst ein großer Anteil des Bewässerungswassers in den Wasserspeichern, dem Bodenwasser und dem Grundwasser allokiert. Dieser Überschuss konnte erst zum Saisonende wieder abfließen. Es ist anzunehmen, dass sich diese Situation unter der vorgefundenen Konfiguration des Bewässerungssystems und vergleichbaren Wasserentnahmemengen verallgemeinern lässt. Darauf deuten die auf Feldebene und WUA-Ebene durchgeführten Wasserbilanzen von FORKUTSA (2006) sowie die großräumigen und langjährigen Analysen der Entwicklung von Grundwasserständen in Khorezm IBRAKHIMOV (2005) hin.

Die Ursachen für die hohe Variabilität der monatlichen Wasserflüsse liegen neben Verzögerungsprozessen der Wasserbewegung im Boden in den hohen Kanalverlusten durch Versickerung sowie im Bewässerungsmanagement. Die Kanalverluste, die im übergeordneten Bewässerungssystem (Magistral-, Inter-Rayon und Inter-Farmkanäle) auf 25 % (Kapitel 2.4) und insgesamt auf 40 % der entnommenen Wassermenge geschätzt werden (MARTIUS et al., 2004), füllen den Grundwasserspeicher großräumig auf (Grundwasserneubildung). Die hohe Entwässerungsleistung der Drainagesysteme reicht nicht aus, den künstlich erzeugten Grundwasserkörper abzubauen. Da die Leistung der Drainage auf der Makroebene hoch ist, liegt das eigentliche Problem in den hohen Neubildungsraten und in der Drainage auf Feldebene. Wirkungsvolle Lösungsvorschläge sollten an dieser Stelle ansetzen. Hier wird eine vertiefende Analyse der Drainagesysteme und der Messergebnisse unter Hinzunahme der Grundwasserspiegelschwankungen vorgeschlagen.

Eine weitere Erklärung für die hohen Grundwasserstände ist die gängige Bewässerungspraxis in Khorezm. Häufig wird die erste Baumwollbewässerung und die Überbrückung von Zeiten ausbleibender Frischwasserzufuhr über das Aufstauen der Drainagekanäle und damit dem künstlichen Anheben des Grundwassers realisiert (Kapitel 2.4). Es gibt Felder in Khorezm, auf denen nach RUDENKO (2004) und FORKUTSA (2006) auch Baumwollerträge ohne oder nur geringe Oberflächenbewässerung erzielt werden können. Das bedeutet, dass hohe Grundwasserstände auch durchaus in Phasen, in denen weitere Baumwollbewässerungen vorgesehen sind, auftreten können und sich wirtschaftlich als nützlich erweisen.

Interpretation des Palvan-Gazavat-Systems

Das Palvan-Gazavat-System war im saisonalen Verlauf 2005 wesentlich größeren Schwankungen der linearen Oberflächenwasserflüsse ausgesetzt als das übrige System. Ungünstige Indikatorenwerte und die Wasserbilanzen zeigten die weitaus größere Problematik der Speicherauffüllung während der Hauptbewässerungsphasen. Folgende Interpretationsmöglichkeiten erscheinen plausibel, um die unausgeglichene Bilanzierung im Palvan-Gazavat-System zu erklären:

- Grundsätzlich ist der Südwesten des Untersuchungsgebietes durch sehr hohe Grundwasserstände gekennzeichnet (IBRAKHIMOV, 2005). Außerdem herrscht dort ein niedriges Geländegefälle vor, also eine Situation, die im Unterlauf eines Bewässerungssystems zu Rückstauwirkungen der Drainage führen kann. Damit kann das Palvan-Gazavat-System in den Sommermonaten nur vergleichsweise schlecht entwässert werden.
- In dem leicht welligen Relief finden sich viele Seen, die durch Grundwasser gespeist werden und in deren direkter Umgebung intensiv Reis angebaut wird. Das Wasser gelangt über die Reisfelder in die Seen. So können Phasen von Frischwasserknappheit durch das – allerdings salzhaltige – Seewasser überbrückt werden. Auf diese Weise wird aber auch im ganzen Umfeld dieser Reisanbauflächen der Grundwasserspiegel „künstlich“ stark angehoben, was sicher anteilig die gefundene Tendenz begründet. Diese hydrologischen Bedingungen und Bewässerungspraxis werden außerhalb des Palvan-Gazavat-Systems nur noch in kleinen Bereichen am Oberlauf des Ozerny-Kollektors angetroffen (Wassersicherheit für Reisanbau).
- Die oben erwähnte Erstabwässerung für Baumwolle über das Blockieren der Drainage kann im Süden Khorezms großräumig gefördert werden, da im Verlauf des Ozerny-Kollektors fünf Regulierungsbauwerke die temporäre Anhebung des Vorfluterniveaus ermöglichen. Solche Regulierungen wurden im Untersuchungszeitraum aber nicht durchgeführt¹²⁷.

Diese Implikationen haben aber nur unter der Annahme Gültigkeit, dass aus dem Grundwasserkörper keine laterale Drainage aus Khorezm herausführt. Grundsätzlich wurde in dieser Arbeit eingangs – wie in allen bekannten Arbeiten im Untersuchungsraum Khorezm – ein Zitat von KATS (1976) angeführt, das jährliche laterale Grundwasserbewegungen in Khorezm als vernachlässigbar gering gewichtet. Dies kann, nach den vorangegangenen Erkenntnissen und nach Beobachtungen auf Satellitenbildern insbesondere des Südwestens von Khorezm, im Palvan-Gazavat-System angezweifelt werden. Dort befindet sich am Wüstenrand, allerdings auf turkmenischer Seite, eine Vielzahl von Seen. Da diese über das ganze Jahr existent sind, liegt die Vermutung nahe, dass sie über einen Grundwasserzufluss gespeist werden. Die Fragen nach der Quelle des Wassers und damit nach der Rolle des Seegebiets für die Wasserbilanz des Palvan-

¹²⁷ Mündliche Kommunikation mit der OGME Khorezm.

Gazavat-Systems konnte im Rahmen der Arbeit nicht geklärt werden. Es wird vorgeschlagen, in einer zukünftigen Arbeit Verbindungen zu Entwässerungskanälen zu suchen und Wasserspiegelgefälle zwischen dem Entwässerungssystem und den Seen am Wüstenrand auf laterale Bewegungen des Grundwassers zu untersuchen. Im Fall, dass ein solcher lateraler Abstrom nachweisbar ist, muss die Bilanz modifiziert werden. Eine Änderung der Gesamtaussage (vergleiche *depleted fraction*) hätte dies nicht zur Folge.

Interpretation des Gesamtsystems ohne das Palvan-Gazavat-System

Außerhalb des Palvan-Gazavat-Systems wurden im Mittel günstigere Indikatorenwerte für die Sommersaison 2005 ermittelt. Mit dem Anstieg der Bewässerung stieg auch leicht zeitversetzt der Anteil der Drainage, insbesondere in den wasserstarken Monaten Juli und August. Offenbar funktionierte die Drainage in diesen Teilsystemen durchschnittlich besser als im Palvan-Gazavat-System. Der Anteil der Drainage am entnommenen Frischwasser erschien insgesamt allerdings sehr hoch. Zudem sind gerade im Oberlauf des Bewässerungssystems mehrere Stellen bekannt, in denen das Drainagewasser in die Bewässerungskanäle zurückgeführt wird. Wegen der Wiederverwendung des Drainagewassers wären eigentlich niedrigere Drainagemengen zu erwarten gewesen, so dass die Ergebnisse auf ein insgesamt hohes Wassernutzungspotenzial des Gesamtsystems (ohne das Palvan-Gazavat-System) hinweisen.

9 Fazit und Ausblick

In der Einleitung wurde skizziert, dass die zukünftige Nutzung der Wasserressourcen eine wichtige Frage für die Entwicklung Mittelasiens darstellt. Problematisch gestaltet sich dabei die Erhebung verwertbarer Daten auf dem hydrologischen Sektor hinsichtlich der Konzeption eines effektiven und nachhaltigen Wassermanagements. Auch stehen in der usbekischen Region Khorezm im Unterlauf des Amu Darya, wo jährlich über 5 km³ Wasser für die landwirtschaftliche Produktion verteilt werden, keine konsistenten und glaubwürdigen Informationen über die Nutzung von Land und Wasser zur Verfügung. Diese sind allerdings Voraussetzung zur Ermittlung von Defiziten und Potenzialen sowie zur Optimierung des Umgangs mit der Ressource.

Vor diesem Hintergrund lag das wesentliche Ziel dieser Dissertation zunächst in der Generierung flächenhafter, objektiver und konsistenter Datensätze über die Landnutzung und den landwirtschaftlichen Wasserverbrauch (Evapotranspiration) mit Methoden der Fernerkundung. Diese Datenbasis, ergänzt durch einen im Gelände erhobenen Messdatensatz der Kanalwasserflüsse, sollte eine Analyse und eine Bewertung des Bewässerungssystems und damit der landwirtschaftlichen Wassernutzung in Khorezm ermöglichen.

Im Folgenden werden nun die wichtigsten Erkenntnisse bezüglich der zentralen Fragen zusammengefasst, methodische sowie thematische Implikationen dargelegt und weiterführender Forschungsbedarf daraus abgeleitet.

9.1 Bestimmung der Landnutzung und Modellierung der Evapotranspiration

Es wurde ein überwachtetes Klassifikationsverfahren entwickelt, das auf Basis zeitlich hoch aufgelöster Fernerkundungsdaten eine inhaltlich genaue **Bestimmung der agrarischen Landnutzung** von Khorezm erlaubt. Besonders die Identifikation von Fruchtfolgen erwies sich

für die spätere Modellierung als vorteilhaft. In diesem Kontext haben insbesondere temporale NDVI-Signaturen aus 8-tägigen 250 m-MODIS-Reflexionsgraden (MOD09) ein hohes Eignungspotenzial zur Klassifikation der mittelasiatischen Hauptnutzungsarten Baumwolle, Reis und Winterweizen bewiesen. Das Verfahren basiert auf der mehrfachen Anwendung von *Recursive Partitioning and Regression Trees* auf unterschiedliche Kurvencharakteristika der NDVI-Zeitserien.

Als pragmatischer Ansatz, klassenspezifische Muster im Kurvenverlauf zu isolieren, wurde die **temporale Segmentierung der NDVI-Zeitserien** und verschiedener Derivate (Kurvenglättung, Steigung, Krümmungsverhalten, Adjustierung an die Position des Maximums) eingeführt. Mittels der deskriptiven Statistiken dieser Kurvensegmente lassen sich leichte phänologische Verschiebungen innerhalb einer Klasse gut erfassen. Die Klassifikationsbäume nutzen dies durch die automatische Filterung geeigneter Merkmale aus, so dass trotz meteorologisch (Datenqualität) und phänologisch variierenden Jahresverläufen des Vegetationssignals Stabilität im Ergebnis erzielt werden kann. Das Verfahren ist somit unabhängig von nutzerdefinierten Schwellenwerten für festgelegte Merkmale und wird somit leichter den Anforderungen an die Klassifikation nicht-physikalisch basierter Zeitserien gerecht.

Die besonderen Potenziale dieses Ansatzes werden durch die erzielten hohen Genauigkeit verdeutlicht: In den Untersuchungsjahren 2004 und 2005 konnten annähernd gleiche *overall accuracies* von 91 % sowie Kappa-Koeffizienten von 0,9 erzielt werden. Aufgrund der vergleichbaren atmosphärischen Bedingungen im Jahresgang und identischen Hauptzielklassen ist zu erwarten, dass sich das Verfahren auf die übrigen Bewässerungsregionen in den Unterläufen des Amu Darya und Syr Darya übertragen lässt. Voraussetzung dazu ist allerdings die Kalibrierung mit regional zu erhebenden Trainingsdaten. Durch eine jährliche Anwendung kann das Verfahren als Baustein für ein umfangreiches Monitoring der landwirtschaftlichen Bewässerungsregionen Khorezms eingesetzt werden.

Durch den Einsatz des Verfahrens wird perspektivisch die Ermittlung mehrjähriger Fruchtfolgen sowie von Trends der Intensität der agrarischen Nutzung ermöglicht. Es wird erwartet, dass die Bestimmung der Klassifikationsbäume auf wenige Zeiterienelemente eine Vorhersage von Landnutzungen innerhalb einer Bewässerungsperiode ermöglicht. Dies kann in der Konsequenz als planungsrelevante Information während des laufenden Bewässerungsbetriebes betrachtet werden. Es ist zu prüfen, inwieweit das Verfahren auf andere Klimazonen mit ganzjährig ungünstigeren Witterungsverhältnissen und damit schlechteren Datenqualitäten übertragbar ist.

Im zweiten Methodenkomplex wurde das SEBAL-Modell in Verknüpfung mit METRIC-Komponenten zur **Modellierung der tatsächlichen Evapotranspiration** als Variable des agrarischen Wasserverbrauchs angewendet. Durch die klimatischen Voraussetzungen von Khorezm begünstigt, konnte das Modell auf Basis täglicher MODIS-LST-Produkte (MOD11) in

zwei Untersuchungsjahren zwischen April und Oktober an über 130 von 215 Tagen zum Einsatz kommen. Weitere Eingangsparameter bildeten Zeitserien der standardisierten biophysikalischen Parameter und Vegetationsindizes aus MODIS-Fernerkundungsdaten der MODIS *product suite*. Methodische Neuerungen lagen in der Anpassung des Modells auf die niedrige geometrische Auflösung von MODIS. Die Mischpixelproblematik im 1 km-Skalenniveau machte **Korrekturfaktoren zur Kalibrierung der SEBAL-Ankerpunkte** erforderlich, die mittels der Landnutzungsklassifikation und des NDVI realisiert werden konnten. Weiterhin wurde eine **automatisierte Wahl der Ankerpunkte** durch die Definition eines Regelwerks sichergestellt, wobei die Ergebnisse der Landnutzungsklassifikation als Auswahlkriterien fungierten. Damit kann die Modellierung seitens des Anwenders semi-operationell auf multitemporale Daten angewendet werden.

Die Modellierung wurde durch umfassende Plausibilitätsuntersuchungen der Eingangsparameter, sowie der Zwischen- und Endprodukte validiert. Es konnten statistisch signifikante, mittlere Korrelationen ($r^2 = 0,63$ für 2004, $r^2 = 0,69$ für 2005) zwischen Modellergebnissen über Wasserflächen und *class-A-pan*-Daten festgestellt werden. Für Winterweizen wurden in den Untersuchungsjahren Evapotranspirationen von akzeptablen 79 % und 85 % der potenziellen pflanzenspezifischen Evapotranspiration ermittelt. Ausgelöst durch hohe Evapotranspiration in der Anfangswachstumsphase übertrafen die Ergebnisse die Erwartungswerte für Baumwolle um 10 % und 15 %. Literaturvergleiche zeigten die Plausibilität des ermittelten erhöhten Verbrauchs durch Evapotranspiration zwischen 17,9 % und 29,2 % über Reisflächen. Eine originäre Messung der tatsächlichen Evapotranspiration über Ackerflächen (*Bowen Ratio*, *Eddy Correlation*, Scintillometer) ist perspektivisch als Validierung anzustreben.

Es kann resümiert werden, dass die gezeigte Modellierung der tatsächlichen Evapotranspiration auf Basis täglicher MODIS-Daten prinzipiell zur operationellen Anwendung geeignet ist. Mittels zehntägiger, Monats- und saisonaler Komposite kann die lokale Wasseradministration in die Lage versetzt werden, ein (post-saisonales) Monitoring des agrarischen Wasserverbrauchs in Khorezm durchzuführen. Als Zielmaßstab werden die bewässerten Flächen der WUAs empfohlen, auf Feldebene ist eine bessere geometrische Auflösung der Fernerkundungsdaten notwendig (ASTER, Landsat 5-TM).

Für eine zukünftige Nahe-Echtzeit-Generierung eines Evapotranspirationsprodukts sind intra-saisonale Landnutzungsklassifikationen und ein kontinuierlicher meteorologischer Datenfluss sicherzustellen. Räumliche Übertragbarkeit – beispielsweise auf die nördlich angrenzenden Bewässerungsgebiete – ist gegeben, setzt aber die Verfügbarkeit meteorologischer Daten aus diesen Regionen voraus, um den Lagebezug bei der Modellierung beizubehalten.

Die entwickelten und angewendeten Methoden können grundsätzlich auch auf MODIS-Daten der Aqua-Plattform angewendet werden. Beide MODIS-Missionen sind allerdings experimentell und daher zeitlich begrenzt. Mit NPOESS (*National Polar Operational Environmental Satellite System*) ist langfristig eine operationelle Nachfolgemission geplant, deren Spezifikationen wie bei MODIS das Monitoring von Vegetationsoberflächen ermöglichen werden (TOWNSHEND und JUSTICE, 2002).

9.2 Analyse und Bewertung des Bewässerungssystems von Khorezm

Bei der **Analyse raumzeitlicher Muster der Landnutzung** konnte für die Jahre 2004 und 2005 eine hohe Auslastung der Nutzfläche bis weit in die Unterlaufgebiete des Bewässerungssystems nachgewiesen werden. Die landwirtschaftliche Nutzungsintensität nahm erst in den entlegenen Regionen von Shavat und Kushkopyr leicht ab. Baumwolle dominierte die Landwirtschaft mit einem Anteil von knapp 60 % an der gesamten Agrarfläche (mittlere Agrarfläche: 245.000 ha). Reis und Winterweizen bedeckten je ein Viertel, 11 % wurden anderweitig landwirtschaftlich genutzt. Eine leichte Intensivierung der Landwirtschaft zeigte der Anstieg des Flächenanteils von Fruchtfolgen mit Winterweizen (Doppelnutzung) zwischen 2004 und 2005 um 14,3 %. Unabhängig von der Lage an Oberlauf- oder Unterlaufkanälen war ein Anteil des wasserintensiven Reisanbaus von über 20 % zu verzeichnen.

Die Mittelwerte der tatsächlichen saisonalen Evapotranspiration zeigten einen hohen **Wasserverbrauch im Agrarsektor** auf. Die saisonale tatsächliche Evapotranspiration lag zwischen 530 mm und über 1.000 mm (Mittelwert: über 750 mm). Niedrigere Werte wurden dabei in den entlegenen Unterlaufregionen ermittelt, die durch einen höheren Anteil an Wüste geprägt waren. Allerdings gingen in diese Summen auch die Wassermengen ein, die nach dem *leaching* durch den hohen Grundwasserstand von der Bodenoberfläche verdunsteten. Für die Vegetationsperiode selbst muss daher ein niedrigerer Wert angenommen werden.

Die Untersuchung auf **Systematiken lokaler Disparitäten des Wasserverbrauchs** ergab einen abnehmenden Gradienten des agrarischen Wasserverbrauchs in Richtung des Unterlaufs auf der Ebene großer agrarischer Feldkomplexe (1 km-MODIS-Pixel). In der Synthese mit der Landnutzungsklassifikation und der potenziellen pflanzenspezifischen Evapotranspiration zeigten sich auf WUA-Ebene Einsparpotenziale im Oberlauf des Kanalsystems und leicht erhöhter Wasserbedarf im Unterlauf. Aus wissenschaftlicher Sicht ist die exakte Ableitung der „Relativen Evapotranspiration“ ein nächster Schritt. Zu lösen ist dabei das Auftreten der unterschiedlich einsetzenden und andauernden Vegetationsperioden innerhalb eines Pixels (Mischpixelproblem).

Umfassende **hydrologische Durchflussmessungen** ermöglichten die Bilanzierungen von Wasserentnahme und Drainage für 82 % des Untersuchungsgebietes in der Sommersaison 2005 (320.000 ha, inklusive der nicht-agrarischen Flächen). Aufgrund seiner Lage im Unterlauf des

Kanalsystems wurde das Palvan-Gazavat-System im Südwesten von Khorezm als untersuchenswertes Teilgebiet abgegrenzt (83.000 ha). Einige Messstellen dienten zusätzlich zu Detailanalysen der Wasserentnahme innerhalb der hydrologischen Subsysteme in Khorezm.

Die auf das Gesamtsystem extrapolierten Messergebnisse von 5,47 km³ zeigten in der wassersicheren Vegetationsperiode 2005 einen durchschnittlichen **Überschuss von 37 % zu offiziellen statistischen Angaben**. Dabei unterbot der Messdatensatz in keiner Dekade die statistischen Werte. Zu Beginn der Saison war die Abweichung minimal, erreichte aber in der ersten Julidekade die 50 %-Marke. Es war zu folgern, dass eine weitere Verwendung dieser offiziell zugänglichen Datensätze falsche Ergebnisse impliziert (beispielsweise bei der Erstellung der Wasserbilanz). Von einem weiteren Einsatz offizieller statistischer Daten wurde daher abgesehen.

Die monatlichen Wasserbilanzen und der Einsatz der Performanceindikatoren *depleted fraction* und „Drainage/Wasserentnahme“ der Sommersaison 2005 erlaubten einen Blick auf die **Funktionsweise des Be- und Entwässerungssystems** von Khorezm. Während der Bewässerungszeit wird in wassersicheren Jahren wie 2005 der Wasserspeicher (Grundwasser und Bodenfeuchte) in Khorezm großflächig aufgefüllt und erst mit großer zeitlicher Verzögerung abgeführt: Die Speicher laufen erst am Ende der Saison wieder leer. In der *leaching* -Periode wiederholt sich der Vorgang.

Als Ursachen für die Speicherauffüllung wurden mittels der *depleted fraction* Kanalverluste und unregelmäßige Wasserverfügbarkeit nachgewiesen. Letztere führt zum Aufstauen der Drainage durch die Landwirte bei drohender Wasserknappheit, um dennoch die Versorgung und damit die Erträge sicherzustellen. Die Gefahr der beschleunigten Salzzakkumulation ist hoch. Dennoch konnte die Drainage in Khorezm im Untersuchungsmaßstab als leistungsstark eingestuft werden. Anstelle einer Forderung nach der Verbesserung der Drainageleistung implizieren die Ergebnisse daher vielmehr die Einführung wassersparender Maßnahmen.

Aus diesem Gesichtspunkt heraus sind mögliche Anforderungen an das Bewässerungsmanagement in Khorezm die Minimierung der Kanalverluste und die Erhöhung der Wassersicherheit zur Umstellung der Bewässerungspraxis. Unter einer Vielzahl möglicher Maßnahmen sollen an dieser Stelle die Befestigung der Kanäle und die Einführung von Optionen zur Wasserspeicherung (abgedichtete Stauseen) an untergeordneten Verteilungsknoten im Bewässerungssystem von Khorezm genannt werden. Eine Umsetzung solcher Vorschläge ist vor dem Hintergrund der ungünstigen finanziellen Situation der Verwaltungseinheit Khorezm fragwürdig.

Schwachstellen der Land- und Wassernutzung im Bewässerungssystem konnten durch den direkten Vergleich der Funktionsweise der Teilsysteme untereinander erschlossen werden. Es konnte insbesondere für das **Palvan-Gazavat-System** eine vergleichsweise negative Situation aus den monatlichen Wasserbilanzierungen abgeleitet werden:

- Die Wasserentnahme des Palvan-Gazavat-Systems übertraf im Jahr 2005 in Bezug auf die Fläche die übrigen Teilsysteme in Khorezm. Das Wasser erreicht innerhalb des Subsystems aber nicht gleichmäßig die Unterläufe, offensichtlich sind sehr hohe Wasserverluste durch Versickerung im Kanalsystem als Ursache zu benennen.
- Die Erhöhung von Bodenfeuchte und Grundwasserspiegel war in der Vegetationsperiode stärker im Vergleich mit dem übrigen Bewässerungssystem, die Entleerung dieser Speicher dagegen verlangsamt. Mit den Beobachtungen von IBRAKHIMOV (2005), der hohe Grundwasserstände in diesem Subsystem nachweist, sind eine Absenkung des Geländegefälles im Unterlauf des Ozerny-Kollektors und damit Rückstauprobleme der Drainage als wahrscheinlich anzunehmen. Es ist zu klären, ob ein Teil des Drainagewassers in die Seen südlich des Ozerny-Kollektors abgeführt wird, um diesem Problem entgegenzutreten.

Die Werte für *depleted fraction* deuten eine vergleichbare Situation im Daryalik-System an. Weiterhin erfordert der modellierte niedrige Wasserverbrauch durch Evapotranspiration im Unterlauf des Shavat-Kanals zukünftige Detailanalysen. Aus den Performanceindikatoren ist ein im Durchschnitt effizienterer Umgang mit Wasser im reisintensiven Klichnyasbay-System abzulesen. Dort wurden auch absolut betrachtet die höchsten saisonalen Mittelwerte der Evapotranspiration von 880 mm erreicht.

Zusammenfassend kann hinsichtlich der Einhaltung existierender **Grundsätze der Wasserverteilung** auf Systemebene festgehalten werden:

- Eine Gleichheit der regionalen Wasserverteilung war im Jahr 2005 nicht festzustellen, was durch stark variierende Wasserentnahmen in den einzelnen Subsystemen belegt werden konnte.
- Offensichtlich besteht hinsichtlich der bedarfsgerechten Wasserverfügbarkeit (Adäquatheit) auf Feldebene mit zunehmender Entfernung von den Einlasspunkten am Amu Darya und dem Tujamujun-Speicher ein negativer Trend.
- Die Zuverlässigkeit der Wasserverfügbarkeit ist nur unterhalb großer Wasserverteilungsbauwerke (auch im Inneren des Systems, Beispiel Palvan-Gazavat-System) in den Oberläufen des Kanalsystems gewährleistet. Ansonsten wäre die Bewässerung durch angehobene Grundwasserspiegel in Khorezm nicht anzutreffen.

Der Vergleich einer Abschätzung des Indikators „Relative Evapotranspiration“ mit der Wasserentnahme hat zudem gezeigt, dass die für viele Systeme typischen **Unterschiede der Wasserverfügbarkeit** zwischen oberen und unteren Kanalabschnitten in Khorezm zwar im Verbrauch auf Feldebene, nicht aber hinsichtlich der potenziellen Verfügbarkeit in den Subsystemen anzutreffen sind.

Eine Verallgemeinerung aller Ergebnisse gestaltet sich aus diversen Gesichtspunkten als schwierig: Ein mehrjähriges Monitoring der Kanalwasserflüsse und der Evapotranspiration wird notwendig, um an das Bewässerungssystem angepasste kritische Werte für die Performanceindikatoren zu entwickeln. Zu deren Bestimmung werden neben den Umweltindikatoren auch Analysen der landwirtschaftlichen Produktivität und der Effizienz des Wassereinsatzes erforderlich. Dazu dient auch die Aufstellung einer Jahresbilanz der Wasserflüsse in Khorezm durch Hinzunahme der *leaching*-Periode und der Winterweizensaison. Methodisch bilden vor allem Detailanalysen des Grundwassers für die Stützung oder Differenzierung der getroffenen Implikationen einen weitere wichtige Grundlage (BOS, 2004).

Zurückblickend auf die in der Einleitung geschilderte **Wasserproblematik in Mittelasien** konkretisieren die durchschnittlichen Wasserentnahmen pro Bezugsfläche von Khorezm die enorme Diskrepanz der Wasserverteilung zwischen und innerhalb der Teilbewässerungsgebiete. Ein Mittelwertsvergleich zeigt, dass Khorezm gegenüber anderen Regionen bezüglich der Wasserverfügbarkeit an den Systemgrenzen deutlich im Vorteil ist. Auf weite Sicht kann eine effizientere Wassernutzung in Khorezm zu Einsparungen führen, die in den schlechter gestellten Regionen im Unterlauf des Amu Darya Deltas Verbesserungen ermöglichen können.

Wie in ganz Mittelasien ist auch in Khorezm eine zentrale Herausforderung der Zukunft die Optimierung von Verteilung und Nutzung der Ressource Wasser. Allein das wassersichere Jahr 2005 hat die bedarfsgerechte Sicherstellung der Wasserverfügbarkeit, die Optimierung der Kanalinfrastruktur (Reduzierung der Kanalverluste durch Versickerung, Steuerung des Wasserflusses) sowie der Bewirtschaftung (Grundwassermanagement) als Kernprobleme im laufenden Bewässerungsbetrieb in Khorezm aufgezeigt. Die Sicherstellung der Konsistenz und Exaktheit der hydrologischen Messdaten vor der vergleichenden Analyse ist dabei – wie gezeigt wurde – der erste wichtige Schritt.

Die Methoden der Fernerkundung haben ihr großes Eignungspotenzial zum Monitoring der mittelasiatischen Bewässerungssysteme in dieser Arbeit unter Beweis gestellt. Die fernerkundlich erschlossenen objektiven, konsistenten und vergleichbaren Daten sind als wertvoller Beitrag zur Überwachung und gegebenenfalls zur Korrektur des Verteilungsprozesses im laufenden Betrieb anzusehen, da sie den unmittelbaren Bezug zur WUA-ebene herstellen können. Dabei ist eine

exakte Landnutzungsklassifikation ein schärfendes Element bei der Ermittlung und der Auswertung des agrarischen Wasserverbrauchs. Insbesondere der vergleichsweise geringe Personal- und Kostenaufwand und die zeitlich rasche flächenhafte Erfassung können als Argumente für eine praktische Implementierung in übergeordnete planerische Vorgänge angeführt werden, beispielsweise in das seitens des ICWC geforderte *Integrated Water Resources Management*.

Anhang I Literaturverzeichnis

ABDULLAEV, I., HASSAN, M. U., MANTHRITHILAKE, H. UND YAKUBOV, M. (2005). Making water distribution more transparent: application of the time-based water distribution method to tertiary canals in Central Asia. *Journal of Applied Irrigation Science* 40(2). 193-216.

ABDULLAEV, I., HORST, M., MIRZAEV, N. UND MATYAKUBOV, B. (2003). Water productivity in the Syr-Darya basin: temporal and spatial differences. 9th International Drainage Workshop, Utrecht, Niederlande.

ABDULLAEV, U. (2003). Republic of Uzbekistan. Land degradation assessment in dry lands (LADA). State Design and Research Institute (Uzqip); Tashkent.

ABRAMS, M. (2000). The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote Sensing* 21(5). 847-859.

AG Boden (1994). Bodenkundliche Kartieranleitung; Hannover.

AKRAMKANOV, A. (2005). The spatial distribution of soil salinity: Detection and prediction. In: *Ecology and Development Series*. 32. Cuvillier Verlag; Göttingen.

ALEXANDRIDIS, T., ASIF, S. UND ALI, S. (1999). Water performance indicators using satellite imagery for the Fordwah Eastern Sadiqia (South) Irrigation and Drainage Project. Lahore, Pakistan. IIMI-Pakistan Research Report. IWMI.

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D. UND SMITH, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guide-lines for computing crop water requirements. In: *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 56; Rome.

ALLEN, R. G., SMITH, M., PERRIER, A. UND PEREIRA, L. S. (1994). An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin* 43(2). 1-34.

ALLEN, R. G., TASUMI, M., MORSE, A. UND TREZZA, R. (2005). A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. *Irrigation and Drainage Systems* 19. 251-268.

ALLEN, R. G., WATERS, R., TASUMI, M., TREZZA, R. UND BASTIAANSEN, W. G. M. (2002). SEBAL - Surface Energy Balance Algorithm for Land - Idaho implementation - Advanced training and users manual. Idaho.

AMBAST, S. K., KESHARI, A. K. UND GOSAIN, A. K. (2002). An operational model for estimating Regional Evapotranspiration through Surface Energy Partitioning (RESEP). *International Journal of Remote Sensing* 23(22). 4917-4930.

ARAI, K. (1999). Preliminary vicarious calibration for EOS-AM1 ASTER with field campaigns. *Advances in Space Research* 23(8, Calibration and Characterization of Satellite Sensors). 1449-1457.

ARNDT, M., GÜNTHER, K. UND MAIER, S. W. (2001). Deriving land cover information from multi-temporal MOS data. 4th Berlin Workshop on Ocean Remote Sensing, "5 Years of MOS-IRS", 30. Mai - 1. Juni, Berlin.

ASCE-EWRI (2005). The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Report by the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. Environmental and Water Resources Institute of the ASCE. Reston, Virginia.

BAHRENBURG, G., GIESE, E. UND NIPPER, J. (1999). *Statistische Methoden in der Geographie I.* Teubner; Stuttgart.

BAHRENBURG, G., GIESE, E. UND NIPPER, J. (2003). *Statistische Methoden in der Geographie II.* Teubner; Stuttgart.

BANDARA, K. M. P. S. (2006). Assessing irrigation performance by using remote sensing. PhD thesis, Wageningen University.

BASTIAANSEN, W. G. M. (1995). Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. Report 109. Agricultural Research Department. Wageningen, Netherlands.

BASTIAANSEN, W. G. M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology* 229. 87-100.

BASTIAANSEN, W. G. M. UND BOS, M. G. (1999). Irrigation performance indicators based on remotely sensed data: A review of literature. *Irrigation and Drainage Systems* 13(4). 291-311.

- BASTIAANSEN, W. G. M., BRITO, R. A. L., BOS, M. G., SOUZA, R. A., CAVALCANTI, E. B. UND BAKKER, M. M. (2001).** Low cost satellite data for monthly irrigation performance monitoring: benchmarks from Nilo Coelho, Brazil. *Irrigation and Drainage Systems* 15. 53-79.
- BASTIAANSEN, W. G. M. UND CHANDRAPALA, L. (2003).** Water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use. *Agricultural Water Management* 58. 171-192.
- BASTIAANSEN, W. G. M., MENENTI, M., FEDDES, R. A. UND HOLTSLAG, A. A. M. (1998).** A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology* 212-213. 198-212.
- BASTIAANSEN, W. G. M., MOLDEN, D. J. UND MAKIN, I. W. (2000).** Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural water management* 46. 137-155.
- BASTIAANSEN, W. G. M., MOLDEN, D. J., THIRUVENGADACHARI, S., SMIT, A. A. M. F. R., MUTUWATTE, L. UND JAYASINGHE, G. (1999).** Remote sensing and hydrologic models for performance assessment in Sirsa Irrigation Circle, India. *Research Report 27. International Water Management Institute. Colombo.*
- BASTIAANSEN, W. G. M., NOORDMAN, E. J. M., PELGRUM, H., DAVIDS, G., THORESON, B. P. UND ALLEN, R. G. (2005).** SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131(1). 85-93.
- BASTIAANSEN, W. G. M., VAN DER WAL, T. UND VISSER, T. N. M. (1996).** Diagnosis of regional evaporation by remote sensing to support irrigation performance assessment. *Irrigation and Drainage Systems* 10(1). 1-23.
- BAUMGARTNER, A. UND LIEBSCHER, H.-J. (1990).** *Lehrbuch der Hydrologie, Band 1: Allgemeine Hydrologie- Quantitative Hydrologie.* Borntraeger Verlag; Berlin, Stuttgart.
- BLENK, S. (2005).** Bestimmung des Blattflächenindex für Baumwoll- und Reisanbauflächen aus Geländeerhebungen und MODIS Fernerkundungsdaten. *Diplomarbeit, Universität Würzburg.*
- BOS, M. G. (2004).** Using the depleted fraction to manage the groundwater table in irrigated areas. *Irrigation And Drainage Systems* 18. 201-209.
- BOS, M. G., BURTON, M. A. UND MOLDEN, D. J. (2005).** *Irrigation and drainage performance assessment.* Cromwell Press; Trowbridge.
- BOS, M. G. UND VAN AART, R. (1996).** The interrelationship between irrigation, drainage and the environment. *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on the Interrelationship between Irrigation, Drainage and the Environment in the Aral Sea Basin.* Kluwer; Dordrecht, Niederlande.

BREIMAN, L., FRIEDMANN, J. H., OLSHEN, R. A. UND J, S. C. (1984). Classification and Regression Trees. Chapman & Hall; New York.

BUTLER, J. J. UND BARNES, R. A. (1998). Calibration Strategy for the Earth Observing System (EOS)-AM1 Platform. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 36(4). 1056-1061.

BUTZ, T. (2005). Fouriertransformation für Fußgänger. Teubner; Wiesbaden.

CAMPBELL, G. S. UND NORMAN, J. M. (1998). An introduction to environmental biophysics. Springer; New York.

CHEMIN, Y., PLATONOV, A., UL-HASSAN, M. UND ABDULLAEV, I. (2004). Using remote sensing data for water depletion assessment at administrative and irrigation-system levels: case study of the Ferghana Province of Uzbekistan. Agricultural Water Management 64(3). 183-196.

CHOUDHURY, B. J. (2000). Carbon-water-energy relations for selected river basins. Advances in Space Research 26(7). 1091-1099.

CHOUDHURY, B. J., IDSO, S. B. UND REGINATO, R. J. (1984). Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation. Agricultural and Forest Meteorology 39. 283-297.

CHUB, E. V. (2000). Climate change and its impact on natural resources potential of the Republic of Uzbekistan. Main Administration on Hydrometeorology under the cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan. Central Asian Hydrometeorological Research Institute named after V.A. Bugayev. Tashkent, Usbekistan.

CIHLAR, J. (2000). Land cover mapping of large areas from satellites: status and research priorities. International Journal of Remote Sensing 21(6&7). 1093-1114.

CNES (2006). The VEGETATION programme. Centre National d'Etudes Spatiales. URL: <http://www.spot-vegetation.com/>, zuletzt aufgerufen am 15.9.2006.

COLDITZ, R. R., CONRAD, C., WEHRMANN, T., SCHMIDT, M. UND DECH, S. (2006). Generation and assessment of MODIS time series using quality information. In: IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium, July 31 - August 04 2006, Denver, Colorado.

COLDITZ, R. R., WEHRMANN, T., BACHMANN, M., STEINNOCHER, K., SCHMIDT, M., STRUNZ, G. UND DECH, S. (2005). Influence of image fusion approaches on classification accuracy – a case study. International Journal of Remote Sensing (akzeptiert).

CONGALTON, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. Remote Sensing of Environment 37. 35-46.

CONGALTON, R. G. UND GREEN, K. (1999). Assessing the accuracy of remotely sensed data. Lewis Publishers; New York.

CONRAD, C., COLDITZ, R. R., PETROCCHI, A., RUECKER, G. R., DECH, S. UND SCHMIDT, M. (2005). Time-Series-Generator – Ein flexibles Softwaremodul zur Generierung und Bewertung von Zeitserien aus NASA MODIS Datenprodukten. In: Angewandte Geoinformatik. Beiträge zum 17. AGIT Symposium, 6.-8. Juli 2005, Salzburg. Strobl, J., Blaschke, T. und Griesebner, G. (Hrsg.). 100-105.

CONRAD, C., RÜCKER, G. R., COLDITZ, R. R., STRUNZ, G. UND DECH, S. (2004A). Crop monitoring using multi-temporal MODIS remote sensing data in Khorezm. The Use of GIS And Simulation Models For Research And Decision Support in Central Asia, Tashkent, Usbekistan. Humboldt-Kolleg.

CONRAD, C., RÜCKER, G. R., SCHWEITZER, C., DECH, S. UND HAFEEZ, M. M. (2004B). Modeling seasonal actual evapotranspiration with remote sensing and GIS in Khorezm region, Uzbekistan. Proc. of the 11th SPIE International Symposium on Remote Sensing, Maspalomas, Gran Canaria, Spanien.

DE BEURS, K. M. UND HENEGBRY, G. M. (2004). Land surface phenology, climatic variation, and institutional change: analyzing agricultural land cover change in Kazakhstan. Remote Sensing of Environment 89(4). 423-433.

DECH, S. (1997). Anwendung der Satellitenfernerkundung. - Von der geowissenschaftlichen Forschung zum operationellen Einsatz. Habilitationsschrift, Universität Würzburg.

DECH, S. UND RESSL, R. (1993). Die Verlandung des Aralsees. - Eine Bestandsaufnahme durch Satellitenfernerkundung. Geographische Rundschau 45(6). 345-352.

DECH, S. W., TUNGALAGSAIKHAN, P., PREUSSER, C. UND MEISNER, R. E. (1998). Operational value-adding to AVHRR data over Europe: methods, results, and prospects. Aerospace Science and Technology 5. 335-346.

DEFRIES, R., HANSEN, M. UND TOWNSHEND, J. R. G. (1995). Global discrimination of land cover types from metrics derived from AVHRR pathfinder data. Remote Sensing of Environment 54. 209-222.

DEFRIES, R. S., HANSEN, M. C., TOWNSHEND, J. R. G. UND SOHLBERG, R. A. (1998). Global land cover classifications at 8 km spatial resolution: the use of training data derived from Landsat imagery in decision tree classifiers. International Journal of Remote Sensing 19(16). 3141-3168.

DJALALOV, A. A., ISHANOV, K. K. UND AZIMOV, U. A. (2005). Project proposal on strategic planning to fulfil the principles of integrated water resource management. National Report. The Republic of Uzbekistan. 46 S. (auf russisch).

DROOGERS, P. (2002). Global Irrigated Area Mapping: Overview and Recommendations. Working Paper 36. I. W. M. Institute. Colombo.

DSRS (2006). MODIS Bow-tie effect. Dundee Satellite Receiving Station, Dundee University, UK. URL: <http://www.sat.dundee.ac.uk/modis-bowtie.html>, zuletzt aufgerufen am 13.10.2006.

DUKHOVNY, V. A. (1996). The problem of water resources management in Central Asia with regard to the Aral Sea situation. In: The Aral Sea Basin. Micklin, P. und Williams, D. W. (Hrsg.). Springer; Berlin, Heidelberg.

DUKHOVNY, V. A., SOKOLOV, V. UND ZIGANSHIMA, D. (2004). Some ideas about IWRM implementation in Central Asia. Seminar on the Role of Ecosystems As Water Suppliers, Geneva. UNECE.

DUKHOVNY, V. A., SORONIN, A. G. UND NIKULIN, A. S. (2003). Amudaria river basin: ways of probable conflicts prevention. 54th International Executive Council of ICID 20th ICID European Conference, Montpellier.

EADS-SPACE (2006). Meteosat Second Generation 2 – Unprecedented weather forecasting accuracy thanks to the SEVIRI imager. European Aeronautic Defence and Space Company. URL: <http://www.space.eads.net/press-center/press-releases/Meteosat-second-generation-2>, zuletzt aufgerufen am 13.9.2006.

ECOTECH (2006). Firmenhomepage. URL: <http://www.ecotech-bonn.de/>, zuletzt aufgerufen am 14.10.2006.

EL MAGD, A. I. UND TANTON, T. W. (2003). Improvements in land use mapping for irrigated agriculture from satellite sensor data using a multi-stage maximum likelihood classification. International Journal of Remote Sensing 24(21). 4197-4206.

EL MAGD, A. I. UND TANTON, T. W. (2005). Remote sensing and GIS for estimation of irrigation crop water demand. International Journal of Remote Sensing 26(11). 2359-2370.

ETTER, A., MCALPINE, C., WILSON, K., PHINN, S. UND POSSINGHAM, H. (2006). Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. Agriculture Ecosystems & Environment 114. 369-386.

FAO (2003). The state of food insecurity in the world. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. Rome.

FAO/WPF (2000). Crop and food supply assessment mission to Karakalpakstan and Khorezm regions of Uzbekistan. Rome.

FAYSULLAEV, B. F. (1980). Water-salt regime of the soils developed on the different alluvial deposits of Amu-Darya River (in Khorezm oasis). SANIIRI. Tashkent. 1-25.

- FILCHAKOVA, N. (2005).** A study of stakeholders and problems in water management of the Amu Darya river basin. M.Sc. thesis, Universität Osnabrück.
- FORKUTSA, I. (2006).** Modeling water and salt dynamics under irrigated cotton with shallow groundwater in the Khorezm region of Uzbekistan. In: Ecology and Development Series. 37. Cuvillier Verlag; Göttingen. 172 S.
- FORSTER, O. (1992).** Analysis I. Vieweg; Braunschweig.
- FUJISADA, H. (1998).** ASTER Level-1 Data Processing Algorithm. IEEE transactions on geoscience and remote sensing 36(4). 1101-1112.
- FULLER, D. O. (1998).** Trends in NDVI time series and their relation to rangeland and crop production in Senegal 1987-1993. International Journal of Remote Sensing 19(10). 2013-2018.
- FÜRST, J. (2006).** Gewässerkunde und Hydrometrie. Vorlesung. Universität für Bodenkunde, Wien. URL: <http://iwhw.boku.ac.at/gkhydrometrie/sbgk2006.pdf>, zuletzt aufgerufen am 17.10.06.
- GEF (1998).** Aral Sea Basin program (Kazakhstan, Kyrgyz Republic, Tajikistan, Turkmenistan and Uzbekistan) water and environmental management project. Global Environment Facility.
- GEBNER, U. (2005).** Landbedeckungs / Landnutzungsklassifizierung von Deutschland auf der Grundlage von Daten des Sensors MERIS. Diplomarbeit, Universität Augsburg.
- GIESE, E. (1997).** Die ökologische Krise der Aralseeregion. Ursachen, Folgen, Lösungsansätze. Geographische Rundschau 49(5). 293-299.
- GIESE, E., SEHRING, J. UND TROUCHINE, A. (2004).** Zwischenstaatliche Nutzungskonflikte in Mittelasien. Geographische Rundschau 56(10). 10-16.
- GLAVGIDROMET (2003).** Meteorological data. Main Administration on Hydrometeorology under the cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan. Tashkent.
- GLAZIRIN, G. E., CHANISHEV, S. G. UND CHUB, V. E. (1999).** Brief outlines of climate in Uzbekistan. Chinor ENK - Galaba. Tashkent. 29 S. (auf russisch).
- GRANGER, R. J. (1997).** Comparison of surface and satellite-derived estimates of evapotranspiration using a feedback algorithm. In: Application of remote sensing in hydrology. Proceedings of the Third International Workshop, NHRI Symposium No. 17, NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD NHRI, Oktober, 1996.
- GRANGER, R. J. (2000).** Satellite-derived estimates of evapotranspiration in the Gediz basin. Journal of Hydrology 229. 70-76.

- GUENTHER, B., XIONG, X., SALOMONSON, V. V., BARNES, W. L. UND YOUNG, J. (2002).** On-orbit performance of the earth observing system moderate resolution imaging spectroradiometer; first year of data. *Remote Sensing of Environment* 83. 16-30.
- HAFEEZ, M. M. (2003).** Water accounting and Productivity at Different Spatial Scales in a Rice Irrigation System; A Remote Sensing Approach. In: *Ecology and Development Series*. 8. Cuvillier Verlag; Göttingen.
- HAFEEZ, M. M. UND KHAN, S. (EINGEREICHT).** Spatial mapping of actual crop water use in ground water dominant irrigation system. *Journal of Physics, Chemistry of the Earth*.
- HANSEN, F. V. (1993).** Surface roughness lengths. ARL Technical Report. U.S.Army. White Sands Missile Range.
- HANSEN, M. C., DEFRIES, R. S., TOWNSHEND, J. R. G., CARROLL, M., DIMICELI, C. UND SOHLBERG, R. A., (2003).** Global percent tree cover at a spatial resolution of 500 meters: First results of the MODIS vegetation continuous fields algorithm. *Earth Interactions* 7(10). 1–15.
- HANSEN, M. C., DEFRIES, R. S., TOWNSHEND, J. R. G. UND SOHLBERG, R. A. (2000).** Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. *International Journal of Remote Sensing* 21(6-7). 1331-1364.
- HERBST, S. (2005).** Water-borne diseases and risk factor analysis. PhD thesis, Universität Bonn.
- HERSCHY, R. W. (1995).** Streamflow measurements. E & FN Spon; London.
- HEYER, E. (1993).** Witterung und Klima, eine allgemeine Klimatologie. Teubner; Stuttgart.
- HOLBEN, B. N. (1986).** Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 7(11). 1417-1434.
- HUANG, S. UND SIEGERT, F. (2006).** Land cover classification optimized to detect areas at risk of desertification in North China based on SPOT VEGETATION imagery. *Journal of Arid Environments* 67(2). 308-327.
- HUETE, A. R. (1988).** A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25. 295-309.
- HUETE, A. R., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E. P., GAO, X. UND FERREIRA, L. G. (2002).** Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83(1-2). 195-213.

- HUETE, A. R., LIU, H. Q., BATCHILY, K. UND VAN LEEUWEN, W. J. D. (1997).** A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* 59. 440-451.
- IBRAKHIMOV, M. (2005).** Spatial and temporal dynamics of groundwater table and salinity in Khorezm. In: *Ecology and Development Series*. 23. Cuvillier Verlag; Göttingen.
- ICG (2002).** Central Asia: Water and conflict. Asia Report 34. International Crisis Group. Osh/Brussels.
- IVANOV, Y. N., CHUB, V. E., SUBBOTINA, O. I., TOLKACHEVA, G. A. UND TORYANNIKOVA, R. V. (1996).** Review of the scientific and environmental issues of the Aral Sea Basin. In: *The Aral Sea Basin*. Micklin, P. und Williams, D. W. (Hrsg.). Springer Verlag; Berlin Heidelberg.
- IWMI (2006).** Water accounting for integrated water management. International Water Management Institute. URL: www.iwmi.cgiar.org/tools/accounting.htm, zuletzt aufgerufen: 5.8.2006.
- JAKUBAUSKAS, M. E., LEGATES, D. R. UND KASTENS, J. H. (2001).** Harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67(4). 461-470.
- JAKUBAUSKAS, M. E., LEGATES, D. R. UND KASTENS, J. H. (2002).** Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. *Computers and Electronics in Agriculture* 37(1-3). 127-139.
- JENSEN, J. R. (1995).** Introductory digital image processing. Prentice Hall; Upper Saddle River, NJ.
- JENSEN, J. R. (2000).** Remote sensing of the environment: an earth resource perspective. Prentice Hall; Upper Saddle River, NJ.
- JONCKHEERE, I., FLECK, S., NACKAERTS, K., MUYS, B., COPPIN, P., WEISS, M. UND BARET, F. (2004).** Review of methods for in situ leaf area index determination, Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121. 19-35.
- JPL (2006).** The ASTER instrument. Jet Propulsion Center. URL: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/instrument.asp>, zuletzt aufgerufen am 01.07.2006.
- JUSTICE, C., VERMOTE, E., TOWNSHEND, J. R. G., DEFRIES, R., ROY, D. P., HALL, D. K., SALOMONSON, V. V., PRIVETTE, J. L., RIGGS, G., STRAHLER, A., LUCHT, W., MYNENI, R. B., KNJAZIHHIN, Y., RUNNING, S. W., NEMANI, R. R., WAN, Z., HUETE, A., VAN LEEUWEN, W. UND WOLFE, R. (1998).** The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36(4). 1228-1249.
- KACHINSKY, N. A. (1965).** Soil Physics, Part I. Kolos Publishers; Moskau.
- KATS, D. M. (1976).** The influence of irrigation on groundwater. Kolos Publishers; Moskau.

KAUFMAN, Y. J., HERRING, D. D., RANSON, K. J. UND COLLATZ, G. J. (1998). Earth observing system AM1 mission to earth. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36(4). 1045-1055.

KAUFMAN, Y. J. UND TANRE, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30. 261-270.

KHAMZINA, A. (2006). The assessment of tree species and irrigation techniques for afforestation of degraded agricultural landscapes in Khorezm, Uzbekistan, Aral Sea Basin. In: *Ecology and Development Series*. 39. Cuvillier Verlag; Goettingen.

KIENZLER, K., IBRAGIMOV, N., LAMERS, J. UND VLEK, P. L. G. (2006). Optimising cotton (*Gossypium Hirsutum* L.) Fertilisation in the Irrigated agriculture of the Aral Sea Basin in Uzbekistan. *Prosperity and Poverty in a Globalized World – Challenges for Agricultural Research*. Tropentag 2006, 11.-13. Oktober, Bonn.

KIENZLER, K., LAMERS, J. P. A., IBRAGIMOV, N. UND VLEK, P. L. G. (2005). Sustainable winter wheat production: quantity, quality, and economics of mineral fertilizer utilization. *INTAS Aral Sea Basin water and food conference: managing water and food quality and security in Central Asia*, Almaty, Kazakhstan.

KITE, G. W. UND DROOGERS, P. (2000). Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. *Journal of Hydrology* 229. 3-18.

KLÖTZLI, S. (1997). Umweltzerstörung und Politik in Zentralasien. Eine ökoregionale Systemuntersuchung. Lang; Bern.

KNYAZIKHIN, Y., GLASSY, J., PRIVETTE, J. L., TIAN, Y., LOTSCH, A., ZHANG, Y., WANG, Y., MORISETTE, J. T., VOTAVA, P., MYNENI, R. B., NEMANI, R. R. UND RUNNING, S. W. (1999). MODIS Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (FPAR) Product (MOD15) Algorithm Theoretical Basis Document. URL:http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod15.pdf, zuletzt aufgerufen am 17.10.06.

KNYAZIKHIN, Y., MARTONCHIK, J. V., MYNENI, R. B., DINER, D. J. UND RUNNING, S. W. (1998). Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *Journal of Geophysical Research* 103. 32257-32275.

LÉTOLLE UND MAINGUET (1996). Der Aralsee. Eine ökologische Katastrophe. Springer Verlag; Berlin.

LETTMAN, T. (2006). Classification and regression trees. Universität Paderborn. URL: <http://wwwcs.uni-paderborn.de/cs/ag-klbue/de/courses/ss06/ml-ii/part-CART-1.pdf>, zuletzt aufgerufen am 17.10.06.

- LIANG, S. L., STRAHLER, A. UND WALTHALL, C. (1999).** Retrieval of land surface albedo from satellite observations: a simulation study. *Journal of Applied Meteorology* 38. 712-725.
- LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W. UND CHIPMAN, J. W. (2004).** Remote sensing and image interpretation. Wiley; New York.
- LLEWELLYN-JONES, D., EDWARDS, M. C., T, M. C., BIRKS, A. R., BARTON, I. J. UND TAIT, H. (2001).** AATSR: global-change and surface-temperature measurements from Envisat. *ESA Bulletin* 105. 11-21.
- LOBELL, D. B. UND ASNER, G. P. (2004).** Cropland distributions from temporal unmixing of MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 93. 412-422.
- LOVELAND, T. R., REED, B. C., BROWN, J. F., OHLEN, D. O., ZHU, Z., YANG, L. UND MERCHANT, J. W. (2000).** Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 21(6&7). 1303-1330.
- LPDAAC (2006A).** ASTER On-Demand L2 Surface Reflectance VNIR. Land Processes Distributed Active Archive Center. URL: http://edcdaac.usgs.gov/aster/ast_07vd.asp, zuletzt aufgerufen am 11.10.2006.
- LPDAAC (2006B).** Earth Overserving System Data Gateway. National Aeronautics and Space Administration. URL: <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>, zuletzt aufgerufen am 13.10.2006.
- LUCHT, W., SCHAAF, C. B. UND STRAHLER, A. H. (2000).** An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38. 977-998.
- MARTIUS, C., LAMERS, J., WEHRHEIM, P., SCHOELLER-SCHLETTER, A., ESHCHANOV, R., TUPITSA, A., KHAMZINA, A., AKRAMKANOV, A. UND VLEK, P. L. G. (2004).** Developing sustainable land and water management for the Aral Sea Basin through an interdisciplinary approach. *Water in Agriculture. Proceedings of a CARDI International Conference Research on water in Agricultural production in Asia for the 21st Century*, Phnom Penh, Kambodscha.
- MARTIUS, C., LAMERS, J. P. A., KHAMZINA, A., MOLLINGA, P., MÜLLER, M., RUECKER, G., SOMMER, R., TISCHBEIN, B., CONRAD, C. UND VLEK, P. L. G. (2006).** Economic and ecological restructuring of land- and water use in the region Khorezm (Uzbekistan): project phase III: change-oriented research for sustainable innovation in land and water use (2007-2010): policies - institutions - technologie. Zentrum für Entwicklungsforschung. Bonn.
- MASUOKA, E., FLEIG, A., WOLFE, R. E. UND PATT, F. (1998).** Key characteristics of MODIS data products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36(4). 1313-1323.

MCCAULEY, D. (2004). Environmental management in independent Central Asia. In: In the tracks of Tamerlane: Central Asia's path to the 21st century. Burghart, D. und Sabonis-Helf, T. (Hrsg.). Washington D.C.

MCIVER, D. K. UND FRIEDL, M. A. (2006). Using prior probabilities in decision-tree classification of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* 81. 253-261.

MCKINNEY, D. C. UND CAI, X. (1997). Multiobjective optimization model for water allocation in the Aral Sea Basin. 3rd Joint USA/CIS Conference on Environmental Hydrology and Hydrogeology, St. Paul, New Mexico. American Institute of Hydrology.

MEIJERINK, A. M. J. UND MANNAERTS, C. M. M. (2000). Introduction to and general aspects of water management with the aid of remote sensing. In: *Remote Sensing in Hydrology and Water Management*. Schultz, G. A. und Engmann, E. T. (Hrsg.). Springer; Berlin Heidelberg.

MENENTI, M. (2000). Evaporation. In: *Remote Sensing in Hydrology and Water Management*. Schultz, G. A. und Engmann, E. T. (Hrsg.). Springer; Berlin Heidelberg.

MICKLIN, P. (1991). The water management crisis in Soviet Central Asia; The Carl Beck Papers in Russian and East European Studies. University of Pittsburgh.

MICKLIN, P. (1996). Introductory remarks on the Aral issue. In: *The Aral Sea Basin*. Micklin, P. und Williams, D. W. (Hrsg.). Springer Verlag; Berlin Heidelberg.

MMS (1999). Annual Report. Ministry of Macroeconomics and Statistics. Tashkent, Usbekistan.

MOD43 (2006). MOD43 Userguide. Boston University Department of Geography. URL: <http://www-modis.bu.edu/brdf/userguide/tools.html>, zuletzt aufgerufen am 14.10.2006.

MODLAND (2006). MODIS Land data products. URL: <http://edcdaac.usgs.gov/modis/dataproducts.asp>, zuletzt aufgerufen am 22.8.2006.

MOHAN, S. UND ARUMUGAM, N. (1994). Irrigation crop coefficients for lowland rice. *Irrigation And Drainage Systems* 8. 159-176.

MOLDEN, D. J. (1997). Accounting for water use and productivity. SWIM Paper 1. International Irrigation Management Institut. Colombo.

MOLDEN, D. J. UND SAKTHIVADIVEL, R. (1999). Water accounting to assess use and productivity of water. *International Journal of Water Ressources Development* 15(1&2). 55-71.

- MORSE, A., ALLEN, R. G., TASUMI, M., KRAMBER, W. J., TREZZA, R. UND WRIGHT, J. L. (2001).** Application of the SEBAL methodology for estimating evapotranspiration and consumptive use of water through remote sensing: final report. Idaho Department of Water Resources. Idaho.
- MUKHAMMADIEV, U. K. (1982).** Water resource use. Tashkent (auf russisch).
- MÜLLER, M. (2006).** A general equilibrium approach to modeling water and land use reforms in Uzbekistan. PhD thesis, Universität Bonn.
- MÜLLER, U. (2004).** Raum-zeitliche Analyse der Vegetationsdynamik in Ostafrika (Kenia und Uganda) anhand von MODIS-Daten. Diplomarbeit, Julius-Maximilians-Universität Würzburg.
- MÜLLER, U., CONRAD, C. UND KRAUS, T. (2004).** Analyse der raum-zeitlichen Vegetationsdynamik in Ostafrika unter Verwendung von MODIS-Daten. Symposium und Fachmesse für Angewandte GeoInformatik (AGIT) 2004, 7.-9. Juli 2004, Salzburg.
- MURRAY-RUST, H., ABDULLAEV, I., UL HASSAN, M. UND HORINKOVA, V. (2003).** Water productivity in the Syr-Darya river basin. Research Report 67. International Water Management Institute (IWMI). International Water Management Institute. Colombo.
- MYNENI, R. B., HOFFMAN, S., KNYAZIKHIN, Y., PRIVETTE, J. L., GLASSY, J., TIAN, Y., WANG, Y., SONG, X., ZHANG, Y., SMITH, G. R., LOTSCH, A., FRIEDL, M., MORISETTE, J. T., VOTAVA, P., NEMANI, R. R. UND RUNNING, S. W. (2002).** Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 83(1-2). 214-231.
- MYNENI, R. B., NEMANI, R. R. UND RUNNING, S. W. (1997).** Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35(6). 1380-1393.
- NASA (1993).** Earth Observing System (EOS) reference handbook. Asrar, G. und Dokken, D. J. National Aeronautics and Space Administration, Earth Science support Office, Document Resource Facility. Washington, D.C.
- NASA (2006).** Terra - The EOS Flagship. National Aeronautics and Space Administration. URL: <http://eosdatainfo.gsfc.nasa.gov/eosdata/terra/platform.html>, zuletzt aufgerufen am 23.06.2006.
- NEMANI, R. R. UND RUNNING, S. W. (1989).** Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology* 28. 276-284.
- NEZLIN, A. P., KOSTIANOY, A. G. UND LI, B. (2005).** Inter-annual variability and interaction of remote-sensed vegetation index and atmospheric precipitation in the Aral Sea region. *Journal of Arid Environments* 62. 677-700.

- NISHIDA, NEMANI, R. R., RUNNING, S. W. UND GLASSY, J. (2003).** An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. *Journal of Geophysical Research* 108(D9). 4270.
- NOBLE, A., UL HASSAN, M. UND KAZBEKOV, J. (2006).** "Bright Spots" in Uzbekistan, Reversing Land and Water Degradation while Improving Livelihoods. Research Report 88. International Water Management Institute (IWMI). International Water Management Institute. Colombo.
- OBLSTAT (1990-2005).** Official Data on Agricultural Crop Production and Yields. Regional Department of Statistics in Khorezm. Urgench.
- OGAWA, K. UND SCHMUGGE, T. (2003).** Mapping Surface broadband emissivity of the Sahara Desert using ASTER and MODIS data. *American Meteorological Society Journal* 8(7). 1-14.
- OGAWA, K., SCHMUGGE, T., JACOB, F. UND FRENCH, A. (2002).** Estimation of broadband land surface emissivity from multi-spectral thermal infrared remote sensing. *Agronomie* 22(6). 695-696.
- PEREIRA, L. S., THEIB, O. UND ZEIRI, A. (2002).** Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management* 57. 175-206.
- PTICHNIKOV, A. (1996).** Environmental and landscape changes in the Aral Sea region as detected from remote sensing. In: *The Aral Sea Basin*. Micklin, P. und Williams, D. W. (Hrsg.). Springer; Berlin Heidelberg.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2005).** R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. R Development Core Team. Vienna. URL: <http://www.R-project.org>, zuletzt aufgerufen am 17.10.06.
- RAST, M., BEZY, J. L. UND BRUZZI, S. (1999).** The ESA Medium Resolution Imaging Spectrometer MERIS: A review of the instrument and its mission. *International Journal of Remote Sensing* 20. 1681-1702.
- RAY, S. S. UND DADHWAL, V. K. (2001).** Estimation of crop evapotranspiration of irrigation command area using remote sensing and GIS. *Agricultural Water Management* 49(3). 239-249.
- REMER, L. A. T., D., KAUFMAN, Y. J., LEVY, R. UND MATTOO, S. (2006).** Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS. National Aeronautics and Space Administration. URL: http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/_docs/04_L2_ATBD_C005_ver1.pdf, zuletzt aufgerufen am 14.10.2006.
- RESSL, R. (1999).** Fernerkundungs- und GIS-gestützte Optimierung des Bewässerungsfeldbaus am Amu-Darja-Unterlauf und in seinem Delta. In: *DLR Forschungsbericht 1999-30*. DLR Oberpfaffenhofen; Oberpfaffenhofen.

- RESSL, R. UND DECH, S. W. (1997).** Landnutzungsoptimierung im Amu Dar'ja-Delta mit Fernerkundungs-Daten und GIS-Verfahren. *Spektrum der Wissenschaft Dossier: Welternährung* (2/97). 66-70.
- RESSL, R., DECH, S. W., PTICHNIKOV, A., NOVIKOVA, N. UND MICKLIN, P. (1998).** Desertification monitoring and land use optimization in the Aral Sea's area with GIS. *GIS Geo-Information-Systeme (Journal for Spatial Information and Decision Making)* 6/98. 25-32.
- RESSL, R. UND MICKLIN, P. (2004).** Morphological changes in the Aral Sea: satellite imagery and water balance model. In: *Dying and Dead Seas: Climatic versus Anthropic Causes: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop*. Nihoul, J. C. J., Zavialov, P. O. und Micklin, P. (Hrsg.); Liège, Belgium, 7-10 May, 2003. *Nato Science Series: 4. Earth and Environmental Sciences* 36.
- RICHARDS, J. A. UND JIA, X. (2006).** *Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction*. Springer; Heidelberg.
- RIPLEY, B. D. (1996).** *Pattern recognition and neural networks*. Cambridge University Press; Cambridge.
- ROLL, G., ALEXEEVA, N., ALADIN, N., PLOTNIKOV, I., SOKOLOV, V., SARSEMBEKOV, T. UND MICKLIN, P. (2006).** Aral Sea experience and lessons learned brief. *Lake Basin Management Initiative. International Lake Environment Committee*.
- RÜCKER, G. R. UND CONRAD, C. (2003).** Exploring leaf area index development and land cover classification in the lower Amu Darya Basin in Uzbekistan based on multi-temporal and multi-spatial remote sensing data. *ZEF Work Papers for Sustainable Development in Central Asia*, Bonn. Zentrum für Entwicklungsforschung.
- RUDENKO, I. (2004).** Analysis of the influence of agricultural production factors on farms profitability. M.Sc. thesis,
- SAKTHIVADIVEL, R., THIRUVENGADACHARI, S., AMERASINGHE, U., BASTIAANSEN, W. G. M. UND MOLDEN, D. J. (1999).** Performance evaluation of the Bhakra irrigation system, India, using remote sensing and GIS techniques. *Research Report 28. International Water Management Institute (IWMI)*. Colombo.
- SAVTCHENKO, A., OUZOUNOV, D., AHMAD, S., ACKER, J., LEPTOUKH, G., KOZIANA, J. UND NICKLESS, D. (2004).** Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC. *Advances in Space Research* 34(4). 710-714.
- SCHAAF, C. B., GAO, F., STRAHLER, A. H., LUCHT, W., LI, X. W., TSANG, T., STRUGNELL, N. C., ZHANG, X. Y., JIN, Y. F., MULLER, J. P., LEWIS, P., BARNESLEY, M., HOBSON, P., DISNEY, M., ROBERTS, G., DUNDERDALE, M., DOLL, C., D'ENTREMONT, R. P., HU, B. X., LIANG, S. L.,**

PRIVETTE, J. L. UND ROY, D. (2002). First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sensing of Environment* 83. 135-148.

SANDMEIER, ST., MÜLLER, CH., HOSGOOD, B. UND ANDREOLI, G. (1998), Sensitivity analysis and quality assessment of laboratory BRDF data. *Remote Sensing of Environment* 64:176-191.

SCHEFFER, F. UND SCHACHTSCHABEL, P. (1992). Lehrbuch der Bodenkunde. Enke; Stuttgart.

SCHMUGGE, T. J., KUSTAS, W. P., RITCHIE, J. C., JACKSON, T. J. UND AL RANGO (2002). Remote sensing in hydrology. *Advances in Water Resources* 25(8-12). 1367-1385.

SCHÖNINGER, M. UND DIETRICH, J. (2004). Hydroskript. URL: http://www.hydroskript.de/html/_index.html, zuletzt aufgerufen am 17.10.06.

SCHULTZ, J. (1995). Die Ökozonen der Erde. Ulmer; Stuttgart.

SCHWEITZER, C., RÜCKER, G. R., CONRAD, C., BENDIX, J., STRUNZ, G. UND DECH, S. (2004). Knowledge-based land use classification combining expert knowledge, GIS, multi-temporal Landsat 7 ETM+ and MODIS time series data in Khorezm, Uzbekistan. *Proceedings of 1st Göttingen GIS & Remote Sensing Days. Environmental Studies, Göttingen.*

SIC-ICWC (2006). On-line data of the Hydromet Center. Scientific Information Center - Interstate Water Coordination Commission of Central Asia. URL: http://www.cawater-info.net/index_e.htm, zuletzt aufgerufen am 01.07.2006.

SNYDER, W. C., WAN, Z., ZHANG, X. Y. UND FENG, Y. Z. (1998). Classification-based emissivity for land surface temperature from measurement from space. *International Journal of Remote Sensing* 19(14). 2753-2774.

SOYUZNIXI. (1992). Methodology for hydromodule zoning. Tashkent.

STOER, J. (2004). Numerische Mathematik 1. Springer Verlag; Berlin.

STOLBOVOI, V. (1998). Soils of Russia correlated with the revised legend of the FAO soil map of the world. Interim Report. IIASA und FAO. International Institute for Applied Systems Analysis. Laxenburg, Österreich. 87 S.

SU, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences* 6(1). 85-99.

TASUMI, M., BASTIAANSEN, W. G. M. UND ALLEN, R. G. (2000). Application of the SEBAL methodology for estimating consumptive use of water and stream flow depletion in the Bear River basin

of Idaho through Remote Sensing. EOSDIS Project Final Report, The Raytheon Systems Company and the University of Idaho.

TASUMI, M., TREZZA, R., ALLEN, R. G. UND WRIGHT, J. L. (2005). Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. *Irrigation and Drainage Systems* 19(3-4). 355-376.

THENKABAIL, P. S., SCHULL, M. UND TURRAL, H. (2005). Ganges and Indus river basin land use/land cover (LULC) and irrigated area mapping using continuous streams of MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 95. 317-341.

THEUS, M. (2004). Multivariate statistische Verfahren, Vorlesungsskript, Sommersemester 2004. Universität Augsburg. URL: <http://rosuda.org/lehre/SS04/CA1.pdf>, zuletzt aufgerufen am 17.10.06.

THIRUVENGADACHARI, S. UND SAKTHIVADIVEL, R. (1997). Satellite Remote Sensing for Assessment of Irrigation System Performance: A Case Study in India. Research Report 9. International Irrigation Management Institute. Colombo.

THOME (1999). Algorithm Theoretical Basis Document for ASTER Level 2B1 - Surface Radiance and ASTER Level 2B5 - Surface Reflectance. NASA contract: NAS5-31717. URL: http://eosps.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/for_scientists/atbd/docs/ASTER/atbd-ast-07-09.pdf, zuletzt aufgerufen am 17.10.06.

THOME, K., ARAI, K., HOOK, S., KIEFFER, H., LANG, H., MATSUNAGA, T., ONO, A., PALLUCONI, F., SAKUMA, H., SLATER, P., TAKASHIMA, T., TONOOKA, H., TSUCHIDA, S., WELCH, R. M. UND ZALEWSKI, E. (1998A). Aster preflight and in-flight calibration and validation of level 2 products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36(4). 1161-1172.

THOME, K., PALLUCONI, F., TAKASHIMA, T. UND MASUDA, K. (1998B). Atmospheric Correction of ASTER. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36(4). 1199-1211.

TIETZE, W., (HRSG) (1968-1972). Westermann Lexikon der Geographie; Braunschweig.

TOTTRUP, C. UND RASMUSSEN, M. S. (2004). Mapping long-term changes in savannah crop productivity in Senegal through trend analysis of time series of remote sensing data. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 103(3). 545-560.

TOWNSHEND, J. R. G. UND JUSTICE, C. O. (2002). Towards operational monitoring of terrestrial systems by moderate-resolution remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 83. 351-359.

TUCKER, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8. 127-150.

TURSUNOV, A. (IN VORBEREITUNG). Soils of the irrigated areas in western Uzbekistan. ZEF Work Papers for Sustainable Development in Central Asia. Bonn.

UNDP (1998). Human development report. United Nations Development Program. Oxford, United Kingdom; New York, United States.

UNECE/UNESCAP (2004). 1st expert group meeting on developing Euro-Asian transport linkages. United Nations Economic Commission for Europe/United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific. Almaty, Kasachstan.

UNESCO (2006). Water, a shared responsibility, The United Nations World Water Development Report 2. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation.

USDA (2001). Water measurement manual. A water resources technical publication. United States Department of Agriculture; Washington D.C.

USDA (2006). National Soil Survey Handbook. United States Department of Agriculture. URL: <http://soils.usda.gov/technical/handbook/contents/part618p5.html#ex8>, zuletzt aufgerufen 22.9.2006.

USGS (2006). The Landsat project: project facts. United States Geological Survey. URL: http://landsat.usgs.gov/project_facts/project_news/2003.php, zuletzt aufgerufen am 13.10.2006.

VERMOTE, E. F., EL SALEOUS, N. Z., JUSTICE, C. O., KAUFMAN, Y. J., PRIVETTE, J., REMER, L. C. UND TANRE, D. (1997A). Atmospheric correction of visible to middle infrared EOS-MODIS data over land surface, background, operational algorithm and validation. *Journal of Geophysical Research* 102(14).

VERMOTE, E. F. UND KAUFMAN, Y. J. (1995). Absolute calibration of AVHRR visible and near-infrared channels using ocean and cloud views. *International Journal of Remote Sensing* 16. 2317- 2340.

VERMOTE, E. F., SALEOUS, N. Z. UND JUSTICE, C. O. (2002). Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: First results. *Remote Sensing of Environment* 83. 97-111.

VERMOTE, E. F., TANRE, D., DEUZE, J. L., HERMAN, M. UND MORCRETTE, J. J. (1997B). Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35. 895-934.

VERMOTE, E. F. UND VERMEULEN, A. (1999). MODIS algorithm technical background document, atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09). NASA contract NAS5-96062.

VERSTRAETEN, W. W., VEROUSTRAETE, F. UND FEYEN, J. (2005). Estimating evapotranspiration of European forests from NOAA-imagery at satellite overpass time: towards an operational processing chain for integrated optical and thermal sensor data products. *Remote Sensing of Environment* 96. 256-276.

- VIERA, C. A. O., MATHER, P. M. UND APLIN, P. (2001).** Multitemporal classification of agricultural crops using the spectral-temporal response surface. In: Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images. Burzzone, L. und Smits, P. (Hrsg.). New Jersey, London, Singapur, Hongkong.
- VINOGRADOV, S. UND LANGFORD, V. P. E. (2001).** Managing transboundary water resources in the Aral Sea Basin: in search of a solution. International Journal Global Environment Issues 1(3/4). 345-362.
- VIOVY, N. (2000).** Automatic Classification of Time Series (ACTS): a new clustering method for remote sensing time series. International Journal of Remote Sensing 21(6&7). 1537-1560.
- VISCHER, D. UND HUBER, A. (1993).** Wasserbau. Springer; Berlin, Heidelberg.
- VLEK, P. L. G., FROHBERG, K. UND DEBIEL, T. (2003).** Economic and ecological restructuring of land- and water use in the region Khorezm (Uzbekistan), project phase II: Field research and development of a restructuring concept. Zentrum für Entwicklungsforschung. Bonn.
- VLEK, P. L. G., MARTIUS, C., WEHRHEIM, P., SCHOELLER-SCHLETTER, A. UND LAMERS, J., (HRSG) (2001).** Economic restructuring of land and water use in the region Khorezm (Uzbekistan) (project proposal for phase I). ZEF Work Papers for Sustainable Development in Central Asia; Bonn.
- VODPROJECT (1999).** Production association. Annual Report. Ministry of Agriculture and Water Resource Management. Tashkent, Usbekistan.
- WALZ, Y., MAIER, S. W., DECH, S., CONRAD, C. UND COLDITZ, R. R. (ACCEPTED).** Measuring burn severity using MODIS: A case study in the jarrah-marri forest of southwest Western Australia. International Journal of Geophysical Research - Biogeosciences Special edition: Remote sensing contributions to forest fire effects assessment. 28 S.
- WAN, X. UND DOZIER, J. (1996).** A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 34(4). 892-905.
- WAN, Z. (1999).** MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD). NASA, contract NAS5-31370. URL: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod11.pdf, zuletzt aufgerufen am 17.10.06.
- WAN, Z., ZHANG, Y., ZHANG, Q. UND ZHAO-LIANG, L. (2002).** Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. Remote Sensing of Environment 83. 163-180.
- WEGERICH, K. (2006).** Handing over the sunset, external factors influencing the establishment of water user associations in Uzbekistan: Evidence from Khorezm province. Habilitationsschrift, Humboldt Universität zu Berlin.
- WEISCHET, W. (1994).** Einführung in die allgemeine Klimatologie. Teubner; Stuttgart.

WELCH, R., JORDAN, T., LANG, H. UND MURAKAMI, H. (1998). ASTER as a source for topographic data in the late 1990's. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36(4). 1282-1289.

WHO (2001). Health aspects of the drought in Uzbekistan 2000-2001. Technical Field Report Series. World Health Organisation Regional Office for Europe. Emergency Preparedness and Response Program. 23 S.

WOLFE, R. E. (2002). Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science. *Remote Sensing of Environment* 83. 31-49.

WOLFE, R. E., ROY, D. P. UND VERMOTE, E. F. (1998). MODIS land data storage, gridding, and compositing methodology: level 2 grid. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36(4). 1324-1338.

WORLD BANK (1996). Fundamental provision of water management strategy in the Aral Sea Basin. World Bank; Washington DC.

YAMAGUCHI, Y., FUJISADA, H., KUDOH, M., KAWAKAMI, T., TSU, H., KAHLE, A. B. UND PNIEL, M. (1999). Aster instrument characterization and operation scenario. *Advances in Space Research* 23(8). 1415-1424.

YAMAGUCHI, Y., KAHLE, A. B., TSU, H., KAWAKAMI, T. UND PNIEL, M. (1998). Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36(4). 1062-1071.

Anhang II Exkurse

II.1 Fouriertransformation zur Glättung fernerkundlicher Zeitserien

Als Glättungsverfahren für fernerkundliche Zeitserien wurde in dieser Arbeit die *Fouriertransformation* verwendet, deren Grundzüge von FORSTER (1992) beschrieben werden. Danach kann eine jede L -periodische integrierbare Funktion $f : x \rightarrow \mathfrak{R}, x \in \mathfrak{R}$ mit $f(x + L) = f(x)$ in ihre Fourierreihe transformiert werden:

$$f(x) = \frac{B_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} \left[A_i * \sin\left(\frac{2\pi}{L} ix\right) + B_i * \cos\left(\frac{2\pi}{L} ix\right) \right]$$

wobei die Fourierkoeffizienten A_i und B_i eindeutig definiert sind:

$$A_i = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) * \sin\left(\frac{2\pi}{L} ix\right) dx \quad \text{und} \quad B_i = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) * \cos\left(\frac{2\pi}{L} ix\right) dx$$

Die Ausgangsfunktion f ist nun durch eine Vielzahl unterschiedlicher Sinus und Kosinusschwingungen charakterisiert. Man sieht bei der Betrachtung von f , A_i und B_i leicht, dass für $i = 1$ nur eine Sinus- oder Kosinusschwingung erzielt wird, wohingegen hohe i eine deutlich höhere Frequenz erreichen. Mit der Filterung nur der niedrigen Schwingungen wird bei der Rücktransformation durch numerische Verfahren nun die geglättete Kurve erreicht.

Numerische Approximationen der Fourierkoeffizienten werden durch die numerische Integration mittels Anwendung der Trapezregel auf gleichabständigen Intervallen erreicht STOER, 2004. Für eine ungerade Menge an Messwerten ($N=2n+1$) bestimmen die diskreten Fourierkoeffizienten A_i und B_i das zugehörige trigonometrische Polynom:

$$f(x) = \frac{B_0}{2} + \sum_{i=1}^n \left[A_i * \sin\left(\frac{2\pi}{L} ix\right) + B_i * \cos\left(\frac{2\pi}{L} ix\right) \right],$$

mit:

$$A_i = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^{N-1} f_j * \sin\left(\frac{2\pi}{L} it_j\right) \quad \text{und} \quad B_i = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^{N-1} f_j * \cos\left(\frac{2\pi}{L} it_j\right)$$

Zur Berechnung der diskreten Fourierkoeffizienten werden die Funktionswerte an den Stützwerten t_j eingesetzt ($f_j = f(t_j)$). Die Fast-FourierTransformation (FFT) erzielt dasselbe Ergebnis wie die gerade beschriebene Diskrete FourierTransformation (DFT) mit einer besseren Performance (BUTZ, 2005) und ist standardmäßig in Softwarepaketen installiert.

Die Parameter, die jede Fourierschwingung charakterisieren (Abbildung AII-1), sind die Amplitude, die Phase sowie ihr Erklärungsanteil an der Ausgangsfunktion (Varianz). Sie lassen sich aus den Fourierkoeffizienten leicht berechnen (STOER, 2004). Der Einsatz der Fouriertransformation oder der Harmonischen Analyse in der Fernerkundung zur Glättung und zur Parametrisierung von Kurven ist unter anderem bei JAKUBAUSKAS et al. (2001) und MÜLLER et al. (2004) am Beispiel von NOAA-AVHRR NDVI und MODIS LAI Zeitserien beschrieben.

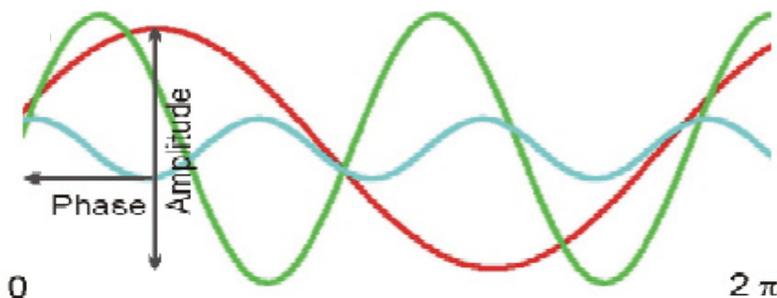


Abbildung II-1: Drei einzelne Schwingungen mit den Frequenzen 1 (rot), 2 (grün), und 3 (blau). Phase und Amplitude sind für die rote Linie, also eine einfache Schwingung eingetragen (MÜLLER, 2004).

II.2 Diskriminanzanalyse

Die Diskriminanzanalyse eignet sich wie die Klassifikations- und Regressionsbäume zur Analyse existierender Klassifikationen und zur Klassifikation selbst. Weiterhin lassen sich so Klassenunterschiede durch die Analyse der Merkmale erklären (BAHRENBERG et al., 2003). Die Diskriminanzanalyse basiert darauf, dass sich Gruppen oder Klassen mittels einer bestimmten Anzahl von Diskriminanzfunktionen (Y) unterscheiden lassen. Diese sind Linearkombinationen der Merkmalsvariablen X_i ($i=1..I$). Die Diskriminanzkoeffizienten werden mit v_i bezeichnet:

$$Y = v_1 X_1 + v_2 X_2 + \dots + v_I X_I$$

Das Diskriminanzkriterium (Γ) bestimmt das Verhältnis der Streuung zwischen den Klassen und innerhalb der Klassen:

$$\Gamma = \frac{\text{Streuung zwischen den Klassen}}{\text{Streuung in den Klassen}}$$

Abbildung AII-2 zeigt drei verschiedene potenzielle Diskriminanzfunktionen (Y, Y^*, Y^{**}) für den zweidimensionalen Fall. Die Häufigkeitsverteilungen der beiden Klassen auf den Achsen zeigen, dass für die Funktion Y keine Überlappung der Streuung innerhalb der Klassen vorliegt. Dies wird durch weit auseinanderliegende Klassenmittelwerte sowie durch geringe Streuung um den jeweiligen Klassenmittelwert erreicht. Die Funktion Y^* und Y^{**} zeigen eine zunehmende Streuung innerhalb der Klassen sowie ein Zusammenrücken der Klassenmittelwerte. Dadurch wird ihr Potential zur Trennung der Klassen im Vergleich zunehmend vermindert. Eine Suche nach der günstigsten Diskriminanzfunktion bedeutet also eine Optimierung hinsichtlich Γ .

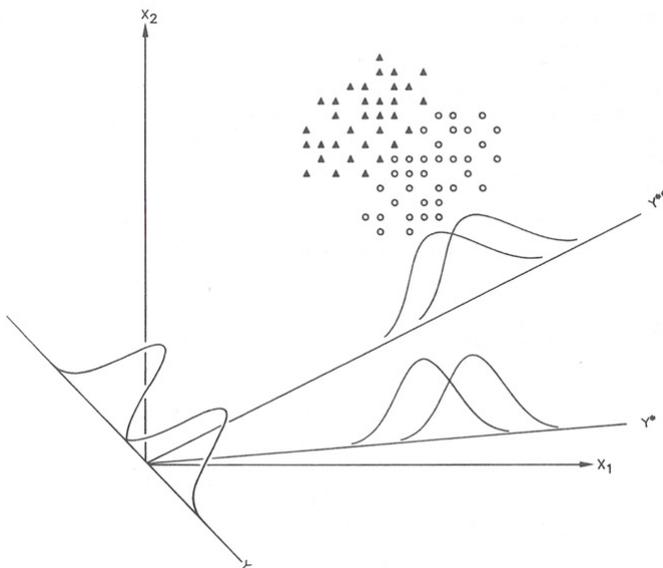


Abbildung AII-2: Möglichkeiten zur Trennung eines zweidimensionalen Merkmalsraum mit zwei Klassen (▲ und ○) durch drei Diskriminanzfunktionen (Y, Y^*, Y^{**}). Die Häufigkeitsdiagramme der beiden Klassen auf den Achsen indizieren die Trennkraft der jeweiligen Funktion. (BAHRENBURG et al., 2003).

Mathematisch definiert sich die Streuung zwischen den Klassen aus der gewichteten Summe der Distanz der Klassenmittelwerte (\bar{y}_k) zum Mittelwert aller Punkte (\bar{y} , bezogen auf jeweils analysierte Diskriminanzfunktion Y). Die Gewichtung wird durch die Einbindung der Gruppenstärke einer Klasse (n_k) als Faktor erreicht. Die Streuung innerhalb der Klassen wird durch die Summe der Abstände aller Punkte (y_{kj}) von ihrem jeweiligen Klassenmittelpunkt errechnet. Für den zweidimensionalen Fall (zwei Klassen, zwei Merkmale) bedeutet dies:

$$\Gamma = \frac{n_1(\bar{y}_1 - \bar{y})^2 + n_2(\bar{y}_2 - \bar{y})^2}{\sum_{j=1}^{n_1} (y_{1j} - \bar{y}_1)^2 + \sum_{j=1}^{n_2} (y_{2j} - \bar{y}_2)^2}$$

Die Lösung des Maximierungsproblems erfolgt durch die partielle Differentiation von Γ nach den Diskriminanzkoeffizienten. Details zum Verfahren finden sich bei BAHRENBURG et al. (2003).

Problematisch wird die Anwendung dieses Verfahrens nur dann, wenn die sogenannte Kollinearität im Merkmalsraum vorliegt, also lineare Abhängigkeiten von Variablen untereinander bestehen (BAHRENBURG et al., 2003). Diese können entweder in den Daten selbst enthalten sein oder durch numerische Gleitkommatafehler verursacht sein. Mehrere Varianten zur Problemlösung bei Kollinearität finden sich in der Literatur. Eine davon ist die Auswertung der Korrelationsmatrix¹²⁸. Allerdings werden dabei nur lineare Abhängigkeiten zwischen zwei Variablen entfernt. Da aber die Diskriminanzanalyse nur im zweidimensionalen Fall vorgesehen war, kam zur Eliminierung linear abhängiger Variablen die Korrelationsmatrix zum Einsatz.

II.3 Die Korrelationsmatrix

Durch die Berechnung der Korrelationsmatrix werden in der optischen Fernerkundung häufig eng miteinander korrelierende Kanäle, also redundante Informationen aus dem Merkmalsraum entfernt (JENSEN, 1995). Im Gegensatz zum *density slice*, der Diskriminanzanalyse und den Klassifikationsbäumen ist die Korrelationsmatrix keine Klassifikationsmethode.

Zur Berechnung der Korrelationsmatrix wird für jeweils zwei Variablen der Pearsonsche Produktmoment-Korrelationskoeffizient r ermittelt und der Wert in einer symmetrischen Matrix gespeichert (JENSEN, 1995). r ist der Quotient aus der Kovarianz der Variablen X und Y (COV_{XY}) und dem Produkt der Varianzen von X (VAR_X) und Y (VAR_Y , BAHRENBURG et al., 1999):

$$r = \frac{COV_{XY}}{VAR_X * VAR_Y}$$

Durch einen t-Test kann nun noch die Signifikanz der Korrelation geprüft werden (BAHRENBURG et al., 1999). In diesem Fall war dies nicht notwendig, da nur lineare Zusammenhänge zwischen Merkmalen der Trainingsgebiete ermittelt wurden. Diese können als Grundgesamtheit und nicht als Stichprobe verstanden werden, da auf deren Basis die Merkmalsauswahl durchgeführt und die Klassifikatoren entwickelt wurden.

¹²⁸ Alternativ wird insbesondere im Mehr-Variablen-Fall die Faktorenanalyse vorgeschlagen.

Anhang III Ergänzende Tabellen und Abbildungen

Tabelle AIII-1: Höherwertige MODLand MODIS Produkte (MODLAND, 2006).

MODLand Produktfamilie	Produkt	Geometrische Auflösung	Temporale Auflösung	Level	
Reflexionsgrade	MOD09A1*	500 m	8-tägig	3	
	MOD09GHK*	500 m	täglich	2G	
	MOD09GQK*	250 m	täglich	2G	
	MOD09GST*	1 km	täglich	2G	
	MOD09Q1*	250 m	8-tägig	3	
LST und Emissionsgrad	MOD11_L2*	5 Bogenminuten	Overpass	2	
	MOD11A1*	1 km	täglich	3	
	MOD11A2*	1 km	8-tägig	3	
	MOD11B1*	5 km	täglich	3	
	MOD11C1*	0.05 Grad (CMG)	täglich	3	
	MOD11C2*	0.05 Grad (CMG)	8-tägig	3	
	MOD11C3*	0.05 Grad (CMG)	monatlich	3	
Landbedeckung / Veränderung der Landbedeckung	MCD12C1**	0.05 Grad (CMG)	96-tägig	3	
	MCD12C2**	0.05 Grad (CMG)	96-tägig	3	
	MOD12Q1	0.05 Grad (CMG)	96-tägig	3	
	MOD12Q2/MCD12Q**	1 km	jährlich	3	
Vegetationsindizes	MOD13A1*/MCD13A1**	500 m	16-tägig	3	
	MOD13A2*/MCD13A2**	1 km	16-tägig	3	
	MOD13A3*/MCD13A3**	1 km	monatlich	3	
	MCD13C3**	0.05 Grad (CMG)	monatlich	3	
	MOD13Q1*/MCD13Q1**	250 m	16-tägig	3	
Thermale Anomalien / Feuer	MOD14*	5 Bogenminuten	Overpass	2	
	MOD14A1*	1 km	täglich	3	
	MOD14A2*	1 km	8-tägig	3	
LAI/fAPAR	MOD15A2*	1 km	8-tägig	4	
NPP***	Netto Photosynthese	MOD17A2*	1 km	8-tägig	4
	NPP	MOD17A3*	1 km	jährlich	4
	NPP	MOD17CM*	1 km	32-tägig	4
	Net Photosynthesis	MOD17CY	0.05 Grad (CMG)	jährlich	4
BRDF/Albedo	BRDF/Albedo Modell	MOD43B1/MCD43B1**	1 km	16-tägig	3
	Albedo	MOD43B3/MCD43B3**	1 km	16-tägig	3
	Nadir BRDF-korr. Reflexionsgrade	MOD43B4/MCD43B4**	1 km	16-tägig	3
	Albedo	MOD43C1/MCD43C1**	0.25/0.05 Grad (CMG)	16-tägig	3
	BRDF/Albedo Parameter	MOD43C2/MCD43C2**	0.25/0.05 Grad (CMG)	16-tägig	3
	Nadir BRDF-korr. Reflexionsgrade	MOD43C3/MCD43C3**	0.05 Grad (CMG)	16-tägig	3
	Vegetation CC/CF	Änderungen der Vegetationsbedeckung	MOD44A	250 m	32-tägig
Vegetation Continuous Fields		MOD44B	500 m	jährlich	3
Geolocation Angles	MODMGGAD*	1 km	täglich	2G	
Pointer Dateien	MODPT1KD*	1 km	täglich	2G	
	MODPTHKM*	500 m	täglich	2G	
	MODPTQKM*	250 m	täglich	2G	

* auch von Aqua MODIS Daten erhältlich

** aus Terra und Aqua MODIS kombiniert

CMG

= Climate Model Grid

NPP

Tabelle AIII-2: Ergebnisse der raumzeitlichen Auswertung der MODIS-Qualitätsflags (QA-SDS) der verwendeten MOD43-Daten für 2004 und 2005

Tabelle AIII-3: Ergebnisse der raumzeitlichen Auswertung der MODIS-Qualitätsflags (QA-SDS) der verwendeten MOD13-Daten für 2004 und 2005

MOD 43 Albedo 16-Day 1km		
Day of Year	Anzahl ungültiger Pixel in Prozent für das Jahr	
	2004	2005
81	25,89	2,63
97	4,62	0,70
113	1,64	0,08
129	0,51	0,00
145	0,34	0,00
161	0,32	0,00
177	1,29	0,00
193	0,49	0,00
209	0,38	0,00
225	0,34	0,00
241	0,37	0,00
257	0,50	0,00
273	1,33	0,07
289	8,55	0,22
305	20,47	16,38
Settings		
General Quality: Good & Acceptable		
Snow: No		

MOD 13 NDVI 16-Day 1km		
Day of Year	Anzahl ungültiger Pixel in Prozent für das Jahr	
	2004	2005
81	4,5050	15,1400
97	12,7350	9,6475
113	12,4850	12,0325
129	8,4825	10,2344
145	10,0156	9,9456
161	9,5919	8,1850
177	8,1806	8,3325
193	9,4044	9,0644
209	8,2138	9,6031
225	8,2706	8,3681
241	8,2119	8,3675
257	7,4887	7,2931
273	7,3988	8,4238
289	16,3600	10,0500
305	4,1212	5,1212
Settings		
General Quality: aus		
Usefulness: bis Good		
Mixed Clouds: No		

Tabelle AIII-4: Ergebnisse der raumzeitlichen Auswertung der MODIS-Qualitätsflags (QA-SDS) der verwendeten MOD15-Daten für 2004 und 2005.

MOD 15 LAI 8-Day 1km			MOD 15 LAI 8-Day 1km		
Day of Year	Anzahl ungültiger Pixel in Prozent für das Jahr		Day of Year	Anzahl ungültiger Pixel in Prozent für das Jahr	
	2004	2005		2004	2005
89	70,01	56,73	217	48,37	49,02
97	51,84	52,60	225	47,71	48,19
105	53,58	52,22	233	47,93	49,06
113	52,13	48,75	241	47,99	48,07
121	51,63	57,21	249	49,37	48,20
129	51,54	52,61	257	49,84	51,25
137	51,43	53,78	265	48,41	48,45
145	52,00	51,75	273	49,69	52,30
153	48,74	52,48	281	52,92	53,34
161	50,71	48,29	289	66,27	56,19
169	48,52	51,31	297	74,67	68,29
177	48,58	50,65	305	87,10	73,83
185	50,32	48,92			
193	52,93	48,85			
201	50,51	50,18			
209	51,03	50,33			
			Settings		
			General Quality: Good & Acceptable		
			Cloudstate: Clear & Assumed Clear		

Tabelle AIII-5: Beispiel für die Segmentstatistiken der NDVI Jahressgänge (Kapitel 5); hier der gesamte Jahressgang und zwei Jahreshälften als Segmente, in rot die klassifizierenden Elemente

Zeitreien-segment	Deskriptive Statistik	Bimodaler Jahressgang	Unimodaler Verlauf, Maximum im Frühjahr	Unimodaler Verlauf, Maximum im Sommer	Non-modaler Jahressgang, fast konstant hoher Vegetationsindex
Jahressgang des NDVI	Maximum	0,74	0,69	0,69	0,57
	Minimum	0,18	0,05	0,12	0,26
	Spannweite	0,56	0,63	0,56	0,31
	Mittelwert	0,42	0,29	0,30	0,42
	Standardabweichung	0,17	0,16	0,18	0,09
Erste Hälfte des NDVI-Jahressgangs	Maximum	0,74	0,69	0,27	0,55
	Minimum	0,21	0,19	0,12	0,26
	Spannweite	0,53	0,49	0,15	0,29
	Mittelwert	0,43	0,38	0,17	0,38
	Standardabweichung	0,15	0,17	0,04	0,10
Zweite Hälfte des NDVI-Jahressgangs	Maximum	0,72	0,37	0,69	0,57
	Minimum	0,18	0,05	0,14	0,34
	Spannweite	0,53	0,31	0,54	0,23
	Mittelwert	0,40	0,21	0,41	0,46
	Standardabweichung	0,19	0,09	0,18	0,07

Tabelle AIII-6: Beispiel für die Segmentstatistiken zweier Klassen unimodaler NDVI Jahresgänge (Kapitel 5); hier der gesamte Jahresgang, zwei Jahreshälften sowie Drittel der Zeitreihe als Segmente

Zeitreisensegment	Deskriptive Statistik	Nutzung 1	Nutzung 1
Jahresgang des NDVI	Maximum	0,76	0,69
	Minimum	-0,03	-0,04
	Spannweite	0,78	0,73
	Mittelwert	0,36	0,30
	Standardabweichung	0,17	0,18
Erste Hälfte des NDVI- Jahresganges	Maximum	0,41	0,35
	Minimum	-0,03	-0,04
	Spannweite	0,44	0,40
	Mittelwert	0,26	0,18
	Standardabweichung	0,08	0,09
Zweite Hälfte des NDVI- Jahresganges	Maximum	0,76	0,69
	Minimum	0,19	0,22
	Spannweite	0,56	0,46
	Mittelwert	0,45	0,42
	Standardabweichung	0,18	0,16
Erstes Drittel des NDVI- Jahresganges	Maximum	0,32	0,35
	Minimum	-0,03	0,09
	Spannweite	0,34	0,26
	Mittelwert	0,24	0,21
	Standardabweichung	0,09	0,08
Zweites Drittel des NDVI- Jahresganges	Maximum	0,76	0,69
	Minimum	0,22	-0,04
	Spannweite	0,53	0,73
	Mittelwert	0,45	0,32
	Standardabweichung	0,19	0,24
Drittes Drittel des NDVI- Jahresganges	Maximum	0,63	0,65
	Minimum	0,19	0,23
	Spannweite	0,44	0,42
	Mittelwert	0,36	0,37
	Standardabweichung	0,15	0,13

Tabelle AIII-7: Der Merkmalsraum M2_A für die Jahre 2004 und 2005 (enthält pro Jahr die 24 durch den *density slice* ermittelten Merkmale, die zur Klassentrennung die beste Wertung erhielten, unabhängig von den einzelnen Klassen). Gelb unterlegt sind Merkmale, die für beide Jahre durch das Verfahren ermittelt wurden.

2004	2005
ndvi_stddev_1_1_0	ndvi_stddev_1_1_0
ndvi_mean_5_2_0	ndvi_range_1_1_0
ndvi_mean_4_3_0	ndvi_min_5_4_0
ndvi_mean_4_2_0	ndvi_max_5_4_0
ndvi_mean_3_2_0	ndvi_max_5_3_0
ndvi_mean_3_1_0	ndvi_max_3_2_0
ndvi_max_5_3_0	ndvi_ha_stddev_1_1_0
ndvi_max_4_3_0	ndvi_ha_mean_5_3_1
ndvi_max_4_2_0	ndvi_ha_max_5_5_0
ndvi_max_4_2_1	ndvi_ha_max_5_4_0
ndvi_max_3_2_0	ndvi_ha_max_4_4_0
ndvi_ha_min_5_2_0	ndvi_ha_max_3_2_0
ndvi_ha_mean_5_2_0	ndvi_fwd_mean_5_5_0
ndvi_ha_mean_4_3_0	ndvi_fwd_mean_5_5_1
ndvi_ha_mean_4_2_0	ndvi_fwd_mean_5_4_0
ndvi_ha_mean_3_1_0	ndvi_fwd_mean_5_4_1
ndvi_ha_max_5_4_0	ndvi_fwd_mean_4_4_0
ndvi_ha_max_5_2_0	ndvi_fwd_mean_4_3_0
ndvi_ha_max_4_3_0	ndvi_fwd_mean_2_2_0
ndvi_ha_max_4_3_1	ndvi_fwd_mean_2_2_1
ndvi_ha_max_4_2_0	ndvi_fwd_max_5_5_0
ndvi_ha_max_3_2_0	ndvi_fwd_max_4_4_0
ndvi_bwd_stddev_1_1_0	ndvi_bwd_stddev_1_1_0
ndvi_bwd_range_1_1_0	ndvi_bwd_max_3_2_0

Tabelle AIII-8: Der Merkmalsraum M2_B für die Jahre 2004 und 2005 (enthält die Merkmale, die mittels des *density slice* pro Klasse am Besten trennen).

M2_B Klasse	2004		2005	
	Merkmal	Kappa	Merkmal	Kappa
Baumwolle	ha_amplitude_0	0,6054	ndvi_ha_mean_5_3_1	0,6810
Reis	ndvi_range_3_2_0	0,8679	ndvi_ha_mean_4_3_2	0,9472
Weizen-Reis	ha_varianz_2	0,9003	ha_varianz_2	0,7833
Weizen-Folgefucht	ndvi_mean_1_1_1	0,3223	ndvi_bwd_mean_2_2_1	0,3155
Weizen	ndvi_bwd_mean_2_2_0	0,9329	ha_phase_0	0,8560
Ländliche Siedlung	ndvi_ha_max_3_2_0	0,9429	ndvi_range_1_1_0	0,8485
Städtische Siedlung	ndvi_stddev_1_1_0	0,8179	ndvi_stddev_1_1_0	0,8560
Wüste	ndvi_stddev_1_1_0	0,9869	ndvi_ha_stddev_1_1_0	1,0000
Mischsignal	ndvi_max_5_4_1	0,6986	ndvi_fwd_stddev_2_2_1	0,8927
Bäume und Gärten	ndvi_ha_mean_4_2_1	0,4499	ndvi_mean_4_2_1	0,3083
Variierende Wasserfläche	ndvi_min_3_2_0	0,8252	ndvi_min_5_4_0	0,8710
Konstante Wasserfläche	ndvi_range_abs_3_3_1	0,8791	ndvi_max_abs_3_1_1	0,7765

Tabelle AIII-9: Der Merkmalsraum M2_C für die Jahre 2004 und 2005 (enthält die Merkmale, die mittels des *density slice* die Zielklasse abspalten können, aber keinen Einfluss auf die Klassifizierung anderer Merkmale haben).

M2_B Klasse	2004		2005	
	Merkmals	Kappa	Merkmals	Kappa
Baumwolle	ndvi_ha_min_abs_4_4_1	0,4591	ndvi_ha_min_abs_4_4_1	0,3491
Reis	ha_amplitude_1	0,6359	ndvi_range_3_2_0	0,8100
Weizen-Reis	ha_amplitude_2	0,7604	ndvi_mean_1_1_2	0,2929
Weizen-Folgefrucht	ndvi_ha_mean_5_1_1	0,3223	ndvi_bwd_mean_2_2_1	0,3155
Weizen	ha_phase_0	0,2946	ha_varianz_1	0,8279
Ländliche Siedlung	ha_varianz_0	0,6490	ndvi_ha_max_1_1_0	0,7867
Städtische Siedlung	ha_phase_2	0,3651	ndvi_max_5_3_0	0,7607
Wüste	ndvi_stddev_2_2_0	0,8508	ha_varianz_3	0,5874
Mischsignal	ha_varianz_11	0,5437	ha_varianz_14	0,5771
Bäume und Gärten	ndvi_ha_min_abs_4_2_1	0,3126	ndvi_fwd_mean_4_3_2	0,3083
Variierende Wasserfläche	ndvi_fwd_max_abs_1_1_1	0,5444	ha_amplitude_8	0,6798
Konstante Wasserfläche	ha_amplitude_4	0,7145	ha_amplitude_3	0,6638

Tabelle AIII-10: Der Merkmalsraum M4_A für die Jahre 2004 und 2005 (Ergebnisse der Diskriminanzanalyse). v1 und v2 sind die Diskriminanzkoeffizienten zur Transformation der Merkmale in die Diskriminanzachse.

M4_A Klasse	2004				
	Merkmals 1	Merkmals 2	Kappa	v1	v2
Baumwolle	ha_amplitude_0	ndvi_ha_range_5_2_0	0,6833	-15,9	7,88
Reis	ndvi_bwd_min_2_2_1	ndvi_fwd_range_4_2_0	0,8536	-9,63	-10,16
Weizen-Reis	ha_amplitude_2	ha_amplitude_5	0,7596	-36,0	27,55
Weizen-Folgefrucht					
Weizen	ndvi_bwd_mean_1_1_0	ndvi_bwd_mean_5_2_0	0,9321	11,70	-7,32
Ländliche Siedlung	ha_amplitude_0	ha_varianz_0	0,7618	10,78	-0,05
Städtische Siedlung	ha_phase_2	ndvi_min_5_2_1	0,3968	0,77	-5,18
Wüste	ha_amplitude_0	ndvi_ha_range_4_2_0	0,9655	13,78	5,89
Mischsignal	ha_phase_15	ndvi_fwd_max_5_3_1	0,6000	-0,25	-11,18
Bäume und Gärten	ndvi_ha_range_4_2_0	ndvi_ha_mean_abs_5_3_1	0,5714	-11,6	69,57
Variierende Wasserfläche	ha_varianz_7	ndvi_ha_min_3_2_0	0,8186	0,29	6,76
Konstante Wasserfläche	ndvi_fwd_mean_5_3_1	ndvi_ha_stddev_abs_3_3_1	0,8712	14,07	-70,44

M4_A Klasse	2005				
	Merkmals 1	Merkmals 2	Kappa	v1	v2
Baumwolle	ha_varianz_0	ndvi_ha_min_abs_5_3_1	0,5590	-0,04	-70,68
Reis	ndvi_fwd_mean_4_3_0	ndvi_fwd_mean_5_2_0	0,9236	7,46	-8,20
Weizen-Reis	ha_varianz_2	ndvi_bwd_mean_5_3_1	0,8788	-0,13	-12,69
Weizen-Folgefrucht					
Weizen	ha_phase_0	ndvi_ha_mean_5_2_1	0,8793	0,79	32,71
Ländliche Siedlung	ha_varianz_0	ndvi_bwd_mean_1_1_1	0,2400	-0,05	-54,10
Städtische Siedlung	ha_phase_5	ndvi_max_abs_3_1_1	0,5238	-0,50	5,62
Wüste	ndvi_ha_range_4_2_0	ndvi_ha_range_4_4_0	1,0000	7,17	4,94
Mischsignal	ndvi_fwd_stddev_2_2_1	ndvi_fwd_mean_5_2_0	0,9444	-21,7	2,71
Bäume und Gärten	ndvi_min_5_4_0	ndvi_bwd_mean_2_2_1	0,5250	-2,10	45,53
Variierende Wasserfläche	ndvi_min_5_4_0	ndvi_fwd_min_abs_5_3_1	0,8846	4,51	6,65
Konstante Wasserfläche	ha_phase_5	ndvi_fwd_mean_5_2_0	0,7618	-0,50	-4,82

Tabelle AIII-11: Der Merkmalsraum M4_B für die Jahre 2004 und 2005 (enthält die Merkmalspaare, die mittels der Diskriminanzanalyse die Zielklasse abspalten können, aber keine weitere Trennbarkeit für andere Klassen aufweisen). v_1 und v_2 sind die Diskriminanzkoeffizienten zur Transformation der Merkmale in die Diskriminanzachse.

M4_B		2004			
Klasse	Merkmal 1	Merkmal 2	Kappa	v_1	v_2
Baumwolle	ha_varianz_0	ndvi_mean_2_2_2	0.5436	-0.03	-39.98
Reis	ha_phase_19	ndvi_fwd_mean_3_2_1	0.6843	-0.11	-35.50
Weizen-Reis	ha_varianz_2	ndvi_fwd_mean_5_4_1	0.5616	-0.12	-7.16
Weizen-Folgefrucht					
Weizen	ha_varianz_1	ndvi_ha_mean_1_1_2	0.8021	-0.11	-189.3
Ländliche Siedlung	ha_varianz_0	ndvi_bwd_mean_1_1_1	0.1877	-0.05	-54.10
Städtische Siedlung	ha_amplitude_5	ha_phase_5	0.5189	42.40	-0.62
Wüste	ha_varianz_0	ndvi_ha_min_abs_5_4_1	0.7831	0.03	130.61
Mischsignal	ha_phase_1	ndvi_fwd_min_5_5_1	0.9231	-0.08	16.83
Bäume und Gärten	ha_phase_15	ndvi_mean_4_2_1	0.4737	-0.20	53.23
Variierende Wasserfläche	ha_phase_2	ndvi_ha_mean_2_2_1	0.7245	0.74	110.59
Konstante Wasserfläche	ha_phase_11	ndvi_max_abs_3_1_1	0.2552	0.07	-7.67

M4_B		2005			
Klasse	Merkmal 1	Merkmal 2	Kappa	v_1	v_2
Baumwolle	ndvi_bwd_max_4_2_1	ndvi_bwd_min_5_2_1	0.4727	14.59	7.91
Reis	ha_phase_15	ndvi_fwd_range_4_2_0	0.4352	0.32	-7.72
Weizen-Reis	ha_amplitude_2	ha_phase_7	0.6315	-30.66	0.20
Weizen-Folgefrucht					
Weizen	ha_phase_11	ndvi_ha_range_5_2_0	0.6783	0.08	-10.69
Ländliche Siedlung	ha_phase_11	ha_varianz_0	0.3658	-0.14	-0.05
Städtische Siedlung	ha_phase_1	ha_phase_2	0.1421	0.03	0.90
Wüste	ha_phase_13	ndvi_loc_max	0.9142	-0.41	0.07
Mischsignal	ha_phase_4	ndvi_bwd_min_abs_5_3_2	0.2486	0.19	-11.61
Bäume und Gärten	ndvi_ha_stddev_4_2_1	ndvi_ha_range_5_2_0	0.2531	65.98	-15.12
Variierende Wasserfläche	ha_phase_1	ha_varianz_10	0.7841	-0.35	-0.34
Konstante Wasserfläche	ha_amplitude_18	ndvi_ha_max_5_5_2	0.6713	-46.70	-21.34

Tabelle AIII-12: Auflistung aller für das Klassifikationsverfahren verwendeter Merkmale, die durch die Klassifikationsbäume sowohl für 2004 als auch für 2005 ausgewählt wurden.

Nummer	Merkmal	Nummer	Merkmal
1	ha_amplitude_1	10	ndvi_bwd_stddev_1_0_0_0
2	ha_amplitude_5	11	ndvi_ha_max_1_0_0_0
3	ha_phase_0	12	ndvi_ha_max_3_1_0_0
4	ha_phase_1	13	ndvi_ha_range_4_1_0_0
5	ha_phase_11	14	ndvi_max_4_2_0_0
6	ha_phase_2	15	ndvi_mean_1_0_0_0
7	ha_varianz_0	16	ndvi_mean_4_1_0_0
8	ha_varianz_1	17	ndvi_range_3_1_0_0
9	ha_varianz_2		

Tabelle AIII-13: Auflistung aller Merkmale, die bezogen auf die Anwendung für Khorezm 2004 einmalig zur Klassifikation eingesetzt wurden.

Nr.	Merkmal	Nr.	Merkmal
18	ha_amplitude_18	40	ndvi_ha_max_4_3_0
19	ha_amplitude_19	41	ndvi_ha_max_5_2_0
20	ha_amplitude_2	42	ndvi_ha_max_5_5_2
21	ha_amplitude_21	43	ndvi_ha_mean_4_2_1
22	ha_amplitude_4	44	ndvi_ha_mean_4_3_0
23	ha_amplitude_5	45	ndvi_ha_mean_4_3_1
24	ha_phase_15	46	ndvi_ha_mean_5_1_1
25	ha_phase_7	47	ndvi_ha_mean_abs_4_3_1
26	ha_varianz_10	48	ndvi_ha_mean_abs_5_3_1
27	ha_varianz_11	49	ndvi_ha_min_3_2_0
28	ha_varianz_7	50	ndvi_ha_min_5_2_0
29	harm_anz	51	ndvi_ha_min_abs_4_2_1
30	harm_proz	52	ndvi_ha_min_abs_4_4_1
31	ndvi_bwd_max_1_1_1	53	ndvi_ha_range_5_2_0
32	ndvi_bwd_mean_1_1_0	54	ndvi_ha_stddev_abs_3_3_1
33	ndvi_bwd_mean_2_2_0	55	ndvi_mean_3_1_0
34	ndvi_bwd_mean_5_2_0	56	ndvi_mean_4_3_0
35	ndvi_bwd_range_1_1_0	57	ndvi_min_3_2_0
36	ndvi_fwd_max_abs_1_1_1	58	ndvi_min_5_2_1
37	ndvi_fwd_mean_3_2_0	59	ndvi_range_abs_3_3_1
38	ndvi_fwd_mean_5_3_1	60	ndvi_stddev_2_2_0
39	ndvi_fwd_range_4_2_0		

Tabelle III-14: Auflistung aller Merkmale, die bezogen auf die Anwendung für Khorezm 2005 einmalig zur Klassifikation eingesetzt wurden.

Nr.	Merkmal	Nr.	Merkmal
18	ha_amplitude_11	40	ndvi_fwd_stddev_2_2_0
19	ha_amplitude_3	41	ndvi_ha_mean_1_1_2
20	ha_amplitude_8	42	ndvi_ha_mean_2_2_1
21	ha_phase_19	43	ndvi_ha_mean_4_3_2
22	ha_phase_5	44	ndvi_ha_mean_5_2_1
23	ha_varianz_14	45	ndvi_ha_mean_5_3_1
24	ha_varianz_3	46	ndvi_ha_mean_abs_4_3_2
25	ha_varianz_5	47	ndvi_ha_min_abs_4_4_1
26	ndvi_bwd_max_3_2_0	48	ndvi_ha_range_4_4_0
27	ndvi_bwd_mean_1_1_1	49	ndvi_max_3_2_0
28	ndvi_bwd_mean_2_2_1	50	ndvi_max_4_3_0
29	ndvi_bwd_mean_5_3_1	51	ndvi_max_5_3_0
30	ndvi_fwd_mean_2_2_1	52	ndvi_max_5_4_0
31	ndvi_fwd_mean_3_2_1	53	ndvi_max_abs_3_1_1
32	ndvi_fwd_mean_4_3_0	54	ndvi_mean_1_1_2
33	ndvi_fwd_mean_4_3_2	55	ndvi_mean_2_1_2
34	ndvi_fwd_mean_5_2_0	56	ndvi_mean_5_4_1
35	ndvi_fwd_mean_5_4_1	57	ndvi_mean_abs_2_1_1
36	ndvi_fwd_mean_5_5_0	58	ndvi_min_4_3_0
37	ndvi_fwd_min_5_5_1	59	ndvi_min_5_4_0
38	ndvi_fwd_min_abs_5_3_1	60	ndvi_range_1_1_0
39	ndvi_fwd_stddev_2_2_1	61	ndvi_stddev_1_1_0
		62	ndvi_stddev_4_3_0

Tabelle AIII-15: Kreuztabelle zur Genauigkeitsabschätzung der Landnutzungsclassifikation 2004.

	Baumwolle	Reis	Weizen-Reis	Weizen-Folgefrucht	Weizen-Brache	Ländliche Siedlung	Städtische Siedlung	Wüste	Mischpixel	Bäume und Gärten	Var. Wasserfläche	Kont. Wasserfläche	
Baumwolle	22	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	24
Reis	1	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32
Weizen-Reis	1	0	28	2	1	0	0	0	0	1	0	0	33
Weizen-Folgefrucht	0	0	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	9
Weizen-Brache	0	0	1	0	29	0	0	0	0	0	0	0	30
Ländliche Siedlung	0	0	0	0	0	20	0	0	0	3	0	0	23
Städtische Siedlung	0	0	0	0	0	1	20	2	0	0	0	0	23
Wüste	0	0	0	0	0	0	0	28	0	0	0	0	28
Mischpixel	1	0	0	0	0	1	0	0	6	0	0	1	9
Bäume und Gärten	0	0	0	0	0	1	0	0	0	16	0	0	17
Variierende Wasserfläche	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	20
Kont. Wasserfläche	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	17	19
	25	32	33	7	30	23	20	30	6	21	22	18	

Tabelle AIII-16: Kreuztabelle zur Genauigkeitsabschätzung der Landnutzungsclassifikation 2005.

	Baumwolle	Reis	Weizen-Reis	Weizen-Folgefrucht	Weizen-Brache	Ländliche Siedlung	Städtische Siedlung	Wüste	Mischpixel	Bäume und Gärten	Var. Wasserfläche	Kont. Wasserfläche	
Baumwolle	23	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25
Reis	4	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35
Weizen-Reis	0	0	27	5	0	0	0	0	0	0	0	0	32
Weizen-Folgefrucht	0	0	1	9	1	0	0	0	0	0	0	0	11
Weizen-Brache	0	0	0	1	24	0	0	0	0	0	0	0	25
Ländliche Siedlung	0	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0	0	26
Städtische Siedlung	0	0	0	0	1	0	22	0	0	0	0	0	23
Wüste	0	0	0	0	0	0	0	29	0	0	0	0	29
Mischpixel	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	6
Bäume und Gärten	2	0	0	1	0	0	0	0	0	21	0	0	24
Variierende Wasserfläche	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	2	30
Kont. Wasserfläche	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	19	24
	29	33	28	16	26	26	22	29	6	21	33	21	

III.1 Indikatoren der Land- und Wassernutzung in Khorezm

III.1.1 Das Klichnyasbay-System

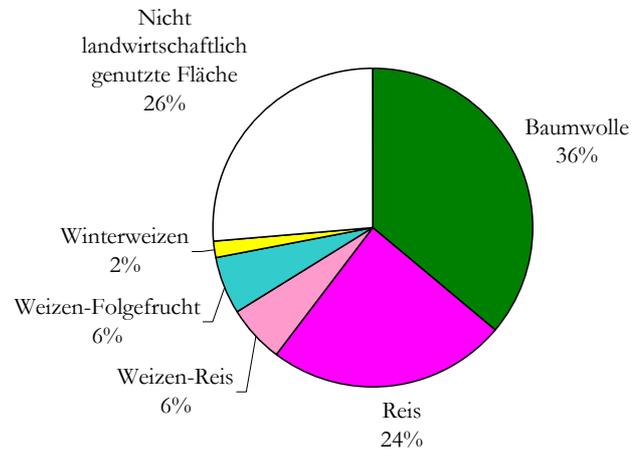
Klichnyasbay-System

Fläche [ha]	43.978
	01.04.2005
Untersuchungszeitraum	- 30.09.2005

Landnutzung [Flächenanteile in %]

Agrarische genutzte Fläche	
Baumwolle	36,04
Reis	24,18
Weizen-Reis	5,91
Weizen-Folgefrucht	5,67
Winterweizen	1,82
Nicht agrarisch genutzte Fläche	
	26,37

Wasserentnahme [km ³]	0,55
Wasserentnahme/Grundfläche [m ³ /ha]	12524,81
Wasserentnahme/LW-Grundfläche [m ³ /ha]	17009,96
Depleted fraction [m ³ /m ³]	0,64



III.1.2 Das Daryalik-System

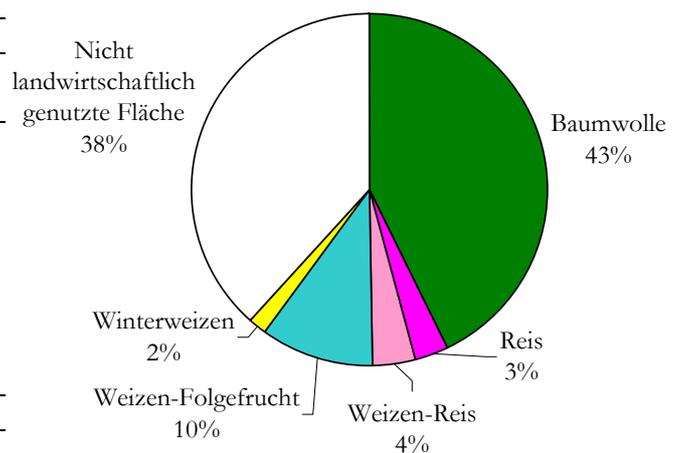
Daryalik-System

Fläche [ha]	213,59
	01.04.2005
Untersuchungszeitraum	- 30.09.2005

Landnutzung [Flächenanteile in %]

Agrarische genutzte Fläche	
Baumwolle	42,74
Reis	3,23
Weizen-Reis	3,86
Weizen-Folgefrucht	10,12
Winterweizen	1,64
Nicht agrarisch genutzte Fläche	
	38,41

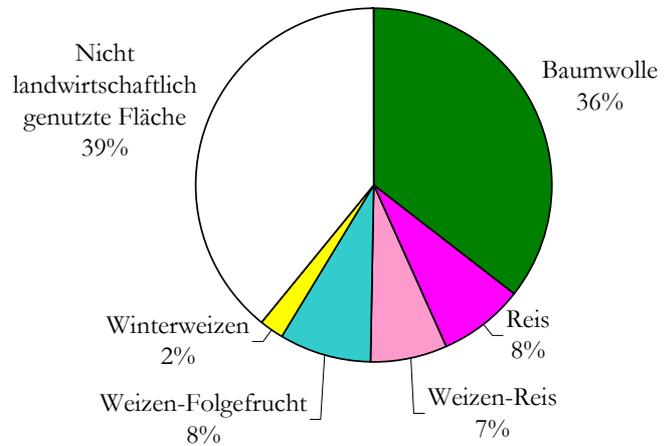
Wasserentnahme [km ³]	0,38
Wasserentnahme/Grundfläche [m ³ /ha]	17988,86
Wasserentnahme/LW-Grundfläche [m ³ /ha]	29207,14
Depleted fraction [m ³ /m ³]	0,37



III.1.3 Das Süd-System

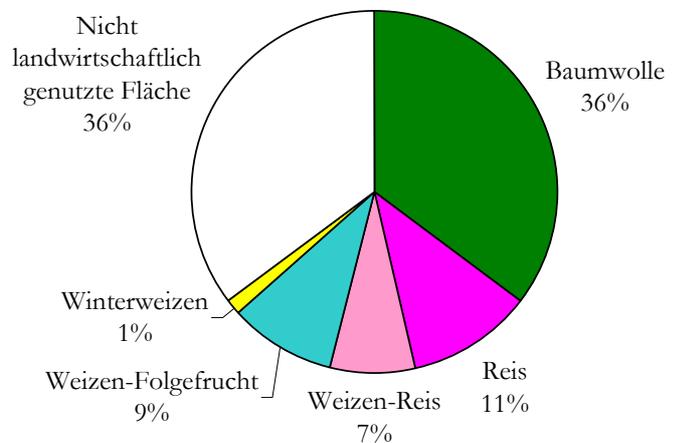
Tash Saka-System

Fläche [ha]	1400,20
	01.04.2005
Untersuchungszeitraum	- 30.09.2005
Landnutzung [Flächenanteile in %]	
Agrarische genutzte Fläche	
Baumwolle	35,51
Reis	7,85
Weizen-Reis	6,95
Weizen-Folgefrucht	8,19
Winterweizen	2,20
Nicht agrarisch genutzte Fläche	
	39,30
Wasserentnahme [km ³]	1,88
Wasserentnahme/Grundfläche [m ³ /ha]	13394,87
Wasserentnahme/LW-Grundfläche [m ³ /ha]	22067,30
Depleted fraction [m ³ /m ³]	0,47



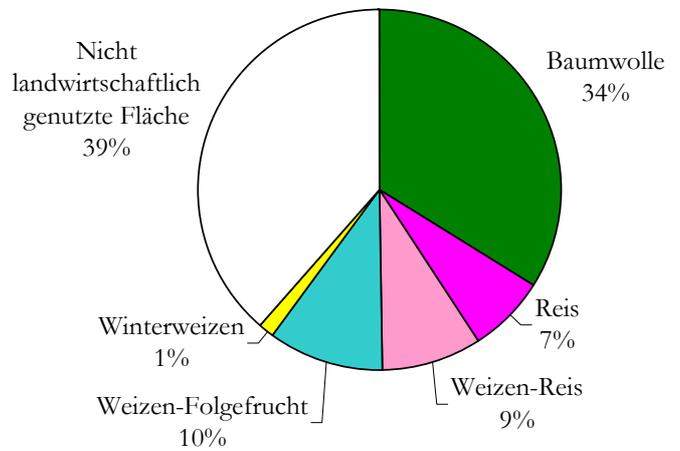
R-8-System

Fläche [ha]	311,95
	01.04.2005
Untersuchungszeitraum	- 30.09.2005
Landnutzung [Flächenanteile in %]	
Agrarische genutzte Fläche	
Baumwolle	35,35
Reis	11,11
Weizen-Reis	7,48
Weizen-Folgefrucht	9,36
Winterweizen	1,43
Nicht agrarisch genutzte Fläche	
	35,28
Wasserentnahme[km ³]	0,50
Wasserentnahme/Grundfläche [m ³ /ha]	16114,24
Wasserentnahme/LW-Grundfläche [m ³ /ha]	24898,16
Depleted fraction [m ³ /m ³]	0,44



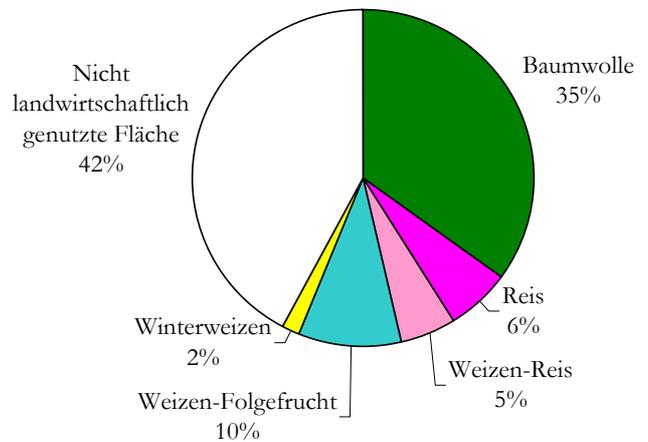
Palvan-Gazavat-System

Fläche [ha]	200,00
	01.04.2005
Untersuchungszeitraum	- 30.09.2005
Landnutzung [Flächenanteile in %]	
Agrarische genutzte Fläche	
Baumwolle	33,75
Reis	7,16
Weizen-Reis	8,94
Weizen-Folgefrucht	10,25
Winterweizen	1,25
Nicht agrarisch genutzte Fläche	
	38,65
Wasserdargebot [km ³]	0,64
Wasserdargebot / Grundfläche [m ³ /ha]	32185,36
Wasserdargebot / LW-Grundfläche [m ³ /ha]	52462,61
Depleted Fraction [m ³ /m ³]	0,39



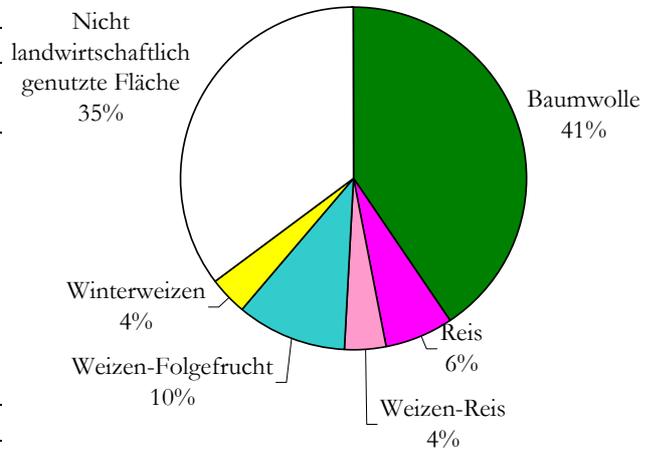
Palvan-System

Fläche [ha]	470,00
	01.04.2005
Untersuchungszeitraum	- 30.09.2005
Landnutzung [Flächenanteile in %]	
Agrarische genutzte Fläche	
Baumwolle	35,05
Reis	6,16
Weizen-Reis	5,27
Weizen-Folgefrucht	9,57
Winterweizen	1,60
Nicht agrarisch genutzte Fläche	
	42,34
Wasserentnahme [km ³]	0,66
Wasserentnahme/Grundfläche [m ³ /ha]	14023,60
Wasserentnahme/LW-Grundfläche [m ³ /ha]	24319,87
Depleted fraction [m ³ /m ³]	0,32



Gazavat

Fläche [ha]	161,63
	01.04.2005
Untersuchungszeitraum	- 30.09.2005
Landnutzung [Flächenanteile in %]	
Agrarische genutzte Fläche	
Baumwolle	40,66
Reis	6,27
Weizen-Reis	3,93
Weizen-Folgefrucht	10,17
Winterweizen	3,62
Nicht agrarisch genutzte Fläche	
	35,35
Wasserentnahme [km ³]	0,18
Wasserentnahme/Grundfläche [m ³ /ha]	11352,89
Wasserentnahme/LW-Grundfläche [m ³ /ha]	17561,89
<i>Depleted fraction</i> [m ³ /m ³]	0,47



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die von mir eingereichte Dissertation zum Thema „Fernerkundungsbasierte Modellierung und hydrologische Messungen zur Analyse und Bewertung der landwirtschaftlichen Wassernutzung in der Region Khorezm (Usbekistan)“ selbständig und nur unter Benutzung der in der Arbeit angegebenen Literatur und sonstigen Quellen angefertigt wurde. Indirekt übernommene Gedanken habe ich als solche kenntlich gemacht.

Würzburg, den 24. Oktober 2006

Curriculum Vitae

Persönliche Daten

Christopher Conrad
Würzburger Straße 14a
97218 Gerbrunn
geboren in Alzenau, Bayern
32 Jahre, ledig

Beruflicher Werdegang

02/02 – 05/02 Freiberufliche Mitarbeit im **Planungsbüro Jestädt und Partner** Mainz
Einschbarkeitsstudien und Visualisierung geplanter Windenergieanlagen

seit 06/02 **Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Deutschen Zentrum für Luft-
und Raumfahrt e.V.**
Lehrstuhlassistenzaufgaben
am DLR-Stiftungslehrstuhl für Geographische Fernerkundung
der Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Prof. Dr. Stefan Dech

Ausbildung

1993 **Abitur**, Hohenstaufen Gymnasium Kaiserslautern (Note: 1,6)

04/95 – 02/02 **Studiengang Geographie an der Universität Mainz**
Nebenfächer: Mathematik und Geologie
Gesamtnote: sehr gut (1,4)

21.10.1997 **Vordiplom Hauptfach Mathematik**, Note: gut (2,0)

10/00 – 10/01 **Diplomarbeit** am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
“Extraktion geowissenschaftlicher Fernerkundungsdatensätze für Animations-
und GIS-Anwendungen“

Praktika

03/00 – 04/00 **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.**
Integration, Georeferenzierung und Klassifizierung von Satellitendaten
Mosaikierung, Entzerrung und Umprojektion von Satelliten- und Luftbildern

05/00 – 06/00 **Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz**
Geologische Geländekartierung

Studentische Tätigkeiten

- 04/98 – 04/99 **Einführung eines Tutoriums für Studienanfänger** am Geographischen Institut der Universität Mainz
Koordination und Planung; Gremienvertretung und Sprecheraufgabe
- 06/98 – 09/00 Mitarbeit in der **Arbeitsgruppe Rüstungsaltslasten**
Digitale Aufbereitung von Luftbildmosaiken; Luftbild- und Satellitendatenauswertung; Digitale Bohrdatenerfassung und Geographische Informationssysteme
- 04/00 – 07/00 Gestaltung und Durchführung eines **ArcView 3.1-Tutoriums**

Ehrenamtliche studentische Tätigkeiten

- 10/96 – 10/98 **Gewählter Fachschaftsrat** am Geographischen Institut der rheinland-pfälzischen Universität Mainz
- 10/96 – 11/99 **Gremienarbeit** am Geographischen Institut der Universität Mainz

Außeruniversitäre ehrenamtliche Tätigkeiten

- 1991 – 1994 Betreuer im Jugendfußball
- 1990 – 1994 Jugendarbeit in der KJG Kaiserslautern-Hohenecken

Zivildienst

- 09/93 – 10/94 DRK Kaiserslautern

Besondere Kenntnisse

- EDV** Softwareentwicklung, Programmiererfahrung
C++, C, Delphi, HTML, IDL, Visual Basic, Datenbanken (MS Access)
- GIS** Sicherer Umgang und Projekterfahrung:
ERDAS Imagine, ENVI/IDL, ArcGIS
- Sprachen** Gute Englischkenntnisse, Grundkenntnisse in Russisch, Großes Latein

Auslandserfahrungen

- 08/01 Vierwöchige Sprachreise nach **Ishevsk, Russland**
- 02/02 – 03/02 Vierwöchige Sprachreise nach **St. Petersburg, Russland**
- 2004 und 2005 6 Monate Forschungsaufenthalt in **Urgench, Usbekistan**

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

2006

COLDITZ, R.R., CONRAD, C., WEHRMANN, T., SCHMIDT, M., DECH, S. (2006): Generation and assessment of MODIS time series using quality information. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2006, 31. Juli - 4. August 2006, Denver, CO, 6 S.

COLDITZ, R.R., CONRAD, C., SCHRAMM, M., SCHMIDT, M., DECH, S. (2006): Mapping regions of high temporal variability in Africa. In: ISPRS mid-term symposium Remote Sensing: from pixels to processes, 8. - 11. Mai 2006, Enschede, Niederlande, 6 S.

WALZ, Y., MAIER, S.W., DECH, S.W., CONRAD, C. AND R.R. COLDITZ: Measuring burn severity using MODIS: A case study in the jarrah-marri forest of southwest Western Australia. In: International Journal of Geophysical Research – Biogeosciences, Special Edition: Remote sensing contributions to forest fire effects assessment, 28 S., accepted.

2005

COLDITZ, R.R., CONRAD, C., RÜCKER, G.R., SCHWEITZER, C., FISTRIC, S., SCHMIDT, M. AND S.W. DECH (2005): Ableitung von phänologischen Verlaufsmustern aus MODIS-Zeitreihen und Möglichkeiten der Anwendung. In: Strobl, J., Blaschke, T. & G. Griesebner (Hrsg.), Angewandte Geoinformatik. Beiträge zum 17. AGIT Symposium, 6.-8. Juli 2005, Salzburg, S. 94-99.

CONRAD, C., COLDITZ, R.R., PETROCCHI, A., RÜCKER, G.R., DECH, S.W. AND M. SCHMIDT (2005): Time Series Generator - Ein flexibles Softwaremodul zur Generierung und Bewertung von Zeitserien aus NASA MODIS Datenprodukten. In: Strobl, J., Blaschke, T. & G. Griesebner (Hrsg.), Angewandte Geoinformatik. Beiträge zum 17. AGIT Symposium, 6.-8. Juli 2005, Salzburg, S. 100-105.

KRANZ O., RÜCKER, G.R., CONRAD, C., STRUNZ, G. AND S.W. DECH (2005): GIS und Multi-Criteria-Evaluation zur räumlichen Modellierung geeigneter Aquakultur-Standorte in der Region Khorezm, Usbekistan. In: Strobl, J., Blaschke, T. & G. Griesebner (Hrsg.), Angewandte Geoinformatik. Beiträge zum 17. AGIT Symposium, 6.-8. Juli 2005, Salzburg, S. 374-379.

RÜCKER, G.R., CONRAD, C., COLDITZ, R.R., STRUNZ, G. & S.W. DECH (2005): Remote sensing based mapping and characterization of soil and vegetation quality of potential plantation areas in the desiccated Aral Sea area. In: ZEF Work Papers for Sustainable Development in Central Asia, Bonn, pp. 20.

- 2004** **CONRAD, C., RÜCKER, G.R., COLDITZ, R.R., STRUNZ, G. AND S. DECH (2004):** Crop Monitoring Using Multi-temporal MODIS Remote Sensing Data in Khorezm, Uzbekistan. In: Humboldt-Kolleg Uzbekistan, "The Use of GIS and Simulation Models for Research and Decision Support in Central Asian River Basins", 6-10 July 2004, Tashkent, Uzbekistan, pp. 118-124.
- CONRAD, C., RÜCKER, G.R., SCHWEITZER, C., DECH, S.W. AND M. HAFEZ (2004):** Modeling Seasonal actual evapotranspiration with remote sensing and GIS in Khorezm region, Uzbekistan. In: SPIE Europe International Symposium "Remote Sensing Europe", 13-16 September 2004, Maspalomas, Canary Islands, Spain, pp. 14-224.
- MÜLLER, U., CONRAD, C., KRAUS, T. (2004):** Analyse der raum-zeitlichen Vegetationsdynamik in Ostafrika unter Verwendung von MODIS-Daten. In: Symposium und Fachmesse für Angewandte GeoInformatik (AGIT) 2004, Salzburg, Austria, 7-9 July 2004
- SCHWEITZER, C., RÜCKER, G.R., CONRAD, C., BENDIX, J., STRUNZ, G. AND DECH, S. (2004):** Knowledge-based land use classification combining expert knowledge, GIS, multi-temporal Landsat 7 ETM+ and MODIS time series data in Khorezm, Uzbekistan. In: Proceedings of 1st Göttingen GIS & Remote Sensing Days. Environmental Studies, Göttinger Geographische Abhandlungen, Göttingen, 2004
- 2003** **RÜCKER, G., CONRAD, C. (2003):** Exploring Leaf Area Index Development and Land Cover Classification in the Lower Amu Darya Basin in Uzbekistan based on Multi-Temporal and Multi-Spatial Remote Sensing Data. In: ZEF Work Papers for Sustainable Development in Central Asia. No 5., Zentrum für Entwicklungsforschung, Bonn
- 2002** **CONRAD, C. (2002):** Auswirkungen intensiver Bewässerungswirtschaft in Zentralasien. Fernerkundung. In: Petermanns Geographische Mitteilungen, Band 146, Heft Nr. 6, S. 4-5