

UNTERSUCHUNG UND BEWERTUNG DES EROSIONSRISIKOS FÜR TRADITIONELLE UND MODERNE BEWIRTSCHAFTUNGSSYSTEME IN DER REGION CASTILLA-LA MANCHA

Mit 8 Abbildungen und 11 Tabellen

MARTIN KAPPAS und MARTIN SCHWETER

Summary: Study and estimation of erosion risks for traditional and modern land use systems in the region Castilla-La Mancha

Traditional land use is more and more being replaced by modern land use systems. This transformation process can lead to a loss of soil and substrate. The consequences are not clearly foreseen for the agricultural landscape and depend on the recurring exploitation of the land. Extensive change in the exploitation of the land happened during the last years in the mediterranean landscape. Especially the development of the irrigation agriculture in the La Mancha of Spain led to decisive alteration in the agricultural landscape. The present study tries to find out the erosion-endangered regions as well as the land use systems that increase erosion for a square region of 30 km length on the Campo de Montiel in the region of Castilla-La Mancha in the Meseta of Spain. The essential factors for erosion risks are identified. With the help of the assessment of these essential factors, recommendations for the future use of the landscape should be established. The concept of the investigation contains the exploitation and combination of different data- and information layers for the calculation of a risk-map for the entire study area. The GIS-based model of the potential soil erosion amounts is estimated by the use of the Universal Soil Loss Equation (USLE), which is comparatively suitable because of its easy structure for the integration into GIS. Comparative investigations of various erosion models showed that physical and mathematical complex models are only insignificantly more precise than the simple and often used USLE (DE ROO 1993). The potential erosion amount ($t/ha * y$) was calculated and finally classified into five risk classes. The USLE was selected since the necessary input parameters are easy to record. For the survey of the input parameters the following data layers are used: field survey, available data and maps and remote sensing (e.g. Fig. 1). In the study area different kinds of land use occur: Matorral, traditional permanent cultivation (traditional dry farming) and intensive irrigation farming (Center Pivots) in comparable relief positions and largely homogeneous geological subsoil. These particular conditions allow the isolation of the impact of the single type of land use for soil erosion. The influence of the particular cultivation and cultivation techniques on soil erosion can directly be compared with each other. Hence people have a tool for future-decision making and planning considering change of land use. The possibilities of the model and the working method chosen in the GIS are shown with the help of two scenarios (scenario I: complete conversion of the traditional dry farming into irrigation farming; scenario II: zero-variant, conversion of current irrigation fields into dry farming).

Zusammenfassung: In der Untersuchung werden erosionsgefährdete Bereiche sowie erosionsfördernde Landnutzungsarten für ein quadratisches Untersuchungsgebiet von ca. 30 km Kantenlänge auf dem Campo de Montiel in der Region Castilla-La Mancha in der spanischen Meseta ermittelt, die wesentlichen Einflußfaktoren auf die Höhe des Erosionsrisikos identifiziert und vor diesem Hintergrund Empfehlungen für die zukünftige Nutzung abgegeben. Das Untersuchungskonzept sieht die aufwandsoptimierte Nutzung und Kombination verschiedener Daten- bzw. Informationsebenen zur Berechnung einer flächendeckenden Risikokarte für das gesamte Untersuchungsgebiet vor. Die GIS-gestützte Modellierung der potentiellen Bodenabtragungsmengen erfolgte über die empirisch abgesicherte Universal Soil Loss Equation (USLE), die sich durch ihren vergleichsweise einfachen Aufbau gut für den Einsatz in einem Geographischen Informationssystem eignet. Wie Vergleiche zwischen verschiedenen Erosionsmodellen gezeigt haben, sind physikalisch komplexe, rechenaufwendige Modelle nur geringfügig besser als die einfache und häufig verwendete USLE (DE ROO 1993). Das Ergebnis dieses Modelldurchlaufs, der potentielle Bodenabtrag in $t/ha * a$, wurde über ein anschließendes Klassifikationsverfahren in abgestufte Risikoklassen überführt. Die USLE wurde als geeignet erachtet, da sich die notwendigen Eingabeparameter auf i. d. R. leicht zu erhebende Daten beschränken, die keine langwierigen und kostenintensiven Meßkampagnen vor Ort erfordern. Für die Erhebung der Eingabeparameter wurden die Datenebenen Geländeaufnahme, vorhandene Daten und Karten und Fernerkundung ihren Informationsgehalten entsprechend und im Hinblick auf ihren Beitrag zur Erklärung des Modellziels optimal eingesetzt (Abb.1).

Im Untersuchungsgebiet treten verschiedene Arten der Landnutzung bzw. der Vegetationsbedeckung in vergleichbarer Reliefsituation und bei weitgehend homogenem geologischem Untergrund auf: von Matorral über traditionelle Dauerkulturen, traditionellen Trockenfeldbau bis hin zu intensiver Bewässerungswirtschaft. Diese besonderen Voraussetzungen ermöglichen es, die Auswirkungen des jeweiligen Landnutzungstyps auf die Erosionsgefährdung zu isolieren, d. h. der Einfluß der einzelnen Kulturen und Kulturtechniken kann unmittelbar miteinander verglichen werden.



Abb. 1: Ablaufschema der Modellierung
Flow chart of the modelling process

Der Untersuchungsraum

Das Untersuchungsgebiet (Abb. 2) liegt im Südosten der spanischen Meseta in der Region Castilla-La Mancha. Die Mancha ist eine ausgedehnte morphologische Depression mit Höhenlagen von etwa 700 m ü. NN in den zentralen Bereichen bis hin zu 1100 m ü. NN an den südlichen und nördlichen Rändern. Das Testgebiet für die satellitengestützte Erosionsanalyse befindet sich auf dem Campo de Montiel. Die Gesamtausdehnung der Satellitenbildszenen in Abbildung 3 umfaßt, bei einer Kantenlänge von etwa 30,5 km, eine Fläche von ca. 930 km², die sich von den Lagunas de Ruidera am Westrand bis ca. 4 km westlich von El Bonillo, bzw. vom Cerro de Morterón im Norden bis etwa 5 km nördlich von Villahermosa erstreckt.

Klima

Das Untersuchungsgebiet liegt in einer Region mit mediterranem Klima unter bereits deutlich kontinentalem Einfluß. Die Sommermonate sind sehr trocken und die wenigen Niederschläge, die in diesem Abschnitt der Mancha mit 400–500 mm im langjährigen Mittel noch vergleichsweise hoch sind, verteilen sich auf Frühjahr und Herbst, in geringem Ausmaß auch auf die Wintermonate (GRÜNEWALD 1983). Zu dem saisonalen Charakter der Niederschläge tritt eine hohe jährliche Variabilität hinzu. Der kontinentale Einfluß macht sich besonders bei den Temperaturen bemerkbar. Hier können die mittleren Monatstemperaturen je nach Höhenlage in den Sommermonaten 22°C überschreiten, während im Winter Monatsmittel von unter 6°C erreicht werden. Das Plateau Campo de Montiel weist mehr Niederschläge und niedrigere Temperaturen auf als die eigentliche Senke der Mancha. Die gemessenen Niederschläge stammen hauptsächlich aus atlantischen Störungen der Polarfront, die jedoch nicht sehr

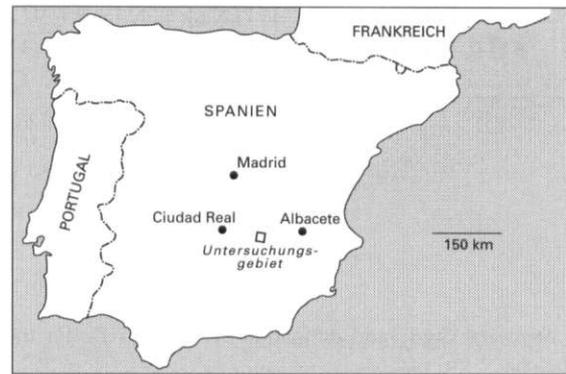


Abb. 2: Lage des Untersuchungsgebiets
Map of the region under investigation

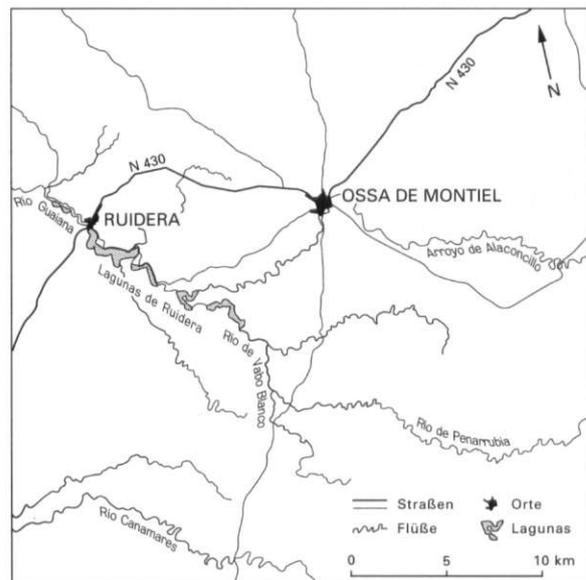


Abb. 3: Lage der multitemporalen Satellitenszenen im Untersuchungsraum
Position of the multitemporal satellite scenes in the region under investigation

häufig auftreten und dem Klima seinen mediterran-kontinentalen Charakter verleihen (CASTILLOS u. BELTRAN 1984). Die trockenste Jahreszeit ist mit etwa 10–15% der Jahresniederschläge der Sommer, wobei die Niederschläge während dieser Zeit überwiegend konvektiven Ursprungs sind. Im Frühjahr überschreitet die potentielle Verdunstung den aktuellen Niederschlag zunächst nur leicht, im Kernsommer jedoch um ein Vielfaches, was die Monate April bzw. Mai bis Oktober arid werden läßt (Abb. 4).

Innerhalb der Fläche des Untersuchungsgebietes variieren die jährlichen Niederschlagshöhen von Nord nach Süd zwischen 350 und 500 mm. Der zentrale Bereich nimmt mit 400–450 mm Niederschlag pro Jahr den größten Flächenanteil ein, gefolgt von der Zone mit 450–500 mm/a im Süden. Die Niederschläge von 350–400 mm/a beschränken sich auf eine schmale Zone am nördlichen Rand des Untersuchungsgebietes.

Vegetation

Die Vegetation auf den nicht durch agrarische Nutzung beeinflussten Flächen besteht aus Wäldern bzw. aus unterschiedlich hohen und dichten Formationen von Matorral. Die Wälder (oak woodland), die in ihrer Verbreitung meist auf Steillagen beschränkt sind, werden in der Baumschicht mit maximal 4 m fast ausschließlich von Steineichen (*Quercus ilex rotundifolia*) und Aleppokiefern (*Pinus halepensis*) gebildet. Im Unterwuchs befinden sich neben dem Jungwuchs dieser Arten auch der Stechwachholder (*Juniperus oxycedrus*) und der Thymian (*Thymus vulgaris*). Die Matorral-Formationen bis 2 m Höhe (oak scrub) bestehen zu wechselnden Anteilen aus *Quercus ilex rotundifolia*, der Kermeseiche (*Quercus coccifera*) und erneut *Juniperus oxycedrus*, während in den weitständigen Formationen bis 1 m Höhe (brushwood) überwiegend *Quercus coccifera*, *Thymus vulgaris*, die Zwenke (*Brachipodium sp.*) und vereinzelt Lavendel (*Lavandula latifolia*) auftreten. Auf dem Campo de Montiel nehmen die Wälder und hohen Matorral-Formationen im Vergleich zur übrigen Mancha noch recht große Flächen ein. Ein Großteil der Wälder im Untersuchungsgebiet bedecken die vergleichsweise steilen Flanken des Rio Guadiana bzw. der Lagunas de Ruidera, die den ehemaligen Lauf des Flusses nachzeichnen. Die Deckungsgrade der unterschiedlichen Matorralformationen erreichen 40%.

Relief

Das Relief bietet ein Spektrum von weiten, leicht welligen Ebenen im Süden bis hin zu kleinräumigen

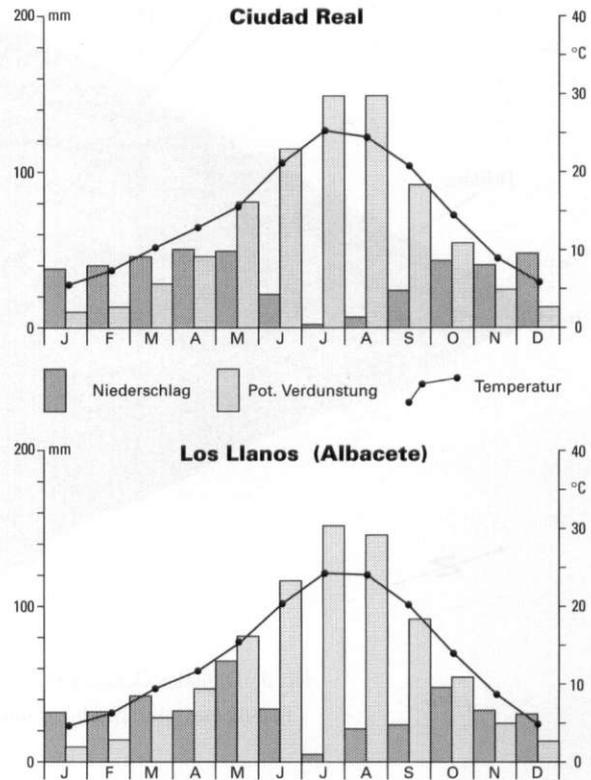


Abb. 4: Klimaparameter an den Stationen Ciudad Real und Los Llanos – Albacete
 Quelle: MÜLLER (1980)
 Climatic parameters at the Ciudad Real and Los Llanos – Albacete stations

Erhebungen im nördlichen Drittel des Untersuchungsgebietes und entlang der Täler des Rio Guadiana und des Rio Canamares in der Südwestecke des Blattes. Die höchsten Lagen mit Werten um 1050 m ü. NN beschränken sich auf den Nordosten des Gebietes. Eine Grobgliederung des Untersuchungsgebietes ergäbe in etwa eine Dreiteilung in eine nördliche Schwellenzone, die das Campo de Montiel zur Manchasanke hin abgrenzt, die südlich angeschlossenen weiten Hochebenen des Campo, mit den darin eingetieften Gewässersystemen als dritte Komponente. Tendenziell weist die nördliche Hälfte des Blattes größere Hangneigungswinkel auf als das südliche Pendant. Die einzigen Ausnahmen stellen die Talflanken des Rio Canamares im äußersten Südwesten dar, die ebenfalls Neigungen von über 10° aufweisen. Im Flächenanteil überwiegen jedoch die ebenen Geländeeinheiten, da etwa 95% des gesamten Untersuchungsgebietes Hangneigungen von weniger als 5,5° aufweist (Abb. 5).

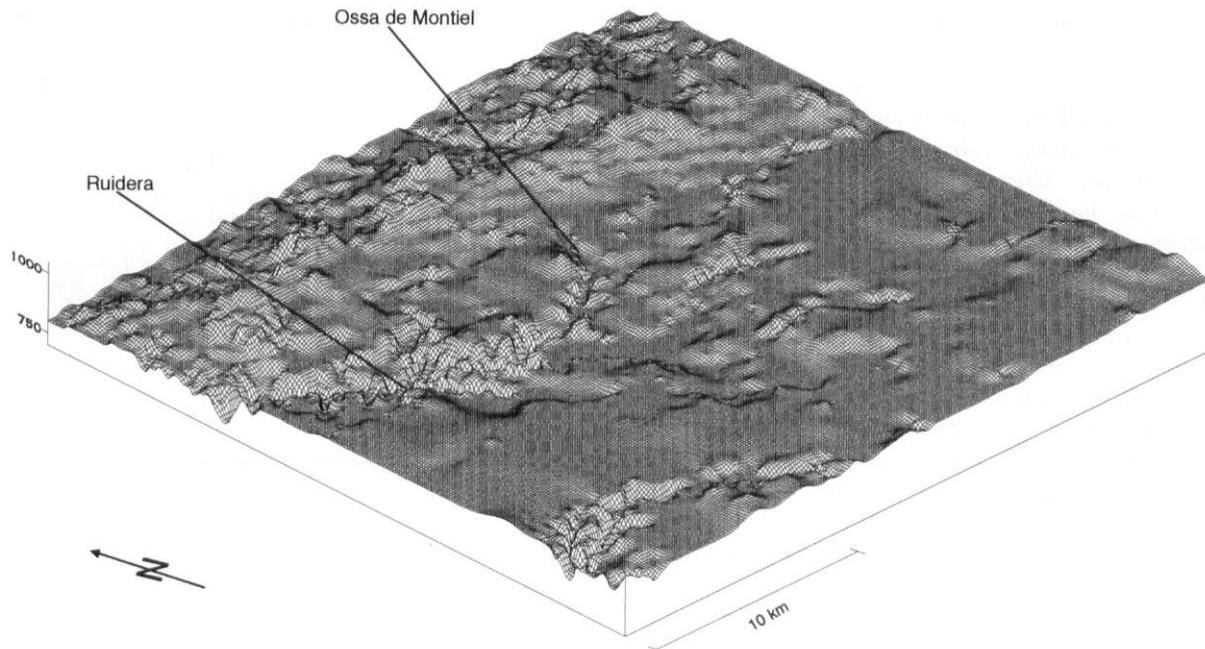


Abb. 5: Digitales Geländemodell der Region Ossa de Montiel
Digital elevation model of the Ossa de Montiel region

Geologie

Den geologischen Untergrund des Campo de Montiel bauen Gesteine des Tertiärs, des Mesozoikums und des Paläozoikums auf. Im untersuchten Ausschnitt des Campo treten jedoch neben kleinräumigen Deckschichten des Quartär (Sande und Mergel) nur noch horizontal lagernde bis schwach nach NE einfallende Gesteinsschichten des Mesozoikums auf. Die quartären Ablagerungen, schwach gerundete Blöcke, Kiese und Sande der quarzitischen Sierras (Sierra de Morena) beschränken sich in ihrer Ausdehnung auf die Talböden eines ehemaligen, weitverzweigten Gewässersystems. Der Großteil der Flußtäler wird von holozänen Alluvialbildungen aus Quarzitgeröllen, Dolomiten und Quarz mit schluffig-sandiger Matrix bedeckt (RAMOS u. DE SANTA OLALLA MANAS 1993), die zumeist einer intensiven Bewirtschaftung unterliegen.

Böden

Die Böden, die sich in Abhängigkeit des geologischen Untergrundes gebildet haben, sind im Bereich der anstehenden jurassischen und triassischen Kar-

bonate je nach Entwicklungsstand als sehr steinige, 15–30 cm mächtige Rendzinen ausgebildet. Sie besitzen eine lehmige Textur mit hohem Ca-Gehalt. Die auf den Karbonaten der Trias entstandenen Böden zeichnen sich durch höhere Tongehalte aus. Die Böden auf dem quartären Untergrund sind vielfach als mächtigere Kalkbraunerden (calcic Cambisols) ausgebildet, die bereits einen teilweise verhärteten Kalkanreicherungs-horizont aufweisen. Wie bei den Rendzinen liegt eine lehmige Textur und hoher Ca-Gehalt vor, jedoch besitzen sie geringere Anteile organischer Substanz (RAMOS u. DE SANTA OLALLA MANAS 1993).

Generell zeigen die Böden des Untersuchungsgebietes auch bei unterschiedlicher Nutzung eine ähnliche Charakteristik. Sie besitzen hohe Karbonatgehalte, eine homogene Textur, wenig organische Substanz, eine mittlere Wasserleitfähigkeit (10–40 cm/d), einen niedrigen Gesamt-Stickstoffgehalt, wenig pflanzenverfügbaren Phosphor, dafür aber viel verfügbares Kalium. Die Kationenaustauschkapazität (CEC) ist mit 20–50 mval/100 g Boden als mittel einzustufen. Ca^{2+} -Ionen herrschen im Vergleich zu Mg^{2+} , K^+ und Na^+ vor. Die Böden unter Bewässerung zeigen tendenziell höhere Mg^{2+} und Na^+ Gehalte, ebenso wie eine allgemein höhere Aggregatstabilität (RAMOS u. DE SANTA OLALLA MANAS 1993).

Bewirtschaftungsformen – Nutzung

Aufgrund der klimatischen und pedologischen Limitationen konnten im Untersuchungsgebiet, wie in der gesamten Mancha, traditionell nur angepaßte Dauerkulturen bewirtschaftet oder ein System des Trockenfeldbaus unterhalten werden, das den Anbau von Winterweizen während der niederschlagsreicheren Jahreszeit durch den Wechsel mit einem Brachejahr zur Wiederherstellung der Bodenfeuchte ermöglicht. Die Dauerkulturen bestehen im wesentlichen aus Weinstöcken und in geringerem Umfang aus Olivenbäumen. Sowohl die Weinstöcke als auch die Olivenbäume werden in der Mancha wegen der geringen Niederschläge sehr weitständig gepflanzt, um das Ausmaß der Wasser Konkurrenz zwischen den Pflanzen zu begrenzen. Das traditionelle System des *ano y vez*, des Weizen-Trockenfeldbaus, bedeckt weite, meist ebene Flächen, die stellenweise von Einzelbäumen oder Baumgruppen unterbrochen werden. Neben der Hauptanbaufrucht, dem Winterweizen, werden im Trockenfeldbau untergeordnet auch Raps und Sonnenblumen angebaut, die jedoch nur einen geringen Anteil an der Gesamtfläche dieser Nutzungsart besitzen (BARTH 1993). Durch ihre größere durchschnittliche Schlaglänge und die oftmals unregelmäßigen Umrisse unterscheiden sich die Agrarflächen des Trockenfeldbaus strukturell von den Wein- und Olivenanbauflächen.

Neben den beiden traditionellen Nutzungskategorien, den Dauerkulturen und dem Trockenfeldbau, tritt eine dritte Kategorie auf, die Intensivbewirtschaftung unter Einsatz von Beregnungsanlagen. Diese junge Form der Landnutzung ist eine technisch aufwendige Lösung um das klimabedingte sommerliche Wasserdefizit zu kompensieren (CEC Directorate General XII for Science, Research and Development 1991). Der Einsatz von Zusatzwasser, der durch die Erschließung von Grundwasser ermöglicht wird, erlaubt den Anbau von Pflanzensorten mit einem höherem Wasserbedarf während der Wachstumsperiode. Das Brachejahr, beim Trockenfeldbau zur Regeneration des Bodenwasserhaushaltes noch unabdingbar, ist nun nicht mehr notwendig. Zudem kann der Anbau während der thermisch günstigen Jahreszeiten ohne Wasserstreß für die Pflanzen erfolgen, d. h. die Beregnungslandwirtschaft ist von den klimatischen Limitationen weitgehend abgekoppelt. Als wesentliche Anbaufrüchte der Beregnungslandwirtschaft können mit etwa 60% Flächenanteil Mais und mit immerhin 12% Gerste angesehen werden. Daneben werden Sonnenblumen und Luzerne mit jeweils etwa 10% Anteil angebaut (BARTH 1993). In einer eher ursprüngliche-

ren Form war die Bewässerungslandwirtschaft entlang der Oberflächengewässer in geringem Umfang bereits vorhanden. Im Hinblick auf die Untersuchung der Erosionsgefährdung sind diese Flächen nicht nur aufgrund des verwendeten Maßstabs nahezu bedeutungslos, sondern auch wegen der unterschiedlichen Technik, die in den beiden Systemen zum Einsatz kommt. Die eher traditionelle Bewässerung beschränkt sich weitgehend auf Furchen- und Grabenbewässerung, während bei der modernen Variante große Rotationsberegner (Center-Pivots) eingesetzt werden, die einen künstlichen Niederschlag aus einer Höhe von etwa 3–5 m erzeugen und auf diese Weise für zusätzliche kinetische Niederschlagsenergie sorgen. Die Technik dieses Landnutzungssystems ist für die charakteristische kreisförmige Struktur der Parzellen verantwortlich, die sich deutlich von den übrigen Landnutzungen abhebt.

Einsatz der USLE und GIS

Zur Berechnung der potentiellen Abtragungsmengen wurde das Untersuchungsgebiet bei einer Gesamtfläche von ca. 930 km² mit einem Raster von 1024 × 1024 Zellen überzogen, das sich an der Auflösung der Fernerkundungsdaten, hier der Landsat TM-Szene, orientiert. Für jede dieser etwa 1,04 Millionen Rasterzellen wurde nun die Universal Soil Loss Equation (USLE) angewandt. Dies setzte voraus, daß alle notwendigen Eingabedaten in der entsprechenden Auflösung vorlagen. Für die Satellitendaten und die aus ihnen abgeleitete Information war dies ohne Einschränkung unmittelbar möglich, für die übrigen Datenebenen (vor Ort kartierte Parameter wie vorhandene Erosionsschutzmaßnahmen, Bodenparameter etc.) mußte die Information nach dem Digitalisierungsvorgang auf das benötigte Rasterformat interpoliert werden.

Die Gleichung lautet: $A = R \times K \times L \times S \times C \times P$

A: Langjähriger, mittlerer jährlicher Bodenabtrag in t/ha; zu errechnende Größe.

R: Regen- und Oberflächenabflußfaktor; Maß für die gebietsspezifische Erosivität (Erosionskraft) des Niederschlags, bestehend aus kinetischer Energie und Niederschlagsintensität aller erosionswirksamer Einzelregen pro Jahr.

K: Bodenerodierbarkeitsfaktor; jährlicher Abtrag eines bestimmten Bodens auf einem Standardhang (22 m lang, 9% Gefälle; dauernde Schwarzbrache, keine Erosionsschutzmaßnahmen) als Maß für die Erodibilität eines Bodens.

L: Hanglängenfaktor; Verhältnis des Bodenabtrages eines Hanges beliebiger Länge zu dem des Standardhanges.

- S: Hangneigungsfaktor; Verhältnis des Bodenabtrages eines Hanges beliebiger Neigung zu dem des Standardhanges.
 C: Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor; Verhältnis des Bodenabtrages eines Hanges beliebiger Bewirtschaftung (Kulturpflanze, Bedeckungsgrad, Bearbeitungsverfahren, etc.) zu dem unter Schwarzbrache.
 P: Erosionsschutzfaktor; Verhältnis des Bodenabtrages eines Hanges mit beliebiger Erosionsschutzmaßnahme zum Standardhang ohne Schutzmaßnahme.

Für jeden einzelnen Faktor der USLE wurde eine Rasterkarte erstellt, die die räumliche Verteilung der Faktorwerte repräsentiert. Die Rasterkarte für den R-Faktor wurde über einer Kombination von detaillierten Niederschlagsdaten einer Referenzstation auf Stundenbasis für den Zeitraum 1991 bis 1994 und einer Karte über die langjährige Niederschlagsverteilung im Untersuchungsgebiet erstellt. Die Verteilung der K-Faktoren wurde über die Beprobung vor Ort und die anschließende Auswertung von Böden in unterschiedlicher Reliefposition und auf unterschiedlichem geologischem Untergrund festgelegt. Zur Erstellung der Karten der L- und S-Faktoren war zunächst die Berechnung eines Digitalen Höhenmodells (DHM) aus analogen topographischen Daten notwendig. Für die S-Faktoren genügte die Ableitung der Hangneigungen aus dem DHM, während für die L-Faktoren zusätzliche Information über die Parzellenlänge aus dem Satellitenbild extrahiert werden mußte. Die Aufbereitung der L-Faktoren in der USLE sieht vor, daß die tatsächliche Hanglänge mit einem neigungsabhängigen Exponenten verrechnet wird. Die Rasterkarte der C-Faktoren konnte auf Grundlage einer Landnutzungsklassifikation der Landsat TM-Daten vergleichsweise einfach realisiert werden. Für die P-Faktoren wurden Daten aus der Geländeaufnahme mit der Flächeninformation aus den Satellitenkarten kombiniert.

Die Rasterkarten der einzelnen Faktoren erhalten alle das Format 1024×1024 Pixel, basierend auf der Auflösung der Satellitenbilddaten. Je nach Struktur der vorliegenden Daten müssen sie teils manuell digitalisiert und anschließend in Rasterdaten umgewandelt werden, teils müssen sie über Rechenverfahren aus bereits vorhandenen Rasterdaten extrahiert werden. Für die Erstellung der S- und L-Faktorkarten mußten beide Verfahren kombiniert angewendet werden. Auf diese Weise wurden alle Karten, seien es Zwischenergebnisse, einfache Karten mit Verrechnungskoeffizienten oder die endgültigen Faktorkarten, auf dieses einheitliche Format gebracht. Dies ist unbedingt notwendig, um die einzelnen Datenebenen im GIS miteinander verrechnen zu können.

Tabelle 1: Einteilung der Risikoklassen

Distribution of the risk classes		
Klasse	Risiko	t/ha * a nach USLE
1:	sehr gering	0,00–0,25 (incl. Siedlungsflächen, Gewässer)
2:	gering	0,25–0,50
3:	mittel	0,50–1,50
4:	hoch	1,50–3,00
5:	sehr hoch	> 3,00

Um nun die Modellierung der Erosionsgefährdung nach der USLE durchzuführen, müssen die deckungsgleichen Rasterkarten der sechs Faktoren lediglich miteinander multipliziert werden. Das Resultat dieser sukzessiven Multiplikation ist eine Karte der potentiellen Bodenabtragsmengen in t/ha * a, die durch eine abgestufte Klassenbildung in eine Karte des Erosionsrisikos überführt wurde. Die Bildung der Klassen erfolgte unter dem Gesichtspunkt möglichst wenig Information und Aussagekraft zu verlieren (Tab. 1), d. h. fielen mehrere Felder einer Nutzungskategorie in den Bereich einer Größenordnung des ermittelten Abtrags, so wurde die Klasse derart gewählt, daß sie diese Bereiche vollständig einschließt. Die Relation zwischen den Klassen, also die Abstufung in niedriges und höheres Risiko, bleibt letztendlich von der Größe der Klassen unbeeinflusst. In die Klasse 1 sehr geringes Risiko fallen alle Pixel die in der Ergebniskarte den Wert 0 besitzen. Da in der Realität auf allen Flächen, selbst bei absolut horizontaler Lagerung, ein Bodenabtrag in gewissem Umfang stattfindet, dürften solche Pixelwerte eigentlich nicht auftreten. Hierzu zählen jedoch auch die Flächen, die von Straßen, Gewässern und Siedlungen eingenommen werden, auf denen selbstverständlich keine Erosion stattfinden kann. Ebenso traten einige Flächen unter der Kategorie Steineichenwälder auf, die Werte in der Größenordnung von $< 0,00005$ t/ha * a aufwiesen. Es wurde jedoch darauf verzichtet, eine zusätzliche Klasse mit dem Wert 0 zu bilden, da im Zuge des Klassifikationsverfahrens durch Rundungsfehler zwangsläufig keine eindeutige Trennung zwischen den genannten Flächen der Steineichenwälder und den Siedlungs- bzw. Gewässerflächen möglich wäre. Dies hat zur Folge, daß die Klasse 1 des Erosionsrisikos automatisch in geringem Umfang überbewertet wird, da sie die zusätzlichen Flächenanteile der Gewässer und der Siedlungsflächen, einschließlich der Straßen, enthält. Bei der geringen Gesamtausdehnung der Gewässer und Siedlungsflächen im Untersuchungsgebiet entsteht jedoch keine wesentliche Beeinträchtigung der Risiko-Verteilung.

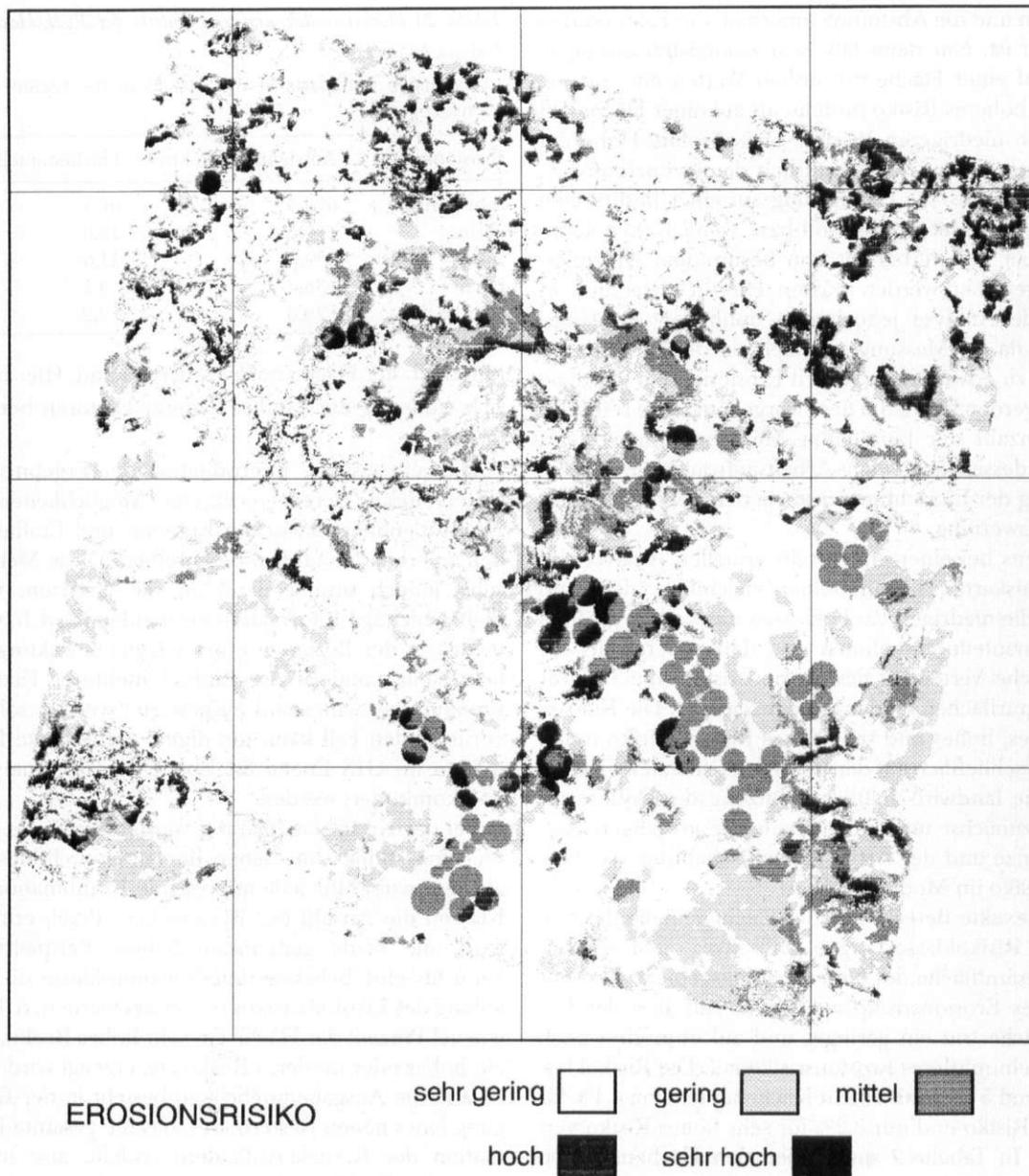


Abb. 6: Klassifiziertes Erosionsrisiko für das Untersuchungsgebiet
Classified erosion risk for the region under investigation

Das Ergebnis der Modellierung, die Karte des klassifizierten Erosionsrisikos für das Untersuchungsgebiet, ist in Abbildung 6 dargestellt. Als Ergebnisse werden nicht tatsächliche Abtragswerte angegeben, sondern nur Intensitätsskalen. Die absolute Höhe der Rechenergebnisse nach der USLE ist hierbei nicht von Belang, denn es wurde nur eine Abstufung der gesamten Bandbreite der Ergebnisdaten vorgenommen. Daß die Abstufung in höheres und niedrigeres Risiko in jedem Fall gegeben ist, d. h. daß das Verhältnis der

Werte untereinander korrekt ist, impliziert der Aufbau der Modellformel, die ja auf empirisch belegten Beziehungen beruht. Beispielsweise erhöht ein großer Hangneigungswinkel auf einer bestimmten Fläche über einen hohen S-Faktor das Ergebnis, während ein niedriger C-Faktor, bedingt durch die hohe Schutzfunktion dichter Vegetation, verringernd wirkt. Ob also das Ergebnis eine Bandbreite von 0 bis 10 t/ha * a oder 1 bis 25 t/ha * a aufweist, ist zunächst zweitrangig, solange die einzelnen Faktoren gewissenhaft erhoben

wurden und die Abstufung innerhalb der Faktorkarten korrekt ist. Nur dann läßt sich zweifelsfrei aussagen, daß auf einer Fläche mit hohen Werten ein entsprechend höheres Risiko besteht, als auf einer Fläche mit deutlich niedrigeren Werten. Die absolute Höhe der Abtragungsmengen ist natürlich dann von Interesse, wenn definitiv die Gefährdung auf einer bestimmten Fläche bewertet werden soll bzw. wenn Entscheidungen über Tolerierbarkeit von bestimmten Nutzungsarten getroffen werden müssen. Hierfür bietet die vorliegende Analyse jedoch den optimalen Ausgangspunkt, da die Messungen gezielt auf den Flächen mit einem zu erwartenden hohen Erosionsrisiko durchgeführt werden können. Diese Vorgehensweise reduziert die Anzahl der benötigten Meßeinrichtungen und infolgedessen auch den Arbeitsaufwand für die Betreuung der Einrichtungen sowie den Zeitaufwand für die Auswertung.

Bereits bei einer ersten rein visuellen Analyse der Ergebniskarte ist unmittelbar ersichtlich, daß zum einen die niedrigen Risikoklassen die weitaus größten Flächenanteile einnehmen und daß andererseits die räumliche Verteilung des Erosionsrisikos die Struktur der Agrarflächen eindeutig nachzeichnet. Die Klassen mittleres, hohes und sehr hohes Erosionsrisiko treten fast ausschließlich auf den agrarisch genutzten Flächen auf. Die landwirtschaftliche Nutzung des Bodens erhöht, zunächst unabhängig von der jeweiligen Kulturpflanze und der Art der Bewirtschaftung, das Erosionsrisiko im Modellergebnis.

Die exakte Berechnung der Flächenanteile der einzelnen Risikoklassen ergab, daß etwas mehr als 66% der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes ein sehr geringes Erosionsrisiko aufweisen. Auf 15% der Gesamtfläche tritt ein geringes und auf immerhin noch 11,6% ein mittleres Erosionsrisiko auf. Die Risikoklassen 4 und 5 sind mit einem Flächenanteil von 4,1% für hohes Risiko und nur 3,2% für sehr hohes Risiko vertreten. In Tabelle 2 sind neben den Flächenanteilen auch die Ausdehnungen der Risikoklassen auf Basis von Quadratkilometern bilanziert.

Die Bereiche erhöhten Erosionsrisikos beschränken sich auf einige zersplitterte Areale im nördlichen Drittel, das ein eher steileres Relief besitzt, auf große zusammenhängende Abschnitte im Umfeld von Ossa de Montiel und in der SE-Ecke des Untersuchungsgebietes, sowie auf schmale Bereiche entlang der Talflanken der Flußsysteme. Sehr deutlich heben sich besonders die kreisförmigen Beregnungsflächen von ihrer Umgebung, überwiegend Matorralgebiete und Getreidefelder, ab, d. h. sie weisen tendenziell ein erhöhtes Erosionsrisiko auf. Gerade bei den sehr großen Beregnungsflächen zeigt sich jedoch, daß die Höhe des Risikos

Tabelle 2: *Flächenausdehnung und Anteile der Risikoklassen im Untersuchungsgebiet*

Extension and parts of risk classes in the region under investigation		
Erosionsrisiko	Ausdehnung in km ²	Flächenanteil in %
sehr gering	624,4	66,1
gering	1141,7	15,0
mittel	109,3	11,6
hoch	38,7	4,1
sehr hoch	29,6	3,2

innerhalb der Fläche noch variieren kann. Hier macht sich eindeutig der Einfluß anderer Faktoren bemerkbar.

Die rein visuelle Interpretation der Ergebniskarte bietet oftmals bereits recht gute Möglichkeiten, die Zusammenhänge zwischen Ergebnis und Einflußgrößen zu erkennen und zu beschreiben. Diese Methode stößt jedoch immer dann an die Grenzen, wenn mehrschichtige Information vorhanden ist, d. h. wenn nicht nur der Bezug zu einer einzelnen Faktorgroße hergestellt, sondern der Einfluß mehrerer Faktoren simultan betrachtet und ausgewertet werden soll. Im vorliegenden Fall kann die digital aufbereitete Information im GIS Ebene für Ebene objektiv analysiert und kombiniert werden.

Bei der Kreuzklassifikation werden sämtliche Klassen eines Bildes mit denen des anderen Bildes verglichen, wobei für jede auftretende Kombination der Klassen die Anzahl der Rasterzellen (Pixel) ermittelt wird, die beide gemeinsam haben. Beispielsweise kann für eine beliebige Landnutzungs-kategorie die Verteilung des Erosionsrisikos berechnet werden, d. h. auf wieviel Prozent der Fläche ein sehr hohes Risiko, bzw. ein hohes oder mittleres Risiko etc. erzeugt wird. Eine zusätzliche Ausgabemöglichkeit besteht in der Erzeugung eines neuen Rasterbildes, das die gesamte Information der Kreuzklassifikation enthält, also in der Legende alle Überschneidungen der Klassen beider Bilder auflistet. Da sich jedoch mit zunehmender Anzahl der Klassen in den zu vergleichenden Bildern die Kombinationsmöglichkeiten und somit die Anzahl der neuen Legendenpunkte vervielfältigt, ist eine analoge Ausgabe selten befriedigend. Das kombinierte Bild kann vielmehr als Grundlage für die Digitalisierung von markanten Problembereichen dienen, wie etwa der Überschneidung kritischer Landnutzungsarten mit hohen Hangneigungswinkeln. Über das RECLASS-Verfahren lassen sich direkt alle Rasterzellen einer zu untersuchenden Klasse isolieren und in einer gesonderten Karte darstellen. Diese Analysemöglichkeit liefert zwar nicht die vielfältige Information der Kreuz-

Tabelle 3: Prozentuale Verteilung des Erosionsrisikos auf die Landnutzungsclassen

Distribution of the erosion risk depending on the land use (in percentages)

Landnutzung	Erosionsrisiko				
	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Gewässer/Siedlung	100,0	–	–	–	–
Steineichenwald	100,0	–	–	–	–
Matorral II	98,6	1,3	0,1	–	–
Matorral I	95,1	3,7	1,2	–	–
Kiefernforst	77,6	10,0	10,0	2,4	–
Trockenfeldbau	22,4	41,6	20,9	9,9	5,2
Beregnungsfeldbau	0,1	12,4	59,0	11,1	17,4
Oliven	10,0	38,6	28,7	9,9	13,7
Wein	9,3	29,6	38,3	10,5	12,3

Matorral II: Matorral hoch/dicht

Matorral I: Matorral niedrig

tabellen, bietet dagegen aber die Möglichkeit, den Raumbezug herzustellen. Denn die Angaben in den Tabellen zeigen nur, wieviele Rasterzellen einer Klasse sich mit denen einer anderen Klasse im Bezugsbild überdecken, erstellen sozusagen die Schnittmenge zwischen den Klassen zweier Bilder. Erst das Rasterbild der Kreuzklassifikation bietet die Möglichkeit zu analysieren, in welchen Abschnitten des untersuchten Gebietes kritische Kombinationen auftreten. Auf diese Information kann gerade aus planerischer Sicht nicht verzichtet werden.

Der Bearbeitungsschwerpunkt in den nun folgenden Abschnitten wird auf der Auswertung der Kreuztabellen zwischen der Risikokarte und den einzelnen Faktormerkmalen liegen. Die Auswertung der in IDRISI erstellten Kreuztabellen kann immer in zwei Richtungen geschehen. Einerseits kann das absolute Erosionsrisiko ermittelt werden, indem die Gesamtfläche, die eine Risikoklasse abdeckt als Bezugsbasis (= 100%) angesetzt wird und die Prozentanteile der einzelnen Faktorklassen an ihr berechnet werden, andererseits kann das relative Erosionsrisiko bestimmt werden, wenn die Flächen, die die einzelnen Faktorklassen abdecken als Basis für die Berechnung angesehen werden und die Relation des Erosionsrisikos innerhalb der betrachteten Klasse in Prozent wiedergegeben wird. Die zuerst genannte Möglichkeit wird in den folgenden Abschnitten dargestellt werden, da sich die Prozentangaben in diesem Fall auf die tatsächlichen Flächengrößen beziehen, auf denen eine Überschneidung einer Risikoklasse mit einer Faktorklasse stattfindet. Dies bedeutet, daß eine Faktorklasse mit großen Anteilen an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes automatisch auch die Anteile innerhalb der Risikoklassen dominieren wird. Bei der Analyse und Isolierung des spezifischen Erosionspotentials

der verschiedenen Landnutzungsarten, würde diese Auswertungsmethode zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen, indem häufig auftretende Faktorklassen überbewertet werden würden. Bei der Untersuchung und Bewertung der tatsächlichen Auswirkungen dieser Erosionspotentiale im Untersuchungsgebiet und zur Bewertung von Szenarien ist diese Anwendung jedoch unbedingt notwendig. Denn selbst eine Landnutzungsart, die im Vergleich zu anderen Landnutzungen hochgradig erosionsgefährdend ist, kann dennoch toleriert oder gar vernachlässigt werden, wenn sie absolut geringe Flächenausdehnungen aufweist oder etwa nur punktuell auftritt. Dagegen kann eine Landnutzung mit vergleichsweise geringem Erosionspotential auf großen zusammenhängenden Flächen langfristig beachtliche Schäden erzeugen und stärker zur Landschaftsdegradierung beitragen, als die zuerst genannte Variante.

Bei der Berechnung des relativen Erosionsrisikos ist die prozentuale Verteilung der Risikoklassen innerhalb der Faktorklassen unabhängig von der flächenmäßigen Ausdehnung der Faktorklasse. Auf diese Weise werden die spezifischen Verhältnisse des Erosionspotentials jeder Faktorklasse wiedergegeben, d. h. es wird beispielsweise ermittelt mit welchen Flächenanteilen der Trockenfeldbau ein hohes Erosionsrisiko erzeugt. Nur so sind die berechneten Prozentangaben unabhängig von der absoluten Größe der jeweiligen Faktorklasse im Untersuchungsgebiet. Tabelle 3 gibt die Verteilung des relativen Erosionsrisikos für die jeweiligen Landnutzungsarten des Untersuchungsgebietes an. Aus den Ergebnissen der Berechnung des relativen Risikos konnten nun zwei der im Untersuchungsgebiet relevanten Einflußfaktoren isoliert werden, die besonders fördernd auf die Erosionsgefährdung einwirken. Um letztendlich jedoch das

Tabelle 4: Flächenanteile der Landnutzungsklassen am Erosionsrisiko (Angaben in km²)Amount of area for the single land use classes related to erosion risk (values in km²)

Landnutzung	Erosionsrisiko				
	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
Gewässer/Siedlung	54,4	–	–	–	–
Steineichenwald	174,4	–	–	–	–
Matorral II	280,8	3,7	0,3	–	–
Matorral I	44,1	1,7	0,6	–	–
Kiefernforst	4,2	0,5	0,5	0,2	–
Trockenfeldbau	63,5	118,2	59,4	28,4	14,8
Beregnungsfeldbau	0,1	7,8	36,9	6,9	10,9
Oliven	0,4	1,7	1,3	0,4	0,6
Wein	2,5	8,1	10,3	2,8	3,3
S	624,4	141,7	109,3	38,7	29,6

tatsächliche Ausmaß der Gefährdung bewerten zu können, muß das absolute Erosionsrisiko, das von diesen Faktoren ausgeht, analysiert werden. Dies bedeutet, daß das spezifische bzw. relative Erosionsrisiko eines Faktors auf die von ihm bedeckte Fläche bezogen werden muß, um abschätzen zu können, ob ein Faktor trotz hohem Gefährdungspotential bei einer geringen flächenmäßigen Ausdehnung dennoch toleriert werden kann. Die Faktoren, bei denen sich in den vorangegangenen Abschnitten ein deutlicher Bezug zur Höhe des relativen Erosionsrisikos abzeichnete, waren die Landnutzung und, zumindest ansatzweise, die Hanglängen. Beide Faktoren sind durch den Menschen leicht veränderbar und daher im Hinblick auf das anthropogen verursachte Erosionsrisiko von großem Interesse. Für diese beiden Faktoren wird in den folgenden Abschnitten das absolute Erosionsrisiko berechnet und bewertet.

Für den Faktor Landnutzung ist eine Auswertung der Kreuzklassifikation in Tabelle 4 aufgeführt. Die Tabelle erklärt also, mit welchen tatsächlichen Flächengrößen eine Faktorklasse an der Gesamtfläche einer Risikoklasse beteiligt ist. Bei der Berechnung des relativen Erosionsrisikos, das eine Faktorklasse unabhängig von ihrer tatsächlichen flächenmäßigen Ausdehnung erzeugt, wurde eine Verfälschung der Ergebnisse durch die Größe der Klasse vermieden. Bei der Berechnung des absoluten Erosionsrisikos wird diese Verfälschung beabsichtigt, da nun die tatsächlichen Auswirkungen des zuvor ermittelten relativen Risikos der einzelnen Faktorklassen auf das Untersuchungsgebiet betrachtet werden sollen. Auf diese Weise soll aufgedeckt werden, ob nicht etwa Faktorklassen, mit nur geringen relativen Anteilen im oberen Bereich des Risikos, über große absolute Flächengrößen dieser Risikoklassen dennoch in größerem Umfang am Ero-

sionsrisiko beteiligt sind, als absolut kleine Klassen mit höheren relativen Anteilen in diesen Risikoklassen.

Die Risikoklasse 1 sehr geringes Risiko wird flächenmäßig von der naturnahen Vegetation dominiert. An den Risikoklassen 2 bis 5, also geringes bis sehr hohes Risiko, besitzt jeweils der Trockenfeldbau die größten Flächenanteile. Diese Landnutzungskategorie ist für etwa die Hälfte des im Untersuchungsgebiet auftretenden sehr hohen Erosionsrisikos verantwortlich. Dies bedeutet, daß der Trockenfeldbau, der relativ gesehen auf nur etwa 5% seiner Flächen ein sehr hohes Risiko erzeugt (Tab. 3), aufgrund seiner großen Ausdehnung dennoch mehr Flächen unter sehr hohem Risiko erzeugt, als die risikoreicheren Landnutzungsarten. Dagegen ist der Beregnungsfeldbau auf nur etwa 37% der Flächen unter sehr hohem Risiko als Versucher anzusehen. Da die Beregnungsflächen innerhalb des Untersuchungsgebietes insgesamt nur 42 km² abdecken, während der Trockenfeldbau bestehend aus Getreideanbauflächen und Brachfläche etwa 284 km² bedeckt, kann aus dem großen Anteil des Beregnungsfeldbaus an der Gesamtfläche der Risikoklasse 5 sein großes Erosionspotential abgelesen werden. Gleiches gilt für die Flächen unter Weinanbau, die trotz der geringen Gesamtausdehnung von etwa 27 km² dennoch beachtliche Flächenanteile am sehr hohen Erosionsrisiko besitzen. Aus diesen Ergebnissen ist unmittelbar ersichtlich, daß eine Ausweitung der Beregnungsflächen zu einer Erhöhung der Gefährdung führen muß, da sich das Erosionsrisiko im Vergleich zu anderen Landnutzungsarten überproportional erhöht.

Festzuhalten bleibt, daß im Hinblick auf die Degradierung der Landschaft und der Böden der flächenmäßig dominierende Trockenfeldbau in der Bilanz die größten Risiken verursacht. Die Flächen unter Bereg-

Tabelle 5: Flächenanteile der Hanglängenklassen am Erosionsrisiko (Angaben in km²)Areal dimension of the classes of slope length liable to erosion risk (values in km²)

Hanglängenklassen in m	Erosionsrisiko				
	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
30	546,4	30,5	17,9	3,7	3,1
100	4,0	2,0	1,4	0,2	0,1
200	13,5	6,8	5,4	1,4	0,7
300	15,3	12,7	8,1	4,1	1,9
400	11,5	9,6	7,2	4,2	1,6
500	10,3	21,1	11,5	5,9	2,2
600	5,2	12,6	7,8	3,9	2,5
700	3,8	5,3	5,7	3,2	2,1
800	3,6	10,3	13,1	4,1	3,4
900	3,9	9,7	8,9	2,9	4,2
1000	1,6	2,8	3,8	0,9	1,2
1100	1,9	4,8	6,3	2,5	3,0
1200	0,5	2,4	2,2	0,6	1,4
1300	0,4	1,2	3,5	0,3	0,3
1400	1,5	3,0	4,2	0,4	1,0
1500	0,2	0,5	0,4	0,04	0,03
1600	0,15	0,2	0,1	0,1	0,4
1700	0,1	1,7	1,0	0,3	-
1900	0,1	1,9	0,01	-	-
2000	0,05	2,2	0,4	-	-
2200	0,4	0,5	0,5	0,05	0,6

nung oder etwa unter Weinanbau erzeugen trotz eines hohen spezifischen Risikos durch ihre geringe Flächenausdehnung insgesamt weniger Risiko. Dies gilt jedoch nur in bezug auf das gesamte Untersuchungsgebiet. Für die einzelnen Flächen unter diesen Nutzungen besteht dennoch ein höheres Erosionsrisiko, mit allen bekannten Folgen für die mittel- und langfristige Erhaltung der Produktivität, die zunächst der Besitzer zu tragen hat.

In der Tabelle 5 sind die Flächengrößen dargestellt, auf denen die einzelnen Hanglängenklassen das jeweilige Erosionsrisiko verursachen.

Für das gesamte Untersuchungsgebiet dominieren Feldlängen zwischen 300 und 900 m Länge. Eine eindeutige Tendenz zur Erhöhung des Risikos bei Zunahme der Feldlänge läßt sich nicht belegen. Die Hanglängenklassen 1600 m und 2200 m, die bei der Untersuchung des relativen Erosionsrisikos als risikoreich identifiziert werden konnten, stellen durch ihre geringe Gesamtfläche keine große Belastung für das Untersuchungsgebiet dar. Vielmehr liegt das Hauptgewicht der Gefährdung auf den Hanglängen unter 1000 m. Die Gegenüberstellung der agrarischen Landnutzungsarten mit den Hanglängenklassen über eine Kreuzklassifikation ergibt, daß die Beregnungsflächen überwiegend Hanglängen von 800, 900 und 1100 m aufweisen, während der Trockenfeldbau sein Haupt-

gewicht mit einer größeren Spannweite auf Längen zwischen 200 und 900 sowie auf 1100 m legt, wobei auch größere Hanglängen mit geringen Anteilen vorhanden sind. Die Landnutzungskategorie Beregnungsfeldbau besitzt oberhalb von 1400 m im gesamten Untersuchungsgebiet keine Flächen mehr. Die Konzentration der Hanglängen der Beregnungsflächen auf einen vergleichsweise engen Bereich hat technologische Ursachen, da für den effektiven Einsatz der Kreisberegnungsanlagen gewisse Ober- und Untergrenzen der Felldradien existieren (HANKE 1982). Zwischen den Hanglängen, der jeweiligen Nutzungsform und der Höhe des Erosionsrisikos läßt sich also kein eindeutiger Bezug herstellen. Im Bereich der Hanglängen von 800 bis 1100 m besitzen Trockenfeldbau und Beregnungslandwirtschaft ähnlich große Flächen, so daß hier auch die Anteile am Erosionsrisiko ähnlich groß sein könnten. Um diese Fragestellung zu untersuchen, wurde die Verteilung dieser Hanglängen auf die beiden Landnutzungskategorien aus der Kreuzklassifikation isoliert und in einer erneuten Kreuzklassifikation den Risikoklassen gegenübergestellt. Auf diese Weise konnte untersucht werden, für welches Erosionsrisiko diese Nutzungsformen bei der jeweiligen Hanglänge verantwortlich sind.

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse nur auszugsweise dargestellt, da die vollständig Kreuztabelle insgesamt

Tabelle 6: Flächenanteile des Trockenfeldbaus sowie des Beregnungsfeldbaus am Erosionsrisiko in verschiedenen Hanglängenbereichen (Angaben in Prozent)

Areal dimension of dry farming and irrigation farming related to erosion risk for different slope lengths (values in percentages)

Hanglängenklassen in m	Nutzung	Erosionsrisiko				
		sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
800	T	0,1	7,0	3,8	5,7	2,8
	B	–	–	7,2	4,1	6,4
900	T	0,1	6,2	3,2	5,3	6,7
	B	–	–	4,0	2,0	6,1
1000	T	–	1,8	1,0	1,5	1,2
	B	–	–	2,3	0,7	2,8
1100	T	0,1	3,2	2,1	3,1	3,5
	B	–	–	3,6	2,6	5,7
1200	T	–	1,7	1,1	0,6	1,8
	B	–	–	1,0	0,8	2,9
1300	T	–	0,8	2,1	0,4	1,0
	B	–	–	1,2	0,5	0,1
1400	T	–	2,1	1,6	0,9	2,8
	B	–	–	2,1	0,1	0,2

T: Trockenfeldbau

B: Beregnungsfeldbau

320 neue Klassen umfaßt. Die Ergebnisdarstellung beschränkt sich auf die Hanglängenklassen 800 bis 1400 m. Die Prozentangaben beziehen sich auf die Fläche der einzelnen Risikoklassen, repräsentieren also das absolute Erosionsrisiko. Innerhalb der Tabelle lassen sich die Werte jedoch nicht spaltenweise auf 100% aufsummieren, da nicht alle Hanglängenklassen und Landnutzungsarten aufgeführt wurden. Für die Hanglänge 100 bis einschließlich 700 m werden sämtliche Risikoklassen durch den Trockenfeldbau deutlich dominiert. Erst im Bereich zwischen 800 bis 1400 m besitzt der Beregnungsfeldbau teilweise größere Flächenanteile an den Klassen mittleres, hohes und sehr hohes Risiko. In den Klassen sehr geringes und geringes Risiko deckt der Trockenfeldbau über alle Hanglängen die größten Flächen ab. Der Beregnungsfeldbau ist in diesen Klassen nicht oder nur mit kleinen Flächen vertreten. Gerade im Bereich des mittleren und vor allem des sehr hohen Risikos sind die Flächen, die der Beregnungsfeldbau belegt, teilweise um den Faktor 2 größer als die Anteile des Trockenfeldbaus. Diese Ergebnisse müssen vor dem Hintergrund der Gesamtfläche der beiden Landnutzungskategorien bewertet werden, denn die Gesamtfläche des Beregnungsfeldbaus ist etwa um den Faktor 7 kleiner, als die des Trockenfeldbaus. Unter Berücksichtigung dieser Fakten ist es erschreckend, daß die Risikoanteile der Flächen unter Beregnung gerade bei Hanglängen von 800 oder 1000 m, verglichen mit den Anteilen des Trockenfeldbaus, doppelt bzw. mehr als doppelt so

groß sind. Diese Tatsachen sind zu berücksichtigen, wenn über eine Ausweitung der Beregnungsflächen auf dem Campo de Montiel nachgedacht wird.

In den folgenden Abschnitten sollen auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse verschiedene Entwicklungsmöglichkeiten bezüglich der zu erwartenden Landnutzungsveränderungen und den daraus resultierenden veränderten Risiken des Bodenabtrags nachgezeichnet werden. Derartige Szenarien lassen sich mit der für die Modellierung aufbereiteten Datenbasis gut bewerkstelligen. Die einzelnen Rasterdatensätze können entweder partiell durch zusätzliches Digitalisieren von Information bzw. durch ein selektives Zuweisungsverfahren, bei dem nur einige Klassen geänderte Werte erhalten, verändert werden, oder aber über arithmetische Verfahren vollständig manipuliert werden. Auf diese Weise können tatsächliche oder eben vermutete Veränderungen eines Faktors bzw. mehrerer Faktoren bei einem erneuten Modelldurchlauf in der Ergebniskarte ihren Ausdruck finden. Anschließend besteht die Möglichkeit, die Szenarien mit der ursprünglichen Ergebniskarte, quasi dem status quo der Erosionsgefährdung, zu vergleichen. Somit können die möglichen Auswirkungen der Landnutzungsveränderungen vorab bestimmt werden und mögliche Alternativen in die Entscheidungen mit einbezogen werden.

Als denkbare Szenario wird die weitere Zunahme der Beregnungsflächen simuliert. Dieser Trend, die Umwandlung von Trockenfeldbau in Beregnungskulturen, ist eine in der gesamten Mancha anzutreffende

Entwicklung. Als Alternative hierzu soll eine Null-Variante gerechnet werden, bei der alle aktuellen Berechnungsflächen durch Trockenfeldbau ersetzt werden sollen.

Szenario I: Vollständige Umwandlung des Trockenfeldbaus in Berechnungskulturen

Für das erste Szenario ist eine Abwandlung der Rasterkarte der C-Faktoren notwendig. Hierbei müssen alle Flächen des Trockenfeldbaus nun mit dem C-Faktor für den Berechnungsfeldbau belegt werden. Darüber hinaus muß die Karte der R-Faktoren modifiziert werden, die ja den erosiven Einfluß des zusätzlichen Niederschlagswassers quantifiziert. Beides ist über das RECLASS-Verfahren möglich, bei dem sequentiell neue Faktorwerte zugewiesen werden können. Für die veränderte Karte der R-Faktoren müssen zunächst die Umrisse der Flächen unter Trockenfeldbau aus der C-Faktorkarte übertragen werden. Dies geschieht über ein einfaches OVERLAY-Verfahren, an das sich die Zuweisung der neuen Faktorwerte anschließt. Die veränderten Faktorwerte sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Im Zuge des RECLASS-Verfahrens werden alle Rasterzellen, die zuvor mit dem Wert des C-Faktor des Trockenfeldbaus belegt waren, nun mit dem entsprechenden Wert der Berechnungskulturen versehen. Für das Rechenverfahren zur Modellierung der Erosionsgefährdung genügt dieser Schritt. Das Rasterdatenmodell kann jedoch keine Abwandlung der Parzellenform leisten, so daß das Szenario auch optisch der Form von Kreisberechnern entspricht. Das Szenario I muß als worst-case angesehen werden, da es mit dem beschriebenen Verfahren nur möglich ist, die gesamte Klasse des Trockenfeldbaus umzuwandeln. Eine partielle Umwandlung dieser Landnutzungsklasse durch das Digitalisieren willkürlich positionierter Kreisberechner könnte nicht als objektiv angesehen werden. Denn eine Vorhersage über die potentielle Lage von zukünftigen Kreisberechnern wäre rein spekulativ. Der Vorteil der hier praktizierten Methode ist, daß für die Gesamtfläche des Trockenfeldbaus die potentielle Gefährdung dargestellt wird, die bei einer Umwandlung in eine Berechnungskultur entstehen würde. Auf der Grundlage dieses Szenarios könnten Bereiche ausgewiesen werden, in denen eine Umwandlung tolerierbar ist oder eben unbedingt vermieden werden sollte. Diese Möglichkeit könnte die genannte Alternativmethode nicht bieten. Dennoch kann das vollständige Eintreten dieses worst-case-Szenario als sehr unwahrscheinlich angesehen werden.

Tabelle 7: Faktorwerte für Szenario I

Factor values for scenario I		
	Szenario I	aktuelle Situation
C-Faktor	0,56	0,28
R-Faktor	23,0	13,5 / 15,3 / 17,1

Die Karte in Abbildung 7 zeigt das Ergebnis der Modellrechnung auf Basis der USLE unter Zugrundelegung der genannten Veränderungen. Bei der ersten Betrachtung fällt unmittelbar auf, daß quasi alle agrarisch genutzten Flächen zumindest ein mittleres Risiko aufweisen. Der Anteil der Flächen unter geringem Risiko an der Gesamtflächen der landwirtschaftlich genutzten Flächen ist sehr gering. Durch die Vorgaben, die für das Szenario getroffen wurden, bleibt die Risikoverteilung auf den aktuell bereits bestehenden Berechnungsflächen unverändert. Die einzigen Veränderungen zur aktuellen Situation betreffen ausschließlich die Flächen des ehemaligen Trockenfeldbaus. Hier zeigt der Vergleich deutlich eine generelle Zunahme des Erosionsrisikos für alle Flächen. Es treten nun, vor allem im äußersten Nordosten, größere zusammenhängende Bereiche unter sehr hohem Risiko auf. Eine starke Veränderung des Risikos erfahren auch die Felder in der unmittelbaren Umgebung von Ossa de Montiel. Hier überwiegen jetzt das mittlere und das sehr hohe Risiko. Im südöstlichen Quadranten des Untersuchungsgebietes sind fast alle Flächen des Trockenfeldbaus vom geringen Erosionsrisiko in die Klasse des mittleren Risikos übergegangen. Tendenziell tritt für den Trockenfeldbau bei der simulierten Umwandlung in Berechnungskulturen ein um eine Klasse höher einzustufendes Erosionsrisiko ein. Die Tabelle 8 gibt ausschnittsweise das Ergebnis einer Kreuzklassifikation zwischen der Landnutzung und dem Ergebnis des Szenarios I wieder.

Die vollständige Umwandlung des Trockenfeldbaus verlagert den Schwerpunkt des Erosionsrisikos nach oben. Die Klasse 1 des Erosionsrisikos tritt nun überhaupt nicht mehr auf und mit 148,9 km² liegen mehr als 50% der Fläche des Trockenfeldbaus im Bereich des mittleren Risikos. Auch in der Klasse des höchsten Risikos hat sich die absolute Fläche mehr als verdreifacht.

Szenario II: Null-Variante; Umwandlung aktueller Berechnungsflächen in Trockenfeldbau

Das zweite Szenario soll die sogenannte Null-Variante repräsentieren, die von einem vollständigen

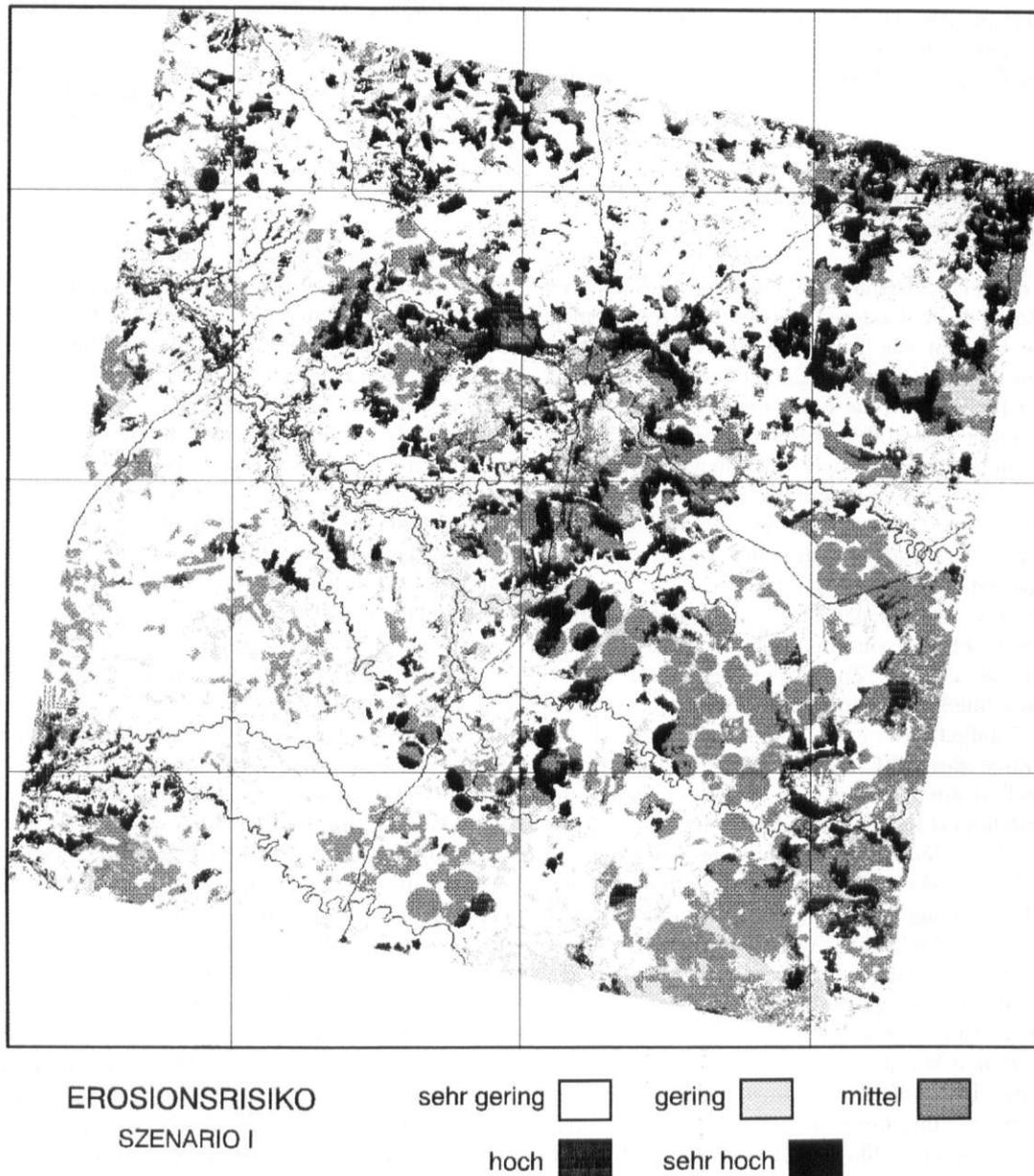


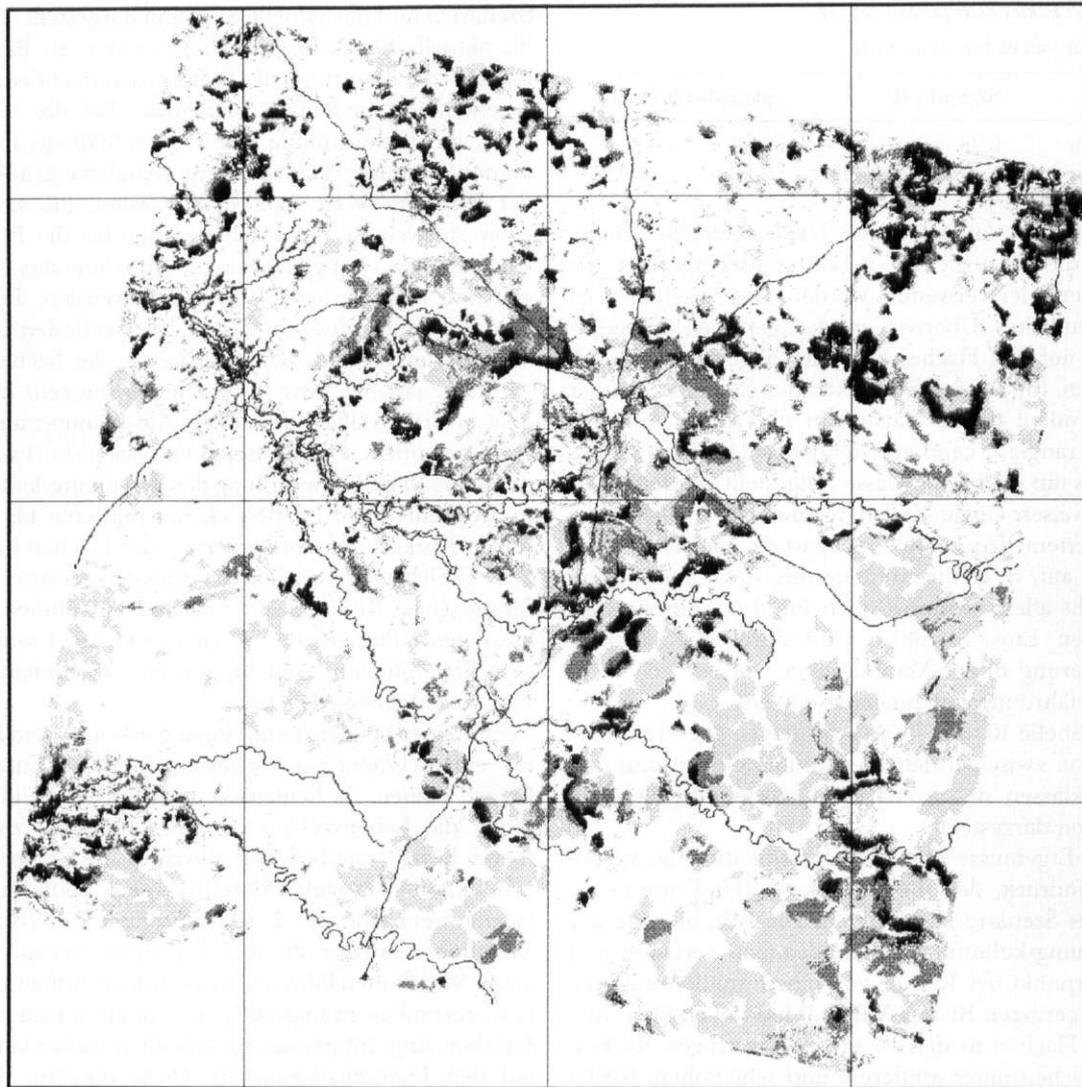
Abb. 7: Erosionsrisiko für Szenario I

Erosion risk for scenario I

Rückbau der Beregnungsflächen zu traditionellem Getreideanbau ausgeht. Diese Variante ist vor dem Hintergrund der immer knapper werdenden Grundwasserreserven in der Mancha (BARTH 1993; CEC Directorate General XII for Science, Research and Development 1991) zwar wünschenswert, jedoch unter Berücksichtigung der agrarpolitischen Maßnahmen und des zunehmenden Wettbewerbsdrucks für die Landwirtschaft im europäischen Umfeld eher unwahrscheinlich. In gewissem Umfang könnte dieses Szenario jedoch von alleine eintreten, wenn die geringer werdenden Wasservorräte in Zukunft tatsächlich eine zusätzliche Bewässerung nicht mehr zulassen.

Die Karte in Abbildung 8 zeigt das Ergebnis der Modellrechnung nach den Vorgaben des Szenario II (Tab. 9). Zur Aufbereitung der geänderten C-Faktorkarte mußte, ähnlich wie bei Szenario I, der C-Faktor für Trockenfeldbau über das RECLASS-Verfahren den Beregnungsflächen zugewiesen werden. Für die modifizierte R-Faktorkarte mußte lediglich die

Die Karte in Abbildung 8 zeigt das Ergebnis der Modellrechnung nach den Vorgaben des Szenario II (Tab. 9). Zur Aufbereitung der geänderten C-Faktorkarte mußte, ähnlich wie bei Szenario I, der C-Faktor für Trockenfeldbau über das RECLASS-Verfahren den Beregnungsflächen zugewiesen werden. Für die modifizierte R-Faktorkarte mußte lediglich die



EROSIONSRIKHO
SZENARIO II

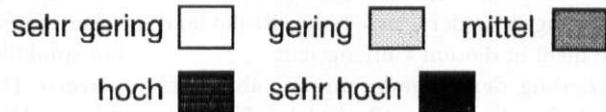


Abb. 8: Erosionsrisiko für Szenario II
Erosion risk for scenario II

Tabelle 8: Vergleich der Risikoverteilung für die Flächen unter Trockenfeldbau zwischen aktueller Situation und Szenario I (Angaben in km²)
Comparison of the risk distribution for the areas under dry farming related to the present situation and scenario I (values in km²)

	Erosionsrisiko				
	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
aktuelle Situation	63,5	118,2	59,4	28,4	14,8
Szenario I	-	36,0	148,9	45,1	54,1

Tabelle 9: Faktorwerte für Szenario II

Factor values for scenario II		
	Szenario II	aktuelle Situation
C-Faktor	0,28	0,56
R-Faktor	13,5 / 15,3 / 17,1	23,0

ursprünglich digitalisierte Niederschlagsverteilung ohne die zusätzlichen R-Faktoraufschläge für die Kreisberechner verwendet werden. Das Ergebnis zeigt ein deutliches Überwiegen des geringen Erosionsrisikos auf den Flächen der ehemaligen Beregnungskulturen. Im Vergleich zur aktuellen Situation, bei der ein Großteil dieser Flächen in der Klasse mittleres Risiko rangiert, kann eine tendenzielle Abnahme des Risikos um etwa eine Klasse festgestellt werden. Dennoch weisen einige Kreisberechnerflächen auch unter simuliertem Trockenfeldbau partiell ein sehr hohes Risiko auf, d. h. die Veränderung der Landnutzung ist nicht allein verantwortlich für das Auftreten des höchsten Erosionsrisikos. Und durch die alleinige Revidierung dieser Veränderungen lassen sich nicht alle Gefährdungspotentiale beseitigen.

In Tabelle 10 sind die Auswertungen der Kreuzklassifikation zwischen dem Beregnungsfeldbau und den Risikoklassen des Szenario II sowie der aktuellen Situation dargestellt.

Die Ergebnisse der Kreuzklassifikation bestätigen den Eindruck, den die Rasterkarte der Erosionsrisiken des Szenario II vermittelt. Die Rückführung der Beregnungskulturen in Getreideanbau verlagert den Schwerpunkt des Risikos von einem mittleren hin zu einem geringen Risiko. Mit 34,0 km² fallen über 50% dieser Flächen in den Bereich des geringen Risikos. Die Flächen unter mittlerem und sehr hohem Risiko sind auf etwa ein Drittel ihrer ehemaligen Ausdehnung zurückgegangen. In der Klasse hohes Risiko fand die Abnahme nicht in diesem Umfang statt.

Eine Bilanzierung der Veränderung der absoluten Erosionsrisiken für die Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes läßt einen Vergleich der gesamten Auswirkungen der beiden Szenarien zu. In Tabelle 11 sind die Flächenausdehnungen der Risikoklassen für die

Szenarien und die aktuelle Situation dargestellt. Wenn die aktuelle Situation des Erosionsrisikos als Bezugsbasis für die Bewertung der Szenarien verwendet wird, ergeben sich eindeutige Tendenzen. Für das Szenario I, die Umwandlung des Trockenfeldbaus in Beregnungskulturen, kann eine grundsätzliche Erhöhung der Erosionsrisiken festgestellt werden, die sich in einer Ausweitung der Flächengrößen für die Risikoklassen 3 bis 5 bei gleichzeitiger Abnahme des geringen und sehr geringen Risikos konkretisiert. Besonders im Bereich des sehr hohen Risikos finden große Veränderungen statt. Bei Realisierung des Szenario I würden zusätzlich etwa 40 km² unter ein sehr hohes Erosionsrisiko fallen, was einer Ausdehnung um ca. 130% entspricht. Das Eintreten von Szenario II würde durch die Rück-Umwandlung der Beregnungskulturen in Trockenfeldbau im Bereich des mittleren bis sehr hohen Risikos eine Verkleinerung der Flächen bewirken. Gleichzeitig würden die Klassen geringes und sehr geringes Risiko größere Flächen einnehmen. Die absoluten Unterschiede zwischen Szenario I und der aktuellen Situation sind verglichen mit Szenario II sehr viel stärker ausgeprägt.

Ein reiner Vergleich mit Vergangenheitswerten kann nur eingeschränkt zur Vorhersage künftiger Entwicklungen dienen, da heutzutage auch in der Landwirtschaft die Lebenszyklen einzelner Produkte zunehmend kürzer werden und durch reale Überschußproduktionen in vielen Bereichen eine Käufermarktsituation entsteht, die den Produzenten kurzfristig zu Variationen in der Produktionspalette zwingt. Derartige Variationen führen über geänderte Anbausorten bzw. -techniken zwangsläufig zu Veränderungen in der Landnutzung mit jeweils individuellen Auswirkungen auf den Landschaftshaushalt. Diese ohnehin dynamische Marktsituation wird gerade in der europäischen Landwirtschaft durch vielgestaltige Subventionspraktiken und Abnahmegarantien reguliert und verzerrt. Die hier vorgestellten Szenarien bieten vor diesem Hintergrund eher planerische Information, die zur antizipativen Bewertung von Folgeerscheinungen angestrebter Veränderungen herangezogen werden kann.

Tabelle 10: Vergleich der Risikoverteilung für die Flächen unter Beregnungsfeldbau zwischen aktueller Situation und Szenario II (Angaben in km²)

Comparison of risk distribution for areas under irrigation farming related to the present situation and scenario II (values in km²)

	Erosionsrisiko				
	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
aktuelle Situation	0,1	7,8	36,9	6,9	10,9
Szenario II	8,4	34,0	11,9	4,5	3,6

Tabelle 11: Vergleich der Flächenausdehnungen der Risikoklassen im Untersuchungsgebiet für Szenario I, Szenario II und die aktuelle Situation (Angaben in km²)Comparison of areal dimensions of risk classes for scenario I, II and the present situation in the region under investigation (values in km²)

Erosionsrisiko	Szenario I	Szenario II	aktuelle Situation
1: sehr gering	560,9	623,8	624,4
2: gering	59,6	167,9	141,7
3: mittel	198,9	84,4	109,3
4: hoch	55,5	36,3	38,7
5: sehr hoch	69,0	22,4	29,6

Der Konzeption der Arbeit entsprechend konnten über die Kombination verschiedener Datenebenen und Informationsquellen in Form von deckungsgleichen Rasterkarten in einem GIS die Einflüsse unterschiedlicher Landnutzungstechniken in Abhängigkeit von den naturräumlichen Gegebenheiten untersucht und bewertet werden. Die Modellierung der Erosionsgefährdung auf der Basis empirisch ermittelter Zusammenhänge zwischen den relevanten Einflußfaktoren und der Höhe des Bodenabtrags, und somit der Höhe des Erosionsrisikos ermöglichte es, gewisse Faktorkombinationen auszuweisen, die als erosionsfördernd gelten können. Grundsätzlich sollte das Erosionsrisiko, das von einem Landnutzungssystem erzeugt wird, in bezug zu der jeweiligen Flächenproduktivität gesehen werden. Denn die, im Vergleich zu den Berechnungskulturen geringe Flächenproduktivität des Trockenfeldbaus, verursacht durch das zwingende Brachejahr, rechtfertigt nicht den großen Anteil dieses Systems am Gesamtrisiko im Untersuchungsgebiet. Eine höhere Produktivität und somit auch ein höherer Flächenertrag beim Berechnungsfeldbau könnte die Installation von aufwendigen und damit kostenintensiven Erosionsschutzmaßnahmen ermöglichen, die trotz des höheren Produktivitätsniveaus das Erosionsrisiko auf das Maß des Trockenfeldbaus reduzieren könnten. Zu diesen Schutzmaßnahmen zählen neben dem Konturpflügen auch Investitionen in Beregnungsanlagen, die keine zusätzliche kinetische Energie erzeugen. Daß hier ein erheblicher technologischer Aufwand notwendig wird, ist evident. Es stellt sich die Frage, ob eventuelle staatliche Unterstützung durch Subventionierung der genannten Maßnahmen nicht ein günstigeres Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweisen würde, als ein nachträglicher Ausgleich der Verdienstauffälle bei erosionsbedingten Beeinträchtigungen des Erntevolumens.

Bezogen auf die Gesamtfläche könnte auf diese Weise eine deutliche Verbesserung der Risikosituation erzielt werden, wenn bei gleichzeitiger Intensivierung der Produktion mit erosionsminimierender Techno-

logie die Flächen des Trockenfeldbaus mit geringerer Produktivität aufgegeben werden. Auf diesen Flächen könnte durch die Sukzession von Matorralformationen ein zusätzlicher Ausgleich geschaffen werden. Voraussetzung ist jedoch, daß auf den intensiv bewirtschafteten Flächen die langfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und -mächtigkeit gewährleistet ist. Hierfür müßte eine Form der Erosionskontrolle eingeführt werden, die sich über ein Boden- bzw. Erosionsmanagement realisieren ließe. Voraussetzung ist jedoch, daß der Stellenwert des Bodens als Produktionsmittel erkannt und akzeptiert wird. Ansonsten würde diese Landnutzungsstrategie zu einer hochgradig technologisierten Variante der shifting cultivation verkommen, die sukzessive alle Flächen nutzt und degradiert. In den Forschungsschwerpunkten des BML (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten) der BRD haben derartige Überlegungen bereits Eingang gefunden. So werden hier Verfahren getestet, die ein ökonomisch vertretbares lokales Ressourcen-Management ohne erheblichen Arbeits- und Kostenaufwand ermöglichen. Hierzu zählen die GIS-gestützte Kombination und Auswertung von Boden- und Ertragsdaten sowie die Durchführung von Simulationsmodellen, die Veränderungen im Boden prognostizieren können, bzw. die Variabilität der Bodenfruchtbarkeit beschreiben können (KÜCKE u. SCHNUG 1995).

Vor dem Hintergrund der aktuellen Problematik der Wasserversorgung infolge einer seit Jahren betriebenen Übernutzung der Ressourcen (BARTH 1993) relativieren sich die angeführten Empfehlungen. Unter Einbeziehung dieser Thematik ist von einer weiteren Ausdehnung der Beregnungsflächen unbedingt abzusehen. Vielmehr sollte ein Rückbau dieses Systems in Richtung des Szenario II erfolgen. Jedoch fordern die Produzenten in dieser Region, ausgelöst durch die anhaltende Trockenheit der letzten Jahre, jetzt staatliche Maßnahmen zur Grundwassererschließung und zur Ausweitung der Bewässerung. Unter dem innenpolitischen Druck zur Minderung der aktu-

ellen existentiellen Bedrohung der Landwirtschaft in der Mancha besteht die Gefahr, daß Aspekte der langfristigen Sicherung der Ressourcen unberücksichtigt bleiben. Auf diese Weise sind zukünftige existentielle Bedrohungen unmittelbar vorprogrammiert. Es wird sich herausstellen, ob zuerst der Vorrat an Bewässerungswasser zur Neige geht, oder vielleicht schon früher die degradierten Böden eine weitere Bewirtschaftung unrentabel machen werden.

Danksagung: Die Feldkartierungen in Spanien und die Beschaffung der Satellitendaten wurden ermöglicht durch die Unterstützung des Lehrstuhls für Physische Geographie an der Universität Paderborn (Prof. H.-K. BARTH) im Rahmen des EFEDA-Projektes (European Field Experiment in a Desertification-threatened Area, EPOC-CT 90-0030) der Europäischen Union.

Literatur

- BARTH, H. K. (1993): Die Entwicklung des Bewässerungsfeldbaus in La Mancha, Spanien. In: POPP, H. u. ROTHER, K.: Bewässerungsgebiete im Mittelmeerraum. Passauer Schriften zur Geographie 13. Passau, 63-70.
- CASTILLOS, E. u. BELTRAN, R. (1984): Estudio agroclimatico de la region Castilla La Mancha. Madrid.
- Commission of the European Communities Directorate general XII for Science, Research and Development (1991): EFEDA: An ECHIVAL Field Experiment in Desertification-threatened Areas. Brüssel.
- DE ROO, A. P. J. (1993): Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using Geographical Information Systems. Utrecht.
- GRÜNEWALD, G. (1983): Länder und Klima - Europa/UDSSR. Wiesbaden.
- HANKE, B. (1982): Bewässerungstechnik. Berlin.
- IGME - Instituto Geologico y Minero de España (1975): Mapa geologico de España 1:50.000, Hoja 763 Sotuelamos. Madrid.
- (1976): Mapa geologico de España 1:50.000, Hoja 788 El Bonillo. Madrid.
- (1977): Mapa geologico de España 1:50.000, Hoja 814 Villanueva de la Fuente. Madrid.
- (1987): Mapa geologico de España 1:200.000 Hoja 62 Tomelloso. Madrid.
- KAPPAS, M. (1994): Fernerkundung - nah gebracht. Leitfaden für Geowissenschaftler. Bonn.
- KÜCKE, M. u. SCHNUG, E. (1995): Lokales Ressourcen Management. In: Forschungsreport Ernährung, Landwirtschaft, Forsten (Nr. 11), 26 - 29.
- MÜLLER, M. J. (1980): Handbuch ausgewählter Klimastationen der Erde. Trier.
- RAMOS, A. B. u. DE SANTA OLALLA MANAS, F. M. (1993): Vegetation, soil and landuse. In: BOLLE, H. J u. STRECKENBACH, B.: EFEDA Final Report. Berlin.