

LANDWIRTSCHAFT UND KLIMATISCHE TRENDS IM ZENTRALEN YARLONG TSANGPO-TAL, TIBET

Mit 13 Abbildungen, 5 Photos und 1 Tabelle

AXEL THOMAS und CHEN SHENBIN

Summary: Agriculture and climatic trends in the central Yarlong Tsangpo valley, Tibet

The Yarlong Tsangpo valley in southern Tibet is the centre of Tibetan farming. About 75% of the area is cultivated with local barley cultivars with some additional spring and winter wheat. With the exception of the Xigaze basin, cultivation is limited by seasonal flooding to higher ground on terraces, debris fans and small upslope areas in the valley. Generally favourable thermal and solar conditions in the subtropical high-altitude valley at elevations between 3,500–3,900 m are offset by low precipitation and high evapotranspiration rates. Previous temperature-based estimates of evapotranspiration rates underestimate the actual conditions considerably; annual Penman-Monteith evapotranspiration totals are estimated at 1,194 and 1,364 mm for Lhasa and Xigaze.

Based on long-term water balance calculations (1954–1990), the seasonal water demand of barley and wheat is estimated at 460–730 mm (580–770 mm) and 530–840 mm (660–920 mm) at Lhasa (and Xigaze, resp.). Mean total plant-available water during the growing season amounted to only 54–59% and 44–49% of the seasonal water demand (wheat and barley, resp.) at Lhasa and Xigaze, resp. and decreased by 12% and 4–8% during that period. Estimated water balance data therefore point to increasingly arid conditions in the region. A shift towards cultivating more drought-tolerant barley cultivars instead of wheat, and raising the effectiveness of irrigation systems are possible counter measures.

Zusammenfassung: Das Yarlong Tsangpo-Tal in Südtibet ist das Zentrum des tibetischen Ackerbaus. Lokale Gerstensorten nehmen neben Sommerweizen und Winterweizen ca. 75% der Getreideanbauflächen ein. Mit Ausnahme des Beckens von Xigaze beschränken sommerliche Hochwasser den Anbau überwiegend auf die Nutzung höhergelegener Terrassen, Schwemmfächer und vereinzelter Hanglagen. Den für ein subtropisches Hochtal mit mittleren Höhenlagen von 3.500–3.900 m günstigen thermischen und solaren Bedingungen stehen geringe Niederschläge und hohe Verdunstungsraten gegenüber, die von bisherigen temperaturgestützten Berechnungen der Verdunstung erheblich unterschätzt wurden. Jährliche Penman-Monteith-Evapotranspirationssummen für Lhasa und Xigaze betragen 1.194 und 1.364 mm.

Auf der Basis von langjährigen Wasserbilanzberechnungen ergibt sich zwischen 1954 und 1990 eine hohe Schwankungsbreite des saisonalen Wasserbedarfs für Gerste (460–730 mm bzw. 580–770 mm) und Weizen (530–840 mm bzw. 660–920 mm, jeweils in Lhasa und Xigaze). Damit werden in Lhasa im Mittel nur 54–59%, in Xigaze nur 44–49% des saisonalen Wasserbedarfs durch Niederschlag und Bodenwasser gedeckt. Diese Wasserbilanz hat in Lhasa im Beobachtungszeitraum um je 12% und in Xigaze zwischen 4% und 8% (Gerste bzw. Weizen) abgenommen. Die berechneten Wasserbilanzen weisen damit auf eine Verschiebung der Klimaverhältnisse zu arideren Bedingungen hin. Bevorzugter Anbau der trocken-toleranteren Gerste anstelle von Weizensorten und eine Instandsetzung der Bewässerungssysteme zur Eindämmung hoher Wasserverluste sind mögliche Gegenmaßnahmen zur Intensivierung der Bewässerungslandwirtschaft.

1 Einleitung

Das Hochland Tibets stellt einen der klimatisch extremsten Räume der Erde dar. In weiten Bereichen mit Höhen über 4.500 m ü. NN sind nur vergleichsweise kleine Gunsträume für den Ackerbau nutzbar. Dies betrifft in erster Linie das Tal des Yarlong Tsangpo, wie der Oberlauf des Brahmaputra in Tibet genannt wird (Abb. 1). Bei durchschnittlichen Höhen zwischen 3.500 und 3.900 m bieten die Talweitungen des Flusses die einzigen Flächen für großräumigen Ackerbau unter vergleichsweise vorteilhaften klimatischen und pedologischen Bedingungen. Mit dem schrittweisen Verfügbarwerden umfangreicherer Kli-

madaten und besserem Zugang zu dem aus politischen Gründen oft verschlossenen Tibet sind auch detailliertere Analysen u. a. der agrarökologischen Gesamtsituation möglich geworden. Da das Hochland von Tibet bei der Genese des asiatischen Monsunsystems eine entscheidende Rolle spielt, muss einer möglichen Rückkopplung zwischen Landnutzung und Klima und damit auch der Anbausituation dieser Region besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

In dieser Arbeit werden die wichtigsten klimatischen Grundzüge Tibets erläutert, soweit sie agrarklimatologische Bereiche berühren. Die klimatischen Trends der letzten Jahrzehnte werden besonders berücksichtigt. Aufbauend auf einer Beschreibung der Anbauregion,

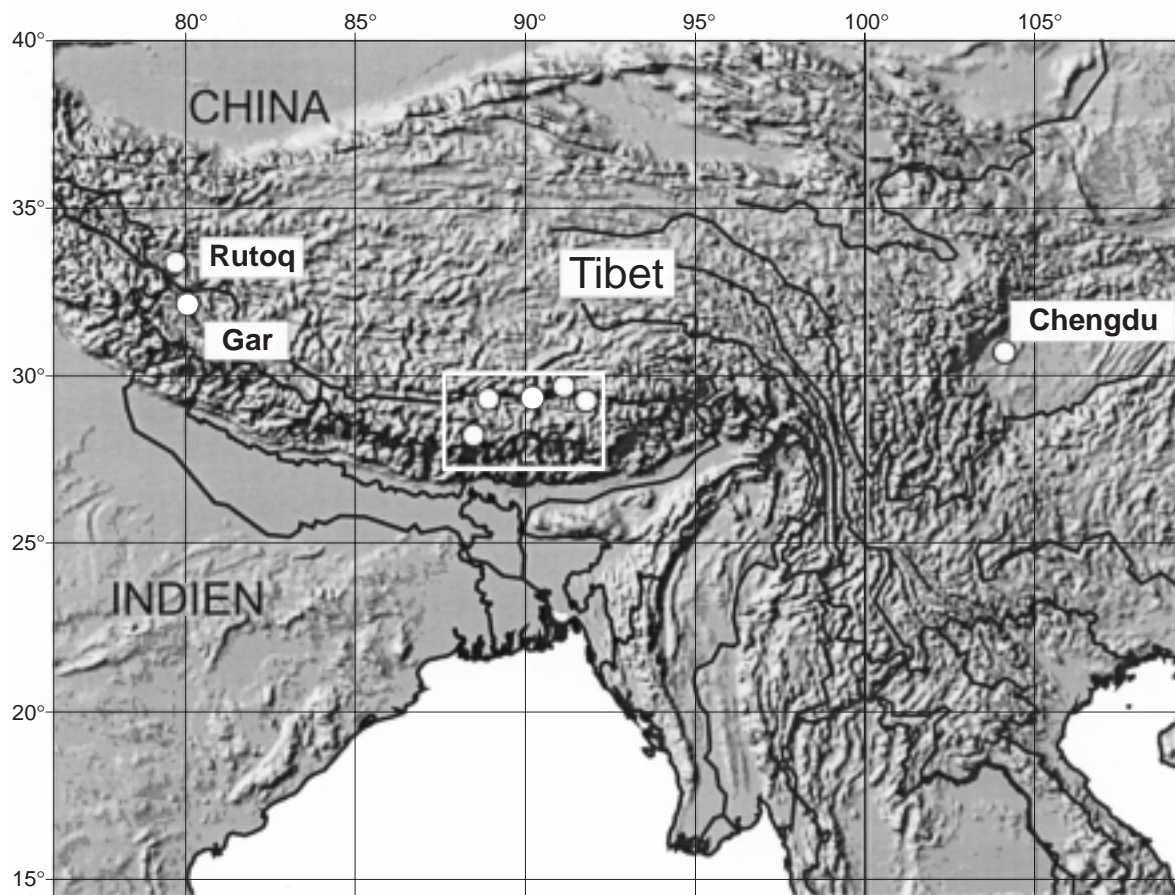


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes im Himalaya. Der Kasten markiert das Untersuchungsgebiet, Orte im Untersuchungsgebiet sind in Abb. 4 bezeichnet

General overview of the study area. The box marks the study area, places within the study area are detailed in Fig. 4

der verwendeten Getreidearten und ihrer agrarökologischen Rahmenwerte werden auf Basis langjähriger monatlicher Summen des Niederschlags und der Penman-Monteith-Evapotranspiration (PET) für zwei Stationen im mittleren Yarlung Tsangpo-Tal agrarökologische Wasserbilanzen für die beiden hauptsächlichen Getreidearten Tibets berechnet, ihre langjährigen Trends erläutert und Schlussfolgerungen für die landwirtschaftliche Entwicklung der Region gezogen.

Trotz der berechtigten Einwände von TÜTING (1991) zur Verwendung chinesischer Ortsnamen in Tibet orientiert sich die Namensgebung aufgrund eines fehlenden einheitlichen tibetischen Kartenwerkes auch an der chinesischen Namensgebung.

2 Klima und Klimatrends in Tibet

In frühen Klimaklassifikationen ist Tibet als „subarktisches Gebirgsklima“ (WISSMANN 1939) beschrie-

ben worden. Neuere Arbeiten überwiegend chinesischer Autoren kennzeichnen die Region um das Yarlung Tsangpo-Tal als „temperate plateau climate“ (CHEN 1982; HUANG 1986; ZHANG 1959 in DOMRÖS a. PENG 1988) bzw. als „semi-arid temperate monsoon climate“ (CAS in LEBER et al. 1995). Die agroökologische Klassifikation der VR China klassifiziert den Raum als „moderately cool plateau climate with spring and winter drought“ (LI 1993).

Aufgrund des Massenerhebungseffekts liegen die auf Meeressniveau reduzierten Temperaturen in Tibet fast um 9° C höher als die von Tieflandstationen gleicher Breite in Ostchina. Selbst bei den tatsächlichen Jahresmitteltemperaturen ist Chengdu in Sichuan (506 m ü. NN) nur 2,1° C wärmer als Lhasa (3.658 m ü. NN). Durch die geringe Luftmasse und die sich daraus ergebende intensive Ein- bzw. Ausstrahlung findet eine rasche Aufheizung des Bodens verbunden mit einer ebenso raschen Abkühlung bei Nacht statt. Die Folge ist eine hohe tägliche Temperaturamplitude, Nacht-

fröste können praktisch in jedem Monat auftreten. Mit über 3.000 Sonnenstunden im Jahr werden gleichzeitig extrem hohe Einstrahlungswerte erreicht. Dadurch ergeben sich vergleichsweise hohe Wintertemperaturen, so dass die mittlere jährliche Temperaturamplitude mit 14°C im Süden (Lhasa mit jährlicher mittlerer Temperaturamplitude von $17,6^{\circ}\text{C}$) bis zu 24°C im Norden Tibets eher gering bleibt. Vergleicht man die akkumulierten Temperaturen $> 10^{\circ}\text{C}$ auf 30°N in Tibet als Maß für die für den Anbau zur Verfügung stehende Wärmesumme mit denen von Stationen gleicher Breite in Ostchina, so stellt man fest, dass diese mit $1.500\text{--}2.000^{\circ}\text{C}$ den Bedingungen auf ca. 50°N , an der Grenze zu Russland, gleichen. Aufgrund der starken Einstrahlung, besonders auch im UV-Bereich, und der hohen Tagestemperaturamplituden ergeben sich aber trotzdem relativ vorteilhafte Wuchsbedingungen: Eine verstärkte Photosynthese und Kohlenhydratfixierung tagsüber verbunden mit einer geringen nächtlichen Respiration führen zu einer hohen Nettphotosyntheserate (LI 1981).

Weniger vorteilhaft stellt sich die hygrische Situation dar: Auf der Nordseite des Himalayamassivs gelegen und damit von der direkten Zufuhr monsonaler Luftmassen weitestgehend abgeschnitten sinkt der Jahresniederschlag von Südost nach Nordwest von ca. 700 mm an der Grenze zu Sichuan über 450 mm bei Lhasa auf 70 mm bei Garze in Westtibet. Gleichzeitig nimmt die Dauer der ohnehin kurzen Regenzeit, in der bis zu 70% des Jahresniederschlags fallen, von Mai bis September im Südosten auf Juli bis August im Nordosten ab.

Die Kenntnis der Verdunstungsraten in Tibet stützt sich auf die Angaben vergleichsweise weniger Wetterstationen. Rein temperaturgestützte Abschätzungen nach THORNTWHAITE (1948) oder WALTER (1955) liefern fehlerhafte Werte; auf Tibet angewendet unterschätzte KAYANE (1971) damit die tatsächliche jährliche PET um bis zu 200%. Bereits der visuelle Vergleich zwischen den Temperaturkurven und dem Verlauf der PET in Abbildung 2a und b zeigt, dass die traditionellen Klimadiagramme in WALTER und LIETH (1960) oder MIEHE et al. (2001) kaum geeignet sind, präzise Aussagen über die Feuchteverhältnisse eines Standortes zu treffen. Stattdessen wird im Rahmen dieser Arbeit die PET nach Penman-Monteith (ALLEN et al. 1998) verwendet, die in allen Klimaten die genauesten Abschätzungen der PET liefert (JENSEN et al. 1990). Die Jahressumme der PET liegt mit 1.194 bzw. 1.364 mm in Lhasa und Xigaze deutlich über den Jahressummen der Niederschläge, was auch durch die mit einem modifizierten Penman-Ansatz gerechnete Jahressumme der PET von HENNING und HENNING (1984) für Lhasa

bestätigt wird. Auch in der saisonalen Verteilung sind lediglich während der Regenzeit im Juli und August leichte Niederschlagsüberschüsse zu verzeichnen. Das tatsächliche Feuchteangebot lässt sich allerdings detailliert nur mit Hilfe der Berechnung der Wasserbilanz unter Berücksichtigung der Bodenfeuchte und der Bodenbedeckung ermitteln. Geht man von einer kurzen Grasfläche, einer grob- bis mittelkörnigen Bodentextur (100 mm pflanzenverfügbares Bodenwasser pro Meter Bodentiefe) und einem durchwurzeltem Bodenraum von einem Meter Tiefe aus, so bestätigt die Wasserbilanzberechnung (siehe Kapitel 4) geringe Wasserüberschüsse am Ende der Regenzeit, die sich als eine kurzfristige Auffüllung des Bodenwasservorrats niederschlagen. Beide Stationen können daher als semiarid eingestuft werden.

In den vergangenen Jahren ist immer mehr die eventuell anthropogen verursachte rezente Variabilität des Klimas in der klimatischen Raumbeschreibung hervorgetreten. Die publizierten Angaben (BÖHNER 1996; HULME et al. 1994; SCHÄFER 2001; YATAGAI a. YASUNARI 1994) zu Trends von Temperatur und Niederschlag in Tibet basieren allerdings nur auf wenigen Stationen. Aufgrund unterschiedlichen Beginns und Endes der verwendeten Datenreihen weisen sie teils widersprüchliche Angaben auf. In Lhasa zeigen die Januartemperaturen den auf der ganzen Nordhemisphäre beobachteten deutlichen Anstieg (Abb. 3a), auch die bis Anfang der achtziger Jahre nur oszillierenden Julitemperaturen steigen danach deutlich an (Abb. 3b). Die Juliniederschläge fallen dagegen im Laufe des Beobachtungszeitraums ständig deutlich ab (Abb. 3c), während die PET-Raten im Juli ähnlich kontinuierlich steigen (Abb. 3d). Damit lässt sich für Lhasa und Xigaze im Sommer eine tendenziell abnehmende Wasserbilanz ableiten, da die leicht fallende Januar-PET (Abb. 3e) bei praktisch niederschlagsfreien Wintermonaten wenig Bedeutung hat. Allerdings ist lediglich der Juli-Trend des Niederschlags statistisch signifikant. Von Bedeutung für den landwirtschaftlichen Bereich ist auch die in Abbildung 3c auffällige vielfach höhere interannuelle Variabilität des Niederschlags gegenüber der PET. Gemessen über die Veränderung des Interdezilabstands hat die Variabilität des Juliniederschlags im Beobachtungszeitraum mit bis zu 10 mm / Dekade zugenommen.

Die Bewölkung, als Maß für die Sonneneinstrahlung eine wichtige Messgröße, hat nach KAISER und VOSE (1997) bzw. KAISER (2000) sowohl im Sommer wie im Winter überwiegend signifikant abgenommen. Eine Zunahme der Sonneneinstrahlung als Ursache der steigenden PET kann, neben einer Abnahme der Luftfeuchte, für Lhasa bestätigt werden (THOMAS 2000a).

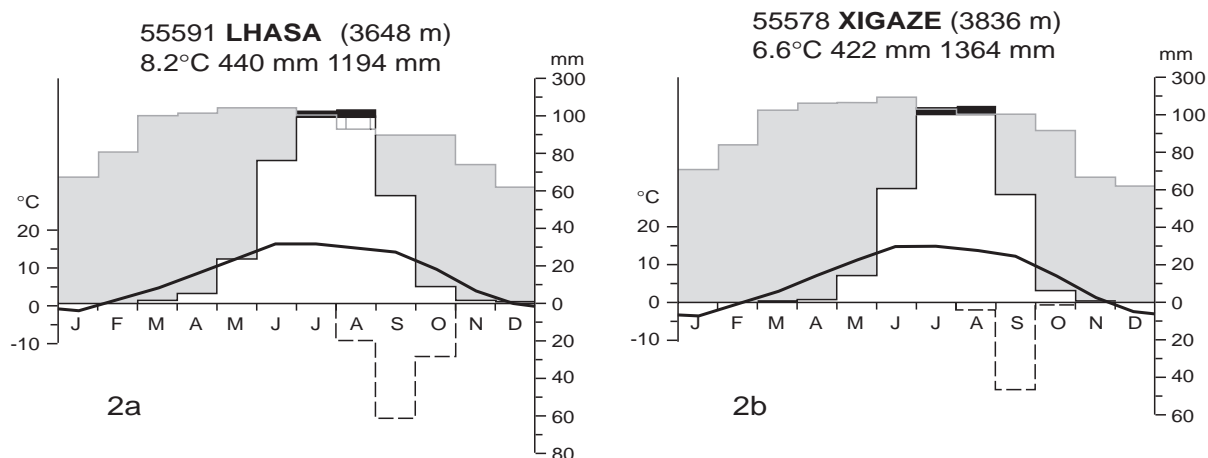


Abb. 2a, b: Klimadiagramme von Lhasa und Xigaze.

Die graue Fläche markiert die potentielle Evapotranspiration nach Penman-Monteith, der Niederschlag ist als weiße Fläche dargestellt, das pflanzenverfügbare Bodenwasser unterhalb der Abszisse durch eine Strichlinie. Das Verhältnis der Maßstäbe von Temperatur und Niederschlag entspricht der Relation nach WALTER (1955); Niederschläge über 100 mm sind schwarz, eine positive Wasserbilanz vertikal schraffiert dargestellt. Absolute monatliche Maxima und Minima sind links außen (Temperatur) bzw. rechts außen (Niederschlag) angegeben

Climate diagrams of Lhasa and Xigaze. Grey shades mark potential Penman-Monteith evapo-transpiration estimates, precipitation is shown in white, plant-available soil water below the abscissa as a dashed line. Temperature and precipitation are scaled according to WALTER (1955); monthly precipitation above 100 mm is marked in black, a positive water balance is hatched vertically. Absolute monthly maxima and minima are labelled on the outer left (temperature) and right (precipitation) axis

3 Landschaft und Landwirtschaft im Yarlong Tsangpo-Tal

Die im Weiteren näher vorgestellte Region ist das Zentrum des Ackerbaus in Tibet nördlich des Himalayahauptkammes zwischen Xigaze im Westen und Nedong im Osten (Abb. 4). Sie besteht im wesentlichen aus dem Yarlong Tsangpo-Tal, das in einer tektonischen Störungslinie über 1.200 km in Ost-West-Richtung auf ca. 30° N verläuft, bevor es im östlichen Tibet scharf nach S abknickt und den Himalaya, dann bereits auf indischem Staatsgebiet, verlässt. Neben dem mittleren Yarlong Tsangpo-Tal gehört auch das Becken von Lhasa, das vom Lhasa He in den Yarlong Tsangpo entwässert wird, zu dieser Region. Nach Norden wird es von den Gebirgszügen des Gangdise Shan und des Nyainqentangla Shan mit durchschnittlichen Höhen um 5.000 m begrenzt.

Die Hauptanbauflächen liegen in den Talböden mit Höhen zwischen 3.500 m im Osten und 3.900 m im Westen. Im überwiegenden Verlauf bildet der Yarlong Tsangpo eine breite, teilweise beckenartige Talung aus, die während der Regenzeit fast vollkommen vom Fluss eingenommen wird und nur wenig Spielraum für landwirtschaftliche Flächen lässt (Photo 1). In vielen Berei-

chen sind die Anbauflächen durch den hohen Grundwasserstand stark vernässt. Wo Terrassen den Fluss in seiner Ausdehnung begrenzen, sind die überwiegend sandig-schottrigen Böden fast vollkommen durch Ackerbau eingenommen. Auf den Schwemmkegeln der Seitentäler, auf denen ein weiterer Teil der Anbauflächen liegt, finden sich neben den terrassierten Feldern meist auch die tibetischen Siedlungen (Photo 2). Chinesische Siedlungen folgen dagegen eher dem Verlauf der tiefer gelegenen Straße. Weite Strecken der höher liegenden Terrassenkörper oder der seitlichen Schwemmkegel können aufgrund fehlender Bodenbildung oder Trockenheit nur wenig genutzt werden. Umfangreiche Sandflächen, teilweise mit Binnendünen, die aus den ausgewehten Sanden des im Winter fast vollkommen trocken fallenden Flussbettes stammen, schränken die nutzbaren Flächen weiter ein.

Trotz der genannten Einschränkungen sind nur im Bereich des canonartigen Durchbruchstals westlich Nyêmo auf ca. 20 km Länge keinerlei Anbauflächen zu finden. Auf weiteren 50 km Richtung Westen bleibt der Anbau im nur 200–600 m breiten Tal auf die Flächen der teilweise über 50 m mächtigen Terrassenkörpern und auf die aus den Seitentälern dringenden Sedi-

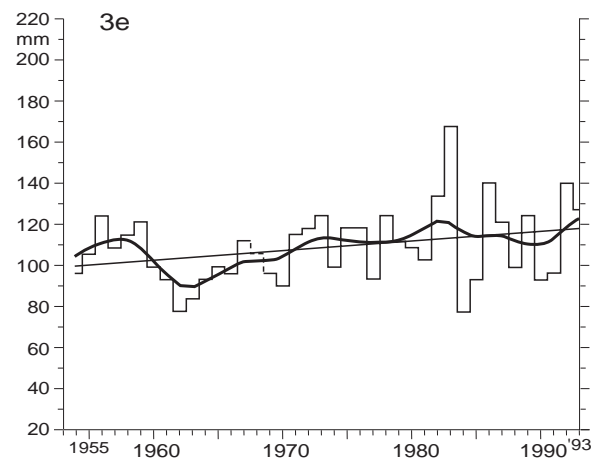
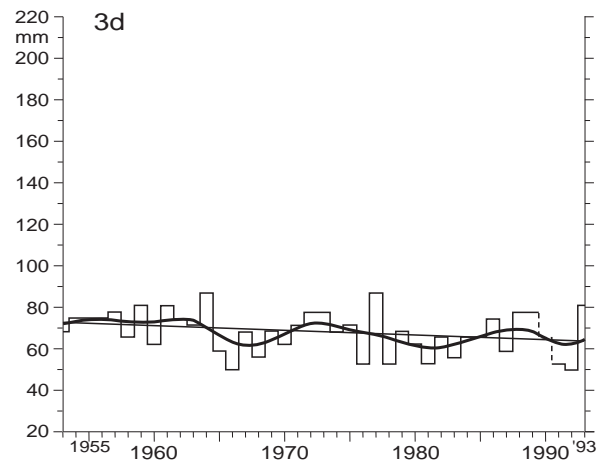
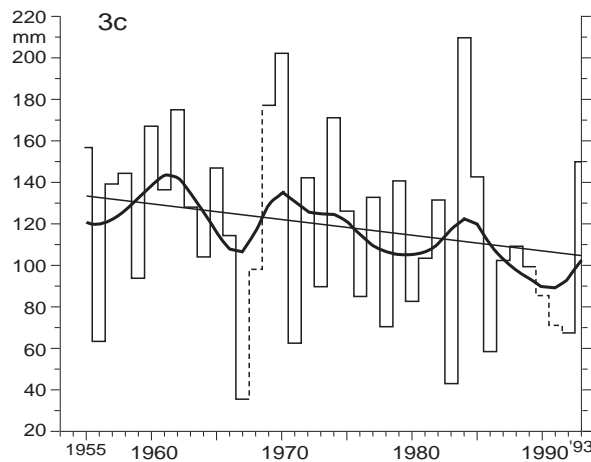
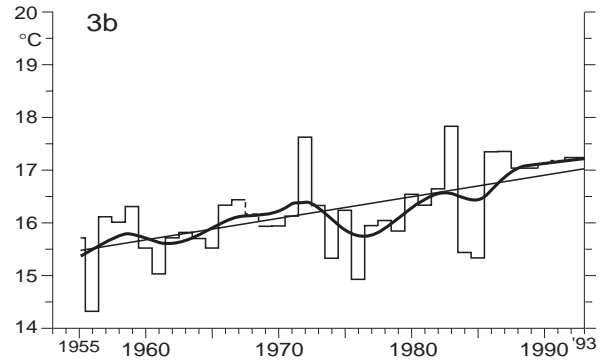
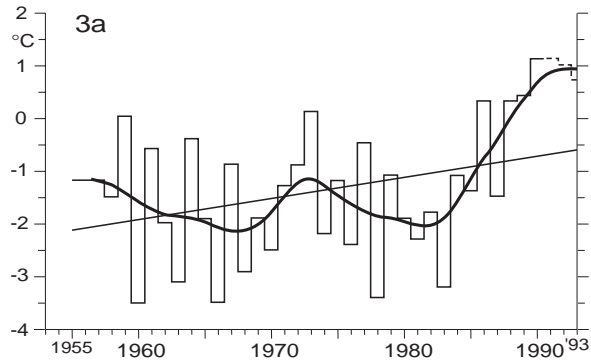


Abb. 3 a-e: Zeitreihen und lineare Trends der Monatsmittel der Januar- und Julitemperaturen (a, b), des Julieniederschlags (c) und der Juli- und Januarevapotranspiration (d, e) in Lhasa. Die Gerade markiert den linearen Trend, der fette Linienzug stellt tiefpassgefilterte Daten, die gepunktete Linie ersetzte Werte dar. Signifikante Trends ($> 95\%$) weisen T-R- bzw. Q-Werte über/unter $\pm 1,96$ aus

Time series and linear trends of monthly January and July temperatures, July precipitation, July and January evapotranspiration. The straight line marks the linear trend, low-pass filtered data are labelled with a thick line and substituted values are shown with a dotted line. Significant trends ($> 95\%$) have T-R- or Q-values larger or smaller than ± 1.96

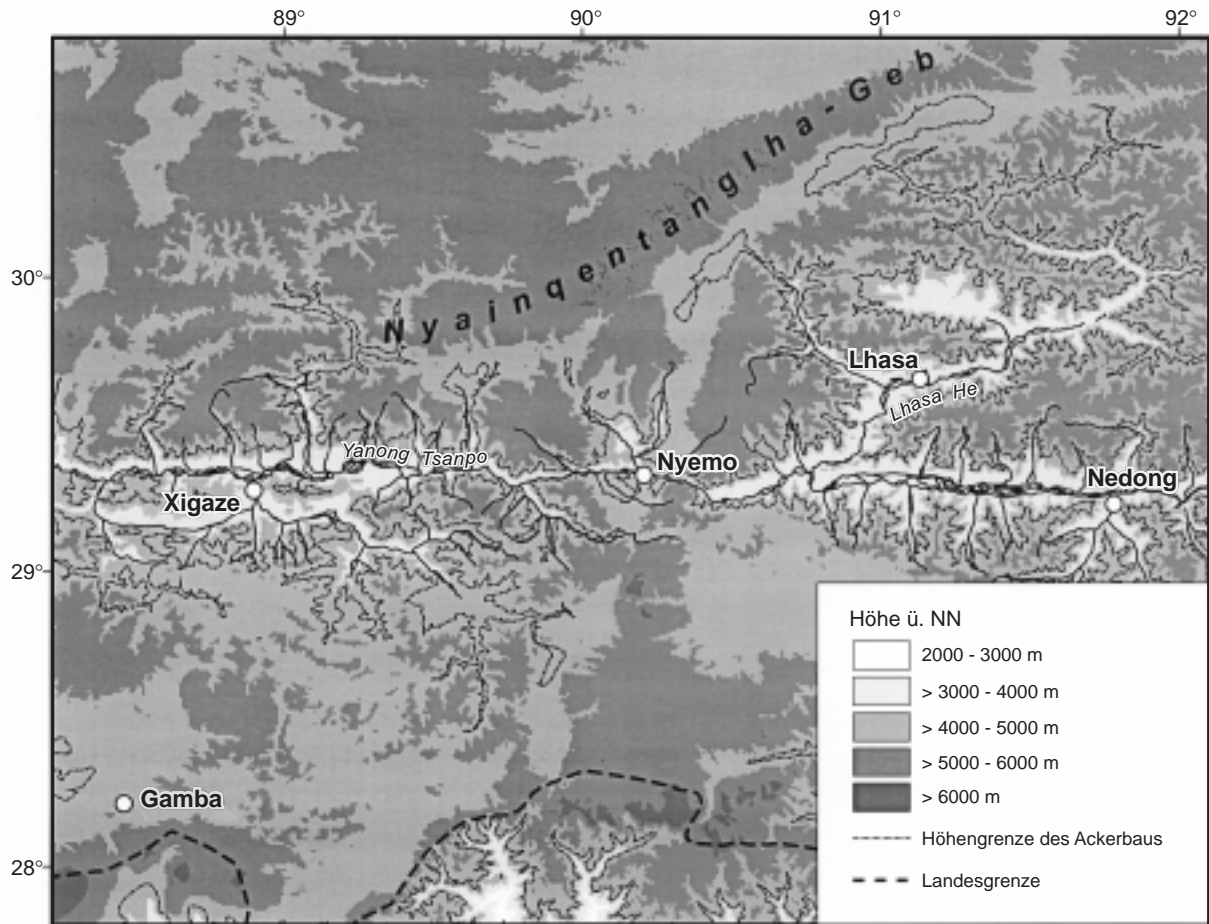


Abb. 4: Karte des mittleren Yarlong Tsangpo-Tales. Die markierte Obergrenze des Getreideanbaus (4.400 m – Isohypse) wird lokal bis zu 400 m überschritten

Map of the central Yarlong Tsangpo valley. The upper limit of grain cultivation (dotted line) is locally exceeded by more than 400 m

mentfächer beschränkt (Photo 3). Wie in vielen Gebirgen Asiens sind aber auch kleinste Flächen von wenigen Quadratmetern an Hängen mit über 40° Neigung genutzt. Auf den Terrassen werden bevorzugt die bis zu 1 m mächtigen sandigen Braunlehme genutzt, die auf eine vergangene Periode der Bodenbildung hinweisen. Das Nebeneinander von bewässerten und unbewässerten Flächen zeigt, dass Bewässerung für den Anbau zwar nicht unumgänglich ist, aber doch deutlich zu Steigerung und Sicherung des Ertrags beiträgt.

Ständige Unterbrechung der Verbindungsstraße zwischen Lhasa und Xigaze in diesem Bereich durch Muren während der Regenzeit und Föhnwolken über den südorientierten Gebirgsketten weisen auf die Beeinflussung der Tallagen sowohl durch Starkregen wie auch durch Föhnwinde hin. Die Niederschläge erfolgen

entsprechend zumeist als abendliche oder nächtliche konvektive Regen, oft verbunden mit Gewittern.

Das traditionelle Getreide der Tibeter, die Gerste (Photo 4), nimmt auch heute noch mit ca. 75% den Hauptanteil der Getreideanbauflächen ein, die nach CIESIN (1996) 1991 204.603 ha betragen. Durchschnittliche Erträge im Bewässerungsfeldbau liegen bei 4,5–6,0 t/ha, unbewässert bei 0,75–2,25 t/ha. Sommerweizen, von der chinesischen Verwaltung im Rahmen der Sinisierung Tibets ‚als zivilisiertes Getreide‘ gefördert, nimmt dagegen trotz höherer Erträge von 6,0–7,5 t/ha nur ca. 20% ein. Neben der notwendigen Bewässerung macht höherer Düngbedarf den Sommerweizenanbau zusätzlich unattraktiv. Auf weiteren ca. 5% der Getreideanbauflächen wird Winterweizen angebaut, der mit 10,5 t/ha noch höhere Er-

träge erbringt. Der Winterweizen ist während der winterlichen Ruhephase von etwa 5 Monaten bis zu -5°C frostresistent, bei Temperaturen bis zu -10°C muss er zusätzlich durch eine Sandschicht geschützt werden, da keine Schneedecke als natürlicher Kälteschutz zur Überwinterung vorhanden ist. Die in Deutschland entwickelte Sorte ‚Bassa‘ hat sich als erheblich produktiver und frostsicherer als die aus Nordchina eingeführten Winterweizensorten erwiesen und bei Lhasa im experimentellen, optimal bewässerten und gedüngten Anbau Erträge bis zu 18,0 t/ha ergeben.

Raps schließlich nimmt ca. 8% der Gesamtanbaufläche von 227.333 ha (CIESIN 1996) ein. Primär zur Speiseölerstellung bestimmt, werden Spross und Blätter zusätzlich gerne als Gemüse verwendet. In seinen Anforderungen ähnelt er der Gerste so stark, dass beide oft gemeinsam in einem Feld angebaut werden.

Der Anbau konzentriert sich auf die kurze Regenzeit mit Aussaat Ende Mai (im Regenfeldbau Anfang Juni), die Ernte findet für Gerste Mitte August, für Sommerweizen Anfang September statt. Winterweizen wird Ende September bis Anfang Oktober ausgesät und braucht dann etwa 350 Tage bis zur Reife. Mit einer oberen Anbaugrenze von ca. 4.150 m liegen Gerste und Sommerweizen gleichauf, die Höhengrenze des Raps liegt mit bis zu 4.400 m sogar darüber. Oberhalb von ca. 3.900 m verzahnt sich der Ackerbau mit der Weidewirtschaft. Im gesamten südtibetischen Raum wird Gerste lokal auch noch bis in 4.600 m Höhe angebaut (pers. Mitt. MIEHE, Marburg), was u. U. auf Föhneffekte durch den Himalayahauptkamm zurückzuführen ist. Der weltweite Höhenrekord für Gerste (*Hordeum nudum*) wird laut REN (1985) bei Rutog in Nordwest-Tibet mit 4.900 m Höhe erreicht.

Im Becken von Xigaze (Photo 5), das mit 9.067 ha eine der größten geschlossenen Getreideanbauflächen Tibets beinhaltet, sind bis zu 70% der Flächen bewässert. Ein Ausbau der Bewässerung scheitert primär an der ungünstigen Lage der noch unbewässerten Flächen in Relation zur nächsten Wasserquelle und den hohen Pumpkosten. Das verfügbare Bewässerungswasser ist bereits jetzt schon so knapp, dass die zweite Bewässerungsperiode vor der Blütezeit unter Wasserknappheit leidet. Die hohen Leitungsverluste von 40–60% tragen einen erheblichen Anteil zu dem Problem bei.

4 Wasserbilanzen

Zur Festlegung von Anbaugrenzen werden meist Angaben zu jährlichen oder saisonalen Niederschlagssummen verwendet. Sie können lediglich als empirische, regional gültige Angaben verstanden werden, da

sie nur implizite Aussagen zur Verdunstungssumme enthalten, die u. U. in Gebieten mit gleichem Niederschlag sehr unterschiedlich sein kann. Erst über die Berechnung der Wasserbilanz, unter Berücksichtigung des im Boden speicherbaren Wassers und des entwicklungsabhängigen Wasserbedarfs der Pflanze, ist eine definitive Aussage über die zur Verfügung stehende Feuchtigkeit möglich. Die hier verwendete Methodik der Verwendung von Wasserbilanzen zur Bestimmung von Wasserbedarf und Ertrag (DOORENBOS a. PRUITT 1977) ist von der FAO entwickelt und weltweit angewendet worden (FAO 1978; FISCHER et al. 2000). Die Wasserbilanz wird in diesem Verfahren in Monatschritten aus der Differenz zwischen Niederschlag und dem Bodenwassergehalt des Vormonats gegenüber der maximalen Evapotranspiration (ET_m) gebildet. Während die PET als die maximal mögliche Verdunstung einer gut bewässerten Grünfläche definiert ist (PENMAN 1956) stellt die ET_m die maximal mögliche Verdunstung einer gegebenen Nutzpflanze während einer bestimmten phänologischen Phase dar. Zur Ermittlung der Monatswerte der ET_m wird die PET dazu mit empirisch ermittelten ‘crop coefficients’ multipliziert, die das Verhältnis von PET zu ET_m wiedergeben. Überschreitet die Summe aus Niederschlag und Bodenwasser die ET_m , füllt die verbleibende Differenz den Bodenwasservorrat auf, die tatsächliche Evapotranspiration, d. h. die Wassermenge, die die Pflanze tatsächlich nutzen konnte (ET_a), entspricht in diesem Fall der ET_m . Bodenwasser, das das maximale Bodenwasserhaltevermögen übersteigt, wird als verloren gegangen betrachtet. Im umgekehrten Fall, bei nicht gedecktem Wasserbedarf, sinkt die ET_a unter die ET_m . Niederschläge in Monaten mit negativen Monatstemperaturen werden als Schnee betrachtet und separat aufsummiert, direkte Sublimation während dieser Monate wird mit 30% der PET-Raten berücksichtigt. In Monaten mit positiven Monatstemperaturen werden Schmelzraten mit $165 \text{ mm}/^{\circ}\text{C}/\text{Monat}$ berechnet (FISCHER et al. 1995) und das Schmelzwasser dem Niederschlag zugerechnet. Die Wasserbilanz, ausgedrückt als Verhältnis der Summen der ET_a und der ET_m über die gesamte Anbausaison, zeigt dann, zu welchem Prozentsatz der Gesamtwasserbedarf der Nutzpflanze befriedigt wurde.

Obwohl ALLEN et al. (1998) die gleichen Anforderungen an die Wasserversorgung von Gerste und Sommerweizen angeben, zeigen die Feldbeobachtungen, dass die lokalen, tibetischen Gerstesorten in ihren Wasseransprüchen deutlich unter denen des Weizens liegen. Diese Situation ist typisch für angepasste, lokale Sorten, die zwar geringere Erträge erbringen, aber auch geringere Wasser- und Temperaturansprüche

haben als importierte Hochleistungshybriden. Zur Berücksichtigung wurden bei der Berechnung der maximalen, pflanzenspezifischen Evapotranspiration geringere 'crop coefficients' verwendet.

Die Profiltiefe der überwiegend sandig-lehmigen Böden beträgt meist nur 40–60 cm, was auch in etwa den Hauptdurchwurzelungstiefen der beiden Getreidearten entspricht. Die digitale Bodenkarte der FAO (FAO 2000) weist im Untersuchungsgebiet überwiegend Böden mit einem maximalen pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalt von 140 mm/m Bodentiefe auf. Da in vielen flusnnahen Lagen der Grundwasserspiegel relativ hoch liegt, ist in diesen Bereichen eher Drainage als Bewässerung notwendig. Diese oder andere Wasserquellen wie etwa laterale Zufuhr über Grundwasserströme können aber aus Mangel an Daten nicht berücksichtigt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Wasserbilanzen für Lhasa und Xigaze berechnet, für die komplette Datenreihen vorliegen. Aufgrund der hohen PET-Raten in Tibet weisen die beiden Getreidearten einen hohen potentiellen Wasserbedarf auf, der die üblichen 450–650 mm pro Saison (DOORENBOS a. KASSAM 1986) deutlich übersteigt (Tab. 1). Wichtiger ist aber die tatsächliche Deckung des Wasserbedarfs durch Niederschlag und Bodenwasser: Alle Wasserbilanzen zeigen für den Zeitraum 1953–1990 (statistisch nicht signifikante) negative Trends mit Abnahmen von je ca. 12% in Lhasa bzw. 4% (Weizen) und 8% (Gerste) in Xigaze (Abb. 5 a–d), was in erster Linie auf die steigenden Verdunstungssummen im Sommer zurückzuführen ist. Lediglich in den letzten 7 beobachteten Jahren ist eine Zunahme der Wasserbilanzen an beiden Stationen zu

erkennen. Deutlich wird auch, dass sich die höheren Wasserbilanzen in Lhasa aufgrund der höheren Abnahmeraten den niedrigeren Werten Xigazes angenähert haben.

Die absolut höheren Wasserbilanzwerte werden im humideren Klima Lhasas erhalten, die geringeren Werte in Xigaze spiegeln die nach Westen zunehmende Aridität im Yarlong Tsangpo-Tal wider. Auffällig ist, dass sich der Gang der Wasserbilanzen zwischen Lhasa und Xigaze zwar ähnelt, aber trotz einer Entfernung von nur 200 km Luftlinie bereits so große Unterschiede auftreten, dass keine einfache Übertragbarkeit etwa auf die zwischen den beiden Stationen liegenden Teile des Yarlong Tsangpo-Tales sinnvoll möglich ist. Einfache statistische Interpolationen von Klimadaten, wie sie von PRIELER (1999) für die Berechnung flächenhafter Datensätze für China verwendet worden sind, werden damit der Realität dieses Raumes nicht gerecht.

In den Wasserbilanzen treten die Unterschiede in der Effektivität der Wassernutzung der beiden Getreidearten hervor, im Durchschnitt liegen die Wasserbilanzen der Gerste um 5% höher. Aufgrund fehlender detaillierter Zeitreihen zu Erträgen im Regenfeldbau bzw. Bewässerungsfeldbau lassen sich die Wasserbilanzen nur bedingt eichen und in Erträge umsetzen. Geht man von einem potentiellen Maximalertrag für Gerste von 7,5 t/ha (d. h. 25% über dem angegebenen oberen Wert von 6 t/ha) aus und berücksichtigt die in DOORENBOS und KASSAM (1986) gegebenen Ertragsreduktionen bei Wasserdefiziten, so ergibt sich (ab einem Nullpunkt von 30%) ein linearer Ertragszuwachs von ungefähr 1 t/ha pro 10% Zunahme der Wasserbilanz. In Xigaze wären damit in den letzten

Tab. 1: Ergebnisse der Wasserbilanzberechnungen: Saisonaler Wasserbedarf (in mm / Saison), Wasserbilanz (in % des saisonalen Wasserbedarfs) und maximaler Bewässerungsbedarf (in mm / Saison) für Gerste und Weizen an den Stationen Lhasa und Xigaze

Results of the water balance calculations: seasonal water demand (mm / season), seasonal water balance (% of seasonal water demand) and maximum irrigation requirements (mm / season) for barley and wheat at Lhasa and Xigaze

		Lhasa			Xigaze		
		Mittelwert	Min.	Max.	Mittelwert	Min.	Max.
Wasserbedarf	Gerste	611 mm	459 mm	730 mm	714 mm	578 mm	771 mm
	Weizen	707 mm	533 mm	838 mm	824 mm	663 mm	921 mm
Wasserbilanz	Gerste	58,7%	28,0%	91,8%	49,1%	23,9%	68,8%
	Weizen	35,5%	24,2%	87,2%	43,9%	20,7%	61,1%
Bewässerungsbedarf	Gerste	260 mm	67 mm	506 mm	365 mm	290 mm	686 mm
	Weizen	337 mm	73 mm	591 mm	465 mm	268 mm	707 mm

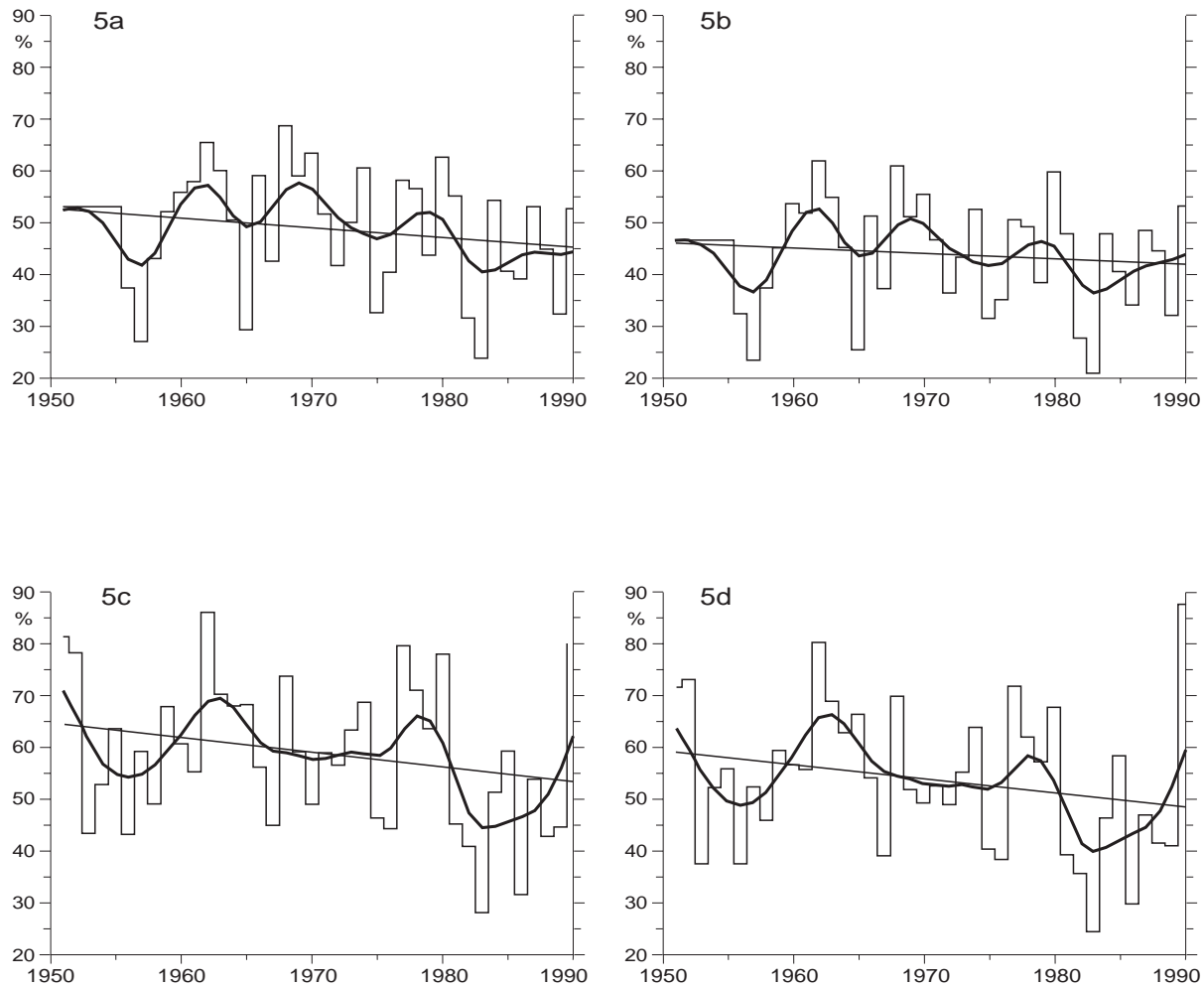


Abb. 5a-d: Zeitreihen und lineare Trends der Wasserbilanzen von Gerste (linke Abb.) und Weizen (rechte Abb.) für Xigaze und Lhasa (obere bzw. untere Reihe)

Time series and linear trend of the water balance for barley (left column) and wheat (right column) for Xigaze and Lhasa (upper and lower row, resp.)

Jahrzehnten Erträge bis zu 3,9 t/ha, in Lhasa bis zu 6,2 t/ha eingebracht worden, in beiden Regionen wären aber auch komplette Ernteverluste aufgetreten. Auch wenn in diesen Werten aufgrund der verschiedenen Annahmen die Unsicherheiten sehr groß sind, so zeigen sie doch die enorme Variabilität der klimatischen Faktoren und ihren Einfluss auf die Erträge.

Die Wasserbilanzberechnungen erlauben auch eine Abschätzung des maximalen Bewässerungsbedarfs (Tab. 1), der für das Erzielen des potentiellen Maximalertrags notwendig ist. Die höhere Effektivität der Wassernutzung der Gerste spiegelt sich nicht nur in den Mittelwerten, sondern auch in der geringeren Schwankung der Werte wieder. Die tatsächlich notwendigen Bewässerungsmengen bleiben allerdings deutlich unter

diesen berechneten Maximalwerten, da Bewässerung zu den wichtigen Stadien der Keimung und Befruchtung bereits ausreicht, um Schwankungen in den Erträgen zu dämpfen und in trockenen Jahren Ertragsverluste oder sogar komplette Ernteaussfälle zu vermeiden.

5 Diskussion

Das Yarlong Tsangpo-Tal stellt den größten zusammenhängenden Gunstraum für Ackerbau in Tibet dar. Viele der Anbauflächen leiden aber an einem Überangebot (Überflutung, zu hoher Grundwasserspiegel) oder einem Mangel an Wasser (klimatische Trocken-

heit). Die Landwirtschaft beschränkt sich damit zwangsläufig auf wenige Gunstflächen.

Niederschlags- und Verdunstungsverhältnisse regeln auf diesen Flächen das landwirtschaftliche Potential. Da die Temperaturen allein kein verlässliches Maß für die zur Verfügung stehende atmosphärische Energie darstellen und die üblichen, auf Temperaturdaten basierenden Verfahren zur Ableitung der Verdunstungsverhältnisse untauglich sind, eignen sich in erster Linie Kombinationsmethoden wie das Penman-Monteith-Verfahren zu einer exakten Abschätzung der Verdunstungsverhältnisse. Mit einer Jahressumme der potentiellen Evapotranspiration von über 1.300 mm übertrifft Xigaze selbst Standorte in den nordwestchinesischen Wüstengebieten. Die berechneten Trends der Wasserbilanzen für die beiden wichtigsten Getreidearten Gerste und Sommerweizen weisen dabei auf eine Verschiebung des Klimas zu arideren Verhältnissen hin. Inwieweit die positiven Trends der letzten Jahre eine Trendwende darstellen bleibt abzuwarten.

Insgesamt bildet das Yarlong Tsangpo-Tal aber aufgrund seiner Einstrahlungs- und Temperaturverhältnisse eher einen Gunstraum für den Getreideanbau (LI 1981). Das wird durch die erzielten Maximalerträge im Bewässerungsfeldbau bestätigt, die internationales Niveau aufweisen. Dabei liegen selbst die Erträge des Gerstenanbaus mit lokalen, eher ertragsschwachen

Sorten in dem Bereich, der mit Hochleistungssorten im Weizenanbau erzielt wird.

Aufgrund des semiariden Klimas nimmt die Bewässerung die entscheidende Rolle für die Sicherung bzw. Steigerung der Getreideerträge ein. Auch in Anbetracht der sinkenden Wasserbilanz, die steigende Bewässerungsmengen erfordert, hoher Investitionskosten beim Ausbau von Bewässerungssystemen und – zumindest im Raume Lhasa – einer langsam steigenden Nachfrage seitens der städtischen Bevölkerung muss eine Optimierung der Wassernutzung in der Landwirtschaft im Vordergrund stehen. Auch für China als Ganzes ist die Erhöhung der Bewässerungseffektivität die primäre nationale Aufgabe für die Sicherung der Nahrungsmittelproduktion in der Zukunft (HEILIG et al. 2000).

Auf der technischen Seite gehören dazu in erster Linie die Erhöhung der Effektivität der Wasserleitungssysteme durch verbesserte Wartung der Kanäle zur Verringerung von Sickerverlusten und der Vermeidung von Verdunstungsverlusten offener Kanäle durch Abdeckung oder Verwendung von Rohren. Nach den vorliegenden Daten reicht im Becken von Xigaze eine Reduktion der Leitungsverluste um 50% aus, um mit dem eingesparten Wasser die heute noch unbewässerten Teile der Anbaufläche bewässern zu können. Auch die Einführung einer verbrauchsabhängigen Wasser-



Photo 1: Das Yarlong Tsangpo-Tal südwestlich Lhasa während der Regenzeit. Bis auf Sandbänke und die Uferstraße ist das Tal in seiner ganzen Breite überflutet

The Yarlong Tsangpo valley south west of Lhasa during the rainy season. With the exception of sand bars and the valley road, the valley is flooded over its entire width



Photo 2: Durchbruchstal westlich Nyêmo: Der Anbau beschränkt sich in diesem Bereich auf schmale Terrassenreste und vereinzelte Hanglagen

Cultivation is restricted to small terraces and scattered upslope fields in the narrowest part of the Yarlong Tsangpo valley west of Nyêmo



Photo 3: Typische Nutzung von hochwassersicheren Terrassen und Schwemmfächern, hier entlang des zentralen Teils des Yarlong Tsangpo zwischen Nyêmo und Xigaze

Typical cultivation on terraces and debris fans above the high water line between Nyêmo and Xigaze



Photo 4: Tibetische Gerstensorten nehmen ca. 80% der Getreideanbauflächen im Yarlong Tsangpo-Tal ein
Tibetan barley cultivars represent about 80% of all planted grain crops in the Yarlong Tsangpo valley



Photo 5: Gemischter Gerste- und Rapsanbau am Rande der größten geschlossenen Anbaufläche des Yarlong Tsangpo-Tales, nordöstlich Xigaze
Mixed barley and rape cultivation on the outskirts of the largest contiguous cultivable area of the Yarlong Tsangpo valley, north east of Xigaze

gebühr würde einen verantwortungsbewussteren Umgang mit Wasser fördern.

Ein unmittelbarer Ansatz zur Sicherung der Erträge ist die Bevorzugung des Anbaus von Gerste gegenüber Weizen. Da Gerste für den potentiellen Maximalertrag rund 25% weniger Bewässerung benötigt als Weizen, lässt sich mit dem gleichen Bewässerungsumfang bei ausschließlichem Gerstenanbau die bewässerte Fläche um 30% steigern, was die geringeren maximalen Flächenerträge der Gerste mehr als ausgleicht. Gleichzeitig erhöht sich durch die geringere Dürreempfindlichkeit der Gerste auch die Stabilität der Erträge gegenüber interannuellen Niederschlagsschwankungen. Verbesserte Sortenwahl unter den vorhandenen Gerstenkultivaren ist eine weitere Möglichkeit zur Ertragssteigerung ohne zusätzliche Belastung der Bewässerungsressourcen. Ein Umdenken in der momentanen, politisch motivierten Landwirtschaftspolitik könnte daher bereits zu einer deutlichen Verbesserung der Situation in der Bewässerungslandwirtschaft führen.

Für eine flächenhafte, das gesamte Yarlong Tsangpo-Tal betreffende Aussage und die Umsetzung der Ergebnisse auf räumlicher Ebene in einem GIS sind digitale Datengrundlagen notwendig. Regionalisierung von Klimadaten unter Berücksichtigung des Reliefinflusses, die Auswertung von lokalen, nur auf chinesischer Seite vorhandenen Daten und die Einbindung international verfügbarer Datensätze stellen die Basis für flächenhafte Wasserbilanzberechnungen dar, die auch exakte Vorgaben für die Planung von Bewässerungsgebieten, für die Wahl von optimierten Anbauprodukten oder für die Berechnung der Bewässerungsmengen selbst geben können. Im Rahmen eines laufenden Projektes der Max-Planck-Gesellschaft werden in Kooperation mit dem Institute of Geographical Sciences and Natural Resources der Chinesischen Akademie der Wissenschaften auf diese Weise Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Landwirtschaft und auch auf natürliche Ökosysteme simuliert werden.

Danksagung

Die Feldarbeiten zu diesem Artikel wurden mit finanzieller Unterstützung der Max-Planck-Gesellschaft und dem Institute of Geographical Sciences and Natural Resources der Chinesischen Akademie der Wissenschaften im Rahmen des Projektes *Geoinformatic research on effects of climate and land cover change on the agriculture of the Qinghai-Tibet Plateau* durchgeführt. Unser besonderer Dank gilt den Mitarbeitern an der Lhasa Agroecological Experimental Station und am Agricultural Science Research Institute in Xigaze, Tibet.

Literatur

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. a. SMITH, M. (1998): Crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rom.
- BÖHNER, J. (1996): Säkuläre Klimaschwankungen und rezente Klimatrends Zentral- und Hochasiens. Göttinger Geogr. Abh. 101.
- CHEN, S. (1982): A new approach to the climatic division of China. In: Acta Meteorologica Sinica 40, 35–48 (in chinesisch).
- CIESIN (CONSORTIUM FOR INTERNATIONAL EARTH SCIENCE INFORMATION NETWORK, Ed.) (1996): China County Level Data on Population and Agriculture, Keyed to 1:1 M GIS Map. CIESIN, Washington.
- DOMRÖS, M. a. PENG, G. (1988): The climate of China. Berlin.
- DOORENBOS, J. a. PRUITT, O. W. (1977): Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Rom.
- DOORENBOS, J. a. KASSAM, A. H. (1986): Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 33, Rom.
- FAO (1978): Report on the agro-ecological zones project. World Soil Resources Report 48, Rom.
- (2000): Soil and Physiographic Database for North and Central Eurasia (1:5 Mio). FAO Land and Water Digital Media Series 7, Rom.
- FISCHER, G.; DE PAUW, E.; VAN VELTHUIZEN, H.; NACHTERGAELE, F. a. ANTOINE, J. (1995): A provisional world climatic resource inventory based on the length-of-growing-period concept. Paper presented at the NASREC Conference, 5–12 November 1995. Wageningen, Niederlande.
- FISCHER, G.; VAN VELTHUIZEN, H. a. NACHTERGAELE, F. O. (2000): Global Agro-Ecological Zones Assessment: Methodology and Results. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) Technical Report IR-00-064, Laxenburg.
- HEILIG, G.; FISCHER, G. a. VAN VELTHUIZEN, H. (2000): Can China feed itself? In: Int. Journal of Sustainable Development and World Ecology 7, 153–172.
- HENNING, I. u. HENNING, D. (1984): Die klimatologische Wasserbilanz der Kontinente. Münsterische Geogr. Arbeiten 19.
- HUANG, B. (1986): Climatic division and physio-geographic division of China: retrospectives and prospects. Unveröff. Vortrag am Deutsch-Chinesischen Workshop 'The Climate of China'. Geogr. Inst., Univ. Mainz, August 1986.
- HULME, M.; ZHAO, Z.-C. a. JIANG, T. (1994): Recent and future climate change in East Asia. In: International Journal of Climatology 14, 637–658.
- JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D. a. ALLEN, R. G. (1990): Evaporation and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices 70, New York.
- KAISER, D. P. (2000): Decreasing cloudiness over China: an updated analysis examining additional variables. In: Geophysical Research Letters 27 (15), 2193–2196.
- KAISER, D. P. a. VOSE, R. S. (1997): Changes in monthly mean cloud amount over China: A closer look. Proceed-

- ings of the Eighth Symposium on Global Changes Studies, Feb. 2–7. Long Beach, California. Boston.
- KAYANE, I. (1971): Hydrological regions in Monsoon Asia. In: YOSHINO, M. M. (Ed.): *Water Balance of Monsoon Asia*. Honolulu.
- LEBER, D.; HOLAWA, F. a. HÄUSSLER, H. (1995): Climatic classification of the Tibet Autonomous Region using multivariate statistical methods. In: *Geoforum* 37, 451–473.
- LI, J. (1981): Agroclimatic analyses of the high yield wheat crops in Qinghai-Xizang Plateau. In: LIU, D. (Ed.): *Geological Studies of Qinghai-Xizang Plateau*, 2045–2050. Proceedings of Symposium on Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, Beijing, China. Beijing.
- LI, S. (1993): Agroclimatic resources and agricultural distribution patterns. In: CHENG, C. (Ed.): *Climate and Agriculture in China*. Beijing.
- MIEHE, G.; WINIGER, H.; BÖHNER, J. a. ZHANG, Y. (2001): The climatic diagram map of High Asia. In: *Erdkunde* 55, 94–97.
- PENMAN, H. L. (1956): Evaporation, an introductory survey. In: *Netherlands Journal of Agricultural Sciences* 4, 9–29.
- PRIELER, S. (1999): Temperature and Precipitation Variability in China – a gridded monthly time series from 1958–1988. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) Technical Report IR-99-074, Laxenburg.
- REN, M. (1985): *An outline of China's Physical Geography*. Beijing.
- SCHÄFER, D. (2001): Rezente Klimaänderungen in China? In: *Geographische Rundschau* 53 (10), 42–47.
- THOMAS, A. (1999): Räumliche Aspekte der potentiellen Evapotranspiration in China. In: *Petermanns Geographische Mitteilungen* 143, 349–362.
- (2000a): Spatial analysis of Penman-Monteith evapotranspiration trends over China. In: *International Journal of Climatology* 20, 381–396.
- (2000b): Climatic changes in yield index and soil water deficit trends in China. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 102, 71–81.
- THORNTHWAITE, C. W. (1948): An approach towards a rational classification of climate. In: *Geogr. Rev.* 38, 55–94.
- TÜTING, L. (1991): Das Rätsel des Hengduan-Gebirgs. In: *Tibet-Forum* 1, 19–20.
- WALTER, H. (1955): Die Klimadiagramme als Mittel zur Beurteilung der Klimaverhältnisse für ökologische, vegetationskundliche und landwirtschaftliche Zwecke. In: *Berichte Deutsch. Bot. Ges.* 68, 331–344.
- WALTER, H. u. LIETH, H. (1960): *Klimadiagramm-Weltatlas*. Jena.
- WISSMANN, H. von (1939): Die Klima- und Vegetationsgebiete Eurasiens. In: *Z. d. Gesellschaft f. Erdkunde zu Berlin*, 1–14.
- YATAGAI, A. a. YASUNARI, T. (1994): Trends and decadal-scale fluctuations of surface air temperature and precipitation over China and Mongolia during the recent 40 year period (1951–1990). In: *Journal of the Meteorological Society of Japan* 72, 937–957.
- ZHANG, J. (1959): *Climate classification in China*. Science Press, Beijing. (in chinesisich)