

kassel
university



press

**Nährstoffflüsse und pflanzengenetische Ressourcen in zwei
Bergoasen des nördlichen Omans**

Maher Nagieb

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften Fachgebiet Ökologischer Pflanzenbau und Agrarökosystemforschung in den Tropen und Subtropen der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften (Dr. agr.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr. Andreas Bürkert

Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Karl Hammer

Tag der mündlichen Prüfung

30. August 2004

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2004

ISBN 3-89958-098-2

URN urn:nbn:de:0002-0984

© 2004, kassel university press GmbH, Kassel

www.upress.uni-kassel.de

Umschlaggestaltung: 5 Büro für Gestaltung, Kassel

Druck und Verarbeitung: Unidruckerei der Universität Kassel

Printed in Germany

**Diese Arbeit ist meinem Vater und meiner Mutter gewidmet,
deren Liebe und Fürsorge ich viel verdanke**

الإهداء

الى كل من المرحوم والدي

و والدتي أنعم الله عليها بالصحة وطول العمر اللذان أدين لهما بالكثير

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1.	Geographie und Klima Omans	3
1.2.	Landwirtschaft und Wasserressourcen	3
1.3.	Projekthintergrund	5
1.4.	Problemstellung, Zielsetzung und Arbeitshypothesen	5
1.5.	Stand der Forschung	6
2.	Material und Methoden	10
2.1.	Beschreibung der Untersuchungsgebiete	10
2.2.	Kartierung der Oasen Balad Seet und Maqta	12
2.3.	Menge, Qualität und Nutzung der Wasserressourcen	13
2.4.	Vergleich der Korn- und Sprosstrockenmasse omanischer und eingeführter Weizensorten unter unterschiedlicher Bewässerungsintensität	14
2.5.	Bestimmung der biologischen N ₂ -Fixierungsleistung von Luzerne (<i>Medicago sativa</i> L.)	17
2.6.	Nährstoffflüsse	18
2.6.1.	Nährstoffentzüge	18
2.6.2.	Nährstoffeinträge	20
2.6.2.1.	Mineralische und organische Düngung der Feldkulturen	20
2.6.2.2.	Mineralische und organische Düngung der Palmengärten	21
2.6.2.3.	Nährstoffeinträge durch N ₂ -Fixierung und Bewässerungswasser	22
2.6.2.4.	Darstellung der Nährstoffflüsse	22
3.	Ergebnisse	24
3.1.	Charakterisierung des Oasensystems an beiden Standorten	24
3.1.1.	Balad Seet	24
3.1.2.	Maqta	27
3.2.	Palmengärten	29
3.2.1.	Sortenspektrum und Erträge der Dattelpalmen in der Kernoase Balad Seet (Oman)	29
3.2.2.	Sortenspektrum und Erträge der Dattelpalmen in der Streuoase Maqta	36
3.3.	Wasserressourcen: Menge, Qualität und Nutzung	39
3.3.1.	Wassermenge	39
3.3.2.	Wasserqualität	40
3.3.3.	Wassernutzung und Bewässerungssystem	41
3.3.4.	Organisation der Wasserverteilung	42
3.3.5.	Nachhaltigkeit der Wasserversorgung der Oasen	44
3.4.	Versalzungsvermeidung der Terrassenböden	47
3.5.	Trockenstressversuch bei Weizen	52
3.5.1.	Kornertrag	52
3.5.2.	Strohertrag	54
3.5.3.	Tausendkorngewicht	55
3.5.4.	Pflanzenhöhe	56
3.6.	Biologische N ₂ -Fixierung von Luzerne	57
3.6.1.	Vorbemerkung zur Schätzmethode der N ₂ -Fixierungsleistung	57

3.6.2.	Stickstofffixierungsleistung der Luzerne in Balad Seet	57
3.7.	Nährstoffflüsse	58
3.7.1.	Stoffflüsse in der Bergoase Balad Seet	58
3.7.1.1.	Stoffflüsse innerhalb der Oasenkerzone:	58
3.7.1.2.	Stoffaustausch zwischen dem Oasenkern und dem Randbereich	59
3.7.1.3.	Stoffaustausch der Oase mit der Außenwelt	60
3.7.2.	Nährstoffbilanz	60
3.7.2.1.	Jährlicher Ertrag der Feldkulturen, Nährstoffkonzentrationen und Nährstoffexport	60
3.7.2.2.	Nährstoffeinträge und Teilbilanzen	60
3.7.2.3.	Jährliche Nährstoffbilanz auf Oasenniveau	68
3.8.	Pflanzengenetische Ressourcen und Biodiversität	70
3.8.1.	Vormerkung zur Entwicklung des Begriffspaares genetische Ressourcen und Biodiversität	70
3.8.2.	Pflanzensammlungen als Instrument zur Erhaltung der genetischen Vielfalt	71
3.8.3.	Pflanzengenetische Ressourcen im Oman	71
4.	Diskussion	74
4.1.	Palmengärten	74
4.2.	Wasserressourcen	75
4.3.	Weizenstressversuch	75
4.4.	N ₂ -Fixierungsleistung bei Luzerne	77
4.5.	Nährstoffflüsse	78
4.6.	Pflanzengenetische Ressourcen und Biodiversität	83
5.	Schlussfolgerungen	84
6.	Zusammenfassung	85
7.	Summary	88
8.	ملخص (Zusammenfassung in Arabisch)	91
9.	Literaturverzeichnis	93
10.	Anhang	102
10.1.	Settlement history of a mountain oasis in northern Oman - Evidence from land use and archaeological studies	103
10.2.	Eine Checkliste der Kulturpflanzen in der Bergoase Balad Seet, Oman	138
10.3.	A note about Triticum in Oman	150
10.4.	Irrigation and Physico-chemical properties of man-made terrace soils in a mountain oasis of northern Oman	157
	Danksagung	177
	Acknowledgments	178
	Eidesstattliche Erklärung	179

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Karte des Omans mit den Lagen der Untersuchungsgebiete	1
Abbildung 2. Darstellung des durchschnittlichen jährlichen Temperatur- und Niederschlagsverlaufes von Buraimi im Norden und Salalah im Süden Omans	2
Abbildung 3. Anlage des Weizenversuches auf dem Terrassensystem <i>Mazra</i> in der Kernoase <i>Balad Seet</i> (Oman) im Anbaujahr 2001/2002	16
Abbildung 4. Anlage des ¹⁵ N-Verdünnungsversuches auf dem Terrassensystem <i>Mazra</i> in der Kernoase <i>Balad Seet</i> (Oman)	18
Abbildung 5. Übersichtskarte der Kernoase <i>Balad Seet</i> (Oman) mit den Terrassen, den Palmengärten, der Bewässerungsinfrastruktur und den Straßen	24
Abbildung 6a. Übliche Fruchtfolgen im Jahresverlauf der Kernoase <i>Balad Seet</i> (Oman)	25
Abbildung 6b. Verteilung der Winter- und Sommerkulturen in der Kernoase <i>Balad Seet</i> (Oman) im Anbaujahr 2001/2002	26
Abbildung 7. Anbauintensität der Felder und Terrassen in der Kernoase <i>Balad Seet</i> (Oman) im Anbaujahr 2000/2001	26
Abbildung 8. Übersichtskarte des zentralen Teiles der Streuoase <i>Maqta</i> (Oman)	28
Abbildung 9. Anzahl angebaute Palmensorten in der Kernoase <i>Balad Seet</i> (Oman) im Jahr 2002	29
Abbildung 10. Verteilung der wichtigsten Palmensorten in der Kernoase <i>Balad Seet</i> (Oman) im Jahr 2002	32
Abbildung 11. Der durchschnittliche Ertrag wichtiger Palmensorten der Kernoase <i>Balad Seet</i> (Oman) im Jahr 2002	34
Abbildung 12. Durchschnittliche Erträge der wichtigsten Palmensorten in <i>Balad Seet</i> (Oman) im Jahr 2002	35
Abbildung 13. Ausbringungsmenge von Tierdung zu den verschiedenen Palmensorten in der Kernoase <i>Balad Seet</i> (Oman) im Jahr 2002	36
Abbildung 14. Ausbringungsmenge von Tierdung in den verschiedenen Palmengärten der Kernoase <i>Balad Seet</i> (Oman) im Jahr 2002	36
Abbildung 15. Verteilung der wichtigsten Palmensorten in der Streuoase <i>Maqta</i> (Oman) im Jahr 2002	38
Abbildung 16. Verteilung der wichtigsten Palmensorten in der Streuoase <i>Maqta</i> (Oman) im Jahr 2002	38
Abbildung 17. Niederschläge im Zeitraum Juli 2001 bis Juni 2003 und Monatsmittel- maximale Tagesmittel- und minimale Tagesmitteltemperatur im Zeitraum November 2002 bis September 2003 in der Kernoase <i>Balad Seet</i> (Oman)	39
Abbildung 18. Schematischer Querschnitt im Tal von <i>Balad Seet</i> , <i>Wadi Bani Awf</i> (Oman)	41
Abbildung 19. Bewässerungsrotation und ihre Untereinheiten	43

Abbildung 20. Topographische Karte der Kernase <i>Balad Seet</i> (Oman) und eines Teils des angrenzenden Felsplateaus	44
Abbildung 21. Topographische Karte der Streuoase <i>Maqta</i> (Oman) and eines Teils des angrenzenden Felsplateaus	45
Abbildung 22. Aus den Tritium- und Helium 3-Konzentrationen ermittelte Wasseralter für Wasserproben aus den Oasen <i>Balad Seet</i> (BS vor der Quellbezeichnung) und <i>Maqta</i> (M vor der Quellbezeichnung) (Oman)	46
Abbildung 23. Aus den SF ₆ -Konzentrationen ermittelte Wasseralter für Wasserproben aus den Oasen <i>Balad Seet</i> (BS vor der Quellbezeichnung), <i>Maqta</i> (M vor der Quellbezeichnung), <i>Hat</i> , <i>Misfat</i> und <i>Ismaiah</i> (Oman)	47
Abbildung 24. Entwicklung des Bodenwassergehalts über zwei Bewässerungszyklen in der Kernase <i>Balad Seet</i> (Oman). Die Daten sind Mittelwerte von vier dielektrischen Kapazitätssonden	49
Abbildung 25. Entwicklung des Bodenwassergehalts über zwei Bewässerungszyklen in der Kernase <i>Balad Seet</i> (Oman). Die Daten sind Mittelwerte von vier Sonden. Die grauen Balken geben Standardfehler des Mittelwertes an	50
Abbildung 26. Bodenwassercharakteristik dreier Bodentiefen eines Terrassenbodenprofils aus der Kernase <i>Balad Seet</i> (Oman)	51
Abbildung 27. Vergleich des Kornertrages von fünf Landrassen und drei verbesserten Weizensorten unter zwei Bewässerungsintervallen in der Kernase <i>Balad Seet</i> (Oman) im Anbaujahr 2001/2002	54
Abbildung 28. Vergleich des Strohertrages von fünf Landrassen und drei verbesserten Weizensorten unter zwei Bewässerungsintervallen in der Kernase <i>Balad Seet</i> (Oman) im Anbaujahr 2001/2002	55
Abbildung 29. Pflanzenhöhe von fünf Landrassen und drei verbesserten Weizensorten unter zwei Bewässerungsintervallen in der Kernase <i>Balad Seet</i> (Oman) im Anbaujahr 2001/2002	56
Abbildung 30. Stickstofffixierungsrate beim zweiten und dritten Schnitt von Luzerne in der Kernase <i>Balad Seet</i> (Oman) im Anbaujahr 2003	58
Abbildung 31. Jährliche Zufuhr von Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in Form von Tierdung und synthetischen Dünger auf Feldern dreier Größenklassen (385 Felder) in der Kernase <i>Balad Seet</i> (Oman) von 2001-2002. Die Anzahlen der Felder stellen absolute Häufigkeiten der entsprechenden Größenklasse dar	64
Abbildung 32. Zweijahresbilanz (Einträge–Entzüge) von Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) für Felder dreier Größenklassen (385 Felder) in der Kernase <i>Balad Seet</i> (Oman) von 2001-2002. Die Anzahlen der Felder stellen absolute Häufigkeiten der entsprechenden Größenklasse dar	65
Abbildung 33. Jährliche Zufuhren von Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in Form von Tierdung auf die 17 Terrassensystemen (Ackerflächen und Palmengärten) in der Streuoase <i>Maqta</i> (Oman) von Februar 2001 bis März 2002	66
Abbildung 34. Teilbilanz (Einträge – Entzüge) von Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in Form von Tierdung auf die 17 Terrassensystemen (Ackerflächen und Palmengärten) in der Streuoase <i>Maqta</i> (Oman) von Februar 2001 bis März 2002	67

Bilderverzeichnis

Photo 1. Die Kernoase von <i>Balad Seet</i> (Oman)	10
Photo 2. Übersicht über die Streuoase <i>Maqta</i> (Oman)	12
Photo 3. Ein Bauer der Kernoase <i>Balad Seet</i> (Oman) bereitet die männlichen Pollen für die Bestäubung der weiblichen Blüten vor	31
Photo 4. Ein Bauer der Bergoase <i>Balad Seet</i> erntet frische Datteln der Sorte <i>Naghal</i>	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Schwellenwerte für den Salz- und Chloridgehalt von Bewässerungswasser	14
Tabelle 2. Messwerte zur Bewässerungswasserqualität in den Oasen <i>Balad Seet</i> und <i>Maqta</i> (Oman)	41
Tabelle 3. pH-Werte und Konzentrationen an organischem Kohlenstoff (C_{org}), anorganischem Kohlenstoff (C_{anorg}), $CaCO_3$, und elektrische Leitfähigkeit in drei verschiedenen Tiefenstufen eines Terrassenbodenprofils in <i>Balad Seet</i> , Oman	48
Tabelle 4. Gesättigte Wasserleitfähigkeit, Gesamtporenvolumen, Lagerungsdichte und verfügbare Feldkapazität (\pm ein Standardfehler) ungestörter Bodenproben aus verschiedenen Tiefen eines Terrassenprofils aus der Kernoase <i>Balad Seet</i> (Oman).	50
Tabelle 5. pH, elektrische Leitfähigkeit (EC), Konzentrationen von Chlorid (Cl^-), Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Natrium (Na^+), Anionen und Kationen, der totalen Alkalinität, des residuellen Natriumcarbonats (RSC) und der Natrium-Adsorptionskapazität im Quellwasser der Kernoase <i>Balad Seet</i> (Oman)	52
Tabelle 6. Korn- und Strohertrag, Tausendkorngewicht (TKG), Pflanzenhöhe und Ährenlänge von fünf Landrassen und drei verbesserten Weizensorten unter zwei Bewässerungsintervallen in der Kerngoase <i>Balad Seet</i> (Oman) im Anbaujahr 2001/2002	53
Tabelle 7. Stoffflüsse innerhalb der Oasenkerzone von <i>Balad Seet</i> (Oman)	60
Tabelle 8. Stoffaustausch zwischen dem Oasenker und dem Oasenrand von <i>Balad Seet</i> (Oman)	60
Tabelle 9. Lufttrockener Ertrag ($kg\ ha^{-1}$) der in vier Klassen eingeteilten Hauptfeldkulturen in der Kernoase <i>Balad Seet</i> (Oman) in den Anbaujahren 2000/2001 und 2001/2002	61
Tabelle 10. Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K)- Konzentrationen der in vier Klassen eingeteilten Hauptfeldkulturen in der Kernoase <i>Balad Seet</i> (Oman) in den Anbaujahren 2000/2001 und 2001/2002.	62
Tabelle 11. Lufttrockener Stroh- und Kornertrag ($kg\ ha^{-1}$) der Weizenlandsorte <i>Walidi</i> ; Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium(K)- Konzentrationen ($g\ kg^{-1}$) bei vier Ertragsklassen in der Streuoase <i>Maqta</i> (Oman) im Anbaujahr 2001/2002	63
Tabelle 12. Jährliche Zufuhr, Entzüge und Teilbilanzen von Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) für Ackerflächen und Palmengärten in der Bergoase <i>Balad Seet</i> (Oman). Die Daten stellen einen Mittelwert von zwei Jahren dar (Oktober 2000 bis Oktober 2002).	68
Tabelle 13. Jährliche Zufuhr, Entzüge und Teilbilanzen von Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) für Ackerflächen und Palmengärten in der Streuoase <i>Maqta</i> (Oman). Die Daten stellen einen Mittelwert von einem Jahr dar (Februar 2001 bis März 2002)	69
Tabelle 14. Einteilung der Nährstoffzufuhren nach ihrem Ursprung (synthetisch oder organisch) und Intensität der zugeführten Nährstoffe (NPK) auf Feldern mit Weizen, Grünfüttergerste, Sorghum, Luzerne, Knoblauch und Koriander in der Bergoase von <i>Balad Seet</i> (Oman) im Anbaujahr 2001/2002	80
Tabelle 15. Kulturspezifische Mittelwerte der NPK-Zufuhren, Entzüge und Nährstoffteilbilanzen bei Weizen, Grünfüttergerste, Sorghum, Luzerne, Knoblauch und Koriander in der Bergoase von <i>Balad Seet</i> (Oman) im Anbaujahr 2001/2002	81

1. Einleitung

1.1. Geographie und Klima Omans

Mit einer Fläche von ca. 309.500 km² liegt das Sultanat Oman an der südöstlichen Spitze der Arabischen Halbinsel (Scholz, 1999; Abb. 1). Ein Drittel seiner Gesamtbevölkerungszahl von etwa zwei Millionen Einwohnern konzentriert sich in der Hauptstadt Muscat und in der schmalen Küstenebene *Al-Batinah* (Al-Wadhahi, 1996; Ibrahim, 1999).



Abbildung 1. Karte des Omans mit den Lagen der Untersuchungsgebiete (Quelle: Oman Maps, the Perry- Castaneda Library Maps Collection, the University of Texas)

Oman lässt sich in verschiedene naturräumliche Einheiten gliedern: (1) schmale Küstenebenen umfassen im Norden den Golf von Oman (*Al-Batinah*) und im Süden die Ebene von *Salalah*; (2) das Omangebirge erstreckt sich bogenförmig im Norden Omans parallel zur Küste des Golfs von Oman. Im *Jabal Akhdar* erreicht dieses Gebirge eine Höhe von über 3000 m. Zum Landesinnern fällt das Gebirge allmählich ab. Es wird hier

von tiefen *Wadis*¹ durchschnitten. In den oberen Abschnitten der *Wadis* befinden sich zahl-reiche Oasen; (3) die Sandwüsten, zu denen die *Ramlat al Wahiba* und die *Rub al Khali* (das leere Viertel) gehören; (4) das *Dhofar*-Gebirge, das durch canyonartig eingetiefte *Wadis* zerschnitten wird und in Zentral-*Dhofar* in ein flaches Tafelland übergeht; (5) das innerromanische Tafelland, eine nach Südwesten geneigte terrassenförmige Kies- und Sandwüste, die von zahlreichen Trockentälern durchzogen ist (Länderbericht, Oman, 1995; Scholz, 1999).

Das Klima des Landes ist sehr trocken und heiß mit durchschnittlichen Jahrestemperaturen zwischen 26°C und 29°C im Tiefland, wobei die Temperatur in den Küstenregionen nahe der Hauptstadt Muscat 50°C erreichen kann, bei einer Luftfeuchtigkeit von 90% (Al-Wadhahi, 1996; Dorvlo und Apratum, 1998, 1999). Die Niederschläge sind mit durchschnittlich 100 mm pro Jahr gering und unberechenbar (Dutton, 1986). Dabei fallen im Norden des Landes weniger als 50 mm Jahresniederschläge, in Berglagen jedoch teilweise über 300 mm (Al-Wadhahi, 1996, Norman et al., 1998; Victor and Al-Farsi, 2001; Abb. 2). Trockenperioden von über fünf Jahren sind keine Seltenheit. Diese harten Umweltbedingungen führen dazu, dass nur 0,3 % der Fläche des Landes landwirtschaftlich genutzt werden können (FAO, 1997).

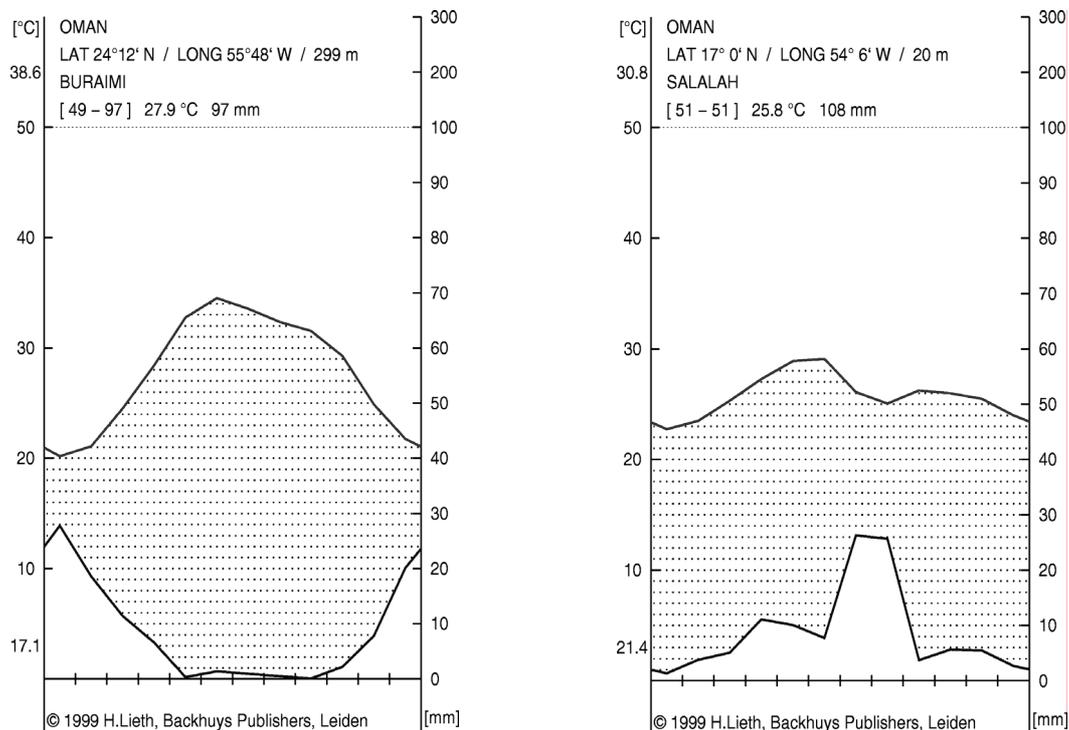


Abbildung 2. Darstellung des durchschnittlichen jährlichen Temperatur- und Niederschlagsverlaufes von Buraimi im Norden und Salalah im Süden Omans

¹ *Wadi*, tief eingeschnittenes Bett eines Berg- oder Wüstenflusses, das nur nach plötzlichen, heftigen Regenfällen Wasser führt.

1.2. Landwirtschaft und Wasserressourcen

Die wenigen Niederschläge und hohen Temperaturen ermöglichen es nicht Regenfeldbau zu betreiben. Deshalb hängt die Landwirtschaft in Oman völlig von der Verwendung von Grundwasser ab, mit Ausnahme der natürlichen Weidegebiete im *Dhofar*-Gebirge, die saisonale Monsunniederschläge von Juni bis September erhalten. Für die Hälfte der 62.000 ha großen kultivierten Flächen im Oman wird Brunnenwasser verwendet, während die andere Hälfte durch die traditionellen Bewässerungsanlagen *Aflaj*² bewässert wird (Abdel-Rahman & Omezzine 1996; MAF, 1995). Omans wichtigste landwirtschaftliche Region ist die Küstenebene im Norden (*Al-Batinah*), in der 10.000 bis 15.000 kleine Betriebe bzw. Gärten mit einer Gesamtfläche von mehr als 20.000 Hektar auf einer Länge von 250 km verstreut sind. In der Region um *Salalah* im Süden befinden sich insgesamt 800 bis 1000 ha landwirtschaftliche Nutzfläche und eine noch kleinere Fläche auf der nördlichen Halbinsel *Musandam*. Darüber hinaus gibt es eine sehr große Anzahl von Oasen im nördlichen Landesinneren. Manche Oasen wie *Ibri* und *Nizwa* haben mehrere Hundert ha an landwirtschaftlicher Fläche und sind gut zugänglich, während andere in den unzugänglichen Bergwadis liegende Oasen nur über wenige ha landwirtschaftliche Nutzfläche verfügen (Dutton, 1986, 1987). Seit 1970 wurden enorme Anstrengungen unternommen, um die landwirtschaftliche Nutzfläche an der Küstenebene zu erweitern. Moderne Tiefbrunnen wurden gebaut, um die Anlage von Gärten entlang der Küstenebene *Al-Batinah* zu ermöglichen. Vermehrte Wasserentnahme führte allerdings zu einer teilweise erheblichen Absenkung des Grundwasserspiegels und dem nachfolgenden Eindringen von Salzwasser, das zahlreiche traditionelle Brunnen in Küstennähe unbrauchbar machte. Allerdings haben die zuständigen Behörden diese Gefahr erkannt und versuchen, den Bau neuer Brunnen zu begrenzen. Außerdem wurden in den *Wadis* zahlreiche Staudämme gebaut, um die Versickerung des Regenwassers und damit auch den Grundwasserspiegel zu erhöhen (Dutton, 1987; Victor and Al-Farsi, 2001). Traditionell war die Landwirtschaft im Oman auf die Selbstversorgung ausgerichtet und der Überschuss an landwirtschaftlichen Produkten war selbst in niederschlagsreichen Jahren bescheiden. Durch die über die Jahre steigende Erdölförderung sank der Anteil der Landwirtschaft und Fischerei am Bruttosozialprodukt in erheblichem Maße, so dass er im Jahr 1993 nur noch 3.3% betrug (FAO, 1997). Landwirtschaft und Fischerei bilden jedoch weiterhin die Erwerbsgrundlage für einen erheblichen Teil der Bevölkerung, wobei heutzutage noch höchstens ein Drittel

² *Aflaj* (sing. *Falaj*): Ein *Falaj* umfasst einen unterirdischen, bis zu 20 km langen Kanal, über den in Trockengebieten des in Galeriesystemen gesammelte Grundwasser vom Gebirgsfuß oder von *Wadis* in eine zu bewässernde Oase geleitet wird.

der männlichen Landbevölkerung permanent in der Landwirtschaft tätig ist (Scholz, 1999; Länderbericht, 1995). Landesweit wird die Wertschöpfung dominiert durch die Erdölindustrie, Handel und Dienstleistungen.

Ein *Falaj*-System besteht aus unterirdischen Wassersammelanlagen und einem Tunnel, welcher das Grundwasser dem natürlichen Gefälle folgend über oft große Entfernungen in besiedeltes Gelände leitet, um es dort sowohl für den menschlichen Gebrauch als auch für die Landwirtschaft nutzbar zu machen. In der Regel ist damit eine ganzjährige Versorgung der Oasen gewährleistet (Asche, 1981; Bait-Ishaq, 1995). Die *Aflaj*-Anlagen sicherten nicht nur die Existenz der Oasensiedlungen über Hunderte von Jahren, sondern spiegeln auch ein hohes Niveau an wasserbaulichen und architektonischen Kenntnissen wider (Cost, 1983). Alhajri (1998) definiert den *Falaj* wie folgt: der *Falaj* ist ein Kanal, der zum einen das künstlich angezapfte Wasser, zum andern das auf natürliche Art fließende Wasser aus Quellen und zum dritten das Regenwasser in den Tälern ansammelt und es für die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen sowie für den menschlichen Bedarf zur Verfügung stellt. Nach der vorigen Definition gibt es in Oman drei Typen von *Aflaj*: (1) Der *Dawody-Falaj* besteht aus einem langen unterirdischen Kanal, der eine Länge von mehreren Kilometern sowie eine Tiefe von mehreren Metern erreichen kann. Das in ihn ganzjährig fließende Wasser wird von Niederschlagsschwankungen nur geringfügig beeinflusst, (2) Der *Ghayl-Falaj* dessen Wasser von dem nach dem Regen im *Wadi* fließenden und in der Kiesschicht angesammelten Wasservorkommen stammt. Deshalb führt der *Ghayl-Falaj* nur saisonal Wasser. Meist besteht aus einem offenen Kanal mit einer Länge von 200 bis 1000 m und einer Tiefe von etwa vier Meter. (3) Der *Aini-Falaj* erhält sein Wasser direkt von einer am Berghang entspringenden und natürlich fließenden Quelle. Diese fließt mehr oder weniger kontinuierlich und der Kanal hat ebenfalls eine Länge von 200 bis 1000 m (Bait-Ishaq, 1995). *Aflaj* bilden die Hauptquelle für die Bewässerung im Landesinneren des Oman. Es existieren etwa 4000 *Aflaj*, die sich jedoch sowohl hinsichtlich ihrer Durchflussmenge als auch ihrer Länge deutlich unterscheiden. Die Länge eines *Falaj* kann Landesweit zwischen 100 m und 12 km schwanken (Abdulrahman, 1985). Die Konstruktion der *Falaj*-Anlagen ist möglicherweise auf den Einfluss persischer Einwanderer vor etwa 1500 Jahren zurückzuführen, aber eine Eigenentwicklung werden in neuerer Zeit für den Oman diskutiert (Häser, 2003). Sie sind heute charakteristisch für die omanische Kulturlandschaft (Allen, 1987). Das *Falaj*-Bewässerungssystem ist nicht nur in Oman zu finden. Es existieren ähnliche Bewässerungssysteme in anderen Regionen der arabischen Halbinsel sowie in Iran, China, Japan, Ägypten, Marokko, Spanien, Mexiko und Peru (Al-Ismaily et al., 1998).

1.3. Projekthintergrund

Die nachfolgende Arbeit entstand im Rahmen des interdisziplinären Forschungsvorhabens "Transformationsprozesse in Oasensiedlungen Omans"³. Die Finanzierung der ersten zweijährigen Pilotphase erfolgte im Rahmen des "Forschungsschwerpunktprogrammes Baden Württemberg". Die darauf folgende zweijährige Projektphase wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen eines im Normalverfahren gestellten Paketantrages gefördert. Die derzeit laufende dritte, zweijährige Projektphase wird ebenfalls von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziert.

1.4. Problemstellung, Zielsetzung und Arbeitshypothesen

Aufgrund der unsicheren Wasserversorgung waren die Omanis über Jahrtausende hinweg gezwungen, sich an die harten Umweltbedingungen anzupassen. Als Siedlungsorte boten sich deshalb solche Stellen an, die hydrologisch günstig lagen und die Anlage von Bewässerungssystemen erlaubten. Die Oasenbevölkerung gründete dabei ihre ökonomische Existenz auf ein stabiles und in sich weitgehend geschlossenes Sozialsystem. Seit dem Beginn der kommerziellen Erdölförderung und politischen Öffnung des Landes in den frühen 1970er Jahren erfährt das Land jedoch einen raschen und fortschreitenden Modernisierungsprozess (Scholz, 1977; 1982), der zu einer grundlegenden Veränderung der landwirtschaftlichen Produktionsbedingungen und – Prozesse geführt hat. Diese Entwicklung hat zur Arbeitskräfteabwanderung von den Oasensiedlungen in die neu entstehenden städtischen Siedlungen um die Hauptstadt Muscat und in sekundäre regionale Zentren geführt.

Übergeordnetes Ziel der im Rahmen des Gesamtprojektes durchgeführten agrarwissenschaftlichen Untersuchungen war es, den *status quo* der einem raschen Transformationsprozess unterliegenden agro-pastoralen Produktionsformen in Oasensiedlungen zu erfassen. Dazu sollten vor allem Produktivität und Ressourcennutzungseffizienz dieser Systeme dokumentiert und die grundlegenden (Nähr-)Stoffflüsse quantifiziert werden. Diese Untersuchungen zum Verständnis der grundlegenden Funktionsweise omanischer Bergoasen, die derzeit noch vertieft und fortgeführt werden, können zukünftig auch zur Beurteilung der Nachhaltigkeit der dort praktizierten Landwirtschaft und möglichen Entwicklungschancen dienen.

³ Die mitwirkenden Institutionen sind: Orientalisches Seminar, Universität Tübingen; Städtebauliches Institut, Universität Stuttgart; Fachgebiet Ökologische Pflanzenbau und Agrarökosystemforschung in den Tropen und Subtropen, Universität Kassel; Orientabteilung, Deutsches Archäologisches Institut, Berlin, Department of Archaeology, Sultan-Qaboos-Universität in Muscat (Oman); Department of Crop Sciences, Sultan Qaboos University, Muscat

Innerhalb des Gesamtprojektes gab es mehrere, für sich betrachtet aussagekräftige Einzeluntersuchungen, deren Ergebnisse bereits veröffentlicht wurden und dieser in Form im Anhang zu finden sind.

Die in der hier vorgelegten Arbeit zu überprüfenden Arbeitshypothesen lauteten wie folgt:

- Die Bergoasen des Omans stellen große "sinks" für Pflanzennährstoffe Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) dar. Dabei spielt der tierbedingte Nährstofftransfer von der Weide in der Umgebung der Oasen zum Ackerland eine wichtige Rolle.
- Da die Niederschläge über mehrere Jahre ausfallen können, hängen Entstehung und Überleben der Oasen entscheidend ab von der Existenz großer, gut gepufferter natürlicher Wasserreservoirs.
- Luzerne (*Medicago sativa* L.) leistet durch ihre N₂-Fixierungsleistung einen erheblichen Beitrag zur Stickstoffsversorgung des Ackerlands und damit der Gesamt-N-Bilanz der Oasen.
- Das Bewässerungssystem sowie die Wasser- und Bodenqualität der omanischen Bergoasen sind so angelegt, dass eine Versalzung der Terrassenböden selbst bei intensiver, langfristiger Nutzung vermieden wird.
- Die Bergoasen sind bedeutende Refugien für pflanzengenetische Ressourcen, da ihre Bewohner bis in die 1980er Jahre durch fehlende infrastrukturelle Außenanbindung jahrtausendlang vergleichsweise isoliert lebten und auf Eigenversorgung angewiesen waren.

1.5. Stand der Forschung

Aufgrund der vielfältigen Interaktionen zwischen pflanzlicher und tierischer Produktion und ihrer dadurch bedingten Flexibilität gegenüber Niederschlagsschwankungen können agro-pastorale Landnutzungssysteme grundsätzlich als Ausdruck menschlicher Anpassung an Umweltbedingungen verstanden werden, die ein hohes agrarisches Produktionsrisiko zeigen. Dabei wurden allerdings bisher die Grundlagen des Nebeneinanders von Nomaden und sesshaften Ackerbauern eher anthropologisch und soziologisch als naturwissenschaftlich-quantitativ untersucht (Mountjoy und Gliessman, 1988). Forschungsarbeiten zur Nachhaltigkeit der Landnutzung in derart integrierten Landnutzungssystemen, die beispielsweise auf der Analyse von Stoffflüssen beruhen, sind derzeit kaum verfügbar.

In den letzten Jahren hat die Bestimmung von Stoffflüssen in Agrarökosystemen weltweit eine verstärkte agrarwissenschaftliche Aufmerksamkeit erfahren, da dieses

Instrument geeignet erscheint, um wenigstens eine teilweise, unvoreingenommene Bewertung der Nachhaltigkeit eines Systems und seiner Wirkung auf die Umwelt vorzunehmen. Holländische Wissenschaftler, die über 'low input'-Anbausysteme in Afrika arbeiteten, gaben den Anstoß für viele der ersten Studien (Baijukya und de Steenhuijsen Piters, 1998; Wijnhoud et al., 2003). Ausgehend von der Sorge um negative Einflüsse der menschlichen Wirtschaftsweise auf die Bodenfruchtbarkeit, die als Ursache für hochgradige Bodenerschöpfung und Degradation betrachtet wurden und mit dem Ziel ortsspezifische Managementstrategien von Kleinbauern zu verstehen und zu verbessern (Harris, 1998), wurden oft bio-physikalische Modellierungsansätze, wie NUTMON⁴ benutzt, um Nährstoffeinträge als auch –entzüge von Feldern, Distrikten und auch Ländern zu ermitteln (Smaling et al., 1993, 1996; Smaling und Fresco, 1993; Stoorvogel und Smaling, 1994; de Jaeger et al., 1998ab; van den Bosch et al., 1998ab). Fastzeitgleich entwickelten europäische und amerikanische Wissenschaftler Messverfahren um in Anbausysteme der gemäßigten Breiten und im intensiven Nassreisanbau in Asiens Stickstoff- und Kohlenstoffausträge in die Atmosphäre zu messen (Ko und Kang, 2000; Wnag und Adachi, 2000; Wassmann et al., 2000; Xu et al., 2000; Butterbach-Bahl et al., 2001). Für diese Studien wurden, je nach Zielsetzung und Umfang der Untersuchung, entweder Teile der Nährstoffumsätze oder das gesamte Geschehen einbezogen und dementsprechend Teil oder Gesamtbilanzen erstellt.

Untersuchungen zur Gesamtbilanz umfassten Messungen oder Schätzungen der Inputs aus Mineraldüngung tierischem Mist, N₂-fixierenden Leguminosen und freilebenden Mikroorganismen, Nährstoffmobilisierung aus tieferen Bodenschichten, menschlichen Fäkalien, Nährstoffeinträgen durch Bewässerung und aus der Atmosphäre (in Form von Regen oder Staub) sowie der Outputs in Form von Ernteerträgen, Erosion, atmosphärischen Emissionen und Verlusten durch Auswaschungen. Im Gegensatz dazu wurde bei Teilbilanzen davon ausgegangen, dass Parameter, wie atmosphärische Eintragungen, gasförmige Emissionen oder Auswaschungsverluste entweder kaum zuverlässig messbar sind oder aber, im Vergleich zu den anderen Parametern, wegen ihrer geringeren Größenordnung vernachlässigt werden können.

Während die meisten bisher verfügbaren Veröffentlichungen sich auf einfache Anbausysteme im Regenanbau oder im bewässerten Reisanbau beziehen, gibt es bisher nur wenige Informationen über Nährstoffbilanzen aus komplexeren Rotationssystemen, wie sie in bewässerten Oasensystemen Ost-Arabiens vorkommen. Ein wesentlicher Grund dafür ist wohl, dass die meisten agro-pastoralen Systeme geographisch nur schwer abgrenzbar und die Datenerfassung deshalb schwierig ist. Vor diesem

⁴ Nutrient Monitoring for Tropical Farming Systems

Hintergrund stellen Oasen mit dem sie umgebenden Einzugsgebiet aufgrund ihrer klaren räumlichen Begrenzung besonders attraktive Untersuchungsobjekte dar.

Grundlegende, soziologisch orientierte Untersuchungen zu omanischen Oasen stammen von Birks (1978a und 1978b). Auch Scholz (1984) hat sich intensiv mit Oasenbewässerungssystemen innerhalb des derzeitigen Transformations- und Modernisierungsprozesses befasst. Wilkinson (1974 und 1977) beschreibt umfassend die Organisation und Funktionalität der viele Jahrhunderte alten Bewässerungssysteme und deren Bedeutung für die Oasenlandwirtschaft und untersucht dabei auch ihre noch immer offene Entstehungsgeschichte. In diesen Arbeiten zur Oasenlandwirtschaft blieben jedoch die Produktivität und grundlegende Funktionsweise von Ackerbau, Gartenbau und Tierhaltung hinsichtlich der Erträge, Nährstoff- und Wassernutzungseffizienz sowie die Düngungsmaßnahmen unberücksichtigt. In Bezug auf die Wassernutzung stellen die Arbeiten von Norman et al., (1998) eine Ausnahme dar. Sie deuten auf eine überraschend hohe Wassernutzungseffizienz im traditionellen Oasenfeldbau Omans an. Allerdings liegen diesen Arbeiten nur einjährige und auf wenigen Einzelparzellen erhobene Daten zugrunde.

Die vermutlich gründlichsten Arbeiten zu Stoffflüssen in (semi-)ariden agropastoralen Systemen kommen von den sehr ertragsschwachen Böden des westafrikanischen Sahel. Dort konnten Powell et al. (1996) eindrücklich den besonderen Beitrag der Tierhaltung für Nährstoffbilanzen zeigen und damit die grundlegende Abhängigkeit des sedentären Ackerbaus vom Nährstofftransfer durch die Dung liefernde teil-nomadische Viehhaltung. Aus Arbeiten von Fernandez et al. (1995) und Turner et al. (1995) im gleichen Gebiet geht hervor, dass für die Hirseproduktion pro ha Ackerfläche zwischen 10 und 65 ha Weideland mit entsprechendem Transfer von tierischem Dung zum Ausgleich negativer Nährstoffbilanzen nötig sind. Schlecht et al., (1995) kommen in ihren Berechnungen bei vollständigem Entzug von Korn und Stroh sogar auf bis zu 240 ha Weideland pro ha Ackerland. Ein derart großes Einzugsgebiet steht für die kleinräumigen Oasen des Oman allerdings nur sehr selten zur Verfügung und deshalb ist das Verständnis ihrer funktionalen Grundlagen in Vergangenheit und Gegenwart von besonderem Interesse. Nur auf der Basis solcher Grundlagen können realistische Zukunftsperspektiven für diese marginalen Agrarökosysteme erarbeitet werden. Für die Datenerhebung in Oasensystemen des Oman kommt erschwerend hinzu, dass diese Systeme derzeit einem hohen sozial und ökonomisch bedingten Druck ausgesetzt sind (Preisverfall für Oasenprodukte, Landflucht, Zerstörung der dörflichen Sozialordnung, Abhängigkeit von Wanderarbeit), der vielerorts zum raschen Verschwinden der traditionellen Formen des Bewässerungslandbaues und der dazugehörigen dörflichen

Infrastruktur führen wird (Birks, 1977; Dutton, 1987). Dieser rasche Wandel der Produktionsbedingungen führt dazu, dass Untersuchungsergebnisse im landwirtschaftlichen Bereich stets Momentaufnahmen darstellen und damit in ihrer Gesamtaussage stark zeitbezogen sind.

Um diese Wissenslücke zu füllen, wurde diese Untersuchung in zwei alten Bergoasen im nördlichen Oman durchgeführt, deren hoher Kohlenstoffumsatz auf intensiv gedüngten Böden mit einem C:N-Verhältnis von 10-12 bereits Gegenstand einer früheren Untersuchung war (Wichern et al., 2004ac).

2. Material und Methoden

2.1. Beschreibung der Untersuchungsgebiete

Der Schwerpunkt der dargestellten Untersuchungen fand in zwei beispielhaft ausgesuchten Bergoasen der *Al-Hajar* Gebirgskette im Norden Omans statt, die sich grundlegend in ihrer Struktur- und Nutzungsintensität unterschieden.

Balad Seet (57,39° östlicher Länge, 23,19° nördlicher Breite) ist eine Bergoase des *Jabal Al-Akhdar Gebirgsmassiv*. Sie liegt in einem Talkessel am Ursprung des *Wadi Bari Awf* in einer Höhe von 950 bis 1020 m über dem Meeresspiegel, umgeben von bis zu 1200 m hohen Felswänden (Photo 1).



Photo 1. Die Kernoase von *Balad Seet* (Oman)

Das Dorf wird von 632 Einwohnern bewohnt, die auf 80 Haushalte verteilt sind. Neuere gemeinsam mit dem archäologischen Teilprojekt durchgeführte Untersuchungen ergaben, dass es sich bei *Balad Seet* um eine sehr alte Siedlung handelt, deren Ursprung sich vermutlich auf das zweite vorchristliche Jahrtausend datieren lässt (Häser, 2003). Die alte Besiedlungsgeschichte dürfte in der ökologisch günstigen Lage der Oase begründet sein. Aufgrund seiner geographischen Lage mitten im westlichen *Al-Hajar* Gebirge Nordomans war das Dorf bis Anfang der achtziger Jahren weitgehend von der Außenwelt abgeschlossen. Eingeführt wurden lediglich Haushaltswaren, Kleidung, Zucker, Kaffee und Brennstoff für die Kerosinlampen. Umgekehrt ergab sich für die Oasenbewohner die Möglichkeit, ihren Überschuss an landwirtschaftliche Erzeugnisse, wie Datteln (*Phoenix dactylifera* L.), Limonen (*Citrus aurantifolia* SWINGLE, *C. aurantium*

L., *C. limettioides* L.), Knoblauch (*Allium sativum* L.) und Zwiebeln (*Allium cepa* L.) auf den Märkten von *Al-Hamra*, *Nizwa* und *Al-Rustaq*, zu verkaufen. Mit dem Bau einer Schotterpiste Anfang der 1980er Jahre löste der Handel mit *Al-Rustaq* den traditionellen Warenaustausch über das Gebirge mit *Al-Hamra* ab. Damit gelangten erstmals Mineraldünger, aber auch Nahrungsmittel wie Weizenmehl, Brot, Gemüse, Obst, Fleisch und andere konservierte Lebensmittel in größerem Umfang in das Dorf. Dadurch verlor die Landwirtschaft in *Balad Seet* ihren Charakter als Subsistenzwirtschaft und wurde stark von der Außenwelt abhängig. Der ursprüngliche Ortskern liegt auf einem Hügel, und ist von sechs Terrassensystemen und Palmengärten umgeben. Neben Dattelpalmen befinden sich auch in den Palmengärten von *Balad Seet* Zitrus sowie vereinzelt Banane (*Musa paradisiaca* L.), Mango (*Mangifera indica* L.), Granatäpfel (*Punica granatum* L.), Feige (*Ficus carica* L.) und Papaya (*Carica papaya* L.). Ihrer Infrastruktur und Anordnung nach ist *Balad Seet* als "Kernoase" zu bezeichnen, die durch weitgehend zusammenhängende Acker- und Siedlungsflächen als Folge einer stabilen Wasserversorgung mit relativ großer Quellschüttung gekennzeichnet ist.

Maqta (59.00° östlicher Länge, 22,83° nördlicher Breite) ist eine Bergoase, die nach den Ergebnissen der Pollenanalyse eines Leitprofiles vermutlich erst im frühen zwei Jahrtausend nach Christus gegründet wurde (Urban und Buerkert, 2005). Sie liegt am oberen Ende des weit geöffneten *Wadi Khabbahs* des *Jabal Bani Jabir* Gebirgszuges in einer Höhe von 1050 Meter über dem Meeresspiegel (Photo 2).

Maqta ist eine idealtypische "Streuoase", die sich durch maximale Anpassung der Acker- und Siedlungsflächen an eine Vielzahl von Quellen mit wenig zuverlässigem Fluss auszeichnet.



Photo 2. Übersicht über die Streuoase *Maqta* (Oman)

2.2. Kartierung der Oasen *Balad Seet* und *Maqta*

Eine umfassende Kartierung der Untersuchungsgebiete war erforderlich, da die kleinräumige Ertrags- und (Nähr)- Stoffflussmessung in den Bergoasen *Balad Seet* und *Maqta* die Verfügbarkeit von maßstabsgetreuen Landnutzungskarten voraussetzten. Dafür wurden zunächst hochauflösende Farbfotos mittels eines mit Helium gefüllten Ballons aus etwa 500 m Höhe erstellt (Buerkert et al., 1996). Die Teile der Aufnahmen wurden mit Hilfe der GIS Software ArcView 3.2 digitalisiert, wobei die auf dem Bildschirm erkennbaren Umrissse der Terrassen und Felder nachgezeichnet wurden. Zur Entzerrung und Georeferenzierung der Terrassenkarten wurden die Eckpunkte der einzelnen Terrassen mittels eines elektronischen Tachymeters (Leica-Geosystems TPS 300, Leica GmbH, Schweiz) mit einer Messungengenauigkeit von ca. 0,01 m vermessen. Zur exakten Ausrichtung des Tachymeters wurden für jedes Terrassensystem mindestens zwei Referenzpunkte durch Langzeitmessung (20 Minuten) mit einem differentiellen GPS-Empfänger und einer Genauigkeit von 30-50 cm bestimmt (GPS; Trimble Pathfinder, Sunnyvale, CA, USA). Bewässerungskanäle (*Aflaj*), Bewässerungsbecken (*Lajal*) und Palmengärten wurden ebenfalls differentiell eingemessen.

Die Digitalisierung von russischen Generalstabskarten (1:100,000, Joint Stock Company SK-IMPEX, Moscow, Russia) in einem Geografischen Informationssystem (GIS) mittels des Software-Paketes ArcView 3.2 ermöglichte die Erstellung eines digitalen dreidimensionalen Höhenmodells mit 40 m Höhenlinien von der Topographie der beiden Untersuchungsgebiete und sowie von den umliegenden Bergen.

2.3. Menge, Qualität und Nutzung der Wasserressourcen

In *Balad Seet* wurde die Schüttung der vier Quellsysteme im Zeitraum November 2000 bis Juni 2003 monatlich gemessen. In *Maqta* dagegen wurden die 22 Einzelquellen mit wenigen Ausnahmen alle zwei Monate im Zeitraum März 2001 bis Juni 2003 gemessen. Zur Bestimmung der Quellschüttungen wurde die für das Füllen eines Gefäßes bekanntes Volumens (1 Liter für kleine, 20 Liter für mittlere und 200 Liter für große Quellen) benötigte Zeitdauer (Sekunden) mit Hilfe einer digitalen Stoppuhr bestimmt. Aus den Schüttungsmessungen konnte die Menge des Bewässerungswassers und entsprechender Inhaltsstoffuntersuchung auch die zugeführten Mengen an Stickstoff (N)-Phosphor (P) und Kalium (K) durch das Bewässerungswasser abgeleitet werden.

Die Regenereignisse wurden in *Balad Seet* ab Juli 2001 mit Hilfe eines manuellen Regenmessers (Friedrichs Gruppe, Wertheim, Germany) erfasst, um Änderungen der Quellschüttungen in Folge von Regenereignissen verfolgen zu können. In *Maqta* dagegen konnten die lediglich zwei kleinen Regenfälle während der im Untersuchungszeitraum beherrschender Trockenperiode nicht erfasst werden.

Innerhalb des Untersuchungszeitraumes wurden im Januar 2001 und Dezember 2002 repräsentative Quellwasserproben aus *Balad Seet* und *Maqta* entnommen. Da in *Balad Seet* alle 12 Quellen demselben Reservoir zu entspringen scheinen (Weier, persönliche Mitteilung), wurden dort nur die Quellen *Al-Miban*, *Al-Hiedan*, *Al-Littel* und der Dorfbrunnen beprobt (Abb. 5). Aufgrund des sehr viel vielfältigeren Ausgangsgesteins wurden in *Maqta* sechs verschiedene Quellen beprobt, um eine repräsentativere Aussage über die Wasserqualität machen zu können.

Die Wasserproben wurden eingefroren nach Deutschland transportiert und im Labor der Firma SEWA GmbH, Essen, ihre elektrische Leitfähigkeit EC_w , den Gehalt an Natrium (Na^+), Kalzium (Ca^{++}), Magnesium (Mg^{++}) und Chlorid (Cl^-) sowie den pH-Wert untersucht. Die elektrische Leitfähigkeit wurde benutzt, um das Ausmaß des Salzgehaltes im Bewässerungswasser abzuschätzen. Natrium und Chlorid haben in zu hoher Dosis toxische Wirkungen auf empfindliche Pflanzenarten. Zusätzlich kann Na zu einer Verschlechterung der Bodenstruktur führen, wenn es im Verhältnis zu den anderen Kationen in zu hoher Konzentration im Bewässerungswasser vorkommt. Zur Bewertung

der Na-Konzentration im Bewässerungswasser wurde die SAR (Sodium Absortion Ratio) wie folgt berechnet:

$$\text{SAR} = \text{Na} / \text{SQRT}(\text{Ca} + \text{Mg}) / 2$$

Na = Natriumgehalt des Bewässerungswassers in me / l

Ca = Kalziumgehalt des Bewässerungswassers in me / l

Mg = Magnesiumgehalt des Bewässerungswassers in me / l.

Schwellenwerte für das Auftreten von Beeinträchtigungen im Pflanzenwachstum sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1. Schwellenwerte für den Salz- und Chloridgehalt von Bewässerungswasser (Ayers und Westcot, 1985)

	Keine Einschränkungen	Leichte bis mittlere Einschränkungen	Schwere Einschränkungen*
Elektrische Leitfähigkeit EC_w ($dS\ m^{-1}$)	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
Natriumgehalt (SAR)	< 3	3 - 9	> 9
Chloridgehalt (me/l)	< 4	4 - 10	> 10
SAR = 0 – 3 und EC_w	> 0.7	0.7 – 0.2	< 0.2
SAR = 3 – 6 und EC_w	> 1.2	1.2 – 0.3	< 0.3
SAR = 6 – 12 und EC_w	> 1.9	1.9 – 0.5	< 0.5
SAR = 12 – 20 und EC_w	> 2.9	2.9 – 1.3	< 1.3
SAR = 20 – 40 und EC_w	> 5.0	5.0 – 2.9	< 2.9

* Schwere Einschränkung bedeutet, dass das Bewässerungswasser nur für jeweils sehr tolerante Kulturen nutzbar ist

Informationen zu Bewässerungsrechten und zur Organisation des Bewässerungssystems der beiden Bergoasen wurden durch Befragung der Bauern gewonnen. Es wurde außerdem angenommen, dass die gesamte verfügbare Wassermenge zur Bewässerung der Ackerflächen und der Palmengärten, sowie der Trinwasserversorgung der Oasenbewohner genutzt wurde.

2.4. Vergleich der Korn- und Sprosstrockenmasse omanischer und eingeführter Weizensorten unter unterschiedlicher Bewässerungsintensität

Am 13. November 2001 wurde in *Balad Seet* ein drei-faktorieller Feldversuch angelegt, mit dem Ziel, die Korn- und Sprosstrockenmasseproduktion der von Al-Maskri et al. (2003) beschriebenen fünf traditionellen Landsorten aus *Balad Seet* und *Maqta* mit drei eingeführten Weizensorten unter zwei verschiedenen Bewässerungsintensitäten zu untersuchen. Als Versuchsgelände dienten zwei benachbarten Felder im

Terrassensystem *Mazra*, die demselben Besitzer gehörten und eine ähnliche Vorgeschichte hatten. Die Anlage umfasste zwei Bewässerungsintensitäten (Intervalle von 18 und 27 Tagen), zwei Stufen der Nährstoffzufuhr (N, P and K Gaben in Höhe von 100-20-40 kg ha⁻¹ und 200-40-80 kg ha⁻¹) sowie acht Weizengenotypen. Die fünf traditionellen Landrassen waren *Sarraya* und *Greda* aus *Balad Seet*, *Walidi* und *Missani* aus *Maqta*, sowie *Cooley* aus der staatlichen Versuchstation in *Al-Rusail* und die drei modernen Zuchtvarietäten *Jimah1*, *Wadi Quraiyat 302* und *Wadi Quraiyat 308* ebenfalls aus der staatlichen Versuchstation in *Al-Rusail*. Bei drei Wiederholungen ergaben sich insgesamt 96 Parzellen mit jeweils 1,25 m² Fläche (Abb. 3). Aus technischen Gründen wurde jedem der beiden benachbarten Felder eine Bewässerungsintensität zugeordnet, innerhalb der Flächen wurden die Parzellen jedoch voll randomisiert. Die Bewässerung erfolgte durch Überstauen der einzelnen Parzellen, die einen Abstand von 50 cm aufwiesen. Dieser Abstand sollte einen wasserbedingten Transport von Nährstoffen zwischen den Parzellen ("Nachbarschaftseffekte") erschweren. Alle 96 Parzellen wurden zunächst alle 18 Tage bewässert (Bewässerungsintervall II). Nach der dritten Bewässerung wurde die Stressbehandlung begonnen, bei der die Parzellen 1-48 nur alle 27 Tage mit Wasser versorgt wurden (Bewässerungsintervall I), während die übrigen Parzellen weiterhin alle 18 Tage Wasser erhielten. Zum Zeitpunkt (30.03.02) der Vollreife wurden die Pflanzen wenige Zentimeter über der Bodenoberfläche abgeschnitten und sieben Tage lang auf dem Feld bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Danach wurde die Trockenmasse von Korn und Stroh, das Tausendkorngewicht (TKG) sowie die Pflanzen- und Ährenlänge bestimmt. Zur Beurteilung der Auswirkungen von Sorte, Düngung und Bewässerung auf das Pflanzenwachstum wurden die folgenden Messgrößen herangezogen: Kornertrag, Strohertrag, Tausendkorngewicht, Pflanzenhöhe und Ährenlänge. Alle erhobenen Daten wurden der Varianzanalyse (ANOVA) unterworfen. Nachdem keine signifikanten Wirkungen der beiden Düngungsstufen auf die Ertragsparameter festgestellt werden konnten, wurde zur Vereinfachung der Ergebnisdarstellung eine erneute ANOVA ohne Einbeziehung der Düngungsvariante durchgeführt. Für den Sortenfaktor wurden die Mittelwerte bei signifikantem F-Wert über LSD_{0,05}-Mittelwertvergleiche auf Unterschiedlichkeit geprüft.

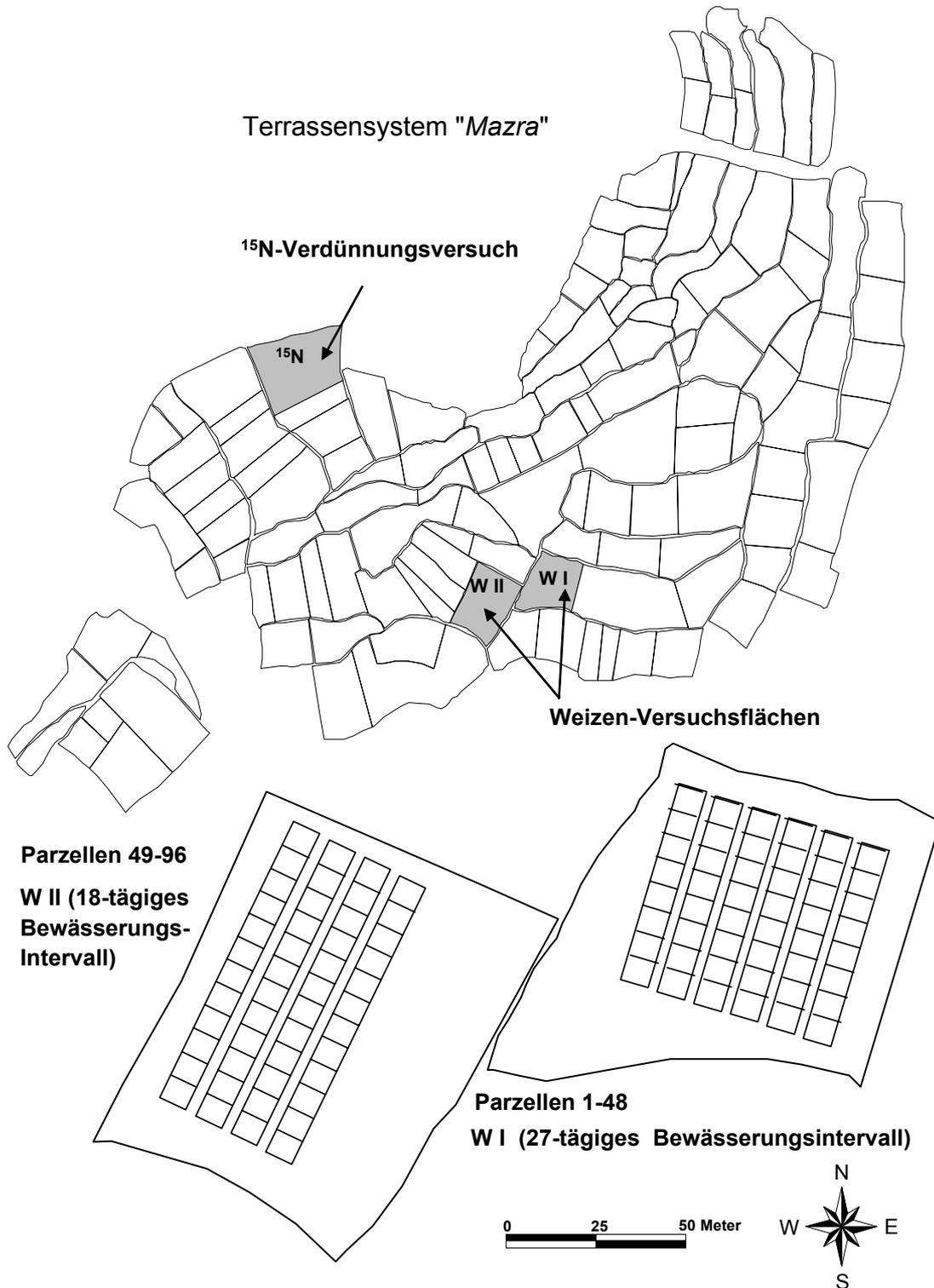


Abbildung 3. Anlage des Weizenversuches auf dem Terrassensystem *Mazra* in *Balad Seet* (Oman) im Anbaujahr 2001/2002; (WI= 27-tägiges Bewässerungsintervall; WII= 18-tägiges Bewässerungsintervall) und Position des ^{15}N -Verdünnungsversuches

2.5. Bestimmung der biologischen N₂-Fixierungsleistung von Luzerne (*Medicago sativa* L.)

Zur Erstellung einer Nährstoffteilbilanz in der Kernoase *Balad Seet*, war es notwendig, die biologische N₂-Fixierungsleistung von Luzerne zu ermitteln und einzubeziehen. Dafür wurde ein ¹⁵N-Verdünnungsversuch mit mehrjähriger Luzerne und einer Rotation aus Weizen und Sorghum als nicht-fixierenden Kontrollpflanzen angelegt (Abb. 3). Der 18-monatige Feldversuch im Terrassensystem *Mazra* begann am 18.10.01. Die aus praktischen Gründen nur teilweise randomisierte Versuchsanlage bestand aus insgesamt 24 Parzellen mit einer Fläche von jeweils 3,2 m². Bei der Anlage des Versuches wurde zwischen Parzellen mit und ohne ¹⁵N-Applikation ein Abstand von 2 Metern eingehalten, um Effekte eines durch Sickerung verursachten horizontalen Transports von markiertem N auf nichtmarkierte Nachbarparzellen zu vermeiden. Innerhalb einer Markierungsstufe dagegen ergab sich ein Parzellenabstand von 0,5 m.

Die faktoriell kombinierten Behandlungen bestanden aus: (1) Luzerne und nicht-N₂-fixierender Referenzpflanze (Weizen und Sorghum im Fruchtwechsel), ¹⁵N-Applikation (mit und ohne) und, (3) Mistgabe (mit und ohne). Bei drei Wiederholungen ergab sich insgesamt 24 Parzellen.

Nach der Anlage des Versuches wurde auf vier Parzellen verzichtet, da dort die oben genannten Abstände zwischen den Parzellen nicht eingehalten werden konnten und so die Gefahr von Nachbarschaftseffekten bestand (Abb. 4).

Die ¹⁵N-Markierung erfolgte am 22.11.01 und am 20.11.02 mit jeweils 15,1 g (NH₄)₂SO₄ (10 % ¹⁵N markiert) pro Parzelle bzw. 47,18 kg (NH₄)₂SO₄ ha⁻¹ oder 10 kg N ha⁻¹. Parzellen mit Mistbehandlung wurden ebenfalls jeweils am 22.11.01 und am 20.11.02 mit 2 kg lufttrockenem Tierdung (Gemisch aus Ziegen- und Rinderdung) pro Parzelle gedüngt. Die Bewässerung der Parzellen erfolgte im Rahmen der vor Ort praktizierten Bewässerungsrotation in 18-tägigen Intervallen im Winter und 9-tägigen Intervallen im Sommer. Die Luzerne wurde während der Versuchszeit insgesamt 16 Mal geschnitten, die Sproßmasse bis zur Gewichtskonstanz luftgetrocknet und ihr Trockenertrag erfasst. Gemahlene Unterproben wurden im Labor des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Universität Kiel mit einem Makro-N-Analysator (Heraeus, Bremen, Deutschland) auf Gesamt-N und an einem Massenspektrometer (Delta C, Thermo Electron, Bremen, Deutschland) auf δ¹⁵N untersucht. Die Erträge der Referenzpflanzen (Weizen und Sorghum) wurden ebenso erfasst und Unterproben wie oben beschrieben analysiert.

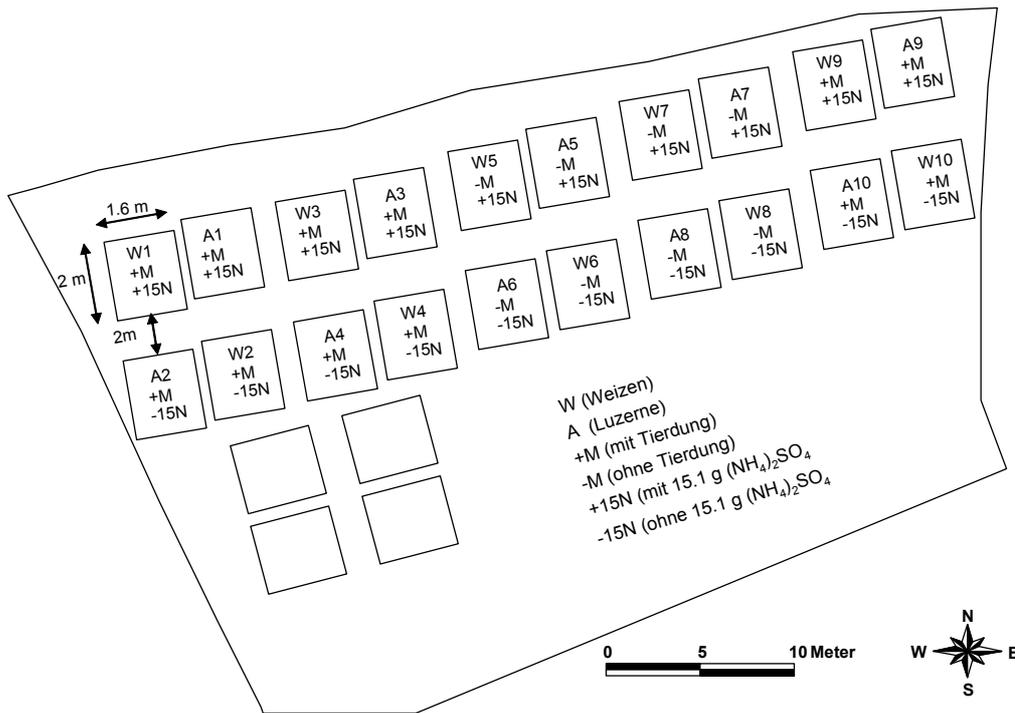


Abbildung 4. Anlage des ¹⁵N-Verdünnungsversuches auf dem Terrassensystem *Mazra* in der Kernoase *Balad Seet* (Oman)

2.6. Nährstoffflüsse

Zur Beschreibung der Nährstoffflüsse innerhalb einer omanischen Bergoase sollen diese zunächst schematisch dargestellt werden. Zur Abgrenzung des Nährstoffaustausches der Oase mit der Umgebung wurden drei Zonen bzw. Gebiete definiert: (1) die Kernzone der Oase, (2) der Randbereich der Oase und (3) die Gebiete außerhalb der Oase. Dabei enthält die Kernoase das Dorf mit den Stallungen, den terrassierten Feldern, den Palmengärten und den Waschplätzen. Der Randbereich umfasst die Weidegebiete des Dorfes, die Quellen mit den dort beginnenden *Aflaj* und die Sammelgebiete für Tierfutter. Die Gebiete außerhalb der Oasen schließen Orte mit denen die Oaseneinwohner Austauschbeziehungen pflegen (früher die umliegenden Orte wie *Al-Hamra*, heute in immer stärkerem Maße auch entfernter Städte wie *Rustaq*).

Zur Erstellung einer Nährstoffbilanz auf Feldebene, waren sowohl die präzise Berechnung der individuellen Feldflächen und ihrer jeweiligen Fruchtfolge als auch die formelle und informelle Befragung der Landwirte und die Erhebung aller Input- und Outputdaten für die Acker- und Palmenflächen notwendig.

2.6.1. Nährstoffentzüge

Die Berechnung der Nährstoffentzüge durch die Anbaukulturen und Dattelpalmen basierte auf den mit den Ernteprodukten entnommenen Mengen an N, P und K innerhalb des 2-jährigen Datenerhebungszeitraumes von Oktober 2000 bis Oktober 2002 in *Balad*

Seet, sowie innerhalb des einjährigen Erhebungszeitraumes von Februar 2001 bis März 2002 in *Maqta*. Die Nährstoffentzüge durch Grünfutter unter Palmen wurden mittels zweier repräsentativer Proben aus *Balad Seet* und *Maqta* abgeschätzt.

An keinem der beiden Standorte konnten Nährstoffverluste durch Versickerung und gasförmige Verluste (Denitrifizierung und Volatilisation) erfasst werden. Da es in beiden Projektoasen keine künstliche Drainage unter den landwirtschaftlichen Flächen gab, konnte die Nährstoffauswaschung unter diesen Flächen auch nicht gemessen werden. Eine Anlage von Lysimetern, die Installation von Saugkerzen oder die regelmäßige Entnahme von Bodenproben aus verschiedenen Tiefenstufen war aus infrastrukturellen und finanziellen Gründen ebenfalls nicht möglich.

Balad Seet. Da es nicht möglich war, die Erträge aller Kulturen auf allen Feldern direkt zu messen, wurden von den acht in Fruchtfolge angebauten Hauptfeldkulturen in *Balad Seet* jeweils vier repräsentative Feldflächen ausgewählt. Diese Felder wurden anhand ihrer Erträge in vier Klassen (niedrig, mittel, hoch und sehr hoch) eingeteilt und abgeerntet. Je nach angebauter Kultur wurde die totale Biomasse (Stroh und Körner) vor und nach der Sontrocknung bis zum Gewichtskonstanz getrennt erfasst. Anschließend wurden die Erträge der restlichen Felder, basierend auf den oben genannten Referenzfeldern, klassifiziert erfasst. Für die Berechnung der N- P und K-Entzüge durch die Pflanzen wurden die solchermaßen abgeschätzten Ertragsdaten der individuellen Felder mit der jeweiligen N- P und K-Konzentration der Referenzpflanzen multipliziert. Die Konzentration an Gesamtstickstoff wurde mit Hilfe eines Stickstoff-Analysators (FP-328 LECO, St Joseph, Mi, USA) bestimmt, der Phosphorgehalt wurde über die Molybdat-Vanadat-Methode (Gericke und Kurmies, 1952) spektralphotometrisch (Hitachi U-2000 Spektrophotometer, Tokyo, Japan) gemessen. Der Kaliumgehalt wurde flammenphotometrisch (Instrument Laboratory 543, Lexington, Massachusetts, 02173 USA) ermittelt.

Für die Abschätzung der Erträge der ausgewachsenen Dattelpalmen in *Balad Seet* wurde ein repräsentativer Palmengarten mit 171 Dattelpalmen als Referenzfläche benutzt. Die Frischmassenerträge aller Dattelpalmen wurden von ihren Besitzern anhand der Zahl und der Größe der Dattelbündel geschätzt. Anschließend wurden die Erträge aller restlichen Dattelpalmen basierend auf dem Ertragsmittelwert der jeweiligen Dattelsorten berechnet, so wie dieser auf der Referenzdattelfläche ermittelt worden war. Für die Berechnung der Gesamtnährstoffentzüge durch die Dattelpalmen wurden Proben von den sechs wichtigsten Dattelsorten in *Balad Seet* (*Naghal*, *Fardh*, *Khassab*, *Khalas*, *Qash Zabad* und *Saily*) entnommen und nach Gefriertrocknung, wie oben beschrieben, auf ihre N-, P- und K-Konzentrationen untersucht.

In *Maqta* wurde von jedem der 10 kleinen, nur einmal im Jahr mit Weizen bestellten Terrassensystemen ein Einzelfeld zufällig ausgewählt und dessen Stroh- und Kornenertrag ermittelt. Unterproben wurden auf ihre N-, P- und K-Konzentration untersucht, um den auf allen Teilflächen der Terrassen anfallenden Nährstoffentzug durch Stroh und Korn ermitteln zu können. Darüber hinaus wurden Proben der drei wichtigsten Dattelsorten *Barni*, *Nashu* und *Bu Narnja* entnommen und nach Gefriertrocknung, wie oben beschrieben, auf ihre N-, P- und K-Konzentration untersucht.

Die jährlich in den Palmenwedeln und in Holzzuwachs N- P und K-Mengen wurden aus Literaturangaben (IFA, 2004) ermittelt. Dabei wurde angenommen, dass die ausgewachsenen Palmen (bei einem Dattelertrag von 70 kg) 50 kg Trockensubstanz an vegetativer Biomasse mit Nährstoffkonzentrationen von 8,6 g N kg⁻¹, 1 g P kg⁻¹ und 30 g K kg⁻¹ produzieren. Da in den beiden Bergoasen die Mengen an P und K in der vegetativen Biomasse nach deren Verbrennung durch das Ausbringen der entstandenen Asche effektiv recycelt werden, wurden bei der Berechnung der Oasenbilanz nur die N-Verluste berücksichtigt. Für *Balad Seet* wurden die N-Verluste mit 215 g pro ausgewachsene Palme (mit einem Dattelertrag von 35 kg) und 54 g pro Jungpalme geschätzt. Für *Maqta* wurden aufgrund der niedrigeren Dattelpalmenerträge N-Verluste von 60 g N pro ausgewachsene Palme (mit 10 kg Dattelertrag) und 15 g pro Jungpalme zu Grunde gelegt.

2.6.2. Nährstoffeinträge

Die Nährstoffeinträge durch Düngung der Feldkulturen und Palmen, die N₂-Fixierung durch Luzerne sowie die im Bewässerungswasser enthaltenen Hauptnährstoffe wurden wie folgt ermittelt.

2.6.2.1. Mineralische und organische Düngung der Feldkulturen

Während in *Balad Seet* Feldkulturen sowohl mineralisch (mit NPK 15-15-15 und Harnstoff 46-0-0) als auch organisch gedüngt wurden, erfolgte die Düngung der Weizenflächen in *Maqta* ausschließlich organisch. Bei dem organischen Dung handelte es sich in *Balad Seet* um Mistkompost kleiner Wiederkäuer (Schaf- und Ziegen dung), der meistens mit etwa 50% Rinderdung gemischt war. In *Maqta* dagegen fand nur Kleintierdung (Schafe und Ziegen) Verwendung, da es dort keine Rinderhaltung gibt.

Es war schwierig, zuverlässige Angaben über die Menge der verwendeten Düngemittel zu bekommen, weil die Bauern die ausgebrachte Menge kaum nachvollziehbar quantifizieren konnten. Allerdings konnten anhand der Anzahl der ausgebrachten mit Tierdung gefüllten Säcke (*Juniya*) die Mengen hinreichend zuverlässig geschätzt werden. Dazu wurden zehn volle Säcke gewogen und

anschließend deren mittleres Gewicht ermittelt. Die NPK-Konzentrationen des Tierdungs wurden zweimal während der Untersuchungszeit ermittelt. Dazu wurden insgesamt 20 Proben (12 und 8) aus zufällig ausgewählten, mit Tierdung gefüllten Säcken entnommen und, wie oben beschrieben, untersucht. Der Median der aus den 20 Proben berechneten N-, P- und K-Konzentrationen wurde benutzt, um den Nährstoffeintrag auf Feldebene unter Berücksichtigung der ausgebrachten Menge des jeweiligen Feldes ermitteln zu können. Die auf Feldebene ausgebrachten Mengen an Mineraldünger wurden durch detaillierte Untersuchungen für die verschiedenen Anbauzeiten ermittelt. Diese Angaben wurden summarisch verifiziert, in dem sie mit den auf Haushaltsebene ermittelten Mineraldüngermengen verglichen wurden.

In *Maqta* wurde für die Abschätzung der ausgebrachten Düngemittel wie in *Balad Seet* vorgegangen. Allerdings wurden hier nur 10 Tierdungproben auf ihre N-, P- und K-Konzentration untersucht.

2.6.2.2. Mineralische und organische Düngung der Palmengärten

Der Nährstoffeintrag in die Palmengärten war an beiden Standorten ausschließlich organischen Ursprungs. Da in *Balad Seet* die verschiedenen Dattelpalmensorten nicht gleich hoch gedüngt werden, wurde dies bei der Datenerhebung berücksichtigt. In *Maqta* dagegen wurden die Dattelpalmen verschiedener Sorten mit den gleichen Düngermengen gedüngt. Zusätzlich zu den Tierdunggaben wurden in den Palmengärten in *Balad Seet* und *Maqta* noch in unregelmäßigen Abständen menschliche Fäkalien in allerdings nicht quantifizierbaren Mengen ausgebracht. Die darin enthaltenen Nährstoffmengen wurden jedoch in der Oasenbilanz auf der Grundlage von Literaturangaben zu N-, P- und K-Tagesausscheidungsmengen berücksichtigt. In ihren umfangreichen Untersuchungen in Thailand geben Schouw et al. (2002) die tägliche Summe menschlicher Ausscheidungen eines Erwachsenen mit 7,8 g N, 1,7 g P und 2,3 g K an. Weiter wurde angenommen, dass die 632 Einwohner von *Balad Seet* sich auf 367⁵ Erwachsene (Gewichtsfaktor 1), 168 Jugendliche (5-15 Jahre, Gewichtsfaktor 0,75) und 97 Kinder (< 5 Jahre, Gewichtsfaktor 0,33) verteilen. Für *Maqta* wurde angenommen, dass sich nur 25 Einwohner (14 Erwachsene und 11 Jugendliche), etwa ein Achtel der gesamten Einwohnerzahl, ständig im Zentralfeld zur Bewirtschaftung der Palmengärten und der ackerbaulichen Flächen aufhalten.

⁵ Die Einteilung der insgesamt 632 Einwohner in die drei Altersgruppen wurde nach folgender Quelle berechnet: Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat; <http://www.un.org/esa/population/>

2.6.2.3. Nährstoffeinträge durch N_2 -Fixierung und Bewässerungswasser

Die Menge des durch Luzerne biologisch fixierten N_2 wurde aus dem ^{15}N -Versuch entnommen, wobei angenommen wurde, dass (1) die oberirdische Fixierungsleistung sich aus der geernteten Sprossmasse multipliziert mit der N-Konzentration und dem Fixierungsanteil berechnen lässt und (2) der im Wurzelbereich netto abgegebene oder der Wurzelmasse festgelegte biologisch fixierte N mengenmäßig 1/3 der im Spross fixierten Gesamt-N-Menge beträgt.

Zuletzt wurde der Nährstoffeintrag durch das Bewässerungswasser in *Balad Seet* und *Maqta* ermittelt. Dazu wurden in *Balad Seet* repräsentative Proben aus den *Aflaj* entnommen. Da das Wasser des Haupt- *Falaj* aufgrund mehrerer, an dessen Verlauf liegenden Waschstellen im Tagesverlauf unterschiedlich mit Detergentien verschmutzt wird, wurden an einem zufällig ausgewählten Messtag in stündlichem Intervall Proben entnommen. Diese wurden in einem Behälter gemischt und davon eine Unterprobe entnommen. Alle entnommenen Wasserproben wurden eingefroren und nach Deutschland transportiert. Die Wasserproben wurden nach Standardverfahren auf ihre N- P- und K-Konzentrationen im Wasseranalysenlabor der Firma SEWA (Essen, Deutschland) untersucht. In *Maqta* wurden Proben aus fünf mengenmäßig wichtigeren Quellen entnommen und wie oben beschrieben untersucht.

Zur Berechnung des Nährstoffeintrages durch das Bewässerungswasser in *Balad Seet* und *Maqta* wurde der Mittelwert der über 24 und 12 Monate gemessenen Schüttungsmenge der verschiedenen *Aflaj* - Quellen und die Ergebnisse der jeweiligen Wasseranalyse herangezogen.

2.6.2.4. Darstellung der Nährstoffflüsse

Balad Seet. Alle Nährstoffentzüge in Form von Ernteprodukten und alle Nährstoffeinträge (in Form von Tierdung, synthetischem Dünger, Bewässerung, menschliche Fäkalien sowie die Menge an durch Luzerne fixierten N_2) wurden über 24 Monate für Feldfrüchte und Dattelpalmen erfasst. Daraus wurden für jedes Einzelfeld sowie für die Oase als Ganzes Nährstoffbilanzen berechnet.

Maqta. Wegen ihrer Streulage und geringer Größe dienten die 17 einzelnen Terrassensysteme sowie die gesamte Oase als Basis für die errechneten Teilbilanzen. Da in der Oase weder Mineraldünger noch Luzerne zu Einsatz kamen, wurde für die Inputberechnungen auf Dattelpalmen und Weizenflächen ausschließlich die jährlich applizierten Tierdungmenge herangezogen.

Für Feldfrüchte auf Parzellenniveau (*Balad Seet*) oder Terrassenniveau (*Maqta*) wurden die durchschnittlichen jährlichen N, P und K-Gaben als absolute Menge in verschiedenen Input-Klassen, deren Größe je nach Nährstoffart verschieden war, grafisch dargestellt.

Um festzustellen, inwieweit die Input-Verteilung von der Feldgröße abhängt, wurden die Felder in *Balad Seet* in drei Größenklassen ($< 72 \text{ m}^2$, $72 - 138 \text{ m}^2$ und $> 138 \text{ m}^2$) eingeteilt. Danach wurden Teilbilanzen für alle einzelnen Felder (*Balad Seet*) bzw. Weizenterrassen (*Maqta*) berechnet. Für die Dattelpalmen wurden die Nährstoffein- und austräge auf Oasenniveau (*Balad Seet*) bzw. für jede Terrasse (*Maqta*) dargestellt.

3. Ergebnisse

3.1. Charakterisierung des Oasensystems an beiden Standorten

3.1.1. Balad Seet

Während die 385 Felder der sechs Terrassensysteme eine ackerbaulich genutzte Fläche von 4,6 ha einnahmen, belegten 2690 Dattelpalmen mit 16 Sorten eine zusätzliche Fläche von 8,8 ha (Abb. 5). *Mazra* war mit 2 ha das größte Terrassensystem dieser Oase, *Zaher* mit 1,3 ha das zweitgrößte. *Khau* und *Lebsy* sind jeweils nur 0,5 ha groß. Das fünfte Terrassensystem *Rodh* hatte 19 Einzelfelder mit einer Gesamtfläche von 0.25 ha, während das private Terrassensystem *Khtawi* über nur sechs Felder mit einer Fläche von 0.06 ha verfügte.

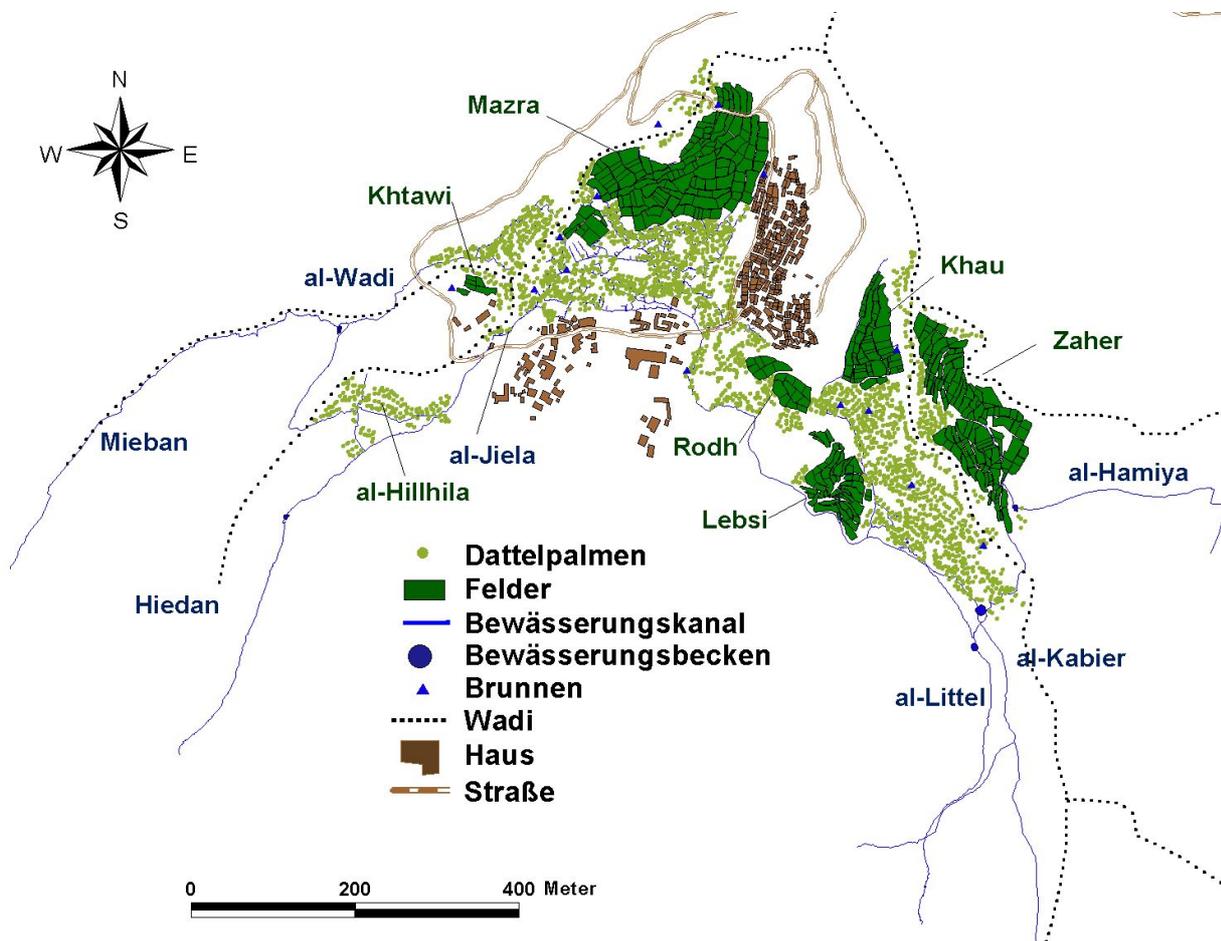


Abbildung 5. Übersichtskarte der Kernoase *Balad Seet* (Oman) mit den Terrassen, den Palmengärten, der Bewässerungsinfrastruktur und den Straßen

Die einzelnen Felder der Terrassen waren mit einer durchschnittlichen Fläche von 110 m² sehr klein, variierten aber sehr stark in ihrer Größe. Die Feldgröße schwankte zwischen 7,5 und 593 m². Jedoch betrug die Durchschnittsfläche der Felder 110 m². Jedes Feld bestand aus mehreren Bewässerungspartzen *Jalba*, die 1,5-1,8 m² groß waren.

Die Bodenart im Terrassensystem *Mazra* war ein schluffiger Lehm (Lu) mit einem Tonanteil von 19 % und 25 % Sand. In den obersten 0,9 m des künstlich aufgeschüttelten Terrassenboden (Irragic Anthrosol) fand sich eine C_{org} -Konzentration von 23 g kg^{-1} . Der pH-Wert in Wasser betrug 8,3 (Luedeling et al., 2003).

Auf vielen Feldern steht mehrjährige Luzerne (*Medicago sativa* L.), die bis zu 12 Mal im Jahr geschnitten wird, während andere annuelle Kulturen wie traditionelle Weizenlandrassen (*Triticum aestivum* L. und *Triticum durum*, Al-Maskri et al., 2003), Sorghum (*Sorghum bicolor* Moench s. l.), Gerste (*Hordeum vulgare* L. s. l.), Hafer (*Avena sativa* L.), Mais (*Zea mays* L.), Knoblauch (*Allium sativum* L.), Zwiebeln (*Allium cepa* L.) und Koriander (*Coriandrum sativum* L.) in Fruchtfolge angebaut werden (Abb. 6a).

Bei dieser Fruchtfolge können auf einer Parzelle bis zu vier Feldfrüchte innerhalb eines Jahres geerntet werden. Weizen, Knoblauch, Zwiebeln und Koriander werden im Winter angebaut. Gerste, Hafer und Mais zur Grünfütterung werden ebenso im Winter zweimal in Folge gesät. Aufgrund seiner relativ hohen Wassernutzungseffizienz und Dürre-resistenz wird im Sommer neben vereinzelt Korianderparzellen sehr viel Sorghum angebaut.

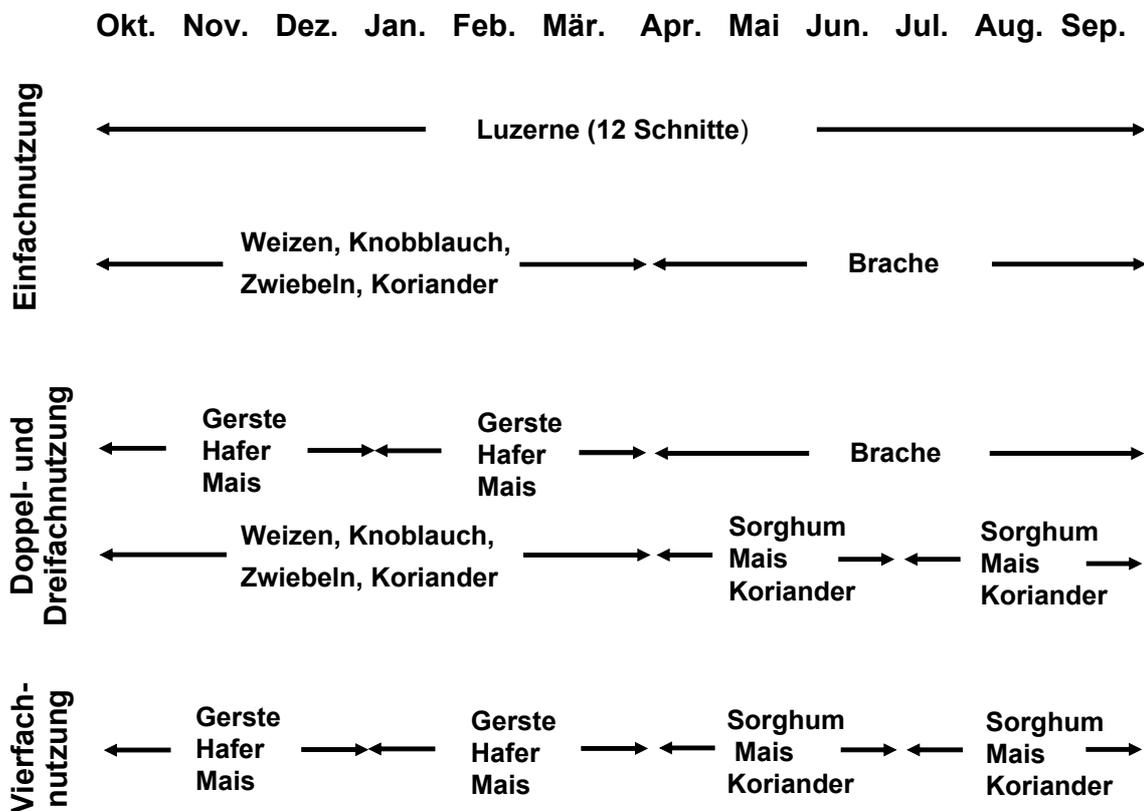


Abbildung 6a. Übliche Fruchtfolgen im Jahresverlauf der Kernoase *Balad Seet* (Oman)

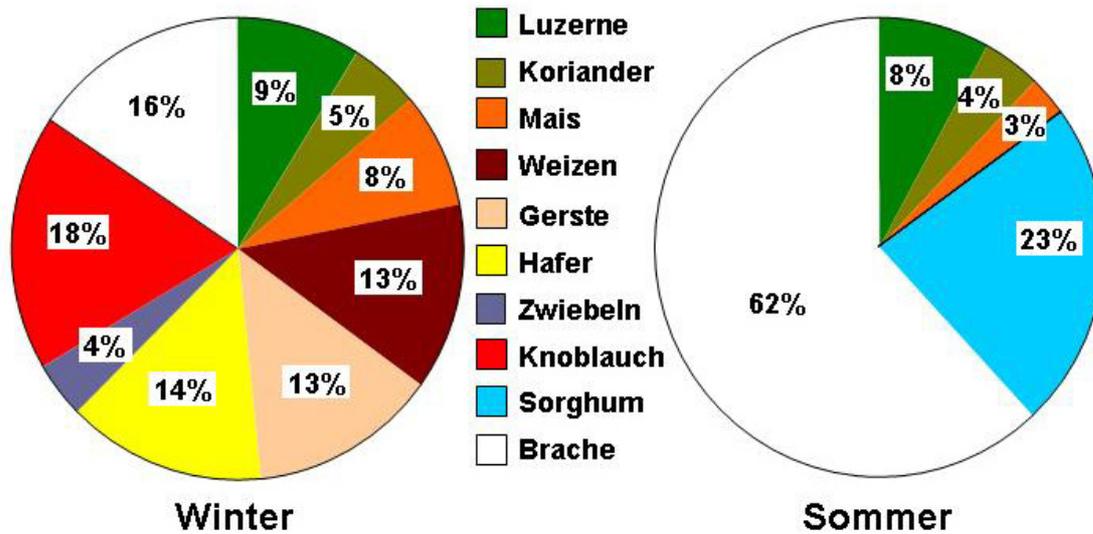


Abbildung 6b. Verteilung der Winter- und Sommerkulturen in der Kernoase *Balad Seet* (Oman) im Anbaujahr 2001/2002

Aus Wassermangel werden im Sommer die weit von den Häusern entfernten liegenden Flächen nicht bewirtschaftet (58-64 % des Gesamtackerlandes; Abb. 6b).

Das verfügbare Wasser wird dann auf die Palmengärten sowie auf die unmittelbar um die Wohnhäuser liegenden Terrassengruppen konzentriert, zumal hier das Wasser auch zu anderen Zwecken benötigt wird. Somit variiert die Anbauintensität und Belegung der Felder, je nach Entfernung zum Dorf (Abb. 7).

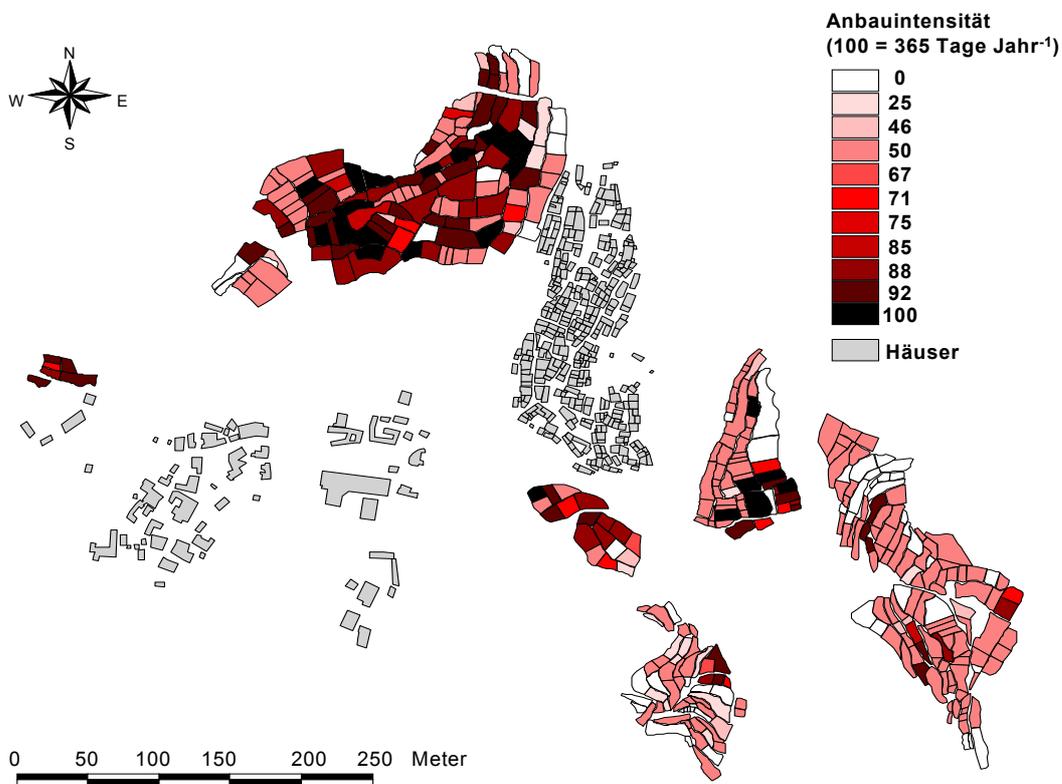


Abbildung 7. Anbauintensität der Felder und Terrassen in der Kernoase *Balad Seet* (Oman) im Anbaujahr 2000/2001

Viehhaltung war wegen ihrer komplementären Funktion in der Landnutzung stets ein bedeutender Bestandteil der Landwirtschaft im Oman (Ibrahim, 1991). Aufgrund der hohen Marktpreise für örtliches produziertes Fleisch nimmt die Viehhaltung auch in *Balad Seet* eine wichtige Stellung ein. Sie umfasste dort 200 Schafe und Ziegen, die tagsüber in den Bergen weiden und nachts im Stall gehalten werden. Die etwa 35 Rinder werden ganztags in Ställen gehalten. Vereinzelt finden noch Esel als kleinräumig eingesetzte Lasttiere Verwendung. Luzerne, Gerste, Hafer und Mais werden ausschließlich als Grünfutter verwendet. Ernterückstände anderer Kulturen wie Weizen und Sorghum werden ebenfalls verfüttert oder dienen als Einstreu. Zu diesem Futter kommen zugekauft Futter (Fischmehl, Brot) und überschüssige Datteln sowie die Beikräuter der Felder und im Randbereich der Oase gesammeltes Grünfutter. Der anfallende Mist wird komplett als Dünger genutzt. Auf diesem Wege gelangen die im hofeigenen Futter enthaltenen und durch zugekauft Futter importierten Nährstoffe auf die Felder.

3.1.2. *Maqta*

Die Streusiedlung *Maqta* bestand als Streuoase aus einem zentralen Dorf und aus mehreren, zum Teil sehr weit voneinander entfernten und weiter untergliederten, Terrassensystemen. Die Positionen der Systeme waren maßgeblich von der Wasserverfügbarkeit, also ihrer Nähe zu Quellen abhängig.

Die um das zentrale Dorf liegenden 17 Terrassensysteme umfassten insgesamt eine Gesamtfläche von 4,4 ha, die auf Palmengärten und ackerbaulichen Felder verteilt war (Abb. 8). Dabei prägten die Palmengärten mit ihren 3,6 ha Fläche und 2128 Palmen das Bild der Landwirtschaft. In den Palmengärten standen ferner vereinzelt einige Zitrus- und Mangobäume. Die lediglich 0,8 ha ackerbauliche Fläche war auf 374 kleine Felder verteilt, deren individuelle Fläche zwischen 1,6 und 173 m² schwankte, mit einer durchschnittlichen Größe von 21,3 m². Im Jahr 2003 waren davon in Folge von zunehmender Wasserknappheit nach einer mehrjährigen Dürre nur 156 Felder kultiviert, während diese Zahl im Jahr 2002 noch 213 betragen hatte. Im Jahr 2002 stand auf 10 der 17 Terrassensystemen auf einer Fläche von 0,37 ha die Weizenlandrasse *Walidi* (Al-Maskri et al., 2003) und auf 0,03 ha andere Kulturen wie Zwiebeln, Knoblauch und Bockshornklee (*Trigonella foenum-graecum*), während 0,4 ha brach lagen. Im Jahr 2003 nahm die mit Weizen angebauten Fläche ab und betrug 0,30 ha, während zusätzliche Gesamtflächen von nur 0,013 ha mit Zwiebeln, Knoblauch und Bockshornklee belegt waren. Zu den ackerbaulichen Flächen zählen auch 0,8 ha verlassene Terrassen, die allerdings seit Jahrzehnten nicht mehr bewirtschaftet wurden und zum größten Teil verfallen waren. In den heißen Sommermonaten werden aufgrund des knappen

Wasserangebotes nur die mit Dattelpalmen bestandenen Terrassenteile bewässert. Die Böden hatten eine überwiegend schluffige Sandtextur mit einem pH-Wert von 8,3-8,5. Die Konzentration an C_{org} schwankte zwischen 4.5 und 21.7 g kg⁻¹ Boden (Wichern et al., 2004c).

Die Kleintierhaltung (Ziegen und Schafe) bildete die Haupteinnahmequelle der Oasenbewohner von *Maqta*. Neben dem Verkauf der Schafe/Ziegen, verkauften die Hirten den Überschuss an Tierdung. Während der überwiegende Teil des Oasenbewohner in 12 temporären Gebäuden lebten, die die Weidegründe begrenzen, lebten im Dorf dagegen meist nur Schulkinder und einige alte Männer. Deshalb war es sehr schwierig, die genaue Anzahl der halbnomadischen Oasenbewohner zu bestimmen, deren Zahl in 2003 auf etwa 200 geschätzt wurde (Siebert et al., 2005).

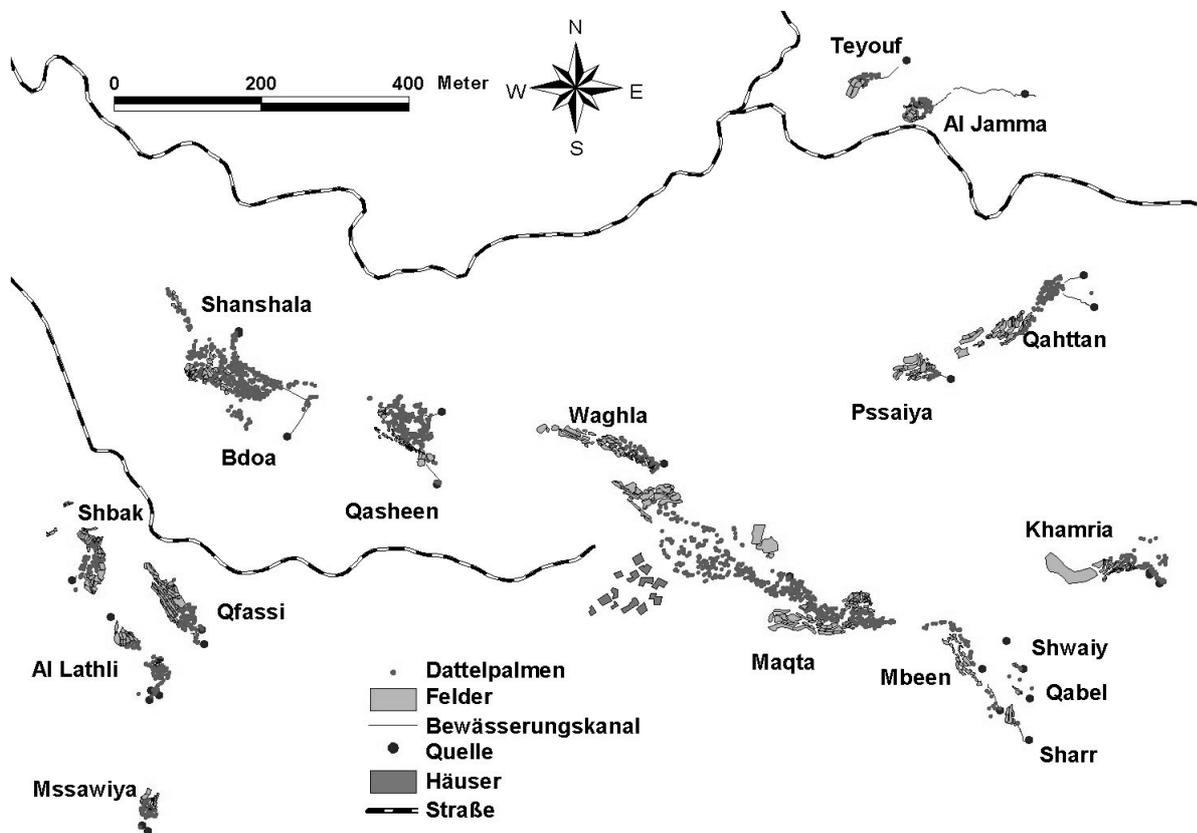


Abbildung 8. Übersichtskarte des zentralen Teiles der Streuoase *Maqta* (Oman)

3.2. Palmengärten

3.2.1. Sortenspektrum und Erträge der Dattelpalmen in der Kernoase *Balad Seet* (Oman)

Die in *Balad Seet* befindlichen 2690 Dattelpalmen umfassten 16 Palmensorten, deren Früchte in ihrer Form, Größe, Farbe und Reifezeit variieren. Auf den Terrassensystemen *Mazra* und *Zaher* standen im Jahr 2002 1281 bzw. 1239 Dattelpalmen, davon waren 58% bzw. 64% im ertragsfähigen Alter. Der vor etwa 50 Jahren relativ neu angelegte Kleinpalmengarten *al-Hillhila* beherbergte 170 Dattelpalmen, von denen 71% im ertragsfähigen Zustand sind. Mit einem Anteil von 74% dominieren die drei Palmensorten *Naghal* (37%), *Fardh* (22%) und *Khasab* (15%); alle übrigen Palmensorten machen zusammen lediglich 26% aus (Abb. 9 und 10). *Naghal* ist eine traditionelle und sehr verbreitete Sorte in *Balad Seet*, die 47% aller ausgewachsenen Dattelpalmen und 21% der Jungpflanzen darstellt. Im *Ruttab*-Stadium (frische Datteln) sind die Früchte gelb, im vollen Reifezustand (*Tammr*) hellbraun. Als frühreife Sorte (ab dem 15. Mai) und wegen ihres niedrigen Zuckergehaltes eignet sich *Naghal* für den Frischverzehr. Sie wird auch meistens aufgrund des zu ihrer Reifezeit noch geringen Angebotes an frischen Datteln auf dem Markt für einen guten Preis verkauft. Die empfindlichen frischen Datteln werden einzeln gepflückt, während die restlichen bis zur vollen Reife auf dem Baum gelassen werden bzw. bis zum Erreichen des höchsten Zuckergehaltes.

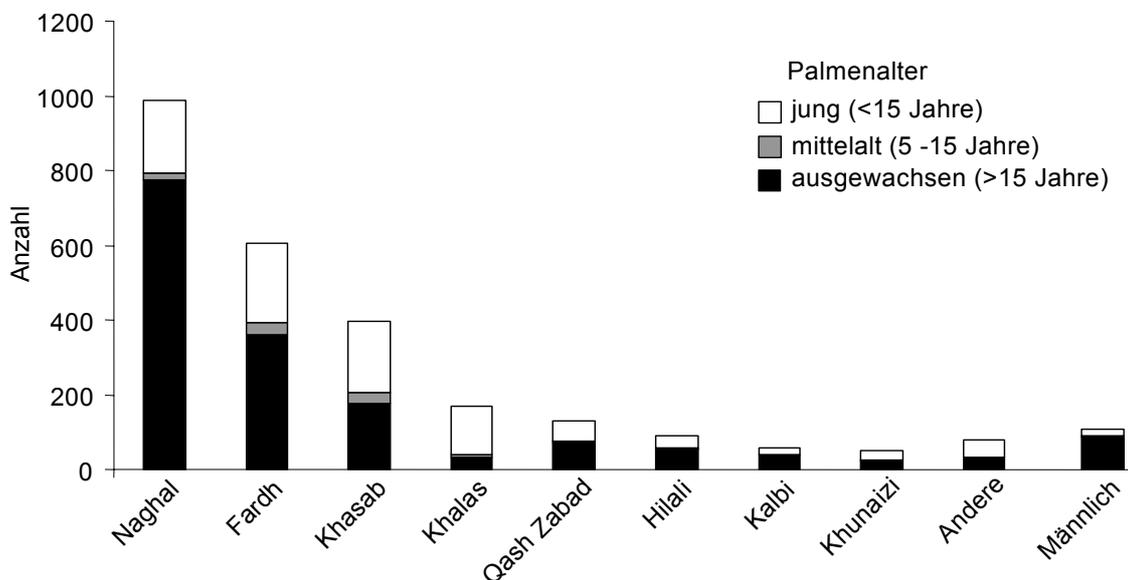


Abbildung 9. Anzahl angebaute Palmensorten in der Kernoase *Balad Seet* (Oman) im Jahr 2002

Naghal ist Angaben der Bauern zufolge sehr genügsam und kommt mit weniger Pflege aus. Die Bestäubung dieser Sorte erfordert relativ wenig Aufwand, da sich fast alle

Blüten des weiblichen Blütenstandes gleichzeitig öffnen. Deshalb muss die Palme für die Bestäubung nur 1-2 Mal erklettert werden. Denselben Vorteil besitzt *Naghal* bei der Ernte, da die zeitgleiche Bestäubung der weiblichen Blüten eine einheitliche Ausreifung und Ernte der Früchte bewirkt. Diese Eigenschaften besitzen nicht alle Palmensorten, wobei insbesondere die Palmensorten *Khalas*, *Khasab* und *Khunaizi* 3-5 Mal erklettert werden müssen.

Mit 605 Palmen ist *Fardh* in *Balad Seet* die zweithäufigste vorkommende Dattelsorte. Sie nimmt einen Anteil von 22% unter den ausgewachsenen Dattelpalmen ein, während die Jungpflanzen dieser Sorte 23% der Jungpflanzen ausmachen. Sie reift etwa 4-6 Wochen später als die Sorte *Naghal* aus. Dies ist für Arbeitsteilung in der Oase *Balad Seet* ungünstig, denn zu dieser Zeit reifen auch die Mehrzahl der restlichen Palmensorten. Die im *Ruttab*-Stadium dunkelroten Früchte entwickeln sich zu sehr zuckerhaltigen dunkelbraunen Früchten im *Tammr*-Stadium, die sich wegen ihres hohen Zuckergehalts gut als Vorrat für die Nacherntezeit eignen.

Als spätreife Sorte ist *Khasab* sehr beliebt bei den Bewohnern von *Balad Seet*, da sie bis etwa Mitte Oktober dunkelrote frische *Ruttab*-Datteln liefert. *Khasab* wird in *Balad Seet* als die ertragsreichste Sorte angesehen (Abb. 12). Mit insgesamt 169 Dattelpalmen nimmt die Sorte *Khalas* einen Anteil von nur 6% der Dattelpalmen ein. Obwohl die ausgewachsenen Dattelpalmen dieser Sorte nur 2 % der Palmen der gleichen Altersklasse ausmachen, beträgt deren Anteil an allen Jungpflanzen 15%. *Khalas* wird als die beste und geschmackvollste Dattelsorte in *Balad Seet* sowie im ganzen Oman angesehen. Die Früchte sind oval geformt, hellgelblich und werden als frische oder halbtrockene Datteln konsumiert. In *Balad Seet* jedoch werden die Früchte aufgrund der geringen Produktionsmengen schon im *Ruttab*-Stadium verzehrt.

Die Einteilung der Dattelpalmen in ausgewachsene und junge Dattelpalmen innerhalb der individuellen Palmensorten in *Balad Seet* ist wie folgt: Die vorherrschenden Palmensorten *Naghal* und *Fardh* haben mit 22% und 35 % einen relativen kleinen Anteil an Kleinpalmen, im Gegensatz zu den Palmensorten *Khalas*, *Khunaizi* und *Khasab*, die Kleinpalmenanteile von 77%, 50% und 48 % haben. *Mazra*, die Terrasse mit dem größten Palmengarten, enthielt noch bis zu 45% der Sorte *Naghal*, 15% der Sorte *Fardh* und 14% der Sorte *Khasab*, während sich der Rest der Palmen aus den übrigen Sorten zusammensetzte, einschließlich 49 männlicher Dattelpalmen (Abb. 9).

Der zweitgrößte Palmengarten *Zaher* bestand dagegen zu 33% aus *Naghal*, zu 25% aus *Fardh* und zu 14% aus *Khasab*. Die restlichen 28% bestanden aus den übrigen Palmensorten, einschließlich 56 männlicher Dattelpalmen (Abb. 10).

Bei der Betrachtung des vor etwa 50 Jahren angelegten Palmengartens *al-Hillhila* ließ sich feststellen, dass unter den 170 Dattelpalmen 93 Palmen der Sorte *Fardh* (55%), 45 Palmen der Sorte *Khasab* (26%) und lediglich 8 Palmen der traditionellen Sorte *Naghal* (5%) waren. Die restlichen Dattelpalmen umfassten sechs Palmensorten, einschließlich zwei männlicher Dattelpalmen. Möglicherweise wollten die Bauern schon vor einiger Zeit die Dominanz der Sorte *Naghal* in *Balad Seet* begrenzen und hatten deshalb verstärkt andere Palmensorten (*Fardh* und *Khasab*) gepflanzt. Vermutlich wurden die neuen Palmensorten (*Khalas*, *Hilali*, *Khunaizi*, *Barni*) erst mit der Eröffnung der Bergstrasse Anfang der 80er Jahre angebaut, nachdem es die wirtschaftliche Lage der Bauern erlaubte, teure Schösslinge anderer Sorten aus anderen Gegenden Omans heranzuschaffen.

Mit insgesamt 107 männlichen Dattelpalmen der Sorten *Gharif*, *Bussabaa*, *Khruri* und *Rafssa* ist die Oase *Balad Seet* mit den für die künstliche Bestäubung der weiblichen Dattelpalmen notwendigen Pollen sehr gut versorgt. Somit steht für jeweils 24 weibliche Dattelpalmen eine männliche zur Verfügung. Achtnich (in Rehm, 1989) gibt an, dass für jeweils 100 weibliche Palmen 2-3 männliche Palmen zur Pollengewinnung notwendig sind. Die Pollen beeinflussen die Größe und Farbe der Frucht, die Größe des Dattelkernes und die Reifezeit. Die Pollen der meistverbreiteten männlichen Dattelsorte *Gharif* in *Balad Seet* sind laut Aussage der Bauern nicht nur besonders ergiebig, sondern sie bewirken auch eine Verkleinerung des Dattelkerns. Die männlichen Sorten *Khuri* und *Rafssa* verkürzen die Reifezeit und intensivieren die Farbe der Früchte (Photo 3).



Photo 3. Ein Bauer der Kernoase *Balad Seet* (Oman) bereitet die männlichen Pollen für die Bestäubung der weiblichen Blüten vor

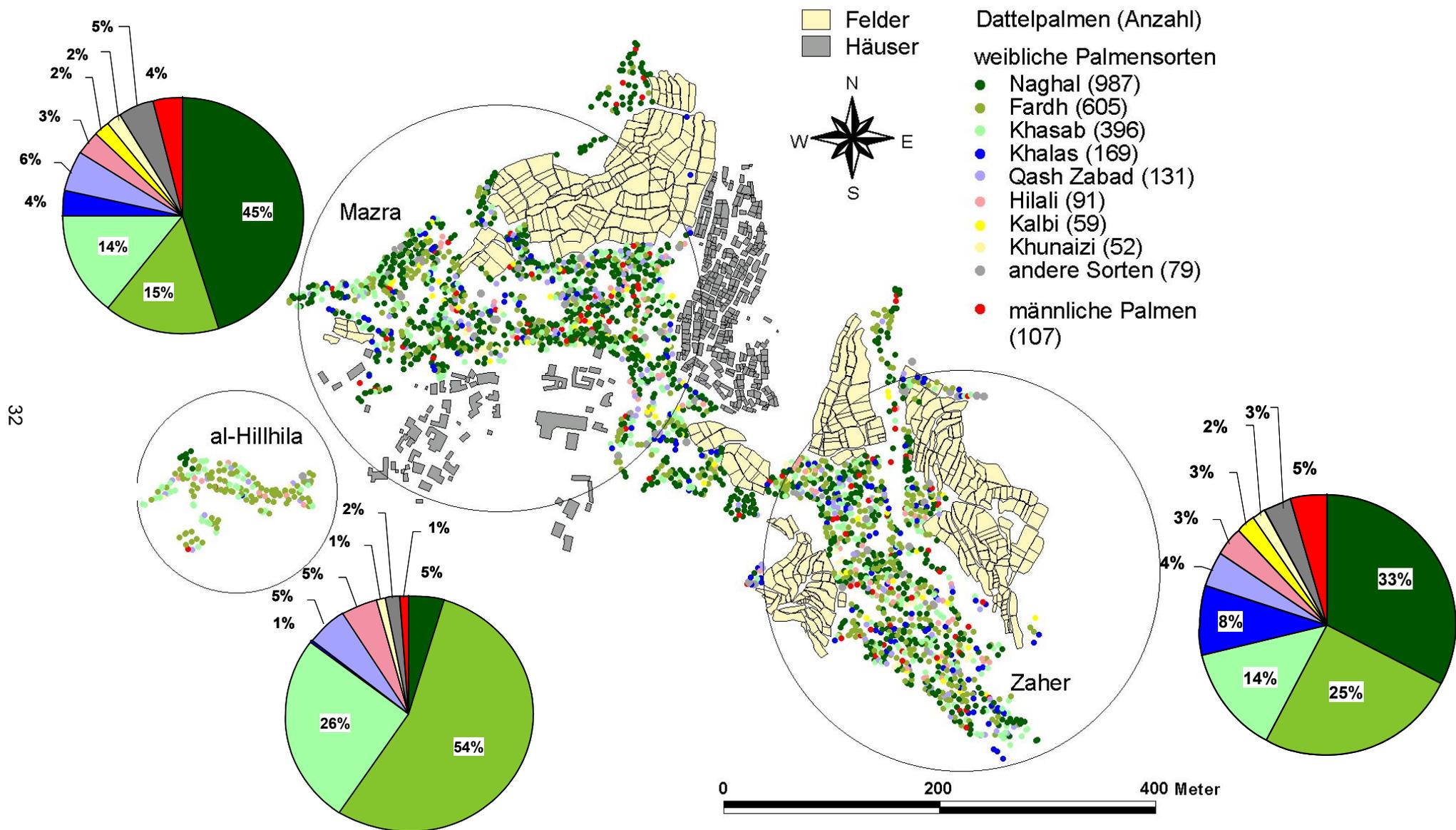


Abbildung 10. Verteilung der wichtigsten Palmensorten in der Kernoase *Balad Seet* (Oman) im Jahr 2002

Im Laufe des Reifungsprozesses durchläuft die Dattel vier Phasen, die traditionell durch die Veränderung von Farbe, Textur und Geschmack beschrieben werden.



Photo 4. Ein Bauer der Bergoase *Balad Seet* erntet frische Datteln der Sorte *Naghal*

In der ersten Phase *Kimri* sind die Früchte grün und fest und haben ihren maximalen Wassergehalt. In der nächsten Phase *Khalal* beginnen die Früchte mehr Zucker zu bilden. Gleichzeitig sinkt ihr Wassergehalt und sie verlieren an Festigkeit. Die Farbe der Früchte schlägt hier je nach Sorte um in Gelb, Rot oder Dunkelrot. Die dritte Phase, *Ruttab* genannt, markiert den Beginn der Ernte der frischen Datteln. Jetzt haben die Früchte einen beachtlichen Teil ihres Wassergehaltes verloren und noch mehr Zucker gebildet. In der letzten Phase sind die Früchte voll ausgereift und haben den höchsten Zucker- und den geringsten Wasser-gehalt. Bezüglich des Reifens der Früchte wird unterschieden zwischen Palmensorten mit uneinheitlicher Ausreifung und Palmensorten mit gleichzeitiger Reife des Fruchtstandes. Zu den letzteren gehören die Palmensorten *Naghal* und *Fardh*, sie können in einem Arbeitsgang geerntet werden. Uneinheitliches Ausreifen erfordert mehrfaches Pflücken und somit mehr Aufwand. Die Ernte selbst erfolgt noch durch Erklettern der Palme und Einsammeln der einzelnen Früchte im *Ruttab*-Stadium oder durch Abschlagen ganzer Fruchtstände im *Tammr*-Zustand (Photo 4).

Die Dattelerträge einzelner Palmen lag zwischen 10 und 100 kg pro Palme. Mit einem durchschnittlichen Ertrag von 44 kg pro Palme belegt die Sorte *Khasab* den ersten Platz. Die Sorte *Khalas* erzielt den zweitbesten durchschnittlichen Ertrag mit 38 kg pro

Palme. Die durchschnittlichen Erträge der Palmensorten *Naghal* und *Fardh*, von 33 und 35 kg pro Palme, lag knapp unter den durchschnittlichen Erträgen aller Dattelsorten in *Balad Seet* (Abb. 11 und 12), obwohl sie deutlich geringere Tierdungzugaben erhalten hatten (Abb. 13 und 14). Allerdings beklagten manche Bauern aufgrund des starken Blattlausbefalles *Dubbas* (*Ommatissus binotatus* var. *Lybicus*) einen von ihnen geschätzten allgemeinen Rückgang der Erträge im Jahre der Datenerhebung um etwa 30 %.

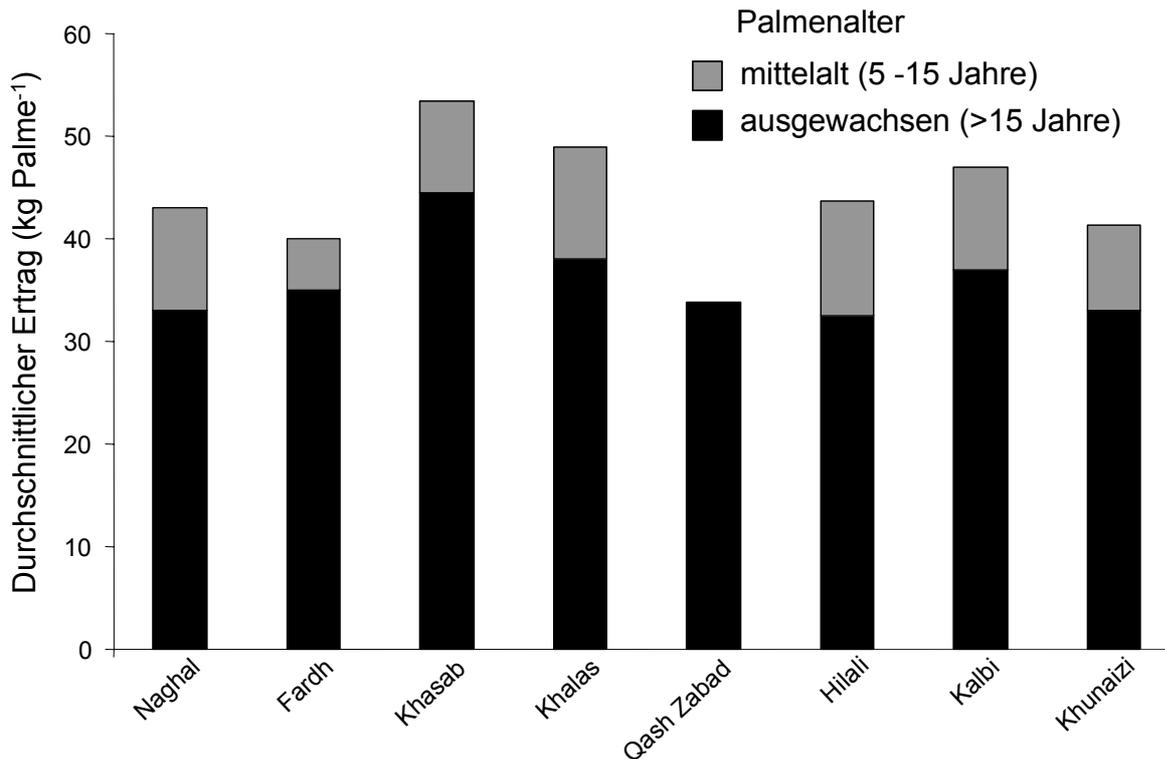


Abbildung 11. Der durchschnittliche Ertrag wichtiger Palmensorten der Kernoase *Balad Seet* (Oman) im Jahr 2002

Die Vermehrung der Dattelpalme über Samen ist möglich, kann aber bei der Dattelpalme als diözischer Pflanze nur teilweise befriedigen (Achnich in Rehm, 1989). Deshalb werden für die Vermehrung heute fast ausschließlich Schösslinge von ausgesuchten weiblichen Bäumen verwendet. Etwa vier Jahre nach dem Auspflanzen der Schösslinge beginnen die jungen Palmen zu tragen und erreichen mit 20-30 Jahren die höchsten Erträge. Die Schösslinge bilden sich in den Blattachseln im bodennahen Bereich des Stammes.

Die jährliche Ausbringungsmenge an Tierdung zu den verschiedenen Palmensorten in *Balad Seet* variierte stark: die Sorte *Khalas* bekam im Durchschnitt 52 kg Palm⁻¹, gefolgt von *Qash Zabad*, *Khasab* und *Hilali* mit jeweils 48, 47 und 45 kg Palm⁻¹. Die Palmensorten *Naghal* und *Fardh* erhielten im Durchschnitt 30 und 36 kg Palm⁻¹. Somit bekam die Sorte *Naghal* nur 57% der Tierdunggabe, die die Sorte *Khalas* bekommen

hatte. Trotzdem betrug der durchschnittliche Ertrag der Sorte *Naghal* 33 kg Palme⁻¹ oder 87% des durchschnittlichen Ertrages der Palmensorte *Khalas*. Zu beachten ist auch, dass Unterschiede bezüglich der Intensität der Tierdunggaben auf den verschiedenen Terrassensystemen bestanden. Auf dem Terrassensystem *Mazra* bekamen die ausgewachsenen Palmen im Durchschnitt 31 kg Palme⁻¹, während dieser Durchschnitt auf den Terrassensystem *Zaher* und *al-Hillhila* 43 und 47 kg Palme⁻¹ waren. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass etwa 45 % aller Palmen auf dem Terrassensystem *Mazra* aus Palmen der Sorte *Naghal* besteht, die die geringste Tierdunggabe bekam. Trotzdem betrug der durchschnittliche Ertrag der ausgewachsenen Palmen auf dem Terrassensystem *Mazra* 33 kg Palme⁻¹, während auf *Zaher* 32 kg Palme⁻¹ betrug.

Den höchsten durchschnittlichen Ertrag der ausgewachsenen Palmen auf Terrassensystemebene hatte das kleine Terrassensystem *al-Hillhila* mit 47 kg Palme⁻¹. Dafür könnten die folgende Gründe verantwortlich sein: (1) die meisten Palmen dieses vor etwa 50 Jahren angelegten Palmengartens standen in der Hauptertragsphase, (2) etwa 26% der Palmen auf diesem System gehörten zur ertragsreichsten Palmensorte *Khasab* und (3) dieses Terrassensystem erhielt mit 47 kg Palme⁻¹ die höchste Tierdunggabe.

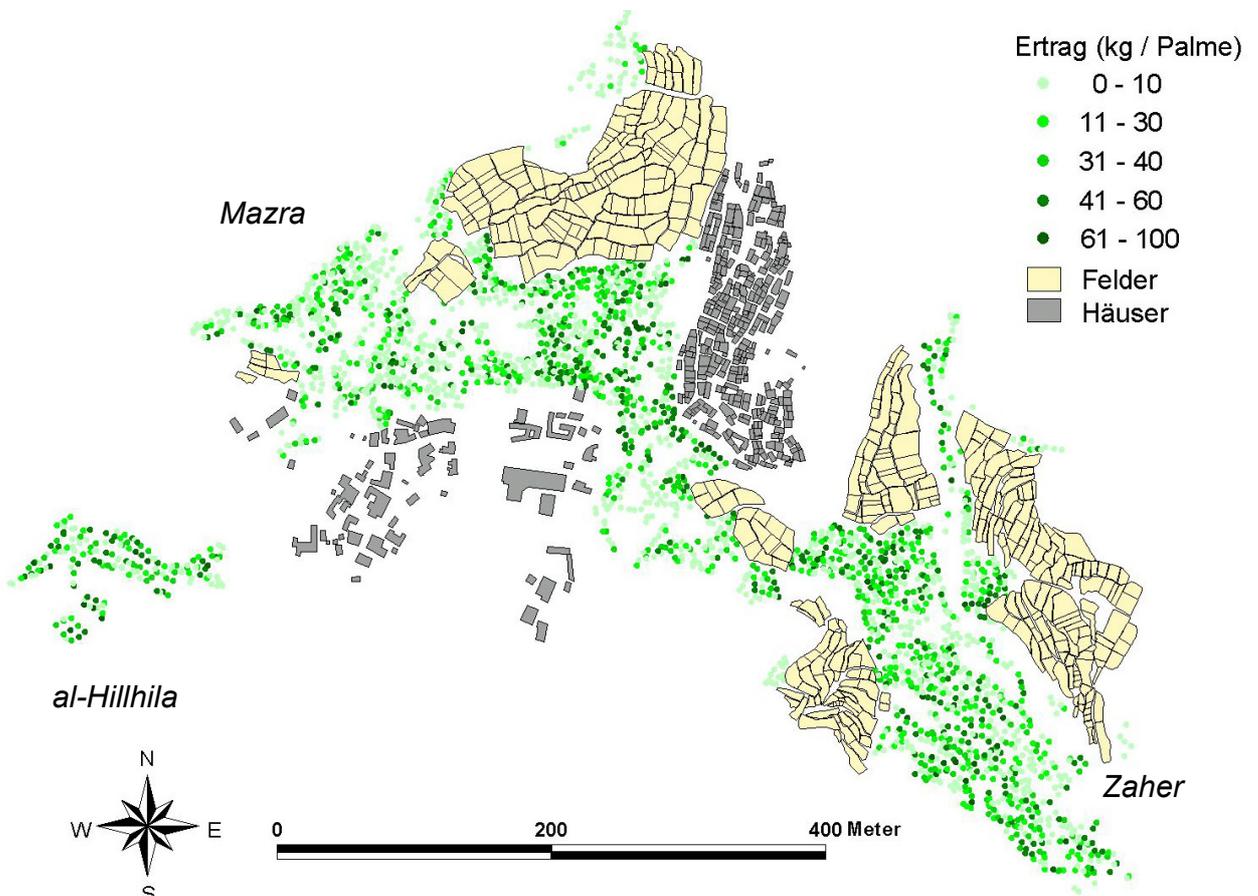


Abbildung 12. Durchschnittliche Erträge der wichtigsten Palmensorten in *Balad Seet* (Oman) im Jahr 2002

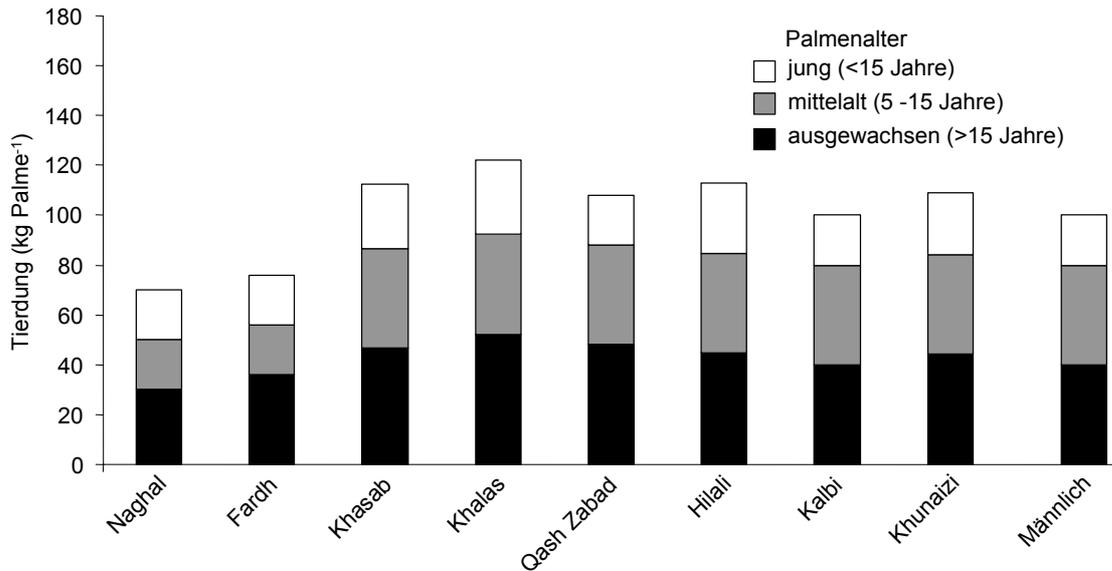


Abbildung 13. Ausbringungsmenge von Tierdung zu den verschiedenen Palmensorten in der Kernoase *Balad Seet* (Oman) im Jahr 2002

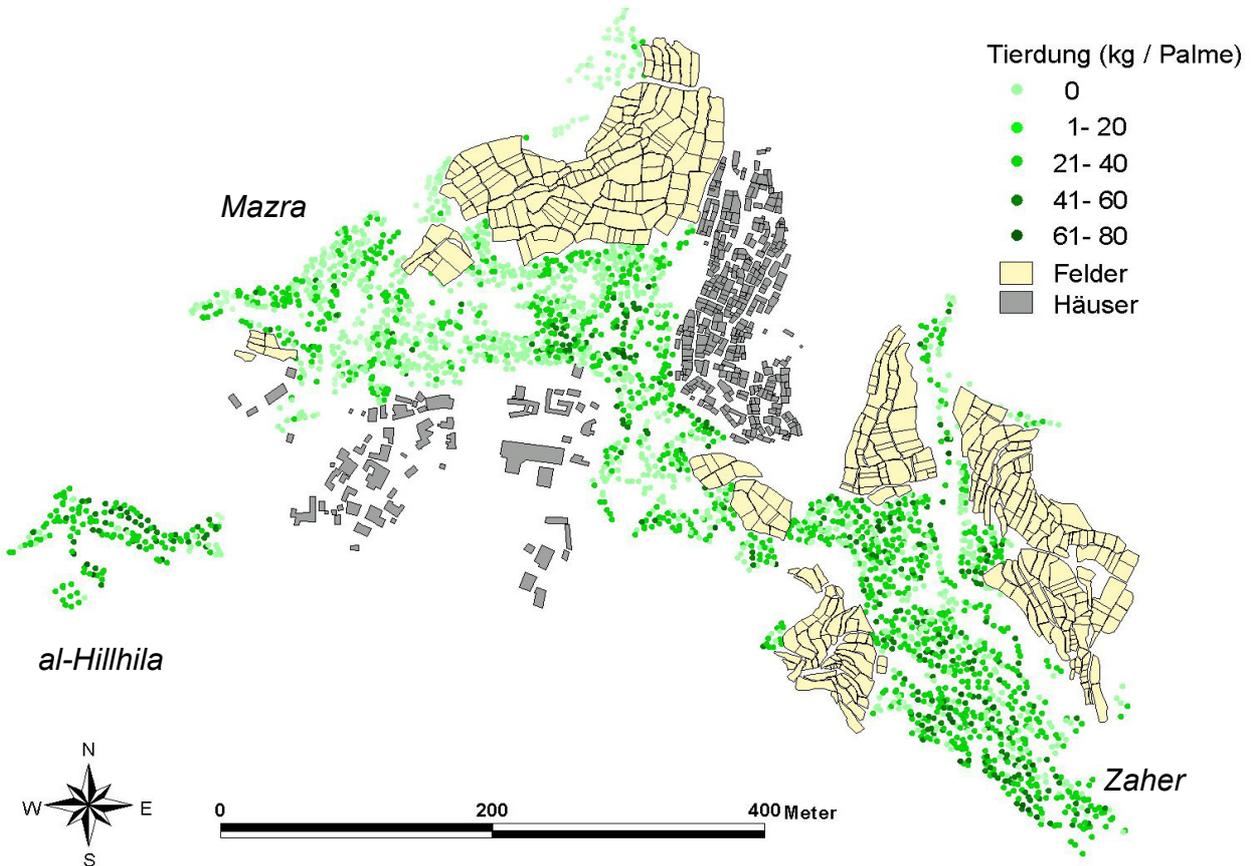


Abbildung 14. Ausbringungsmenge von Tierdung in den verschiedenen Palmengärten der Kernoase *Balad Seet* (Oman) im Jahr 2002

3.2.2. Sortenspektrum und Erträge der Dattelpalmen in der Streuoase *Maqta*

Auf den 17 verstreuten Systemen der Bergoase *Maqta* standen im Jahr 2002 insgesamt 2128 Dattelpalmen, die aus 13 verschiedenen Palmensorten einschließlich der männlichen Dattelpalmen bestanden. Im ertragsfähigen Stadium befanden sich lediglich

937 Dattelpalmen. Auf den fünf größten Terrassensystemen *Maqta*, *Shanshalla*, *Qasheen*, *Qahtan* und *Al Lathli* standen 572, 504, 250, 119 und 112 Palmen. Demgemäß hatten die restlichen 13 Terrassensysteme einen Anteil von nur 27% aller Palmen. Die kleinsten Terrassensysteme *Shwaiy* und *Sharr* besaßen lediglich vier und zehn Palmen (Abb. 15 und 16).

Ähnlich wie in *Balad Seet* dominierten auch in *Maqta* zwei Palmensorten den gesamten Bestand. Mit 1546 bzw. Dattelpalmen repräsentierten die Sorten *Barni* (1016) und *Nashu* (530) zusammen 73% Palmen. Nur noch zwei weitere Sorten, *Bunarnja* (155) und *Sidri* (120) kamen jeweils auf über 100 Dattelpalmen. Die in *Balad Seet* vorherrschenden Palmensorten *Naghal* und *Fardh* sind in *Maqta* mit 96 und 32 Palmen nur geringfügig vertreten. Die Zahl der männlichen Dattelpalmen betrug in *Maqta* 69, was einer männlichen Palme je 30 weiblichen Palmen entsprach. Von den 13 in *Maqta* vorhandenen Palmensorten gab es lediglich fünf Sorten, die auch in *Balad Seet* vertreten waren. Die dominierende Sorte in *Maqta*, *Barni* (48%), war in *Balad Seet* durch 27 Palmen vertreten, während *Nashu*, die zweitvorherrschende Palmensorte in *Maqta* (25%), nicht vertreten war. Ferner war in *Maqta*, *Khalas*, die wertvollste Palmensorte in *Balad Seet* und im ganzen Oman nicht vorhanden. Aufgrund der marginalen Lage der Bergoase *Maqta* sowie aufgrund der fehlenden Niederschläge in den letzten vier Jahren war der Palmenertrag dort sehr bescheiden und betrug durchschnittlich lediglich acht kg pro ausgewachsener Palme, während er sich in *Balad Seet* auf 32 kg pro Palme belief. Die Ausbringungsmenge an Tierdung war in *Maqta* auch wesentlich geringer als in *Balad Seet*. Die durchschnittlich ausgebrachte Tierdungmenge betrug in *Maqta* 15 kg und in *Balad Seet* 35 kg pro Palme. Hierbei muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Palmendichte in *Maqta* etwa doppelt so hoch wie in *Balad Seet* war. In *Maqta* standen auf 3,6 ha Fläche 2128 Palmen (17 m² pro Palme), während in *Balad Seet* auf 8,8 ha Fläche 2690 Palmen standen (33 m² pro Palme).

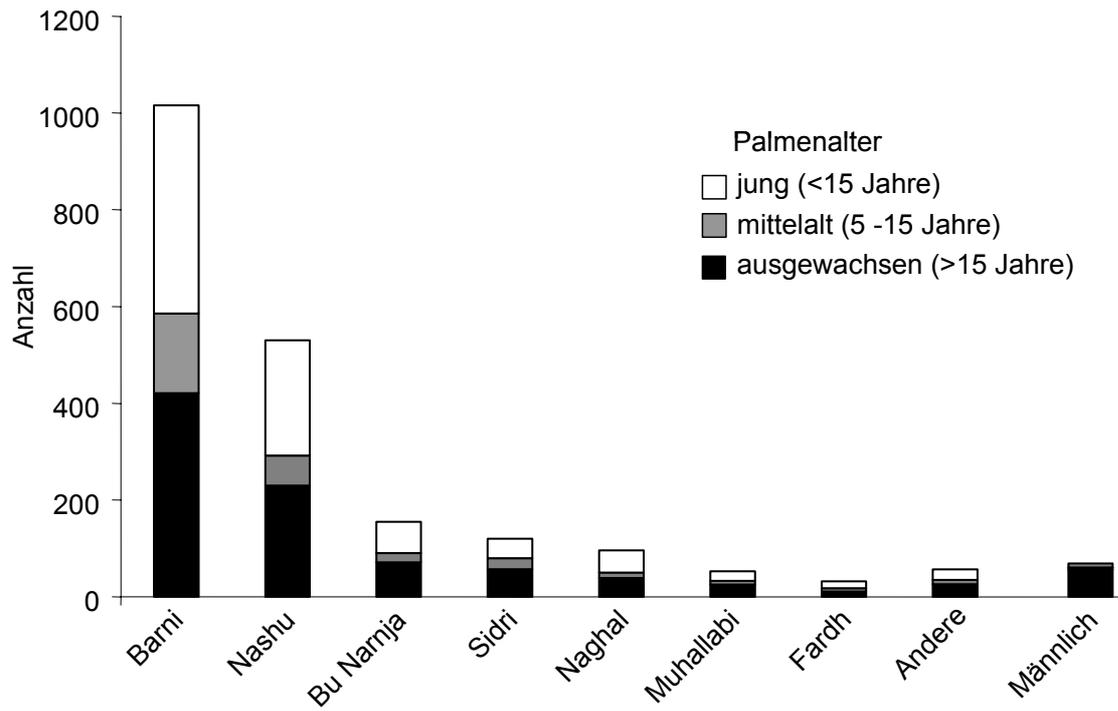


Abbildung 15. Verteilung der wichtigsten Palmensorten in der Streuoase *Maqta* (Oman) im Jahr 2002

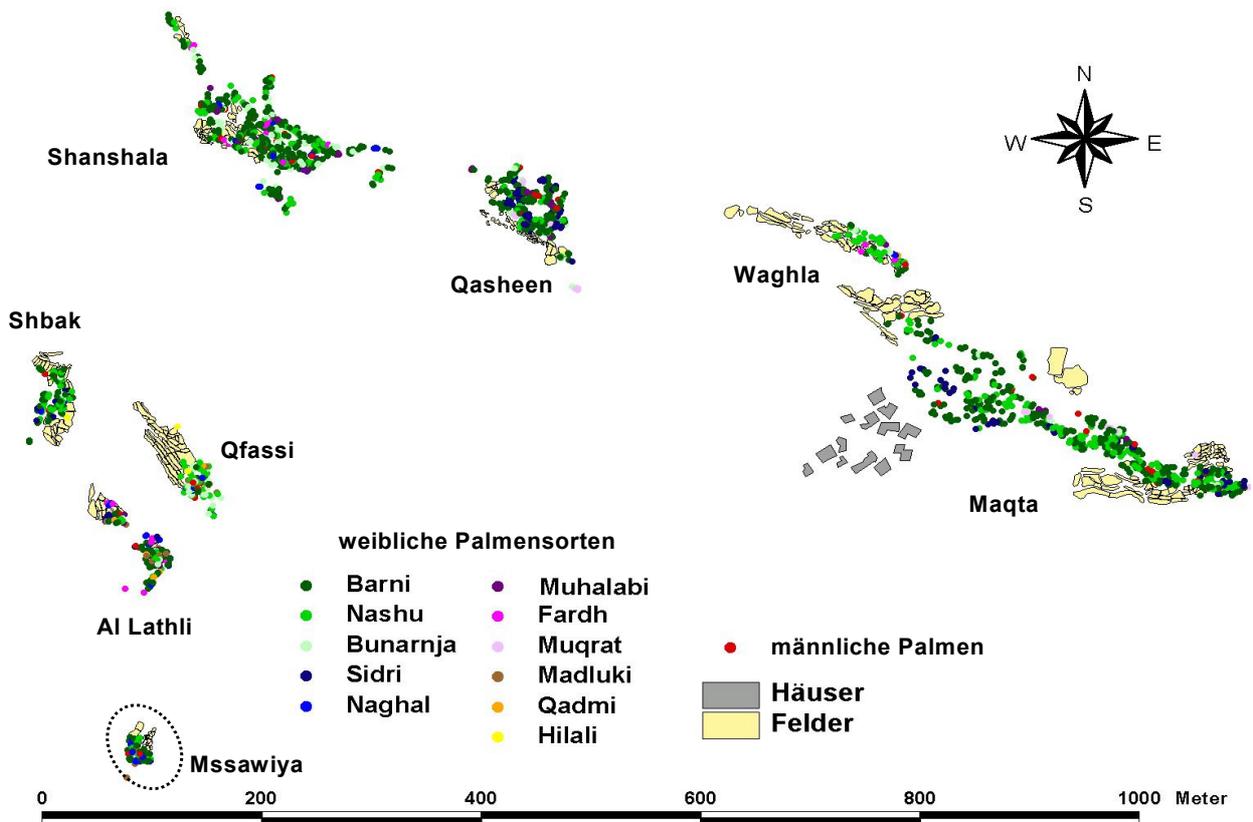


Abbildung 16. Verteilung der wichtigsten Palmensorten in der Streuoase *Maqta* (Oman) im Jahr 2002

3.3. Wasserressourcen: Menge, Qualität und Nutzung

3.3.1. Wassermenge

Balad Seet. Obwohl *Balad Seet* im *Jabal Al-Akhdar* des westlichen Hajargebirge liegt, das Jahresniederschläge von etwa 300 mm erhalten kann (Al-Wadhahi, 1996) fielen dort im Zeitraum von Juli 2001 bis Juni 2003 insgesamt nur 331 mm (Abb. 17).

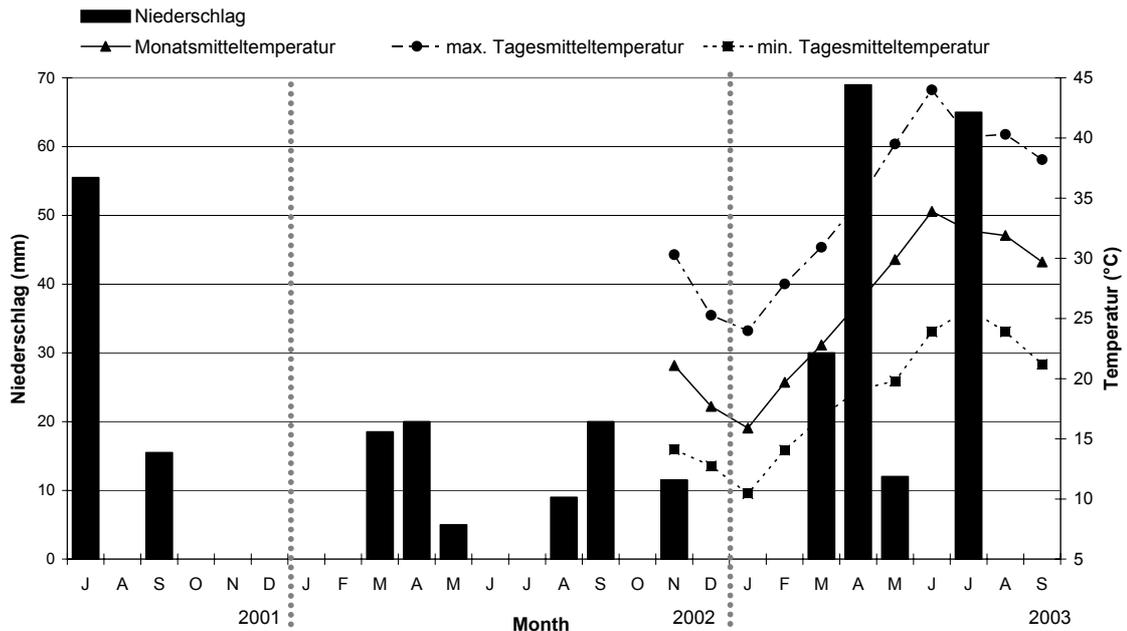


Abbildung 17. Niederschläge im Zeitraum Juli 2001 bis Juni 2003 und Monatsmittel-, maximale Tagesmittel- und minimale Tagesmitteltemperatur im Zeitraum November 2002 bis September 2003 in der Kernoase *Balad Seet* (Oman)

Sieben Quellen im Süden des Dorfes speisen den *Falaj al-Kabier* (großer *Falaj*), dessen durchschnittliche Flussrate während des Untersuchungszeitraumes $19 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ betrug und als Hauptwasserversorger der Oase gilt. Er bewässert sowohl Palmengärten als auch die ackerbaulichen Flächen. Die restlichen fünf Quellen lassen sich wie folgt nach ihrer Schüttungsmengen ordnen und dienen überwiegend oder ausschließlich der Bewässerung der Palmengärten: *Al Miban*, *Al Hiedan*, *Al Littel*, *Al Jiela*, *Al Wadi* und *Al Hamiya* (Abb. 5). Die totale Schüttung der zwölf Quellen nahm über die 24 Monate des Messzeitraumes um 22,5 % bzw. eine monatliche Abnahme von 0,94 % ab.

Zu den Wasserressourcen der Bergoase *Balad Seet* gehörten auch 14 privatgenutzte Brunnen, die ihr Wasser aus Hangzug des Sickerwassers entlang der temporären Wasserläufe (*Wadis*) sowie dem Sickerwasser gewinnen, das von den oberhalb der Brunnen liegenden Terrassen stammt. Diese Wasserressource ist allerdings relativ unzuverlässig und hängt direkt von den Regenereignissen ab.

Eine einmalige Mengenabschätzung des entnommenen Wassers aus allen Brunnen im Juni 2002 ergab etwa $2,7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, wobei das Wasser allerdings nur manchmal und dann nur kurzzeitig gepumpt wird.

Maqta. Die Schüttung der 22 Quellen variierte im Mai 2003 zwischen $0,005 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ bei *Shwaiy* und $1,3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ bei der Quelle *Maqta* und konnte als Kriterium für eine Kategorisierung herangezogen werden: (1) Quellen mit hohen Schüttungsmengen zwischen $0,75 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ und $1,3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Diese Gruppe enthält nur drei Quellen (*Maqta*, *Mbeen* und *Bdooa*), die gemeinsam im Mai 2003 $2,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ bzw. 54% der Gesamtwassermenge aller Quellen schütteten. (2) Quellen mit mittleren Schüttungsmengen zwischen $0,1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ und $0,4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Diese Gruppe umfasst 12 Quellen (*Qfassy*, *Al Lathli*, *Al Jamma*, *Arrassa*, *Qasheen*, *Shbak*, *Al Munddas*, *Khamriya*, *Qahtan*, *Wazin*, *Waghla*, *Sharr*, *F1755*⁶ und *F1789*), die im Mai 2003 zusammen insgesamt $1,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ oder 36% der Gesamtwassermenge lieferten. (3) Quellen mit sehr niedrigen Schüttungsmengen zwischen $0,005 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ und $0,06 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (*Teyof*, *Shway*, *Mssaiya*, *Pssaiya* und *Qabel*) deren Gesamtwassermenge zum Vergleichszeitpunkt insgesamt nur $0,13 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ oder 2,4% betrug (Abb. 8). Aufgrund der während des 20 monatigen Quellmessungszeitraumes ausgeprägten Trockenperiode in *Maqta* nahm die Schüttung aller Quellen um insgesamt 47 % ab, was eine monatliche Abnahme von 2,35 % entspricht. Diese Abnahme war deutlich höher als in *Balad Seet*, wo einige Regenfälle die Quellschüttungen stabilisieren konnten.

3.3.2. Wasserqualität

Die Kenndaten der Wasserqualität für *Balad Seet* und *Maqta* sind in Tabelle 2 vergleichend dargestellt. (Werte, die zu keinen Beeinträchtigungen führen, sind in normaler Schrift dargestellt, leichte – solche die zu mittleren Beeinträchtigungen erscheinen kursiv, schwere Restriktionen werden kursiv und fett gedruckt dargestellt).

Bei keiner der gemessenen Quellen wurden schwere Beeinträchtigungen der Wasserqualität festgestellt. Es wurden allerdings an mehreren Quellen in *Maqta* mittlere Beeinträchtigungen festgestellt. Insgesamt gesehen kann die Qualität des Bewässerungswassers jedoch als sehr gut angesehen werden.

⁶ Amtliche Registrierungsnummer der Omanischen Behörde für Wasserressourcen und *Aflaj*

Tabelle 2. Messwerte zur Bewässerungswasserqualität in den Oasen *Balad Seet* und *Maqta* (Oman)

Problem	Versalzung	Toxizität	
Parameter	EC _w (dS m ⁻¹)	Na-Gehalt (SAR)	Cl-Gehalt (mmol l ⁻¹)
Quellen in Balad Seet			
Al Mieban	0,5	0,5	0,6
Al Hiedan	0,4	n.g.	n.g.
Al Littel	0,4	n.g.	n.g.
Dorfbrunnen	1,3	n.g.	n.g.
Quellen Maqta			
F 1777	0,5	0,9	1,6
F 1778	0,7	1,4	2,8
F 1780	0,6	8,4	1,6
F 2447	1,0	8,6	4,2
F 2680	0,8	1,8	2,1
Wazin	1,0	2,1	3,9

n.g. = nicht gemessen

3.3.3. Wassernutzung und Bewässerungssystem

Balad Seet. Die Konstruktion des Bewässerungssystems (*Aini-Falaj*) der Bergoase *Balad Seet* (Abb. 18) erlaubte die Anlage von sechs Terrassensystemen, die die Existenz der Bergoase seit etwa Dreitausend Jahren sicherten (Nagieb et al., 2004).

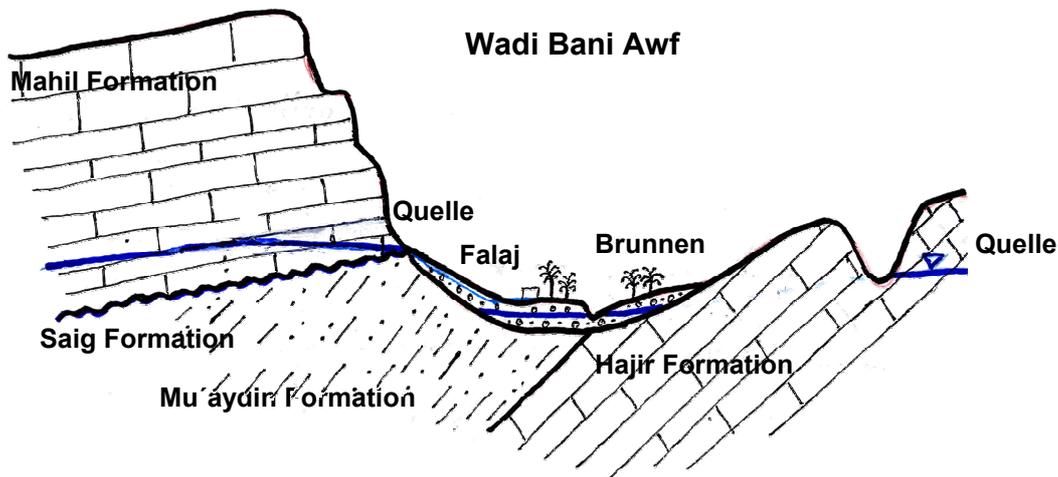


Abbildung 18. Schematischer Querschnitt im Tal von *Balad Seet*, *Wadi Bani Awf* (Oman) (Nagieb et al., 2004)

Das Bewässerungssystem besteht aus den Bewässerungskanälen *Aflaj*, die durch Quellen an den Berghängen gespeist werden. Bewässerungskanäle werden ergänzt durch offene Wassersammelbecken, die als temporäre Speicher dienen.

Sie sind besonders für die kleinen *Aflaj* von großer Bedeutung, wobei die Bauern die Becken über Nacht füllen, um das Wasser dann am Folgetag verwenden zu können.

3.3.4. Organisation der Wasserverteilung

Da Wasser stets knapp ist, muss seine Verteilung unter den Beteiligten genau geregelt werden. In Oman gehört zu jedem Bewässerungskanal eine festgelegte Rotation (*Dawran*). Darunter wird die Zeit verstanden, die benötigt wird, um allen davon abhängenden Flächen das Wasser jeweils ein Mal zuzuteilen. Danach beginnt die Wasserteilung mit einem neuen *Dawran* für weitere neun Tage (Wilkinson, 1974; Scholz, 1993).

Das *Dawran* des *Falaj Al Kabier* in *Balad Seet* beträgt neun Bewässerungstage. Jeder Bewässerungstag ist in zwei Teile (*Badda*) eingeteilt. Eine *Badda* besteht wiederum aus 24 Zeiteinheiten, *Athar* genannt. Ein *Athar* ist also eine Messeinheit für eine Bewässerungszeit von 30 Minuten. Ein Bewässerungstag hat 48 *Athar*. Einen Bewässerungstag nennt man in *Balad Seet* auch *Maqfool*. Um die Orientierung innerhalb des *Dawran* für die Beteiligten zu erleichtern, erhält jeder *Maqfool* und *Badda* einen Namen. Diese Namen sind teilweise geographischer Art, teilweise handelt es sich auch um die Namen der Wasserrechtsbesitzer. Die Bewässerungszeit am Tag heißt *Baddatu alnaha* (von 6 Uhr morgens bis 18 Uhr), die nächtliche Bewässerungseinheit *Baddatu allail* (von 18 Uhr bis 6 Uhr morgens). Aus praktischen Gründen wurde die Tages-*Badda* für die Bewässerung von den ackerbaulichen Terrassen genutzt, während mit Nacht-*Badda* die Palmengärten bewässert werden (Abb. 19).

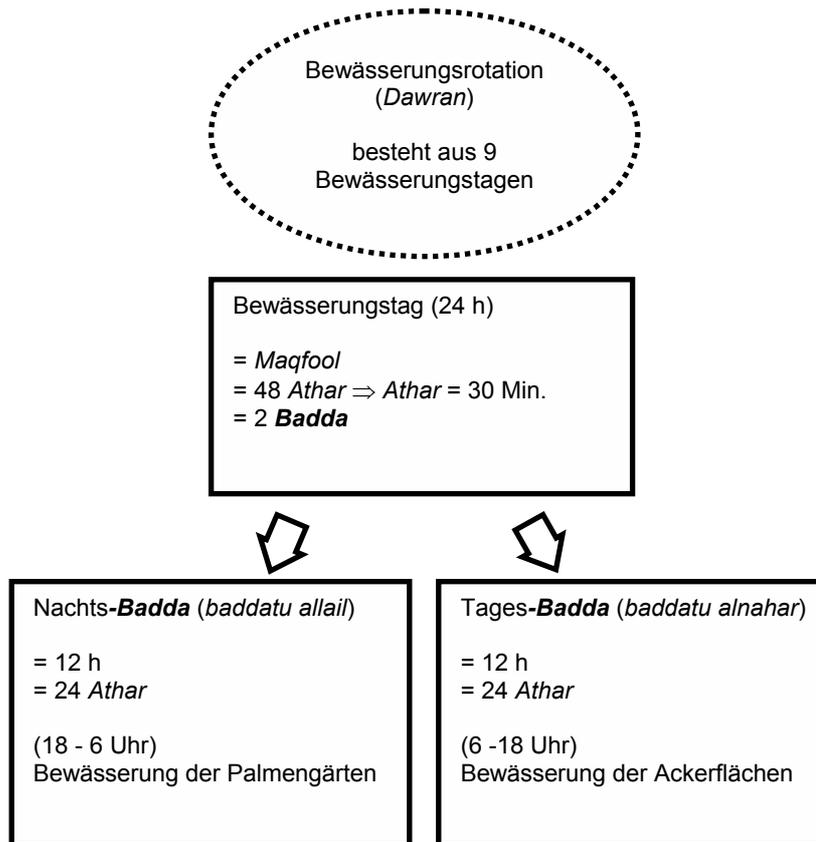


Abbildung 19. Bewässerungsrotation und ihre Untereinheiten

Maqta. Im Gegensatz zu *Balad Seet* gehört in *Maqta* zu jedem Terrassensystem ein bestimmtes Bewässerungssystem, das aus oberhalb des Terrassensystems entspringenden Quellen, Bewässerungskanälen (*Falaj*) und Bewässerungsbecken besteht. Da die Schüttungsmengen der Quellen sehr klein sind, kann keine zeitgleiche Bewässerung stattfinden. Deswegen wird das Wasser mehrere Stunden in den Wasserbecken gespeichert, bis es genutzt werden kann. Das Bewässerungssystem und die Wasserverteilung sind weniger kompliziert als in *Balad Seet*, da jedes Terrassensystem mit seinen wenigen Landnutzern eigenes Bewässerungswasser und eine spezifische Rotation (*Dawran*) besitzt. Die Rotation der einzelnen Systeme beträgt neun oder 12 Tage. Aufgrund der geringen Wasserverfügbarkeit der einzelnen Systeme findet in *Maqta* die im ganzen Oman bekannte, 30 Minuten betragende, Messeinheit *Athar* keine Verwendung. Das Wasser wird unter den Landnutzern des jeweiligen Systems tageweise verteilt. So beträgt die Rotation des Terrassensystems *Qfassi* beispielsweise 12 Tage. Da die drei Landnutzer im System *Qfassi* gleiche Mengen an Palmen und Ackerflächen bewirtschaften, können sie jeweils vier Tage lang das gesamte zur Verfügung stehende Bewässerungswasser nutzen.

Wenn die genutzte Fläche mehrerer Bauern in einem System nicht gleich groß ist, wird das Wasser proportional zur genutzten Fläche verteilt. So wird das Terrassensystem *Mssaiya* beispielsweise von zwei Bauern genutzt, wobei die Länge der Wassernutzungsperioden 7,5 und 4,5 Tage beträgt.

3.3.5. Nachhaltigkeit der Wasserversorgung der Oasen

Die kontinuierliche Besiedelung der Oasen über lange Zeitspanne hinweg deutet darauf hin, dass eine stabile Wasserversorgung gewährleistet ist. Angesichts der niedrigen und unregelmäßigen Regenfälle und langer Dürreperioden, die sich oftmals über mehrere Jahre erstrecken, ist es offensichtlich, dass regulierende Mechanismen vorhanden sein müssen. Die Stabilität der Quellschüttungen wird hierbei durch die geologische Lage der Oasen gesichert. Große Einzugsgebiete sind offenbar in der Lage, Regenfälle zu sammeln, an geologisch begünstigten Orten zu konzentrieren und so die niedrigen Jahresniederschläge auszugleichen. Dies erklärt auch die Lage vieler Quellen unterhalb mächtiger Gesteinsformationen (Abb 20, Abb, 21). Die darüber liegenden Formationen, oftmals zur Höhlenbildung neigende Kalksteine mit guten Wasserspeichereigenschaften, dienen als Reservoirs, die die Wasserversorgung über niederschlagsarme Zeiten hinweg sicherstellen.

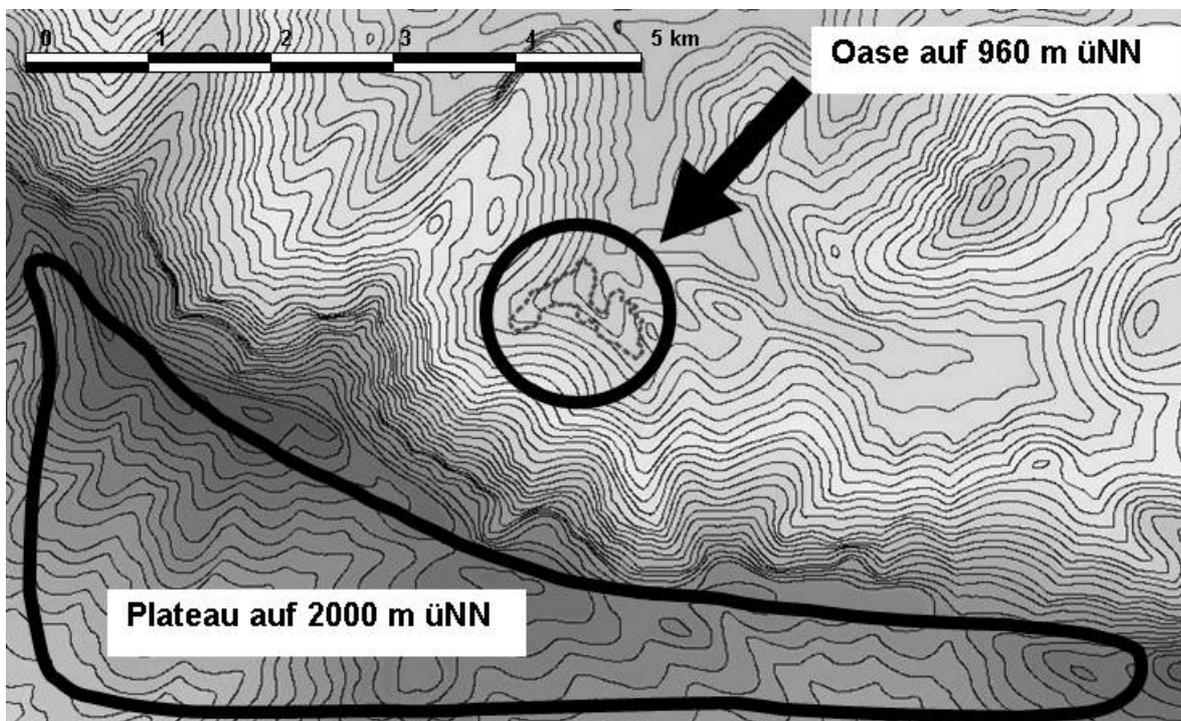


Abbildung 20. Topographische Karte der Kernase *Balad Seet* (Oman) und eines Teils des angrenzenden Felsplateaus. Die Oase befindet sich am Fuße einer steilen Felsklippe

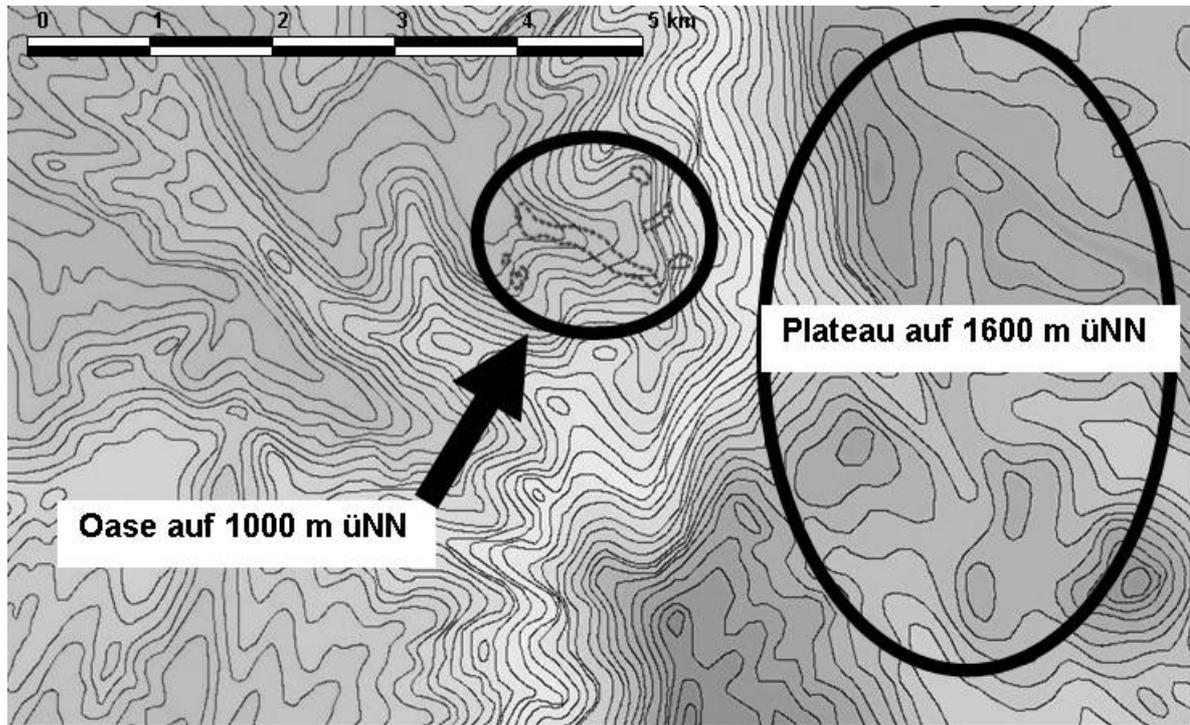


Abbildung 21. Topographische Karte der Streuoase *Maqta* (Oman) und eines Teils des angrenzenden Felsplateaus. Die Oase befindet sich im unteren Teil eines langgestreckten Hanges

Tragfähigkeit und Dürresistenz der Oasen hängen in erster Linie von der Wasserspeicherkapazität der Reservoirs ab. Eine maßgebliche Größe ist hierbei die Retentionszeit des Wassers im Gestein, also die Zeitspanne zwischen einem Niederschlagsereignis und dem Austreten des Regenwassers als Quellwasser in der Oase. Die Bestimmung dieser Retentionszeit erfolgte mittels einer Analyse von gelösten Gasen im Quellwasser. In Wasserproben von mehreren Quellen in *Balad Seet* und *Maqta* wurden Konzentrationen des Gases Schwefelhexafluorid (SF_6) bestimmt. Aus diesen Konzentrationen ließ sich ableiten, welche Konzentrationen zum Infiltrationszeitpunkt in der Erdatmosphäre geherrscht haben müssen (Busenberg und Plummer, 2000). SF_6 ist ein anthropogenes Gas, das zur Isolierung von Hochspannungsschaltern und in anderen industriellen Prozessen eingesetzt wird. Es ist sehr langlebig und reichert sich daher in der Atmosphäre an, wo die Konzentrationen seit seiner Einführung durchschnittlich um jährlich etwa 7% ansteigen (Busenberg und Plummer, 2000). Dieser steile und gut dokumentierte Konzentrationsanstieg ermöglicht eine recht genaue Bestimmung des Infiltrationszeitpunktes aus der Gaskonzentration im Quellwasser.

Parallel zu diesen Messungen wurde eine Abschätzung des Wasseralters durch Messung der Konzentrationen des radioaktiven Wasserstoffisotops Tritium (^3H) und dessen Zerfallsprodukt ^3He durchgeführt (Schlosser et al., 1988; Solomon and Cook 2000; Kipfer et al., 2002). Beide Analysen wurden in der ETH Zürich und später in der Universität Heidelberg durch die Arbeitsgruppe um Prof. Dr. Werner Aeschbach-Hertig durchgeführt.

Aus den Tritiumkonzentrationen ergaben sich für die gemessenen Quellen aus *Maqta* und *Balad Seet* Speicherzeiten zwischen 2 und 12 Jahren, die allerdings wegen sehr niedriger atmosphärischer Tritiumkonzentrationen im Oman (etwa ein Zehntel der europäischen) mit großen Fehlern behaftet waren (Abb. 22). Die SF_6 -Methode erlaubte deutlich genauere Datierungen und ergab Wasseralter zwischen 2,9 Jahren für Quelle F 2680 aus *Maqta* und 4,1 Jahren für Quelle 6 aus *Balad Seet*. Für andere untersuchte Oasen schwankten die SF_6 -Alter zwischen 0.6 und 16.1 Jahren (Abb. 23). Bei allen ermittelten Altern handelt es sich um Durchschnittswerte, die eine Vermischung schneller und langsamer austauschender Wasserfraktionen beinhalten. Die Retentionszeit ist daher nicht mit der absoluten Durchlaufzeit durch das Gestein gleichzusetzen. Dennoch geben die Werte Informationen darüber, wie gut bestimmte Oasen sich gegen Dürren behaupten können und wie lange die Trockenperiode anhalten kann, bevor Wassermangel eintritt.

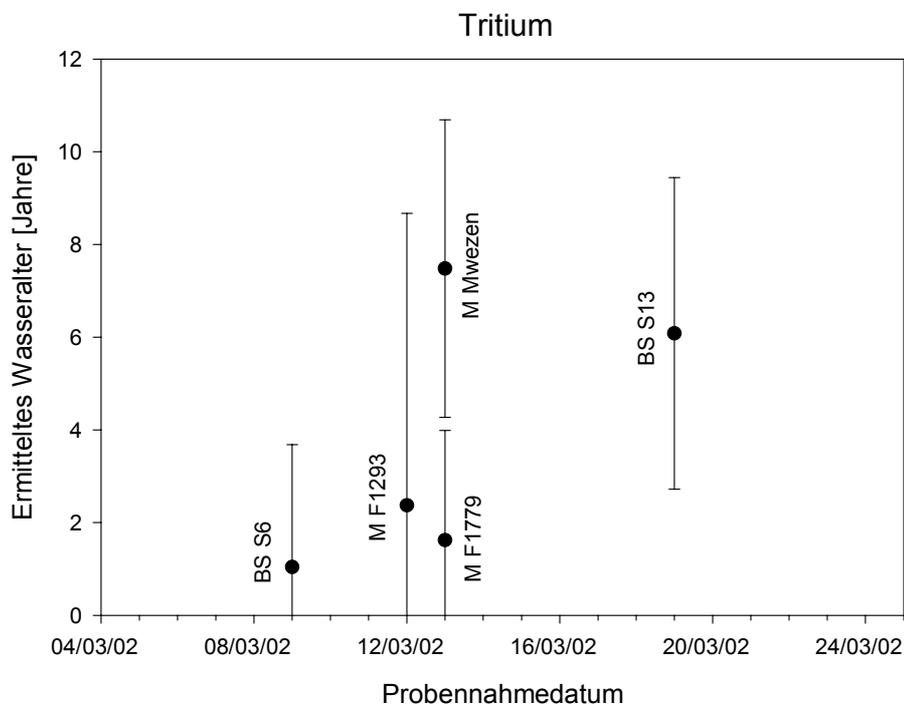


Abbildung 22. Aus den Tritium- und Helium 3-Konzentrationen ermittelte Wasseralter für Wasserproben aus den Oasen *Balad Seet* (BS vor der Quellbezeichnung) und *Maqta* (M vor der Quellbezeichnung) (Oman)

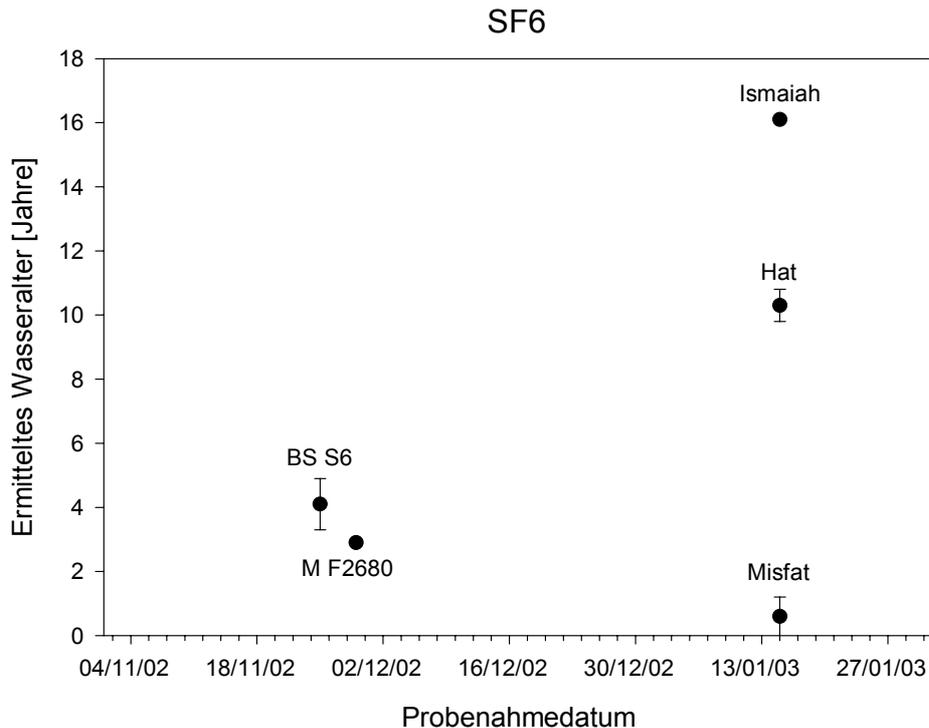


Abbildung 23. Aus den SF₆-Konzentrationen ermittelte Wasseralter für Wasserproben aus den Oasen *Balad Seet* (BS vor der Quellbezeichnung), *Maqta* (M vor der Quellbezeichnung), *Hat*, *Misfat* und *Ismaiah* (Oman)

3.4. Versalzungsvermeidung der Terrassenböden

Bewässerte Landwirtschaft in Trockengebieten ist oftmals sehr anfällig für Versalzung. Auch im extrem trockenen Norden des Oman, wo ausschließlich Bewässerungs-Feldbau zu finden ist, ist hohes Versalzungspotential gegeben. In den Hauptlandwirtschaftsgebieten in der *Batinah*, der omanischen Küstenebene, lässt sich der Aufbau erhöhter Salzkonzentrationen im Boden bereits nach wenigen Jahrzehnten beobachten (Victor und Al-Farsi, 2001).

Trotz dieser für Bewässerungslandwirtschaft grundsätzlich ungünstigen Klimabedingungen sind in den untersuchten Oasen keine Anzeichen von Salzstress an Pflanzen zu erkennen. Offenbar wird die Akkumulation von Salz durch die ackerbaulichen Praktiken verhindert. In der Bewässerungslandwirtschaft wird dies in erster Linie durch ausreichende Drainage erreicht. Es liegt daher nahe, die Struktur der terrassierten Felder hinsichtlich ihrer hydrologischen, bodenphysikalischen und bodenchemischen Eigenschaften zu untersuchen. Die Untersuchung fand in einer ausgewählten Parzelle in *Mazra*, dem größten Terrassensystem von *Balad Seet*, statt. Die untersuchten Parameter waren Kohlenstoff- und Salzgehalt der Böden, die Entwicklung der Bodenfeuchte im Oberboden über mehrere Monate, die gesättigte Wasserleitfähigkeit des Bodens in verschiedenen Tiefen, die Porenverteilung der

Bodenmatrix, die vertikale Wasserbewegung und die Qualität des Bewässerungswassers. Einzelheiten der Experimente sind in Luedeling et al. (2005) im Anhang erläutert.

Die bodenchemischen Untersuchungen zeigten zum einen, dass die obersten 0,45m des Bodens frei von Versalzung waren, während sich darunter durchaus eine Ansammlung von Salzen diagnostizieren ließ. Diese lag jedoch unterhalb der Wurzelzone der meisten Feldfrüchte (Tab. 3). Auffällig waren die außerordentlich hohen Konzentrationen an organischem und anorganischem Kohlenstoff und an Carbonat (Tab. 3). Die hohen Anteile von 1,5 bis 3,7% C_{org} und 37,9 - 43,4% $CaCO_3$ leisten einen maßgeblichen Beitrag zur Stabilisierung der Bodenstruktur.

Tabelle 3. pH-Werte und Konzentrationen an organischem Kohlenstoff (C_{org}), anorganischem Kohlenstoff (C_{anorg}), $CaCO_3$, und elektrische Leitfähigkeit in drei verschiedenen Tiefenstufen eines Terrassenbodenprofils in *Balad Seet*, Oman (Luedeling et al., 2005)

Tiefe (m)	pH (H_2O)	C_{org} %	C_{anorg} %	$CaCO_3$ %	Leitfähigkeit $dS\ m^{-1}$
0,00 – 0,15	8,32	3,68	4,55	37,9	1,404
0,15 – 0,45	8,40	2,98	4,67	38,9	0,883
0,45 – 1,00	8,37	1,57	5,21	43,4	4,826

Diese hohen Anteile an Kittsubstanzen sind von großer Bedeutung, da die niedrigen Tonanteile des Bodens sich eher ungünstig auf die Bodenstruktur auswirken (Abb. 24). Die Korngrößenanalyse des Terrassensubstrats zeigte einen deutlichen Unterschied zwischen den oberen 0,90m des Profils, in denen eine relativ gleichmäßige Verteilung der Partikelgrößen bei geringem Kiesanteil beobachtet wurde, und der untersten Schicht der Terrasse (0,90 – 1,10m), in der in erster Linie Geröll und Sand vorhanden war (Abb. 24).

Das in *Balad Seet* verwendete Bewässerungssystem scheint in der Lage zu sein, den Wassergehalt des Bodens in einem Bereich zu halten, in dem der Wasserstress für die Feldfrüchte minimiert wird. Messungen des Wassergehaltes des Oberbodens über mehrere Bewässerungszyklen mit Hilfe einer dielektrischen Kapazitätssonde zeigten, dass die Bodenfeuchte zwischen 13 und 100% schwankte, wobei Wassergehalt nach einer Bewässerung rasch genug abnahm, um Staunässe zu verhindern (Abb. 25).

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit des Bodens war sehr hoch, insbesondere in den unteren Bereichen des Profils. Eine sehr geringe Lagerungsdichte des Bodens sowie ein hohes Porenvolumen deuten eine hohe Feldkapazität und insgesamt gutes Wasserspeichervermögen des Bodens an (Tab. 4). Dies wird zusätzlich belegt durch

eine gleichmäßige Porengrößenverteilung des Bodens (Abb. 26), die andeutet, dass die Drainage- und Speicherkapazitäten in einem ausgewogenen Gleichgewicht stehen.

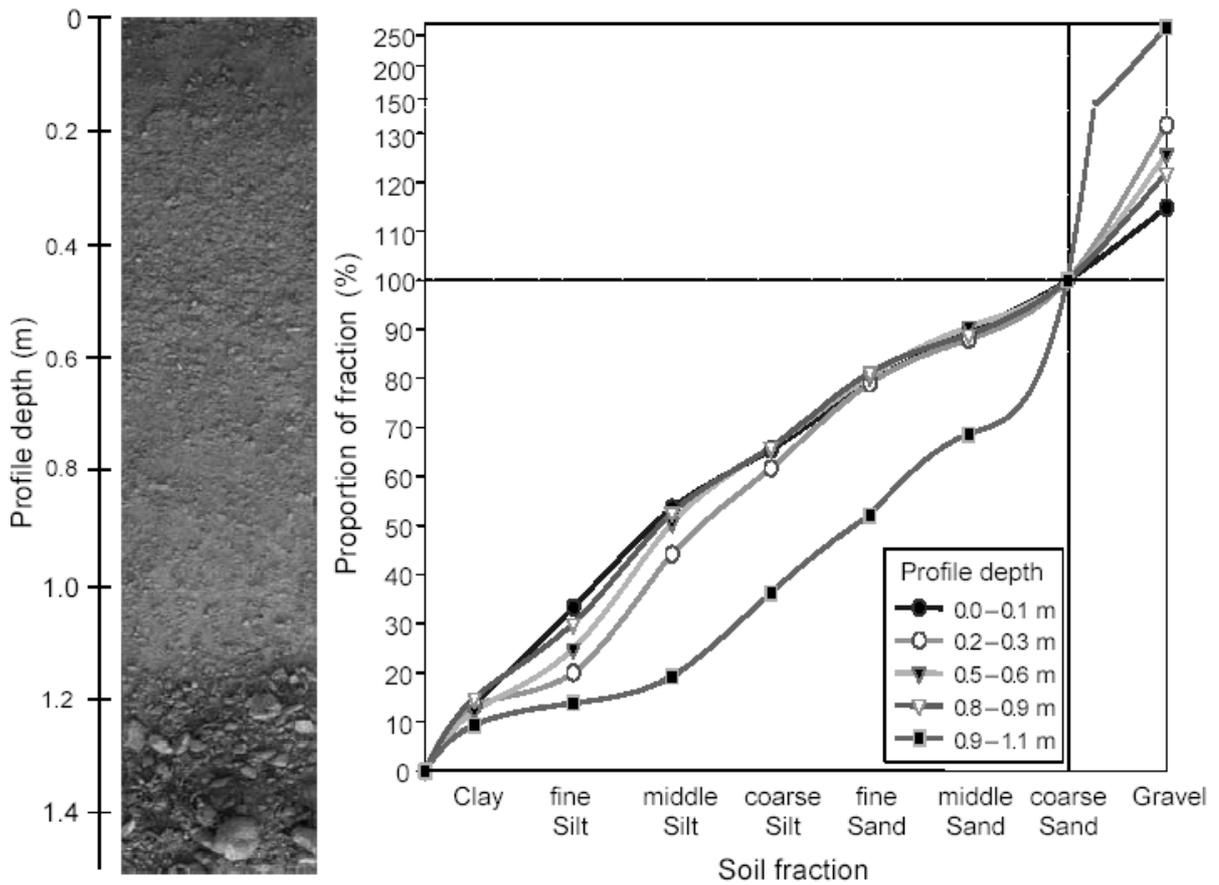


Abbildung 24. Entwicklung des Bodenwassergehalts über zwei Bewässerungszyklen in der Kernoase *Balad Seet* (Oman). Die Daten sind Mittelwerte von vier dielektrischen Kapazitätssonden (Luedeling et al., 2005)

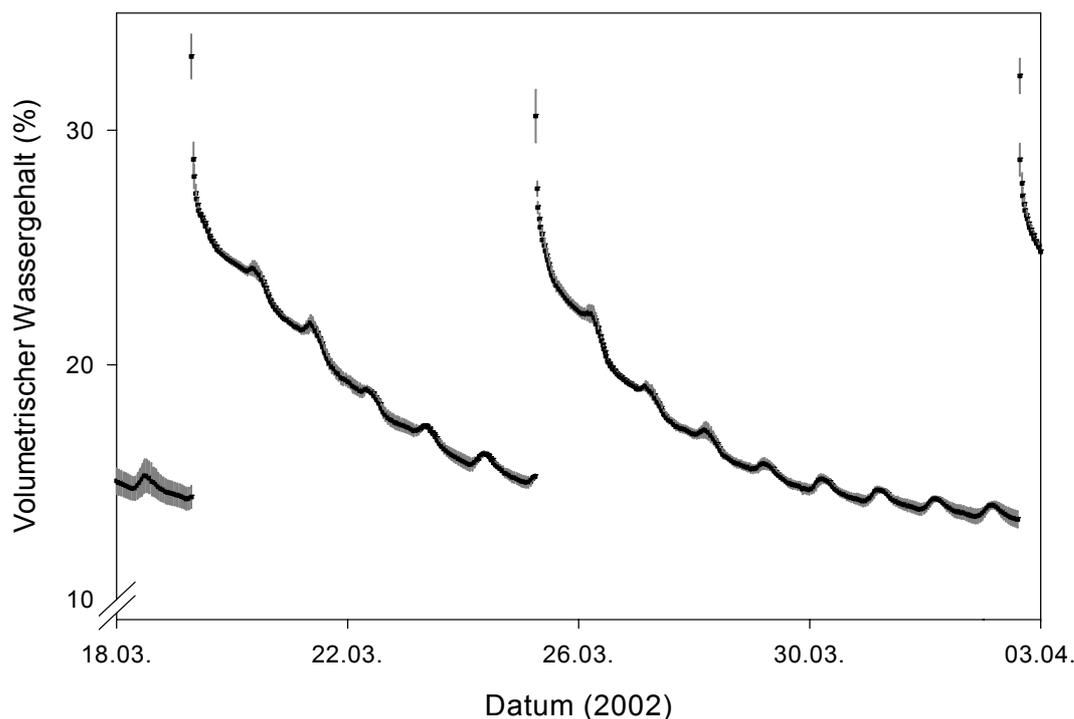


Abbildung 25. Entwicklung des Bodenwassergehalts über zwei Bewässerungszyklen in der Kernoase *Balad Seet* (Oman). Die Daten sind Mittelwerte von vier Sonden. Die grauen Balken geben Standardfehler des Mittelwertes an (Luedeling et al., 2005)

Tabelle 4. Gesättigte Wasserleitfähigkeit, Gesamtporenvolumen, Lagerungsdichte und verfügbare Feldkapazität (\pm ein Standardfehler) ungestörter Bodenproben aus verschiedenen Tiefen eines Terrassenprofils aus der Kernoase *Balad Seet* (Oman). Werte in einer Spalte mit dem gleichen Buchstaben sind nicht signifikant verschieden mit $p < 0,05$. Alle Daten sind Mittelwerte von vier Proben (Luedeling et al., 2005)

Tiefe (m)	Gesättigte Wasserleitfähigkeit (m d^{-1})		Gesamtporen- volumen (%)		Lagerungsdichte (kg m^{-3})		Verfügbare Feldkapazität (vol %)	
0,00 – 0,06	$2,76 \pm 0,4$	a	$61,6 \pm 0,3$	a	1020 ± 10	a	$18,7 \pm 1,7$	a
0,20 – 0,25	$8,40 \pm 0,7$	b	$56,9 \pm 0,5$	b	1140 ± 10	b	$13,0 \pm 0,7$	b
0,55 – 0,60	$6,81 \pm 0,8$	b	$56,7 \pm 0,6$	b	1150 ± 20	b	$13,5 \pm 0,8$	b

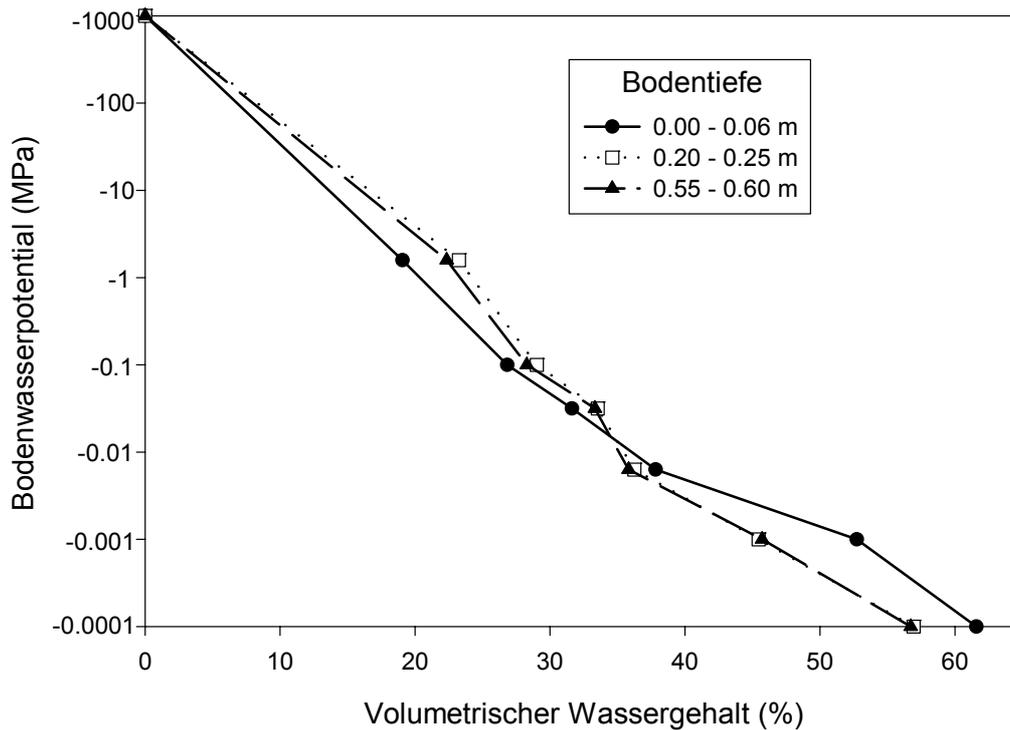


Abbildung 26. Bodenwassercharakteristik dreier Bodentiefen eines Terrassenbodenprofils aus der Kernoase *Balad Seet* (Oman) (Luedeling et al., 2005)

Die tatsächliche vertikale Wasserbewegung wurde in einem Tracer-Experiment durch Luedeling et al. (2005) untersucht, in dem Bewässerungswasser (zwei Varianten mit 40 und 60l Bewässerung) Bromid (Br) zugesetzt wurde. Aus der Wiederfindung von Br in verschiedenen Bodentiefen konnten Rückschlüsse zum Verbleib des Wassers gezogen werden. Die Ergebnisse des Versuchs deuteten an, dass ein großer Teil des Bewässerungswassers in den oberen 0,20m des Profils verbleibt oder von dort verdunstet. Die tatsächliche Wasserspeicherung in den tieferen Schichten scheint eher gering zu sein. 21 (bei 40l Bewässerung) und 33% (bei 60l Bewässerung) des Bromids wurde nicht wiedergefunden, was der Menge des drainierten Wassers entsprechen könnte.

Ein weiterer Faktor, der zur Versalzungsvermeidung beiträgt, ist die Wasserqualität und die niedrige Salzkonzentration im Bewässerungswasser (Tab. 5). Das Wasser wies eine geringe Leitfähigkeit auf. Den größten Teil hiervon machten zudem Ca^{2+} und Mg^{2+} -Ionen aus, während die Na^+ -Konzentration eher niedrig war.

Tabelle 5. pH, elektrische Leitfähigkeit (EC), Konzentrationen von Chlorid (Cl⁻), Calcium (Ca²⁺), Magnesium (Mg²⁺), Natrium (Na⁺), Anionen und Kationen, der totalen Alkalinität, des residuellen Natriumcarbonats (RSC) und der Natrium-Adsorptionskapazität im Quellwasser der Kernoase *Balad Seet* (Oman)

pH	EC (dS m ⁻¹)	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Gesamte Anionen (meq l ⁻¹)	Gesamte Kationen	Alkalinität	RSC	SAR
8,24	0,51	0,56	2,82	2,30	0,56	5,64	5,73	4,56	-0,88	0,47

Die Nachhaltigkeit der Terrassenkultur wird folglich zum einen durch die gute Qualität des Bewässerungswassers gesichert. Zum anderen sorgt die durch Carbonat und organische Substanz stabilisierte Porenstruktur des Bodens für ausreichende Drainage ohne dabei jedoch die Wasserspeicherfähigkeit in der durchwurzelter Zone zu vermindern.

3.5. Trockenstressversuch bei Weizen

Die Varianzanalyse (ANOVA) zeigte signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Weizenvarietäten und der Bewässerung; die Düngung hatte keine signifikanten Auswirkungen auf alle untersuchten Parameter. Deshalb wurden die Daten über die beiden Düngungsvarianten gemittelt (Tab. 6).

3.5.1. Kornertrag

Beim 27-tägigen Bewässerungsintervall (W I), produzierten die Sorten *Sarraya* und *Wadi Quraiyat 308* mit 4,4 t ha⁻¹ die höchsten Kornerträge. Diese beiden Erträge waren 16-37% höher als diejenigen der Sorten *Cooley*, *Missani* und *Jimah*. Die Erträge der Sorten *Sarraya* und *Wadi Quraiyat 308* waren zwar tendenziell höher als die von *Greda*, *Walidi* und *Wadi Quraiyat 302*, aber diese Unterschiede waren nicht signifikant verschieden (Tab. 6, Abb. 27). Beim 18-tägigen Bewässerungsintervall (W II) erzielten die Landsorten *Sarraya* mit 6,6 t ha⁻¹ und *Walidi* mit 6,0 t ha⁻¹ die höchsten Kornerträge. Während es zwischen den Kornerträgen der Sorten *Sarraya* und *Walidi* keine signifikanten Unterschiede gab, waren deren Erträge signifikant höher als diejenigen aller anderen Sorten – mit Ausnahme derjenigen von *Walidi* und *Wadi Quraiyat 308*. Die Sorte *Wadi Quraiyat 308* erzielte mit 5,5 t ha⁻¹ den dritthöchsten Kornertrag, der deutlich über derjenigen der Sorten *Greda*, *Missani* und *Jimah* lag.

Die Verkürzung des Bewässerungsintervalls von 27 auf 18 Tage führte zu einer Erhöhung des Kornertrages der Sorte *Missani* um 68% und somit zur höchsten Ertragssteigerung, gefolgt von *Walidi* (60%), während die niedrigste Ertragssteigerung

bei der Sorte *Greda* (18%) beobachtet wurde. Dies zeigt, dass die Landrasse *Missani* stärker als alle anderen auf eine hohe Wassergabe reagiert.

Tabelle 6. Korn- und Strohertrag, Tausendkorngewicht (TKG), Pflanzenhöhe und Ährenlänge von fünf Landrassen und drei verbesserten Weizensorten unter zwei Bewässerungsintervallen in der Kerngoase *Balad Seet* (Oman) im Anbaujahr 2001/2002

Varietät	Kornertrag (t ha ⁻¹)		Strohertrag (t ha ⁻¹)		TKG (g)		Pflanzenhöhe (cm)		Ährenlänge (cm)	
	W I [†]	W II [‡]	W I	W II	W I	W II	W I	W II	W I	W II
Sarraya	4,42	6,57	5,06	8,22	35,80	37,15	104,90	121,40	6,88	7,73
Greda	3,77	4,45	5,85	9,42	32,18	32,83	112,63	137,43	6,13	6,98
Cooley	3,35	5,12	6,15	10,67	36,39	35,22	107,73	140,37	6,08	6,80
Walidi	3,76	6,00	5,29	8,15	30,55	30,01	94,97	118,77	5,72	6,33
Missani	2,80	4,71	6,74	10,90	41,19	37,45	99,53	143,00	8,97	9,80
Jimah	3,22	4,76	3,92	7,40	37,75	34,67	78,93	100,23	9,22	10,22
WQ302 [#]	3,79	5,29	4,73	7,26	35,98	33,37	78,93	96,07	9,57	9,92
WQ308	4,42	5,50	4,32	7,54	35,96	35,15	87,13	105,07	10,25	11,68
LSD	0,68		1,06		2,46		8,40		0,64	
Effekte										
Varietät	<,001		<,001		<,001		<,001		<,001	
Dünger	0,868		0,319		0,666		0,547		0,985	
Wasser	<,001		<,001		0,005		<,001		<,001	
V * D	0,493		0,201		0,284		0,992		0,184	
V * W	0,030		0,184		0,057		<,001		0,477	
D * W	0,679		0,483		0,003		0,754		0,003	
V * D * W	0,369		0,611		0,138		0,955		0,447	

[†] Bewässerungsintervall I (27 Tage), [‡] Bewässerungsintervall II (18 Tage); [#] WQ ist eine Abkürzung für *Wadi Quraiyat*

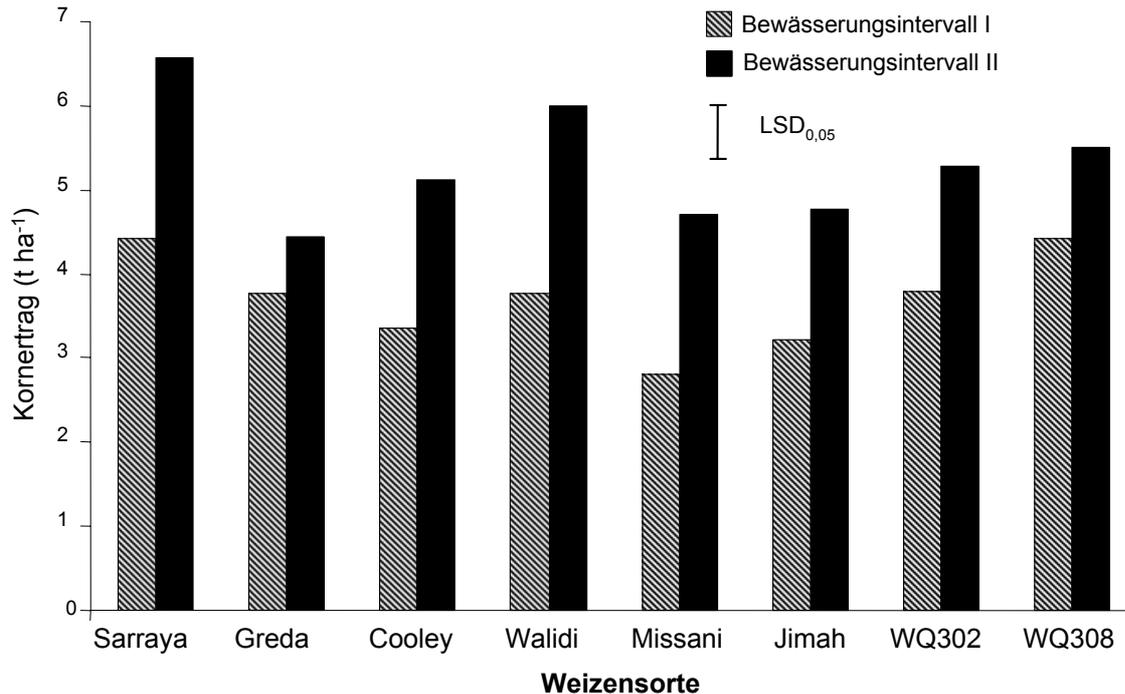


Abbildung 27. Vergleich des Kornertrages von fünf Landrassen und drei verbesserten Weizensorten unter zwei Bewässerungsintervallen (I = 27 Tage, II = 18 Tage) in der Kernoase *Balad Seet* (Oman) im Anbaujahr 2001/2002

3.5.2. Strohertrag

Der Strohertrag folgte einem ähnlichen Trend, wie er beim Kornertrag zu beobachten war d.h., alle Varietäten reagierten auf die erhöhte Bewässerung mit signifikant höheren Erträgen. Bei WII Bewässerungsintervall erzielten die Landsorten *Missani* (10,9 t ha⁻¹) gefolgt von *Cooley* (10,7 t ha⁻¹) die höchsten Stroherträge aller Sorten. Beim WI Bewässerungsintervall produzierte die Landsorte *Missani* signifikant höhere Strohmenen als alle anderen Sorten mit Ausnahme von *Cooley*. Die Landsorte *Cooley* erzielte dagegen einen signifikant höheren Strohertrag als die Sorten *Sarraya*, *Jimah*, *Wadi Quraiyat 302* und *Wadi Quraiyat 308*. Unter der Bewässerungsstufe WII zeigte *Jimah* einen signifikant geringeren Strohertrag als die Landsorten *Sarraya*, *Greda*, *Coly*, *Walidi* und *Missani*. Der Strohertrag stieg signifikant bei einem Wechsel von WI (27-tägiges Bewässerungsintervall) auf WII (18-tägiges Bewässerungsintervall; Tab. 6, Abb. 28).

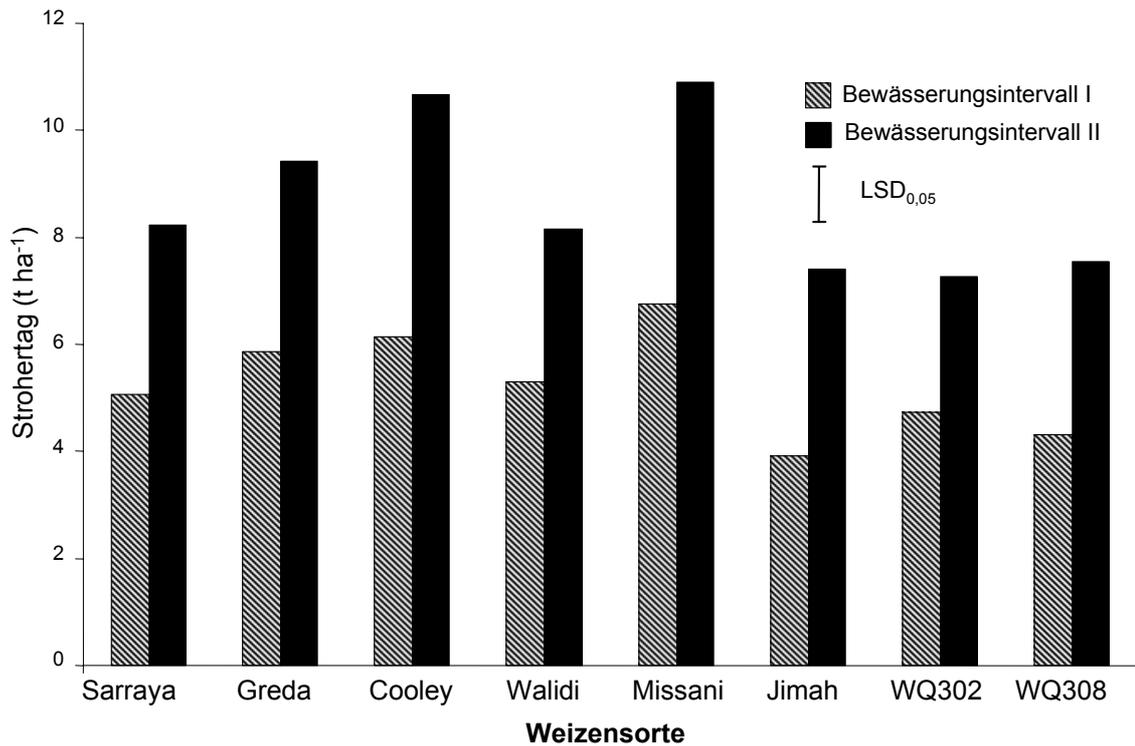


Abbildung 28. Vergleich des Strohertrages von fünf Landrassen und drei verbesserten Weizensorten unter zwei Bewässerungsintervallen (I = 27 Tage, II = 18 Tage) in der Kernoase *Balad Seet* (Oman) im Anbaujahr 2001/2002

Die Verkürzung des Bewässerungsintervalls von 27 auf 18 Tage steigerte den Strohertrag bei *Jimah* um 89% und erzielte somit die höchste Ertragersteigerung gefolgt von derjenigen von *Wadi Quraiyat 308* mit 75%. Die Sorten *Walidi* und *Wadi Quraiyat 302* erzielten mit 54% und 53% die niedrigsten Ertragersteigerungen (Tab. 6, Abb. 28), während sich der Strohertrag von *Missani* bei der Verkürzung des Bewässerungsintervalls von WI auf WII nur um 38,2% erhöhte.

3.5.3. Tausendkorngewicht

Mit Ausnahme von *Greda* lag das Tausendkorngewicht (TKG) der Sorte *Walidi* mit 30,55 g beim Bewässerungsintervall I signifikant niedriger als das aller anderen Sorten, während das TKG dieser Sorte unter Bewässerungsintervall II signifikant kleiner als das der übrigen Sorten war. Ein weiterer signifikanter Unterschied zwischen den Sorten zeigte sich bei *Greda*, deren TKG-Wert unter beiden Bewässerungsintervallen signifikant niedriger war als das TKG aller Sorten, mit Ausnahme desjenigen von *Walidi* (Tab. 6). Die Verkürzung des Bewässerungsintervalls führte bei keiner der Sorten zu einer signifikanten Erhöhung des TKG.

3.5.4. Pflanzenhöhe

Alle Sorten reagierten, unabhängig von der Düngung, auf verstärkte Wassermenge mit einem verstärkten Längenwachstum. Innerhalb der Sorten brachte eine Veränderung der Dünge­stufen keine Veränderung der Pflanzenhöhe. Unter WI war die Pflanzenhöhe der Sorte *Greda* mit 112,6 cm signifikant höher als diejenige der Sorten *Walidi*, *Missani*, *Jimah*, *Wadi Quraiyat 302* und *Wadi Quraiyat 308*, deren Pflanzenhöhe sich ihrerseits nicht unterschied von derjenigen von *Sarraya* und *Colley*. Unter WI betrug die Pflanzenhöhe der Sorte *Missani* 99 cm und belegte somit den fünften Rang unter allen Sorten, während sie unter WII mit 143 cm Pflanzenlänge den ersten Rang erreichte. Dabei unterschied sie sich signifikant von den Sorten *Sarraya*, *Walidi*, *Jimah*, *Wadi Quraiyat 302* und *Wadi Quraiyat 308*. Die Verkürzung des Bewässerungsintervalls von 27 auf 18 Tage führte bei *Missani* zu einer 44%igen Erhöhung der Pflanzenhöhe, gefolgt von *Cooley* mit 23,3 und *Walidi* mit 24%. Die niedrigste Erhöhung der Pflanzenhöhe wurde bei der Sorte *Sarraya* (16%) festgestellt (Tab. 6, Abb. 29).

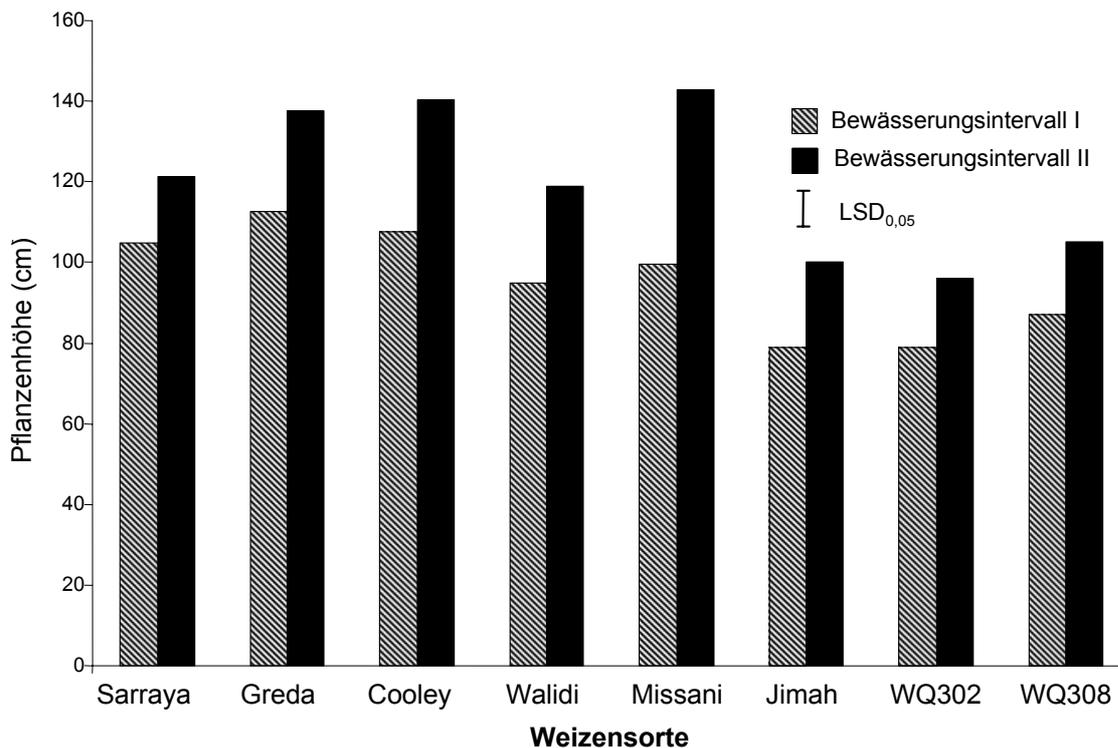


Abbildung 29. Pflanzenhöhe von fünf Landrassen und drei verbesserten Weizensorten unter zwei Bewässerungsintervallen (I = 27 Tage, II = 18 Tage) in der Kernoase *Balad Seet* (Oman) im Anbaujahr 2001/2002

3.5.5. Ährenlänge

Die Verkürzung des Bewässerungsintervalls von 27 auf 18 Tage erhöhte die Ährenlänge bei allen Sorten ausser bei *Walidi* und *Wadi Quraiyat 302*. Diese Erhöhung war mit 14% am stärksten bei *Greda* und *Wadi Quraiyat 308* gefolgt von *Sarraya* mit 12% und *Cooley*

mit 10,6%. Die niedrigste Erhöhung der Ährenlänge wurde bei der Sorte *Wadi Quraiayat 302* festgestellt, gefolgt von *Missani* mit 9%. Letztere reagierte bei den anderen Parametern stärker als andere Varietäten auf eine hohe Wassergabe (Tab. 6).

3.6. Biologische N₂-Fixierung von Luzerne

3.6.1. Vorbemerkung zur Schätzmethode der N₂-Fixierungsleistung

Nach Schmidtke (1997) muss die N₂-Fixierungsleistung der Leguminosen als Integral über die Zeit erfasst werden, wenn die symbiotisch fixierte N-Menge unter Feldbedingungen assimiliert wurde. Dafür kommen mehrere Methoden in Frage: Die Differenzmethode (Stülpnagel, 1982; Hauser, 1987), die $\delta^{15}\text{N}$ -Methode (Schmidtke, 1997) und die ¹⁵N-Verdünnungsmethode (Danso et al., 1993). Die Anwendung der beiden letztgenannten Methoden nutzt das Verhältnis der stabilen Stickstoff-Isotope ¹⁴N und ¹⁵N in der Pflanze. In der Atmosphäre liegt dieses Verhältnis konstant bei 273:1, was 0.3663 atom % ¹⁵N entspricht (Marriott, 1983). Das natürliche Vorkommen (natural abundance) des ¹⁵N-Isotopes ist im Boden auf Grund biologischer und chemischer Prozesse Schwankungen unterworfen. Bei Anwendung der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode wird der Unterschied zwischen dem natürlichen Vorkommen der ¹⁵N-Isotopen in Boden und Luft genutzt, um die Fixierungsleistung zu schätzen. Bei Anwendung der ¹⁵N-Verdünnungsmethode (isotope dilution) wird die ¹⁵N-Menge im Boden durch kontrollierte Zugabe von ¹⁵N-Tracern künstlich angereichert (McAuliffe, et al., 1958). Zur Messung der Isotopenverhältnisse wird der aufwändige Einsatz von Massenspektrometern notwendig, während bei Anwendung der erweiterten Differenzmethode lediglich die N-Akkumulation der Pflanzen und gegebenenfalls die residuale N_{min}-Mengen bestimmt werden muss. Neben Stickstoff aus der Luft wird von den Leguminosen auch mineralischer Stickstoff aus dem Boden aufgenommen (Ledgard et al., 1985). Eine wichtige Voraussetzung zur Schätzung der Luft bürtigen N-Aufnahme ist deshalb der Einsatz von nicht-fixierenden Referenzpflanzen, um zusätzlich die bodenbürtige N-Aufnahme und deren ^{14/15}N Isotopenverhältnis zu erfassen. Die Referenzpflanze muss ihre N-Ernährung ausschließlich aus den im Boden vorhandenen N-Vorräten speisen. In der Regel werden Nichtleguminosen verwendet (Stülpnagel, 1982).

3.6.2. Stickstofffixierungsleistung der Luzerne in *Balad Seet*

Da bis zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Dissertation die endgültige Auswertung der ¹⁵N-Untersuchungen (¹⁵N-Verdünnungsversuch) mit Weizen und Sorghum als Kontrollpflanzen noch nicht abgeschlossen werden konnte, bezieht sich diese Arbeit auf die bereits analysierten und ausgewerteten Proben des zweiten und dritten Schnitts

Dabei ergab sich eine Stickstofffixierungsrate der Luzerne von 64-85% (Abb. 30). Bei 22 Tonnen Trockenmasseertrag (12 Schnitte pro Jahr) und einer N-Aufnahme in oberirdischen Teilen der Pflanze von 2,9% hatte die Luzerne eine jährliche Gesamtfixierungsleistung in Sprossmassen von 476 kg N ha⁻¹. Die Stickstofffixierungsrate der Luzerne wurde durch die Tierdungzugabe von 6 t ha⁻¹ nicht beeinflusst (Abb. 30).

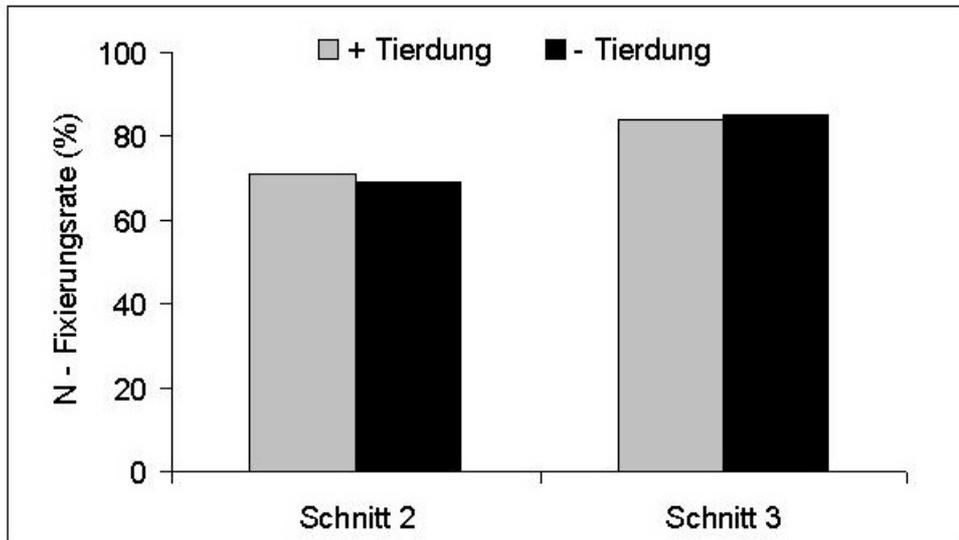


Abbildung 30. Stickstofffixierungsrate beim zweiten und dritten Schnitt von Luzerne in der Kernoase *Balad Seet* (Oman) im Anbaujahr 2003

3.7. Nährstoffflüsse

3.7.1. Stoffflüsse in der Bergoase *Balad Seet*

3.7.1.1. Stoffflüsse innerhalb der Oasenkerzone:

Zwischen den ackerbaulich genutzten Terrassen, der Viehhaltung, den Palmengärten und den menschlichen Haushalten existiert ein komplexes System von Stoffflüssen (Tab. 7). Die Tierhaltung versorgt die menschlichen Haushalte mit Fleisch und Milch. Der in den Stallungen gesammelte Tierdung wird auf die Ackerflächen und in die Palmengärten ausgebracht. Die in den Palmengärten geernteten Früchte werden im Dorf selbst konsumiert, die Reste (insbesondere Datteln zweiter Wahl aber auch alte Datteln) werden verfüttert. Die Stämme abgestorbener Palmen dienen im Haushalt als Brennmaterial. Unter den Palmen wachsende Gerste oder Unkräuter werden grün an die Tiere verfüttert und von den Bäumen abgefallene Blätter dienen auf den Feldern als Mulchmaterial oder werden verbrannt. In den Haushalten anfallende Asche wird als Dünger für die Palmengärten und die Ackerflächen verwandt. Hingegen werden die in Gruben gesammelten menschlichen Fäkalien nur in den Palmengärten als Dünger

benutzt. Küchen- und Essensreste werden an die Tiere verfüttert. Auch über mehrere kleine öffentliche Waschplätze entlang der Bewässerungskanäle erfolgt ein Nährstoffeintrag in die Palmengärten und die ackerbaulich genutzten Flächen.

3.7.1.2. Stoffaustausch zwischen dem Oasen Kern und dem Randbereich

Das Quellwasser dient Menschen und Tieren als Trinkwasser, im Ackerbau und in den Palmengärten als Bewässerungswasser und in den Haushalten zur Reinigung (Tab. 8). Der Oasenrandbereich wird außerdem als Weidegrund für Schafe und Ziegen genutzt. Somit nehmen die Tiere in diesem Bereich einerseits Futter auf, hinterlassen dort aber auch Kot und Urin. Futterpflanzen werden im Oasenrandgebiet geschnitten und anschließend zu den Stallungen transportiert. Außerdem werden beachtliche Mengen an Gräsern geschnitten, die zur Einstreu in den Stallungen verwendet werden. Danach gelangen sie mit dem Tierdung auf die Ackerflächen sowie in die Palmengärten.

Tabelle 7. Stoffflüsse innerhalb der Oasen kernzone von *Balad Seet* (Oman)

Von	Zu	Art des Stofftransportes
Ackerbau	Viehhaltung	Ernteprodukte (Luzerne, Hirse, Weizen, Grünfutter)
Ackerbau	Haushalt	Ernteprodukte (Gemüse, Weizen, Koriander)
Palmengärten	Haushalt	Ernteprodukte (Datteln, Zitrusfrüchte, Bananen, Papaya, Granatapfel) und Palmenstämme
Palmengärten	Viehhaltung	Ernteprodukte (Datteln, Grünfutter)
Palmengärten	Ackerbau	Blätter (Mulchmaterial)
Viehhaltung	Haushalte	Fleisch, Milch
Viehhaltung	Ackerbau, Palmengärten	Stallmist
Haushalt	Palmengärten	Fäkalien
Öffentliche Waschplätze	Palmengärten, Ackerbau	Waschmittellösung
Haushalt	Viehhaltung	Küchenreste
Haushalt	Ackerbau, Palmengärten	Asche

Tabelle 8. Stoffaustausch zwischen dem Oasenkern und dem Oasenrand von *Balad Seet* (Oman)

Von	Zu	Art des Stofftransportes
Quellen am Oasenrand	Haushalte, Ackerbau, Viehhaltung, Palmengärten	Trink-, Bewässerungs- und Reinigungswasser
Oasenrand	Viehhaltung	Viehfutter
Oasenrand	Ackerbau	Gräser, Baumblätter (Mulchmaterial)
Viehhaltung	Randbereich	Dung
Haushalt	Randbereich	Entsorgung von Abfällen

3.7.1.3. Stoffaustausch der Oase mit der Außenwelt

Die 632 Oasenbewohner/innen beziehen fast alle Konsumgüter, einschließlich vieler Nahrungsmittel sowie Baumaterial, Werkzeuge, Brennstoffe von Märkten außerhalb der Oase. Auch Mineraldünger und Tierfutter werden zur Oase transportiert. Im Gegenzug verkaufen die Oasenbewohner/innen Ernteprodukte (Datteln, Koriander, Zwiebeln, Knoblauch) sowie Schafe und Ziegen.

3.7.2. Nährstoffbilanz

3.7.2.1. Jährlicher Ertrag der Feldkulturen, Nährstoffkonzentrationen und Nährstoffexport

In *Balad Seet* waren die Getreideerträge für die Jahre 2000/1 und 2001/2 relativ gering, mit durchschnittlich 2980 kg Kornertrag ha^{-1} für Weizen und Trockenmasseerträgen von Futtergerste und Futterhafer in Höhe von jeweils 5420 kg ha^{-1} und 5370 kg ha^{-1} und von Mais mit 5490 kg ha^{-1} . Trotzdem gab es zwischen beiden Jahren erhebliche Unterschiede; die Erträge waren im ersten Jahr deutlich höher als im zweiten Jahr (Tab. 9). Mit 12 Schnitten pro Jahr summierte sich der durchschnittliche Trockenmasseertrag von Luzerne auf 22520 kg ha^{-1} . In *Maqta* waren die Weizenerträge mit 2210 kg ha^{-1} deutlich niedriger als in *Balad Seet*, genauso wie die Nährstoffkonzentrationen in Weizen (Tab. 10 und 11).

3.7.2.2. Nährstoffeinträge und Teilbilanzen

Balad Seet. Innerhalb des zweijährigen Untersuchungszeitraumes erhielten 55% der 385 Felder jährliche N-Gaben von insgesamt 100-500 kg N ha^{-1} , 25% 500-1400 kg N ha^{-1} und 11% bekamen gar kein N. Jährliche P-Gaben in Höhe von 1-90 kg ha^{-1} wurden auf 46% der Felder ausgebracht, während 27% 90-210 kg P ha^{-1} und noch einmal 27%

gar kein P erhielten. Ebenso blieben 27% der Felder ohne K, während 32 % 1-300 kg K ha⁻¹ erhielten und die übrigen Felder bis zu 1400 kg K ha⁻¹ (Abb. 31). Große und mittlere Felder erhielten dabei deutlich höhere Nährstoffinputs als kleine (Abb. 31). Auf den Feldern war die zweijährige Teilbilanz für N auf 82% aller Felder, für P auf 79% aller Felder und für K auf 63% aller Felder positiv (Abb. 32). Die Nährstoffkonzentrationen im Bewässerungswasser betragen durchschnittlich 0,574 mg N l⁻¹, 0,303 mg P l⁻¹ und 1,0 mg K l⁻¹.

Tabelle 9. Lufttrockener Ertrag (kg ha⁻¹) der in vier Klassen eingeteilten Hauptfeldkulturen in der Kernoase *Balad Seet* (Oman) in den Anbaujahren 2000/2001 und 2001/2002

Klasse/ Feldkultur	Stroh				Korn [†]			
	Niedrig	Mittel	Hoch	Sehr hoch	Niedrig	Mittel	Hoch	Sehr hoch
2000/1								
Weizen	11070	11250	11880	11970	2610	2700	3060	3150
Gerste	5490	6300	6570	7020	†	†	†	†
Sorghum	11440	12760	13200	14960	2250	2250	2790	3240
Mais	5670	6480	6660	6940	†	†	†	†
Hafer	5730	6090	6730	6910	†	†	†	†
Luzerne [‡]	1820	1910	2360	2450	†	†	†	†
Knoblauch	1890	2060	2150	3270	5180*	5340*	5770*	9940*
Koriander	3400	3500	4000	4400	†	†	†	†
2001/2								
Weizen	6300	8100	10800	11970	2020	2880	3600	3780
Gerste	3600	4050	4500	5850	†	†	†	†
Sorghum	11700	12600	13500	15300	2160	2250	2790	3060
Mais	2880	4500	4950	5850	†	†	†	†
Hafer	3640	3820	4550	5460	†	†	†	†
Luzerne [‡]	910	1460	1640	2460	†	†	†	†
Knoblauch	1720	2150	2580	3440	4680*	5460*	7020*	10140*
Koriander	2250	2520	2880	3420	†	†	†	†

[†] Nur vegetative Teile wurden geerntet

[‡] Erträge beziehen sich auf einen Schnitt bei 12 Schnitten im Jahr

* Trockene Knollen

Tabelle 10. Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K)- Konzentrationen der in vier Klassen eingeteilten Hauptfeldkulturen in der Kernoase *Balad Seef* (Oman) in den Anbaujahren 2000/2001 und 2001/2002. Alle Angaben sind in g kg⁻¹ Trockenmasse

Klasse	Stroh												Korn [†]											
	Niedrig			Mittel			Hoch			Sehr hoch			Niedrig			Mittel			Hoch			Sehr hoch		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Weizen	3,8	0,2	19	3,7	0,2	18	2,3	0,2	13	2,7	0,2	12	20,7	2,6	5	18,2	3,3	5	19,8	3,1	4	18,8	3,1	5
Gerste	27,9	3,9	25	18,5	1,3	11	31,4	1,7	11	23,9	3,9	25	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†
Sorghum	8,9	1,6	9	8,8	2,6	12	9,5	1,6	18	nd	nd	nd	21,3	4,6	5	22,5	4,6	5	21,2	4,6	5	nd	nd	nd
Mais	23,9	2,5	27	24,5	2,8	29	18,8	1,9	27	21,1	1,9	27	†	†	†	†	†		†	†	†	†	†	†
Hafer	27,8	3,2	25	21,4	2,8	29	19,6	2,8	30	20,0	3,0	30	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†
Luzerne [‡]	27,0	1,8	9	27,8	1,8	8	34,2	2,0	17	25,8	2,0	17	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†
Knoblauch [*]	17,6	1,8	26	12,1	1,2	36	17,6	2,4	22	10,7	2,6	20	18,0	1,0	5	16,0	1,4	6	17,0	1,5	6	14,0	1,6	4
Koriander	27,5	3,6	42	28,6	3,8	36	38,8	3,6	28	36,7	3,6	24	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†	†

[†] Nur vegetative Teile wurden geerntet

[‡] Trockene Knollen

Tabelle 11. Lufttrockener Stroh- und Kornertrag (kg ha^{-1}) der Weizenlandsorte *Walidi*; Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium(K)- Konzentrationen (g kg^{-1}) bei vier Ertragsklassen in der Streuoase *Maqta* (Oman) im Anbaujahr 2001/2002

Klasse	Stroh				Korn			
	Niedrig	Mittel	Hoch	Sehr hoch	Niedrig	Mittel	Hoch	Sehr hoch
Trockenmasse	6580	8460	8460	9400	1800	2070	2250	2700
N	2,3	3,1	3,3	3,8	16,2	16,5	18,3	15,4
P	0,4	0,4	0,3	0,5	2,8	2,5	2,6	2,8
K	18,9	11,9	13,1	19,5	3,4	3,1	3,0	3,3

Maqta. Palmengärten dominierten dort alle Terrassensysteme bis auf *Qfassy*, bei dem weite Teile zeitweise brachlagen. Die ausgebrachte Menge Tierdung brachte den Palmengärten pro Hektar 61-277 kg N und den Weizenfeldern 112-225 kg N, 9-40 kg P und 14-29 kg P sowie 98-421 kg K und 113-227 kg K (Abb. 33). Mit Ausnahme des winzigen und kaum gedüngten *Shwaiy* Systems, das keine Weizenfelder aufwies, waren die Input-Mengen unabhängig von der Terrassengröße (Abb. 33). Allerdings zeigte die Tendenz, dass Palmen auf kleineren Terrassen höhere Inputs erhielten als die Weizenfelder, aber für die größten Systeme traf das Gegenteil zu, insbesondere für N und P.

Die Nährstoffbilanz war in allen Systemen eindeutig positiv, unabhängig von der Terrassennutzung, mit Ausnahme von K in Weizenfelder von *Lathli* und *Shbak* (Abb. 34). Für den 12-monatigen Messzeitraum betrug die Nährstoffüberschüsse für N 47–222 kg ha^{-1} , für P 7-34 kg ha^{-1} und für K 79-266 kg ha^{-1} in den Palmengärten und 63-157 kg N ha^{-1} , 7-198 kg P ha^{-1} und 13-85 kg K ha^{-1} in Weizenfeldern (Abb. 33). Die Nährstoffkonzentrationen im Bewässerungswasser betrug durchschnittlich 0,49 mg N l^{-1} , 0,01 mg P l^{-1} und 2,50 mg K l^{-1} .

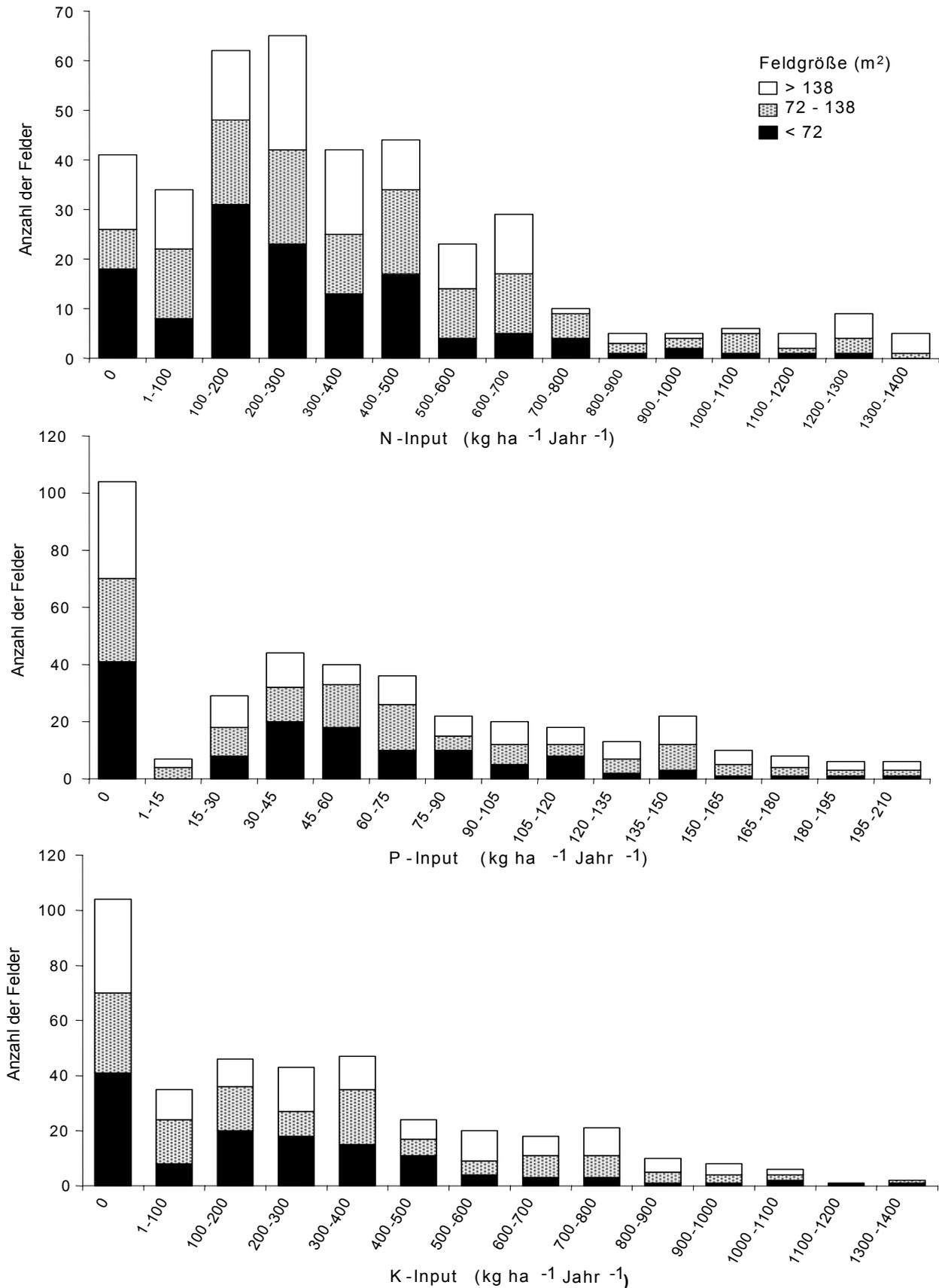
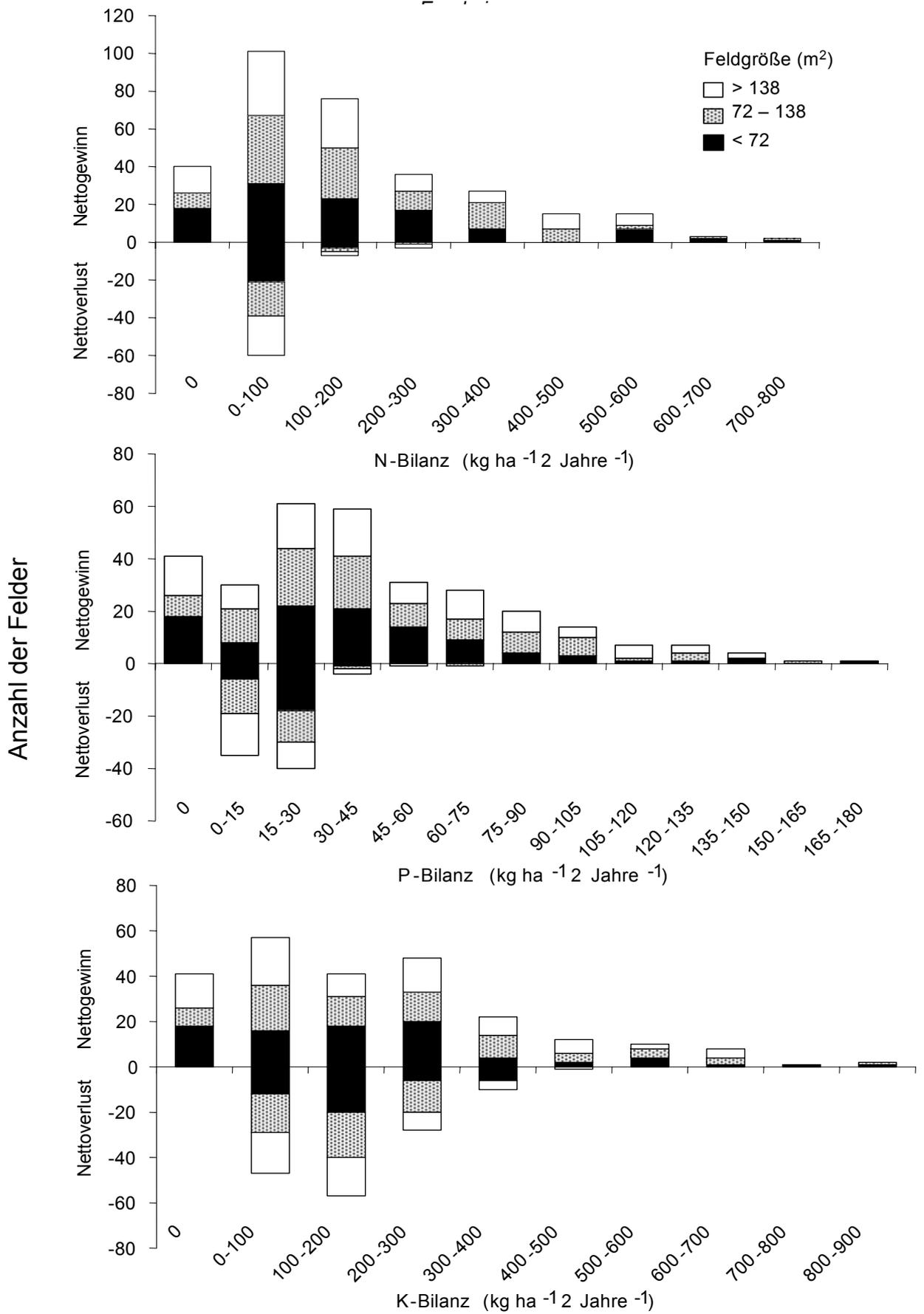


Abbildung 31. Jährliche Zufuhr von Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in Form von Tierdung und synthetischen Dünger auf Feldern dreier Größenklassen (385 Felder) in der Kernoase *Balad Seet* (Oman) von 2001-2002. Die Anzahlen der Felder stellen absolute Häufigkeiten der entsprechenden Größenklasse dar



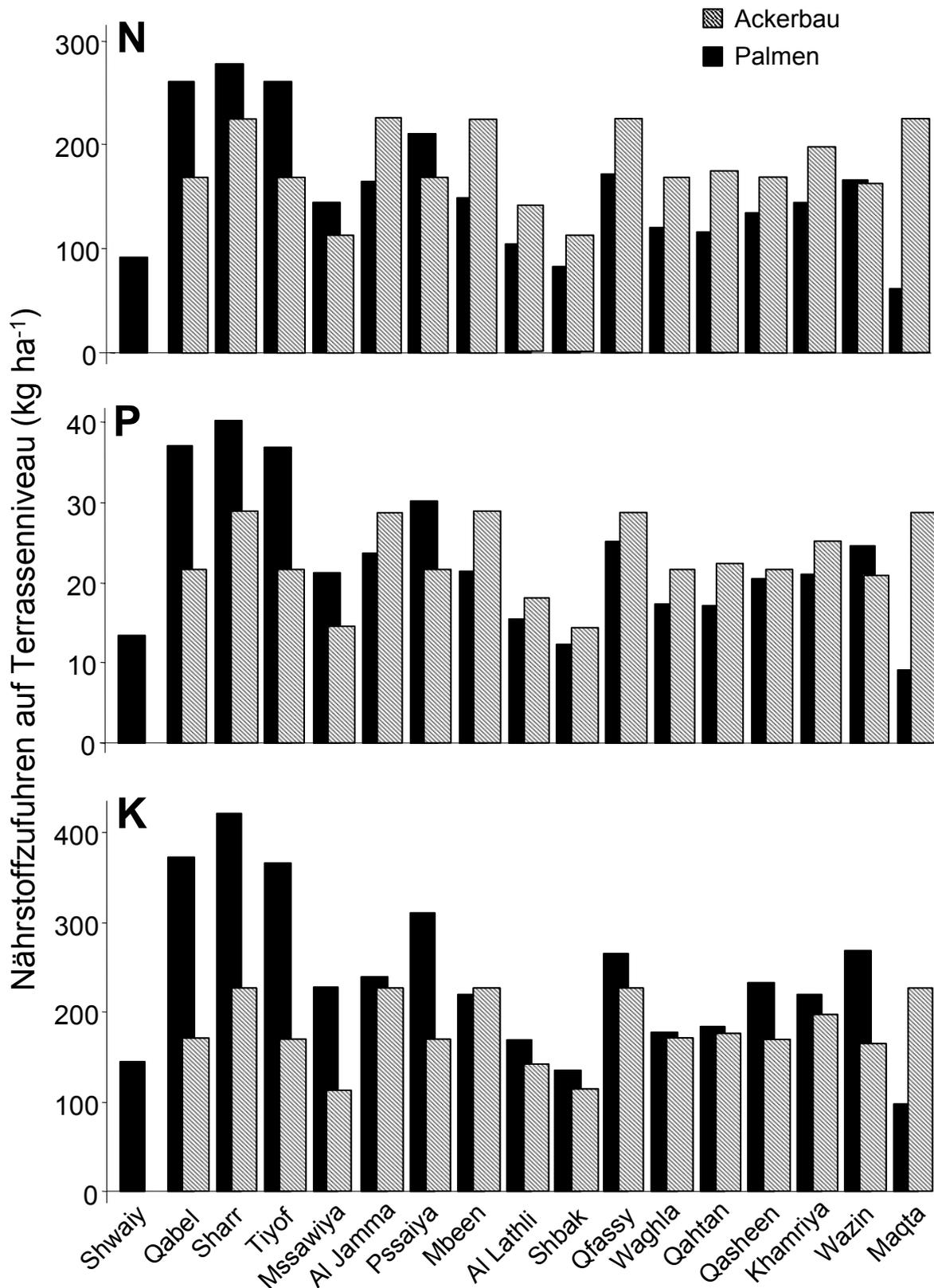


Abbildung 33. Jährliche Zufuhren von Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in Form von Tierdung auf die 17 Terrassensystemen (Ackerflächen und Palmengärten) in der Streuoase *Maqta* (Oman) von Februar 2001 bis März 2002

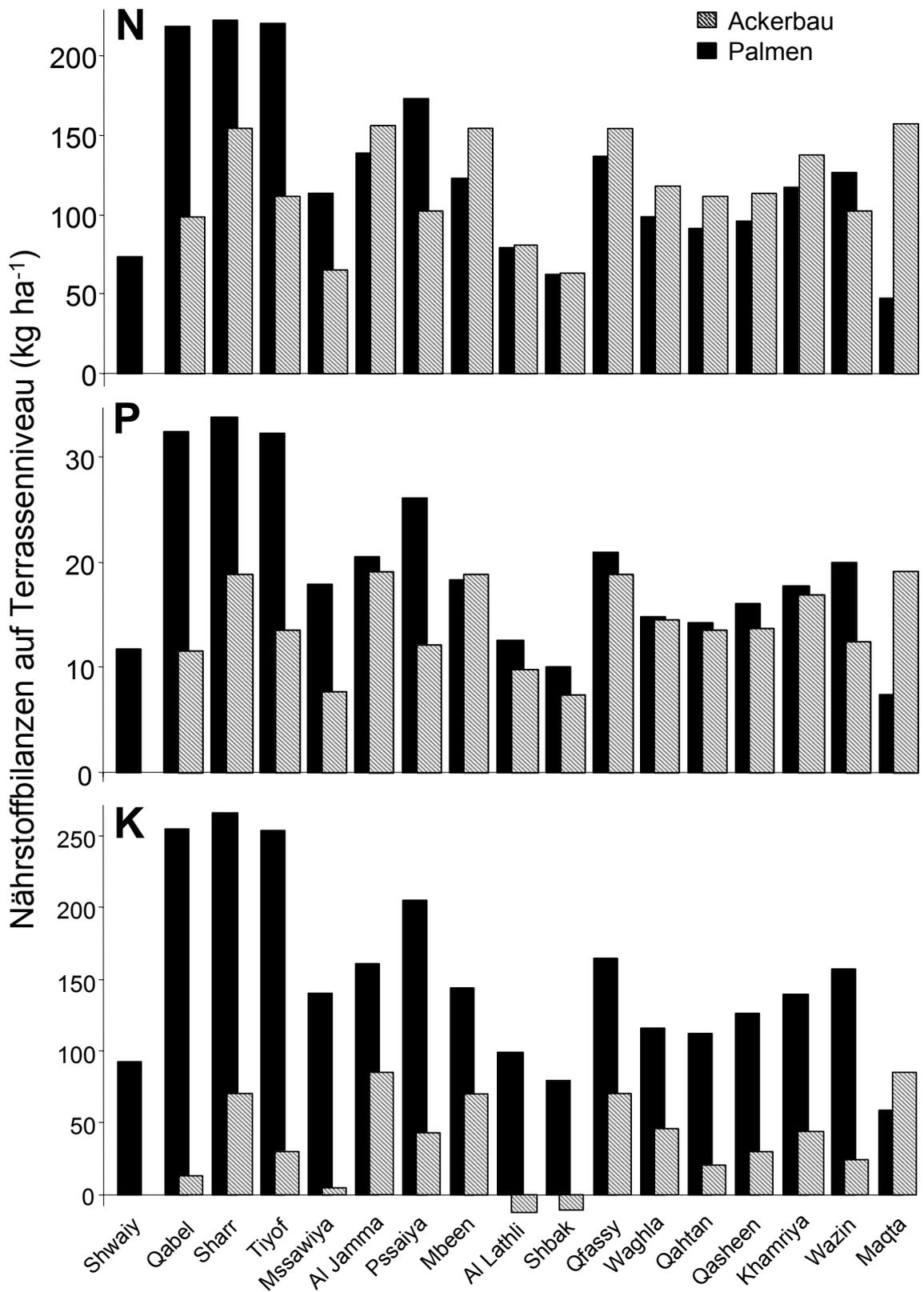


Abbildung 34. Teilbilanz (Einträge – Entzüge) von Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in Form von Tierdung auf die 17 Terrassensystemen (Ackerflächen und Palmengärten) in der Streuoase *Maqta* (Oman) von Februar 2001 bis März 2002

3.7.2.3. Jährliche Nährstoffbilanz auf Oasenniveau

Balad Seet. Die N-, P- und K-Entzüge wurden von den Einträgen bei weitem übertroffen, sowohl bei den Feldfrüchten als auch bei den Dattelpalmen. Bei den Feldfrüchten war der Nährstoffeintrag durch Dung 1,3 bis 5,9 mal höher als der durch synthetische Dünger, bei den Palmen variierte dieses Verhältnis von 2,3 bis 73. Die Nährstoffeinträge pro Flächeneinheit waren bei den Palmengärten insgesamt höher als bei den Feldfrüchten, um 131% bei N, 1% bei P und um 106% bei K (Tab. 12). Die, im Vergleich zu den Feldern, geringeren Mengen an appliziertem Tierdung und synthetischem Dünger wurden bei den Palmen in bezug auf N und P durch die Gabe von menschlichen Fäkalien wieder ausgeglichen. Der Nährstoffaustrag durch die Nutzung der Ernteprodukte war bei den Feldfrüchten für N um 344% höher, für P um 231 % höher und für K um 131% höher als bei Palmen (Tab. 12).

Tabelle 12. Jährliche Zufuhr, Entzüge und Teilbilanzen von Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) für Ackerflächen und Palmengärten in der Bergoase *Balad Seet* (Oman). Die Daten stellen einen Mittelwert von zwei Jahren dar (Oktober 2000 bis Oktober 2002).

Land- nutzung	Quelle	Menge (kg ha ⁻¹ Jahr ⁻¹) [†]			Bilanz (kg Jahr ⁻¹) [†]		
		N	P	K	N	P	K
Ackerland (4,6 ha)	Synthetischer Dünger	143	23,9	45	658	119,9	207
	Tierdung	180	40,2	267	828	184,9	1228
	Bewässerungswasser [‡]	10	5,2	17	46	23,9	78
	Symbiotische N ₂ - Fixierung	63	n.g.*	n.g.	290	n.g.	n.g.
	Feldfrüchte (Ernte)	-265	-32,8	-245	-1219	-150,9	-1127
	Teilbilanz	131	36,5	84	603	177,8	386
Palmen- gärten (8,8 ha)	Synthetischer Dünger	59	1,8	4	519	15,8	35
	Tierdung + Asche	141	8,0	289	1241	70,4	2543
	Bewässerungswasser	10	5,2	17	88	45,8	150
	Menschliche Fäkalien	170	37,0	50	1496	325,6	440
	Dattelpalmen (Datteln + Stamm + Blätter)	-63	-12,7	-176	-554	-111,8	-1549
	Grünfutter unter Palmen	-14	-1,5	-11	-123	-15,8	-97
	Teilbilanz	303	37,8	173	2632	324,1	1469
Oase (13,4 ha)	Oasenteilbilanz	244	37,4	142	3235	501,9	1855

[†] Positive Werte zeigen Gewinne (Einträge) und negative Verluste (Entzüge)

[‡] Jährliche Gesamtquellschüttung von 228.600 m³ multipliziert mit Nährstoffkonzentrationen von 0,57 mg N l⁻¹, 0,30 mg P l⁻¹ und 1,0 mg K l⁻¹, dividiert durch die jeweilige Fläche

* Nicht gemessen

Die absolute Nährstoffanreicherung auf dem kultivierten Oasenland war besonders hoch für N und K, wobei der Anteil der menschlichen Fäkalien 46% des Überschusses an N, 65% des Überschusses an P und 24% des Überschusses an K ausmachte (Tab. 12).

Maqta. Durchschnittlich 16.0 bzw. 9.3 t Tierdung pro Hektar wurden zu den Feldfrüchten bzw. zu den Palmen ausgebracht. Verglichen mit *Balad Seef* bekamen die Feldfrüchte nur durchschnittlich 61 % des gesamten N, 39 % des P und 64 % des gesamten K. Ähnliche Unterschiede im Nährstoffeintrag konnten für die Palmengärten festgestellt werden (Tab. 12 und 13).

Tabelle 13. Jährliche Zufuhr, Entzüge und Teilbilanzen von Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) für Ackerflächen und Palmengärten in der Streuoase *Maqta* (Oman). Die Daten stellen einen Mittelwert von einem Jahr dar (Februar 2001 bis März 2002)

Land-Nutzung	Quelle	Input and output (kg ha ⁻¹ Jahr ⁻¹) [†]			Partial balance (kg Jahr ⁻¹) [†]		
		N	P	K	N	P	K
Ackerland (0,4 ha)	Synthetischer Dünger	n.g.*	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.
	Tierdung	198	25,3	199	79	10,1	80
	Bewässerungswasser [‡]	2	0,05	12	0,9	0,02	5
	Symbiotische N ₂ - Fixierung	n.a.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.
	Feldfrüchte (Ernte)	-64	-9,0	-145	-26	-3,6	-58
	Teilbilanz	136	16,4	66	54	6,5	27
Palmen- gärten (3,6 ha)	Synthetischer Dünger	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.
	Tierdung	104	15,4	166	374	55,4	598
	Bewässerungswasser [‡]	7	0,1	35	24	0,5	125
	Menschliche Fäkalien	17	3,8	5	64	13,8	19
	Dattelpalmen (Datteln + Stamm + Blätter)	-24	-2,7	-66	-86	-9,7	-238
	Grünfütter unter Palmen	-19	-2,2	-49	-68	-7,9	-176
	Teilbilanz	85	14,0	91	308	52,1	328
Oase (4 ha)	Oasenteilbilanz	90	14,2	89	283	47,5	298

[†] Positive Werte zeigen Gewinne (Einträge) und negative Verluste (Entzüge)

[‡] Jährliche Gesamtquellschüttung von 51.666 m³ multipliziert mit Nährstoffkonzentrationen von 0,49 mg N l⁻¹, 0,01 mg P l⁻¹ und 2,5 mg K l⁻¹, dividiert durch die jeweilige Fläche

* Nicht gemessen

Im Unterschied zu *Balad Seef* trugen menschliche Fäkalien und die Bewässerung nur wenig zur N, P und K-Versorgung bei. Bei den Feldfrüchten war die durchschnittliche jährliche flächenmäßige Nährstoffanreicherung für beide Oasen gleich, aber bei den Palmen war der Input in *Balad Seef* viel höher als in *Maqta* (Tab. 12 und 13).

3.8. Pflanzengenetische Ressourcen und Biodiversität

3.8.1. Vormerkung zur Entwicklung des Begriffspaares genetische Ressourcen und Biodiversität

Der Begriff "pflanzengenetische Ressourcen" ist untrennbar verknüpft mit der modernen Pflanzenzüchtung, die sich im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts in Deutschland als neue Wissenschaft langsam zu formieren begann. Öffentlich dokumentiert findet sich das entstehende Interesse an der Sammlung und Weiterentwicklung von sogenannten Landsorten erstmals auf dem Internationalen Land- und Forstwirtschaftlichen Kongress zu Wien im Jahr 1890. Auf diesem Kongress wurde auch erstmals öffentlich die Bedeutung der traditionellen Sorten für die Pflanzenzüchtung diskutiert.

In der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts fand das Begriffpaar durch die Arbeit der FAO neue, weltweite Beachtung. Auf dem FAO/IBP-Kongreß von 1967 wurde der Begriff der "genetischen Erosion" geprägt (Flitner, 1995; Hammer, 1993) und spätestens 1983 wurde der Begriff "Plant Genetic Resources" mit dem FAO-Papier "International Undertaking on Plant Genetic Resources" vorläufig festgeschrieben.

Mit der Biodiversität wird ein holistischer Ansatz verfolgt, der die Gesamtheit von Ökosystemen und Lebensräumen als schützenswert deklariert. In diesem Sinne erweitert sich auch der Begriff der genetischen Ressourcen und umfasst das ganze Pflanzenspektrum, nicht länger nur die Kulturpflanzen, sowie alle Tiere und Mikroorganismen.

Bei Hammer (1998) wird darüber hinaus der Begriff der Agrarbiobiodiversität beschrieben. Diese umfasst die gesamte biologische Diversität der Landwirtschaft und bildet damit eine Schnittmenge aus dem Konzept der pflanzengenetischen Ressourcen im engeren Sinn und der Biodiversität. Sie bezieht sich auf den Reichtum unterschiedlicher Arten, auf viele, möglichst diverse Ökosysteme und auf eine ausgeprägte Variation innerhalb der Arten. Agrarbiobiodiversität schließt ausdrücklich die genetischen Ressourcen der Zukunft mit ein. Mix-Wagner (1990) weist darauf hin, dass die bisher vollzogene Trennung von Wildflora und Nutzpflanze sich schnell als kurzfristig erweisen könnte, da jede Pflanzenart der Wildflora zu einer Kulturpflanze von morgen werden kann. Der Erhalt der Artenvielfalt sollte daher nicht nach augenblicklichen Prioritäten erfolgen, zumal die Gesamtzahl der Kulturpflanzen ohne Zierpflanzen verglichen mit der der höheren Pflanzen recht gering ist und nicht einmal ca. 3% ausmacht (Hammer, 1998).

3.8.2. Pflanzensammlungen als Instrument zur Erhaltung der genetischen Vielfalt

Die Notwendigkeit, pflanzengenetische Ressourcen für die Zukunft zu sichern sowie ihre Nutzbarmachung zu betreiben bzw. ihre Nutzung und das Wissen darum zu erhalten, ist ebenso unumstritten wie die ökologische Bedeutung dieser Arbeiten im Rahmen des Artenschutzes. Eine wichtige Maßnahme dabei ist die Durchführung von Pflanzensammlungen, wobei es mit der Sammlung allein nicht getan ist. Pflanzengenetische Ressourcen bekommen nämlich für die Pflanzenzüchtung nur dann einen Wert, wenn ihre Merkmale bekannt sind (Dambroth, 1990).

Wichtige Aspekte hierbei sind unter anderem die sorgfältige, standardisierte Evaluation, Dokumentation und Lagerung des gesammelten Materials. Ein weiterer kritischer Punkt sind die Reproduktionsmethoden, die von Anfang an mit in die Überlegungen zur Lagerung mit einbezogen werden müssen (Hammer, 1993).

Vor großangelegten Sammelexpeditionen ist es ratsam, sich einen Überblick über das zu erwartende Sammelmateriale zu verschaffen. Hierfür haben sich Pilotstudien auf Basis von Checklisten bewährt. Diese Checklisten erlauben eine intensive Einschätzung der pflanzengenetischen Ressourcen eines geographischen Gebietes und geben erstmals einen detaillierten Überblick über den Artenreichtum bestimmter Gebiete (Hammer, 1990).

3.8.3. Pflanzengenetische Ressourcen im Oman

Laut Angaben des Agrarministeriums von 2004 gibt es im Oman ca. 1021 Pflanzenarten, von denen 74 endemisch und zwei Arten gefährdet sind. Wie andere entwickelte Länder, nutzt Oman moderne, weltweit verbreitete Nutzpflanzensorten, die – wie überall anders auch – die lokal vorhandenen Landrassen verdrängen. Um das genetische Potential ihrer angepassten Landrassen zu erhalten, wurde in den Jahren 1987–1988 in Zusammenarbeit mit IPGRI eine Sammlung durchgeführt, mit dem Ziel, genetisches Material sämtlicher Nutzpflanzen des Omans zu sichern. Dabei wurden alle Gegenden des Omans berücksichtigt. Es wurden zahlreiche Akzessionen verschiedener Nutzpflanzen gesammelt, davon allein 84 bei Luzerne (*Medicago sativa* L.). Zur Zeit ist eine Sammlung von einheimischen Futterpflanzen durch ICARDA-ARP geplant (Al Lawati, 2004).

In der Genbank von ICARDA⁷, aber auch bei CIAT⁸, IITA⁹ und ICRISAT¹⁰ lagern mehr als 300 unbekannte Akzessionen omanischer Herkunft, wobei es sich dabei hauptsächlich um kleinkörnige Getreidesorten und Futterpflanzen handelt. Zusätzlich

⁷ International Center for Agricultural Research in the Dry Areas

⁸ International Center for Tropical Agriculture

⁹ International Institute for Tropical Agriculture

¹⁰ International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics

werden durch das USDA¹¹ National Plant Germplasm über 200 Akzessionen gesammelt und konserviert (Al Lawati, 2004).

Oman plant den Aufbau einer computergestützten Datenbank zur Erfassung der einheimischen Pflanzen. Für Dattelpalmen, Mango, Limone und Granatapfel existieren bereits Steckbriefe und Beschreibungen in herkömmlicher Aktenform, die als Grundlage für die neue Datenbank dienen können (Al Lawati, 2004).

Diese Daten und das Wissen um die lange geo-politische Isolation des Omans an sich sowie die weitgehend isolierte Lage der Bergoasen innerhalb des Omans bis in die 80er Jahre hinein, machen den Oman und speziell die Bergoasen zu einem potentiellen Refugium für pflanzengenetische Vielfalt. Während die pflanzengeographische Sonderstellung des Oman für Wildpflanzen bereits überzeugend nachgewiesen werden konnte (Kürschner, 1986), wurden die Kulturpflanzen bisher relativ wenig bearbeitet. Bei den Kulturpflanzen gibt es erste Hinweise für das Auftreten indigener Sippen (z.B. bei *Coriandrum sativum* L.; Diederichsen, 1996) und besonderer Formen beispielsweise aus der Gattung *Ocimum* L. (Eckelmann (2002). Laut Hammer (2001) ist außerdem die Evolution der Kultursippe *Punica granatum* L., möglicherweise genetisch beeinflusst durch das Auftreten von *Punica protopunica* Balf. f., der einzig verwandten Art auf der benachbarten Insel Sokotra, als weitere kulturpflanzen genetische Besonderheit zu nennen.

Die exakte Kartierung der vom agrarwissenschaftlichen Teilprojekt bisher schwerpunktmäßig untersuchten nordomanischen Oasenstandorte *Balad Seet* und *Maqta* deutete auf eine botanisch unerwartet große Vielfalt zwischen und innerhalb der angebauten Kulturarten hin. Dies galt insbesondere für Weizen (*Triticum* sp.). Eine umfangreiche morphologisch-taxonomische Untersuchung des Erntegutes nach dem aktuellen russischen Bestimmungsschlüssel von Dorofeev *et al.* (1979) zeigte, dass es sich bei den angebauten fünf Landrassen um Mischungen aus bis zu vier verschiedenen botanischen *T. aestivum* und *T. durum* Varietäten handelte, von denen zwei bisher wissenschaftlich noch nicht beschrieben waren (Al-Maskri *et al.*, 2003). Die auf einen Nachbau unter kontrollierten Bedingungen erfolgte erneute Klassifizierung bestätigte diese Ergebnisse ebenso wie anschließende molekulargenetische Untersuchungen, die in Zusammenarbeit mit der Genbank des Internationalen Mais- und Weizenzüchtungsinstitutes (CIMMYT) in Mexiko durchgeführt wurden (Zhang *et al.*, 2004). Es handelt sich bei den im Oman angebauten Weizenvarietäten vermutlich um entwicklungsgeschichtlich sehr altes Material, das vor sehr langer Zeit über traditionelle Land- und Seewege nicht nur aus dem Mittleren Osten sondern möglicherweise direkt

¹¹ United States Department of Agriculture

aus dem indischen Raum eingeführt wurde und sich in den Bergoasen reliktilsch erhalten hat (Alkhanjari et al., 2003). Ähnliches gilt auch für Emmer (*T. dicoccon*), wobei es im Rahmen von zwei Notsammlungen in einer Vielzahl von Oasen in den Projekttransektengebieten und darüber hinaus gelang, die letzten Emmerbestände des Landes zu sichern. Der Emmer stellte sich als eine asiatische Subspezies (subsp. *asiaticum*) und nicht als eine äthiopische (subsp. *abyssinicum*) heraus. Die Untersuchungen zeigten, dass es sich bei dem Emmer im Oman um var. *hausknechtianum* und var. *aeruginosum* handelt (Hammer et al., 2004b).

Der gesamte *Triticum*-Bestand wird derzeit in Rahmen eines von der Sultan Qaboos Universität (Oman) separat teilfinanzierten Dissertationsvorhabens an der Universität Kassel und am Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung (IPK) in Gatersleben morphologisch und molekulargenetisch sowie auf seine Trockenheitstoleranz und ernährungsphysiologischen Eigenschaften (Aminosäuremuster, Flavonoide) hin näher untersucht.

Um das Potential der genetischen Ressourcen im Oman genauer zu evaluieren, wurde in einer mehrtägigen Übersichtsuntersuchung die kulturpflanzenfloristische Zusammensetzung der Bergoase *Balad Seet* analysiert. Dazu wurde die im Anhang vorhandene Checkliste benutzt. Anhand dieser Checkliste konnten 66 Arten erfasst werden. Auffällig ist das relativ häufige Vorkommen tropischer Arten. Die Ergebnisse weisen dem Oman eine besondere Stellung in der Evolution und Erhaltung von Kulturpflanzen zu.

4. Diskussion

4.1. Palmengärten

Die Dattelpalme ist eine der ältesten Nutzpflanzen der alten Welt, Abbildungen aus Babylonien zeigen ihren Anbau um 3.000 v. Chr (Achnitch in Rehm, 1989). In den meisten arabischen Ländern, insbesondere in der Golfregion, nimmt die Dattelpalme auch kulturell eine besonders wichtige Stellung ein und ihre Früchte waren bis zur Entdeckung des Erdöls ein wichtiges Grundnahrungsmittel der Oasenbewohner dieser Region (Ahmed et al., 1995).

Im Oman spielt die Dattelpalme heute noch eine sehr wichtige Rolle. Etwa 75% der gesamten pflanzenbaulich nutzbaren Flächen sind mit Dattelpalmen bepflanzt, deren Zahl gegenwärtig auf ca. 7 Millionen geschätzt wird (Dutton 1986, 1987; Allen, 1987; Scholz, 1999). Im Oman werden der Zeit 239 weibliche und 61 männliche Palmensorten angebaut (Hamouda et al., 1998).

Die in *Balad Seet* vorherrschenden Palmensorten *Naghal* und *Fardh* haben mit 22% und 35 % einen relativen kleinen Anteil an Kleinpalmen, im Gegensatz zu den Palmensorten *Khalas*, *Khunaizi* und *Khasab*, die Kleinpalmenanteile von 77%, 50% und 48 % haben. Dies verdeutlicht eine neue Tendenz bei den Bauern von *Balad Seet*, verstärkt die alten, traditionellen und in großen Stückzahlen vertretenden Palmensorten wie *Naghal* und *Fardh* durch neue Palmensorten wie *Khalas*, *Khasab*, *Khunaizi*, *Qash Zabad* und *Hilali* zu ersetzen. Die meisten Jungpflanzen in *Balad Seet* befinden sich auf Flächen, auf denen früher Limettenbäume (*Citrus aurantifolia*) standen. Diese waren die zweiwichtigste Einnahmequelle der Bauern, bis sie aufgrund des starken Befalls mit einer virusartigen Krankheit, dem Hexenbesen [„Witches’ Broom Disease of Lime (WBDL)“], die einen abnormalen Wuchs der Zweige und Blätter des Baumes hervorruft, abstarben. Hexenbesen trat seit den späten 70er Jahren im Oman auf und machte den weit verbreiteten Limettenanbau unrentabel (Garnier and Bové, 2003).

Sortenbedingt unterschiedlich erfolgt die Fruchtentwicklung einer Dattelpalme von der Blüte zur Reife innerhalb von 5-8 Monaten. In *Balad Seet* reift die Sorte *Naghal* gegen Mitte Mai, gefolgt von *Fardh*, *Khalas*, *Khunaizi*, und *Kalbi* im Zeitraum von Juli bis August. Als spätreifende Palmensorten werden *Khasab*, *Qash Zabad* und *Hilali* im Zeitraum September-Oktober geerntet. Somit ist dank der breiten Variation der Dattelpalmen die Versorgung der Oase *Balad Seet* mit frischen Datteln, von Mitte Mai bis etwa Mitte Oktober gewährleistet.

4.2. Wasserressourcen

Bei einer jährlichen Gesamtmenge von 228.600 m³ bzw. 17.060 m³ ha⁻¹ ist die Wasserversorgung in *Balad Seet* deutlich höher als in der Oase *Maqta*, für die jährlich eine Gesamtwassermenge von 51.666 m³ bzw. 9.936 m³ ha⁻¹ zur Verfügung steht.

Während die Quellschüttung in *Balad Seet* aufgrund der durchschnittlich wesentlich längeren Verweildauer des Wassers im Felsmassiv relativ unabhängig von bis zu fünfjährigen Dürreperioden ist, ist die Abhängigkeit der Landwirtschaft in *Maqta* von regelmässig fallenden Niederschlägen deutlich größer. Dies könnte ein wesentlicher Grund für die offensichtlich wesentlich frühere Besiedelung von *Balad Seet* (Nagieb et al., 2004) und seine größere Bevölkerungszahl im Vergleich zu *Maqta* (Siebert et al., 1004) sein. Es bleibt allerdings anzumerken, dass die geologische und hydrologische Situation in *Maqta* sehr komplex ist (Glennie et al., 1974). In *Balad Seet* ist die Geologie relativ einfach und das ermittelte Alter der Quellwasserproben kann als repräsentativ für die gesamte Oase angesehen werden. Für genauere Aussagen über die Hydrologie und Dynamik der Quellen in *Maqta* dagegen, sind weitere Altersbestimmungen notwendig. Von besonderem Interesse wäre es dabei, die Reaktion der Quellen auf Regenereignisse zu verfolgen

4.3. Weizenstressversuch

Sowohl der Brotweizen (*Triticum aestivum* L.) als auch der Hartweizen (*Triticum durum* esf.) werden im Oman seit den historischen Zeiten angebaut (Schwartz, 1939; Guarino, 1990). Landrassen wie *Sarraya*, *Missani*, *Walidi*, *Cooley*, *Greda* und *Hamira* finden sich bis heute in den traditionellen Oasen Omans. Jedoch reduzierten sich innerhalb eines 8-jährigen Beobachtungszeitraumes die mit diesen Landsorten bepflanzten Flächen von 1000 auf 240 ha (Anonymous, 2000; Toll und Moss, 1995). Selbst in den beiden untersuchten Oasen verschwanden bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes die Landsorten *Greda* aus *Balad Seet* und *Missani* aus *Maqta*, obwohl sie zu Beginn der Untersuchungen noch von jeweils einem Bauern der beiden Oasen angebaut wurden.

Die deutlich durch höhere Wassergaben gesteigerte Korn- und Stroherträge aller acht Sorten um 44% und 54% weisen auf die Bedeutung des Wassers als wichtigster limitierender Faktor des Weizenertrags weltweit hin (Dash and Monhanty, 2001; Zhang und Oweis, 1999).

Die bei Al-Maskri et al. (2003) beschreiben Landsorten *Sarraya* (*Balad Seet*) und *Walidi* (*Maqta*) erzielten unter WII den höchsten Kornertrag, während die Landsorte *Sarraya* zusammen mit der modernen Sorte *Wadi Quraiyat 308* unter WI die ertragsreichsten waren. Dotlacil et al. (2000) hatten 31 europäische Weizenlandrassen

mit vier modernen Weizensorten bezüglich ihrer Ertragspotential miteinander verglichen und fanden, dass der durchschnittliche Ertrag der modernen Sorten um 51% höher als derjenige der Landrassen lag. Pecetti und Annicchiarico (1993) hatten dagegen in einem Versuch die Erträge von 40 syrischen Landsorten mit der verbesserten und weit verbreiteten Sorte *Sham 1* untersucht. Dabei fanden sie bei manchen der Landsorten Erträge, die mit dem Ertrag der modernen Sorte vergleichbar waren, wobei die Erträge der restlichen Landsorten nicht signifikant niedriger als diejenigen der modernen Sorten lagen. Dieser Befund wurde von Oliveira (2001) bestätigt. Er stellte beim Vergleich der Kornträge von fünf Weizenlandsorten und zwei modernen Weizensorten fest, dass die von ihm untersuchten Landsorten ähnliche Kornträge wie diejenigen der modernen Sorten erbracht hatten.

Der durchschnittliche Strohertrag der Landsorten insgesamt unter WI und WII lag insgesamt 35% und 28% höher als derjenige der modernen Sorten. Dies ist insbesondere für agro-pastorale Systeme in omanischen Bergoasen wichtig, bei denen die Tierhaltung eine zentrale Rolle spielt.

Der im Rahmen dieser Arbeit nicht untersuchte Proteingehalt im Korn der Landsorten könnte durchaus höher sein als derjenige der modernen Sorten. Oliveira (2001) und Carrillo (1993) fanden bei den von Ihnen untersuchten Weizenlandsorten in Spanien höhere Proteingehalte als bei modernen Sorten. Dies ist ein wichtiges Argument für den Erhalt von lokalen Landsorten, zumal im Oman lokaler Weizen auf dem lokalen Markt aufgrund der Präferenz der Omanis zu den lokalen Produkten fünf bis acht-fach höheren Preis als Importweizen erzielt.

Wenn auch aufgrund der möglicherweise zu geringen Dauer der Bewässerungsintervalle keine signifikanten Unterschiede zwischen den Sorten bezüglich Ihrer Dürretoleranz festgestellt werden konnten, so konnten doch überraschend hohe Korn- und Stroherträge für die verwendeten Landsorten nachgewiesen werden (Tab. 6, Abb. 26-27).

Zur besseren Bewertung der Wasserstresstoleranz der einzelnen Sorten wäre es sinnvoll, einen weiteren Versuch mit einem Bewässerungsintervall von 36 Tagen durchzuführen. Dabei sollte der Wasserstress insbesondere beim Ährenschieben und während der Kornfüllungsphase angesetzt werden, da diese Phasen besonders empfindlich sind und als wichtige Kriterien für die Dürresistenz einer Sorte gelten. Kyzeriddis et al. (1995) hatten dies bei ihrem Versuch berücksichtigt und fanden eine deutlich höhere Trockenstress- und Temperaturenresistenz bei Landrassen im Vergleich zu modernen Sorten. Pecetti et al. (1994) hatten 25 bereit geprüfte trockenresistente Landsorten aus Syrien untersucht und fanden, dass frühreifende Sorten deutlich höhere

Korn- und Stroherträge erzielt hatten als spätreifende. Dieses zeigt eine wichtige Eigenschaft der Frühreife unter Trocken- und Temperaturstress. Dieser Trend konnte bei den Landsorten *Sarraya* und *Walidi* beobachtet werden.

4.4. N₂-Fixierungsleistung bei Luzerne

Die Luzerne (*Medicago sativa* L.) ist eine mehrere Jahre ausdauernde Pflanze und gehört zur Familie der Schmetterlingsblütler. Sie stammt aus Vorderasien und wird seit der Antike angebaut (Maaß, 1996). Verbreitet ist die Luzerne sowohl in gemäßigten als auch heißen und ariden Klimazonen in Systemen mit künstlicher Bewässerung (Rehm und Espig, 1991; Keller et al., 1999). Mit 17330 ha belegt die Luzerne nach Dattelpalmen und Bananen die drittgrößte Anbaufläche im Oman (FAOa, 1997).

Luzerne spielt eine wichtige Rolle in Oasensystemen des Omans und bekommt auf dem Markt einen guten Preis, da sie traditionell an kleine Wiederkäuer verfüttert wird, die wiederum als Omanische Tiere auf dem lokalen Markt eine Präferenz darstellen und für einen deutlich höheren Preis (2-3 fach) als eingeführte Tiere verkauft werden können.

Der erfasste Trockenmasseertrag der Luzerne von 22 Tonnen im Jahr wird als sehr hoch betrachtet. Er ist der 2-3 mal höher als die Erträge von intensiv bewirtschafteten Flächen in den USA (Haby et al., 1999; Hoy et al. 2002) oder in Brasilien (Monteiro et al., 1998), auch wenn die Erträge pro Schnitt vergleichbare Werte erreichten (Ottman et al., 1996). Dies ist möglicherweise auf den monatlichen Schnitt, der das ganze Jahr über erfolgte, zurückzuführen und auf das schnelle Nachwachsen, das sich in erstaunlich hohen Bodenrespirationswerten wie sie z.B. in Luzerne-Feldern gefunden wurden, widerspiegelt (Wichern et al., 2004b).

Die Angaben zur N₂-Fixierungsleistung verschiedener Futterleguminosen schwanken in der Literatur stark. Die Angaben für Luzerne (*Medicago sativa* L.) lagen zwischen 23 kg N ha⁻¹ im Spross (Sparrow et al., 1995) und 466 N ha⁻¹ in Spross und Wurzel (Kellner et al., 1997). Die in unserem Versuch gemessene jährliche N₂-Fixierungsleistung von 478% kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹ im Spross der Luzerne liegt deutlich höher als die von Keller et al. (1999) festgestellten Fixierungsleistung von 90-340 kg N ha⁻¹ Jahr⁻¹.

Zunächst überraschend war, dass die in *Balad Seet* übliche Tierdungzugabe von 6 t ha⁻¹ zu Versuchbeginn, keine Wirkung auf die Stickstofffixierungsrate hatte. Grundsätzlich ist eine Düngergabe zum Beginn der Pflanzung der Luzerne zwar empfehlenswert, da die Pflanze in dieser Phase noch keinen Luftstickstoff binden kann und auf die N-Vorräte im Boden angewiesen ist. Andererseits führen hohe Nitratgehalte im Boden zur Hemmung der biologischen Stickstofffixierung während der Jugendentwicklung von Leguminosen (Mengel, 1994). Auch das Knöllchenwachstum und damit die Leistungsfähigkeit der

Knollen werden durch hohe Nitratgehalte vermindert (Mengel, 1994; Marschner, 1995). Deshalb empfiehlt es sich angesichts der hohen N-Vorräte der Böden von *Balad Seet* (Wichern et al., 2004b), die übliche Tierdunausbringungsmenge auf Luzernefeldern zu verkleinern.

4.5. Nährstoffflüsse

Aufgrund der hohen Inputs von tierischem und synthetischem Dünger lagen an beiden Standorten die Konzentrationen von N, P und K in Stroh und Korn aller Feldfrüchte (Tab. 10) weit über den von Bergmann (1988) genannten kritischen Werten. Im Gegensatz dazu waren die Erträge der Feldfrüchte niedrig, mit Ausnahme von Sorghum, Knoblauch und Luzerne. Der Trockenmasseertrag von Luzerne war zwei bis dreimal höher als die Erträge auf intensiv bewirtschafteten Flächen in den USA (Haby et al., 1999; Hoy et al. 2002) oder in Brasilien (Monteiro et al., 1998), auch wenn die Erträge pro Schnitt teilweise vergleichbare Werte erreichten (Ottman et al., 1996). Die hohe Schnitthäufigkeit ist auf das temperatur- und bewässerungsbedingt ganzjährig schnelle Nachwachsen der Pflanzen zurückzuführen, das sich in erstaunlich hohen Bodenrespirationswerten widerspiegelt (Wichern et al., 2004b).

Die Teilbilanzen aller untersuchten Nährstoffe waren stark positiv, was die Ausgangshypothese bestätigte, dass beide Standorten 'sinks' für Nährstoffe darstellen. Vergleichbare Bilanzen in Thailand zeigten Überschüsse von +12 kg N, +8 kg P und +7 kg K pro Hektar (Wijinhoud et al., 2003). Dagegen wiesen Studien in Kenia von Farmen mit Ackerbau und Tierhaltung, die auf der Grundlage von Gesamtbilanzen erstellt wurden und damit Auswaschungsverluste und atmosphärische Einträge berücksichtigten auf Werte von -71 kg N, +3 kg P und -9 kg K ha⁻¹ auf (van den Bosch et al., 1998). In *Balad Seet* resultierten die hohen Nährstoffüberschüsse überwiegend aus der hohen ausgebrachten Düngermenge, die auf Ackerland sowohl aus Tierdung als auch aus synthetischem Dünger und in den Palmengärten zusätzlich aus menschlichen Fäkalien besteht (Tab. 10). Beide Formen des organischen Inputs beweisen die Verbindung der derzeitigen Oasen-Landwirtschaft mit der "äußeren" Wirtschaft, die beachtliche Nährstoff-Inputs in Form von zugekauften Nahrungsmitteln und Fischmehl als Tierfutterergänzung liefert. Dies spiegelt sich ebenfalls in der Nährstoffkonzentration des Tierdungs wider. Während die darin gemessene N-Konzentrationen mit 18 g kg⁻¹ vergleichbar mit den von Esse et al. (2001) und Brower und Powell (1998) berichteten 15-23 g N kg⁻¹ für Schafdung war, waren die in Balad Seet und Maqta ermittelten Werte von P und K mit 5 g kg⁻¹ und 29 g kg⁻¹ viel höher als die Vergleichswerte aus dem westafrikanischen Sahel von 2g kg⁻¹ bzw. 8 g kg⁻¹. Die Ausbringung des Düngers

(synthetisch oder organisch) richtete sich klar nach der Art der Feldfrüchte. Sorghum, Luzerne und Knoblauch erhielten fast ausnahmslos Nährstoffinputs in Form von Tierdung, während Weizen, Gerste und Koriander hauptsächlich mit synthetischem Dünger versorgt wurden (Tab. 14). Der größte Anteil am ermittelten Nährstoffüberschuss im Ackerland trat in *Balad Seet* beim Anbau von Sorghum und Luzerne auf, gefolgt von dem bei Knoblauch und Koriander.

Die Terrassengröße in *Maqta* und der große Anteil an brachliegenden und verlassenen Feldern scheinen typisch für Streuoasen im Oman (Siebert et al., 2004). Die allein auf starken Tierdunggaben basierenden positiven Nährstoffbilanzen zeigten die weiterhin bestehende starke agro-pastorale Verbundenheit des Systems.

Im Vergleich zu *Balad Seet* wurden in den Palmengärten von *Maqta* um 55–74% geringere Nährstoffüberschüsse gemessen. Dies lässt sich mit der viel geringeren Bevölkerungsdichte in *Maqta* erklären, wo die Mehrheit der Bevölkerung in kleinen Siedlungen in einem Radius von 10 km rund um die Oase wohnt.

Die mit Ausnahme von K viel geringeren Nährstoffkonzentrationen des Bewässerungswassers von *Maqta* lassen sich durch die fehlende Vorhandensein von Waschplätzen für Kleidung und Geschirr in den höher gelegenen Teilen des Bewässerungskanal-systems, wie sie für *Balad Seet* typisch sind, erklären.

Tabelle 14. Einteilung der Nährstoffzufuhren nach ihrem Ursprung (synthetisch oder organisch) und Intensität der zugeführten Nährstoffe (NPK) auf Feldern mit Weizen, Grünfüttergerste, Sorghum, Luzerne, Knoblauch und Koriander in der Bergoase von *Balad Seet* (Oman) im Anbaujahr 2001/2002

	Weizen			Gerste			Sorghum		
	Art der Düngung (Felderanzahl)			Art der Düngung (Felderanzahl)			Art der Düngung (Felderanzahl)		
	organisch (15)	synthetisch (30)	beide (11)	organisch (2)	synthetisch (53)	beide (2)	organisch (26)	synthetisch (6)	beide (15)
	Intensität (kg ha ⁻¹)	Org. Ursprung (%) Bereich	Mittelwert	Intensität (kg ha ⁻¹)	Org. Ursprung (%) Bereich	Mittelwert	Intensität (kg ha ⁻¹)	Org. Ursprung (%) Bereich	Mittelwert
N-Input	50-375	0-100	37	34-352	0-100	8	0-423	0-100	85
P-Input	0-102	0-100	73	0- 50	0-100	24	0- 94	0-100	98
K-Input	0-462	0-100	89	0-274	0-100	47	0-458	0-100	99
	Luzerne			Knoblauch			Koriander		
	Art der Düngung (Felderanzahl)			Art der Düngung (Felderanzahl)			Art der Düngung (Felderanzahl)		
	organisch (25)	synthetisch (0)	beide (3)	organisch (52)	synthetisch (0)	beide (12)	organisch (15)	synthetisch (5)	beide (10)
	Intensität (kg ha ⁻¹)	Org. Ursprung (%) Bereich	Mittelwert	Intensität (kg ha ⁻¹)	Org. Ursprung (%) Bereich	Mittelwert	Intensität (kg ha ⁻¹)	Org. Ursprung (%) Bereich	Mittelwert
N-Input	285-551 [†]	39-58	52	177-514	39-100	96	31-503	0-100	69
P-Input	34-100	70-100	96	45-117	66-100	98	14- 95	0-100	84
K-Input	190-467	87-100	99	250-558	85-100	99	25-527	0-100	94

[†] Etwa 45% des Gesamt-N-Inputs stammen aus der symbiotischen N₂-Fixierung.

Tabelle 15. Kulturspezifische Mittelwerte der NPK-Zufuhren, Entzüge und Nährstoffteilbilanzen bei Weizen, Grünfüttergerste, Sorghum, Luzerne, Knoblauch und Koriander in der Bergoase von *Balad Seef* (Oman) im Anbaujahr 2001/2002

	Weizen			Gerste [†]			Sorghum		
	Zufuhren	Entzüge	Teilbilanzen	Zufuhren	Entzüge	Teilbilanzen	Zufuhren	Entzüge	Teilbilanzen
	kg ha ⁻¹			kg ha ⁻¹			kg ha ⁻¹		
N	85	45	40	155	142	13	208	106	102
P	16	5	11	13	15	-2	52	37	15
K	72	82	-10	37	111	-74	276	125	151
	Luzerne			Knoblauch			Koriander		
	Zufuhren	Entzüge	Teilbilanzen	Zufuhren	Entzüge	Teilbilanzen	Zufuhren	Entzüge	Teilbilanzen
	kg ha ⁻¹			kg ha ⁻¹			kg ha ⁻¹		
N	322 [‡]	198	124	121	75	46	179	111	68
P	35	13	22	34	8	26	44	12	32
K	184	104	80	185	54	131	203	110	93

[†] Wird als Grünfütter verwendet und hauptsächlich mit Harnstoff gedüngt

[‡] Etwa 45% des Gesamt-N-Inputs stammen aus der symbiotischen N₂-Fixierung

Die mit 10 zu 12 in der oberen 0,2 m Schicht der Terrassenböden von *Balad Seet* und *Maqta* hohen C:N-Werte (Wichern et al., 2004ac), machen es unwahrscheinlich, dass nennenswerte zusätzliche Mengen an N für längere Zeit in der mikrobiellen Biomasse des Bodens gebunden werden können. Gasförmige Verluste von N und Auswaschungen sind daher wahrscheinlich.

Die pH-Werte von 7.6-8.4 und max. Tagestemperaturen von 30 – 45°C machen auf den stark gedüngten Böden, die zudem starken Mineralisierungsprozessen durch regelmäßige Bewässerungs- und Austrocknungsphasen unterworfen sind, Denitrifikationsverluste in Höhe von mindestens 11 bis 14 kg N ha⁻¹ wahrscheinlich, wie sie für bewässerten Maisanbau mit einer jährlichen Düngermenge von 16-32 t tierischem Dünger auf sandigem Tonlehm-Boden in Pakistan gemessen wurden (Mahmood et al., 1997). Für die omanischen Bergoasen sind solche Durchschnittswerte jedoch angesichts der großen Bandbreite an verwendeten Feldfrüchten nur sehr schwer zu ermitteln.

In der deutlich kühleren nordchinesischen Tiefebene wurden im bewässerten Maisanbau NH₃-Verluste in Höhe von 44-48% des ausgebrachten N gemessen, zusätzlich zu N₂O-Emissionen in Höhe von 2 kg N ha⁻¹ in den zwei Monaten nach einer Harnstoffdüngung mit 75 bis 200 kg ha⁻¹ (Cai et al., 2002). Auf bewässerten Alluvial-Böden in Indien wurden NH₃-Emissionen von bis zu 60 kg ha⁻¹ nach einer Düngung mit 60 kg Harnstoff N plus 60 kg ha⁻¹ Tierdung-N zu Reis und 120 kg ha⁻¹ Harnstoff-N zu Weizen ermittelt (Banerjee et al., 2002). Verluste ähnlichen Ausmaßes sind nach Harnstoffdüngung in *Balad Seet* und nach Ausbringung von Dung in *Maqta* zu erwarten. Mit relativ hohen Verlusten an N, aber auch an organischem P, verursacht durch Auswaschung, ist ebenfalls zu rechnen, jedoch sind die Auswaschungen auf bestimmte Zeiträume begrenzt.

Tracer-Experimente, mit denen die Wasserbewegungen in *Balad Seet* gemessen wurden (Luedeling et al., 2004), weisen darauf hin, dass eine Nährstoffverlagerung in tiefere Bodenschichten nur in den Wintermonaten stattfindet, wenn feuchte Witterung, geringere Evaporation und gelegentliche starke Regenfälle für eine zeitlich begrenzte völlige Durchfeuchtung der Terrassenböden sorgen.

Im Gegensatz dazu erscheinen Nährstoffverluste durch Erosion aufgrund der Terrassenstruktur, die eine laterale Bodenbewegung effektiv verhindert, als unwahrscheinlich. Als ähnlich niedrig sind atmosphärische Nährstoffeinträge einzuschätzen, da die Oasen weit entfernt von industriellen oder vulkanischen Aktivitäten liegen.

Außerdem sind NH₃-Verluste während der Dunglagerung wahrscheinlich. Bei einem C:N-Verhältnis von frischem Dung von 24 bis 16 (Wichern et al., 2004c), ist zu erwarten,

dass unter den hohen Temperaturen und starkariden Bedingungen des Oman die Verluste am Gesamt-N, die von Petersen et al. (1998) unter gemäßigten Bedingungen gemessenen 5-24% für Rinder- und Schweinemist bei weitem übersteigen.

4.6. Pflanzengenetische Ressourcen und Biodiversität

Die in *Balad Seet* und *Maqta* gefundenen zwei neuen Weizensorten (Al-Maskri et al., 2002), das Auffinden von sechs Emmer-Populationen (Hammer et al., 2004b) sowie die in der Checkliste von *Balad Seet* erfassten 66 Arten (Hammer et al., 2004a) weisen dem Oman eine besondere Stellung in der Evolution und Erhaltung von Kulturpflanzen zu.

Aufgrund ihrer begrenzten Flächen und Nischenlage würden sich die Bergoasen Omans gut für ein durch staatliche Subventionen gesteuertes *in situ*-Erhaltungsprogramm des Genmaterials eignen. Gladis und Hammer (1994) kamen zum Schluss, dass Genbanken keine wirklich sichere Erhaltungsmethode für genetische Ressourcen darstellen und fordern deshalb parallel eine *in situ* Erhaltung, das heißt den regelmäßigen alljährlicher Nachbau unter geeigneten klimatischen und Bodenbedingungen, gekoppelt mit einer sippenspezifischen Nutzung und Selektion, wie sie unter kleinbäuerlichen Bedingungen gegeben ist.

5. Schlussfolgerungen

Eine stabile Wasserversorgung mit relativ großer Quellschüttung war vermutlich der wesentliche Grund für die Entwicklung der Bergoase *Balad Seet* als typische 'Kernoase', die durch weitgehend zusammenhängende Acker- und Siedlungsflächen gekennzeichnet ist. Dagegen dürften die deutlich geringen und in Trockenperioden stärker schwankenden Schüttungen der zahlreichen und weit gestreuten Quellen in der Bergoase *Maqta* ihre Entwicklung als 'Streuoase' bestimmt haben.

Die kontinuierliche Besiedelung der Bergoase *Balad Seet* über Jahrtausende wurde sowohl durch die hydrologisch günstige Lage der Oase und die damit verbundene relativ stabile Wasserverfügbarkeit begleitet von guter Wasserqualität (geringer Salzgehalt), als auch durch die nachhaltige Bewirtschaftungsweise der Terrassenböden ermöglicht. Für die Terrassenlandwirtschaft spielte deren Aufbau an sich zur Vermeidung von Erosion, der hohe Input und die Rückführung von organischer Substanz über Mist und Ernterückstände (insbesondere Wurzelmassen von mehrjährigen Kulturen wie Luzerne) und die Entwicklung eines präzisen und gut funktionierenden Bewässerungssystems eine entscheidende Rolle.

Aus den bereits vorhandenen Daten lässt sich ableiten, dass die Oasen unter den gegebenen Bedingungen beachtliche Nährstoffspeicher darstellen. Allerdings müssen Denitrifikation, NH_3 -Volatilisation sowie NO_3^- - und K-Auswaschungen in der Zukunft für beide Oasentypen quantifiziert werden, um die agrarökologische Bedeutung der bisher sehr stark positiven Nährstoffbilanzen besser beurteilen zu können. Die momentane Überdüngung der Oasen ist ein historisch junges Phänomen, das auf die Verfügbarkeit externer Nährstoffquellen (synthetische Dünger, Nahrungsmittel, Tierfutter) zurückzuführen ist.

Die Entdeckung zweier neuer botanischer Weichweizenvarietäten in *Balad Seet* und *Maqta* belegte die Vermutung, dass die omanischen Bergoasen ein Refugium für pflanzengenetische Ressourcen darstellen, die durch geeignete staatliche Maßnahmen *in situ* sowie *ex-situ* (in Genbanken) erhalten werden sollten.

6. Zusammenfassung

Bei durchschnittlichen Jahresniederschlägen von 100 mm können im Oman nur 0,1% der Landfläche landwirtschaftlich im Bewässerungslandbau genutzt werden. Als Siedlungsorte boten sich dabei solche Orte an, die hydrologisch günstig lagen und der Oasenbevölkerung die Anlage von Bewässerungssystemen erlaubten. Seit dem Beginn der kommerziellen Erdölförderung und politischen Öffnung des Landes in den frühen 1970er Jahren erfährt das Land jedoch einen raschen Modernisierungsprozess, der zu einer grundlegenden Veränderung der landwirtschaftlichen Produktionsbedingungen und –Prozesse geführt hat. Übergeordnetes Ziel der im Rahmen des Gesamtprojektes durchgeführten agrar-wissenschaftlichen Untersuchungen war es, den *status quo* der einem raschen Transformationsprozess unterliegenden agro-pastoralen Produktionsformen in Oasensiedlungen zu erfassen. Zur Klärung der Ursachen für die jahrhundertealte Nachhaltigkeit der Oasenwirtschaft sollten im agrarwissenschaftlichen Teilprojekt die Produktivität und Ressourcennutzungseffizienz dieser Systeme dokumentiert und die grundlegenden Nährstoffflüsse quantifiziert werden.

Im Rahmen eines von der DFG finanzierten interdisziplinären Projektes "Transformationsprozesse in Oasensiedlungen Omans" wurden die Oasengebiete *Balad Seet* (57,39 °O, 23,19 °N, 996 m über NN) und *Maqta* (59,00 °O, 22,83 °N, 1050 m über NN) untersucht. Die Oase *Balad Seet* befindet sich am oberen Ende des *Wadi Bani Awf* an der Nordseite der *Hajar* Bergkette und ist umgeben von bis zu 1000 m hohen Steilwänden. Das sich auf einem Hügel befindliche, drei Jahrtausende alte Dorf wird derzeit von 632 Einwohnern besiedelt und ist umgeben von 8,8 ha Palmengärten und 4,6 ha Ackerland, die in ihrer Mehrzahl das ganze Jahr über intensiv bewässert werden. Die Dorfbewohner besitzen etwa 200 Schafe und Ziegen sowie etwa 35 Rinder. Fünf Systeme von Bewässerungskanälen, genannt *Aflaj*, versorgen das Dorf mit Quellwasser aus den umliegenden Bergen. Im Gegensatz zur kompakten Anordnung von Siedlung und landwirtschaftlicher Fläche in *Balad Seet* (Kernoase) entspricht die im *Wadi Khabbah* in den *Jabal Bani Jabir* Bergen gelegene Oase *Maqta* eher dem Bild einer Streusiedlung. Aufgrund einer mehrjährigen Dürreperiode und der hydrologischen Gegebenheiten konnten die Mehrzahl der Ackerbauterrassen im Zeitraum 2000–2003 nicht bestellt werden, da das Wasser der 22 gering schüttenden Quellen zur Bewässerung der insgesamt 2,9 ha Palmengärten benötigt wurde.

Die kleinräumige Ertrags- und Nährstoffflussmessung in den Untersuchungsgebieten erforderten eine umfassende Kartierung der Bergoasen *Balad Seet* und *Maqta*. Dafür wurden hochauflösende Farbfotos mittels eines mit Helium -gefüllten Ballons aus etwa 500 m Höhe erstellt. Die erstellten Aufnahmen wurden mit Hilfe der GIS Software

ArcView 3.2 digitalisiert. Zur Entzerrung und Georeferenzierung der Terrassenkarten wurden ein elektronisches Tachymeter und ein differenzieller GPS-Empfänger verwendet.

Zur Erstellung von Nährstoffbilanzen auf Feldebene waren die präzise Berechnung der individuellen Feldflächen, formelle und informelle Befragung der Landwirte zu den Fruchtfolgen und die Quantifizierung aller Ein- und Austräge von Nährstoffen auf den Acker- und Palmenflächen notwendig.

Alle Entzüge von Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in Form von Ernteprodukten und alle NPK-Einträge in Form von Tierdung und synthetischem Dünger (nur in *Balad Seet*), Bewässerungswasser, menschlichen Fäkalien sowie die Menge des durch Luzerne (*Medicago sativa* L.) fixierten N₂ (nur in *Balad Seet*) wurden für Feldfrüchte und Dattelpalmen erfasst. Daraus konnten für jedes Einzelfeld in *Balad Seet* und für jedes Terrassensystem in *Maqta* sowie für die Oasen als ganzes Nährstoffbilanzen berechnet, vergleichend analysiert und grafisch dargestellt werden.

Zur Erfassung der biologischen N₂-Fixierungsleistung von Luzerne wurde in *Balad Seet* ein ¹⁵N-Verdünnungsversuch mit mehrjähriger Luzerne und einer Rotation aus Weizen und Sorghum als nicht-fixierenden Kontrollpflanzen angelegt. Dabei zeigte die Luzerne eine überraschend hohe jährliche Fixierungsleistung von 476 kg N ha⁻¹ bezogen auf die oberirdische Biomasse.

Zur Erfassung von Schwankungen der Quellschüttungen sowie zur Bestimmung der zugeführten N- P und K-Menge durch das Bewässerungswasser wurden die Quellschüttungen innerhalb des Untersuchungszeitraumes in *Balad Seet* (monatlich) und in *Maqta* (alle zwei Monate) gemessen. Ebenfalls analysiert wurden die N-, P- und K-Konzentrationen im Bewässerungswasser. Bei einer jährlichen Gesamtmenge von 228600 m³ bzw. 17060 m³ ha⁻¹ ist die Wasserversorgung in *Balad Seet* deutlich höher als in der Oase *Maqta*, für die jährlich insgesamt eine Wassermenge von 51666 m³ bzw. 9936 m³ ha⁻¹ zur Verfügung steht. Aufgrund der herrschenden Trockenperiode während des Untersuchungszeitraumes nahm die Schüttung der 22 Quellen in *Maqta* um 47 % ab, während die Gesamtschüttung der zwölf Quellen in *Balad Seet* um 22,5 % sank.

Fünf gesammelte Weizenlandsorten von beiden Oasenstandorten wurden mit drei eingeführten Weizensorten in einem in *Balad Seet* angelegten Feldversuch unter zwei verschiedenen Bewässerungsintervallen (18 und 27 Tage) vergleichend untersucht. Dabei erzielten die Landsorten *Sarraya* und die moderne Sorte *Wadi Quraiyat* 308 unter dem kürzeren Bewässerungsintervall die höchsten Kornerträge, während die Landsorten *Sarraya* und *Walidi* unter dem längeren Bewässerungsintervall die besten Kornerträge hatten. Die höchsten Stroherträge erreichten die Landsorten *Missani* und *Cooley*.

In **Balad Seet** wurden die N-, P- und K-Entnahmen von den Einträgen bei weitem übertroffen, sowohl bei den Feldfrüchten als auch bei den Dattelpalmen. Innerhalb des zweijährigen Untersuchungszeitraumes erhielten 55% der 385 Felder jährliche N-Gaben von insgesamt 100-500 kg N ha⁻¹, 25% 500-1400 kg N ha⁻¹ und 11% bekamen gar kein N. Jährliche P-Gaben in Höhe von 1-90 kg ha⁻¹ wurden auf 46% der Felder ausgebracht, während 27% 90-210 kg P ha⁻¹ und noch einmal 27% gar kein P erhielten. Ebenso blieben 27% der Felder ohne K, während 32 % 1-300 kg K ha⁻¹ erhielten und die übrigen Felder bis zu 1400 kg K ha⁻¹. Die ausgebrachte Menge Tierdung brachte den Palmengärten pro Hektar 61-277 kg N und den Weizenfeldern 112-225 kg N, 9-40 kg P und 14-29 kg P sowie 98-421 kg K und 113-227 kg K.

Auf den Ackerbauflächen waren die Teilbilanzen, die Nährstoffeinträge durch Tierdung, synthetischen Dünger biologische Stickstofffixierung und Bewässerungswasser sowie Nährstoffentzüge durch Ernteprodukte berücksichtigen, mit Überschüssen von 131 kg N ha⁻¹, 37 kg P ha⁻¹ und 84 kg K ha⁻¹ in Balad Seet sowie 136 kg N ha⁻¹, 16 kg P ha⁻¹ und 66 kg K ha⁻¹ in Maqta etwa in derselben Größenordnung. Demgegenüber waren die entsprechenden Teilbilanzen für die Palmengärten mit 303 kg N ha⁻¹, 38 kg P ha⁻¹ und 173 kg K ha⁻¹ in Balad Seet sowie 84 kg N ha⁻¹, 14 kg P ha⁻¹ und 91 kg K ha⁻¹ stark unterschiedlich. Die Ergebnisse zeigen, dass beide Oasen gegenwärtig Senken für Nährstoffe und damit potentielle Quellen für gasförmige Nährstoffverluste sowie Nährstoffauswaschung darstellen. Diese Verluste könnten durch eine Reduzierung des Nährstoffeinsatzes gesteuert werden.

7. Summary

An average annual precipitation of about 100 mm in Oman requires the use of irrigation facilities for agriculture, which is only possible on 0.1% of the country's surface. Historically settlement sites were therefore always limited to hydrologically favourable areas which allowed the construction of irrigation facilities. Since the onset of commercial oil exploitation in the early 1970s, Oman experienced a rapid modernization process that has led to major changes in the conditions for and modes of agricultural production. In view of this the overall goal of this project was to analyze the *status quo* and the driving forces of the rapidly changing traditional agro-pastoral systems which characterise most oases settlements. In this context it seemed of particular interest to quantify the productivity, resource use efficiency and nutrient fluxes of these systems as important criteria characterising their century-old sustainability.

In the framework of the DFG-funded interdisciplinary project 'Transformation processes in oasis settlements of Oman' the oasis systems of *Balad Seet* (57,39 °E, 23,19 °N, 996 m asl) and *Maqta* (59,00 °E, 22,83 °N, 1.050 m asl) were investigated. The oasis of *Balad Seet* is situated at the upper end of the *Wadi Bani Awf* at the northern fringe of the *Hajar* mountain range and is surrounded by cliffs of up to 1000 m. The 2500-year old settlement on a rocky outcrop is presently populated by 632 inhabitants and surrounded by 8.8 ha of palm groves and 4.6 ha of cropland which in their majority are intensively irrigated year round. The villagers own about 200 sheep and goats and 35 cattle. Five irrigation systems called *aflaj* convey the spring water from the surrounding mountains to the settlement.

In contrast to the compact nature of the settlement and agricultural land in the 'core oasis' of Balad Seet the widely spread-out settlement of *Maqta* in the *Wadi Khabbah* of the *Jabal Bani Jabir* mountains represents a 'scattered oasis'. As a consequence of a several year drought and its hydrological properties the majority of its agricultural terraces remained uncultivated during the investigations of 2000–2003 as the water of the 22 minor springs was needed for the irrigation of the palm groves totaling 2.9 ha.

The detailed measurements of crop yields and nutrient flux measurements in both oases required the initial cartography of their major features. To this end high-resolution aerial photographs were taken with a helium-filled balloon from about 500 m height. Subsequently the photographs were digitised and an electronic tachymeter and a differential GPS were used to rectify and georeference the terrace maps.

For the establishment of partial nutrient balances at the level of individual fields the precise determination of field sizes, formal and informal interviews with farmers about

their cropping sequences and the quantification of all nutrient inputs and outputs on the cropland and palm grove terraces were necessary.

All removals of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) as harvested products and all NKP-inputs as animal manure and synthetic fertilizers (only for *Balad Seet*), irrigation water, human faeces and the amount of atmospheric N₂ fixed by alfalfa (*Medicago sativa* L.; only at *Balad Seet*) were measured for both field crops and date palms. This allowed to establish, analyze and display partial nutrient balances for each individual field (at *Balad Seet*) or for each terrace system (at *Maqta*) as well as for the oasis as a whole.

A ¹⁵N dilution experiment with a rotation of wheat (*Triticum aestivum* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) MOENCH) as non-fixing reference crops was established at *Balad Seet* to measure the N₂-fixation of perennial alfalfa. The results indicated an annual N₂-fixation of 476 kg N ha⁻¹ in its above-ground biomass.

To monitor fluctuations in spring flow and to determine the amount of N, P and K added in the irrigation water, during the measurement period, spring flows were determined monthly at *Balad Seet* and bi-monthly at *Maqta*. Nutrient concentrations in the spring water were also analyzed. The annual water resources in *Balad Seet* of 228600 m³ or 17060 m³ ha⁻¹ are much higher than in *Maqta* where 51666 m³ or 9936 m³ ha⁻¹ are available. Because of the observed multi-year drought period the outflow of the 22 springs at *Maqta* declined by 47% while the outflow of the twelve springs at *Balad Seet* declined by 22%.

A field experiment was established at *Balad Seet* to test five wheat landraces from both oases against three modern varieties under two irrigation regimes for drought tolerance at irrigation intervals of 18 and 27 days. At the shorter irrigation interval grain yields were highest for the landrace *Saraya* and the variety *Wadi Quraiyat 308* while at the longer interval highest grain yields were found in the landraces *Saraya* and *Walidi*. The landraces *Missani* and *Cooley* had the highest straw yields.

At *Balad Seet* about 55% of the 385 fields received annual inputs of 100-500 kg N ha⁻¹ and 26% of 500-1400 kg N ha⁻¹, 19% that were under fallow did not receive any N. Phosphorus was applied annually at 1-90 kg ha⁻¹ on 46% of the fields, whereas 27% received 90-210 kg ha⁻¹. 27% of the fields received no K, while 32% obtained 1-300 kg K ha⁻¹ and the remaining ones up to 1400 kg ha⁻¹. At *Maqta* N-inputs were 61-277 kg ha⁻¹ in palm groves and 112-225 kg ha⁻¹ in wheat (*Triticum* sp.) fields, respective P inputs were 9-40 kg ha⁻¹ and 14-29 kg ha⁻¹, and K inputs 98-421 kg ha⁻¹ and 113-227 kg ha⁻¹. For cropland, partial oasis balances (comprising inputs of manure, mineral fertilizers, N₂-fixation, irrigation water and outputs of harvested products) were with per hectare

surpluses of 131 kg N, 37 kg P and 84 kg K in Balad Seet (totalling 4.6 ha) and of 136 kg N, 16 kg P and 66 kg K in Maqta (0.4 ha) similar. Respective palm groves balances, in contrast, were with 303 kg N, 38 kg P and 173 kg K ha⁻¹ (on 8.8 ha in Balad Seet) and 84 kg N, 14 kg P and 91 kg K ha⁻¹ (on 3.6 ha in Maqta) remarkably different. The data show that both oases are presently large sinks for nutrients and potential sources for gaseous and leaching losses, which could be controlled by a decrease in nutrient input intensity.

8. ملخص (Zusammenfassung in Arabisch)

سلطنة عمان تنتمي الى البلدان الأكثر جفافا حيث لا يتجاوز معدل الأمطار السنوي 100 مم الأمر الذي أدى الى أن المساحة المستثمرة زراعياً لا تتجاوز 0,1 بالمائة من المساحة الكلية للسلطنة. ولقد أمكن إقامة القرى والمستوطنات الحالية في مناطق ذات مواقع ملائمة من الناحية الهيدرولوجية سمحت بإنشاء أنظمة الري المنتشرة على نطاق واسع في عمان والتي تدعى بالأفلاج. منذ بداية السبعينات بدأت في عمان عملية تحديث شاملة مستمرة مما كان له الأثر السلبي على مناطق الزراعات التقليدية (الواحات الجبلية) ومقوماتها الزراعية وبالتالي أخذت تفقد هذه المواقع دورها الرئيسي كمصدر للعيش معتمدة بشكل رئيسي على أسواق المناطق المجاورة في سد احتياجاتها الغذائية. أهداف الأبحاث الزراعية التي أجريت في إطار مشروع شامل يحمل اسم توثيق الواحات العمانية هي دراسة وتوثيق كيفية عمل هذا النوع من الأنظمة الزراعية التقليدية ومحاولة تفسير العوامل التي أدت الى استدامتها عبر مئات السنين من خلال دراسة مستوى إنتاجية ومدى فعالية استخدام الموارد في مثل هذه الأنظمة كفعالية استخدام مياه الري بالإضافة إلى دراسة دورة العناصر الغذائية. لقد تم من خلال هذا المشروع المشترك, المتعدد التخصصات والممول من مؤسسة البحوث الألمانية تحت تسمية "عمليات التحول الحاصلة على الواحات العمانية" دراسة قريتي بلد سبت ومقطع الجبلتين تقع. بلد سبت على ارتفاع 996 مترا عند بداية وادي بني عوف العلوية في سلسلة جبال الحجر الغربي وهي مأهولة بدون انقطاع منذ حوالي 3000 سنة ويسكنها حاليا 632 نسمة يقومون بزراعة 4,6 هكتارات من المصاطب الزراعية التي يزرع القسم الأكبر منها على مدار السنة بالإضافة الى 2800 نخلة موزعة على مساحة 8,8 هكتار والتي تروى بواسطة خمسة أفلاج تنقل مياه الينابيع المنبثقة من الجبال المحيطة. من أجل سد الحاجيات المحلية يوجد في بلد سبت حوالي 200 رأس من الأغنام والماعز بالإضافة إلى 35 رأس من الأبقار.

أما قرية مقطع فتقع على ارتفاع 1000 متر في وادي خبة بجبل وادي بني جابر الواقعة في سلسلة جبال الحجر الشرقي وتتميز بتناثر مزارعها وبعدها عن بعضها البعض نسبياً على عكس بلد سبت التي تتميز بقرب مزارعها وبتجمعها حول المساكن. يسكن مقطع حوالي 200 نسمة يملكون 2100 نخلة متوزعة على مساحة 2,9 هكتار بالإضافة إلى 1,6 هكتار من المصاطب الزراعية لم يزرع منها سنة 2003 سوى 0,4 هكتار بسبب موجة الجفاف المستمرة منذ عدة سنوات. إلا أن أغلب سكان مقطع يعتمدون في كسب رزقهم على رعي الأغنام والماعز في الجبال المحيطة, لذلك يضطرون للإقامة في مساكن مؤقتة هناك وليس في القرية التي تخلو في معظم الأوقات من سكانها إلا من تلاميذ المدارس والمسنين.

من أجل القيام بالأبحاث المدرجة وخاصة منها حصر الأسمدة والمحاصيل الزراعية اللازمة لقياس وحساب دورة وميزانية العناصر الغذائية كان لا بد من اعداد خارطة مفصلة ودقيقة لمنطقتي البحث. من أجل ذلك تم أخذ صور جوية بواسطة كاميرا يمكن التحكم بها عن بعد مربوطة إلى بالون يستخدم غاز الهليوم للتخليق على ارتفاع يقارب ال 500 متر. بعد ذلك تم ادخال هذه الصور إلى برنامج يمكن من ربط البيانات والمعلومات المتوفرة بالمناطق الجغرافية التي جمعت منها أو ما يدعى باختصاراً (GIS) ومن ثم تم إضافة الأبعاد الجغرافية الحقيقية للخارطة باستخدام نظام التحديد الجغرافي أو ما يدعى (GPS). من أجل حساب ميزانية العناصر الغذائية على مستوى الحقول والمزارع وعلى مستوى القرية أو الواحة ككل كان من الضروري حساب كمية العناصر الغذائية الداخلة الى النظام الزراعي مقابل تلك التي تخرج منه وخاصة النيتروجين, الفوسفور والبوتاسيوم وذلك بواسطة حصر كل كميات الأسمدة العضوية والكيماوية المدخلة إلى النظام الزراعي بالإضافة إلى المدخلات عن طريق مياه الري والنروجين الهوائي المثبت بواسطة البرسيم الحجازي مقابل العناصر التي تخرج على شكل محاصيل حقلية مختلفة وتمور.

من أجل تقدير كمية النيتروجين الهوائي المثبت بواسطة العقد الأزوتية للبرسيم الحجازي تم إجراء تجربة في بلد سبت باستخدام طريقة تمديد نظائر النيتروجين (^{15}N -Isotopes - isotop dilution) حيث تم مقارنة البرسيم الحجازي مع القمح و الذرة البيضاء كشاهدان كونهما لا يثبتان النيتروجين الهوائي. وقد تبين أن البرسيم الحجازي يثبت كمية كبيرة من النيتروجين الهوائي تصل إلى 480 كغ في السنة لكل هكتار الأمر الذي لم يكن متوقفاً.

كما تم قياس كمية المياه المنبتة عن الينابيع الموجودة في بلد سبت (شهرياً) ومقطع (كل شهرين) لتحديد كمية المياه التي تتساقط من كل عين والتغيرات التي تطرأ على هذه الكمية مع مرور الوقت ومدى التغير وسرعة تأثر هذه الكمية بعد هطول الأمطار التي تم قياسها أيضاً حين حدوثها. وقد تم تحليل عينات من مياه الري لتحديد جودتها والعناصر الغذائية الرئيسية المنحلة فيها. بسبب فترة الجفاف اللتي تمر بالمنطقة نقصت كمية المياه الكلية في بلد سبت على طوال فترة الدراسة بنسبة 22 بالمائة بينما بلغت كمية النقصان في مقطع لنفس الفترة 47 بالمائة .

من بين الأبحاث, أقيمت في بلد سبت تجربة حقلية لمقارنة محصول خمسة أصناف قمح محلية تم جمعها من بلد سبت ومقطع مع ثلاثة أصناف محسنة باستخدام فترتين للسقاية وهي 18 و 27 يوماً. لدى نباتات فترة الري الأقصر (18 يوماً) كان محصول الحبوب للصنف المحلي سريعة والصنف المحسن وادي قريات هو الأفضل بينما كان محصول الحبوب للصفين المحليين سريعة و وليدي هو الأعلى لدى استخدام فترة الري الأطول (27 يوماً). و وجدت أعلى محاصيل القش (التبن) لدى الصنفين المحليين ميساني وكولي وذلك لدى فترتي الري القصيرة والطويلة.

عند حساب ميزانية العناصر الغذائية في بلد سبت تبين أن المدخلات كانت أعلى بكثير من المخرجات وذلك لدى كل من مزارع المحاصيل الحقلية و مزارع النخيل. في أثناء فترة البحث حصلت نسبة 55 بالمائة من مجموع 385 حقلًا في بلد سبت مدخلات سنوية للنيتروجين تتراوح ما بين 100-500 كغ للهكتار ونسبة 25 بالمائة 500 – 1400 كغ للهكتار ونسبة 11 بالمائة لم تحصل على أية مدخلات للنيتروجين. و حصلت نسبة 46 بالمائة من الحقول على مدخلات سنوية من الفوسفور تتراوح بين 1 – 90 كغ للهكتار بينما نسبة 27 بالمائة من الحقول حصلت على مدخلات فوسفور تتراوح بين 90 و 210 كغ للهكتار. بينما لم تحصل 27 بالمائة من الحقول على أية مدخلات من الفوسفور. وقد بقيت أيضاً 27 بالمائة من الحقول بدون مدخلات للبتاسيوم بينما حصلت نسبة 32 بالمائة من الحقول مدخلات بوتاسيوم تتراوح بين 1 و 300 كغ للهكتار والباقي من الحقول حصلت على مدخلات من البوتاسيوم تصل إلى 1400 كغ للهكتار.

فيما يخص مزارع المحاصيل الحقلية في بلد سبت بلغت ميزانية العناصر الغذائية الناتجة عن طرح المخرجات على شكل محاصيل حقلية من المدخلات على شكل سماد عضوي ومركب (كيماوي) و بالإضافة إلى كميات النيتروجين الهوائي المثبتة من قبل البرسيم والعناصر المنحلة في مياه الري كميات فائضة تساوي 131 كغ للهكتار لعنصر النيتروجين و 37 كغ للهكتار لعنصر الفوسفور و 84 كغ للهكتار لعنصر البوتاسيوم. أما في مقطع فقد بلغ هذا الفائض للنيتروجين 136 كغ للهكتار و للفوسفور 16 كغ للهكتار و للبتاسيوم 66 كغ للهكتار. في مقابل ذلك بلغت ميزانية العناصر الغذائية لدى مزارع النخيل في بلد سبت 303 كغ في الهكتار لعنصر النيتروجين و 38 كغ في الهكتار لعنصر الفوسفور و 173 كغ للهكتار لعنصر البوتاسيوم أما في مزارع النخيل في مقطع فقد بلغ هذا الفائض 84 كغ في الهكتار للنيتروجين و 14 كغ في الهكتار للفوسفور و 91 كغ في الهكتار للبتاسيوم.

لقد أظهرت النتائج بأنه يتشكل في كلا الواحتين فائضاً كبيراً من العناصر الغذائية (النيتروجين, الفوسفور, البوتاسيوم) حيث تشكلت مجعماً لهذه العناصر مما يجعلها مصدراً لفقدان العناصر على شكل غازي أو عن طريق التسرب إلى أعماق التربة بعد الري والأمطار القوية عند حصولها رغم ندرتها. ويمكن التقليل من هدر هذه العناصر عن طريق تقنين كمية المدخلات بشكل يتلائم مع أنواع المزرعات المختلفة من أجل تقليل الهدر و حماية للبيئة.

9. Literaturverzeichnis

- Abdulrahman, N., Tawakul, M. und Franz, J., 1985. Grundwasservesorgungs-Dämme in Oman, Nr. 1: Damm des Wadi Al-Khod, Ministerium für Landwirtschaft und Fischerei, Oman (in Arabisch).
- Abdel-Rahman, H. A. and Omezzine, A., 1996. Aflaj water resources management: Tradable water rights to improve irrigation productivity in Oman. *Water International* 21, 70-75.
- Ahmad, I. S. A., Al-Gharibi, K. N., Daar, A. S. and Kabir, S., 1995. The composition and properties of date proteins. *Food chemistry* 53, 441-446.
- Alhajri, M. N., 1998. Aflaj-System in Oman und seine Rolle für die Entwicklung. Erste Ausgabe (in Arabisch).
- Al-Ismaily, H. and Probert, D., 1998. Water-resource facilities and management strategy for Oman. *Applied Energy* 61 (3)125-146.
- Alkhanjari, S., Hammer, K., Buerkert, A. and Al-Maskri, A., 2003. A survey of wheat landraces in Oman; submitted.
- Al-Lawati, A. H., 2004. Plant genetic resources of Oman documentation system, 2 Seiten, <http://apps3.fao.org/wiews/Morocco/Paper7.htm>.
- Allen Calvin H. Jr., 1987. The modernisation of the Sultanate of Oman. Profiles/Nations of the contemporary of the Middle East. Westview Press, Inc.
- Al-Maskri, M., Nagieb, M., Hammer, K., Filatenko, A. A., Khan, I. and Buerkert, A., 2003. A note about *Triticum* in Oman. *Genetic Resources and Crop Evolution* 50 (1), 83-87.
- Al-Wadhahi, S. H., 1996. Water resources development strategies in the Sultanate of Oman: beyond 2000. Dissertation submitted to the development planning unit University College London.
- Anonymous, 2000. Wheat cultivation in Oman (Arabisch). Nashra irshadiya, ministry of agriculture and fisheries, Oman extension guideline, Sultanate of Oman.
- Asche, H., 1981. Al Masna'ah und Hazm. Aspekte des neuzeitlichen Wandels traditionaler südost-arabischer Oasentypen. *Geographische Rundschau* 33, 52-57.
- Ayers, R.S. and Westcot, D.W., 1985. Water quality for agriculture, FAO – Irrigation and Drainage Paper 29, FAO, Rome (<http://www.fao.org/DOCREP/003/T0234E/T0234E00.HTM#TOC>).
- Baijukya, F. P. and de Steenhuijsen Piters, B., 1998. Nutrient balances and their consequences in the banana-based land use systems of Bukoba district, northwest Tanzania. *Agric. Ecosystems Environment* 71, 147-158.
- Bait-Ishaq, H. J. I., 1995. The use of geographic information systems and remote sensing in identifying the relationships between Oman's changing water level, water quality and land use. Thesis submitted for the degree of master of science, University of Durham.
- Banerjee, B., Pathak, H. and Aggarwal, P. K. 2002. Effects of dicyandiamide, farmyard manure and irrigation on crop yields and ammonia volatilization from an alluvial soil

- under a rice (*Oryza sativa* L.)-wheat (*Triticum aestivum* L.) cropping system. *Biology and Fertility of Soils* 36(3), 207-214.
- Bergmann, W., 1988. *Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, pp. 762.
- Birks, J. S., 1978a. The mountain pastoralists of the Sultanate of Oman. *Development and Change* (The Hague) 9, 71-86.
- Birks, J. S., 1978b. Development or decline of pastoralists: The Bani Qitab of the Sultanate of Oman. *Arabian Studies* 4, 7-19.
- Birks, J. S. and Letts, S. E., 1977. Diqal and Muqida: Dying oasis in Arabia. *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie* 68, 145-151.
- Brouwer, J. and Powell, J.M., 1998. Increasing nutrient use efficiency in West-African agriculture: the impact of micro-topography on nutrient leaching from cattle and sheep manure. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 71, 229-239.
- Busenberg, E., Plummer, L.N., 2000. Dating young groundwater with sulfur hexafluoride: Natural and anthropogenic sources of sulfur hexafluoride. *Water Resources Research* 36 (10), 3011-3030.
- Butterbach-Bahl, K., Stange, F., Papen, H. and Li, C., 2001. Regional inventory of nitric oxide and nitrous oxide emissions for forest soils of Southeast Germany using the biogeochemical model PnET-N-DNDC. *Journal of Geophysical Research* 106, 34155-34166.
- Cai, G., Chen, D., White, R. E., Fan, X. H., Pacholski, A., Zhu, Z. L. and Ding H., 2002. Gaseous nitrogen losses from urea applied to maize on a calcareous fluvo-aquic soil in the North China Plain. *Australian Journal of Soil Research* 40(5), 737-748.
- Carrillo, JM., 1993. Variability of glutenin proteins in Spanish durum wheat landraces. Durum wheat quality in the Mediterranean region. *Proceedings of the seminar, Zaragoza, Spain, 17-19 November 1993. Options Mediterraneennes. Serie A, Seminaires Mediterraneens.* 1995, No. 22, 143-147.
- Cost, P. M., 1983. Notes on traditional hydraulics and agriculture in Oman. *World Archaeology*, 14, 273-295.
- Dambroth, M., 1990. Überlegungen zur europäischen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der pflanzengenetischen Ressourcen; in: *Gemeinsames Kolloquium, Sicherung und Nutzbarmachung pflanzengenetischer Ressourcen, 1990, Braunschweig-Gatersleben.*
- Danso, S. K. A., Hardarson, G. and Zapta, D., 1993. Misconceptions and practical problems in the use of ¹⁵N soil enrichment technique for estimating N₂ fixation. *Plant and Soil*, 152, 25-52.
- Dash, S. and Monhany, N., 2001. Evolution of assays for the analysis of thermotolerance and recovery potentials of seedlings of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Journal of Plant Physiology* 158, 153-165.

- De Jaeger, A., Kariuku, I., Matiri, F. M., Odendo, M. and Wanyamana, J.M. 1998b. Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON). IV. Linking nutrient partial balances and economic performance in three districts in Kenya. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 71, 215-228.
- De Jaeger, A., Nandwa, S. M. and Okoth, P.F. 1998a. Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON). I. Concepts and methodologies. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 71, 37-48.
- Diederichsen, A., 1996. Coriander (*Coriandrum sativum* L.). Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. IPK and IPGRI, Gatersleben and Rome, 83pp.
- Dorvlo, A. S. S. and Ampratwum, D. B., 1998. Summary climatic data for solar technology development in Oman. *Renewable Energy* 1-4, 255-262.
- Dorvlo, A. S. S., Ampratwum, D. B., 1999. Modelling of weather data for Oman. *Renew. Energy* 17, 421-428.
- Dotlacil, L., Hermuth, J., Tisova, V., Brindza, J. and Debre, F., 2000. Yield potential and stability in selected winter wheat landraces and obsolete cultivars of European origin. *Rostlinna Vyroba*, 46 (4) 153-158.
- Dutton, R. W., 1986. Agriculture and the Future of Aflaj in Oman. Brismes: Proceedings of the 1986 international conference on Middle Eastern studies. Oxford 1986, 349-358.
- Dutton, R. W., 1987. Updating agriculture and associated rural enterprises. B. R. Pridham (ed.): Oman: economic, social and strategic developments. London 1987, 94-117.
- Eckelmann, S. B. J. 2002. Biodiversität der Gattung *Ocimum* L., insbesondere der Kultursippen. Diss. Uni Kassel, 152pp. + Anhang.
- Esse, P.C., Buerkert, A., Hiernaux, P. and Assa, A., 2001. Decomposition of and nutrient release from ruminant manure on acid sandy soils in the Sahelian zone of Niger, West Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 83, 55-63.
- FAO, 1997. FAOSTAT agriculture database. FAO, Rome, Italy. Accessible at: <http://www.fao.org>.
- FAOa, 1997. Irrigation in the Near East region in figures. FAO, Rom, Italy. Accessible at: <http://www.fao.org>.
- Fernández-Rivera, S., Williams, T. O., Hiernaux, P. and Powell, J. M., 1995. Faecal excretion by ruminants and manure availability to crop production in semi-arid West Africa. pp. 149-170. In J M Powell, S Fernández-Rivera, T O Williams and C Renard (eds.). Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sub-Saharan Africa. Volume II, Technical Papers. Proceedings of a conference at ILCA, Addis Ababa, Ethiopia, 22-26 November 1993.
- Flitner, M., 1995. Sammler, Räuber und Gelehrte, Die politischen Interessen an pflanzengenetischen Ressourcen 1895-1995; Campus Verlag Frankfurt.

- Garnier, M. and J. M. Bove, 2000. Etiology of witches' broom disease of lime (WBDL). International Citrus Congress (9th : 2000 : Orlando, Florida), 2003. p. 939-941.
- Gericke S. and Kurmies B., 1952. Die kolorimetrische Phosphorsäurebestimmung mit Ammonium-Vandadat-Molybdat und ihre Anwendung in der Pflanzenanalyse. Zeitschrift für Düngung, Pflanzenernährung und Bodenkunde 59, 235-247.
- Gladis T., und Hammer, K. 1994. Über die Notwendigkeit der Erhaltung Pflanzengenetischer Ressourcen. Vorträge für Pflanzenzüchtung 27, 231-243.
- Glennie KW, Boeuf MGA, Hughes Clarke MW, Moody-Stuart M, Pilaar WFH & Reinhardt BM, 1974. Geology of the Oman mountains. Verhandelingen Koninklijk Nederlands geologisch mijnbouwkundig Genootschap 31, 423pp.
- Guarino, L., 1990. Crop collecting in the Sultanate of Oman in the context of the Arabian Peninsula. PGR Newsletter 77, 27-33.
- Haby, V. A., Davis, J.V., Leonard, A.T., 1999. Response of overseeded alfalfa and bermudagrass to alfalfa row spacing and nitrogen rate. Agronomy Journal 91 (6), 902-910.
- Hammer, K., 1993. Generosion aus Genbank-Sicht; in: Vorträge für Pflanzenzüchtung, Heft 25; Erhaltung und Nutzung pflanzengenetischer Ressourcen – eine internationale Aufgabe für Naturschützer, Genbanken und Pflanzenzüchter, Tagungsbericht 27./31. Oktober 1992, Putbus.
- Hammer, K., 1990. Sammlung pflanzengenetischer Ressourcen für die Genbank in Gatersleben; in: Gemeinsames Kolloquium, Sicherung und Nutzbarmachung pflanzengenetischer Ressourcen, 1990, Braunschweig-Gatersleben, Germany.
- Hammer, K., 1998. Schriften zu Genetischen Ressourcen, Band 10; Agrarbiodiversität und pflanzengenetische Ressourcen, ZADI, Bonn.
- Hammer, K. et al., 2004a. Eine Checkliste der Kulturpflanzen in der Bergoase *Balad Seet*, Oman; zur Veröffentlichung eingereicht
- Hammer, K. et al., 2004b. Emmer (*Triticum dicoccon* Schrank) in Oman. Genetic Resources and Crop Evolution 51, 111-113.
- Hamuda, A., Maki, M. and Al-Abri, A., 1998. Date palms: Varieties in the Sultanat of Oman, diwan – general authority for agriculture, Vol. 2, Muscat, Oman.
- Harris, F. M. A., 1998. Farm-level assessment of the nutrient balance in northern Nigeria. Agriculture, Ecosystems and Environment 71, 201-214.
- Häser, J., 2003. Archaeological results of the 1999 and 2000 survey campaigns in Wadi Bani Auf and the region of al-Hamra (Central Oman). Proceedings of the Seminar for Arabian Studies 33 (2003), 21-30.
- Hauser, S., 1987. Schätzung der symbiotisch fixierten Stickstoffmenge von Ackerbohnen (*Vicia faba* L.) mit erweiterten Differenzmethoden. Diss. (agr.) Universität Göttingen, Germany.

- Hoy, M. D., Moore, K. J., George, J. R. and Brummer, E. C., 2002. Alfalfa yield and quality as influenced by establishment method. *Agronomy Journal* 94, 65-71.
- Ibrahim, W. M. J., 1999. Geographische Erscheinungsbilder der landwirtschaftlichen Produktion in Sultanat von Oman, Fakultät für Literatur, Sultan Qaboos Universität, Oman (in Arabisch).
- IFA, 2004. World Fertilizer Use Manual. International Fertilizer Industry Association (IFA) 1996-2004, Paris, France <http://www.fertilizer.org/ifa/publicat/html/pubman/manual.htm>.
- Keller, E. R., Hanus, H. and Heyland, K. N., 1999. Handbuch des Pflanzenbaues. Bd. 3: Knollen- und Wurzelfrüchte, Körner- und Futterleguminosen. Verlag E. Ulmer, Stuttgart-Hohenheim.
- Kellner, D. J., Vessey, K. and Entz M. H., 1997. The nitrogen dynamics of 1-, 2- and 3-years stands of alfalfa in cropping system. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 64, 1-10.
- Kipfer, R., Aeschbach-Hertig, W., Peeters, F. and Stute, M., 2002. Noble gases in lakes and ground waters. In: Noble gases in geochemistry and cosmochemistry, Vol. 47 (ed. D. Porcelli, C. Ballentine, and R. Wieler), pp. 615-700. Mineralogical Society of America, Geochemical Society.
- Ko, J.-Y. and Kang, H.-W., 2000. The effects of cultural practices on methane emission from rice fields. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 58, 311-314.
- Kürschner, H., 1986. Omanisch-markanische Disjunktionen. Ein Beitrag zur pflanzengeographischen Stellung und zu florengeographischen Beziehungen Omans. *Botanisches Jahrbuch für Systematik* 106, 541-562.
- Kyzeridis, N., Biesants, A. and Limberg P., 1995. Comparative trials with durum-wheat landraces and cultivars in different ecological environments in the Mediterranean region. *Journal of Agronomy and Crop Science* 174 (2), 133-144.
- Länderbericht, 1995. Oman, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Metzler-Poeschel, Stuttgart, Germany.
- Legard, S. F., Simpson, J. R., Freney, L. R. and Bergerson, F. J., 1985. Field evaluations of ¹⁵N techniques for estimating nitrogen fixation in legume-grass associations. *Australian Journal of Agricultural Research* 36, 247-258
- Luedeling, E., Nagieb, M., Wichern, F., Brandt, M., Deurer, M. and Buerkert, A., 2005. Irrigation and physico-chemical properties of man-made terrace soils in a mountain oasis of northern Oman. *Geoderma* (zur Veröffentlichung angenommen).
- Maaß, H. I., 1996. Biologische Basisdaten zu *Cichorium intybus* und *Medicago sativa*. Umweltbundesamt Berlin, Heft 50/96.
- MAF, 1995. The progression of agriculture and fisheries development from 1970 to 1995. Ministry of Agriculture and Fisheries, Sultanate of Oman.

- Mahmood, T., Tahir, G.R., Malik, K.A. and Shamsi, S.R.A. 1997. Denitrification losses from an irrigated sandy-clay loam under a wheat-maize cropping system receiving different fertilizer treatments. *Biology and Fertility of Soils* 26 (1), 35-42.
- Mariotti, A., 1983. Atmospheric nitrogen is a reliable standard for natural ¹⁵N abundance measurements. *Nature* 303, 685-687.
- Marschner H., 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd edition. Academic Press. London.
- Mcauliffe, C., Chamblee, D.S., Uribe-Arango, H. and Wooshouse, W.W., JR., 1958. Influence of inorganic nitrogen on nitrogen fixation by legumes as revealed by N. *Agronomy Journal* 50, 334-337.
- Mengel, K., 1994. Symbiotic dinitrogen fixation – Its dependence on plant nutrition and its eco - physiological impact. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 157, 233-241.
- Mix-Wagner, G., 1990. *In vitro* Erhaltung pflanzengenetischer Ressourcen. In: Gemeinsames Kolloquium, Sicherung und Nutzbarmachung pflanzengenetischer Ressourcen, 1990, Braunschweig – Gatersleben, Germany.
- Monteiro, A.L.G., Costa, C. and Silveira, A.C. 1998. Dry matter production and seasonal distribution and chemical composition of alfalfa cultivates (*Medicago sativa* L.). *Revista Brasileira de Zootecnia – Brazilian Journal of Animal Science* 27 (5), 868-874.
- Mountjoy, D. C. and Gliessman, S. R., 1988. Traditional management of a hillside agroecosystem in Tlaxcala, Mexico: an ecologically based maintenance system. *American Journal of Alternative Agriculture* 3, 3-10.
- Nagieb, M., Häser, J., Siebert, S., Luedeling, E. and Buerkert, A., 2004. Settlement history of a mountain oasis in northern Oman – Evidence from land use and archaeological studies *Die Erde* 1/2004 (im Druck).
- Norman, W. R., Shayya, W. H., Al-Ghafri, A. S. and McCann, I. R., 1998. Aflaj irrigation and on-farm water management in northern Oman. *Irrigation and Drainage Systems* 12, 35-48.
- Oliveira, JA., 2001. North Spanish emmer and spelt wheat landraces: agronomical and grain quality characteristic evaluation. *Plant Genetic Resources Newsletter*. No. 125, 16-20.
- Ottman, M.J., Tickes, B.R. and Roth, R.L., 1996. Alfalfa yield and stand response to irrigation termination in an arid environment. *Agronomy Journal* 88 (1), 44-48.
- Pecetti, L. and Annicchiarico, P., 1993. Grain yield and quality of durum wheat landraces in a dry Mediterranean region of northern Syria. *Plant Breeding* 110 (3), 243-249.
- Pecetti, L., Boggini, G. and Gorham, G., 1994. Performance of durum wheat landraces in a Mediterranean environment (eastern Sicily). *Euphytica*. 1994, 80 (3), 191-199.
- Petersen, S.O., Lind, A.M. and Sommer, S.G., 1998. Nitrogen and organic matter losses during storage of cattle and pig manure. *Journal of Agricultural Science* 130, 69-79.

- Powell, J. M., Fernandez-Rivera, S., Hiernaux, P. and Turner, M. D., 1996 Nutrient cycling in integrated rangeland/cropland systems of the Sahel. *Agricultural Systems* 52, 143-170.
- Rehm, S. and G. Espig, 1991. *The Cultivated Plants of the Tropics and Subtropics*. Verlag Josef Margraf.
- Rehm, S., 1989. *Spezieller Pflanzenbau in den Tropen und Subtropen*. 2., völlig Neubearb. und erw. Auflage. Verlag E. Ulmer, Stuttgart-Hohenheim.
- Schlecht, E., Mahler, F., Sangaré, M., Susenbeth, A. and Becker, K., 1995 Quantitative and qualitative estimation of nutrient intake and faecal excretion of zebu cattle grazing natural pasture in semi-arid Mali. pp. 85-97. In: J M Powell, S Fernández-Rivera, T O Williams and C Renard (eds.). *Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sub-Saharan Africa*. Volume II, Technical Papers. Proceedings of a conference at ILCA, Addis Ababa, Ethiopia, 22-26 November 1993.
- Schlosser, P., Stute, M., Dörr, C., Sonntag, C., and Münnich, K. O., 1988. Tritium/³He-dating of shallow groundwater. *Earth Planet Science Letters* 89, 353-362.
- Schmidtke, K., 1997. Einfluß von Rotklee (*Trifolium pratense* L.) in Reinsaat und Gemenge mit Poaceen auf symbiotische N₂-Fixierung, bodenbürtige N-Aufnahme und CaCl₂-extrahierbare N-Fractionen im Boden. Diss. (agr.) Universität Gießen, Germany.
- Scholz, F., 1984. Falaj-Oasen in Sharqiya, Inner-Oman. *Die Erde* 115, 273-294.
- Scholz, F., 1977. Sultanat Oman: Ein Entwicklungsland im Südosten der arabischen Halbinsel. Beschreibung der Entwicklung vor und nach 1970 und Versuch einer Analyse der Hintergründe und Perspektiven. *Die Erde* 108, 23-72.
- Scholz, F., 1982. Landverteilung und Oasensterben, das Beispiel der omanischen Küstenebene "Al Batinah". *Erdkunde* 36, 199-207.
- Scholz, F., 1993. Falaj-Oman Lebensquelle in der Vergangenheit. Oman: Weihrauch und Erdöl. *Landeskunde und Reisehandbuch*. Lucerne 1993, 209-219.
- Scholz, F., 1999. Die kleinen Golfstaaten. *Perthes Länderprofile, Geographische Strukturen, Entwicklungen, Probleme*, Klett-Perthes, Gotha und Stuttgart.
- Schouw, N.L., Danteravanich, S., Mosbaeka, H. and Tjella, J.C., 2002. Composition of human excreta - a case study from southern Thailand. *The Science of the Total Environment* 286, 155-166.
- Schwartz O., 1939. *Flora des tropischen Arabien*. Mitteilungen aus dem Institut für allgemeine Botanik in Hamburg, 10, 393 pp.
- Siebert, S., Häser, J., Nagieb, M., Korn, L. and Buerkert, A., 2004. Agricultural, architectural and archaeological evidence for the role and ecological adaptation of a scattered mountain oasis in Oman. *Journal of Arid Environments* (accepted).
- Smaling, E.M.A. and Fresco, L.O., 1993. A decision-support model for monitoring nutrient balances under agricultural land use (NUTMON). *Geoderma* 60, 235-256.

- Smaling, E.M.A., Fresco, L.O. and de Jaeger, A., 1996. Classifying, monitoring and improving soil nutrient stocks and flows in African agriculture. *Ambio* 25, 492-496.
- Smaling, E.M.A., Stoorvogel, J.J. and Windmeijer, P.N., 1993. Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. II. District scale. *Fertilizer Research* 35, 237-350.
- Solomon, D. K. and Cook, P. G., 2000. ^3H and ^3He . In: *Environmental tracers in subsurface hydrology* (ed. P. Cook and A. L. Herczeg), pp. 397-424. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Sparrow, D. S., Cochran, V. L. and Sparrow E. B., 1995. Dinitrogen Fixation by seven Legume Crops in Alaska. *Agronomy Journal*, 87, 34-41.
- Stoorvogel, J.J. and Smaling, E.M.A., 1994. Assessment of soil nutrient depletion in sub-Saharan Africa: 1983-2000. Vol. 1. Main Report. The Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands, 137 pp.
- Stülpnagel, R., 1982. Schätzung der von Ackerbohnen symbiontisch fixierten Stickstoffmenge im Feldversuch mit der erweiterten Differenzmethode. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* 151, 446-458.
- Toll, J. A. and Moss, H., 1995. Reporting on germplasm collection missions collecting plant genetic diversity technical guideline, IPGRI 1995. p. 597-613.
- Turner, M. D., 1995. The sustainability of rangeland to cropland nutrient transfer in semi-arid West Africa: ecological and social dimensions neglected in the debate. pp. 435-452. In J M Powell, S Fernández-Rivera, T O Williams and C Renard (eds.). *Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sub-Saharan Africa. Volume II, Technical Papers. Proceedings of a conference at ILCA, Addis Ababa, Ethiopia, 22-26 November 1993.*
- Urban, B. and Buerkert A., 2005. Palaeoecological analysis of a sediment profile in northern Oman. *Palaeogeology, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (submitted).
- Van den Bosch, H., de Jaeger, A. and Vlaming, J., 1998a. Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON). II. Tool development. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 71, 49-62.
- Van den Bosch, H., Gitari, J.N., Ogaro, V.N., Maobe, S. and Vlaming, J., 1998b. Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON). III. Monitoring nutrient flows and balances in three districts in Kenya. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 71, 63-80.
- Victor, R., Al-Farsi, A.A.I., 2001. Water quality and invertebrate fauna of farm wells in an area affected by salinization in Oman. *Journal of Arid Environments* 48, 419-428.
- Wang, B. and Adachi, K., 2000. Differences among rice cultivars in root exudation, methane oxidation, and populations of methanogenic and methanotrophic bacteria in relation to methane emission. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 58, 349-356.

- Wassmann, R., Neue, H.U., Lantin, R.S., Makarim, K., Chareonsilp, N., Buendia, L.V. and Rennenberg, H., 2000. Characterization of methane emissions from rice fields in Asia. II. Differences among irrigated, rainfed, and deepwater rice. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 58, 13-22.
- Wichern, F., Lobe, I., Amelung, W., Müller, T., Joergensen, R.G. and Buerkert, A., 2004a. Changes in amino acid enantiomers and microbial performance in soils from a subtropical mountain oasis in Oman abandoned for different periods. *Biology and Fertility of Soils* 39(6), 398-406.
- Wichern, F., Luedeling, E., Müller, T., Joergensen, R.G. and Buerkert, A., 2004b. Field measurements of the CO₂ evolution rate under different crops during an irrigation cycle in a mountain oasis of Oman. *Applied Soil Ecology* 25, 85-91.
- Wichern, F., Müller, T., Joergensen, R.G. and Buerkert, A., 2004c. Effects of manure quality and application forms on soil C and N turnover of a subtropical oasis soil under laboratory conditions. *Biology and Fertility of Soils* 39 (3), 165-171.
- Wijnhoud, J.D., Konboon, Y. and Lefroy, R.D.B., 2003. Nutrient budgets: sustainability assessment of rainfed lowland rice-based systems in northeast Thailand. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 100, 119-127.
- Wilkinson, J. C., 1974. The organization of the falaj irrigation system in Oman. School of Geography, University of Oxford Research Paper No. 10.
- Wilkinson, J. C., 1977. Water and tribal settlement in South-East Arabia. A study of the aflaj of Oman. Clarendon Press, Oxford, UK, 276 p.
- Xu, H., Cai, Z.C., Jia, Z.J. and Tsuruta, H., 2000. Effect of land management in winter crop season on CH₄ emission during the following flooded and rice-growing period. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 58, 327-332.
- Zhang, H. and Oweis, T., 1999. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management* 38,195-211.
- Zhang, P., Dreisigacker S., Buerkert A., Alkhanjari S., Melchinger A. E. and Warburton M. L., 2004. Genetic diversity and relationships of wheat landraces from Oman investigated with SSR markers (zur Veröffentlichung eingereicht).

10. Anhang

- 10.1. Settlement history of a mountain oasis in northern Oman - Evidence from land use and archaeological studies
- 10.2. Eine Checkliste der Kulturpflanzen in der Bergoase Balad Seet, Oman
- 10.3. A note about Triticum in Oman
- 10.4. Irrigation and Physico-chemical properties of man-made terrace soils in a mountain oasis of northern Oman

10.1

Settlement History of a Mountain Oasis in Northern Oman – Evidence from Land Use and Archaeological Studies

Siedlungsgeschichte einer Bergoase im Nordoman – Untersuchungen zur Landnutzung und Archäologie

Maher Nagieb¹, Jutta Häser², Stefan Siebert¹,
Eike Luedeling¹ and Andreas Buerkert¹

¹ Institute of Crop Science, University of Kassel, Steinstr. 19, D-37213 Witzenhausen

² Deutsches Archäologisches Institut, Orient-Abteilung, Podbielskiallee 69-71, D-14195 Berlin

Abstract

Little is known about the functioning and history of the rapidly decaying ancient mountain oases in Northern Oman. In the *Wadi Bani Awf* with its head oasis *Balad Seet* hydro- and pedological measurements were combined with archaeological surveys to derive a series of comprehensive settlement hypotheses. The main driving force for the dynamic development of this exemplary selected watershed at the northern foot of the *Hajar* mountain range was the availability of an abundant and stable flow of springs. The likely construction of a spring-based *aflaj* irrigation system and of elaborate terraces in the first millennium BC allowed an increasingly efficient water use for the production of dates, wheat and alfalfa. The scarcity of land and water might have been two major driving forces for the development of this mountain oasis over its three millennia of existence.

1. Introduction

Situated at the eastern edge of the Arabian Peninsula (Fig. 1), the Sultanate of Oman has experienced a very rapid modernization process since the early 1970s. Following the political opening and the rapid infrastructural changes triggered by the oil-driven economic boom, desert oasis agriculture – once the backbone of the country's economy, together with fisheries and trade, – has undergone major changes. Due to the aridity of its climate (from 0 to 240 mm annual precipitation compared to a potential evapotranspiration of >2000 mm) agriculture in Oman heavily depends on irrigation. At present about 2% of Oman's total land surface, equivalent to 150,377 ha. is cultivated (Anonymous, 1995). Of this area, about 74% is irrigated by modern sprinkler systems drawing subsurface water from wells (mostly situated in the flat northern coastal area, the Batina region and intensively cropped with modern technologies), 14% by ancient *falaj* systems, 0.4% by springs and the remainder by a combination of the former methods (Ibrahim 1999).

The basic irrigation infrastructure of the complicated, partly underground *falaj* (pl. *aflaj*) systems, a canal that conveys groundwater from the foot of a mountain or another impermeable layer to a distant oasis, has been investigated by several authors (Costa 1983; Dutton 1986; Norman et al. 1998; Omezzine and Lokman 1998; Wilkinson 1974). However, little is known about how these systems have developed over time and how their development may relate to the settlement history of a site. In a recent paper on the regional development of these irrigation systems, are also known as *qanat*, in the Persian zone of influence, Boucharlat (2003) differentiates the *falaj* according to their catchment types. These range from typically deep, underground water-draining galleries for the true *qanat* to shallower *wadi* bed collection systems and also comprise systems

that merely convey the water above-ground from a spring to the fields. It is this latter type that is referred to in the following study.

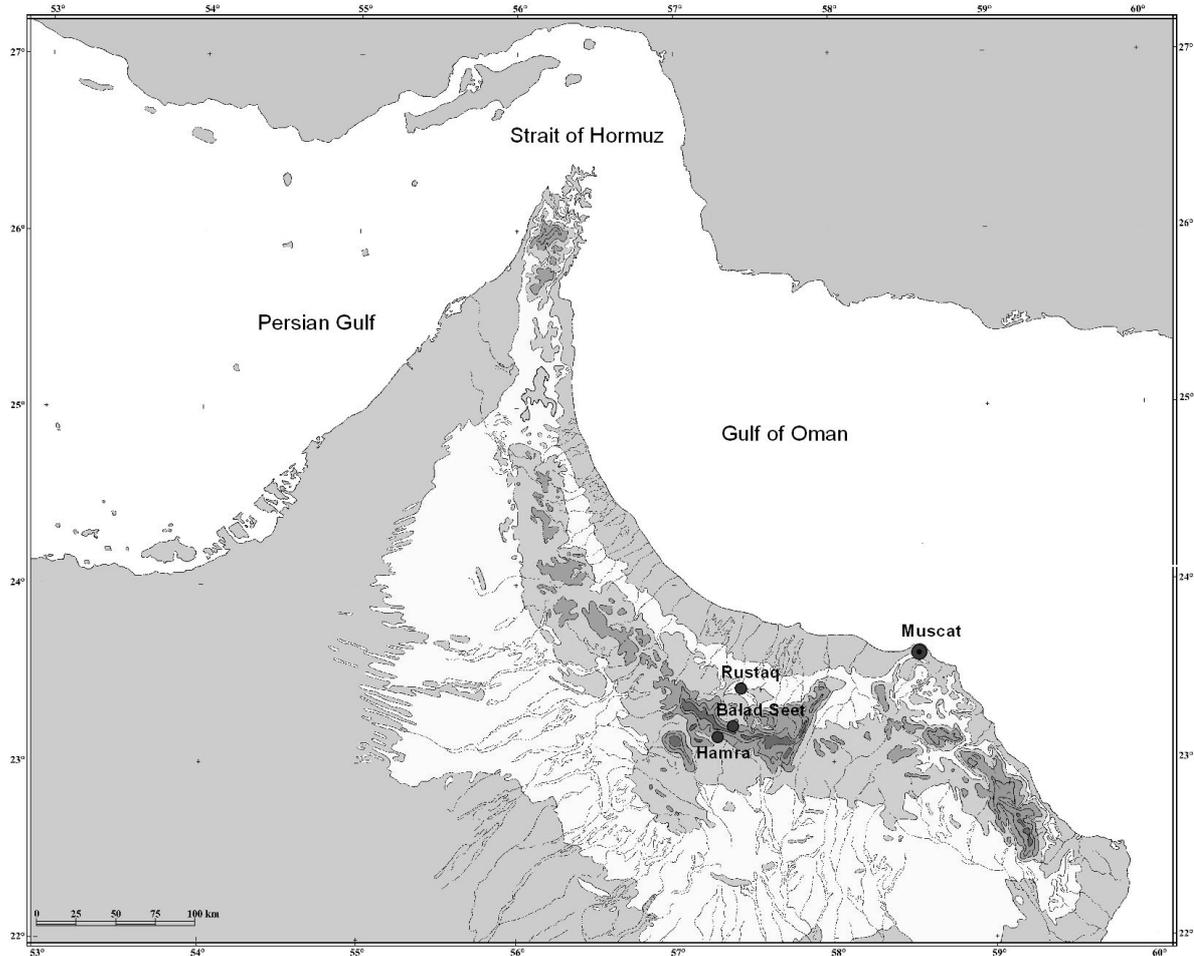


Figure 1. Map of northern Oman showing the major mountain ranges and the research site of Balad Seet together with the towns of Muscat, Rustaq and Hamra. Modified after TAVO, 2001

Research is needed to unravel the settlement history of northern Oman, and clearly the development of the oasis settlements has to be seen in the broader context of cultural development. The earliest oasis settlement in this region is thought to be *Hili 8* in the modern oasis of *Al Ain* in the United Arab Emirates, which was dated to the early 3rd millennium BC (*Cleuziou 1998; Costantini 1980*). It was concluded from charred date stones and imprints of barley, wheat and sorghum in dried mud found at this place, that it had already at this early time a well-organized oasis agriculture. The excavations at *Al Ain* also uncovered a canal that surrounds a large building; however, the underlying mode of irrigation is not yet understood.

Since the *Umm an-Nar* period (2,700 BC, Table 1) many other oasis settlements were established at the eastern and western coast of the Oman Peninsula as well as at the south-western and southern foreland of the *Hajar* mountains. During the *Wadi Suq*

period around 2,000 BC, most of the inland oases were given up for still unknown reasons. During the following 900 years some of the older settlements at the coast were still in use, but in most areas one can only find faint traces of settlements. The many large cemeteries that were discovered, however, provide convincing evidence that these areas were not completely abandoned (*Carter 1997*).

For the Iron Age II period between 1,100 and 600 BC (Table 1), a dramatic rise in the number of settlements has been documented, as well as a shift of settlements from the mountain foreland towards the mountainous regions (*Magee 1999*). Since many of the new established villages were situated very close to traditional *falaj* systems, it seems reasonable to explain the development of oases with the introduction of this intrinsic method of irrigation. There is a long-lasting discussion about the introduction of the *falaj* system to the Oman Peninsula (*Boucharlat 2001*), but the excavations of the last ten years have shown that the old theory of that they were introduced from Iran by the Achaemenians as late as in the 6th century BC is no longer convincing. Still, it remains open to further discussion whether the *falaj* system came from outside or whether it was developed in Oman.

To fill existing gaps of knowledge in the settlement history of oases in northern Oman, an interdisciplinary study engaging archaeologists and agriculturalists was initiated. Its aim was to elucidate the natural and historical bases for the transformation processes of such ancient systems based on detailed topographic, agricultural and hydro-pedological measurements as well as on archaeological findings. The first results of this study, presented below, allow for the development of hypotheses for the millennia-old development of oasis agriculture for a specific section of northern Oman.

Tab 1. Sequence of settlement phases at Balad Seet in the context of archaeological and historic time periods in Oman. The settlement phases partly overlap with the duration of the time periods / Abfolge der Siedlungsphasen in Balad Seet im Vergleich zu den archäologisch und historisch belegbaren Zeitperioden in Oman. Die Siedlungsphasen können teilweise die Dauer der Zeitperioden überlappen

Time period	Duration	Settlement phase
Hafit	3,100–2,700 BC [†]	(1)
Umm an-Nar	2,700–2,000 BC	(1)
Wadi Suq	2,000–1,300 BC	(1)
Iron Age I	1,300–1,100 BC	(1)
Iron Age II	1,100–600 BC	(2) (3)
Iron Age III	600–300 BC	(3)
Late Iron Age		(3)
(<i>Samad</i>)	300 BC–630 AD [‡]	
Early Islamic	630–1,055 AD	(4)
Middle Islamic	1,055–1,500 AD	(5)
Late Islamic	1,500–1,930 AD	(6)
Sub-recent	1,930–1,970 AD	(7)
Recent	1,970–today	(8)

[†] Before the birth of Christ, [‡] After the birth of Christ

2. Materials and methods

2.1. Experimental area

The study area comprises the *Wadi Bani Awf*, a catchment area (watershed) on the northern side of the *Hajar* range of the *Jabal Akhdar* mountains with the small oases of *Fara*, *Qismatayn*, *Wasit*, *Tikha*, *Zamma*, *Salma* and *Hat*. On the southern flank of these mountains, the area extends as far as the villages of *Misfa* and *al-Hamra* (Fig. 2). For centuries *al-Hamra* with its *sheikh* was the traditional political center of the region and a market place for goods from and into the *Wadi Bani Awf* (Ribbeck et al. 1999). The strong contacts across the mountains are also reflected by families living at *al-Hamra* but also owning fields at *Balad Seet* (Mershen 1999; Nagieb personal communication).

Within this area the central observation unit for the agronomic research is the mountain oasis of *Balad Seet* (23.19° N, 57.39° E; 996 m a.s.l.), situated at the upper end of the watershed in a small valley at the foot of a 1000 m high cliff and surrounded by mountains (Photo 1).

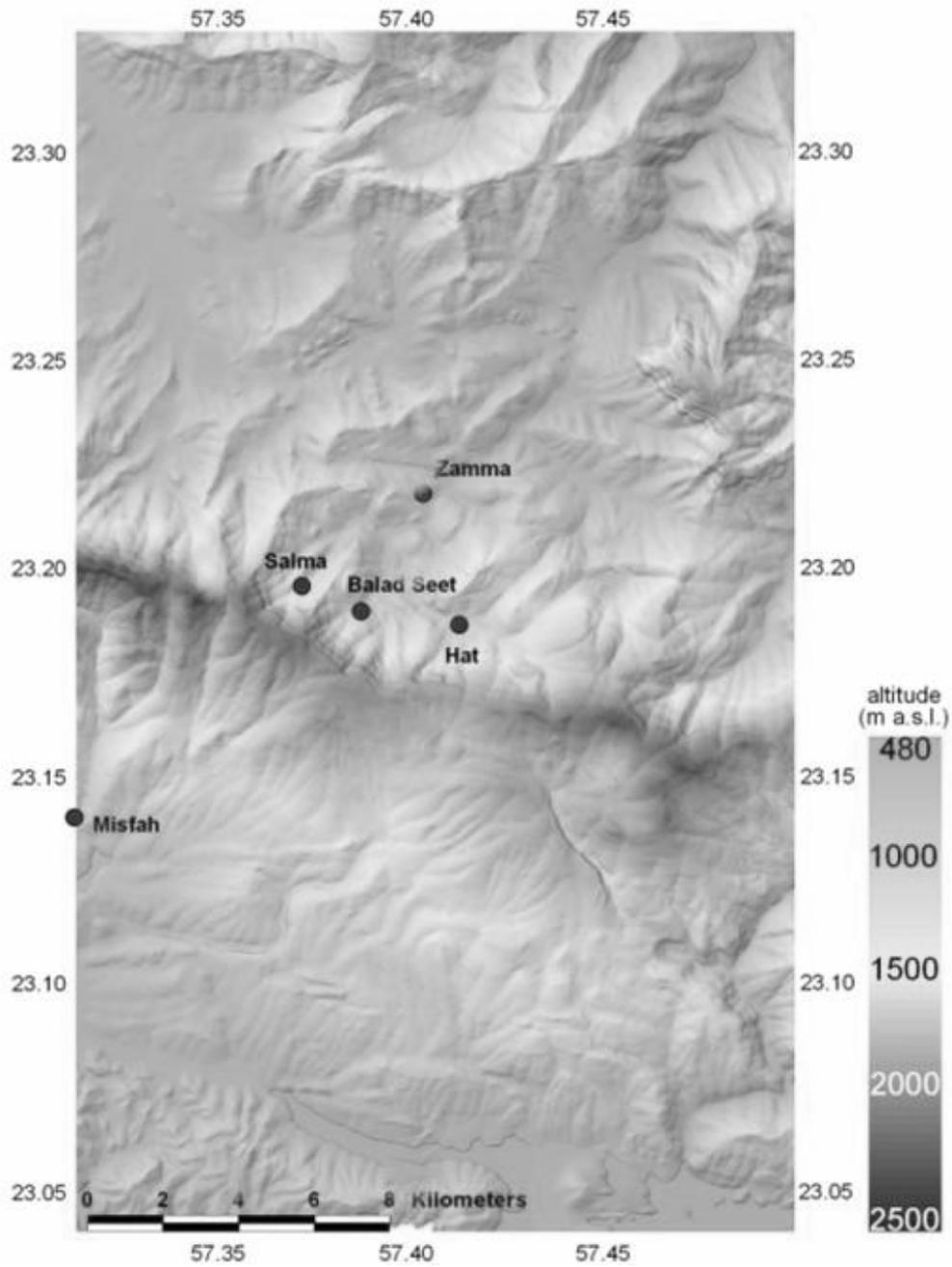


Figure 2. Three-dimensional map of the study area with the Wadi Bani Awf and Hamra comprising the modern roads and ancient trading paths. Data from Russian military maps (1:100,000), own GPS measurements and aerial photographs



Photo 1. Image of the mountain oasis of Balad Seet situated at the upper end of Wadi Bani Awf on the northern side of the Hajar range of the Jabal Akhdar mountains, Oman

In the middle of this valley is a major rocky outcrop, which contains most of the village buildings. The surrounding rock formation consists of highly permeable carbonates (dolomites and lime stones of the *Mahi* formation) resting over impermeable, red-greyish-green silt- and clay-stones of the *Muaydin* formation. The silt-stones have very little fracture porosity and act therefore as an aquifuge, whereas the carbonates above are highly fractured and karstic which allows the groundwater to be stored and to migrate over long distances (*Weier*, personal communication; Fig. 3). Next to *Balad Seet* and at the foot of the same cliff is the slightly smaller oasis of *Hat* with three springs that drain into the same watershed. The lower part of the wadi contains the oases of *Zamma*, *Tikha* and *Fara* which are much smaller than *Balad Seet*. They derive their water partly from the drainage flow of the two head-oases filtrating through the rocky valley and partly from smaller local springs.

2.2. Recording of topography, agri-infrastructural features, available water and soil properties

At *Balad Seet* the measurement period started in April 2000 and comprised the establishment of a three-dimensional digital base map of the oasis within a Geographical Information System (GIS). First, the topography of the rugged surrounding mountains was digitized from Russian military maps (1:100,000, Joint Stock Company SK-IMPEX,

Moscow, Russia) with 40-m altitude lines. Subsequently, all major features governing the oasis agriculture were mapped using a differential Global Positioning System (GPS; Trimble Pathfinder, Sunnyvale, CA, USA) with decimeter precision.

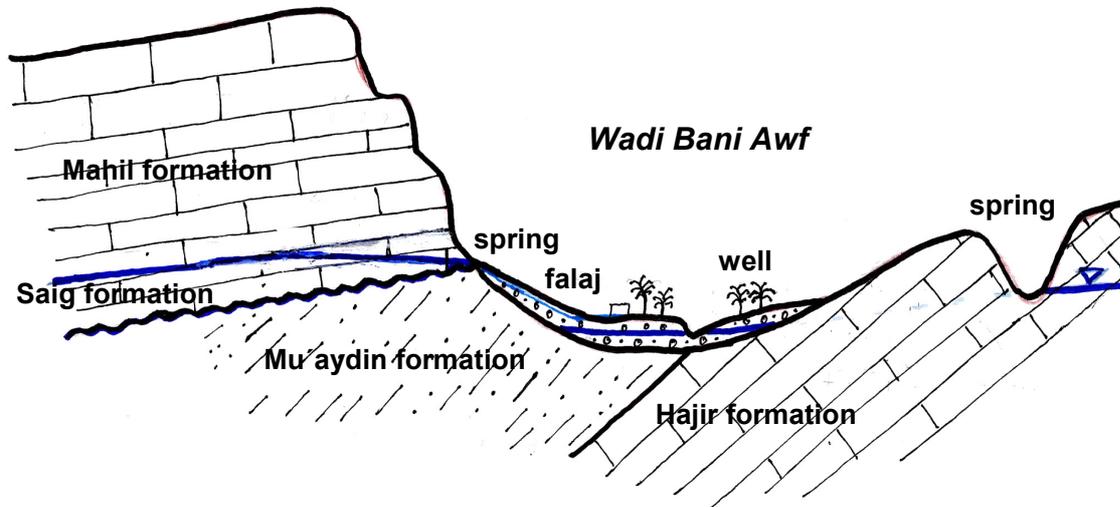


Figure 3. Cross-section of the geological setting at Balad Seet in the upper Wadi Bani Awf, Oman

Those features comprised the position of the 12 springs, the 14 shallow wells that have been dug into the *wadi* sediments to allow irrigation water to be reused, the canals conveying the spring water to the fields (*aini-afraj* or shortly called *afraj* below), the terraces as well as the position of the date palms (*Phoenix dactylifera* L.), foot paths and roads. The borders of the plots in the six terrace systems of the oasis and the houses were digitised from aerial photographs taken with a remotely controlled camera from a helium-filled balloon (Buerkert et al., 1996). Additional 3-D measurements of the terraces were taken with an electronic tachymeter at ± 0.01 m (Leica-Geosystems TPS300, Leica GmbH, Switzerland).

Between November 2000 and April 2003 monthly flow measurements of all springs at *Balad Seet* that convey their water into four major *afraj* systems, were taken with a hand-operated barrel system to determine the total influx of irrigation water and the relative contribution of each spring to this total over time. Additionally daily precipitation data were collected to observe the response of spring flow to rainfall. In November 2002 and January 2003 selected springs in *Balad Seet* and *Hat* were also sampled to determine the age of the water stored through the tritium/³helium ratio and concentration of the anthropogenic trace gases sulphurhexafluoride (SF₆) and chlorfluorcarbohydrides (CFC) according to methods described in detail by Aeschbach-Hertig et al. (1998) and Beyerle et al. (1999). The purpose of these water measurements in the context of this paper was to show the relative importance of the different *afraj* as water sources and the ‘elasticity’

of their water flow during the extended period of drought experienced during the measurement period. Given the constancy of the geological properties of the springs' parent rocks, insights into the 'elasticity' of the water supply are an important basis for subsequent hypotheses about any pre-historic settlement of the oasis system under study.

In October 2002 two soil pits were dug in the palm grove area and the cropped portion of the *Mazra* terrace system. A lacquer peel technique (modified after *Hähnel*, 1961) was used to conserve and study the structure of the anthropogenic profiles (Photo 2). In the second pit soil samples were taken at four depth intervals (0 to 0.2 m, 0.2 to 0.4 m, 0.4 to 0.6 m and 0.6 to 0.9 m) to determine the particle size distribution and hydraulic properties of the different layers. About 0.2 m below the plough layer at 0.45 m depth, this profile also contained a small piece of charcoal, which could be used for ^{14}C -dating through accelerated mass spectrometry (AMS) at the Institute of Physics at the University of Erlangen-Nürnberg, Germany. In the same pit, a single green glazed pottery sherd was found that allowed a typological age determination.

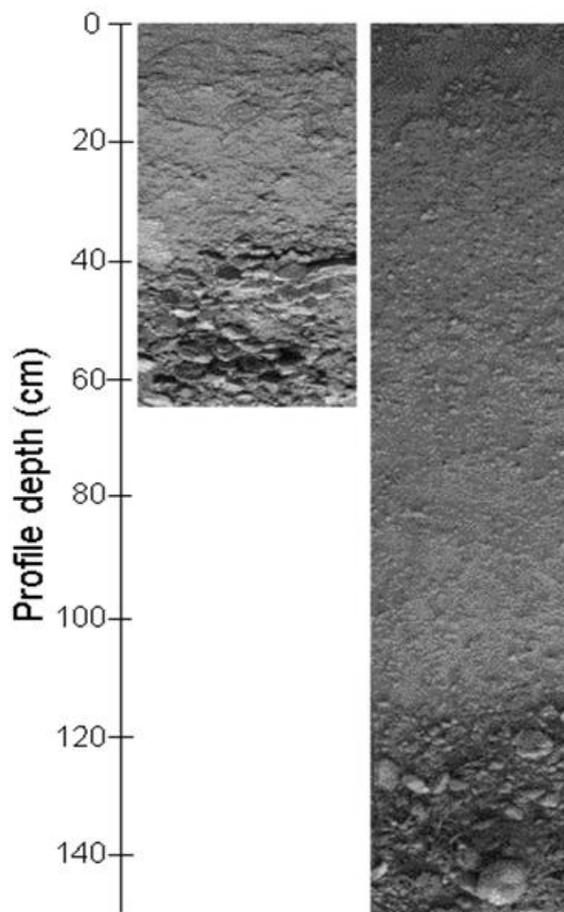


Photo 2. Soil profile of the upper part of the *Mazra* terrace system in Balad Seet (Oman) planted with palm trees (left) and the lower part planted with annual crops and alfalfa (right)

2.3. Estimation of agricultural production and carrying capacity

To estimate the agricultural production and the carrying capacity for small ruminants and the size of the farming community at *Balad Seet* over time from the biophysical and archaeological data collected, the following eight assumptions were made (Table 2).

1. The water outflow of the springs in the valley of *Balad Seet* remained unchanged over long periods of time and thus present day flow rates could be used as a proxy.
2. Potential evapotranspiration in the valley could be calculated according to *Priestley and Taylor* (1972) modified by *Shuttleworth* (1993). The necessary input data (global radiation and air temperature) came from an automatic weather station established at *Balad Seet* from Dezember 2002 to April 2003. Crop coefficients were taken from *Allen et al.* (1998).
3. Date yields and energy levels from unfertilized local palms genotypes remained largely unchanged over time. Present day yield levels (10-20 kg DM tree⁻¹ year⁻¹, *Nagieb et al.* unpublished) were in close agreement with data reported from Oman prior to modernization (*FAO Stat* 2003).
4. The germplasm for wheat (ancient landraces, *Al-Maskri et al.* 2003), sorghum, and alfalfa has remained unchanged over time. Therefore yield levels prior to 1960 (*FAO Stat* 2003) and energy contents of crops were representative for all previous periods. Human energy consumption for a farm-working adult also remained constant over time.
5. The largely genetically determined ratio between crop residues and grain yield, also known as harvest index, remained constant over time and could thus be taken from present day measurements in the oasis.
6. The construction of the access road in 1980 led to a large increase in the cropland grown to alfalfa as the basis for feeding the oasis's herd of small ruminants.
7. The fraction of dates used as an energy supplement for the nutrition of goats and sheep grazing the desert mountains, the DM intake of these animals and the meat yield per slaughtered animal remained constant over time and was taken from the literature (*George* 1987).
8. The useable fraction of the total spring outflow can be calculated as a function of the irrigation system available during a specific time period. This refers particularly to the constructed *afraj*. With the exception of the likely oldest wadi well, major additional amounts of supplementary well water became only available after the arrival of motor pumps after 1980.

2.4. Collection of archaeological data

An archaeological survey totaling 14 weeks was undertaken during three campaigns in 1999 and 2000. Given that the study aimed at a regional appraisal of settlement patterns, only surface material was collected and no excavations were undertaken. During the survey *Balad Seet* received the registration number 63 and its 18 sites were sub-numbered from 1-18. In the following description only these sub-numbers are used.

The surface material consists - with few exceptions - of pottery sherds, which after comparison with a previously established pottery typology, allow a provisional dating of the archaeological sites. However, the chronological scheme for Oman's history is still vague and therefore the dating spans of the different periods are broad (Table 1). This certainly has major effects on the precision with which the settlement development can be interpreted.

Additionally, the pottery may allow insights into the functional context of the sites, as in many cases it was possible to distinguish between the remains of domestic items and grave wares. Furthermore, pottery sherds can indicate trade connections between different sites and areas. Since typological studies of the pottery in Oman are rare, especially for the Islamic periods, it was decided to collect all pottery sherds, rather than only a subsample as was previously done in other surveys of the Near East. However, this was only possible because the number of finds was relatively small at all archaeological sites. Upon completion of the field collection, all pottery was processed typologically and with an archaeological seriation technique (The Bonn Seriation and Archaeological Statistics Package, Version 4.0.).

In addition to the pottery, all built ancient structures such as houses, towers, shelters, protection walls and tombs were mapped and described. This mapping was made with the help of a GPS and aerial photographs at the scale of 1:20,000 (National Survey Authority, Sultanate of Oman, 1985). From selected oases aerial photographs were taken with a helium-filled balloon, as described above, to obtain a better overview of the architectural remains of the sites.

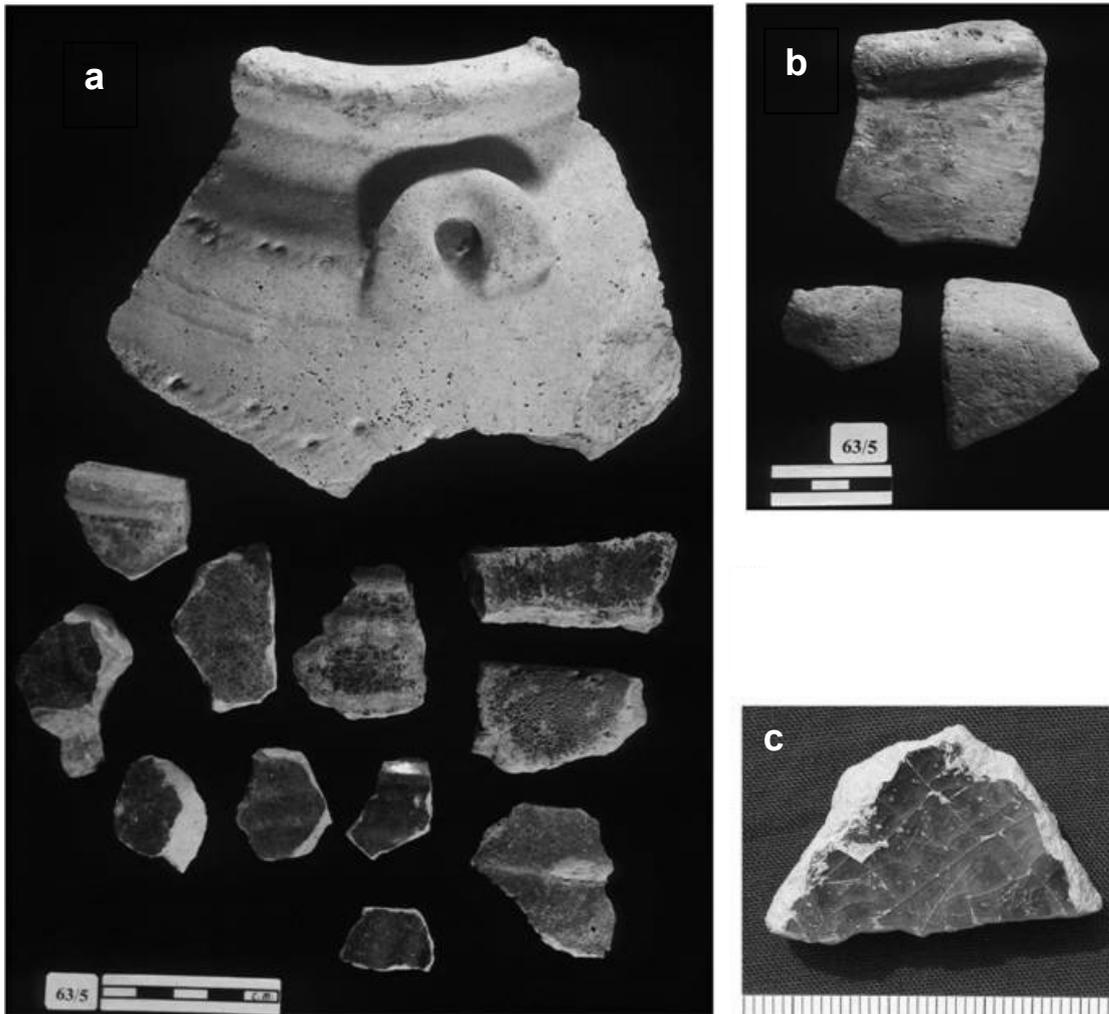


Photo 3. Different pottery sherds from Balad Seet , Oman: (a) turquoise glazed early Islamic sherds from site 5, (b) domestic sherds of the Iron Age II period from site

3. Results

3.1 Settlement and agriculture in Balad Seet

In early 2001, the oasis system of *Balad Seet* comprised 650 inhabitants distributed in 80 households who rented land in and out. About 2,800 date palms comprising 14 varieties cover 8.8 ha of terraced land. The 385 fields of the oasis are divided into six terrace systems totaling 4.6 ha. These comprise *Mazra* with 145 plots and a total area of 2.03 ha, *Zahir* with 137 plots and 1.27 ha, *Khaw* with 53 plots and 0.54 ha, *Libsi* with 58 plots and 0.47 ha, *Rud* with 19 plots and 0.25 ha and *Khtawi*, a small private terrace system with 6 plots and 0.06 ha. Average plot size is 110 m² with a variation between 7.5 and 593 m² (Fig. 4). The terraces contain traditional wheat landraces (*Triticum aestivum* L. and *Triticum durum*; Al-Maskri et al. 2003), sorghum (*Sorghum bicolor* Moench s. l.), barley (*Hordeum vulgare* L. s. l.), oats (*Avena sativa* L.), alfalfa (*Medicago sativa* L.), garlic (*Allium sativum* L.), onion (*Allium cepa* L.), lime (*Citrus aurantiifolia* [Christm. et Panz.] Swingle) and banana (*Musa* spp.) in rotation or in interplanted cropping systems. The analysis of the land use pattern across the year (winter compared to summer months) also shows a characteristic fluctuation of used and unused plots. In the cooler winter months, the fallow rate is only 15-20% and has a larger variation of crops compared with the summer months, when the total proportion of fallow plots is 50-70%, and cultivation consists of mainly drought-tolerant crops such as sorghum.

A major proportion of the farm income is derived from the up to 200 small ruminants (sheep and goats) fed mainly alfalfa, immature barley and crop residues at home in addition to a minor amount of forage browsed during two 3-hour herded grazing periods per day in the oasis neighborhood. On separate grazing grounds in the surrounding mountains and at altitudes above 1,300 m, small ruminants are also herded by semi-nomadic families commonly referred to as *shawawi*.

Until the early 1980s when an unpaved road was built across the *Wadi Bani Awf* to connect it with *Rustaq*, most trade occurred with *al-Hamra* which was connected to *Balad Seet* by two ancient trade routes. The major 27 km long donkey trade path connected the two places via *Hat*, and a 19 km long footpath allowed travelers to climb the cliff above *Balad Seet* partly by rock stairs.

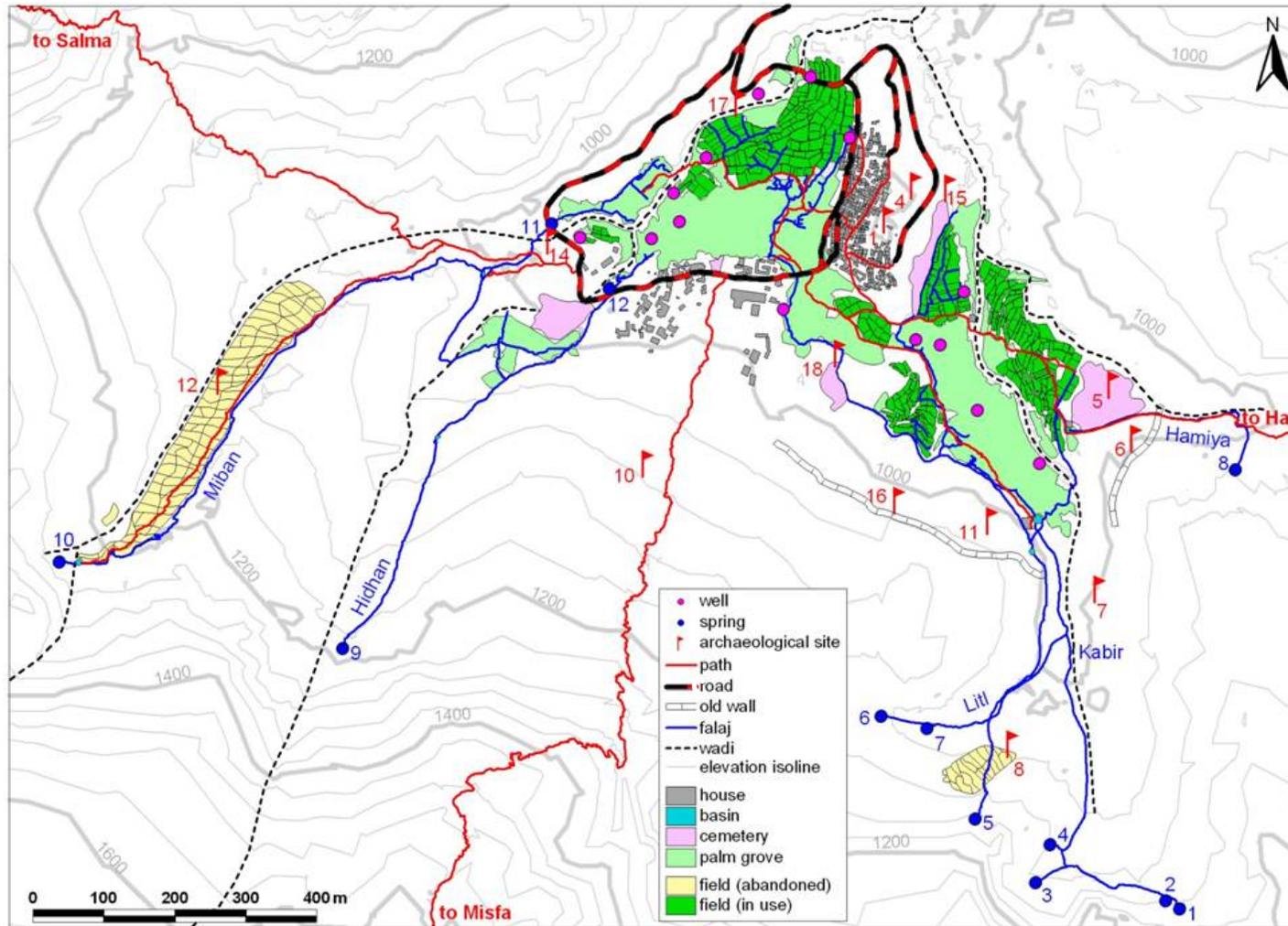


Figure 4. GIS-based map with the agricultural features and archaeological sites of the mountain oasis of Balad Seet, Oman

3.2 Rainfall, runoff and hydrological features

With only one major rainfall event in July 2001, the total *afraj* flow declined from $30.0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ in November 2001 to $22.3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ in March 2003. It recovered within 4 days after two long expected rainfall events on 15 and 17 April 2003 with 20 and 44 mm precipitation to $31.3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (Fig. 5). During the prolonged drought period, the total flow of all springs decreased at a monthly rate of about 3 %. However, there were clear differences for the different *afraj*. The springs in the eastern part of the oasis which joint their water into the *falaj Kabir* (with a flow rate of $24.7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ on 20 April 2003), *Litl* ($1.7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) and *Hamiya* ($0.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) showed a much slower decline in their flow over the prolonged drought period than the springs in the south (*Hidan* with $2.0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) and west (*Miban* with $2.9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) indicating a more buffered hydrological reservoir with a larger water storage capacity (Fig. 5). In winter months, the oasis farmers of today's *Balad Seet* draw in addition to the springs' flow up to 63 m^3 of groundwater per day by motor pumps from 14 wells (Photo 3), which have been dug into the wadi sediments. In summer months, however, seepage is too low to allow the extraction of substantial amounts of water from these wells.

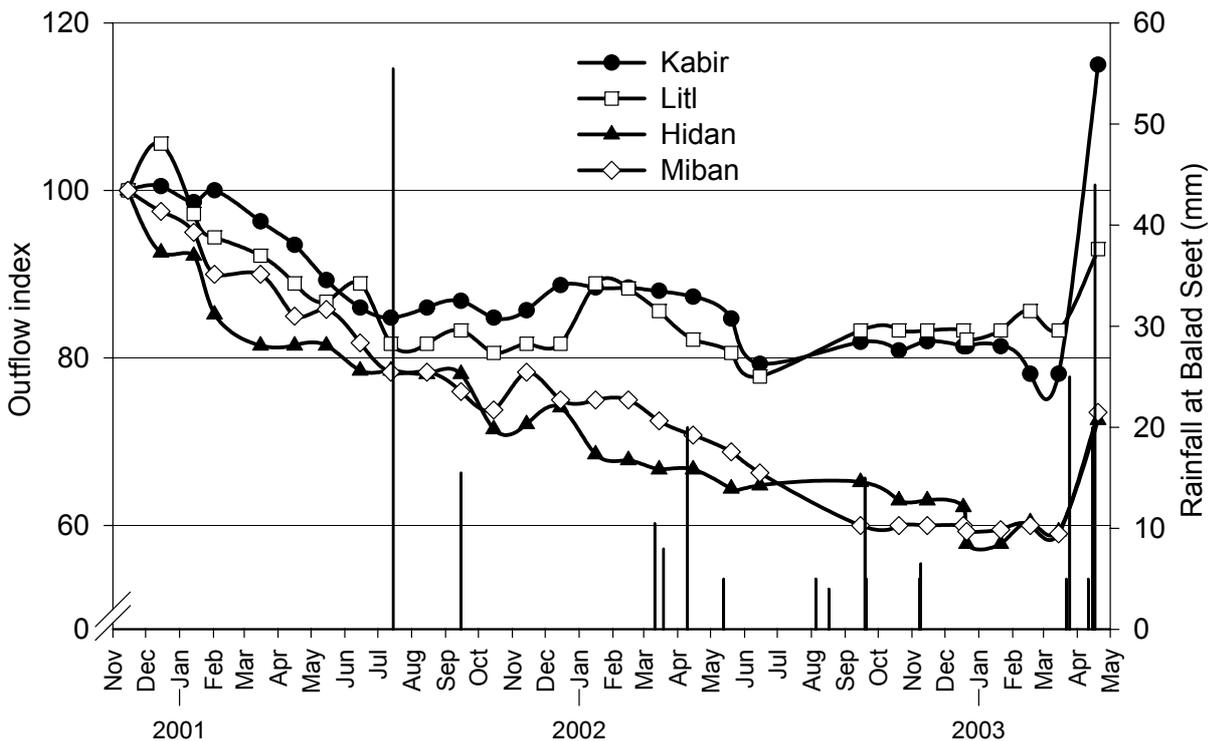


Figure 5. Relative outflow of the four major aflaj and rainfall at Balad Seet. Flow rates were set to 100 at the onset of the measurement period on 15 November 2000, no rainfall measurements were taken before January 2001

The first results of the isotopic analyses of the water's age indicated a range of 2 to 10 years for the percolation from the mountain tops to the springs feeding *Balad Seet*. Given the karstic nature of the parent rock it is most likely that the age of the

apparently younger waters reflect a contact between water and air at some point of the flow path through the rocks. Therefore the average water age is probably at the upper end of the determined range with substantial scope for variation between individual springs.



Photo 4. Rock stairway ('Persian Stairs') on the mountain foot path from Balad Seet to Hamra



Photo 5. Old well near the wadi below the falaj Kabir

3.3. Soil analyses

The analyses of the soil profiles indicate that the cropped, man-made terrace soils of *Mazra* are made up of three successive top layers in total 0.9 m thick and with pH 8.4, 12-15% clay, 48-54% silt, 34-38% sand and an organic carbon (Corg) concentration of 23 g kg⁻¹ (Luedeling *et al.* unpublished data). The very high Corg levels reflect the regular application of manure at rates up to 10 t ha⁻¹ year⁻¹. They form the basis for the high fertility and productivity of these oases soils despite high C turnover rates (Wichern *et al.* 2003).

The ¹⁴C-dating of the charcoal in the *Mazra* terrace system reveal an age of 911 ± 43 years or an origin between 1,027–1,212 AD at a 95% probability. This corresponds well to the age determination of the sherd which dates back to the Early Islamic period probably between 800–1,000 AD.

During the period of terrace construction, the large amounts of silt needed were likely collected from wadi sediments after heavy rainfalls, as there is barely any other soil

material available in the rocky surroundings of the oasis. Below the upper layers there is a clearly differentiated fourth stratum with 9% clay, 27% silt and 64% sand and an increasing number of big stones. This clear stratification of horizons allows the storage of water and nutrients in the upper 0.9 m of the terrace soils and a rapid drainage below, thereby avoiding the typical built-up of toxic salt concentrations with irrigation in many arid environments. The upper, shallow soils planted to date palms have a similar structure, but reach the coarsely weathered bedrock at 0.4 m.

3.4. Archaeological findings

The most important archaeological place of *Balad Seef* is situated at the steep eastern slope of the outcrop, where the modern settlement is located (site 4 on Fig. 4, Photo 4). A total of 785 pottery sherds of different periods, but no architectural structures or tombs were discovered there. The sherds covered the entire period from the Iron Age II period (Table 1) to modern times. The fact that only ceramic sherds were found at the bottom of the eastern slope indicated that, over time, this part of the outcrop was the rubbish dump of the settlement above. It may thus be hypothesized that the site was continuously inhabited since the Iron Age. As there are no architectural remains older than the Late Islamic period in the village itself, the archaeological findings did not allow estimation of the extension of the settlement nor the size of population for these early periods. The fact that all Iron Age II sherds (579 pieces) are from domestic wares, and no grave pottery has been found, precludes the possibility that they come from tombs situated at the top of the outcrop.

Twenty-one out of a total of 38 sherds of the same archaeological period were collected on site 5 (Figs. 3 and 4), situated at the eastern edge of the fields. This area is covered with an Islamic cemetery. The graves were constructed inside the remains of stone-built house foundations (Photo 5). Three rooms or houses were distinguishable but the area was very disturbed, which made it impossible to determine whether there once was a small settlement or only a few individual houses. Because the stones of the foundations are laid out carefully, it may be assumed that they were not from stables but from homes. The determination of the age of these house foundations is as difficult as that of the remaining sherds on site (5): 21 sherds were of the Early Iron Age, 10 of the Early Islamic period and 7 of the Middle or Late Islamic period (Table 1). Since the Islamic graves were built inside the house foundations, the former must be older than the latter. If the graves are Late Islamic, the houses could be of the Early Islamic or Late Iron Age period.



Photo 6. *Balad Seet* from the east. The white arrow marks the rubbish dump with pottery of different periods

A local story in *Balad Seet* refers to an ancient settlement (site 8) called *madina qadima* (old city) in Arabic. Its inspection revealed a number of very dilapidated terrace fields with remains of a *falaj* system. These are situated at a slope south–east of *Balad Seet* close to spring 5 (Fig. 4). Here 45 of the 47 discovered pottery sherds are of the Iron Age II. It is unclear whether they really allow for dating the terraces, because they also could have been carried with manure from other places to this site. However, the physical state of these terraces and the fact that the residents of the village did not remember their function and interpreted them as remains of an ancient settlement indicated that they were abandoned a long time ago.

Besides the former *madima qadima* terraces there is a second area of abandoned terrace fields in the situated south-western part of the village (site 12, Fig. 4). However, it is much better preserved. The old men of the village remember that these fields were abandoned about 70 years ago due to a successive shortage of water. According to oral records after the abandonment of these terraces, a smaller system was built together with an access *falaj* to allow the flow of spring 10 (Fig. 4) to reach these structures that are planted with date palms. In the immediate surroundings of these fields the remains of

a few scattered enclosures were identified on site 14 (Fig. 4). They appear to be former camp sites of the *shawawi* and their livestock. The four pottery sherds found inside these enclosures are of Iron Age and very Late Islamic date. Some further remains of stone built houses are scattered south and south-east of *Balad Seet*. Given their architectural layout these houses are probably also of the Late Islamic period.



Photo 7. Islamic cemetery with graves inside the remains of stone-built house foundations. The graves may be of the late Islamic period (1,500–1,930 AD) and the houses of the early Islamic (630–1,055 AD) or Iron Age II period (1,000-600 BC, Table 1)

South and east of the oasis two long and massive walls were erected. The southern near site 16 (Fig. 4) stretches parallel to the slope over 440 m. It was built of undressed stones, about 1.5 m high and its width varies between 0.6 and 1.0 m. The eastern wall near site 6 (Fig. 4) was also built of undressed stones, but is more massive than the first one. It also extends parallel to the slope and ends near the eastern wadi. No findings were discovered near these walls, and today's inhabitants of *Balad Seet* have no records of who might have built them. They explain their purpose as part of a fortification system, but their position on the steep rocky slope makes this very unlikely. Walls of a similar type have been found elsewhere in Oman and are often interpreted as boundaries, but with unclear functions.

Near site 4 (Fig. 4), two Islamic cemeteries were found: one at the eastern foot of the outcrop with the modern village (site 15, Fig. 4), the other one south of the village (site

18, Fig. 4). The latter one is still in use, whereas the former is overgrown with bushes and littered with rubbish. In contrary to the cemetery of site 5 (Fig. 4), no findings were discovered on the latter cemeteries. Presumably, they belong to the Late Islamic and recent settlement phases.

In contrast to other parts of *Wadi Bani Awf*, *Wadi Hat* and *al-Hamra* where tombs of the *Hafit* period were discovered, no such structures were found at *Balad Seet*, nor were there any settlements from this period. Presumably, during these early times the population lived from herding goats and sheep, and their dwellings have completely vanished. Wherever identified elsewhere, such early tombs were located in clearly visible positions, marking long axes. This gave rise to the hypothesis that they not only served as burial sites but also as landmarks pointing to important features in the landscape. As *Balad Seet* is topographically a dead end and the mountain crests nearby could only be crossed on a steep footpath unsuitable for animals, there may have been no cause for the construction of early tombs as landmarks.

The settlement history during the following periods (the *Umm an-Nar* period, the *Wadi Suq* period and the Iron Age I period, Table 1) is even more difficult to determine for the area as only a few graves were found in *Wadi Bani Awf* and *al-Hamra* and none at *Balad Seet*.

At *al-Hamra* two settlements of the Iron Age II period were identified, similar to *Balad Seet*, and there are also several cemeteries of this period. Two additional small Iron Age cemeteries were discovered in the *Wadi Bani Awf* between *Zamma* and *Tikha*. Since there are no remains of Iron Age tombs at *Balad Seet*, it remains open to further debate, where the deceased of *Balad Seet* may have been buried.

The following periods of the Early Iron Age and the Late Iron Age are only represented by some tombs and faint traces of a wall at *al-Hamra*, but not in the *Wadi Bani Awf*. The latter also preserved only very few remains of the Early Islamic period.

In the 11th / 12th century AD, a slight increase of settlement activities in the *Wadi Bani Awf* as well as at *al-Hamra* was observed. At *al-Hamra* these sites are sometimes close to the former Iron Age settlements. Pottery of this period was also found at *Hat* and in *Wadi Bani Awf* at the junction to *Bi'r*. The last mentioned oasis was probably abandoned already in the Middle Islamic period or in the early phase of the Late Islamic period.

A dramatic change in the settlement history of the wadi was observed for the Late Islamic period. All now-existing oases were established by then. This was conclusively shown by the appearance of the so-called *Bahla* ware, the typical glazed pottery for this period, that was found at all settlements. Two additional sites, now abandoned, were

established during this period. At *al-Hamra* a new *falaj* was built, which provided the basis for erecting a much larger settlement.

4. Discussion

4.1. Settlement hypotheses

There is no archaeological evidence for any settlement at *Balad Seet* during the first phase of occupation in the lower *Wadi Bani Awf*, that is, the period from 3,100–1,100 BC. However, in view of the unusually large and reliable water resources at the upper end of the valley, it is most likely that this was used intensively by shepherds and their flocks that were watered in the small natural basins of the wadi below what later became the *falaj Kabir's* main reservoir (Fig. 6-1). The settlement history of *Balad Seet* probably started in the Iron Age II period (1,100–600 BC) when, as indicated by the findings of the rubbish dump on the south eastern side of the rocky outcrop, a small village was established on its top. It would have been the first village of that period ever found north of the *Hajar* mountains (Magee 1999). There is evidence that the sudden appearance of settlements in this area may be explained by the introduction of the *falaj* system (Boucharlat 2001; Häser 2003). At *Balad Seet* the villagers of this second settlement phase would have lived from hundreds of date palms planted on the first, relatively archaic terraces of 2.5 ha size located between today's *Zahir* and *Khaw* terrace systems. Before the construction of the *aflaj* Kabir and Litl in the following third phase (the second part of the Iron Age II period), the flow from the most abundant springs of *Balad Seet* (springs 1 to 4) would likely have surfaced in the south-eastern wadi and provided year-round a relatively constant water supply. Irrigation of the date palms could thus have easily occurred from the large, ancient and partly natural well tapping into the wadi sediments there (Fig. 6-2). Given the strong infrastructural and cultural connections between *al-Hamra* and the upper *Wadi Bani Awf*, for which there also is evidence in the surprising similarity of the pottery sherds found for the Iron Age II period at both sites, it is likely that the first villagers of *Balad Seet* came from *al-Hamra*. As early as in the first half of the first millennium BC, they might have brought with them the innovative *falaj* system. This allowed to more efficiently exploit the reliable waters from springs 1 to 4 and to irrigate the 0.4 ha of terraces in the so-called *madina qadima* area (8). In this context, the major old basin should have been built to collect and redistribute the water of the *aflaj Kabir* and *Litl* (Fig. 6-3).

The fourth settlement phase of *Balad Seet* has taken place sometime in the Early Islamic period (630–1,055 AD) and was apparently characterized by a large expansion of the cropping and housing area. The abundance of water from the two *aflaj* should have

allowed the establishment of the terrace systems of *Zahir* and *Khaw* planted with wheat landraces (Fig. 6-4; *Al-Maski et al.* 2003) and lime. Their construction certainly required a substantial supply of labor to collect the necessary stones and silt material from the wadi sediments. During this period, the rocky outcrop remained inhabited and a few additional buildings were established on site 5 (Fig. 4), east of the *Zahir* terraces. Their foundations are still visible and carry sherds of simple turquoise glazed vessels probably imported from Iran or Mesopotamia. The fifth settlement phase fell into the Middle Islamic and the first part of the Late Islamic period (1,055–1,500 AD and 1,500–1,650 AD). The surprisingly consistent age of the ¹⁴C-dated charcoal piece and the turquoise sherd found in the lower part of the *Mazra* soil profile (site 17) indicates a large expansion of the agricultural area during this period. The cultivation of large palm groves and cropping terraces at *Mazra* certainly required a major modification of the *aflaj* system to take advantage of the abundant water from the *falaj Kabir* system. It is therefore likely that this period saw the construction of a new basin to redistribute this water from a higher topographic position thereby also allowing the irrigation of the newly built *Khaw*, *Rud* and *Libsi* terraces (Fig. 6-5). However, continuous cultivation of *Mazra* required so much water that also the *aflaj Hidan* and *Miban* needed to be constructed. This major project increased the village's total amount of cropland by 137% and of date palm groves by 105% thereby providing the broad hydro-infrastructure condition for its subsequent continued flourishing. With respect to the settlement structure the remains showed that the small building area east of *Zahir* was given up, whereas the houses on the outcrop remained.

Pottery sherds of underglazed sgraffiato wares from the 12th/13th century AD found in the rubbish dump indicated persisting trade relationships with Iran. During this period, the existing settlements of *Balad Seet* and the later abandoned oasis at the junction to *Bi'r*, *Hat* and *al-Hamra* were probably closely connected by the two trans-mountain trade routes described earlier.

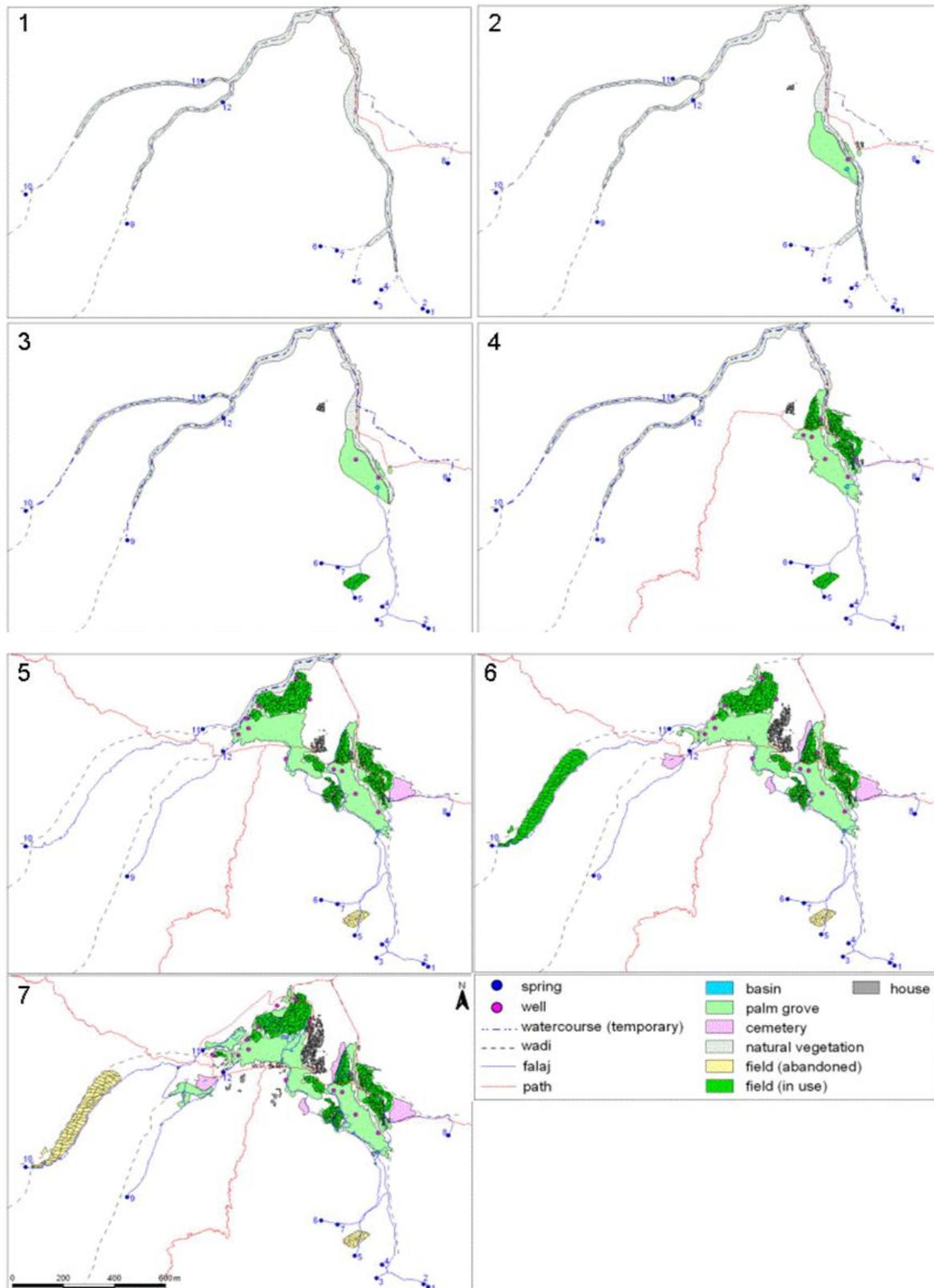


Figure 6. Settlement phases of the mountain oasis of Balad Seet (Oman). Timings relate to settlement phases rather than to archaeological and historic periods and may show some overlap. **(1)** *Hafit* period (3,100–2,700 BC), *Umm an-Nar* period (2,700–2,000 BC), *Wadi Suq* period (2,000–1,300 BC), and Iron Age I period (1,300–1,100 BC), **(2)** 1st part of Iron Age II period (1,100–900 BC), **(3)** 2nd part of Iron Age II and Iron Age III period (900–300 BC) and Late Iron Age (*Samad*) period (300 BC–630 AD), **(4)** early Islamic period (630 AD–1,055 AD), **(5)** middle Islamic period and 1st part late Islamic period (1,055 AD–1,650 AD), **(6)** 2nd part late Islamic period (1,650 AD–1,930) and **(7)** Sub-recent period (1,930–1,970)

The sixth settlement phase comprises the second part of the Late Islamic period (1650-1930 AD, Table 1). The small fortress and also the layout of the modern village were presumably built during this period. On the other side of the *Hajar* mountains, a new major *falaj* was laid out, which formed the economic basis of the mud brick village of *al-Hamra*. This *falaj* was financed by the *Ya'ariba* dynasty to support the tribe of the *Abriyin*. Subsequently, *al-Hamra* became the local center of this tribe. For this period a strong rise of settlement and agricultural activities was noted along the entire *Wadi Bani Awf*, which must have required massive investments. Though there is no firm evidence, it is likely that also these activities were economically supported by the *Ya'ariba* dynasty. It is likely that during this time the 2.5 ha sized terrace system at the western slope of the valley of *Balad Seet* was built (Fig. 6-6). It was irrigated by the *falaj Miban* until it was, according to oral history, abandoned in the 1930s.

A last, still-puzzling finding was the presence of the two large walls along the southern and eastern slopes of the *Balad Seet* valley, whose function and age were difficult to determine. Some old stone houses at the slope south of the village had the typical, simple layout of houses of the Late Islamic period, and also were of a type found elsewhere in the *Wadi Bani Awf* and at *al-Hamra*. Latest in this phase, cemeteries were laid out east and south of the outcrop and east of the *Zahir* terrace system (5). The two last-mentioned cemeteries are still in use today.

The sub-recent settlement phase (Table 1) saw the construction of the 1.2 ha sized *Hillhila* palm grove to which the waters of the *aflaj Miban* and *Hidan* were conveyed after the western terraces had been abandoned (Fig. 6-7). The final recent phase is characterized by the renovation of the *aflaj* and of many houses, using cement, and by the establishment of a southern housing area with a large school building (Fig. 4).

4.2. Agricultural production and carrying capacity over time

The previously described sequence of *aflaj* and terrace construction and the amounts of food and fodder likely produced from these terraces allowed the drawing of a sketchy, yet surprisingly convincing picture of the agricultural activities at *Balad Seet* (Table 3). It appears as though the cropping area steadily increased between the 3rd and 6th settlement phase and declined again only after the western terraces of size 2.5 ha had been abandoned in the 1930s. Thereafter, the 2.9 m³ water flow h⁻¹ of the *Miban falaj* was used for date production in the 1.2 ha of the *Hillhila* palm groves. Wheat production reflected the expansion and shrinkage of the cropping area, with the exception of the present period when the arrival of mineral nitrogen and phosphorus fertilizers allowed doubling of the grain yield per unit area. The presented settlement hypotheses allow the

postulation of an interesting infrastructure-driven swing between periods of water limitation and those of land limitation. This can be exemplified by the assumed production of sorghum, a heat-tolerant typical summer cereal. It expanded several-fold during the 4th settlement phase when water should have abounded year round after the construction of the *Kabir falaj* system, and before the large expansion of land following the subsequent construction of the *Mazra* terrace system. A steadily increasing production of dates over the centuries seems very likely to reflect both an expansion of the palm grove area, and during the modern period, the intensification of the palm production by manure application to the trees. The latter was a consequence of the larger herd sizes maintained at *Balad Seet* (Table 3). The road construction in the 1980s with the subsequent large influx of food commodities from external markets should have led to a reduced area dedicated to wheat and a major conversion of the former 'food land' into 'fodder land'. This would have allowed an increase of the herd size of sheep and goats to the present levels of up to 200 head, and herewith, much above the drought-limited carrying capacity of the grazing grounds in the surrounding ecosystem. In an increasingly market-oriented economy, the animals are sold at premium prices on regional markets or are eaten by the farmers' extended families when returning to their village of origin on occasion of religious feasts such as *Ramadan* and *Id*.

The number of settlers at *Balad Seet* may have always substantially exceeded the agriculture-based carrying capacity of the upper *Wadi Bani Awf*. Revenues from trade may have allowed the import of grain from a major village like *al-Hamra* with larger land resources. The large difference between today's calculated carrying capacity of 156 adults and the four-fold higher actual village population, however, is the result of the revenues from the flourishing secondary (trading) and tertiary sector (education and administration) of the modern economy which is based on oil and gas revenues. These allow large quantities of calories and plant nutrients in the form of mineral fertilizers to be imported into the oasis and may finally lead to the conversion of the agriculturally exploited resource base into an increasingly vacation-oriented setting. Such transformation processes have been taking place in many oases of Oman and can presently be observed in its final stages at *al-Hamra*, *Balad Seet's* presumed mother village.

Table 3. Carrying capacity of the mountain oasis of *Balad Seet* (Oman) through time. All output estimations are based on input data from Table 2. The approximate duration of the settlement phases does not always correspond to the time span of the archaeological and historic time periods. *Landnutzungskapazität der Bergoase Balad Seet (Oman) im Zeitverlauf ihrer Besiedelung. Alle Output-Größen gründen sich auf die in Tabelle 2 dargestellten Eingabegrößen. Die ungefähre Dauer der Siedlungsphasen stimmt nicht immer mit der Dauer der archäologisch und historisch belegbaren Zeitperioden überein*

Settlement phase	1	2	3	4	5	6	7	8
Approximate duration	3,100-1,100BC	1,100-600BC	900BC-630AD	630-1,055AD	1,055-1,650AD	1,650-1,930AD	1,930-1,970AD	>1,970
Output estimation								
Cropping area (ha)	0	0	0.4	2.2	4.6	7.0	4.6	4.6
Total wheat production (kg year ⁻¹)	0	0	390	2,170	4,490	6,900	4,540	11,110
Total sorghum production (kg year ⁻¹)	0	0	840	4641	0	0	0	0
Number of adult date palms	0	400	400	690	1535	1600	1,700	1,700
Palm grove area (ha)	0	2.5	2.5	3.1	7.0	7.6	8.8	8.8
Total date production (kg year ⁻¹)	0	7,500	7,500	12,940	28,780	30,000	34,000	55,250
Total fodder production (kg DM [†] year ⁻¹)	0	0	1,800	9,950	20,610	31,680	20,840	90,730 [‡]
Water available (minimum) (m ³ day ⁻¹)	4	44	438	442	538	538	538	601
Minimum evapotranspiration (m ³ day ⁻¹)	0	138	138	171	383	419	487	487
Medium evapotranspiration (m ³ day ⁻¹)	0	138	149	234	513	618	619	622
Maximum evapotranspiration (m ³ day ⁻¹)	0	138	163	308	667.3	855.8	774.7	774.7
Number of adult sheep and goats	0	2	11	29	56	84	59	186
Energy from dates (MJ year ⁻¹)	0	39,130	39,130	67,490	150,140	156,500	177,370	288,220
Energy from crops (MJ year ⁻¹)	0	0	14,930	26,250	54,410	83,640	55,000	134,700
Energy from meat (MJ year ⁻¹)	0	60	350	900	1,750	2,620	1,850	5,840
Number of adults living from agriculture	0	14	20	34	75	88	85	156

[†] Dry matter; [‡] Comprises alfalfa as well as green fodder from cereals used before modernization as grain crops for human consumption.

5. Conclusions

Despite the scanty finding situation in the study area, the combination of topographic, agricultural, hydro-pedological and archaeological data allowed the establishment of conclusive settlement hypotheses for the *Wadi Bani Awf* with a focus on its head oasis *Balad Seet*, a likely early offspring of *al-Hamra*. The main driving force for the settlement dynamics at *Balad Seet* was the availability of an abundant and stable flow of springs at the northern foot of the *Hajar* mountain range. This triggered the early construction of an interrelated infrastructure of *aflaj* and terraces for the sustainable and increasingly efficient production of dates, limes, annual crops and meat. The scarcity of land and water and their eventual optimisation by the immigrant settlers of *Balad Seet* might have been the major driving force for the development and apparent relatively stable wealth of this oasis over the millennia.

The absence of settlements of the 3rd millennium BC in the area of this study leads to the hypothesis that the earliest oases of Oman may not have been established in the mountainous regions of the *Hajar* range, but instead concentrated in its foreland and at the coast. The reasons for the choice of settlement areas are still poorly understood. The emergence of the first mountain settlements between 1100 and 600 BC confirm the existing theory on the one hand, but provide new hints to the strong correlation between the rise of settlements at this period and the introduction of the *falaj* system. The origin of the *falaj* irrigation system remains open to further debate. The discovery of an Iron Age settlement at *Balad Seet*, an oasis on the northern side of the *Hajar* mountains which was connected with *al-Hamra* on its southern side is a major surprise. It contradicts the conclusion of *Magee* (1999) who argued that the *Hajar* range formed a cultural barrier. The findings of this study rather indicate that a political, and presumably also economical frontier went right through the *Wadi Bani Awf*. For the first time, this study shows the existence of the Early and Middle Islamic settlements that were not based on trade such as in *Sohar*, or on metal resources such as in *Arja* and *Wadi Safafir*, but on agriculture alone. The apparently uninterrupted inhabitation of *Balad Seet* during periods of major crisis and revival at other sites in Oman reflects the role of oasis agriculture for the settlement history in this arid country. As such, oasis agriculture certainly merits further interdisciplinary research.

Acknowledgements

The authors would like to thank *Eike Luedeling*, *Werner Aeschbach-Hertig* and *Horst Weier* for their contribution to the water measurements, the hydro-geological characterisation of the study area and the profile description. They are also indebted to *Jürgen Schreiber* for the classification of the pottery sherds, to *Dierk Kurz* and *Matthias Brommer* for digitising of topographic maps, to *Barbara Buerkert* for many helpful suggestions on an earlier version of this paper, to *Ann Baier* for revising the English, to Sultan Qaboos University at Muscat for infrastructural support, to the farmers of *Balad Seet* and the *Wadi Bani Awf* for their hospitality and patient replies to numerous questions and to the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) and the German Archaeological Institute (DAI) for funding.

6. References

- Aeschbach-Hertig, W., P. Schlosser, M. Stute, H.J. Simpson, A. Ludin and J.F. Clark* 1998: A $^3\text{H}/^3\text{He}$ study of groundwater flow in a fractured bedrock aquifer. - *Ground Water* 36:661–670.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith* 1998: Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO, Rome, 1998
- Al-Maskri, M., M. Nagieb, K. Hammer, A.A. Filatenko, I. Khan and A. Buerkert* 2003: A note about *Triticum* in Oman. - *Genetic Resources and Crop Evolution* 50 (1): 83–87.
- Anonymous.* 1995: Agriculture statistics. - Department of Statistics, Ministry of Agriculture and Fisheries, Sultanate of Oman: 210 pp.
- Beyerle, U., W. Aeschbach-Hertig, M. Hofer, D.M. Imboden, H. Baur and R. Kipfer* 1999: Infiltration of river water to a shallow aquifer investigated with $^3\text{H}/^3\text{He}$, noble gases and CFCs. - *Journal of Hydrology* 220: 169–185.
- Boucharlat, R.* 2001: Les galeries de captage dans la péninsule d'Oman au premier millénaire avant J.-C. - In: P. Briant (ed.): Irrigation et drainage dans l'Antiquité, qanāts et canalisation souterraines en Iran, en Égypte et en Grèce. *Persika* 2, Thotm éditions, Paris: 157–183.
- Boucharlat, R.* 2003: Iron age water-draining galleries and the Iranian 'Qanāt' - In: D. Potts, H. Al Naboodah and P. Hellyer (eds.): *Archaeology of the United Arab Emirates, Proceedings of the First International Conference on the Archaeology of the U.A.E.*, Trident Press, United Arab Emirates: 162–172.
- Buerkert, A., F. Mahler and H. Marschner* 1996: Soil productivity management and plant growth in the Sahel: Potential of an aerial monitoring technique. - *Plant and Soil* 180: 29–38.
- Carter, R.* 1997: The Wadi Suq period in south-east Arabia: a reappraisal in the light of excavations at Kalba, UAE. - *Proceedings of the Seminar for Arabian Studies* 27: 87–98. Belgium.
- Cleuziou, S.* 1998: Early Bronze Age Oasis Life in the Oman Peninsula. - In: M. Pearce and M. Tosi (eds.): *Papers from the EAA Third Annual Meeting at Ravenna 1997. I: Pre- and Protohistory.* BAR International Series 717. Oxford, England: 59–70.
- Costa, P. M.* 1983: Notes on traditional hydraulics and agriculture in Oman. - *World Archaeology* 14: 273–295.
- Costantini, L.* 1980: Palaeoethnobotany: Identification of two rows barley and early domesticated sorghum. - *Archaeology in the United Arab Emirates II/III*: 70–71.
- de Cardi, B., S. Collier and D.B. Doe* 1976: Excavations and Survey in Oman 1974–1975. - *The Journal of Oman Studies* 2: 101–187.

- Dutton, R.W.* 1986: Agriculture and the Future of Aflaj in Oman. - Brismes: Proceedings of the 1986 International Conference on Middle Eastern Studies. Oxford, England: 349–358. *FAO Stat.* 2003: FAO, Rome, Italy.
<http://apps.fao.org/page/collections?subset=agriculture>, 10/05/2003
- George, M.R.* 1987: Planning Guide No. 4. Rangeland Watershed Program. University of California, Davis. USA
(http://agronomy.ucdavis.edu/calrng/planning_guide_pdf/PG4.pdf), 10/05/2003
- Hähnel, W.* 1961: Die Lackfilmmethode zur Konservierung geologischer Objekte. - Der Präparator, Zeitschrift für Museumstechnik 7 (4): 243–263.
- Häser, J.* 2000: Formation and transformation processes of oasis settlements in the Sultanate of Oman: preliminary report on a new field project. - Proceedings of the Seminar for Arabian Studies 30: 115–118.
- Häser, J.* 2003: Archaeological results of the 1999 and 2000 survey campaigns in Wadi Bani 'Awf and the region of al-Hamra' (Central Oman). Proceedings of the Seminar for Arabian Studies 33: 21–30.
- Lombard, P.* 1998: Chronologie in assemblages céramiques des sites de l'Age du Fer de la péninsule d'Oman. Documents d'Archéologie de l'Arabie 1 (CD). Lyon, France.
- Luedeling, E., M. Nagieb, F. Wichern, M. Brandt, J. Böttcher, T. Mueller and A. Buerkert:* Irrigation of man-made terrace soils in a mountain oasis of northern Oman. Geoderma (submitted).
- Ibrahim, W.M.J.* 1999. Geographische Erscheinungsbilder der landwirtschaftlichen Produktion im Sultanat von Oman. Fakultät für Literatur, Sultan Qaboos Universität, Oman (auf Arabisch).
- Magee, P.* 1999: Settlement Patterns, Politics and Regional Complexity in the Southeast Arabian Iron Age. *Paléorient* 24 (2): 49–60. Paris, France.
- Mershen, B.* 1999: Settlement space and architecture in South-Arabian oases: preliminary remarks on the use and division of space in Omani oasis settlements. - Proceedings of the Seminar for Arabian Studies 29: 103–110. Belgium.
- Norman W.R., W.H. Shayya, A.S. Al-Ghafri and I.R. McCann* 1998: Aflaj irrigation and on-farm water management in northern Oman. *Irrigation and Drainage Systems* 12: 35-48.
- Omezzine, A. and Z. Lokman* 1998: Management of modern irrigation systems in Oman: allocative vs. irrigation efficiency. - *Agriculture and Water Management* 37: 99–107.
- Priestley, C. and R. Taylor* 1972: On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. - *Mon. Weather Rev.* 100: 81-92.

- Ribbeck, E., F. Dahman, A. Gangler and H. Gaube* 1999: Al Hamre, die Rote. Zenith: Zeitschrift für den Orient 1999/2: 34–37. Hamburg, Germany.
- Shuttleworth, W.J.* 1993: Evaporation. - In Maidment, D.R. (ed.). Handbook of Hydrology McGraw Hill, Columbus, OH, USA: 4.1-4.53.
- Wichern, F., T. Müller, R.G. Joergensen and A. Buerkert* 2003: Effects of manure quality and application forms on soil C and N turnover of a subtropical oasis soil under laboratory conditions. Biology and Fertility of Soils (in press).
- Whitcomb, D.* 1975: The Archaeology of Oman: A preliminary discussion of the Islamic Periods. - The Journal of Oman Studies 1: 123–157.
- Wilkinson, J.C.* 1974: The Organisation of the Falaj Irrigation System in Oman. - School of Geography, University of Oxford, England.
- Yule, P.* 2001: Die Gräberfelder in Samad al-Shan. - Orient-Archäologie 4. Rahden/Westf., Germany.

Summary: Settlement History of a Mountain Oasis in Northern Oman – Evidence from Landuse and Archaeological Studies

To unravel the settlement history of oases in northern Oman, data on topography, the agricultural setting, water and soil parameters and archaeological findings were collected in the *Wadi Bani Awf* with its head oasis *Balad Seet*. This collection lasted from April 2000 to April 2003 and was based on the establishment of a 3D-georeferenced map of the oasis comprising all its major infrastructural and agronomic features. At today's *Balad Seet*, a total of 8.8 ha are planted to 2,800 date palms and 4.6 ha are divided into 385 small fields dedicated to wheat, barley, sorghum, oats, alfalfa, garlic, onion, lime and banana. Their yields, nutrient uptake and nutrient inputs were determined. Radiocarbon dating of charcoal in the lower part of the main terrace system determined its age to 911 ± 43 years. Monthly flow measurements of four major *afraj* systems showed a total maximum flow of $32 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ with the largest *falaj* contributing 78% of the total flow. During drought periods, average water flow decreased by 3% per month, however, with significant differences between the spring systems. The analysis of the tritium/³helium ratio in the water led to an estimated water age of about 10 years. In combination with the flow data, this provided insights into the elasticity of the spring flow over time. The use of the natural resources of the *Wadi Bani Awf* by a pastoral population started probably in the early 3rd millennium BC. The first permanent settlement might have been established at *Balad Seet* during the first part of the 1st millennium BC. Presumably, it was initiated by settlers from *al-Hamra*, a village at the southern foot of the *Hajar* mountains. Given an abundant and stable flow of springs, even in periods of drought, the construction of *Balad Seet's* first irrigation systems may have occurred at this early time. The combination of topographic, agricultural, hydro-pedological and archaeological data allowed assessment of the carrying capacity of this oasis over the three millennia of its likely existence. The changing scarcity of land and water and the eventual optimisation of their use by different *afraj* constructions have been major driving forces for the development and apparent relatively stable wealth of this oasis.

Zusammenfassung: Siedlungsgeschichte einer Bergoase im Nordoman – Untersuchungen zur Landnutzung und Archäologie

Ziel der vorliegenden Untersuchung war die Entschlüsselung der jahrtausendealten Siedlungsgeschichte von Oasen im Nordoman am Beispiel des *Bani Awf* Tales mit seiner Kopfoase *Balad Seet*. Dazu wurden zwischen April 2000 und April 2003 topographische, landwirtschaftliche, hydrologische und pedologische Messungen sowie archäologische Geländeaufnahmen auf der Grundlage einer dreidimensionalen Geländekartierung durchgeführt. Die Analyse zeigte 2800 Dattelpalmen auf 8,8 ha Fläche und 385 mit Weizen, Gerste, Sorghum, Hafer, Luzerne, Knoblauch, Zwiebeln, Limetten und Bananen bestandene Kleinparzellen mit einer Gesamtfläche von 4,6 ha. Deren Erträge, Nährstoffaufnahmen und Düngungsniveaus wurden aufgezeichnet. Das Alter der Hauptterrassen konnte mittels ^{14}C -Datierung von Holzkohle in einem Bodenprofil auf 911 ± 43 Jahre bestimmt werden. Monatliche Wasserflussmessungen der vier wichtigen Quellkanalsysteme ergaben eine maximale Gesamtwassermenge von $32 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, woran das größte Kanalsystem einen 78%igen Anteil hatte. Während einer längeren Trockenphase nahm der Wasserfluss monatlich um durchschnittlich 3% ab, wobei allerdings deutliche Unterschiede zwischen den vier Kanalsystemen festgestellt werden konnten. Die Bestimmung des Tritium/ $^3\text{Helium}$ Isotopenverhältnisses in den Quellwässern ergab deren Alter mit bis zu 10 Jahren und erlaubte in Verbindung mit den Flussmessungen eine Abschätzung der Elastizität der Wasserverfügbarkeit über die Zeit. Die Nutzung der natürlichen Ressourcen im *Wadi Bani Awf* begann vermutlich im frühen 3. Jahrtausend v. Chr. durch eine nomadische Hirtenbevölkerung. Die dauerhafte Besiedlung von *Balad Seet* dürfte bereits in der ersten Hälfte des frühen 1. Jahrtausend v. Chr. eingesetzt haben. Sie wurde vermutlich von Siedlern aus *al-Hamra* auf der Südseite des *Hajar*-Gebirges initiiert. Es gibt Hinweise darauf, dass bereits zu dieser frühen Zeit in *Balad Seet* die ersten einfachen Bewässerungskanalsysteme entstanden sein könnten. Die Kombination von biophysikalischen Messergebnissen und archäologischen Befunden erlaubte auch eine erste Abschätzung der Besiedlungsdichte dieser Oase über den Zeitraum ihrer vermutlich dreitausendjährigen Geschichte. Die wechselnde Knappheit von Ackerland und Wasser sowie deren letztliche Optimierung durch den Bau verschiedener *afraj*-Kanalsysteme dürften wesentliche Triebkräfte für die Entwicklung und den relativen Wohlstand der Oase gewesen sein.

Résumé: Histoire de l'établissement d'une oasis de montagne au Nord Oman - Recherches d'usage du terrain et d'archaeologie

Pour révéler l'histoire de l'établissement d'oasis du Nord Oman, des mesures biophysiques et des recherches archéologiques ont été conduites dans l'oued *Bani Awf* et son oasis amont, *Balad Seet*. La collecte des données s'est déroulée d'avril 2000 à avril 2003. Elle repose sur le lever d'une carte de l'oasis en 3 dimensions comprenant les principaux aménagements agricoles et hydrauliques. De nos jours à *Balad Seet*, 2800 palmiers dattiers sont plantés sur une superficie totale de 8,8 ha et 4,6 ha sont subdivisés en 385 petites parcelles vouées aux cultures de blé, orge, sorgho, avoine, luzerne, ail, oignon, citrons verts et bananes. Les rendements de ces cultures, les intrants et exportations en éléments minéraux ont été déterminés. Une datation au ^{14}C d'une pièce de charbon prélevée à la base du principal système de terrasse établit son âge à 911 ± 45 ans. Les mesures mensuelles des flux de sortie des quatre principaux canaux (*aflaj*) indiquaient un flux maximal de $32 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ auquel le principal *aflaj* contribue pour 78%. Au cours des périodes de sécheresse les flux de sortie moyens décroissaient de 3% par mois avec, cependant, de significatives différences entre sources. Une analyse du rapport tritium/ 3 hélium de l'eau conduisait à estimer l'âge moyen de l'eau à 10 ans environ, ce qui, avec les données de flux, donnait une idée de l'élasticité temporelle de l'écoulement des sources. La première occupation humaine, par des éleveurs, de l'oued *Bani Awf* remonte probablement au 3^{ème} millénaire BC alors que la première occupation de *Balad Seet* remonte au début du 1^{er} millénaire BC. Probablement, initiée par migrants provenant d'*al-Hamra*, un village du sud des monts *Hajar*. L'écoulement des sources étant abondant et stable, même en période de sécheresse, la construction du premier système d'irrigation de *Balad Seet* peut remonter à ces premiers temps. La combinaison de données archéologiques et biophysiques permettait d'évaluer la capacité de charge de l'oasis au cours des trois millénaires de son existence probable. Les variations du manque de terre et d'eau et leur optimisation par la construction de divers *aflaj* ont été les forces directrices majeures du développement et de la prospérité, apparemment assez stable, de l'oasis.

Zur Veröffentlichung eingereicht

10.2

Eine Checkliste der Kulturpflanzen in der Bergoase Balad Seet, Oman

Karl Hammer¹, Maher Nagieb¹,
and Andreas Buerkert¹

¹ Institut für Nutzpflanzenkunde, Universität Kassel, D-37213 Witzenhausen, Germany

Zusammenfassung

In einer mehrtägigen Übersichtsuntersuchung wurde die kulturpflanzenfloristische Zusammensetzung der Bergoase Balad Seet, Oman analysiert. Insgesamt konnten 66 Arten in einer Checkliste erfasst werden. Die Ergebnisse weisen dem Oman eine besondere Stellung für die Evolution und Erhaltung von Kulturpflanzen zu. Beim Vergleich mit libyschen Wüstenoasen (Ghāt) ergaben sich Ähnlichkeiten aber insgesamt eine größere Variationsbreite des Spektrums der Kulturpflanzen im Oman. Die Arbeiten sollten in einem größeren Rahmen fortgesetzt werden.

Einleitung

Checklisten haben sich als nützliches Werkzeug zur Erfassung der Sammlung pflanzengenetischer Ressourcen erwiesen (Hammer 1991). Erste Vorarbeiten für solche Checklisten wurden in den Ghāt-Oasen der Sahara (Libyen) durchgeführt (Hammer und Perrino, 1985). Dabei wurden im speziellen Fall 57 Arten nachgewiesen. In anschließenden Untersuchungen wurde der Gesamtanteil des kultivierten Pflanzenmaterials für Libyen mit 279 Arten festgestellt (Hammer *et al.*, 1988). Im Jahre 2002 ergab sich die Möglichkeit für eine Untersuchung im extremen Südosten des arabischen Siedlungsgebietes. In der Bergoase Balad Seet konnten 66 Arten in Kultur nachgewiesen werden. Die Ähnlichkeit, auch in der Anzahl der Arten, zu den oben zitierten Wüstenoasen ist auffällig. Das häufigere Vorkommen von tropischen Arten im Oman erhöht dort das Spektrum der Kulturpflanzenarten, so dass für den gesamten Oman mit einer deutlich höheren Artenanzahl als für Libyen zu rechnen ist.

Die Kulturpflanzen sind für den Oman bisher relativ wenig bearbeitet. Eine hervorragende Zusammenstellung der Pflanzen für den gesamten arabischen Raum wurde von Schwartz (1939) erarbeitet wobei er seine Quellen für Kulturpflanzen überwiegend aus dem Jemen bezieht (Deflers, 1889; Blatter, 1919-1936). Spätere Arbeiten beschäftigen sich mit den Kulturpflanzen nur am Rande (Mandaville, 1977; Ghazanfar, 1991; eine Literaturzusammenstellung geben Miller *et al.*, 1982). Guarino (1990a und b) hat im Oman Kulturpflanzen gesammelt und eine Reihe von interessanten Ergebnissen geliefert. Zum bisher erschienenen ersten Band der „Flora der arabischen Halbinsel und Sokotra“ (Miller und Cope, 1996) lassen sich bei den Kulturpflanzen die Lücken wiederfinden, die aus dem Mangel an guten Beobachtungsdaten herrühren, beispielsweise ist *Morus nigra* L., ein typischer Obstbaum der Oasen, nicht für den Oman angegeben.

Für die Wildpflanzen ist die pflanzengeographische Sonderstellung des Oman überzeugend nachgewiesen worden (Kürschner, 1986). Bei den Kulturpflanzen gibt es erste Hinweise, beispielsweise für das Auftreten einer indigenen Sippe von *Coriandrum*

sativum L. (Diederichsen, 1996), und besonderer Formen aus der Gattung *Ocimum* L. (Eckelmann, 2002). Auch die Evolution der Kultursippe *Ceratonia siliqua* L. im Gebiet (Mabberley, 1997) und von *Punica granatum* L., möglicherweise genetisch beeinflusst durch das Auftreten von *Punica protopunica* Balf. F., der einzig verwandten Art auf der benachbarten Insel Sokotra (Hammer, 2001) gehört zu den kulturpflanzengenetischen Besonderheiten des Oman.

Als Erhaltungszentrum für seltene Kulturpflanzensippen ist der Oman erst in letzter Zeit bekannt geworden, insbesondere durch die Beschreibung von zwei neuen Varietäten in omanischen Weizen-Landrassen (Al-Maskri *et al.*, in press). Damit ist dieses Gebiet von hohem Interesse für die Kulturpflanzenforschung. Mit der Checkliste der Kulturpflanzen der Bergoase Balad Seet wird der erste Schritt zu einem intensiveren Studium der Kulturpflanzenflora des Oman getan.

Checkliste

Abutilon theophrasti Medik. (Malvaceae).

Früher vielleicht zur Faserherstellung angebaut, heute Unkraut und als Futter genutzt.

Allium cepa L. (Liliaceae) "Bassal بصل"

Die Küchenzwiebel ist eine wichtige Pflanze des indigenen Anbaus (Guarino, 1990a), auch in Mischkultur mit anderen Fruchtarten.

Allium sativum L. (Liliaceae). "Thum ثوم"

Beliebte Würz- und Gemüsepflanze (Guarino, 1990a).

Aloe vera (L.) Burm. f. (Liliaceae). "Sabbar صَبَّار"

Heilpflanze mit gelben Blüten am Rande dorfnahe Felder in Halbkultur und verwildert.

Anethum graveolens L. (Umbelliferae). "Shabbat"

Von Schwartz (1939) aus dem Jemen berichtet. Aber auch im Oman wichtige Gemüse- und Würzpflanze.

Avena sativa L. (Gramineae). "Shoufan شوفان"

Überwiegend als Viehfutter kultiviert, wahrscheinlich in neueren Sorten (Akhdar und Nadaf, 2001).

Früher war wahrscheinlich *Avena abyssinica* im Anbau (Schwartz, 1939).

Bougainvillea spectabilis Willd. (Nyctaginaceae).

Eine der wenigen in der Oase angebauten Zierpflanzen, auch als dichte Hecke gezogen.

Brassica oleracea L. (Cruciferae). "Malfuf ملفوف"

Weißer Kopfkohl finden sich häufig im Anbau. Aber auch Blumenkohl und Introgressionsprodukte zwischen beiden, die an Brokkoli erinnern. Die beobachteten *Brassica*-Formen scheinen erst in neuerer Zeit eingeführt worden zu sein.

Über einen traditionellen Anbau im Jemen berichtet Schwartz (1939).

Brassica rapa subsp. *chinensis* (Cruciferae). "Kharrdall خردل"

Einige Pflanzen dieser ostasiatischen Sippe wurden im Anbau gefunden. Sie bildeten lockere Köpfe aus. Offenbar erst in neuerer Zeit eingeführt.

Capsicum frutescens L. (Solanaceae). "Fullful فلفل"

Als Würzpflanze (scharfe, rote Früchte) vereinzelt in den Gemüsebeeten angebaut. Die Anbautradition scheint nicht sehr lange zurückzureichen. Von Schwartz (1939) bereits aus dem Jemen berichtet.

Carica papaya L. (Caricaceae). "Fifaye فيفاي"

Häufig in den unteren Lagen angebaut, und auch im Gebirge hier und da anzutreffen. Von Guarino (1990a) für den Oman erwähnt. Beliebtes Obst.

Carthamus tinctorius L. (Compositae). "Osfor عسفر, شوران"

Traditionelle Färbepflanze, oft im Mischanbau mit Getreide und anderen Kulturen. Als Körperfarbe (Stirn) verwendet. Für den Jemen ist ein alter Anbau nachgewiesen (Schwartz, 1939), für den Oman erwähnt bei Guarino (1990a).

Cicer arietinum L. (Leguminosae). "Hummus حمص"

Gehört zu den traditionellen Kulturpflanzen des Gebietes (Nutzung der Samen). Für den Jemen bei Schwartz (1939) erwähnt. Nachweis für den Oman bei Guarino (1990a). Neben traditionellen sind auch neue, sehr ertragreiche Sorten im Anbau.

Cichorium intybus L. (Compositae). "Shakkuriya"

Gelegentlich als Gemüse in Kultur.

Citrus aurantiifolia (Christm. & Panz.) Swingle (Rutaceae). "لومي Lumi"

Getrocknete Früchte werden als Gewürz genutzt. Ein Rückgang im Anbau ist zu beobachten (Guarino, 1990a).

Citrus aurantium L. (Rutaceae). "نارنج Narinj"

Einige Bäume in der näheren Umgebung des Dorfes.

Citrus limon Burm. f. (Rutaceae). "ليمون Laymun"

Wenige Bäume im Anbau. Für den Oman erwähnt (Guarino, 1990a).

Citrus limonia Osbeck (Rutaceae). "ليمون Laymun"

Relativ häufig im Anbau. Wie auch andere Citrus Arten durch die Hexenbesenkrankheit stark geschädigt.

Citrus medica L. (Rutaceae). "سفرجل (الاسم المحلي) Safardjal"

Traditionelle Frucht des Gebietes (Guarino, 1990a). Frühe Berichte aus dem Jemen (Schwartz, 1939).

Citrus sinensis (L.) Osbeck (Rutaceae). "برتقال Burtokal"

Wenige Bäume. Ältere Berichte gibt es aus dem benachbarten Jemen (Schwartz, 1939).

Coriandrum sativum L. (Umbelliferae). "كزبرة Kuzbara"

Traditionsreiches Blattgemüse und –gewürz für Jemen und den Oman (Schwartz, 1939, Guarino, 1990a). Für den Oman wurde ein charakteristischer Genotyp beschrieben (Diederichsen, 1996).

Datura meteloides Dunal (Solanaceae). "زهر أبيض Zahr Abiadh"

Eine der wenigen Zierpflanzenarten im Dorf.

Eruca sativa Mill. (Cruciferae). "جرجير Djardjir"

Alte Würz- und Gemüsepflanze, häufig auf den Feldern angebaut. Früher Nachweis für Jemen (Schwartz, 1939; Miller und Cope, 1996).

Ficus carica L. (Moraceae). "Tīn تين"

Die Feige gehört zu den traditionellen Obstbäumen im Gebiet (Schwartz, 1939). Viele verschiedene Sorten sind im Anbau.

Gossypium arboreum L. (Malvaceae). "Kotn قطن"

Wenige kleinere Bäume in der Oase. Die Kultur verfügt im Gebiet über ein beträchtliches Alter (Schwartz, 1939). Die Faser findet für den Totenkult Verwendung.

Hordeum vulgare L. s.l. (Gramineae). "Shaier شعير"

Die Gerste gehört zu den alten Getreiden des Gebietes (Schwartz, 1936; Guarino, 1990b). Formen mit vierzeiliger Ähre und langer Granne überwiegen. Gerste dient überwiegend als Viehfutter.

Ipomoea batatas (L.) Poir. (Convolvulaceae). "Batata Hulwa بطاطا حلوة, فندال"

Weithin im Oman kultiviert (Guarino, 1990a). Die Knollen werden gegessen.

Jasminum officinale L. (Oleaceae). "Yassamin ياسمين"

Traditioneller Strauch im Jemen (Schwartz 1939). Im Gebiet gelegentlich als Duftspender kultiviert.

Lablab purpureus (L.) Sweet (Leguminosae). "Leblab لبلاب"

Als Hülsenfrucht in Kultur, Blüten blau. Alte Berichte über einen Anbau im Jemen (Schwartz, 1939).

Lactuca sativa L. (Compositae). "Khasx خس"

Berichte über den Anbau dieser Art aus dem Oman sind vorhanden (Guarino, 1990a). Als Blattgemüse in der Oase verbreitet. Verschiedene Formen sind im Anbau.

Lathyrus aphaca L. (Leguminosae). "Djalban Barri جلبان برِّي"

Als Futterhülsenfrucht in Kultur. Die Sippe scheint zu den alten Kulturpflanzen in der Oase zu gehören. Gelegentlich auch importiert (Akhdar und Nadaf, 2001).

Lens culinaris Medik. (Leguminosae). "Adass عدس"

Früher als Hülsenfrucht für den menschlichen Verzehr weithin kultiviert. Heute aus dem Anbau völlig verschwunden durch billige Samenimporte.

Lycopersicon esculentum Mill. (Solanaceae). "Tamatem طماطم"

Traditionelles Fruchtgemüse in Jemen und Oman (Schwartz, 1939; Guarino, 1990a).
Wichtiges Gemüse in der Oase.

Mangifera indica L. (Anacardiaceae). "Mango مانغو"

Traditioneller Fruchtbaum im Jemen und Oman (Schwartz, 1939; Guarino, 1990a).
Wichtiges Obst der Oasen.

Medicago sativa L. (Leguminosae). "Berseem Hidjazi / Ghatt برسيم حجازي / فت"

Alte Futterpflanze in Jemen und Oman (Schwartz, 1939; Guarino, 1990a). Wichtigste
Futterpflanze unserer Oase.

Melilotus officinalis (L.) Pall. (Leguminosae).

Als Futterleguminose unter Datteln gepflanzt.

Mentha piperita L. (Labiatae). "Nanaa نعناع"

Traditionelle Würzpflanze (Jemen: Schwartz, 1939; Oman: Guarino, 1990a),
überwiegend im inneren Siedlungsbereich der Oase.

Mimusops laurifolia (Forssk.) Friis (Sapotaceae).

Alter Obstbaum des arabischen Siedlungsgebietes (Schwartz, 1939). Die Art liefert ein
geschätztes Obst.

Morus nigra L. (Moraceae). "Tuth Asswad توت أسود"

Traditioneller Obstbaum in Jemen und Oman (Schwartz, 1939; Guarino, 1990a). In der
Oase einzelne Sträucher mit relativ kleinen Früchten.

Musa acuminata Colla (Musaceae). "Muz موز"

Stauden mit kleinen Früchten.

Musa x paradisiaca L. (Musaceae). "Muz موز"

Traditionelle Fruchtstaude in Jemen und Oman (Schwartz, 1939; Guarino, 1990).

Myrtus communis L. (Myrtaceae). "Ass أس"

Traditionelle Würz- und Zierpflanze des Oman (Guarino, 1990a).

Nerium mascatense A.DC. (Apocynaceae). "Difflla دفلة"

Endemit des Oman. Gehört in Balad Seet zu den wenigen kultivierten Zierpflanzen. Wächst auch in der Umgebung der Oase.

Ocimum basilicum L. (Labiatae). "Rihan ريحان"

In der Oase gelegentlich als Würzpflanze (Blätter) angebaut (Schwartz, 1939; Guarino, 1990a).

Olea europea L. (Oleaceae). "Zaitun زيتون, عتم"

Alte Kulturpflanze des Gebietes (Schwartz, 1939). Stammt wahrscheinlich von *Olea africana* (Miller) P. Greene ab (*O. chrysophylla* Lam.), einer Wildsippe, die auch in unmittelbarer Nähe der Oase vorkommt. Interessante Konstellation für die Evolution des Ölbaumes!

Pennisetum glaucum (L.) R. Br. (Gramineae). "Dukhn دخن"

Alte Kulturpflanze des Oman (Schwartz, 1939; Guarino, 1990a). In den Oasen als Sommergetreide angebaut.

Phoenix dactylifera L. (Palmae). "Nakheel نخيل"

Wichtigster Fruchtbaum im gesamten Gebiet. Zahlreiche lokale Sorten sind im Anbau. Möglicherweise hat der Oman für die Domestikation dieser alten Kultursippe eine größere Rolle gespielt.

Pisum sativum L. (Leguminosae). "Bazila بازلاء"

Offenbar alte Kulturpflanze im Oman (Guarino, 1990a). Bunt blühende Formen treten als Unkraut in den Getreidefeldern auf (Futterbau). Daneben können aber auch moderne Formen (Speiseerbsen) gefunden werden.

Prunus persica (L.) Batsch (Rosaceae). "Khukh خوخ, دراق"

Im Frühjahr blühender Fruchtbaum.

Punica granatum L. (Punicaceae). "Rumman رمان"

Durch das Vorkommen des möglichen Vorfahrs dieser Art, *Punica protopunica* Balf. f., auf der benachbarten Insel Sokotra ist der Oman als ein Entstehungs- oder Entfaltungszentrum für die alte Granatapfelkultur interessant. Weit verbreitet im Gebiet (Jemen: Schwartz, 1939; Oman: Guarino, 1990a).

Raphanus sativus L. (Cruciferae). "Fudji فجل, رويد"

Traditionelle Kultur in Jemen und Oman (Schwartz, 1939; Guarino, 1990a). Die jungen Pflanzen werden als Gemüse gegessen. Meist weißblühende Formen ohne Rüben, die auch verbreitet als Unkraut im Getreide auftreten.

Ricinus communis L. (Euphorbiaceae).

Arznei- und Zierpflanze im inneren Bereich der Oase.

Rosa damascena Mill. (Rosaceae). "Ward ورد"

Als Zier- und Duftpflanze im Anbau.

Ruta chalepensis L. var. *bracteosa* (DC.) Boissier (Rutaceae)

Zwischen den Getreide- und Gemüseparzellen Einzelpflanzen (in Halbkultur) als Gewürz- und Heilpflanze angebaut. Auch über einen Anbau dieser Sippe aus dem jemenitischen Hochland wird berichtet (Schwartz, 1939).

Solanum melongena L. (Solanaceae). "Badhindjan باذنجان"

Traditionsreiches Fruchtgemüse aus dem Jemen und dem Oman (Schwartz, 1939; Guarino, 1990a). Häufig in den Dattelgärten angebaut.

Sorghum bicolor L. s.l. (Gramineae). "Dhura ذرة بيضاء"

Viele verschiedene Sippen sind als Sommergetreide im Anbau (Schwartz, 1939; Guarino, 1990a).

Terminalia catappa L. (Combretaceae).

Bei Schwartz (1939) als Seltenheit für Anbau erwähnt. Heute weit verbreiteter Zierbaum (bis in die Bergoasen). Die Nüsse werden gegessen.

Trigonella foenum-graecum L. (Leguminosae). "Halba حلبة"

Als Futterpflanze, oft in Mischung mit Getreide, auf den Terrassen angebaut. Über einen alten Anbau wird aus dem Jemen berichtet (Schwartz, 1939), auch Anbaunachweise aus dem Oman vorhanden (Guarino, 1990a).

Triticum aestivum L. em. Fiori et Paoletti (Gramineae). "Kamh / Burr قمح طري / بر"

Variable Landsorten dieser Art sind noch im Anbau. Auffällig sind Formen mit kompakten Ähren und behaarten Spelzen (Al-Maskri *et al.*, in press.).

Triticum dicoccon Schrank (Gramineae) "Alass علس"

An wenigen Stellen konnte diese Art als Reliktkultur gefunden werden (Guarino, 1990a). Früher im gesamten Gebiet häufiger und wahrscheinlich auch in dieser Oase im Anbau.

Triticum durum Desf. (Gramineae). "Kamh قمح صلب"

Auch hier sind variable Landsorten im Anbau. Interessant sind die Parallelvariationen zum Saatweizen des Gebietes (kompakte Ähre, behaarte Spelzen etc.). Die wichtigsten Formen der Oase werden bei Al-Maskri *et al.* (in press) aufgeführt.

Vicia faba L. (Leguminosae). "Ful / Badjilla فول / باجلاء"

Variable Landsorten sind aus dem Jemen und dem Oman bekannt (Schwartz, 1939; Guarino, 1990a). Die typischen Landsorten unserer Oase haben relativ kleine Samen und finden als Viehfutter Verwendung. Einige Sippen mit besonders kleinen Samen treten als Unkräuter in Getreide auf.

Vicia sativa L. (Leguminosae). "Beekiah بيقية"

Als Futterleguminose unter Dattelpalmen angebaut. Auch neu in die omanische Landwirtschaft eingeführt (Akhtar und Nadaf, 2001).

Vitis vinifera L. (Vitaceae). "Karmattu Al Inab كرمة العنب"

Wichtiges Fruchtgehölz in mehreren Sorten auftretend. Berichte aus dem Jemen und dem Oman sind vorhanden (Schwartz, 1939; Guarino, 1990a).

Zea mays L. (Gramineae). "Dhurra Safra نذرة صفراء"

Angaben zum traditionellen Anbau des Mais sind vorhanden (Schwartz, 1939; Guarino, 1990a). Wichtige Getreidepflanze für die menschliche- und die Tierernährung.

Ziziphus spina-christi (L.) Willd. (Rhamnaceae). "Sidr سدر"

Traditionelles Obst (Schwartz, 1939; Guarino, 1990a). In vielen Formen im Anbau bis hin zur dornenlosen var. *inermis* Boiss.

Schlussfolgerungen

Am Beispiel des Emmers (*Triticum dicoccon*) und anderer seltener Kulturpflanzen hat sich gezeigt, daß auch für die entfernten Bergoasen des Oman die Generosion eine nicht zu unterschätzende Rolle spielt. Obwohl die Kulturpflanzenvielfalt in der für den Oman typischen Ausprägung noch immer einer zusammenfassenden Bearbeitung harret, sind an manchen Stellen schon jetzt wichtige Beweise verschwunden. Eine intensive Bearbeitung in den nächsten Jahren kann die einzigartige Kulturpflanzenflora des Gebietes dokumentieren und hoffentlich auch konservieren. Das Studium der Bergoase Balad Seet ist als erster Schritt in diese Richtung zu verstehen.

Literaturverzeichnis

- Akhdar, M. and Nadaf, S. K. 2001. Consolidated Results of the Experiments in Field Crops in Oman (1971-2000). Agriculture Research Station, Jimah, 69pp.
- Al-Maskri, A., Nagieb, M., Hammer, K., Filatenko, A. A., Khan, I. and Buerkert, A. 2002. A note about *Triticum* in Oman. Gen. Res. Crop Evol. (in press).
- Blatter, E., 1919-1936. Flora Arabica. Rec. Bot. Surv. India 8, 1-519.
- Deflers, A., 1889. Voyage au Jemen. Journal d'une excursion botanique faite en 1887 dans les montagnes de l'Arabie heureuse. Paris, 246pp.
- Diederichsen, A., 1996. Coriander (*Coriandrum sativum* L.). Promoting the Conservation and Use of Underutilized and Neglected Crops. IPK and IPGRI, Gatersleben and Rome, 83pp.
- Eckelmann, S. B. J. 2002. Biodiversität der Gattung *Ocimum* L., insbesondere der Kultursippen. Diss. Uni Kassel, 152pp. + Anhang.
- Frey, W. and Kürschner, H. 1986. Masqat area (Oman). Remnants of vegetation in an urban habitat. In H. Kürschner (ed.), Contributions to the Vegetation of Southwest Asia. Beit. Tübinger Atlas des Vorderen Orients, An. 24, 201-221.
- Ghazanfar, S. A. 1991. Floristic composition and the analysis of vegetation of the Sultanate of Oman. Fl. Veg. Mundi 9, 215-227.
- Guarino, L., 1990a. Crop collecting in the Sultanate of Oman in the context of the Arabian Peninsula. FAO/IBPGR Plant Genetic Resources Newsletter 77, 27-33.
- Guarino, L., 1990b. Barley collecting in Southern Arabia. FAO/IBPGR Plant Genetic Resources Newsletter 81/82, 36-38.
- Hammer, K., 1991. Checklists and germplasm collecting. FAO/IBPGR Plant Genetic Resources Newsletter 85, 15-17.
- Hammer, K., 2001. Punicaceae, p.965. In P. Hanelt and IPK (eds.), Mansfeld's Encyclopedia of Agricultural and Horticultural Crops. Springer, Berlin.
- Hammer, K., Lehmann, C. O., Perrino, P. 1988. A check-list of the Libyan cultivated plants including an inventory of the germplasm collected in the years 1981, 1982 and 1983. Kulturpflanze 36, 475-527.
- Hammer, K. and Perrino, P. 1985. A check-list of the cultivated plants of the Ghât oases. Kulturpflanze 32, 269-286.
- Kürschner, H., 1986. Omanisch-makranische Disjunktionen. Ein Beitrag zur pflanzengeographischen Stellung und zu den florenogenetischen Beziehungen Omans. Bot. Jahrb. Syst. 106, 541-562.
- Mabberley, D. J. 1997. The Plant Book. A Portable Dictionary of the Vascular Plants. 2nd ed., Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.
- Mandaville, J. P. 1977. Plants. In Scientific Results of the Oman Flora and Fauna Survey 1975. J. Oman Studies Special Report No.1, 229-269.
- Mandaville, J. P., 1985. A botanical reconnaissance in the Musandam Region of Oman. J. Oman Studies 7, 9-28.
- Miller, A.G. and Cope, T. A. 1996. Flora of the Arabian Peninsula and Socotra. Vol.1. Edinburgh University Press.
- Miller, A. G., Hedge, I. C. and King, R. A. 1982. Studies in the Flora of Arabia: I, A botanical bibliography of the Arabian Peninsula. Notes Roy. Bot. Gard. Edinburgh 40, 43-61.
- Schwartz, O. 1939. Flora des tropischen Arabien. Mitt. Inst. Allg. Botanik Hamburg, 393pp.

10.3

A note about *Triticum* in Oman

A. Al-Maskri¹, M. Nagieb^{1,2}, K. Hammer²,
A. A. Filatenko³, I. Khan¹ and A. Buerkert^{2,4}

¹ Department of Agriculture, Sultan Qaboos University, Al Khod, Oman

² Institute of Crop Science, University of Kassel, D-37213 Witzenhausen, Germany

³ 199034 Sankt Petersburg, 13 Linija, 12, KV 7, Russia

⁴ Corresponding author

Abstract

Little is known about the diversity of wheat (*Triticum* spp.) in Oman. Results of a survey conducted in two remote mountain oasis of northern Oman indicate that there exists considerable morphological variation within and among the five traditional landraces of wheat cultivated. Within two of the landraces grown on irrigated terraces, sized between 2 and 100 m², two new botanical wheat varieties (*Triticum aestivum* var. *baladseetense* and var. *maqtaense*) were identified of which the agronomic properties, in particular tolerance to drought and heat, and the nutritional value are still under investigation.

Key words: Landrace, new botanical varieties, Oman, *Triticum*

Introduction

The Arabian peninsula and Oman, situated at the eastern edge of this peninsula, have an ancient cultivation history of both bread wheat (*Triticum aestivum* L. s. l.) and durum wheat (*Triticum durum* Desf.; Schwartz, 1939; Guarino, 1990). However, given Oman's long geo-political isolation, little is known about the morphological variation, genetic structure, the agronomic properties (such as tolerance against heat, drought and salinity) and quality characteristics of these traditional wheat landraces. Due to the aridity of its climate (from 30 to 300 mm annual precipitation compared to a potential evapotranspiration >2000 mm) irrigation is necessary for crop growth all over in Oman except for the southernmost area which is characterized by a summer monsoon. This leads to only about 2% of Oman's total land surface, equivalent to 150,377 ha being cultivated (Anonymous, 1995).

Commodity wise and technologically irrigated crop production in Oman is divided into two sectors. The first one is in the flat, northern Al Batinah region where a modern, market-oriented agriculture on large land holdings focuses on the production of vegetables for human consumption, and on corn (*Zea mays* L.) and alfalfa (*Medicago sativa* L.) for milk production. This system depends on furrow and sprinkler systems drawing subsurface water from pump wells. These are fed by aquifers originating in the Jabel Akhdar mountains (Fig. 1).

The second sector, which is of interest for this study, consists of traditional, mainly subsistence-oriented oasis systems which date back over 3000 years and produce dates (*Phoenix dactylifera* L.), wheat, sorghum (*Sorghum bicolor* Moench s. l.), barley (*Hordeum vulgare* L. s. l.), alfalfa, lime (*Citrus aurantiifolia* (Christm. et Panz.) Swingle), garlic (*Allium sativum* L.), onion (*Allium cepa* L.) and banana (*Musa* spp.) in rotation systems on small terraces sized between 2 and 100 m². Located in remote mountain valleys of the Central Oman mountains, these systems rely on ancient spring or falaj irrigation infrastructure which tends to rapidly deteriorate as the economic pressure of a

globalized food commodity market reached these villages with the advent of modern access roads.

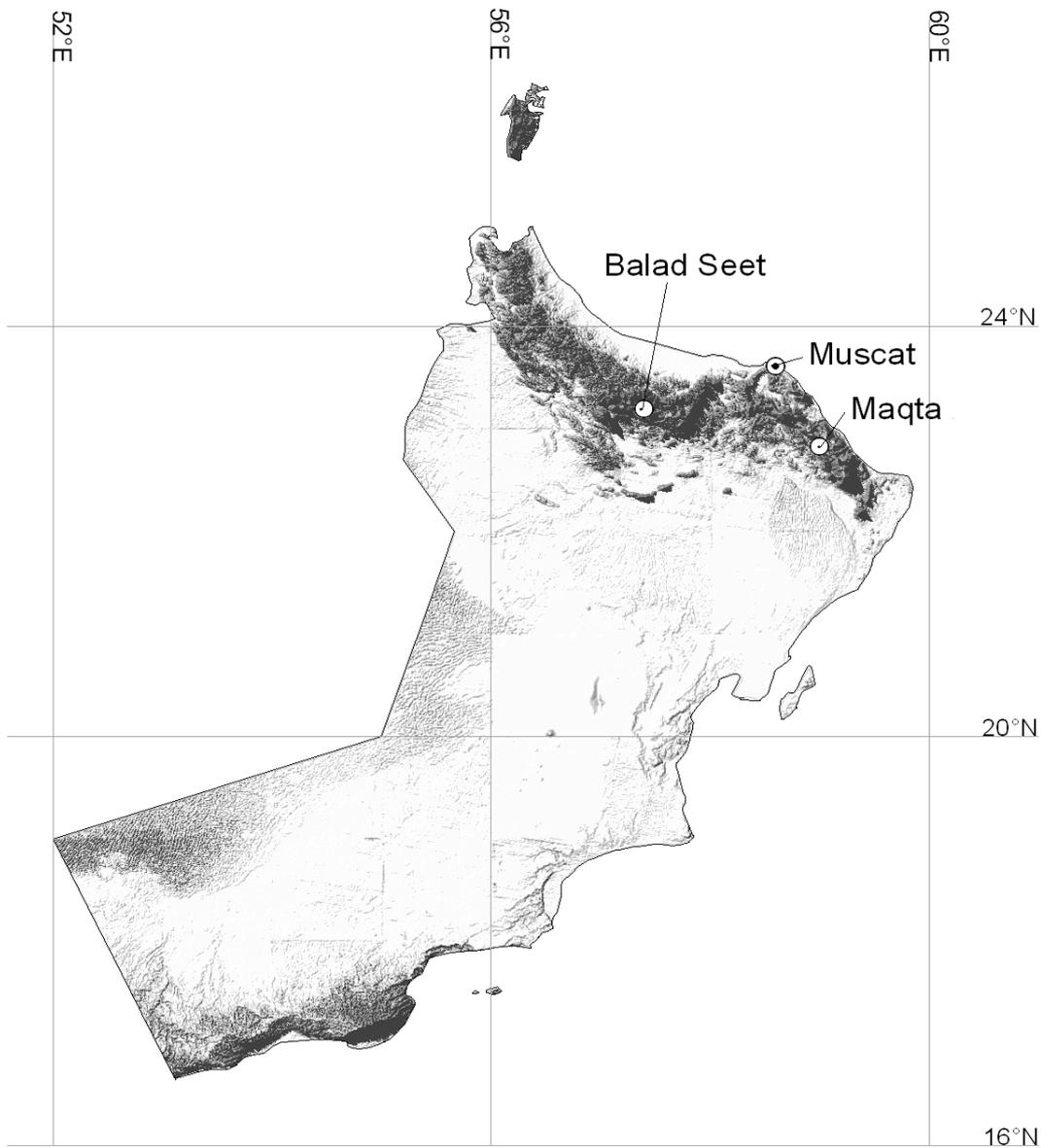


Figure 1. Map of Oman indicating the location of the two mountain oases of Balad Seet and Maqta where the wheat germplasm was collected.

The basic irrigation infrastructure of the falaj systems has been intensively investigated by several authors (Cost, 1983; Dutton, 1986; Norman et al., 1998; Omezzine and Lokman, 1998; Wilkinson, 1974 and 1977). The water use efficiency and nutrient cycling of traditional and introduced crop species in traditional mountain oases of Oman is one of the subjects of an ongoing interdisciplinary project on 'Transformation Processes in Oasis systems of Oman' conducted jointly by scientists from the German Universities of Tuebingen, Stuttgart and Kassel, the German Archeological Institute and Sultan Qaboos University in Oman.

First wheat collections by the Omani Ministry of Agriculture differentiated a number of landraces (Sarraya, Walidi, Cooley, Greda, Missani and Hamira) which were found to be increasingly replaced by higher-yielding modern varieties (Anonymous, 2000). In 1996 the total area sown to Omani wheat typically growing from November to April (Akhtar, 1981) in Interior, Sharquia, Dhahera, and Musandam was only about 238 ha compared to 1000 ha in 1988.

The purpose of this pilot study was to collect wheat seeds from farmers' fields in two remote mountain villages of Oman, to reproduce them under uniform conditions and to subsequently conduct a morphological characterization of their botanic structure.

Materials and methods

In spring 2001 a survey of wheat fields was conducted in the mountain oases of Balad Seet (23.19° N, 57.39° E; 996 m a.s.l.) in Wadi Bani Awf of the Northern Omani Jabal Akhdar mountain range and the village of Maqta (59.00 °E, 22.83 °N; 1250 m a.s.l.) in the Wadi Khabbah of the Al-Hajar Ash'sharqi range (Fig. 1). In Balad Seet the farmers used the landraces Missani, Sarraya and Greda, whereas in Maqta only Missani and Walidi were found. Subsequently about 150 seeds from each landrace were taken to a growth chamber with a 14/10h day/night cycle ($475 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) and 25/20°C, sown in three replicates in pots filled to 0.15 m with a loamy soil, watered daily and supplied four times during the growing season with a nutrient solution (Wuxal Super 886 at 2ml l⁻¹, Schering AG, Duesseldorf, Germany). At maturity all plant material was subjected to a thorough morphological characterization following Dorofeev *et al.* (1979), the so far last complete botanical monograph of *Triticum* with keys also leading to infraspecific taxa.

Results

The morphological characterization revealed that the landraces were often mixtures of *T. aestivum* and *T. durum* comprising the following botanical varieties (Table 1):

1. *T. aestivum* var. *humboldtii* (Koern.) Mansf. (compact spikes), known from Europe and the New World
2. *T. aestivum* var. *insigne* (Kudr.) A. Filat (compact spikes), known from Middle Asia, Mongolia and Afghanistan
3. *T. aestivum* var. *linaza* (Koern.) Mansf. (compact spikes), known from Chile and Mongolia
4. *T. durum* var. *africanum* Koern., known from the Mediterranean and Middle Asia
5. *T. durum* var. *melanopus* (Alef.) Koern., known from the Mediterranean and Middle Asia

6. *T. durum* var. *pseudaffine* (Haciz.) Schreib. (compact spikes) known from Cyprus and Turkey
7. *T. durum* var. *reichenbachii* Koern., known from the Mediterranean, Kaukasus, Transkaukasus, Krim and Ukraine
8. *T. durum* var. *serengei* (Aschers. et Graebn.) Dorof. et A. Filat. (compact spikes), known from North Africa, Middle East and Asia minor

Table 1. Morphological constituents of wheat landraces from Oman

Landrace	Morphological constituents
Sarraya	<i>Triticum aestivum</i> var. <i>baladseetense</i> <i>Triticum durum</i> var. <i>pseudaffine</i> <i>Triticum durum</i> var. <i>reichenbachii</i> <i>Triticum durum</i> var. <i>serengei</i>
Walidi	<i>T. aestivum</i> var. <i>maqtaense</i> <i>T. durum</i> var. <i>africanum</i>
Cooley	<i>Triticum aestivum</i> var. <i>linaza</i>
Greda	<i>T. aestivum</i> var. <i>humboldtii</i> <i>T. aestivum</i> var. <i>insigne</i> <i>Triticum aestivum</i> var. <i>linaza</i>
Missani	<i>Triticum durum</i> var. <i>Melanopus</i> <i>Triticum durum</i> var. <i>Pseudaffine</i> <i>Triticum durum</i> var. <i>serengei</i>

Two new botanical varieties (Fig. 2) of *T. aestivum*, identified within the Walidi and Missani landraces need a formal description:

(a) *Triticum aestivum* var. *baladseetense* Hammer et A. Filat., var. nov.-A *T. aestivo* var. *pseudoicterinum* (Greb.) Mansf. glumis pubescentis differt. Typus: Peninsula arabica, varietas localis (Balad Seet), Reproductio Institutis Scientiae Plantarum Culturarum Wizenhausensis, herb. GAT 04.01.02. Compact spikes, yellow with black awns, grains red, glumes pubescent.

(b) *Triticum aestivum* var. *maqtaense* A. Filat. et Hammer, var. nov.-A *T. aestivo* var. *icterinum* (Alef.) Mansf. glumis pubescentis differt. Typus: Peninsula arabica, varietas

localis (Maqta), Reproductio Institutis Scientiae Plantarum Cultarum Witzenhausensis, herb. GAT 04.01.02.

Compact spikes, yellow with yellow awns, grains red, glumes pubescent.

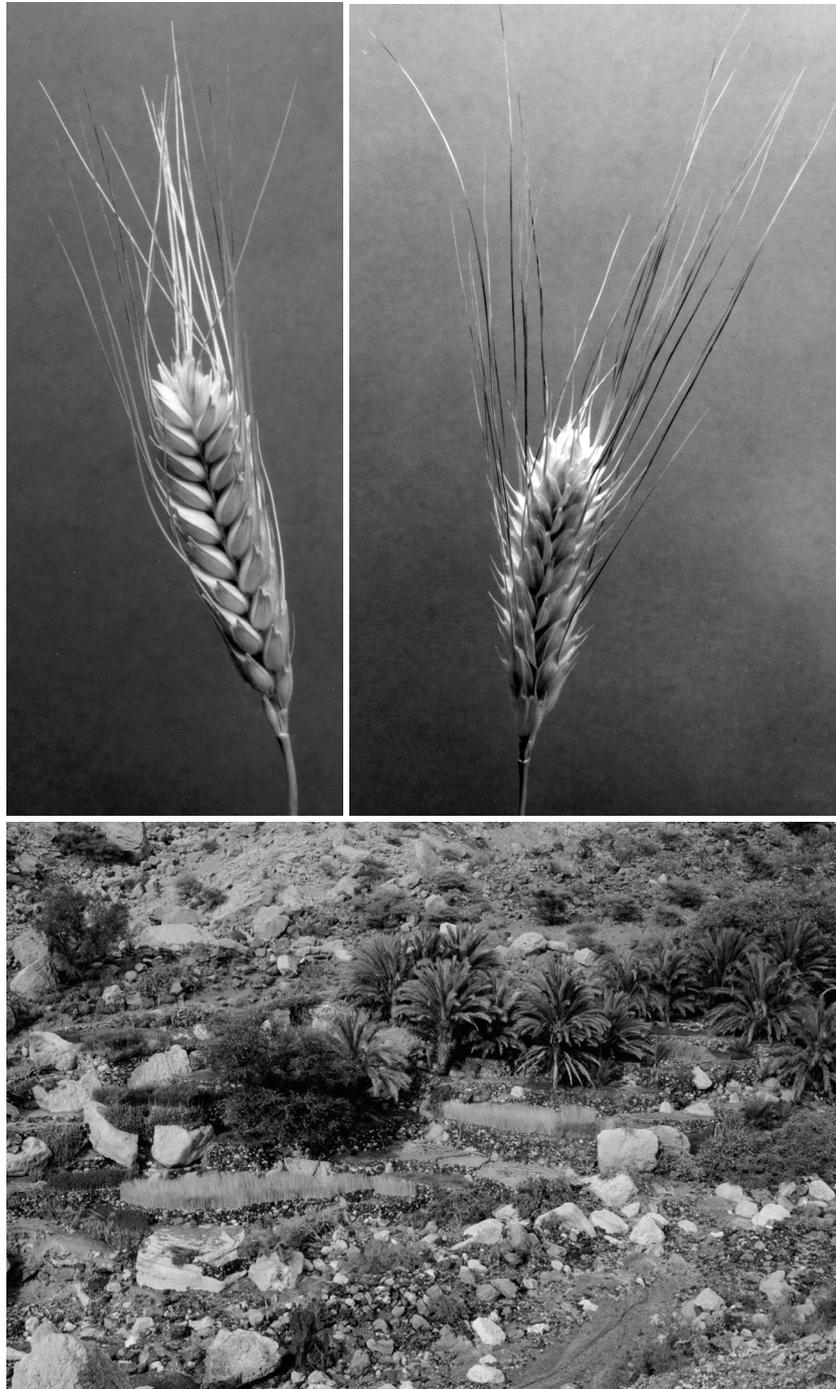


Figure 2. *Triticum aestivum* var. *baladseetense* (above left) and *Triticum aestivum* var. *maqtaense* (above right), two new botanical varieties of wheat identified in the Omani mountain oasis of Balad Seet and Maqta, respectively; typical farmer fields at Maqta (below). The genetic structure of both varieties is currently being analyzed by micro-satellite techniques and compared to the germplasm contained in the wheat gene bank at the

International Maize and Wheat Improvement Centre (CIMMYT) in Mexico. Comparative analyses of the varieties' agronomic traits, grain quality characteristics and possible physiological adaptation to drought and heat, the most important environmental constraints in their habitat will follow. In the next months more systematic surveys in other remote Omani mountain oases with 'niche environments' (Fig. 2) will be conducted to study the diversity of Omani wheats with respect to the documented germplasm of this crop.

Acknowledgements

The authors would like to thank Stefan Siebert for drawing the map. This research was financially supported by the state government of Baden Wuerttemberg, the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), and the University of Kassel.

References

- Akhtar M. 1981. Wheat cultivation in Oman. Nashrah irshadiyah (Saltanat 'Uman). Wizarat al-Zira'ah wa-al-Asmak, 15. 22 p.
- Anonymous. 1995. Agriculture statistics. Department of Statistics, Ministry of Agriculture and Fisheries. Sultanate of Oman. 210 pp.
- Anonymous. 2000. Wheat cultivation in Oman. Nashrah Irshadiyah, Ministry of Agriculture and Fisheries. Oman Extension Guideline. Sultanate of Oman, p. 10-16.
- Cost P. M. 1983. Notes on traditional hydraulics and agriculture in Oman. World Archaeology, 14, 273-295.
- Dorofeev V. F., Filatenko, A. A., Migušova, E. F., Udačin R. A., Jakubciner M. M. 1979. Pšenica. Kul'turnaja Flora SSSR, vol. 1, 347 pp. Leningrad, Russia.
- Dutton R. W. 1986. Agriculture and the Future of Aflaj in Oman. Brismes: proceedings of the 1986 international Conference on Middle Eastern Studies. Oxford 1986, 349-358.
- Guarino, L. 1990. Crop collecting in the Sultanate of Oman in the context of the Arabian Peninsula. PGR Newsletter 77, 27-33.
- Norman W. R., Shayya W. H., Al-Ghafri A. S. and McCann I. R. 1998. Aflaj irrigation and on-farm water management in northern Oman. Irrigation and Drainage Systems 12, 35-48.
- Omezzine A. and Lokman Z. 1998. Management of modern irrigation systems in Oman: allocative vs. irrigation efficiency. Elsevier, Agriculture Water Management 37, 99-107.
- Schwartz, O. 1939. Flora des tropischen Arabien. Mitteilungen aus dem Institut für allgemeine Botanik in Hamburg 10, 393 pp.
- Wilkinson J. C. 1974. The Organisation of the Falaj Irrigation System in Oman. School of Geography, University of Oxford.
- Wilkinson J. C. 1977. Water and Tribal Settlement in South-East Arabia. A Study of the Aflaj of Oman. Clarendon Press, Oxford 1977.

10.4

Irrigation and physico-chemical properties of man-made terrace soils in a mountain oasis of northern Oman

E. Luedeling^a, M. Nagieb^a, F. Wichern^b,
M. Brandt^c, M. Deurer^d and A. Buerkert^a

^a Institute of Crop Science, University of Kassel, D-37213 Witzenhausen, Germany

^b Department of Soil Biology and Plant Nutrition, University of Kassel, D-37213 Witzenhausen, Germany

^c Department of Soil Science, University of Kassel, D-37213 Witzenhausen, Germany

^d Institute of Soil Science, University of Hannover, Herrenhäuser Straße 2, D-30419 Hannover, Germany

Abstract

Little is known about water management in the mountain oases in Oman. This study therefore aimed at unravelling the causes for sustained productivity avoiding salinization in man-made terrace soils of the Jabal Akhdar mountain range. To this end a typical flood-irrigated field sown to alfalfa (*Medicago sativa* L.) was analyzed physico-chemically. The moisture content of its topsoil (0 to 0.2 m) was monitored over several flood irrigation cycles with ECH₂O dielectric capacitance probes. Particle size, organic and inorganic carbon content, pH and electrical conductivity of the soil profile were analyzed at 0.15, 0.45 and 1.00 m. Saturated hydraulic conductivity, the soil's apparent bulk density and soil water potential were determined from undisturbed samples at 0.05, 0.25 and 0.60 m. Irrigation cycles varied between 6 and 9 days. During this time volumetric water contents ranged from about 30% directly after irrigation events to 13% before subsequent watering. A tracer experiment with potassium bromide revealed that between 91% and 85% of the irrigation water was stored in the upper 0.4 m of the soil. Only small amounts of water moved further downward the elaborately-built man-made profile providing the necessary drainage to avoid the build-up of toxic salt concentrations. In the topsoil the plant-available water amounted to 18.7% compared to 13% and 13.5% at 0.25 and 0.60 m depth, respectively. The aggregate structure in the upper 1.0 m of the soil profile is preserved by calcium carbonate concentrations between 379 and 434 mg kg⁻¹ and organic carbon concentration between 157 and 368 mg kg⁻¹ soil.

Key words: *aflaj, leaching, manure application, hydraulic conductivity, salinization*

1. Introduction

In arid regions agriculture is mainly limited by the availability of suitable irrigation water. However, even with sufficient water, its use is often not sustainable leading to soil salinization as a consequence of inappropriate irrigation and drainage techniques. Nevertheless, despite extremely xeric moisture regimes some systems of intensive agriculture have been productive for millennia with only a moderate build-up of toxic salt levels. The mechanisms that govern the sustainability of these systems have not yet been sufficiently investigated.

A suitable location to study the effects of irrigation and the sustainability of dryland agriculture is the Sultanate of Oman on the Arabic peninsula. The country's climate is very arid and hot, with an average temperature of 27 °C, peak temperatures of 45 °C in summer and a mean annual rainfall of 105 mm, all measured in the capital Muscat (Dorvlo and Apratwum, 1998; 1999). Over the years precipitation shows a very erratic

pattern in which relatively moist years of more than 300 mm alternate with dry years of less than 50 mm of annual rainfall (Norman et al., 1998; Victor and Al-Farsi 2001). Droughts lasting as long as five years are also common. This climate makes only 0.3% of Oman's surface eligible for crop production (FAO, 1997), practically all of which is covered by two different types of intensive irrigation agriculture. About 74% of the total agricultural land is irrigated by sprinkler systems and large portions of it are facing serious problems of salinity and groundwater depletion after only a few decades of use. Most of these systems are located in the Batina region near the northeastern coast of the country (Victor and Al-Farsi, 2001).

In the mountainous regions of Northern Oman, a completely different form of agriculture has persisted for at least three millennia (Nagieb et al., 2004). Date palms and annual crops are cultivated in oases that are watered either by springs or by tunnel systems, called *aflaj* (sing. *Falaj*; Norman et al., 1998; Wilkinson, 1977) in Arabic. These were carved into the ground to tap underground aquifers. Both systems require the oases to be located at the foot of cliffs, below plateaus, which accumulate the scarce rainfall of a large area. The accumulated water that resurfaces at the bottom of the cliffs becomes an important resource for irrigation. This geomorphological setting provides a reliable water supply necessary for intensive year-round date and crop cultivation on ancient, artificial terrace soils that are disconnected from the groundwater table and thus do not suffer from salinization due to capillary rise (Jorenush and Sepaskhah, 2003).

In view of the above the objective of this study was to examine how water management practices, the quality of irrigation water, the profile structure of the man-made terraces and the application of large amounts of manure may have allowed to maintain agricultural productivity by avoiding salinization over the more than two millennia of the oasis' existence.

2. Materials and methods

2.1. Site description

The study was conducted in the mountain oasis of Balad Seet (23.19° N, 57.39° E, 995 m asl) in the Jabal Akhdar mountains of Oman. The agriculture of the oasis consists of extensive date palm (*Phoenix dactylifera* L.) gardens and terraced fields, where annual and perennial crops such as landraces of wheat (*Triticum spp.* L.; Al-Maskri et al., 2003), barley (*Hordeum vulgare* L.), garlic (*Allium sativum* L.), onion (*Allium cepa* L.), coriander (*Coriandrum sativum* L.) and alfalfa (*Medicago sativa* L.) are cultivated. The irrigation water for the oasis' agriculture is distributed through an elaborate *aini-aflaj* canal system fed from 12 springs originating at the foot of a calcareous rock wall of 1000 m height in

the southwest of the settlement. The oasis is home to about 650 people, among whom 48 households cultivate the 13.1 ha of available agricultural land (Nagieb et al., 2004).

Flood-irrigation of the terraces, which are divided into square plots (*jalba* in Arabic) of about 2 m², occurs at intervals between five to eighteen days, depending on the season. The soils of the terraces are classified as Irragic Anthrosols according to the FAO (2001) system. There is considerable variation of profile depth which is 1.3 m in the examined part of the Mazra terrace system (Fig. 1). The lower 0.3 m of the soil profile of the Mazra consists of two layers of gravel with different colours and stone sizes, on top of which 1.0 m of silt-rich material was placed at the time of terrace construction. That time has been dated to the year 1092 ± 43 years (Nagieb et al., 2004) using the ¹⁴C method.

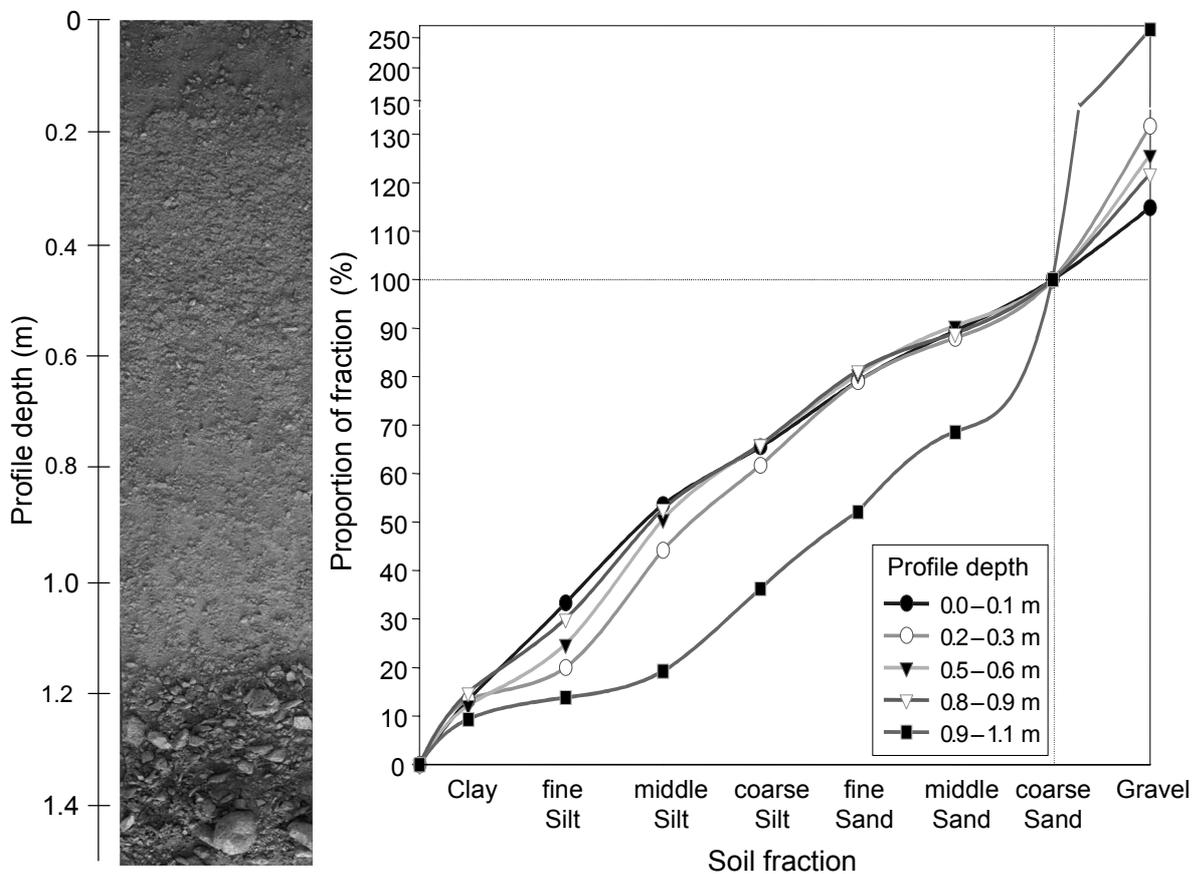


Figure 1. Soil profile of the lower part of the *Mazra* terrace system at *Balad Seet* (Oman) planted with annual crops and alfalfa. Note the difference between the gray, silt-rich upper layers of this man-made profile with their high water-holding capacity and the lower portion with its reddish, stony and rapidly draining structure (left) and the large difference in the particle size distribution curve below 0.9 m (right)

2.2. Basic soil characteristics

Inorganic and organic carbon concentration were determined in samples from three different depth intervals (0 – 0.15 m, 0.15 – 0.45 m, 0.45 – 1.00 m) of an irrigated plot cultivated with alfalfa (*Medicago sativa* L.) using a LECO-RC 412 C-Analyser (LECO

Corp, St. Joseph, MI, USA). The electrical conductivity of the samples (EC_e) was analysed in a soil paste (United States Salinity Laboratory Staff, 1954) by extracting the water from the paste and measuring the EC with a LF 90 conductivity meter (WTW, Weilheim, Germany). The pH of the soil was determined in a 1:2 soil suspension with deionised water.

2.3. Particle size distribution

To determine the particle size of the soil, 25 ml of sodiumpolyphosphate was added to 10 g of soil. The samples were shaken and treated with ultrasound for 5 minutes for complete dispersion. Calcium carbonate ($CaCO_3$) and organic matter were not destroyed as the $CaCO_3$ fraction amounted to more than 35% of this soil (Wichern et al., 2004). A particle size analysis with a large proportion of compound particles being destroyed would not allow any conclusion about its hydraulic properties. The sand and coarse silt fractions were determined by sieving and the finer fractions by sedimentation.

2.4. Soil moisture

The volumetric water content (θ , [$m^3 m^{-3}$]) of the topsoil (0 – 0.2 m) was determined by continuously measuring the electrical conductivity (EC, [$S m^{-1}$]) of the soil using four ECH₂O dielectric capacitance probes (Decagon Devices Inc., Pullman, Washington, USA). The voltage readings (in mV) on the probes are based on the difference between the dielectric number (ϵ) of the soil water ($\epsilon = 80$ at 20 °C), the soil matrix ($\epsilon < 10$) and the soil air ($\epsilon = 1$) (Fares and Alva, 2000). A good correlation between EC and soil water content has been described by several authors (Wu, 1998; Fares and Alva, 2000).

The readings of the ECH₂O probes were collected in 30-minute intervals and stored with a Campbell CR10 (Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA) datalogger. To calibrate the measurements (Mead et al., 1995; Khosla and Persaud, 1997; Chanzy et al., 1998; Lane and Mackenzie, 2001) the volumetric water content of the soil was determined thermogravimetrically on nine occasions. Subsequently, a linear regression was estimated ($r^2 = 0.96$) using the data obtained from the ECH₂O probes and these volumetric measurements. As the readings for the individual probes varied considerably, each probe had to be calibrated separately. After initial experiments under controlled conditions no temperature correction (Campbell, 2002) was applied to the readings obtained as such corrections rather aggravated than alleviated the slight irregularities in the measurements (Fig. 2).

2.5. Saturated hydraulic conductivity

The saturated hydraulic conductivity (k_f) of the soil was determined using a hood permeameter as described by Hartge (1966). Five undisturbed soil samples were vertically excavated with 250 cm³ cylinders at three different depths (0.00 – 0.06 m, 0.20 – 0.25 m and 0.55 – 0.60 m). This sampling occurred in the immediate proximity of the plot where the tracer experiment was conducted. The cylinders were sealed with a lid and tape and transported to Germany, where the soil was carefully saturated with water. This was achieved by placing the cylinders on a layer of rough wire netting in a tub and then slowly raising the water level above the top of the cylinders. The permeameter was then connected to the top of the cylinders and water was added to the top of the permeameter to create excess pressure on the soil surface. The amount of water percolating through the profile was measured and the k_f determined by the Darcy equation.

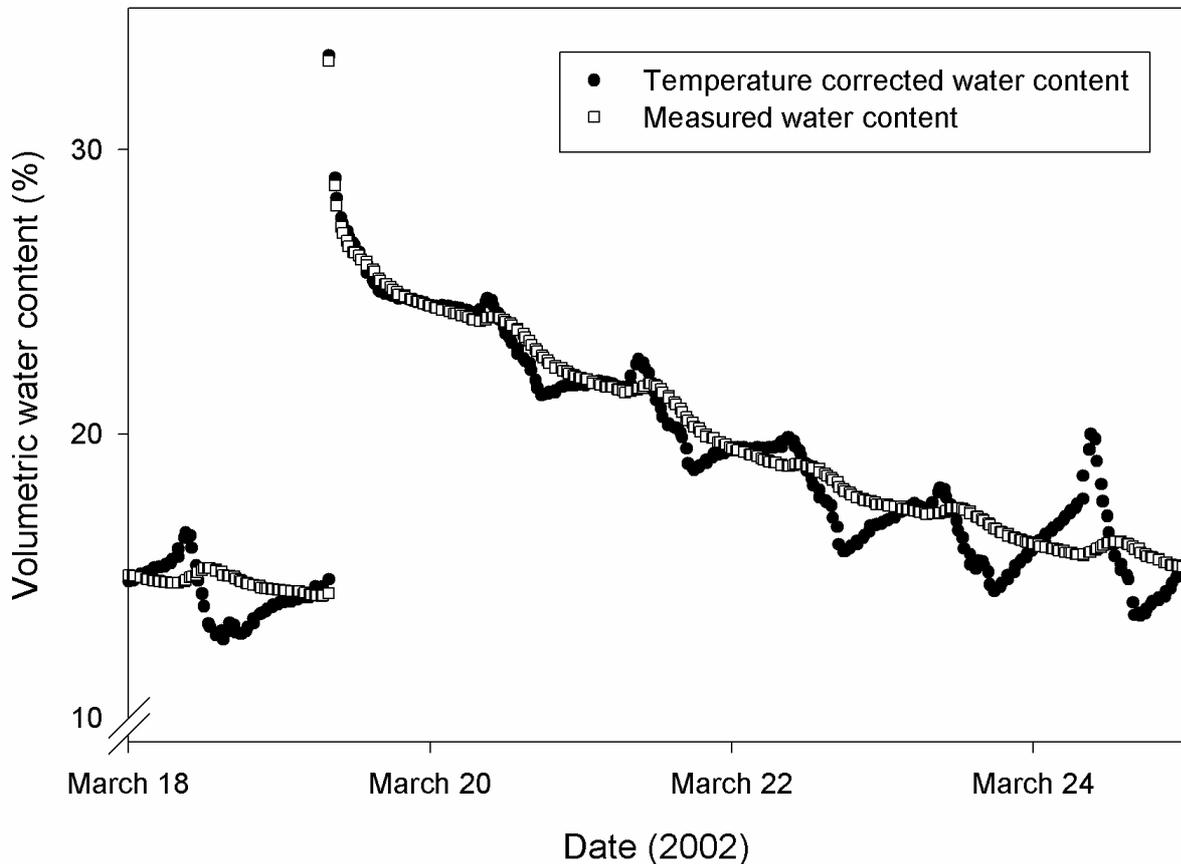


Figure 2. Soil moisture dynamics over 7 days with and without the temperature correction for the volumetric water content (θ) as provided by the probe manufacturer

2.6. Soil water potential

To determine a typical water characteristic function for the terrace soil, five undisturbed samples were taken in 100 cm³ volumetric cylinders from the same depths of the same plot as the k_f samples. Sampling occurred vertically (instead of horizontally) to better

represent the pore system relevant for drainage. The samples were analysed using 5 bar and 15 bar pressure plate extractors (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA, USA). The soil in the cylinders was first slowly saturated with water from the bottom and placed on a porous, water-saturated ceramic plate in a pressure chamber. Then different levels of excess pressure corresponding to different soil water potentials were applied to the extractor and the water quantity draining from the samples at the specific pressures was determined. From these data the overall pore volume was computed and the bulk density determined after drying of the samples.

2.7. Vertical water movement

To obtain information about the vertical movement of water in the soil profile, 10 g of potassium bromide (KBr), corresponding to 6.7 g of bromide ions, were applied as a tracer to two 1 m x 1 m fallow plots along with 40 L (thereafter denoted as the variant Br₄₀), respectively 60 L (thereafter denoted as the variant Br₆₀) of irrigation water applied in a similar way as a typical irrigation occurred. The plots were then covered with plastic sheets to avoid evaporation. Thirteen days after the application of the tracer, triplicate soil samples were taken from each of the plots at four different depth intervals (0 – 0.20 m, 0.20 – 0.40 m, 0.40 – 0.60 m and 0.60 – 0.80 m). The analysis of Br⁻ followed the procedure proposed by Flury (1993). To 20 g of soil, 40 ml of deionised water were added as an extraction agent. After shaking for 30 min the mixture was centrifuged and microfiltrated. Subsequently, the Br⁻ concentration in the extract was measured with a DIONEX ICS-90 ion chromatograph (Dionex Corporation, Sunnyvale, CA, USA). From the average of the diluted and undiluted extracts, blind values from samples from an adjacent plot where no Br⁻ had been applied were subtracted to account for the natural background of Br⁻ in the soil. From the bulk density at the different soil depths and the soil mass of the layers the total amount of Br⁻ in these layers was calculated. Correlating these data with the Br⁻ concentration in the irrigation water allowed the amount of water stored in the soil at different depths to be estimated as well as the amount of water leached beyond 0.80 m. Given the physical structure of the profile, this latter portion of water was considered to be draining to the aquifer.

2.8 Quality of Irrigation water

Spring water samples were taken from the main *afraj* of the oasis. As all springs originate from only one aquifer, samples were pooled, transported to Germany and analyzed for dissolved minerals, pH, electrical conductivity (EC_w) and for the sum of alkaline earth ions and carbonates (total and carbonate hardness) at SEWA GmbH, Essen, Germany.

2.9 Calculation of leaching fractions and leaching requirements

The leaching fraction establishes a relation between drainage and salinity. It may be estimated from a steady-state salt-balance equation (Hoffman and Durnford, 1999) as:

$$Lf = \frac{D_d}{D_a} = \frac{EC_w}{EC_d},$$

where D_d [mm] is the amount of drainage water from the root zone, D_a [mm] is the amount of irrigated water, EC_w [dS/m] is the electrical conductivity of the irrigation water and EC_d [dS/m] is the electrical conductivity of the water draining from the root zone. It is difficult to measure EC_d *in situ*. Therefore we estimated EC_d as recommended by Ayers and Westcot (1994) as $2 EC_e$, where EC_e [dS/m] is the average soil salinity measured in a saturation extract.

The leaching requirement (Lr) is the amount of additional irrigation water required to avoid a harmful built-up of salts in the root zone of plants. This amount depends on numerous factors, including the salinity of the soil, soil type, water quality, rainfall, drainage, and crop tolerance. Probably the single most important factor is the quality of the water. The water quality sets the lower limit for the minimum salinity that can accommodate the growth of a specific crop (such as alfalfa). The leaching requirement for a specific crop can be estimated with different methods, one of them is given by Ayers and Westcot (1994) as:

$$Lr = \frac{EC_w}{[5EC_{e,C} - EC_w]},$$

where $EC_{e,C}$ [dS/m] is the average soil salinity measured in a saturation extract tolerated by a specific crop C. For alfalfa no yield reduction is expected for $EC_e < 2.0$ (Ayers and Westcot, 1994).

2.10 Statistics

One way analyses of variance of all data were carried out using Statview 5.0 (SAS Inst. Inc., Cary, NC, USA) and Fisher's protected least significant difference (LSD) test was used to separate means.

3. Results

3.1. Basic soil characteristics

The inorganic carbon content was greater than 4% at all depths. These high values reflect the lime content of up to 43% throughout the profile (Table 1). Alkaline soil conditions are reflected in pH values ranging between 8.3 and 8.4 which. However, the alkalinity is not the result of increased salinization (see below). The organic carbon

content (Corg) was 3.7% in the topsoil, but declined substantially with depth. The soil's electrical conductivity (EC) was moderately high in the upper 0.45 m of the soil but 4.6-fold higher below 0.45 m (Table 1).

Table 1. pH and concentration of inorganic carbon, CaCO₃, organic carbon, electrical conductivity of the soil (EC_e) and leaching fraction (Lf) at three different depths of a terrace soil from Balad Seet (Oman)

Depth (m)	pH	Inorganic carbon %	CaCO ₃ %	Organic carbon %	Electrical conductivity EC _e dS m ⁻¹	Leaching fraction Lf [†]
0.00 – 0.15	8.32	4.55	37.9	3.68	1.404	0.18
0.15 – 0.45	8.40	4.67	38.9	2.98	0.883	0.28
0.45 – 1.00	8.37	5.21	43.4	1.57	4.826	0.05

[†] Estimated according to Ayers and Westcot (1994) as $EC_w/(2 EC_e)$

3.2. Particle size

The soil profile can be stratified into two layers. The upper grayish coloured part (0-0.9 m) has a homogeneous particle size distribution with about 14% clay, 51% silt, 35% sand, and an additional 24% gravel, relative to the fine mineral soil. The lower layer (0.90 – 1.10 m), in contrast, showed a much higher proportion of coarse material with only 9% clay and 27% silt, but 64% sand and 163% gravel. Comparisons of the profile's colours with material from the surrounding mountains indicate that the upper layers likely are sediment deposits collected on the floor of the valley (wadi) after heavy rainfall events, while the lower layers, particularly the reddish subsoil material (> 1.10 m; Fig. 1) come from broken bedrock material.

3.3. Soil moisture

In each of two selected irrigation cycles between March 18th and April 3rd 2002, an initial rise of the volumetric water content to between 30.6% and 33.1% was recorded in the topsoil, with a subsequent decline in soil moisture to between 13.4% and 15.0% (Fig. 3). Cycle durations lasted 5 days, 21 hours and 8 days, 14½ hours, respectively. For the rest of the year 2002, the irrigation cycles varied between 5 and 18 days, with cycle duration decreasing during the hot summer months when the plant water demand was higher. The probes indicated a slight rise in soil water content around noon of each day (Fig. 3).

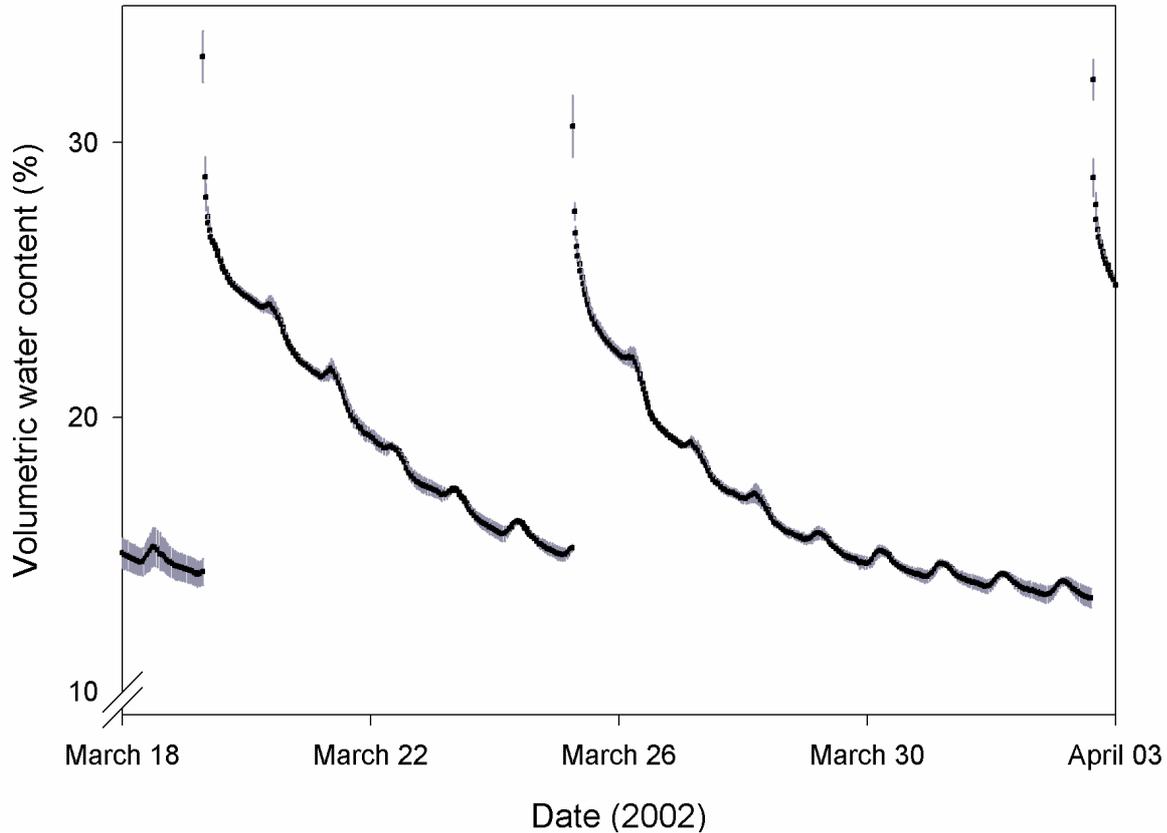


Figure 3. Soil moisture dynamics over two irrigation periods. The data are means of four probes with the grey bars indicating \pm one standard error

3.4. Saturated hydraulic conductivity (k_f)

Of the five samples for each depth, typically one had a conductivity that was several-fold higher than that of the other samples from that layer. After conducting an outlier test (Dixon, 1950), these samples, which might not have been properly filled on site and therefore been disturbed during their transport on bumpy mountain roads, were discarded. The four replicates used for comparison consistently showed a high saturated hydraulic conductivity. The hydraulic conductivity (k_f) in the subsoil was with 840 ± 69 and 681 ± 83 cm d^{-1} much higher than in the topsoil (276 ± 41 cm d^{-1}) (Table 2). The greater total pore volume in the topsoil reflected its lower bulk density (Fig. 4).

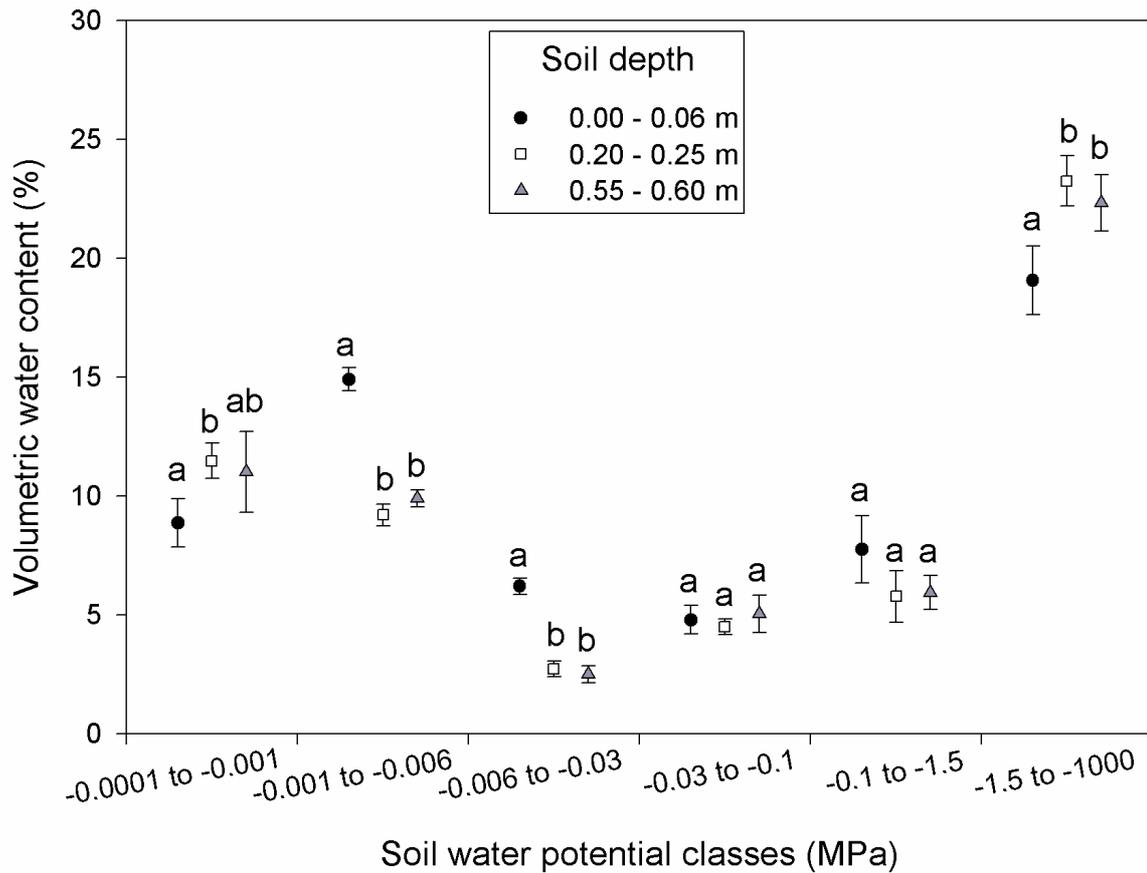


Figure 4. Pore volume at different depths and soil water potential classes. The error bars indicate \pm one standard error. Values at the same soil water potential with the same letter are not significantly different at $p < 0.05$

3.5. Soil water potential

The fractions of soil macropores (defined by a soil water potential of -0.0001 to -0.001 MPa) and of water not available for plants (defined by a soil water potential of -1.5 to -1,000 MPa) were higher at lower depths. The water characteristic function of the topsoil, however, showed a significantly higher fraction at a potential from -0.001 to -0.03 MPa. This is the pressure range from which water can be extracted easily by plants. The equivalent pore volume at potentials between -0.03 MPa and -1.5 MPa was relatively low and did not differ between the individual soil depths ($p < 0.05$). The soil water characteristic curve clearly shows the higher proportion of intermediate-size pores in the topsoil and the predominance of smaller pores at 0.20 – 0.25 m and 0.55 – 0.60 m (Fig. 5). The higher available field capacity indicates that the topsoil has a significantly higher ability to store plant available water than the deeper layers (Table 2).

Table 2. Saturated water conductivity, total pore volume, bulk density and available field capacity, \pm one standard error, of undisturbed soil samples from a terrace plot at Balad Seet. Values within one variable with the same letter do not differ at $p < 0.05$. Data are means of four replicates

Depth (m)	Saturated hydraulic conductivity (k_f) ($m\ d^{-1}$)		Total pore volume (%)		Bulk density ($kg\ m^{-3}$)		Available field capacity (vol %)	
0.00 – 0.06	2.76 ± 0.4	a	61.6 ± 0.3	a	$1,020 \pm 10$	a	18.7 ± 1.7	a
0.20 – 0.25	8.40 ± 0.7	b	56.9 ± 0.5	b	$1,140 \pm 10$	b	13.0 ± 0.7	b
0.55 – 0.60	6.81 ± 0.8	b	56.7 ± 0.6	b	$1,150 \pm 20$	b	13.5 ± 0.8	b

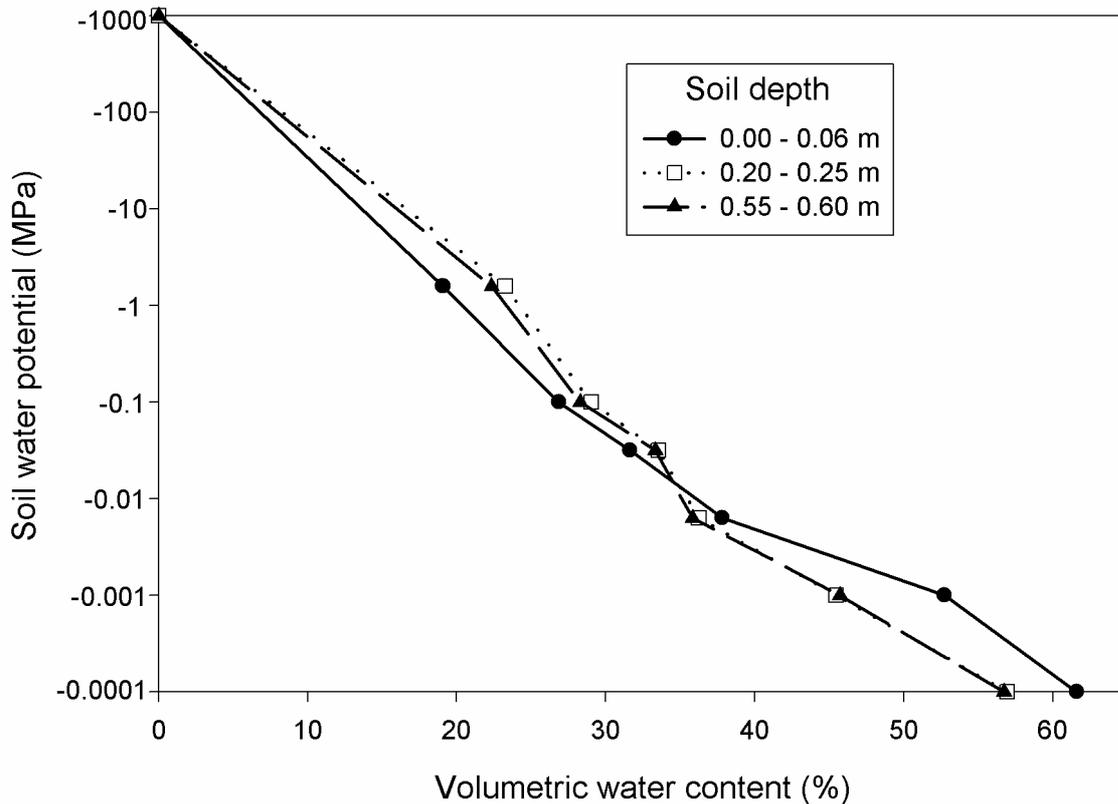


Figure 5. Soil water characteristic function of a terrace soil at Balad Seet at three different depth intervals

3.6. Vertical water movement

The tracer experiment reveals that most of the applied water does not leave the topsoil of the profile, but remains in the upper 0.2 m of the soil (Fig. 6), where in both variants the centre of mass of the Br^- concentration *versus* depth distribution is found. With increasing depth, the Br^- concentration rapidly declines. In the topsoil the Br^- peak tends to be

higher with the lower amount of applied water in variant Br₄₀ than in Br₆₀, whereas the reverse occurs at deeper layers. However, these differences are significant only at 0.20 – 0.40 m.

The amount of water stored in the different layers also is affected by the amount of applied water (Table 3). Irrespective of depth, significantly more water is stored with Br₆₀ than with Br₄₀. However, as calculated from the amount of Br⁻ applied but not accounted for in the analysis, there were only minor treatment effects on the amounts of drainage to deeper layers (Br₄₀ = 13.4 ± 1.1 L; Br₆₀ = 12.8 ± 4.2 L). Based on the mass balance calculations for Br⁻, the total amount of leaching beyond 0.8 m was estimated at 33% for 40 mm irrigation (Br₄₀) and at 21% for 60 mm (Br₆₀, Table 3).

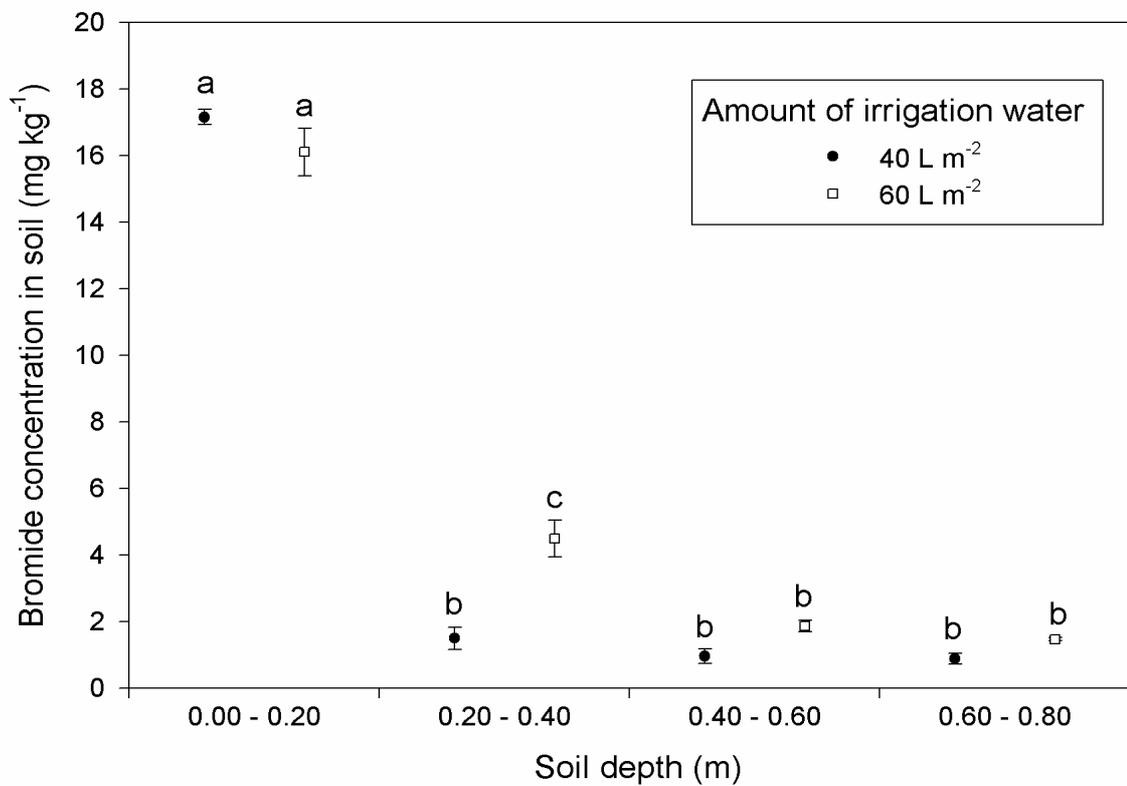


Figure 6. Bromide concentrations in soil samples from different depths of a terrace soil at Balad Seet, Oman. The error bars indicate ± one standard error (n=3). 10 g of potassium bromide were dissolved in 40 and 60 L of water respectively. Values with the same letter do not differ at p<0.05

Table 3. Bromide (Br^-) concentrations and mass balance (% of applied Br^- recovered) in the soil after irrigation with 40 and 60 L m^{-2} (Br_{40} and Br_{60} , respectively) of water in a tracer experiment conducted at Balad Seet (Oman) and estimated amounts of stored water at different soil depths. Data are means of four replicates and wherever applicable followed by their standard error of the mean

Irrigation	Soil depth (m)	Bulk density (kg m^{-3})	Soil mass (kg)	Br^- concentration (mg kg^{-1} soil)	Total Br^- in soil (g)	Br^- concentration in irrigation water (g L^{-1})	Stored water (L)
Br_{40}	0.00 – 0.20	1,080	216	17.2 ± 0.2	3.7 ± 0.1		22.1 ± 0.4
	0.20 – 0.40	1,140	228	1.5 ± 0.3	0.3 ± 0.0		2.0 ± 0.1
	0.40 – 0.60	1,150	230	1.0 ± 0.2	0.2 ± 0.0	0.17	1.3 ± 0.2
	0.60 – 0.80	1,150	230	0.9 ± 0.2	0.2 ± 0.1		1.2 ± 0.3
	Sum				4.5 ± 0.2		26.6 ± 1.1
	% of applied				67		
Br_{60}	0.00 – 0.20	1,080	216	16.1 ± 0.7	3.5 ± 0.2		31.1 ± 1.8
	0.20 – 0.40	1,140	228	4.5 ± 0.6	1.0 ± 0.2		9.2 ± 1.8
	0.40 – 0.60	1,150	230	1.9 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.11	3.8 ± 0.5
	0.60 – 0.80	1,150	230	1.5 ± 0.1	0.3 ± 0.0		3.1 ± 0.1
	Sum				5.3 ± 0.5		47.2 ± 4.2
	% of applied				79		

3.7. Quality of irrigation water and leaching requirement

The analysis of the irrigation water reveals that the water is moderately hard with a sum of alkaline earth ions (total hardness) of 2.57 mmol L^{-1} . Most of this hardness is caused by carbonate ions. The chloride (Cl^-) concentration is low and the residual sodium carbonate (RSC) concentration negative (Table 4). Given the high quality of the irrigation water the leaching fraction for alfalfa with $\text{EC}_w = 0.5$ and $\text{EC}_{e,C} = 2.0$ for a 100% crop yield is 0.05 (Table 1).

Table 4. pH, electrical conductivity (EC), concentration of chloride (Cl), calcium (Ca), magnesium (Mg), sodium (Na), total anions and total cations, total alkalinity, residual sodium carbonate (RSC) and sodium adsorption ratio (SAR) in spring irrigation water at Balad Seet (Oman)

pH	EC dS m ⁻¹	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Total		Alkalinity	RSC	SAR
						anions	cations			
						meq l ⁻¹				
8.24	0.51	0.56	2.82	2.30	0.56	5.64	5.73	4.56	-0.88	0.47

4. Discussion

The maintenance of the soil's salt concentration at a level which is not hampering plant growth by little, but regular, drainage is the main parameter which under the prevailing arid conditions determines the oasis' sustained productivity over time. Neither the measured pH levels of 8.3 to 8.4 nor the EC values of 0.88 to 1.40 dS m⁻¹ show the effects of salt accumulation in the upper soil layers where most of the roots are observed. A major reason for the avoidance of salinization in the upper soil layers is the quality of the spring irrigation water, with its high concentrations of hardly soluble carbonates and high HCO₃ *versus* low Na and Cl. According to the classification proposed by Rhoades et al. (1992), the irrigation water at Balad Seet has drinking water quality. It appears as if most of its alkalinity is buffered by Ca and Mg leading to large precipitations of those minerals. This would explain the high CaCO₃-concentrations throughout the profile (Table 1) and also leads to a low risk of alkalisation or sodication.

The availability of high quality irrigation water and sufficient leaching within the traditional management system of this mountain oasis is also reflected in the low EC of the soil saturation extract. Even sensitive crops such as maize and alfalfa experience major yield declines only at between 1.7 and 5.9 dS m⁻¹ and between 2.0 and 8.9 dS m⁻¹ (Maas and Hoffman 1977; Rhoades, 1982).

This irrigation water quality also leads to small leaching requirements, such as 0.05 for alfalfa. Therefore even with limited water resources the main strategy to avoid salinization in the soils of the Oasis seems to have been to establish leaching fractions in the root zone that are considerably higher than the leaching requirement (Table 1). In the main rooting zone (0-0.45 m depth) the salinity is well below the value (EC_e =2.0) that would reduce the alfalfa yield. Only from the bottom of the root zone (0.45 m) downward a small build up of salinity was observed (Table 1). The reason for this likely is the intensive extraction of water by the roots in the topsoil increasing the salinity of the residual water that leaches further downwards.

The mass of Br lost from the profile in 0-0.8 m (see Table 3) represents the leaching fractions for two typical irrigation cycles. It was 0.35 for Br₄₀ and 0.21 for Br₆₀. A smaller amount of irrigation at this site seems to be less effective (more Br lost) and leads to higher leaching fractions. Generally, the variation of the leaching fraction between individual irrigation cycles is high. Still the value of 0.21 is fairly close to the long-term leaching fraction of 0.16 that can be calculated by integrating the depth dependent leaching fractions (Table 1) over the depth of the tracer experiment (0-0.8 m).

The available field capacity is particularly high in the topsoil (19%), which likely reflects the effects of regular soil tillage and of abundant root growth. In the untilled subsoil, in contrast, the available field capacity is only moderately high (13%). The necessary drainage of the soil is provided by the large proportion of macro-pores (at a soil water potential of > -0.006 MPa) in the unploughed lower soil layers of 20.7% and 20.9 % at 0.20 and 0.55 m depth, respectively, and among these especially by the large proportion of quickly draining pores (soil water potential of > -0.001 MPa) of 11.5% and 11.0 %. During irrigation events, the significantly lower saturated water conductivity in the topsoil prevents a rapid leaching of water to deeper soil layers, thereby increasing the time available for infiltration into the smaller soil pores. After flooding, the macro-pores are rapidly drained, avoiding harmful effects of waterlogging on crop growth. The small amount of leached water (estimated in this study to be about 13 L m⁻²) is sufficient to transport salts to greater depths. However, the subsoil peak in the EC of 4.8 dS m⁻¹ suggests that some solutes do not reach the gravelly drainage layer at the bottom, but remain in the profile.

The very high Corg concentrations in the oasis soil investigated are a third important prerequisite for the oasis' sustainability, as they contribute to aggregate stability, reduce the effects of salinization on plant growth by providing active cation and anion exchange sites, and supply plant nutrients by a high turnover rate (Wichern et al., 2004). The high Corg levels reflect the regular application of manure at rates of up to 20 t ha⁻¹ year⁻¹. A decrease in manure application and partial replenishment of extracted nutrients by mineral fertilizers, as observed in recent years in some plots of the oasis' terrace systems, may lead to a long-term decline of soil Corg. In the long-term increasing levels of salts in the soil profile may be the consequence of a deteriorating soil structure and hampered drainage.

The moisture dynamics of the soil profile describe the efficacy of the elaborate distribution system for the springs' outflow. The scarcity of water may motivate farmers to match its availability with crop evapotranspiration throughout the year. Lacking symptoms of water stress indicates that within an irrigation cycle the minimum topsoil

moisture content of 13.4 % is sufficient for maintaining crop metabolisms, even though according to the soil water curve, all water at that level should be non-available to plants. It must be assumed that during the latter part of the irrigation cycle, plants extract less water from the topsoil, in which the probes were installed, than from the rooted soil below, which extends to approximately 0.5 m depth. This layer is not exposed to solar radiation and consequently does not dry out rapidly.

The daily rise in the moisture level at noon (Fig. 2) is an unexpected result and may reflect an experimental artefact. One explanation for this phenomenon could be the penetration of warm midday air into the soil and subsequent condensation around the impermeable plastic probes, thereby leading to erroneous increases in their soil moisture readings. However, this could not be verified experimentally.

5. Conclusions

High quality irrigation water, the elaborately built soil structure of the terraces, a system of water distribution designed to match crop needs during their different growth stages and adequate drainage are the main factors explaining the lack of salinization in ancient mountain oases of Oman. It remains to be seen, however, whether these *afraj*-based systems can withstand the challenges posed by overpopulation, rapidly raising labour costs and the heavy use of mineral fertilizers instead of manure-based recycling to maintain their productivity. Given the aridity of the climate and high ambient temperatures maintaining soil Corg levels and appropriate leaching will certainly remain a key prerequisite to avoid the build-up of salts over time.

References

- Al-Maskri, M., Nagieb, M., Hammer, K., Filatenko, A.A., Khan, I., Buerkert, A., 2003. A note about *Triticum* in Oman. *Gen. Res. Crop Evol.* 50 (1), 83-87.
- Ayers, R.S., Westcot, D.W., 1994. *Water Quality for Agriculture*. Irrig. and Drain. Paper No. 29, Rev. 1. FAO, Rome, Italy.
- Campbell, C.S., 2002. Response of ECH₂O Soil Moisture Sensor to Temperature Variation. Application Note. Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, USA.
- Chanzy, A., Chadoeuf, J., Gaudu, J.C., Mohrath, D., Richard, G., Bruckler, L., 1998. Soil moisture monitoring at the field scale using automatic capacitance probes. *Europ. J. Soil Sci.* 49 (4), 637-648.
- Dixon, W.J. 1950. Ratios involving extreme values. *Ann. Math. Statist.* 21, 488-506.
- Dorvlo, A.S.S., Ampratwum, D.B., 1998. Summary climatic data for solar technology development in Oman. *Renew. Energy* 1-4, 255-262.
- Dorvlo, A.S.S., Ampratwum, D.B., 1999. Modelling of weather data for Oman. *Renew. Energy* 17, 421-428.
- FAO, 1997. FAOSTAT agriculture database. FAO, Rome, Italy. Accessible at: <http://www.fao.org>.
- FAO, 2001. Lecture notes on the major soils of the world. FAO, Rome, Italy.
- Fares, A., Alva, A.K., 2000. Evaluation of capacitance probes for optimal irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile. *Irrig. Sci.* 19, 57-64.
- Flury, M., 1993. Transport of bromide and chloride in a sandy and a loamy soil. Dissertation No 10185, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich, Switzerland.
- Hartge, K.H., 1966. Ein Haubenpermeameter zum schnellen Durchmessen zahlreicher Stechzylinderproben. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung* 7, 155-163.
- Hoffman, G.J., Durnford, D.S., 1999. Drainage Design for Salinity Control. Chapter 17 in: Skaggs, R.W., Van Schilfgaarde, J. (eds.) *Agricultural Drainage*. Agronomy Series No. 38, American Society of Agronomy, Madison, USA.
- Jorenush, M.H., Sepaskhah, A.R. 2003. Modelling capillary rise and soil salinity for shallow saline water table under irrigated and non-irrigated conditions. *Agricultural Water Management* 61, 125-141.
- Khosla, R., Persaud, N., 1997. Performance of a non-nuclear resonant frequency capacitance probe. 1. Calibration and field testing. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 28 (15-16), 1333-1345.

- Lane, P.N.J., Mackenzie, D.H., 2001. Field and laboratory calibration and test of TDR and capacitance techniques for indirect measurement of soil water content. *Austr. J. Soil Res.* 39 (6), 1371-1386.
- Maas, E.V., Hoffmann, G.J., 1977. Crop salt tolerance - current assessment. *ASCE J. Irrig. and Drainage Div.* 103 (IR2), 115-134.
- Mead, R.M., Ayars, J.E., Liu, J., 1995. Evaluating the influence of soil texture, bulk density and soil water salinity on a capacitance probe calibration. *ASAE Summer Meeting Presentation*, Chicago, IL, USA.
- Nagieb, M., Häser, J., Siebert, S., Luedeling, E., Buerkert, A., 2004. Settlement history of a mountain oasis in northern Oman - Evidence from land use and archaeological studies. *Die Erde* (in press).
- Norman, W.R., Shayya, W.H., Al-Ghafri, A.S., McCann, I.R., 1998. Aflaj irrigation and on-farm water management in northern Oman. *Irrig. Drain. Sys.* 12, 35-48.
- Rhoades, J.D., 1982. Reclamation and management of salt-affected soils after drainage. *Proc. First Annual Western Provincial Conf. Rationalization of Water and Soil Resources and Management*, Lethbridge, Alberta, Canada. 29 November-2 December 1982. pp. 123-197.
- Rhoades, J.D., Kandiah, A., Mashali, A.M., 1992. The use of saline waters for crop production - *FAO irrigation and drainage paper 48*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- United States Salinity Laboratory Staff, 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. Agricultural Handbook No. 60. United States Department of Agriculture, Washington D.C., USA.
- Victor, R., Al-Farsi, A.A.I., 2001. Water quality and invertebrate fauna of farm wells in an area affected by salinization in Oman. *J. Arid Environ.* 48, 419-428.
- Wichern, F., Luedeling, E., Müller, T., Joergensen, R.G., Buerkert, A., 2004. Field measurements of the CO₂ evolution rate under different crops during an irrigation cycle in a mountain oasis of Oman. *Appl. Soil Ecol.* 25, 85-91.
- Wilkinson, J.C., 1977. *Water and Tribal Settlement in South-East Arabia. A study of the aflaj of Oman*. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Wu, K.G., 1998. Measurement of soil moisture change in spatially heterogeneous weathered soils using a capacitance probe. *Hydrol. Processes* 12 (1), 135-146.

Acknowledgements

The authors are grateful to H. Wildhagen, J. Böttcher and S. Siebert for their advice, to E. Wiegard, C. Thieme, B. Heiligtag, U. Pieper, M. Hammer-Weiß, and R. Spinger for their contributions to the soil analyses and to Horst Weier for the hydrogeological classification of the study area. They are also indebted to Sultan Qaboos University, Muscat for technical and logistical assistance and to the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) for funding. Many thanks also to the farmers of the oasis of Balad Seet for their patience and hospitality.

Danksagung

Mein besonderer herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr. Andreas Bürkert für seine großartige fachliche Unterstützung und seine menschliche Geduld während meiner Arbeit im Rahmen dieses Projektes sowohl im Oman als auch am Institut. Herrn Prof. Dr. Karl Hammer danke ich ebenfalls sehr herzlich für seine hilfreiche Unterstützung und fachliche Beratung während mehrerer Exkursionen im Oman. Besonders danken möchte ich auch Dr. Ahmad Al-Maskri für seine Unterstützung im Oman, insbesondere für seine fachliche Beratung, die sehr zur Verwirklichung dieser Untersuchungen beigetragen hat. Mein herzlicher Dank gilt auch Prof. Dr. Christian Richter für seine fachliche Beratung und großartigen Unterstützung sowie Herrn Burkhard Heiligtag für die seine Unterstützung bei der Probenanalyse sowie während meines ganzen Aufenthaltes in Witzenhausen.

Ebenso danken möchte ich Frau Sigrid Haber für ihre zuverlässige und freundliche Hilfe im Institutssekretariat, Frau Claudia Thieme und Frau Eva Wiegard für ihre technische Unterstützung, sowie dem Gewächshausteam. Dankbar verbunden bin ich auch meinen Freunden und Kollegen im Omanprojekt richten, insbesondere Herrn Stefan Siebert für seine äußerst geduldige und großzügige Hilfe, Herrn Sulaiman Al-Khanjari für seine Unterstützung im Oman, Herrn Eike Luedeling für manche gute Anregung sowie Frau Elisabeth Gumpertsberger und Herrn Florian Wichern.

Mein besonderer Dank geht auch an Frau Nadija Zermane für ihre hilfreiche allgemeine Unterstützung, Frau Heidi Träger und Frau Dr. Barbara Bürkert für ihren Beitrag sprachlichen Verbesserung dieser Arbeit.

Bei den Einwohnern der Oasen *Balad Seet* und *Maqta* möchte ich mich für ihre geduldige und konstruktive Kooperation sowie insbesondere für ihre Gastfreundschaft besonders herzlich bedanken. Dieser richtet sich insbesondere an die Herren Saoud Bin Hammad Al Zuhli, Khalfan Bin Hareth Al Zuhli, Zaher bin Hamoud Al Zuhli und Rashid Bin Ahmad Al-Uwaysi bedanken, die entscheidend zur Durchführungen der Untersuchungen an beiden Standorten beigetragen hatten.

Danken möchte ich außerdem meiner ganzen Familie, besonderes meiner Mutter und meiner Frau für ihre Geduld und liebevolle Unterstützung sowie meiner lieben kleinen Tochter Shahd für ihr ermutigendes Wesen.

Mein Dank gilt auch der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Finanzierung der Untersuchungen sowie der Sultan Qaboos Universität (Oman) für ihre großzügige logistische Unterstützung des Projektes.

Acknowledgments

First of all, I would like to express my deep appreciation and gratitude to Prof. Dr. Andreas Bürkert for his support, professional supervision and patience throughout my work within the project either in Oman or at Witzenhausen. My sincere thanks are also extended to Prof. Dr. Karl Hammer for his helpful guidance and professional advice during several excursions conducted in Oman. Special thanks also go to Dr. Ahmad Al-Maskri for his support in Oman and his skilful advice that have greatly contributed to this research. I am also indebted to Prof. Dr. Christian Richter for his constructive advice and excellent support and would like to sincerely thank Mr. Burkhard Heiligtag for his analytical support and his human company during my entire stay at Witzenhausen. Many thanks also to Mrs. Sigrid Haber for her reliable and friendly help in the institute's secretariate and to Mrs. Claudia Thieme, Mrs. Eva Wiegard and the technical staff of the greenhouse for their technical support.

To my friends and colleagues involved in the Oman project I would like to express my gratitude, particularly to Mr. Stefan Siebert for his extremely patient and generous help, to Mr. Sulaiman Al-Khanjari for his support in Oman, Mr. Eike Luedeling for many productive discussions, and to Mrs. Elisabeth Gumpertsberger and Mr. Florian Wichern. I would like to thank also Mrs. Nadjia Zermene for her helpful general support, Mrs. Heidi Träger and Dr. Barbara Bürkert for their contribution to correct grammatical errors and textual inconsistencies.

To the inhabitants of the oases of *Balad Seet* and *Maqta* I am highly indebted their patient and constructive cooperation and for their warm hospitality. Most particularly, I would like to thank Mr. Sauod Bin Hammad Al Zuhli, Khalfan Bin Hareth Al Zuhli, Zaher bin Hamoud Al Zuhli und Rashid Bin Ahmad Al-Uwaysi for their efficient contributions to the investigations at both sites.

My heartfelt thanks and deepest appreciations I would like to express to my whole family particularly my mother and my wife for their patience and loving support as well as my little daughter Shahd for her charming character.

The financial support of the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) and the logistical provision of the Sultan Qaboos University (Oman) are highly appreciated.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Witzenhausen, 05.08.2004

(Unterschrift)