

Verbesserung der Bewässerungseffizienz in den Oasen Südtunesiens - Fallstudie Nefzaoua Oasen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER NATURWISSENSCHAFTEN

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

genehmigte

DISSERTATION

von

M.Sc. Nizar Omrani

aus Gabes, Tunesien

Referent: Prof. Dr. Dieter Burger

Korreferent: PD Dr. Stefan Norra

Tag der mündlichen Prüfung: 08.07.2015

Karlsruhe 2015

Danksagung

Mit diesen Wörtern möchte ich diese Gelegenheit nutzen, um meinen tiefen Dank zum Ausdruck zu bringen.

Ich danke vor allem meinem Doktorvater Herrn Professor Dr. Dieter Burger, der mir mit seinem Fachwissen zur Seite stand, viele seiner freien Abende für mich opferte. Ich verdanke ihm darüber hinaus jede erdenkliche, hilfreiche Unterstützung und viele anregende Diskussionen. Jede Phase dieser Arbeit wurde von ihm intensiv, professionell und warmherzig begleitet. Besonders bedanken will ich mich auch für die Freiheit, die er mir während des gesamten Forschungsprojektes gewährte, was maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beitrug. Sein kompetenter Rat und seine Hilfe kamen mir in zahlreichen Angelegenheiten sehr zu gute.

Ebenso herzlich bedanke ich mich bei Prof. Dr. Stefan Norra für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Ich bedanke mich herzlich bei Herrn Professor Dr. Dieter Prinz, ehemaliger Leiter der Abt. Kulturtechnik des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung, der diese Arbeit in Rahmen der Zusammenarbeit mit der GIZ initiiert hatte. Vielen Dank auch an Till Loeper, Verena Hemm und Angela Straub für die exzellente Zusammenarbeit in Kebili.

Des Weiteren bedanke ich mich herzlichst bei Herrn Professor Houcine Khatteli, Leiter des Instituts der ariden Gebiete in Tunesien (IRA) und Herrn Professor Mohamed Sadok Belkadh, Leiter des Regional Institut des IRA in Kebili, Südtunesien. Mein bester Dank geht an Herrn Belgacem Bedoui, Leiter der IRA Parzelle in Ailet und das gesamte Team (Bechir, Saleh, Samir, Fethi) für die sehr wertvolle Unterstützung vor Ort.

Ich danke auch Herrn Dr. Ali Abaab, Herrn Helmi Sabara, Herrn Dr. Jörg Linke und Herrn Anselm Duchrow von der deutschen Gesellschaft für internationalen Zusammenarbeit (GIZ), ohne deren wertvolle Unterstützung diese Arbeit nicht hätte realisiert werden können.

Und nicht zuletzt danke ich meinen Eltern, die in jeglicher Hinsicht die Grundsteine für meinen Weg gelegt haben und denke auch an meinen verstorbenen Großvater Fethi, der mich auf meinem Lebensweg bis ins Studium sehr tief geprägt hat.

1 Zusammenfassung/Abstract/Résumé

Zusammenfassung

Die Oasen in Südtunesien stehen im Mittelpunkt der Entwicklungspolitik und bleiben vor allem der Hauptfaktor, der eine nachhaltige Landwirtschaft in diesen extrem ariden Gebieten beeinflusst. Die Bewässerung spielt hierbei eine Schlüsselrolle um den hohen Wasserbedarf der Dattelpalmoasen zu gewährleisten. Während der letzten Dekaden hat die Anbaufläche exponentiell zugenommen und damit hat sich der Druck auf die Grundwasser Aquifere verstärkt. Um die Bewässerungspraxis weiter zu entwickeln, haben die Entwicklungsbehörden in diesen Regionen eine Renovierung der Bewässerungsinfrastruktur unternommen. Dies hat unter anderem die Effizienz der Wasserverteilung für das Hauptnetz substantziell von 60 % auf 80 % verbessert. Der restliche relevante Teil dieser Strategie ist die Verbesserung der Bewässerungseffizienz innerhalb der Parzellen.

Der Ansatz dieser Arbeit besteht aus zwei Komponenten, die kombiniert werden sollen. Zunächst werden Bewässerungsalternativen für die traditionelle Überflutungsmethode (in unserer Untersuchung in zwei Varianten mit A_1 und A_2 bezeichnet) untersucht. Dafür wurde auf einer Versuchsparzelle in der Oase von *Atilet* in *Kebili*, Südwest Tunesien unter den realen Bedingungen der Bewässerung einer ausgedehnten Oase ein Versuchsfeld installiert. Die drei getestete Alternativen A_3 , A_4 und A_5 entsprechen Bewässerungsmethode mit einem einzelnen Rohr, mit Doppelrohr und Mikroberegnung. Die Untersuchungen liefen über drei Jahre mit einer detaillierten Untersuchung der Saugspannung, der Messung der Wassergehalte und daraus berechnet der verfügbaren Wasserreserve, sowie die Messung der elektrischen Leitfähigkeit für jede Bewässerungsalternative. Der zweite Teil des Ansatzes beschäftigt sich mit dem Zusammenhang zwischen der eingesetzten Bewässerungsmenge, dem Bestockungstyp und dem Ertrag der Dattelpalmen. Die Erträge von fünf Jahren (2007 bis 2011) wurden als Basis benutzt, um die Auswirkung der Faktoren Wasservolumen ($V_1=8.500$; $V_2=13.600$; $V_3=17.000$; $V_4=20.000$ und $V_5=25.000$ $m^3/ha/Jahr$) und Bestandsdichte ($D_1=64$; $D_2=100$ und $D_3=156$ Palmen/ha) zu untersuchen. Die Untersuchungen lieferten praxisrelevante Empfehlungen für die Auswahl der Bewässerungstechnik innerhalb der Parzellen, welche die Alternative A_5 als optimal geeignet bewerten.

Im Hinblick auf die Wasserproduktivität, sowie die quantitativen und qualitativen Erträge der Palmen, hat sich die Variante Bewässerungsmenge $V_3=17.000$ $m^3/ha/Jahr$ mit einer Bestandsdichte von 156 Palme/ha als empfehlungswert herausgestellt.

Abstract

The oases in southern Tunisia are the focus of the development policy and remain above all the main component that precondition a sustainable agriculture in these extreme arid areas. The irrigation plays a key role to meet the high demand for water of the palm oases. During the last decades, the area under cultivation has increased exponentially and thus the pressure on the groundwater aquifers. In order to develop the irrigation practices, the development authorities have undertaken a rehabilitation of the irrigation infrastructure in these regions. This has substantially improved the efficiency of water distribution for the main network from 60% to 80%. The rest of the relevant part of this strategy is to improve irrigation efficiency within the plots. The approach of this work consists of two complementary components. First part has been to investigate irrigation alternatives for the traditional flooding method (which we demote in our study in two Alternatives A₁ and A₂). A trial plot in the oasis of Ailet in Kebili, South West of Tunisia has been installed under the currently prevailing conditions of irrigation within the oases. The alternatives A₃, A₄ and A₅ simulated the sprinkler irrigation method with a single pipe, double tube and micro irrigation. The tests ran for three years with a detailed study of soil water potential, the measurement of soil moisture and calculating the available water reserve, as well as the measurement of the electrical conductivity for each irrigation alternative. The second part of the approach deals with the relationship between the amounts of irrigation used, the plantation density and yield of date palms. The income of five years (2007 to 2011) were used as the basis to determine the effect of the factors of water volume ($V_1 = 8.500$, $V_2 = 13.600$; $V_3 = 17.000$ $V_4 = 20.000$ and $V_5 = 25.000$ m³/ha/year) and plantation density ($D_1 = 64$; $D_2 = 100$ Palm / ha and $D_3 = 156$ Palm / ha). The studies provided practical recommendations for the selection of irrigation technique within the plots, the alternative A₅ had been evaluated as optimal. In terms of water productivity, as well as the quantitative and qualitative yield of palm trees, the variant irrigation Volume $V_3 = 17.000$ m³ / ha / year with a population density of 156 Palm / ha has been also assessed as the optimal schema to be implemented.

Résumé

Les oasis tunisiennes sont au centre de la politique de développement dans le sud et restent avant tout le principal outil qui conditionne le développement durable de l'agriculture dans ces zones extrêmement arides. L'irrigation joue un rôle clé pour satisfaire la forte demande en eau des palmerais. Durant les dernières décennies, la superficie cultivée a exponentiellement augmenté et a par conséquent accentué la pression sur les ressources en eau souterraines. Dans le but de développer les pratiques d'irrigation, les autorités de développement ont entrepris la réhabilitation de l'infrastructure dans ces régions. Ceci a substantiellement amélioré l'efficacité de distribution dans les réseaux principaux de 60 % à 80%. La partie restante et la plus importante de cette stratégie consiste à améliorer dorénavant l'efficacité de l'irrigation à l'intérieur des parcelles.

L'approche de ce travail repose sur deux volets complémentaires. En premier lieu, il s'est agi de tester des techniques d'irrigation alternatives à l'irrigation traditionnelle dite de submersion (représentée dans notre étude par les variantes A_1 et A_2). Une parcelle d'essai dans a été installé dans l'oasis de *Atilet a Kebili*, Sud-Ouest de la Tunisie sous les conditions actuelles en vigueur de l'irrigation dans les oasis.

Les alternatives A_3 , A_4 et A_5 simulent la méthode d'irrigation par aspersion avec une rampe, double rampe ainsi que la micro-irrigation. Les tests ont été menés pendant trois ans avec une étude détaillée du Tension d'eau du sol, la mesure de l'humidité du sol et de calcul de la réserve d'eau disponible, ainsi que la mesure de la conductivité électrique pour chaque alternative d'irrigation.

La deuxième partie traite de la relation entre les volumes d'irrigation appliqués, la densité de plantation et le rendement de palmiers dattiers. Les récoltes de cinq ans (2007-2011) ont été utilisés comme base de données pour déterminer l'effet des facteurs de volume d'eau ($V_1 = 8.500$, $V_2 = 13.600$; $V_3 = 17.000$ $V_4 = 20.000$ et $V_5 = 25.000$ $m^3/ha/an$) et la densité de plantation ($D_1 = 64$; $D_2 = 100$ et $D_3 = 156$ Palmier/ha) sur le rendement. Notre étude a fourni des recommandations pratiques pour la sélection de la technique de l'irrigation dans les parcelles, l'alternative A_5 ayant été évalués comme optimale.

En termes de productivité de l'eau, ainsi que le rendement quantitatif et qualitatif du palmier, le volume $V_3 = 17.000 m^3 / ha / an$ avec une densité de population de 156 Palmier / ha a été également évalué comme schéma optimal à être recommandé pour le développement des oasis.

2 Inhaltsverzeichnis, Abbildungen und Tabellen

2.1 Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung/Abstract/Résumé	2
2	Inhaltsverzeichnis, Abbildungen und Tabellen.....	5
2.1	Inhaltsverzeichnis	5
2.2	Abbildungsverzeichnis	8
2.3	Tabellenverzeichnis	10
3	Abkürzungsverzeichnis.....	11
4	Stand der Forschung.....	12
4.1	Einleitung und Zielsetzung	12
4.2	Stand der Technik des Wassermanagements in den tunesischen Oasen	14
4.2.1	Die tunesischen Oasen im Allgemeinen.....	14
4.2.2	Besonderheiten der Nefzaoua-Oasen.....	17
4.2.3	Untersuchungen zum Bewässerungsmanagement in tunesischen Oasen	20
4.2.4	Die Effizienz der Bewässerung in den Oasen von Nefzaoua	23
4.2.5	Abschätzung der Wasserbedürfnisse für die Oasen: Machbarkeit und Wissenslücken	25
5	Das Untersuchungsgebiet	28
5.1	Lage	28
5.2	Geomorphologie	29
5.3	Klima	30
5.3.1	Klimadiagramm	30
5.3.2	Sonnenscheindauer	31
5.3.3	Temperatur	31
5.3.4	Niederschlag.....	32
5.3.5	Evaporation.....	32
5.3.6	Luftfeuchte.....	33
5.3.7	Winde	34
5.4	Böden des Untersuchungsgebietes	34
5.4.1	Bodentypen der Region.....	37
5.5	Wasserressourcen in Kebili	40
5.6	Der Aquifer „Complexe Terminal“	44

5.6.1	Hydrogeologie.....	45
5.6.2	Chronologischer Überblick der Piezometrie des Aquifers „Complexe Terminal“.....	46
5.6.3	Reserve des „Complexe Terminal“	46
5.7	Der Aquifer „Continental Intercalaire“.....	47
5.7.1	Chronologie des Aquifers „Continental Intercalaire“	48
5.7.2	Piezometrie des Aquifers „Continental Intercalaire“ in Nefzaoua	48
5.8	Der regionale obere Aquifer	49
6	Methodik	50
6.1	Bodenkundliche Untersuchung.....	50
6.2	Alternative Bewässerungsverfahren	50
6.3	Messungen zum Bodenwasserhaushalt	53
6.3.1	Bestimmung des gravimetrischen Wassergehaltes	54
6.3.2	Bestimmung der Dichte	55
6.3.3	Bestimmung des volumetrischen Wassergehaltes	55
6.3.4	Berechnung des Wassergehaltes pro m ³ Boden	56
6.3.5	Messung der Bewässerungsmenge.....	56
6.4	Ermittlung der Bodenwassergehalte	57
6.4.1	Feldkapazität (FK).....	57
6.4.2	Permanenter Welkepunkt (PWP).....	57
6.4.3	Nutzbare Feldkapazität.....	57
6.4.4	Messung des pF-Wertes	57
6.5	Praktische Konsequenzen.....	58
6.6	Bestimmung des pH-Wertes und Leitfähigkeit	61
6.7	Ermittlung des Wasserbedarfs für Dattelpalmen	61
6.7.1	Evapotranspiration	61
6.7.2	Berechnung der verwendeten Bewässerungsmenge	62
6.8	Ermittlung der Dattelpalm Erträge.....	64
6.9	Übersicht über den zeitlichen Verlauf aller Messungen	65
7	Ergebnisse	66
7.1	Bodenuntersuchungen auf der Versuchsparzelle Atillet (nach KADRI & SARTORI, 1998).....	66
7.1.1	Physiko-chemische Charakterisierung.....	66
7.1.2	Ergebnisse der Saugspannungsmessungen	72

7.1.3	Untersuchung des Wasservorrats im Boden	83
7.1.4	Studie zum Verlauf der Bodenwasserreserve Rd.....	87
7.1.5	Ergebnisse der elektrischen Leitfähigkeit.....	95
7.2	Analyse der Beziehung zwischen der Wasserdosis, dem Bestockungstyp und den Dattelpalm Erträgen 100	
7.2.1	Quantitative Untersuchung des Ertrages	100
7.2.2	Wirkung von Bewässerungsdosen und die Bestockungstypen auf die Fruchtstände der Dattelpalmen 101	
7.2.3	Wasserproduktivität.....	102
7.2.4	Qualitative Untersuchung des Ertrages.....	103
7.3	Wirtschaftliche Machbarkeitsstudie.....	106
8	Diskussion und Ausblick.....	109
8.1	Auswertung der Saugspannungsmessungen.....	109
8.2	Auswertung der Wassergehalts Ermittlung	110
8.3	Auswertung der Wasserreserve Rd Ergebnisse.....	111
8.4	Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit Ermittlung	111
8.5	Auswertung der Ermittlung der Erträge.....	112
8.6	Empfehlungen für zukünftige Studien	114
9	Fazit.....	115
9.1	Gesamtergebnis.....	116
10	Literatur	117

2.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Typologie der tunesischen Oasen nach geographischer Herkunft (bearbeitet nach SGHAIER, 2010, S30).....	14
Abbildung 2. Kontext der tunesischen Oasen zu Klimazonen (Quelle: MEAT, 1998; S.7).....	15
Abbildung 3. Zunahme der Oasenfläche in den Oasen Südtunesiens (SGHAIER, 2010. S.28).	16
Abbildung 4. Verortung der Region Nefzaoua, Südtunesien (GHAZOUANI ET AL, 2007, S. 2). (Oasenflächen sind grün unterlegt).....	17
Abbildung 5. Bevölkerungswachstum in den Oasen Südtunesiens (1975-2009). (SGHAIER, 2010 S.27).....	18
Abbildung 6. Einfluss der Verbesserungsarbeiten auf den Wasserverbrauch in den vier Regierungsbereichen im Süden Tunesiens (verändert nach SAPI, 2005).	26
Abbildung 7. Ort des Untersuchungsgebietes (BENBOUBAKER et al., 2003: S.38 und SAPI, 2005: S. 14).....	28
Abbildung 8. Geomorphologische Karte des Südtunesiens (Quelle: Karte nach COQUE, 1962: S84).....	29
Abbildung 9. Klimadiagramm für Kebili (bearbeitet nach: http://de.climate-data.org/location/30099/)	30
Abbildung 10. Temperaturen in der Region Kebili (bearbeitet nach: http://de.climate-data.org/location/30099/) ..	31
Abbildung 11. Jahrgang der Evaporation in Kebili (1961-1990). (Quelle: INM 2000, S. 103)	33
Abbildung 12. Geologische Karte von Südtunesien (SCHLÜTER, 2006)	35
Abbildung 13. Austritt des Grundwasserkörpers in einer Senke, Oase von Nefzaoua (Foto PRINZ).....	35
Abbildung 14. Auswirkung des Grundwasser Nutzungszyklus auf die Nachhaltigkeit der Böden in den Oasen Kebili Südtunesiens.	36
Abbildung 15. Böden mit Salzkruste am Rande der Sebchas mit halophytischer Vegetation (Foto OMRANI).....	37
Abbildung 16. Fossiles GW führende Aquifere im nördlichen Afrika (PRINZ & LOEPER, 2008).....	41
Abbildung 17. Das Aquifersystem des Continental Intercalaire und Complex Terminal (Quelle. LOEPER, 2008, S.13, bearbeitet nach Oss, 2000)	43
Abbildung 18. Hauptaquifere des SASS „North-Western Sahara System“ (PUYOÔ, 2007)	44
Abbildung 19. Versuchsaufbau für die Verbesserung der Bewässerungseffizienz der Parzellen.....	51
Abbildung 20. Wassersparende Bewässerungsalternativen A ₃ und A ₄	52
Abbildung 21. Wassersparende Bewässerungsalternative A ₅	52
Abbildung 22. Bodenwasserhaushalt Untersuchung mit Tensiometer.....	54
Abbildung 23. Drucktopf für die Bestimmung der pF-Werte	58
Abbildung 24. Darstellung der wichtigen Feuchtigkeitswerte des Bodens(MUSY UND SOUTTER, 1991)	58
Abbildung 25. Wasserbedarf für den Dattelpalmenanbau in Reinkultur in der Region Kebili [mm / Monat] (APIOS 1996)	63
Abbildung 26. Dattel Ernte bei der experimentellen Parzelle Bild (OMRANI, 2010).....	64
Abbildung 27. Kornsummenkurve Profil 8 (C), Werte nach KADRI und SARTORI (1988)	67
Abbildung 28. Chemische Kennwerte von Profil 8 und Profil 10 (bearbeitet nach KADRI & SARTORI, 1988).....	70
Abbildung 29. Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt (pF-Kurve) des Bodens in Ailet. Abbildungsgrundlage für Sandboden, Schluffboden und einem Tonboden nach SCHEFFER et al., 2002. FK= Feldkapazität, PWP= permanenter Welkepunkt	71
Abbildung 30. Verlauf der Saugspannung im Boden in 40 cm Tiefe für A ₃	72
Abbildung 31. Verlauf der Saugspannung im Boden in 80 cm Tiefe für A ₃	74

Abbildung 32. Verlauf der Saugspannung im Boden in 120 cm Tiefe für A ₃	75
Abbildung 33. Verlauf der Saugspannung im Winter für A ₃	76
Abbildung 34. Verlauf der Saugspannung im Boden in A ₃	77
Abbildung 35. Verlauf der Saugspannung zwischen drei Bewässerungen im Sommer für A ₃ bei den Tiefen 40 cm, 80 cm und 120 cm.....	78
Abbildung 36. Verlauf der Saugspannung zwischen zwei Bewässerungen.....	80
Abbildung 37. Saugspannung bei A ₃ , A ₄ und A ₅ bei 40 cm (Jun-Jul-Aug 2010)	81
Abbildung 38. Saugspannung bei A ₃ , A ₄ und A ₅ bei 80 cm (Jun-Jul-Aug 2010)	82
Abbildung 39. Saugspannung bei A ₃ , A ₄ und A ₅ bei 120 cm (Jun-Jul-Aug 2010)	83
Abbildung 40. Vergleich des Wassergehalts für die Bewässerungsmethoden A ₁ , A ₂ , A ₃ , A ₄ und A ₅ vor der Bewässerung (30.06.2008).....	84
Abbildung 41. Vergleich des Wassergehalts für die Bewässerungsmethoden A ₁ , A ₂ , A ₃ , A ₄ und A ₅ 24 St nach Bewässerung (30.06.2008).....	85
Abbildung 42. Vergleich des Wassergehalts für die Bewässerungsmethoden A ₁ , A ₂ , A ₃ , A ₄ und A ₅ 72 h nach Bewässerung (30.06.2008).....	86
Abbildung 43. Verhalten des Wassergehalts in einem Bewässerungszyklus mit der Bewässerungsalternative A ₃ (30.06.2008).....	87
Abbildung 44. Zeitlicher Verlauf der Wasserreserve von A ₁ beim Bewässerungszyklus vom 01.06-24.08.2009	89
Abbildung 45. Übersicht der Wasserreserven R _d der Varianten A ₁ – A ₅	91
Abbildung 46. Zeitlicher Verlauf der Wasserreserve von A ₃ beim Bewässerungszyklus 02.06-25.08.2008.....	92
Abbildung 47. Wasserreserve von A ₅ beim Bewässerungszyklus.....	93
Abbildung 48. R _d Wasserreserve für gesamtes Profil Vergleich.....	94
Abbildung 49. Messungen der elektrischen Leitfähigkeit	97
Abbildung 50. Ertrag für die verschiedenen Bewässerungsvolumen und Bestockungstypen.....	101
Abbildung 51. Wasserproduktivität für die fünf Bewässerungsdosen und die drei Bestockungstypen.....	103
Abbildung 52. Entwicklung der durchschnittlichen Qualität für D ₁ = 64 Palmen/ha.....	104
Abbildung 53. Entwicklung der durchschnittlichen Qualität für D ₂ = 100 Palmen/ha.....	105
Abbildung 54. Entwicklung der Qualität des Ertrages für den Bestockungstyp D ₃ =156	105
Abbildung 55. Kategorisierungscluster der Bewässerungsmethoden A ₁₋₅	113

2.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Entwicklung der Dattelpalmlantagen (Sorte Deglet Nour) in der Region Nefzaoua (verändert nach CORSALE, 2005, S.247).....	18
Tabelle 2. Wasserverlust in Erdkanäle unterschiedlicher Länge (SANYO, 1996, S. 34).....	24
Tabelle 3. Größe der Bewässerungsbecken in Bezug zur Bodennutzung (SANYO, 1996, S. 52).....	24
Tabelle 4. Verteilung der Flächennutzung in Kebili (MAERH, 2012, S4).....	28
Tabelle 5. Mittlere monatliche Sonneneinstrahlung in Stunden (INM, 2000).	31
Tabelle 6. Niederschlags Daten von Kebili (INM, 2000, S93).	32
Tabelle 7. Grundwasserressourcen in den Oasen Südtunesiens (Quelle: MEDD, 2010; S13).....	41
Tabelle 8. Die Aquifere in der Oasen Region: Verfügbare Ressourcen und Verwendungstendenz 1995-2005 (MEDD, 2010; S. 14).	42
Tabelle 9. <i>Grundwasserspiegelsenkung der tiefen Aquifere in Südtunesien (Quelle: CRDAVON KEBILI; ANNUAIRE DES NAPPES PROFONDES, 2000)</i>	47
Tabelle 10. Angabe des Herstellers (Eijkelkamp) zur Interpretation der Saugspannungswerte	53
Tabelle 11. Verfügbare Bodenwasserreserve in einem Profil von 120 cm.....	61
Tabelle 12. Zeitlicher Verlauf der Messungskampagnen	65
Tabelle 13. Analytischen Daten des Bodenprofils N°8.....	69
Tabelle 14. Analytischen Daten des Bodenprofils N°10.....	69
Tabelle 15. Bodendichte und Wassergehalte für pF 2 und 4,2 Ermittlung bis in eine Bodentiefe von 120 cm (IRA, 2007).	71
Tabelle 16. <i>Veränderung der Saugspannung während 3er Bewässerungszyklen</i>	79
Tabelle 17. Mittelwerte der elektrischen Leitfähigkeit bei den fünf Bewässerungsalternativen (Sommer 2008-2009-2010)	95
Tabelle 18. Ertragseinbußen bei Dattelpalmen in Bezug auf elektrische Leitfähigkeit im Boden (FAO, 1988)	96
Tabelle 19. <i>Leitfähigkeit und Ionenkonzentration des Bodenprofils Nr. 8 nach KADRI A. und SARTORI G. (1988)</i> ..	98
Tabelle 20. <i>Leitfähigkeit und Ionenkonzentration des Bodenprofils N°10. KADRI A. und</i>	99
Tabelle 21. gängige Stückpreise der Teile für das wassersparende Bewässerungssystem	106

3 Abkürzungsverzeichnis

	Erläuterung	Einheit
A _{1,2,3,4,5}	Bewässerungsalternativen	
CI	Continental Intercalaire	
CT	Complexe Terminal	
D _{1,2,3}	Bestockungstyp	Palmen/ha
e	tatsächlicher Dampfdruck	mbar
ea	Sättigungsdampfdruck	mbar
EC	Elektrische Leitfähigkeit	mS/cm
ET0	Referenz Evapotranspiration	mm
ETP	potenzielle Evapotranspiration	mm
f(U)	windabhängige Funktion	
GIF	branchenübergreifender Verband für Obstanbau	
GMS	Granulor Matrix Sensor	(cb)
Kc	pflanzenspezifischer Koeffizient	
Rd	verfügbare Bodenwasserreserve	mm
RFU	leicht nutzbare Feldkapazität (lnFk)	mm
Rn	Nettostrahlung in Äquivalenz-Evapotranspiration	
Rs	Solarstrahlung	
RU	nutzbare Feldkapazität (nFk)	mm
T	Temperatur	°C
V _{1,2,3,4,5}	Bewässerungsdosis	m ³ /ha/Jahr
W	gravimetrischer Wassergehalt	%
z	Horizontmächtigkeit	cm
α *Rs	reflektierter Anteil der Solarstrahlung (α = 0,25)	
ϑ	volumetrischer Wassergehalt	%
ρ _d	Bodendichte	kg/m ³

4 Stand der Forschung

4.1 Einleitung und Zielsetzung

Der südlichste Teil Tunesiens ist durch ein trockenes bis sehr trockenes (Niederschlag < 100 mm/Jahr) Klima charakterisiert. Besonders die Region um Kebili im Südwesten des Landes ist den Risiken eines trockenen, wüstenartigen Klimas ausgesetzt. Dadurch auftretende Gefahren, wie häufige Trockenheit und die Bedrohung der Felder durch Versalzung und Desertifikation, bestärken die Überzeugung der an der Regionalentwicklung beteiligten Akteure, dass dringende und ganzheitliche Maßnahmen von Nöten sind, um die dauerhafte Nutzung der Felder sicher zu stellen.

Der Hauptentwicklungssektor in dieser Region bleibt unumstritten die Landwirtschaft, welche der lokalen Bevölkerung, im Vergleich zu anderen Regionen des Landes, ein sicheres und komfortables Einkommen garantiert. Die Bewohner Mittel- und Südost-Tunesiens leben weit unter den Einkommensverhältnissen der Bewohner um Kebili, die Region, die auch Nefzaoua genannt wird. Der Anbau und die Nutzung der Dattelpalme stellen den Haupterwerb in dieser Region dar und verhelfen den Bauern zu einem wichtigen Teil ihres Einkommens.

Der Anteil des Ertrages dieser Anbaukultur an der nationalen Wirtschaft ist ebenfalls sehr wichtig und nimmt eine bedeutende Stelle im Exportsektor ein. Tunesien ist mit 30 % derzeit der weltweit größte Dattel Exporteur. Dank der guten Qualität sind die tunesischen Datteln der Sorte Deglet Nour auf dem Weltmarkt stark nachgefragt. Mehr als 60 % der gesamten Dattel Produktion Tunesiens wird in 57 Länder exportiert (FAOSTAT, 2009).

Laut den Prognosen der GIF (2013), d.h. des branchenübergreifenden Verbandes für Obstanbau, erreicht die Dattelproduktion für die Saison 2013-2014 voraussichtlich 198.850 t, was somit eine Steigerung von 3,5 % gegenüber der letzte Saison (ca. 192.125 t) bedeutet. Dies wäre u.a. eine Erhöhung um 7% im Vergleich zu der durchschnittlichen Produktion der letzten drei Jahren von durchschnittlich 185.600 t / Jahr.

Dank dieser herausragenden Bedeutung des Dattelanbaus in der Wirtschaft von Tunesien, insbesondere der Sorte Deglet Nour wurde und wird der Entwicklung des landwirtschaftlichen Sektors besondere Aufmerksamkeit zuteil.

Durch den klimatisch bedingten chronischen Wassermangel ist die Bewässerung der Schlüssel zur Sicherung und eventuellen Steigerung der Erträge im landwirtschaftlichen Sektor. Die Entdeckungen von wichtigen hydrogeologischen Ressourcen in den sechziger Jahren, vor allem des Aquifer Complexe Terminal (CT) und Continental Intercalaire (CI), die das Aquifersystem

der nördlichen Sahara bilden, steigerte die Entwicklung der Bewässerung in diesen Regionen deutlich (MEHAT, 2007).

Mit der Weiterentwicklung der Bohrtechnik konnten durch den Zugang zu den Aquiferen die Flächen der bewässerten Felder der Oasen dieser Region fortlaufend erweitert werden. Die illegale Erweiterung der bewässerten Flächen ist durch private Bohrungen der Bauern exponentiell angestiegen (OMRANI & BURGER, 2010). Deswegen ist diese Intensivierung der Bewässerung nicht ohne Konsequenzen für das Umfeld der Oasen. In den letzten Jahrzehnten wurde vor allem der Aquifer CT durch unzählige tiefe Bohrungen übernutzt, was eine deutliche Absenkung des Wasserspiegels im Aquifer und einen Anstieg des Salzgehaltes im Bewässerungswassers zur Folge hat (ZAMMOURI et al., 2007; EL FAHEM et al., 2004). In Anbetracht des trockenen Klimas und der geforderten Qualität der Bewässerungswässer (im Mittel max. 3 g/l Salzgehalt, lokal bis zu 6 g/l), stellen die Versalzung und die Vernässung von natürlichen Senken ein immer größeres Risiko für die Anbauflächen dar. Die traditionelle Bewässerung, die immer noch weiträumig in den Parzellen der Oasen angewendet wird, bringt zum einen das Problem der Verschwendung der Wasserressourcen mit sich (KADRI & RANST, 2002). Zum anderen beinhaltet die verstärkte Bewässerung auch den Vorteil der Erneuerung der oberflächennahen Grundwasservorkommen, welche durch Kapillaraufstieg die Wurzelzone der Dattelpalmen bewässern (OMRANI & BURGER, 2011).

Neben den Bewässerungstechniken, die in den Parzellen angewandt werden, ist Unkenntnis über die Wasserbedürfnisse der Dattelpalme, welche hauptsächlich in Monokultur angebaut wird, ebenfalls Forschungsthema. Das Fehlen von Arbeiten über die Produktivität der Dattelpalme in Bezug auf die Bewässerungsmenge und den Bestockungstyp bergen weitere Risikofaktoren einer ökonomischen Bewässerung der Palmenhaine.

Für diese Arbeit mit dem Ziel der Verbesserung der Bewässerung der Dattelpalmoasen in Südtunesien ergeben sich damit zwei wesentliche Fragestellungen:

- führen verbesserte Bewässerungstechniken zu einer Reduzierung des Wasserverbrauchs und inwieweit können wir ihre Effizienz verbessern.
- welche Bewässerungsmenge ist zu einem maximalen Ertrag der Dattelpalmen notwendig und welcher Bestockungstyp ist für eine nachhaltige Entwicklung der Oasen zu empfehlen.

4.2 Stand der Technik des Wassermanagements in den tunesischen Oasen

4.2.1 Die tunesischen Oasen im Allgemeinen

Aufgrund der geographischen Lage lassen sich die tunesischen Oasen in zwei Klassen gliedern: litorale Oasen (Gabes) und kontinentale Oasen (Nefzaoua oder Kebili). Diese Wüstenzonen sind durch eine intensive Landwirtschaft, die auf Familienbetrieben basiert, charakterisiert (Abb.1).

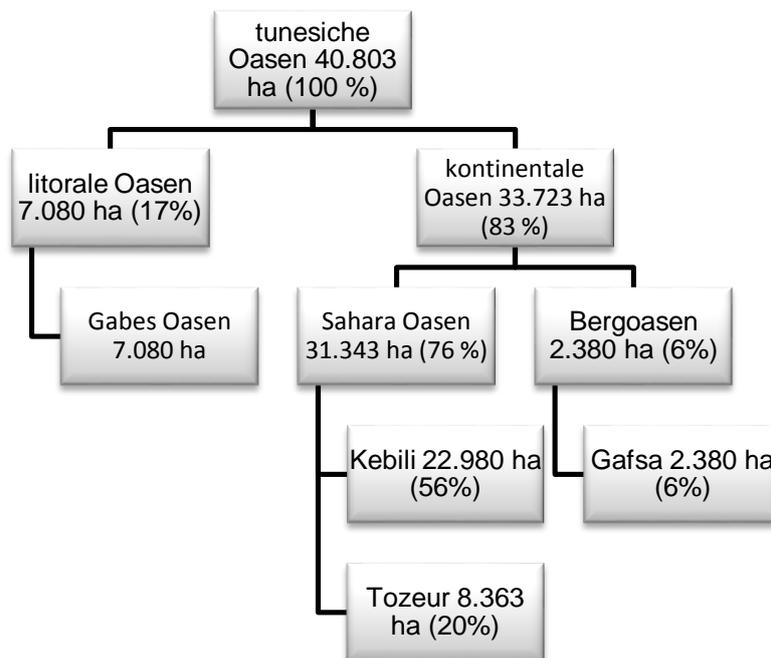


Abbildung 1. *Typologie der tunesischen Oasen nach geographischer Herkunft (bearbeitet nach SGHAIER, 2010, S30).*

Die Sahara Oasen (31.343 ha oder 76% der tunesischen Oasen) liegen nördlich von Tozeur (8.363 ha d.h. 20 %) und westlich des Schott Djerids in der Region um Kebili (22.980 ha d.h. 57 %). Diese Sahara oder kontinentalen Oasen sind durch ein trockenes Klima mit hohen Temperaturen gekennzeichnet. Die Bergoasen sind mit einer Fläche von etwa 2.380 ha (6 % der gesamten Oasenfläche) in der Region um Gafsa konzentriert und sind außerdem durch einen milden Winter gekennzeichnet (Abb.2).

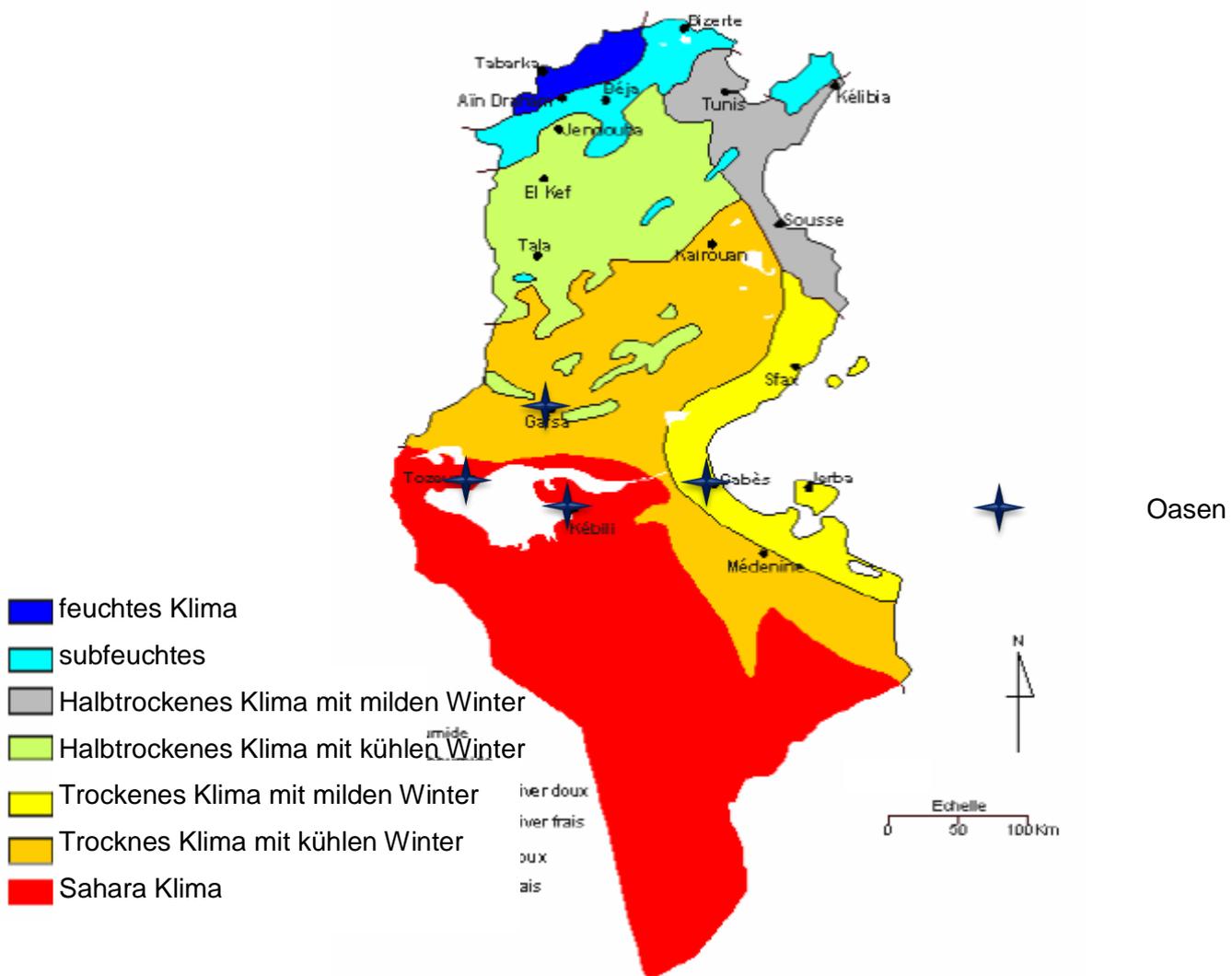


Abbildung 2. Kontext der tunesischen Oasen zu Klimazonen (Quelle: MEAT, 1998; S.7).

Die räumliche Dimension der tunesischen Oasen hat seit der Unabhängigkeit von 1956 eine eindeutige Erweiterung erfahren (Abb. 3). Diese Erweiterung der Oasen Fläche wurde seit den siebziger Jahren unter der Wirkung der verschiedenen aufeinanderfolgenden Projekte (z.B. Wasserrahmenplan für den Süden PDES sowie der Wasserressourcen Strategien von 1990-2000 und 2001-2011) beschleunigt (ENNABLI, 1993; FERRY, 1996; KUPER et al., 1999; KUPER, 2002). Die Oasenfläche ist von 16.720 ha im Jahr 1974 auf 31.500 ha im Jahr 1993 ausgeweitet worden und erreicht ca. 41.000 ha in 2010 (SGHAIER, 2010). Zwei Hauptfaktoren haben dieses fast exponentielle Wachstum gefördert:

1. Die staatlichen Programme der Oasen Entwicklung sind immer auf die im Untergrund vorhandenen Wasserressourcen ausgerichtet und

2. Die privaten Initiativen der Bauern und Geldgeber (sogenannte „illegale Parzellen“).

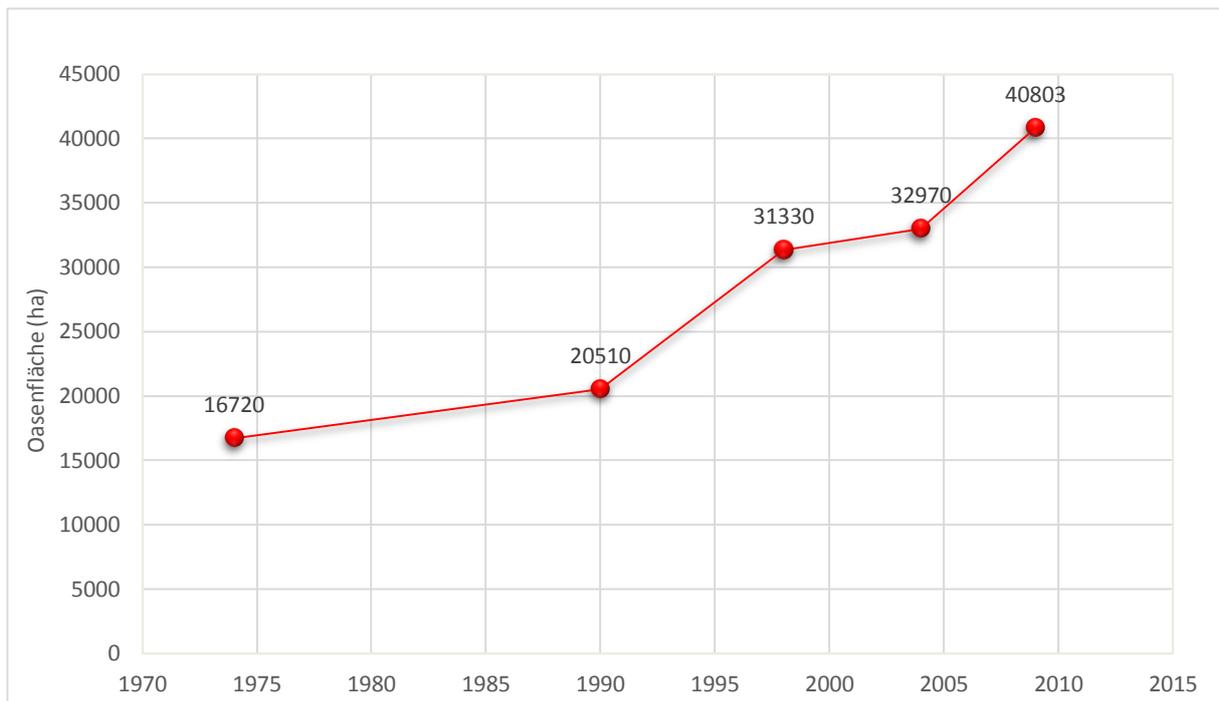


Abbildung 3. Zunahme der Oasenfläche in den Oasen Südtunesiens (SGHAIER, 2010. S.28).

Trotz der geographischen Unterschiede zeigt sich in diesen drei tunesischen Oasentypen eine Homogenität in Bezug auf das Verhältnis der lokalen Bevölkerung zu den natürlichen Ressourcen, insbesondere den Wasserressourcen. Es handelt sich primär um die Nutzung unterirdischer Wässer „tiefere Aquifere“ (MHIRI ET AL, 1998).

Ebenfalls überein stimmend sind die Abhängigkeit der Bevölkerung von der Dattelproduktion, sowie die nationale Politik in diesen Regionen, welche als Leitlinie die intensive Entwicklung und Erweiterung der hydraulischen Infrastruktur (Bewässerungs- und Drainagenetz) hat. Die gemeinschaftliche Nutzung der Wasserressourcen durch Kooperativen (GIC), in denen die Bauern zusammengeschlossen sind, ermöglicht heute die Erarbeitung von Bewässerungskalendern und übernimmt heute die Lösung von Konflikten.

Ein weiteres Problem ist die Fragmentierung der Parzellen durch Eigentumsübertragung per Erbschaft, das in den drei Arten der Oasen angetroffen werden kann (MALANO & BURTON, 2001). Die Nutzung und Pflege der Parzellen ist bei kleinbäuerlichen Betrieben, im Gegensatz zu Großgrundbesitzern, noch sehr intensiv, wird aber zunehmend durch den Wegzug der jungen Generation erschwert.

4.2.2 Besonderheiten der Nefzaoua-Oasen

Verortet im Südwesten von Tunesien, gehört die Region Nefzaoua zum Regierungsgebiet von Kebili. Sie ist im Nordwesten von den Regierungsgebieten Tozeur und Gafsa, im Westen von der algerischen Grenze, im Süd-Osten von den Regierungsgebieten Tataouine und Medenine und im Osten vom Regierungsgebiet Gabes begrenzt (Abb. 4). Im Bezug zu den verschiedenen regionalen Räumen ist Nefzaoua Teil der süd-westlichen Region, zu welcher ebenfalls die beiden Regierungsgebiete Gafsa und Tozeur gehören. Sie wird, nach der Entwicklungsplanung für den Süden Tunesiens, „*Plan Directeur du Développement des Régions du Sud*“, auch als zentrale Region der südlichen Sahara betrachtet (SGHAIER, 1993; 1999).

Diese Region stellt insbesondere den Kern der Oasen mit starker Entwicklungsdynamik dar und ist seit langem für bedeutende Verbesserungen im Bewässerungssektor bekannt. Der Anbau von Dattelpalmen, besonders der Sorte Deglet Nour, bleibt ein wichtiger Faktor für die Aufwärtsentwicklung des Bewässerungssektors in dieser Region (Tab. 1).

Genauer gesagt fungieren die Oasen von *Nefzaoua* als Orientierung für die komplexen Probleme des Managements der Bewässerung.

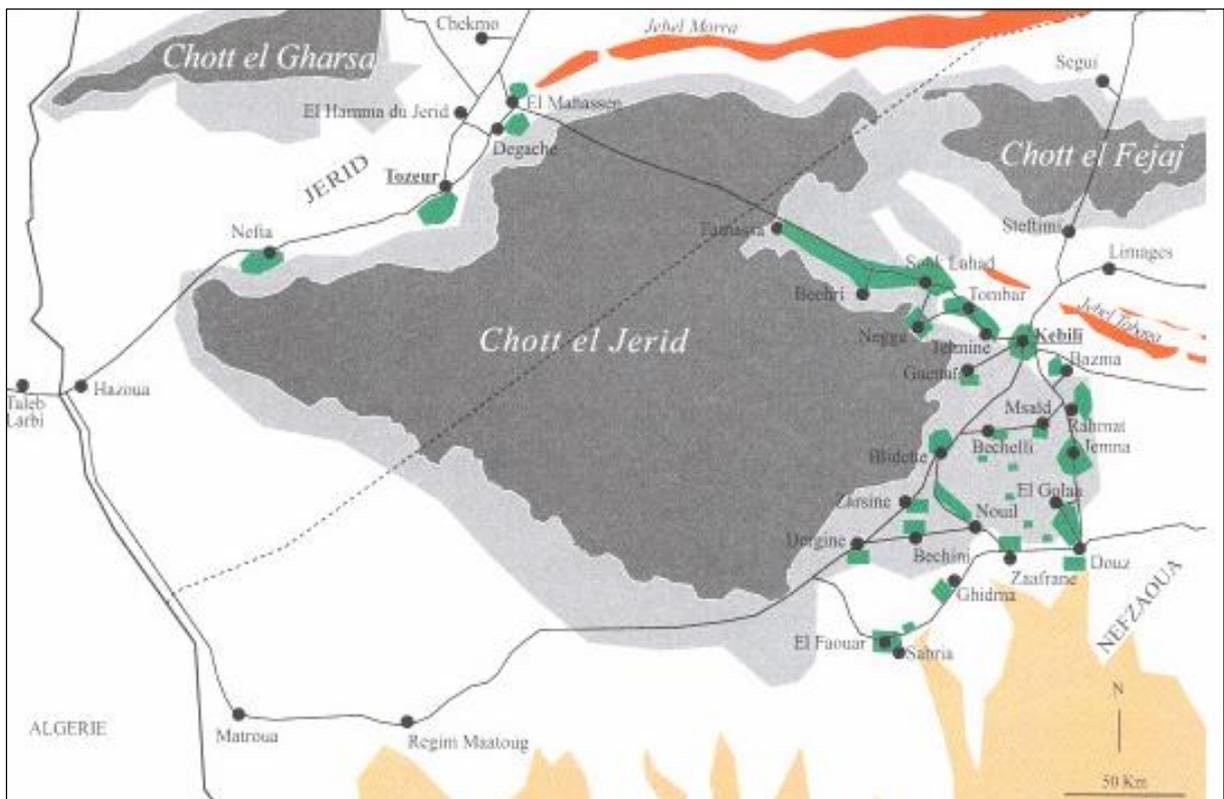


Abbildung 4. Verortung der Region Nefzaoua, Südtunesien (GHAZOUANI ET AL, 2007, S. 2). (Oasenflächen sind grün unterlegt).

Tabelle 1. *Entwicklung der Dattelpalmlantagen (Sorte Deglet Nour) in der Region Nefzaoua (verändert nach CORSALE, 2005, S.247).*

Jahr	1935	1970	1976	1987	1991	1996	2002
Anzahl der Palmenhaine	473	678	776	1.050	1.180	1.700	1.957
Anzahl der Palmenhaine der Sorte DegletNour	18	361	450	750	880	1.300	1.547
Anteil der Haine der Sorte DegletNour (%)	3,8	53,2	58,0	71,4	74,6	76,5	79,0

Demografisch ist diese Region durch ein starkes Wachstum (eines der stärksten des Landes) und einer Dynamik charakterisiert, von der die vielen Erweiterungen der Oasen zeugen. Die Bevölkerung in den Oasen in den vier Provinzen im Süden zählten im Jahr 2009 ca. 948.000 Bewohner, das ist etwa 10% der tunesischen Bevölkerung (SGHAIER, 2006; 2010). Die lokale Bevölkerung hat sich in drei Jahrzehnten nahezu verdoppelt (Abb.5).

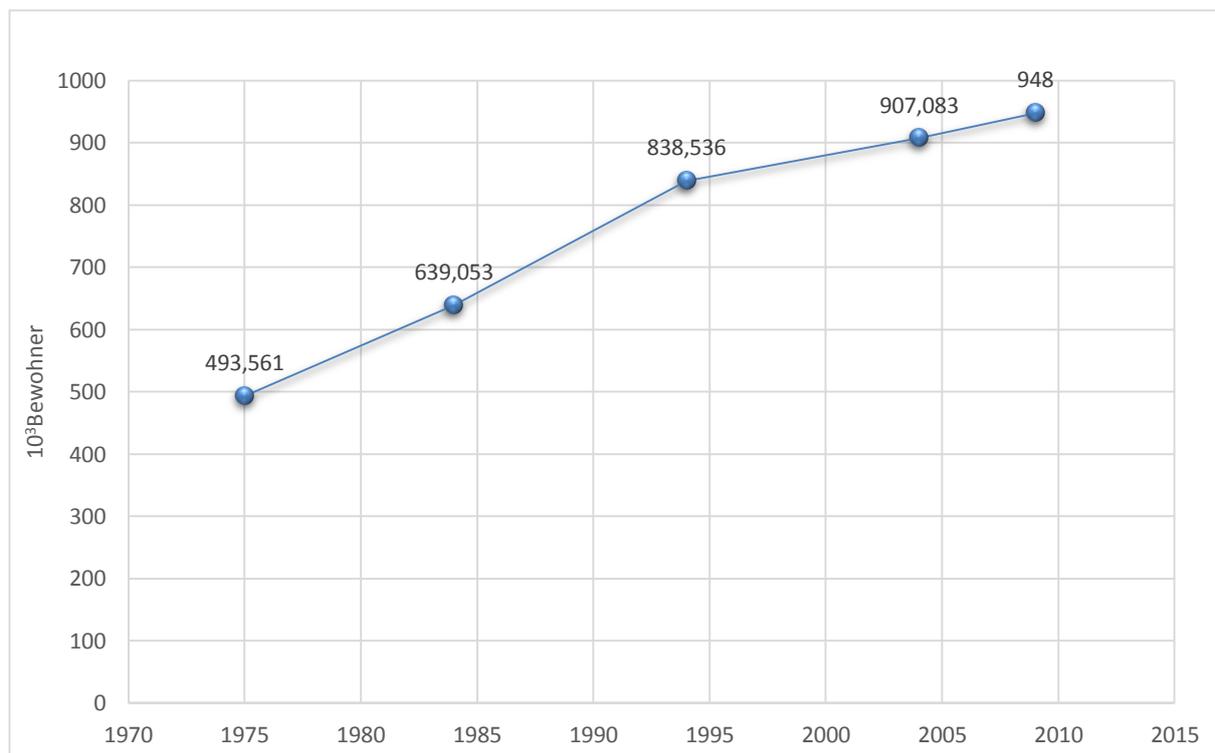


Abbildung 5. *Bevölkerungswachstum in den Oasen Südtunesiens (1975-2009).* (SGHAIER, 2010 S.27).

Die Wachstumsrate der lokalen Bevölkerung in diesem Gebiet erreicht jeweils 3,1 % pro Jahr zwischen 1975-1984, 2,8% pro Jahr zwischen 1984-1994 und 1 % pro Jahr zwischen 1994-

2004 im Vergleich zu der nationalen Quote in den gleichen Zeiträumen (2,5%, 2,3% und 1,2%) (SGHAIER, 1995 b; GAMMOUDI & SGHAIER, 2007; MEDD, 2010).

Die geringe Verfügbarkeit der Ressource Boden bei erhöhtem Bevölkerungsdruck führt zur Übernutzung und Degradation. Da die Bevölkerung nach wie vor von der Nutzbarkeit der Ressource Boden abhängig ist, besteht ein nationales Interesse an dessen nachhaltiger Nutzung und damit verbunden, der Entwicklung der Region.

Die Mehrzahl der Oasen in dieser Region haben Probleme, welche den Wiederanstieg des oberflächennahen Grundwassers und die Versalzung betreffen, die in Zusammenhang mit einem unangemessenen Wasser- und Bodenmanagement und der Abwesenheit von Vorflutern für Drainagewässer stehen. Obwohl die Wasserressourcen in Süd-Tunesien limitiert und von fossilem Ursprung sind, ist die Effizienz ihrer Nutzung oft gering. Mehrere Faktoren konkurrieren hier. In den Oasen sind die Wasserverluste in den Kanälen aus Erde erheblich, sie betragen zwischen 30 und 50 %. Auf Parzellenebene dosiert der Landwirt ungenügend genau die Bewässerungsmenge und kennt nur notdürftig die Bedürfnisse seiner Kulturen, besonders, da die Wasserbedürfnisse von verschiedenen Sorten nicht bekannt sind.

Wenige Arbeiten beschäftigen sich mit dieser Frage (EL AMAMI, 1968, EL AMAMI & LABERCHE, 1973) und es gibt keine verlässliche Abschätzungsmethode für diese Bedürfnisse. Die Landwirte bewässern ausschließlich oberflächlich in verschiedenen Beckenformen, was durch die natürlichen Eigenschaften des Sandes, aus dem der Großteil der Böden besteht, zu großen Wasserverlusten in der Parzelle führt. Diese unterschiedlichen Verluste (Transport und Verteilung) führen zu einem Mangel an Wasserverfügbarkeit in den Oasen und verhindern einen geschlossenen Wasserkreislauf. Um diese Probleme zu überwinden hat der Landwirt in einigen Fällen die Tendenz, seine Parzellen überdosiert zu bewässern. All dies wirkt sich in den Parzellen durch Versalzung und Verstopfung der Poren aus. Zwei Lösungen werden im Moment favorisiert:

- die Verbesserung der Effizienz der Bewässerung
- die Verbesserung der Qualität des Wassers, das aus den Oasen heraus geleitet wird.

Aktuelle Studien über die Verwaltung der Wasservorräte in den tunesischen Oasen zeigen, dass die Arbeiten über die Benutzung des Brackwassers und die Versalzung der Böden in den tunesischen Oasen, die es seit über fünfzig Jahren gibt, ausschließlich von Seiten der Bodenkunde und der Hydrogeologie durchgeführt wurden (HACHICHA et al, 1995). Diese Studien wurden im Rahmen der Entwicklungspläne der Landwirtschaft in diesen Regionen und reiner Forschungsarbeiten über speziellere Themen, u.a. die Reaktion der Dattelpalme auf die

Bewässerung und die Bewässerungs- und Drainageparameter (CREUSI, 1968 a,b; 1970) oder die Versalzung der Böden und die Reaktion der oberflächennahen Grundwasservorkommen (RHOADES, 1980; RHOADES et al., 1997; COINTEPOIS, 1965; MARTEL, 1966), durchgeführt. Entsprechende Studien wurden 1984 in Tarfaya und Gabès wieder aufgenommen. Gleichzeitig wurden weitere Studien über die Wasserressourcen (UNESCO, 1972; MAMOU, 1976, 1990; MAMOU & HLAIMI, 1999; MAMOU & KASSAH, 2002), die Ressourcen des Bodens und die Dynamik des Gipses (EL FEKIH & POUGET, 1966; HACHICHA, 1994; 1998; 1999; HACHICHA et al., 1998; POUGET, 1968; BELKHODJA, 1967; PONTANIER, 1967; PONTANIER & VEILLEFON, 1977; VIEILLEFON, 1976, 1978; JOB et al., 1987; JOB, 1992, 1995; Goussi, 1996; GRIRA, 1993), die sozio-ökonomische Aktivität (BADUEL, 1980 ;1987) und über die Dynamik der Oasenpopulation (BERNSTEIN, 1981; BACHTA, 1976; SGHAIER, 1984;1985;1988; KASSAH, 1980; 1996; 1998; 2002; LASRAM, 1990; AUCLAIR & ZAAFOURI, 1996 ; BARRETEAU, 1998 ; BATTESTI, 2005) durchgeführt. Diese Ergebnisse, welche für die Region *Nefzaoua* sehr relevant sind, verdienen es, vertieft zu werden, da die in den anderen Regionen des Landes gewonnenen Erkenntnisse oft nicht auf die Umstände der Oasen in *Kebili* anwendbar sind. Diese sind vielmehr charakterisiert durch Toleranz gegenüber Salz und Vernässung, das Vorkommen der Palmen, einen Boden, der vergleichsweise gut filtert aber reich an Gips ist und Wasser, dessen geochemische Zusammensetzung deutlich von Sulfaten dominiert ist.

4.2.3 Untersuchungen zum Bewässerungsmanagement in tunesischen Oasen

Tunesien ist, ein Land, in dem es periodisch, vor allem im Bereich der Landwirtschaft, zu Wassermangel kommt. Die bewässerte Fläche beträgt etwa 468.550 ha, das sind etwa 8 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche. Deswegen haben sich bereits viele Forschungsarbeiten mit dem Aspekt der Bewässerung befasst und dadurch eine Verbesserung der Effizienz der Wassernutzung ermöglicht.

LOUHICHI (1999; 2000) z. B. hat sich mit der Bewässerungseffizienz in den litoralen Oasen in Gabes beschäftigt und hat bewiesen, dass eine Renovierung der Bewässerungsanlagen eine Ersparnis von 0,036 DT/m³ erbringen kann.

MARLET ET AL. (2006; 2009) betonte in der Fallstudie der Oase *Fatnassa* in *Nefzaoua*, die Notwendigkeit, neue Bewässerungstechniken dringend zu implementieren. Es geht darum, sowohl die Spitzen des Wasserbedarfs besonders im Sommer zu reduzieren, als auch den Wiederanstieg des Wasserspiegels des oberflächennahen Aquifers zu verhindern und damit den Salzgehalt des Bodens in den Parzellen zu minimieren. Der Quotient zwischen den

Salzgehalten des Bewässerungs- und Entwässerungswassers ist momentan 1,66 aufwärts des Grundwasserstroms zur Oase, während er 7,77 abwärts zur Oase erreichen kann (BEN AISSA, 2004; 2006).

Trotzdem bleibt die Situation im Süden des Landes sehr unsicher (BAHRI, 1999; 2009; AGRAR, 1992). Die Oasen hängen heute vor allem von der Verfügbarkeit der tieferen, unterirdischen, nicht erneuerbaren Wasserressourcen ab (LE GAL & PAPYH, 1998; PLAYAN et al., 2000).

In Anbetracht der Tatsache, dass die erneuerbaren Wasserressourcen nicht ausreichen und ein Defizit entsteht, ist die Effizienz der Bewässerung in diesen Regionen ein wichtiger Aspekt der Entwicklung. Seit dem PDES (Ausführungsplan des Wassers des Südens, fr.: Plan Directeur de l'Eau du Sud) 1979 haben mehrere Forschungsarbeiten auf den bewässerten Flächen stattgefunden, um eine Ausdehnung der Oasen zu ermöglichen. Ein Versuch der Implementierung effizienter Bewässerungsalternativen in den Oasen von Nefzaoua, um die traditionelle Überschwemmungsmethode zu ersetzen, wurde von HEMM und STRAUB (2007) und LOEPER (2008) durchgeführt. Die Wirksamkeit, Wasser durch den Einsatz neuer Techniken zu sparen, konnte belegt werden, gleichzeitig wurde aber in Frage gestellt, ob die Bauern diese neuen Techniken wirksam einsetzen können.

Laut AL ALTIRI (2005) bleiben die Preise des Bewässerungswassers in den Oasen im Süd Tunesien noch niedrig (z. B. durchschnittlich 0,028 DT/m³ in den Gafsa Oasen). Die Inanspruchnahme der traditionellen Wasserrechte in den Oasen durch die Bauern schränken aber eine am Bedarf und an der Verfügbarkeit orientierte Tarifentwicklung ein (SGHAIER, 1995 a).

Die Umsetzung der Wassereinsparungsprojekte in den Gabes Oasen hat z.B. eine tiefgreifende Veränderung der Mentalität der Bauern gefordert, die darauf aber nicht vorbereitet waren. Trotz dieser Veränderungen im Wassermanagement, besteht nach wie vor ein wesentlicher Wassermangel in den Parzellen im Sommer. Wegen der häufigen Stromausfälle und dem damit verbundenen Ausfall der Pumpen, bekommen die Bauern zunehmend das Gefühl ihre eigene Kontrolle über das Wassermanagement verloren zu haben (VEYRAC BEN AHMED & ABDEDAIEM, 2011). Solche Aspekte sollen in Zukunft in den Untersuchungen der Bewässerungseffizienz in den Oasen berücksichtigt werden.

Die hydraulischen Renovierungsarbeiten hatten vornehmlich eine Verringerung der Wasserverluste im Vertriebsnetz zum Ziel. Der Großteil der Arbeiten wurde im Zuge des APIOS-Projektes (Verbesserung der Bewässerungsflächen in den Oasen Süd-Tunesiens, (fr.: Amélioration de Périmètres Irrigués dans les Oasis du Sud Tunisie) durchgeführt.

Die Fläche der von diesem Projekt betroffenen tunesischen Oasen bedeckt etwa 23.000 ha in den Provinzen Gabes, Gafsa, Kébili und Tozeur. Seit 1996 waren die immer noch anhaltenden Erneuerungsarbeiten bereits in 90 von 153 (58,82 %) der anfänglich im Projekt angestrebten Oasen abgeschlossen. Trotz der schon erreichten Verbesserungen stellt die bleibende Abnahme der nicht erneuerbaren unterirdischen fossilen Wasserressourcen aufgrund intensiver Entnahme und die mit der Nutzung immer tieferer Aquifere einhergehende Verschlechterung der Wasserqualität eine Bedrohung für das fragile ökologische Gleichgewicht in diesen Regionen dar. Offene Wasserzufuhr und die Flutung der Bodenoberfläche bleibt die Hauptbewässerungsmethode und ist in den Parzellen weit verbreitet.

Forschungen haben gezeigt, dass die Landwirte immer noch ein Bewässerungssystem verwenden, bei der große Mengen an Wasser schon vor dem Erreichen der eigentlichen kleineren Bewässerungsbecken verloren gehen (SAEED et al., 1990). Solche Wasserverluste sind in der Oase von Jedida im Nord-Westen von Kébili beobachtet worden, wo wegen mangelhafter Pflege des Hauptbewässerungsnetzes innerhalb der Parzellen, dort ein Wasserverlust von über 11 % beim Durchfluss der Kanäle entstanden (MECHERGUI & VAN VUREN, 1998).

Traditionell bestehen die Bauern auf der Errichtung und Erhaltung von Erdkanälen für die Wasserverteilung in den Parzellen. Hierbei ist in einem Erdkanal mit wechselndem Querschnitt auf einer Strecke von 210 m, bei einem Durchfluss der zwischen 15,7 und 8,5 l/s schwankte, eine Verlustrate von 0,034 l/s/m in einem Erdkanal gemessen worden. In einem Kanal mit gleichbleibendem Querschnitt, in dem der Durchfluss nur zwischen 15 l/s auf 13,2 l/s schwankte, reduzierte sich der Wasserverlust auf einer Strecke von 250 m auf 0.018 l/s/m. Das alles erschwert eine ökonomische und ökologisch sinnvolle Wassernutzung. Daher muss die Verbesserung der Effizienz der Wasserverteilung durch Forschungsarbeiten unterstützt werden, welche eine Verbesserung der Bewässerungseffizienz in den Parzellen selbst anstreben (HAMDANE, 2007; ENABLI, 1993; AL ATIRI, 2005).

Der mit der Zufuhr von Bewässerungswasser aus tieferen Aquiferen verbundene Anstieg der oberflächennahen Grundwasservorkommen und die Versalzung des Bodens werden zu einem permanenten Risiko. Bei weiterhin unveränderter Wassernutzung ist die Lebensdauer dieser Ökosysteme, sowohl innerhalb der Oasen als auch in angrenzenden Senken, begrenzt.

Es wird nötig sein neue Techniken einzuführen, um die Bewässerung der Oasenflächen zu verbessern. Dabei ist eine Berücksichtigung der momentanen regional vorliegenden Bedingungen, wie verfügbare Wassermenge und Wasserqualität, unbedingt zu berücksichtigen. Um dieses Ziel zu erreichen wird es nötig sein, die Beteiligung der Landwirte und ihr

Engagement bei der Modernisierung der Bewässerungstechniken zu fördern. Zurzeit sind die Landwirte, trotz der Subventionen der Regierung und Werbemaßnahmen für den Erwerb von Materialien, welche das Wassersparen auf den Parzellen erlauben, den neuen Techniken noch abgeneigt.

4.2.4 Die Effizienz der Bewässerung in den Oasen von Nefzaoua

Die verwendete Bewässerungsart in den Oasen Süd-Tunesiens ist ausschließlich gleichförmig und traditionell mit einer sehr schwachen mittleren Effizienz. Viele der Arbeiten, die sich mit dieser Frage beschäftigen und in verschiedenen Regionen im Süden des Landes durchgeführt wurden, haben die Verluste durch diese Art der Bewässerung und die Notwendigkeit einer Öffnung hin zu neuen Techniken der Wasserwirtschaft in den Vordergrund gestellt. In diesem Zusammenhang gibt es auch Initiativen durch Ämter der Agrarentwicklung im Hinblick auf die Modernisierung des Wassermanagements. Dabei wurde mit einer Bauplanung, welche die Grundwässer des Südens beeinflusst, begonnen, die das Ersetzen der veralteten Kanäle durch eine neue Infrastruktur mit einer höheren Effizienz der Verwaltung der Bewässerungssysteme vorsieht (SEDDIK, 1991). Der erste Teil der Ausführung dieses Plans wurde als Erfolg bewertet, da die Wasserverluste erheblich reduziert wurden (ESSID, 1991), was den Ausschlag dazu gab, den Radius des Planungsgebietes zu vergrößern. Allerdings wurde nach Durchführung der Maßnahmen festgestellt, dass für die Nutzung auf den Parzellen nur 60 – 70 % der geförderten Wasser zur Bewässerung für die Bauer zur Verfügung stehen. Die restlichen 30 – 40 % gehen schon bei der Zuleitung zu den Parzellen verloren (BEN HASSINE & HFAIED, 1992).

Aufgrund der erkannten Probleme war das Ziel einer breitangelegten Veränderungsstrategie ein effizientes Management der Bewässerungswässer zu entwickeln, um die Produktivität zu steigern, die Nachfrage nach Wasser zu reduzieren und eine Steigerung der landwirtschaftlichen Profite herbeizuführen (BASTIAANSEN, 1993).

Im Einklang mit dieser Planung steht das Projekt zur Verbesserung der Oasen im Süden Tunesiens APIOS (1996). Die Machbarkeitsstudie über den Verlust an Wasser in den Erdkanälen, durchgeführt in den Oasen Gabès, Gafsa, Tozeur und Kébili, zeigte dabei einen Verlust in Höhe von 25% auf 100 m Länge eines Bewässerungskanals in traditionellen Oasen gegenüber 30% Verlust in den neuen Oasen. Im Vergleich zu den neuen Oasen, sind die Wände der Erdkanäle in den alten traditionellen Oasen kompakter und auch feuchter als in den neuen Oasen, wo die Erdkanäle frisch angelegt werden (was eine relative höhere Versickerung ergibt).

Die Tabelle. 2 zeigt die Entwicklung der Verlustmengen im Verlauf des Kanals in den zwei unterschiedlichen Oasentypen:

Tabelle 2. Wasserverlust in Erdkanäle unterschiedlicher Länge (SANYO, 1996, S. 34).

Kanallänge (m)	12,5	25	50	75	100	125	150	175	200
Verlustmenge (%) bei traditionellen Oasen	3,3	6,5	13	19	25	30	35	39	44
Verlustmenge (%) bei modernen Oasen	4	8	16	23	30	35	41	46	51

Anhand der Tabelle 2 kann gezeigt werden, dass die Verluste durch Infiltration mit der zurückgelegten Entfernung steigen.

Im Hinblick auf die Effizienz, erwies sich die neuere, rein manuell arbeitende Oasentechnik als wirksamer. Hierbei kann die Anlage der Zuläufe des Wassers besser und individueller an die Größe der Bewässerungsbecken angepasst werden, die, zwecks dichter Bestockung, immer kleiner angelegt werden (Tab. 3). Dies führt zu einer Effizienzsteigerungen von 85% gegenüber 80 % in den traditionellen Oasen.

Tabelle 3. Größe der Bewässerungsbecken in Bezug zur Bodennutzung (SANYO, 1996, S. 52).

Oasennamen	Region	Oasentyp	Anbau	Größe (m²)
Ibn Chabbat 3	Tozeur	neu	Palme	4 X 4
Draa Sud	Tozeur	neu	Palme	3 X 3
Mansoura	Kebili	traditionell	Palme	6 X 6
Atillet	Kebili	neu	Palme	2 X 6
Oasis de Gabes	Gabès	traditionell	Palme	5 X 20
Limaoua	Gabès	neu	Futtermittel	2,5 X 15

Die Oase von Rahmat in Nefzaoua, war zum Beispiel das Objekt einer Studie über die Effizienz der Bewässerung. Die erzielten Ergebnisse von MECHERGUI und SNANE (1996) an diesem Ort zeigen, dass bei einem Hauptsystem, mit einem Gesamtdurchfluss von 86 l/s, nur eine effektive Rate von 77,4 l/s zu den Parzellenanschlüssen geliefert wird. Mehr als 10% sind in den primären

und sekundären Bewässerungsnetzen verloren gegangen. Weitere Wasserverluste (0,033 bis 0,050 l/s/m) geschehen dann auch durch die Erdkanäle in den Parzellen.

Außerdem gibt es ein Phänomen der Ungleichheit, was bei der Zuteilung erkannt wurde. Tatsächlich sind die Parzellen, welche direkt stromabwärts neben den Anschlüssen liegen, im Vergleich zu denen, die weiter weg liegen, mit Wasser bevorteilt. Der Bauer, der diese letzten Plantagen bewässert, besitzt nur einen Durchfluss, der weitaus schwächer ist, als der, welcher laut Wasserkalender vorhanden sein müsste. Er bekommt nur etwa die Hälfte des Durchflusses (12 l/s statt 24 l/s) und das, obwohl alle eigentlich das gleiche Recht haben und den gleichen jährlichen Betrag zahlen.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Untersuchung der Bewässerung immer nur auf die Messung einzelner technischer Parameter als ausgewählte Indikatoren für das gesamte Netz oder lokal in den Parzellen, durchgeführt wurden (ABERNETHY, 1989). Die Studien, die bezüglich der Leistung der Bewässerungssysteme in den Oasen durchgeführt wurden, haben das Systemen nicht umfassend untersucht, sondern waren oft Gutachten von Experten die spezifische Themen untersuchen wollten z. B: die Wirkung des Salzgehaltes als bestimmenden Faktor für den Anbau der Dattelpalmen (AL- AJMI et al , 2002; SHANI et al., 2001; TRIPLER et al., 2007). GHAZOUANI (2009) studierte die Quantifizierung der Evapotranspiration der Palmen in Verbindung mit der Effizienz der Wasseranwendung (SIEBERT et al., 2007). Weitere Studien beschäftigten sich hauptsächlich mit der Biomasse (SELLAMI & SIFAQUI, 2008) oder dem Effekt des Ziselierens auf die ernährungsphysiologische Qualität der Datteln (AL- SAIKHAN, 2008). SHANI et al. (2005; 2007) haben insbesondere die Wirkung der Wasserversorgung und des Salzgehaltes auf den Anbau der bewässerten Kulturen in einem kontrollierten Umfeld hervorgehoben. VIDAL et al. (2004) haben festgestellt, dass sehr wenige Studien, die die Bewässerungseffizienz betroffen haben, sich mit dem Community-Aspekt des Bewässerungsanlagen Managements befassen haben. Bei der Verwaltung der kommunalen Wässer, wie es für die Oasen des südlichen Tunesien der Fall ist, ist die Erfassung der Bewässerungseffizienz sogar noch komplexer, weil sie soziale und kulturelle Traditionen des technischen Wassermanagements für ganze Generationen von Landwirten berücksichtigen muss.

4.2.5 Abschätzung der Wasserbedürfnisse für die Oasen: Machbarkeit und Wissenslücken

Um die Wasserversorgung zur Bewässerung in den Oasen im Süden Tunesiens im Allgemeinen und für Nefzaoua im Besonderen zu optimieren, hat sich das Projekt der „Verbesserung der Oasen im Süden Tunesiens“ (frz.: Amélioration des Périmètres Irrigués dans les Oasis du Sud Tunisie, kurz: APIOS) im Zuge einer Machbarkeitsstudie mit den Wasserbedürfnissen

beschäftigt. Dabei wurden vier verschiedene empirische Methoden verwendet (Pan Class A; Penman; Blaney-Criddle; Espinar). Die Methode nach Penman wurde nach Empfehlung der FAO (2002) verändert und letztendlich verwendet. Dennoch ist darauf hinzuweisen, dass hinsichtlich der verschiedenen Rechenmethoden für die Wasserbedürfnisse keine signifikanten Unterschiede in den vier Regierungsbereichen des Südens (Gabes, Kebili, Gafsa und Tozeur) beobachtet wurden.

Um die Verfügbarkeit des Wassers in Bezug auf den Bedarf im Bewässerungsnetzes zu überprüfen, wurden die Wasserbedürfnisse der Anbausysteme der Oasen wie folgt angenommen: 1.025-1.410 mm/Jahr für Gafsa, 1.150-1.669 mm/Jahr für Tozeur, 1.170-1.670 mm/Jahr für Kébili und 820-1.240 mm/Jahr für Gabes (SAPI, 2005). Auf Basis dieser Schätzungen wurden die Verbesserungsarbeiten aufgenommen um die Effizienz der Verteilung zu steigern. Das hat dazu geführt, dass zwischen 25 bis 30 % der Wasserverluste eingespart werden konnten (Abb. 6).

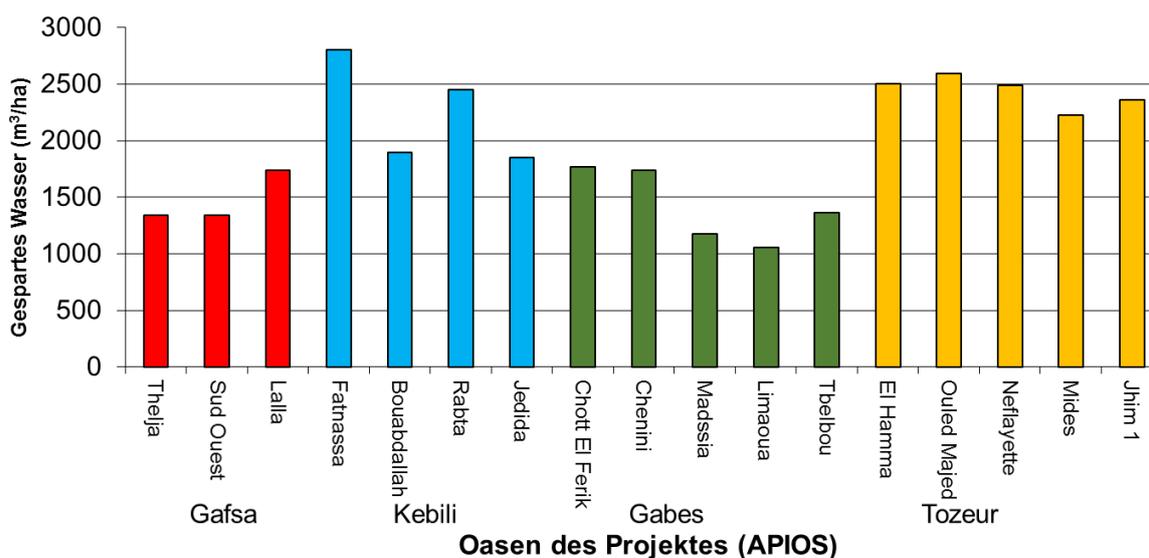


Abbildung 6. Einfluss der Verbesserungsarbeiten auf den Wasserverbrauch in den vier Regierungsbereichen im Süden Tunesiens (verändert nach SAPI, 2005).

Trotz der Verbesserung der hydraulischen Infrastruktur ist das Wasserdefizit im Sommer, wenn die Bewässerungsnetze schnell ihre Grenzen erreichen und die stark steigende Nachfrage an Wasser nicht mehr decken können, weiterhin vorhanden (GHARBI, 2009). Auf der anderen Seite überschreiten die Wassermengen, welche weiterhin aus den Grundwasserleitern gepumpt werden, bei weitem die tatsächlichen Bewässerungsbedürfnisse (LORITE et al., 2007). Der Wasserüberschuss nährt den oberflächlichen Grundwasserkörper, dessen Niveau auf eine inakzeptable Höhe steigt (RITZEMA, 1994; PRINZ et al., 2005).

Das chronische Wasserdefizit im Sommer hängt mit dem sehr hoch bleibenden Wasserverbrauch in den Parzellen zusammen, da keine deutliche Verbesserung der Produktivität beobachtet werden konnte. Die schwache Bewässerungseffizienz im Inneren der Parzellen stellte schon immer einen bedeutenden Druck für eine Verbesserung der Leistungen des Bewässerungssystems in den Oasen dar. Ein ausschließlich technischer Ansatz kann dieses Defizit nicht überwinden, da die sozialen Regeln des Community-Management der Bewässerungsanlagen das Hauptproblem darstellen (AUBRIOT, 2000, 2004). Diese sogenannten Regeln sind oft auch im Widerspruch mit den Strategien und dem individuellen Verhalten der Landwirte (GHAZOUANI et al., 2009). Das Ergebnis dieser Widersprüche bestimmt die Vielfalt der Bewässerungsleistung in den Parzellen der Oasen.

Doch für technische Aspekte, zeigt der Stand der Forschung ein nur schwach vorhandenes Fachwissen in Bezug auf den Umgang mit Wasser bei der Bewässerung. MECHERGUI und VAN VUREN (1998) haben für die Oase *Rahmat* in *Kébili* bewiesen, dass starke Schwachstellen bei der Berieselungsbewässerung vorhanden sind. In Abwesenheit von spezifischen Empfehlungen von Seiten des Entwicklungssektors, verwendet jeder Landwirt zur Bewässerung eigene Methoden (MOLDEN & GATES, 1990). Viele Betreiber haben noch nicht einmal Regulierungen der Abflussrate vor dem Anlegen der Bewässerungsnetze genutzt, was erhebliche Wasserverluste mit sich bringt. In Oasen, in denen die vorgeschriebene Bewässerungsmenge 50 mm beträgt, werden beispielsweise Wassermengen von 100 bis 300 mm verwendet.

KACEM (1990) zeigte eine signifikante Strömung in Richtung der niedriger gelegenen Gebiete, welche sich in Austritten von oberflächlichem Wasser und Salzkrusten im Sommer äußert. Diese Erkenntnis wurde unter anderem durch OUNIS (1999) untermauert, welcher die Auswirkungen eines Ausfalls des Entwässerungsnetzes auf die Produktivität des Anbaus in den Oasen zeigen konnte. Außerdem konnte gezeigt werden, dass es eine unangemessen hohe Auswaschung während der Bewässerung gibt, aus welcher eine chronische Vernässung des Bodens folgt, die unter anderem die Versalzung hervorruft und dadurch Schäden in den Plantagen bewirkt. Hierbei sind ebenfalls die topographisch niedrigeren Bereiche besonders betroffen (LÜDELING et al., 2005)

Es ist also festzustellen, dass immer noch Forschungsbedarf nötig ist, welche die Parzellen selber betrifft und es müsste eine ökonomische Alternative zu traditionellen Bewässerungsmethoden gefunden werden.

5 Das Untersuchungsgebiet

5.1 Lage

Der Regierungsbereich Kebili erstreckt sich über eine Fläche von 22.454 km², das entspricht 14,4 % der Gesamtflächen Tunesiens. Die Nutzung der Fläche ist der folgenden Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 4. Verteilung der Flächennutzung in Kebili (MAERH, 2012, S4)

	Ackerland	Wege	Wälder	ungenutzte Flächen	Gesamtfläche
Fläche (ha)	50.502	500.000	2.500	1 592.444	2 245.446

In Bezug auf die administrativen Einheiten, ist der Regierungsbereich Kebili begrenzt durch die Regierungsbezirke Gafsa und Tozeur im Nord-Westen, durch Algerien im Westen und durch die Regierungsbezirke Medenine und Tataouine im Süd-Osten (Abb. 7).

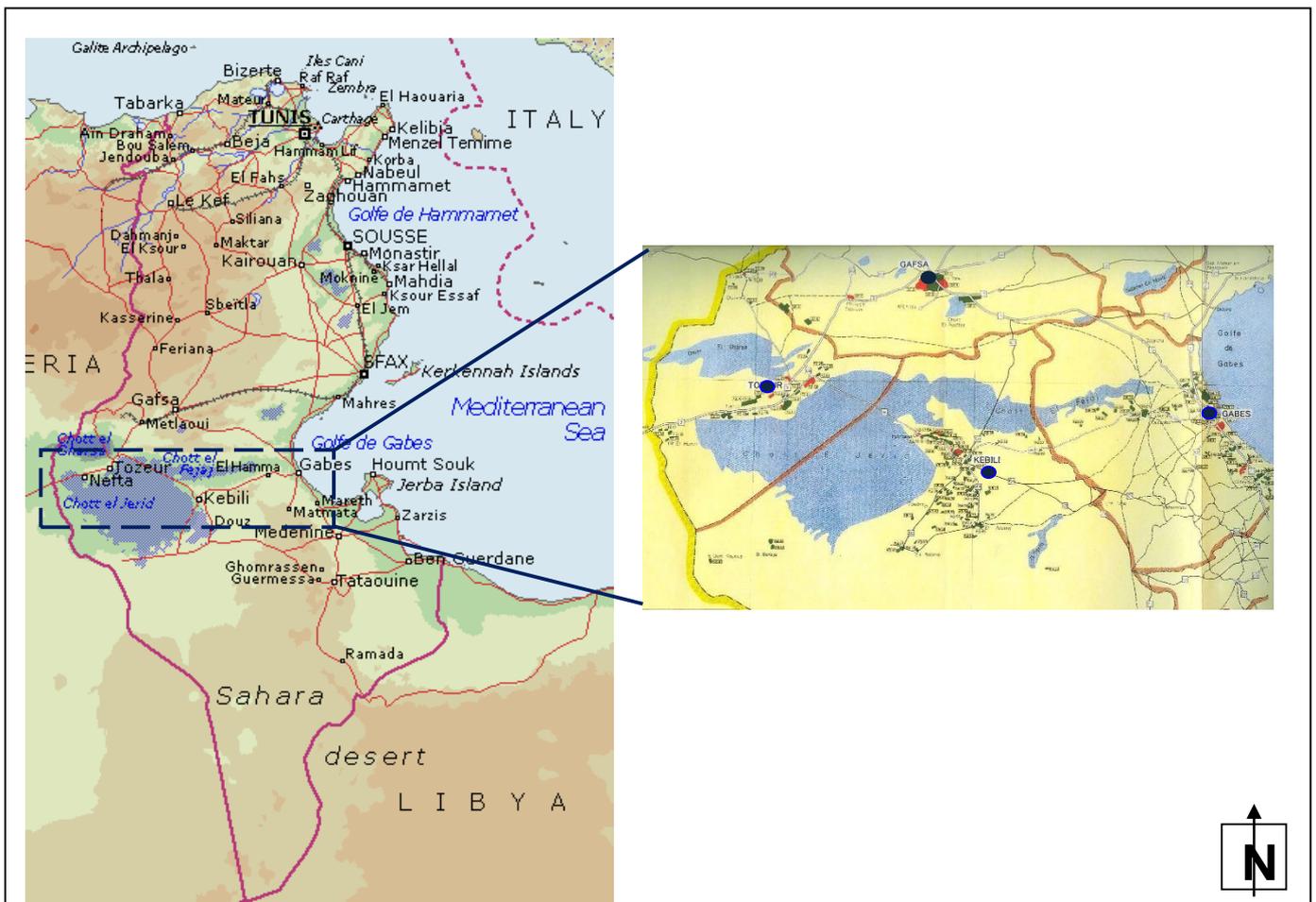


Abbildung 7. Ort des Untersuchungsgebietes (BENBOUBAKER et al., 2003: S.38 und SAPI, 2005: S. 14).

5.2 Geomorphologie

Nach MENSCHING (1968) ist der Süden Tunesiens geprägt durch die gestaffelten, West-Ost verlaufenden Schichtkämme der Schott *Djerid*- und der *Fedjedj*-Umrahmung, die nach Süden unmittelbar zum flachen Sahara-Relief überleiten (Abb. 8). Das Schott *Fedjedj* wird im Süden vom *Tebaga*-Schichtkamm begrenzt, an dessen Südhang unmittelbar die Region um *Kebili* angrenzt. Der *Djebel Tebaga* ist kein geschlossener, durchziehender Schichtkamm sondern wird durch querstreichende Gassen unterbrochen. Durch diese Korridore kann der Wind besonders stark wehen. Die ausgedehnten Schichtstufen des *Dahar* im Osten, mit dem Nord-Süd verlaufenden Stufentrauf, gehören strukturell schon zum Sahara-Block. Diese steile Schichtstufe im Osten behindert das Einströmen feuchter, milder, ozeanischer Luftmassen in das westlich gelegene Untersuchungsgebiet und verstärkt dadurch das Problem der Trockenheit. Die Landterrasse dieser Schichtstufenlandschaft bildet das Hochland des *Dahar*, welches nach Westen zum Schott *Djerid* flach abdacht. Die darauf entwickelten endorheischen Abflusssysteme sind im Übergang zum Schott mit Sanden sedimentiert. Die vom höheren Relief im Norden und Osten fluvial herantransportierten sandigen Sedimente bilden

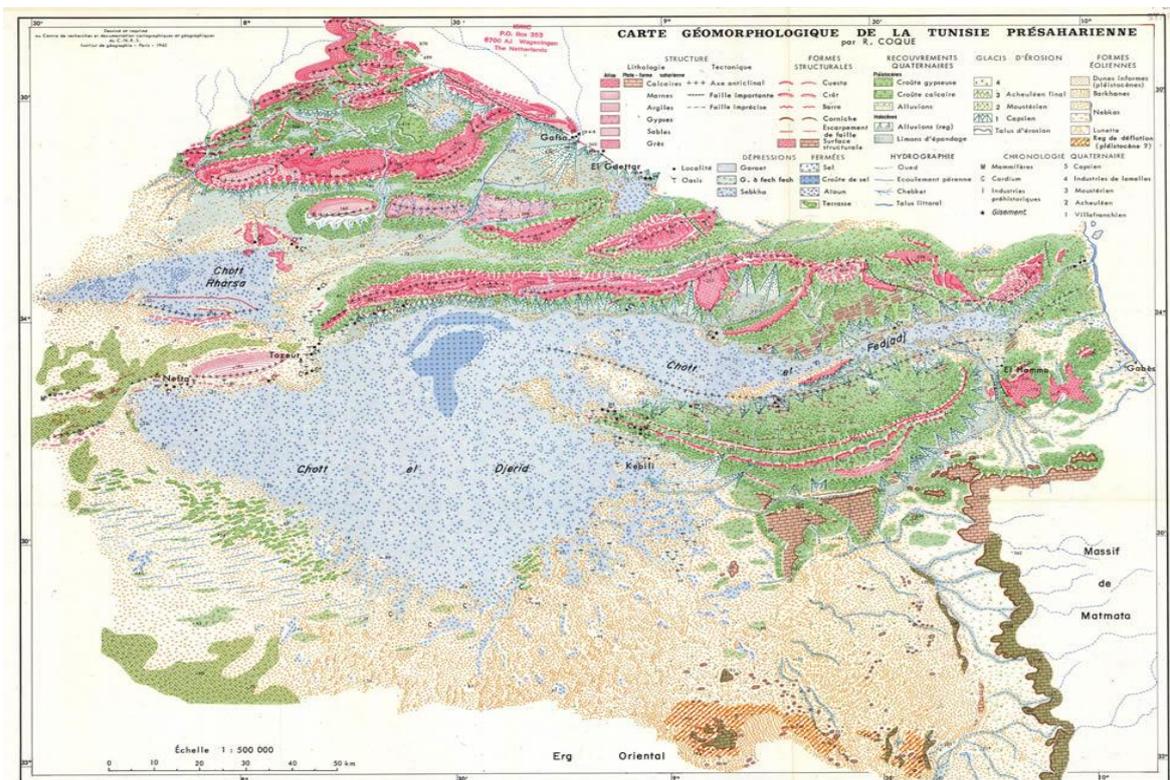


Abbildung 8. Geomorphologische Karte des Südtunesiens (Quelle: Karte nach COQUE, 1962: S84)

flache, etwas höher gelegene zungenartige Landrücken. Traditionell wird auf diesen flachen, sandigen Rücken die Oasenwirtschaft betrieben. Die Landrücken gliedern das Untersuchungsgebiet in eine Vielzahl von zwischengeschalteten, tieferen Sebchas und Schotts. Die Reliefenergie des Gebietes ist deshalb sehr gering und beträgt nur wenige, 2-4 m, Meter. Lediglich um ehemalige artesischen Quellaustritte finden sich höhere, kegelartige Ablagerungen. Ein Großteil der fluvialen Sande wurde später äolisch zum südlich angrenzenden großen Dünengebiet des östlichen Ergs aufgeweht.

5.3 Klima

Der untersuchte Bereich ist dem kontinentalen Sahara-Klima zuzuordnen, welches durch eine hohe zeitliche und räumliche Variabilität des Niederschlags und eine hohe thermische Tages- und Jahresamplitude gekennzeichnet ist.

5.3.1 Klimadiagramm

Kebili ist durch das lokale Wüstenklima geprägt. Die Klassifikation des Klimas nach Köppen und Geiger weist die Station als ein BWh-Klima, ein heißes Wüstenklima, aus. Im Jahresdurchschnitt beträgt die Temperatur 20,9 °C. Jährlich fallen etwa 98 mm Niederschlag (Abb. 9).

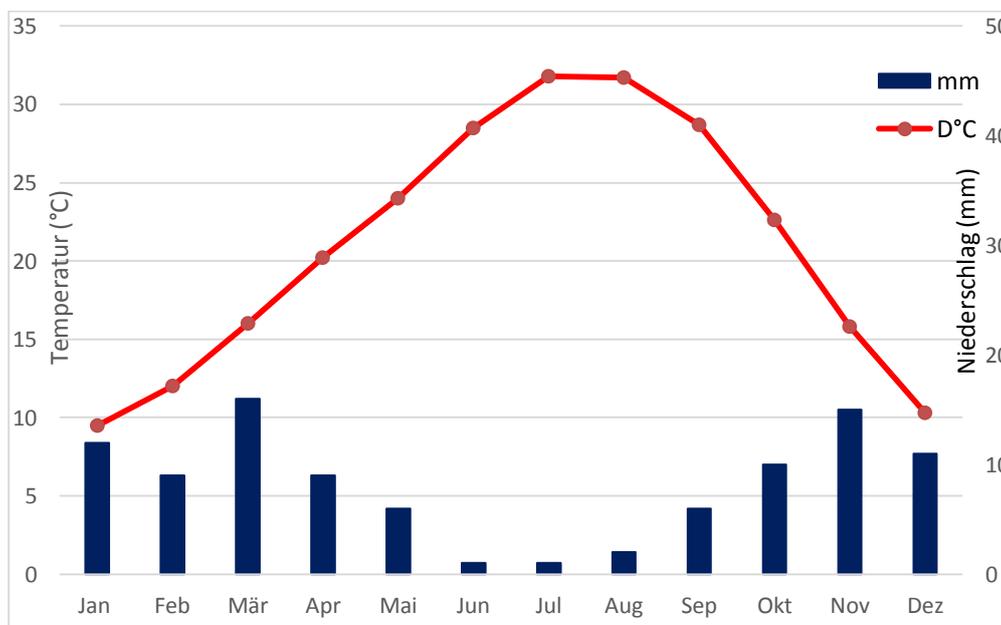


Abbildung 9. Klimadiagramm für Kebili (bearbeitet nach: <http://de.climate-data.org/location/30099/>)

5.3.2 Sonnenscheindauer

Die mittlere monatliche Sonneneinstrahlung (in Stunden), welche in Kebili gemessen wurde, sind anhand der folgenden Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5. *Mittlere monatliche Sonneneinstrahlung in Stunden (INM, 2000).*

Monat	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Jahr
Einstrahlung (h)	5,7	7,7	7,4	8	8,6	8,3	9,9	9,9	8	7,1	6,3	6,6	7,8

5.3.3 Temperatur

Es handelt sich um eine Region, die dem vor der Sahara liegenden Bereich Tunesiens angehört und durch große thermischen Tages – und Jahresamplituden charakterisiert ist. Das absolute Temperaturmaximum liegt über 50° C während das absolute Temperaturminimum bis zu -7° C fallen kann (Abb. 10).

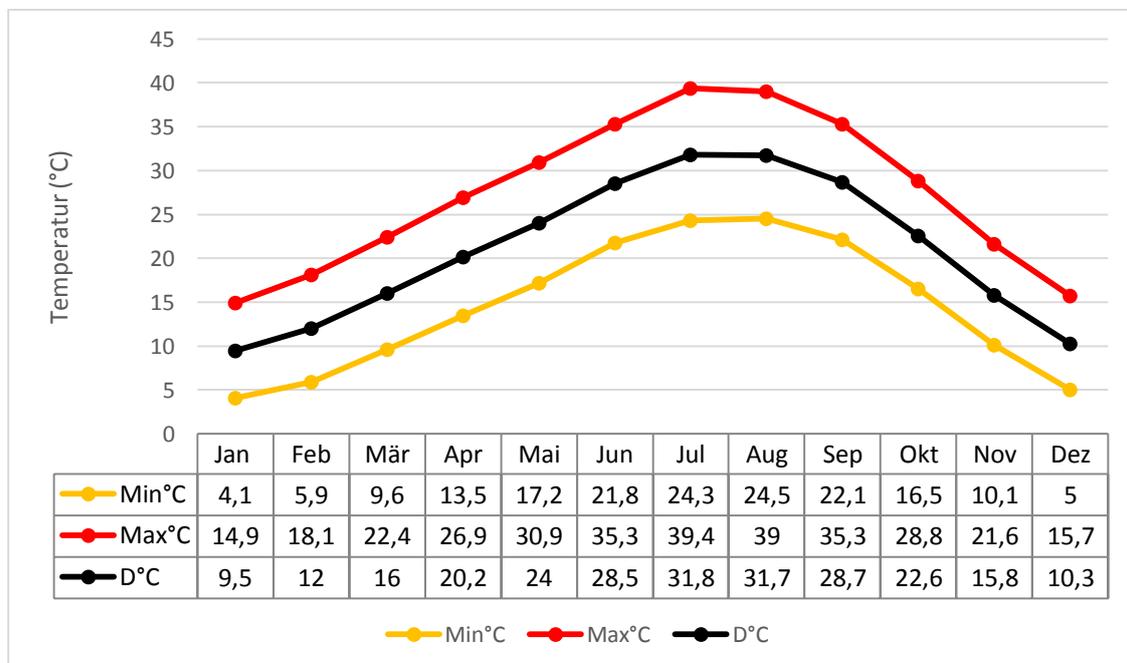


Abbildung 10. *Temperaturen in der Region Kebili (bearbeitet nach: <http://de.climate-data.org/location/30099/>)*

Demnach ist die absolute thermische Amplitude etwa bei 57° C. Im Jahresverlauf ist der Juli der wärmste Monat mit einer durchschnittlichen Temperatur von 31,8 °C. Die durchschnittliche Jahresamplitude der Temperatur liegt bei 22,3 °C. Der kälteste Monat im Jahresverlauf ist mit 9,5 °C im Mittel der Januar (<http://climate-data.org>). Diese Werte sind als optimal für die Entwicklung der Dattelpalme und insbesondere der Sorte Deglet Nour anzusehen.

5.3.4 Niederschlag

Die verfügbaren Daten in der Region, die den Niederschlag betreffen, sind in Tabelle 6 dargestellt, aus welcher hervorgeht, dass die jährliche Niederschlagsmenge nicht über 100 mm steigt. Diese Menge verteilt sich wie folgt auf die Jahreszeiten:

- Herbst: 32,4 mm
- Winter: 33,0 mm
- Frühling: 28,4 mm
- Sommer: 1,8 mm

Tabelle 6. *Niederschlags Daten von Kebili (INM, 2000, S93).*

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
P (mm)	10,8	7,5	14,6	9,0	4,8	1,3	0,3	0,2	7,5	11,5	13,4	14,7	95,4
Tage m. N.	4	3	4	2	2	1	0	1	2	3	4	3	29

5.3.5 Evaporation

Die potentielle Evaporation in Kebili, aus einer Messreihe von monatlichen Mittelwerten von 30 Jahren, wurde auf Basis der Formel von Blaney-Criddle und von Piche bestimmt und ist im folgenden hygrothermischen Diagramm (Abb.11) dargestellt. Mit der ersteren lässt sich eine minimale Evaporation von 46,5 mm im Dezember und ein maximale Evaporation von 294,5 mm im Juli berechnen. Die Jahresgesamtevaporation beträgt 2.124,4 mm.

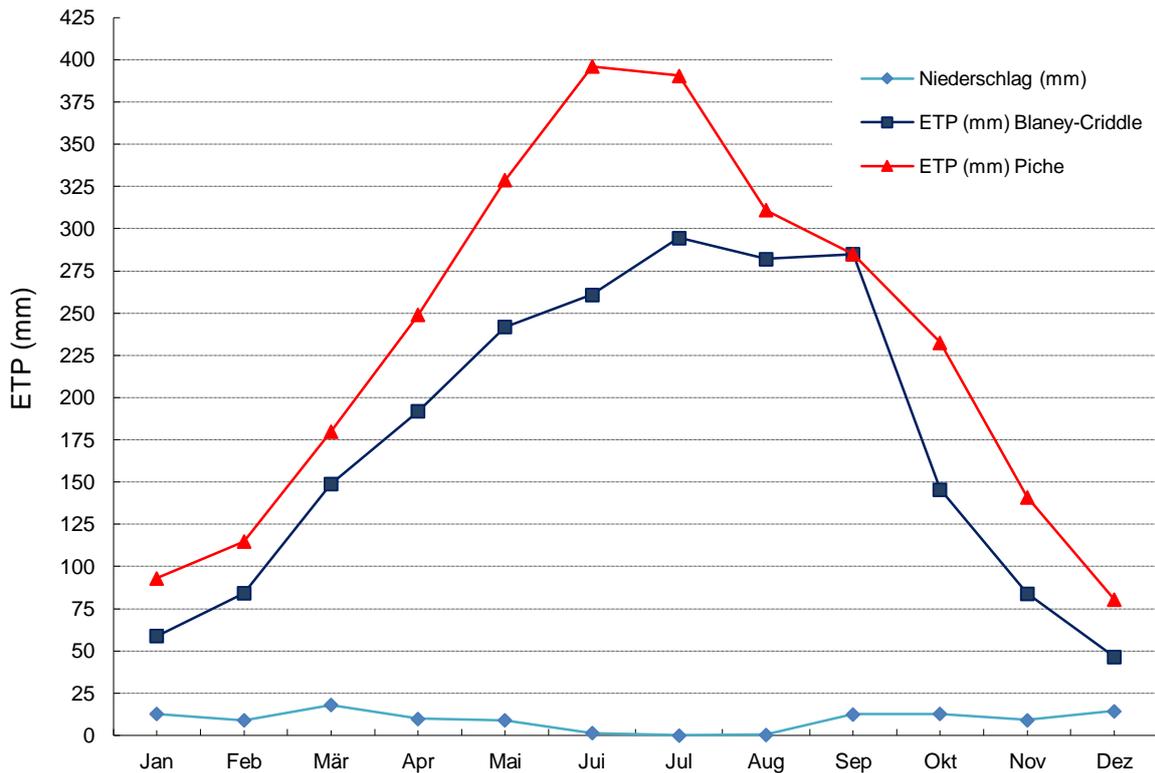


Abbildung 11. Jahresgang der Evaporation in Kebili (1961-1990). (Quelle: INM 2000, S. 103)

5.3.6 Luftfeuchte

Die Luftfeuchte und die Niederschläge im Herbst sind die Hauptklimafaktoren, welche die günstigen Bedingungen für die Produktion der Dattelpalme, insbesondere der Sorte *Deglet Nour*, schaffen. Die besten Datteln kommen in den Zonen vor, in denen die relative Luftfeuchte gering ist. Der mittlere Jahresfeuchtwert in *Kebili* liegt immer unter 50 % und schwankt im gesamten Jahresverlauf kaum. Die Dattelpalmen sind sehr feuchtigkeitsempfindlich (MUNIER, 1973; PEYRON, 2000; ABOU KHALED et al., 1981). Durch die niedrige Luftfeuchtigkeit hält das Befruchtungsverfahren sehr lang an und sie unterstützt die Austrocknung der Datteln im Reifestadium. Hohe Luftfeuchtigkeit führt im Gegensatz im Frühling und Herbst zum Auftreten von Fäulen der Blütenstände sowie der Datteln.

Daher werden die besten Datteln geerntet in den Regionen, in denen die Luftfeuchtigkeit relativ niedrig (40%) ist (BOUGUEDOURA, 1991).

5.3.7 Winde

Durch seine besondere Lage und die vorherrschende niedrige Vegetation im Schott *El Jerid*, ist die Region im gesamten Jahresverlauf Winden aus allen Richtungen ausgesetzt. Auf der Klimastation in *Kebili* wurden folgende Winde aus den unterschiedlichen Richtungen aufgezeichnet:

- trockene und kalte Winde, stark kontinental aus den Richtungen West-Nord-West und Süd-West kommend, von November bis April
- feuchte und milde ozeanische Winde von Mai bis Oktober
- Sirocco, trocken und heiß, von Süd-West. Diese Winde kommen etwa 30-35 Tage im Jahr mit folgender Verteilung im Jahresablauf vor:
 - Herbst: 5 Tage
 - Winter: 3 Tage
 - Frühling: 11 Tage
 - Sommer: 16 Tage

5.4 Böden des Untersuchungsgebietes

Die Schott-Zone bildet die Verbindung des Saharaseckels zu den nördlichen Ketten des Atlasgebirges (Abb. 12). Wie oben beschrieben bilden sich die Böden des Untersuchungsgebietes hauptsächlich aus fluvialen Sanden und Salzionen am Rande des Schotts (TABET, 1999; STUDI, 2000). Die Oasen befinden sich auf den zungenförmig abgelagerten fluvialen und äolisch umgelagerten Sanden, welche etwas erhöht zu den Schotts liegen. Sie besitzen eine sandige bis feinsandige Bodenart und einen hohen Gehalt an Gips. Diese Böden sind meistens mächtig, homogen und reich an Organik. Werden sie lange genutzt, entwickeln sie Oberflächenhorizonte, die im trockenen Zustand ein gutes lockeres Gefüge aufweisen. Bewässerungswasser kann hierin leicht versickern und trägt zur Ausbildung eines lokalen, oberflächennahen Grundwasserkörpers bei. Durch lateralen Grundwasserausgleich von den etwas erhöhten genutzten Rücken zu den randlichen, tiefer gelegenen Senken tritt dort der Grundwasserkörper bei intensiver Bewässerung oberflächlich aus. (siehe Abb. 13).

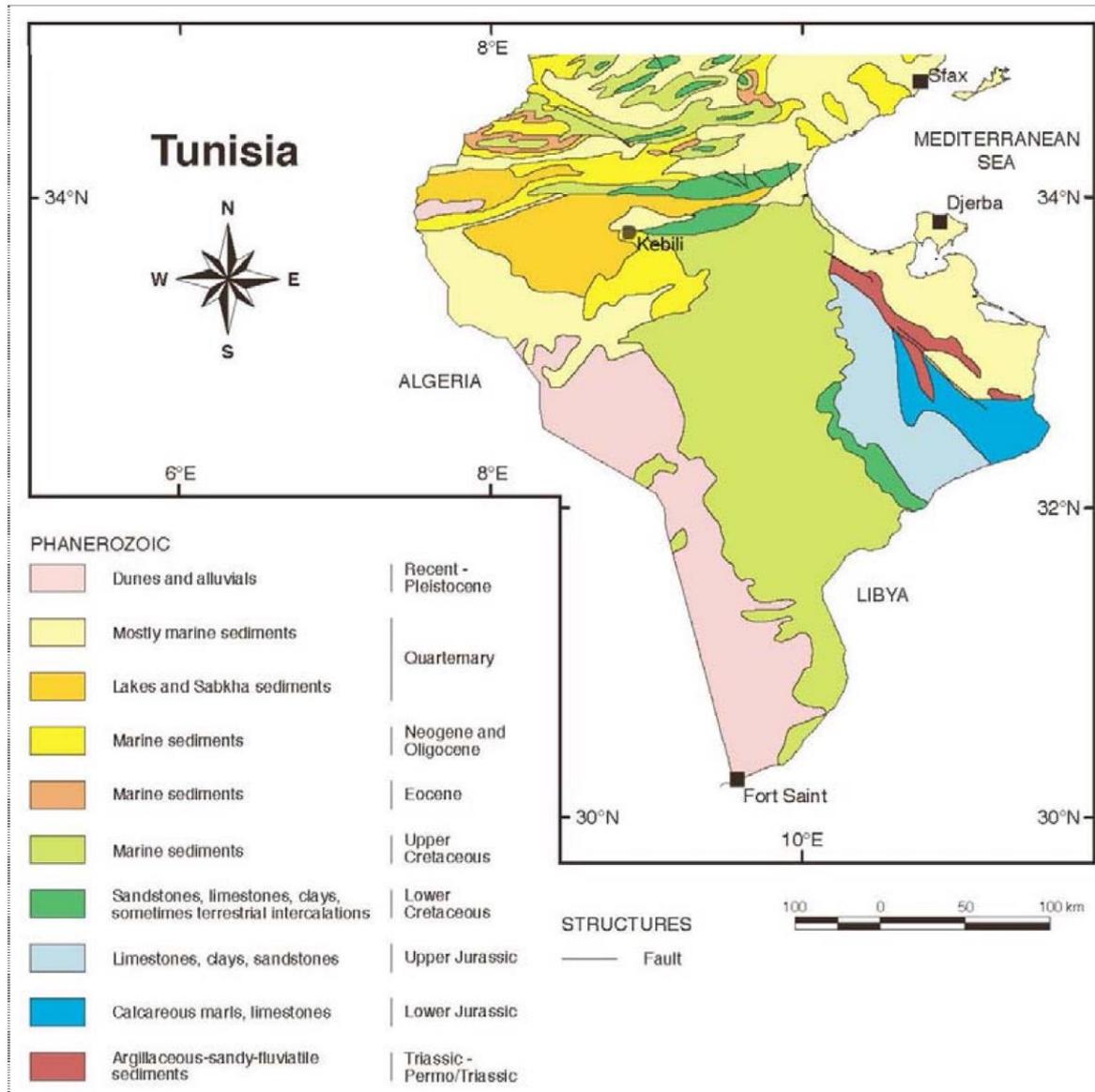


Abbildung 12. Geologische Karte von Südtunesien (SCHLÜTER, 2006)



Abbildung 13. Austritt des Grundwasserkörpers in einer Senke, Oase von Nefzaoua (Foto PRINZ)

Die ständige Zufuhr an Salzen in diese Seen führt zu einer irreversibel Schädigung der an die Oasen angrenzenden oder auch in den Senkenlagen der innerhalb der Oasen gelegenen Gebiete (Abb. 14).

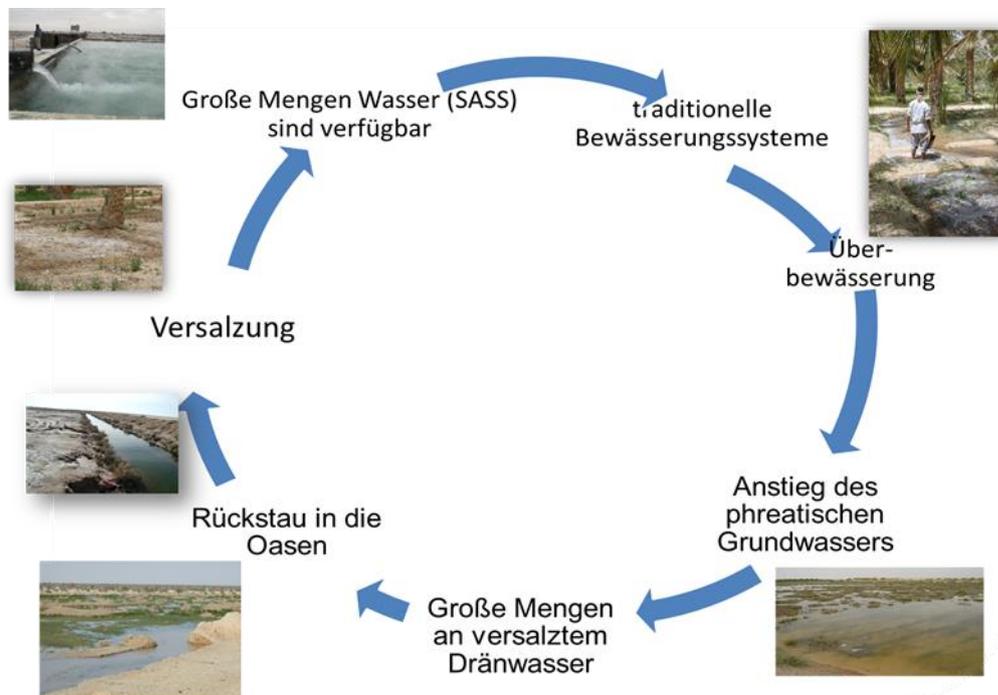


Abbildung 14. *Auswirkung des Grundwasser Nutzungszyklus auf die Nachhaltigkeit der Böden in den Oasen Kebili Südtunesiens.*

Diese Böden werden aufgrund des hohen Salzgehaltes nahezu steril. Bei späterer Absenkung des Grundwasserspiegels kann selbst halophytische Vegetation nur noch am Rande der Sebchas außerhalb der dann auftretenden Salzkrusten aufkommen (ZIDI et al., 1993; 1997; MTIMET, 2009). (Abb.15).

Ein weiterer Anstieg des Grundwasserspiegels bis auf 120 cm unter Geländeoberfläche, beschränkt auch die Produktivität der Dattelpalmen in den höher gelegenen Oasengebieten, da mehr als 70% der Wurzeln der Dattelpalmen bis in eine Tiefe von 120 cm reichen (GHAZOUANI, 2009; MUNIER, 1973; BAHRI, 1993, 2000; ABOU KHALED et al., 1981). Will man einen solchen Anstieg vermeiden, kann das nur über gute Drainage oder eine Begrenzung der Dauer der Bewässerung erreicht werden (GALLALI, 1980; THABET, 1999). Eine Einschränkung der Bewässerung führt aber wieder zu erhöhter Salzanreicherung im Boden, eine gute Drainage vergrößert die salzreichen Flächen in den Senken (AYARS et al., 1999).



Abbildung 15. Böden mit Salzkruste am Rande der Sebchas mit halophytischer Vegetation
(Foto OMRANI)

5.4.1 Bodentypen der Region

Die meisten Böden der Region sind schwach entwickelt, vernässt und meistens mit Kalzium und Magnesium angereichert. Der Salzgehalt wird in diesem Klassifikationssystem, was in Süd-Tunesien und insbesondere für die Böden der Oasen gilt, zur Differenzierung nicht berücksichtigt (STUDI, 2000).

5.4.1.1 Mineralische Rohböden

5.4.1.1.1 äolischen Ursprungs

Es handelt sich um Böden auf aktiven Sanddünen mit Gipsbändern, die vereinzelt am Rand von Oasen oder auf Dünenketten vorkommen, welche in Richtung der Achsen Nord-Ost und Süd-West ausgerichtet sind.

5.4.1.1.2 Lithosol

Es handelt sich um Böden mit Gipskrusten aus ehemaligen oberflächlichen Wasserkörpern des mittleren Quartärs, welche auf Gipssanden liegen.

5.4.1.2 schwach entwickelte Böden

5.4.1.2.1 schwach entwickelte, tiefgründige Böden

Trotz der zeitweise auftretenden Überstauung mit salzhaltigen Wässern und des damit verbundenen erhöhten Salzgehaltes im Oberboden haben diese Böden eine relativ mächtige Entwicklungstiefe (mehr als 80 cm), ohne gravierende Beeinträchtigung für die landwirtschaftliche Nutzung. Sie sind auf Standorten anzutreffen, die schon lange landwirtschaftlich genutzt und tiefgreifend bearbeitet wurden. Die anthropogene Veränderung ist durch Einebnung von flachen Dünen und damit verbundenem Eintrag von organischem Material eingetreten. Dadurch kommt es zu einer Durchmischung und Einmischung der oberen Anreicherungshorizonte über das gesamte Profil. Dieser Bodentyp ist häufig am Rande der landwirtschaftlich genutzten fluvialen Sandrücken im Übergang in die tonigeren Senken zu finden.

5.4.1.2.2 schwach entwickelte, vernässte Böden, Pseudogley

Der typische, den Pseudogley kennzeichnende wasserstauende Sd-Horizont ist meist in einer Tiefe von 80-120 cm ausgebildet. Fehlende Entwässerung und die tonige Bodenart des Bodens sind der Hauptgrund für sein Entstehen. Durch besseres Eindringen von Bodenluft entlang der Wurzelbahnen oxidiert das Eisen entlang dieser und zeichnet die Wurzelräume mit Eisenoxid- oder Eisenhydroxid-Cutanen nach. Da diese Wurzelröhren auch die Sickerwasserbahnen darstellen, sind diese hydromorph geprägten Horizonte auch durch höhere Salzgehalte gekennzeichnet. Dieser Bodentyp ist im direkten Übergang zu den tonreicheren Senken anzutreffen. Diese ehemaligen Anbauböden sind folgendermaßen charakterisiert:

- das Vorhandensein von Gipsbändern und -knollen
- ein relativ hoher Organikgehalt (0,5-1 %)
- eine erhebliche Makroporosität des Bodens (durch Wurzeln)
- das Vorhandensein von pseudovergleyten Horizonten in größerer Tiefe.

5.4.1.2.3 schwach entwickelte, anthropogene Böden

Sie zeichnen sich durch eine Kombination von fossilen Gipskrusten an der Oberfläche und an Pflanzenresten im darunter liegenden Horizont (allgemein: Gipssand) aus. Bei Bearbeitung und anderweitiger Aufwertung sind diese Böden gut für die Bepflanzung von Kulturpflanzen in den Oasen geeignet.

5.4.1.3 Hydromorphe Böden

5.4.1.3.1 Gley

In den Gleyen kann das Grundwasser im Winter ausreichend lange in Oberflächennähe bleiben, um unter anaeroben Bedingungen eine Reduktion des Eisens und des Magnesiums zu bewirken. Im Sommer bilden sich dann im Bereich der Wasserspiegelabsenkung durch Oxidation unter aeroben Bedingungen Rostflecken. Der von der Grundwasserschwankung beeinflusste Horizont ist deshalb durch hohe Flächenanteile von Rostflecken und Bleichungen charakterisiert.

5.4.1.4 Remobilisierung von Gips (Gipsknollen und -bänder)

Aufgrund der Anreicherung und der Remobilisierung von Gips können drei Bodentypen unterschieden werden. Diese Böden sind oft über das gesamte Profil hinweg salzig. Nach der Bewässerung oder durch starken Regen wird die Konzentration der leichtlöslichen Salze in der Bodenlösung verringert und nach unten abgeführt, während der schlechter lösliche Gips erneut im oberen Profilabschnitt ausfällt. In diesem Fall befindet sich der Gips in Form von Nadeln, Knollen und Bändern in den Horizonten unter der Oberfläche. Es fehlt eine Gipskruste an der Oberfläche.

5.4.1.5 Gipsverkrustung der Oberfläche

Die Verkrustung an der Oberfläche unterscheidet sich von einer Kruste durch die weichere Konsistenz und die geringere Dichte. Außerdem bleibt sie durchwurzelbar. Nach Komprimierung kann diese Verkrustung der Oberfläche die Zirkulation des Wassers und das Wurzelwachstum beeinträchtigen.

5.4.1.6 Oberflächliche Gipskruste

Im Allgemeinen sind die vorhandenen Formen in der Umgebung der Oasen häufiger harte Krusten der Oberfläche, welche nicht durchwurzelbar sind.

5.4.1.7 *Calciisol*

Diese Böden sind nur von begrenzter Verbreitung. Sie bestehen aus einem ausgebleichten grauen Horizont, der reich an diffus verteiltem Gips ist, welcher an mit Gips angereichertem Sand haftet.

5.4.1.8 *Physisch-chemische Charakteristika*

Wie schon beschrieben besitzen die Böden der landwirtschaftlich genutzten Flächen meist eine sandige Bodenart in den oberen Horizonten, die sich nach unten zu tonigen Bodenarten ändern kann.

Aufgrund der Bodenart des Bodens, dem geringen Gehalt an Organik, der Art und der Häufigkeit der Bewässerung und der Bearbeitung des Bodens, ist die Struktur oft variabel und instabil. Die Feldkapazität und die nutzbare Feldkapazität sind sehr gering. Während langer Zeiträume liegt ein Wasserdefizit vor.

Generell sind der Salzgehalt und der pH-Wert erhöht. Der Salzgehalt, welcher sich bereits an der Oberfläche des Bodens in niedrigen Zonen (Effloreszenz) niederschlägt, kann sehr hohe Werte erreichen, aber dies ist nur zeitlich begrenzt und hängt von der Dränage, der Art und Weise der Bewässerung, dem Niederschlag und vielem mehr ab. Der pH-Wert ist in dieser Region immer über acht. Der Gehalt an organischem Material, welcher überall sehr gering ist, wird in einigen Parzellen durch die Zugabe von organischem Dünger (in Form von Asche) verbessert.

5.5 **Wasserressourcen in Kebili**

Man muss beachten, dass für die vier Regierungsbezirke im Süden, die Region Kebili eingeschlossen, das Grundwasserpotenzial nur etwa 747,6 Mm³/Jahr ist, also knapp 34% der gesamten Grundwasserressourcen von Tunesien (siehe Tab. 7). Dagegen umfasst die bewässerte Fläche in diesen Regionen nur 14% der gesamten bewässerten Fläche in Tunesien. Die Wasserressourcen der tiefen Aquifere in den vier Provinzen repräsentieren ca. 46% der gesamten Ressourcen der tiefen Aquifere des Landes. 63% dieser Ressourcen befinden sich im Djerid und der Nefzaoua. Die Mobilisierung dieser Wässer wird durch 1.012 Bohrungen, von denen 177 noch artesisch sind, durchgeführt.

Tabelle 7. Grundwasserressourcen in den Oasen Südtunesiens (Quelle: MEDD, 2010; S13).

	Wasserressourcen (Mm ³)			Anzahl der Bohrungen	
	Oberflächennahes	Tief	Sum	Oberflächennahes	Tief
	Grundw.	Grundw		Grundw.	Grundw
Kebili	5,5	238	243,5	175	260
Tozeur	33,6	174,4	208	1.851	205
Gabes	23,7	156,6	180,3	2.905	267
Gafsa	33,3	82,5	115,8	3.934	280
Insg Oasen	96,1	651,5	747,6	8.865	1012
Insg					
Tunesien	745,4	1421	2.166,4	94.691	5.855
%	13	46	34	9	17

Die Region Nefzaoua besitzt vorwiegend Grundwasservorkommen, welche nicht erneuerbar sind, da es sich um fossile Ressourcen handelt. Diese tiefen Aquifere sind grenzüberschreitend (siehe Abb. 16) und stammen aus dem 'Northern (North-Western) Sahara Aquifer System' (NSAS).

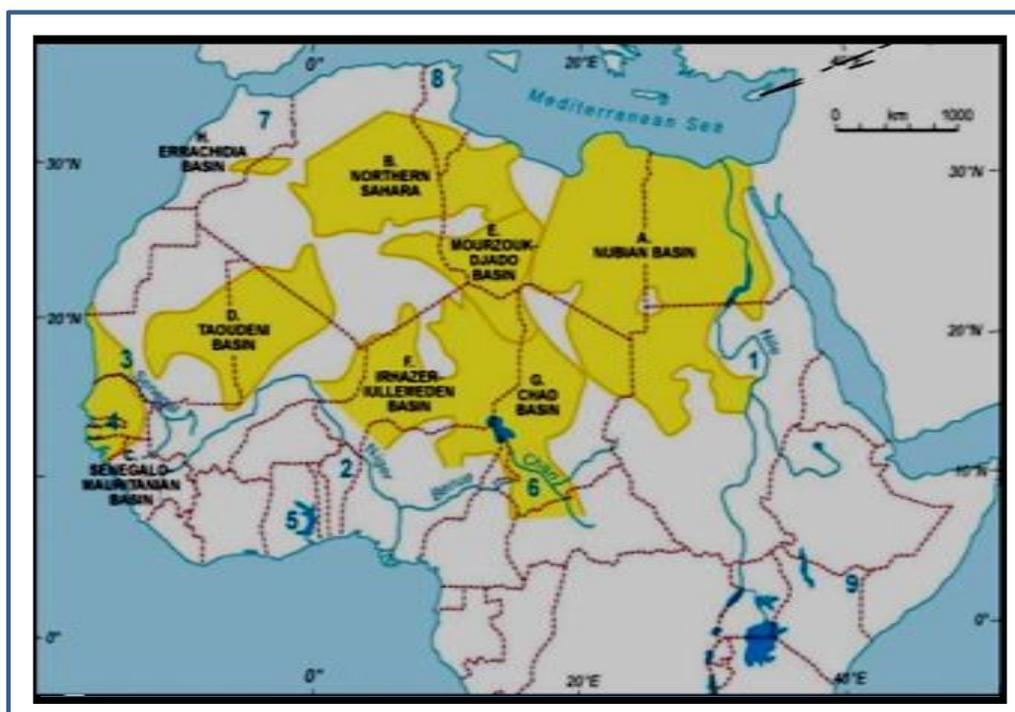


Abbildung 16. Fossiles GW führende Aquifere im nördlichen Afrika (PRINZ & LOEPER, 2008)

Kebili allein besitzt etwa 5,5 Mm³ Wasser, welche in 238 tiefen Grundwasserleitern und 175 Grundwasserkörpern gespeichert sind, die in 260 bzw. 175 Brunnen genutzt werden (Tab. 8). Zur Qualität der Ressourcen ist zu sagen, dass nur 8% der Ressource einen Salzgehalt unter 1,5 g/l haben, während mehr als 21% einen Salzgehalt über 5 g/l besitzen.

Tabelle 8. *Die Aquifere in der Oasen Region: Verfügbare Ressourcen und Verwendungstendenz 1995-2005 (MEDD, 2010; S. 14).*

	Reserve (Mm ³ /Jahr)	Nutzung in Mm ³ /Jahr		Nutzungsrate 2005 %	Anzahl GWS*	Salzgehalt (g/l)	
		1990	2005			Min	Max
Kebili	5,5	1,6	0,3	5	7	2	9
Tozeur	33,6	25,2	32,3	96	5	1	8
Gabes	23,7	19	28,3	119	7	1	8
Gafsa	33,3	25,6	34,3	103	13	1	14

- Grundwasserstockwerke

Die Sicherstellung des zum Anbau in den Oasen notwendigen Wassers erfolgte auch traditionell über die Nutzung der fossilen Grundwasserspeicher. Der jährliche Niederschlag des vollariden Gebietes reicht bei weitem hierzu nicht aus. Zugänglich waren die tieferen fossilen Grundwasservorkommen durch die Nutzung artesisch gespeister Quelltöpfe und Quelhügel in weiter von der Gebirgskette entfernten Oasen. An den Gebirgsrand bei Kebili angrenzend wurden Wasserstollen gegraben, in der Sahara Region *Foggara*, lokal „khraig“ genannt. Die Schüttungen der Quelltöpfe und –hügel reichten aber nur zur Bewässerung von Oasen geringer Ausdehnung. Eine Ausdehnung der Nutzflächen konnte erst durch die Entwicklung der Bohrtechnik und leistungsstarker Pumpen erfolgen. Die alten Stollen sind heute zerfallen, die artesischen Quellen wegen der Förderung durch Tiefbohrungen versiegt. (MENSCHING, 1979). Hinzu kommt der ständig steigende Salzgehalt aus dem tiefen Grundwasser, was unter anderem auf die grundlegende Umstrukturierung der hydrologischen Verhältnisse zurück zu führen ist. Zum einen infiltriert stark salzhaltiges Dränwasser in den Grundwasserkörper, dessen Wasserspiegel aufgrund der hohen Entnahmeraten stetig sinkt. Durch die daraus folgenden Druckveränderungen werden salzhaltige Wässer aus tieferen Lagen umgeschichtet und mobilisiert (LOEPER, 2008).

Auch Intrusionen des hypersalinen Wassers des Schott el Djerids in die Aquifere ist nicht auszuschließen. Das intensive Tempo der Entwicklung ist nicht ohne Auswirkungen auf die Verfügbarkeit von Wasser Ressourcen passiert (Teufelskreismodus). Die Übernutzung der Wasserressourcen bedroht die Nachhaltigkeit in den Oasen (Abb.17) da sich das

Grundwassergefälle, durch die starken Entnahmen, statt vom Grundwasser zum Schott nun umgekehrt hat (SIEGFRIED, 2003).

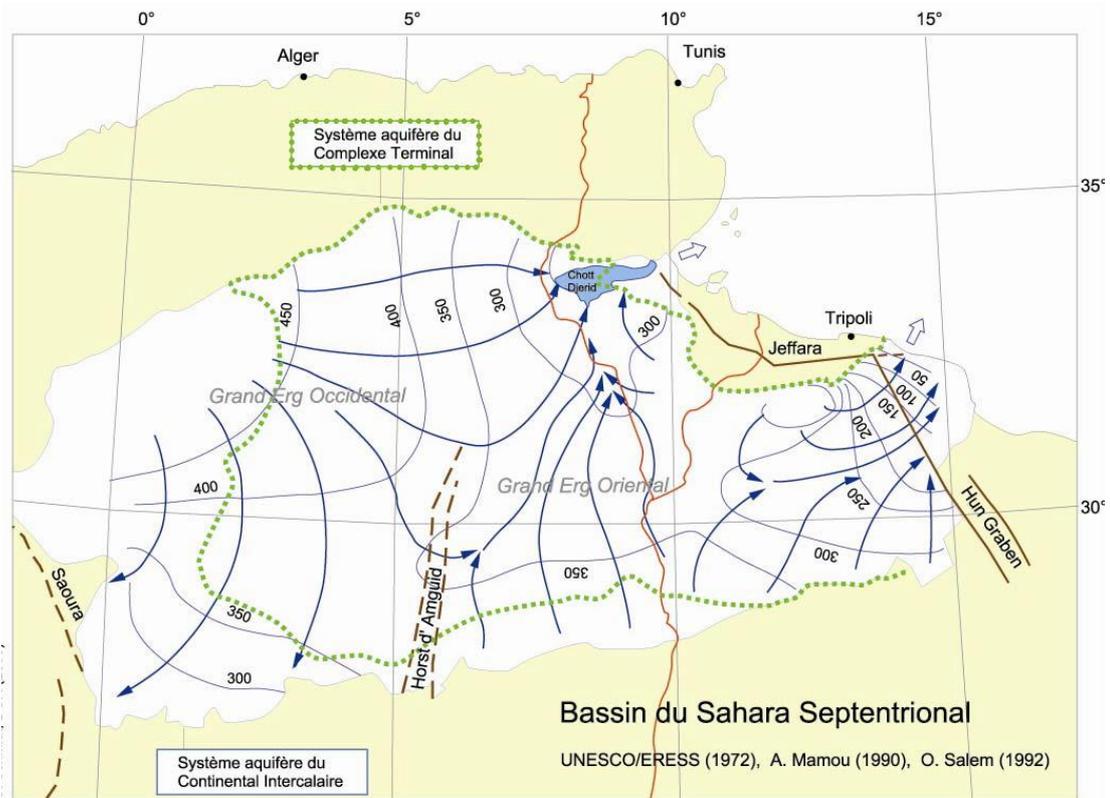


Abbildung 17. Das Aquifersystem des Continental Intercalaire und Complex Terminal (Quelle. LOEPER, 2008, S.13, bearbeitet nach OSS, 2000)

Die hydrogeologischen Studien, welche im Regierungsbezirk *Kebili* stattfanden, haben gezeigt, dass es zwei wichtige Grundwasservorkommen gibt: die des „Complexe Terminal“ (CT) und des „Continental Intercalaire“ (CI). Diese beiden Aquifere erstrecken sich über gesamt Südtunesien und in die Nachbarstaaten und sichern wesentliche nutzbare Ressourcen in *Nefzaoua* (Abb. 18). Die tatsächliche Nutzung der Ressourcen liegt bei 275 Millionen m³/Jahr, aus 240 tiefen Bohrungen und natürlichen Quellen (STUDI, 2000). Diese Wasserressourcen der beiden Grundwasserleiter der Region *Nefzaoua* werden wie nachfolgend beschrieben verwendet.

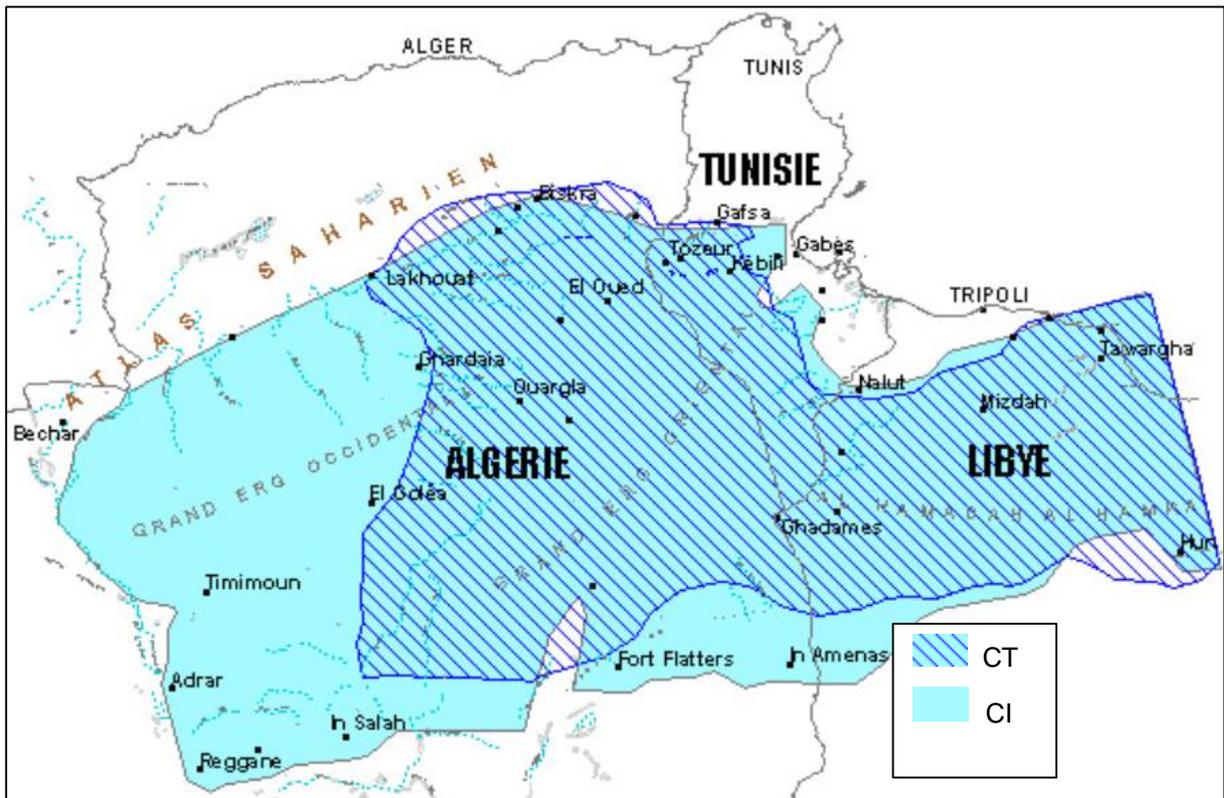


Abbildung 18. *Hauptaquifere des SASS „North-Western Sahara System“ (PUYOÛ, 2007)*

5.6 Der Aquifer „Complexe Terminal“

Dieser Aquifer soll den Großteil der Wasserressourcen der Region aufbringen. Die nutzbaren Ressourcen sind durch die Administration auf 204,95 Millionen m³/Jahr (4.500 l/s) in *Nefzaoua* und 102 Millionen m³/Jahr (2.000 l/s) in *Rjim Maatoug* festgelegt. Der Salzgehalt variiert von 1 bis 4 g/l. Der Grundwasserkörper ist in der Mitte des Beckens sehr artesisch und von erhöhter Temperatur. An den Rändern ist er im Allgemeinen sehr flach und normal temperiert. Die Erneuerung des Aquifers erfolgt durch Infiltration des Abflusses aus der Umgebung entlang der Wadis, welche von den Gebirgsmassiven heruntersommen, vor allem vom Saharaatlas und vom Atlas von Dahar, in geringem Umfang aus dem Tademait-Plateaus in Algerien oder in niederschlagsreichen Jahren durch Stauseen aus dem westlichen Großen Erg (UNESCO, 1972). Die Gesamtheit dieser Quellen liefert etwa 8,5 m³/s.

Die illegalen Bohrungen im „Complexe Terminal“ sind ein entscheidender Grund für die Übernutzung der Ressourcen. (ca. 96 Millionen m³/Jahr werden illegal gepumpt).

5.6.1 Hydrogeologie

Der „Complexe Terminal“ heißt deswegen so, weil er in verschiedenen geologischen Schichten ausgebildet ist, die in der Entstehung von der Oberkreide bis zum Mio-/Pliozän reichen und einen oft miteinander verbundenen Komplex bilden. Er erstreckt sich über die gesamte südliche Sahara auf einer Fläche von 350.000 km², von der sich nur ein kleiner Teil in Tunesien in *Jerid* und *Nefzaoua* befindet. In *Nefzaoua* sind in diesem Aquifer fünf geologische Schichten identifiziert und drei in *Jerid*.

In *Nefzaoua* ist der Grundwasserkörper gespeichert zwischen den Kalken der Oberkreide und den Sanden des Mio-/Pliozäns. Im *Jerid* befindet sich das Wasser in den Sanden des Miozäns. Die mittlere Tiefe des Grundwasserkörpers ist zwischen 100 und 300 m in *Nefzaoua* und 200 bis 600 m in *Jerid*. Die Hauptfließrichtung des Wassers ist von Süden nach Norden, übereinstimmend mit den Strömen in Richtung der Schotts *Melghir* in Algerien und *Jerid* in Tunesien (Abb. 17, S. 42). Im Norden des Schotts *Gharsa* richtet sich die Strömung entgegengesetzt von Nord nach Süd. Natürliche Austritte dieses Aquifers sind die zahlreichen artesischen Quellen und natürlichen Karstquellen an mehreren Stellen des Schotts *Jerid*. Der Salzgehalt bewegt sich um einen Mittelwert von 2,5 g/l in *Nefzaoua*. Er kann aber auch höhere Werte wie 4 g/l auf der Halbinsel *Kebili* und 8 g/l in *El Hamma* in *Jerid* annehmen.

Der Grundwasserkörper „Complexe Terminal“, von welchem die Oasen ihr Wasser erhalten, ist ausschließlich in den Sanden des *Pont* eingeschlossen. Dieses Wasser findet sich in verschiedenen Serien von Mittel- bis Feinsanden zwischen tonigen Schichten. Bei intensiver Wasserentnahme versanden die Bohrungen in diesen Mittel- und Feinsanden.

Die Hauptfließrichtung des Aquifers geht von Süden in Richtung Norden. Die Schotts *Jerid* und *El Gharsa* bilden hierbei die Hauptaushänge für das Wasser. Einer der Grundwasserströme versickert am Hangfuß des *Jbels Blimi, Alme* und *Zerfin* dort befindlichen Schlucklöchern (STUDI, 2000).

Im Rahmen der Studie über die Wasserressourcen der südlichen Sahara (ERESS, 1972) wurde zum ersten Mal eine hydrogeologische Bilanz dieses Grundwasserkörpers mit Hilfe einer Simulation erstellt. Das verwendete Modell diente der Realisation von vorhersagenden Simulationen für die Planung der Wassernutzung von 1971 bis 2010.

5.6.2 Chronologischer Überblick der Piezometrie des Aquifers „Complexe Terminal“

Seit 1970 hat das mittlere Niveau des Grundwasserkörpers drei wichtige Veränderungen mitgemacht, welche an die Art und den Rhythmus der Nutzung gekoppelt sind. Diese Veränderungen können wie folgt beschrieben werden:

5.6.2.1 Die Zeit vor 1987

Das Niveau des Aquifers scheint konstant, die jährliche Abnahme ist schwach, nur wenige Zentimeter pro Jahr. In dieser Epoche haben die Bohrungen begonnen, die traditionellen artesischen und natürlichen Wasserquellen der Oasen zu ersetzen. Außerdem wurden in dieser Epoche Oasenflächen merklich erweitert.

5.6.2.2 Die Zeit zwischen 1978 und 1984

In dieser Zeit verbreiteten sich Bohrungen und Pumpenanlagen für die neu gebildeten Oasen. Der Effekt der Wassernutzung zeigt sich nun deutlicher durch ein Absenken des Wasserspiegels, das Versiegen der artesischen Quellen wirkte sich auf die traditionellen Oasen aus.

5.6.2.3 Die Zeit nach 1984

Die Absenkung des Grundwasserspiegels wird deutlicher und die Wassernutzung des „Complexe Terminal“ ist nur kontrolliert möglich. Fast alle Quellen sind ausgetrocknet. Pumpenanlagen sind durchweg verbreitet, während artesische Brunnen sich nur an den Ufern der Schotts, in der Region Hezoua, die für seine starken artesischen Brunnen bekannt ist, halten.

5.6.3 Reserve des „Complexe Terminal“

Während des Aktualisierungsprojektes 1997 wurden die neuen Erhebungen von der „Leitung der Wasserressourcen“ (frz.: DIRECTION DES RESSOURCES EN EAU) mit dem Ziel durchgeführt, die piezometrische Karte zu analysieren. Diese Simulationen für das Jahr 1995 haben in Jérid neue Grundwasserstände zwischen 2 und 30 m und in Nefzaoua Stände zwischen 19 und 56 m ergeben.

Diese simulierte Absenkung des Grundwasserniveaus für den Zeitraum von 1995 bis 2010 ist in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9. Grundwasserspiegelsenkung der tiefen Aquifere in Südtunesien (Quelle: CRDAVON KEBILI; ANNUAIRE DES NAPPES PROFONDES, 2000).

Region	Absenkung (1995-2010) (m)	Absenkung (m/Jahr)
Nefzaoua	5 bis 11	1
Jerid	8 bis 12	0,7
Rjim Maatoug	12 bis 14	0,9

Die Piezometerhöhen, welche in den Bezirken der CRDA in den betroffenen Regionen ermittelt wurden, haben überall eine kontinuierliche Absenkung der Niveaus gezeigt, welche direkt von der Art und Weise der Nutzung abhängig ist. Genauso wie andere Aquifere, welche übernutzt werden, weist auch der Wasserstand des Aquifers „Complexe Terminal“ eine kontinuierliche Abnahme auf.

5.7 Der Aquifer „Continental Intercalaire“

Dieses Aquifer ist ein Reservoir, welches in detritischen Serien kontinentalen Ursprungs besteht, welche zwischen dem Ende der Jurazeit und dem Cenomanium abgelagert wurden. Dieses Aquifer, welches auch Aquifer von Albien (frz.: Nappe de l'Albien) genannt wird, dehnt sich in Tunesien, Algerien und Libyen auf eine Fläche über 600.000 km² aus (Abb. 18, S. 43), welches mehrere hundert Meter mächtig ist. Nach Norden hin dehnt es sich bis zur südlichsten Spitze des Saharaatlas von Béchar bis Gabès aus, im Süden bis zu der Verbindungslinie von Reggane bis Ain Aménas, im Westen bis zum Saoura Wadi, im Osten bis zu der Schichtstufe des Dahar und dem Rand der Südküste Tunesiens (ganz im Süden überschreitet das Aquifer die algerisch-libyische Grenze). Dieses Aquifer hat ein Volumen, das nicht mit seiner gegenwärtigen Speisung zu vergleichen ist.

Wie für terrestrische Sedimente typisch, zeigt es eine große Variabilität in der Lithologie und der Mächtigkeit seines Reservoirs und ist für Dahar, Jérid, Nefzaoua und die Antiklinale des Schotts Fejj im Westen von Gabes von besonderem Interesse. In der Mitte des Beckens liegt der Grundwasserkörper sehr tief, bis 2.800 m, und das Wasser kommt aus artesischen Quellen mit einer erhöhten Temperatur von 75° C. An den Rändern ist er relativ flach und von normaler Temperatur. Die Tiefe dieses Grundwasserkörpers variiert zwischen 80 m und 2.800 m, je nach

Geologie. Der Salzgehalt des Wassers variiert zwischen 2 und 4 g/l. Die nutzbaren Ressourcen dieses Grundwasserkörpers in den Ländern sind auf einen Wert von 4.000 l/s bilanziert. Für die Nutzung in den Regionen wurde der Wert auf 31 Millionen m³/a bzw. 1.000 l/s von den Behörden festgelegt.

In jedem Fall ist die Nutzung des Aquifers „Continental Intercalaire“ darauf angelegt, eine Unterstützung in Form von zusätzlichen Ressourcen zu sichern, um die Übernutzung dieses Grundwasserkörpers zu vermindern. Er sichert ebenfalls die Wasserbedürfnisse in der geothermischen Umgebung der Region.

Der Grundwasserkörper des „Continental Intercalaire“, bedeckt den Großteil der nördlichen Sahara. Er erstreckt sich über drei Länder: Tunesien, Algerien und Libyen. In Tunesien wird er von fünf Regierungsbezirken genutzt: Tozeur, Kébili, Gabès, Médenine und Tataouine.

Wie bereits am Namen „Continental Intercalaire“ abzulesen ist, welche sich auf die Stratigrafie des Aquifers bezieht, handelt es sich um eine kontinentale Zwischenschicht zwischen zwei Sedimentationsschichten. In Nefzaoua befinden sich die Wasservorkommen in Sandsteinschichten des Barremiums bis Berrasiums. Die Nutzung des „Continental Intercalaire“ wurde seit jeher als eine Unterstützung für die des „Complexe Terminals“ gesehen.

5.7.1 Chronologie des Aquifers „Continental Intercalaire“

Die Erkundungen zu diesem Aquifer in Jérid begannen erst 1981 mit Hilfe der *Mahassen*-Bohrung während sie in Nefzaoua bereits seit den Sechzigern bekannt war. Wasserförderung fand jedoch erst seit 1983 mittels tiefer Bohrlöcher statt.

Die Förderung in Nefzaoua ist von 398 l/s im Jahre 1981 auf 2.223 l/s im Jahr 1995 gestiegen. Die Anzahl der Bohrungen wurde von 36 im Jahr 1981 auf 118 erhöht und steigt bis heute weiter an. Gefördert werden hier also mehr als die vorgeschriebenen 1.000 l/s. Anhand dessen lässt sich auch die Trockenheit, die in dieser Region verbreitet ist und, in Folge dessen, die Absenkung des Grundwasserspiegels des „Complexe Terminal“ begründen.

5.7.2 Piezometrie des Aquifers „Continental Intercalaire“ in Nefzaoua

Vor 1983 fand die Wasserentnahme mittels Bohrungen, welche weniger als 1.500 m tief waren, statt (*Menchia*-Bohrloch von 1967). Der Grundwasserspiegel war anfangs bei 74 m, dann folgte eine Absenkung von 10 m/a in 11 Jahren. Nach 1983 wurden mehrere neue Bohrungen mit

verschiedenen Tiefen zwischen 1.800 und 2.600 m niedergebracht. Aus ihnen lässt sich schließen, dass die Piezometrie zwischen 20,8 und 217,45 m ist.

Das Grundwasserniveau in Nefzaoua ist im Allgemeinen wichtiger als das von Jérid, die Grundwasserabsenkung in diesen beiden Regionen variiert von einer Bohrung zur anderen. In Kébili beträgt sie zwischen 0,5 und 4 m/a. In einigen Bohrlöchern ist die Absenkung so hoch, dass man die Pumpen außer Betrieb nehmen musste. Im Aquifer bei Jérid variiert die gemessene Absenkung zwischen 6 und 18 m/a.

Die Wässer aus dem Aquifer „Continental intercallaire“ treten unter hohem Druck aus großer Tiefe aus und werden über Kühltürme herunter temperiert. In manchen Fällen kommt es aber zu Absenkungen und man ist gezwungen, das Wasser mit Pumpen zu fördern.

5.8 Der regionale obere Aquifer

Andere Grundwasservorkommen von geringerer Wichtigkeit wurden ebenfalls in der Region entdeckt. Der wichtigste von ihnen ist der oberflächennahe Aquifer oder „Oasenaquifer“, welches durch „return flow“ der Bewässerungswässer gespeist wird.

Die oberflächennahe Aquifere von Kébili sind hauptsächlich in den Oasen verortet und ihre Speisung ist ausschließlich durch den Überschuss von Bewässerungswasser gesichert. Die Salzgehalte, welche von der CRDA (*Commissariat Régional Développement Agricole*) in einer Vielzahl von Oasen gemessen wurden, bewegen sich zwischen 4 und 8,85 g/l im Winter und 4 bis 10,7 g/l im Sommer. Dieser Salzgehalt schwankt jedoch von Oase zu Oase.

6 Methodik

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise vorgestellt, welche sich hauptsächlich in zwei Teile einordnen lässt:

- Die Forschung zur Verbesserung der Bewässerungseffizienz der Parzellen.
- Die Forschung zum Einfluss der Faktoren Bewässerungsmenge und Bestockungsdichte auf die Produktion der Dattelpalme (quantitativ und qualitativ).

6.1 Bodenkundliche Untersuchung

Die bodenkundlichen Untersuchungen gehen auf KADRI UND SARTORI (1988) zurück, deren angewendeten Methoden werden dort beschrieben und sind angelehnt an das Handbuch des US Soil Survey (USDA, 1951) und der Anleitung der FAO (1969). Es wurden 10 Profile im 100 m Raster über die Versuchsfläche Atillet angelegt und weitere 6, auf noch ungestörtem Gelände der Umgebung. Vom Autor wurden darüber hinaus der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit, die Rohdichte und der Bodenwassergehalt gemessen.

6.2 Alternative Bewässerungsverfahren

Die Forschung über die Effizienzsteigerung der Oberflächenbewässerung wurde auf einer Testparzelle in der Versuchsanlage des *Institut des Regions Arides* (IRA) in Atillet, Kébili durchgeführt. Es kamen unterschiedliche Systeme der Wasserzufuhr zu den Bewässerungsbecken um einzelne Palmen zum Einsatz. Es handelt sich also um einen Versuch im Freien, bei dem das Wasser durch betonierte Kanäle der Versuchsanlage zugeführt wurde. Der Wasserzufluss zu den Parzellen ist durch eine Verbindung zwischen den betonierten Kanälen und einem PVC-Leitungsrohr von 100 mm Durchmesser durch die Rohre erfolgt. Der Aufbau beinhaltet fünf alternative Bewässerungsmethoden, welche für die Dattelpalme der Sorte Deglet Nour getestet wurden. Er erstreckt sich auf einer Fläche von 282 m² und ist mit sieben Dattelpalmen bestockt (siehe Abb. 19).

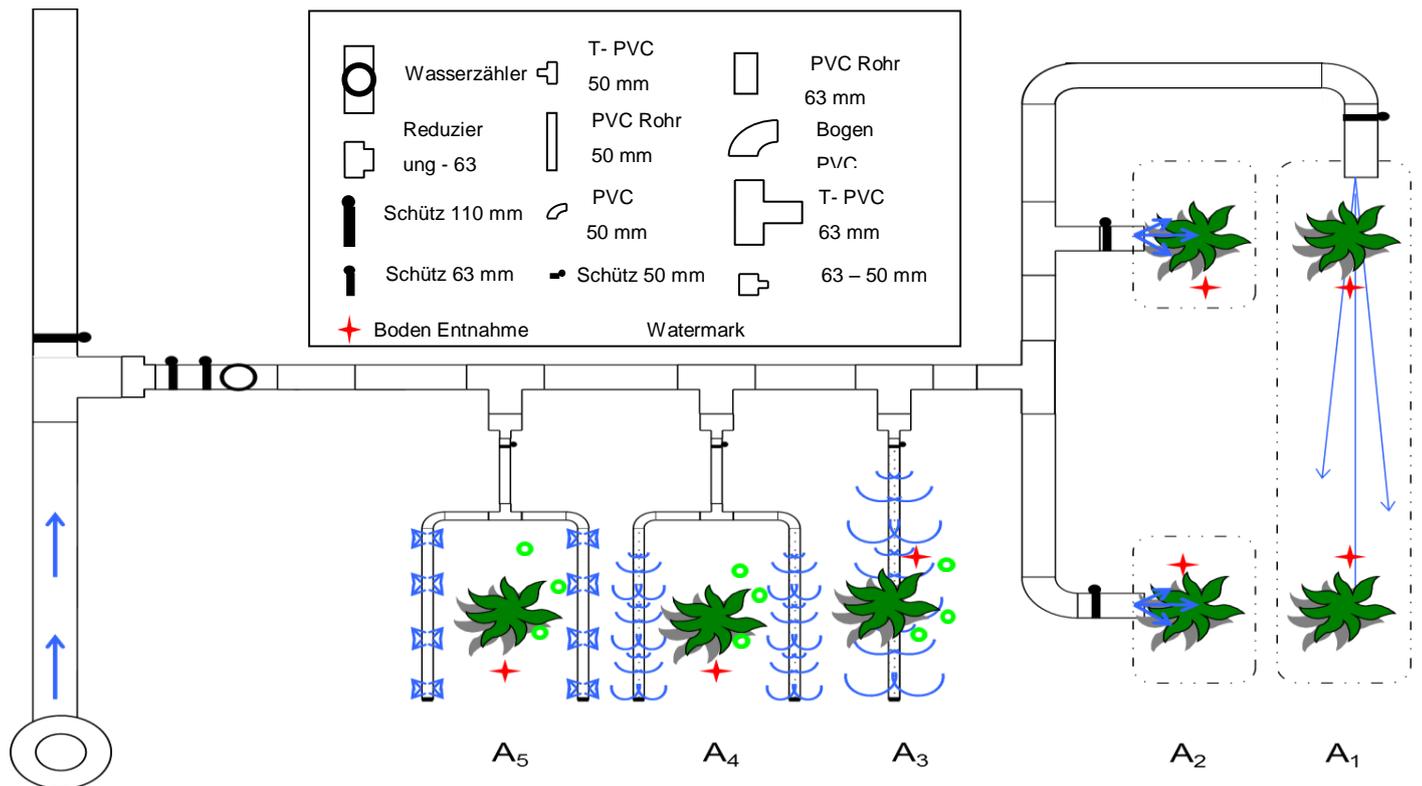


Abbildung 19. Versuchsaufbau für die Verbesserung der Bewässerungseffizienz der Parzellen

Bewässerungsbecken A₁ zeigt eine Parzelle von 48 m² mit zwei Palmen. Dieser Aufbau ist sehr häufig in den Parzellen der Oasen der Region im Falle einer traditionellen Bewässerung anzutreffen.

Bewässerungsbecken A₂ zeigt zwei unterschiedliche Bewässerungsbecken von je 16 m². Jedes Bewässerungsbecken ist mit einem 50 mm Leitungsrohr mit einer Absperrklappe in PVC ausgestattet.

Bewässerungsbecken A₃ simuliert die Bewässerung durch Beregnung (Sprinkler-System) mit einem 50 mm Leitungsrohr, welches an der Oberseite alle 14 cm durchlöchert ist. Die Löcher haben einen Durchmesser von je 2 mm. Die Löcher sind abwechselnd in den Winkeln 30°, 75° und 85° an den zwei oberen Seiten angebracht. Diese Vorrichtung wurde entworfen, um eine gleichförmige Bewässerung zu garantieren. Im Mittel liegt der Durchfluss bei 0,3 l/s bei einem Druck von 0,04 bar. Dabei hat der Wasserstrahl je nach Winkel von 30°, 75° und 80° eine Reichweite von 0,5; 0,3 und 0,1 m (Abb.20).

Bei dem Bewässerungsbecken A₄ erfolgt die Bewässerung über zwei perforierte Leitungsrohre (Durchmesser von 50 mm) mit einer Länge von 1,95 m, welche um die Dattelpalme gelegt werden. Das Schema der Löcher ist dasselbe wie bei Bewässerungsbecken A₃.

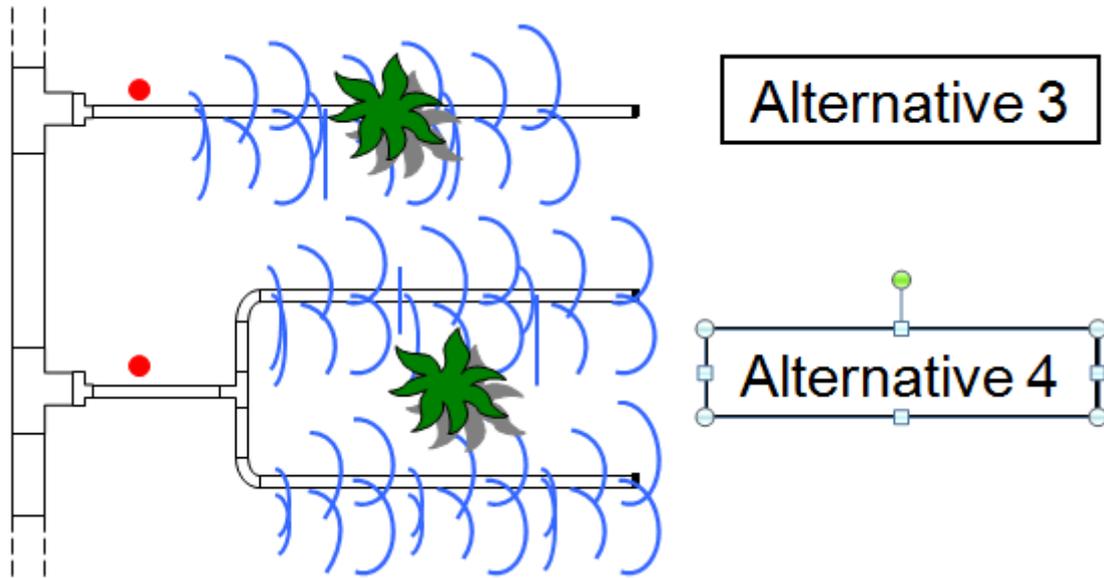


Abbildung 20. Wassersparende Bewässerungsalternativen A_3 und A_4

Das Bewässerungsbecken A_5 beinhaltet ebenfalls zwei Leitungsrohre mit 50 mm Durchmesser, die an der Unterseite alle 25 cm im Winkel von 150° abwechselnd auf der rechten und der linken Seite mit Löchern (Durchmesser 4 mm) versehen sind (der Winkel misst sich vom obersten Punkt des Rohres aus). Im Gegensatz zu den Bewässerungsbecken A_3 und A_4 , funktioniert diese Anordnung nicht als Beregnungssystem sondern leitet das Wasser direkt auf die Oberfläche des Bodens (Abb.21).

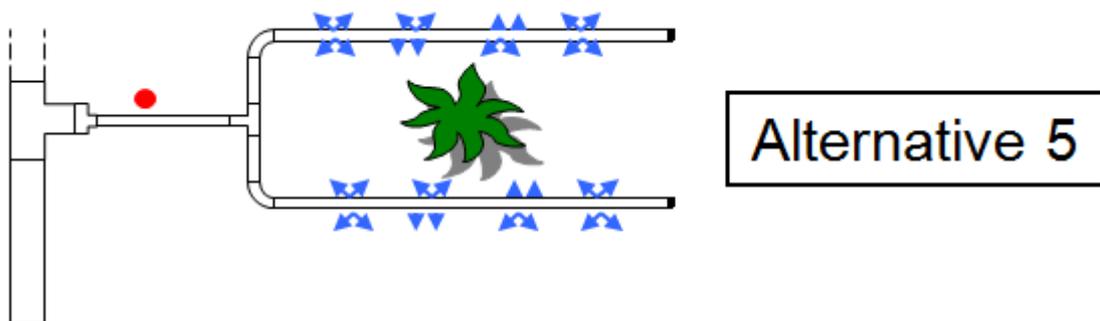


Abbildung 21. Wassersparende Bewässerungsalternative A_5

6.3 Messungen zum Bodenwasserhaushalt

Hierbei werden die Saugspannung des Wassers und die Wassergehalte im Boden bei den Dattelpalmen der verschiedenen Bewässerungsverfahren gemessen.

Die Untersuchung, Saugspannung, fand mittels Tensiometer statt, die in den Bewässerungsbecken A₃, A₄ und A₅ in 40, 80 und 120 cm Tiefe eingebracht waren (Abb. 22). Die Messungen erfolgten jeweils direkt vor der Bewässerung und 24 h und 72 h nach der Bewässerung.

Die Druckangabe der Saugspannung erfolgt laut Hersteller in centibar (cb). Zur Interpretation der Messwerte hat der Hersteller des Watermark Messsystems (EIJKELKAMP) Tabelle 10 beigefügt. Als weitere Interpretationshilfe der erhaltenen Werte der Saugspannungen wurden die Klassengrenzen der Herstellerangaben von cb in pF-Werte umgerechnet.

Tabelle 10. Angabe des Herstellers (Eijkelkamp) zur Interpretation der Saugspannungswerte

pF	Saugspannungswerte (cb)	Stand der Feuchtigkeit des Bodens
0 - 2	0 – 10	gesättigter Boden
2 - 2,4	10 – 20	Boden ist hinreichend feucht (außer grobe Sande, die bereits beginnen Wasser zu verlieren)
3,5 - 3,8	30 – 60	gewöhnlicher Bereich für Bewässerung (außer bei schweren Ton Böden)
3,8 - 4,0	60 – 100	gewöhnlicher Bereich für Bewässerung schwerer Ton Böden
4 - 4,3	100 – 200	zum Erreichen einer maximalen Produktion wird der Boden zu trocken. Vorsicht!

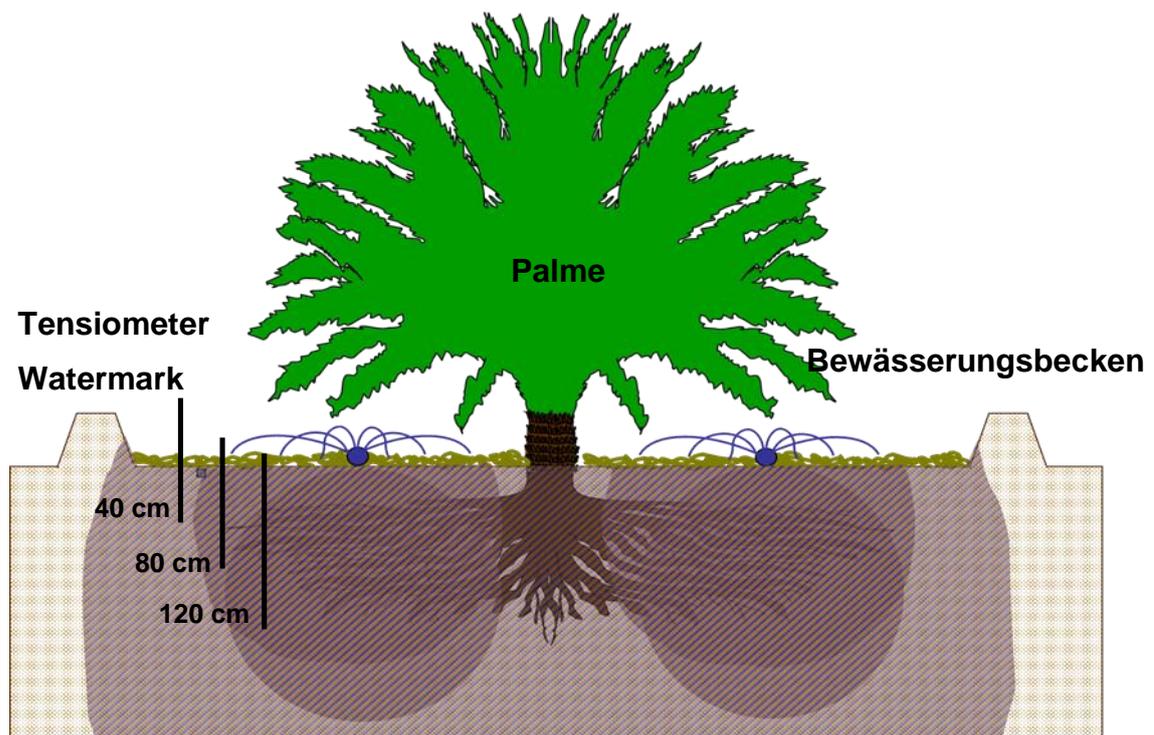


Abbildung 22. Bodenwasserhaushalt Untersuchung mit Tensiometer

6.3.1 Bestimmung des gravimetrischen Wassergehaltes

Die Untersuchung des hygrischen Profils in den Bewässerungsbecken fand jeweils direkt vor der Bewässerung sowie 24 h bzw. 72 h danach statt. Bis in eine Profiltiefe von 120 cm, was dem Aufbau der Oasenböden entspricht, wurden, mit Hilfe eines Lochbohrers alle 20 cm Proben genommen, um die Massen- und Volumenkonzentration zu bestimmen.

Die direkte Messung des Wassergehaltes der Bodenproben erfolgte durch Wiegen vor und nach der Trocknung. Die Trocknung geschah bei einer Temperatur unter 80° C, um aufgrund des hohen Gipsgehaltes der Böden das Austreiben von Kristallwasser zu vermeiden.

Die folgenden Formeln für die Bestimmung der Bodendichte, des volumetrischen Wassergehaltes, der Berechnung des Wassergehaltes pro m³ Boden sowie der pF-Werte Bestimmung wurden von MUSY UND SOUTTER (1991) übernommen.

Der Wassergehalt in % lässt sich also wie folgt ermitteln:

$$W = \frac{M_e}{M_s} = \frac{M_t - M_s}{M_s} \quad (1)$$

M_e : Wassermenge in der Probe.

M_s : Masse der Festfraktion M_s .

M_t : Gesamtmasse der Probe M_t

Die Bodenproben wurden in einer hermetisch abgeschlossenen Verpackung (Plastikbeutel) transportiert, um Wasserverluste durch Evaporation zu vermeiden.

6.3.2 Bestimmung der Dichte

Auf der Versuchsparzelle von Ailet wurde ein Bodenprofil von 1 m Länge, 1 m Breite und 1,2 m Tiefe gegraben. An der Profilwand erfolgte im Abstand von jeweils 20 cm eine Probennahme am ungestörten Boden. Die Dichte des Bodens im trockenen Zustand wird anhand der Masse des Bodens im trockenen Zustand (M_s) und des Gesamtvolumens der Probe (V_t) bestimmt.

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_t} \quad [\text{Kg/m}^3] \quad (2)$$

ρ_d : Bodendichte

M_s : Masse des Bodens im trockenen Zustand

V_t : Gesamtvolumens der Probe

Die für die Probennahme verwendeten Zylinder haben ein Referenzvolumen von 100 cm³. Die Dichte eines trockenen Bodens ist daher geringer als seine eigentliche Dichte, da die Festmasse in Bezug zum tatsächlichen Volumen gesetzt wird und nicht zum Volumen des Bodens im trockenen Zustand.

Die durchschnittlichen Dichten verschiedener Bodenarten sind wie folgt (MUSY UND SOUTTER, 1991):

- sandige Böden: 1.400 bis 1.700 [kg/m³]
- tonige Böden: 1.000 bis 1.500 [kg/m³]
- moorige Böden: 300 bis 1.000 [kg/m³]
-

6.3.3 Bestimmung des volumetrischen Wassergehaltes

Der Volumenanteil an Wasser wird wie folgt berechnet:

$$\mathcal{G} = \frac{V_e}{V_t} = \frac{\rho_d}{\rho_e} \cdot W \quad (3)$$

V_e : Wasservolumen; V_t : gesamtes Volume

ρ_e : Dichte des Wassers; ρ_d Bodendichte

W : gravimetrischer Wassergehalt in %

Die Proben wurden im Ofen für 24 h bei einer Temperatur unter 80° C getrocknet, um auf Grund des hohen Gipsgehaltes der Böden das Austreiben von Kristallwasser zu vermeiden.

6.3.4 Berechnung des Wassergehaltes pro m³ Boden

Der Wassergehalt bis zu einer Tiefe Z, welcher im Boden gespeichert ist, wird nach folgender Beziehung geschätzt:

$$S(t) = \int_0^Z \vartheta(z, t) dz \quad (4)$$

Betrachtet man die Feuchtemessungen mit konstanten Abständen Z, kann der Wassergehalt durch die Trapezregel berechnet werden.

$$S(t) = \frac{\Delta z}{2} (\vartheta_0 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \vartheta_i + \vartheta_n) \quad (5)$$

Dabei ist ϑ_i der Wassergehalt der Schicht $z_i = i \cdot \Delta z$.

ϑ ist der volumetrische Wassergehalt in %

Auf Grund der Schwierigkeit, den Wassergehalt an der Oberfläche zu messen, nimmt man im Allgemeinen an, dass dieser gleich der ersten Schicht ϑ_1 ist.

6.3.5 Messung der Bewässerungsmenge

Vor der Erläuterung zur Bestimmung der Bewässerungsmenge müssen einige theoretische Anmerkungen, welche sich auf den energetischen Zustand des Wassers im Boden beziehen, gemacht werden.

Die Dynamik der flüssigen Phase im Boden kommt durch das Zusammenspiel verschiedener Kräfte, welcher sie ausgesetzt ist zustande: Gravitationskraft, Kapillarkraft, Adsorptionskraft, etc. Daher spricht man von Gravitationswasser, wenn die Bewegung des Wassers von der Gravitationskraft maßgeblich beeinflusst wird, von Kapillarwasser, wenn der Effekt der Kapillarkräfte hinzukommt oder aber von Adsorptionswasser bzw. hygroskopisches Wasser, wenn die anderen Kräfte erschöpft sind.

6.4 Ermittlung der Bodenwassergehalte

6.4.1 Feldkapazität (FK)

Die Feldkapazität gibt den Wassergehalt des Bodens an, der gegen die Gravitationskraft im Boden gehalten wird. Er stellt sich im Boden ein, wenn das gesamte Sickerwasser nach unten abgeflossen ist. Das ist meistens etwa zwei oder drei Tage nach der Sättigung des Bodens durch Regen oder Bewässerung der Fall. Nach Definition wird für die dafür notwendige Saugspannung ein pF-Wert von 1,8 bis 2,4 angenommen, Wasser, das mit Saugspannungen oberhalb dieses Wertes gebunden ist verbleibt im Boden.

6.4.2 Permanenter Welkepunkt (PWP)

Dieser Wert beschreibt den Wassergehalt im Boden, der mit einer solch hohen Saugspannung an die Bodenmatrix gebunden ist, dass Pflanzen dieses Wasser nicht mehr mobilisieren können. Als Referenz zur Definition des Grenzwertes wurden Sonnenblumen herangezogen, bei denen folgender Mittelwert gemessen wurde:

$$h = -160 \text{ m} \quad \Leftrightarrow \quad \psi = 16 \text{ bar} \quad \Leftrightarrow \quad \text{pF} = 4,2 \quad (6)$$

6.4.3 Nutzbare Feldkapazität

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) gibt die Wassermenge im Boden an, die für die Pflanzen verfügbar im Boden gegen die Gravitationskraft gehalten werden kann und berechnet sich aus:

$$\text{Wassermenge nFK} = \text{Wassermenge FK} - \text{Wassermenge PWP}$$

6.4.4 Messung des pF-Wertes

Nach den Probenahmen mit dem Bohrer wurden die gestörten Bodenproben in die Labore der *Direction des Sols* in Gabès und zum *Institut des Régions Arides de Médinine* gebracht.

Zur Ermittlung der pF-Werte wird das Wasser mittels Überdruck aus den Proben gepresst, die sich in einem Druckgefäß auf wasserdurchlässigen aber luftdichten Keramikplatten befinden (Abb. 23).

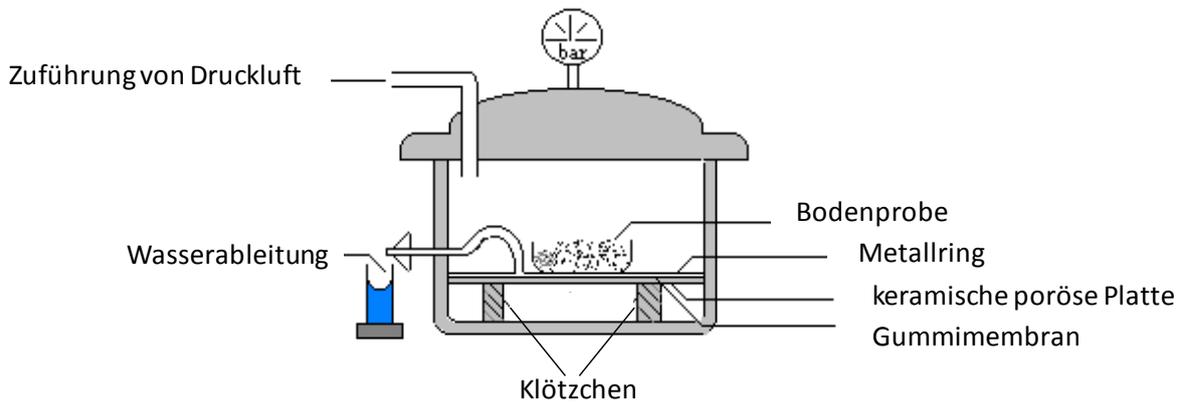


Abbildung 23. Drucktopf für die Bestimmung der pF-Werte

Eingestellt wurden für die Feldkapazität 0,1 bar, für den permanenten Welkepunkt 15 bar. Die Proben verbleiben unter gleichbleibendem Druck, bis alles Wasser mit geringerer Saugspannung aus der Probe ausgetrieben wurde. Die Probe wird dann aus dem Topf genommen und der Wassergehalt wird durch die üblichen gravimetrischen Methoden bestimmt (doppeltes Wiegen). Die Gewichtsdiﬀerenz zur getrockneten Probe ergibt die entsprechenden Wassergehalte (RICHARDS, 1954).

6.5 Praktische Konsequenzen

Die sehr hohen Gehalte freien Wassers können also durch eine Skala steigender Wassergehalte repräsentiert werden, wie in der folgenden Abbildung 25 zu sehen:

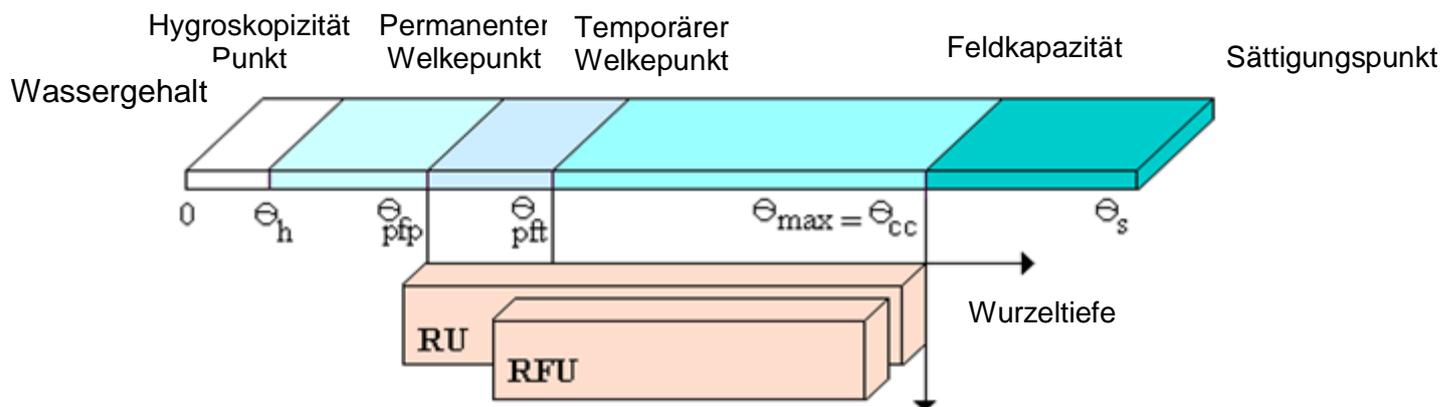


Abbildung 24. Darstellung der wichtigen Feuchtigkeitswerte des Bodens (MUSY UND SOUTTER, 1991)

RU (Reserve Utile) entspricht hier der nFK; RFU (Reserve Facilement Utilisable) leicht nutzbare nFK entspricht 50-60 % der nFK

Die Bestimmung der Variablen Feldkapazität (FK) und permanenter Welkepunkt (PWP) sind also unbedingt notwendig um die Wassermenge zu bestimmen, die den Pflanzen über längere Zeiträume zur Verfügung gestellt werden kann. Wird über diesen Bedarf bewässert, versickert das Wasser aus dem Wurzelraum in den Untergrund. Dies wäre bei Drainage zur Salzausspülung notwendig. Wird weniger als die nutzbare Feldkapazität erlaubt bewässert, können die Pflanzen nicht über das maximal im Boden speicherbare Wasser verfügen, es wäre also eine häufigere Bewässerung notwendig. Da die Feldkapazität den maximalen Wassergehalt darstellt, bei dem das Wasser von der Gravitation beeinflusst wird, bedeutet sie ebenfalls die obere Grenze für die Bewässerung und die untere Grenze des Wassers, was durch Drainage entfernt werden kann (MERMOUR, 1989).

Die Evaporation und die Wasseraufnahme durch Wurzeln können den Wassergehalt bis zum permanenten Welkepunkt reduzieren, wobei bei letzterem die Schäden irreversibel sind. Die Häufigkeit und die Menge der Bewässerung sind also durch den permanenten Welkepunkt und durch die Feldkapazität begrenzt.

Die nutzbare Reserve (RU) in einem Bodenprofil ist wie folgt definiert:

$$RU = \sum_0^Z (\vartheta_{\max} - \vartheta_{pfp}) dz = (\vartheta_{\max} - \vartheta_{pft}) \cdot Z \quad [m] \quad (7)$$

Dabei ist Z die Mächtigkeit des durchwurzelten Bereichs in Metern. Die leicht nutzbare Reserve (RFU) ist folgendermaßen definiert:

$$RFU = \int_0^Z (\vartheta_{\max} - \vartheta_{pft}) \cdot dz = (\vartheta_{\max} - \vartheta_{pft}) \cdot Z \quad [m] \quad (8)$$

Zu gegebenem Zeitpunkt kann die leicht verfügbare Wasserreserve R vom hydrischen Profil abgezogen werden, auf Grund der folgenden Beziehung:

$$R = \int_0^Z [\vartheta(z) - \vartheta_{pft}] \cdot dz = \int_0^Z \vartheta(z) \cdot dz - \vartheta_{pft} \cdot Z \quad [m] \quad (9)$$

Der Vergleich der potenziellen Wasserbedürfnisse der Pflanze, welche in m/Tag ausgedrückt werden, und der maximalen Wasserreserve des Bodens erlaubt eine Abschätzung der Menge und Häufigkeit der Bewässerungen.

Diese beiden Bezugswerte definieren vollständig die Wasserreserven des Bodens, welche für die Pflanze verfügbar sind. Bei einer exzessiven Bewässerung geht die Quantität $(\vartheta_s - \vartheta_{\max}) \cdot z$ verloren. In der Praxis werden die folgenden empirischen Beziehungen häufig verwendet (KRAMER, 1980).

$$\vartheta_{fp} \approx \frac{1}{2} \vartheta_{\max} \quad \text{und} \quad \vartheta_{ft} \approx \frac{2}{3} \vartheta_{\max} \quad (10)$$

$$RU \approx \frac{1}{2} \vartheta_{\max}^* z \quad \text{und} \quad RFU \approx \frac{2}{3} RU \approx \frac{1}{3} \vartheta_{\max}^* z \quad (11)$$

Die Wassergehalte über einem Profil von 120 cm, wurden vor der Bewässerung, 24h und 72 h danach gemessen. Aus diesen Werten kann man die verfügbare Wasserreserve (*Reserve Disponible*) an diesen drei Messpunkten wie folgt ermitteln (TRON, G ; ISBÉRIE, C. & CHOL, P. 2013, S.45):

Pflanzenverfügbares Wasser zum Zeitpunkt t (R_d) in einem Horizont der Mächtigkeit z berechnet sich aus:

$$R_d = (\theta_t - \theta_{pwp}) \cdot z \cdot 0,1 \quad [\text{mm}] \quad \text{oder} \quad R_d = (W_t - W_{pwp}) \cdot \rho_d \cdot z \cdot 0,1 \quad (12)$$

θ_t : Volumetrischer Wassergehalt an einem Messzeitpunkt t

θ_{pwp} : Volumetrischer Wassergehalt am Permanenten Welkepunkt (PWP)

z : Horizontmächtigkeit (cm)

W_t : gravimetrischer Wassergehalt an einem Messzeitpunkt t

W_{pwp} : gravimetrischer Wassergehalt am permanenten Welkepunkt

ρ_d : Bodendichte

Pflanzenverfügbares Wasser zum Zeitpunkt t (R_d) in einem Bodenprofil berechnet sich aus der Summe der R_d der Einzelhorizonte.

Ein Beispiel einer Berechnung der verfügbaren Wasserreserve im Boden 72 St nach Bewässerung mit Bewässerungsalternative A_{2b} (Messdatum 30.06.2008) ist in Tabelle 11 durchgeführt.

Tabelle 11. Verfügbare Bodenwasserreserve in einem Profil von 120 cm.

Probe	Entnahmetiefe Tiefe (cm)	Horizont- mächtigkeit	θ_{pwp}	θ_t (%)	$\theta(t) - \theta_{pwp}$	Rd [mm]
A _{2b}	20	20	12,9	15,2	2,4	4,8
	40	20	11,1	11,1	0,0	0,0
	60	20	11,8	14,2	2,4	4,8
	80	20	8,9	16,2	7,3	14,6
	100	20	7,8	13,2	5,3	10,6
	120	20	7,4	12,1	4,7	9,4
Verfügbare Reserve Rd (mm)						44,2

6.6 Bestimmung des pH-Wertes und Leitfähigkeit

Die Messungen wurden im Labor des *Instituts des Regions Arides (IRA)* in *Kebili* durchgeführt. Die Proben wurden 24 Stunden bei 65 °C im Ofengetrocknet und die Fraktion kleiner 2 mm abgesiebt. Die Proben werden durch Zugabe von destilliertem Wasser zu einer gut gesättigten Paste gerührt und 2 Stunden stehen gelassen. Das überschüssige Wasser wird abgesaugt, in einer Ampulle ruhen gelassen und dann dekantiert. In der derart aufbereiteten Flüssigkeit werden der pH Wert und die elektrische Leitfähigkeit gemessen. Beide werden zeitgleich mit den Geräten WTW inoLab Cond Level 1 und der pH-Meter WTW inoLab pH Level1 gemessen.

6.7 Ermittlung des Wasserbedarfs für Dattelpalmen

6.7.1 Evapotranspiration

Für den Pflanzenanbau allgemein sind berechenbare Werte der Evapotranspiration ET (Evaporation und Transpiration) maßgebend, um den Pflanzenwasserbedarf zu ermitteln. Dabei handelt es sich nicht um die tatsächliche, aktuelle – und schwer erfassbare Evapotranspiration, sondern es wird mit der potentiellen Evapotranspiration gerechnet.

$$ETP = K_c \cdot E_{t_0} \quad (13)$$

ETP: potenzielle Evapotranspiration (mm)

K_c: pflanzenspezifische Koeffizient

E_{t0}: Referenz Evapotranspiration (mm)

Der geltende Pflanzenwasserverbrauch ETP für einen bestimmten Kulturbestand entspricht dem Basiswasserverbrauch ETo (Referenz Evapotranspiration: reference crop evapotranspiration), der mit einem pflanzenspezifischen Pflanzenkoeffizienten kc multipliziert wird (ALLEN et al., 1998).

Mit Hilfe von Verdunstungsformeln ist es möglich die potentielle (Referenz-) Evapotranspiration Eto zu berechnen. Eto ist definiert als die Verdunstungsrate einer ausgedehnten, gleichmäßig bewachsenen Grasfläche. Das Gras soll 5-8 cm hoch sein, sich im Wachstum befinden, den Boden komplett bedeckenden und keinen Mangel an Wasser und Nährstoffen aufweisen.

6.7.2 Berechnung der verwendeten Bewässerungsmenge

Der Bewässerungsbedarf berechnet sich aus der Evapotranspiration der Pflanzen. Hierfür wurde folgendes Verfahren zur Ermittlung der Verdunstung und der Transpiration der Dattelpalmen angewendet:

Bei den Verdunstungsformeln kann zwischen empirischen Formeln und theoretisch abgeleiteten Formeln unterschieden werden:

- Empirischen Formeln: Thornthwaite, Haude, Blaney-Criddle, Pan Evaporation, u.a.m.
- Theoretisch fundierte Formeln: Radiation Method, FAO-Penman, Penman-Montheith u.a.m.

In Tab. 25 wird der Pflanzenwasserverbrauch, berechnet nach APIOS (1996), mit den oben erwähnten Parametern für den Dattelanbau der Region Kébili, dargestellt.

Nach den Empfehlungen der FAO 1977, wird in APIOS (1996) für die Region Kébili die modifizierte Formel nach Penman für die Berechnung des Basiswasserverbrauchs ETo angewendet (siehe Gleichung. 14).

„Die sog. FAO-Penman Gleichung wurde von DOORENBOS und PRUITT (1977) aus der ursprünglichen Penman-Gleichung abgeleitet. Die Gleichung berücksichtigt sowohl den Strahlungsanteil als auch den aerodynamischen Anteil an der Verdunstung:

$$\begin{aligned} \text{Strahlungsanteil} \quad E_{T0} &= c \cdot [W \cdot R_n + (1-W) \cdot f(U) \cdot (e_a - e)] \quad [\text{mm/d}] & (14) \\ \text{aerodynamischer Anteil} \quad R_n &= (1-\alpha) R_s - R_{n,1} \\ R_n &\dots \dots \text{Nettostrahlung in Äquivalenz-Evapotranspiration} \quad [\text{mm/d}] \\ R_s &\dots \dots \text{Solarstrahlung} \\ \alpha \cdot R_s &\dots \dots \text{reflektierter Anteil der Solarstrahlung} \quad (\alpha = 0,25) \\ R_{n,1} &\dots \dots \text{langwellige Nettostrahlung} \quad R_{n,1} = f(T) \cdot f(e_d) \cdot f(n/N) \end{aligned}$$

ea..... Sättigungsdampfdruck [mbar]

e..... tatsächlicher Dampfdruck [mbar]

f(U).... windabhängige Funktion, U in km/d, gemessen in 2 m Höhe

W..... Gewichtungsfaktor, - temperatur- und höhenabhängig, entspricht dem bei der Strahlungsmethode

c.....Anpassungsfaktor zur Kompensation der unterschiedlichen Wetterbedingungen am Tag und in der Nacht

erforderliche Messdaten: Tm..... mittlere Temperatur

RHm..... mittlere relative Luftfeuchtigkeit oder

e..... Dampfdruck

U..... Windgeschwindigkeit

Rs..... Solarstrahlung oder

n.....mittlere Sonnenscheindauer“

(nach CEPUDER, P. 2011, S.2-2-19)

Der, für diese Arbeit verwendete Pflanzenkoeffizient k_c für Dattelpalmen (je nach Monat 0,74 bis 1), stammt aus Messungen der Referenzversuchsstation aus *Zafaraniah* (Irak) (APIOS 1996).

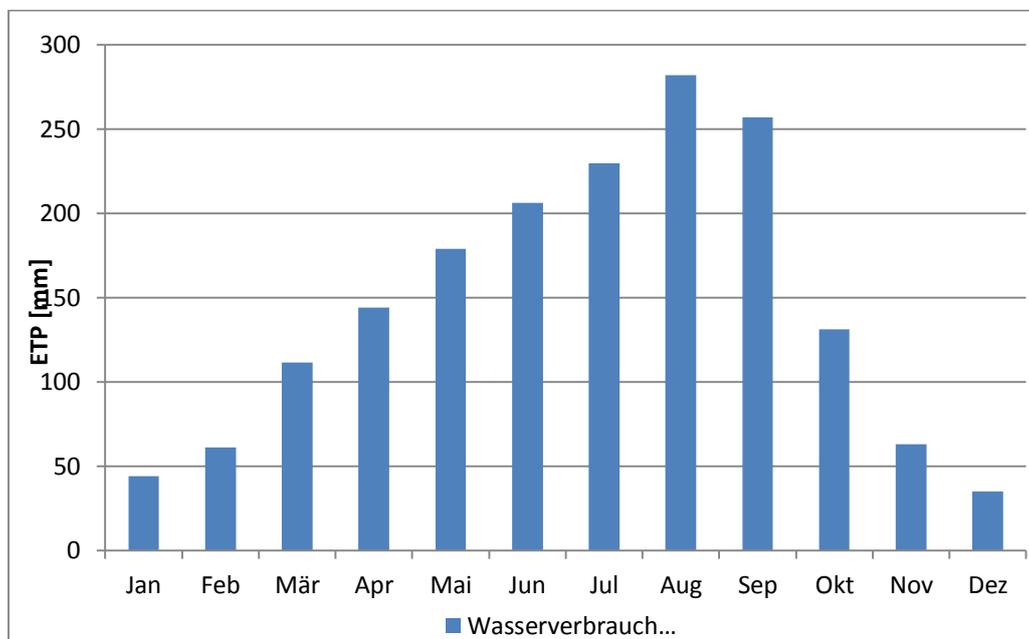


Abbildung 25. Wasserbedarf für den Dattelpalmenanbau in Reinkultur in der Region Kebili [mm / Monat] (APIOS 1996)

6.8 Ermittlung der Dattelpalm Erträge

Die Dattelpalm Erträge wurden jeweils im November der Jahre 2008, 2009, 2010 und 2011 quantitativ und qualitativ bewertet.

In der Versuchsstation *Atilet* wurden Palmen jeweils mit 8.500 m³/ha; 13.600 m³/ha; 17.000 m³/ha; 20.000 m³/ha und 25.000 m³/ha pro Jahr bewässert. Die Berechnung des Wasserbedarfs erfolgte nach Abbildung 26, s.o., aus der sich ein Bedarf von 17.000 m³/ha und Jahr ergibt. In Anlehnung an die in Kebili tatsächlich eingesetzten Wassermengen wurden jeweils die beiden niedrigeren und die beiden höhere Bewässerungsmengen hinsichtlich des Ertrages getestet. Zusätzlich wurden 3 Bestockungsvarianten getestet: 64 Palmen/ha, 100 Palmen/ha und 156 Palmen/ha. Diese drei Bestockungsdichten sind repräsentativ für die kontinentalen Oasen Südtunesiens.

Von jeder Variante V_iD_j (V_i ist das Wasservolumen $i = 8.500 \text{ m}^3/\text{ha}; 13.600 \text{ m}^3/\text{ha}; 17.000 \text{ m}^3/\text{ha}; 20.000 \text{ m}^3/\text{ha}$ und $25.000 \text{ m}^3/\text{ha}$; und $D_j = 64 \text{ Palmen/ha}, 100 \text{ Palmen/ha}$ und 156 Palmen/ha) wurden die Erträge von 4 Palmen untersucht (Abb. 26). Die Fruchtstände wurden nachgezählt, gewogen und die Datteln in Hinsicht auf die Qualität visuell in drei Kategorien klassifiziert (schlecht, mittel, gut). Ermittelt wurde das Durchschnittsgewicht der Fruchtstände von den 4 Palmen gleicher Bewässerungsmenge und Bestockungsdichte.



Abbildung 26. Dattel Ernte bei der experimentellen Parzelle Bild (OMRANI, 2010)

6.9 Übersicht über den zeitlichen Verlauf aller Messungen

Tabelle 12. Zeitlicher Verlauf der Messungskampagnen

	2007		2008											
	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Juin	Juill	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Saugspannung	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Bewässerung	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Wassergehalt, Wasservorräte								9	6	6				
Leitfähigkeit EC, pH								9	6	6				
Bodendichte	1													
Ermittlung Erträge													1	

	2009											
	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Juin	Juill	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Saugspannung	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Bewässerung	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Wassergehalt, Wasservorräte						9	6	6				
Leitfähigkeit EC, pH						9	6	6				
Bodendichte												
Ermittlung Erträge											1	

	2010												2011	
	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Juin	Juill	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Nov	Dez
Saugspannung	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6		
Bewässerung	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
Wassergehalt, Wasservorräte						6	6	6						
Leitfähigkeit EC, pH						9	6	6						
Bodendichte													1	
Ermittlung Erträge											1		1	

*Die Zahlen geben die Anzahl der Messungen pro Monat an.

7 Ergebnisse

7.1 Bodenuntersuchungen auf der Versuchsparzelle Ailet (nach KADRI & SARTORI, 1998)

7.1.1 Physiko-chemische Charakterisierung

Tieferreichende geologische Sondierungen haben ergeben, dass die Versuchsparzelle Ailet auf einer durchschnittlich 1 m mächtigen Dünensandüberdeckung angelegt wurde. Im Liegenden folgen bis 10 m Tiefe Kalkschotter und Tonlagen, gefolgt von roten, gipsreichen Tonen bis 35 m Tiefe. Diese Sedimente liegen auf Kalken aus dem Mio-/Pliozän, die bis 100 m Tiefe nachgewiesen werden konnten (D.R.E.S, 1985).

Auf dieser leicht über die Umgebung erhöhten, eingeebneten Dünensandfläche wurden von KADRI A. & SARTORI G. (1988) insgesamt 16 Bodenprofile untersucht. Alle Profile sind in den oberen 20 cm schwach dunkelbraun gefärbt (10 YR 3/4) und wechseln nach unten über eine dunkelgelblich orange Farbe (10 YR 7/4) zu einem blassen Gelb (2,5 Y 8/3) ab etwa 70 cm. Die Horizonte sind, obwohl nur gering unterschiedlich, deutlich voneinander abgrenzbar. In manchen Profilen sind im unteren Profilabschnitt deutlich leichte Rostflecken von hell gelb-oranger Farbe (10 YR 8/3) zu erkennen, Hinweise auf eine Pseudovergleyung.

Die Korngrößenverteilung besteht zu 65 – 81 % aus Sand, wobei der Feinsand, hier ab < 250 µm definiert, mit 62 – 76 % dominiert und damit den äolischen Transport belegt. Der Grobsand besteht ausschließlich aus sekundären Gips- und Kalkkristallen. Schluff wurde maximal mit 20 % im Oberboden und Ton mit maximal 14 % bestimmt. Als Bodenart ergibt sich hieraus ein Ss bis Sl, ein sandiger Sand bis schwach lehmiger Sand. Aus dieser Bodenart sind die Probleme der Wasserversorgung für die Pflanzen direkt ableitbar. Bestimmt wurden Wassergehalte von maximal 27 % bei Sättigung, maximal 16 % bei pF 2 bzw. 0,1 bar (Feldkapazität) und maximal 7,1 % am permanenten Welkepunkt, pF 4,2 bzw. 15 bar. Mit dem Doppelringinfiltrimeter wurde aufgrund der durch den Sand reichlich vorhandenen Poren eine Wasserwegsamkeit von 12 cm/h im Oberboden bis 6 cm/h im mittleren und unteren Profilabschnitt gemessen. Die höheren Schluff- und Tongehalte im Oberboden belegen eindeutig, dass im Ausgangsmaterial, den Dünensanden, eine pedogene Entwicklung stattgefunden hat (siehe Kornsummenkurven Abb.27).

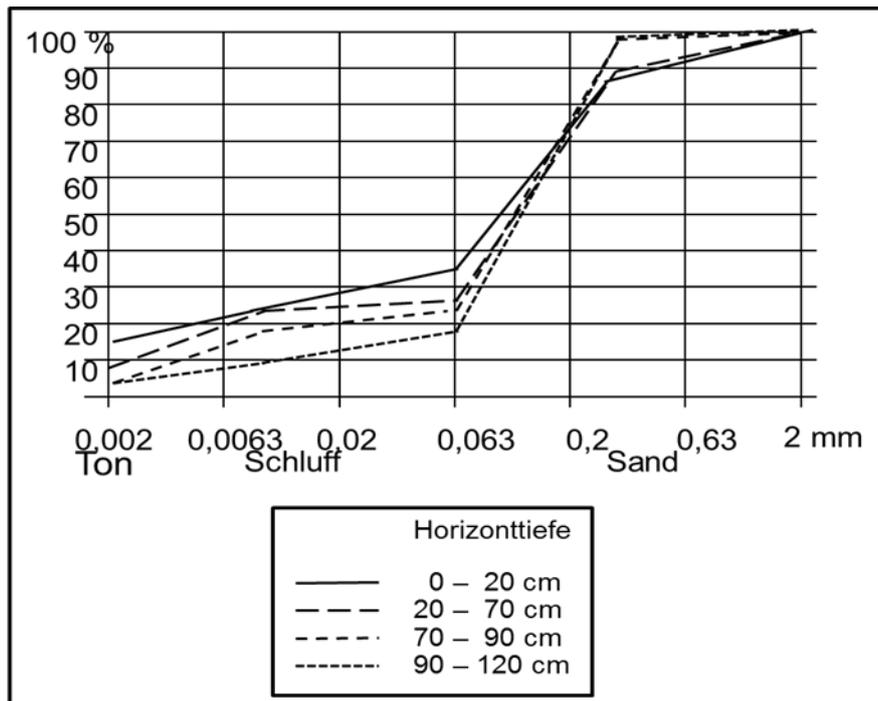


Abbildung 27. Kornsummenkurve Profil 8 (C), Werte nach KADRI und SARTORI (1988)

Organisches Material ist nur im Oberbodenhorizont mit bis zu 0,15 % nachweisbar, das C/N Verhältnis ist mit 6 sehr eng. Die pH Werte sind alkalisch und bewegen sich in allen untersuchten Horizonten zwischen 8 und 9. Der Kalkgehalt steigt vom Oberboden (7 % CaCO_3) bis in eine Tiefe von 45 – 60 cm (bis 15 % CaCO_3) und nimmt dann zum Unterboden wieder ab. In 5 Profilen konnte im Unterboden kein Kalzium mehr nachgewiesen werden. Die nadelförmigen Kalkanreicherungen erlauben in einigen Horizonten die Ansprache als *calcic horizon* nach der FAO Nomenklatur. Die Profile sind ebenfalls durch hohe Gehalte an Gips gekennzeichnet, dieser weist jedoch die höchsten Werte, bis 23 %, im oberen und mittleren Horizont auf und nimmt im Unterboden stark auf 1 % ab. Auch hier ist eine Einstufung als *gypsic horizon* nach der FAO vertretbar. Über die gesamten Profile wurde mit 9,4 mS/cm als Minimum bis 30,7 mS/cm eine hohe elektrische Leitfähigkeit gemessen, Hinweis auf den hohen Salzgehalt in allen Profilen. Die Untersuchungsergebnisse von KADRI A. und SARTORI G. (1988) erlauben die Böden hinsichtlich des Bodentyps als Gypsisol, Calcisol bis zu Solonchak nach der FAO einzustufen.

Profil N°8 wurde von KADRI A. Und SARTORI G. (1988) im Gelände folgendermaßen beschrieben: A 0-20 cm: dunkel braune Farbe (10 YR 3/4), trocken; stark sandig; feines, mittleres polyedrisches bis subpolyedrisches Gefüge; Lagerungsdichte gering; häufige Gipskristalle und -konkretionen; häufige sehr feine bis feine Poren; häufige Feinwurzeln; stark schäumend; deutliche ebene Horizontgrenze.

B_w 20-70 cm: dunkel gelblich orange Farbe (10 YR 7/4), trocken, stark sandig; großes polyedrische bis subpolyedrisches Gefüge, Lagerungsdichte gering; häufige Gipskristalle, wenige große kalkige-gipshaltige Nadel; häufige feine Poren; stark schäumend. Der Horizont ist nach unten durch eine Kalk-/Gipskruste von 5 cm Mächtigkeit begrenzt.

C₁ 70-90 cm: blass gelbliche Farbe (2,5 Y 8/3), trocken; sandig; lagerungsdichte hoch; wenige sehr feine Poren; stark schäumend. Horizontgrenze schwach und eben.

C₂ 90-120 cm: blass gelbliche Farbe (2,5 Y 8/3), schwach feucht; „sableux franc“; Taschen gelblich oranger (10 YR 7/8) und hell grauer (2,5 Y 8/2) Farbe, deutlich ausgeprägt und häufig.

120-135 cm : unterbrochene Kalkkruste.C₃ 135 – 150 cm: wie C₂

Die Bodenhorizonte des Bodenprofils N°10 (siehe Tab. 14) werden von KADRI A. und SARTORI G. (1988) im Gelände wie folgt beschrieben:

A 0-20 cm: hell gelbe-orange Farbe (10YR 8/4), trocken; stark sandig; feines subpolyedrisches Gefüge, schwach ausgebildet; Lagerungsdichte gering; feine durchgehende Poren; feine bis mittlere Wurzeln, häufige Gipskristalle 6-7 mm; häufige Gipskonkretionen von 3-4 mm, schwach schäumend, deutliche, ebene Horizontgrenze.

B_w 20-40 cm: gelblich braune Farbe (10 YR 7/4), trocken, stark sandig; schwaches Prismengefüge; Lagerungsdichte mittel; häufig Gipskristalle; häufig Nadeln aus Kalk und Gips, bis 10 cm; wenig Feinporen; wenig Feinwurzeln; stark schäumend; deutliche, ebene Horizontgrenze.

C₁ 40-65 cm: gelblich braune Farbe (10 YR 7/4), trocken, stark sandig; Lagerungsdichte hoch; wenige Feinporen; starkes Schäumen; deutliche, wellige Horizontgrenze.

C₂ 65-125 cm: dunkel orange Farbe (7,5 YR 7/4); trocken stark sandig; lagerungsdichte sehr hoch, fest; wenig Feinporen; stark schäumend: deutliche, wellige Horizontgrenze.

C₂ 65-125 cm: Farbe hell grau (7,5 YR 8/2) trocken, Lagerungsdichte sehr hoch, fest;größere Taschen von stark gelblich oranger Farbe (10 YR 7/8), stark schäumend.

Der Horizont ist nach unten von einer Kalkkruste von 10 cm abgegrenzt, diese ist von Partien hell gelb oranger Farbeunterbrochen (10 YR 8/3).

Tabelle 13. Analytischen Daten des Bodenprofils N°8

Tiefe cm		0-20	20-70	70-90	90-120	135-145
Horizont		A	B _w	C ₁	C ₂	C ₃
Korngrößen						
Sand	%	65,3	73,0	73,9	80,1	77,5
Schluff	%	20,2	15,6	11,4	9,7	10,0
Ton	%	14,6	11,5	14,7	10,3	12,5
Feinschluff	%	9,3	5,8	4,7	2,2	3,7
Grobschluff	%	10,9	9,8	6,7	7,5	6,3
Feinsand (<250 µm)	%	50,0	62,0	72,1	79,5	77,0
Grobsand (>250 µm)	%	15,3	11,0	1,8	0,6	0,5
C org	%	0,1				
N tot	%	0,03				
Kalk	%	11,0	9,0	11,0	9,0	--
Gips	%	22,0	23,0	9,0	1,0	1,0
pH		8,6	8,2	9,0	8,9	8,4
EC mS/cm		21,7	9,4	23,1	12,6	16,3
Wassersättigung	%	25,0	27,0	29,4	27,2	30,7
Wassergehalt						
0,1 bar ~ pF2	%	27,4	27,4	19,4	14,0	19,6
15 bar ~ pF 4,2	%	9,6	9,1	4,9	3,1	6,0
Wasserleitfähigkeit (cm/h)		12,0	6,0	6,0		

Tabelle 14. Analytischen Daten des Bodenprofils N°10

Tiefe cm		0-20	20-40	40-65	65-125
Horizont		A	B _w	C ₁	C ₂
Korngrößen					
Sand	%	76,6	72,9	76,5	81,4
Schluff	%	11,2	12,9	12,9	6,3
Ton	%	12,3	14,3	10,6	12,3
Feinschluff	%	4,5	5,0	6,8	2,9

Grobschluff %	%	6,7	7,9	6,1	3,4
Feinsand (<250 µm)	%	60,1	69,7	71,0	76,4
Grobsand (>250 µm)	%	16,5	3,2	5,5	5,0
C org	%	0,1			
N tot	%	0,04			
Kalk	%	7,0	14,0	15,0	11,0
Gips	%	14,0	2,0	1,0	1,0
pH		8,3	8,7	8,7	9,1
EC mS/cm		13,3	25,9	29,2	13,0
Wassersättigung	%	23,8	26,9	25,4	26,7
Wassergehalt					
0,1 bar ~ pF 2	%	16,2	16,2	11,4	13,5
15 bar ~ pF 4,2	%	7,1	4,5	3,6	3,2

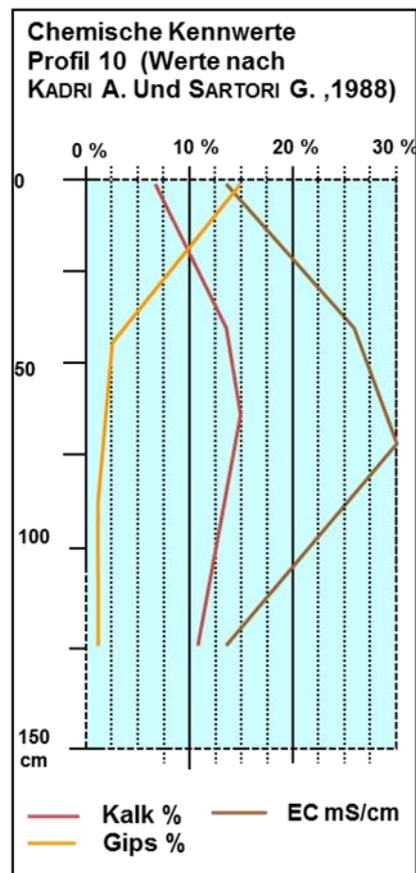
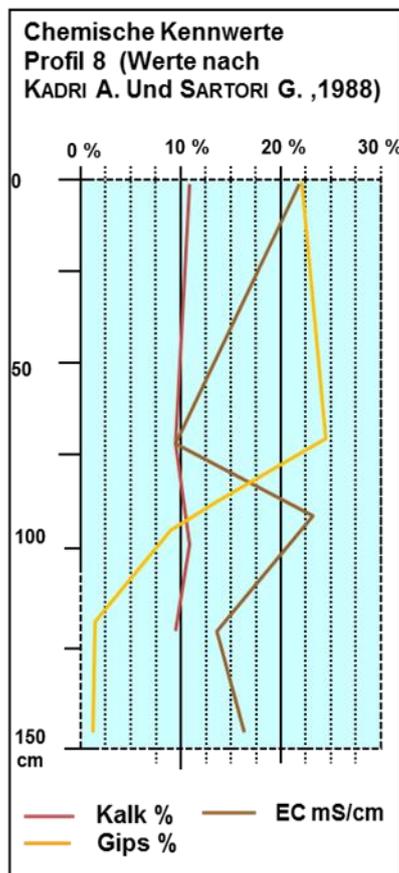


Abbildung 28. Chemische Kennwerte von Profil 8 und Profil 10 (bearbeitet nach KADRI & SARTORI, 1988)

Die eigenen Untersuchungen über die Bodendichte und die pF-Werte des Bodens der *Atilet* Parzelle wurden im Juli 2007 unternommen. Die entsprechenden Messungen wurden in den Laboren des IRA Instituts, Tunesien durchgeführt. Die Tabelle 15 zeigt die Messwerte der Wassergehalte entsprechend den pF-Werten.

Tabelle 15. *Bodendichte und Wassergehalte für pF 2 und 4,2 Ermittlung bis in eine Bodentiefe von 120 cm (IRA, 2007).*

	Tiefe	pF2	pF4,2	θ_{fk}	θ_{pwp}
Bodendichte	(cm)	Wfk	Wpwp		
1,6	0-20	17,25	8,03	27,61	12,85
1,7	20-40	16,54	6,53	28,12	11,10
1,7	40-60	17,43	6,93	29,64	11,79
1,5	60-80	14,45	5,94	21,67	8,92
1,6	80-100	12,48	4,90	19,97	7,84
1,6	100-120	12,48	4,63	19,97	7,41

Anhand des gemessenen Wassergehalts, kann man den Boden der experimentalen Parzelle wie folgt charakterisieren.

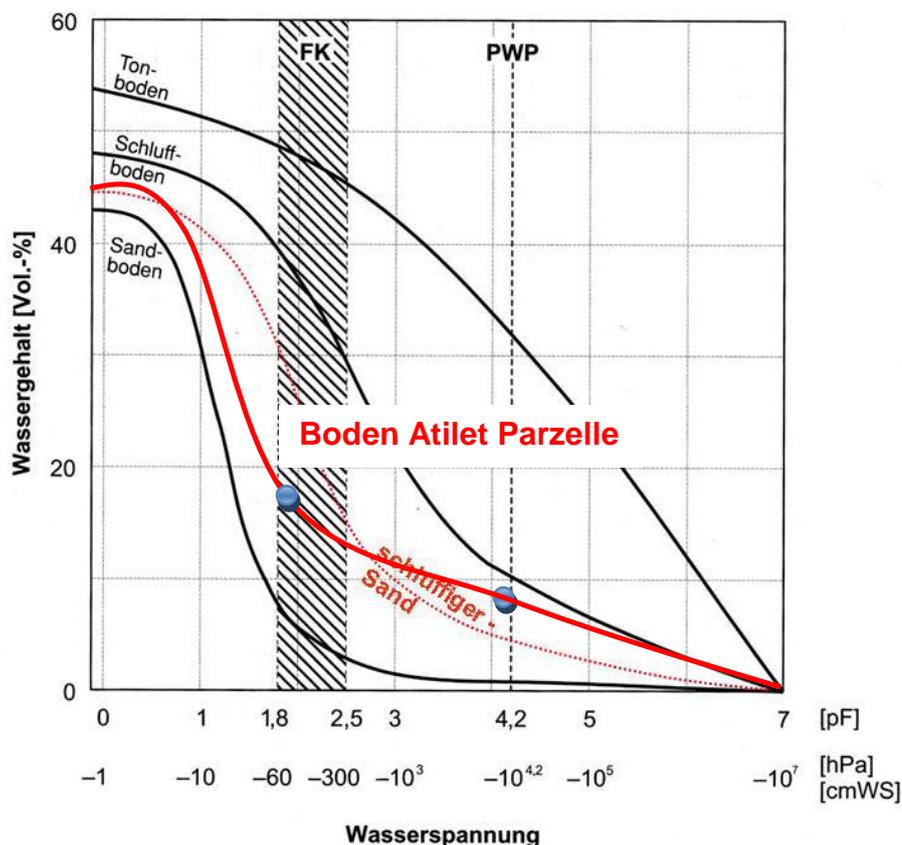


Abbildung 29. *Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt (pF-Kurve) des Bodens in Atilet. Abbildungsgrundlage für Sandboden, Schluffboden und einem Tonboden nach SCHEFFER et al., 2002. FK= Feldkapazität, PWP= permanenter Welkepunkt*

7.1.2 Ergebnisse der Saugspannungsmessungen

Es wurden von November 2007 bis Dezember 2010 durchgängig Messungen der Saugspannung im Boden unter Dattelpalmen durchgeführt, angepasst an einen 14-tägigen Bewässerungsrhythmus. Die Messungen wurden in den Bewässerungsbecken A₃, A₄ und A₅ mit unterschiedlicher Wasserverteilung (s.o.) jeweils in den Tiefen von 40, 80 und 120 cm durchgeführt.

Das Auslesen der Saugspannungswerte erfolgt einmal direkt vor der Bewässerung und zweimal je 24 Stunden und 72 Stunden nach der Bewässerung. Alle Werte für die drei Bewässerungsmethoden über den gesamten Zeitraum und alle Tiefen sind im Anhang zu finden. Bei den drei folgenden Diagrammen sind die Größenordnungen zwischen den drei Tiefen sehr unterschiedlich, deshalb sind die Skalen für die Saugspannung unterschiedlich und den unterschiedlichen Werten angepasst wurden.

7.1.2.1 Verlauf der Saugspannung bei Bewässerungssystem A₃

Die Abbildung 30 zeigt den Verlauf der Saugspannung im Becken A₃ in einer Tiefe von 40 cm zwischen dem 05.11.07 und dem 21.10.10.

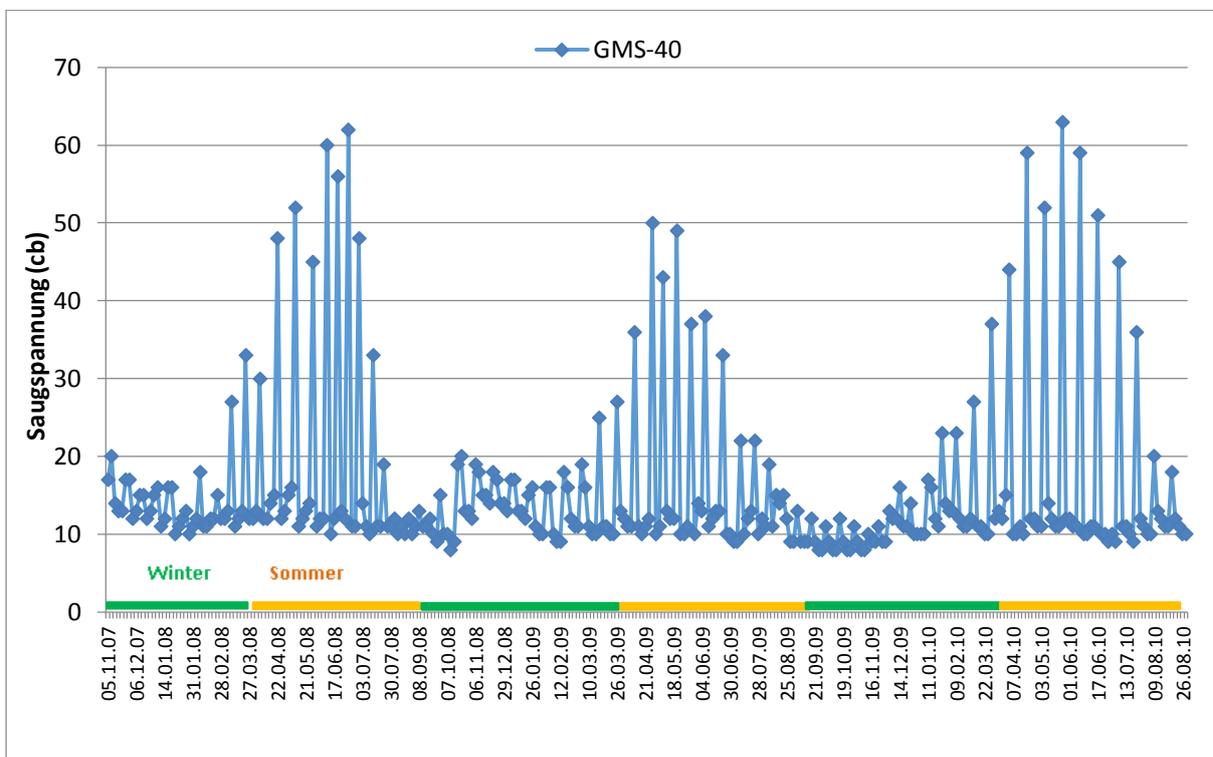


Abbildung 30. Verlauf der Saugspannung im Boden in 40 cm Tiefe für A₃

Es wird deutlich, dass die Saugspannung im Boden ab dem Monat April eines jeden Jahres signifikant ansteigt und ein eindeutiger Bezug zu den unterschiedlichen Bewässerungsmengen im Winter- und Sommerhalbjahr, den unterschiedlichen Temperaturen und der Wachstumsphase der Dattelpalmen besteht. Direkt vor der Bewässerung werden im Sommer Werte erreicht, die teilweise 60 cb, entsprechend pF 3,8 überschreiten. Nach der Bewässerung werden Werte von leicht über 10 cb, entsprechend pF 2 in 40 cm Tiefe gemessen. Die Saugspannungen schwanken also im Sommer während zweier aufeinanderfolgender Bewässerungen fast zwischen dem permanenten Welkepunkt (pF 4,2) und der Feldkapazität (pF 2). Somit wird in 40 cm Tiefe durch eine Bewässerung das gesamte Haftwasservolumen des Bodens wieder aufgefüllt, die Bewässerung ist also in diesem zeitlichen Rhythmus dringend notwendig. Es kann hier auch schon abgeleitet werden, dass weiteres Sickerwasser für tiefere Bodenhorizonte zur Verfügung steht. Bis zur nächsten Bewässerung in 14 Tagen ist das gesamte Volumen der nutzbaren Feldkapazität durch Vegetation und Verdunstung wieder aufgebraucht. Ab September sinkt die Größeneinheit der Werte im Mittel auf eine Spanne zwischen 10 cb (pF 2) und 20 cb (pF 2,4). Nach Tabelle 10 (EIJKELKAMP) ist der Boden im Winter also immer „hinreichend feucht“, eine Bewässerung ist also nicht notwendig.

Die Abbildung 31 zeigt den Verlauf der Saugspannung im Boden für die Bewässerungsalternative A₃ in 80 cm Tiefe während des gesamten Messzeitraumes. Der Verlauf ist nicht mehr eindeutig auf die unterschiedlichen Bedingungen zwischen Winter- und Sommerhalbjahr zurück zu führen. Die Amplituden der Saugspannungen sind geringer als in 40 cm Tiefe gemessen und schwanken zwischen 2 cb (pF 1,3) und 14 cb (pF 2,15). Es ist also über das ganze Jahr bei der angewandten Bewässerungsmethode genügend pflanzenverfügbares Wasser vorhanden. Die Bewässerungsmengen im Sommer sind sogar so hoch, dass in dieser Bodentiefe sogar über den Haftwasseranteil hinausgehendes Sickerwasser verfügbar ist. In dieser Bodentiefe ist deshalb die Saugspannung in den Sommermonaten niedriger als in den Wintermonaten, in denen mit geringerer Menge bewässert wurde. Nur für die Pflanzenversorgung betrachtet, abgesehen von dem Problem der Entsalzung durch Dränwasser, stellt sich die Frage, ob die Bewässerungsmenge reduziert werden kann.

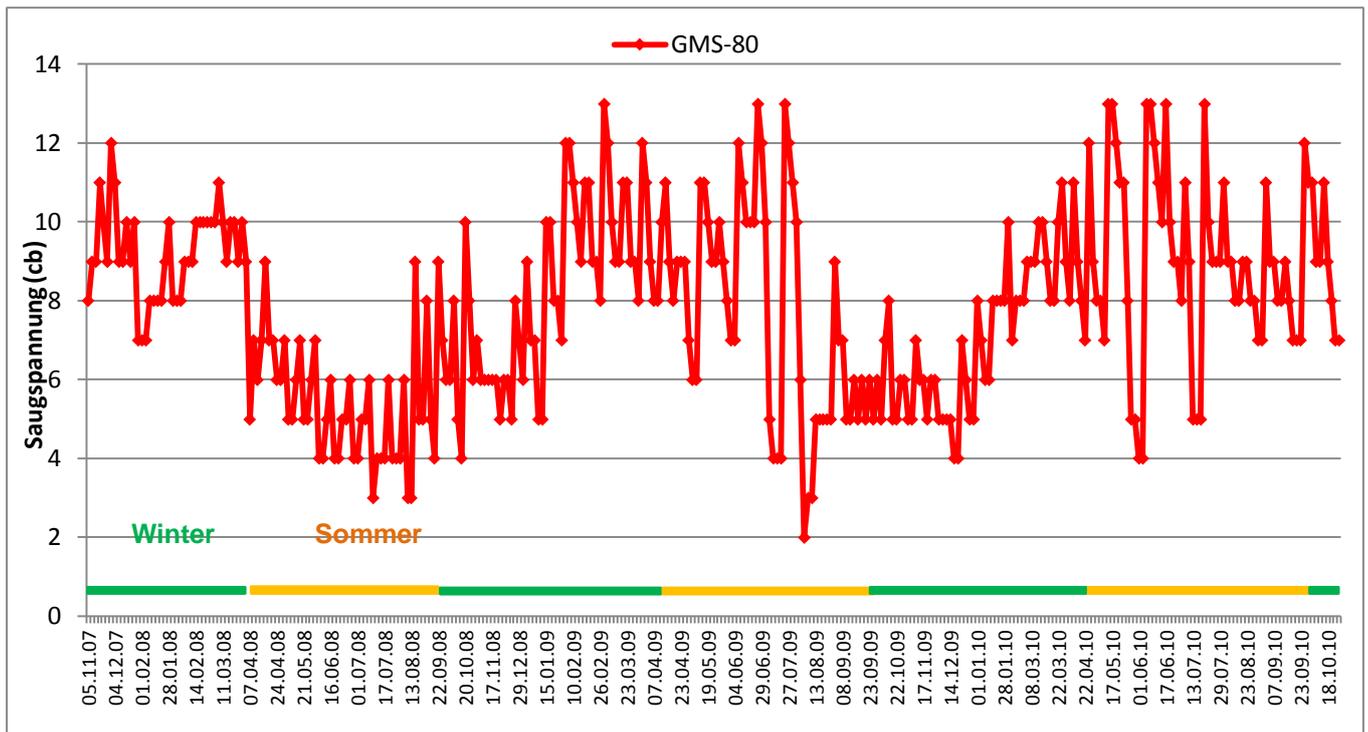


Abbildung 31. Verlauf der Saugspannung im Boden in 80 cm Tiefe für A₃

In Abbildung 32 ist der Verlauf der Saugspannung des Bodens für A₃ in 120 cm Tiefe dargestellt. Ein zyklischer Verlauf zu Winter- und Sommerhalbjahr ist hier gar nicht mehr zu erkennen. Zudem ändert sich der Verlauf über die 3 Messjahre gesehen viel stärker. Dennoch sind in 120 cm Tiefe die Schwankungen der gemessenen Werte mit einer Spannung von 1 cb bis 20 cb entsprechend pF 0,1 bis 2,4 signifikant und liegen alle im Sickerwasserbereich. Sie liegen vor allem im Sommer weit unter denen an der Messtelle in 80 cm Tiefe. Hier stellt sich die Frage, ob diese Wässer in den Poren in 120 cm Tiefe alle aus der vertikalen Zufuhr über die Bewässerung direkt aus den Versuchsbecken resultieren. Die Versuchsbecken sind eingebettet und umgeben von Becken mit traditioneller Bewässerung. Vor allem in den Sommermonaten werden diese Becken reichlich mit nicht kontrollierten Wassermengen geflutet. Es ist deshalb möglich, dass es in den Versuchsbecken in 120 cm zu einem lateralen Wasserzufluss aus den umgebenden Becken des Versuchshains kommt. Dies würde dem örtlichen, oberflächennahen Grundwasser entstammen, das sich aus dem überflüssigen Bewässerungswasser bildet und die außerhalb der Palmenhaine liegenden Senken mit salzhaltigem Wasser auffüllt. Unterstützt wird diese Erklärung dadurch, dass die Saugspannungen in 120 cm Tiefe keine deutlichen Bezüge zu den Bewässerungszeitpunkten erkennen lassen. Dies wird später bei Betrachtung einzelner Bewässerungsphasen nochmals aufgegriffen.

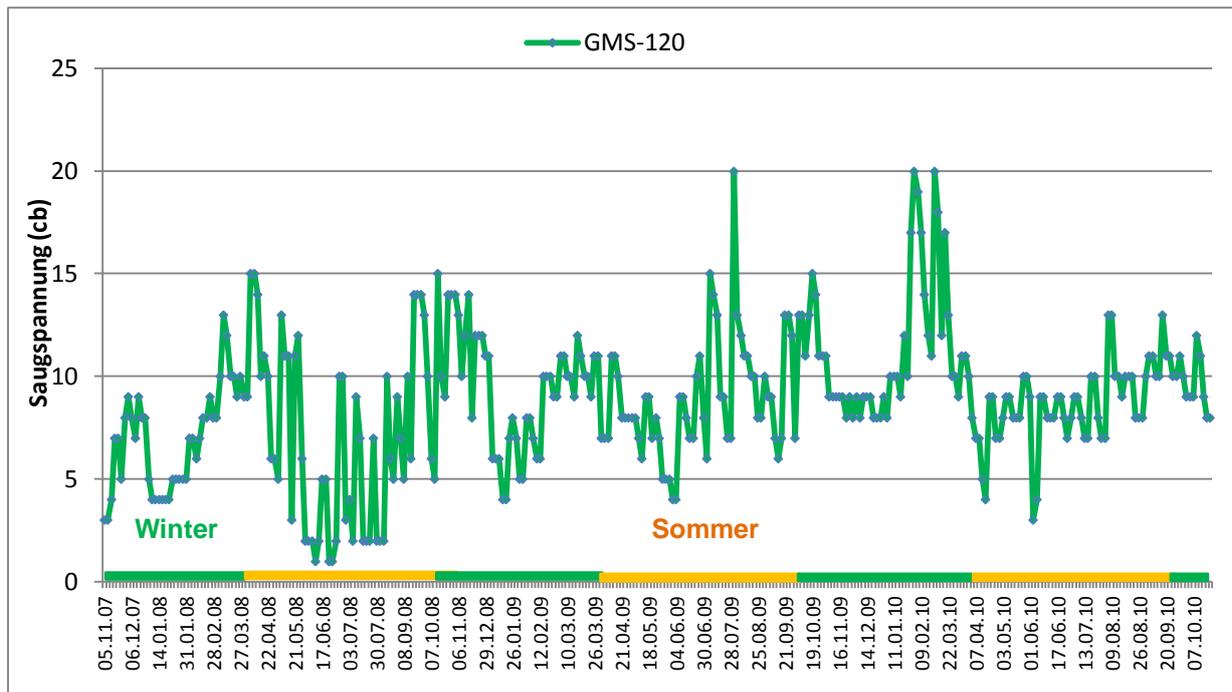


Abbildung 32. Verlauf der Saugspannung im Boden in 120 cm Tiefe für A₃

In den beiden folgenden Diagrammen ist der Verlauf der Saugspannungskurven in den unterschiedlichen Messtiefen in einem Beispielwinter und -Sommer dargestellt.

Die Werte, die in 80 und 120 cm Tiefe aufgezeichnet wurden, liegen unter den Werten, die in 40 cm Tiefe gemessen wurden. Zudem sind die Schwankungen zwischen den Bewässerungsereignissen geringer. Dies kann dadurch erklärt werden, dass der untere Bereich (80 cm und 120 cm Tiefe) vor der direkten Verdunstung durch Einstrahlung geschützt ist. Was anzeigt, dass sich der Wurzelraum der Dattelpalme auch während der Sommerperioden in einem ausreichend feuchten Milieu befindet.

7.1.2.2 Entwicklung der Saugspannung während des Winterhalbjahres

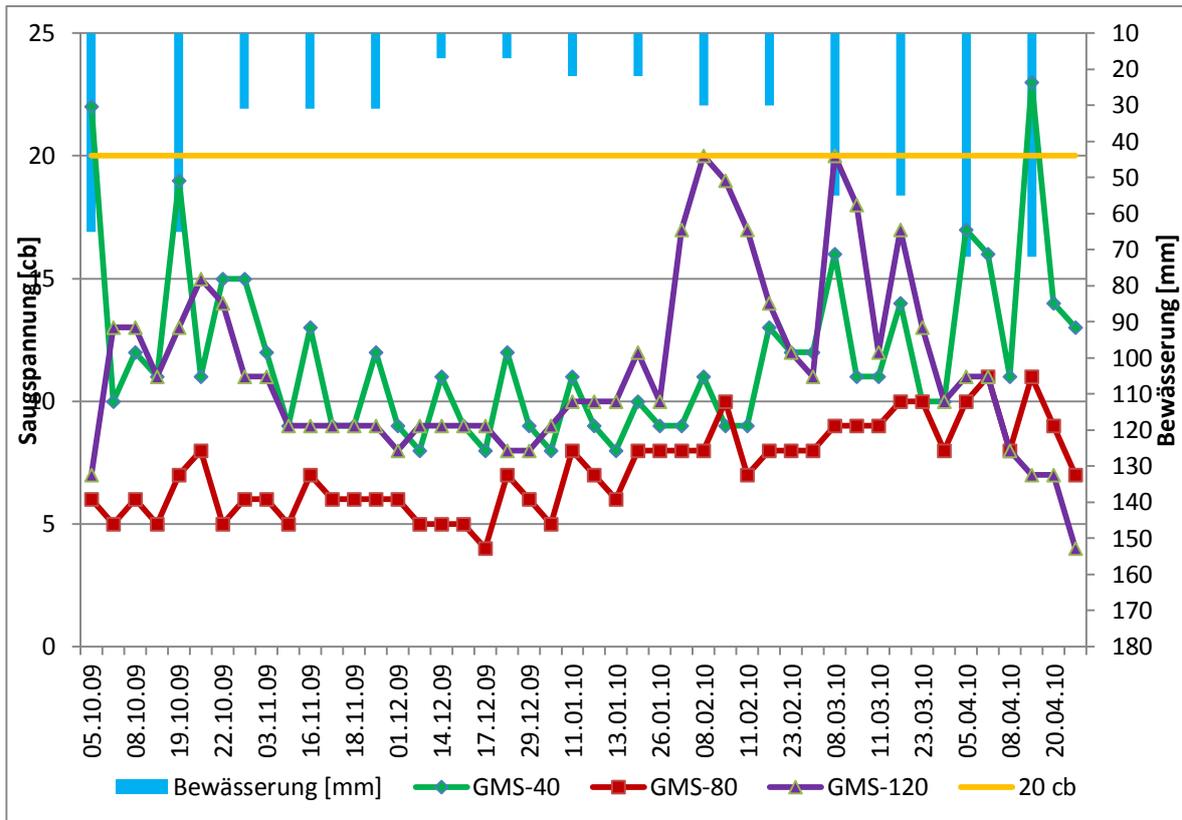


Abbildung 33. Verlauf der Saugspannung im Winter für A₃

Die Messungen in 40 cm Tiefe (Abb. 33, grüne Kurve) zeigen deutlich eine Reaktion auf die Bewässerung, nämlich die höchsten Saugspannungen jeweils vor der Bewässerung und die geringsten am Tag danach. Es wird hier deutlich, dass in der Winter Saison die Werte der Saugspannung im Boden für die drei Tiefe 40 cm, 80 cm und 120 cm, unter 20 cb entsprechend pF 2,4 bleiben. In 40 cm Tiefe werden nach den Bewässerungen minimal 8 cb, entsprechend pF 1,1 gemessen. Die Schwankungen liegen also im Bereich, der sich auf frei bewegliches Sickerwasser im Boden bezieht. Der mittlere Profilabschnitt in 80 cm ist immer feuchter als derjenige in 40 cm Tiefe und, der Rhythmus der Bewässerung und damit die Auswirkungen sind noch erkennbar. In 120 cm Tiefe liegen im Zeitraum 13.1. – 24.3. 2010 die Tensiometerwerte höher als in 40 cm Tiefe, liegen aber noch unterhalb 20 cb, entsprechend pF 2. Der untere Profilabschnitt ist also etwas trockener als der Oberboden. Dies kann durch eine Absenkung des Wasserspiegels des oberflächennahen Grundwasserkörpers bedingt sein, verursacht durch die im Winter geringeren Bewässerungsmengen. Insgesamt aber ist das Bodenprofil über das gesamte Winterhalbjahr, trotz der geringeren Bewässerungsmengen, hinreichend feucht. Erklärbar ist dies aufgrund der geringeren Temperaturen und damit der geringere Verdunstung

und der im Winterhalbjahr geringeren pflanzlichen Aktivität. Wie schon oben erwähnt zeigt sich, dass eine Bewässerung, auch für den Oberboden, im Winter nicht notwendig ist, von den Bauern aus Erfahrung auch nicht vorgenommen wird.

7.1.2.3 Entwicklung der Spannung während des Sommerhalbjahres

Während der ersten Sommerperiode der Messungen ist die Saugspannung in 80 cm und 120 cm Tiefe dauerhaft kleiner 20 cb (pF 2,4). Dies ist in Abbildung 34 zu erkennen. Die Schwankung ist in 40 cm deutlicher ausgeprägt. Die Maxima liegen direkt vor der Beregnung, die teilweise 60 cb erreichen. Die genauen Maximalwerte sind: 62 cb, 9 cb und 14 cb jeweils für die Tiefen 40cm, 80cm, 120cm.

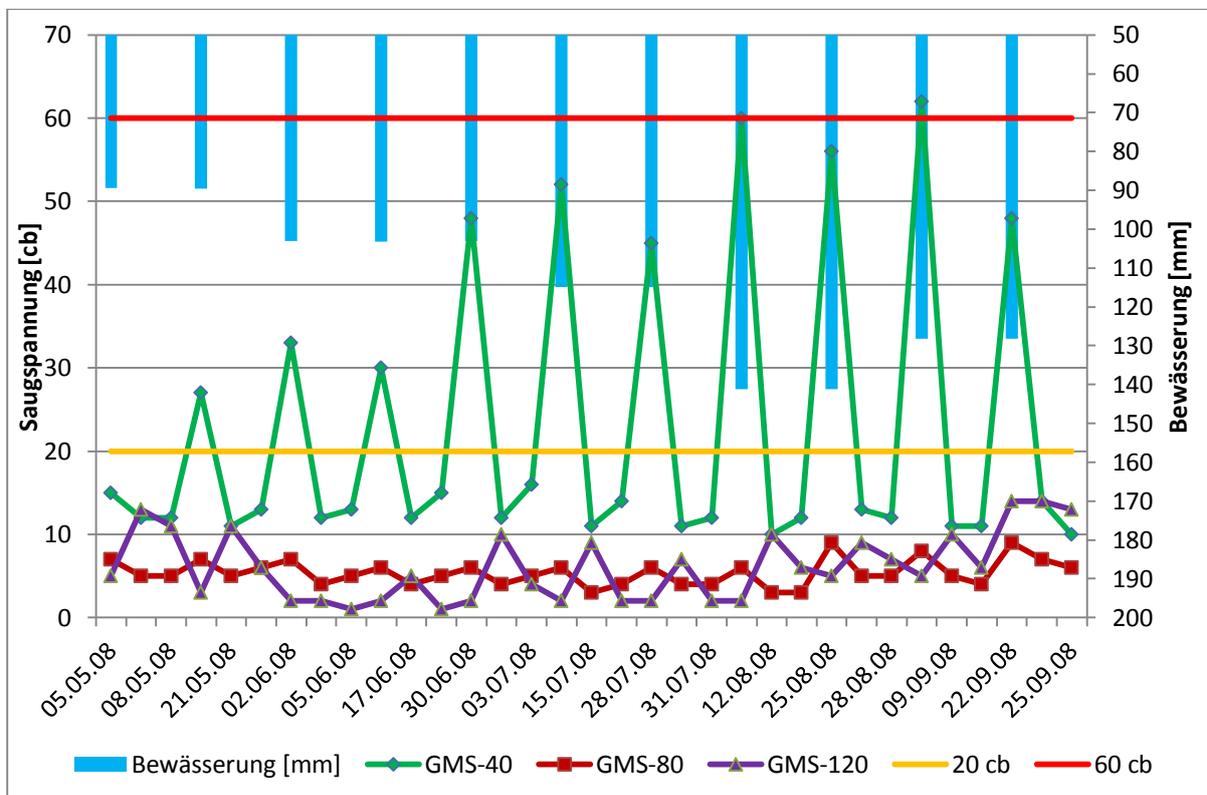


Abbildung 34. Verlauf der Saugspannung im Boden in A₃

Hier wird deutlich, dass die Saugspannung im Boden in 40 cm sehr signifikant ansteigt und direkt vor der Bewässerung Werte erreicht, die teilweise 60 cb, entsprechend pF 3,8 überschreiten. 24 St nach der Bewässerung werden Werte von leicht über 10 cb, entsprechend pF 2 erreicht.

7.1.2.4 Verlauf der Spannung zwischen drei Bewässerungen im Sommer

Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung der Saugspannung in den drei Tiefen 40 cm, 80 cm und 120 cm über 3 Bewässerungszyklen in der Sommerperiode (Juni-Juli-August 2008).

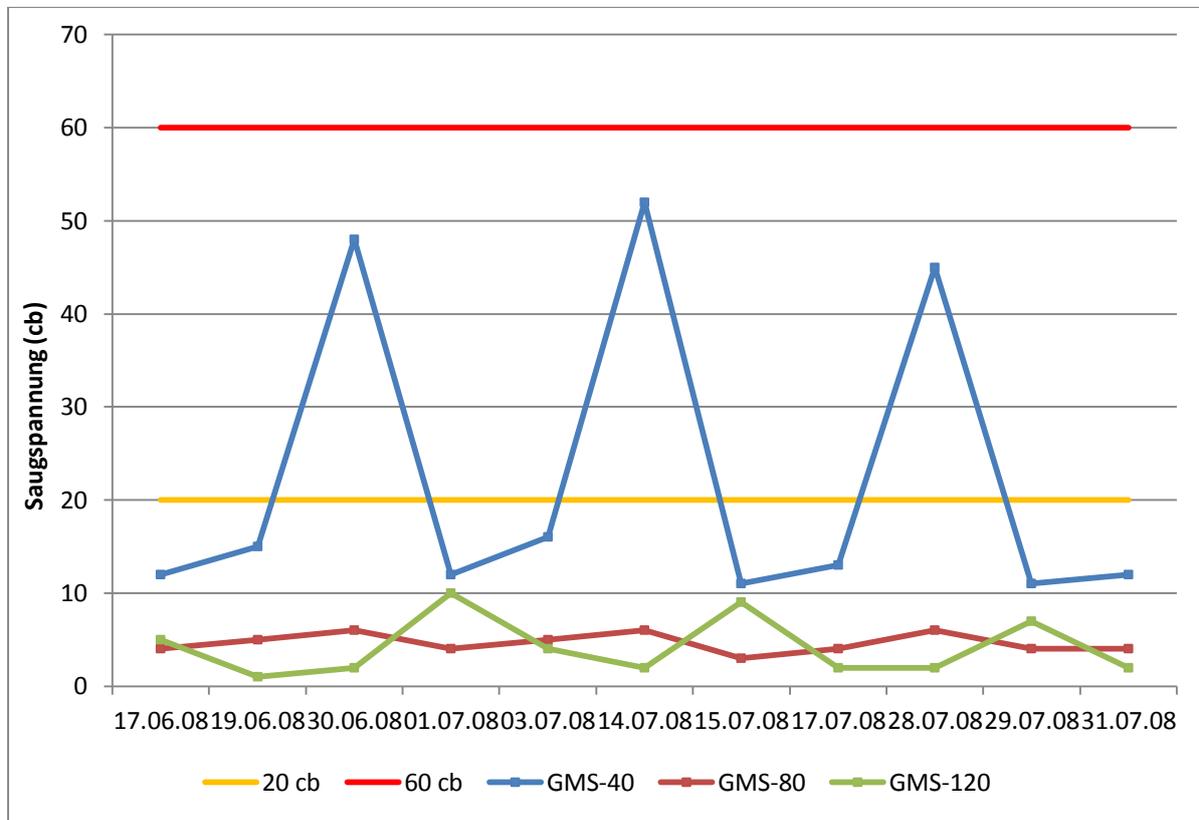


Abbildung 35. Verlauf der Saugspannung zwischen drei Bewässerungen im Sommer für A_3 bei den Tiefen 40 cm, 80 cm und 120 cm

In der Tiefe 40 cm steigt die Saugspannung vor jeder Bewässerung sehr signifikant und die Werte erreichen teilweise 50 cb, entsprechend pF 6. Nach der Bewässerung werden Werte von leicht über 10 cb, entsprechend pF 2 und zwar in 40 cm Tiefe gemessen. Während dieser drei Monate, wo der Wasserverbrauch der Dattelpalme und die Verdunstung am höchsten sind, schwanken die Saugspannungen also im Sommer während zweier aufeinanderfolgender Bewässerungen fast zwischen dem permanenten Welkepunkt (pF 4,2) und der Feldkapazität (pF 2). Somit wird durch eine Bewässerung das gesamte Haftwasservolumen des Bodens wieder aufgefüllt, die Bewässerung ist also in diesem zeitlichen Rhythmus dringend notwendig.

In Tabelle 16 sind 3 Bewässerungszyklen aus dem Sommerhalbjahr 2008 dargestellt. Für die 3 Bodentiefen wurden aus den Saugspannungswerten die Zunahme oder Abnahme zum nächsten Messzeitpunkt ermittelt. Die Zunahme der Saugspannung, entsprechend einer

Abnahme des Bodenwassers (Boden wird trockener) im Haftwasserbereich ist negativ dargestellt und gelb unterlegt. Der umgekehrte Fall eine Saugspannungserniedrigung, entspricht einer Erhöhung des Haftwasseranteils (Boden wird feuchter) ist positiv dargestellt und blau unterlegt.

Tabelle 16. Veränderung der Saugspannung während 3er Bewässerungszyklen
 positive Werte (blau unterlegt) = niedrigere Saugspannung (Wasserzufuhr)
 negativ Werte (gelb unterlegt) = höhere Saugspannung (Wasserverlust/Trocknung)

Veränderung der Saugspannung				
Datum	St nach Bewässerung	40 cm	80 cm	120 cm
14. - 15. 07.2008	0 - 24	22	4	-10
15. - 17. 07.2008	24-72	-4	0	3
17. - 28. 07.2008	72-696	-25	-3	8
28. - 29. 07.2008	0 - 24	29	4	3
29. - 31. 07.2008	24-72	-4	-1	1
31.07 - 11.08.2008	72-696	-27	-3	-3
11. - 12. 08.2008	0 - 24	31	4	-8
12. - 14. 08.2008	24-72	-3	-1	2
14. - 25. 08.2008	72-696	-31	-5	5

In allen 3 Zyklen wird deutlich, dass das Bewässerungswasser in den ersten 24 h die Messtellen in 40 cm und in 80 cm erreicht, am 28.7. 2008 auch schon die Messtelle in 120 cm. Am 14.7. 2008 und am 11.8. 2008 erfolgt in der ersten 24 h noch keine Wasserzufuhr in 120 cm. Ebenfalls wird deutlich, dass die Wasserzufuhr in 120 cm Tiefe bis nach 72 h weiter geht. Dagegen trocknen der obere und der mittlere Profilabschnitt schon wieder aus. Die Austrocknung geht in den beiden oberen Profilabschnitten weiter, das Verhalten in 120 cm ist unterschiedlich und zeigt erneut, dass die Wasserspannung hier nicht nur vom Bewässerungswasser abhängig ist (Zunahme am 17.7. und 13.8. 2008).

Die Abbildung 36 zeigt die Saugspannungswerte eines Bewässerungszyklus vom 14.07 bis 28.07 mit zeitlich linearer Achse.

Saugspannung

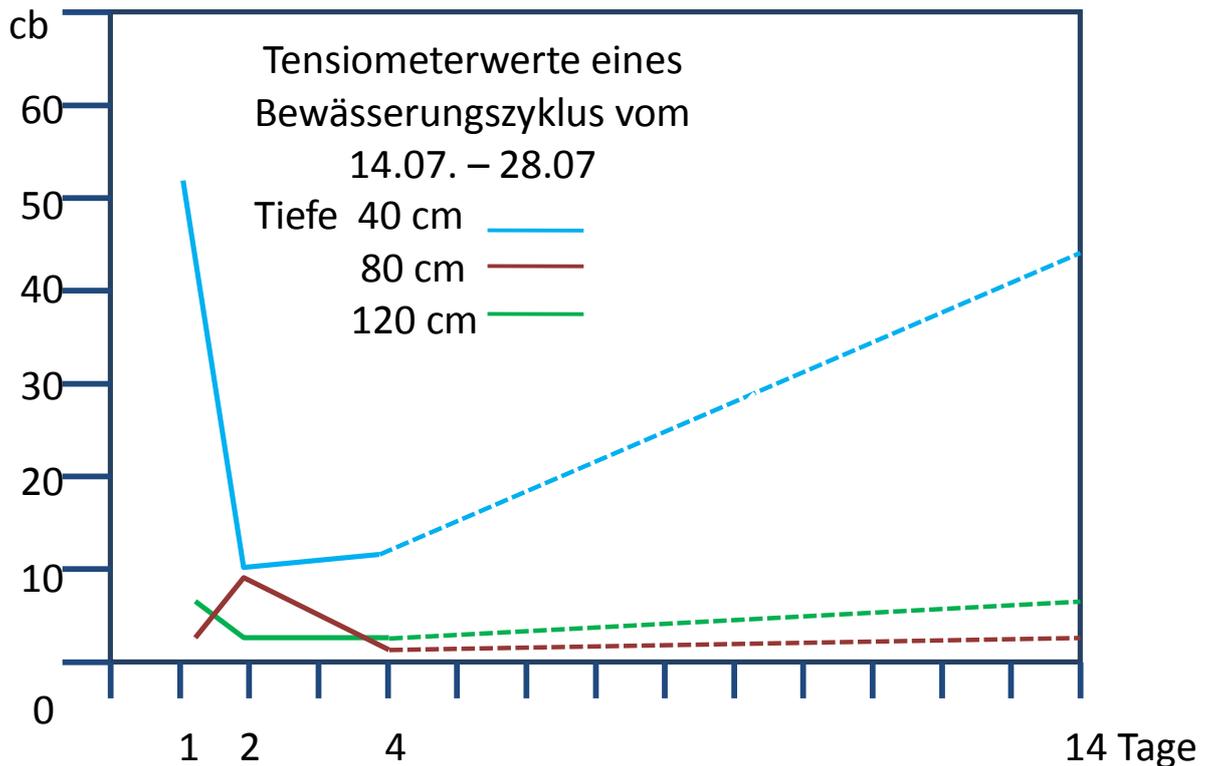


Abbildung 36. Verlauf der Saugspannung zwischen zwei Bewässerungen (4 Messungen) im Sommer für A_3 bei den Tiefen 40 cm, 80 cm und 120 cm

Hier kann man deutlich erkennen, dass bei der oberflächennahen Tiefe (40 cm) die Saugspannung im Boden bis vor eine Bewässerung signifikant ansteigt. Bei diesem Bewässerungszyklus erreicht die Saugspannung 52 cb (pF 6,2) und sinkt nach 24 h auf 11 cb 8 (pF 1,3). Nach 72 h erreicht sie 13 cb (pF 1,5).

An den Tiefen 80 cm und 120 cm, ist festzustellen, dass gleich vor der Bewässerung, die Werte der Saugspannung jeweils nur 6 cb (pF 0,7) und 2 cb (pF 0,2) betragen. Nach der Bewässerung bleiben sie immer unter 10 cb (pF 1,2). Bei diesen Tiefen bleibt der Boden ganz deutlich hinreichend feucht.

7.1.2.5 Vergleich zwischen den Bewässerungsalternativen A_3 , A_4 und A_5

Die Abbildung 37 zeigt den Vergleich des Verlaufs der Saugspannung bei den drei Bewässerungsalternativen A_3 , A_4 und A_5 in der Tiefe 40 cm in Sommer Juni-Juli-Aug 2010.

Man kann eine signifikante Schwankung der Bodenwasserspannung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bewässerungen erkennen. In der Tiefe 40 cm, betragen die maximalen

Werte unmittelbar vor Bewässerung 55 cb, 33 cb und 35 cb jeweils für A₃, A₄ und A₅. Der Oberboden trocknet also bei der Variante A₃ deutlich stärker aus als bei den beiden mit dem Doppelrohr versehenen Varianten A₄ und A₅.

24 h nach der Bewässerungen sinken die Mittelwerte der Saugspannung auf 12 cb für A₃ und 10 cb für A₄ et A₅ und nach 72 h werden die Mittelwerte der Saugspannung 11 cb für A₃ und 8 cb für A₄ et A₅. Zu empfehlen sind nach diesen Ergebnissen die varianten A₄ und A₅.

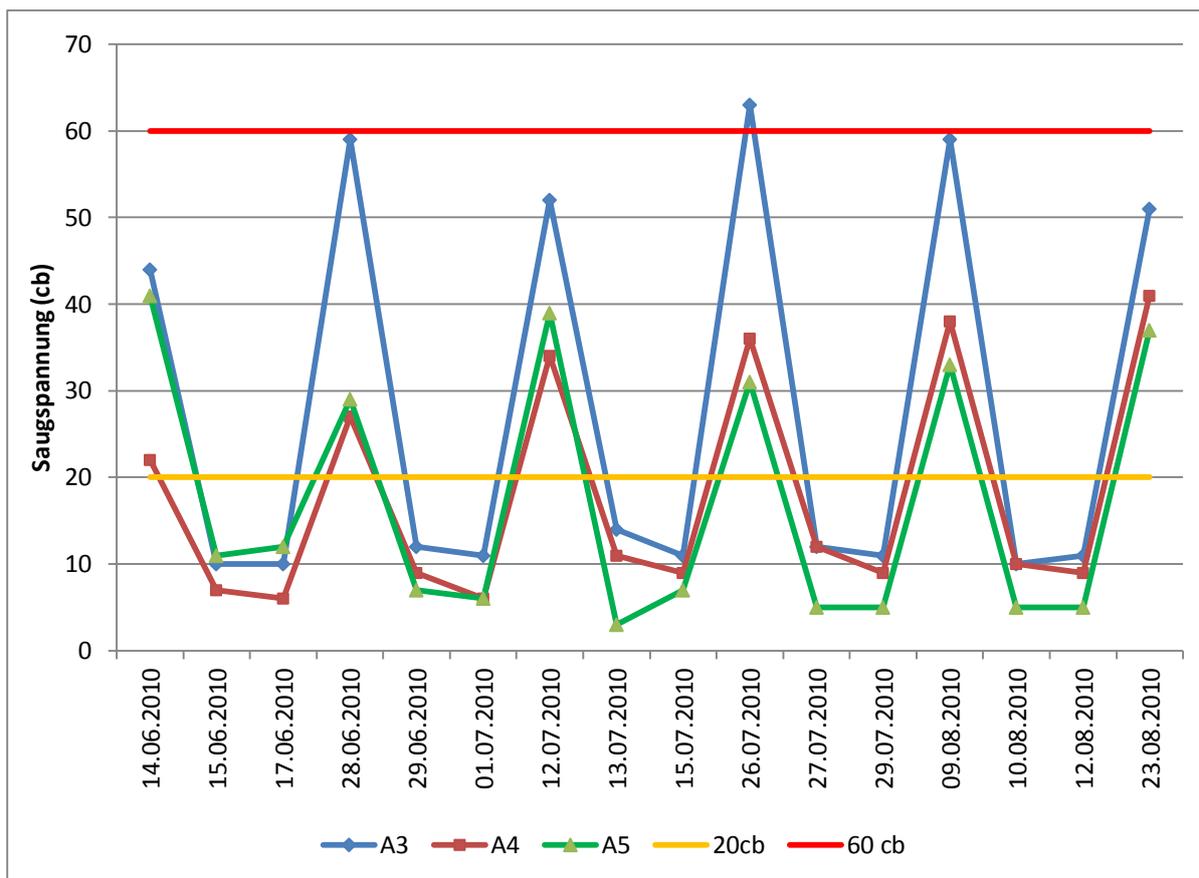


Abbildung 37. Saugspannung bei A₃, A₄ und A₅ bei 40 cm (Jun-Jul-Aug 2010)

Die Abbildung 38 zeigt den Vergleich des Verlaufs der Saugspannung bei den drei Bewässerungsalternativen A₃, A₄ und A₅ an der Tiefe 80 cm in Sommer Juni-Juli-Aug 2010.

In 80 cm Tiefe, betragen die maximalen Werte unmittelbar vor Bewässerung 55 cb, 33 cb und 35 cb jeweils für A₃, A₄ et A₅. 24 h nach der Bewässerungen sinken die Mittelwerte der Saugspannung auf 12 cb für A₃ und 10 cb für A₄ et A₅ und nach 72 h werden die Mittelwerte der Saugspannung 11 cb für A₃ und 8 cb für A₄ et A₅.

Ein Bezug zu den Bewässerungszyklen kann nicht mehr deutlich hergestellt werden. Am ehesten ist dies noch bei Variante A₅ ablesbar, obwohl zwischen 12. 7. und 26.7. keine Schwankung der Messwerte zu verzeichnen ist (Messfehler?).

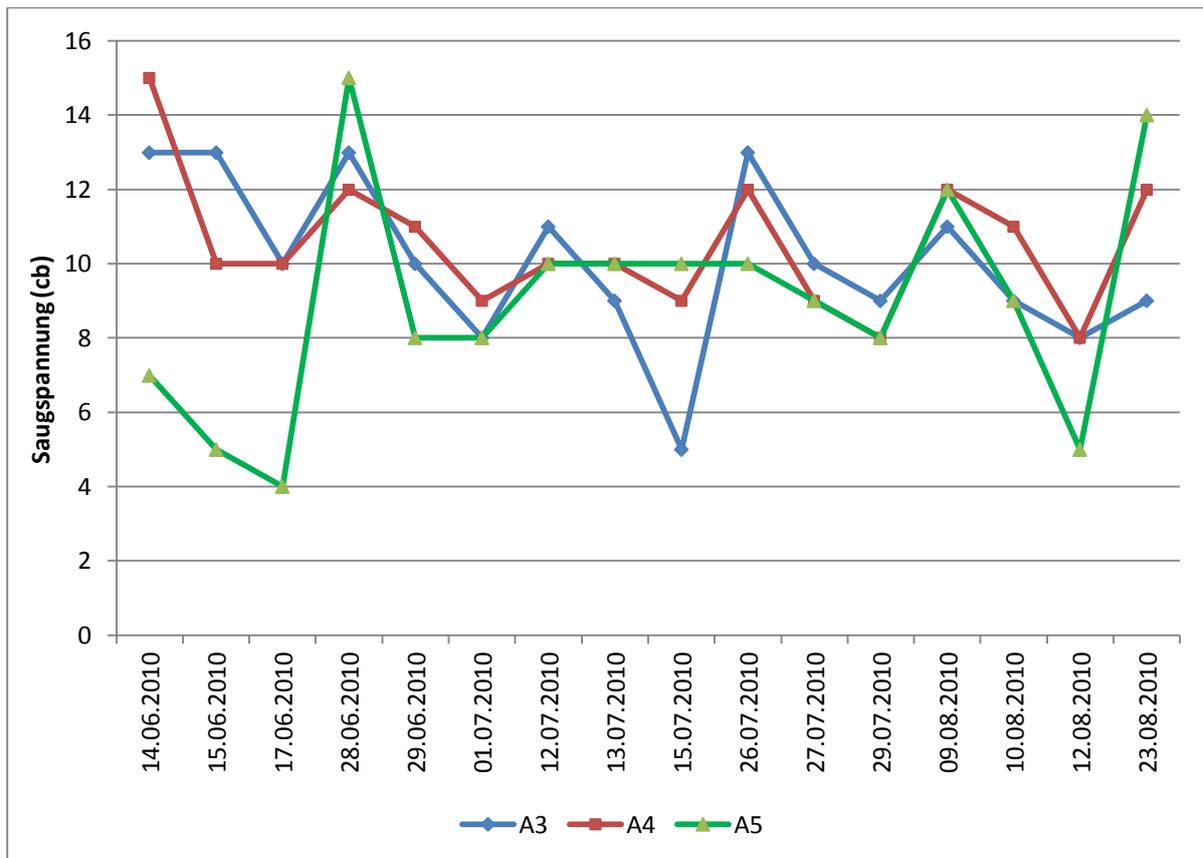


Abbildung 38. Saugspannung bei A₃, A₄ und A₅ bei 80 cm (Jun-Jul-Aug 2010)

Die Abbildung 39 zeigt den Vergleich des Verlaufs der Saugspannung mit den drei Bewässerungsalternativen A₃, A₄ und A₅ in 120 cm Tiefe im Sommer Juni-Jul-Aug 2010. Für die drei Bewässerungsalternativen, sind die Amplituden der Saugspannungen deutlich geringer als in 40 cm Tiefe gemessen und schwanken zwischen 4 cb (pF 0,5) und 15 cb (pF 1,8). Es ist bei den angewandten Bewässerungsmethoden genügend pflanzenverfügbares Wasser vorhanden. Die Bewässerungsmengen im Sommer sind sogar so hoch, dass in dieser Bodentiefe über den Haftwasseranteil hinausgehendes Sickerwasser verfügbar ist.

Nach den Ergebnissen der Saugspannungsuntersuchungen sind also die Bewässerungsvarianten A₄ und A₅, Doppelrohr um die Palmen, der Variante A₃ vor zu ziehen und zu empfehlen.

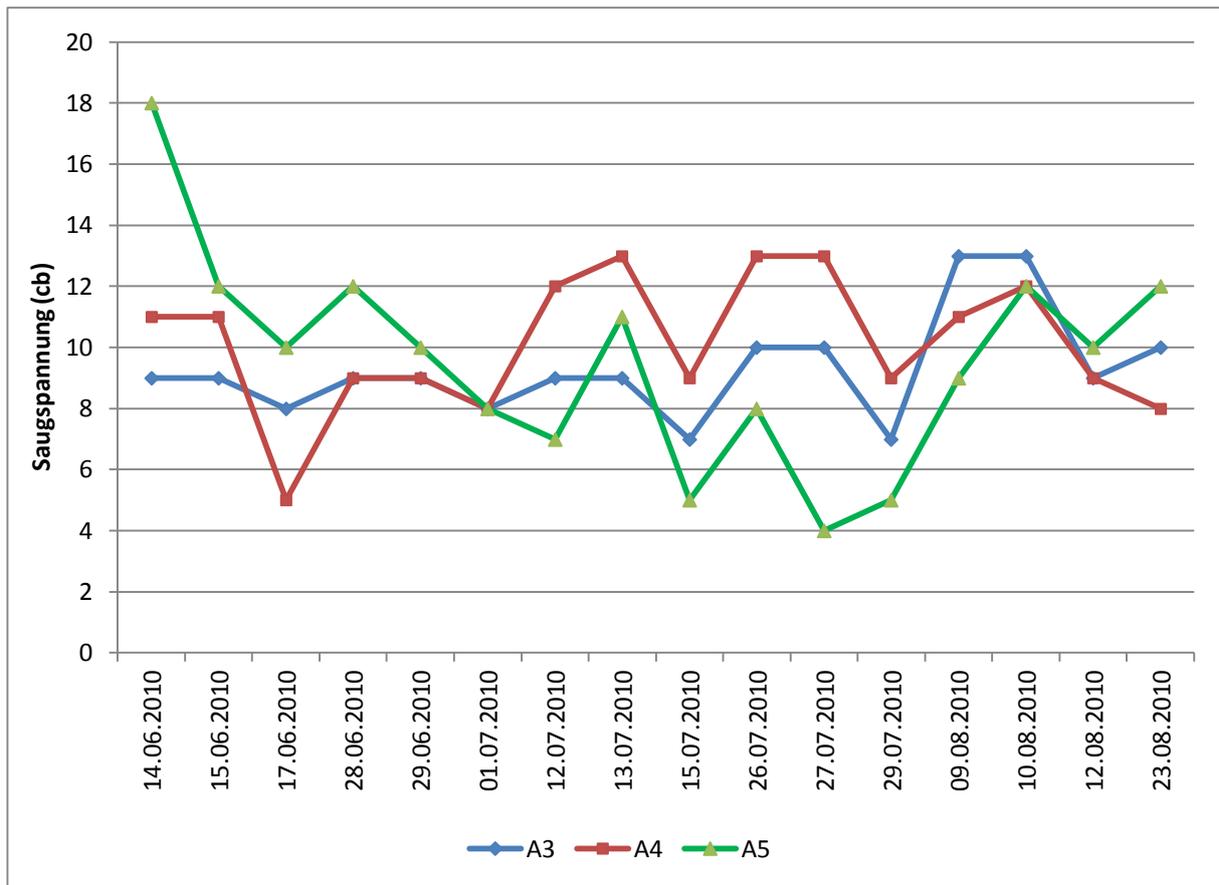


Abbildung 39. Saugspannung bei A₃, A₄ und A₅ bei 120 cm (Jun-Jul-Aug 2010)

7.1.3 Untersuchung des Wasservorrats im Boden

In diesem Abschnitt soll der Wassergehalt des Bodens hinsichtlich der Schwankungen während eines Bewässerungszyklus analysiert werden. Durch die angewandte gravimetrische Methode soll im Vergleich zu den Saugspannungsmessungen direkt der verfügbare Wasservorrat bestimmen werden.

Wie bei den Saugspannungen schon beschrieben wurden drei Messungen des Feuchtigkeitsgehaltes pro Bewässerungszyklus vorgenommen, kurz vor der Bewässerung, 24 Stunden nach der Bewässerung und 72 Stunden nach der Bewässerung.

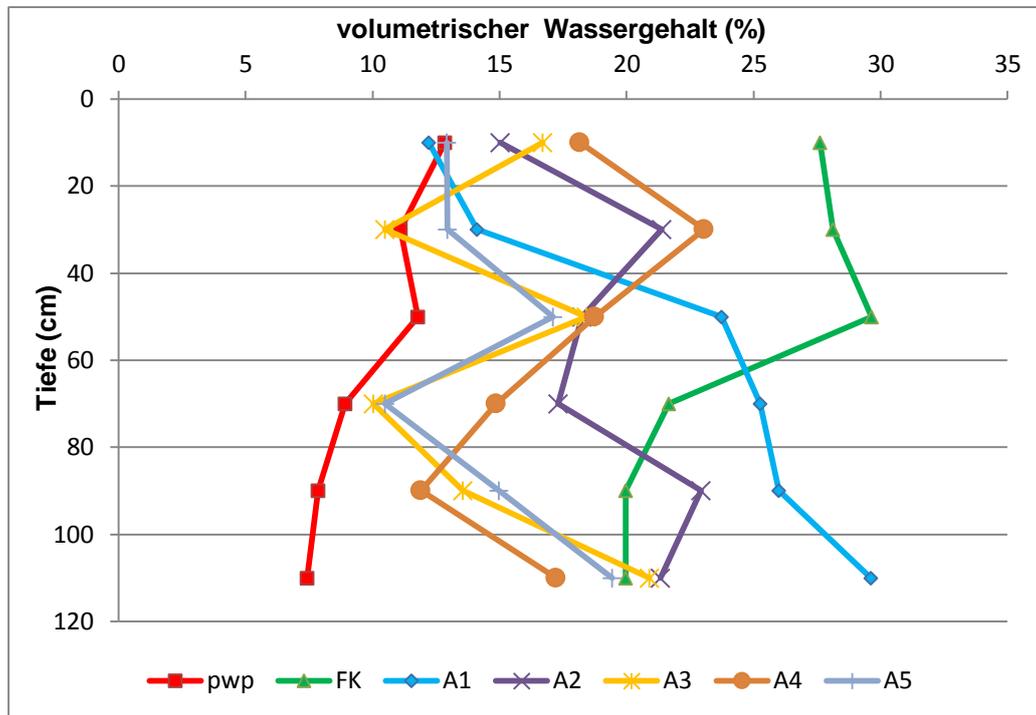


Abbildung 40. Vergleich des Wassergehalts für die Bewässerungsmethoden A₁, A₂, A₃, A₄ und A₅ vor der Bewässerung (30.06.2008)

Betrachtet man die Ergebnisse in Abbildung 40, mit den Messungen vor der Bewässerung am 30.06. 2008, so fällt bis auf Variante A₁ der sprunghafte, wechselnde Tiefenverlauf der Wassergehaltsmessungen auf. Einheitlich sind aber bei allen Bewässerungsvarianten die annähernd gleichen Wassergehalte in der obersten Bodenschicht von 0 – 20 cm (12 – 18 Vol %) und in der untersten von 100 – 120 cm (17 – 22 Vol %). Dazwischen, im Wurzelbereich schwanken die Messwerte kräftig. Lediglich Variante A₄ zeigt einen absolut unerwarteten Verlauf. Die stark wechselnden Schwankungen in den mittleren Bodenschichten sind wohl auf das schon im Methodenteil angesprochene Problem einer sauberen Probennahme beim Einsatz des Schneckenbohrers oder den heterogenen Wurzelbereich der Palmen zurück zu führen. Die Bodenproben wurden 50 cm entfernt vom Stamm genommen. Lediglich bei Variante A₁ lässt sich ein erwarteter, kontinuierlicher Verlauf der Kurve mit ständiger Zunahme des Bodenwassergehaltes nach unten erkennen. Insgesamt wird ein Trend einer Zunahme des Wassergehaltes mit der Tiefe bestätigt. Zwischen 0 und 20 cm beläuft er sich von Wasservolumina, die nahe des permanenten Welkepunktes möglich sind (13 Vol %), bis zur Schicht in 100 bis 120 cm zu Wassergehalten im Bereich des durch Haftwasser (Feldkapazität) möglichen Volumens (20 Vol %). Bei den traditionell bewässerten Varianten geht er sogar darüber hinaus und weist, vor allem bei Variante A₁, Wasservolumina auf, wie sie nur im

Sickerwasserbereich möglich sind. Dieser Verlauf entspricht den Ergebnissen aus den Tensiometer Messungen am gleichen Tag, Abbildung 38. s.o.

Betrachtet man die 24 h nach der Bewässerung gemessenen Bodenwassergehalte, so fällt bei Variante A₄ wieder ein recht sprunghafter Kurvenverlauf auf (Abb. 41). Sicher ist hier der Messwert für die Bodenschicht von 20 – 40 cm fehlerhaft. Von diesem Messwert abgesehen lässt sich aber in allen Kurven eine eindeutige Tendenz bei den Varianten A₁ bis A₅ wie folgt ablesen: Bei allen Bewässerungsvarianten steigen die Bodenwassergehalte zunächst mit der Tiefe; Bei A₁ bis zur Schicht in 20 – 40 cm; bei A₂, A₄ und A₅ bis in die Schicht zwischen 40 bis 60 cm und bei A₃ bis zur Schicht in 60 – 80 cm. Darunter sinken bei allen Varianten die bis zur Schicht in 80 – 100 cm und steigen zur darunterliegenden Schicht wieder leicht an. Im Verlauf zwischen 40 cm und 120 cm verhalten sich alle Tiefenprofile einheitlich und liegen recht dicht zusammen. Interpretiert werden kann dies, wie bei den Tensiometer Messungen, dadurch, dass an der Bodenoberfläche, das Bewässerungswasser, vornehmlich wohl durch Verdunstung, schon wieder aufgebraucht wird. Ebenfalls wie bei den Tensiometer Messungen erkennbar, hat in 24 h hat das Bewässerungswasser die Tiefe von 40 – 80 cm erreicht. Ganz deutlich ist der Bewässerungseinfluss bei den Varianten A₁ und A₅ erkennbar, die gemessenen Werte entsprechen dem Volumen bei der Feldkapazität bzw. übersteigen diesen in den Bereich des Sickerwassers.

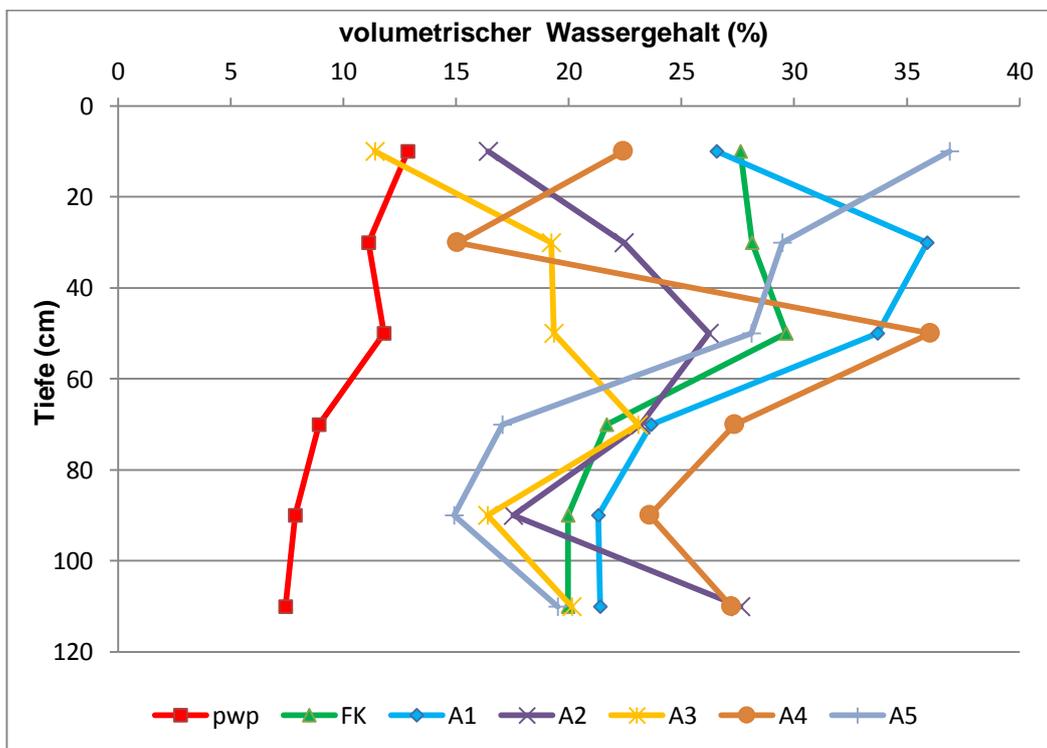


Abbildung 41. Vergleich des Wassergehalts für die Bewässerungsmethoden A₁, A₂, A₃, A₄ und A₅ 24 St nach Bewässerung (30.06.2008).

72 h nach Bewässerung (siehe Abb. 42) ist ein recht einheitlicher, paralleler Tiefverlauf der Bodenwassergehalte bei allen Bewässerungsvarianten feststellbar, ein deutlicher Hinweis darauf, dass die Messungen der Bodenwassergehalte zwar mit Vorsicht zu bewerten sind, aber dennoch brauchbare Ergebnisse liefern. Der Tiefenverlauf hat also Ähnlichkeit zu demjenigen unmittelbar vor der Bewässerung. Die Wassergehalte steigen stetig mit zunehmender Tiefe von Werten um den PWP im Oberboden, bis zu Werten um die Feldkapazität im tiefsten Profilabschnitt. Bei 80 cm, ist die Größenordnung der Werte sehr ähnlich und liegen alle Werte zwischen dem permanenten Welke Punkt und der Feldkapazität. Es hat sich also ein kontinuierlicher Tiefengradient im Bereich des Haftwassers eingestellt. Während der obere Profilabschnitt bis 60 cm schon wieder eine Wasserzufuhr benötigt, besitzt der Profilabschnitt darunter, vor allem zwischen 100 cm und 120 cm noch genügend Feuchtigkeit bzw. ist teilweise gesättigt (A_2). Dies unterstützt erneut die Aussage, dass der tiefere Profilabschnitt nicht nur durch die Bewässerung im Becken gesteuert wird.

Die Varianten A_4 und A_5 verfügen beide über die höchsten Wasserreserven und sind auch nach den Untersuchungen zum Wassergehalt zu empfehlen.

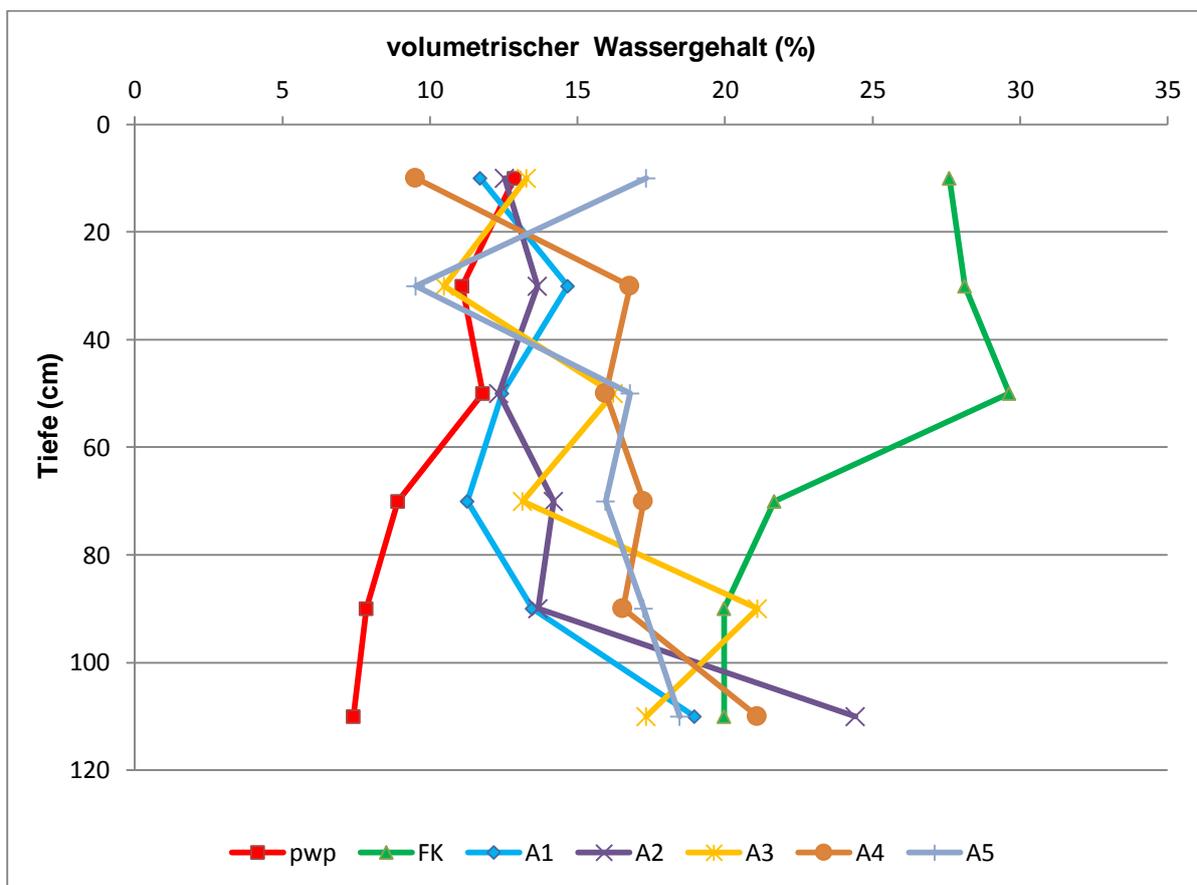


Abbildung 42. Vergleich des Wassergehalts für die Bewässerungsmethoden A_1 , A_2 , A_3 , A_4 und A_5 72 h nach Bewässerung (30.06.2008)

Eine repräsentative Übersicht über die Veränderungen des Wassergehaltes in einem Bewässerungsbecken über einen Bewässerungszyklus zeigt Abbildung 43. Bis auf die oberste Bodenschicht von 0 cm – 20 cm sind in allen anderen, tieferen Profilabschnitten die Wassergehalte 24 h nach der Bewässerung noch höher oder gleich als vor der Bewässerung. Das Bewässerungswasser ist also schon bis in die Tiefe von 80 – 100 cm gesickert. Im Oberboden hat die Evapotranspiration schon wieder den gesamten Vorrat im verfügbaren Haftwasserbereich aufgezehrt. Ab 60 cm ist aber noch genügend pflanzenverfügbares Haftwasser vorhanden. Da sich dies unterhalb von 100 cm im Boden nicht verändert, ist die Zeitspanne zwischen den Bewässerungszyklen gut gewählt.

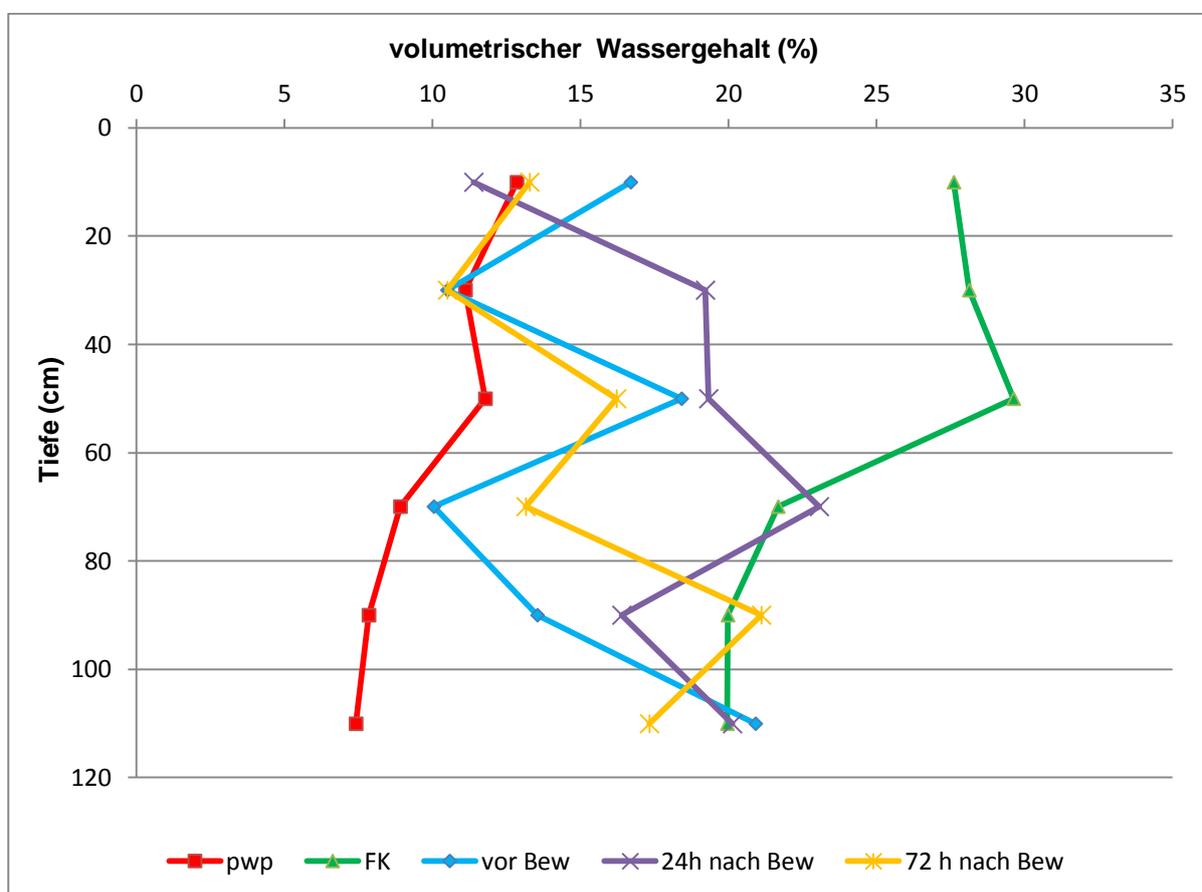


Abbildung 43. Verhalten des Wassergehaltes in einem Bewässerungszyklus mit der Bewässerungsalternative A₃ (30.06.2008)

7.1.4 Studie zum Verlauf der Bodenwasserreserve Rd

In diesem Abschnitt soll der Wassergehalt des Bodens in Hinsicht auf Schwankungen des Wasservorrats analysiert werden, um die verfügbare Wasserreserve Rd zu bestimmen.

Gemessen wurden die Wassergehalte während der Bewässerungen im Zeitraum der Sommermonate Juni, Juli und August der Jahre 2008, 2009 und 2010. Der Zeitraum wurde gewählt um die Monate mit dem höchsten Wasserstress zu erfassen. Während eines Bewässerungszyklus wurden drei Messungen des Feuchtigkeitsgehaltes vorgenommen, kurz vor der Bewässerung, 24 Stunden nach der Bewässerung und 72 Stunden nach der Bewässerung.

Für den Boden bis 120 cm Tiefe der Versuchsparzelle wurde eine theoretische maximale Wasserreserve RU von 174,14 mm berechnet, d.h. in der Bodensäule über 120 cm steht eine Säule von 17,4 cm pflanzenverfügbares Haftwasser zur Verfügung. Die entsprechenden Werte für den oberen Profilabschnitt bis 60 cm sind $RU = 99,25$ mm und für den unteren Profilabschnitt zwischen 60 und 120 cm $RU = 74,89$ mm. Eine differenzierte Betrachtung in den oberen Profilabschnitt, bis 60 cm, und den darunter liegenden wurde wegen der Ergebnisse bei der Betrachtung der Tiefenprofile des Wassergehaltes, in denen unterschiedlicher Beeinflussung erkennbar waren, gewählt.

In den Abbildungen 44-45 sind die aus den Messungen errechneten momentanen Wasserreserven R_d dargestellt. Bei der Berechnung von R_d wird nach der Formel 9 (siehe S. 59) der Todwasseranteil schon abgezogen. Dieser nicht pflanzenverfügbare Haftwasseranteil ist also in den Diagrammen nicht enthalten. Die in den Diagrammen dargestellten Wassergehalte enthalten also den pflanzenverfügbaren Haftwasseranteil in den blauen Farben, der maximal den Wert von RU erreichen kann. Der über diesen Betrag hinausgehende Teil des Wassergehaltes bildet im Boden den Sickerwasseranteil, in den grünen Säulen dargestellt. Da das Haftwasser gegen das Gravitationspotential im Boden gehalten wird, wurde es positiv dargestellt. Umgekehrt bewegt sich das Sickerwasser aus dem Bodenprofil nach unten und wurde deshalb negativ dargestellt. Die für die entsprechenden Zeitpunkte errechneten Wasserreserven R_d setzen sich also, wenn Sickerwasser enthalten ist, aus der Summe beider Säulen, blau und grün, zusammen. Bei dem Sickerwasseranteil kann es sich vor allem im tieferen Profilabschnitt auch um Stau- oder Grundwasser handeln.

Aus der Abbildung 44a, Wassermengen des Gesamtprofils der Bewässerungsvariante A_1 aus dem Jahr 2009, geht hervor, dass die Wasserreserven vor der Bewässerung am 1.6. und 15.6. 2009 sehr niedrig waren, eine Bewässerung also notwendig. Dies ändert sich aber bei den folgenden Bewässerungen, vor allem am 27.7. und 24.8. 2009 wurde eine über den Wert von RU hinausgehende Wasserreserve ermittelt. Eine Bewässerung wäre demnach überflüssig. Da man aber nicht feststellen kann, wie sich die Wasserreserve über die Profiltiefe verteilt, wurden

zur besseren Interpretation die Werte R_d für den oberen Profilabschnitt von 0 – 60 cm und den unteren Profilabschnitt von 60 – 120 cm zusätzlich berechnet und in Diagrammen dargestellt, jeweils Abbildungen b und c.

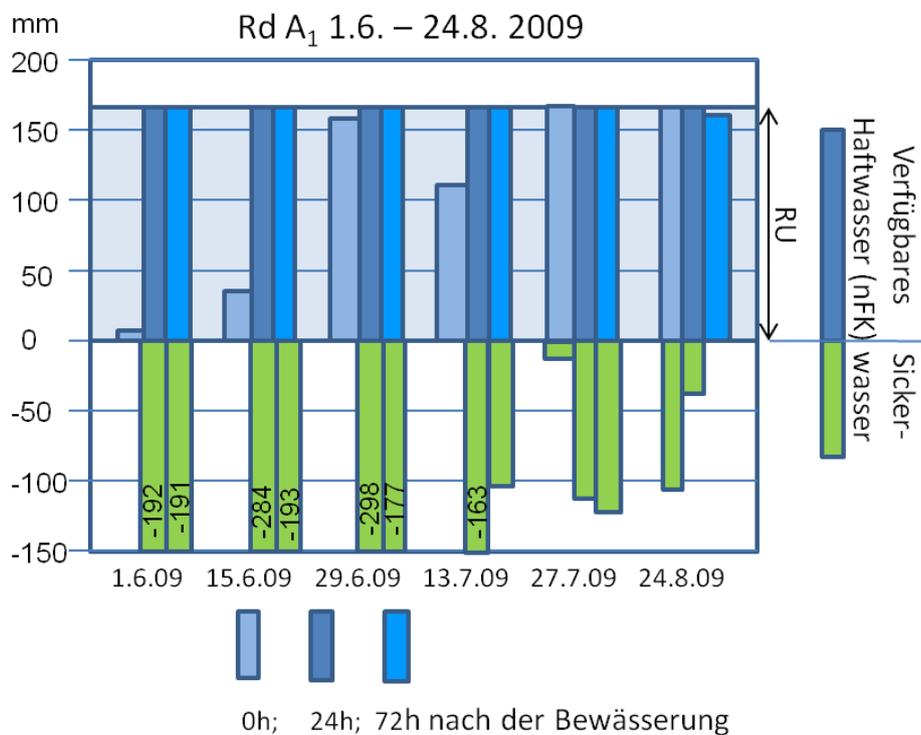


Abb.44a

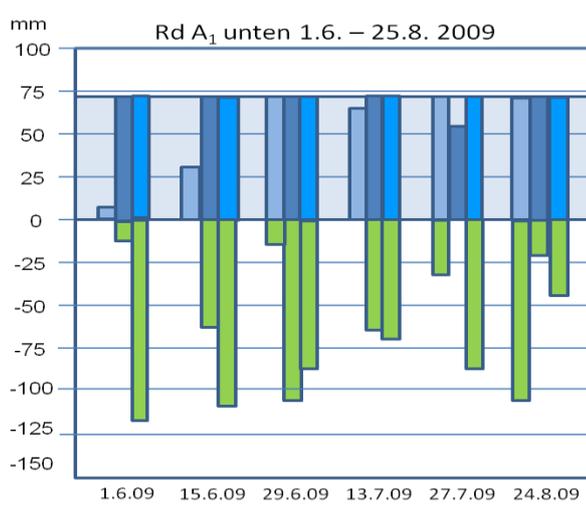


Abb.1b

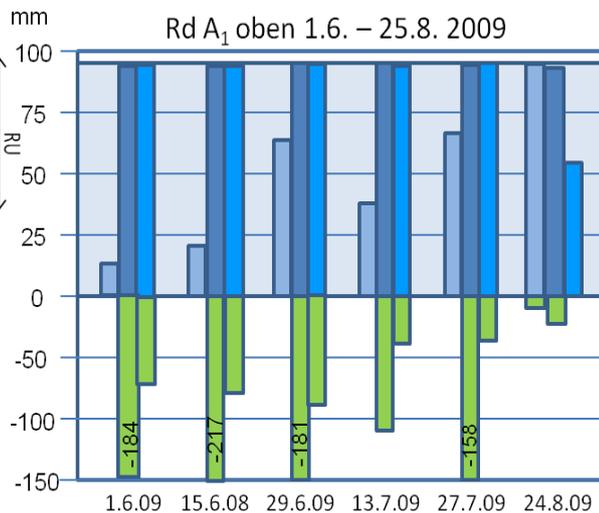


Abb.1c

Abbildung 44. Zeitlicher Verlauf der Wasserreserve von A₁ beim Bewässerungszyklus vom 01.06-24.08.2009

Aus dem Vergleich des oberen und unteren Profilabschnittes geht hervor, dass vor Bewässerungsbeginn die Wasserreserve im oberen Profilabschnitt geringer ist und erst am 24.8. 2009 ein leichter Haftwasserüberschuss zu verzeichnen ist. Im Unterbodenabschnitt ist

am 27.7. und 24.8. 2009 vor Bewässerungsbeginn sogar ein beträchtlicher Sickerwasseranteil berechnet worden. Da die letzte Bewässerung jeweils 14 Tage zurücklag, kann diese hohe Wasserreserve nur durch eine zwischenzeitliche Wasserzufuhr erklärt werden. Dies ist nicht von oben erfolgt, somit bleibt nur eine Zufuhr aus gestiegenem Grund- oder Stauwasserkörper oder durch lateralen Zustrom als Möglichkeit übrig. In allen drei Diagrammen bei der Bewässerungsvariante A₁ steigt mit weiteren Bewässerungen die Wasserreserve vor Bewässerungsbeginn, eine Bewässerung könnte also in zeitlich längerem Abstand oder mit geringerer Wassermenge durchgeführt werden. Auch 24 h und 72 h nach der Bewässerung ist der gesamte pflanzenverfügbare Haftwasserraum mit Wasser gefüllt. Lediglich die Ergebnisse am 24.8. 2009 72 h nach der Bewässerung im oberen und am 27.7. 2009 im unteren Profilabschnitt weichen davon ab. Letzteres kann eigentlich nur durch einen Fehler erklärt werden. Bei dieser Bewässerungsmethode A₁ gibt es keinerlei Wasserstress, sondern einen Überschuss an Wasser im Boden. Man könnte von einer „Luxusbewässerung“ sprechen.

Aus der Übersichtsdarstellung Seite 92 erkennt man, dass bei der Bewässerungsvariante A₃, Wasserzufuhr mit einem Rohr durch Bohrungen oben, rein grafisch ein gegenteiliges Bild erkennbar ist. Vor allem im oberen Profilabschnitt sind kaum über die Haftwassermenge hinausgehende Wassergehalte gemessen worden. Bei den ersten drei Bewässerungen wird sogar die maximal verfügbare Haftwassermenge nicht mehr aufgefüllt, ganz extrem ist dies am 30.6. 2008. Im Unterboden wurde ebenfalls bei den Bewässerungen am 16.6. und 30.6. 2008 nach 24 h und 72 h nicht das gesamte pflanzenverfügbare Haftwasservolumen aufgefüllt. Bei diesem Beispiel muss man also von einer nicht genügenden Wasserversorgung ausgehen. Im unteren Profilabschnitt ist, wie schon oben, die Tendenz erkennbar, dass mit zunehmenden Bewässerungen Sicker, Grund- oder Stauwasser vorhanden ist.



Abbildung 45. Übersicht der Wasserreserven Rd der Varianten A₁ – A₅

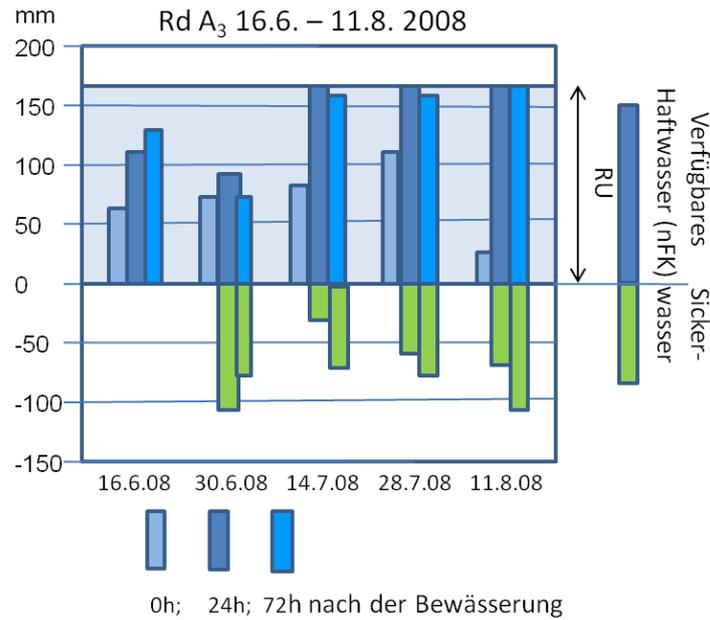


Abb.46a

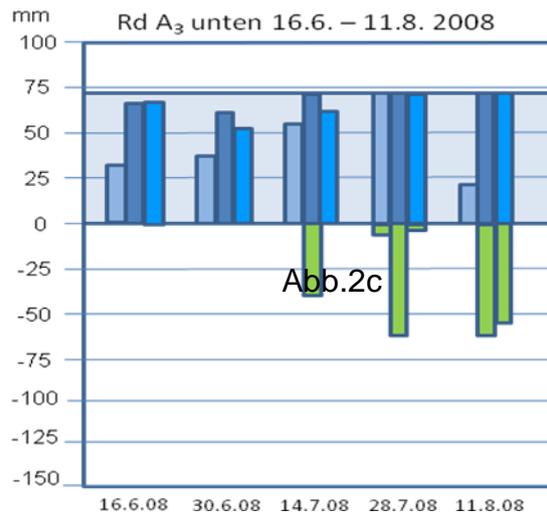
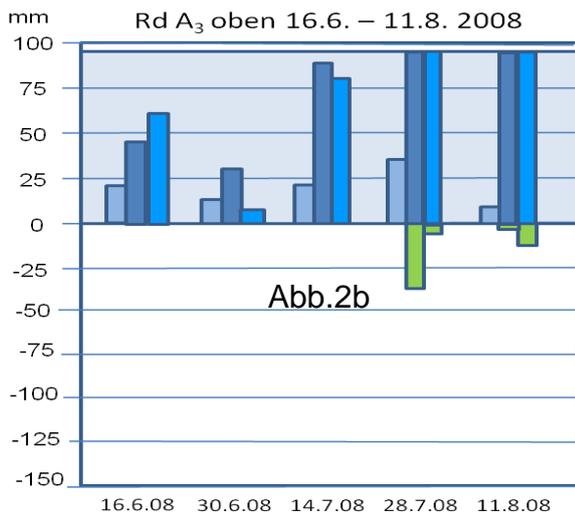


Abbildung 46. Zeitlicher Verlauf der Wasserreserve von A₃ beim Bewässerungszyklus 02.06-25.08.2008

Aus der Übersicht Seite 92 kristallisiert sich die unten nochmals dargestellte Bewässerungsvariante A5 als günstigste heraus, Wasserzufuhr über Doppelrohr direkt über Bohrungen nach unten. Die Darstellung vom Gesamtprofil, 3a, verdeutlicht, dass bei der Bewässerung das gesamte pflanzenverfügbare Haftwasservolumen durch die Bewässerung gefüllt wird. Dies ist ebenfalls getrennt für den oberen und unteren Profilabschnitt gegeben. Zudem wird beim Diagramm des oberen Profilabschnitts erkennbar, dass die Sickerwassermengen nicht sehr hoch sind. Die Wassermenge vor der Bewässerung ist mit etwa

der Hälfte der maximal möglichen Wasserreserve ausreichend und bietet noch Spielraum für ein längeres Intervall zwischen den Bewässerungen. Der untere Profilabschnitt ist wegen Beeinflussung durch Wasser von unten oder lateral in dieser Hinsicht nicht interpretierbar. Der Trend, dass mit zunehmenden Bewässerungen der Anteil an Sicker- Stau- oder Grundwasser zunimmt belegt, wie oben schon beschrieben, diese Beeinflussung. Bei der Methode A₅ ist also ein ausgewogenes Verhältnis von zeitlichem Bewässerungsabstand, Wassermenge, Wasserversorgung und Wasserverteilung um die Palmen gegeben. Somit bestätigen sich die Ergebnisse aus den Tensiometer Messungen und weisen diese Variante A₅ als die beste Bewässerungsmethode aus (siehe Abb. 47). Der Unterschied bei Variante A₄ besteht darin, dass dabei der obere Profilabschnitt nicht immer mit der maximal möglichen Wasserreserve versorgt wird.

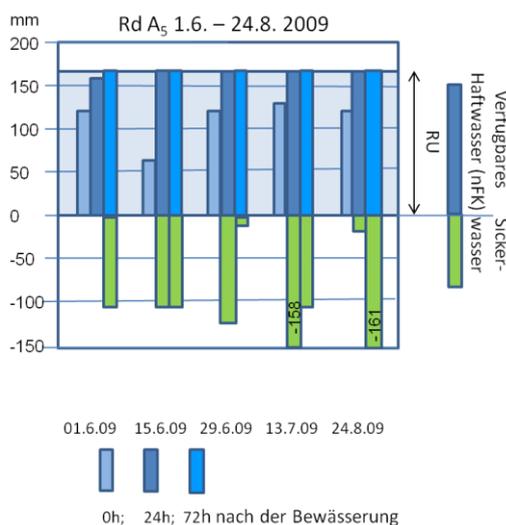


Abb.47a

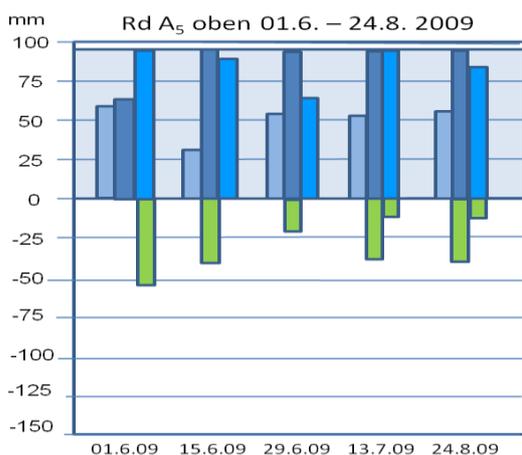


Abb.47b

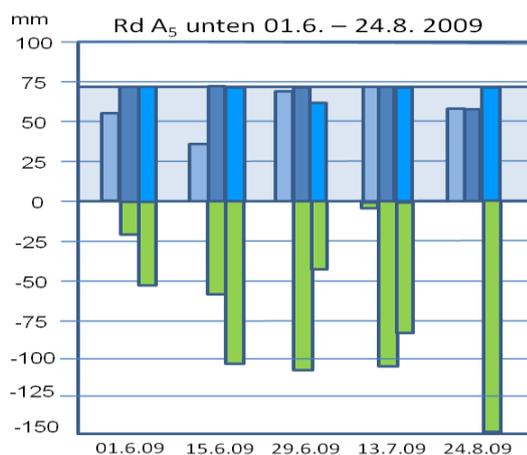


Abb.47c

Abbildung 47. Wasserreserve von A₅ beim Bewässerungszyklus

vom 01.06-24.08.2009

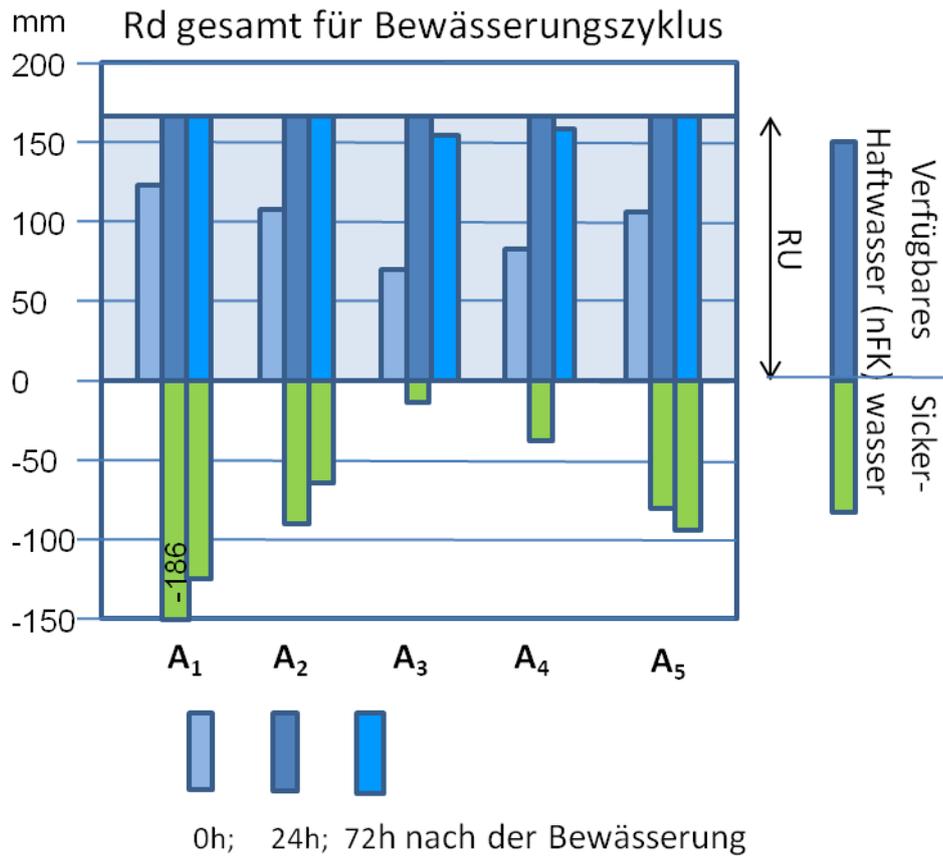


Abb.48a

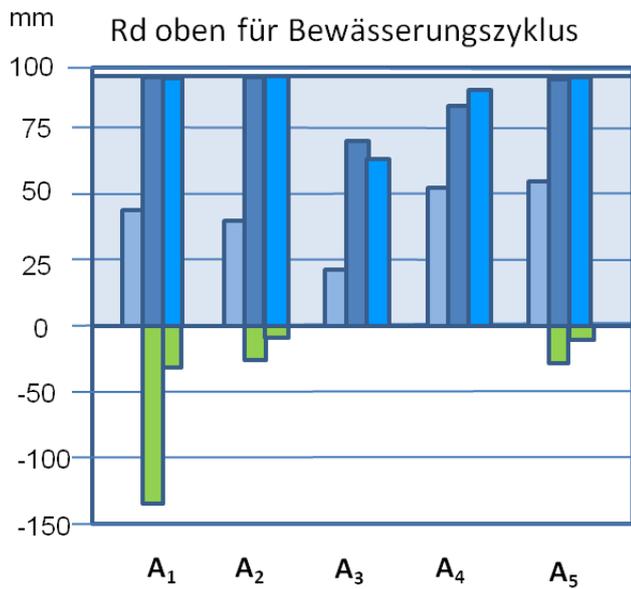


Abb.48b

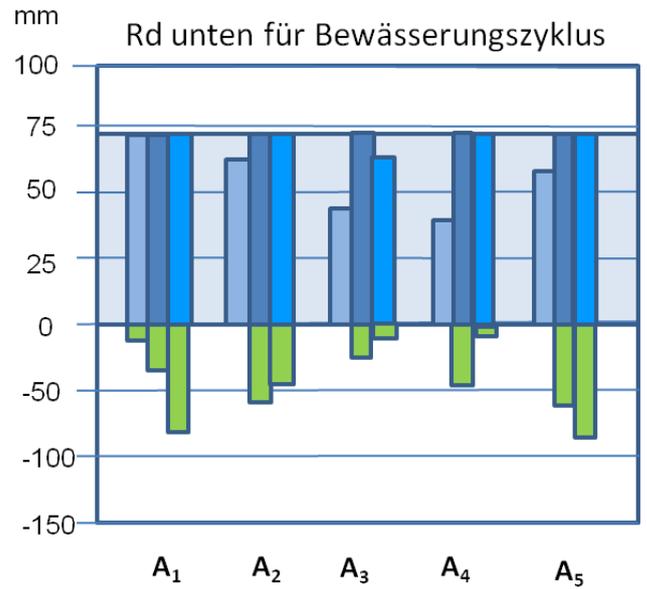


Abb.48c

Abb.6c

Abbildung 48. Rd Wasserreserve für gesamtes Profil Vergleich

7.1.5 Ergebnisse der elektrischen Leitfähigkeit

Die Messungen von pH-Wert und elektrischer Leitfähigkeit wurden an den Proben parallel zum Wassergehalt gemessen. Die Messungen zum pH-Wert ergaben ein recht einheitliches Bild und betragen zwischen 7,6 und 8,4. Eine einheitliche Tendenz mit der Profiltiefe ließ sich nicht erkennen. Es gab auch keinen unterschiedlichen Bezug zu den Bewässerungsverfahren. Wesentlich interessanter sind die Ergebnisse der Messwerten der elektrischen Leitfähigkeit, die zusammenfassend in Tabelle 17 dargestellt sind.

Tabelle 17. Mittelwerte der elektrischen Leitfähigkeit bei den fünf Bewässerungsalternativen (Sommer 2008-2009-2010)

Alternative	Tiefe (cm)	Vor Bew (mS/cm)	Nach 24 St (mS/cm)	Nach 72 St (mS/cm)
A₁	40	3,12	3,36	3,25
	80	3,75	3,90	3,92
	120	4,18	4,45	4,34
A_{2a}	40	3,36	3,34	3,21
	80	3,94	3,85	3,76
	120	4,35	4,33	4,30
A_{2b}	40	3,30	3,20	3,09
	80	3,89	3,65	3,76
	120	4,36	4,11	4,19
A₃	40	3,13	3,29	3,32
	80	3,74	3,85	3,91
	120	4,22	4,37	4,28
A₄	40	3,15	3,32	3,16
	80	3,80	3,89	3,71
	120	4,27	4,34	4,12
A₅	40	3,35	3,21	3,26
	80	3,93	3,77	3,78
	120	4,42	4,19	4,31

Da sich nach den Tensiometer und Wassergehalts Messungen die Bewässerungsvarianten A₁, A₃ und A₅ als A₁ repräsentativ für zu hohe Sickerwassermengen, A₃ zu geringe Haftwassermengen, bis A₅ zu günstigen Verhältnissen, herausstellten, sind nur diese in der Tabelle aufgenommen worden. Die Messungen der jeweiligen Variante sind für die 3 Jahre untereinander angeordnet, um einen zeitliche Entwicklung abschätzen zu können. Um dies besser ablesen zu können sind die gemessenen Randwerte 3 und 5 mS/cm mit einer blauen Linie markiert. Ebenfalls markiert ist die Leitfähigkeit von 4 mS/cm mit roter Linie, die nach der FAO Klassifizierung als Grenzwert für das Unterschreiten eines 100% Ertrages bei Dattelpalmen angegeben wird (Tab. 18).

Tabelle 18. Ertragseinbußen bei Dattelpalmen in Bezug auf elektrische Leitfähigkeit im Boden (FAO, 1988)

Produktionsniveau (%)	100	90	75	50	0
Anbau	(elektrische Leitfähigkeit mS/cm)				
Dattelpalme	4	6,8	11	18	32

Die einzelnen Tiefenlinien in den Diagrammen (Abb. 49) stellen die Messungen direkt vor den Bewässerungen im Sommer der einzelnen Jahre dar. Dabei sind die Farben so gewählt, dass sich bei regelhafter Abfolge eine Farbenfolge von rot über orange nach blau und bei den einzelnen Farben von hell nach dunkel ergeben würde. In rot bzw. dunkel blau sind also der Beginn und das Ende des Bewässerungszyklus im Sommer gekennzeichnet. Eine solche strikte Abfolge der farbigen Tiefenprofile ist in keiner der Diagramme zu erkennen, am besten ist dies vielleicht bei Variante A₃ im Jahr 2010 erkennbar. Dieses grafische Ergebnis umgesetzt kann man also keinen Trend während eines Bewässerungszyklus erkennen, weder in Richtung einer Ent-, noch in Richtung einer Versalzung des Bodens. Erkennbar ist bis auf eine Ausnahme, A₁ im Jahr 2008 bei Bewässerungsbeginn am 2.6. 2008, in allen anderen Fällen eine Zunahme der Leitfähigkeit mit der Profiltiefe. Ebenfalls auffällig ist, dass die

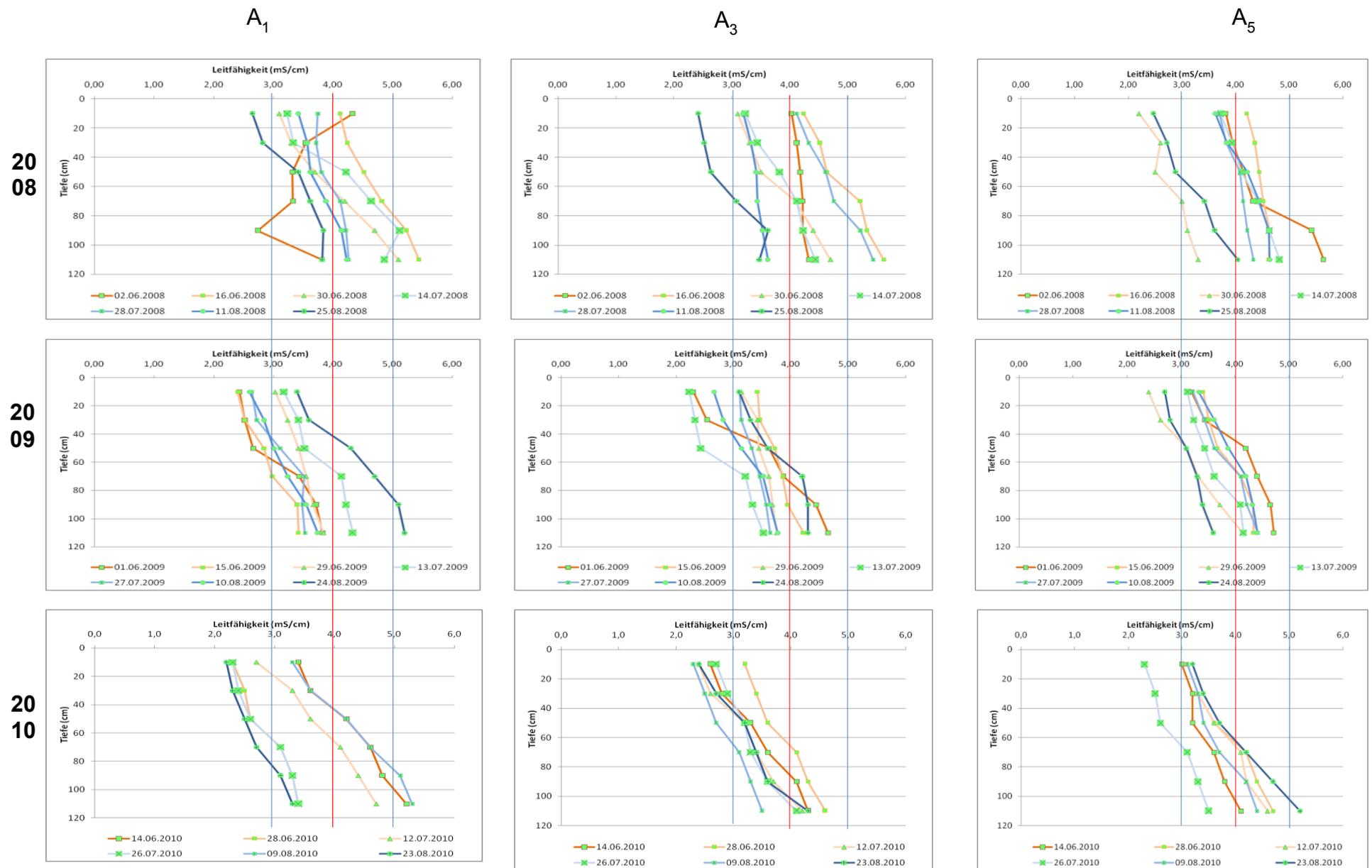


Abbildung 49. Messungen der elektrischen Leitfähigkeit

Messwerte zu Beginn der Messreihe im Jahr 2008 noch weit, von 2 mS/cm bis über 4 mS/cm im Oberboden auseinanderliegen. Die Schwankungsbreite der Messwerte in den einzelnen gemessenen Profiltiefen bleibt bei etwa 2 mS/cm und steigt im Unterboden auf Werte von 3,5 bis 5,5 mS/cm. Auffällig ist, dass diese Schwankungsbreite bei der Variante A₁ über die Jahre 2008, 2009 und 2010 erhalten bleibt. Die Schwankungen bei den beiden Varianten A₃ und A₄ werden dagegen nach Ende der Untersuchung im Jahr 2010 geringer und haben sich bei Variante A₃ fast auf einen Skalenwert, also 1 mS/cm, halbiert. Diese homogener werdende Verteilung der Ionen im Boden bei diesen beiden Bewässerungsvarianten kann durch die bessere Wasserverteilung dank der gezielteren Zufuhr in den Röhrenanordnungen erklärt werden. Ganz gut erkennbar ist auch bei den Varianten A₃ und A₅, dass im Unterboden von Beginn der Untersuchung im Jahr 2008 bis zum Ende im Jahr 2010 eine deutliche Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit auf Werte um 4,5 gemessen werden konnte. Dies ist bei A₁ nicht der Fall. Hieraus kann man ableiten, dass bei den beiden Varianten A₃ und A₅ über die 3 Jahre eine Entsalzung im Unterboden stattgefunden hat. Dass überhaupt durch die Bewässerung eine enorme Entsalzung im Boden der Palmenhaine stattfand, kann man an den vor etwa 30 Jahren vor Anlage des Palmenhains gemessenen Leitfähigkeit von über 20 mS/cm von KADRI A. und SARTORI G. (1988) (siehe Tab. 19) ablesen. Dies ging allerdings zu Lasten der an die Palmenhaine angrenzenden leicht tieferen Senken, in denen sich, wie oben schon beschriebenen Salzseen bildeten, die sich bis heute noch ausweiten.

Tabelle 19. Leitfähigkeit und Ionenkonzentration des Bodenprofils Nr. 8 (nach KADRI A. & SARTORI G. 1988)

EC mS/cm	21,7	9,4	23,1	12,6	16,3
Ca⁺⁺	22,0	31,0	3,4	3,4	3,6
Mg⁺⁺	1,9	1,4	2,2	1,3	2,5
Na⁺	20,6	6,1	17,9	8,6	14,9
K⁺	1,1	0,7	0,9	0,5	0,7
HCO₃⁻	0,8	0,4	0,8	0,5	0,3
Cl⁻	14,0	5,5	18,0	9,0	8,0
SO₄⁻	16,7	35,6	39,0	25,7	37,2

Tabelle 20. Leitfähigkeit und Ionenkonzentration des Bodenprofils N°10. (KADRI A. & SARTORI G., 1988)

EC mS/cm	13,3	25,9	29,2	13,0
Ca⁺⁺	26,4	9,8	7,2	1,4
Mg⁺⁺	1,9	2,8	2,5	1,0
Na⁺	8,4	22,6	18,9	8,7
K⁺	0,9	1,4	0,8	0,6
HCO₃⁻	0,4	0,6	0,8	0,6
Cl⁻	9,0	18,0	17,0	9,0
SO₄⁻	27,6	13,6	9,6	3,4

Betrachtet man die absoluten Werte der elektrischen Leitfähigkeit, so überschreiten diese nur im tieferen Profilabschnitt ab 60 cm die von der FAO angegebene 100 % Ertragsgrenze für Dattelpalmen von 4 mS/cm (s.o. Tab.18, S. 96). In der Bewertung gibt es zwischen den neuen Varianten A₃ und A₅ keinen wesentlichen Unterschied. Beide Varianten führen also nicht zu einer Erhöhung des Salzgehaltes im Boden, obwohl salzhaltiges Bewässerungswasser, derzeit 5 mS/cm eingesetzt werden muss. Die Salzgehalte bleiben in einem für die Dattelpalmen gut erträglichen Bereich, der zu keiner Ertragseinschränkung führt.

7.2 Analyse der Beziehung zwischen der Wasserdosis, dem Bestockungstyp und den Dattelpalm Erträgen

7.2.1 Quantitative Untersuchung des Ertrages

In den Jahren 2007 bis 2011 wurden Ertragskontrollen durchgeführt. Dabei wurden folgende beiden Parameter variiert: die Bewässerungsmenge und die Bestandsdichte. Die Bewässerungsmengen V_i betragen $V_1 = 8.500 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{Jahr}$, $V_2 = 13.600 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{Jahr}$, $V_3 = 17.500 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{Jahr}$, $V_4 = 20.000 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{Jahr}$ und $V_5 = 25.000 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{Jahr}$. Traditionell wird eine Bewässerungsmenge von $17.500 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{Jahr}$ eingesetzt.

Es wurde mit folgenden Bestandsdichten D_i gearbeitet: $D_1 = 64$ Palmen pro ha, entsprechend einem Abstand der Palmen von 12 m, $D_2 = 100$ Palmen pro ha, entsprechend einem Abstand von 10 m, und $D_3 = 156$ Palmen pro ha, entsprechend einem Abstand von 8 m. In diesem Abschnitt wird der Einfluss jedes Bestockungstypen auf den Ertrag der Dattelpalme bei unterschiedlicher Bewässerungsmenge erläutert. Diese Ergebnisse sind der Durchschnitt von fünf aufeinanderfolgenden Jahren.

7.2.1.1 Ertrags Ermittlung für die Bestockungstypen und Bewässerungsmengen

Für den Bestockungstyp $D_1 = 64$ Palmen/ha (Abb. 50), hat man einen maximale Durchschnittsertrag von $180,1 \text{ kg}/\text{Palme}$ und $180,9 \text{ kg}/\text{Palme}$ jeweils für die Bewässerungsdosen von $V_4 = 20.000 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{Jahr}$ und $V_5 = 25.000 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{Jahr}$. Auch bei der Bewässerungsmenge $V_2 = 13.600 \text{ m}^3/\text{ha}$ wurde ein hoher Ertrag pro Palme von 173 kg erzielt, selbst bei der traditionell eingesetzten Menge von $V_3 = 17.500 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{Jahr}$ wurden noch $168,8 \text{ kg}$ pro Palme erzielt. Nur die geringsten Dosis von $V_1 = 8.500 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{Jahr}$ liegt mit einem Ertrag von $147,9 \text{ kg}/\text{Palme}$ weit darunter.

Für den Bestockungstyp $D_2 = 100$ Palmen/ha, liegt der Ertrag in 2 Fällen, V_1 und V_3 höher als bei der Bestandsdichte von 65 Palmen/ha, in den 3 restlichen Fällen niedriger. Der höchste Ertrag wird hier bei der traditionellen Bewässerungsvariante $V_3 = 17.500 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{Jahr}$ erzielt, bleibt aber mit $171,7 \text{ kg}$ pro Palme um $8,4 \text{ kg}$ hinter dem der geringeren Bestockung von 64 Palmen/ha zurück. Berechnet man den Ertrag pro ha, bedeutet das aber bei der um 36 Palmen dichteren Bestockung einen Gesamtertrag von $11.526,4 \text{ kg}/\text{ha}$ (D_1) zu $17.170 \text{ kg}/\text{ha}$ (D_2).

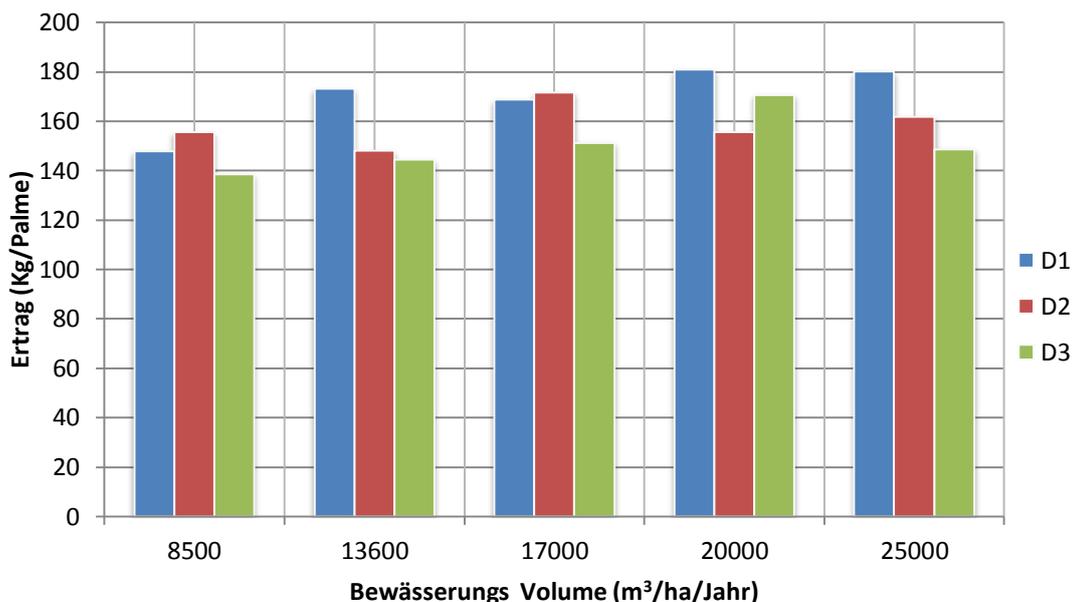


Abbildung 50. Ertrag für die verschiedenen Bewässerungsvolumen und Bestockungstypen

Bei der Bestockungsdichte von 156 Palmen/ha gehen die Erträge pro Palme leicht zurück und erreichen bei Bewässerungsvariante V_4 eine durchschnittliche Menge von 170,6 kg pro Palme. Bei der traditionell üblichen Bewässerungsvariante V_3 wird noch ein Ertrag von 151,2 kg pro Palme erzielt. Auf den Hektar bezogen würde bei 156 Palmen ein Ertrag von 23 587,2 kg/ha erzielt.

Die maximalen Erträge pro Palme werden also mit der traditionell eingesetzten Bewässerungsmenge von 17.500 m³/ha und 20.000 m³/ha erzielt. Eine Erhöhung der Wassermenge steigert den Ertrag nicht mehr.

Bei den Bestockungsdichten kompensiert die höhere Zahl der Palmen bei den unterschiedlichen Varianten die nur geringen Ertragsunterschiede pro Palme. Die Ergebnisse einer 5-jährigen Messreihe würden also nahe legen, die traditionelle Bewässerungsmenge bei zu behalten und den Bestand auf 156 Palmen pro ha, entsprechend einem Abstand von 8 m, zu erhöhen. Fraglich ist bei dieser dichten Bestockung über lange Jahre aber die Anfälligkeit für Parasiten.

7.2.2 Wirkung von Bewässerungsdosen und die Bestockungstypen auf die Fruchtstände der Dattelpalmen

7.2.2.1 Einfluss der Bewässerungsdosis auf die Zahl der Fruchtstände der Dattelpalmen

Die Fruchtstände der untersuchten Dattelpalmen schwanken insgesamt nur gering von 13 bis 15 pro Palme. Dabei gibt es zwischen den Bestandsdichten D_1 und D_2 kaum gravierende Unterschiede. Ganz gering ist der Unterschied zwischen den Bestandsdichten von 64 und 100

Palmen pro ha, wobei aber die geringere Fruchtstandzahl bei der Bewässerungsmenge von 17.000 m³/ha/Jahr bei einer Bestandsdichte von 64 Palmen pro ha überrascht.

7.2.2.2 Auswirkung der Bewässerungsdosis auf den durchschnittlichen Gewicht der Fruchtstände der Datteln

Für die Bestockung D₁, stellt man fest, dass das maximale durchschnittliche Gewicht von ca. 13 kg bei der Wassermenge V₃ erreicht wird, gefolgt von der Dosis V₄ mit 12,7 kg. Der Unterschied ist eigentlich nur zur Wassermenge V₁ (8.500 m³/ha) mit 10,6 kg pro Fruchtstand gravierend. Diese Bewässerungsmenge ist also eindeutig zu gering.

12 kg pro Fruchtstand an Gewicht wird bei der Bestandsdichte von 100 Palmen pro ha erreicht. Der Unterschied ist hier wesentlich geringer und liegt ebenfalls bei der Bewässerungsmenge V₁ mit 11,5 kg pro Fruchtstand niedriger.

Die Varianz im Gewicht der Fruchtstände bei den untersuchten Palmen mit der Bestandsdichte von 156 Palmen pro Hektar ist mit 3,3 kg pro Fruchtstand wesentlich höher und schwankt zwischen 13,8 kg bei der Wassermenge von 20.000 m³/ha bis 10,5 kg bei der Bewässerungsmenge von 8.500 m³/ha. Die stärkeren Unterschiede zeigen an, dass hier durch die hohe Bestandsdichte eine stärkere gegenseitige Beeinflussung der Palmen untereinander vorherrscht.

7.2.3 Wasserproduktivität

Die höchste Wasserproduktivität wurde jeweils bei der Bestockungsdichte von D₃ = 156 Palmen/ha erreicht, mit den folgenden Durchschnittswerten 2,54 kg/m³, 1,66 kg/m³, 1,39 kg/m³, 1,33 kg/m³ und 0,93 kg/m³ bei den fünf Bewässerungsmengen V₁; V₂; V₃; V₄ und V₅ (Abb.51). Die Bestockungsdichten D₁ und D₂ liegen dahinter eindeutig zurück.

Am höchsten ist die Wasserproduktivität natürlich bei der Bewässerungsmenge V₁, 8.500 m³/ha/Jahr. Am Kurvenverlauf zeigt sich aber auch, dass die Wasserproduktivität bei den Wassermengen V₃ und V₄ fast gleichgroß ist. Gewichtet man die Wasserproduktivität mit der Relation vom jeweilig erzielten Ertrag zu maximal erzielten Ertrag bei V₄ so ergeben sich die Werte: 1,9 bei V₁; 1,4 bei V₂; 1,2 bei V₃; 1 bei V₄ und 0,9 bei V₅. Aus Sicht des optimalen Wasserertrages müsste also eine Bewässerungsmenge von 8.500 m³/ha/Jahr bei einer Bestandsdichte von 156 Palmen pro ha empfohlen werden. Dies würde aber zu Ertragseinbußen führen. Unter Berücksichtigung von maximalem Ertrag und Wasserproduktivität wären die Bewässerungsmengen V₃ und V₄ zu empfehlen.

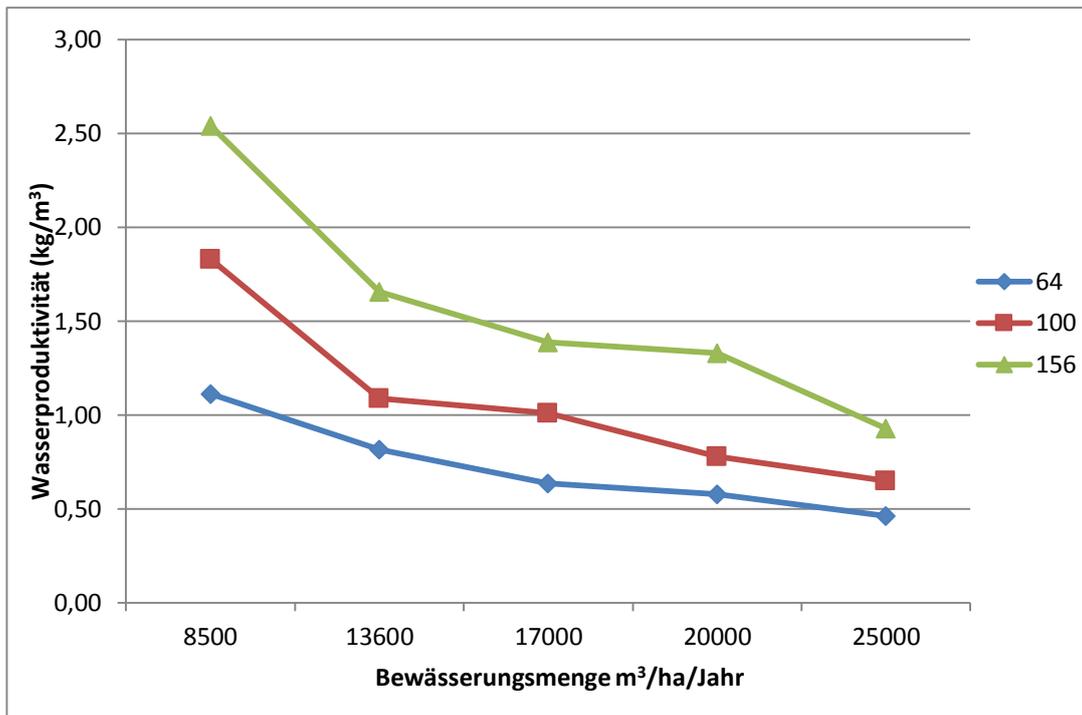


Abbildung 51. Wasserproduktivität für die fünf Bewässerungsdosen und die drei Bestockungstypen.

7.2.4 Qualitative Untersuchung des Ertrages

Ergänzend zu dem ersten Abschnitt der Untersuchung des Ertrages wird im Folgenden der qualitative Aspekt des Ertrages durch die Auswertung der Mittelwerte von fünf aufeinanderfolgenden Erntejahren von 2007 bis 2011 dargelegt.

Die Auswertung der Qualität der Produktion erfolgt durch eine Kategorisierung in drei Typen: gute (G), mittlere (M) und schlechte (S) Qualität.

7.2.4.1 Qualität der Datteln abhängig von der Bewässerungsdosis und den Bestandsdichten

Bei einer Bestandsdichte von 64 Palmen pro ha ist zunächst auffällig ist zunächst, dass die Zahl der Datteln mit geringerer Qualität eindeutig die niedrigste der 3 Klassen ist und immer unter 20 % bleibt (Abb. 52). Dieser Prozentanteil ändert sich auch bei den anderen Bestandsdichten nicht.

Bei der Bewertung hinsichtlich der Bestandsdichten sind also nur die Datteln der mittleren und guten Qualitätsklasse relevant. Das Verhältnis von Datteln mittlerer zu denen höherer Qualität ändert sich bei einer Bestandsdicht von 64 Palmen pro ha mit zunehmender Bewässerungsmenge zu Gunsten der Datteln höherer Qualität, beide Gruppen liegen zwischen 50 und 40 %. Die maximalen Werte erreichen die guten Datteln bei Varianten V₃ und V₄.

Bei der Bestandsdichte von 100 Palmen pro ha schneidet ebenfalls die Bewässerungsvariante V_3 mit über 50% guter Datteln am günstigsten ab, neben Variante V_5 (Abb. 53).

Bei der Bestandsdichte von 156 Palmen pro ha wird der Anteil der schlecht klassifizierten Datteln höher, und erreicht in der bisher besten Bewässerungsvariante V_3 den höchsten Wert von 20 %. Auch nehmen mit höheren Bewässerungsmengen hier die mittleren und guten Klassen ab und liegen unter 40 % (Abb. 54).

Legt man die Ergebnisse der Qualitätskontrolle zu Grunde, müsste die traditionelle Bewässerungsvariante V_3 mit 17.000 m³/ha/Jahr mit einer Bestandsdichte von 100 Palmen pro ha empfohlen werden.

Betrachtet man alle Ergebnisse der Qualitätskontrolle, so muss eine Bewirtschaftung mit einer Bewässerungsmenge von 17.000 m³/ha/Jahr bei einer Bestandsdicht von 100 Palmen pro ha empfohlen werden. Dies führt nach den Untersuchungen bei günstiger Wasserproduktivität zu einem hohen Ertrag von guten Datteln.

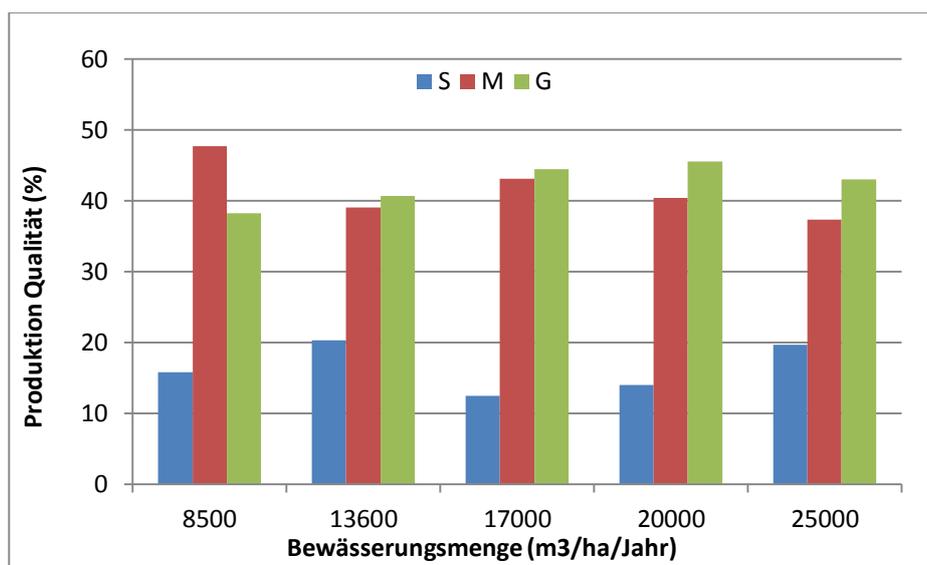


Abbildung 52. Entwicklung der durchschnittlichen Qualität für $D_1 = 64$ Palmen/ha.

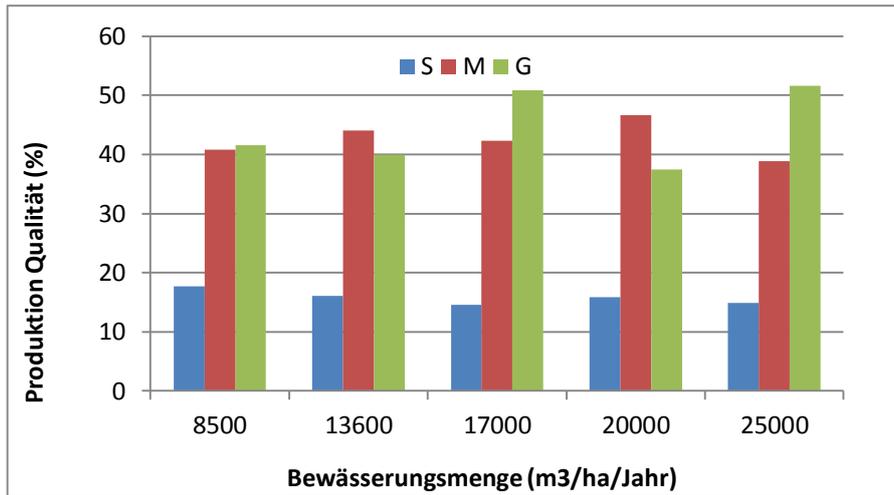


Abbildung 53. Entwicklung der durchschnittlichen Qualität für $D_2 = 100$ Palmen/ha.

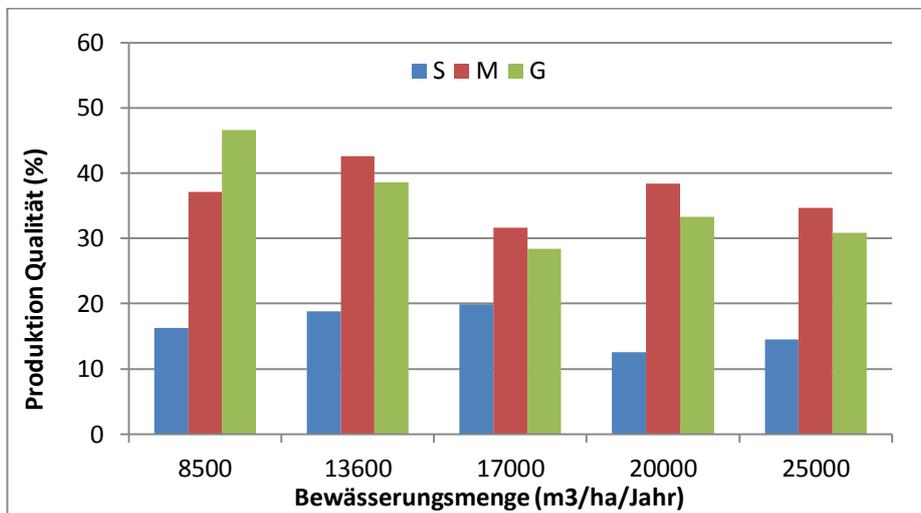


Abbildung 54. Entwicklung der Qualität des Ertrages für den Bestockungstyp $D_3=156$

7.3 Wirtschaftliche Machbarkeitsstudie

Im folgenden Abschnitt wird der finanzielle Aufwand bei Umsetzung der Alternativbewässerung (A₃, A₄ und A₅) mit lokalen Preisen für einen Hektar berechnet. In Tabelle 21 sind die Preise der kleinen hydraulischen Teile, die zur Montage der Bewässerungssysteme dienen, aufgelistet. Diese Teile sind auf dem lokalen Markt leicht zu beschaffen und die lokalen Landwirte sind in der Lage, diese selbst zu montieren

Tabelle 21. gängige Stückpreise der Teile für das wassersparende Bewässerungssystem

Teile	Preis pro Stück (DT)
1 m PVC Rohr 63mm Ø (1,8 mm Wandung)	1,5
1 m PVC Rohr 63mm Ø(4 mm Wandung)	2,8
1 m PVC Rohr 50 mm Ø (1,8 mm Wandung)	1,3
1 m PVC Rohr 50 mm Ø (4 mm Wandung)	2,1
90er Bogen 63mm Ø	0,8
90er Bogen 50mm Ø	0,75
T-Stück 63 mm Ø	1,3
T- Stück 50mm Ø	1,1
Reduzierung 100-63mm	2,5
Reduzierung 63-50 mm Ø	1,47
Ventil 100mm Ø	132,5
Ventil 63mm Ø	33 bis 35
Ventil 50mm Ø	27,5 bis 32,5
Wasserzähler	41

Bei den Alternativen A₃, A₄ und A₅ werden bei der Montage der Beregnungsrohre mit einfacher Rampe folgende Kosten entstehen:

Für die drei verschiedene Bestandsdichten D_i (mit D₁ = 64 Pflanzen/ha, D₂ = 100 Pflanzen/ha, D₃ = 156 Pflanzen/ha) ergibt sich an Material:

- Hauptzuleitungsrohr H: 100m PVC 63Ø
- Ventile: 1 * 100 mm Ø
j * 63 mm Ø
- Reduzierung: 100 – 63 mm Ø
- Nebenleitung N: j * 100m PVC 63 mm Ø
- Material pro Palme:
 - Für die Alternative 3: T Stück 63Ø + Reduzierung 63-50 Ø + Ventil 50+ 4m PVC Ø 50
 - Für die Alternative 4: T Stück 63 Ø + Reduzierung 63-50 Ø + 2 T-Stücke50Ø+ Ventil Ø50 + 2 * 90er Bögen + 8m PVC 50Ø
 - Für die Alternative 5: T Stück 63 Ø + Reduzierung 63-50 Ø + 2 T-Stücke 50Ø + Ventil Ø50 + 2* 90er Bögen + 8m PVC 50Ø

Die Anzahl der Nebenleitungen wird durch j gekennzeichnet, wobei bei D₁ = 64 Pflanzen/ha, j = 4 ; D₂ = 100 Pflanzen/ha, j = 5 und D₃ = 156 Pflanzen/ha, j = 6 beträgt.

In der Tabelle21 sind die jeweiligen Materialkosten pro Alternative und Bestandsdichte zusammengefasst:

Tabelle 21. Materialkosten für die alternativen Bewässerungsvarianten

Alternativen	Bestandsdichte (Anzahl Palmen/ha)	Preis (DT)/ha
A ₃		3.200
A ₄	64	3.693
A ₅		3.693
A ₃		4.655
A ₄	100	5.435
A ₅		5.435
A ₃		6.832
A ₄	156	8.050
A ₅		8.050

Dank bestehender Fördermaßnahmen beim Einbau wassersparender Techniken innerhalb der Parzellen müssen die Bauer nur 20 %; 40 % und 60 % der Material Kosten entsprechend für kleine (< 0,5 ha), mittlere (0,5 - 1 ha) und große Bewässerung (> 1 ha) übernehmen oder bezahlen.

8 Diskussion und Ausblick

8.1 Auswertung der Saugspannungsmessungen

Bei den drei Bewässerungsalternativen A₃, A₄ und A₅, ist die Schwankung der Saugspannung aufgrund von Bewässerung und Austrocknung besonders in der Sommerzeit in der Tiefe 40 cm klar zu erkennen. Die Maximalwerte, also größte Austrocknung des Bodens, werden bei Variante A₃ im Sommer erreicht und überschreiten mit 60 cb eine Saugspannung, die über pF 3,8 liegt. Hierfür empfiehlt der Tensiometerhersteller EIJKELKAMP dringend eine Bewässerung. Die Saugspannungswerte zwischen 2 Bewässerungen, also während eines Bewässerungszyklus liegen zwischen pF 4,2, dem permanenten Welkepunkt und pF 2, der Feldkapazität. Das gesamte pflanzenverfügbare Bodenwasser wird also zwischen zwei Bewässerungen vollständig durch die Palmen und die Verdunstung aufgebraucht. Laut des Vergleichs der Alternativen für den Sommer 2010 (Jun-Jul-Aug), erreichen die maximalen Werte unmittelbar vor Bewässerung 55 cb, 33 cb und 35 cb jeweils für A₃, A₄ und A₅. Der zweiwöchige zeitliche Bewässerungsrhythmus ist also besonders in der Vegetationsperiode im Sommer dringend notwendig. Die Ermittlung der Saugspannung bei der Bewässerungsalternative A₃ hat ergeben, dass für die oberflächliche Tiefe bis 40 cm die Palme chronischen Wasserdefizit Risiken ausgesetzt ist, während bei A₄ und deutlicher mit A₅ solche Risiken ausgeschlossen werden.

Die Schwankungen der Saugspannungswerte nehmen in ihrer Intensität bei den Bewässerungsalternativen A₄ und A₅ ab. Diese bieten also in Hinblick auf Wasserstress mehr Sicherheit. Bei diesen beiden Bewässerungssystemen, bleiben die maximalen Werte der Saugspannung häufig unter 40 cb, daher kann in dieser Bodentiefe ein Wasserdefizit ausgeschlossen werden. Dieser Befund wird vom Hersteller der Tensiometer, EIJKELKAMP, als gewöhnlicher Bereich für Bewässerung bezeichnet.

Die durchgehenden Untersuchungen von 2008 bis 2010 haben auch gezeigt, dass vor allem in 80 cm und 120 cm Tiefe über das ganze Jahr bei den angewandten Bewässerungsmethoden genügend pflanzenverfügbares Wasser vorhanden ist. Dies gilt besonders in 120 cm Tiefe. Hier scheint es, dass sogar über den Haftwasseranteil hinausgehendes Sicker-, Grund- oder Stauwasser vorhanden ist. Der Boden scheint zwischen den Bewässerungen so gesättigt, dass man die Bildung eines temporären Wasserspiegels vermuten könnte.

Im Vergleich der Bewässerungsverfahren hat sich die Alternative A₅ als die geeignetste gezeigt.

8.2 Auswertung der Wassergehalts Ermittlung

Die Wassergehalte bei den 5 Bewässerungsalternativen $A_{1,2,3,4,5}$ wurden durch eine gravimetrische Messungsmethode jeweils für den Sommerzeitraum in 2008, 2009 und 2010 untersucht.

Aus der Betrachtung des Bewässerungszyklus (vom 30.06.2008), kann folgendes festgestellt werden:

- Vor Bewässerung, sind bei allen Bewässerungsvarianten annähernd die gleichen Wassergehalte in der obersten Bodenschicht von 0 - 20 cm (12 – 18 Vol %) und in der untersten von 100 – 120 cm (17 - 22 Vol %) zu erkennen. Dazwischen schwanken die Werte stark über das gesamte Profil.
- Insgesamt wird ein Trend einer Zunahme des Wassergehaltes mit der Tiefe bestätigt.
- 24 h nach Bewässerung, wird bei A_3 , A_4 und A_5 an der Bodenoberfläche, das Bewässerungswasser, vornehmlich wohl durch Verdunstung, schon wieder aufgebraucht. Ein gemessenes Wasservolumen bei A_3 liegt schon unter dem permanenten Welkepunkt.
- 72 h nach Bewässerung, zeigen die Messungen einen kontinuierlichen Tiefengradient im Bereich des Haftwassers. Während der obere Profilabschnitt bis 60 cm schon wieder eine Wasserzufuhr benötigt, besitzt der Profilabschnitt darunter, vor allem zwischen 100 cm und 120 cm noch genügend Feuchtigkeit bzw. ist teilweise gesättigt (A_2). Besonders A_1 und A_2 zeigen das Auftreten von Sickerwasser ab 80 cm. Der Wasserbedarf wird bei weitem überschritten, signifikante Wasserverluste durch Versickerung sind bei dieser Methode deutlich zu erkennen.

Die Ermittlungen des Wassergehaltes während eines Bewässerungszyklus (30.06.2008) bestätigt die zuvor erkannte Tendenz. Während die traditionellen Alternativen A_1 und A_2 substantielle Wasserverluste verzeichnen, bleibt die Alternative A_3 in Hinblick auf Wasserstress für die Dattelpalmen im Sommer ein Risikofaktor.

Letztendlich stellen die Alternativen A_4 und A_5 genügend Bodenwasser bei günstiger Wasserverteilung zur Verfügung.

8.3 Auswertung der Wasserreserve Rd Ergebnisse

Basierend auf den Wassergehalten des Bodens für die Sommerperioden von Jun-Jul-Aug, 2008, 2009 und 2010, wurde die Wasserreserven Rd für ein Profil von 120 cm Tiefe berechnet und zwar; (i) gleich vor Bewässerung, (ii) 24 h nach Bewässerung und (iii) 72 h nach Bewässerung. Der Referenz Wert mit denen der Vergleich der Wasserreserve (Rd) erfolgt beträgt $RU=174,14$ mm für das gesamte Bodenprofil von 120 cm. Die entsprechenden Werte der nutzbare Reserve RU für den oberen Profilabschnitt (0-60 cm) und den unteren Teil Profilabschnitt sind jeweils 99,25 mm und 74,89 mm.

Besonders mit der Bewässerungsalternative A₁, wurde bei dem unteren Profilabschnitt ein Wasserüberschuss festgestellt, der sich sogar in der Bilanz über das gesamte Profil deutlich bemerkbar macht. Bei einem Bewässerungsabstand von 14 Tagen, sowie bei den eingesetzten Wassermengen, ergibt sich bei dieser Methode ein substantieller Wasserverlust, der dann zur Bildung eines oberflächennahen Wasserkörpers führt.

Im Gegensatz zu der traditionellen Bewässerungsmethode A₁, besteht bei der Alternative A₃ ein Risiko, dass sich besonders in dem oberen Bodenabschnitt Wasserstress ergeben kann. Der Einsatz der Alternative A₅ führt zur optimalsten Wasserreserve, besonders in dem oberen Profilabschnitt.

Das bestätigt wieder die zuvor erhaltenen Ergebnisse aus den Saugspannungen und der Messung der Wassergehalte hinsichtlich der günstigen Ergebnisse von Alternative A₅.

8.4 Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit Ermittlung

Aus der Untersuchung über den Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit für die Sommerzeiträume der Jahre 2008, 2009 und 2009, ist eine schrittweise Versalzung bei den Alternativen A₁, A₂ und A₄ ableitbar. Die Alternativen A₃ und A₅ zeigten eher eine Tendenz zur Entsalzung des Profils. Besonders im Unterboden und zwar von Beginn der Untersuchung im Jahr 2008 bis zum Ende im Jahr 2010, wurde eine deutliche Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit auf Werte um 4,5 mS/cm festgestellt. Auf der anderen Seite stellt dieser Wert kein Risiko für den Ertrag dar. Laut FAO (1998), beginnt für die Dattelpalmen eine Abnahme des Ertrages erst ab 6,8 mS/cm und zwar um 10 %. Noch deutlicher zeigt der Vergleich mit den Studien von KADRI und SARTORI (1988) vor Anlage des Palmenhains, dass durch die nachfolgende Bewässerung eine deutliche Entsalzung des Bodens stattgefunden hat.

Im Hinblick auf die elektrischen Leitfähigkeitsprofile, sind die Alternative A3 und A5 zu empfehlen.

8.5 Auswertung der Ermittlung der Erträge

Bei der Ermittlung der Erträge der Dattelpalmen, Sorte „*Deglet Nour*“, wurden während der Untersuchung die beiden Parameter Bewässerungsmenge ($V_1 = 8.500 \text{ m}^3/\text{ha}$, $V_2 = 13.600 \text{ m}^3/\text{ha}$, $V_3 = 17.000 \text{ m}^3/\text{ha}$, $V_4 = 20.000 \text{ m}^3/\text{ha}$, $V_5 = 25.000 \text{ m}^3/\text{ha}$ und die Bestockungstypen ($D_1 = 64$ Palmen pro ha, entsprechend einem Abstand der Palmen von 12 m, $D_2 = 100$ Palmen pro ha, entsprechend einem Abstand von 10 m, und $D_3 = 156$ Palmen pro ha, entsprechend einem Abstand von 8 m) variiert. Die folgenden Ergebnisse wurden gewonnen:

Die maximalen durchschnittlichen Erträge entsprechend einem Bestockungstyp $D_1 = 64$ Palmen/ha, von 180,1 kg/Palme und 180,9 kg/Palme wurden jeweils für die Bewässerungsdosen von $V_4 = 20.000 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{Jahr}$ und $V_5 = 25.000 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{Jahr}$ erreicht. Mit einem Bestockungstyp $D_2 = 100$ Palmen / ha, wurde der höchste Ertrag bei der traditionellen Bewässerungsvariante $V_3 = 17.000 \text{ m}^3/\text{ha}$ erzielt, bleibt aber mit 171,7 kg pro Palme um 8,4 kg hinter dem der geringeren Bestockung von $D_1 = 64$ Palmen/ha zurück. Die maximalen Erträge pro Palme werden also mit der traditionell eingesetzten Bewässerungsmenge von $17.000 \text{ m}^3/\text{ha}$ und $20.000 \text{ m}^3/\text{ha}$ entsprechend 170,6 kg pro Palme und 151,2 kg pro Palme erzielt.

Es wurde klar festgestellt, dass die maximalen Erträge pro Palme mit der traditionell eingesetzten Bewässerungsmenge von $17.500 \text{ m}^3/\text{ha}$ und 20.000 m^3 erzielt wurden und somit eine Erhöhung der Wassermenge den Ertrag nicht mehr steigern würde.

Bei der Auswertung von der Auswirkung der Bewässerungsdosis und dem Bestockungstyp auf die Fruchtstände der Dattelpalmen, kam folgendes heraus:

Die Fruchtstände der untersuchten Dattelpalmen schwanken insgesamt nur gering von 13 bis 15 pro Palme mit einem sehr geringen Unterschied zwischen den Bestandsdichten von 64 und 100 Palmen pro ha.

Im Hinblick auf eine Gewichtsbestimmung der Fruchtstände wurde für die Bestockung D_1 festgestellt, dass das maximale durchschnittliche Gewicht von ca. 13 kg bei der Wassermenge V_3 erreicht wird, gefolgt von der Bewässerungsmenge V_4 mit 12,7 kg.

Qualitativ ergab sich, dass zunächst bei der Bestandsdichte von 64 Palmen pro ha die Zahl der Datteln mit geringerer Qualität eindeutig die niedrigste der 3 Qualitätsklassen (gut; mittlere; schlecht) ist. Dieser Prozentanteil ändert sich auch bei den anderen Bestandsdichten nicht.

Das Verhältnis von Datteln mittlerer zu denen höherer Qualität ändert sich bei einer Bestandsdicht von 64 Palmen pro ha mit zunehmender Bewässerungsmenge zu Gunsten der Datteln höherer Qualität, beide Gruppen liegen zwischen 50 % und 40 %. Die maximalen Werte erreichen die guten Datteln bei den Varianten V₃ und V₄.

Aus der Auswertung der Qualitätskontrolle und vor allem der Wasserproduktivität muss eine Bewirtschaftung mit einer Bewässerungsmenge von 17.000 m³/ha/Jahr bei einer Bestandsdicht von 156 Palmen pro ha empfohlen werden. Diese Variante führt nach den Untersuchungen bei günstiger Wasserproduktivität zu einem hohen Ertrag von guten Datteln.

Um eine Empfehlung für die Entwicklungsbehörde in den Oasen zur Verfügung zu stellen, sollten die folgenden Gesichtspunkte berücksichtigt werden:

Aus der Auswertung der gesamten Ergebnisse (Saugspannung, Wassergehalt, Wasserreserve, elektrische Leitfähigkeit) kann man die Bewässerungsmethoden in die folgenden Clusters kategorisieren (Abb.56).

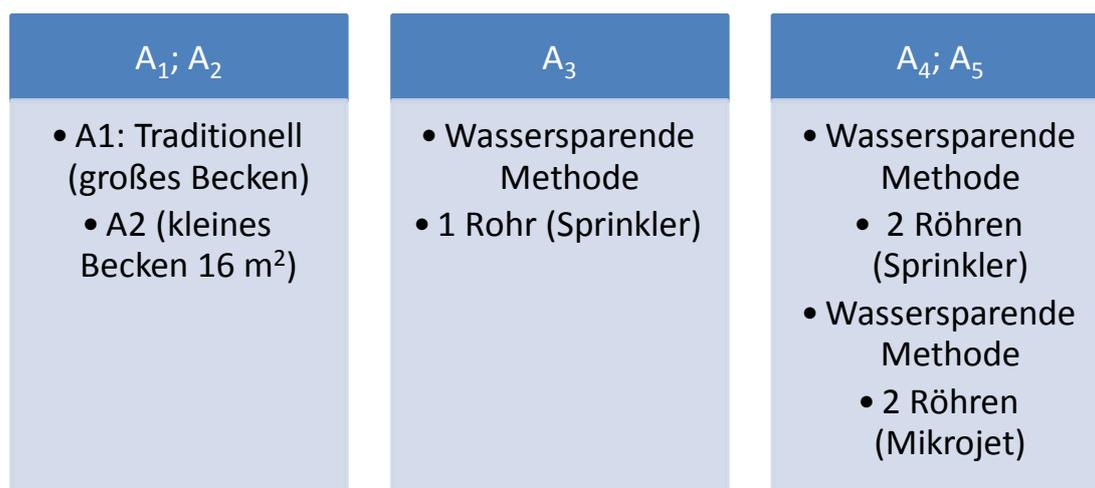


Abbildung 55. Kategorisierungscluster der Bewässerungsmethoden A₁₋₅

Die gesamte Untersuchung hat bei den traditionellen Bewässerungsalternativen A₁, A₂ klar substantielle Wasserverluste festgestellt, besonders in den unteren Bodenprofil Abschnitten. Diese speisen sehr stark die durch die Bewässerung der Palmenhaine entstandenen Salzwasserseen.

Umgekehrt, wurde mit der Bewässerungsalternative A₃ ein deutlicher Wasserstress für die Dattelpalme in der Sommerzeit festgestellt.

Die beiden Alternativen A₄ und A₅ haben im Hinblick auf die gesamte Untersuchungspalette die optimalsten Ergebnisse. Die Alternative A₅ hatte sich besonders durch eine deutlich bessere Wasserversorgung ausgezeichnet, die sich sowohl auf das gesamte Bodenprofil (im oberen

sowie unteren Abschnitt), als auch die Homogenität der Wasserverteilung rund um die Dattelpalme bezieht. Durch die günstigere Verteilung des Wassers ist trotz gleichhoher Bewässerungsmenge mit wesentlich geringeren Sickerwassermengen aus dem Profil in die umgebenden Salzseen zu rechnen.

Aus den Untersuchung zur Bewässerungstechnik, und basierend auf der Studie zu den Erträgen, wird die Alternative A₅ mit der Bewässerungsmenge $V_3 = 17.000 \text{ m}^3/\text{ha}$ und einer Bestandsdichte von $D_3 = 156 \text{ Palme/ha}$ empfohlen.

8.6 Empfehlungen für zukünftige Studien

Im Rahmen dieser Arbeit, konnten die folgenden Punkte nicht vollständig geklärt werden:

- wie kann man nach Bewässerungen die Wasserflüsse zwischen den Palmen im Boden ermitteln und die Befeuchtungszwiebeln bestimmen.
- die Auswirkung von verschiedenen Bewässerungsmengen mit der neuen Technik auf die Bodenchemie sowie die Auswirkung der Wasserreserve für die Palmen. Dies könnte durch die Reduzierung der Wassermenge sowie die Verwendung längerer Bewässerungsabstände untersucht werden.
- die Ausbildung eines oberflächennahen Grundwasserspiegels, der sich in den untersuchten Profilen im Unterboden bemerkbar macht. Dieses Szenario betrifft schon viele Parzellen, die am Rande des Schotts liegen. Untersucht werden müsste, ob diese Wasserspiegelschwankung direkt durch die Bewässerung vor Ort gesteuert wird, siehe hoher Sickerwasseranteil durch traditionelle Bewässerungsmethode, oder durch den Rückstau des Wassers aus den Depressionen in Richtung der Oasen. Letztere bedroht zunehmend die Parzellen mit einer chronischen Überschwemmung und damit einer irreversiblen Versalzung des Bodenprofils.
- die Bestimmung der Bewässerungseffizienz für den traditionellen Etagenanbau innerhalb der Oasen. Im Rahmen der Intensivierung sollte zukünftig die bewässerte Fläche maximal genutzt werden um die Wasserproduktivität zu optimieren. Die untere Anbau Etage soll unter anderem Anbau, die weniger Wasserbedarf haben, beinhalten.
- Um ein besseres Verständnis über die soziale Akzeptanz neuer Techniken in den Oasen zu erhalten, wäre auch eine Befragung wertvoll. Dies könnte soziale Probleme, die während der Untersuchung durch den politischen Umbruch nicht mehr berücksichtigt werden konnten, ans Licht bringen.

9 Fazit

Die Oasen in Südtunesien stehen im Mittelpunkt der Entwicklungspolitik in Tunesien und bleiben der Hauptfaktor, der eine nachhaltige Landwirtschaft in diesem extrem ariden Gebiete bedingt. Die Bewässerung spielt hierbei eine Schlüsselrolle um den hohen Wasserbedarf der Dattelpalmoasen zu gewährleisten. Während der letzten Dekaden hat die Anbaufläche exponentiell zugenommen und damit hat sich der Druck auf die Grundwasser Aquifere verstärkt. Um die Bewässerungspraxis weiter nachhaltig zu entwickeln, haben die Entwicklungsbehörden in diesen Regionen eine Umstrukturierung der Bewässerungsinfrastruktur unternommen. Dies hat unter anderem die Effizienz der Wasserverteilung für das Hauptnetz substantziell von 60 % auf 80 % verbessert. Der restliche relevante Teil dieser Strategie ist die Verbesserung der Bewässerungseffizienz innerhalb der Parzellen. Dafür hat die Behörde als Anreiz für die Bauern, die traditionelle Bewässerung durch moderne Technik zu ersetzen, finanzielle Zuschüsse angeboten. Dieses Förderungssystem ist von der Größe der bewässerten Fläche abhängig. Bei einem Einbau wassersparender Technik innerhalb der Parzellen sollen die Bauer nur 20 %; 40 % und 60 % der Material Kosten entsprechend für kleine (<0,5ha), mittlere (0,5-1 ha) und große Bewässerung (>1ha) übernehmen oder bezahlen.

Der Fokus früherer Forschungsarbeiten in den tunesischen Oasen lag stärker auf den bestehenden Problemen bei der Bewässerungsverwaltung jedoch ohne wirkliche plausible Empfehlung bezüglich einer Verbesserung der Effizienz innerhalb der Parzellen. Die vorliegende Arbeit richtet sich an die Entwicklungsbehörde sowie an die Gemeinschaft der Oasen Bauern. Wichtigstes Ziel ist es, durch moderne Bewässerungstechniken eine optimalere, wassersparende Wasserversorgung der Dattelpalmen zu erarbeiten. Daneben soll erstmals ein besseres Verständnis von Bewässerungsmenge und Ertrag in den Oasen von *Nefzaoua* geschaffen werden.

Der Forschungsansatz dieser Arbeit besteht aus zwei Komponenten, die kombiniert werden sollen. Zunächst werden Bewässerungsalternativen für die traditionelle Überflutungsmethode (die in der Untersuchung in zwei Varianten mit A_1 und A_2 bezeichnet) untersucht. Dafür wurde auf einer Versuchsparzelle in der Oase von *Atillet* in *Kebili*, Südwest Tunesiens unter den realen Bedingungen der Bewässerung der Oasen ein Versuchsfeld installiert. Die drei getestete Alternativen A_3 , A_4 und A_5 entsprechen einer Bewässerungsmethode mit einem einzelnen Rohr, mit doppeltem Rohr und Mikroberegnung. Die Untersuchungen liefen über drei Jahre mit einer detaillierten Untersuchung der Saugspannung, der Messung der Wassergehalte und daraus

berechnet die verfügbaren Wasserreserve, sowie die Messung der elektrischen Leitfähigkeit für jede Bewässerungsalternative.

Der zweite Teil des Ansatzes beschäftigt sich mit dem Zusammenhang zwischen der eingesetzten Bewässerungsmenge, dem Bestockungstyp und dem Ertrag der Dattelpalmen. Die Erträge von fünf Jahren (2007 bis 2011) wurden als Basis benutzt, um die Auswirkung der Faktoren Wasservolumen ($V_1 = 8.500$; $V_2 = 13.600$; $V_3 = 17.000$; $V_4 = 20.000$ und $V_5 = 25.000$) und Bestandsdichte ($D_1 = 64$ Palme/ha; $D_2 = 100$ Palme/ha und $D_3 = 156$ Palme/ha) zu untersuchen.

Die Untersuchungen lieferten praxisrelevante Empfehlungen für die Auswahl der Bewässerungstechnik innerhalb der Parzellen, welche die Alternative A_5 als optimal geeignet bewerten. Diese Technik sorgt für eine bessere Verteilung des Wassers um die Palmen und innerhalb des Bodenprofils. Das Bewässerungswasser ist fast vollständig für die Palmen und die Produktion der Datteln verfügbar. Sie reduziert den Verlust an Bewässerungswasser durch vertikalen und lateralen Abfluss, bei gleichzeitiger Vermeidung einer Versalzung des Bodens. Im Hinblick auf die Wasserproduktivität, sowie die quantitativen und qualitativen Erträge der Palmen, hat sich die Variante Bewässerungsmenge $V_3 = 17.000 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{Jahr}$ mit einer Bestandsdichte von 156 Palme/ha als empfehlungswert herausgestellt.

9.1 Gesamtergebnis

Aus den Untersuchungen und deren Ergebnissen kristallisiert sich die im Folgenden dargestellte Bewertungsmatrix heraus. Diese führt zur Empfehlung der Bewässerungsvariante A_5 , bei einer Bewässerungsmenge von $17.000 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{Jahr}$ und einer Bestockung von 156 Palmen pro ha.

Bewertungsmatrix		
Methode		Empfehlung
Bewässerungsverfahren		
Saugspannung		A4 und A5
Wassergehalt		A5
Bewässerungsmenge		
Erträge		17.000 - 25.000
Wasserproduktivität		13.600 - 17.000
Bestockung		156

10 Literatur

- Abernethy, C.L. (1989):** Performance criteria for irrigation systems. In: Proceedings on International Conference on Irrigation Theory and Practice, Rydzewski, J.R. & Ward, K. (eds.), University of Southampton: UK, 12-15 September 1989.
- Abou-Khaled, A., Chaudhri, S.A. & Abdul-Salam, S. (1981):** Consumption of water by date palms: preliminary results of a date palm irrigation experiment in central Iraq. In: Date Palm Journal N°1: pp 131-132.
- AGRAR (1992):** Aménagement hydro-agricole de la basse vallée de la Medjerda. Projet d'irrigation et de drainage Galaat Andalou-Ras Djebel. Phase I. Medjerda. Rapport principal.
- Al Atiri, R. (2005):** Analyse des politiques hydrauliques. Cas de la Tunisie. In: Bachta, M.S. (ed) Les instruments économiques et la modernisation des périmètres irrigués, 21-22 Novembre 2005, Sousse, Tunisie: 22 pages.
- Al-Ajmi, A., Nortcliff, S. & Simmonds, L.P. (2002):** A physically based one dimensional irrigation management model for soil salinity control. In: Soil Use and Management 18: pp184-190.
- Al-Saikhan, M.S. (2008):** Effect of thinning practices on fruit yield and quality of *Ruzeiz* date palm cultivar (*Phoenix dactylifera* L.) In: Al-Ahsa Saudi Arabia. Asian Journal of Plant Sciences N°7: pp 105-108.
- Auclair, L. & Zaafouri, M.S. (1996):** La sédentarisation des nomades dans le sud tunisien, comportement énergétique et désertification. In : Rapport annuel d'activité de L'Institut des Région Arides : pp 17-24.
- Aubriot, O. (2000):** Comment « lire » un système d'irrigation? Une approche pour l'étude des systèmes irrigués traditionnels, illustrée de cas pris au Népal. Université catholique de Louvain, Document de Travail N° 8 : 21 pages.
- Aubriot, O. (2004):** L'eau, miroir d'une société. Irrigation paysanne au Népal central. Paris, Éditions du CNRS: 321 pages.
- Ayars, J.E., Hutmacher, R.B., Schoneman, R.A., Soppe, R.W.O., Vail, S.S. & Dale, F. (1999):** Realizing the potential of integrated irrigation and drainage water management for meeting crop water requirements in semi-arid and arid areas. In : Irrigation and Drainage Systems N°13 : pp 321-347.
- Bachta, M.S. (1976):** Interaction des systèmes de production et de l'emploi dans le Djérid. Mémoire de 3ème cycle INAT, Tunis : 119 pages.

- Baduel, A. & Baduel, P. (1980):** Le pouvoir de l'eau dans le Sud-Tunisien. In : Revue de l'occident musulman et de la Méditerranée N°30 : pp 101-134.
- Baduel, P.R. (1987):** Politique tunisienne et développement hydroagricole. In : Travaux de la Maison de L'Orient N°14, Lyon : pp 147-174.
- Bahri, A. (1993):** Evolution de la salinité dans un périmètre irrigué de la basse vallée de la Medjerda en Tunisie. In : Sciences du sol, Vol. 31, 3: pp 125-140.
- Bahri, A. (1999):** Achievements and prospects of water resources development and management in Tunisia-The research output, 5th General Assembly of the African Academy of science, Hammamet, Tunisia, 23-27 April 1999: 25 pages.
- Bahri, A. (2000):** Economie de l'eau en irrigation. Numéro Spécial des Annales de l'institut National de Recherche en Génie Rural Eaux et Forêts : 232 pages.
- Bahri, A., Debbarh, A., Garin, P., Jamin, J.Y. & Vincent, B. (2009):** A crop needs more than a drop: towards a new praxis in irrigation management in North Africa. In : Irrigation and Drainage N°58 : pp 231-239.
- Barreteau, O. (1998):** Un Système Multi-Agent pour explorer la viabilité des systèmes irrigués: dynamique des interactions et modes d'organisation. PhD de l'ENGREF: 262 pages.
- Bastiaansen, W.G.M. (1993):** Interpretation of field experiments to arrest rising water tables using SWASALT Model. DLO-Winand Staring Centre, International activities Report N°29, Wageningen, The Netherlands.
- Battesti, V. (2005):** Jardins au désert. Evolution des pratiques et savoir oasiens. Djérid tunisien. Collection A travers champs, IRD, Paris, France : 440 pages.
- Belkhodja, K. (1971):** Origine / Évolution et caractères de la salinité dans les sols de la Plaine de Kairouan (Tunisie), contribution à leur mise en valeur. Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse : 103 pages
- Ben Aissa, I., Bouksila, F., Bahri, A., Bouarfa, S., Chaumont, C. & Hichri, W. (2004):** Gestion de l'eau et des sels au sein d'une oasis du Sud tunisien. In : Hammani, A., Kuper, M. & Debbarh, A. (Eds) Modernisation de l'agriculture Irriguée, 19 au 23 avril 2004, Rabat, Maroc.
- Ben Aissa, I. (2006):** Evaluation de la performance d'un réseau de drainage enterré au sein d'une oasis modernisée du sud tunisien : Cas de l'oasis de Fatnassa-Nord à Kébili, Tunisie, Master Recherche en Eau et Environnement, Université de Montpellier II, Montpellier, France : 119 pages.
- Ben Boubaker, H., Benzarti, Z. & Henia, L. (2003):** Les ressources en eau de la Tunisie : contraintes du climat et pression anthropique: pp 37-52.

- Bernstein, L. (1981):** Effects of salinity and water regime on crop yields. In: Yaron D. (ed) Salinity in irrigation and water resources; Marcel Dekker, INC, USA: pp 47-64.
- Bouguedoura, N. (1991):** Connaissance de la morphogenèse du palmier dattier: étude in situ et in vitro du développement morphogénétique des appareils végétatif et reproducteur. Thèse de Doctorat d'Etat USTHB Alger.
- Cepuder, P. (2011):** Bewässerungswirtschafts Skript : LV-Nr. 815.304. Universität für Bodenkultur Wien, Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft: 96 pages.
- CRUESI (1968 a):** Lessivage du sol gypseux salé de Tozeur. Note technique N°4B : 28 pages.
- CRUESI (1968 b):** Lessivage du sol de Cherfech. Note technique N°4C : 27 pages.
- CRUESI (1970):** Recherche et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées, 1962-1969, Tunis/UNESCO-Paris, rapport technique: 243 pages.
- Cointepas, J.P. (1965):** Irrigation à l'eau salée et drainage en Tunisie. In: Cahiers. ORSTOM, Série Pédologie, Tome III, N°4: pp 299-304.
- Corsale, A. (2005):** Changes and challenges along the Northern Edge of the Sahara. A comparative Approach: 14 pages.
- Coque, R. (1962):** La Tunisie Présaharienne. Etude géomorphologique, (Colin, Paris) : 476 pages.
- El Amami, S. (1968):** Interactions climatiques de deux milieux écologiques, cas d'un système Oasis-Désert. Note de recherche du CRGR, N°34 : 41 pages.
- El Amami, S. & Laberche, J.C. (1973):** Climats et microclimats des oasis de Gabès comparés à l'environnement désertique, Annales de l'INRAT, 46 (3).
- El Fahem, T., Siegfried, T., Kinzelbach, W., Pfeiffer, S. & Ben Baccar, B. (2004):** Isotopic and hydrochemical investigation in the origins of groundwater salinization in the Nefzaoua Oases (Southern Tunisia). In: International Conference on Soil and Groundwater Contamination Risk Assessment and Remedial Measures, Hyderabad, India: 9 pages.
- El Fekih, M. & Pouget, M. (1966):** Les sols des oasis anciennes du sud tunisien. Conférence sur les sols méditerranéens, 12-17 Septembre 1966, Madrid, Espagne : 12 pages.
- Ennabli, N. (1993):** Les aménagements hydrauliques et hydro-agricoles en Tunisie. INAT, Department GREF: 255 pages.
- FAO (2002):** Crops and drops: Making the best use of water for agriculture. Rome, Italy: 22 pages.
- FAOSTAT (2009):** Data on date palm oases production in Tunisia between 1961 and 2007. [online] URL <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>

- Ferry, M. (1996):** La crise du secteur phoenicicole dans les pays méditerranéens. Quelles recherches pour y répondre ? In : Le palmier dattier dans l'agriculture d'oasis des pays méditerranéens, CIHEAM/Estacion Phoenix, A/28 : pp 129-156.
- Gammoudi, T. & Sghaier, M. (2007):** Contribution à l'évolution d'impact de l'émigration Internationale sur la région de départ: cas de l'oasis de Fatnassa, sud-ouest de la Tunisie. In : New Médit 3 : pp 60-64.
- Gallali, T. (1980):** Transferts de sels et matières organiques en zones arides méditerranéenne. Contribution à l'étude pédologique des sols salsodiques formés sur matériaux sédimentaires. Thèse Doctorat d'état, Université de Nancy I : 202 pages.
- Ghazouani, W., Marlet, S., Mekki, I. & Vidal, A. (2007):** Diagnostic d'un périmètre oasien, cas de l'oasis de Fatnassa Nord, Kébili, sud tunisien. In : Actes du troisième atelier régional du projet Sirma (Economies d'eau en systèmes irrigués au Maghreb). Nabeul, Tunisie, 4-7 Juin 2007. Cirad, Montpellier, France, Colloques-Cédérom : 18 pages.
- Ghazouani, W. (2009):** De l'identification des contraintes environnementales à l'évaluation des performances agronomiques dans un système irrigué collectif. Cas de l'oasis de Fatnassa (Nefzaoua, sud tunisien). Thèse de Doctorat, ENGREF, Montpellier, France : 181 pages.
- Gharbi, N. (2009):** Aménagements hydrauliques et amélioration de la gestion de l'eau dans les Oasis du sud. In : Marlet, S. & Mekki, I. (Eds) Atelier "Gestion des ressources naturelles et Développement durable des systèmes oasiens du Nefzaoua", 25-27 Février 2009, Douz, Tunisie.
- GIF (2013):** Groupement Interprofessionnel des fruits et des Dattes (<http://www.babnet.net/cadredetail-72829.asp>).
- Goussi, L. (1996):** Contribution à l'évaluation du fonctionnement d'un réseau de drainage enterré. Cas d'un réseau de drainage enterré de l'oasis Ibn Chabbat de Tozeur. Mémoire du cycle de spécialisation en hydraulique et aménagement rural. INAT : 164 pages.
- Grira, M. (1993):** Hydromorphie et salure des sols des oasis de la région de Réjim Maatoug. Mémoire de fin d'études du cycle de spécialisation de l'INAT : 163 pages.
- Hachicha, M. & Job, J.O. (1994):** Suivi de la salure des périmètres irrigués de Tunisie par conductivimétrie électromagnétique. Note de recherche de L'INRGREF : 87 pages.
- Hachicha, M., Mtimet, A., Zidi, Ch. & Job, J.O. (1995):** La salinisation des sols et la gestion des eaux dans les oasis. Actes de séminaire : Tozeur, 8-9 Décembre 1993. Sols de Tunisie. Bulletin de la Direction des Sols N°16.

Hachicha, M. (1998): Mise en valeur des sols salés. Organisation, fonctionnement, évolution des sols salés du nord de la Tunisie. Thèse de Doctorat ENSA Rennes: 229 pages.

Hachicha, M., Zimmer, D., Bahri, A. & Bouarfa, S. (1998): Drainage water disposal in Tunisian continental oasis; Problems, concerns and solutions, ICID workshop on the use of saline and brackish water for irrigation. Bali, Indonesia, July 23-24, 1998.

Hachicha, M. (1999): Utilisation des eaux saumâtres. Problématique, acquis et perspectives de recherche. Edition INRGREF : 12 pages.

Hamdane, A. (2007): Tunisie. In : UNEP, MAP et Plan Bleu (Eds) Gestion de la demande en eau, progrès et politiques : Actes du 3ème atelier régional sur l'eau et le développement durable en Méditerranée, 19-21 mars 2007, Saragosse, Espagne. MAP Technical Reports Series N°168: pp 647-688.

IRA (2007): Bodendichte und Wassergehalte für pF 2 und pF 4,2 der Parzelle in Ailet, Kebili: 01 pages.

Hemm, V. & Straub, A. (2007): Tests des Techniques Nouvelles d'irrigation des Palmiers Dattiers dans les Oasis de la Région Kébili. Rapport de stage; Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Bereich Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe.

Job, J.O., Loyer, J.Y. & Ailoul, M. (1987): Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. In : Cahiers de l'ORSTOM, série Pédologie Tome XXIII : pp 123-131.

Job, J. O. (1992): Les sols salés de l'oasis d'El Guettar. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II: 150 pages.

Job, J.O., Tabbagh, A. & Hachicha, M. (1995): Détermination par méthode électromagnétique de la concentration en sel d'un sol irrigué. In : Journal of Soil Sciences N°75: pp 463-469.

Kacem, M. (1990): Contribution à l'étude de la réutilisation des eaux de drainage dans le gouvernorat de Kébili. Cas du périmètre de Smida. Mémoire du cycle de spécialisation en Génie Rural INAT : 127 pages.

Kadri, A. & Sartori, G. (1988): Etude pédologique d'un nouveau périmètre irrigué en Ailet dans la région de Nefzaoua Tunisien: 10 pages.

Kadri, A. & Ranst, E.V. (2002): Contraintes de la production oasienne et stratégies pour un développement durable. Cas des oasis de Nefzaoua (Sud tunisien). In : Science et changements planétaires / Cahiers Sécheresse N° 13 : pp 5-12.

Kramer, P.J. (1980): Drought, stress, and the origin of adaptations. In: N.C. Turner and P.J. Kramer, editors, Adaptation of plants to water and high temperature stress. John Wiley & Sons, New York.

- Kassah, A. (1980):** Problèmes des oasis tunisiennes. In : Faculté des Lettres et sciences humaines de Tunis 2^{ème} série: Géographie VI: pp 391-412.
- Kassah, A. (1989):** Le Sahara tunisien ou la sédentarisation en voie d'achèvement. In : Le nomade, l'oasis et la ville. Publi. URBAMA Tours Fasc. 20 : pp 73-89.
- Kassah, A. (1996):** Les oasis tunisiennes. Aménagement hydro-agricole et développement en zone aride. Publi. CERES série géographique N°13 Tunis : 345 pages.
- Kassah, A. (1998):** Eau et développement agricole au Sahara maghrébin: enjeux, conflits et arbitrages. In : Cahiers Sécheresse N° 9 : pp 95-102.
- Kassah, A. (2002):** Irrigation et développement agricole dans le sud tunisien. In: Méditerranée Tome 99 N°34: pp 21-26.
- Kuper, M. & Habib, Z. (2002):** Containing salinity through irrigation management: the case of the Fordwah area in Pakistan. In : Marlet S. & Ruelle P. (Eds) « Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation » Actes de l'atelier du PCSI, 28-29 mai 2002, Montpellier, France CEMAGREF, CIRAD, IRD.
- Kuper, M., Bouarfa, S., Errahj, M., Faysse, N., Hammani, A., Hartani, T., Marlet, S., Zaïri, A. & Lahmeyer-SCET Tunisie. (1999):** Orientations stratégiques du secteur de l'eau. Rapport provisoire. Direction Générale des Ressources en Eau : 62 pages.
- Lasram, M. (1990):** Les systèmes agricoles oasiens dans le sud de la Tunisie. Options Méditerranéennes, Série A (11), CIHEAM / CEE, DG VIII: 7 pages.
- Le Gal, P.Y. & Papyh, F. (1998):** Co-ordination Processes in a Collectively Managed Cropping System: Double Cropping of Irrigated Rice in Senegal. In: Agricultural Systems N° 57: pp 135-159.
- Loeper, T. (2008):** Alternative Bewässerungstechniken für den Dattelanbau in den Oasen der Region Nefzaoua (Kébili / Südtunesien). Diplomarbeit; Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Bereich Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe: 208 pages.
- Lorite, I.J., Mateos, L., Orgaz, F. & Fereres, E. (2007):** Assessing deficit irrigation strategies at the level of an irrigation district. In : Agricultural Water Management N°91 : pp 51-60.
- Louhichi, K. (1999):** L'amélioration de l'efficience de l'irrigation pour une économie d'eau: cas d'un périmètre irrigués en Tunisie, Rapport final, CIHEAM-IAMM, Plan bleu, PNUE: 57 pages.
- Louhichi, K., Kanellopoulos, A., Janssen, S., Flichman, G., Blanco, M., Hengsdijk, H., Heckelei, T., Berentsen, P., Oude Lansink, A. & Van Ittersum, M.K. (2010):** A bioeconomic farm model for simulating the response of EU farming systems to agricultural and environmental policies", In: Agricultural Systems, Vol.103: pp 585-597.

- Luedeling, E., Nagieb, M., Wichern, F., Brandt, M., Deurer, M. & Buerkert, A. (2005):** Drainage, salt leaching and physico-chemical properties of irrigated man-made terrace soils in a mountain oasis of northern Oman. In: *Geoderma* N°125: pp 273-285.
- Malano, H. & Burton, M. (2001):** Guidelines for benchmarking performance in the irrigation and drainage sector. IPTRID Secretariat, FAO, Rome, Italy: 29 pages.
- Mamou, A. (1976):** Contribution à l'étude hydrogéologique de la presqu'île de Kébili.
- Mamou, A. (1990):** Caractéristiques et évaluation des ressources en eau du Sud tunisien. Thèse doc. Es sc. Uni. Paris Sud.
- Mamou, A. & Hlaimi, A. (1999):** Les Nappes de la Nefzaoua. Caractéristiques et Exploitation. Ministère de l'agriculture, DGRE, Tunis.
- Mamou, A. & Kassah, A. (2002):** Eau et développement dans le sud tunisien. Publi. CERES série géographique N°23, Tunis : 286 pages.
- Marlet, S., Hammami, A., Hartani, T., Kuper, M. & Zairi, A. (2006):** Enjeux et contraintes liés à la modernisation de l'agriculture irriguée dans les pays du Maghreb. In: *Agro Line* 54: pp 21-30.
- Marlet, S., Bouksila, F. & Bahri, A. (2009):** Water and salt balance at irrigation scheme scale: a comprehensive approach for salinity assessment in a Saharan oasis. In : *Agricultural Water Management* 96: pp 1311-1322.
- Martel, P. (1966):** Les confins saharo-tripolitains de la Tunisie 1881-1911, PUF, Thèse de Géographie.
- MEAT (1998):** Ministère de l'environnement et de l'Agriculture. Programme d'action national de lutte contre la Désertification : 112 pages.
- MEHAT (2007):** Schéma directeur d'aménagement de la région économique du sud-ouest. Ministère de L'équipement, d'habitat et de l'aménagement du Territoire, Direction générale de l'aménagement du Territoire. Centre national de Télédétection.
- MEDD (2010):** Ministère de l'Environnement et du Développement Durable. Etude sur la gestion durable des systèmes oasiens, document provisoire.
- Mechergui, M. & Snane, M. H. (1995):** Diagnostic et modélisation de la gestion de l'eau a la parcelle dans quelques oasis du sud tunisien. In: *Cahier CERES* 12: pp 87-106.
- Mechergui, M. & Van Vuren, G. (1998):** Improved Irrigation efficiencies in Tunisian Oases. In: *ILEA Newsletter*: pp14-15.
- Mensching, H. (1968):** Tunesien, eine geographische Landeskunde. *Wissenschaftliche Länderkunden*, Darmstadt.

- Mermoud, A. & Morel-Seytoux, H.J. (1989):** Modélisation et observation du flux hydrique vers la surface du sol depuis une nappe peu profonde. In : Hydrologie Continentale, 1989, 4 (1) : pp 11-23.
- Mhiri, A., Tarhouni, J., Hachicha, M. & Lebdi, F. (1998):** Approche systémique des risques de salinisation par endoresiation anthropique. In: Revue: Etude et Gestion des sols N°5: pp 257-268.
- Molden, D.J. & Gates, T.K. (1990):** Performance Measures for Evaluation of Irrigation-Water-Delivery Systems. In: Journal of Irrigation and Drainage Engineering 116 (6): pp 804-823.
- Musy, A. & Soutter, M. (1991):** Physique du sol. Presses Polytechniques universitaires romandes : 348 pages.
- Mtimet, A. (2009):** Dégradation des terres et pratique d'amendements sableux dans les oasis (cas de Kébili). In : Marlet S. & Mekki I. (Eds) Atelier "Gestion des Ressources Naturelles et Développement Durable des Systèmes Oasiens du Nefzaoua", 25-27 février 2009, Douz, Tunisie.
- Munier, P. (1973):** Le Palmier Dattier. Maisonneuve et Larose, Paris, France : 221 pages.
- Omrani, N. & Burger, D. (2010):** Improvement of irrigation efficiency in date palm oases: Context and perspectives, case study Kébili, Southern Tunisia. In: Low Input Intensification of developing countries Agriculture-Opportunities and Barriers. Proceeding of the KIT-Workshop, 8th December 2010, Karlsruhe: pp 103-115.
- Omrani, N. & Burger, D. (2011):** Water Management Issues in Southern Tunisia under Climate Change Context. In: Climate Change and the sustainable use of water resources: pp 225-235.
- Ounis, M. (1999):** Contribution à l'évaluation du drainage dans les oasis de Kébili. Etude de Cas de l'oasis de Zarcine, Mémoire de Fin d'études. INAT, 1999 : pp 87.
- Peyron, G. (2000):** Cultiver le palmier dattier. Guide illustré de formation. Editions Quae, La librairie du CIRAD, France : 112 pages.
- Playan, E., Slatni, A., Castillo, R. & Faci, J.M. (2000):** A case study for irrigation modernization In: II. Scenario analysis. Agricultural Water Management N°42 : pp 335-354.
- Pouget, M. (1968):** Contribution à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le sud tunisien. In: Cah. ORSTOM, Sér. Pédologie, VI : pp 309-365.
- Pontanier, R. (1967):** « Etude pédologique du périmètre de la nouvelle Matmata ». D.R.E.S. Tunis, N°332 : 26 pages.
- Pontanier, R. & Veillefon, J. (1977):** Carte des ressources en sol de la Tunisie (1/200 000). Direction des Ressources en eaux et sols de Tunisie, Edition N° 135 : 57 pages.

- Prinz, D., Chahbani, B. & Kastl, A. (2005):** New Approaches in Oasis Water Management - Experiences from North Africa. Proceedings, XII World Water Congress of IWRA – Water for Sustainable Development – Towards Innovative Solutions, 22-25 Nov. 2005, New Dehli.
- Prinz, D. & Loeper, T. (2008):** Nutzung fossilen Grundwassers in der tunesischen Oasenwirtschaft. Effizienz-Notwendigkeit-Sinnhaftigkeit. Presentation of the 21.02.2008, BGR Conference Hannover, Germany.
- Puyoô, S. (2007):** Terminal evaluation of the UNEP/Swiss/FFEM Project “Protection of the North West Sahara Aquifer System (NWSAS) and related humid zones and ecosystems”. UNEP, Evaluation and Oversight Unit. Sept 2007: 97 pages.
- Richards, L. A. (1954):** Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agricultural handbook, N°60.
- Ritzema, H.P. (1994):** Drainage Principles and Applications. ILRI publication N°16, Edition N°2. Wageningen, Netherlands: 1125 pages.
- Rhoades, J.D. (1980):** Determining leaching fraction from field measurements of soil electric conductivity. In: Agricultural Water Management 81(3): pp 205-215.
- Rhoades, J.D., Lesch, S.M., LeMert, R.D. & Alves, W.J. (1997):** Assessing irrigation/drainage/salinity management using spatially referenced salinity measurements. In: Agricultural Water Management N°35: pp 147-165.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P., Blume, H.P., Brümmer, G., Schwertmann, U., Horm, R., Kögel-Knabner, I., Stahr, K., Wilke., Beyer, L., Auerswald, K., Stanjek, H., Fischer, W.R., Renger, M. & Strebel, O. (2002):** Lehrbuch der Bodenkunde, 15 Auflage; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- SAPI (2005):** Special Assistance for Project Implementation study team. Irrigation perimeters improvement project in oasis in south Tunisia. DG/GREE, MARH, Tunis.
- Schlüter, T. (2006):** Geological Atlas of African - With Notes on Stratigraphy, Tectonics, Economic Geologie of Each Country; Springer, Berlin-Heidelberg.
- Sghaier, M. (1984):** Identification et analyse des systèmes de production dans les oasis de Nefzaoua. Mémoire de 3ème cycle. INAT, Tunis : 144 pages.
- Sghaier, M. (1985):** Monographie de la région de Nefzaoua.
- Sghaier, M. (1988):** Etude monographique des oasis de Nefzaoua, Rivista di Agricoltura.
- Sghaier, M. (1993):** Les agrosystèmes de productions oasiens et leurs rôles socio-économiques et écologiques. Cours MED-CAMPUS, I.R.A.

- Sghaier, M. (1994):** Les agrosystèmes de production en Tunisie : Fonctionnement, rôle et adaptation aux changements écologiques et socio-économiques. Actes du séminaire "agriculture oasiennes", Dgache (Tunisie) GRIDAO, INRA de Tunisie : 14 pages.
- Sghaier, M. (1995 a):** Tarification et allocation optimale de l'eau d'irrigation dans les systèmes de production de la région oasienne de Nefzaoua. Doctorat en Sciences Agronomiques. Faculté de Gent (Belgique): 235 pages.
- Sghaier, M. (1995 b):** Les agrosystèmes de production oasiens et leur rôle socio-économique, cas des oasis tunisiennes. In : Coude-Gaussen G. & Rognon P. (eds) Désertification et Aménagement au Maghreb, Hartmann : Paris : pp. 203-213.
- Sghaier, M. (1999):** Les oasis de la région de Nefzaoua. IMAROM Working Paper Series no. 3, August 1999: 37 pages.
- Sghaier, M. (2006):** Région saharienne du Nefzaoua. In : Picouet, M. (ed) Dynamique des populations, disponibilités en terres et adaptation des régimes fonciers le cas de la Tunisie. CICRED, Paris : pp 167-181.
- Sghaier, M. (2010):** Etude de la gouvernance des ressources naturelles dans les oasis : Cas des oasis en Tunisie : 69 pages.
- Saeed, A.B., Etewy, H.A. & Aly Hassan, O.S. (1990):** Watering requirement and scheduling of date palm. In: Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America 21(4): pp 49-52.
- Sanyo (1996):** The feasibility study on the irrigated area improvement in oasis in the south of the Republic of Tunisia. Japan International Cooperation Agency (JICA).
- Sellami, M.H. & Sifaoui, M.S. (2008):** Modelling of heat and mass transfer inside a traditional oasis: Experimental validation. In: Ecological modelling 210: pp 144-154.
- Shani, U. & Dudley, L.M. (2001):** Field Studies of Crop Response to Water and Salt Stress. In: Soil Science Society of America Journal 65: pp 1522-1528.
- Shani, U., Ben-Gal, A. & Dudley, L.M. (2005):** Environmental Implications of Adopting a Dominant Factor Approach to Salinity Management. In: Journal of Environmental Quality 34: pp 1455-1460.
- Shani, U., Ben-Gal, A., Tripler, E. & Dudley, L.M. (2007):** Plant response to the soil environment: an analytical model integrating yield, water, soil type, and salinity. Water resources research 43 (W08418): 12 pages.
- Siebert, S., Nagieb, M. & Buerkert, A. (2007):** Climate and irrigation water use of a mountain oasis in northern Oman. In: Agricultural Water Management N°89: pp 1-14.

Siegfried, T. (2003): Grundwasser- Knappe Ressource im nördlichen Afrika; In: Bulletin (ETH), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich; Heft 289, Mai 2003; NZZ Fretz AG, Zürich: pp 6-13 (www.cc.ethz.ch/news/bulletin/pdf/eth_bulletin_289.pdf, zugegriffen am 4.6.07)

STUDI (2000): Réutilisation agricole des eaux de drainage. Ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire : 54 pages.

Tabet, D. (1999): Intérêt d'une approche spatiale pour le suivi de la salinité des sols dans les périmètres irrigués. PhD. en Sciences de l'eau, ENGREF: 340 pages.

Tripler, E., Ben-Gal, A. & Shani, U. (2007): Consequence of salinity and excess boron on growth, evapotranspiration and ion uptake in date palm (*Phoenix dactylifera* L., cv. Medjool). In: Plant Soil 297: pp 147-155.

Tron, G., Isberie, C. & Chol, P. (2013): La tensiométrie pour piloter les irrigations. Educagri Editions N°2, 2013: 237 pages.

USDA (1951): United States Department of Agriculture, Soil Survey Manual: 315 pages.

UNESCO (1972): Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional. Nappe du Continental Intercalaire. Projet ERESS.

Veyrac-Ben Ahmed, B. & Abdedaïem, S. (2011): Incidences de la modernisation du réseau d'irrigation sur l'écosystème oasien: le cas de l'oasis de Gabès (Sud-est tunisien). In : Colloque international Usages écologique, économiques et sociaux de l'eau agricole en Méditerranée : Quels enjeux pour quels services 20-21/01/2011, Université de Provence, France : pp 8-9.

Vidal, A., Rigourd, C. & Nepveu de Villemarceau, A. (2004): Identification et diffusion de bonnes pratiques sur les périmètres irrigués en Afrique de l'Ouest. Rapport final du projet IPTRID GCP/RAF/355/FRA. IPTRID, FAO, Rome, Italy: 46 pages.

Vieillefon, J. (1976): Inventaire critique des sols gypseux en Tunisie. Etude préliminaire. Direction des Ressources en Eau et en Sol, Tunis, Tunisie : 80 pages.

Vieillefon, J. (1978): Les sols gypseux en Tunisie. Contribution à l'amélioration de leur étude analytique. In: Sols de Tunisie, N°10: pp 40-105.

Zammouri, M., Siegfried, T., El Fahem, T., Samiha, K. & Wolfgang, K. (2007): Salinization of groundwater in the Nefzaoua oases region, Tunisia: results of a regional-scale hydrogeologic approach. In : Hydrogeology Journal N°15: pp 1357–1375.

Zidi, Ch., Job, J.O., Hachicha, M. & Grira, M. (1993): Gestion des eaux et des sols dans l'oasis de Tarfaya. Etude préliminaire. ES - 275, Direction des Sols.

Zidi, Ch. & Hachicha, M. (1997): Régime de la nappe superficielle et incidences sur la salure des sols et la production des dattes dans l'oasis de Tarfaya (Kébili). ES - 297, Direction des Sols: 24 pages.