

**Zur Bodenwasserdynamik ausgewählter
Meßpunkte
im südwestlichen Uvs-Nuur-Becken
in Abhängigkeit von
Standorteigenschaften und Witterung**

**Diplomarbeit im Fach Geoökologie
an der Universität Potsdam
vorgelegt von Benjamin Blank**

Potsdam, Mai 1999

Online veröffentlicht auf dem
Publikationsserver der Universität Potsdam:
URL <http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2010/4559/>
URN <urn:nbn:de:kobv:517-opus-45592>
<http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:517-opus-45592>

Inhaltsverzeichnis

1. Vorwort.....	1
2. Einleitung – Kurze Beschreibung des Untersuchungsgebiets.....	2
3. Bodenwasser – Allgemeine Einführung.....	7
3.1. Die Arten des Bodenwassers.....	7
3.2. Das Potentialkonzept.....	8
3.3. Die ökologische Bedeutung des Bodenwassers	10
4. Methoden zur Bodenwassergehaltsbestimmung.....	12
4.1. Bestimmung des Bodenwassergehalts mit Stechzylindern.....	13
4.2. Bestimmung des volumetrischen Bodenwassergehalts mit der Thetasonde...	14
4.3. Tensiometer zur Bestimmung des Matrixpotentials	15
4.4. Gipsblocksensoren zur Bestimmung des Bodenwasserpotentials.....	24
4.5. Das Meßprogramm.....	25
4.6. Vergleichende Betrachtung der Meßverfahren zur Bestimmung des volumetrischen Bodenwassergehalts	27
5. Die räumliche und zeitliche Variabilität der Bodenwassergehalte von Juni bis September.....	35
5.1. Die räumlichen Differenzen der Bodenwassergehalte zwischen den Meßstationen S1, S2, S3, S5 und S7	35
5.2. Die Variabilität der Bodenwassergehalte an den Standorten.....	44
5.3. Interpretation der Bodenwasserdynamik an Station S 3 anhand von Thetasondenmeßwerten	56
6. Vergleich von Bodenwassergehalten der Jahre 1997 und 1998 unter dem Einfluß des Witterungsablaufs	68
7. Zusammenfassung.....	73

8. Anhang	76
8.1. Volumetrische Bodenwassergehalte der Stechzylindermessungen	76
8.2. Volumetrische Bodenwassergehalte der Thetasondenmessungen	78
8.3. Wasserspannungswerte der Tensiometermessungen	83
9. Glossar	89
Literaturliste	92
Tabellenverzeichnis.....	94
Abbildungsverzeichnis.....	95
Danksagung.....	98
Eidesstattliche Erklärung	99

1. Vorwort

Von Mitte Juni bis Anfang September 1998 führte eine Expeditionsgruppe des Instituts für Geoökologie der Universität Potsdam unter der Leitung von Dr. Wolfgang Krüger im Rahmen des DFG-Projekts „Klimamessungen und Klimamodellierungen als Determinanten zur Kennzeichnung der Landschaftsdynamik an Stationären des Uvs-Nuur-Beckens/Nordmongolei“ geökologische Untersuchungen im Uvs-Nuur-Becken durch.

Als ein Bestandteil des Projekts wurden detaillierte Messungen von Bodenwassergehalten und von der Bodenfeuchte unternommen. Sie wurden schwerpunktmäßig an den Stationen S 1, S 2, S 3, S 5 und S 7 durchgeführt. Insgesamt wurden im Untersuchungsgebiet 11 Meßstationen betrieben, 8 davon waren automatisch aufzeichnende Datalogger.

Die Bodenwassergehaltsmessungen fanden einmal pro Woche statt außer an S 3, wo täglich Messungen durchgeführt wurden. Sie wurden manuell mit der Thetasonde und Stechzylindern durchgeführt. Die Messungen der Bodenfeuchte mit Tensiometern und Gipsblocksensoren liefen über Datalogger.

Ziel meiner Diplomarbeit, die im Rahmen dieses Projekts entstand, ist es die Bodenwasserdynamik an den ausgewählten Standorten zu beschreiben und Beziehungen zwischen Bodenwasser, Standortfaktoren und Witterung aufzuzeigen.

Dem voran geht eine Diskussion der einzelnen Meßverfahren, um bewerten zu können wie sie Bodenwassergehalt und Bodenfeuchte darstellen.

2. Einleitung – Kurze Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Das Uvs-Nuur¹-Becken im äußersten Nordwesten der Mongolei liegt in der Nähe der Grenze zu Rußland im Aimak² Uvs mit der Hauptstadt Ulaangom.

Das Becken wird an allen Seiten von mächtigen Bergketten umschlossen und zählt zu der Großlandschaft der großen Seen, die sich durch kahle, felsige Gebirge und Hügel und weit ausgedehnte Sandgebiete auszeichnet, die dieser Landschaft ihren stellenweise wüstenartigen Charakter verleihen. Das Uvs-Nuur-Becken ist Teil des abflusslosen zentralasiatischen Beckens, sein tiefster Punkt liegt bei 759 m über dem Meeresspiegel, dem Spiegel des Uvs-Nuur. Das sind ca. 820 m weniger als die durchschnittliche Höhe des Staatsgebiets der Mongolei.

Im Westen wird das Uvs-Nuur-Becken von Ausläufern des „mongolischen Altai“ begrenzt. Die Gipfel Tuurgen und Charchiraa erheben sich bis auf über 4000 m über den Meeresspiegel und schirmen das Gebiet in diese Richtung ab. Die Hauptstreichrichtung dieser Bergketten verläuft von Nordwesten nach Südosten. Die Gebirgszüge im Norden (Tannu-Ola), Osten (Changai), und Süden (mongolischer Altai), reichen an diese mächtigen Erhebungen nicht ganz heran, sorgen aber auch dafür, daß das Gebiet in diese Richtungen abgeschirmt ist.

Zu einem Großteil besteht das Becken aus geneigten Ebenen, die durch kleinere Hügel und flachwellige Abschnitte unterteilt werden und überwiegend von quartären Sanden limnischen und äolischen Ursprungs bedeckt sind, und in ihrer Mächtigkeit stark differieren. Weite Teile werden von ausgedehnten Schotterkörpern ehemaliger Flußläufe eingenommen. Westlich des Uvs-Nuur findet man häufig alte Strandwälle, die Relikte aus Zeiten sind, in denen der Wasserspiegel des Sees noch bedeutend höher war.

Dominierende Landschaftstypen in dieser Senke sind Halbwüsten, sie reichen in diesem Gebiet weiter nach Norden als an irgendeiner anderen Stelle Eurasiens (Murzaev, 1954). Die Wüsten und Halbwüsten befinden sich in den zentraleren Bereichen des Beckens, in der Peripherie sind Trockensteppen weit verbreitet.

¹ Nuur = See

² Aimak = Provinz, Verwaltungsbezirk

Das Relief des Gebietes gliedert sich in verschiedene Grundtypen (Murzaev, 1954), die Vorstufen der Hochgebirge an den Rändern des Beckens, kleinere Hügelländer geringer Höhe, die über die gesamte Senke verteilt sind und als Relikte ehemaliger Gebirge angesehen werden können, ausgedehnte Sandflächen alluvialer Herkunft, sowie Sandflächen, die von Kiesgeröll überlagert werden.

Die hohe Kontinentalität und seine allseitige Abschirmung ist für eine Reihe klimatischer Eigenschaften des Beckens verantwortlich. Die Temperaturen und Niederschlagswerte im Uvs-Nuur-Becken tendieren zu extremen Werten. So beträgt die Jahresmitteltemperatur in Ulaangom -4°C , die Mitteltemperatur im Januar liegt sogar bei unter -30°C (Barthel, 1988). Diese Temperaturminima sind für Becken charakteristisch, wobei allerdings davon ausgegangen werden kann, daß das Uvs-Nuur-Becken das flächenmäßig größte Gebiet ist, in dem diese sehr geringen Temperaturen auftreten.

Wie aus diesen Gebieten bekannt ist, findet in den Becken und Senken eine winterliche Temperaturinversion statt, die in den unteren Luftschichten den durch den hypsometrischen Formenwandel bedingten Temperaturgradienten umkehrt. Die Lufttemperatur nimmt daher mit zunehmender Höhe nicht ab, sondern steigt bis zu einer gewissen Stufe an. Diese Inversion erklärt sich dadurch, daß die kältesten Luftmassen die höchste Dichte besitzen und sich in den Senken sammeln. So entstehen hier die im Winter üblichen extrem niedrigen Temperaturen. Voraussetzung für die Bildung einer Temperaturinversion ist eine stabile Witterungssituation, da bei häufigen Wetteränderungen die Durchmischung der Luftschichten zu hoch ist und keine ausgeprägte Schichtung zulassen würde.

Diese Stabilität wird durch die winterlichen Witterungsverhältnisse in der Mongolei gewährleistet. Über Transbaikalien liegt in dieser Zeit ein sehr stabiles Hochdruckgebiet in Form der sibirisch-mongolischen Antizyklone, die für die Witterungsabläufe bestimmend ist. Entlang der Antizyklone werden ständig polare Luftmassen herangeführt, zudem sorgt die geringe Bewölkung für eine hohe Ausstrahlung und Wärmeverlust, besonders in den unteren Schichten (Barthel, 1983), nebenbei ist eine äußerst geringe Windbewegung zu verzeichnen.

Auf Grund dieser niedrigen Temperaturen findet man besonders in feuchteren Lagen Dauerfrostböden. Eine weitere Folge dieser stabilen Witterungslage sind extrem geringe Niederschläge von Herbst bis Frühsommer, die durchschnittlich nur einen Anteil von 14.7% an der Summe der Niederschläge eines Jahres haben (Barthel, 1988).

Im Sommer wird das Wettergeschehen im Uvs-Nuur-Becken von den Fronten der

Westwinddrift bestimmt. Diese sorgen für mehr Bewegung im atmosphärischen Geschehen als die stabilen winterlichen Witterungsverhältnisse und führen Wetterlagen herbei, die zu höheren Niederschlägen führen können. Ab Mai tritt in der Regel eine deutliche Erhöhung der Niederschlagstätigkeit auf. Die Niederschläge bleiben dennoch häufig gering, da die Wolken einen Großteil ihrer Feuchtigkeit an den umliegenden Bergketten abregnen. Dieser Lee-Effekt des Beckens tritt gegenüber Wetterfronten aus allen Himmelsrichtungen in Erscheinung, man kann von einer allseitigen Abschottung des Gebietes sprechen.

Kommt es zu Niederschlägen im Uvs-Nuur Becken, so sind diese entweder auf konvektive Vorgänge oder auf den Durchzug von Wetterfronten zurückzuführen. Also zum einen auf Wolkengebilde, die durch Verdunstungsvorgänge ihren Feuchtigkeitsanteil aus Wasservorkommen im Becken rekrutieren und häufig in Form von heftigen Gewittern ihre feuchte Fracht verschütten, zum anderen auf Fronten, die meist aus westlichen Richtungen über das Gebiet hinwegziehen. Die so entstehenden Starkregenereignisse können innerhalb des Beckens stark variieren. Am 11.7.98, dem Tag des mongolischen Naadamfestes, wurden aus der Gegend des Uureg Nuur und aus Tuurgen von sintflutartigen Regengüssen berichtet. In der Umgebung Ulaangoms hingegen fiel kaum ein Tropfen. Die größte Menge an Niederschlag fällt im Uvs-Nuur-Becken normalerweise in den Monaten Juli und August.

So niedrig die winterlichen Temperaturen liegen, so hoch können sie im Sommer ansteigen. Schon in den Morgenstunden steigt die Temperatur rasch an und erreicht an vielen Tagen Maximalwerte von 35°C und mehr.

Das Frühjahr zeichnet sich durch starke Luftbewegung und eine geringe Luftfeuchte aus, wie auch im Herbst kommt es noch häufig zu Nachtfrösten und Frosttagen. Ab November kann mit Durchschnittstemperaturen im negativen Bereich gerechnet werden.

Unser Untersuchungsgebiet befindet sich entlang einer Transsekte im westlichen Uvs-Nuur-Becken, die sich einer gewissen Regelmäßigkeit folgend in verschiedene Landschaftstypen untergliedert.

Diese Abschnitte werden durch Parameter wie Höhenlage, Substrat, Bodentyp, Vegetationsformen und Exposition charakterisiert.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick der verschiedenen Meßstationen des Forschungsprogramms 1998, ihrer wichtigsten Charakteristika und ihrer Lage im Untersuchungsgebiet. Dabei wurden nicht alle aufgeführten Standorte in das Meßprogramm zur Bodenwasserdynamik mit einbezogen.

Tabelle 1 : Die einzelnen Untersuchungsstandorte entlang des Transsekt

Station	Lage	Naturraum- einheit	Höhe ü. NN [m]	Nei- gung	Substrat	Boden	Vegetations- formation	Hydromorphie
S1	50° 06' 58,2" N 92° 23' 05,7" E	Seeniederung	760	0-1°	feinkörnige Seesedimente im Wechsel mit Schottern	Gley	Salzsteppe	Grundwassertiefe 0,5-1m
S2	50° 03' 24,5" N 92° 18' 40,6" E	Flachwelliger Dünenhügel der Seeniederung	800	0-1°	Sand mit Schluff- bändern	Burozem	Salzsteppe	Sickerwasser- bodenfeuchte- regime im Wechsel mit Lösungsaufstieg; Grundwasser > 2m
Ulaan- gom	49° 58' N 92° 05' E		936	0-1°				
S3	49° 53' 17,6" N 91° 56' 09,1" E	Schuttfächer südöstlich der Pediment- fläche	1180	1°	Lößartiges Sediment (9dm) über Flußschotter	Heller Kastanozem	Kurzgras- steppe	Sickerwasser im Wechsel mit Lösungsaufstieg
S4	49° 51' 30,7" N 91° 53' 39,7" E	Geneigte Ebene der Pediment- fläche	1380	2-4°	Lößartiges Sediment (3dm) über Schotter	Heller Kastanozem	Kurzgras- steppe	Sickerwasser im Wechsel mit Lösungsaufstieg
S5	49° 50' 39,8" N 91° 59' 42,4" E	Hangschutt- halde	1800	18-20°	Verwitte- rungsschutt des Anstehen- den	Kastanozem	Gebirgs- waldsteppe	Sickerwasser im Wechsel mit Lösungsaufstieg
S6	49° 50' 37,1" N 91° 50' 23,9" E	Waldfreier südexponierter steiler Berghang	1910	36°	flachgründiger skelettreicher Verwitte- rungsschutt	Kastanozem	Gebirgs- waldsteppe	Sickerwasser im Wechsel mit Lösungsaufstieg
S7	49° 50' 40,4" N 91° 50' 27,8" E	Nordexpo- nierter steiler Berghang	1910	35°	flachgründiger skelettreicher Verwitte- rungsschutt	Dunkler Kastanozem	Gebirgs- waldsteppe	Sickerwasser im Wechsel mit Lösungsaufstieg
S8	49° 50' 20,0" N 91° 49' 41,2" E	Waldfreie Kammregion	2355	0-3°	flachgründiger skelettreicher Verwitte- rungsschutt	Schutt- ranker	Subalpine Matten (Kabresia)	Sickerwasser im Wechsel mit Lösungsaufstieg

Station	Lage	Naturraum- einheit	Höhe ü. NN [m]	Nei- gung	Substrat	Boden	Vegetations- formation	Hydromorphie
S9		Gipfelflage	2905	0-3°	flachgründiger skelettreicher Verwite- rungsschutt	Schutt- ranker	Alpine Matten	Sickerwasser im Wechsel mit Lösungsaufstieg

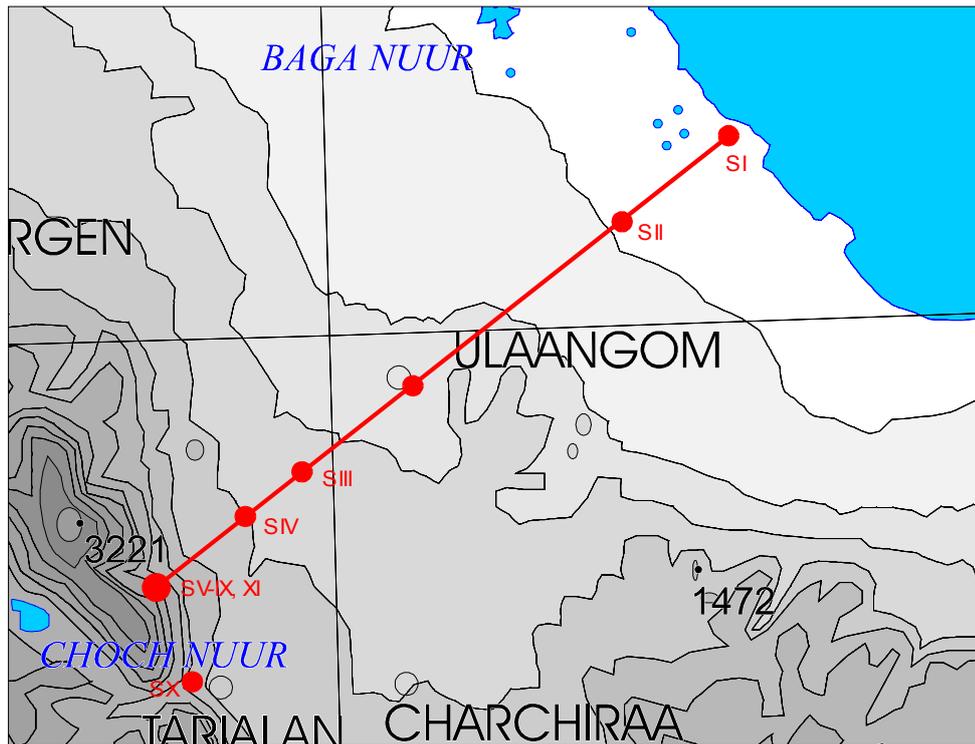


Abbildung 1: Lage der Stationen im Untersuchungsgebiet

3. Bodenwasser – Allgemeine Einführung

Der Standortwasserhaushalt nimmt in der geökologischen Forschung einen zentralen Platz ein, weil die Bodenfeuchte als landschaftsökologisches Hauptmerkmal gilt. Mit ihm sind zudem wichtige pedogenetische Prozesse und die Stofftransporte in der Geodermis verbunden. Der Bodenwasserhaushalt steht zudem in Beziehung zu der Vegetation und den Klimagrößen, vor allem Verdunstung und Niederschlag (Leser, 1997).

Diese Worte Hartmut Lesers zeigen, welche große Bedeutung dem Bodenwasser in Geosystemen zukommt, als Transportmedium innerhalb des Bodens, zur Versorgung der Vegetation mit Nährstoffen und Flüssigkeit und auch bei der Stabilisierung des Bodengefüges.

Als Bodenwasser bezeichnet man den Flüssigkeitsanteil, der dem Boden durch Trocknung bei 105° C entzogen werden kann. Wasser, das sich danach noch im Boden befindet, wird nicht zum Bodenwasser gerechnet. Es handelt sich dabei meist um sehr fest in die Bodenbestandteile eingelagertes Kristallwasser.

Das Bodenwasser gelangt durch Niederschlag, Grundwasser und Kondensation aus der Luft in den Boden, es enthält gelöste Salze und Gase. Gelangt mehr Wasser in den Boden als dieser aufnehmen kann, so fließt der Überschuß meist als Oberflächenwasser ab. Die Stärke dieses Abflusses hängt von der Höhe des Wassereintrages und der Neigung des Bodens ab. Als wassergesättigt wird ein Boden bezeichnet, wenn alle Poren mit Wasser gefüllt sind.

3.1. Die Arten des Bodenwassers

Das Bodenwasser wird vorrangig dadurch charakterisiert, ob und wie es an die festen Bodenbestandteile, die Bodenmatrix, gebunden ist. Man unterscheidet hierbei zunächst zwischen dem freien, nicht an die Bodenmatrix gebundenen Sicker-, Grund- und Stauwasser und dem Haft- und Kapillarwasser, das auch entgegen der Wirkung der Schwerkraft im Boden festgehalten wird.

Grund- und Stauwasser sammelt sich meist über einer Bodenschicht geringerer Durchlässigkeit. Oft gelangt es als Sickerwasser aus höher gelegenen Bodenschichten in diese Bereiche. Grundwasser ist dabei die ganzjährig vorhandene Variante, als Stauwasser wird es bezeichnet, wenn man es z.B. nur nach höheren,

eventuell jahreszeitlich bedingten, Niederschlägen findet.

Haft- und Kapillarwasser, auch als Bodenfeuchte bezeichnet (Scheffer/Schachtschabel, 1992), wird über verschiedene Bindungsarten an der Bodenmatrix festgehalten.

Beim Haftwasser sind es Van-der-Waals-Kräfte und permanente elektrostatische Kräfte, die eine Anziehung aufgrund der unterschiedlichen elektrischen Ladung des Wassers und der Bodenpartikel zustande kommen lassen. Da das Wassermolekül ein Dipol ist, also sowohl positiv als auch negativ geladene Bereiche hat, können auch pH-Wert-abhängige Ladungsveränderungen der Bodenmatrix diese Anziehung nicht aufheben.

Vom kapillaren Aufstieg redet man, wenn sich Bodenwasser in engeren Bodenporen (Kapillaren) entgegen der Schwerkraft in Richtung auf die Bodenoberfläche bewegt. Grund für diese Aufwärtsbewegung sind komplexe physikalische Vorgänge in den Kapillaren. An der Grenzfläche von Wasser und Luft wird ein konkaver Meniskus ausgebildet, über dem es zu einer Vergrößerung der Grenzfläche zwischen diesen beiden Medien kommt. Über dem Meniskus herrscht ein geringerer Dampfdruck als über einer ebenmäßigen Wasser-Luft-Grenzfläche gleichen Niveaus. Dies ermöglicht es dem Wasser, in der Kapillare aufzusteigen, bis dieser Druckunterschied ausgeglichen und das höhere Druckniveau erreicht ist. Je enger die Pore ist, desto weiter kann sich das Wasser dem Einfluß der Schwerkraft entziehen und emporsteigen.

3.2. Das Potentialkonzept

Bei der Betrachtung von Ver- und Anlagerungsprozessen des Bodenwassers versteht man unter einem Potential die Menge an Arbeit, die aufgewendet werden muß, damit das Wasser von einem Ort im Boden zu einem anderen transportiert werden kann, oder um es aus einer Bindung zu lösen, z.B. von der Bodenmatrix (Scheffer/Schachtschabel, 1992). Dabei erfolgt die Bewegung des Bodenwassers immer entlang eines Potentialgefälles, also von einem höheren Potential (einem Ort höherer potentieller Energie) zu einem niedrigeren. So lange wie im Boden Potentialunterschiede bestehen, bewegt sich das Bodenwasser; sind diese Differenzen ausgeglichen, tritt ein Gleichgewichtszustand ein, der allerdings meist zeitlich begrenzt ist.

Die Summe aller auf das Bodenwasser wirkenden Kräfte wird als Gesamtpotential bezeichnet:

$$\Psi = m \cdot b \cdot h$$

Dabei ist Ψ das Potential, m die Masse des Wassers, b die Beschleunigung (im Freiland die Erdbeschleunigung), h ist die Höhe über einer Wasserfläche, die als Bezugspunkt dient (im Freiland die Grundwasseroberfläche).

Neben dem Gesamtpotential gibt es verschiedene Teilpotentiale :

- das Gravitationspotential Ψ_z gibt an, welches Maß an Energie aufgewendet werden muß, um das Wasser entgegen der Schwerkraft in eine größere Höhe zu bewegen
- das Matrixpotential Ψ_m sagt aus, wie stark die Bodenmatrix das Bodenwasser anzieht; je weniger der Boden enthält, desto stärker wird es an die Matrix gebunden
- das osmotische Potential Ψ_o ist vom Salzanteil in der Bodenlösung abhängig, führt dazu, daß salzreiche Zonen im Boden Wasser aus Zonen mit einer geringeren Salzkonzentration entziehen können
- das Gaspotential Ψ_g ist von Bedeutung, wenn der Luftdruck im Boden vom dem auf der Bezugsebene abweicht

Für bestimmte Aussagen können Teilpotentiale kombiniert werden. Z.B. wird der pflanzenverfügbare Wasseranteil über das Wasserpotential angegeben, das sich aus Matrix-, Gas- und dem osmotischen Potential zusammensetzt.

$$\Psi_w = \Psi_m + \Psi_o + \Psi_g$$

Unter Freilandbedingungen kann hierbei das Gaspotential meistens vernachlässigt werden. Ferner gibt es noch das Hydraulische- und das Druckpotential.

3.3. Die ökologische Bedeutung des Bodenwassers

Eine Aufgabe des Bodenwassers ist den Zusammenhalt des Bodens zu gewährleisten. In der Bodenlösung besitzen Bodenpartikel die Mobilität, um sich aneinander zu lagern und feste Komplexe zu bilden, die das Bodengefüge stabilisieren.

In trockenen Böden kommt es auf Grund von extremem Wassermangel zur Krustenbildung, welche die Belüftung des Bodens behindern kann und für Pflanzen ein mechanisches Hindernis bedeutet. In ariden Gebieten ist das Aufbrechen der Krusten daher eine wichtige landwirtschaftliche Maßnahme. Ein gut durchfeuchteter Boden ist auch ganz offensichtlich besser gegen Winderosion geschützt als eine ausgetrocknete, bröckelige Krume.

Nährstofftransporte im Boden finden über die Bodenlösung statt, die aus im Bodenwasser gelösten Molekülen und Ionen besteht. Nur so können Pflanzen Nährstoffe aus dem Boden aufnehmen. Abhängig von der Menge des vorhandenen Bodenwasser variiert also die Bodenlösung und damit auch die Art und Weise, auf die den Pflanzen Nährstoffe zugetragen werden können. Den Eintrag von Nährstoffen in die Bodenlösung bezeichnet man auch als Mobilisierung, die meisten Nährstoffe stammen aus dem Ausgangsgestein bzw. gehen durch Mineralisierungsprozesse aus der abgestorbenen organischen Substanz hervor. An den Wurzeln nehmen die Pflanzen die Nährstoffe auf, und es kommt zu einer geringeren Konzentration, die durch eine Nachlieferung von Nährstoffen über die Bodenlösung wieder ausgeglichen wird.

Das Sickerwasser kann allerdings Nährstoffe aus dem Wurzelraum herauspülen und so zu einer Verarmung führen.

Selbstverständlich darf in diesem Zusammenhang die Flüssigkeitsversorgung der Pflanzen über das Bodenwasser nicht unerwähnt bleiben, das je nach Beschaffenheit des Bodens in verschiedener Weise aufgenommen und gespeichert werden kann. So können einige Böden auch nach längeren Trockenperioden die Pflanzen noch mit Flüssigkeit versorgen und so deren Vertrocknen verhindern bzw. verzögern.

Der Bodenwassergehalt ermöglicht zudem Rückschlüsse über die Witterungsvorgänge an einem Standort, da Bodenwasser, Niederschläge, Verdunstung und andere klimatische Parameter in ständiger Wechselwirkung stehen.

Die Richtung, in die sich das Bodenwasser meistens bewegt, bestimmt maßgeblich die Bodengenese und Verlagerungsprozesse. Dies ist eine Hauptursache für die Unterschiede von Böden in ariden und humiden Gebieten. In ariden Gebieten bewegt

sich das Bodenwasser oft zur Bodenoberfläche hin und bewirkt so spezifische Verlagerungsprozesse, in humiden Gebieten bewegt es sich meist in die entgegengesetzte Richtung und prägt den Boden durch mit der Schwerkraft gerichtete Verlagerungen von Stoffen.

4. Methoden zur Bodenwassergehaltsbestimmung

Im Rahmen der diesjährigen Meßkampagne kamen verschiedene Verfahren zur Bestimmung von Bodenwassergehalten und Matrix- bzw. Wasserpotentialen zum Einsatz. Abhängig von den Eigenarten des Gebietes wie zum Teil extremer Niederschlagsarmut, hoher Bodenverdichtung und stellenweise hoher Salzkonzentration im Boden und den gewünschten Ergebnissen müssen unterschiedliche Meßverfahren gewählt werden. Jedes dieser Meßverfahren hat spezifische Eigenschaften, die bei der Betrachtung der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen und die man auf jeden Fall bei einem Vergleich der Meßwerte berücksichtigen muß.

An den verschiedenen Standorten wurden zeitgleich mehrere Meßverfahren angewendet. Passend zum Standort wurden die geeigneten ausgewählt, wobei an vielen Stationen dieselben Meßverfahren eingesetzt wurden, um die räumliche Vergleichbarkeit dieser Meßpunkte gewährleisten zu können. Ein einschränkendes Kriterium bei der Bestückung der Meßpunkte war die Anzahl der vorhandenen Meßinstrumente.

Für die Standorte, die nicht täglich von den Mitarbeitern des Projekts betreut werden konnten, wurde ein automatischeaufzeichnendes Verfahren gewählt. Nur an Station 3 wurden tägliche Messungen mit der Thetasonde durchgeführt, da sie sich direkt am Hauptlager befand, an allen anderen Stationen nur beim wöchentlichen Kontroll- und Meßbesuch.

Folgende Methoden kamen zum Einsatz :

- Stechzylinder zur volumetrischen Bodenwassergehaltsbestimmung
- FD-Sonde (Thetaprobe ML1) zur volumetrischen Bodenwassergehaltsbestimmung
- Tensiometer zur Bestimmung des Matrixpotentials
- Gipsblocksensoren zur Bestimmung des Bodenwasserpotentials

4.1. Bestimmung des Bodenwassergehalts mit Stechzylindern

Mit diesem Verfahren kann sowohl der volumetrische, als auch der gravimetrische Wassergehalt des Bodens bestimmt werden.

Für die Probenentnahme muß man zunächst eine Bodengrube der gewünschten Tiefe anlegen, danach werden Proben aus den jeweiligen Bodenhorizonten entnommen. Dabei wird ein Stechzylinder von 100 cm³ Volumen mittels eines Aufsatzes horizontal in den Boden eingebracht, um eine ungestörte Probe zu erhalten.

Es muß darauf geachtet werden, daß bei der Entnahme des Zylinders aus dem Boden kein Material herausfällt. Dies erweist sich bei sehr trockenen Böden oft als recht schwierig, und es erfordert manchmal mehrere Versuche, bis man eine ungestörte Probe erhält.

Nach der Entnahme werden die Proben gewogen und bei 105°C 48 Stunden lang im Trockenschrank getrocknet. Danach werden die Proben erneut gewogen. So wird auf einfache Weise der Wassergehalt bestimmt.

Der zeitliche Abstand zwischen dem Feuchtwiegen der Proben im Feld und dem Trockenwiegen im Labor betrug zum Teil mehrere Wochen oder Monate, da die Proben erst aus der Mongolei nach Potsdam gebracht werden mußten und der größte Anteil zeitaufwendig mit der Bahn befördert wurde.

Außer in sehr harten Böden konnte dieses Verfahren meist relativ zufriedenstellend angewendet werden. Bei genügender Vorsicht blieb auch in den stark verhärteten Böden der Materialverlust gering. Der Nachteil dieses Verfahrens liegt in der aufwendigen Rückführung großer Probenmengen, außerdem kann im Feld noch keine Aussage über den Bodenwassergehalt getroffen werden.

Auch sollte das Verfahren auf die Beschaffenheit des Probenmaterials in den Stechzylindern kritisch betrachtet werden. Man kann nicht davon ausgehen, daß das Probenmaterial in den Stechzylindern wirklich ungestört ist und einen standortgetreuen Bodenausschnitt repräsentiert. Dies liegt zum einen an der Entnahmeweise, bei der stets gewisse Mengen an Boden und an Feuchtigkeit verloren gehen. Außerdem wird beim Transport die Struktur des Materials in den Stechzylindern unweigerlich verändert. So kann es zu Problemen bei der Erstellung von Saugspannungskurven kommen (siehe Kapitel 4.3.), da eine veränderte Bodenstruktur ein anderes Porenvolumen bedingt und eine veränderte Wasseraufnahmefähigkeit mit sich bringt.

4.2. Bestimmung des volumetrischen Bodenwassergehalts mit der Thetasonde

Die Thetasonde ML-1 ist eine FD-Sonde (Frequency Domain Meßverfahren), die ebenfalls zur Bestimmung des volumetrischen Wassergehalts eines Bodens dient.

Ihr Meßprinzip beruht darauf, daß der Boden als ein Dielektrikum angesehen werden kann, das heißt als ein elektrisch isolierender Stoff, in dem ein statisches elektrisches Feld auch ohne beständige Ladungszufuhr bestehenbleibt. Ein Dielektrikum wird durch die Dielektrizitätskonstante charakterisiert, deren Höhe im Boden vom Wassergehalt abhängt. Über die Dielektrizitätskonstante und den Anteil der Ionen im Boden definiert sich die Impedanz des Bodens. Die entscheidende Größe für Messungen mit der Thetasonde ist jedoch die Dielektrizitätskonstante, da bei diesem Meßverfahren der Einfluß der Ionen als nahezu unerheblich angesehen werden kann, und sich die gemessene Impedanz nur über die Dielektrizitätskonstante ergibt.

Die Thetasonde besteht aus einem zylindrischen Gehäuse von 12.5 cm Länge, aus dessen einem Ende ein Kabel zum Anzeigegerät herausführt. Am anderen Ende ragen vier 6 cm lange Meßstäbe aus Stahl heraus, von denen sich einer in der Mitte der Fläche befindet und um den die drei anderen radial angeordnet sind.

Die Messungen mit der Thetasonde wurden meistens an der selben Bodengrube durchgeführt, an welcher auch die Stechzylinderproben entnommen wurden. Zur Bestimmung des volumetrischen Wassergehalts müssen die Meßstäbe einfach in den Boden eingebracht werden. Dabei ist darauf zu achten, daß sie sich in voller Länge im Boden befinden und vollständig vom Boden umschlossen werden. Nur so sind exakte Messungen möglich. Über ein Kabel ist ein Ausgabegerät mit der Thetasonde verbunden. Auf Knopfdruck erscheint dort auf einer LCD-Anzeige entweder die Höhe des volumetrischen Wassergehalts eines mineralischen- bzw. eines organischen Bodens oder die Stärke des von der Sonde gesendeten und reflektierten Spannungssignals.

Im Gehäuse der Thetasonde befindet sich ein Oszillator, der ein Spannungswellensignal von 100 MHz aussendet. Das Signal wird innerhalb der Meßstäbe abhängig von der Impedanz des Bodens reflektiert und dann gemessen.

Die Amplitude des reflektierten Signals hängt von der Dielektrizitätskonstante des Bodens ab und ermöglicht so eine Aussage über den Wassergehalt des Bodens.

Die Thetasonde ordnet der so gemessenen Dielektrizitätskonstante des Bodens den entsprechenden Feuchtegehalt zu. Die Sonde ist auf die meisten Bodentypen kalibriert und bietet eine Genauigkeit von 5%. Wird eine höhere Genauigkeit

gewünscht, muß man die Sonde individuell für einen Boden kalibrieren. So kann die Genauigkeit auf 2% erhöht werden. Dies empfiehlt sich nur bei einem stationären Einsatz der Sonde.

Messungen mit der Thetasonde sind schnell und unproblematisch durchzuführen. Allerdings kommt es bei bestimmten Bodentypen zu Komplikationen, da die Sonde in sehr festen, stark verdichteten Böden nur unter Schwierigkeiten oder gar nicht in den Boden eingebracht werden kann und die Gefahr besteht, daß Meßstäbe abbrechen können. Die gleichen Schwierigkeiten treten auf, wenn der Boden einen hohen Skelettanteil besitzt. Das Verfahren konnte nicht an allen Standorten eingesetzt werden, da stellenweise die Böden zu hart waren.

Um eine möglichst genaue Wiedergabe der tatsächlichen Verhältnisse zu bekommen, hätte die Sonde stationär im Boden vergraben werden müssen. Das war nicht möglich, da die vorhandene Sonde an mehreren Standorten gebraucht wurde. An den Meßpunkten wurde versucht, die Bodenwasserverhältnisse möglichst genau aufzunehmen, indem an den Bodengruben vor der Messung ca. 20 cm Bodenmaterial von der Meßfläche abgetragen wurde, so daß man die Messungen in einem noch nicht ausgetrockneten Bereich des Bodens vornehmen konnte. Dies entspricht nicht der Genauigkeit einer fest installierten Sonde, war aber unter den Bedingungen vor Ort die beste Variante.

4.3. Tensiometer zur Bestimmung des Matrixpotentials

Das Matrixpotential als Maß dafür, wie stark das Bodenwasser an die feste Bodensubstanz gebunden ist und welche Kraft aufgewendet werden muß, um das Wasser von der Matrix zu lösen, wird mit Tensiometern gemessen (Scheffer/Schachtschabel, 1992).

Je weniger Wasser ein Boden enthält, desto stärker ist es an die Matrix gebunden. Findet in dem Boden keine Wasserbewegung statt, kann man davon ausgehen, daß das Wasser um so stärker gebunden ist, je größer der Abstand zur Grundwasseroberfläche ist (Scheffer/Schachtschabel, 1992). Das Matrixpotential ist dann dem Gravitationspotential entgegen gerichtet und kann als negativer hydrostatischer Druck betrachtet werden.

Die Tensiometer bestehen aus einem Kunststoffrohr, einer porösen keramischen Spitze am unteren Ende des Rohrs und einem Manometer, das auf dem oberen Ende

des Rohrs befestigt ist. Das Plastikrohr wird vor der Inbetriebnahme vollständig mit destilliertem Wasser gefüllt.

Das Rohr wird senkrecht im Boden installiert, so daß sich die keramische Spitze in der gewünschten Tiefe befindet.

Es wird um so mehr Wasser aus dem Tensiometer herausgesaugt, je größer der Abstand von der keramischen Spitze zur Grundwasseroberfläche ist. Der Unterdruck innerhalb des Tensiometers erhöht sich dabei und kann über das Manometer abgelesen werden. Tensiometer eignen sich nur für einen Meßbereich bis -0.8 bar. Sie sind deshalb für den Einsatz in unserem Untersuchungsgebiet nur bedingt geeignet, da die Drücke aufgrund der großen Trockenheit der Böden dort stellenweise niedriger liegen.

Für die Eichung der Tensiometer müssen vor Ort ungestörte Stechzylinderproben entnommen werden, an die im Labor mit einer Keramik-Druck-Platte verschiedene Wasserspannungen³ angelegt werden. Hierdurch läßt sich das Verhältnis zwischen volumetrischem Wassergehalt und Wasserspannung des betreffenden Bodens bestimmen.

³ Bodenwasser- und Matrixpotential werden in bar angegeben, Wasser- bzw. Saugspannung in bar, in pF oder in cm Wassersäule. Dabei entspricht 1 bar 1000 cm Wassersäule (WS). Die Zahlenangaben zur Wasserspannung sind positiv.



Abb. 2 : Poröse Keramik-Platte zum Erstellen der Wasserspannungs-Kurve

Bei diesem Verfahren werden die Stechzylinder mit Wasser benetzt und auf eine Keramikplatte gelegt. Die Platte ist mit einem Druckapparat verbunden, der über die Keramikplatte das Wasser aus den Zylindern herausaugt. Die Menge Wasser, die dabei aus den Zylindern entfernt wird, hängt von dem anliegenden Unterdruck ab. Man beginnt dabei mit einem geringen Unterdruck von -0.01 bar, der über den Versuchszeitraum bis auf -0.63 bar erhöht wird. Jeder einzelne Unterdruck wirkt auf die Zylinder ca. zwei Wochen ein, bis alles Wasser, daß sich bei diesem Unterdruck aus dem Zylinder entziehen läßt, entfernt wurden ist. Bevor ein neuer Unterdruck angelegt wird, werden die Stechzylinder gewogen. So wird nach und nach das Verhältnis von volumetrischen Wassergehalt und der dazugehörigen Saugspannung ermittelt.

Die Tensiometer benötigen im Feld eine bestimmte Zeit, um sich an die vorliegenden Feuchteverhältnisse anzupassen. Das Meßverfahren eignet sich daher nur für die Betrachtung langfristiger Entwicklungen, nicht z.B. für die Aufzeichnung der Bodenwassergehaltserhöhung nach einem Starkniederschlag.

An Station S 3 bewegt sich der Verlauf der Meßkurven in allen Bodentiefen um den Meßbereich von -0.6 bar, dabei tendieren die Werte in 20 cm Tiefe häufiger zu etwas niedrigeren Werten, in 50 cm Tiefe bewegen sich die Werte in der zweiten Hälfte der Meßperiode mehr im Bereich von -0.8 bar. Je höher die Wasserspannungswerte

liegen, desto stärker sind die Austrocknungserscheinungen im Boden.

In allen Bodentiefen zeigen die Meßreihen einen Verlauf, der viele kleinere Schwankungen enthält, die aber nicht sonderlich vom Mittelwert abweichen und sich im Bereich von -0.1 bar bewegen. Der Variationskoeffizient ist relativ gering, er liegt zwischen 7 und 12. Klare Tendenzen der Meßwerte in Bereiche, die sich wesentlich vom Mittelwert unterscheiden, sind außer in 50 cm Bodentiefe, wo die Meßwerte für die zweite Hälfte der Periode stärkere Austrocknungserscheinungen anzeigen, nicht vorhanden.

Die vielen kleineren Schwankungen der Meßkurven können nicht allein durch Veränderungen der Feuchteverhältnisse im Boden begründet sein. Zum einen lagen, wie man aus den anderen Verfahren erkennen kann, keine derartigen Schwankungen vor, zum anderen wären sie wahrscheinlich nicht von den Tensiometern aufgezeichnet worden, da dieses Meßverfahren nicht so schnell auf Änderungen der Feuchteverhältnisse reagieren kann.

Neben den tatsächlichen Veränderungen in den Feuchteverhältnissen, kann als weitere Ursache für die Schwankungen noch der Druckabfall in den Tensiometern angesehen werden, der entsteht, wenn die Tensiometer geöffnet werden, um Wasser nachzufüllen. Nach der Öffnung der Tensiometer dauert es ca. 2 Tage, bis die Meßwerte sich wieder im ursprünglichen Bereich eingepegelt haben. Durch das Nachfüllen des Wassers entstehen so mehr oder weniger regelmäßige Druckabfälle in der Meßreihe.

Über die Wasserspannungskurve läßt sich den Tensiometerwerten der entsprechende Bodenwassergehalt zuordnen.

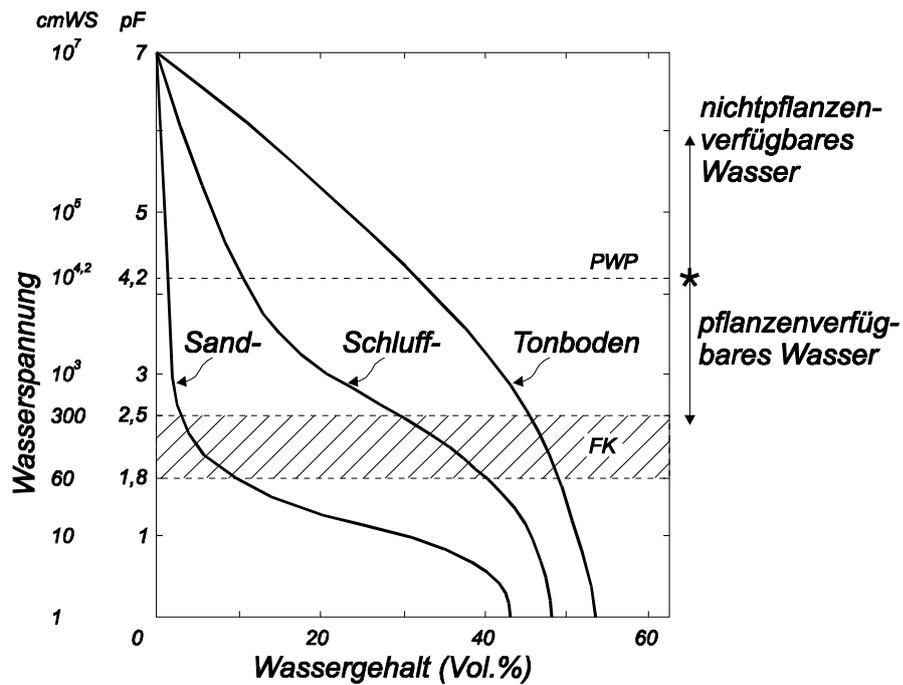


Abb. 3 : Verhältnis von Wasserspannung und Bodenwassergehalt
(aus Scheffer/Schachtschabel, 1992)

In der Tabelle werden den Mittelwerten der Tensiometermeßreihen an Station S 3 die entsprechenden Bodenwassergehalte der Wasserspannungskurve zugeordnet und mit den volumetrischen Bodenwassergehalten der Thetasondenmessungen verglichen. Die Tabelle stellt die Mittelwerte der jeweiligen Meßtiefen für den gesamten Beobachtungszeitraum dar.

Tab.2 : Wasserspannung und Bodenwassergehalte an S 3

Bodentiefe (cm)	Wasserspannung (bar)	Bodenwassergehalt (%vol.) Tensiometer	Bodenwassergehalt (%vol.) Thetasonde
20	0.53	15	6.1
30	0.61	22	5.8
50	0.64	15	5.3

Diese Bodenwassergehaltswerte weichen erheblich den Werten der Stechzylindermessungen ab, deren Mittelwert für Station S 3 liegt bei 5.1%vol., die Werte, die über die Tensiometer ermittelt wurden liegen also um 10-15% höher.

Da die Stechzylindermeßwerte über den Vergleich mit den Thetasondenmeßwerten

bestätigt wurden, muß untersucht werden, welche Fehlerquellen auf die Tensiometerwerte einwirken können.

Grundsätzlich muß gesagt werden, daß die Bestimmung des Bodenwassergehalts über Tensiometer ein indirektes Meßverfahren ist. Es beinhaltet mehr Meßschritte als ein direktes Verfahren, so gibt es auch mehr Stellen, an denen Meßfehler auftreten können.

Zum einen sind es Fehlerquellen bei der Messung im Feld. Wie schon erwähnt führt das Auffüllen der Tensiometer mit Wasser, der Druckabfall im Inneren und mögliche Lufteinschlüsse dabei, zu einer erheblichen Beeinflussung der Ergebnisse. Auch über die Installation der Tensiometer kann es zu Fehlern kommen, sind die Kerzen nicht vollständig vom Boden umschlossen und befinden sich viele Steine im Boden, kann die Diffusion von Wasser zwischen Tensiometerkerze und Boden beeinflusst werden. Auch die extreme Erwärmung der Tensiometer durch die Sonneneinstrahlung kann die Meßergebnisse beeinflussen. Darüber hinaus spielt der Salzgehalt der Böden eine Rolle, ein hoher Salzgehalt im Boden kann bedingen, daß noch zusätzlich Wasser aus dem Tensiometer in den Boden diffundiert.

Weitere Fehlerquellen liegen bei der Erstellung der Wasserspannungskurve im Labor. Auf der porösen Platte muß die Bodenprobe im Zylinder auf der Fläche des gesamten Zylinders Kontakt mit der Platte haben, ansonsten kann nicht Wasser aus der Probe entfernt werden, und man erhält den Drücken entsprechend zu hohe Wassergehalte.

Beim Wiegen der Proben nach den einzelnen Druckphasen kann es zu Verlusten von Bodenmaterial kommen.

Ferner wird die Zuordnung von Wassergehalten zu den Wasserspannungen durch den Hysteresis-Effekt erschwert.

Dabei entstehen abhängig davon, ob es sich um die Be- oder Entwässerung des Bodens handelt, zwei verschiedene Wasserspannungskurven. Dieser Effekt wird dadurch bedingt, daß bei der Entwässerung, sich das Bodengefüge ändern kann, handelt es sich dabei möglicherweise um irreversible Veränderungen, so verändert sich die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens dauerhaft. Auch die Befüllung bzw. Entleerung der Poren bei Bewässerung und Austrocknung kann abhängig von Beschaffenheit und Form der Poren zu Abweichungen führen.

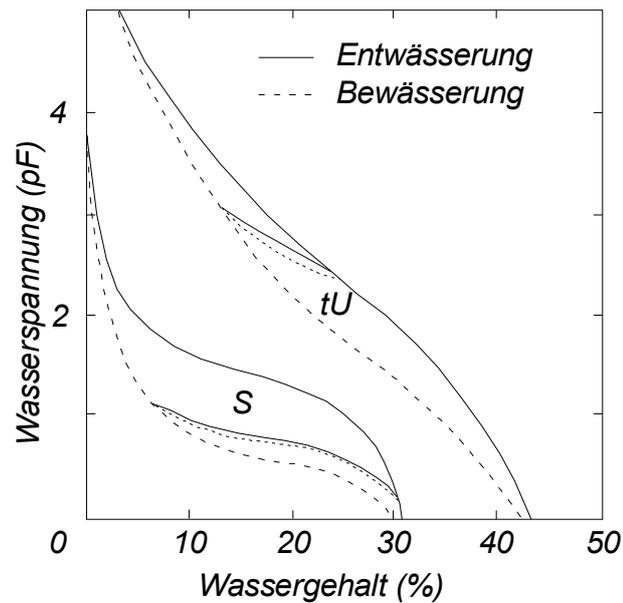


Abb. 4 : Hysteresis-Effekt bei Sand und tonigem Schluff
(aus Scheffer/Schachtschabel, 1992)

Die Wasserspannungskurve im Labor wurde über Entwässerung erstellt, im Feld war der Boden auch meist einer Austrocknung durch starke Verdunstung ausgesetzt. Der Austrocknungsvorgang im Feld wurde jedoch durch Regeneinträge unterbrochen, so daß keine ununterbrochene Austrocknung stattfand. Daher muß bei der Betrachtung der Ergebnisse auch der Hysteresis-Effekt berücksichtigt werden.

Tab.3 : Wasserspannung und dazugehörige Bodenwassergehalte

Probe	WS	0 cm	33 cm	63 cm	100 cm	158 cm	316 cm	446 cm	631 cm
S 2 20cm	% Vol.	35.9	33.7	29.5	28.4	29.2	20.4	8.9	7.2
S 2 50cm	% Vol.	38.5	32.0	17.4	9.3	6.8	4.0	3.9	3.7
S 2 70cm	% Vol.	36.4	29.0	19.2	13.7	10.8	8.7	8.7	7.0
S 3 20cm	% Vol.	45.6	41.8	38.4	37.8	35.0	20.3	17.4	14.4
S 3 30cm	% Vol.	56.2	50.0	45.1	42.3	38.3	27.0	26.6	22.6
S 3 50cm	% Vol.	49.8	43.6	38.5	35.2	30.6	18.4	18.4	15.8
S 7 15cm	% Vol.	45.1	35.6	26.6	23.6	21.4	17.4	17.0	16.0
S 7 30cm	% Vol.	48.8	42.1	30.7	29.7	31.6	18.4	16.5	14.9

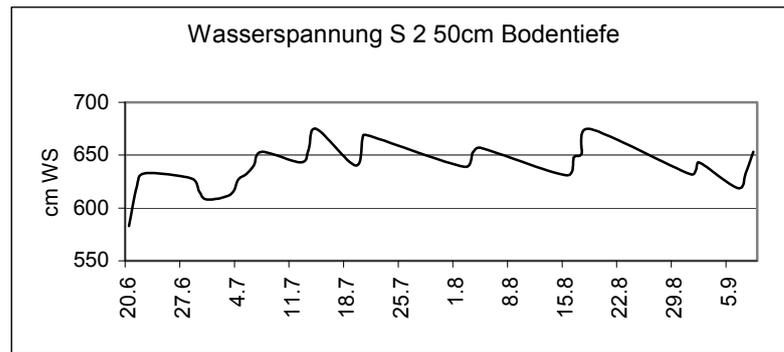


Abb. 5 : Wasserspannung S 2; 50 cm Bodentiefe

Anhand der Saugspannungswerte der Tensiometermessungen läßt sich über Tabelle 3 jedem Tensiometermeßwert der entsprechende Bodenwassergehalt zuordnen. An Station S 2 liegt der Mittelwert der Tensiometerwerte in 50 cm Bodentiefe bei 593 cm Wassersäule, dies entspricht einem Bodenwassergehalt von ungefähr 3.8 %vol., der Wert für den Volumetrischen Bodenwassergehalt aus den Stechzylindermessungen liegt in dieser Tiefe bei 3.4 %vol.. In Anbetracht der möglichen Fehlerquellen kann man sagen, daß die beiden Mittelwerte sehr nah bei einander liegen.

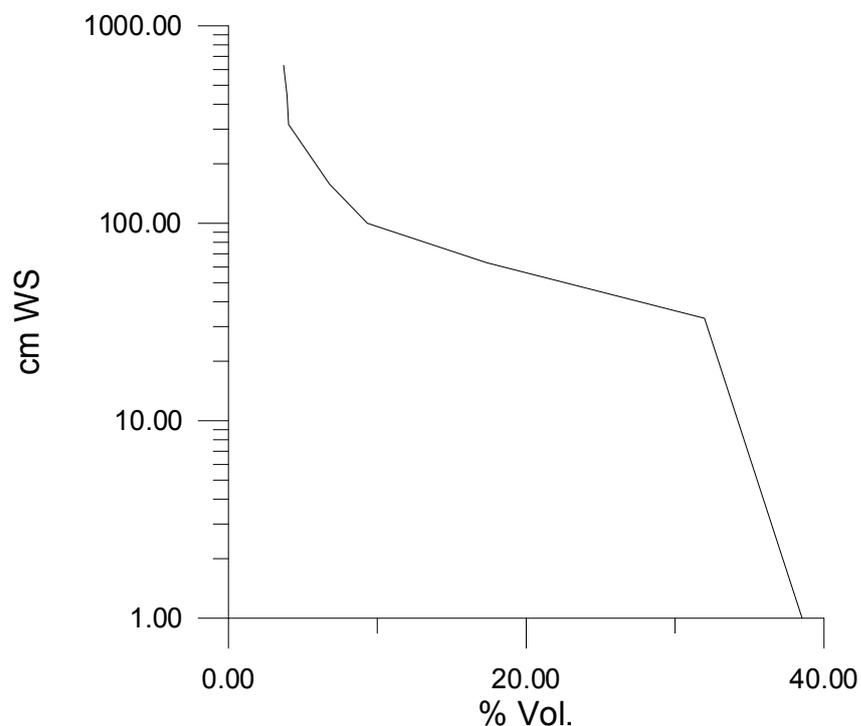


Abb. 6 : Verhältnis Wasserspannung / Bodenwassergehalt S 2; 50 cm Bodentiefe

An Station S 3 liegt der Mittelwert der Tensiometermessungen in 50cm Bodentiefe bei 640 cm WS, nach der Wasserspannungskurve entspricht dies einem durch-

schnittlichen Bodenwassergehalt von ca. 16 %vol.. Verglichen mit den Mittelwerten von Thetasonde und Stechzylinderproben, die im Bereich von 5 %vol. liegen, ist dieser Wert sehr viel höher, und kann nicht als repräsentativ für die Bodenwassergehalte an S 3 angesehen werden.

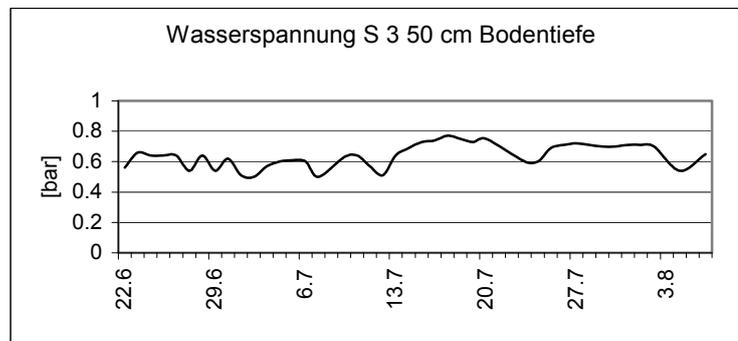


Abb. 7 : Wasserspannung S 3; 50 cm Bodentiefe

Die höhere Wasserspannung in der zweiten Hälfte der Meßperiode in dieser Bodentiefe gibt allerdings tendenziell die zunehmenden Austrocknungserscheinungen im Boden wieder, wenn auch die Absolutwerte immer noch überhöht sind.

Wie in 50 cm Bodentiefe sind an S 3 auch in den anderen Bodentiefen die über die Saugspannung ermittelten Bodenwassergehalte überhöht, gleiches gilt für Station S 7, wobei dort die Werte etwas näher an den Ergebnissen liegen, die mit den Stechzylindern und der Thetasonde ermittelt wurden.

Abschließend läßt sich sagen, daß die Wasserspannungswerte von S 2 in dem Meßbereich liegen, den man anhand der Ergebnisse der Thetasonden- und Stechzylindermessungen erwartet, an den Stationen S 3 und S7 liegen die Bodenwassergehalte, die man über die Wasserspannung erhält, höher, als die Ergebnisse der anderen Verfahren.

4.4. Gipsblocksensoren zur Bestimmung des Bodenwasserpotentials

Das Bodenwasserpotential, zu dessen Bestimmung Gipsblocksensoren verwendet werden, setzt sich aus drei Teilpotentialen zusammen: dem Matrixpotential, dem osmotischen Potential und dem Gaspotential. Im Gelände ist das Gaspotential meist von untergeordneter Bedeutung. Das Gleiche gilt für das osmotische Potential in Böden mit nur einem geringen Salzgehalt. Insofern wird das Bodenwasserpotential oft als ähnliche Größe wie das Matrixpotential betrachtet.

Der Sensor ist aus Gips gefertigt, und in ihn sind zwei Elektroden eingebettet. Die Sensoren sind mit einem Datalogger verbunden und werden in der gewünschten Bodentiefe über den gesamten Meßzeitraum fest installiert.

Nach einiger Zeit diffundiert die Bodenfeuchte durch den porösen Gips zu den Elektroden im Block, und es stellt sich ein Gleichgewicht des Blocks mit dem umgebenden Bodenmaterial ein. Es besteht dann eine konstante Wechselspannung zwischen den beiden Elektroden. In einem trockenen Block ist die Spannung gleich Null, mit steigendem Wassergehalt nimmt sie zu.

Aus dem Gips gehen Calciumionen und Sulfationen in die Lösung um die Elektroden ein, dadurch wird eine gleichmäßige Konzentration an Elektrolyten gewährleistet. So wird ein stabiles leitendes Medium im Gipsblock geschaffen, das den Einfluß von Ionen aus der Bodenlösung auf die Spannung zwischen den Elektrolyten gering hält.

In stark salinen Böden, oder wenn eventuell salzhaltiges Wasser zur Bewässerung verwendet wird, arbeiten die Gipsblöcke dennoch nicht gut, da unter solchen Bedingungen zu viele Elektrolyte aus der Bodenlösung mit dem Sensor in Wechselwirkung treten.

Aus den Loggern erhält man einen Widerstandswert, der über eine Formel in das Potential umgerechnet werden kann.

$$\text{BWP} = R_S / [0.01306 * (1.062 * (34.21 - T_S + 0.01060 T_S^2) - R_S)]$$

BWP = Bodenwasserpotential (kPa)

R_S = Sensorwiderstand (k Ω)

T_S = Bodentemperatur (°C)

Jeder Gipsblock sollte individuell kalibriert werden, wie es mit den Tensiometern gemacht wird. Bei Kalibrierung auf einer Keramik-Druck-Platte können mit den

Gipsblöcken neben dem Wasserpotential auch der volumetrische Wassergehalt bestimmt werden. Die Gipsblöcke arbeiten am besten in Böden, deren Wasserpotential geringer als -0.5 bar ist, der Meßbereich geht von 0 bis -2.0 bar. Auf eine Veränderung des Wassergehalts reagieren sie langsam und sind deshalb nicht zur Aufzeichnung schnell wechselnder Bodenwassergehalte geeignet.

Den verschiedenen Meßbereichen entsprechende Feuchtesituationen (nach Campbell Sensorenbeschreibung)

0-0.1 bar = gesättigter Boden

0.1-0.2 bar = Boden ist hinreichend feucht, grobe Sande können Wasser verlieren

0.2-0.6 bar = üblicher Bereich für Bewässerung (außer bei schweren Tonböden)

0.6-1.0 bar = übliche Werte für schwere Tonböden

1.0-2.0 bar = Boden ist sehr trocken

4.5. Das Meßprogramm

Die folgende Tabelle stellt das Meßprogramm dar und gibt Aufschluß über die zeitliche Dichte der Probenentnahmen und darüber, welche Meßverfahren an den einzelnen Stationen eingesetzt wurden.

Tab.4 : Das Bodenwassermeßprogramm 1998 im Überblick

Station/ Methode	Stechzylinder	Thetasonde	Gipsblock-Sensoren	Tensiometer
1	Wöchentlich; 5,20,50 cm	Wöchentlich; 5-50cm	5, 20, 30 cm	-
2	Wöchentlich; 5,20,50 cm	Wöchentlich; 5-50cm, nach Möglichkeit	-	20, 50, 70 cm
3	Wöchentlich; 5,20,50 cm	Täglich; 5-50cm	-	15, 15, 40, 50 cm
4	-	-	-	15, 30, 50 cm

Station/ Methode	Stechzylinder	Thetasonde	Gipsblock-Sensoren	Tensiometer
5	Wöchentlich; 5,20,50 cm	Wöchentlich; 5-50cm, nach Möglichkeit	5, 20, 50 cm	-
6	-	-	5, 10, 20 cm, Hang/ 5,10,20 cm im Wald	-
7	5, 10, 20 cm; nach Möglichkeit	5, 10, 20 cm; nach Möglichkeit	-	15, 30, 50 cm
9	-	-	5, 20, 30 cm	-

An allen Stationen, die regelmäßig betreut wurden, wurde versucht in gleichmäßigen zeitlichen Abständen Messungen mit der Thetasonde durchzuführen und Stechzylinderproben zu entnehmen. An den Standorten 6 und 9 konnten diese Techniken nicht angewendet werden, da die Bodenbeschaffenheit es nicht zuließ, oder die Stationen auf Grund ihrer Lage nicht regelmäßig betreut werden konnten.

Die Messungen mit der Thetasonde waren auch an den Stationen 2 und 5 nicht immer durchführbar, da der Boden entweder zu hart oder zu steinig war.

Für die Messung von Wasser- und Matrixpotential standen Gipsblöcke und Tensiometer zur Verfügung. Der Einsatz der Gipsblöcke war nur an Standorten möglich, an denen Campbell Datalogger aufgestellt wurden, dies waren die Stationen 1, 5, 6 und 9. Die Auswahl der Standorte für die Campbell Logger richtet sich in erster Linie nach den anderen Meßinstrumenten, die mit ihnen verbunden waren.

An den anderen Stationen, 2, 3, 4, und 7 wurden Tensiometer eingesetzt, die an Dataloggern angeschlossen waren. Die Tensiometer an Station 4 wurden manuell abgelesen.



Abb. 8 : Einsatz von Tensiometern und der Thetasonde an Station S 7

4.6. Vergleichende Betrachtung der Meßverfahren zur Bestimmung des volumetrischen Bodenwassergehalts

Die beiden Meßverfahren, die thermogravimetrische Bodenwassergehaltsbestimmung mit Stechzylindern und die Thetasonde (Thetaprobe ML1), dienen dazu, dieselbe Bodeneigenschaft, nämlich den volumetrischen Bodenwassergehalt zu bestimmen.

Soweit es bei den Bodenwassergehaltsuntersuchungen möglich war, wurden beide Verfahren an den Standorten im Untersuchungsgebiet parallel angewendet.

Vollständig über den gesamten Meßzeitraum hinweg war dies allerdings nur an den Stationen S 1 und S 3 möglich. Die Ergebnisse der beiden Meßverfahren werden in diesem Abschnitt dargestellt, um herauszufinden, in welcher Weise sie den Bodenwassergehalt wiedergeben.

Tab. 5 : Abweichungen zwischen den Meßwerten beider Verfahren

Station	Tiefe	Methode	Mittel	Abw.	Tages- Werte	Abw.	TW	Abw.	TW	Abw.
					30.06.98		21.07.98		04.08.98	
1	5cm	Theta	29.1	145%	32.2	135 %	31.5	310 %	23.2	106 %
		Stechzyl.	20.1		23.8		10.2		21.8	
					21.07.98		11.08.98		18.08.98	
1	20cm	Theta	24.5	110 %	13.1	140 %	27.3	126 %	6.5	36 %
		Stechzyl.	22.4		9.26		21.57		18.14	
					07.07.98		04.08.98		01.09.98	
1	30cm	Theta	31	103 %	36	122 %	30.8	123 %	27.6	80 %
		Stechzyl.	30		29.5		24.9		34.31	
					23.06.98		24.08.98		02.09.98	
3	5cm	Theta	4.7	87 %	12.9	134 %	18.7	107 %	2.6	63 %
		Stechzyl.	5.3		9.6		17.5		4.1	
					27.07.98		31.07.98			
3	20cm	Theta	5.7	112 %	6.2	187 %	3.2	43 %		
		Stechzyl.	5.1		3.32		7.4			
					27.07.98		31.07.98		24.08.98	
3	50cm	Theta	4.7	112 %	6.8	174 %	2.5	45 %	4.9	124 %
		Stechzyl.	4.2		3.9		5.6		3.95	

In der Tabelle sind die Abweichungen der Meßverfahren von einander dargestellt. Dabei gibt die fettgedruckte Zahl an, wieviel Prozent des Stechzylinderwertes der Thetasondenwert beträgt.

Für den Einsatz der beiden Verfahren ist es wichtig zu wissen, ob es in einem bestimmten Meßbereich charakteristische Abweichungen gibt und ob eines der beiden Verfahren regelmäßig höhere Werte liefert als das andere, oder ob die

Abweichungen eher zufällig verteilt sind.

Dazu wurden die Mittelwerte und einige Einzelwerte der Meßergebnisse der beiden Verfahren in den wichtigsten Horizonten von Station 1 und Station 3 verglichen. Für die Betrachtung der Einzelwerte wurden Tage ausgewählt, an denen die Ergebnisse beider Verfahren entweder sehr stark oder sehr schwach voneinander abweichen.

In den folgenden Diagrammen sind die Meßreihen beider Verfahren für die jeweiligen Bodenhorizonte zusammen dargestellt, gemeinsame Tendenzen und Abweichungen werden auf diese Weise visualisiert.

Vergleich der Thetasonden und Stechzylinderwerte an Station S 3

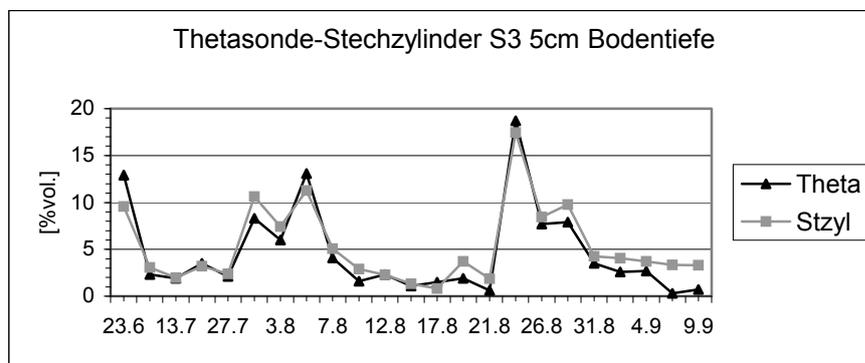


Abb. 9 : Vergleich Thetasonde-Stechzylinder S 3; 5 cm Bodentiefe

In dieser Bodentiefe läßt sich erkennen, daß die beiden Meßkurven einander stark ähneln und nur geringe Unterschiede im Wassergehalt zwischen beiden Meßverfahren auftreten.

Der Mittelwert aus den Thetasondenmessungen beträgt mit 4.7% 87% des Stechzylinderwertes, somit sind in dieser Bodentiefe die Stechzylinderergebnisse höher als die der Thetasonde.

Differenzen zwischen den Werten treten z.B. am 23.6. auf, an dem der Meßwert der Thetasonde das 134% des Wertes der Stechzylinderprobe beträgt. Die Maxima beider Meßreihen liegen meist an den selben Tagen.

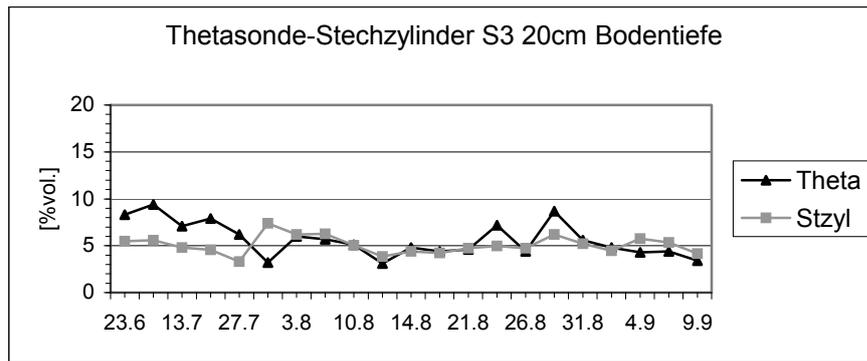


Abb. 10 : Vergleich Thetasonde-Stechzylinder S 3; 20 cm Bodentiefe

Im Gegensatz zu 5cm Meßtiefe ist in dieser Tiefe der Mittelwert der Thetasondenwerte wieder höher als der von den Stechzylinderproben, er beträgt ca. das 1.1fache. Am 27.7. liegt der Wert der Thetasonde bei 187% des Stechzylinderwertes, hingegen ist am 31.7. der Stechzylinderwert größer, der Thetasondenwert ist weniger als halb so groß. Bis zum 31.7. liegen die Werte beider Verfahren etwas weiter auseinander, an den Meßtagen danach treten nur noch zweimal größere Differenzen auf.

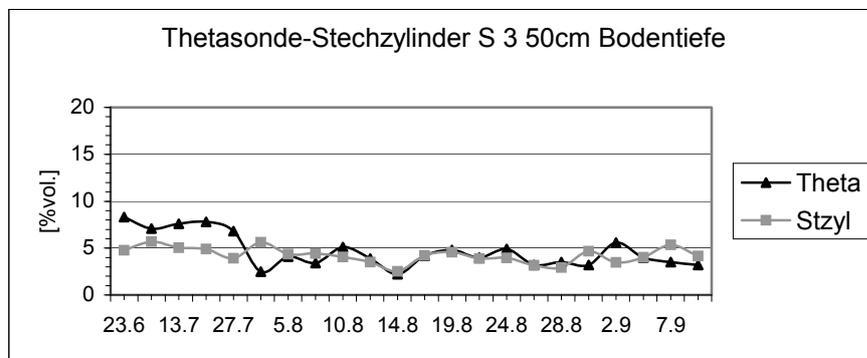


Abb. 11 : Vergleich Thetasonde-Stechzylinder S 3; 50 cm Bodentiefe

Bei den Messungen in dieser Bodentiefe gibt es Ähnlichkeiten mit den Werten aus 20cm Tiefe dieser Meßstation. Im Juni und Juli, also in der ersten Hälfte der Meßperiode liegen die Meßwerte höher als in der zweiten Hälfte, besonders bei den Thetasondenwerten tritt das in Erscheinung. Die Meßdichte ist in der zweiten Hälfte der Meßperiode höher, da in diesem Zeitraum verstärkt Kontrollmessungen durchgeführt wurden.

Der Mittelwert der Thetasondenergebnisse ist 1.1mal so groß wie der von den Stechzylindern. Die Thetasondewerte liegen bis zum 27.7. höher, danach schneiden sich die Kurven, und am 31.7. ist der Stechzylinderwert höher. Ab dem 5.8. liegen die Ergebnisse der beiden Meßverfahren meist sehr dicht bei einander.

Zusammenfassend kann für den Standort S 3 festgestellt werden, daß die Werte in allen Bodentiefen relativ dicht zusammen liegen und die Kurvenverläufe einander stark ähneln. In 20 und 50cm Tiefe gibt es innerhalb der Werte keine so großen Bewegungen wie in 5cm Tiefe, Tendenzen treten deshalb weniger stark hervor. Insgesamt sind in diesen Tiefen leichte Abnahmen der Werte nach der ersten Hälfte der Meßperiode zu erkennen.

Der ähnliche Verlauf der Meßkurven gibt die Veränderungen der Werte durch beide Verfahren gleichgerichtet wieder, dabei weichen die Absolutwerte nur geringfügig von einander ab.

Vergleich der Thetasonden und Stechzylinderwerte an Station S 1

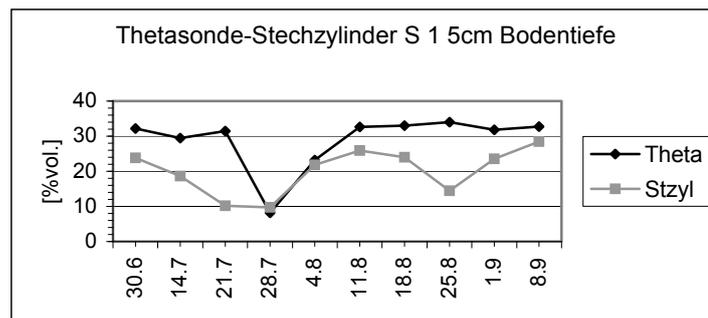


Abb. 12 : Vergleich Thetasonde-Stechzylinder S 1; 5 cm Bodentiefe

Beim Vergleich der Meßwerte der beiden Verfahren gibt es an einigen Terminen in dieser Tiefe größere Abweichungen zwischen beiden Meßverfahren, wie z.B. am 21.07. und am 25.08.1998. Am 28.07. werden mit beiden Verfahren, die geringsten Werte innerhalb dieses Horizonts gemessen. An den beiden folgenden Meßtagen steigen die Werte an, entwickeln sich also in die gleiche Richtung. Die Messungen mit den Stechzylindern liefern in dieser Bodentiefe meist geringere Werte als die Messungen mit der Thetasonde.

Der Mittelwert der Ergebnisse aus den Thetasondenmessungen beträgt 29.1% volumetrischen Bodenwassergehalts, dieser Wert beträgt damit 145% des Mittelwerts der Stechzylinderproben.

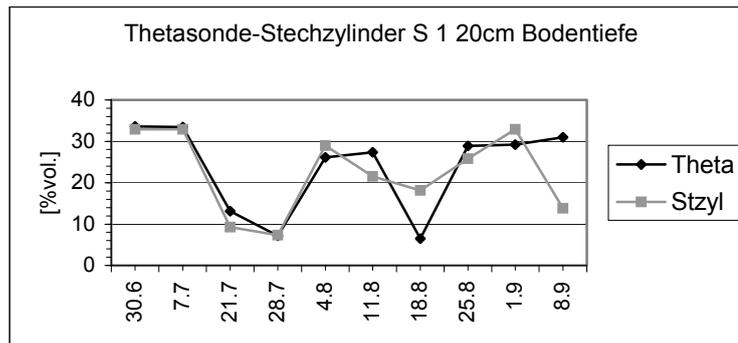


Abb. 13 : Vergleich Thetasonde-Stechzylinder S 1; 20 cm Bodentiefe

Verglichen mit den Werten aus 5cm Bodentiefe dieser Station liegen die Werte viel dichter bei einander, und die Kurven ähneln einander viel stärker. Größere Abweichungen in den Ergebnissen beider Meßverfahren gibt es nur am 18.08. und 8.09. Am 18.08. beträgt der Thetasondenmeßwert 36% des Stechzylinderwerts.

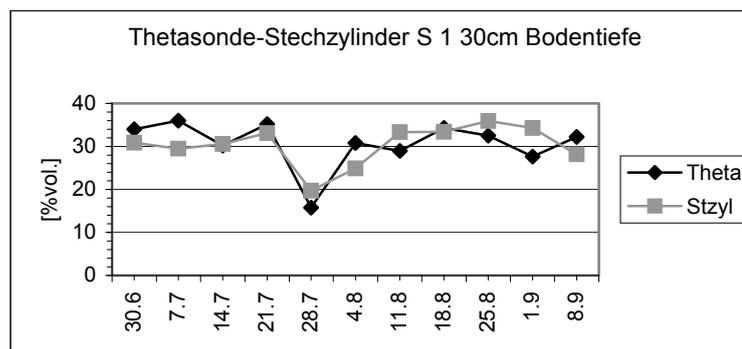


Abb. 14 : Vergleich Thetasonde-Stechzylinder S 1; 30 cm Bodentiefe

In dieser Bodentiefe erfolgt nochmals eine Angleichung der Meßwerte aus den beiden Verfahren. Der Mittelwert der Thetasonde beträgt nur noch 103% des Mittelwerts der Stechzylindermessungen.

Die beiden Kurven verlaufen relativ parallel und es gibt nur kleinere Abweichungen zwischen den einzelnen Meßwerten.

Die Werte der beiden Meßverfahren differieren an diesem Standort zu bestimmten Tagen erheblich. Über den gesamten Meßzeitraum betrachtet relativieren sich allerdings diese Unterschiede, da die Bewegungen der Kurven oft in die gleiche

Richtung stattfinden. Die beiden Meßkurven gleichen sich mit zunehmender Bodentiefe einander an, außerdem liegen in 20 und 30 cm Bodentiefe die Meßwerte der Thetasonde nicht mehr generell über denen der Stechzylinder, ohne ein erkennbares Muster sind in diesen Tiefen stellenweise auch die Meßwerte der Stechzylinder höher als die der Thetasonde.

Die Differenzen, die zwischen den Werten der beiden Verfahren auftreten, liegen überwiegend bei den Absolutwerten der einzelnen Messungen. Darüber hinaus gibt es aber auch einige Abweichungen bezüglich der Tendenzen der Meßwerte bei der Betrachtung der Ergebnisse über einen bestimmten Zeitraum hinweg. Nicht immer bewegen sich die Veränderungen in die gleiche Richtung, das heißt z.B., daß die Meßwerte der Thetasonde abnehmen, während die Ergebnisse der Stechzylinderproben in der gleichen Zeit eine ansteigende Entwicklung aufweisen, obwohl die atmosphärischen Einflüsse an den Meßstandorten für beide Verfahren die gleichen sind und ähnliche Meßergebnisse vermuten lassen würden. Die Absolutwerte liegen bei diesen entgegengesetzt verlaufenden Entwicklungen meistens jedoch relativ nah bei einander, so daß diese Tendenzen nicht überbewertet werden sollten. Außerdem erstrecken sich die gegensätzlichen Tendenzen meist nur über kürzere Zeiträume.

Die Abweichungen zwischen den beiden Verfahren können verschiedene Ursachen haben. Der Meßfehler der Thetasonde liegt laut Hersteller bei +/- 5%, wenn sie nicht für einen Standort speziell kalibriert wird; von daher muß schon mit gewissen Tendenzen gerechnet werden. Außerdem arbeitet sie am besten, wenn sie stationär eingesetzt wird, das heißt an einem Standort fest installiert. Dadurch können die Feuchteverhältnisse im Boden ohne die störenden Einflüsse, die beim mobilen Einsatz der Sonde unvermeidbar sind, wiedergegeben werden.

Hinzu kam, daß der Boden oft sehr trocken, hart und skelettreich war und man daher nicht davon ausgehen kann, daß die Meßstäbe stets vollständig vom Boden umschlossen waren, wenn die Sonde in den Boden eingebracht wurde. Diese durch die Bodenstruktur bedingten Probleme können ebenfalls zu einer Beeinträchtigung der Meßergebnisse geführt haben.

Die Bodeneigenschaften, welche die Arbeit mit der Thetasonde erschwert haben, hatten auch Auswirkungen auf die Entnahme der Stechzylinderproben.

In sehr harten und trocknen Böden wird das Einbringen der Metallzylinder erschwert, und es ist kompliziert, bei der Entnahme kein Material zu verlieren. In wassergesättigten Böden hingegen kann bei der Entnahme Flüssigkeit verloren

gehen. Besonders, wenn der Boden viel grobes Material enthält und keine feste Struktur hat, entweicht oft beim Verschließen der Zylinder ein gewisses Maß an Bodenwasser.

Im Vergleich von Station 3 mit Station 1 läßt sich sagen, daß keine bestimmte Meßtiefe für die geringsten Abweichungen prädestiniert ist. Zumindest läßt es sich an diesen Stationen nicht erkennen, da an beiden Standorten die Horizonte mit den geringsten Abweichungen in unterschiedlichen Tiefen liegen. Auch läßt sich keine definitive Aussage darüber treffen, ob ein Meßverfahren generell die höheren Werte liefert. Allerdings liefert an den beiden betrachteten Standorten die Thetasonde tendenziell meist etwas höhere Werte als die Stechzylinderproben.

Bei der Anwendung beider Methoden gibt es aufgrund der extremen Trockenheit und der daraus resultierende Bodenbeschaffenheit Probleme bei den Messungen und Probenentnahmen, die zu Ungenauigkeiten und Beeinträchtigungen der Ergebnisse führen können. In Einzelfällen treten zwischen den beiden Verfahren starke Abweichungen auf, die die Frage aufwerfen, welche Werte man für die Auswertung heranziehen sollte. Meistens liegen die beiden Meßkurven allerdings so dicht bei einander oder haben zumindest ähnliche Tendenzen, so daß die beiden Verfahren sich gegenseitig bestätigen.

5. Die räumliche und zeitliche Variabilität der Bodenwassergehalte von Juni bis September

Im Meßzeitraum von Juni bis September 1998 wurden detaillierte Messungen der Bodenwassergehalte an den Untersuchungsstationen im südwestlichen Uvs-Nuur-Becken durchgeführt. Bei der Betrachtung der Ergebnisse dieser Messungen sind drei Aspekte von besonderer Bedeutung :

- die Variabilität der Bodenwassergehalte zwischen den Standorten
- die Variabilität der Bodenwassergehalte zwischen den Horizonten einzelner Standorte
- die Entwicklung der Bodenwassergehalte im Verlauf der Meßperiode.

5.1. Die räumlichen Differenzen der Bodenwassergehalte zwischen den Meßstationen S1, S2, S3, S5 und S7

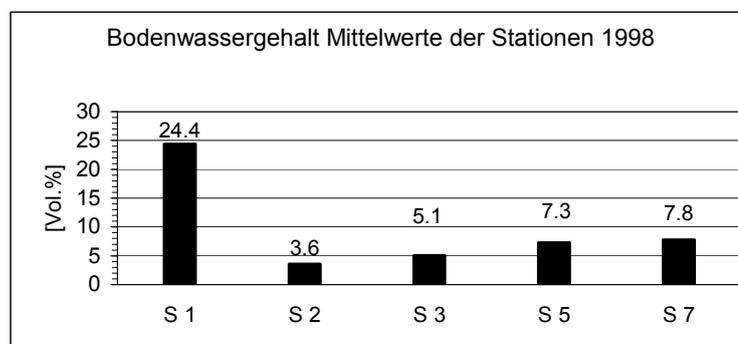


Abb. 15 : Mittelwerte der volumetrischen Bodenwassergehalte an den Stationen 1, 2, 3, 5 und 7

Fünf Meßstationen wurden für die Untersuchung der räumlichen Variabilität der Bodenwassergehalte herangezogen. Es handelt sich dabei um Standorte, die in den verschiedenen Naturraumeinheiten des Untersuchungsgebiets liegen und diese repräsentieren.

Für die Betrachtung der Bodenwassergehalte in Bezug auf ihre räumliche Variabilität

im Untersuchungsgebiet werden nur die Meßwerte der Stechzylinderproben verwendet, um die Vergleichbarkeit der Werte untereinander gewährleisten zu können. Aus den Mittelwerten der einzelnen Meßtiefen einer Station wurden Mittelwerte gebildet, die die gesamte Station repräsentieren.

Dabei ist es von Bedeutung zu wissen, auf Grundlage welcher Datenreihen die Mittelwerte erstellt wurden. Diese Datenreihen erstrecken sich teilweise nicht gleichmäßig über den Meßzeitraum und können daher beispielsweise in einer niederschlagsreicheren Zeit eine höhere Meßdichte aufweisen, wodurch die Aussagekraft der Werte beeinflußt werden könnte. Berücksichtigt werden muß dies bei den Stechzylinderwerten von Station 7. An diesem Standort liegt eine höhere zeitliche Meßdichte in der zweiten Hälfte des Untersuchungszeitraums vor. Die Werte von Station 7 sind in Bezug auf ihre Repräsentativität auch daher problematisch, weil die Anzahl der Tageswerte relativ gering ist.

Wie bei der Betrachtung des Diagramms deutlich wird, ist der Mittelwerte der Bodenwassergehalte an Station 1 wesentlich höher als an den anderen Meßstationen mit einem volumetrischen Bodenwassergehalt von 24.4 %vol.. An allen anderen Stationen liegen die Werte wesentlich niedriger im Bereich von 3.6%vol. bis 7.8%vol..

Insgesamt höhere Mittelwerte werden noch an den Stationen 5 und 7 verzeichnet, an denen die Mittelwerte 7.3 und 7.8 %vol. betragen. An den Stationen 2 und 3 sind die Mittelwerte 3.6 und 5.1 %vol. am geringsten.

Jede der Meßstationen zeichnet sich durch spezifische Standorteigenschaften aus und wird durch charakteristische Witterungsabläufe geprägt, die zusammen die Bodenwassergehalte bestimmen.

Station S 1

Station 1 ist als Seeniederung der einzige Standort, an dem die Meßhorizonte aufgrund der unmittelbaren Nähe zu einem Gewässer direkt vom Grundwasser beeinflußt werden. Der Grundwasserspiegel liegt bei ca. 50 cm unter Flur und variiert im Laufe der Meßperiode teilweise erheblich. Durch kapillaren Hub kann das stark salzhaltige Grundwasser als Kapillarwasser in größeren Mengen bis relativ weit über die Grundwasseroberfläche aufsteigen, und sorgt so für eine intensive Durchfeuchtung der höher gelegenen Bodenhorizonte an dieser Meßstation. Auf diese Weise kommen die außergewöhnlich hohen Bodenwassergehalte an dieser Meßstation zustande, die sehr viel höher liegen, als die Werte aller anderen

Standorte.

Die Grundwasser-Flurabstände bewegen sich zwischen 37.0 und 68.0 cm, variieren also um mehr als 30 cm im Verlauf des Meßzeitraums. Gründe für diese zum Teil erheblichen Schwankungen sind möglicherweise die durch Niederschlagseinträge variierenden Wassermengen der Zuflüsse und daraus resultierende Veränderungen vom Wasserspiegel des Sees .

Der kapillare Hub in Sandböden beträgt durchschnittlich 0.5 m (Scheffer/Schachtschabel, 1992), ein geringer Wert im Vergleich zu Schluff- und Tonböden, bei denen das Grundwasser um bis zu 3.3. m an die Bodenoberfläche transportiert werden kann. Beim Sandboden an Station S 1, wo der Grundwasserspiegel bei durchschnittlich 0.5 m unter Flur liegt, würde ein derartiger kapillarer Aufstieg allerdings ausreichen, um den gesamten Oberboden zu durchfeuchten. Ausreichend Grundwasser ist vorhanden.

Station S1 wird durch ein Grundwasser-Bodenfeuchteregime geprägt, das die anderen Einflußfaktoren überlagert und für eine starke Durchfeuchtung des Bodens sorgt, dessen Wassergehalt oft so hoch ist, daß er als gesättigt bezeichnet werden kann.

Station S 2

Diese Meßstation befindet sich auf einem flachwelligen Dünenhügel, dessen Vegetation als Salzsteppe angesprochen werden kann.. Der Standort liegt zwar noch im Bereich der Seeniederung, dort aber auf einem Dünenhügel, so daß keine Beeinflussung des Bodenwassers durch das Grundwasser besteht. Von der Hydromorphie her handelt es sich hier um ein Sickerwasserbodenfeuchteregime.

Der Bodenwassergehalt wird durch Niederschlagseinträge in den Boden und die Evapotranspiration an der Boden-Luft-Grenzschicht bestimmt, wobei der Anteil von Feuchtigkeit, der durch Transpiration verdunstet, relativ gering sein dürfte, da der Pflanzenbewuchs äußerst spärlich ist und nur einen geringen Bedeckungsgrad von 10-15% hat. Trlica und Biondini (1990) geben für verschiedene Pflanzenarten einer Kurzgrassteppe in Wyoming, USA eine durchschnittliche tägliche Transpiration von 0.4-1.2 mm an. Bei einer potentiellen Verdunstung von täglich ungefähr 6-7 mm an Station S 2, würde der Anteil der Transpiration an der gesamten potentiellen Verdunstung also etwa bei einem Achtel liegen.

Die Niederschlagssumme an diesem Standort beträgt im gesamten Meßzeitraum von

Juni bis September 47.2 mm, ein Wert, der etwas unter dem Durchschnitt der fünf betrachteten Stationen liegt. Die potentielle Verdunstung ist dabei mit 527 mm die höchste der Untersuchungsstationen.

Das Zusammentreffen geringer Niederschläge und hoher potentieller Verdunstung bedingt, daß die Bodenwassergehalte an dieser Meßstation mit einem Mittelwert von 3.6 %vol. die geringsten des gesamten Untersuchungsgebiets sind.

Tab.6 : Mittlere Bodenwassergehalte, Niederschlagssummen und potentielle Verdunstung während des Meßzeitraums

Station	Mittlerer Bodenwassergehalt [% vol.]	Niederschlagssumme [mm]	Potentielle Verdunstung [mm] (berechnet nach Wendling)
S 1	24.4	28.4	450
S 2	3.6	47.2	527
S 3	5.1	96.9	485
S 5	7.3	88.3	380
S 7	7.8	47.8	85

Station S 3

Dieser Standort befindet sich direkt neben dem Hauptlager der Expedition im Auslaufbereich eines mächtigen Schuttfächers südöstlich der Randkette des Tuurgen-Chaarchira-Gebirges. Wie auch an der Station S 2 handelt es sich hier um ein Sickerwasserbodenfeuchteregime, so daß der Bodenwassergehalt über die gleichen Parameter wie an Station S 2 gesteuert wird, über Niederschlag und Verdunstung.

Der Bedeckungsgrad der Vegetation ist etwas höher als an Station 2, er liegt bei ca. 30%, die Vegetationsformen können als Kurzgrassteppe eingestuft werden.

Die Niederschlagssumme beträgt 96.9 mm und die potentielle Verdunstung liegt bei 485 mm für den gesamten Meßzeitraum. Diese Einflußfaktoren führen dazu, daß der Bodenwassergehalt an Station S 3 gegenüber S 2 höher liegt, der Stationsmittelwert liegt hier bei 5.1 %vol.. Bei der Ansprache der Böden beider Standorte ohne Meßgeräte z.B. über die Fingerprobe sind die höheren Wassergehalte an S 3 allerdings nicht wahrnehmbar. Dies liegt unter anderem daran, daß der stark schluffige Boden mehr Wasser aufnehmen kann als der Sandboden an S 2. Auch ist der Boden an S 3 etwas weniger stark verhärtet als an S 2, so daß die Probenentnahme und Messungen einfacher durchführbar sind.

Vergleicht man die einzelnen Bodenhorizonte von S 2 und S 3 mit einander, fällt auf, daß gerade im Oberboden, wo sich die Auswirkungen der Niederschläge besonders deutlich zeigen müßten, mit 5.3 %vol. an S 3 gegenüber 4.6 %vol. an S 2 kein wesentlich höherer Wert vorliegt. Die doppelt so hohen Niederschläge an diesem Standort würden deutlichere Unterschiede der Bodenwassergehalte im Vergleich zu S 2 vermuten lassen.

Diese Betrachtung verdeutlicht, daß höhere Niederschlagseinträge an einem Standort nicht gleichzeitig eine proportionale Erhöhung des Bodenwassergehalts bedeuten müssen.

Die Bodenart, die Korngrößenzusammensetzung des Bodens, spielt eine entscheidende Rolle für die Versickerungsgeschwindigkeit des Bodenwassers und für die Fähigkeit des Bodens Wasser zu speichern. Sie muß daher berücksichtigt werden, wenn man die Vorgänge in einem Boden nach Niederschlagsereignissen betrachtet.

Wie an Station 2 ist auch an Station 3 Sand die am stärksten vertretene Korngrößenfraktion, wobei Mittel- und Feinsand dominieren und Grobsand nur in geringeren Anteilen vorkommt. Die Kiesanteile bewegen sich zwischen schwach kiesig und sehr schwach kiesig. Entscheidende Unterschiede bezüglich der Körnung liegen in den Schluffanteilen, die an Station 3 zwischen 33.7% und 46.6% liegen, wohingegen sie an Station 2 nur zwischen 6.7% und 8.9% betragen.

So kann man das Substrat an Station 3 als schwach- bis stark schluffigen Sand ansprechen, an Station 2 handelt es sich um Sandboden.

Ein feineres Substrat, wie es an Station 3 vorliegt, zeichnet sich gegenüber einem gröberen dadurch aus, daß es eine größere innere Oberfläche und somit ein höheres Porenvolumen besitzt. Die Poren in einem feineren Substrat sind insgesamt kleiner als in einem gröberen, vergleichbar mit einem feineren Filter; Wasser braucht also eine längere Zeit, um das Material zu durchdringen und zu versickern. Das feinere Material besitzt eine geringere Wasserleitfähigkeit.

Tab.7 : Feldgesättigte Wasserleitfähigkeit des Bodens

Standort	Datum	Tiefe	Kfs (cm/d)
S2	07.07.98	20cm	197.9
S3	04.07.98	20cm	35.8
S5	06.07.98	20cm	97.6

Diese Tabelle gibt die mit dem Guelph-Permeameter bestimmte feldgesättigte

Wasserleitfähigkeit der Standorte S 2, S 3 und S 5 an. Sie wird in cm pro Tag angegeben und kann als Richtgröße dafür betrachtet werden, wie schnell sich Wasser im Boden in Richtung der Schwerkraft ausbreitet, also auch für eine Aussage darüber, wann nach einem Niederschlag in einer bestimmten Bodentiefe eine Erhöhung des Bodenwassergehalts zu erwarten ist.

Die stellenweise geringen Unterschiede der Bodenwassergehalte an Station 2 und 3 trotz der stark unterschiedlichen Niederschlagseinträge erscheinen auf den ersten Blick nicht plausibel. Ginge man allein nach der Niederschlagssumme, müßte der Bodenwassergehalt an Station 3 wesentlich höher sein. Hinzu kommt, daß aufgrund des größeren Substrats die Versickerungsgeschwindigkeit an Station 2 größer ist als an Station 3. Die geringeren Niederschlagseinträge müßten zudem schneller versickern. Alles spricht daher für die Annahme, daß die Bodenwassergehalte an Station 2 wesentlich unter denen von Station 3 liegen müßten. Auch ist die potentielle Verdunstung im Meßzeitraum an Station 2 höher als an Station 3.

Ein möglicher Grund für die verhältnismäßig geringen Bodenwassergehalte an S 3 wäre die stärkere Neigung des gesamten Areals im Vergleich zu Station 2, die in Verbindung mit der Verteilung der Niederschläge einen stärkeren oberflächlichen Abfluß begünstigen könnte. Eine große Menge des Niederschlages ist nicht gleichmäßig verteilt gefallen, sondern in Form von wenigen Starkregenereignissen. Zwischen diesen Niederschlagsereignissen lagen zum Teil lange, intensive Trockenphasen, die zu einer Austrocknung und Verhärtung des Bodens führten, die seine Aufnahmefähigkeit für Wasser herabsetzte.

Tab.8 : Niederschlagsereignisse an S 2 und S 3

Datum	Zeit	Station 2	Station 3
26.6./ 27.6.	19:00-1:00	5.0 mm	-
29.7.	18:50-19:40	-	10.4 mm
3.8.	17:00-17:20	-	13.4 mm
22.8.	-	-	20.8 mm
22.8./ 23.8.	22:00-4:00	9.0 mm	-
7.9./ 8.9.	23:00-11:00	4.0 mm	-

Wie man aus der Tabelle ersehen kann, fanden zwei der stärksten Niederschlagsereignisse der Meßperiode in einem Zeitraum von weniger als einer Stunde statt. Das Niederschlagsereignis vom 22.8. verteilte sich zwar über den gesamten Tag, es fiel dabei allerdings die größte Summe an Niederschlag des gesamten Meßzeitraums. Somit kann man auch hierbei von einem Starkniederschlagsereignis sprechen.

Gemeinsam mit der Neigung des Geländes könnten diese großen Niederschlagsmengen dazu geführt haben, daß ein erheblicher Teil der Niederschläge nicht in den Boden eindringen konnte, oberflächlich abfloß und daher nicht zu einer Erhöhung des Bodenwassergehalts beitrug.

Bei S 2 sieht man, daß sich vergleichbare Niederschlagsmengen auf größere Zeitspannen verteilen, wie am 22./23.8., an anderen Tagen kommt es nicht zu derart starken Niederschlagsereignissen.

Ferner wäre denkbar, daß die unterschiedliche Korngrößenzusammensetzung der Böden die Verdunstung des Bodenwassers beeinflusst. In humiden Gebieten geht man im Allgemeinen davon aus, daß Böden, die sich aus feineren Substraten zusammensetzen, eine günstigere Wasserbilanz aufweisen als Böden mit gröberen Substraten, da die feineren Böden eine größere Menge Wasser aufnehmen können und dieses auch nicht so schnell versickert. In semiariden und ariden Gebieten können gerade diese Eigenschaften der feineren Böden zu ungünstigeren Wasserbilanzen führen. Noy-Meir (1973) stellt in seiner „Inverse-Texture-Hypothesis“ diese Überlegung an. Und zwar sollen bei gröberen Substraten die Wasserverluste durch Verdunstung geringer sein, da das Wasser schneller in den Boden eindringen kann als bei feineren Substraten. Aus diesem Grund nimmt man an, daß Böden mit gröberen Substraten in Trockengebieten auch für die Pflanzenproduktion besser geeignet sind.

Auf die Betrachtung von Station 2 und 3 übertragen könnte dies bedeuten, daß die

höheren Niederschlagseinträge an Station 3 durch stärkere Verdunstungsverluste minimiert werden und so nicht zu wesentlich höheren Bodenwassergehalten als an Station 2 führen können.

Tab.9 : Prozentuale Korngrößenzusammensetzung und Porenvolumen des Bodens an den Standorten

Standort	Tiefe	PorenVol	Kies	Sand (FB)	Schluff (FB)	Ton (FB)	Bodenart
S 1	0-8cm	25,2	0	95.5	2.8	1.6	Sand
	20cm	36,3	11	98.4	1.3	0.2	s.k. Sand
	30cm	30,1	32.4	99.1	0.7	0.1	s.k.Sand
S 2	0-5cm	42,4	8.4	89.2	8.9	1.9	s.k.Sand
	10-20cm	35,6	8	96.5	1.8	1.7	s.k.Sand
	40-50cm	34,8	7.9	93.2	6.7	0.1	s.k.Sand
	90cm	34,6	26.3	82.7	15.8	1.5	m.k. schwach schluffi- ger Sand
S 3	0-11cm	48,1	1.1	64.9	33.7	2.3	s.s.k. schwach schluffi- ger Sand
	11-50cm	47,8	1.7	66.4	32.3	1.3	s.s.k. mittel schluffi- ger Sand
	50-70cm	46,0	0.1	51	46.6	2.3	s.s.k.stark schluffi- ger Sand
S 5	5-8cm	34,4	0	88.3	11.7	0.3	Schwach schluffi- ger Sand
	20-35	29,4	0	79.7	18.9	1.5	Schwach schluffi- ger Sand
	50-60cm	39,8	43.6	81.1	17	1.9	m.k.schwa ch schluf- figer Sand

(m.k. = mittel kiesig ; s.k. = schwach kiesig ; s.s.k. =sehr schwach kiesig)

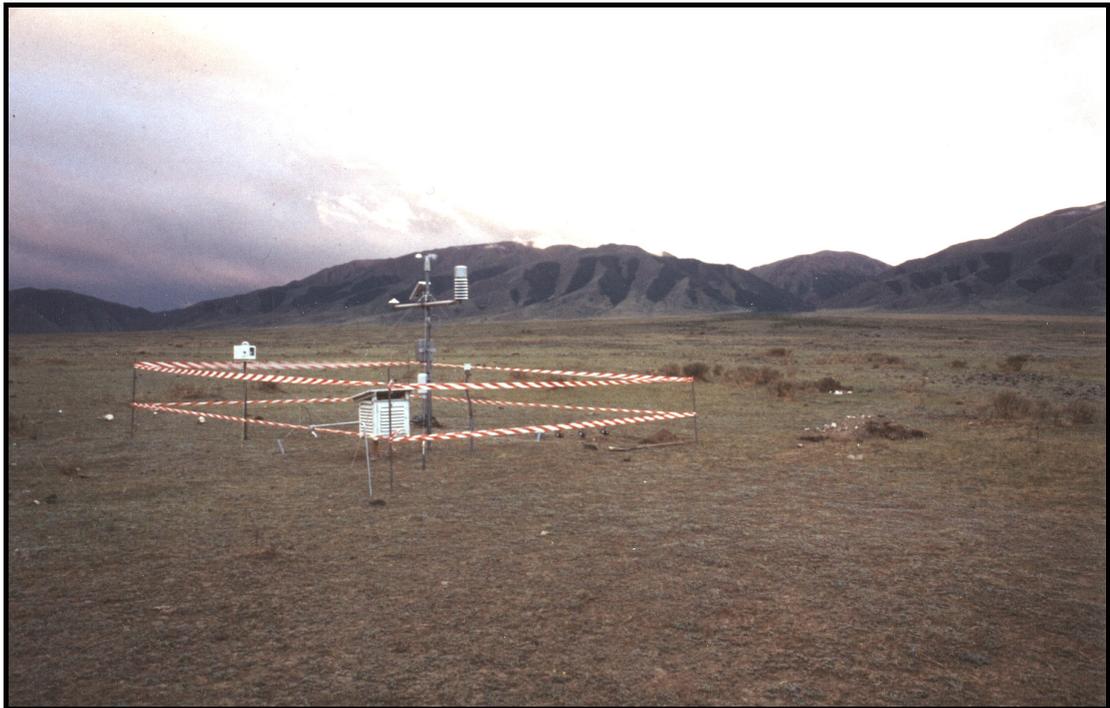


Abb. 16 : Meßgarten an S 3

Station S 5

Standort 5 befindet sich auf einem Sattel am Bergfuß im Bereich der Gebirgswaldsteppe. Da die Probenentnahmen bodenmaterialbedingt nicht immer durchführbar waren, liegen dem Mittelwert dieser Station mit acht Messungen pro Horizont nur relativ wenige Einzelwerte zugrunde.

Der Standortmittelwert des Bodenwassergehalts liegt mit 7.3 %vol. deutlich über den Mittelwerten der Standorte S 2 und S 3.

Gegenüber den Standorten in der Ebene zeichnen sich die in Hanglage durch gemäßigte klimatische Verhältnisse im Sommer aus. Die Temperaturen sind aufgrund der höheren Lage etwas geringer, und häufig fallen höhere Niederschläge als in den tiefer gelegenen Bereichen; auch die Verdunstung ist niedriger.

An Station 5 beträgt die Summe der Niederschläge 88.3 mm, zusammen mit der relativ geringen Verdunstung von 380 mm erklären sich so die verhältnismäßig hohen Bodenwassergehalte.

Station S 7

Station S 7 befindet sich in einem steilen Waldstück im mittleren Bereich des Berghanges, in dem der für das Gebiet typische Lärchenwald vorherrschend ist. Der Mittelwert des Bodenwassergehalts liegt bei 7.8 %vol., dieser Wert bestätigt den Eindruck, den man vor Ort vom Boden erhält, nämlich, daß er an diesem Waldstandort verglichen mit den anderen Standorten feuchter war.

Die Meßwerte repräsentieren allerdings nur die Zeit vom 10.8. bis zum 9.9, da die Station erst im Verlauf der Meßperiode eingerichtet wurde.

Die Summe der Niederschläge liegt mit 47.5 mm verglichen mit dem anderen Hangstandort S 5 relativ niedrig. Da es sich um einen Waldstandort handelt, verdunstet ein größerer Teil der Niederschläge schon durch Interzeption und erreicht nicht die Auffangfläche des Pluviographen. So dürfte die tatsächliche Niederschlagsmenge an diesem Standort höher liegen.

Mit 85 mm hat die potentielle Verdunstung einen für einen Waldstandort typischen niedrigen Wert, der gegenüber den anderen Stationen sehr viel geringer ist und die geländeklimatischen Gegensätze der bewaldeten und waldfreien Standorte wiedergibt.

Wie an den Stationen S 2, S 3 und S 5 kann die Hydromorphie des Bodens durch ein Sickerwasserbodenfeuchtere regime gekennzeichnet werden.

5.2. Die Variabilität der Bodenwassergehalte an den Standorten

Die Dynamik der Bodenwassergehalte an den einzelnen Standorten wird nach zwei Gesichtspunkten untersucht, ihren Unterschieden zwischen den Horizonten und der zeitlichen Veränderung der Bodenwassergehalte.

Dabei wurden zunächst für jeden Horizont statistische Kennwerte ermittelt, über deren Vergleich Aussagen bezüglich der Bodenwasserdynamik an den Standorten getroffen werden können.

Station 1

Tab.10 : Statistische Kenngrößen S 1

Station	Tiefe	Max. : Datum	Min. : Datum	Mittelwert	Standardabw.	Variationskoeffizient
S1	5cm	28.47 : 8.9.	9.76 : 28.7.	19.89	5.95	30
S1	20cm	32.91 : 30.6.	7.34 : 28.7.	23.03	9.18	40
S1	30cm	35.91 : 25.8.	19.68 : 28.7.	30.34	4.49	15

Die Tabelle gibt für den untersuchten Bodentiefen die Extrema mit dazugehörigem Datum, den Mittelwert, die Standardabweichung als Streuungsmaß und den Variationskoeffizienten als dimensionslose Größe für die Streuung. Er kann als Maß für die Stärke der Dynamik des Bodenwassergehalts über den Meßzeitraum betrachtet werden.

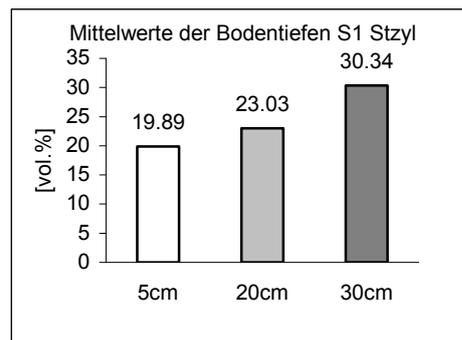


Abb. 17 : Mittelwerte des volumetrischen Bodenwassergehalts der einzelnen Meßtiefen; S 1

An S 1, der Station mit den durch die Grundwasserbeeinflussung höchsten Bodenwassergehalten, steigen die Durchschnittswerte der einzelnen Horizonte mit zunehmender Bodentiefe an, die Standardabweichung ist in 20cm Tiefe am größten. Dort sind auch die Gegensätze zwischen den einzelnen Tagesmeßwerten und den Extrema am stärksten ausgeprägt. In 30cm Tiefe beträgt das Minimum 19.68%, ist also ungefähr 2.5 mal so hoch wie die Minimalwerte in den anderen Horizonten. Auch das Maximum ist in diesem Horizont größer als in den anderen Horizonten, so ist dann auch der Mittelwert der Bodenwassergehalte am größten.

Die zeitliche Entwicklung der Bodenwassergehalte verläuft, wie sich aus dem Variationskoeffizienten ergibt, in 5 cm und 20 cm Tiefe mit sehr viel stärkeren

Abweichungen vom Mittelwert als in 30 cm Tiefe.

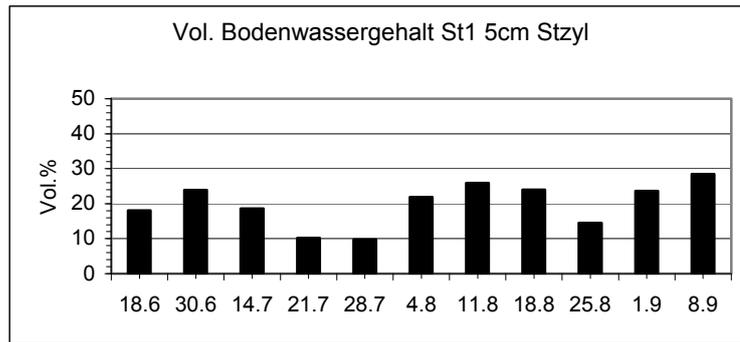


Abb. 18 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 1; 5 cm Bodentiefe

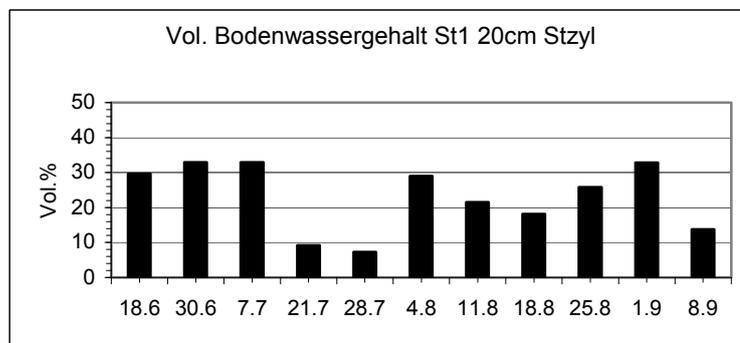


Abb. 19 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 1; 20 cm Bodentiefe

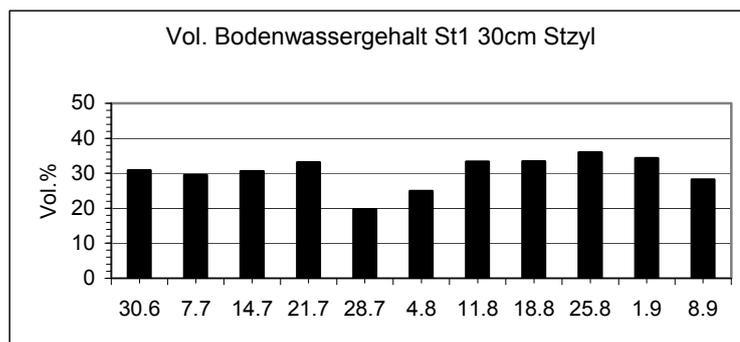


Abb. 20 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 1; 30 cm Bodentiefe

Beim Vergleich der Diagramme zeigt sich, daß Zusammenhänge bei den Tendenzen der Meßreihen der Horizonte bestehen. So liegen z.B. in 5cm und 20cm Tiefe zu den selben Tagen, am 21.7. und am 28.7., die geringsten Werte des Meßzeitraums vor, in

30cm Tiefe liegt das Minimum am 28.7..

Diese übereinstimmenden Tendenzen zeigen, daß die Faktoren, die an diesem Standort die Bodenwassergehalte beeinflussen, in den einzelnen Horizonten gleichgerichtete Entwicklungen hervorrufen können.

Dabei muß angemerkt werden, daß es auch entgegengesetzte Bewegungen gibt, Zunahmen des Bodenwassergehalts in einem Horizont, während er in einem anderen abnimmt. Die Minima am 28.7. sind allerdings in allen Horizonten vorhanden, es kann also davon ausgegangen werden, daß sie durch äußere Bedingungen verursacht wurden, die Auswirkungen auf alle Horizonte hatten.

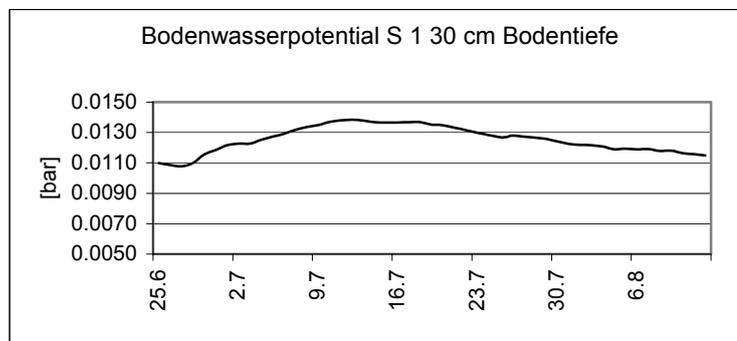


Abb. 21 : Tageswerte des Bodenwasserpotentials an S 1; 30 cm Bodentiefe

Die Meßwerte der Gipsblocksensoren liegen an dieser Station in allen Bodentiefen in Bereichen, die wassergesättigten Verhältnissen entsprechen, nämlich zwischen 0 und 0.1 bar. Stellvertretend für die anderen Bodentiefen sind hier die Werte aus 30 cm Tiefe dargestellt. Das leichte Abfallen der Kurve nach dem 16.7. zeigt einen Rückgang des Bodenwasserpotentials und somit eine Erhöhung des Feuchtegehalts, die allerdings sehr gering ist, und von den anderen Meßverfahren nicht beschrieben wird.

Die Entwicklung der Bodenwassergehalte an diesem Standort kann von zwei Faktoren abhängen, zum einen von den Niederschlagseinträgen und der Verdunstung im Laufe des Meßzeitraums, und zum anderen von der Höhe des Grundwasserstands. Die Niederschläge dürften dabei, sollten sie überhaupt für die Bodenwassergehalte dieser Station von Bedeutung sein, in den oberen Bodenschichten die stärkeren Auswirkungen haben. Der Einfluß des Grundwassers durch den kapillaren Aufstieg dürfte sich auf alle Bodenhorizonte auswirken.

Der Standort S 1 zeichnet sich durch die geringsten Niederschläge während dieser Meßperiode im Untersuchungsgebiet aus, am 22.8. findet mit 10 mm das stärkste Niederschlagsereignis dieser Meßstation statt. Eine Erhöhung der Bodenwassergehalte in 5 cm Tiefe ist bei der nächsten Probenentnahme am 25.8. nicht zu verzeichnen, allerdings können in den Tagen zwischen Niederschlagsereignis und der Messung auch schon Austrocknungsvorgänge eingesetzt haben. Nach den weniger starken Niederschlägen vom 2.8. und vom 3.8. ist am 4.8. ein Anstieg des Bodenwassergehalts gegenüber dem vorangegangenen Meßtermin zu verzeichnen. Zu diesem Termin, bei dem die Zeit zwischen Niederschlagsereignis und Probenentnahme also nur einen Tag beträgt, erkennt man einen Einfluß der Niederschläge auf den Bodenwassergehalt.

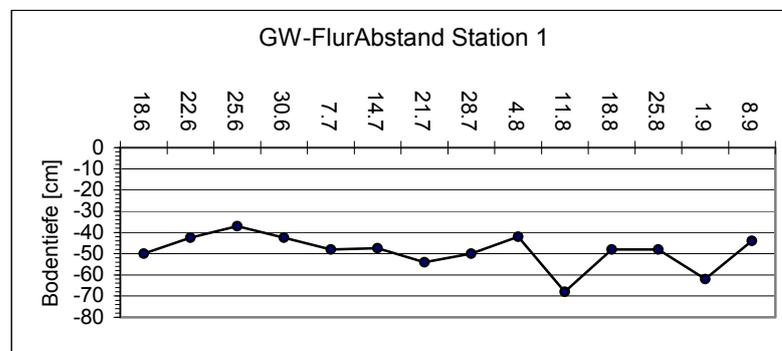


Abb. 22 : Grundwasser-Flur Abstand an S 1

Der Grundwasser-Flur-Abstand ist am 30.6. und am 4.8. besonders gering mit nur etwas über 40 cm. Man könnte annehmen, daß dieser hohe Stand den kapillaren Aufstieg begünstigt und zu hohen Bodenwassergehalten führt. Vergleicht man die Bodenwassergehalte dieser Tage mit den Werten anderer Tage mit geringeren Grundwasserständen, so fallen diese Tage durch keine besonders hohen Bodenwassergehaltswerte auf. Auch sind an den Tagen mit extrem niedrigen Grundwasserständen wie dem 11.8. und dem 1.9. keine besonders niedrigen Bodenwassergehalte gemessen wurden. Eine direkte Beeinflussung der Bodenwassergehalte an dieser Meßstation durch die Veränderung des Grundwasserstands ist also nicht festzustellen, das heißt, daß der kapillare Hub während der gesamten Meßperiode von der Grundwasser-Flur-Oberfläche bis zur Bodenoberfläche reicht.

Station S 2

Tab.11 : Statistische Kenngrößen S 2

Station	Tiefe	Max. : Datum	Min. : Datum	Mittelwert	Standardabw.	Variationskoeffizient
S2	5cm	8.13 : 30.6.	1.53 : 28.7.	4.63	1.92	41
S2	20cm	4.94 : 14.7.	0.78 : 28.7.	2.65	1.21	46
S2	50cm	5.25 : 22.6.	1.91 : 1.9.	3.42	1.17	33

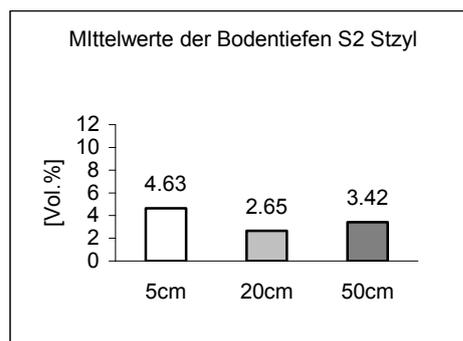


Abb. 23 : Mittelwerte des volumetrischen Bodenwassergehalts der einzelnen Meßtiefen; S 2

An Station 2, an der die geringsten Bodenwassergehalte des gesamten Untersuchungsgebietes gemessen werden, liegt in 5 cm Bodentiefe der höchste Durchschnittswert dieser Station, die Streuung ist in 20 cm Tiefe am größten mit einem Variationskoeffizienten von 46.

Die Entwicklung der Bodenwassergehalte an diesem Standort wird nur von Niederschlägen und Verdunstung bestimmt, da kein Grundwassereinfluß wie an Station 1 besteht.

Bei den Bodenwassergehalten in 5cm Bodentiefe gibt es drei herausragende Werte am 30.6., am 4.8. und am 8.9., die alle über 6 %vol. betragen. Der Probenentnahme vom 30.6. gingen Niederschläge voran, zwischen denen und der Entnahme allerdings mehrere Tage lagen. An den anderen beiden Terminen gingen den Bodenwassergehaltsmessungen unmittelbar kleinere Niederschlagsereignisse voraus. Die zeitliche Lage der Maxima dieses Horizonts zeigt also den Zusammenhang zwischen Niederschlagseintrag und Erhöhung des Bodenwassergehalts auf. Einschränkend muß man dazu sagen, daß zu anderen Terminen vergleichbare und auch höhere Niederschlagseinträge keine bedeutende Erhöhung der Bodenwassergehalts hervorriefen.

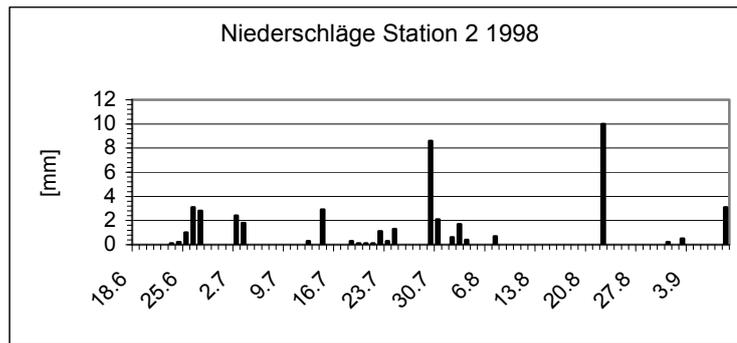


Abb. 24 : Tagessummen der Niederschläge an S 2

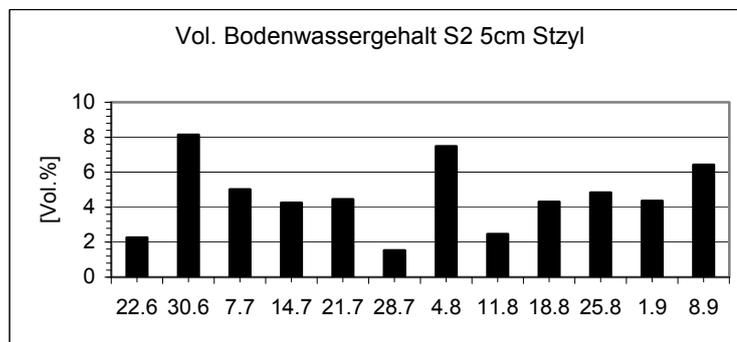


Abb. 25 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 2 5 cm Bodentiefe

Der Sommer ist im Uvs-Nuur-Becken die einzige Jahreszeit, in der größere Niederschlagsmengen fallen, die Einträge in der Zeit vom Herbst bis zum Frühsommer sind dem gegenüber in der Regel unbedeutend und ohne größere Auswirkung auf den Bodenwasserhaushalt. Die Niederschläge während der Sommers 1998 beeinflussen den Bodenwassergehalt an Station S 2 im Oberboden so, daß nach den Niederschlagseinträgen eine Erhöhung erfolgt, die aber aufgrund der hohen Verdunstung und der damit verbundenen schnellen Austrocknung rasch wieder zurückgeht.

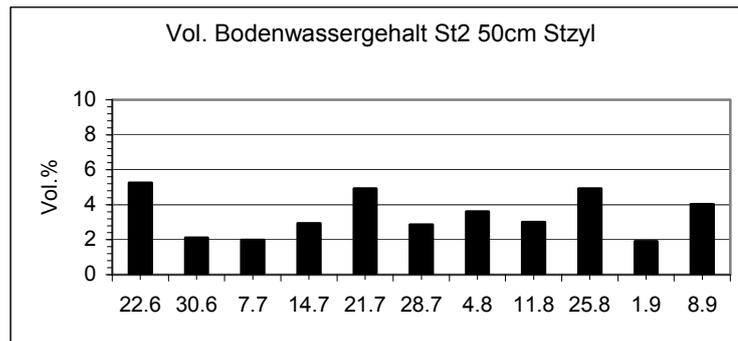


Abb. 26 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 2; 50 cm Bodentiefe

Betrachtet man die Entwicklung der Bodenwassergehalte in 50 cm Tiefe, gibt es auch hier einige höhere Werte, wie z.B. am 25.8., die mit den vorangegangenen Niederschlägen in Zusammenhang stehen. Aber auch in dieser Tiefe schwanken die Werte.

Es ist kein kontinuierlicher Anstieg der Bodenwassergehalte auszumachen, der auf einer nachhaltigen Durchfeuchtung des Bodens durch die Niederschlagseinträge während der Sommermonate beruhen könnte.

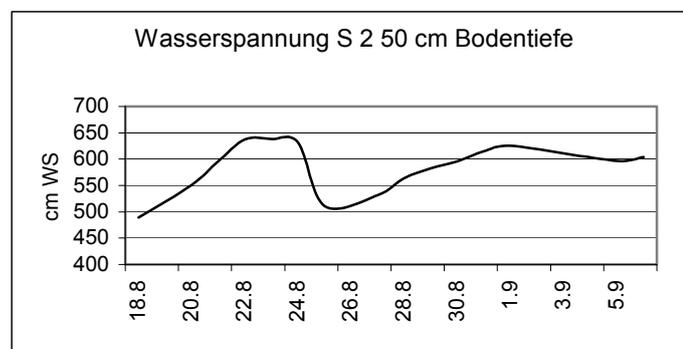


Abb. 27 : Tageswerte der Wasserspannung an S 2; 50 cm Bodentiefe

Der Verlauf der Wasserspannungskurve in 50 cm Bodentiefe für die Zeit vom 18.8. bis zum 6.9. erfolgt parallel zum Verlauf der Bodenwassergehalte in dieser Tiefe, am 25.8. erfolgt ein Anstieg des Bodenwassergehalts, dementsprechend geht der Wert der Wasserspannung zurück. Zum 1.9. hin steigt die Wasserspannung wieder an, parallel dazu ist der Bodenwassergehalt an diesem Meßtermin geringer als am Vorherigen.

Station S 3

Tab.12 : Statistische Kenngrößen S 3

Station	Tiefe	Max. : Datum	Min. : Datum	Mittelwert	Standard- abw.	Variations- koeffizient
S3	5cm	17.45 : 24.8.	0.82 : 17.8.	5.30	4.02	76
S3	20cm	22.7 : 3.8.	3.32 : 27.7.	5.88	3.78	64
S3	50cm	5.7 : 6.7.	2.52 : 14.8.	4.24	0.80	19

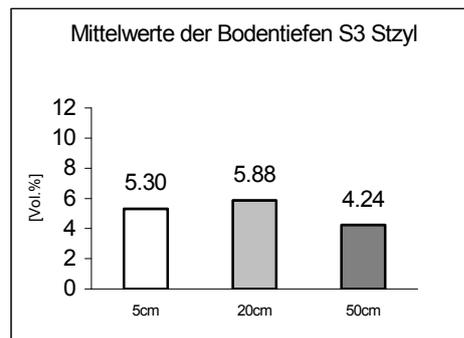


Abb. 28 : Mittelwerte des volumetrischen Bodenwassergehalts der einzelnen Meßtiefen; S 3

Der oberste Horizont in 5 cm Bodentiefe weist die stärkste Bewegung innerhalb der Meßwerte auf, der Variationskoeffizient ist mit 76 der größte des gesamten Untersuchungsgebiets.

In 20 cm und 50 cm Tiefe nehmen die Abweichungen innerhalb der Meßwerte ab, der Variationskoeffizient in 20 cm Tiefe ist der zweitgrößte des Untersuchungsgebietes, in 50cm Tiefe liegt mit 19 ein relativ kleiner Wert vor, der auf eine relativ einheitliche Meßreihe ohne größere Bewegungen zurückzuführen ist.

Eine ausführliche Beschreibung von Station S 3 wird im folgenden Kapitel vorgenommen.

Station S 5

Tab.13 : Statistische Kenngrößen S

Station	Tiefe	Max. : Datum	Min. : Datum	Mittelwert	Standardabw.	Variationskoeffizient
S5	5cm	14.52 : 21.6.	4.71 : 13.7.	9.11	3.30	36
S5	20cm	6.85 : 31.8.	2 : 9.9.	5.44	1.65	30

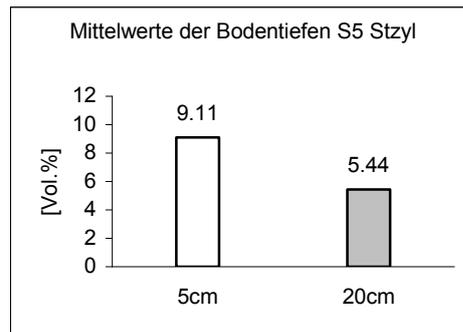


Abb. 29 : Mittelwerte des volumetrischen Bodenwassergehalts der einzelnen Meßtiefen; S 5

An Station S 5 liegt in 5 cm Bodentiefe der zweithöchste Mittelwert des Untersuchungsgebiets nach S 1, der Variationskoeffizient in dieser Tiefe liegt bei 36, einem mittleren Wert, obwohl die Gegensätze zwischen den Einzelwerten zum Teil erheblich sind und sich zwischen 4.7 %vol. und 14.5 %vol. bewegen.

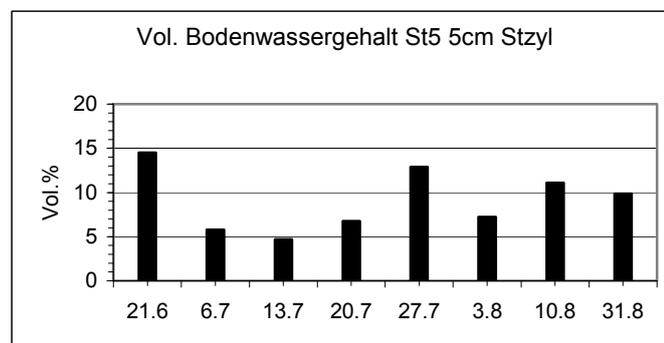


Abb. 30 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 5; 5 cm Bodentiefe

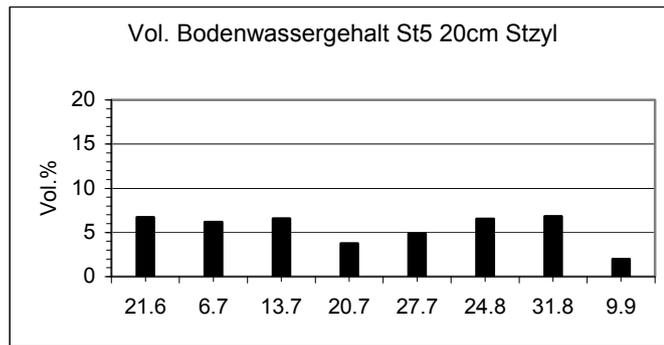


Abb. 31 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 5; 20 cm Bodentiefe

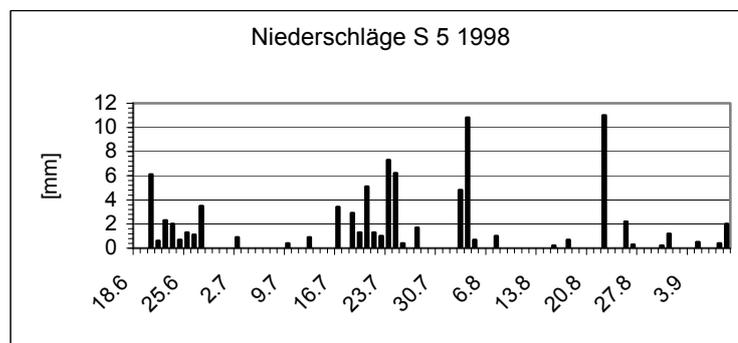


Abb. 32 : Tagessummen der Niederschläge an S 5

Die Niederschlagssumme ist an S 5 mit 88.7 mm für das Untersuchungsgebiet als hoch einzustufen, nur an S 3 fällt eine größere Menge. Die Niederschläge fallen, wie es schon an anderen Standorten des Untersuchungsgebiets beobachtet wurde, oft in Form von Starkregenereignissen, die zu einer schnellen Erhöhung der Bodenwassergehalte führen. Zwischen den Niederschlagsereignissen gibt es längere Trockenphasen, die einen Rückgang der Bodenwassergehalte verursachen. Die Gegensätze zwischen den Tageswerten der Bodenwassergehalte sind infolgedessen sehr stark ausgeprägt und geben die unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalte des Bodens wieder.

Wie auch an Standort S 2 sind im Oberboden die spontanen Veränderungen der Bodenwassergehalte nach Niederschlägen zu beobachten, in 20 cm Tiefe ist jedoch keine gerichtete Entwicklung der Bodenwassergehalte, z.B. in Form einer Erhöhung zum Ende der Meßperiode hin, festzustellen.

Station S 7

Tab.14 : Statistische Kenngrößen S 7

Station	Tiefe	Max. : Datum	Min. : Datum	Mittelwert	Standard- abw.	Variations- koeffizient
S7	5cm	8.93 : 24.8.	4.92 : 17.8.	7.28	1.50	21
S7	20cm	8.53 : 31.8.	7.36 : 17.8.	8.28	0.82	10

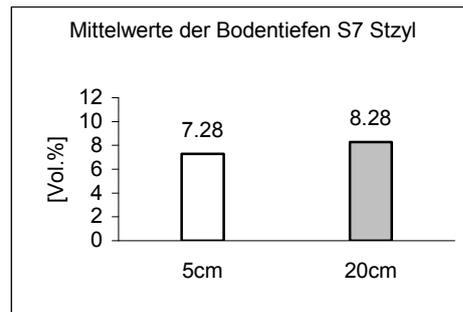


Abb. 33 : Mittelwerte des volumetrischen Bodenwassergehalts der einzelnen Meßtiefen; S 7

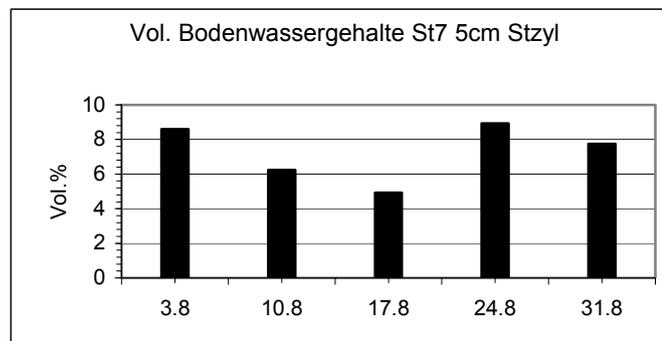


Abb. 34 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 7; 5 cm Bodentiefe

Die Mittelwerte beider Meßhorizonte dieser Station liegen beide mit Werten von 7.3 bzw. 8.3 %vol. im gleichen Größenbereich, somit sind die oberen Bodenhorizonte gleichmäßig durchfeuchtet.

Dieser Waldstandort wird durch eine besonders geringe potentielle Verdunstung charakterisiert, die einen Wert von nur 85 mm hat. Zwar gelangen durch die Niederschläge von 47.8 mm keine übermäßig großen Einträge in den Boden, aber die Wasserverluste durch Verdunstung sind auch sehr viel geringer als an den

unbewaldeten Standorten. So sind auch im Oberboden relativ einheitliche Bodenwassergehalte zu verzeichnen, der Variationskoeffizient liegt bei nur 21. Das ist der geringste Wert in 5 cm Bodentiefe des Untersuchungsgebiets. In 20 cm Tiefe liegt er bei nur 10. Das ist der geringste Wert des gesamten Untersuchungsgebiets.

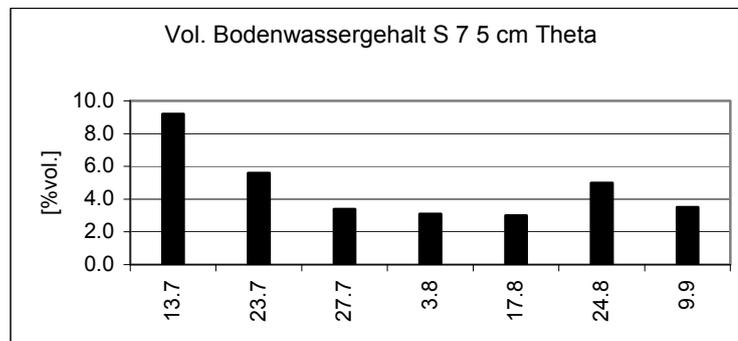


Abb. 35 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 7; 5 cm Bodentiefe aus Thetasondenmessungen

Für die erste Hälfte des Meßzeitraums liegen Thetasondenwerte vor, die sich im gleichen Bereich bewegen wie die Stechzylinderwerte. Bei den Thetasondenwerten ist ein deutlicher Rückgang nach dem 23.7. zu verzeichnen.

Der Waldstandort S 7 zeichnet sich also aufgrund seiner geringen Verdunstung und der infolgedessen ausgewogenen Feuchtesituation durch relativ einheitliche Bodenwassergehalte mit einer geringen zeitlichen Variabilität aus.

5.3. Interpretation der Bodenwasserdynamik an Station S 3 anhand von Thetasondenmeßwerten

An diesem Standort, der sich direkt neben dem Hauptlager der Expedition befand, wurden mit der Thetasonde fast täglich Bodenwassergehaltsmessungen durchgeführt. Auf diese Weise kam es hier zu der höchsten zeitlichen Meßdichte dieser Werte und zu den aussagekräftigsten Ergebnissen.

Wie auch an den anderen Standorten sind die Einflüsse der Niederschläge auf den Bodenwassergehalt in 5 cm Tiefe am deutlichsten zu erkennen. Die hohe zeitliche Dichte der Thetasondenwerte gibt auch kurzfristige Veränderungen des Bodenwassergehalts wieder und ermöglicht so relativ genaue Aussagen über die Zusammen-

hänge zwischen Niederschlagseintrag und Veränderung des Bodenwassergehalts.

Wie aus dem Diagramm der zeitliche Entwicklung der Bodenwassergehalte zu erkennen ist, erfolgt die Veränderung der Werte nach einem gewissen Muster.

Es erfolgen rasche Anstiege des Bodenwassergehalts, die meistens als Einzelwerte aus einer Umgebung niedriger Meßwerte herausragen. Vor diesen Anstiegen werden zum Teil extrem niedrige Werte gemessen, nach den hohen Werten kommt es zu einem raschen Rückgang der Meßwerte, manchmal erfolgt der Rückgang allerdings auch durch ein langsames Absinken.

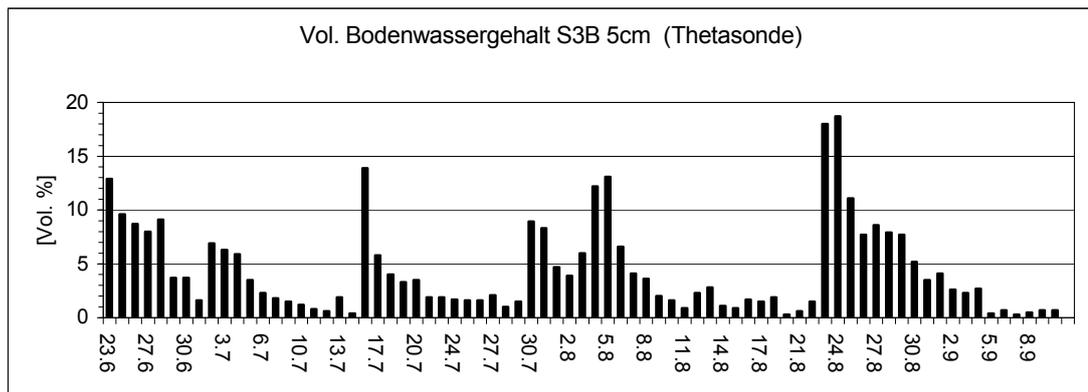


Abb. 36 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 3; 5 cm Bodentiefe

Die Tage, an denen die Werte der Bodenwassergehaltsmessungen stark ansteigen, liegen in den meisten Fällen mit den Tagen zusammen, an denen es zu stärkeren Niederschlagsereignissen kommt. So zum Beispiel am 2.7. und am 16.7..

Am 29.7., am 3.8., und am 22.8. fallen ebenfalls erhebliche Mengen an Niederschlag, die damit korrespondierenden Bodenwassergehaltswerte werden allerdings erst an den jeweils darauf folgenden Tagen gemessen.

Zu solchen Verzögerungen kann es kommen, da die Tagesmessungen nicht immer nach den Niederschlägen durchgeführt wurden, sondern zum Teil auch schon davor, und so die Auswirkungen der Niederschläge erst am nächsten Tag registriert werden können.

Die weniger starken Niederschläge wirken sich auch auf die Erhöhung der Bodenwassergehalte aus, wenn auch weit weniger auffällig als die Starkniederschläge, wie z.B. die Niederschläge vom 2.8. auf die Bodenwassergehalte vom 3.8..

Innerhalb der Meßreihe der Thetasonde in 5 cm Bodentiefe ist weiterhin auffällig,

daß sich mehrfach an aufeinanderfolgenden Meßtagen die Bodenwassergehalte erhöhen, ohne daß in der Zwischenzeit Niederschlag gefallen ist, so z.B. vom 4.8. auf den 5.8. und vom 23.8. auf den 24.8..

Diese Erhöhungen liegen bei 0.9 bzw. 0.7 % vol., bewegen sich also im Bereich des bauartbedingten Meßfehlers der Sonde von 5%. In einem gewissen Maß können diese Abweichungen natürlich auch durch Heterogenitäten im Boden verursacht werden, die beim Vergleich aller Meßwerte berücksichtigt werden müssen, da sie auf alle Messungen einen Einfluß gehabt haben können.

Bei der Betrachtung der Diagramme fällt auf, daß es bei der Auswirkung der Niederschläge auf den Bodenwassergehalt auch quantitative Zusammenhänge zwischen der Höhe der Niederschläge und dem Maß, in welchem der Bodenwassergehalt ansteigt, gibt. Dabei ist es nicht jedoch so, daß eine bestimmte Menge an Niederschlag immer zu einer proportionalen Erhöhung des Bodenwassergehalts führen muß.

Um über das genaue Maß der Erhöhung Aussagen treffen zu können, müßte gewährleistet sein, daß die Bodenwassergehaltsmessungen immer im gleichen Zeitabstand nach Ende der Niederschläge durchgeführt werden. Eine derartige Meßroutine war nicht Bestandteil des Meßprogramms, insofern können keine genauen Aussagen über derartige Zusammenhänge gemacht werden.

Die mittleren Niederschläge von etwas über 6 mm Höhe am 16.7. führen zu einem starken Anstieg des Bodenwassergehalts auf fast 14 %vol.. Die Niederschläge von ca. 12 mm am 29.7. lassen die Bodenwassergehalte hingegen nur auf 9 %vol. ansteigen. Der Ausgangsgehalt an Bodenwasser war für beide Termine ungefähr gleich. Beim zweiten Termin mag die zeitliche Verzögerung bei der Messung eine Rolle spielen, allerdings waren die Niederschläge auch stärker, so daß das Maß der Erhöhung des Bodenwassergehalts nicht ganz im erwarteten Bereich liegt.

Dabei kann allerdings auch der oberflächliche Abfluß von Regenwasser eine Rolle spielen, durch den auch bei starken Niederschlägen die Erhöhung des Bodenwassergehalts in Maßen gehalten wird, wenn nicht alles Niederschlagswasser in den Boden eindringt. Dazu kann es kommen, sobald die Niederschlagsmenge die Infiltrationsrate des Bodens übersteigt, und der Boden nicht mehr in der Lage ist alles dargebotene Wasser aufzunehmen. Es sei auf die Tabelle der Starkregenereignisse an Station S 3 in Kapitel 5.1. verwiesen, in der einige besonders heftige Niederschläge dargestellt sind.

Nach einem Anstieg der Bodenwassergehalte nach größeren Regenfällen gehen sie

am darauffolgenden Tag meist wieder zurück, da keine weitere Wasserzufuhr stattfindet. Der Rückgang der Bodenwassergehalte hängt von verschiedenen Faktoren ab, zum einen von der Versickerung des Wassers im Boden und zum anderen von der Verdunstung und von der Menge des eingegangenen Wassers, die den Ablauf der Verdunstung mitbestimmt.

Für die Geschwindigkeit der Versickerung des Wassers im Boden gibt es als Richtgröße die feldgesättigte Wasserleitfähigkeit, sie beträgt an Station S 3 35 cm/d, ist aber nicht von den Niederschlagsmengen und Bodenwassergehalten abhängig. Sie kann somit als eine Größe betrachtet werden, die zu allen Zeitpunkten und unter den verschiedenen Bedingungen gleich ist.

Beim Rückgang der Bodenwassergehalte fällt auf, daß bei hohen vorliegenden Bodenwassergehalten meist ein sprunghafter Rückgang um einen großen Betrag erfolgt, bei geringeren Bodenwassergehalten erfolgt der Rückgang in kleineren Schritten.

Nach Niederschlägen geht der Bodenwassergehalt vom 2.7. auf den 3.7. von 6.9% auf 6.3% um nur 0.6% zurück, am nächsten Tag erfolgt nochmals ein geringer Rückgang. Vom 16.7. auf den 17.7. erfolgt ein Rückgang von 13.9% auf 5.8%, also um 8.1%. Die potentielle Verdunstung liegt zu beiden Terminen mit Tageswerten von 6 und 7 mm in ähnlichen Bereichen und kann allein das unterschiedliche Verhalten beim Rückgang der Niederschläge nicht erklären.

Der starke, sprunghafte Rückgang der Bodenwassergehalte erfolgt stets bei hohen Bodenwassergehaltswerten, es liegt also nah anzunehmen, daß er mit der Menge an Bodenwasser zusammenhängt.

Hartge und Horn (1991) beschreiben die Verdunstung aus dem Boden als einen Vorgang, der in drei Phasen abläuft, unter der Voraussetzung, daß kein Wasser im Boden ersetzt wird. Während der ersten Phase findet eine sehr starke Verdunstung statt, die fast so stark wie die Verdunstungsvorgänge an einer freien Wasseroberfläche sind. Die zweite Phase setzt ein, wenn der Wassergehalt des Bodens erheblich zurückgeht und die Wasserleitfähigkeit sinkt, dies reduziert die Stärke der Verdunstung, die im Verlauf dieser Phase kontinuierlich im hohen Maße abnimmt. Während der dritten Phase findet konstant eine geringe Verdunstung statt.

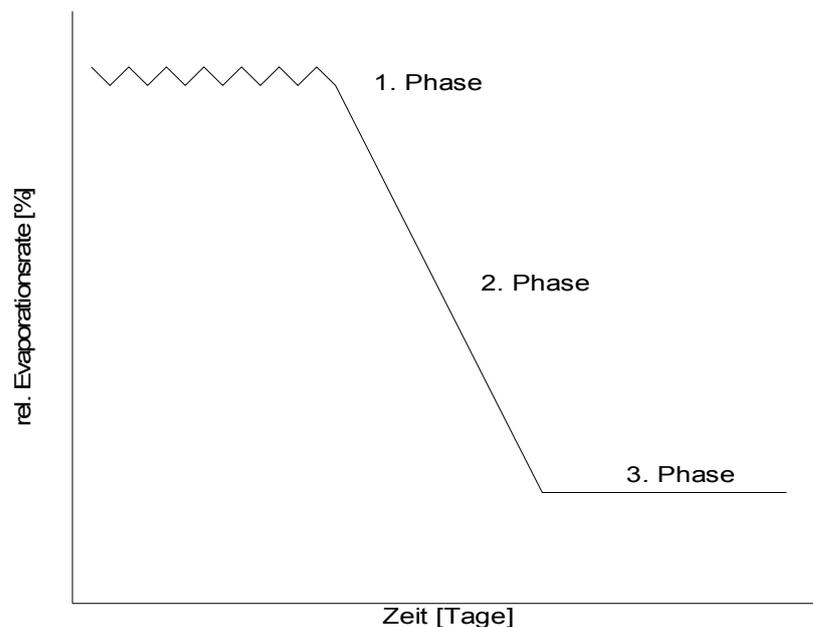
Zeitlicher Ablauf der Evaporation aus dem Boden

Abb. 37 : Zeitlicher Ablauf der Evaporation aus dem Boden (aus Hartge/Horn, 1991)

Die aufgrund des Wasserentzugs zurückgegangene Wasserleitfähigkeit wirkt wie eine Evaporationsbarriere. Hartge/Horn (1991) : „Wenn keine Zufuhr vom Grundwasser her erfolgt, so ist die erste Phase der Evaporation nur kurz...“.

Dieses Modell vom Ablauf der Verdunstung würde die sprungartige Abnahme hoher Bodenwassergehalte und die stufenartige Abnahme kleinerer Bodenwassergehalte erklären.

Bei kleinen Erhöhungen kommt es durch den geringen Feuchtigkeitseintrag nur zu einer geringen Erhöhung der Wasserleitfähigkeit, kein bedeutender Wassernachschub während einsetzender Verdunstungsvorgänge ist gewährleistet, es wird also sehr schnell die zweite, langsam voranschreitende Verdunstungsphase erreicht.

Bei größeren Erhöhungen der Bodenwassergehalte findet aufgrund eines höheren Wassernachschubs und einer höheren Wasserleitfähigkeit, eine intensivere erste Verdunstungsphase statt, die in kurzer Zeit, bis es zur Ausbildung einer Evaporationsbarriere während der zweiten Phase kommt, eine schnelle Verdunstung größerer Mengen Bodenwasser stattfinden läßt.

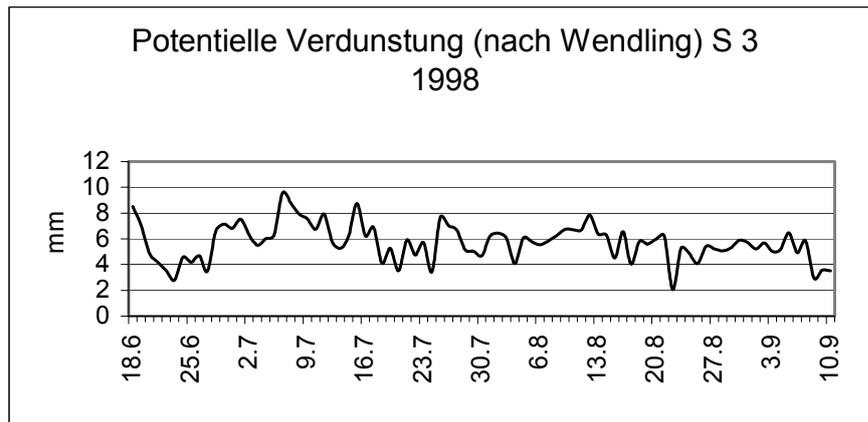


Abb. 38 : Tagessummen der potentiellen Verdunstung berechnet nach Wendling; S 3

Generell kann man zum Bodenhorizont in 5 cm Tiefe sagen, daß er als schnell auf aktuelle Veränderungen ansprechender Spiegel der Niederschlagsverhältnisse angesehen werden kann, der durch starke Schwankungen des Bodenwassergehalts in teilweise geringer Zeit charakterisiert ist. Diese hohe Variabilität wird auch von den statistischen Größen bestätigt; der Variationskoeffizient liegt in 5 cm Tiefe mit einem Wert von 95 außergewöhnlich hoch.

Die Höhe der Bodenwassergehalte der tiefer liegenden Bodenschichten wird wie im obersten Horizont über die Niederschlagseinträge gesteuert, allerdings sind die Zusammenhänge nicht so unmittelbar zu erkennen.

In 10 cm Bodentiefe werden die Bodenwassergehalte noch sehr stark von den Niederschlägen beeinflusst, aber schon etwas weniger direkt als in 5 cm Tiefe, wo selbst sehr kleine Niederschlagsmengen zu einer deutlichen Erhöhung des Bodenwassergehalts führen. In 10 cm Tiefe kann eine starke Erhöhung des Bodenwassergehalts z.B. nach den hohen Niederschlägen vom 22.8. beobachtet werden. Die starken Niederschläge vom 3.8. haben hingegen kaum Auswirkungen in dieser Tiefe. Die zahlreichen extremen Schwankungen der Bodenwassergehalte wie in 5 cm Tiefe sind nicht vorhanden. So liegt auch der Variationskoeffizient in dieser Tiefe bei nur 39, weniger als der Hälfte des Wertes aus 5 cm Tiefe.

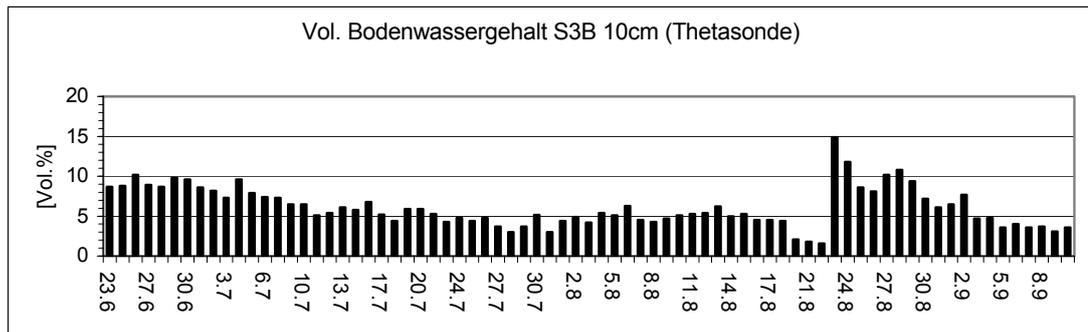


Abb. 39 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 3; 10 cm Bodentiefe

Tab.15 : Statistische Kenngrößen der Thetasondewerte S 3

Station	Tiefe	Max. : Datum	Min. : Datum	Mittelwert	Standard- abw.	Variations- koeffizient
S3 B	5cm	18.7 : 24.8.	0.3 : 20.8.	4.4	4.2	95
S3 B	10cm	14.9 : 23.8.	1.6 : 22.8.	6.1	2.4	39
S3 B	20cm	9.5 : 28.6.	3.1 : 12.8	6.1	1.7	28
S3 B	30cm	9.3 : 28.6.	2.1 : 5.9.	5.8	1.7	29
S3 B	40cm	8.8 : 3.7.	2.3 : 9.8.	5.2	1.7	33
S3 B	50cm	10.2 : 30.6.	2.2 : 14.8.	5.3	1.9	36

Bei der Betrachtung der Diagramme für die Bodenwassergehalte in 20 cm Tiefe gibt es keine auffälligen herausragenden Werte mehr, die eine Reaktion des Bodens auf starke Niederschlagsereignisse erkennen lassen. Erhöhungen des Bodenwassergehalts können nur als langfristige Veränderungen beobachtet werden.

Die Niederschläge aus der Zeit um den 2.7. lassen die Werte vom 3.7. über den 4.7. zum 5.7. hin ansteigen. Auch nach dem Starkniederschlag vom 22.8. ist ein Anstieg des Bodenwassergehalts zu verzeichnen.

Bei den Meßwerten der Thetasonde in 20cm Bodentiefe läßt sich ein insgesamt abnehmender Trend der Werte im Verlauf der Meßperiode erkennen. Bis zum 30.7. bewegen sich viele Werte zwischen 6% und 8% oder darüber, danach liegen die meisten Werte unter 6%.

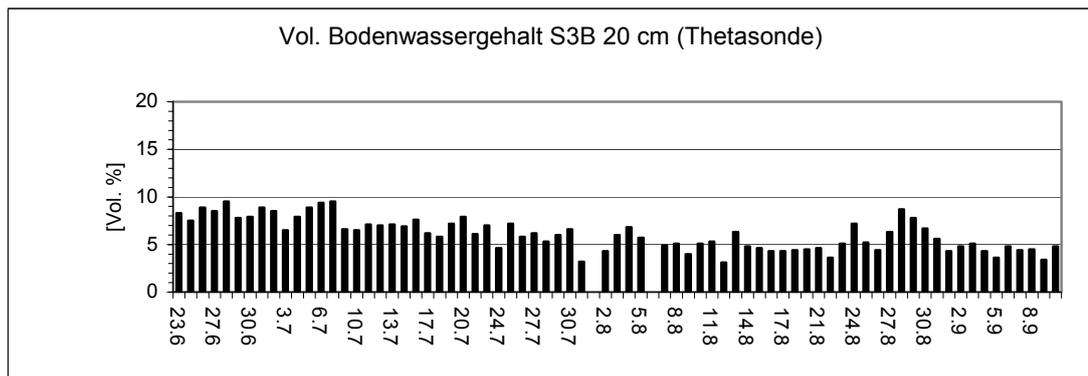


Abb. 40 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 3; 20 cm Bodentiefe

In den Meßwerten der noch tiefer liegenden Horizonte verhält es sich wie in 20 cm Bodentiefe. Es kommt nicht mehr zu starken Schwankungen der Bodenwassergehalte, Veränderungen sind nur über längere Zeiträume hinweg zu beobachten. Ein Rückgang der Meßwerte im Laufe der Meßperiode ist weiterhin von der ersten Hälfte der Meßperiode zur zweiten hin zu verzeichnen. Im Gegensatz zu 20 cm Bodentiefe, wo noch eine Erhöhung der Bodenwassergehalte nach den Starkniederschlägen vom 22.8. zu verzeichnen ist, gibt es in 50 cm Tiefe keine erkennbare Reaktion mehr darauf.

Der Variationskoeffizient liegt in den Tiefen von 20 cm bis 50 cm zwischen 28 und 36, auch in 10 cm ist der Wert mit 39 nicht wesentlich höher. Eine deutlich höhere Variabilität ist also nur in 5 cm Bodentiefe zu verzeichnen, die mit 95 mehr als doppelt so hoch liegt.

Ein weiterer Faktor, der Rückschlüsse auf die Bodenwasserdynamik und die Niederschlagseinträge erlaubt, ist die Vegetation. Anhand der Vegetationsentwicklung läßt sich abschätzen, wieviel Feuchtigkeit im System zur Verfügung steht und wieviel möglicherweise dem Boden von der Vegetation entzogen wird.

Tab.16 : Vegetationsproben S 3

Station	Datum	feucht(g)	Trocken(g)	Wasseranteil (%)	BDG(%)	Wuchshöhe
S3	22.06.98	51.17	26.22	40.06	30	-
S3	25.07.98	49.59	35.59	22.03	-	-
S3	02.08.98	47.59	27.59	42.03	15-20	2-5cm
S3	08.08.98	80.59	47.59	40.95	15-20	2-5cm
S3	15.08.98	54.59	45.59	16.49	15-20	2-5cm
S3	29.08.98	42.59	28.59	32.87	15-20	2-5cm
S3	06.09.98	72.59	60.59	16.53	20-25	10-15cm
S3	06.09.98	41.59	33.59	19.24	10-15	2-5cm

Der Wasseranteil der Vegetation variiert teilweise erheblich, er liegt zwischen 16 und 42%. Bedeckungsgrad (BDG) und Wuchshöhe bleiben über den Meßzeitraum ungefähr konstant. Während der Zeit, in der die meisten Niederschläge fallen, vom 16.07. bis zum 06.08., liegt auch der Wasseranteil der Vegetation hoch; bei zwei der Messungen liegt er höher als 40%. Ein Zusammenhang der Entwicklung des Vegetations- und Bodenwassergehalts ist jedoch nicht zu erkennen.

Eine übersichtliche Darstellung der Bodenwasserdynamik der einzelnen Horizonte im Verlauf der Meßperiode bietet die Isoplethenkarte von Station S 3.

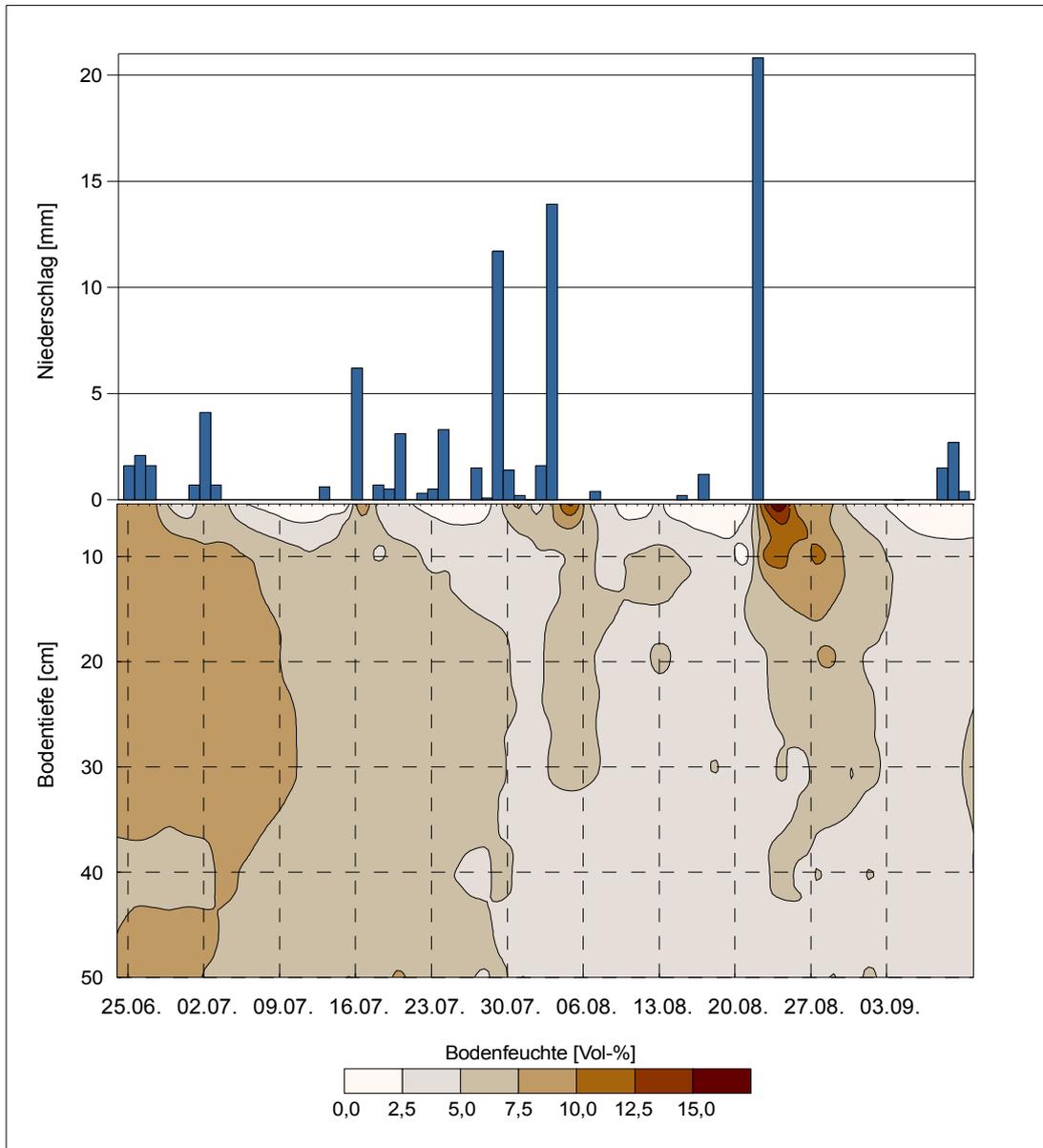


Abb. 41 : Isoplethenkarte des volumetrischen Bodenwassergehalts und des Niederschlags an S 3

Entlang der X-Achse sind die Tage des Meßzeitraums dargestellt, entlang der Y-Achse die unterschiedlichen Bodentiefen. Die farbigen Flächen auf der Karte geben für jeden Meßtag an, in welche Bodenwassergehaltsklasse die einzelnen Meßhorizonte von 5-50cm Bodentiefe fallen. Die Klassen gehen in Schritten von 2.5 von 0.0 % vol. bis 17.5 % vol..

Die gemeinsame Darstellung von Isoplethenkarte und Niederschlagsverteilung in der oberen Abbildung läßt schnell die Zusammenhänge von einzelnen Niederschlagsereignissen und den damit korrespondierenden Erhöhungen des Bodenwassergehalts erkennen.

Die hohe Variabilität des Bodenwassergehalts in 5 cm Bodentiefe wird von den vielen Wechseln der unterschiedlichen Wassergehaltsklassen in dieser Bodentiefe wiedergegeben. Zu den Zeitpunkten, an denen Niederschläge fallen, werden hohe Bodenwassergehalte durch farblich intensivere Bereiche wiedergegeben, in den Austrocknungsphasen gehen diese in hellere über.

Aus der Karte sind auch die langfristigen Veränderungen der Bodenwassergehalte in den tiefer gelegenen Horizonten sehr gut zu erkennen.

Bis zum 10.7. ist auf der Karte ein dunkler Bereich dominierend, der Bodenwassergehalte von 7.5% - 10 % vol. repräsentiert. Er wird von einem helleren Bereich mit Bodenwassergehalten von 5% - 7 % vol. abgelöst. Ab dem 30.7. liegen überwiegend Gehalte von 2.5%- 5% vol. vor. Innerhalb dieser Fläche liegen zwei dunkle Keile, die höhere Bodenwassergehalte in Folge von Niederschlagseinträgen repräsentieren. Sie liegen in der Zeit um den 6.8. und den 27.8.. So ergeben sich bei der vorliegenden Klasseneinteilung drei Hauptbereiche unterschiedlichen Bodenwassergehalts entlang der Zeitachse der Karte. Der oberste Horizont muß dabei aus dieser Betrachtung herausgenommen werden, da dort ständig kurzfristige Veränderungen auftreten.

Trotz der zunehmenden Niederschläge ist eine zunehmende Austrocknung des Bodens festzustellen, die durch Niederschlagsereignisse stellenweise unterbrochen wird, sich aber über den gesamten Meßzeitraum fortsetzt. Die starken Niederschläge vom 30.7. bis zum 6.8. und vom 22.8. sorgen dabei für eine Durchfeuchtung des Bodens, die sich bis in tiefere Horizonte fortsetzt, aber mit zunehmender Tiefe an Stärke verliert. Auch anhand der Wasserspannungswerte aus 50 cm Bodentiefe läßt sich die zunehmende Austrocknung des Bodens erkennen, gegenüber der ersten Hälfte der Meßperiode, steigt die Wasserspannung in der zweiten Hälfte deutlich an, was einem Rückgang des Bodenwassergehalts entspricht.

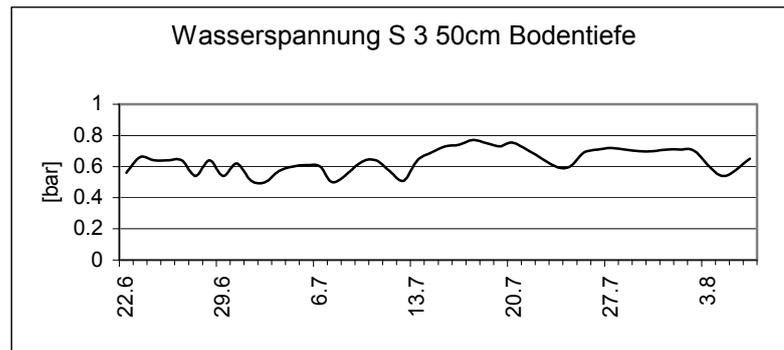


Abb. 42 : Tageswerte der Wasserspannung an S 3; 50 cm Bodentiefe

Die feldgesättigte Wasserleitfähigkeit gemessen mit dem Guelph-Permeameter beträgt 35 cm/d. Also müßte sich 24 Stunden nach einem stärkeren Niederschlag der Bodenwassergehalt bis in 35 cm Tiefe deutlich erhöhen. Anhand der beiden dunkleren Keile, die sich um den 6.8. und den 27.8. ausbreiten, lassen sich diese Meßwerte des Guelph-Permeameters nachvollziehen, da die Wasserfronten, die die Keile darstellen, nach Ablauf eines Tages ungefähr die entsprechenden Tiefen erreicht haben. Allerdings erscheint nach den Niederschlägen vom 29.7. die Ausbreitungsgeschwindigkeit etwas gehemmt, da am 30.7. und am 31.7. in 20cm Tiefe noch keine Erhöhung des Bodenwassergehalts stattgefunden hat. Die starken Niederschläge vom 22.8. durchdringen den Boden auch in der durch die Permeameterwerte erwarteten Zeit.

In den tieferen Horizonten findet während der gesamten Meßperiode eine langsame Austrocknung des Bodens statt, die auch von den Niederschlagseinträgen von insgesamt 96.9 mm in dieser Zeit nicht gestoppt werden kann, es finden lediglich kurzfristige Unterbrechungen der Austrocknung nach Starkniederschlägen statt. Zu Anfang der Meßperiode liegen in den tieferen Bodenhorizonten die höchsten Meßwerte vor. Trotz der geringen Niederschläge, die im Untersuchungsgebiet von September bis Juni fallen, sind die Werte im Frühsommer höher als nach der Hauptniederschlagsperiode. Es ist daher anzunehmen, daß die hohen Bodenwassergehalte des Frühsommers Reserven des regenreichen Vorjahres sind, die von Herbst bis Frühsommer im Boden gespeichert waren.

6. Vergleich von Bodenwassergehalten der Jahre 1997 und 1998 unter dem Einfluß des Witterungsablaufs

Im Uvs-Nuur-Becken waren die Jahre 1997 und 1998 durch sehr verschiedene Niederschlagssituationen geprägt, infolge derer auch die Bodenwasserdynamik der beiden Jahre stark unterschiedlich ausfiel. Diese beiden Ausgangslagen ermöglichen es zu vergleichen, welchen Einfluß die unterschiedlichen Niederschlagseinträge auf die Bodenwassergehalte haben.

Das Jahr 1997 war durch außergewöhnlich hohe Niederschläge gekennzeichnet, in den Sommermonaten fielen an der Station Ulaangom insgesamt 225 mm Niederschlag, das Jahresmittel liegt bei 135 mm. 1998 hingegen fielen im Sommer an der Meßstation 3 nur 96.9 mm. Die Sommerniederschläge des Jahres 1997 sind somit rund 2.3 mal so hoch wie die von 1998.

Für den Vergleich der Bodenwassergehalte der beiden Jahre wurden ausschließlich Stechzylinderwerte benutzt, da für das Jahr 1997 keine Thetasondenmeßwerte vorliegen.

Tab.17 : Niederschlagssummen der Sommermonate

Jahr	Station Ulaangom	Station 3
Sommer 97	225.6 mm	-
Sommer 98	56.2 mm	96.9 mm
Jahresmittel	135 mm	-

Tab.18 : Vergleich der Durchschnittswerte der Bodenwassergehalte

Station	Tiefe (cm)	Sommer 1997 (Vol. %)	Sommer 1998 (Vol.%)	Faktor
S 1	5	15.8	19.9	1.3
S 1	20	28.1	23.0	1.2
S 2	5	14.1	4.6	3
S 2	20	10.4	2.7	3.9
S 2	50	7.9	3.4	2.3
S 3	5	14.1	5.3	2.7
S 3	20	15.3	5.9	2.6
S 3	50	9.4	5.4	1.7
S 5	5	19	9.1	2.1
S 5	20	14.7	5.4	2.7

Zum Vergleich der Bodenwassergehalte der beiden Jahre wird Station 1 nicht herangezogen, da hier wegen des hohen Grundwasserspiegels des Bodens nicht eindeutig gesagt werden kann, ob eine Bodenwassergehaltserhöhung durch Niederschlagseinträge oder den Einfluß des Grundwassers verursacht wurde.

An allen anderen Meßstandorten läßt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Bodenwassergehalten der beiden Jahre feststellen.

An den Stationen S 2, S 3 und S 5 liegen die Werte des Jahres 1997 gegenüber den Werte des Jahres 1998 ungefähr 2.5 – 3.5 mal so hoch. Wenn man dazu die Niederschläge des Jahres 1997 betrachtet, die das 2.3fache der Werte des Jahres 1998 betragen, erklären sich diese stark unterschiedlichen Werte.

In den beiden Jahren liegen zwei völlig unterschiedliche Situationen vor, wobei die des Jahres 1998 ungefähr den üblicherweise herrschenden Bedingungen entspricht, die Niederschläge des Jahres 1997 liegen außergewöhnlich hoch.

Die hohen Niederschlagseinträge des Jahres 1997 führten an den Standorten zu einer nachhaltigen Durchfeuchtung des Bodens. Vielfach wurden an zeitlich dicht aufeinander folgenden Meßterminen ähnlich Bodenwassergehalte festgestellt, die belegen, daß zwischen diesen Tagen keine wesentliche Austrocknung des Bodens stattgefunden hat. Auch in den tiefer gelegenen Meßhorizonten kommt es zu einer erheblichen Erhöhung des Bodenwassergehaltes.

Dies ist ein entscheidender Unterschied zum Jahr 1998, da hier die Niederschlagseinträge zwar in den oberen Horizonten starke Auswirkungen hatten, aber in den unteren Horizonten kaum für Veränderungen sorgten.

Die Bodenwasserdynamik des Jahres 1998 ist zwischen den Niederschlagseinträgen durch starke Austrocknungsphasen geprägt, während derer der Bodenwassergehalt erheblich zurückgeht, oft auf Werte unter 2 %vol.. Diese Austrocknungserscheinungen machen sich besonders in den oberen Horizonten bemerkbar.

Die Bodenwassergehalte des Jahres 1997 unterliegen in den oberen Horizonten natürlich auch gewissen Schwankungen, diese extremen Gegensätze liegen dort allerdings nicht vor. Der Variationskoeffizient in 5 cm Bodentiefe liegt bei 17 gegenüber 1998, wo er in der gleichen Tiefe 76 beträgt.

Die hohen Niederschläge des Jahres 1997 führen zu einer recht gleichmäßigen Durchfeuchtung des Bodens, da die hohen, wiederholten Einträge bis in tiefere Horizonte versickern können und gespeichert werden. Dies hat zur Folge, dass sich die Bodenstruktur verändert und der Boden in dieser Zeit eine höhere Aufnahmefähigkeit für Niederschlagseinträge besitzt. Durch die beständige Feuchtigkeitzufuhr werden Verkrustungen und Bodenverhärtungen reduziert, und der Boden erhält eine lockerere, homogenere Struktur. Treffen Niederschläge auf einen derartigen Boden, können sie relativ ungehindert eindringen, der oberflächliche Abfluß ist nur begrenzt, und sie haben eine stärkere Auswirkung auf die Erhöhung des Bodenwassergehalts, als es bei einem verhärteten, ausgetrockneten Boden der Fall ist, wie er während der meisten Zeit der Meßperiode im Jahr 1998 vorgefunden wurde.

Die gleichmäßige Durchfeuchtung des Bodens des Jahres 1997 findet 1998 nicht statt, in den unteren Horizonten liegen relativ gleichmäßig geringe Wassergehalte mit nur geringen Schwankungen vor, in den oberen Horizonten hingegen kommt es zu starken Gegensätzen der Bodenwassergehalte im zeitlichen Verlauf der Meßperiode. Nach Starkregen liegen hier hohe Bodenwassergehalte vor, die aber in den Austrocknungsphasen meist schnell wieder zurückgehen.

Neben den Niederschlagseinträgen ist die Verdunstungsrate von entscheidender Bedeutung für die Feuchteverhältnisse im Boden. Sie ist von der Lufttemperatur, der Luftfeuchte, der Windgeschwindigkeit und den Einstrahlungsverhältnissen abhängig, wenn man zur Berechnung der potentiellen Verdunstung die Formel von Wendling benutzt, Es ist anzunehmen, daß im niederschlagsreichen Jahr 1997 die Verdunstung geringer war als 1998.

Tab.19 : Potentielle Verdunstung 1997 und 1998

Station	E [mm] 08.08.1997 bis 26.08.1997	E [mm] 08.08.1998 bis 26.08.1998
S 5	90.6	106.4

Tab.20 : Verdunstungssummen ausgewählter Tage in mm an S 5

10.8.97	10.8.98	11.8.97	11.8.98	12.8.97	12.8.98	13.8.97	13.8.98
5.4	6.58	3.5	6.22	1.6	8.94	4.6	7.11

Der Vergleich der potentiellen Verdunstung kann nur an Station 5 erfolgen, da im Jahre 1997 nur an diesem Standort die für die Berechnung der Verdunstung benötigten Grunddaten erhoben wurden.

Wie man beim Vergleich der beiden Jahre sehen kann, sind sowohl im Zeitraum 8. Bis 26. August (Meßperiode des Jahres 1997) und zu den betrachteten Tagen die Werte des Jahres 1998 immer höher als die des Jahres 1997. Einzelwerte des Jahres 1998 liegen dabei bis über 5 mal so hoch wie die vergleichbaren Werte des Jahres 1997.

So lassen sich die Bodenwasserverhältnisse der beiden Jahre über die Niederschläge und die Verdunstung charakterisieren, die zu höchst unterschiedlichen Bodenwassergehalten führen. Dabei kann man erkennen, daß die durchschnittlichen Niederschläge des Jahres 1998 nur zu einer begrenzten, teilweise stark variierenden Erhöhung des Bodenwassergehaltes führen.

Damit eine nachhaltige Durchfeuchtung stattfinden kann, sind sehr hohe Niederschläge wie die des Jahres 1997 notwendig.

Darüber hinaus ist anzunehmen, daß die überdurchschnittlich hohen Niederschläge des Jahres 97 noch für die Bodenwassergehalte des Jahres 98 von Bedeutung waren. In der Zeit von Herbst 97 bis Sommer 98 fielen im Untersuchungsgebiet nur geringe Mengen Niederschlag, die keine große Auswirkung auf die Bodenwassergehalte gehabt haben dürften, selbst die starken Niederschläge im Sommer 98 haben wahrscheinlich nur einen geringen Einfluß auf die Bodenwassergehalte in den tiefer gelegenen Horizonten gehabt; direkte Zusammenhänge sind meist nur in den oberen Horizonten zu erkennen. Anhand der Isoplethenkarte für Station S 3 (Abb.41) läßt sich erkennen, daß die Bodenwassergehalte in den unteren Horizonten im Laufe der Meßperiode kontinuierlich in kleinen Schritten abnehmen. Aufgrund der geringen Niederschlagseinträge während der Zeit von Herbst bis Frühsommer ist davon

Zur Bodenwasserdynamik.... Vergleich der Bodenwassergehalte von 1997 und 1998

auszugehen, daß die Bodenwassergehalte noch aus Einträgen des Jahres 97 stammten und als eine Art Vorrat der unteren Horizonte gespeichert waren, da die Niederschläge des Jahres 98 in diesen Bereichen zu keiner Erhöhung der Bodenwassergehalte führen konnten und diese im Laufe der Meßperiode weiterhin abnahmen.

7. Zusammenfassung

Die verschiedenen Meßverfahren zur Bestimmung von Bodenwassergehalten und der Bodenfeuchte konnten während ihres Einsatzes im Uvs-Nuur-Becken über einen längeren Zeitraum hinweg erprobt werden.

Dabei stellte sich heraus, daß die Thetasonde und die Stechzylinderproben sich zur Bestimmung des volumetrischen Bodenwassergehalts gut eignen. An den Standorten, an denen parallele Messungen mit beiden Verfahren möglich waren, zeigten Vergleiche der Meßreihen, daß sich die beiden Methoden gegenseitig bestätigen. Nur in Einzelfällen traten größere Abweichungen zwischen den Tageswerten auf.

Einschränkend auf die Anwendbarkeit der Verfahren und die Genauigkeit der Meßergebnisse kann sich die Bodenbeschaffenheit auswirken. In stark verdichteten oder skelettreichen Böden ist das Einbringen der Sondenmeßstäbe schwierig und stellenweise nicht möglich. Derartige Böden sind auch für die Entnahme von Stechzylinderproben problematisch, da es schwierig ist Materialverluste bei der Entnahme gering zuhalten.

Die Verfahren zur Bestimmung der Bodenfeuchte, Tensiometer und Gipsblocksensoren, hatten gegenüber den anderen Verfahren den Vorteil, daß sie automatisiert waren. Auf diese Weise konnte auch ohne intensive Betreuung eine hohe zeitliche Meßdichte erzielt werden. Über eine Eichkurve, die im Labor erstellt wurde, konnten den Wasserspannungen die entsprechenden Bodenwassergehalte zugeordnet werden. Für Station S 2 sind die Tensiometermeßwerte gut geeignet, um zusammen mit den Stechzylinderproben die Bodenwasserdynamik zu beschreiben. An den anderen Standorten liegen die Wassergehalte, die man über die Eichkurve erhält, verglichen mit Thetasonden- und Stechzylinderwerten sehr viel höher.

Beim Einsatz von Tensiometern und Gipsblocksensoren in diesem Gebiet muß aufgrund des geringen Bodenwassergehalts vieler Standorte besonders darauf geachtet werden, daß die Sensoren bzw. die Kerzen eng vom Boden umschlossen sind, ansonsten kann es zu erheblichen Beeinträchtigungen der Meßgenauigkeit kommen. Bei den Tensiometern muß zusätzlich darauf geachtet werden, daß der Meßbereich nicht überschritten wird.

Die Variabilität zwischen den Bodenwassergehalten der Standorte ergibt sich aus ihrer Lage im Untersuchungsgebiet und dem Witterungsgeschehen. Die deutlichsten

Unterschiede zeigen sich beim Vergleich der Standorte der Ebenen und der Hangbereiche. Station S 1 muß gesondert betrachtet werden, da die Bodenwassergehalte an diesem Standort vom Grundwasser beeinflusst werden.

An den Standorten in der Ebene ist die potentielle Evapotranspiration höher als an den Hangstandorten, dies wirkt sich auf die absolute Höhe der Bodenwassergehalte und auf ihre Variabilität aus. In der Ebene gehen die Bodenwassergehalte nach einer Erhöhung durch Niederschlagseinträge aufgrund der starken Evapotranspiration relativ schnell wieder zurück, so kommt es zu einer hohen Variabilität. An den Hangstandorten ist dieser Effekt abgeschwächt, besonders gering ist die potentielle Verdunstung im Wald am Standort S 7. Die Meßreihen dort weisen geringere Gegensätze zwischen den Extrema auf.

Die signifikanten Unterschiede der Bodenwassergehalte verschiedener Meßtiefen eines Standortes werden anhand Variationskoeffizienten der Meßreihen deutlich. In 5 cm Bodentiefe spiegelt sich das aktuelle atmosphärische Geschehen wider. Niederschlagseinträge werden durch eine unmittelbare Erhöhung des Bodenwassergehalts sichtbar. Ist die potentielle Verdunstung nach einer Erhöhung der Bodenwassergehalte durch Niederschlagseinträge hoch, verringern sich die Bodenwassergehalte in dieser Meßtiefe auch schnell wieder. In den Bereichen ab 20 cm Bodentiefe sind kurzfristige Erhöhungen des Bodenwassergehalts nur nach sehr starken Niederschlägen zu beobachten. Veränderungen wie der allmähliche Rückgang des Bodenwassergehalts in den tieferen Bodenschichten an S 3 sind nur über einen längeren Zeitraum festzustellen.

Die zeitliche Variabilität der Bodenwassergehalte wird vom Witterungsgeschehen, insbesondere den Niederschlägen und der potentiellen Verdunstung, bestimmt.

Im Sommer 1998 ist das Verhältnis von Niederschlag und potentieller Verdunstung so, daß auch nach den Hauptniederschlägen des Jahres in den Sommermonaten keine Erhöhung der Bodenwassergehalte stattgefunden hat. An Station S 3 ist in den tieferen Bodenschichten eine Austrocknung zu verzeichnen.

Dies ist der Hauptunterschied zwischen den Jahren 1997 und 1998. 1997 fällt sehr viel mehr Regen als 1998, es kommt zu einer nachhaltigen Durchfeuchtung des Bodens. Auch die Verdunstung ist 1997 geringer. Nach Niederschlägen findet daher kein so schneller Rückgang der Bodenwassergehalte wie 1998 statt, und die Variabilität der Meßwerte ist geringer.

Es ist anzunehmen, daß die Bodenwassergehalte am Anfang der Meßperiode des Jahres 1998, die im Laufe des Meßzeitraums abnehmen, Vorräte aus den Einträgen des Jahres 1997 darstellen. Eine nachhaltige Durchfeuchtung des Bodens findet also nur bei sehr hohen Niederschlagseinträgen wie im Jahr 1997 statt.

8. Anhang**8.1. Volumetrische Bodenwassergehalte der Stechzylindermessungen**

Station	Datum	%vol. 5cm	%vol. 10cm	%vol. 20cm	%vol. 30cm	%vol. 40cm	%vol. 50cm
S 1	18.06.98	18.1	-	29.7	30.9	-	29.5
S 1	30.06.98	23.9	-	32.9	29.5	-	-
S 1	07.07.98	-	-	32.9	-	-	-
S 1	14.07.98	18.6	-	-	30.6	-	-
S 1	21.07.98	10.2	-	9.3	33.1	-	-
S 1	28.07.98	9.8	-	7.3	19.7	-	-
S 1	04.08.98	21.9	26.1	29.0	24.9	20.2	-
S 1	11.08.98	25.9	44.6	21.6	33.3	27.5	22.6
S 1	18.08.98	24.0	38.2	18.1	33.4	31.8	37.5
S 1	25.08.98	14.5	15.5	25.8	35.9	24.5	26.1
S 1	01.09.98	23.6	19.8	32.9	34.3	32.9	25.5
S 1	08.09.98	28.5	34.1	13.8	28.2	30.0	-
S 2	22.06.98	2.3	-	3.9	-	-	5.3
S 2	30.06.98	8.1	-	2.8	-	-	2.1
S 2	07.07.98	5.0	-	1.5	-	-	2.0
S 2	14.07.98	4.3	-	4.9	-	-	2.9
S 2	21.07.98	4.5	-	3.5	-	-	4.9
S 2	28.07.98	1.5	-	0.8	-	-	2.9
S 2	04.08.98	7.5	5.6	3.1	3.4	1.4	3.6
S 2	11.08.98	2.5	-	-	-	-	3.0
S 2	18.08.98	4.3	2.1	-	2.1	1.0	-
S 2	25.08.98	4.8	3.8	2.5	1.0	3.3	4.9
S 2	01.09.98	4.4	63.1	1.5	-	1.8	1.9
S 2	08.09.98	6.4	4.2	1.9	1.9	1.7	4.0
S 3	23.06.98	9.6	-	5.5	-	-	4.8
S 3	06.07.98	3.1	-	5.6	-	-	5.7
S 3	13.07.98	2.0	-	4.8	-	-	5.0
S 3	20.07.98	3.2	-	4.6	-	-	4.9
S 3	27.07.98	2.4	-	3.3	-	-	3.9
S 3	31.07.98	10.6	6.5	7.4	5.2	5.2	5.6
S 3	03.08.98	7.4	-	6.2	4.0	-	-
S 3	05.08.98	11.3	4.5	6.3	6.1	4.3	4.4
S 3	07.08.98	5.1	6.1	-	6.5	5.5	4.4
S 3	10.08.98	2.9	5.7	5.1	4.9	3.2	4.1
S 3	12.08.98	2.3	5.0	3.9	-	4.6	3.5

Station	Datum	%vol. 5cm	%vol. 10cm	%vol. 20cm	%vol. 30cm	%vol. 40cm	%vol. 50cm
S 3	14.08.98	1.3	4.0	4.4	3.8	3.9	2.5
S 3	17.08.98	0.8	4.7	-	4.7	5.3	4.2
S 3	19.08.98	3.7	3.6	4.2	4.7	6.0	4.6
S 3	21.08.98	1.9	3.4	4.7	5.2	3.5	3.9
S 3	24.08.98	17.5	10.1	5.0	3.8	7.6	4.0
S 3	26.08.98	8.4	9.1	4.7	5.4	3.0	3.2
S 3	28.08.98	9.8	11.0	6.2	4.4	2.5	2.9
S 3	31.08.98	4.3	6.2	5.2	37.6	1.0	4.7
S 3	02.09.98	4.1	5.5	4.4	3.4	3.1	3.5
S 3	04.09.98	3.7	5.9	5.8	4.8	4.4	4.0
S 3	07.09.98	3.3	4.2	5.4	4.7	5.3	5.3
S 3	09.09.98	3.3	5.3	4.1	4.8	5.4	4.2
S 5	21.06.98	14.52	-	6.72	-	-	-
S 5	06.07.98	5.78	-	6.17	-	-	-
S 5	13.07.98	4.71	-	6.6	-	-	-
S 5	20.07.98	6.78	-	3.75	-	-	-
S 5	27.07.98	12.86	-	4.9	-	-	-
S 5	03.08.98	7.24	7.6	-	-	-	-
S 5	10.08.98	11.11	7.32	6.53	7.64	5.59	-
S 5	24.08.98	-	14.85	6.85	4.4	3.06	-
S 5	31.08.98	9.86	7.82	-	5.93	-	-
S 5	09.09.98	-	4.42	2	-	-	-
S 7	03.08.98	8.6	10.6	-	-	-	-
S 7	10.08.98	6.2	18.3	7.8	-	-	-
S 7	17.08.98	4.9	-	7.4	7.5	-	-
S 7	24.08.98	8.9	-	-	17.4	-	-
S 7	31.08.98	7.7	8.7	9.5	8.5	-	-
S 7	09.09.98	-	5.8	8.4	4.5	-	-

8.2. Volumetrische Bodenwassergehalte der Thetasondenmessungen

Station	Datum	%vol. 5 cm	%vol. 10 cm	%vol. 20 cm	%vol. 30 cm	%vol. 40 cm	%vol. 50 cm
S 1	18.06.98	58.1	26.5	-	60.5	33.5	-
S 1	22.06.98	21.6	36.3	-	36.6	34.7	-
S 1	25.06.98	33.6	-	34.4	36.1	36.2	-
S 1	30.06.98	32.2	32.7	33.6	34.0	34.3	-
S 1	07.07.98	31.3	31.8	33.4	36.0	37.5	-
S 1	14.07.98	29.5	29.0	33.0	30.2	37.0	37.9
S 1	21.07.98	31.5	26.4	13.1	35.2	37.4	-
S 1	28.07.98	8.2	7.5	7.2	15.8	33.2	-
S 1	04.08.98	23.2	22.4	26.1	30.8	28.2	-
S 1	11.08.98	32.6	34.9	27.3	29.0	32.5	27.2
S 1	18.08.98	33.0	35.9	6.5	34.3	29.9	25.7
S 1	25.08.98	34.0	17.7	28.9	32.5	31.4	31.8
S 1	01.09.98	31.8	28.0	29.2	27.6	30.1	24.5
S 1	08.09.98	32.7	34.8	31.0	32.2	31.7	31.6
S 2	22.06.98	0.1	-	-	-	5.2	6.8
S 2	25.06.98	3.4	-	3.5	-	3.2	5.8
S 2	30.06.98	3.7	8.1	6.3	-	-	3.2
S 2	07.07.98	4.8	-	-	-	-	-
S 2	14.07.98	4.5	-	-	-	-	-
S 2	21.07.98	2.3	-	-	-	-	-
S 2	27.07.98	5.7	4.8	1.0	1.4	0.4	-
S 2	04.08.98	10.8	10.5	7.0	3.2	10.6	11.7
S 2	11.08.98	3.7	7.1	5.6	6.8	-	11.2
S 2	18.08.98	3.1	9.3	11.5	-	-	-
S 2	25.08.98	11.3	11.6	9.3	18.5	-	13.4
S 2	01.09.98	9.2	9.2	3.8	2.1	-	-
S 2	08.09.98	6.2	3.0	4.6	5.7	4.5	6.9
S 3	23.06.98	12.9	8.7	8.3	8.3	7.3	8.3
S 3	25.06.98	9.6	8.8	7.5	6.1	6.9	7.7
S 3	26.06.98	8.7	10.2	8.9	8.5	7.6	9.1
S 3	27.06.98	8.0	8.9	8.5	8.6	7.4	7.3
S 3	28.06.98	9.1	8.7	9.5	9.3	7.1	9.2
S 3	29.06.98	3.7	9.8	7.8	7.4	7.2	10.1
S 3	30.06.98	3.7	9.6	7.9	7.6	7.3	10.2
S 3	01.07.98	1.6	8.6	8.9	8.1	6.4	8.0
S 3	02.07.98	6.9	8.2	8.5	7.9	6.2	7.3
S 3	03.07.98	6.3	7.3	6.5	8.3	8.8	6.9
S 3	04.07.98	5.9	9.6	7.9	9.0	7.5	7.6
S 3	05.07.98	3.5	7.9	8.9	7.8	7.5	7.4

Station	Datum	%vol. 5 cm	%vol. 10 cm	%vol. 20 cm	%vol. 30 cm	%vol. 40 cm	%vol. 50 cm
S 3	06.07.98	2.3	7.4	9.4	7.8	7.4	7.1
S 3	08.07.98	1.8	7.3	9.5	8.4	-	-
S 3	09.07.98	1.5	6.5	6.6	8.5	7.1	6.4
S 3	10.07.98	1.2	6.5	6.5	8.3	7.0	6.4
S 3	11.07.98	0.8	5.1	7.1	6.5	-	-
S 3	12.07.98	0.6	5.4	7.0	6.6	6.0	7.1
S 3	13.07.98	1.9	6.1	7.1	6.8	6.3	7.6
S 3	15.07.98	0.4	5.8	6.9	6.5	6.2	5.0
S 3	16.07.98	13.9	6.8	7.6	7.4	7.1	5.1
S 3	17.07.98	5.8	5.2	6.2	5.7	6.0	5.5
S 3	18.07.98	4.0	4.4	5.8	6.1	5.7	5.5
S 3	19.07.98	3.3	5.9	7.2	7.5	5.4	7.9
S 3	20.07.98	3.5	5.9	7.9	6.6	6.8	7.8
S 3	22.07.98	1.9	5.3	6.1	7.4	6.9	6.5
S 3	23.07.98	1.9	4.3	7.0	7.6	7.1	5.9
S 3	24.07.98	1.7	4.8	4.6	6.6	6.8	6.2
S 3	25.07.98	1.6	4.4	7.2	5.8	4.2	6.1
S 3	26.07.98	1.6	4.8	5.8	5.7	4.5	5.3
S 3	27.07.98	2.1	3.7	6.2	7.0	5.1	6.8
S 3	28.07.98	1.0	3.0	5.3	4.6	3.4	4.1
S 3	29.07.98	1.5	3.7	6.0	6.3	6.1	6.0
S 3	30.07.98	8.9	5.2	6.6	5.3	6.9	6.0
S 3	31.07.98	8.3	3.0	3.2	2.3	3.5	2.5
S 3	01.08.98	4.7	4.4	-	4.4	4.5	-
S 3	02.08.98	3.9	4.9	4.3	4.0	4.8	3.4
S 3	03.08.98	6.0	4.2	6.0	5.5	-	-
S 3	04.08.98	12.2	5.4	6.8	5.7	2.4	4.8
S 3	05.08.98	13.1	5.1	5.7	-	2.8	4.1
S 3	06.08.98	6.6	6.3	-	5.5	5.1	2.3
S 3	07.08.98	4.1	4.5	4.9	5.1	3.0	3.4
S 3	08.08.98	3.6	4.3	5.1	5.0	2.8	2.9
S 3	09.08.98	2.0	4.7	4.0	-	2.3	2.9
S 3	10.08.98	1.6	5.1	5.1	3.6	4.6	5.1
S 3	11.08.98	0.9	5.3	5.3	4.4	3.1	-
S 3	12.08.98	2.3	5.4	3.1	3.0	3.5	3.9
S 3	13.08.98	2.8	6.2	6.3	5.7	3.8	4.1
S 3	14.08.98	1.1	5.0	4.8	3.7	2.7	2.2
S 3	15.08.98	0.9	5.3	4.6	4.9	3.3	4.8
S 3	16.08.98	1.7	4.5	4.3	4.5	4.9	3.2
S 3	17.08.98	1.5	4.5	4.3	4.2	4.2	4.2
S 3	19.08.98	1.9	4.4	4.4	6.3	4.6	4.8

Station	Datum	%vol. 5 cm	%vol. 10 cm	%vol. 20 cm	%vol. 30 cm	%vol. 40 cm	%vol. 50 cm
S 3	20.08.98	0.3	2.1	4.5	3.2	2.9	3.7
S 3	21.08.98	0.6	1.8	4.6	4.5	4.9	4.0
S 3	22.08.98	1.5	1.6	3.6	5.0	4.3	3.2
S 3	23.08.98	18.0	14.9	5.1	3.8	3.4	3.5
S 3	24.08.98	18.7	11.8	7.2	5.9	8.2	4.9
S 3	25.08.98	11.1	8.6	5.2	4.6	5.7	5.2
S 3	26.08.98	7.7	8.1	4.4	4.2	3.5	3.2
S 3	27.08.98	8.6	10.2	6.3	5.2	6.2	4.3
S 3	28.08.98	7.9	10.8	8.7	5.5	4.0	3.5
S 3	29.08.98	7.7	9.4	7.8	6.2	4.5	5.2
S 3	30.08.98	5.2	7.2	6.7	5.2	5.6	4.8
S 3	31.08.98	3.5	6.1	5.6	4.4	3.7	3.2
S 3	01.09.98	4.1	6.5	4.3	6.0	4.9	5.5
S 3	02.09.98	2.6	7.7	4.8	5.3	5.6	5.6
S 3	03.09.98	2.3	4.7	5.1	4.3	4.3	3.9
S 3	04.09.98	2.7	4.8	4.3	5.1	4.4	4.0
S 3	05.09.98	0.4	3.6	3.6	2.1	2.6	3.2
S 3	06.09.98	0.7	4.0	4.8	4.2	3.2	3.9
S 3	07.09.98	0.3	3.6	4.4	5.1	4.7	3.5
S 3	08.09.98	0.5	3.7	4.5	3.4	4.2	3.4
S 3	09.09.98	0.7	3.1	3.4	4.0	2.7	3.2
S 3	10.09.98	0.7	3.6	4.8	5.7	5.0	4.0
S 3 A	17.06.98	4.0	14.8	8.0	10.7	16.2	-
S 3 A	19.06.98	6.2	5.0	8.3	6.3	4.2	-
S 3 A	21.06.98	3.6	7.6	8.2	6.9	6.4	-
S 3 A	22.06.98	9.3	6.7	8.4	8.5	6.8	-
S 3 A	23.06.98	11.3	9.2	8.6	8.5	7.4	-
S 3 A	25.06.98	6.6	9.9	8.9	7.9	6.9	-
S 3 A	26.06.98	7.1	9.9	9.3	8.4	10.0	-
S 3 A	27.06.98	5.6	10.5	9.1	7.9	9.6	-
S 3 A	28.06.98	6.4	10.7	9.6	7.3	5.7	-
S 3 A	29.06.98	2.6	7.7	8.9	6.8	-	-
S 3 A	30.06.98	2.7	7.7	9.2	6.7	-	-
S 3 A	01.07.98	1.7	7.2	6.8	6.1	-	-
S 3 A	02.07.98	5.3	8.1	8.9	7.7	-	-
S 3 A	03.07.98	7.3	8.7	8.2	7.5	7.5	-
S 3 A	04.07.98	4.8	7.1	8.7	6.2	-	-
S 3 A	05.07.98	3.7	6.9	7.9	6.1	-	-
S 3 A	06.07.98	2.3	6.2	7.8	-	-	-
S 3 A	08.07.98	1.9	6.8	6.8	7.0	-	-
S 3 A	09.07.98	1.4	5.6	6.9	6.5	-	-

Station	Datum	%vol. 5 cm	%vol. 10 cm	%vol. 20 cm	%vol. 30 cm	%vol. 40 cm	%vol. 50 cm
S 3 A	10.07.98	1.3	5.4	6.8	6.5	-	-
S 3 A	11.07.98	1.1	0.0	6.1	-	-	-
S 3 A	12.07.98	1.9	5.2	6.3	6.0	5.0	-
S 3 A	13.07.98	0.9	5.9	6.5	5.9	4.6	-
S 3 A	15.07.98	0.7	0.0	6.1	4.7	-	-
S 3 A	16.07.98	10.2	0.0	0.0	-	-	-
S 3 A	17.07.98	5.1	4.7	5.1	5.9	5.8	-
S 3 A	18.07.98	3.2	5.0	7.4	-	5.8	-
S 3 A	19.07.98	2.9	4.9	5.7	7.1	5.6	-
S 3 A	20.07.98	4.2	4.2	6.7	7.1	7.1	-
S 3 A	22.07.98	2.5	4.2	0.0	6.0	5.2	5.3
S 3 A	23.07.98	1.8	4.1	6.6	-	3.8	-
S 3 A	24.07.98	2.1	4.6	5.9	4.7	5.5	5.6
S 3 A	25.07.98	3.1	2.7	6.1	6.1	5.0	6.9
S 3 A	27.07.98	3.0	5.0	7.4	6.0	6.2	-
S 3 A	28.07.98	1.6	3.7	5.6	5.2	4.7	6.1
S 3 A	29.07.98	1.8	3.9	5.5	5.0	4.9	-
S 3 A	30.07.98	1.2	3.5	6.5	4.6	5.5	-
S 3 A	31.07.98	11.8	7.8	-	-	-	-
S 3 A	01.08.98	10.6	12.2	4.8	4.8	4.2	-
S 3 A	02.08.98	4.7	10.0	6.0	-	4.3	4.6
S 3 A	03.08.98	6.7	9.2	-	4.6	3.5	2.9
S 3 A	04.08.98	19.9	18.0	14.5	-	-	-
S 3 A	05.08.98	22.0	20.8	27.2	19.6	29.8	33.2
S 3 A	06.08.98	12.6	15.2	16.9	25.1	20.1	26.1
S 3 A	07.08.98	11.6	12.5	17.7	24.1	15.9	21.9
S 3 A	08.08.98	5.6	11.2	14.1	12.0	11.0	17.1
S 3 A	09.08.98	5.1	10.3	13.2	8.5	3.4	9.3
S 3 A	10.08.98	3.5	7.8	11.3	3.2	2.1	9.0
S 3 A	11.08.98	2.7	6.6	9.6	4.7	2.0	-
S 3 A	12.08.98	2.5	6.5	8.5	7.8	2.0	3.9
S 3 A	13.08.98	1.7	4.8	7.3	7.1	3.8	3.4
S 3 A	14.08.98	0.2	5.6	8.6	7.4	5.0	2.6
S 3 A	15.08.98	1.0	4.7	5.6	4.4	2.5	-
S 3 A	16.08.98	0.6	5.6	7.0	5.9	3.8	4.8
S 3 A	17.08.98	1.0	3.2	-	2.7	4.2	4.7
S 3 A	19.08.98	0.2	2.8	4.2	4.2	2.1	4.0
S 3 A	20.08.98	0.4	2.4	5.4	5.2	4.7	3.9
S 3 A	21.08.98	0.1	1.6	4.5	4.8	3.8	3.2
S 3 A	22.08.98	0.1	3.1	4.7	4.8	2.6	3.0
S 3 A	23.08.98	1.7	1.6	3.6	5.0	4.3	3.2

Station	Datum	%vol. 5 cm	%vol. 10 cm	%vol. 20 cm	%vol. 30 cm	%vol. 40 cm	%vol. 50 cm
S 3 A	24.08.98	12.9	11.9	5.5	5.1	3.5	2.3
S 3 A	25.08.98	10.5	10.7	7.5	5.0	4.8	2.9
S 3 A	26.08.98	6.9	13.3	9.4	3.8	3.3	3.9
S 3 A	27.08.98	5.6	8.5	7.0	3.2	3.3	-
S 3 A	28.08.98	6.4	9.8	10.5	5.7	5.4	5.5
S 3 A	29.08.98	6.4	6.7	9.6	5.7	3.7	3.9
S 3 A	30.08.98	3.6	5.3	8.4	6.3	5.0	5.1
S 3 A	31.08.98	4.7	7.0	8.1	4.3	2.7	3.9
S 3 A	01.09.98	3.7	7.1	8.1	5.0	3.8	4.5
S 3 A	02.09.98	4.2	7.0	8.1	7.5	7.4	4.4
S 3 A	03.09.98	3.0	4.8	7.6	3.4	3.6	-
S 3 A	04.09.98	2.1	4.2	5.8	5.3	-	-
S 3 A	05.09.98	1.8	4.1	6.0	-	-	-
S 3 A	06.09.98	0.3	3.0	4.3	-	-	-
S 3 A	07.09.98	1.2	3.7	5.6	4.4	4.2	3.2
S 3 A	08.09.98	1.0	3.5	4.5	5.2	4.1	4.0
S 3 A	09.09.98	1.4	2.5	3.9	4.0	4.0	-
S 3 A	10.09.98	0.8	3.6	3.0	4.1	-	-
S 5	19.06.98	-	-	15.4			
S 5	29.06.98	15.6	9.1	-			
S 5	13.07.98	7.8	8.3	-			
S 5	20.07.98	11.4	-	-			
S 5	23.07.98	8.7	-	-			
S 5	27.07.98	12.6	7.6	5.4			
S 5	03.08.98	8.5	4.0	-			
S 5	10.08.98	8.6	4.7	8.0			
S 5	24.08.98	19.3	17.3	6.7			
S 5	31.08.98	11.9	7.9	6.5			
S 5	09.09.98	2.5	3.9	5.1			
S 7	13.07.98	9.2	7.1	7.9	6.4	-	
S 7	20.07.98	2.6	8.4	5.1	-	-	
S 7	23.07.98	5.6	7.9	5.4	-	-	
S 7	27.07.98	3.4	6.9	6.3	-	5.7	
S 7	03.08.98	3.1	3.1	2.1	4.0	-	
S 7	10.08.98	0.2	3.1	5.1	6.7	-	
S 7	17.08.98	3.0	3.8	6.9	4.5	2.9	
S 7	24.08.98	5.0	9.0	19.0	22.4	21.7	
S 7	31.08.98	1.9	4.6	8.3	9.3	8.7	
S 7	09.09.98	3.5	3.1	9.2	6.2	3.4	

8.3. Wasserspannungswerte der Tensiometermessungen

Station	Datum	WS 20cm	WS 50cm	
S 2	20.06.98	0.61	0.58	
S 2	21.06.98	0.66	0.62	
S 2	22.06.98	0.67	0.63	
S 2	23.06.98	-	-	
S 2	24.06.98	-	-	
S 2	25.06.98	0.53	-	
S 2	26.06.98	0.54	-	
S 2	27.06.98	0.54	-	
S 2	28.06.98	0.55	0.63	
S 2	29.06.98	0.55	0.62	
S 2	30.06.98	0.55	0.61	
S 2	01.07.98	-	-	
S 2	02.07.98	0.55	-	
S 2	03.07.98	0.57	0.61	
S 2	04.07.98	0.57	0.63	
S 2	05.07.98	0.57	0.63	
S 2	06.07.98	0.58	0.64	
S 2	07.07.98	0.60	0.65	
S 2	08.07.98	-	-	
S 2	09.07.98	-	-	
S 2	10.07.98	0.58	-	
S 2	11.07.98	0.60	-	
S 2	12.07.98	0.64	0.64	
S 2	13.07.98	0.65	0.66	
S 2	14.07.98	0.67	0.68	
S 2	15.07.98	-	-	
S 2	16.07.98	-	-	
S 2	17.07.98	0.61	-	
S 2	18.07.98	0.66	-	
S 2	19.07.98	0.69	0.64	
S 2	20.07.98	0.73	0.67	
S 2	21.07.98	0.74	0.67	
S 2	22.07.98	-	-	
S 2	23.07.98	0.69	-	
S 2	24.07.98	0.75	-	
S 2	25.07.98	0.76	-	
S 2	26.07.98	0.78	-	
S 2	27.07.98	-	-	
S 2	28.07.98	-	-	
S 2	29.07.98	-	-	

Station	Datum	WS 20cm	WS 50cm	
S 2	30.07.98	-	-	
S 2	31.07.98	-	-	
S 2	01.08.98	-	-	
S 2	02.08.98	0.67	0.64	
S 2	03.08.98	0.70	0.65	
S 2	04.08.98	0.71	0.66	
S 2	05.08.98	-	-	
S 2	06.08.98	-	-	
S 2	07.08.98	-	-	
S 2	08.08.98	-	-	
S 2	09.08.98	-	-	
S 2	10.08.98	-	-	
S 2	11.08.98	-	-	
S 2	12.08.98	-	-	
S 2	13.08.98	-	-	
S 2	14.08.98	-	-	
S 2	15.08.98	0.67	0.63	
S 2	16.08.98	0.69	0.65	
S 2	17.08.98	0.69	0.65	
S 2	18.08.98	0.71	0.68	
S 2	19.08.98	-	-	
S 2	20.08.98	-	-	
S 2	21.08.98	0.66	-	
S 2	22.08.98	0.69	-	
S 2	23.08.98	0.69	-	
S 2	24.08.98	0.67	-	
S 2	25.08.98	0.65	-	
S 2	26.08.98	-	-	
S 2	27.08.98	-	-	
S 2	28.08.98	-	-	
S 2	29.08.98	-	-	
S 2	30.08.98	0.64	-	
S 2	31.08.98	0.67	0.63	
S 2	01.09.98	0.69	0.64	
S 2	02.09.98	-	-	
S 2	03.09.98	-	-	
S 2	04.09.98	-	-	
S 2	05.09.98	-	-	
S 2	06.09.98	0.68	0.62	
S 2	07.09.98	0.70	0.63	
S 2	08.09.98	0.71	0.65	

Station	Datum	WS 20cm	WS 30cm	WS 50cm
S 3	19.06.98	0.26	0.55	-
S 3	20.06.98	0.29	0.49	0.27
S 3	21.06.98	0.39	0.59	0.30
S 3	22.06.98	0.47	0.64	0.56
S 3	23.06.98	0.48	0.63	0.66
S 3	24.06.98	0.46	0.66	0.64
S 3	25.06.98	0.42	0.67	0.64
S 3	26.06.98	0.37	0.47	0.64
S 3	27.06.98	0.53	0.58	0.54
S 3	28.06.98	0.38	0.39	0.64
S 3	29.06.98	0.48	0.56	0.54
S 3	30.06.98	0.59	0.60	0.62
S 3	01.07.98	0.60	0.63	0.51
S 3	02.07.98	0.64	0.65	0.50
S 3	03.07.98	0.65	0.66	0.57
S 3	04.07.98	0.65	0.66	0.60
S 3	05.07.98	0.63	0.60	0.61
S 3	06.07.98	0.55	0.50	0.60
S 3	07.07.98	0.44	-	0.50
S 3	08.07.98	-	0.40	-
S 3	09.07.98	0.47	0.56	0.63
S 3	10.07.98	0.59	0.59	0.64
S 3	11.07.98	0.47	0.62	0.57
S 3	12.07.98	0.62	0.62	0.51
S 3	13.07.98	-	0.48	0.64
S 3	14.07.98	-	0.58	0.69
S 3	15.07.98	-	0.64	0.73
S 3	16.07.98	0.52	0.66	0.74
S 3	17.07.98	0.40	0.66	0.77
S 3	18.07.98	0.54	0.66	0.75
S 3	19.07.98	0.60	0.67	0.73
S 3	20.07.98	-	0.68	0.75
S 3	21.07.98	0.40	0.67	0.41
S 3	22.07.98	-	0.65	-
S 3	23.07.98	0.37	0.49	0.60
S 3	24.07.98	-	0.46	0.60
S 3	25.07.98	-	0.58	0.69
S 3	26.07.98	-	0.60	0.71
S 3	27.07.98	-	0.63	0.72
S 3	28.07.98	0.39	0.63	0.71

Station	Datum	WS 20cm	WS 30cm	WS 50cm
S 3	29.07.98	0.51	0.64	0.70
S 3	30.07.98	0.52	0.65	0.70
S 3	31.07.98	0.52	0.65	0.71
S 3	01.08.98	0.52	0.65	0.71
S 3	02.08.98	0.52	0.65	0.70
S 3	03.08.98	0.53	0.64	0.36
S 3	04.08.98	0.44	0.46	0.54
S 3	05.08.98	0.38	0.40	0.24
S 3	06.08.98	0.51	0.53	0.65
S 3	07.08.98	0.56	0.58	-
S 3	08.08.98	0.59	0.59	-
S 3	09.08.98	0.59	0.60	-
S 3	10.08.98	0.39	0.60	-
S 3	11.08.98	0.54	0.61	-
S 3	12.08.98	0.58	0.62	-
S 3	13.08.98	0.56	0.50	-
S 3	14.08.98	0.34	-	-
S 3	15.08.98	0.47	0.46	-
S 3	16.08.98	0.59	0.54	-
S 3	17.08.98	-	0.55	-
S 3	18.08.98	0.47	0.59	-
S 3	19.08.98	0.55	0.59	-
S 3	20.08.98	0.56	0.58	-
S 3	21.08.98	0.56	0.52	-
S 3	22.08.98	0.45	0.47	-
S 3	23.08.98	0.50	0.50	-
S 3	24.08.98	0.50	0.54	-
S 3	25.08.98	0.50	0.55	-
S 3	26.08.98	0.51	0.59	-
S 3	27.08.98	0.52	0.58	-
S 3	28.08.98	0.52	0.58	-
S 3	29.08.98	0.52	0.58	-
S 3	30.08.98	0.41	0.43	-
S 3	31.08.98	0.55	0.54	-
S 3	01.09.98	0.58	0.59	-
S 3	02.09.98	0.58	0.60	-
S 3	03.09.98	0.56	0.62	-
S 3	04.09.98	-	0.63	-
S 3	05.09.98	0.44	0.63	-
S 3	06.09.98	0.51	0.64	-
S 3	07.09.98	0.54	0.64	-
S 3	08.09.98	0.56	0.64	-

Station	Datum	15cm	30cm	50cm
S 7	30.06.98	0.32	-	0.21
S 7	01.07.98	0.37	-	0.27
S 7	02.07.98	0.38	-	0.31
S 7	03.07.98	0.39	-	-
S 7	04.07.98	0.38	-	-
S 7	05.07.98	0.38	-	-
S 7	06.07.98	0.39	0.21	-
S 7	07.07.98	0.40	0.22	-
S 7	08.07.98	0.40	0.22	-
S 7	09.07.98	0.41	0.22	-
S 7	10.07.98	0.41	0.22	0.23
S 7	11.07.98	0.42	0.23	0.23
S 7	12.07.98	0.44	0.24	0.25
S 7	13.07.98	0.45	0.25	0.26
S 7	14.07.98	0.45	0.25	0.27
S 7	15.07.98	0.45	0.25	0.26
S 7	16.07.98	0.46	0.21	0.26
S 7	17.07.98	0.45	0.21	0.26
S 7	18.07.98	0.47	0.23	0.25
S 7	19.07.98	0.48	-	0.27
S 7	20.07.98	-	-	0.28
S 7	21.07.98	-	-	0.28
S 7	22.07.98	-	-	0.29
S 7	23.07.98	-	0.19	0.28
S 7	24.07.98	0.43	0.20	-
S 7	25.07.98	0.44	0.20	-
S 7	26.07.98	0.46	0.22	0.25
S 7	27.07.98	-	-	0.26
S 7	28.07.98	-	-	-
S 7	29.07.98	-	-	-
S 7	30.07.98	-	-	-
S 7	31.07.98	-	-	-
S 7	01.08.98	-	-	-
S 7	02.08.98	-	-	-
S 7	03.08.98	-	-	-
S 7	04.08.98	-	-	-
S 7	05.08.98	-	-	-
S 7	06.08.98	-	-	-
S 7	07.08.98	0.39	0.21	-
S 7	08.08.98	0.40	0.21	0.24
S 7	09.08.98	0.42	0.22	0.25
S 7	10.08.98	-	-	0.27

Station	Datum	WS 15cm	WS 30cm	WS 50cm
S 7	11.08.98	-	0.22	-
S 7	12.08.98	-	0.23	0.24
S 7	13.08.98	0.40	0.23	0.26
S 7	14.08.98	0.42	0.24	0.27
S 7	15.08.98	0.44	0.24	0.28
S 7	16.08.98	0.44	0.23	0.29
S 7	17.08.98	-	0.24	0.30
S 7	18.08.98	-	0.24	0.32
S 7	19.08.98	0.40	0.23	0.32
S 7	20.08.98	0.43	0.24	0.32
S 7	21.08.98	0.46	-	0.33
S 7	22.08.98	0.49	-	-
S 7	23.08.98	0.49	-	-
S 7	24.08.98	-	-	-
S 7	25.08.98	-	-	-
S 7	26.08.98	-	-	-
S 7	27.08.98	-	-	-
S 7	28.08.98	0.39	-	-
S 7	29.08.98	0.40	-	-
S 7	30.08.98	0.43	-	-
S 7	31.08.98	-	-	-
S 7	01.09.98	-	-	-
S 7	02.09.98	-	-	-
S 7	03.09.98	0.37	-	-
S 7	04.09.98	0.37	-	-

9. Glossar

In alphabetischer Reihenfolge :

- **Bodenfeuchte** : Anteil des Bodenwassers, der entgegen der Wirkung der Schwerkraft im Bodengehalten werden kann, unterteilt in Haft- und Kapillarwasser
- **Bodenmatrix** : die Oberfläche der festen Bodensubstanz, in einer definierten Volumeneinheit ist die Größe dieser Oberfläche vom Substrat abhängig, je feiner das Substrat ist, desto größer ist die Oberfläche
- **Bodenwasser** : sich im Porenraum des Bodens befindliches Wasser, wird unterteilt in Grund-, Stau-, und Sickerwasser (freies Bodenwasser) und Haft- und Kapillarwasser (siehe Bodenfeuchte)
- **Datalogger** : Gerät, an das Sensoren angeschlossen sind, deren Meßwerte im Datalogger meist digital aufgezeichnet werden, es wurden Geräte der Firmen Thies und Campbell eingesetzt
- **Dielektrizitätskonstante** : gibt an, in welchem Maße in einem Medium ein elektrisches Feld auch ohne Ladungszufuhr von Außen bestehen kann
- **Feldkapazität** : Wassergehalt des Bodens nachdem der Boden nach Wassersättigung 48 Stunden bei Verdunstungsschutz Sickerwasser abgeben konnte
- **Gaspotential** : muß bei der Betrachtung des Luftdrucks im Boden berücksichtigt werden, wenn der Druck im Boden sich vom Druck an der Bodenoberfläche unterscheidet
- **Gipsblock** : Sensor, der aus 2 Elektroden besteht, die von ca. fingergroßen Gipskörper umschlossen sind, dient zur Bestimmung des Wasserpotentials, Betrieb am Datalogger
- **Gravimetrischer Bodenwassergehalt** : prozentualer Wasseranteil im Boden bezogen auf das Gewicht

- **Gravitationspotential** : Einfluß der Schwerkraft auf das Bodenwassers, Kraft die aufgewendet werden muß, um eine bestimmte Menge Wasser im Boden entgegen der Schwerkraft zu bewegen
- **Guelph-Permeameter** : Feldmeßgerät zur Bestimmung der feldgesättigten Wasserleitfähigkeit, die weitgehend der gesättigten Wasserleitfähigkeit entspricht, arbeitet auf dem Prinzip der Mariotte-Flasche, wurde an der Universität Guelph, Ontario entwickelt
- **Isoplethe** : Fläche bestehend aus Punkten gleicher Eigenschaft, z.B. Isoplethenkarte zur Darstellung von Bodenwassergehalten während eines bestimmten Zeitraumes
- **Keramik-Druck-Platte** : poröse Keramik-Platte, an die ein bestimmter Druck angelegt werden kann, dient zur Erstellung einer Wasserspannungskurve
- **Matrixpotential** : Maß dafür, wie stark Wasser an die Bodenmatrix gebunden ist, wieviel negativer Druck (Saugspannung) nötig ist, um es dem Boden zu entziehen, wird in pF, cm Wassersäule oder bar angegeben
- **Osmotisches Potential** : vom Anteil der Salze in der Bodenlösung abhängig, auch Lösungspotential, kann über Konzentrationsgefälle die Wasserbewegung im Boden beeinflussen
- **Porenvolumen** : Porenraum, Raum im Boden, der von Wasser oder Luft eingenommen werden kann
- **Saugspannung** : siehe Matrixpotential
- **Standardabweichung** : statistische Größe, die besagt, in welchem Maße die Werte einer Datenreihe durchschnittlich vom Mittelwert abweichen
- **Station, Stationar, Meßpunkt, Meßstation, Standort** : zum Teil synonym verwendet, Orte, an denen sich Datalogger befanden und Bodenuntersuchungen durchgeführt wurden
- **Stechzylinder** : beidseitig offener Stahlzylinder (100cm³ Volumen), der zur Entnahme von Bodenproben verwendet wird, meist zur Bestimmung des volumetrischen Bodenwassergehalts eingesetzt, dazu wird den Stechzylindern im Trockenschrank der Wasseranteil entzogen

- **Substrat** : Korngrößenfraktion wie Sand, Schluff oder Ton, aus der die feste Bodensubstanz besteht, oft Mischformen wie z.B. schwach schluffiger Sand
- **Tensiometer** : Gerät zur Bestimmung des Matrixpotentials des Bodens in Bar bzw. cm Wassersäule, besteht aus einem Rohr mit poröser Spitze und einem Manometer, wird meistens an einen Datalogger angeschlossen
- **Thetasonde** : Thetaprobe ML 1 der Firma Delta-T Devices, Handmeßgerät zur Bestimmung des volumetrischen Bodenwassergehalts, Meßprinzip ist Frequency Domain, wird daher als FD-Sonde bezeichnet
- **Trockenschrank** : siehe Stechzylinder
- **Volumetrischer Bodenwassergehalt** : prozentualer Anteil am Bodenvolumen, den Wasser darstellt, in einem Boden dessen volumetrischer Wassergehalt 15% beträgt, enthalten 100cm³ Boden 15cm³ Wasser
- **Wasserleitfähigkeit** : auch Durchlässigkeit, Maß für Wasserbewegung im Boden, man unterscheidet gesättigte und ungesättigte Wasserleitfähigkeit
- **Wasserpotential** : gibt Verfügbarkeit des Wassers für die Pflanze an, setzt sich aus Matrix-, Osmotischem- und Gaspotential zusammen, kann mit Gipsblöcken bestimmt werden

Literaturliste

- Barthel, H. (1983) : Die regionale und jahreszeitliche Differenzierung des Klimas in der Mongolischen Volksrepublik, in Barthel H, Brunner H, Haase G (1983) Physisch geographische Studien in Asien, Studia Geographica, 34, Brno, Tschechien
- Campbell Scientific Inc. (1996) : 257 and 253 Soil Moisture Sensors – User Guide, Campbell Scientific Inc., Shepshed, UK
- Carter, M.R. (1993) : Soil Sampling and Methods of Analysis, Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers
- Delta-T Devices Ltd (1996) : Theta Probe ML1 User Manual, Delta-T Devices, Cambridge
- Eijkelkamp Agrisearch Equipment (1987) : 09.07 Guelph Permeameter Operating Instructions, Eijkelkamp, Giebeek, NL
- Fachnormenausschuß Wasserwesen (1972) : Felduntersuchungen – Bestimmung der Feldkapazität, DIN 19682, Bestimmung des Wassergehaltes des Bodens, DIN19683
- Gaskin, G.J. & Miller J. D. (1996) : Measurement of Soil Water Content Using a Simplified Impedance Measuring Technique, J. agric. Engng Res. (1996) 63, 153-160
- Hartge, K.H. & Horn, R. (1991) : Einführung in die Bodenphysik, Enke Verlag, Stuttgart
- Kemp, P.R.; Reynolds, J. F.; Pachepsky, Y. & Chen, J. (1997) : A comparative modeling study of soil water dynamics in a desert ecosystem, Water Resources Research, Vol. 33, No. 1,73-90, 1997
- Krüger, W.; Barsch, A. & Bauer, A. (1997) : Arbeitsbericht zum Forschungsprojekt „ Klimamessungen und Klimamodellierungen als Determinanten zur Kennzeichnung der Landschaftsdynamik an Stationären des Uvs- Nuur- Beckens/ Nordmongolei“, Universität Potsdam, Potsdam

- Krüger, W.; Barsch, A. & Bauer, A. (1998) : Zwischenbericht zum Forschungsprojekt Kr 1196/3-3 „Klimamessungen und Klimamodellierungen als Determinanten zur Kennzeichnung der Landschaftsdynamik an Stationären des Uvs- Nuur- Beckens/ Nordmongolei“, Universität Potsdam, Potsdam
- Leser, H. (1997) : Landschaftsökologie, Ulmer, Stuttgart
- Murzaev, E.M. (1954) : Die Mongolische Volksrepublik, Gotha, Germany
- Scheffer, F. & Schachtschabel, P. (1992) : Lehrbuch der Bodenkunde, Enke Verlag, Stuttgart
- Schroeder, D. (1992) : Bodenkunde in Stichworten, Hirt in der Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- Singh, J.S.; Milchunas, D.G. & Lauenroth, W.K. (1998) : Soil water dynamics and vegetation patterns in a semiarid grassland, *Plant Ecology* 134: 77-89, 1998
- Trlica, M. J. & Biondini M.E. (1990) : Soil Water Dynamics Transpiration And Water Losses In A Crested Wheatgrass And Native Shirtgrass Ecosystem, *Plant&Soil* 126(2). 1990. 187-202.
- Whalley, W.R.; Dean, T.J. & Izzard, P. (1992) : Evaluation of the Capacitance Technique as a Method for Dynamically Measuring Soil Water Content, *J. agric. Engng Res.* (1992) 52, 147- 155
- Wild, Alan (1995) : Umweltorientierte Bodenkunde – eine Einführung, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg-Berlin-Oxford
- Wilmking, M. (1998) : Von der Tundra zum Salzsee – Landschaftsökologische Differenzierung im westlichen Uvs-Nuur-Becken, Mongolei, Diplomarbeit, Universität Potsdam, Potsdam
- Wilpert v., K.; Nell, U.; Lukes, M. & Schack-Kirchner, H. (1998) : Genauigkeit von Bodenfeuchtemessungen mit „Time Domain Reflectometry“ und „Frequency Domain-Sensoren“ in heterogenen Waldböden, *Z. Pflanzenernährung und Bodenk.*, 161, 179-185 (1998)

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1 : Die einzelnen Untersuchungsstandorte entlang des Transsekts
- Tabelle 2 : Wasserspannung und Bodenwassergehalte an S 3
- Tabelle 3 : Wasserspannung und dazugehörige Bodenwassergehalte
- Tabelle 4 : Das Bodenwassermeßprogramm 1998 im Überblick
- Tabelle 5 : Abweichungen zwischen den Meßwerten beider Verfahren
- Tabelle 6 : Mittlere Bodenwassergehalte, Niederschlagssummen und potentielle Verdunstung während des Meßzeitraums
- Tabelle 7 : Feldgesättigte Wasserleitfähigkeit des Bodens
- Tabelle 8 : Niederschlagsereignisse an S 2 und S 3
- Tabelle 9 : Prozentuale Korngrößenzusammensetzung und Porenvolumen des Bodens an den Standorten
- Tabelle 10 : Statistische Kenngrößen S 1
- Tabelle 11 : Statistische Kenngrößen S 2
- Tabelle 12 : Statistische Kenngrößen S 3
- Tabelle 13 : Statistische Kenngrößen S 5
- Tabelle 14 : Statistische Kenngrößen S 7
- Tabelle 15 : Statistische Kenngrößen der Thetasondewerte S 3
- Tabelle 16 : Vegetationsproben S 3
- Tabelle 17 : Niederschlagssummen der Sommermonate
- Tabelle 18 : Vergleich der Durchschnittswerte der Bodenwassergehalte
- Tabelle 19 : Potentielle Verdunstung 1997 und 1998
- Tabelle 20 : Verdunstungssummen ausgewählter Tage in mm an S 5

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Lage der Stationen im Untersuchungsgebiet
- Abbildung 2 : Poröse Keramik-Druck-Platte zum erstellen der Wasserspannungskurve
- Abbildung 3 : Verhältnis von Wasserspannung und Bodenwassergehalt (aus Scheffer/Schachtschabel, 1992)
- Abbildung 4 : Hysteresis-Effekt bei Sand und tonigem Schluff (aus Scheffer/Schachtschabel, 1992)
- Abbildung 5 : Wasserspannung S 2; 50 cm Bodentiefe
- Abbildung 6 : Verhältnis Wasserspannung / Bodenwassergehalt S 2; 50 cm Bodentiefe
- Abbildung 7 : Wasserspannung S 3; 50 cm Bodentiefe
- Abbildung 8 : Einsatz von Tensiometern und der Thetasonde an S 7
- Abbildung 9 : Vergleich Thetasonde-Stechzylinder S 3; 5 cm Bodentiefe
- Abbildung 10 : Vergleich Thetasonde-Stechzylinder S 3; 20 cm Bodentiefe
- Abbildung 11 : Vergleich Thetasonde-Stechzylinder S 3; 50 cm Bodentiefe
- Abbildung 12 : Vergleich Thetasonde-Stechzylinder S 1; 5 cm Bodentiefe
- Abbildung 13 : Vergleich Thetasonde-Stechzylinder S 1; 20 cm Bodentiefe
- Abbildung 14 : Vergleich Thetasonde-Stechzylinder S 1; 30 cm Bodentiefe
- Abbildung 15 : Mittelwerte der volumetrischen Bodenwassergehalte an den Stationen 1, 2, 3, 5 und 7
- Abbildung 16 : Meßgarten an S 3
- Abbildung 17 : Mittelwerte des volumetrischen Bodenwassergehalts der einzelnen Meßtiefen; S 1

- Abbildung 18 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 1; 5 cm Bodentiefe
- Abbildung 19 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 1; 20 cm Bodentiefe
- Abbildung 20 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 1; 30 cm Bodentiefe
- Abbildung 21 : Tageswerte des Bodenwasserpotentials an S 1; 30 cm Bodentiefe
- Abbildung 22 : Grundwasser-Flur Abstand an S 1
- Abbildung 23 : Mittelwerte des volumetrischen Bodenwassergehalts der einzelnen Meßtiefen; S 2
- Abbildung 24 : Tagessummen der Niederschläge an S 2
- Abbildung 25 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 2; 5 cm Bodentiefe
- Abbildung 26 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 2; 50 cm Bodentiefe
- Abbildung 27 : Tageswerte der Wasserspannung an S 2; 50 cm Bodentiefe
- Abbildung 28 : Mittelwerte des volumetrischen Bodenwassergehalts der einzelnen Meßtiefen; S 3
- Abbildung 29 : Mittelwerte des volumetrischen Bodenwassergehalts der einzelnen Meßtiefen; S 5
- Abbildung 30 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 5; 5 cm Bodentiefe
- Abbildung 31 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 5; 20 cm Bodentiefe
- Abbildung 32 : Tagessummen der Niederschläge an S 5
- Abbildung 33 : Mittelwerte des volumetrischen Bodenwassergehalts der einzelnen Meßtiefen; S 7

- Abbildung 34 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 7; 5 cm Bodentiefe
- Abbildung 35 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 7; 5 cm Bodentiefe aus Thetasondenmessungen
- Abbildung 36 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 3; 5 cm Bodentiefe
- Abbildung 37 : Zeitlicher Ablauf der Evaporation aus dem Boden (aus Hartge/Horn, 1991)
- Abbildung 38 : Tagessummen der potentiellen Verdunstung berechnet nach Wendling S 3
- Abbildung 39 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 3; 10 cm Bodentiefe
- Abbildung 40 : Tageswerte des volumetrischen Bodenwassergehalts an S 3; 20 cm Bodentiefe
- Abbildung 41 : Isoplethenkarte der volumetrischen Bodenwassergehalte und des Niederschlags an S 3
- Abbildung 42 : Tageswerte der Wasserspannung an S 3; 50 cm Bodentiefe

Danksagung

Für die wissenschaftliche Beratung und Betreuung, für die Aufnahme des Datenmaterials in der Mongolei und für die freundliche Hilfe bei der Auswertung der Proben im Labor und der Daten am Computer bin ich den folgenden Personen außerordentlich dankbar:

Dr. Wolfgang Krüger, Dr. Dieter Knothe, Andreas Bauer, Andreas Barsch, Tsesem Sugar, Jens Ibendorf, Jens Heidemann, Dr. Andreas Meixner, Dr. Heide Kraudelt, Dr. Sybille Itzerott, Oliver Stock, Ingo Heymann, Tina Schulte und den Herren Zereng, Otgo und Taschtawaahn.

Ferner bedanke ich mich für viele gute Ratschläge und die moralische Unterstützung bei meiner Familie Heidrun, Dieter und Sebastian Blank und Elke Reinsperger. Darüber hinaus geht besonders herzlicher Dank an Maryester Gonzalez und zu guter Letzt auch an meine Studienkollegen Hannes Reuter und Martin Wilmking.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, daß ich die Diplomarbeit selbständig angefertigt habe und keine außer denen von mir angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Potsdam, den 28.05.99

Benjamin Blank