

# **Anhang 2**

## **Rechercheergebnis Bodenwasserprobennahme (QSM)**

# **Anhang 2.1**

Rechercheergebnis  
Bodenwasserprobennahme (QSM)

**Sachstandsrecherche**

## **Sachstandsrecherche: Bodensickerwasserprobennahme**

<b>1</b>	<b>VERFAHRENSGRUNDLAGE .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>ANWENDUNGSGEBIETE .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>TECHNISCHE AUSRÜSTUNG.....</b>	<b>3</b>
<b>3.1</b>	<b>Allgemeine Geräteangaben .....</b>	<b>3</b>
3.1.1	Kerzenkörper.....	4
3.1.2	Saugschläuche.....	4
3.1.3	Probensammelbehälter .....	4
3.1.4	Druck gesteuerte Probennahme .....	5
<b>3.2</b>	<b>Materialklassen.....</b>	<b>7</b>
<b>3.3</b>	<b>Probennahmesysteme .....</b>	<b>10</b>
3.3.1	Ein-Kammer-Saugkerzen.....	10
3.3.2	Zwei-Kammer-Saugkerzen .....	11
3.3.3	Sonderverfahren .....	12
<b>3.4</b>	<b>Einbauvarianten.....</b>	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>INSTALLATION UND BETRIEBSAUFNAHME VON SAUGSONDENSYSTEMEN.....</b>	<b>20</b>
<b>4.1</b>	<b>Planung .....</b>	<b>20</b>
4.1.1	Kapillardruckgesteuerte Bodenwasserprobennahme .....	20
<b>4.2</b>	<b>Aufschlussverfahren.....</b>	<b>24</b>
<b>4.3</b>	<b>Bohrlochgeometrie.....</b>	<b>24</b>
<b>4.4</b>	<b>Einschlämmen und Abdichtung (ASTM D 4696-92).....</b>	<b>24</b>
4.4.1	ASTM D 4696-92 .....	24
4.4.2	Merkblatt Montanhydrologisches Monitoring (LMBV, 2007) .....	25
<b>4.5</b>	<b>Einbautiefe .....</b>	<b>25</b>
<b>4.6</b>	<b>Betriebsaufnahme .....</b>	<b>26</b>
<b>4.7</b>	<b>Auswahl der Betriebsart .....</b>	<b>26</b>

<b>4.8</b>	<b>Qualitätssicherung .....</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>ANWENDUNGSGRENZEN .....</b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b>ERFORDERLICHE BZW. ZWECKMÄßIGE VERFAHRENSKOMBINATIONEN IN ABHÄNGIGKEIT DER ZIELSTELLUNG .....</b>	<b>29</b>
<b>7</b>	<b>FEHLERQUELLEN.....</b>	<b>30</b>
<b>7.1</b>	<b>Systembedingte Fehlerquellen .....</b>	<b>30</b>
<b>7.2</b>	<b>Handhabungsbedingte Fehlerquellen .....</b>	<b>31</b>
<b>8</b>	<b>QUALITÄTSKONTROLLE .....</b>	<b>32</b>
<b>8.1</b>	<b>Vorbereitung der Saugsonden vor dem Einbau.....</b>	<b>32</b>
<b>8.2</b>	<b>Prüfung der Tauglichkeit vor dem Einsatz .....</b>	<b>33</b>
8.2.1	Äußere Zustandsüberprüfung .....	33
8.2.2	Innere Zustandsüberprüfung.....	33
8.2.3	Dichtheitstest (LD-Test) .....	33
8.2.4	Reinigungsverfahren nach DVWK-Merkblatt 217 .....	33
8.2.5	Reinigungsverfahren nach ASTM D 4696-92 .....	33
8.2.6	Eigene Anmerkungen.....	34
<b>8.3</b>	<b>Behandlung von Bodenwasserproben.....</b>	<b>34</b>
8.3.1	LMBV-Merkblatt (2007) .....	34
8.3.2	DVWK-Merkblatt 217 .....	35
8.3.3	Luftdurchtrittspunkt.....	35
<b>8.4</b>	<b>Beispiele zur Protokollierung der Ergebnisse .....</b>	<b>35</b>
<b>9</b>	<b>EMPFEHLUNGEN AUS EIGENEN FORSCHUNGSARBEITEN.....</b>	<b>38</b>
<b>10</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>40</b>

## 1 Verfahrensgrundlage

Die Funktionsweise von Saugsonden beruht auf der Kapillarität poröser Feststoffe. Die engen Poren des Kerzenmaterials sind aufgrund ihrer hohen Kapillarspannung ständig wassererfüllt. Mittels eines angelegten Unterdruckes in der Saugsonde wird ein Druckgradient zwischen dem Porensystem des Bodens und dem porösen Kerzenteil des Probenehmers erzeugt und eine Gewinnung von Sicker-, teilweise auch Haftwasser möglich.

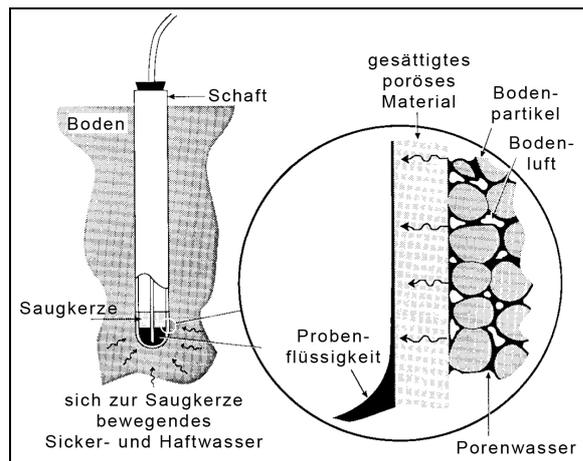


Abb. 1.1: Funktionsprinzip einer Saugsonde (ASTM 2000)

Voraussetzung hierfür ist, dass die Poren des Kerzenmaterials denen des Bodens anzupassen sind, um eine Wassersättigung des Kerzenmaterials trotz hoher Saugspannungen zu gewährleisten. Eine wichtige Kenngröße der Saugsondenanwendung ist der Lufteintrittspunkt. Er bestimmt den Druck, der die Kapillarkraft der größten Pore übersteigt, so dass sie sich entleert und mit Luft füllt.

Die Saugsonde verliert somit ihre Wasseranbindung an den Bodenkörper und eine Förderung von Bodenwassers ist nicht mehr möglich. Der angelegte Unterdruck muss deshalb stets unterhalb des Lufteintrittspunktes liegen.

## 2 Anwendungsgebiete

Der Einsatz von Saugsonden ermöglicht eine punktbezogene, wiederholbare Entnahme von Bodenwasserproben und dient der Ermittlung mobiler Stoffgehalte von Böden im Rahmen einer Sickerwasserprognose nach Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV).

Saugsonden werden gleichfalls zur Aufnahme einmaliger Ist-Zustände bzw. zur Dokumentation der zeitlichen Entwicklung der Bodenwasserbeschaffenheit eingesetzt.

Die Verwendung von Saugsonden ermöglicht eine weitestgehend zerstörungsfreie und wiederholbare in situ-Beprobung des Bodenwassers am Untersuchungsort.

## 3 Technische Ausrüstung

### 3.1 Allgemeine Geräteangaben

Eine Saugsondenanlage besteht aus einem Kerzenkörper aus porösem Material, einem Schaft (aus Acrylglas, Kunststoff oder Edelstahl), einem Stopfen zum Verschließen (aus Gummi, Neopren oder Polytetrafluorethylen (PTFE)), einem Probensammelbehälter, einer Unterdruckapparatur (bei einigen Verfahren in Kombination mit Überdruck) und Saugschläu-

chen bzw. Verbindungselementen. Die Auswahl der Materialien ist dabei abhängig von den Anforderungen an die chemische Beständigkeit und die Belastung beim Einbau sowie vom Spektrum der zu erwartenden Schadstoffe. Die Saugsonde kann an den Schaft geklebt, geschweißt oder über ein Gewinde angeschraubt sein.

### 3.1.1 Kerzenkörper

**Hydrophile Kerzenkörper** (Keramik mit verschiedenen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalten) sind in verschiedenen Porendurchmessern und demzufolge mit unterschiedlichen Lufteintrittspunkten verfügbar, sodass große Unterdruckbereiche anwendbar sind. Empfohlen werden vor allem high flow Keramikkerzen mit einer dünnen Wandung und vergleichbar sehr guter hydraulischer Durchlässigkeit und geringen Speichereigenschaften. Aufgrund der hohen Ladungsdichte des Feststoffes ist der Kerzenkörper gut benetzbar, gleichzeitig zeigt er jedoch in Abhängigkeit der Wandungsstärke und des pH-Wertes eine hohe Austauschkapazität infolge von Ad- und Desorptionsprozessen auf. Zudem kann eine signifikante Aluminiumabgabe an die Bodenlösung auftreten und beim Einbau muss besonders Vorsicht geboten werden, damit das Material nicht bricht.

**Hydrophobe Kerzenkörper** (Glas, Kunststoffe, Edelstahl) sind durch ihre geringe Ladungsdichte schwer benetzbar und besitzen eine geringe Austauschkapazität. Für die Probenförderung sind aufgrund der schwereren Benetzbarkeit weite Porendurchmesser notwendig, die wiederum einen niedrigen Lufteintrittspunkt vorweisen. Gleichfalls muss zur Wassersättigung der Poren bereits Unterdruck angewendet werden. Der Unterdruck darf jedoch aufgrund des niedrigen Lufteintrittspunktes nur gering sein. Zur Herstellung eines hydraulischen Kontaktes zwischen Boden und Kerze dient bei Kunststoffkerzen eine Schutzhülle aus grobporigem Material, welche sich beim Einschlämmen mit Feinboden zusetzt.

### 3.1.2 Saugschläuche

Ad- und Desorptionsprozesse treten auch an Schlauchmaterialien auf. Genaue Untersuchungen von Bodenwasserprobennahmen liegen nicht vor. Es ist jedoch anzunehmen, dass z.B. PTFE-Materialien sehr geringe Wechselwirkungen mit der Bodenlösung aufweisen. Demgegenüber ist jedoch auf die relativ große Gasdiffusionsrate bei diesem Material zu beachten, die einen Einfluss auf die Sickerwasserprobe haben kann. Dementsprechend sollte die Länge der Schläuche so kurz wie möglich sein, um dadurch auch ein möglichst geringes Totvolumen, eine zeitnahe Probenförderung und einen geringen Rückfluss aus der Kerze bei steigenden Saugspannungen des Bodens zu gewährleisten. Der übliche Innendurchmesser von Saugschläuchen beträgt zwischen 1,6 und 3 mm.

### 3.1.3 Probensammelbehälter

Probensammelbehälter dienen der Sammlung und dem Transport des Bodenwassers. Es kann hierbei zwischen Sammelflaschen und der Sammlung des Bodenwassers im Schaft der Saugsonde unterschieden werden.

An eine Flasche können mehrere Saugsonden gleichzeitig angeschlossen werden. Flaschen aus Glas sollten gegen Implosionsgefahr geschützt sein, hierzu sind Kunststoffummantelun-

gen erhältlich. Gefäße aus PP, PE und PA eignen sich nicht für die Anwendung im Vakuumbetrieb. Das Flaschenvolumen sollte mindestens das Dreifache des Probevolumens betragen.

Die Bodenwassersammlung im Schaft eignet sich für die Probennahme in großen Tiefen (ca. 6 m), falls

- a) angelegte Unterdrücke zur Förderung an die Oberfläche nicht mehr ausreichen,
- b) wenn die Lösung bei Bodentemperatur gelagert werden soll,
- c) wenn methodisch bedingte Unterdrücke minimiert werden sollen, um eine Änderung des Bodenwassermilieus entgegen zu wirken.

Die Entnahme der Bodenlösung erfolgt zum gegebenen Zeitpunkt durch Absaugen oder Förderung aus dem Sammelgefäß mittels Überdruck.

### **3.1.4 Druck gesteuerte Probennahme**

Die Größe des anzulegenden Unterdrucks ist bestimmt durch die Bodenart, die Probenmenge, den aktuellen Wassergehalt und die Ansaugzeit. Während eines kontinuierlichen Betriebes sollte der Unterdruck rund 0,1 – 0,2 bar größer sein als die Saugspannung im Boden. Beim diskontinuierlichen Betrieb wird ein Unterdruck zwischen 0,3 und 0,7 bar vorgeschlagen, um die erforderliche Wassermenge kurzfristig absaugen zu können (DVWK 1990). Bei Untersuchungsreihen sollte der Unterdruck möglichst konstant gehalten werden. Siehe hierzu auch Kapitel 4.1.1.

In Abhängigkeit der aufzuwendenden Kosten kann der Unterdruck wie folgt gesteuert werden (LUA 2004):

#### **Probensammlung mit automatischer Pumpensteuerung**

Die Saugsonden in einem Horizont sind über Sammelflaschen an einen Unterdruckschalter angeschlossen, der bei Bedarf eine Vakuumpumpe zuschaltet. Der Unterdruck bleibt über den Probennahmezeitraum hinweg konstant und wird manuell vorgegeben. Bei starken Niederschlägen ist eine schnelle Füllung der Sammelflaschen möglich. Eine Optimierung der Anlage kann durch einen manuellen oder elektronischen Vakuumregler und einen Schwimmerschalter erreicht werden. Der Nachteil der Regelung ergibt sich aus einer häufigen Probennahme und dem Entstehen bestimmter Fließwege im Boden durch das permanente Druckgefälle.

#### **Probensammlung mit tensionsgesteuerter Vakuumanlage**

Zusätzlich zu den Saugsonden werden Tensiometer installiert, die eine Nachregelung des Unterdrucks je nach gemessener Wasserspannung ermöglichen. Dies gestattet eine zielgerichtete Probennahme, jedoch ist diese kombinierte Anlage energieintensiv und teuer. Zudem muss darauf geachtet werden, dass das Steuertensiometer außerhalb des Einflussbe-

reiches der Saugsonde liegt, um Rückkopplungen zu vermeiden. Siehe hierzu auch Kapitel 4.1.1.

### **Niederschlagsgetriggerte Probennahme**

Nach einer vorgegebenen Niederschlagsmenge wird im Anschluss an eine bestimmte Wartezeit  $t$  eine Probennahme ausgelöst. Dabei erfolgt die Förderung des Bodenwassers mit hohem Unterdruck, bis eine bestimmte Wassermenge (ca. 30 ml) erreicht ist. Die Pumpe schaltet sich daraufhin ab und das Bodenwasser wird im Schaft gespeichert. Das Verfahren wirkt sich aufgrund der kurzen Probennahmezeit nur geringfügig auf den Bodenwasserhaushalt aus, ist jedoch relativ teuer, energieintensiv und liefert lediglich geringe Probemengen.

### **Ungeregelt fallender Unterdruck**

Dieses Verfahren sollte nur in begründeten Ausnahmefällen zulässig sein. Es wird hierbei einmalig ein Unterdruck angelegt, welcher mit zunehmendem Probenvolumen abnimmt, bis ein Gleichgewicht mit der Saugspannung des Bodens erreicht ist. Die Saugsondenanlage muss regelmäßig beprobt werden (betreuungsintensiv), ist aber gleichfalls einfach zu installieren, kostengünstig und unabhängig von externer Energieversorgung. Der Unterdruckverlauf und das Beprobungsintervall sind jedoch von vielen Faktoren, z.B. Leckagen, abhängig.

### 3.2 Materialklassen

In der folgenden Tabelle sind ausgewählte Kerzenkörper unterschiedlichen Materials aufgeführt, wie sie derzeit auf dem Markt angeboten werden.

Tab. 3.1: Kerzenkörper (Würck 2007)

Typenbezeichnung	Material	Händler bzw. Hersteller
SG 	Glas ( $\text{SiO}_2$ )	Ecotech GmbH Bonn
P80 	Keramik ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	CeramTec AG
PTFE/Quarz 	Kunststoff (PTFE, $\text{SiO}_2$ )	Prenart Equipment ApS
SIC20 	Siliziumkarbid ( $\text{SiC}$ )	UMS GmbH München
V4A 	Edelstahl (Cr-Ni-Mo)	UP GmbH Cottbus

Die Kerzentypen unterscheiden sich hinsichtlich ihres Materials, Größe und physikalischen Parameter (vgl. Tab. 3.2). Für Vergleichsmessungen sollten Kerzen mit einheitlicher Porenweite ( $0,45 \mu\text{m}$ ) genutzt werden, eine Filtration der gewonnenen Bodenlösung entfällt somit. Jedoch ist die Porenweite vom Untersuchungsziel abhängig (Austauschprozesse). Es existiert jedoch kein Kerzenmaterial, welches für alle Fragestellungen und Stoffgruppen gleichermaßen geeignet ist. Die Auswahl des Werkstoffes wird so von der Aufgabenstellung bestimmt.

Tab. 3.2: Allgemeine Angaben der Kerzenkörper (Würck 2007)

	Keramik	Edelstahl	Glas	Siliziumkarbid	Kunststoff
Anzahl der verfügbaren Saugkerzen	4	3	4 <sup>1)</sup>	2	2
Form des Saugkörpers	Hohlzylinder + Halbkugelspitze	Hohlzylinder + Halbkugelspitze	Konus + Halbkugelspitze	Hohlzylinder + Halbkugelspitze	Hohlzylinder
Länge (cm)	4,3	5,5	4,9	5,0	5,2
Durchmesser (cm)	2,0	2,0	1,9	2,0	2,1
Äußere Oberfläche (cm <sup>2</sup> )	35	40	29	37	34
Trockenmasse des porösen Saugkörpers (g)	17	88	12	22	17
Porung (Herstellerangaben) (µm) <sup>2)</sup>	1,0	0,5	1,0	-	2,0
Schlauchmaterial	PTFE	Edelstahl	PTFE	PE	PTFE
Schlauchlänge (cm)	95	265	95	95	95
Schlauchinnendurchmesser (cm)	0,16	0,2	0,16	0,16	0,16

<sup>1)</sup> zwei Chargen gleicher Bauart zu je zwei Stück

<sup>2)</sup> Berechnung aus Luftdurchtrittspunkt

In Tab. 3.3 sind für jedes gängige Kerzenmaterial die geeigneten Stoffgruppen, weniger und nicht geeignete Stoffgruppen, sowie Hinweise und allgemeine Bemerkungen aufgeführt.

Bei der Literaturrecherche zeigte sich, dass die Eignung von Saugsonden bei der Beprobung von Pflanzenschutzmitteln (PSM) abhängig vom pH-Wert und den Eigenschaften des Wirkstoffes (geringere Adsorption bei höherer Wasserlöslichkeit) ist. Die Sorption von PAK an Kerzen steigt mit zunehmender Molekülgröße an, bei geringen Durchflussraten bzw. einer langen Probennahmezeit ist zudem ein mikrobieller Abbau nicht auszuschließen. Der Einsatz von Saugsonden für MKW ergibt an allen Kerzenmaterialien aufgrund starker Filtration und Adsorption hohe Minderbefunde.

Tab. 3.3: Eignung von Kerzenmaterialien für die Probennahme (BERGER/KALBE 2004, LUA 2004)

Kerzenmaterial	geeignet für	bedingt geeignet für	Hinweise	allgemeine Bemerkungen
Keramik (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Nitrat, Nitrit, Bromid, Sulfat, Natrium	Phosphat, Ammonium, Mangan, Magnesium, Schwermetalle (SM), PAK (> 1 mg/l, 2-4-Ring) Nitroaromaten	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> : vorherige Säurespülung erhöht Adsorption, SM: starke Adsorption bei pH 4-6 und 8, Nitroaromaten: Adsorption geringer nach 1 l Durchfluss	Vorherige Konditionierung (Säurespülung) und Ab-sättigung der Sorptionsplätze notwendig, DOC nur nach Vorbehandlung beproben
Nickel-Sinter		Natrium, Kalium, Calcium, org. Stoffe		kaum mehr angewendet, große Differenzen in Po-renraumverteilung, Abgabe von Nickel in Bodenlö-sung führt zur Verstopfung und pH-Verfälschung
Glas (Borosilikat)	org. Stoffe (PSM, DOC), Nitrat, Chlorid, Bromid, Sulfat, Phosphat, Natrium	Schwermetalle, LHKW, PAK (> 1 mg/l, 2-4-Ring), Nitroaromaten	Nitroaromaten: Adsorption gerin-ger nach 1 l Durchfluss	
Prenart (Edelstahl, Quarz, Teflon)	Nitrat, Chlorid, Bromid, Sulfat, Natrium, Phosphat, Schwermetalle, DOC			
Edelstahl	Nitrat, Chlorid, Bromid, Sulfat, Natrium, Phosphat, PSM, org. Stoffe	Schwermetalle, PAK (> 1 mg/l, 2-4-Ring)		
Teflon/ Kunststoffef	Arsen, Nitrat, Nitrit, Chlo-rid, Bromid, Sulfat, Natri-um, Phosphat, Ammonium	Nitroaromaten, DOC, SM PAK, PCB, BTEX, PSM	Nitroaromaten: Adsorption gerin-ger nach 1 l Durchfluss, DOC: Freisetzung org. Kohlenstoffs aus Kerze möglich SM: pH abhängig	Voraussetzung: Einbau der Kerze mit Quarzmehl zur hydraulischen Anbindung an den Boden
Siliciumkarbid		BTEX		

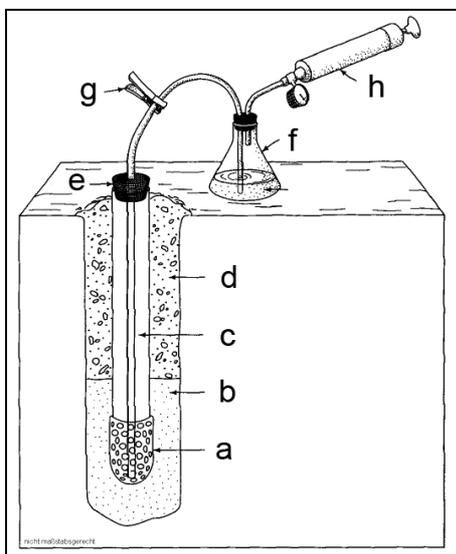
### 3.3 Probennahmesysteme

#### 3.3.1 Ein-Kammer-Saugkerzen

##### Ein-Kammer-Saugkerzen mit gleichzeitiger Probenförderung

Die Förderung des Bodenwassers erfolgt anschließend an die Perkolationslösung durch die Kerzenwand über den Kerzenschaft in den externen Sammelbehälter. Zur Gewinnung von Bodenlösung wird dabei ein Unterdruck durch eine Handpumpe oder einen Unterdruckbehälter erzeugt. Die Entnahmetiefe ist bei diesem Verfahren durch den angelegten Unterdruck vom Dampfdruck des Bodenwassers (Verflüchtigung von Inhaltsstoffen vermeiden) und dem Förderdruck der Pumpe abhängig.

In der Literatur finden sich Angaben zur Entnahmetiefe bei Teflonkerzen bis 1 m, Edelstahlkerzen bis 1,5 m und Keramik- sowie Siliciumkarbidkerzen bis 2 m.



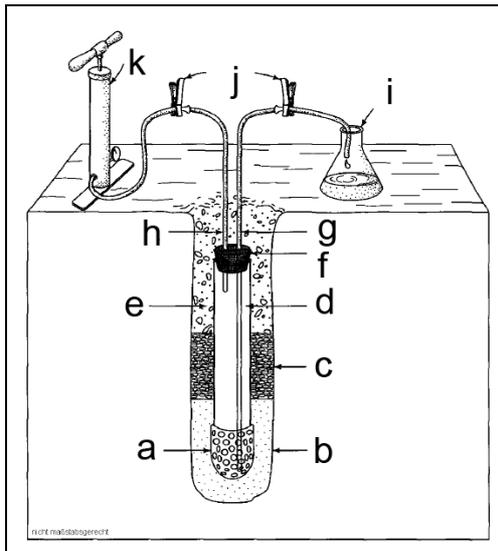
Legende:

- a Kerzenkörper
- b Quarzmehl
- c Schaft
- d Bohrgut
- e Stopfen
- f luftdichter Probensammler
- g Schlauchklemme
- h Vakuumpumpe

Abbildung 3.1: Ein-Kammer-Saugsonde mit gleichzeitiger Probenförderung (LUA, 2004)

##### Ein-Kammer-Saugkerzen mit Sammlung im Schaft und anschließender Probennahme

Die durch Unterdruck angesaugte Bodenlösung wird in der Kerze und im Schaft gesammelt. Im Anschluss daran erfolgt die Förderung des Bodenwassers mit Hilfe von Überdruck (Luft oder Stickstoff) in das externe Sammelgefäß, wobei die Kerze als Rückschlagventil dient. Die Entnahmetiefe richtet sich nach dem Lufteintrittspunkt und der Förderhöhe der Pumpe. In der Literatur finden sich dazu Angaben für Teflonkerzen bis 1 m, Edelstahlkerzen bis 3 m und Keramikkerzen bis 15 m.



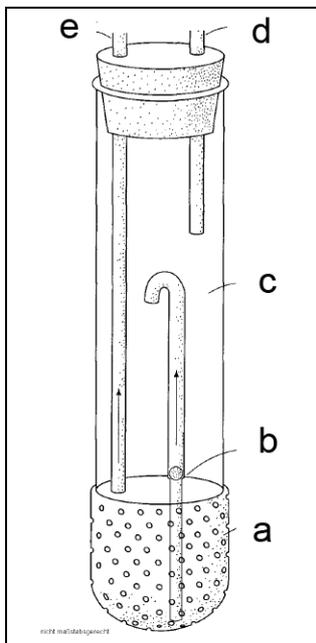
**Abbildung 3.2: Ein-Kammer-Saugsonde mit Sammlung im Schaft und anschließender Probennahme (LUA, 2004)**

Legende:

- a Kerzenkörper
- b Quarzmehl
- c Bentonit-Granulat
- d Schaft
- e Bohrgut
- f Stopfen
- g Probenförderleitung
- h Überdruck-/Unterdruckleitung
- i Sammelgefäß
- j Schlauchklemmen
- k Überdruck-/Vakuumpumpe

### 3.3.2 Zwei-Kammer-Saugkerzen

Bei dieser Bauform sind Kerze und Schaft getrennt ausgebildet. Der Schaft besteht wiederum aus zwei Kammern, die durch ein Ventil unterteilt werden. Die Probennahme der Bodenlösung erfolgt durch Unterdruck, wobei die einströmende Bodenlösung das Ventil passieren und sich im Schaft anreichern kann.



**Abbildung 3.3: Zwei-Kammer-Saugsonde (LUA 2004)**

Legende:

- a Kerzenkörper
- b Ventil
- c Schaft mit Probensammelkammer
- d Unterdruck-/Überdruckleitung
- e Probenförderleitung

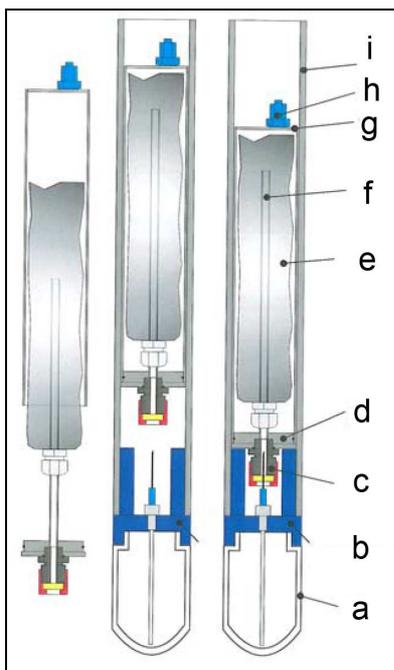
Bei angelegtem Überdruck schließt sich das Ventil und die Lösung gelangt über eine Steigleitung in die Sammelflasche. Die Einbautiefe der Saugsonde ist begrenzt durch den Betriebsdruck. Das Ventil im Schaft schützt die gesammelte Bodenwasserprobe vor dem Zurückfließen durch erhöhte Saugspannungen im Boden.

### 3.3.3 Sonderverfahren

#### Probennahme mittels Shuttleprinzip (gasdichtes System)<sup>1</sup>

Zur Probennahme wird in das Schutzrohr ein Shuttle mit dem Probennahmebeutel eingeführt und bis zum Anschluss der Kanüle (d) abgelassen. Die Nadel durchstößt das Septum, wodurch eine Verbindung zwischen der Saugkerze und dem Probennahmebeutel hergestellt ist. Durch Anlegen eines Unterdrucks an das Shuttle erfolgt die Bodenwasserentnahme.

Die Sammlung in einem gasdichten Beutel ermöglicht eine kapillardruckgesteuerte Entnahme ohne Verlust leichtflüchtiger Inhaltsstoffe und Gase. Die Bodenwasserprobe kann im Shuttle dem Labor übergeben werden.



Legende:

- a Saugkörper
- b Adapter für Kerze und Anschluss für Kanüle
- c Verschraubung mit Septum
- d Verschluss mit Bajonettenverschraubung
- e Perkolationsbeutel
- f Steigrohr
- g Shuttle
- h Vakuumananschluss
- i Schutzrohr

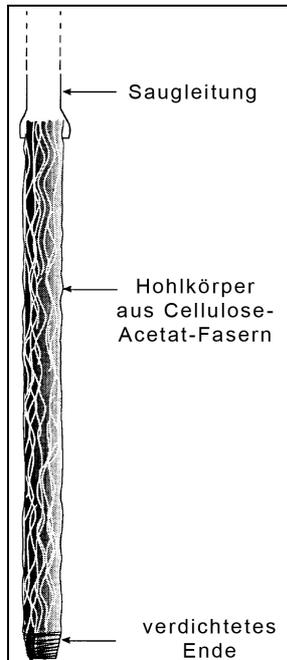
Abbildung 3.4: Bodenwasserprobennahmesystem zur gasdichten Probennahme

<sup>1</sup> Sickerwasserprobennahmesystem BGD GmbH/UGT GmbH

## Internationale Probennahmeverfahren

In der amerikanischen Literatur finden sich neben den bereits erwähnten Saugsondentypen eine Vielzahl abgeänderter Formen und neuer Typen (ASTM 2000).

### 1. Probenehmer aus Fasern:



**Abb. 3.1: Hohlkörper (JACKSON et al.) (ASTM 2000)**

JACKSON et al. entwickelten einen Probenehmer, der aus einem Hohlkörper aus Cellulose-Acetat-Fasern, welche am Ende verdichtet sind, besteht. Die Saugleitung ist am oberen Ende der Fasern angebracht. Eine Weiterentwicklung ist bei LEVIN und JACKSON zu finden, die Polymerfasern verwendeten. Ein Kritikpunkt an der Bauausführung sind die sehr dünnen und zerbrechlichen Fasern.

Dazu installierten SILKWORTH und GRIGAL den Probenehmer in perforierte PVC Rohre, welche mit flüssigem Bodenmaterial gefüllt worden. An diese Apparatur kann laut Autor ein konstanter Druck von 0,81 bar angelegt, wodurch eine Probennahme in schluffigen Lehmen mit Feuchten zwischen 20 – 50 % möglich ist. (ASTM 2000)

### 2. Probenehmer mit Membranfilter:

Der Membranfilter besteht aus Polycarbonat, Celluloseacetat, Cellulosenitrat, oder PTFE und ist in einem Filterhalter montiert, der auf dem Glasfaserfilter sitzt. Der Glasfaserfilter befindet sich auf zwei oder drei Glasfaserdochten, die wiederum auf einem Glasfasersammler montiert sind. Der Glasfasersammler hat Bodenkontakt und erhöht die Probennahmereichweite des Filters. Die Saugleitung reicht vom Filterhalter zur Oberfläche. Die Bodenlösung gelangt in den Sammler durch dessen Kapillarkräfte, der Transport der Lösung erfolgt im Anschluss durch Ansaugen aus dem Sammler in den Filter und von dort aus zur Oberfläche. Der Glasfaserfilter filtert Feinmaterial heraus und bewahrt so, dass Zusetzen des Membranfilters (ASTM 2000).

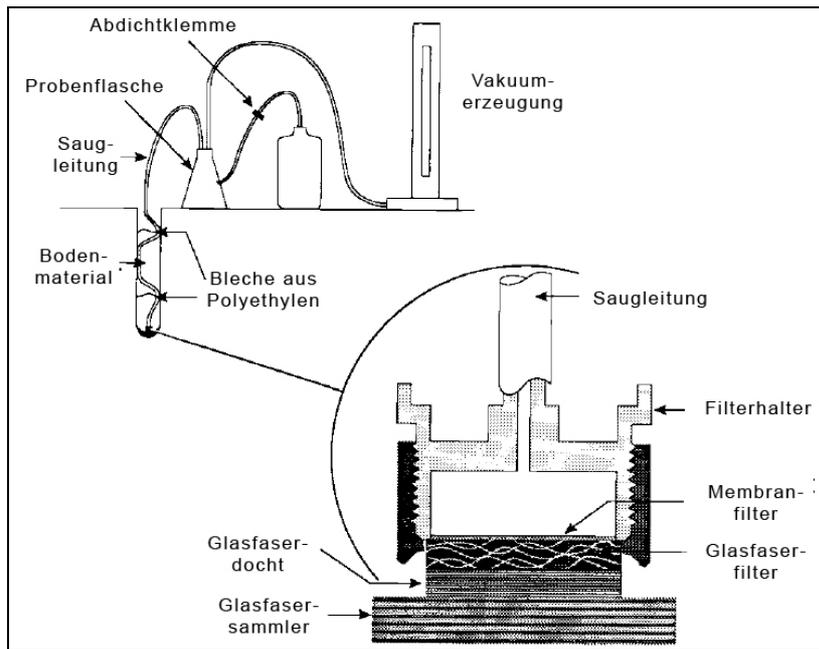


Abb. 3.2: Probennehmer mit Membranfilter (ASTM 2000)

### 3. Probennehmer mit Vakuumplatte:

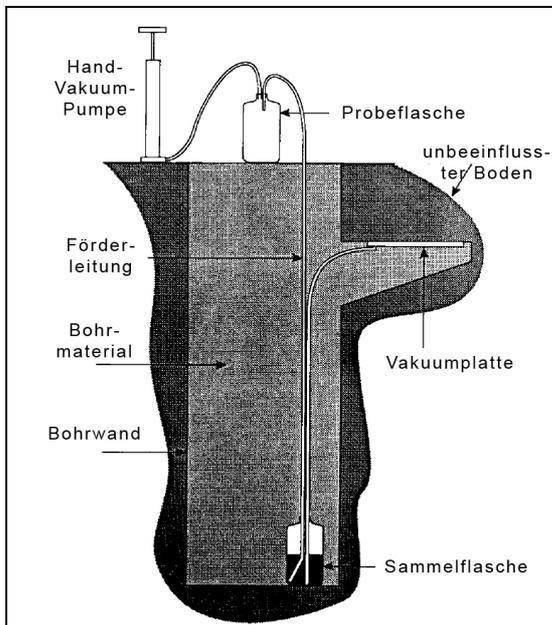
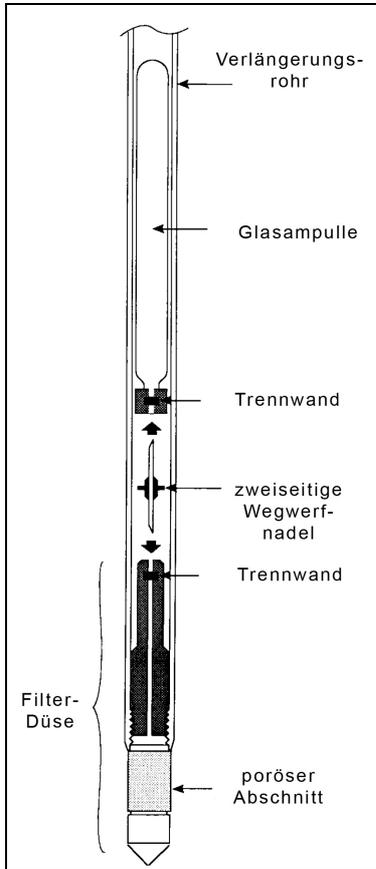


Abb. 3.3: Probennehmer mit Vakuumplatte (ASTM 2000)

Die Vakuumplatte besteht aus einer flachen, porösen Scheibe, die an eine Saugleitung angeschlossen wird. Das Material der Scheibe kann Edelstahl, Keramik oder Fritteglass sein. Die Vakuumplatte wird in einen seitlichen Hohlraum der Bohrlochwand an die Decke angebracht (ASTM 2000). Zur Anbringung nutzt man Druckmembranen oder verborgene Rohre, für die Verbesserung des hydraulischen Kontakts findet Quarzmehl Einsatz. Der Vorteil der Apparatur besteht in der großen Kontaktfläche, sodass ein großes Probevolumen in kurzer Zeit gewonnen werden kann (ASTM 2000).

4. Probennehmer mit Filterdüse:

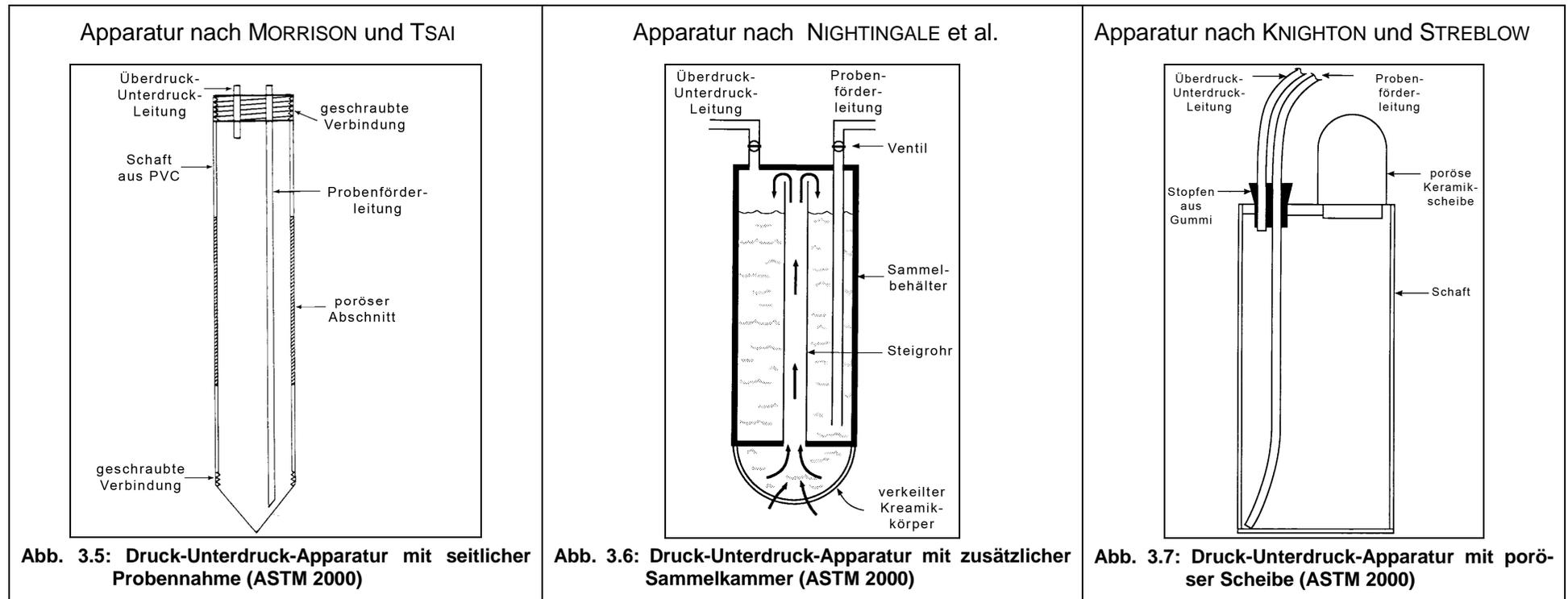


Diese Apparatur ist zweiteilig und besteht aus einer permanent installierten Filterdüse sowie einer entnehmbaren Glasampulle. Die Düse enthält ein poröses Segment und eine Trennwand. Sie ist auf Verlängerungsrohre aufgeschraubt, die bis zur Oberfläche reichen. Bei einer Probennahme wird ein neues Glasampulle auf einen Adapter aufgesetzt, der eine zweiseitige Wegwerfnadel enthält. Die beiden Trennwände des Probennehmers werden durchstoßen und die Flüssigkeit kann durch den anliegenden Unterdruck in der Glasampulle eintreten. Der Unterdruck nimmt mit steigendem Probenvolumen (maximal 35 ml) bis zum Druckausgleich ab (ASTM 2000).

Abb. 3.4: Probennehmer mit Filterdüse (ASTM 2000)

5. Druck-Unterdruck-Probennahmer:

Die ASTM D 4696-92 weist darauf hin, dass bei Saugsonden, die das Bodenwasser mit Überdruck fördern, oft Verluste der Bodenwasserprobe auftreten. Die folgend dargestellten Apparaturen wurden entwickelt, um diese Verluste zu minimieren.



Dabei handelt es sich um Probennahmer mit einem porösen Segment seitlich am Schaft, einem Probennahmer mit Sammelkammer und einem Probennahmer mit poröser Scheibe oberhalb des Schaftes, die einen Durchmesser von 7,6 bis 12,7 cm aufweist.

## Zusammenstellung der Betriebsdaten

In folgender Tabelle sind die eingesetzten Materialien, Saugspannungsbereiche und Probennahmetiefen der amerikanischen Geräte zusammengefasst.

Tab. 3.4: Zusammenstellung der Betriebsdaten (ASTM 2000)

Typ	Kerzenmaterial	max. Porengröße [µm]	Luft Eintrittspunkt [cbar]	Saugspannungsbereich [cbar]	max. Einbautiefe [m]
Unterdruck-Saugkerzen	Keramik	1,2 – 3,0 <sup>A(1)</sup>	> 100	< 60 – 80	< 7,5
	PTFE	15 – 30 <sup>A(2)</sup>	10 - 21	< 10 – 21	< 7,5
	Edelstahl	n.a. <sup>B</sup>	49 - 5	49 – 5	< 7,5
Druck-Unterdruck-Saugkerzen	Keramik	1,2 – 3,0 <sup>A(1)</sup>	> 100	< 60 – 80	< 15
	PTFE	15 – 30 <sup>A(2)</sup>	10 - 21	< 10 – 21	< 15
Hochdruck-Unterdruck-Saugkerzen	Keramik	1,2 – 3,0 <sup>A(1)</sup>	> 100	< 60 – 80	< 91
	PTFE	15 – 30 <sup>A(2)</sup>	10 - 21	< 10 – 21	< 91
Probenehmer mit Filterdüse	Polyethylen	n.a. <sup>B</sup>	n.a. <sup>B</sup>	n.a. <sup>B</sup>	keine
	Keramik	2 – 3 <sup>A(1)</sup>	> 100	< 60 – 80	< 7,5
	Edelstahl	n.a. <sup>B</sup>	n.a. <sup>B</sup>	n.a. <sup>B</sup>	keine
Probenehmer aus Cellulose-Acetate-Fasern	Cellulose	< 2,8	> 100	< 60 – 80	< 7,5
	Acetat				
	nicht cellulosehaltig Polymere	< 2,8	> 100	< 60 – 80	< 7,5
Probenehmer mit Membranfilter	Cellulose	< 2,8	> 100	< 60 – 80	< 7,5
	Acetat				
	PTFE	2 – 5	n.a. <sup>B</sup>	n.a. <sup>B</sup>	< 7,5
Probenehmer mit Vakuumpatte	Alundum	n.a. <sup>B</sup>	n.a. <sup>B</sup>	n.a. <sup>B</sup>	< 7,5
	Keramik	1,2 – 3,0	> 100	< 60 – 80	< 7,5
	Fritteglas	4 – 5,5	n.a. <sup>B</sup>	n.a. <sup>B</sup>	< 7,5
	Edelstahl	n.a. <sup>B</sup>	49 - 5	49 - 5	< 7,5

Legende:

A(1): Porengröße gemessen durch Luft eintrittspunkt

A(2): Porengröße gemessen durch Eindringen von Quecksilber

B: Information nicht verfügbar

### 3.4 Einbauvarianten

Saugsondenanlagen können generell in drei Varianten installiert werden:

#### horizontaler Einbau:

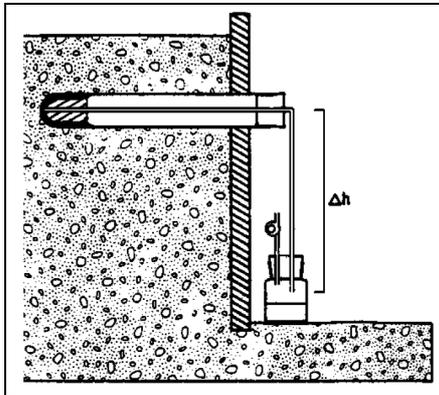


Abb. 3.8: Horizontaler Einbau (LUA 2004)

Hier erfolgt die Installation von der Profilwand aus. Bei diesem Verfahren ist kein Einschlämmen nötig, die Kerze wird in das Bohrloch hineingerückt. Der Bohrdurchmesser ist dabei etwa 2 mm kleiner als der Durchmesser der Kerze bzw. des Schaftes. Die Förderung des Bodenwassers erfolgt durch die hängende Wassersäule im Schlauch, der einen Durchmesser von kleiner 2 mm hat.

#### schräger Einbau:

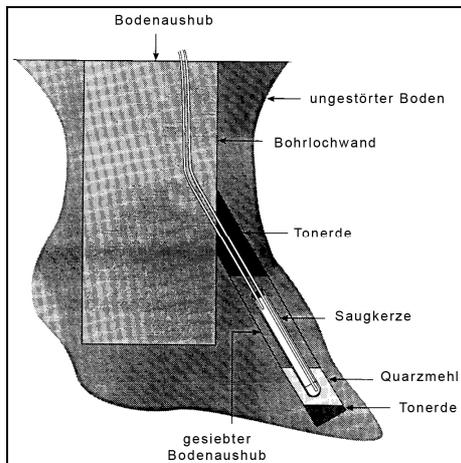


Abb. 3.9: Schräger Einbau (ASTM 2000)

Der Einbauwinkel beträgt mindestens 20°. Ragt der Schaft über das Gelände hinaus, ist eine zusätzliche Dichtmanschette zur Ableitung des Niederschlagswassers nötig. Gemäß ASTM D 4696-92 sind die Probennahmegeräte in der Bohrlochwandung zu installieren. Der Einbauwinkel sollte dabei in Anlehnung an die U.S. EPA zwischen 30° und 45° umfassen. Diese Verfahrensweise sichert eine ungestörte Bodensäule oberhalb der Saugsonde und simuliert natürliche Bedingungen, da das Porensystem nicht zerstört wird.

**vertikaler Einbau:** Hierbei muss der Bohrdurchmesser größer als der Kerzen- bzw. Schaftdurchmesser sein. Die befeuchtete Kerze wird in das Bohrloch eingesetzt. Für den Kontakt zwischen Kerze und Boden sorgt ein Einschlämmmaterial.

In Tab. 3.5 erfolgt eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von horizontalem und vertikalem Einbau.

Tab. 3.5: Vor- und Nachteile des horizontalen und vertikalen Einbaus von Saugsondenanlagen

	<b>Horizontaler Einbau</b>	<b>Vertikaler Einbau</b>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine durch Einbau bedingten vertikalen Fließwege</li> <li>• einfache Möglichkeit der konstanten Unterdruckerzeugung durch hängende Wassersäule</li> <li>• Minimierung der auf die Bodenprobe wirkenden Druckwechsel</li> <li>• einfache Möglichkeit der gasdichten Bodenwassergewinnung (kein Ausgasen durch Unterdruck)</li> <li>• einfache Wartung und Betrieb</li> <li>• Möglichkeit der Installation mehrerer Saugkerzen in einem Horizont</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installationstiefe wird nur durch Lufteintrittspunkt der Saugkerze (Ein-Kammer-System) oder Betriebsdruck (Zwei-Kammer-System) bestimmt</li> <li>• teufenorientierte Probenahme möglich</li> <li>• kostengünstig, da kein Schurf notwendig</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installationstiefe auf 2 m unter Gelände begrenzt</li> <li>• bei der Installation kann es zur Kräfteinwirkung und Verschleppung von Bodenmaterial kommen</li> <li>• aufwendig und teurer durch Errichtung eines Probenahmeschurfes oder –schachtes</li> <li>• erhöhter Arbeitsschutzbedarf in kontaminierten Bereichen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklung Einbau bedingter vertikaler Fließwege möglich</li> <li>• Störung des Bodengefüges durch größeren Bohrdurchmesser und Einschlämmen des Materials</li> <li>• externe Anordnung einer Unterdruckerzeugungseinheit</li> <li>• empfindlicher Druckwechsel</li> <li>• kein nachträglicher Umbau des Systems für gasdichte Probenahme möglich</li> </ul>

## 4 Installation und Betriebsaufnahme von Saugsondensystemen

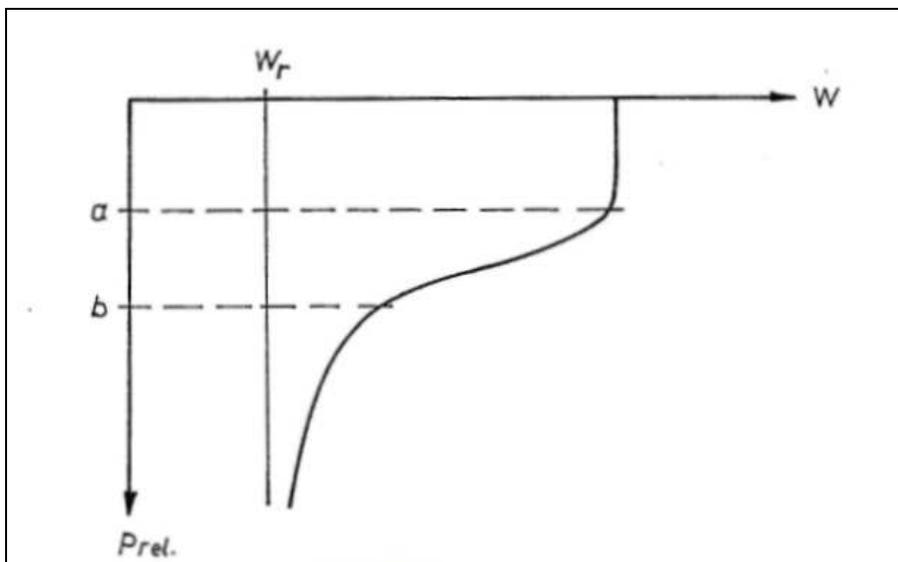
### 4.1 Planung

Anforderungen an die Planung ergeben sich aus der Zielstellung des Projektes. Dabei sollten vor der Realisierung u. a. folgende einzelfallspezifischen Faktoren bei der Planung berücksichtigt werden:

- Aufgabenstellung (z.B. Parameterumfang und Messintervalle/-zeitraum)
- standortspezifische Gegebenheiten (z.B. Bodenhorizonte, Heterogenität, Hangneigung, Fließwege und Hydrologie)
- Messfeldgröße / Verfügbarkeit von Medienträgern
- Sondenordnung / Einbautiefen
- notwendiges Probennahmenvolumen
- ...

#### 4.1.1 Kapillardruckgesteuerte Bodenwasserprobennahme

Bei einer Sickerwasserprobennahme ist zuerst festzulegen, welcher Bereich des Bodenwassers (mobiles Bodenwasser, d.h. Sickerwasser oder der mehr immobile Bodenwasseranteil) beprobt werden soll. Dies erfolgt i.d.R. auf der Grundlage einer im Labor ermittelten Saugspannungs-Wassergehalts-Funktion, auch als pF-Kurve oder Kapillardruck-Wassergehalts-Funktion bezeichnet. In der Abbildung 4.1.1 wird dies schematisiert dargestellt.



**Abb. 4.1.1:** Schematisierte Darstellung einer Kapillardruck ( $p_{rel.}$ )-Wassergehalts ( $w$ )-Funktion mit eingezeichnetem Restwassergehalt ( $w_r$ ) und den Druckbereichen „a“: für die Entnahme des mobilen Bodenwasseranteils, „b“: für die Entnahme des mobilen und vorrangig immobilen Bodenwasseranteils (Mischwasserprobe) und „a“ bis „b“: Bodenwasserprobe aus dem vorrangig immobilen Bodenwasserbereich<sup>2</sup>

Diese Entscheidung hat grundlegenden Einfluss auf die in der Bodenwasserprobe enthaltene Stoffkonzentration. In Abbildung 4.1.2 wird dies für Nitrat verdeutlicht. Das Beispiel wurde aus (LUCKNER, NITSCHKE, EICHHORN, 1992) entnommen und zeigt, dass mit zunehmenden

dem Entnahmedruck auch die Nitratkonzentration in der Bodenwasserprobe steigt. Es wird davon ausgegangen, dass mit zunehmenden Entnahmedruck zunehmend mehr immobiles Bodenwasser beprobt wird, dass höhere Gleichgewichtskonzentrationen aufweist als das mobile Bodenwasser (Sickerwasser) bei längeren Grundwasserneubildungsereignissen.

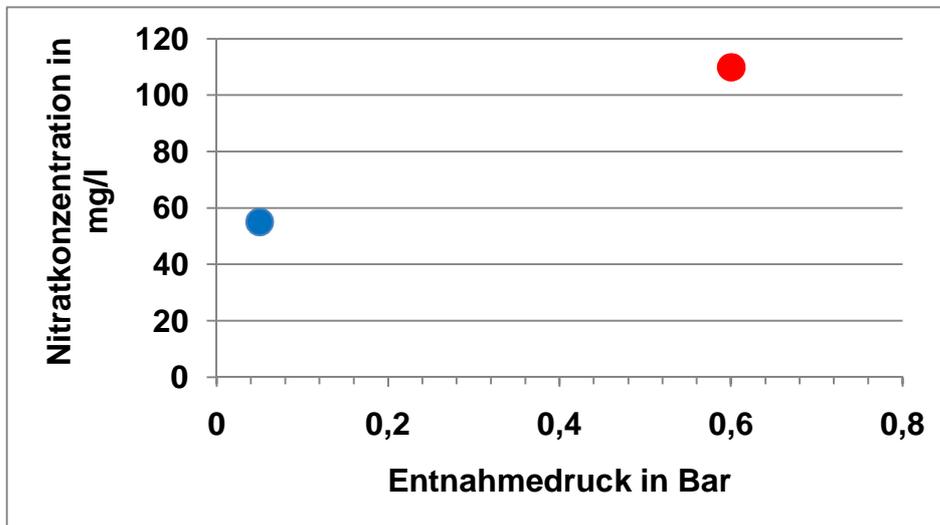


Abb. 4.1.2: Darstellung der Abhängigkeit der in einer Bodenwasserprobe analysierten Stoffkonzentration vom Entnahmedruck am Beispiel des Nitrates (LUCKNER, NITSCHKE, EICHHORN, 1992)

Mit einer kapillardruckgesteuerten Bodenwasserprobennahme<sup>2</sup> ist es möglich, bei der Probennahme auch die Bindungsform des Wassers im Boden zu berücksichtigen.

Diese Aufgabe kann z.B. dadurch gelöst werden, dass insbesondere während der Probenahme der Druckverlauf in einem Tensiometer, das außerhalb des Einflussbereiches des Bodenwassersammlers (Saugkerzensystem) installiert wurde, gemessen und dieser Druck im Vergleich zu dem im Sammelbehälter gemessenen Druck ausgewertet wird. Durch dieses Verfahren kann die entnommene Probe eindeutig einer bestimmten Bindungsform des Wassers im Boden zugeordnet werden bzw. wird gesichert, dass die Probe nur aus dem gewünschten Bodenwasserbereich entnommen wird. Dies soll an einem Ausführungsbeispiel verdeutlicht werden.

Die schematisiert dargestellten Abbildungen zeigen:

- Abb. 4.1.3: ein Druck-Zeit-Diagramm für einen geschlossenen Bodenwassersammler, bei dem der Entnahmedruck nur einmalig mit einem Druck a angelegt wurde. Dadurch werden nur Bodenwasserproben entnommen, die dem mobilen Sickerwasser entsprechen.
- Abb. 4.1.4 ein Druck-Zeit-Diagramm für einen offenen Bodenwassersammler, bei dem der geplante Entnahmedruck ständig angelegt wird und nur dann eine Bodenwasserprobe entnommen wird, wenn der mittels Tensiometer gemessene Druck zwischen a und b liegt. Dies erfolgt durch Steuerung des Entnahmedrucks. Beide in den Abbildungen dargestellten Varianten erfordern Bodenwassersammler, wie in Abb. 3.3 und 3.4 dargestellt.

<sup>2</sup> Patentschrift DD 294 616 A7 „Verfahren zur Steuerung bzw. Regelung der Fluidprobennahme“

In den Abbildungen 4.1.3 und 4.1.4 zeigen die Kurven (1) den zeitlichen Verlauf des Drucks im Sammelbehälter und die Kurven (2) den im Tensiometer gemessenen Druckverlauf. Die Entnahmephasen sind mit „EP“ gekennzeichnet. In Abb. 4.1.1 ist eine übliche Saugspannungssättigungskurve mit dem Wassergehalt ( $w$ ), dem Restwassergehalt ( $w_r$ ), dem relativen Druck ( $p_{rel.}$ ), dem Lufteintrittspunkt „a“ (der Grenze zwischen strömender und nichtströmender Fluidphase) und einem Punkt „b“, der oberhalb des Dampfdrucks und unterhalb von „a“ liegt, dargestellt. Zwischen „a“ und „b“ wird die nichtströmende Fluidphase mit einem Wassergehalt oberhalb des Restwassergehalts erfasst.

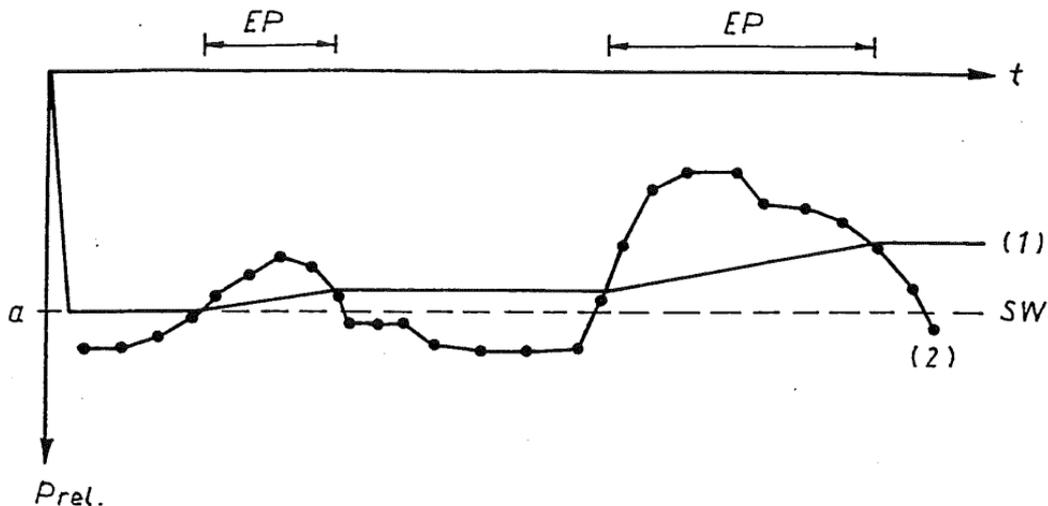


Abb. 4.1.3: Schematisiert dargestelltes Druck-Zeit-Diagramm für einen geschlossenen Bodensammler, bei dem der Entnahmedruck nur einmalig angelegt wurde; „Kurve 1“ zeigt den zeitlichen Verlauf des Drucks im Sammelbehältern und die „Kurve 2“ den im Tensiometer gemessenen Druckverlauf. Die Entnahmephasen sind mit „EP“ gekennzeichnet<sup>3</sup>

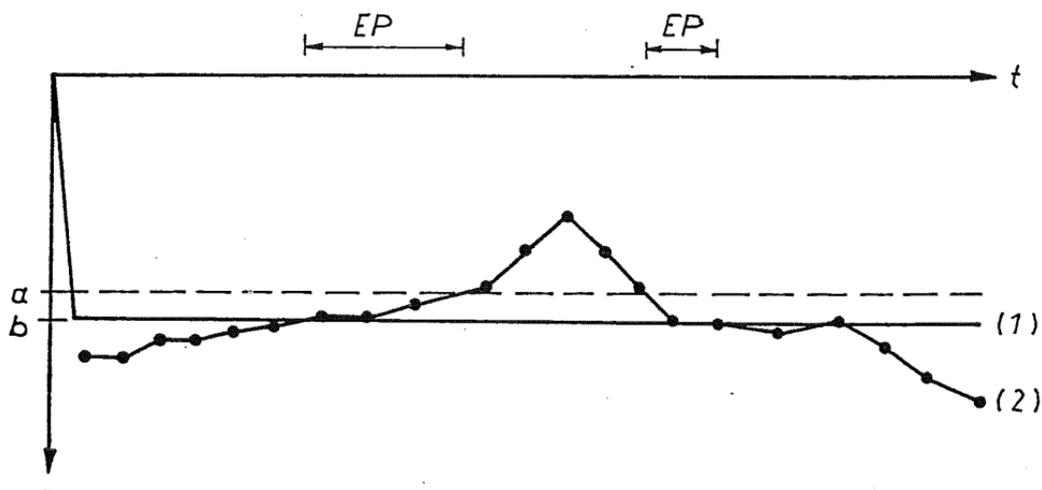


Abb. 4.1.4: Schematisiert dargestelltes Druck-Zeit-Diagramm für einen offenen Bodensammler, bei dem der geplante Entnahmedruck ständig angelegt wird und nur dann eine Bodenwasserprobe entnommen wird, wenn der mittels Tensiometer gemessene Druck zwischen „a“ und „b“ liegt, „Kurve 1“ den zeitlichen Verlauf des Drucks im Sammelbehältern und die

<sup>3</sup> s. Patentschrift DD 294 616 A7

„Kurve 2“ den im Tensiometer gemessenen Druckverlauf. Die Entnahmephasen sind mit „EP“ gekennzeichnet<sup>3</sup>

Die sich aus einer kapillardruckgesteuerten und ungesteuerten Bodenwasserprobennahme ergebenden Konzentrationsunterschiede werden in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt (LUCKNER u.a., 1989). In dem Beispiel wird ein vertikal eingebautes Sickerwasserprobennahmesystem (SGM) mit einem horizontal installierten Sickerwasserprobennahmesystem (Messschacht) verglichen, deren Keramikkerzen in den gleichen Teufen installiert wurden. Verwendet wurde bei beiden Probennahmesystemen Keramikkerzen der Fa. Soilmoisture Equipment Corp. Typ High Flow mit einem Außendurchmesser von ca. 50 mm, einer Länge von ca. 60 mm, einer Wandungstärke von ca. 2,5 mm und einem Lufteintrittspunkt von ca. 1 Bar. Die Probennahmen erfolgten unterhalb eines Rieselfeldes, das mit Klarwasser betrieben wurde.

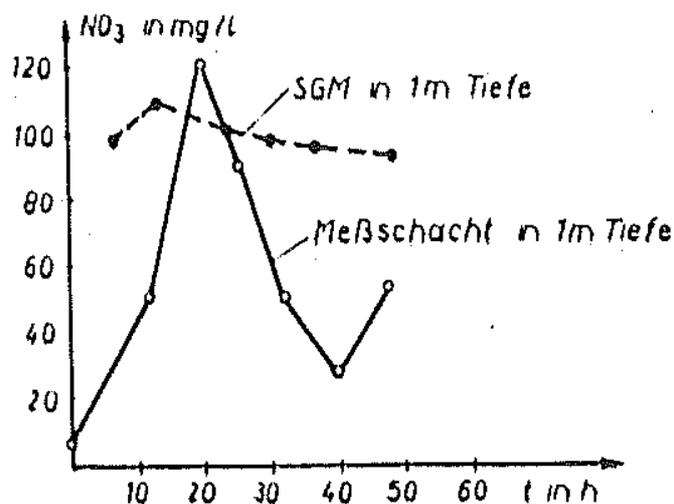


Abb. 4.1.5: Vergleich der in den Bodenwasserproben analysierten Nitratkonzentrationen als Funktion der Zeit zwischen dem horizontal installierten und kapillardruckgesteuert betriebenen Bodenwassersammler (Messschacht) mit einem vertikal installierten und ungesteuert betriebenen Bodenwassersammler (SGM) (LUCKNER u.a., 1989)

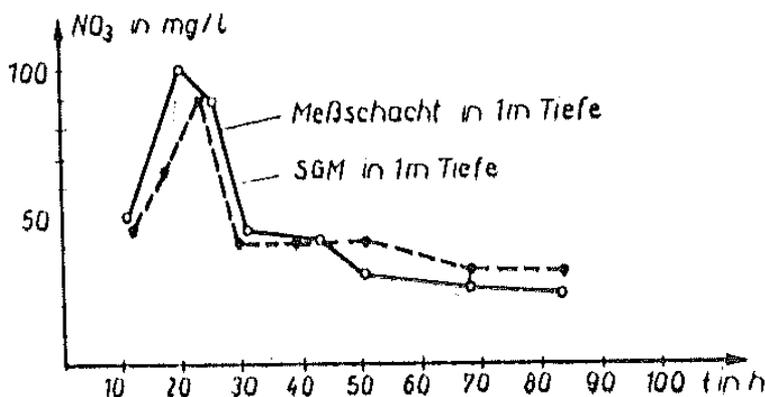


Abb. 4.1.6: Vergleich der in den Bodenwasserproben analysierten Nitratkonzentrationen als Funktion der Zeit zwischen dem horizontal installierten und kapillardruckgesteuert betriebenen Bo-

**denwassersammler (Messschacht) mit einem vertikal installierten und ebenfalls kapillardruckgesteuert betriebenen Bodenwassersammler (SGM) (LUCKNER u.a., 1989)**

Aus dem Vergleich der beiden Abbildungen wird sowohl der Einfluss der kapillardruckgesteuerten Bodenwasserprobennahme auf die in der Wasserprobe analysierten Stoffkonzentration als auch die Vergleichbarkeit der mittels horizontal und vertikal installierten Bodenwassersammelsystemen erzielbaren Ergebnisse deutlich. Damit wird nachdrücklich die Bedeutung des Einsatzes der Kapillardruck gesteuerten Bodenwasserprobennahme für eine Erzielung belastbarer und repräsentativer Bodenwasserüberwachungsdaten, wie sie vor allem im Rahmen der Sickerwasserprognose erforderlich ist, untersetzt.

## 4.2 Aufschlussverfahren

Generell können folgende Aufschlussverfahren für die Saugsondeninstallation angewendet werden:

- Stechbohrung (Durchmesser der Bohrung sollte maximal 2 mm größer sein als der Kerzenschaftdurchmesser)
- Schürfe (zum horizontalen Einbau), evtl. durch Spundwände gestützt
- Rammkernsondierung (bei gefügelosen Böden unbegrenzt einsetzbar, bei kompressiblen Böden dagegen maximal 1 m tief, danach sollte das Stechbohrverfahren angewendet werden)
- Horizontalbohrverfahren (bedingt durch die starke Störung des Bodengefüges sollte es nur in Ausnahmefällen angewendet werden).

## 4.3 Bohrlochgeometrie

In der ASTM D 4696-92 erfolgen verschiedene Literaturangaben zur Dimensionierung des Bohrlochdurchmessers. Nach U.S. EPA ist der Bohrlochdurchmesser maximal 5 cm größer als der Durchmesser der Saugsonde zu wählen. Eine andere genannte Literaturquelle gibt einen höchstens 8 cm größeren Durchmesser zum erleichterten Einbringen des Quarzmehls an. Der Wirkungsradius des Probenehmers wird durch einen minimal größeren Bohrlochdurchmesser sowie die Anwendung von Quarzmehl vergrößert.

## 4.4 Einschlämmen und Abdichtung (ASTM D 4696-92)

### 4.4.1 ASTM D 4696-92

Der Einbau von Probenehmern erfolgt mit der so genannten Quarzmehl-Tonerde-Methode. Dabei wird Quarzmehl in das Bohrloch in schlammigem Zustand um das poröse Kerzenteil verfüllt. Die Zusammensetzung der pastösen Masse entspricht etwa 450 g Quarzmehl auf 150 ml destilliertes Wasser.

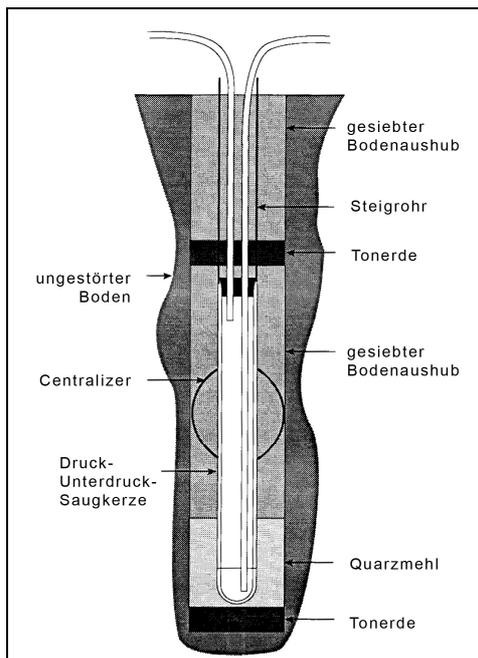


Abb. 4.1: Einschlämmen und Abdichtung (ASTM 2000)

Auch kann ein Einbau in gefrorenem Zustand erfolgen, wodurch keine Fehler durch Verschleppungen von Bodenbestandteilen auftreten. Die Mächtigkeit des Quarzmehls sollte bis 30 cm über den porösen Kerzenteil reichen. Für die Mächtigkeit der Tonerde werden 15 cm angegeben.

Um Schrumpfungs- und Quellungsprozessen vorzubeugen ist es möglich, Tonerde im Verhältnis von 1:9 mit Feinsand zu mischen. Über der Tonerde lagert gesiebter Bodenaushub, der gemäß den gegebenen Standortbedingungen verdichtet wird. Für flache Installationen reicht gesiebter Bodenschlamm aus.

Der in der Abbildung dargestellte Centralizer dient der exakten Ausrichtung in Bohrlochmitte, die Steigrohre schützen die Förder- und Druckleitungen und sichern eine exakte Platzierung des Probenehmers.

#### 4.4.2 Merkblatt Montanhydrologisches Monitoring (LMBV, 2007)

Die Entscheidung, ob ein Einschlämmen notwendig ist hängt von den jeweiligen Bodenbedingungen und der jeweiligen Bodenbeschaffenheit ab. Die Anwendung von Quarzmehlsuspension (allochtones Material) kann unter Umständen den pH-Wert der Bodenlösung beeinflussen und folglich zur Mobilisierung von Stoffen (problematisch bei Schwermetallen) führen. Um eine möglichst gute hydraulische Anbindung zu gewährleisten, muss besondere Sorgfalt beim Bohrvorgang angewendet werden, sodass der entstehende Spalt zwischen Boden und Saugkerze so gering ist, dass er beim Einsetzen der Saugkerze mit überschüssigem Einschlammmaterial automatisch verfüllt/geschlossen wird.

Wenn kein Einschlammmaterial erforderlich ist, kann mit etwas zugegebenem Wasser in der Bohrung der hydraulische Kontakt zwischen Kerze und Bohrloch hergestellt werden. Für den Einsatz von autochtonem Bohrmaterial wird eine Korngröße  $\leq 2$  mm empfohlen.

#### 4.5 Einbautiefe

Die Installationstiefe der Saugsonde richtet sich nach dem Untersuchungszweck. Es ist empfehlenswert, Saugsonden in verschiedenen Tiefen einzubauen, um z.B. eine Aussage über Sickerfronten treffen zu können.

Dabei ist auf einen genügend großen Abstand zu achten, um auch bei einer notwendigen Erhöhung des Unterdrucks Überlagerungseffekte zu vermeiden.

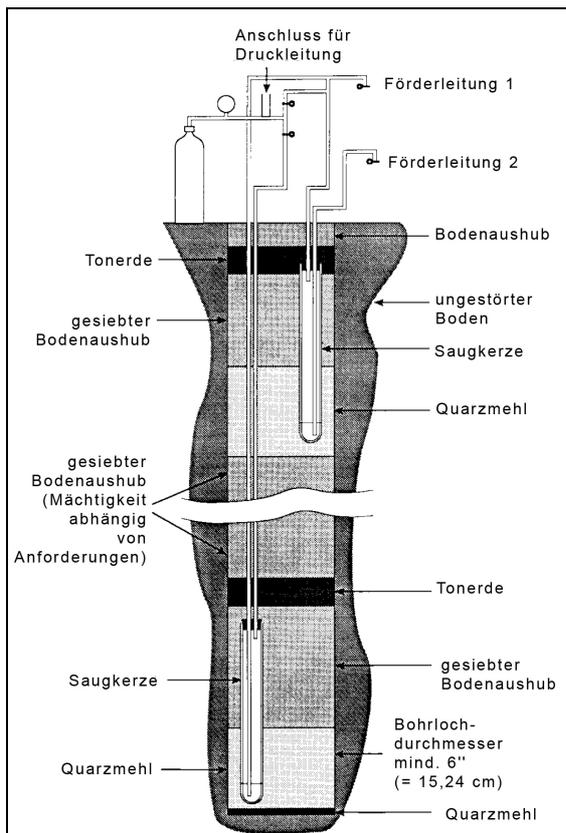


Abb. 4.2: Einbau mehrerer Saugsonden (ASTM 2000)

#### 4.6 Betriebsaufnahme

Die Betriebsaufnahme von Saugsondenanlagen sollte nicht unter 4 Wochen nach dem Einbau erfolgen. Zuvor sind ein Probetrieb und das Verwerfen der gewonnenen Bodenlösung nötig. In der amerikanischen Norm wird ein Zeitraum von bis zu einem Jahr angegeben (ASTM 2000).

#### 4.7 Auswahl der Betriebsart

Für Langzeitprojekte, repräsentative Bodenwasserproben und zur Abschätzung von Sickerfrachten werden Saugsondenanlagen kontinuierlich betrieben. Dazu ist eine ständig wirksame Saugspannung über eine konstant haltende Unterdruckeinheit oder ein kapillardruckgesteuertes Unterdrucksystem anzulegen (LMBV, 2007).

Ein diskontinuierlicher Betrieb bietet sich für Messungen mit geringem Probewasserbedarf und zur Bestimmung diskreter Sickerwasserkonzentrationen, sowie Untersuchungen am Pfad Boden-Pflanze an (DVWK 1990).

Die U.S. EPA schlägt eine Probennahme nach Niederschlagsereignissen vor, da diese Zeiträume durch hohe Bodenwassergehalte gezeichnet sind und der Boden mehr Schadstoffe austrägt (ASTM 2000).

In Tab. 4.1 sind Vor- und Nachteile des kontinuierlichen und diskontinuierlichen Betriebs zusammengefasst.

Tab. 4.1: Vor- und Nachteile des kontinuierlichen/diskontinuierlichen Betriebes von Saugsondenanlagen (DVWK 1990)

	<b>kontinuierlicher Betrieb</b>	<b>diskontinuierlicher Betrieb</b>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• große Zeitintervalle erfassbar</li> <li>• vollständige Erfassung durchlaufender Sickerfronten</li> <li>• ständige Durchströmung des Kerzenmaterials</li> <li>• geringe Unterdrücke (keine Zeitvorgabe der Probenahme)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bodenwasserhaushalt kaum gestört</li> <li>• geringer Wartungs- und Messaufwand</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• personalintensiv durch häufige Probenahme</li> <li>• lange Verweilzeit des Probewassers im Auffangbehälter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe Sorptionsprozesse an Kerze und Schlauchmaterialien, da keine ständige Durchströmung</li> <li>• kurzfristige Ereignisse, z.B. Starkregen, nicht erfassbar</li> </ul>

#### 4.8 Qualitätssicherung

Um etwaigen Verfälschungen der Probenbeschaffenheit entgegen zu wirken, sollten die mit dem Bodenwasser in Verbindung geratenen Materialien chemisch inert sowie beständig gegenüber physikalische Einwirkungen sein.

Schlauchmaterialien können oberirdisch durch Hüllrohre gegen Verbiss geschützt werden. Bei Erfordernis, z.B. durch Quetschgefahr aufgrund eines hohen Skelettanteils im Boden ist ein Einsatz von Hüllrohren auch unterirdisch empfehlenswert.

Der Schutz von Probesammelbehältern vor Lichteinfall ist nur bei langwierigen Probennahmen und Probennahmen organischer Verbindungen notwendig.

Die Bohrverfahren sind so anzuwenden, dass keine Materialverschleppung in den Untergrund erfolgt. Hierzu ist es angebracht, humosen Oberboden abzutragen, wenn die Beprobung im Unterboden stattfindet. Bei nicht standfesten Böden kann ein Schutzrohr einem Zusammenfall entgegenwirken. Auch das Einbringen von Einschlämmmaterial sowie der Saugsonde selbst muss so durchgeführt werden, dass eine Verschleppung von Bodenmaterial auszuschließen ist.

Ein Test der hydraulischen Anbindung der Kerzen an das Bodenmaterial sollte ebenfalls erfolgen.

### 5 Anwendungsgrenzen

Saugsonden sind einsetzbar für qualitative Analysen, jedoch nicht für quantitative Untersuchungen. Die chemischen Verhältnisse der Bodenlösung sind zudem abhängig vom Proben-

nahmeort, der Probennahmdauer und dem Probennahmzeitraum, sodass ein Vergleich zwischen verschiedenen Bodenwasserproben schwierig ist (ASTM 2000).

Saugsonden sind zur Gewinnung von Bodenwasserproben mit einer Stoffkonzentration von mehr als 1 mg/l gut einsetzbar. In Spurenbereichen sind sie nur bedingt anwendbar. Sie liefern gleichfalls nur punktbezogene Ergebnisse, da sich der Probennahmebereich wenige Zentimeter um die Kerze befindet (LUA 2004).

Aufgrund von pH gesteuerten Ad- und Desorptionsprozessen der Saugsondenmaterialien kann es zu Ergebnisverfälschungen in der Analytik kommen. Daher ist eine von der Zielstellung abhängige Materialauswahl nötig.

Ein Einsatz von Saugsonden bei der Gewinnung PAK und MKW haltiger Bodenwässer ist laut eigenen Untersuchungen nur bedingt möglich.

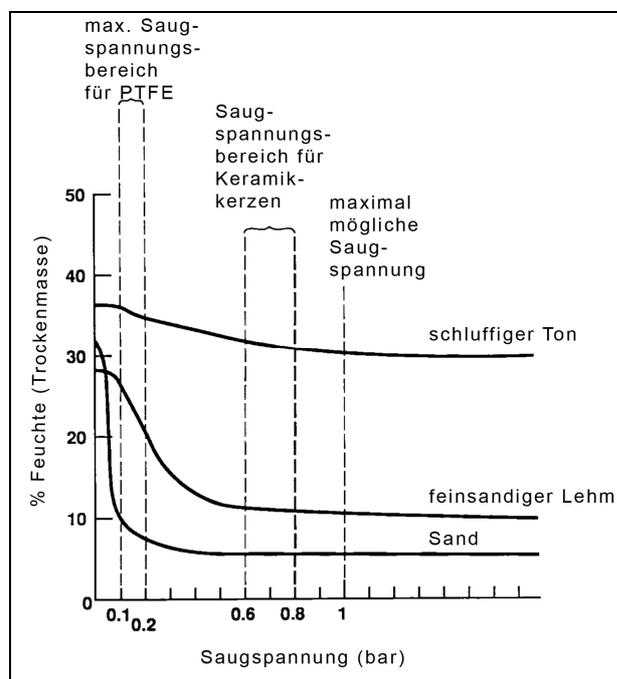


Abb. 5.1: Saugspannungsbereich (ASTM 2000)

Das zu erhaltende Bodenwasservolumen hängt maßgeblich von der Korngrößenverteilung des Bodens, der angelegten Saugspannung, dem Bodenwassergehalt, der Verteilung des Bodenwassers, der Bodenstruktur und dem Alter des porösen Werkstückes ab. Steigende Saugspannungen bei austrocknenden Böden bewirken sinkende Durchlässigkeitskoeffizienten, sodass die Fließrate des Bodenwassers geringer wird.

Die hydraulischen Eigenschaften des Bodens können einen limitierenden Faktor bei der Probennahme darstellen, wenn die Saugspannungen bei Grobböden 0,6 bar und bei Feinböden 0,8 bar übersteigen. In diesen Druckbereichen sind die Fließraten nahezu null. Die Saugsonde (z.B. Saugkerzentyp: PTFE) kann bei Lufteintrittspunkten kleiner 0,6 bar den limitierenden Faktor darstellen, da die Bodenwasserspannung oft höher ist. Abb. 5.1 zeigt zudem die Anwendungsgrenzen einzelner Kerzentypen, die sich am jeweiligen Lufteintrittspunkt orientieren.

Der Einsatz von Saugsonden in Böden mit stark lateraler Wasserbewegung ist unzuverlässig.

## **6 Erforderliche bzw. zweckmäßige Verfahrenskombinationen in Abhängigkeit der Zielstellung**

Im Allgemeinen kann die Auswahl der Saugsondenanlagen und ihrer Installation unter anderem anhand folgender Kriterien eingeschränkt werden (ASTM 2000):

- a) Beprobungstiefe
- b) Probenvolumen
- c) chemische und biologische Eigenschaften des Sickerwassers
- d) Bodeneigenschaften
- e) Sickerwasserregime
- f) Haltbarkeit und Zuverlässigkeit der Materialien
- g) Installationsanforderungen und Kosten

## 7 Fehlerquellen

### 7.1 Systembedingte Fehlerquellen

Tab. 7.1: Systembedingte Fehlerquellen

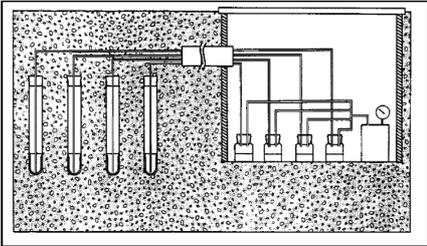
Fehlerquelle	Folge	Evtl. Gegenmaßnahme
Klebermaterial	Veränderungen des Bodenwassers durch Kontakt möglich	Schraubverbindungen oder verkeilte Saugkerzen nutzen
Filtereffekt (Screening) der Kerze in Abhängigkeit der Porenweite	Rückhalt von Kolloiden und Makromolekülen (FeOH, Huminstoffe, org. Spurenstoffe)	Auswahl geeigneter Kerzenmaterialien, höhere Durchflussraten
Unterdruck	Entgasung von leicht flüchtigen Stoffen im Bodenwasser in Abhängigkeit des Dampfdruckes	Zwei-Kammer-Saugkerze (Förderung durch Überdruck), Förderung mittels hängender Wassersäule (horizontaler Einbau), Nutzung flexibler Kunststofftaschen statt Glasflaschen, die sich beim Sammeln der Probe ausdehnen
Unterdruck	Einfluss auf Sickerwasserkonzentration, da unterschiedliche Wasserbindungsformen entnommen werden (Gravitations- oder Kapillarwasser)	
Materialwechselwirkungen zwischen Saugkerze und Bodenwasser	Analyseverfälschungen durch Ausfällungen aufgrund: Änderung der Redoxspannung und Änderung des pH-Wertes (bis zu 0,28 bzw. 0,44 pH-Stufen durch Freisetzung von CO <sub>2</sub> )	Redoxmilieu konstant durch vorheriges Spülen mit Stickstoff, pH-Änderungen bei langen Probenahmezeiträumen unbedeutend
Clogging/ Ausfällungen/ mikrobieller Bewuchs der Kerze	Porenraumverringering des porösen Materials abh. durch Boden, Kerzenmaterial, Saugspannung, Alter	säubern (Material abhängig), austauschen, Spülen mit destilliertem Wasser und 30 min bei 0,34 bar auspressen, Verwendung von Quarzmehl (Filterwirkung)
Freisetzungen von Bestandteilen des porösen Kerzenmaterials	Verfälschungen der Analyseergebnisse	spezifische Auswahl der Kerzenmaterialien für jede Fragestellung

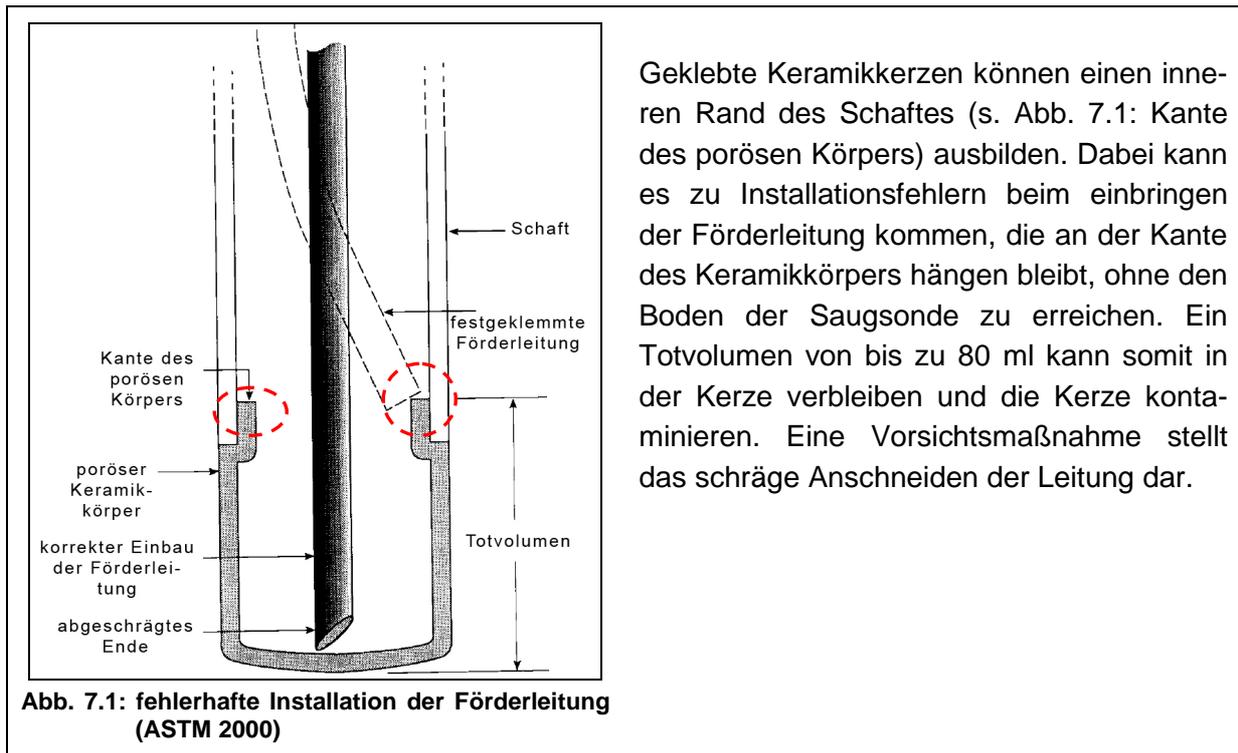
Die ASTM D 4696-92 beschreibt eine Apparatur gegen den Verlust leichtflüchtiger organischer Verbindungen nach WOOD et al.. An den Schaft ist eine Spülkammer angeschlossen, in der ein Abscheider aus Harz installiert ist. An diesem binden sich während der Probenahme leicht flüchtige Stoffe und können gesondert entnommen werden.

Ein weiterer, System bedingter Fehler ist der hydraulische Einfluss der Saugsonden auf den Bodenwasserhaushalt. Dieser orientiert sich an der Bodenstruktur und Bodensaugspannung und beträgt je nach Kerzengröße bei Grobböden bis zu 10 cm und bei Feinböden bis zu 90 cm. WARRICK und AMOOZEGEAR-FARD entwickelten ein analytisches Gleichungssystem zum Abschätzen des beeinflussten Radius durch verschiedene Saugspannungen, während NARASIMHAN und DRIESS ein numerisches Verfahren zur Simulation der Einflüsse einer Saugsonde auf den Bodenwasserhaushalt konstruierten (ASTM 2000).

## 7.2 Handhabungsbedingte Fehlerquellen

Tab. 7.2: Handhabungsbedingte Fehlerquellen

Fehlerquelle	Folge	Evtl. Gegenmaßnahme
Installation von Saugkerzenanlagen	Gefügeänderungen, dadurch Verdichtung von Aggregatzwischenräumen und Röhrensystemen, Verschmieren von Tonbelägen	schräger Einbau der Saugkerzen
lange Probenahmezeiten	Änderung der Beschaffenheit durch mikrobielle Prozesse, keine Vergleichbarkeit der Ergebnisse	vor Temperaturänderungen und Lichteinfall schützen (z.B. durch abgedeckte Erdmulde), um mikrobielle Tätigkeit zu minimieren, ggf. andere Verfahren anwenden
Lagerung ohne Schutz vor Temperaturänderungen oder Lichteinfall	Beschaffenheitsänderungen des Bodenwassers	Lagerung in einer Erdmulde  Quelle: DVWK 1990
unzureichender Schutz der Leitungen	Leckagen durch Frost, beim Einbau, durch Fraß von Nagetieren	Komplettreinigung, Leitungen zuklemmen (kein Eindringen von Insekten), Witterungsschutz



Geklebte Keramikkerzen können einen inneren Rand des Schaftes (s. Abb. 7.1: Kante des porösen Körpers) ausbilden. Dabei kann es zu Installationsfehlern beim einbringen der Förderleitung kommen, die an der Kante des Keramikkörpers hängen bleibt, ohne den Boden der Saugsonde zu erreichen. Ein Totvolumen von bis zu 80 ml kann somit in der Kerze verbleiben und die Kerze kontaminieren. Eine Vorsichtsmaßnahme stellt das schräge Anschneiden der Leitung dar.

## 8 Qualitätskontrolle

### 8.1 Vorbereitung der Saugsonden vor dem Einbau

Zur Beseitigung der Stoffabgabe aus den Kerzenmaterialien sollten neue Saugsonden, oder Saugsonden, die kurz nach der Installation in Betrieb gehen sollen durch Ansaugen mehrerer Liter entionisierten Wassers gespült werden.

Gemäß ASTM D 4696-92 ist der poröse Kerzenteil zu Beginn der Feldinstallation etwa 30 Minuten in destilliertes Wasser zu legen, um eine Sättigung zu gewährleisten.

Bei der Durchführung eines Probetriebes erfolgt ein Testlauf mit dem Verwerfen der Bodenlösungen (in-situ-Konditionierung) zur Absättigung der Sorptionsplätze am Kerzenmaterial. In begründeten Ausnahmefällen ist eine ex-situ-Konditionierung möglich. Hierzu wird bei erwarteten Konzentrationen unter 1 mg/l die Kerze mit Lösungen bekannter Konzentrationen gespült, um Auskunft über die Sorptionseigenschaften des Materials zu erhalten. Eigene Untersuchungen zeigen jedoch, dass dieses Verfahren besser kontrollierbar ist. Hierfür sollte Wasser aus einer oberflächennahen Grundwassermessstelle verwendet werden.

Weiterhin wird auf die Ausführungen in Abschnitt 4.1 verwiesen.

## 8.2 Prüfung der Tauglichkeit vor dem Einsatz

In dem LMBV-Merkblatt (2007) ist die Eignungsbewertung der Bodenwassermessstelle wie folgt vorzunehmen:

### 8.2.1 Äußere Zustandsüberprüfung

- a) Kontrolle des Abschlusses des Schutzrohres zur Geländeoberfläche
- b) Kontrolle auf Deformationen des Schutzrohres
- c) Kontrolle auf Abweichung von der Lotrechten
- d) Prüfung der Kappe auf Fehlen oder Undichtigkeit
- e) Kontrolle der Zugängigkeit der Messstelle
- f) Kontrolle auf Ablagerungen um die Messstelle

### 8.2.2 Innere Zustandsüberprüfung

Bei der inneren Zustandsüberprüfung wird der anliegende Unterdruck gemessen (ggf. Werte des Datenloggers nutzen). Sollte dieser von der anliegenden Unterdruckeinheit abweichen ist das System zu entlüften und neu zu prüfen.

### 8.2.3 Dichtheitstest (LD-Test)

Bei der Überprüfung der Dichtheit des Gesamtsystems wird dieses mit Deionat gefüllt und nach einer Stunde mittels Schutzgas entleert. Im Gesamtsystem wird mit Schutzgas ein Druck, der etwa die Hälfte des Lufteintrittspunktes entspricht, eingestellt und das System dann verschlossen. Der Dichtheitstest ist positiv, wenn der Druckabfall nach 24 Stunden kleiner als 10 % des Ausgangsdruckes beträgt.

### 8.2.4 Reinigungsverfahren nach DVWK-Merkblatt 217

Vor dem Einbau sollten in noch nicht in Betrieb gewesene Kerzen circa 100 ml Salzsäure ( $c = 1 \text{ mol/l}$ ) angesaugt werden. Danach ist die Kerze mit destilliertem Wasser chloridfrei zu spülen. Herstellungsbedingte Fremdsbstanzen in Kunststoffkerzen können mit verdünnter Salzsäure ( $c = 0,1 \text{ mol}$ ) und anschließend mit destilliertem Wasser gespült werden.

### 8.2.5 Reinigungsverfahren nach ASTM D 4696-92

In der amerikanischen Norm ist das Reinigungsverfahren an den verwendeten Kerzentyp anzupassen.

Für **Keramik-Saugsonden** empfehlen NEARY und TOMASSINI das Spülen der Kerze mit HCl ( $8 \text{ N} = 26 \text{ Masse-\%}$ ) und anschließend mit destilliertem Wasser solange, bis die elektrische Leitfähigkeit des aus der Kerze abfließenden Wassers maximal 2% vom reinfließenden Wasser abweicht. In DEBYLE ET AL. wird das Ansaugen einer Lösung nach dem Spülen mit HCl vorgeschlagen, die der Zusammensetzung des Bodenwassers ähnlich ist, sodass eine erste Adsorption von Ionen bis zur Absättigung der Keramik erfolgt. Alternativ wird das erste

Probennahmenvolumen verworfen. Problematisch bei der Verwendung von HCl ist jedoch die Korrosionsgefahr der Ventile.

Bei **Fritteglas** geben CORNING LABORATORIES das Spülen mit heißer HCl und danach mit destilliertem Wasser an.

Für **PTFE-Kerzen** empfiehlt TIMCO das Ansaugen von 0,5 l destillierten Wassers sowie anschließend folgenden Bädern in I.P.A (Isopropanol) und Wasserstoffperoxid, oder dem Spülen der Kerze mit HCl. Zur Reinigung wird die Kerze mit destilliertem Wasser durchspült. Der Autor gibt zudem an, dass die Anwendung von Salzsäure nicht bei Probennahme in Mülldeponien geeignet ist, da dort vorkommendes Methan sich mit Chloriden zu Di- oder Trichlormethanen verbindet.

**Probennehmer aus Celluloseacetatfasern** sollten laut STEVENSON mit Silbernitrat und Natriumchlorid gegen Biofilmwachstum behandelt werden.

**Für Probennehmer mit Membranfilter** ist gemäß MORRISON das Spülen mit destilliertem Wasser ausreichend.

## 8.2.6 Eigene Anmerkungen

Nach Angaben eines Herstellers von Edelstahlsaugkerzen sind diese in der Regel nicht vorbehandelt sondern lediglich mit einer Labordetergenz und destilliertem Wasser gespült. Für weitere Reinigungsschritte wird Alkohol empfohlen, wobei das Durchsaugen von 50 ml ausreichend ist. Bei erwünschter Passivierung der Saugkerze wird wie folgt vorgegangen. Das Spülen erfolgt durch Ansaugen mit Unterdruck.

- a) Spülen mit 100 ml Reinigungslösung (Labordetergenz und destilliertes Wasser)
- b) Spülen mit 100 ml destilliertem Wasser
- c) Spülen mit 50 ml 30%-iger Salpetersäure
- d) Spülen mit 100 ml destilliertem Wasser
- e) Spülen mit 50 ml Methanol

## 8.3 Behandlung von Bodenwasserproben

### 8.3.1 LMBV-Merkblatt (2007)

Die Entnahme der Bodenwasserproben sollte zur Vermeidung von Veränderungen der chemischen Beschaffenheit unter Druckgas (Schutzgas) oder dem Shuttleprinzip erfolgen (vgl. Kap. 3.3.3).

Die gekühlte Probe ist gasblasenfrei über eine Durchflussmesszelle abzufüllen. Dabei sollte eine Messung der Temperatur, des pH-Wertes, der elektrischen Leitfähigkeit und des Sauerstoffgehaltes erfolgen. Zudem muss der Schlauch nach jeder Probennahme erneuert werden.

Das gewonnene Bodenwasser ist in vorgekühlte Kunststoff- oder Glasflaschen abzufüllen. Eine anschließende Filtration ergibt sich aus der prozessbezogenen Bewertung stattgefundenen Veränderungen während der Entnahmezeit (z.B. Fällungsprozesse).

Die Proben sollten am Probennahmetag ins Labor gegeben werden.

### 8.3.2 DVWK-Merkblatt 217

Vor-Ort sind möglichst pH-Wert, Sauerstoffgehalt, elektrische Leitfähigkeit und Säurekapazität ( $\text{HCO}_3$ ) zu bestimmen. Konservierungsmaßnahmen wie Kühlen oder Einfrieren sowie Vorbehandlungen mit chemischen Zusätzen oder Filtration wirken einer Beschaffenheitsänderung des Bodenwassers entgegen. Die Kühlung bei + 4°C verursacht dabei die geringsten Änderungen. Durch eine Filtration ändert sich unter Umständen die Konzentration der Parameter, falls sie an Bodenteilchen adsorbiert sind. Zudem sind Oxidationsprozesse und Ausfällungen nicht auszuschließen.

Zur Abschätzung eventueller Kontaminationen müssen begleitende Untersuchungen durchgeführt werden. Diese umfassen unter anderem Standort- und Profiluntersuchungen, die Erfassung der Klimadaten und die Sickerwassermenge.

**Daten zum Standort:** Nutzungsart, Düngung, Nähr- und Schadstoffentzüge durch Pflanzen, Immissionsdaten

**Daten zum Profil:** Bodenkundliche Kartierung, Bodenkundliche Karten, in Abhängigkeit der Zielstellung auch bodenphysikalische, bodenchemische und bodenbiologische Untersuchungen.

Ergänzend dazu sind eine kontinuierliche Niederschlags-, Temperatur- sowie Grundwasserstandsmessung (Kontrollmessstelle) zu empfehlen.

### 8.3.3 Luftdurchtrittspunkt

In der amerikanischen Norm ASTM D 4696-92 wird der Lufteintrittspunkt durch Absättigen des porösen Körpers durch das Eintauchen in Wasser und dem Durchdrücken von Luft ermittelt. Der Druck, bei dem Luftblasen im Wasser aufsteigen ist der Lufteintrittspunkt und gibt die maximale Saugspannung vor, die zur Probennahme angelegt werden kann.

## 8.4 Beispiele zur Protokollierung der Ergebnisse

Tab. 8.1: Vorschlag für Betriebsprotokoll Saugsondenmessplatz (nach DVWK 1990)

Projekt:	<b>Betriebsprotokoll</b>	
Jahr:	Saugsondenmessplatz	
Name der Messstelle:		Koordinaten: RW: HW:
Kerzenmaterial: Vorbehandlung:		Betriebsweise: kontinuierlich

Sondentiefe:				diskontinuierlich
	<b>Messergebnisse</b>			
	1. Unters.	2. Unters.	3. Unters.	usw.
Beprobungsbeginn				
Unterdruck (bar)				
Probennahme				
Entnahmemenge (cm <sup>3</sup> )				
klim. Wasserbilanz N – V (mm)				
Messungen vor Ort (pH, O <sub>2</sub> , Lf, Säurekap.)				
Messungen im Labor				

Tab. 8.2: Vorschlag zur Beschreibung eines Saugsondenmessplatzes (nach DVWK 1990)

Datum	Beschreibung
Bearbeiter	Saugsondenmessplatz
Lage der Entnahmestelle (Ort, Straße, etc.): TK25 Nr.: - Koordinaten Rechtswert: - Bezeichnung der Messstelle:	Hochwert: Bodenkarten:
<b>I. Allgemeine Kenndaten:</b>	
Datum des Einbaus:  Kerzenmaterial: Größe der Kerze: Schlauchmaterial:	Messzeitraum Beginn: Ende:  Porendurchmesser ( $\mu\text{m}$ ): Schlauchlänge (m):
Einbautiefe (cm): Anzahl der Sonden pro Einbautiefe:	Sondenlage (z.B. horizontal):
<b>II. Bodenkennwerte:</b>	
Bodenart in Einbautiefe: Überlagernde Bodenhorizonte: Bodentyp: eff. Durchwurzelungstiefe (dm): nutzbare Feldkapazität (mm/dm): gesättigte Wasserleitfähigkeit (m/s): Humusanteil (%):	Bodenhorizont:   nach Verfahren: nach Verfahren: Kalkgehalt (%): pH ( $\text{CaCl}_2$ ):
<b>III. Mittlerer GW-Stand (m) unter Gelände:</b>	
<b>IV. Bodennutzung:</b>	
<b>V. Düngung und Düngungstermine:</b>	

## 9 Empfehlungen aus eigenen Forschungsarbeiten

In den Jahren 2005 bis 2007 wurden durch das Landesumweltamt Brandenburg Untersuchung zum Einsatz von Saugkerzen an einem durch MKW, MTBE und BTEX kontaminierten Standort durchgeführt.

Zum Einsatz kamen Keramik- und Siliciumkarbid-Saugkerzen mit Ein-Kammer- und Zwei-Kammer-Bauweise und in Kombination mit Tensiometer-, Regenmesser-, Bodenfeuchteaufzeichnungen und Bodenluftuntersuchungen. Die Beprobung wurde kontinuierlich und diskontinuierlich vorgenommen. Im Folgenden sollen die wesentlichen Erkenntnisse des Projektes zusammenfassend dargestellt werden.

1. Bodensickerwasserproben sind repräsentativ, wenn zu einem definierten Zeitpunkt aus einem definierten Volumenelement die in-situ-Verhältnisse des Entnahmeraumes hinsichtlich der Milieukennwerte, der Konzentration und Verteilung von Inhaltsstoffen und der physikalischen/chemischen/biologischen Eigenschaften wiedergespiegelt werden.

Dazu sind folgende Anforderungen zu erfüllen:

- a) Die Probennahme und Prognose sollte auf einem hydrogeologischen Modell basieren. Eine dafür erforderliche detaillierte Standorterkundung umfasst den Aufbau der Versickerungszone, die lithologischen, petrophysikalischen und geochemischen Eigenschaften der Bodenhorizonte und Schichtfolgen (Neigung), ihrer Ausbreitung und Oberflächenmorphologie.
- b) Eine modellgestützte Prognose (z.B. Festlegen von Erwartungswerten) dient der Planung von Lage und Abstand der Saugsonden zueinander sowie der Festlegung von entsprechenden Beprobungshorizonten.
- c) Für standortkonkrete Sickerwasserprognosen sind laborativ bestimmte pF-Kurven angetroffener Schichten, insbesondere der kontaminierten Bereiche unerlässlich.
- d) Des Weiteren sind wichtige Randbedingungen wie Temperatur, Strahlungsverhältnisse, Niederschlagsmenge/-verteilung, möglichst als konkrete Messungen an Ort und Stelle, zur Abschätzung der Infiltrationsraten zu ermitteln.
- e) Der Feuchtetransport in einem Bodenprofil ist abhängig vom Grundwasserstand, sodass die Erfassung der entsprechenden Grundwasserstandsganglinie eine weitere Randbedingung zur Standortcharakterisierung darstellt.
- f) Bei der Überwachung der Versickerungszone sind möglichst alle Phasen im Boden zu beproben (Feststoffphase, Bodenwasser, Bodenluft).
- g) Die Überwachung sollte zudem alle wesentlichen Horizonte und Schichten der Versickerungszone umfassen.
- h) Zusätzlich durchgeführte laborative Prozessuntersuchungen (LfULG, 2004) sind von grundlegender Bedeutung für das Prozessverständnis am Untersuchungsstandort.
- i) Vor dem Feldeinsatz bzw. Einbau in den Boden sollten die Saugkerzen mit kontaminiertem Bodenwasser zur Absättigung der Sorptionsplätze am Kerzenmaterial gespült werden.

- j) Die Herstellerangaben bezüglich maximaler Porengrößen von Kerzenkörpern beruhen vorwiegend auf der Berechnung ermittelter Lufteintrittspunkte. Vor dem Feldversuch sollte demzufolge die genaue Ermittlung dieses Parameters erfolgen.

2. Weitere unabdingbare Anforderungen zur Qualitätssicherung sind:

- a) Die Bestätigung der Messwerte durch Laboruntersuchungen.
- b) Ein kapillardruckgesteuerter Betrieb der Saugkerzen zur Gewährleistung gleicher Probennahmebedingungen.

3. Der in Kapitel 3.2 diskutierte Unterschied der Saugkerzenmaterialien bezüglich des Verhaltens gegenüber zu analysierenden Schadstoffen, konnte während der Versuche in den untersuchten Konzentrationsbereichen nicht bestätigt werden. Die Einflüsse der genutzten Bodenwassersammlertypen (Systeme) sind größer als die des Kerzenmaterials.

Dabei stellte sich heraus, dass der Einsatz vertikal installierter Ein-Kammer-Saugkerzen zu drastischen Verlusten bei den Analyseergebnissen von MKW und BTEX führte. Zweikammer-Saugkerzen lieferten dagegen plausible, den Laborwerten entsprechende, Analyseergebnisse.

Zudem sind vertikal installierte Ein-Kammer-Bodenwassersammler für die Probennahme ungeeignet, da durch Wasseransammlungen im Bereich der Bodenoberfläche erhebliche Druckunterschiede entstehen können, die zur Ausgasung und damit verbundenen Veränderungen der Milieubedingungen führen.

4. Siliciumkarbidkerzen erweisen sich im Vergleich zu anderen untersuchten Kerzenmaterialien unter Beachtung des analysierten Schadstoffspektrums am Untersuchungsstandort als ein für den Einsatz an MKW kontaminierten Standorten geeignetes Material. Dies ergibt sich unter anderem durch die hohe Stabilität, den hohen Lufteintrittspunkt, die niedrige spezifische Oberfläche und die sehr homogene Porenstruktur des Materials.

## 10 Literatur

ASTM D 4696-92 (2000): Standard guide for pore-liquid sampling from the vadose zone, American Society for Testing and Materials.

BERGER, W.; KALBE, U. (2004): Saugsonden zur Untersuchung der Bodenwasserbeschaffenheit: Ein Überblick der Einsatzmöglichkeiten, in: TerraTech 11-12/2004, S. 8 – 12.

DVWK (1990): DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E.V.: Gewinnung von Bodenwasserproben mit Hilfe der Saugkerzen-Methode, DVWK-Merkblatt 217, Verlag Paul Parey, Hamburg.

LUCKNER, L., NITSCHKE, C., EICHHORN, D. (1992): Das SGM-System, eine neue Technik und Technologie zur Boden- und Grundwasserüberwachung in Deutschland; Die Geowissenschaften, 10. Jahrgang, 1992/ Nr.2.

LUCKNER, L., NESTLER, W., NITSCHKE, C., ALTMANN, H.-J., ROHRBACH, L. (1989): Teufenge-rechte Wasserdruckmessung und repräsentative Wasserprobennahme mit neuer Technik; bbr 5/ 1989.

LMBV (2007): LAUSITZER UND MITTELDEUTSCHE BERGBAU- UND VERWALTUNGSGESELLSCHAFT MBH: Merkblatt Montanhydrologisches Monitoring in der LMBV mbH, 30.11.2007.

LUA (2004): LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG: Altlastenbearbeitung im Land Brandenburg: Nationale und internationale Sachstandsrecherche: Praxiserprobte und innovative Direkt/in-situ Probennahmeverfahren für Grund-, Sickerwasser und Bodenluft im Rahmen der Altlastenbearbeitung, Fachinformation des Landesumweltamtes Band 4.

LfULG (2004): SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE: Materialienband zur Altlastenbehandlung: "Laborative Untersuchungen zur Sickerwasserprognose im Rahmen der Detailerkundung".

JENN, F.; KAST, G.; MICHEL, R.; NITSCHKE, C.; VOIGT, H.-J. (2007): Vergleichende Analyse von Beprobungsverfahren zur Bewertung des Stofftransportes in der Versickerungszone, Endbericht 2007.

UP (Umweltanalytische Produkte) GmbH: Einbauanleitung von Edelstahl-saugkerzen, schriftliche Mitteilung vom 25.11.2008.

WÜRCK, S. (2007): Laboruntersuchungen zur Praxistauglichkeit von Saugkerzen für Sickerwasserprobennahmen, Diplomarbeit an der TU Cottbus.

# **Anhang 2.2**

Rechercheergebnis  
Bodenwasserprobennahme (QSM)

**Themenbezogene Fundstellen**  
(allgemeine Fragestellungen)



Qualitätssicherungsmaßnahmen bei innovativen direkten/indirekten Probennahmeverfahren

Nomen- klatur	Quellenbezeichnung lang	Jahr	Sonderverfahren													
			PN mittels gasdichtem System						internationale PN-Verfahren							
			Verfahrens- grundlagen, -prinzipien, -skizzen	Anwen- dungs- gebiete	Anwen- dungs- grenzen	Entwick- lungs-/ Er- fahrungs- stand	Erforderliche/ zweck- mäßige Verfahrensko- mbination	Fehler- quellen	QS	Verfahrens- grundlagen, -prinzipien, -skizzen	Anwen- dungs- gebiete	Anwen- dungs- grenzen	Entwick- lungs-/ Er- fahrungs- stand	Erforderliche/ zweck- mäßige Verfahrensko- mbination	Fehler- quellen	QS
/1/	ASTM (American Society for Testing and Materials) D 4696-92: Standard guide for pore-liquid sampling from the vadose zone	2000								S. 3, S. 5-11	S. 2	S. 2, S. 14 - 19	S. 2 -3, S. 11	S. 10,	S. 9-11, S. 15 - 17	
/2/	Berger, W.; Kalbe, U.: Saugsonden zur Untersuchung der Bodenwasserbeschaffenheit: Ein Überblick der Einsatzmöglichkeiten, in: TerraTech 11-12-2004, S. 8 - 12	2004														
/4/	DVVWK-Merkblatt 217: Gewinnung von Bodenwasserproben mit Hilfe der Saugkerzen-Methode	1990														
/5/	Landesumweltamt Brandenburg: Altlastenbearbeitung in Brandenburg: Nationale und Internationale Sachstandsrecherche: Praxiserprobte und innovative Direkt/in-situ Probenahmeverfahren für Grund-, Sickerwasser und Bodenluft im Rahmen der Altlastenbearbeitung, Fachinformation des LUA Band 4	2004														
/6/	LMBV (2007): Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau- und Verwaltungsgesellschaft mbH: Merkblatt Montanhydrologisches Monitoring in der LMBV mbH, 30.11.2007															
/7/	Jenn, F.; Kast, G.; Michel, R.; Nitsche, C.; Voigt, H.-J.: Innovative Direkt/in-situ-Probenahmeverfahren für Grund- und Sickerwasser, Schadstoffphase und Bodenluft - Feldversuch/Gleichwertigkeitsbetrachtung	2007														
/8/	Würrck, S.: Laboruntersuchungen zur Praxistauglichkeit von Saugkerzen für die Sickerwasserprobenahmen	2007														

Erläuterung:

"QS" ..... Qualitätssicherung; "PN" ..... Probennahme

## **Anhang 2.3**

Rechercheergebnis  
Bodenwasserprobennahme (QSM)

**Themenbezogene Detailübersicht**

Qualitätssicherungsmaßnahmen bei innovativen direkten/indirekten Probennahmeverfahren

Planung	allgemein	Festlegung der Beprobungsziele	/2/ S. 9-11, /4/ S. 4-6, /5/ S. 44, S. 50, /7/ S. 108-109: Planung der Anordnung der Sonden, Einbautiefe, Messfeldgröße, Standorterkundung, Beprobungsziel (punktueller Ergebnis oder Stoffbilanz), Messzeitraum (Stichprobe oder Zeitintervall)
	konkret	Wahl der Art der Probenahmegeräte, -behälter	/1/ S. 2, /2/ S. 8, /4/ S. 2, /5/ S. 10-12, S. 47-48: Wahl abhängig von Beprobungstiefe, Probenahmezeitraum, Standortbedingungen des Bodens (pF-Wert) und dementsprechend anzulegenden Unterdruck zur Vermeidung von chemischen Veränderungen der Analyselösung (Ausgasen, chemische Reaktionen)
		Wahl der Materialien der Probenahmegeräte, -behälter	/1/ S. 2, /2/ S. 8-12, /4/ S. 2-3, /5/ S. 43-44: Material sollte chemisch und biologisch inert sein, keine Wechselwirkungen mit der Analyselösung eingehen und geringe Sorptions- und Extraktionseffekte aufweisen
Durchführung	Vorbereitung der Probenahme	Kalibrierung	/1/ S. 8-9, /4/ S. 1-3, /4/ S. 45, /7/ S. 108-109: Reinigung und Konditionierung der Kerzen vor dem erstmaligen Einsatz zur Entfernung herstellungsbedingter Verschmutzungen, Prüfung physikalischer Parameter (Totvolumen, Lufteintrittspunkt, hydraulische Durchlässigkeit)
		Anwendungsvorgaben	/1/ S. 10-11, /4/ S. 3, /5/ S. 46: das Einschlämmen der Kerze zur Verbesserung der hydraulischen Anbindung ist sinnvoll
	Durchführung der Probenahme	Entnahme der Proben	/1/ S. 3-7, /4/ S. 4-5, /5/ S. 10-11, S. 47-50, /6/ S. 34-35: Probenförderung mittels Unterdruck, oder kombiniertem Unter- und Überdruckverfahren, Probenahme in Einkammer- und Zweikammersystemen, druckbedingte Änderung der chemischen Verhältnisse der Analyselösung vermeiden
		Probenvorbehandlung/ -konservierung	/4/ S. 6, /6/ S. 35 : Filtration bzw. parameterspezifischer Zusatz von Chemikalien, Verweis auf DIN EN ISO 5667-3
	Probennahme-Folge-maßnahmen	Vor-Ort-Analytik	/4/ S. 6, /7/ S. 108-109: pH-Wert, Sauerstoffgehalt, elektrische Leitfähigkeit, Säurekapazität, Temperatur, Strahlungsverhältnisse, NS-Menge/-verteilung
		Probentransport/ -lagerung	/4/ S. 6, Kühlen (4-8°C) / Einfrieren, vor Sonnenlicht schützen, Verweis auf DIN EN ISO 5667-3
	Dekontamination der Geräte	/5/ S. 47: materialspezifische Reinigungsverfahren	
Auswertung / Dokumentation	Dokumentation (Protokollierung diverser Randbedingungen, ...)	/4/ S. 11-12 Vorschläge für Übergabeprotokolle (Beschreibung allgemeiner Kenndaten, Bodenkennwerte, Grundwasserstand, Standortbedingungen, Probennahmedaten)	
Fehlerquellen	Systembedingt	/1/ S. 14, /2/ S. 9-12, /5/ S. 11, S. 43-44, S. 47-49, Druck bedingte Änderung der Bodenwasserbeschaffenheit (pH-Wert, Entgasung), Materialbedingte Sorptions- oder Filterprozesse und Analyseverfälschungen, hydraulischer Einfluss auf Bodenwasserhaushalt	
	Handlungsbedingt	/1/ S. 9-11, /2/ S. 9-12, /4/ S. 1-4 /5/ S. 11, falscher Zusammenbau der Kerzen, lange Probenahmezeiträume (Änderung der Bodenwasserbeschaffenheit durch mikrobiologische Prozesse), Gefügeänderungen im Boden durch Installation (Verschmieren), Analyseverfälschungen durch falsche Reinigung der Materialien, falschen Materialeinsatz, falsche Lagerung / Transport / Behandlung	