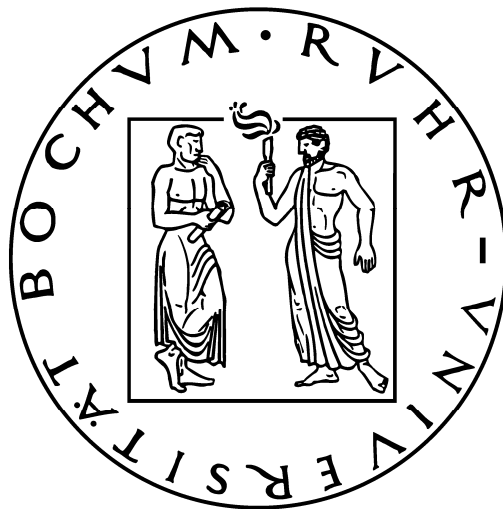


**Gefügebildung und Langzeitbeständigkeit alternativer  
mineralischer Oberflächenabdichtungen von  
Abfalldeponien**



**Dissertation zur Erlangung des Grades eines  
Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)  
an der Fakultät für Geowissenschaften  
der Ruhr-Universität Bochum**

**vorgelegt im Mai 2009**

**Diplom-Geograph Sebastian Kiewitt  
aus Dortmund**

<b>Erstgutachter</b>	<b>Herr Prof. Dr. Harald Zepp</b>
<b>Zweitgutachter</b>	<b>Herr Prof. Dr. Stefan Wohnlich</b>
<b>Fachfremder Gutachter</b>	<b>Herr Prof. Dr. Detlev K. Richter</b>
<b>Tag der Disputation</b>	<b>21.07.2009</b>

## Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen.....	IV
Verzeichnis der Abbildungen.....	V
Verzeichnis der Tabellen.....	VIII
1 Einleitung und Zielsetzung.....	1
2 Untersuchungsgebiet und Versuchsaufbau.....	5
2.1 Lage des Untersuchungsgebietes.....	5
2.2 Aufbau alternatives Oberflächenabdichtungssystem Castrop–Rauxel.....	5
3 Funktionalität und Untersuchung alternativer mineralischer Oberflächenabdichtungen.....	12
3.1 Einflussfaktoren und Prozesse.....	12
3.2 Ausgewählte Untersuchungsverfahren zur Ermittlung der Dichtwirkung.....	17
4 Methoden.....	24
4.1 Feldarbeiten.....	24
4.2 Labormethoden.....	27
4.2.1 Probengewinnung und Bezeichnung.....	27
4.2.2 CT-Untersuchung.....	31
4.2.3 Computertomographische Untersuchung von Böden.....	32
4.2.4 Bestimmung des Bodenwassergehaltes.....	34
4.2.5 Herstellung von Dünnschliffpräparaten.....	37
4.2.6 Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes ( $k_f$ ), der Porensysteme und der Verdichtung von Oberflächenabdichtungssystemen.....	37
4.2.7 Isotopengeochemische Untersuchungen.....	38
4.2.7.1 Beprobung laterale Abflüsse.....	40
4.2.7.2 Beprobung Betonwannenabflüsse.....	40
4.2.7.3 Belastbarkeit der ermittelten $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte.....	40
4.2.7.4 Isotopengeochemische Analytik.....	41
4.2.7.5 Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP).....	41
5 Ergebnisse.....	43
5.1 Computertomographische Untersuchungen.....	43
5.1.1 „Zylinder A“ aus Schurf 2a (150-160 cm u. GOK).....	43
5.1.2 „Zylinder B“ aus Schurf 2a (150-160 cm u. GOK).....	47
5.1.3 „Zylinder C“ aus Schurf 2a (160-170 cm u. GOK).....	50
5.1.4 „Zylinder D“ aus Schurf 2a (185-195 cm u. GOK).....	52

5.1.5	„Zylinder E“ aus Schurf 2a (195-205 cm u. GOK) .....	54
5.1.6	„Zylinder M“ aus Schurf 2b (180-190 cm u. GOK) .....	56
5.1.7	„Zylinder S“ aus Schurf 2b (25-35 cm u. GOK) .....	58
5.2	Gravimetrische Bodenwassergehalte .....	60
5.3	Dünnschliffmikroskopie .....	62
5.3.1	Übersichtsdarstellungen Dünnschliffe .....	62
5.3.2	Einordnung der mineralischen Bestandteile .....	64
5.3.3	Einfluss der Verdichtung auf die Gefügestruktur .....	67
5.4	Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ ) .....	68
5.5	Isotopengeochemische Untersuchungen .....	71
5.5.1	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte .....	71
5.5.2	Vergleich der für Castrop-Rauxel ermittelten $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte mit Zeitreihen der IAEA .....	73
5.5.3	Temperaturabhängige Ausprägung der Isotopenverhältnisse .....	76
5.5.4	Lateraler Abfluss .....	78
5.5.5	Betonwannenabfluss .....	79
5.5.6	Beziehungen von Niederschlag, lateralem Abfluss und Betonwannenabfluss .....	80
6	Diskussion .....	96
7	Zusammenfassung .....	99

## Verzeichnis der Abkürzungen

### Abkürzungen im Text

Abb.	Abbildung
ca.	circa
cm	Zentimeter
DepV	Deponieverordnung
epL	einfach polarisiertes Licht
Gl.	Gleichung
GOK	Geländeoberkante
HU	Hounsfield-Unit (Hounsfield-Einheit)
Kap.	Kapitel
ki	Ergänzung durch den Autor
kvS	kontrolliert verdichtete Schicht
kV	Kilovolt (Einheit elektrische Spannung)
LANUV NRW	Landesamt für Natur-, Umwelt- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
LUA NRW	Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen
m	Meter
mm	Millimeter
mA	Milliampere (Einheit elektrische Stromstärke)
n	Stichprobengröße
RKS	Rekultivierungsschicht
s	Sekunde
s.	siehe
SHJ-T	hydrologisches Sommerhalbjahr; tägliche Probenahme
SHJ-W	hydrologisches Sommerhalbjahr; wöchentliche Probenahme
Tab.	Tabelle
TASi	Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen
vgl.	vergleiche
WHJ-T	hydrologisches Winterhalbjahr; tägliche Probenahme
WHJ-W	hydrologisches Winterhalbjahr; wöchentliche Probenahme
°C	Grad Celsius
µm	Mikrometer
π	Kreiszahl Pi = 3,1514...
ρ	Massendichte Rho [kg m <sup>-3</sup> ]



**Verzeichnis der Abbildungen**

Abb. 1.1	Regelaufbau nach TASI.....	2
Abb. 2.1	Lage der Zentraldeponie Castrop-Rauxel (Ausschnittvergrößerung) (Landesvermessungsamt NRW; verändert).....	5
Abb. 2.2	Aufbau der Oberflächenabdichtung, schematisch .....	6
Abb. 2.3	Betonwannen (Einbau 1998; Foto Kadelka, BFUB).....	7
Abb. 2.4	Kippzähler „Betonwanne“ mit Auffangflasche .....	7
Abb. 2.5	Folienlysimeter mit überstehender Folie .....	8
Abb. 2.6	Kippzähler Folienlysimeter.....	8
Abb. 2.7	Lage der Versuchsflächen auf der Zentraldeponie Castrop-Rauxel; Aufsicht; schematisch (ZEPP 2003; unveröffentlicht; verändert) .....	9
Abb. 4.1	Lage der Baggerschürfe auf der Deponie Castrop-Rauxel (Aufsicht; schematisch).....	24
Abb. 4.2	Aufgrabung Position 2b .....	24
Abb. 4.3	Schmelzkammergranulatschicht.....	25
Abb. 4.4	Skelettbestandteile Position 2b (s. Pfeile).....	26
Abb. 4.5	Dunkle Verfärbungen durch Methanoxidation an Position 2b.....	26
Abb. 4.6	Schematische Darstellung der Entnahmepunkte für die computertomographischen Untersuchungen; RKS = Rekultivierungsschicht, SKG = Schmelzkammergranulat, kvS = kontrolliert verdichtete Schichten (nummeriert).....	28
Abb. 4.7	Schematische Darstellung eines verwendeten Plexiglaszylinders mit Schneidvorsatz aus Edelstahl (Vertikalanschnitt) (vgl. Abb. 4.8).....	28
Abb. 4.8	Freipräparierte Bodensäule und Entnahmezylinder.....	29
Abb. 4.9	Schematische Darstellung der Probenentnahme.....	30
Abb. 4.10	Entnahme einer Bodenprobe (entspricht B in Abb. 4.9).....	30
Abb. 4.11	Anordnung der Entnahmestellen (Aufsicht, schematisch) .....	34
Abb. 4.12	Einschlaghülsen zur Entnahme von Bodenfeuchteproben .....	35
Abb. 4.13	Aufsicht auf die Zentraldeponie Castrop-Rauxel - Lage der Niederschlagsmessbecher Nr. 2 und Nr. 6 (Quelle: Google Maps; 22.12.2008, verändert) .....	39
Abb. 5.1	Zylinder A; -1000 bis -875 HU (Links); 2500 bis 3000 HU (Mitte); 500 bis 1000 HU (Rechts) .....	44
Abb. 5.2	Zylinder A; 2000 bis 2500 HU .....	44
Abb. 5.3	Dichte (pb) Zylinder A.....	45
Abb. 5.4	Scheibe 20; pb = 1,92 g/cm <sup>3</sup> (Links); Scheibe 62; pb = 1,77 g/cm <sup>3</sup> (Mitte); Scheibe 85; pb = 1,86 g/cm <sup>3</sup> (Rechts).....	46
Abb. 5.5	Scheibe 101; pb = 1,80 g/cm <sup>3</sup> (Links); Scheibe 120; pb = 1,82 g/cm <sup>3</sup> (Rechts) .....	46
Abb. 5.6	Zylinder B; -1000 bis -875 (Links); 2500 bis 3000 HU (Mitte); -500 bis 0 HU (Rechts) .....	47
Abb. 5.7	Zylinder B; -500 bis 500 HU (Links); 500 bis 1000 HU (Mitte); 1000 bis 1500 HU (Rechts) .....	48
Abb. 5.8	Zylinder B; 2000 bis 2500 HU .....	48
Abb. 5.9	Dichte (pb) Zylinder B.....	49
Abb. 5.10	Scheibe 27; pb = 1,91 g/cm <sup>3</sup> (Links), Scheibe 129; pb = 1,61 g/cm <sup>3</sup> (Mitte); Scheibe 145; pb = 1,71 g/cm <sup>3</sup> (Rechts) .....	49
Abb. 5.11	Zylinder C; -1000 bis -875 HU (Links); 2500 bis 3000 HU (Mitte); 500 bis 1000 HU (Rechts) .....	50
Abb. 5.12	Zylinder C; 2000 bis 2500 HU.....	51

Abb. 5.13 Dichte ( $\rho_b$ ) Zylinder C.....	51
Abb. 5.14 Scheibe 42; $\rho_b = 1,76 \text{ g/cm}^3$ (Links), Scheibe 116; $\rho_b = 1,86 \text{ g/cm}^3$ (Rechts) .....	52
Abb. 5.15 Zylinder D; -1000 bis 0 HU (Links); 2500 bis 3000 HU (Mitte); 2000 bis 2500 HU (Rechts) .....	53
Abb. 5.16 Dichte ( $\rho_b$ ) Zylinder D.....	53
Abb. 5.17 Scheibe 15; $\rho_b = 1,94 \text{ g/cm}^3$ (Links); Scheibe 115; $\rho_b = 1,90 \text{ g/cm}^3$ (Rechts) .....	54
Abb. 5.18 Zylinder E; -1000 bis -875 HU (Links); 2500 bis 3000 HU (Mitte); -500 bis 500 HU (Rechts) .....	54
Abb. 5.19 Zylinder E; 2000 bis 2500 HU .....	55
Abb. 5.20 Dichte ( $\rho_b$ ) Zylinder E.....	55
Abb. 5.21 Scheibe 80; $\rho_b = 1,85 \text{ g/cm}^3$ (Links); Scheibe 136; $\rho_b = 1,78 \text{ g/cm}^3$ (Rechts) .....	56
Abb. 5.22 Zylinder M; -1000 bis -875 HU (Links); 2500 bis 3000 HU (Rechts) .....	56
Abb. 5.23 Zylinder M; 2000 bis 2500 HU (Links); 500 bis 1000 HU (Rechts).....	57
Abb. 5.24 Dichte ( $\rho_b$ ) Zylinder M .....	57
Abb. 5.25 Scheibe 11; $\rho_b = 1,82 \text{ g/cm}^3$ (Links); Scheibe 46; $\rho_b = 1,75 \text{ g/cm}^3$ (Rechts) .....	58
Abb. 5.26 Zylinder S vor der Entnahme .....	58
Abb. 5.27 Zylinder S; -1000 bis -875 HU (Links); 2500 bis 3000 HU (Mitte); 2000 bis 2500 HU (Rechts) .....	59
Abb. 5.28 Gravimetrischer Bodenwassergehalt 2a und 2b (RUB A = Bestimmung an der Ruhr-Universität Bochum - Entnahmestelle A; RUB B = Bestimmung an der Ruhr-Universität Bochum - Entnahmestelle B; Hennig A = Bestimmung im Erdbaulabor Dr. Hennig - Entnahmestelle A; Hennig B = Bestimmung im Erdbaulabor Dr. Hennig - Entnahmestelle B) .....	60
Abb. 5.29 Schliff 1; oben; einfach polarisiertes Licht (epL) .....	63
Abb. 5.30 Schliff 2; Mitte; epL .....	63
Abb. 5.31 Schliff 3; unten; epL.....	64
Abb. 5.32 Glaukonit (Links = L); Feuerstein (Rechts = R); epL (Maßstab untere Seite - Einzelbild - ca. 0,5 mm).....	65
Abb. 5.33 Sandsteinklast (L); Tonstein mit Kohle-Detritus (Mitte = M); Kohle (R); epL (Maßstab untere Seite - Einzelbild - ca. 1 mm).....	65
Abb. 5.34 Karbonatklast; epL (Maßstab untere Seite - ca. 1 mm) .....	66
Abb. 5.35 Mikrokliner Feldspat (L), monokristalliner Quarz (M), polykristalliner Quarz (R); gekreuzte Nicols epL (Maßstab untere Seite - Einzelbild - ca. 1 mm) .....	66
Abb. 5.36 Schlacke I (L); Schlacke II (R); epL (Maßstab untere Seite - Einzelbild - ca. 0,5 mm).....	67
Abb. 5.37 Verwürgte tonreiche Partie, Pfeile markieren den Verlauf; epL (Maßstab untere Seite - ca. 0,5 mm) .....	67
Abb. 5.38 Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ -Werte) der kontrolliert verdichteten Schichten (kvS) der Deponieversuchsflächen (2a, 2b) in Castrop-Rauxel (Versuchsanlagenaufbau, schematisch) (RKS = Rekultivierungsschicht; SKG = Schmelzkammergranulat) unter Geländeoberkante (GOK) .....	68

- Abb. 5.39 Mittelwerte, Standardabweichungen und Minimal- und Maximalwerte der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Verhältnisse unterschiedlicher Entnahmestellen der Deponie Castrop-Rauxel, 2ax, 2bx = lateraler Abfluss (lateraler Abfluss); BW2 = Betonwannenabfluss 2b, BW3, BW4 = Betonwannenabfluss 2a (weitere Erklärungen der Abkürzungen im Text) 71
- Abb. 5.40  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  \*Werte der Niederschläge zum Standard von Emmerich (EM), Bad Salzuflen (BS) und Castrop-Rauxel (CR) im Vergleich (Castrop-Rauxel gewichtet nach Niederschlagshöhe, IAEA (Monatsmittelwerte 1978-2001); hydrologisches Sommerhalbjahr (SHJ); hydrologisches Winterhalbjahr (WHJ); wöchentliche, tägliche Probenahme ..... 74
- Abb. 5.41 Niederschlags- $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte Castrop-Rauxel im Vergleich zu  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Monatsmittelwerten der IAEA; Positiv- und Negativabweichungen der Standardabweichung vom Mittelwert der Monatsmischproben (pos).=positiv; neg.=negativ; BS=Bad Salzuflen, EM=Emmerich (Rhein). 75
- Abb. 5.42 Monatsmitteltemperatur (gemessen (g)) an der Wetterstation auf der Deponie Castrop-Rauxel; Vergleich berechnete (b)  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Monatsmittelwerte der Niederschläge mit gemessenen (g)  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Monatsmittelwerten..... 77
- Abb. 5.43  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte für Niederschlag, Betonwannenabfluss und lateralen Abfluss auf der Zentraldeponie Castrop-Rauxel im Zeitraum vom 30.06.05 bis 22.06.06; Polynomische Regression (3. Ordnung) der Niederschlagsisotopie (2ax, 2bx = Abfluss lateral; BW2 = Betonwanne 2b und BW3, BW4 = Betonwanne 2a) ..... 81
- Abb. 5.44 Verlauf der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte von Niederschlag und lateralen Abflüssen; Polynomische Regression (3. Ordnung) von Niederschlag und lateralen Abflüssen; Zeitliche Abfolge der Konzentrationsminima und -maxima ..... 93

## Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1.1	Deponieklassen .....	1
Tab. 2.1	Verdichtungsgrade, Proctordichte und kf-Wert der kontrolliert verdichteten Schichten (kvS) der Deponie Castrop-Rauxel (nach Zepp, H., Hennig, A. 2002, verändert) .....	11
Tab. 3.1	Porengrößen und Bodenwasser [AD-HOC-AG BODEN 2005, verändert]	14
Tab. 3.2	Anteil des Porenvolumens und der Porengrößenbereiche am Gesamtvolumen von Mineralböden (C-Gehalt bis 2%) [SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. 1998]; verändert .....	15
Tab. 4.1	Entnahmetiefen ungestörte Bodenproben .....	27
Tab. 4.2	Modifikation des $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Standards über einen Zeitraum von 31 Tagen..	41
Tab. 5.1	Arithmetisches Mittel der kf-Werte der Einzellagen der kontrolliert verdichteten Schichten 1999 [ZEPP 2000; verändert] .....	69
Tab. 5.2	Statistische Parameter für die $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Niederschläge im hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahr bei wechselndem Beprobungsintervall .....	72
Tab. 5.3	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Niederschläge der Deponie Castrop-Rauxel innerhalb und außerhalb des Vertrauensbandes der Referenzstationen..	76
Tab. 5.4	Statistische Parameter für die $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der lateralen Abflüsse.....	78
Tab. 5.5	Niederschlagssumme, lateraler Abfluss und möglicher prozentualer Anteil des Niederschlags am lateralen Abfluss an den Stationen 2ax und 2bx im Zeitraum vom 01.05.2005 bis 31.10.2006 .....	78
Tab. 5.6	Minimum und Maximum der Regressionsfunktion für Niederschläge und laterale Abflüsse (Näherungswerte).....	94
Tab. 7.1	Trockenrohdichten der kvS (1999, 2001 und 2006); (2006 CT = bestimmt mittels CT, unkorrigierter Trockenrohdichtewert CT in Klammern) .....	101

## 1 Einleitung und Zielsetzung

In der Bundesrepublik Deutschland fallen im Jahr mehrere Millionen Tonnen Abfall an. Eine zeitlich unbegrenzte Lagerung von Abfällen erfolgte bis zum 31.05.2005 auf Deponien. Nach der Novellierung der gesetzlichen Bestimmungen zur Abfallablagerung entfällt diese Möglichkeit. Seitdem dürfen nur noch vorbehandelte Abfälle auf Deponien verbracht werden. Daher wird sich die Bedeutung von Deponien für die Abfallwirtschaft und die aktuelle Abfallentsorgung in den kommenden Jahren verändern. Viele Deponien werden von der Betriebsphase in die Nachsorgephase überführt und stillgelegt. Mit der Schließung einer Abfalldeponie beginnt die letzte Phase in ihrem Lebenszyklus, die Nachsorge und der Übergang in den geologischen Kreislauf [WITT 2005]. Ein Fokus liegt zukünftig in der gesetzeskonformen Sicherung von Deponiealtstandorten im Rahmen der Nachsorge.

Nach Deponieverordnung (DepV) [BUNDESREGIERUNG 2002] unterteilt das Landesamt für Natur-, Umwelt- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV-NRW) Deponien in Klassen (<http://www.lanuv.nrw.de/abfall/deponierung/deponierung.htm>; 15.11.2007) (Tab. 1.1).

Tab. 1.1 Deponieklassen

Klasse	Nach EU- Spezifikation	Typischer Abfall
0	Inertabfälle	Unbelasteter Boden
I	Nicht gefährliche Abfälle	Bauschutt
II	Nicht gefährliche Abfälle	Siedlungsabfälle und z. T. Gewerbeabfälle
III	Gefährliche Abfälle	Sonderabfälle (oberirdische Lagerung)
IV	Gefährliche Abfälle	Sonderabfälle (Untertagelagerung)

Deponien sollen nach Deponieverordnung so beschaffen sein, dass ein dauerhafter Schutz von Boden und Grundwasser gewährleistet ist [BUNDESREGIERUNG 2002]. In der Technischen Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TASi) [BUNDESREGIERUNG 1993] ist die gesetzliche Grundlage für die Konstruktion von Oberflächenabdichtungen fixiert [HORN 2002].

Zur Sicherung von Deponien werden Oberflächen- oder Basisabdichtungen oder eine Kombination aus beiden Abdichtungstypen gewählt. Die zentrale Aufgabe z.B. von Oberflächenabdichtungen ist die langfristige Begrenzung der Infiltration von Niederschlagswasser und die nachhaltige Begrenzung von Umwelteinwirkungen der Deponie auf ein vertretbares Maß [WITT 2005].

Den Richtlinien der TASi folgend werden beispielsweise auf Deponien der Klasse I Abfälle mit sehr geringem organischen Anteil und einer sehr geringen Schadstofffreisetzung im Auslaugungsversuch abgelagert. Deponien der Klasse II weisen, im

Vergleich zu Deponien der Klasse I, Abfälle mit höherem organischem Anteil und höherer Schadstofffreisetzung im Auslaugungsversuch auf. Die Anforderungen an den Deponiestandort und die Deponieabdichtung sind entsprechend höher.

Die nachfolgend vorgestellten Untersuchungen wurden auf einer Deponie der Klasse II durchgeführt. Nach TASI sind für Deponien der Klasse II Oberflächenabdichtungen in Form einer Kombinationsdichtung verbindlich und nach den Vorschriften der Deponieverordnung (DepV) [BUNDESREGIERUNG 2002] zu erstellen. Eine Regelabdichtung besteht aus einer Ausgleichsschicht, einer Gasdrainageschicht, einer Kombinationsdichtung aus mineralischer Dichtungsschicht und Kunststoffdichtungsbahn, einer Entwässerungsschicht und einer Rekultivierungsschicht. Dieses Oberflächenabdichtungssystem ist nach TASI als „Stand der Technik“ definiert worden (Abb. 1.1).

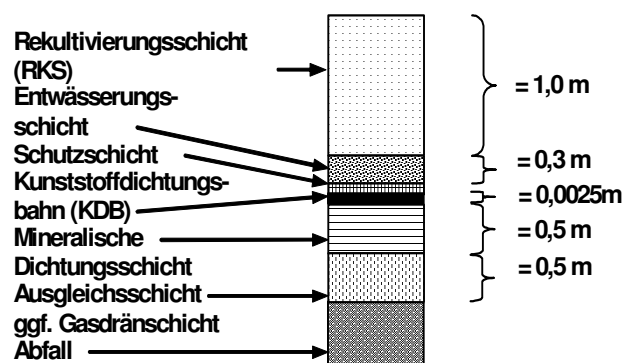


Abb. 1.1 Regelaufbau nach TASI

Die Deponieverordnung lässt neben der herkömmlichen Regelabdichtung nach TASI (1993) die Möglichkeiten alternativer Oberflächenabdichtungssysteme zu [PFEIFFER 2003]. Es können zur Konstruktionen einer Oberflächenabdichtung zum Beispiel auch mineralische Abdichtungsmaterialien genutzt werden [HORN 2002].

Alternative Abdichtungssysteme müssen sich für eine Genehmigung nach dem „Gleichwertigkeitsprinzip“ an der Regelabdichtung nach DepV orientieren. Die Funktionalität einer alternativen Oberflächenabdichtung muss durch Testreihen nachgewiesen und die Eignung als alternatives Oberflächenabdichtungssystem von einer durch den Gesetzgeber anerkannten Institutionen geprüft werden [RICHTER et al. 2001]. Systeme und Komponenten werden nach einer Eignungsbeurteilung durch eine unabhängige Institution oder andere Fachgremien zugelassen [RAMKE et al. 2007].

Die Funktionalität eines Bauteils wird durch Messungen nachgewiesen [WITT 2005]. Die Prüfung eines alternativen Oberflächenabdichtungssystems entspricht den vom Gesetzgeber für die Nachsorgephase vorgeschriebenen Untersuchungen zur Wirksamkeit der Langzeitsicherungsmaßnahmen. Der Nachweis, dass sich das Oberflächenabdichtungssystem in einem stabilen Zustand befindet, welcher durch derzeitige und künftige Nutzungen nicht beeinträchtigt werden kann, ist eine Voraussetzung für die Entlassung aus der Nachsorge.

Die Abfallentsorgungs-Gesellschaft Ruhrgebiet mbH (AGR) hat 1999 auf der Zentraldeponie in Castrop-Rauxel eine Versuchsanlage erstellt und mit einer alternativen rein mineralischen Oberflächenabdichtung versehen (s. Kap. 2). Ziel dieser Versuchsanlage ist es, technische, wissenschaftliche und wirtschaftliche Aspekte zu klären und wie von [RICHTER et al. 2001] gefordert, innovative Materialien und Systeme auf Gleichwertigkeit als Oberflächenabdichtung zu überprüfen. Diese Forderung wird auch von der BWK-Arbeitsgruppe „Restabfallbehandlung“ gestellt, welche nach einem „Ersatz der bisher in der TaSi geforderten Oberflächenkombinationsabdichtung durch geeignete Oberflächenabdichtungssysteme mit ausreichender Restdurchlässigkeit für Wasser“ [Müll und Abfall 7–2001 zitiert in REUTER et al. 2004] sucht. [MELCHIOR, S., MIEHLICH, G.1989] schlägt vor, aus gesamtgesellschaftlicher Sicht kostengünstige Systeme einzusetzen, um möglichst viele Altlasten sichern zu können. Als Alternative zur Kombinationsabdichtung könnten auch für höherwertige Deponien rein mineralische Dichtungssysteme gebaut werden [WITT, K. J., ZEH, R. 2005].

Mit der Prüfung des alternativen Oberflächenabdichtungssystems auf der Zentraldeponie in Castrop-Rauxel wurde die Ruhr-Universität Bochum beauftragt. Als Ergebnis dieser Prüfung stand im Jahr 2005 die Genehmigungsfähigkeit des mineralischen Oberflächenabdichtungssystems am Standort Castrop-Rauxel. Ein Hauptkriterium für die Genehmigungsfähigkeit war die Begrenzung der Niederschlagsinfiltration zur Sickerwasserminimierung im Müllkörper, welche in Castrop-Rauxel dauerhaft realisiert werden konnte.

Über die genaue Funktionsweise solcher Abdichtungssysteme liegen im Gegensatz zur nachgewiesenen Dichtwirkung in der Regel jedoch nur unzureichende quantitative Angaben vor [HÖTZL, H., WOHNLICH, S. 1985]. Außerdem ist die Kenntnis der physikalischen Prozesse in Dichtsystemen und deren Langzeitverhalten begrenzt [MELCHIOR, S. MIEHLICH, G. 1989]. Ziel der durchgeführten Untersuchungen war,

die dichtwirksamen Schichten detailliert zu untersuchen und Erkenntnisse über die standortspezifischen bodenphysikalischen Eigenschaften zu gewinnen. Die vorgenommenen Untersuchungen wurden nach DIN-Normverfahren durchgeführt und durch alternative Methoden ergänzt.

Eine besondere Qualität erlangt die Oberflächenabdichtung in Castrop–Rauxel durch ihre Beständigkeit. Vergleichbare funktionstüchtige Alternativabdichtungen existieren bundesweit nicht. Die Deponie Castrop–Rauxel besitzt deshalb „Modellcharakter“.



## 2 Untersuchungsgebiet und Versuchsaufbau

### 2.1 Lage des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet liegt in der Stadt Castrop-Rauxel im Bundesland Nordrhein-Westfalen. Castrop-Rauxel ist eine große kreisangehörige Stadt (Kreis Recklinghausen) im Regierungsbezirk Münster. Die Felduntersuchungen wurden auf der Zentraldeponie von Castrop–Rauxel durchgeführt, welche im Nordwesten der Stadt liegt (Abb. 2.1).

Die Deponie wird im Norden von der Pöppinghauser Straße (L645), im Süden und Osten vom Rhein-Herne Kanal (Hafen Victor) und im Westen von der Döninger Heide begrenzt. Der Gesamtstandort inklusive Wegen, dem Eingangsbereich und den Nebenlagen umfasst eine Fläche von ca. 18 ha. Ohne das Versuchsfeld und die Waldböschung am Rhein-Herne-Kanal ist der Deponiestandort ca. 16 ha groß.

Ende 1999 wurde die Betriebsphase der Deponie beendet und mit der Nachsorgephase begonnen. Auf dem Gelände betreibt die AGR (Abfallbeseitigungsgesellschaft Ruhrgebiet mbH) einen Recyclinghof im Auftrag des EUV Stadtbetriebs Castrop-Rauxel

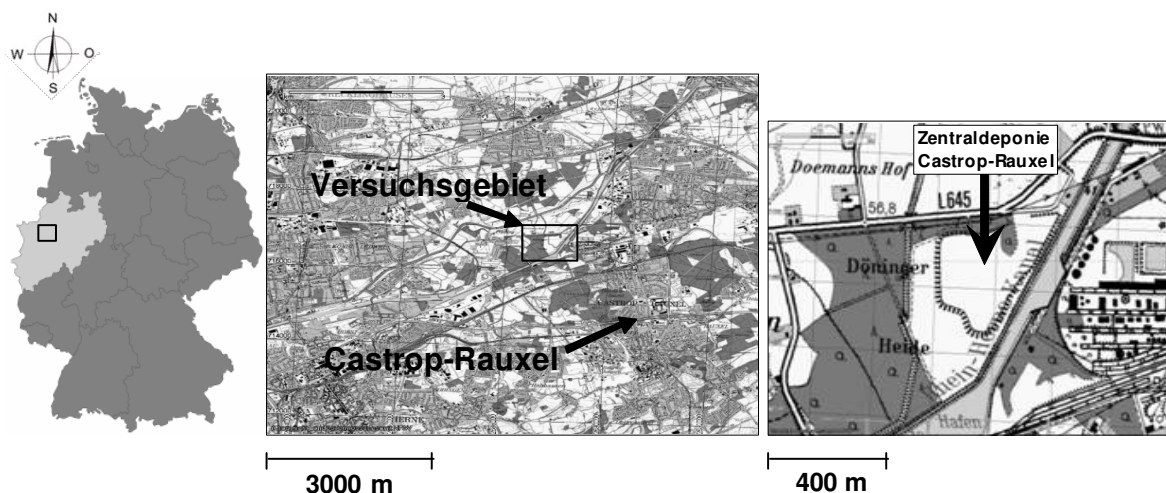


Abb. 2.1 Lage der Zentraldeponie Castrop-Rauxel (Ausschnittvergrößerung) (Landesvermessungsamt NRW; verändert)

### 2.2 Aufbau alternatives Oberflächenabdichtungssystem Castrop–Rauxel

Auf der Zentraldeponie Castrop-Rauxel wurden bis Ende 1999 Abfälle oberirdisch abgelagert. Die aufgeschichteten Abfälle bedingen, dass sich der Deponiekörper als klar abgegrenzte Erhebung mit ca. 20 m Höhenunterschied gegenüber der umgebenden planen Landschaft darstellt. 1998 wurden auf der Kuppe des Deponiekörpers mehrere Versuchsfelder zur Untersuchung eines alternativen Oberflächenabdichtungssystems installiert. Die Versuchsfelder liegen ca. 73 m über Normalnull.

Es sind zwei Anlagentypen „Betonwanne“ (2a, 2b) und „Folienlysimeter“ (2ax, 2bx)“ verwirklicht worden. Das Oberflächenabdichtungssystem besteht aus mehreren Schichten, welche nacheinander aufgetragen wurden. Das System setzt sich aus folgenden Elementen zusammen (von oben nach unten) (Abb. 2.2):

- Rekultivierungsschicht mit Gras-Krautvegetation (1,3 m),
- Schmelzkammergranulat (nur 2a, 2ax) (0,2 m),
- Kontrolliert verdichtete Schichten (kvS) (4 à 0,25 m).

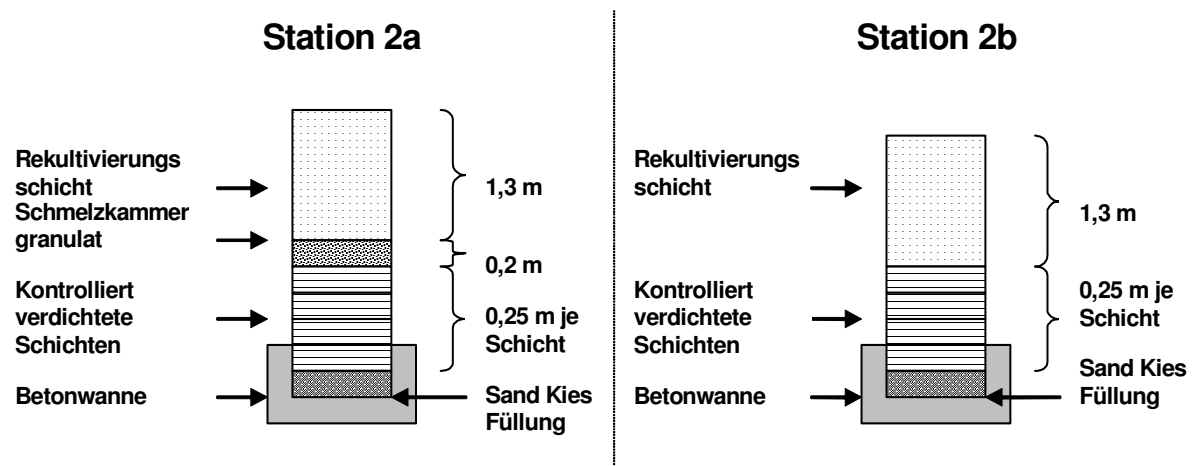


Abb. 2.2 Aufbau der Oberflächenabdichtung, schematisch

Auf den Versuchsfeldern 2b und 2bx wurde das Abdichtungssystem ohne eine Schicht Schmelzkammergranulat ausgeführt, welche auf den Versuchsfeldern 2a und 2ax die Funktion einer Flächendrainage erfüllt.

Abweichend vom Normaufbau nach der Technischen Anleitung Siedlungsabfall (TASi) (Abb. 1.1) wurde keine Kunststoffdichtbahn (KDB) in das Oberflächenabdichtungssystem eingesetzt. Die KDB wird funktional durch die kontrolliert verdichteten Schichten (kvS) aus Lößlehm ersetzt. Die kvS sind mit 1 m doppelt so mächtig wie die mineralische Dichtung von der TASi verlangt [WEISS, ZEPP 2004].

- Anlagentyp „Betonwanne“

Als Basis der Versuchsstationen 2a und 2b wurden Betonwannen aus wasserundurchlässigem Spezialbeton gebaut. Die in vier Quadranten unterteilten Betonwannen haben eine Abmessung von 10 m \* 10 m. Vor der Überlagerung durch die alternative Oberflächenabdichtung wurden die Betonwannen mit Sand und Kies gefüllt und an der Oberseite mit einem Geotextil überdeckt. Die erste, zuunterst liegende, kontrolliert verdichtete Schicht (kvS) wurde zum Teil in die Betonwannen (2a und 2b) eingebaut. (Abb. 2.3).



Abb. 2.3 Betonwannen (Einbau 1998; Foto Kadelka, BFUB)

Bodensickerwasser kann die Betonwannen nicht durchdringen. Es wird am Boden der Wannen gefasst, in einen in die Abdichtung eingelassenen Messschacht geleitet und dort von Kippzählern quantitativ (digital) erfasst.

Kippzähler (Abb. 2.4) messen den Abfluss der Betonwannen (Stationen 2a und 2b) und auf Station 2a (Schmelzkammergranulatschicht) den der Flächendrainage.

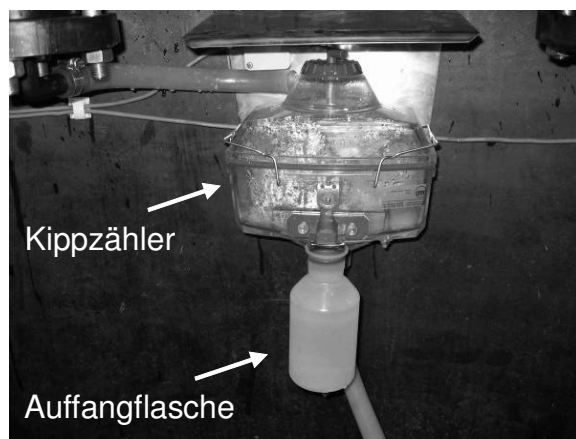
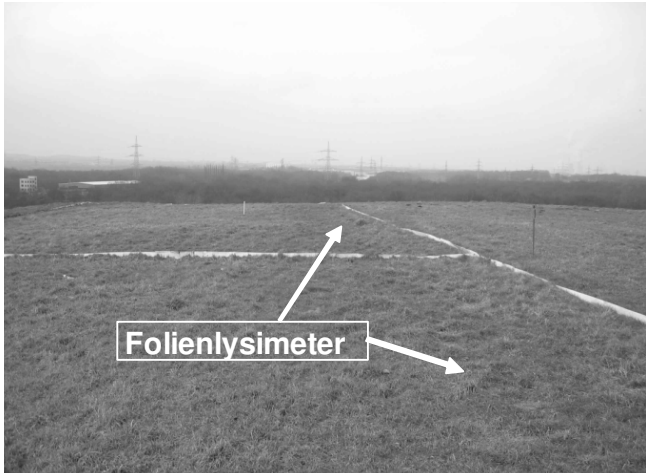


Abb. 2.4 Kippzähler „Betonwanne“ mit Auffangflasche

Es entstehen durch den modularen Aufbau je vier Abflüsse pro Wanne, die in zwei Teilströme zusammengefasst werden. Gemeinsam werden die Abflüsse der beiden rechten und linken Hälften der Betonwannen aufgefangen (2 Kippzähler je Wanne). Der Abfluss eines Kippzählers bezieht sich somit auf eine Gesamtfläche von 50 m<sup>2</sup>. Die Abflüsse „BW 1 und BW 2“ entstammen Versuchsfeld 2b und die Abflüsse „BW 3 und BW 4“ von Versuchsfeld 2a.

- Anlagentyp „Folienlysimeter“

Die „Folienlysimeter“ (2ax und 2bx) unterscheiden sich vom Anlagentyp „Betonwanne“ dadurch, dass an ihrer Basis keine Betonwannen installiert sind. Die Versuchsanlage endet an der Oberseite der kvS. Als umlaufende seitliche Begrenzung wurden wasserundurchlässige Folien aus PEHD (Polyethylen; engl. high density) vertikal in

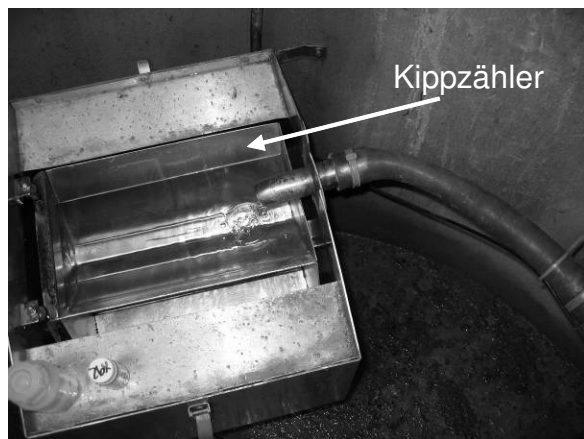


den Boden eingebracht. Sie reichen bis 10 cm in die kontrolliert verdichteten Schichten hinein und stehen an der Geländeoberfläche ca. 15 cm über. Ein Wasseraustausch mit angrenzendem Material wird durch die Folie (Abb. 2.5) unterbunden.

Abb. 2.5 Folienlysimeter mit überstehender Folie

- Kippzähler

Im Folienlysimeter wird anfallendes Bodensickerwasser lateral in eine Drainagerigole abgeleitet, in einer geschlitzten Rohrleitung gefasst und in Schächte mit Kippzählern



abgeleitet. Die Abflüsse werden zusätzlich von zwei Tauchpumpen mit Wasseruhr erfasst, wodurch selbst beim Ausfall der Kippzähler (Abb. 2.6) und Messelektronik eine quantitative Erfassung der Bodensickerwasser gewährleistet ist.

Abb. 2.6 Kippzähler Folienlysimeter

Die Kippzähler „Betonwanne“ und „Folienlysimeter“ unterscheiden sich in ihrer Bauart voneinander. Die Kippzähler vom Typ „Betonwanne“ scheiden den 10ten Teil der Bodensickerwasser zusätzlich zu einer digitalen Messdatenerfassung der Wassermenge in eine Auffangflasche ab. Die Flasche wird wöchentlich zu Kontrollzwecken ausgelitert.

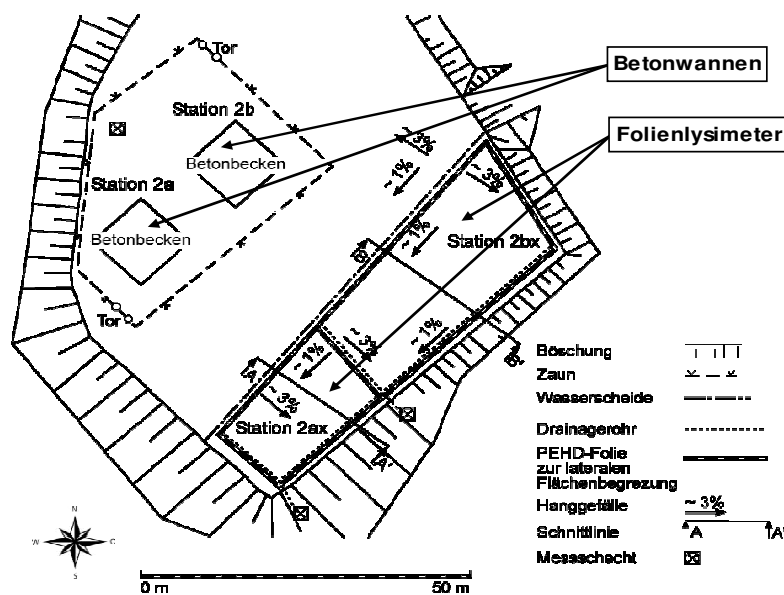
Die Kippzähler „Folienlysimeter“ erfassen die gesamte Menge an Bodensickerwasser in einer Messwanne. Drei Wannen sitzen hintereinander auf einer Welle und rotieren

nacheinander in die Auffangposition. Ist eine Wanne voll gelaufen, rotiert sie unter gleichzeitiger Entleerung des Inhalts, und die nächste Auffangwanne nimmt ihre Position ein.

- Lage der Versuchsflächen

Der Anlagentyp „Betonwanne“ liegt im nordwestlichen Teil und der Anlagentyp „Folienlysimeter“ im südöstlichen Teil der Versuchsfläche (Abb. 2.3). Die Oberfläche der Kuppe ist 3° quer und 1° längs geneigt und insgesamt als „glatt“ (Unebenheiten kleiner 10 cm) zu bezeichnen.

Während die Betonwannen eine Versuchsfläche von je 100 m<sup>2</sup> (10 m·10 m) umfassen besitzt das Folienlysimeter 2ax eine Fläche von 352 m<sup>2</sup> und das Folienlysimeter



2bx eine Fläche von 711 m<sup>2</sup>. Die Betonwannen und Folienlysimeter sind durch eine ober- und unterirdische Wasserscheide voneinander getrennt.

Abb. 2.7 Lage der Versuchsflächen auf der Zentraldeponie Castrop-Rauxel; Aufsicht; schematisch (ZEPP 2003; unveröffentlicht; verändert)

- Instrumentierung im Oberflächenabdichtungssystem

Auf den Versuchsflächen werden Wasserspannung, Bodenwassergehalt, Bodentemperatur sowie – wie oben dargestellt – Abflusshöhen gemessen. Für die Messung der Wasserspannung werden frostsichere Druckwandler-Tensiometer der Fa. UGT, Müncheberg verwendet. Die Tensiometer sind an den Stationen 2a und 2b in sieben Tiefen (30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 cm) à 6 Parallelen eingebaut.

Die Klimaelemente Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Windgeschwindigkeit und Windrichtung werden an einer Klimastation erfasst. Zusätzlich wird die Bodenfeuchte mittels Time-Domain-Reflectometry-Sonden (TDR) ermittelt. Die TDR Methode zur Bestimmung der Bodenfeuchte im Gelände ist stark verbreitet [SPERL 1995].

- Hydrologische Wirksamkeit

Auf der Wetterstation der Zentraldeponie Castrop-Rauxel wurden über den Zeitraum 04.09.1999 – 30.04.2009 insgesamt 8171,3 mm Niederschlag durch eine fast lückenlose stündliche Erfassung registriert. Die auf den Stationen 2a und 2b registrierten Abflüsse waren gering. Der Gesamtabfluss auf Station 2a betrug 20,96 l/m<sup>2</sup> und auf Station 2b 7,4 l/m<sup>2</sup>. Rechnerisch sind auf Station 2a 0,26% und auf Station 2b 0,09% des Gesamtniederschlages durch die kontrolliert verdichtete Schicht abgeführt worden (ZEPP 2009). Die Ergebnisse dieser Messungen werden im Rahmen einer anderen Untersuchung (Dissertation Kathrin Weiß, Bochum 2009) vertieft diskutiert (vgl. WEISS, ZEPP 2004).

- Materialeigenschaften

Die geotechnisch-bodenphysikalischen Eigenschaften der Rekultivierungsschicht und kontrolliert verdichteten Schichten (kvS) wurden bereits 1999 und 2001 untersucht. Zur Probenahme wurden Stechzylinder verwendet und die bodenphysikalischen Parameter

- Korngrößenverteilung, (nach DIN 18123)
- Wasserleitfähigkeit ( $k_f$ ), (nach DIN 18130, Teil 1)
- Trockenrohdichte ( $\rho_b$ ), (nach DIN 18124, Teil 1)
- Proctordichte, ( $D_{pr}$ ) (nach DIN 18127 - 9 100 Y)

bestimmt [ZEPP, HENNIG 2002].

Das Material der Rekultivierungsschicht ist als Sand-Ton-Gemisch (ST) bzw. Sand-Schluff-Gemisch (SU) zu kennzeichnen [WEISS, ZEPP 2004]. Die kvS der Oberflächenabdichtung besteht aus Schluff (70 bis 80%) mit einem Tonanteil von 10 bis 12%. Das Material ist im 1999 und 2001 untersuchten Bereich sehr homogen und als schwach toniger Schluff (Ut2) zu kennzeichnen.

Die Verdichtungsarbeit der kontrolliert verdichteten Schichten (kvS) wurde lagenweise von einer Schafffußwalze geleistet. Die kvS wurden abschließend auf der obersten Lage mit einer Glattmantelwalze überfahren. Die Rekultivierungsschicht wurde ohne Verdichtung durch schweres Gerät locker aufgebracht.

Die Vernachlässigung des Setzungseinflusses auf den Wassertransport kann zu erheblichen Fehlbeurteilungen z.B. der Sickerung führen [HUWE 1985]. Aus diesem Grund wurden die Verdichtungsgrade  $\rho_b$  [g/cm<sup>3</sup>], Proctordichten  $D_{pr}$  [%] und  $k_f$ -Werte [m/s] sowohl im Jahr 1999, als auch 2001 ermittelt. Diese werden in Tab. 2.1 dargestellt.

Tab. 2.1 Verdichtungsgrade, Proctordichte und  $k_f$ -Wert der kontrolliert verdichteten Schichten (kvS) der Deponie Castrop-Rauxel (nach Zepp, H., Hennig, A. 2002, verändert)

	$p_b$ (g/cm <sup>3</sup> )	$D_{pr}$ (%)	$k_f$ (m/s)
kvS 1999	1,68	93,3	$1,50 \cdot 10^{-9}$
kvS 2001	1,78	98,3	$1,00 \cdot 10^{-9}$

Von 1999 bis 2001 hat die Dichte zugenommen. Innerhalb des Zeitraums von zwei Jahren hat die Auflast der Rekultivierungsschicht und das Eigengewicht der kvS zu einer Erhöhung der Trockenrohdichte durch Konsolidierung geführt. Wasser wurde aus dem Porenraum der kvS auspresst. Die gesättigte Wasserleitfähigkeit hat sich von 1999 bis 2001 erniedrigt. Nach [ZEPP, H., HENNIG, A. 2002] ist die Abnahme des  $k_f$ -Wertes sowohl das Resultat der Konsolidation als auch einer während des Einbaus stattfindenden Verschlämmung. Durch die Verschlämmung wurden im Material bevorzugt Wasser leitende Poren verschlossen.

### 3 Funktionalität und Untersuchung alternativer mineralischer Oberflächenabdichtungen

#### 3.1 Einflussfaktoren und Prozesse

Deponieoberflächenabdichtungen unterliegen einer Vielzahl von Einflüssen. Exemplarisch sollen Belastungsarten genannt werden, welche zum Versagen einer Oberflächenabdichtung führen können. Ein Versagen kann eintreten durch

- Setzungen und Sackungen (Riss-, Scherversagen),
- Mechanische Beanspruchungen (Überfahren mit scharfkantigem Gerät),
- Erosion und Suffosion,
- Pflanzenwurzeln und Tiere,
- Einbaufehler und
- Austrocknung

(<http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/alfaweb/berichte/tba19-95/uv0016.html>; 25.09.2008).

Allen Versagensformen ist gemein, dass sie Wegsamkeiten als kontinuierliche Hohlformen (luft- oder wassergefüllt), durch die dichtwirksamen Komponenten von Oberflächenabdichtungen hindurch, bedingen. Hohlformen verändern den Durchlässigkeitsbeiwert<sup>1</sup> ( $k_f$ -Wert) dieser Komponenten.

Für Deponieabdichtungssysteme in Deutschland müssen verbindliche Durchlässigkeitsbeiwerte eingehalten werden. Die TASI [BUNDESREGIERUNG 1993] sieht für Deponien der Klasse II (z.B. Castrop–Rauxel) die Einhaltung eines Mindest-  $k_f$ - Wertes von  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s vor.

Nach [HORN 1996] nehmen die Gefügekenngößen Lagerungszustand, Porenverteilung und Porengeometrie Einfluss auf den Gas- und Wassertransport in Böden. Von der Gefügeform ist der Zusammenhang der Porenräume im Boden, die Porenkontinuität, abhängig. Die Porenkontinuität ist eine textur- und gefügeabhängige Größe [FREDE, H. G., HORN, R. 1990].

Es liegen verschiedene Porentypen als Teile der Gesamtporosität vor, welche nach [WITT 2007-1] differenziert werden können. Nach [WITT 2007-1] setzt sich die Gesamtporosität aus Interaggregatporen und Intraaggregatporen zusammen. Interaggregatporen liegen z.B. in der Mikrostruktur von Tonaggregaten,

---

<sup>1</sup> Der Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ ) bezeichnet einen rechnerischen Wert, der die Wasserdurchlässigkeit von Materialien, meist Böden oder Gesteine, beschreibt. Dieser hängt auch von Korngröße und Kornzusammensetzung ab und besitzt die Einheit Meter pro Sekunde [m/s] [ADAM 2000]. Die Grenze zwischen einem durchlässigen und undurchlässigen Boden liegt etwa bei  $10^{-6}$  m/s. Nach DIN 18130-1 [in HÖLTING 2005] sind Böden ab einem Durchlässigkeitsbeiwert von  $< 10^{-8}$  m/s als sehr schwach durchlässig zu kennzeichnen. Böden mit einem  $k_f$ -Wert  $< 10^{-9}$  m/s sind nahezu wasserundurchlässig



Intraaggregatporen zwischen den festen Bodenbestandteilen vor. Im gesättigten Zustand ist die Wasserdurchlässigkeit einer mineralischen Dichtschicht wesentlich von der Größenverteilung der Interaggregatporen abhängig.

Eine Limitierung der Niederschlagsinfiltration in den Deponiekörper ist durch die im System verbaute dichtwirksame Schichtenabfolge zu gewährleisten. „Die Wasserleitfähigkeit wird wesentlich [...] von der Anzahl, Größe und Form der Poren, durch die das Wasser fließt“ [SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. 1998] beeinflusst. Das Vorhandensein von kontinuierlichen und Luft gefüllten Makroporenkanälen sowie die Ausprägung der Trockenrohdichte sind für die Funktion von dichtwirksamen Schichten maßgeblich.

Wasser und Luft werden über Porenräume innerhalb des Bodenkörpers verfrachtet. Wenn die untersuchten Dichtungen nicht wassergesättigt sind, kann der Transport sowohl in flüssiger als auch dampfförmiger Phase stattfinden [VIELHABER et al. 1993].

Aus der Bodenmechanik und Bodenphysik ist bekannt, dass ein bindiger Boden bei einer Wasserabgabe ein- oder mehrdimensional schrumpft. Mit der Abgabe von Wasser erhöht sich die Wasserspannung, der Boden reduziert sein Volumen, die Bodenaggregate rücken dichter zusammen. Bis zur Schrumpfungsgrenze besteht ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Volumen. Ist diese Grenze überschritten, erhöhen sich zwar die Wasserspannungen weiter, gleichzeitig dringt aber immer mehr Porenluft in die Bodenstruktur ein. Wird dabei die Zugfestigkeit des Bodens überschritten, bilden sich Risse, die sich je nach Isotropie der Feuchteverteilung vertiefen oder verzweigen. Die Risse können im Mikro- wie Makrobereich verlaufen, sind u. U. visuell nicht erkennbar und führen zu einer stark erhöhten Wasserdurchlässigkeit der betroffenen Bodenschicht [WITT, K. J., ZEH, R. 2004].

Da bei der gesetzeskonformen Ausführung von dichtwirksamen Schichten die Einhaltung bestimmter Durchlässigkeitsbeiwerte zu gewährleisten ist, liegt ein Betrachtungsschwerpunkt nachfolgend auf den Intraaggregatporen. Diese werden nach [AD-HOC-AG BODEN 2005] größenabhängig in Grob-, Mittel- und Feinporen unterschieden (Tab. 3.1)). Schnell bewegliches Bodensickerwasser ist in den weiten Grobporen ( $> 50 \mu\text{m}$ ) und langsam bewegliches Bodensickerwasser in den engen Grobporen (50 bis  $> 10 \mu\text{m}$ ) anzutreffen. Ab dieser Grenze ist im Boden befindliches Wasser als Haftwasser zu bezeichnen und bis  $0,2 \mu\text{m}$  Porengröße pflanzenverfügbar (Tab. 3.1).

Haftwasser in Feinporen verbleibt im Boden und trägt nur geringfügig zum Bodensickerwasser bei.

Tab. 3.1 Porengrößen und Bodenwasser [AD-HOC-AG BODEN 2005, verändert]

Porenbezeichnung	weite Grobporen	enge Grobporen	Mittelporen	Feinporen
Porenäquivalent [µm]	> 50	50 bis > 10	10 bis > 0,2	≤ 0,2
Bodenwasser	schnell bewegliches	langsam bewegliches	pflanzenverfügbares	nicht pflanzenverfügbares
	Sickerwasser		Haftwasser	

Der Einfluss von Makroporen auf den Durchlässigkeitsbeiwert wird von den geometrischen und topologischen Eigenschaften der Poren bestimmt [PIERRET 2002]. Als Makroporeneffekte werden der präferenzielle Fluss und der Transport über fingerartige Strukturen durch den Boden angesehen [REINKEN 1995]. Diese Effekte beschreiben schnelle Sickerwasservorgänge.

Auch [SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. 1998] unterscheiden Poren in Primärporen (körnungsbedingte Poren) und Sekundärporen, unter welche z.B. Schrumpfrisse, Wurzel- und Tierhöhlen fallen. Sekundärporen zeichnen sich besonders durch ihre Kontinuität und einen hohen durchschnittlichen Äquivalentdurchmesser (> 60 µm) aus.

Die Wasserdurchlässigkeit im quasigesättigten Zustand einer mineralischen Dichtschicht wird wesentlich durch die Größenverteilung der Sekundärporen beeinflusst. Es besteht ein enger Zusammenhang zwischen Porengrößenverteilung bzw. der Körnung und der Wasserleitfähigkeit eines Bodens.

Der Zusammenhang dieser Variablen wird durch die Hagen-Poiseuillesche Gleichung beschrieben (Gl. 3.1):

$$Q = \frac{(\pi \cdot r^4 \cdot \Delta\psi)}{(8 \cdot \eta \cdot l)} \tag{Gl. 3.1}$$

mit

π: Pi = 3,14

Q: Wassermenge je Zeiteinheit [m<sup>3</sup>/s]

r: Radius [m]

Δψ: hydraulische Potentialdifferenz [„Länge“]

η: Viskosität [m<sup>2</sup>·s]

l: Fließstrecke [m]

Der Radius „r“ (4. Potenz) (Gl. 3.1) beeinflusst die perkolierte Wassermenge pro Zeiteinheit (Q) am stärksten. Die Minimierung der für den Wassertransport maßgebli-

chen Porengrößen ist ein Hauptziel bei der bautechnischen Ausführung von Deponieoberflächenabdichtungssystemen.

Natürliche Mineralböden werden zur Einhaltung gesetzlicher Vorgaben beim Einbau als Deponieabdichtungssystem einer mechanischen Manipulation unterzogen. Die Manipulation erfolgt in Form von Verdichtungsmaßnahmen. Dabei wird nach [LANG, H. J., HUBER, J. 1994] die Abnahme des Porenvolumens eines Bodens durch äußere Krafteinwirkung mittels eines Verdichtungsgerätes ohne Veränderung der Kornverteilung erzielt. Die Verdichtung beschneidet die pro Zeiteinheit durch den Boden perkolierende Wassermenge über die Veränderung der Porengrößenverteilung. Insbesondere wird der Radius der für den Wassertransport verfügbaren Poren verringert. Das luftgefüllte Porenvolumen wird reduziert [FAZEKAS, O., HORN, R. 2005].

Die Bearbeitung von dichtwirksamen Schichten erfolgt z.B. mit einer Schafffußwalze [HORN 1996]. Diese verändert auch das Bodengefüge und besitzt so eine homogenisierende Funktion. Es kommt zu einer Verknetung und Relokation fester Bodenbestandteile. Zusätzlich erfolgt eine Setzung des Materials.

[DUMBECK 1985] merkt an, dass zunehmende Packungsdichten in der Mehrzahl der Fälle eine Abnahme der weiten Grobporen (> 50 µm) zur Folge haben. Die Erhöhung der Packungsdichte bzw. eine Verdichtung des Bodenmaterials bedingt somit eine Verminderung der Grobporenanteile. Die Anzahl der Poren von 0,2 bis 3 µm steigt hingegen an. Es kommt zu einer überproportionalen Zunahme der Mittelporen, welche sich an Dünnschliffpräparaten nachweisen lässt.

Die Untersuchung der Porensysteme in den dichtwirksamen Schichten einer in Betrieb befindlichen und funktionstüchtigen Oberflächenabdichtung bildet einen Schwerpunkt dieser Arbeit. Auf der Zentraldeponie Castrop–Rauxel wurde die Versuchsabdeckung aus natürlichem Mineralboden erstellt. Die Porenanteile in mineralischen Böden variieren (Tab. 3.2).

Tab. 3.2 Anteil des Porenvolumens und der Porengrößenbereiche am Gesamtvolumen von Mineralböden (C-Gehalt bis 2%) [SCHEFFER, F., SCHACHT-SCHABEL, P. 1998]; verändert

	Porenvolumen %	Grobporen %	Mittelporen %	Feinporen %
Sand	46 ± 10	30 ± 10	7 ± 5	5 ± 3
Schluff	47 ± 9	15 ± 10	15 ± 7	15 ± 5
Lehm	50 ± 15	8 ± 5	10 ± 5	35 ± 10

[HORN 2001] vertritt die Auffassung, dass für die Herstellung einer mineralischen Oberflächenabdichtung auch Material der Tonfraktion (10–12 %) eingesetzt werden

kann. Der Tonanteil der dichtwirksamen Schichten auf der Deponie Castrop-Rauxel beträgt im Mittel 10% und liegt im von [HORN 2001] vorgeschlagenen Prozentbereich. Die Funktionsstabilität der experimentellen Oberflächenabdichtung in Castrop-Rauxel kann möglicherweise einen Beitrag zur Bestätigung oder Widerlegung dieser These leisten.

Einige Tone (z.B. Montmorillonite, Tone aus der Smektit-Gruppe und Dreischichtsilikate) verfügen über ein intensives Quellungs- und Schrumpfungsvermögen [SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. 1998], welches langfristig zur Ausbildung von Wegbarkeiten in der Dichtschicht führt. [HORN 2001] vertritt die These, dass eine Stabilisation dieser Eigenschaften zu einer Eignung von Tonen als Dichtungsmaterial führen könnte. Die chemischen Eigenschaften (z.B. hohe Austauschkapazität) und die physikalischen Eigenschaften (z.B. geringe Durchlässigkeit im homogenen Zustand) sprechen nach [HORN 2001] für eine Eignung des Materials Ton als langfristiges Oberflächenabdichtungsmaterial. Er vertritt den Standpunkt, dass die Erhaltung der Porenstabilität durch gezielte Vorbehandlung des Tons einer anschließenden Rissbildung entgegenwirkt.

Bei der Herstellung von dichtwirksamen Schichten einer Oberflächenabdichtung ist die langfristige Vermeidung von Sekundärporen ein vorrangiges Ziel. Dabei ist entscheidend, dass ein Abdichtungssystem, welches nach [WITT 2007-2] aus verschiedenen Komponenten, die in Serie wirken und senkrecht zur Schichtung durchsickert werden, so aufgebaut wird, dass die Entstehung dieser Porensysteme unterbunden wird. [ZEH 2007] ergänzt, dass die klimatischen Verhältnisse, die Aggregatgröße und -stabilität, die Einbauweise und die Verdichtung die Wasserdurchlässigkeit und die Langzeitbeständigkeit der mineralischen Schicht wesentlich bestimmen.

Die Funktionalität von Deponieoberflächenabdichtungen, die optimale Schichtenabfolge und der ideale Einbauwassergehalt sind Schwerpunkt verschiedener Veröffentlichungen. Weitere Forschungsvorhaben zum Schwerpunkt Deponieoberflächenabdichtungen findet man z.B. unter <http://www.deponie-stief.de/fachlit/abdichtung/ofa.htm>; 25.09.2008.

Für die Ausprägung von Grobporenstrukturen in mineralischen Oberflächenabdichtungen ist der Einbauwassergehalt von zentraler Bedeutung. Bei Einbau auf dem trockenen Ast der Proctorkurve können infolge unvollständiger mechanischer Verdichtung primäre Grobporen im Dichtungskörper verbleiben. Beim Einbau auf dem nassen Ast besteht die Gefahr sekundärer Grobporen und Schrumpfrissbildung

durch hydraulische Weiterverdichtung. Das primäre Grobporenvolumen nimmt mit steigendem Einbauwassergehalt ab und das sekundäre zu [BAUER et al. 2003].

Mineralische Abdichtsysteme, nach Stand der Technik auf dem nassen Ast der Proctorkurve eingebaut, neigen nach [JUNGE et. al 1996] in Abhängigkeit vom verwendeten Substrat zu mehr oder weniger starkem Schrumpfen und Schrumpfrissbildung. Die langjährige Funktionsfähigkeit der Oberflächenabdichtung Castrop-Rauxel stellt diese These in Frage, da sie selbst stark vernässt eingebaut wurde. So musste auf Grund von Starkregenereignissen die Fortführung der Installation der kVS für mehrere Monate unterbrochen werden.

### **3.2 Ausgewählte Untersuchungsverfahren zur Ermittlung der Dichtwirkung**

Porenräume in Böden können nur nach vorangegangener Entnahme einer Bodenprobe ermittelt werden. Die Entnahme- und Untersuchungsmethoden müssen die Porensysteme der Materialien konservieren. Eine zerstörungsfreie Untersuchung von Bodenproben ermöglichen jedoch nur wenige Verfahren. Eine Untersuchungsmethode mit zusätzlicher Möglichkeit zur Visualisierung der Porenräume in Bodenproben kann z. B: mittels Computertomographie oder Dünnschliffanalytik erfolgen. Die graphische Darstellung von Porenräumen ist für die Interpretation der Porenkontinuität und der damit in direktem Zusammenhang stehenden Wasserdurchlässigkeit des Materials sinnvoll. Aus diesem Grund werden für diese Arbeit die Verfahren der Computertomographie und der Dünnschliffanalytik eingesetzt, welche nachfolgend gesondert erläutert werden.

Zur direkten Messung des Porenraumes kann auch das Luftdruckpyknometerverfahren [HARTGE, K. H., HORN, R. 2009] Anwendung finden. Allerdings ist für dessen Durchführung die Trocknung der Probe notwendig. Die Trocknung von Bodenmaterial kann z. B. durch Schrumpfung Einfluss auf die im Boden vorhandenen Porenkanäle nehmen und ist für die Fragestellung dieser Arbeit daher unbrauchbar. Weitere Lysimeter- und Wasserhaushaltsmethoden sind denkbar, jedoch für die Fragestellung dieser Arbeit ungeeignet.

Als zusätzliches Instrument zur Überprüfung der mittels Computertomographie und Dünnschliffmikroskopie ermittelten Ergebnisse kommen isotopengeochemische Methoden in Frage. Diese vermögen die Herkunft und das Verhältnis verschiedener Wässer zueinander zu erklären und könnten so schnelle Sickerwasserprozesse in den zu untersuchenden Dichtschichten nachweisen, selbst wenn die zuvor angewandten Verfahren keine Porensysteme nachweisen konnten.

- **Computertomographie**

[BAYER et al. 2003] nutzen die Computertomographie (CT) zur Bestimmung hydraulischer Eigenschaften, da diese von Porensystemen determiniert werden und sie sich mittels CT abbilden lassen. Die Computertomographie (CT) (griech: tomós (Schnitt); gráphein (schreiben)) wird vorwiegend in der Medizin, aber auch in anderen Fachgebieten (wie z.B. der Bodenkunde, ki) angewendet. Es kann eine hoch auflösende dreidimensionale Betrachtung der Bodenstruktur, welche anschließend über abgeleitete bodenphysikalische Parameter bewertet wird, erfolgen. Die kontinuierlichen, Luft gefüllten Makroporenkanäle und die Trockenrohdichte können mittels Computertomographie zerstörungsfrei ermittelt werden. Nachgeschaltete bildanalytische Methoden ermöglichen die Messung der Porengrößenverteilung direkt am Präparat [DATHÉ 1998].

Makroporen können auf richtungsabhängige (anisotrope) Strukturen hin untersucht werden. [ROGASIK 2003-1] bewertet das CT-Verfahren als Möglichkeit, das Verständnis zur Entwicklung von Bodenstrukturen und ihrer Funktionscharakteristika, wie z.B. die Wasserleitfähigkeit, zu erweitern.

Bei der Computertomographie werden Röntgenstrahlen von einer Quelle ausgesandt und nach Durchdringung des zu untersuchenden Körpers von Detektoren aufgezeichnet. Der Vergleich zwischen ausgesandter und gemessener Strahlungsintensität gibt Aufschluss über die Abschwächung der Strahlung durch das zu untersuchende (Objekt, ki) [BUZUG 2004].

Die physikalische Größe, welche die Abschwächung der Strahlung durch die Masse beschreibt, heißt „linearer Abdämpfungskoeffizient“. Die Strahlungsabschwächung tritt auf, da die Photonen des ausgesandten Strahls durch das Material absorbiert oder von der Bahn abgelenkt werden [AYLMORE 1994]. Der lineare Abdämpfungskoeffizient, oft physikalisch ungenau als Dichte oder Röntgendichte bezeichnet, wird in der Computertomographie auf der „Hounsfield–Skala“ mittels abgestufter Grauwerten dargestellt.

Hounsfield Einheiten (HU) berechnen sich nach (Gl. 3.2):

$$HU = 1000 \cdot \frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \quad \text{(Gl. 3.2)}$$

mit

$\mu_w$ : linearer Abdämpfungskoeffizient Wasser [ $\text{cm}^{-1}$ ]

$\mu$ : linearer Abdämpfungskoeffizient Material [ $\text{cm}^{-1}$ ]

Hounsfield-Einheiten (HU) sind eine international standardisierte Größe [GREVERS 1989] mit linearer Skalierung.

Für Luft (-1000 HU) und Wasser (0 HU) sind die HU-Werte definiert [AYLMORE 1993]. CT-Bilder werden aus Voxeln zusammengesetzt. Der Farbwert der Voxel wird je nach verwendeter Farbskala und Hounsfield-Einheiten z.B. durch verschiedene abgestufte Grauwerte dargestellt. Anschließend können die Voxel mittels Bildanalyse-Software untersucht werden [GREVERS 1994].

Nach [WARNER 1989] deuten schwarze Bereiche in CT-Abbildungen auf Material mit einer geringen Abschwächung (geringe Dichte) hin, wobei weiße Bereiche Material mit einer hohen Abschwächung (hohe Dichte) aufweisen. Die Strahlenabsorption ist eine Materialeigenschaft und stellt sich bei gegebenem Material proportional zur Dichte dar [HECKER et al. 2003].

Ein (Objekt,  $k_i$ ), das einen niedrigeren Schwächungskoeffizient aufweist als ein anderes wird als hypodens (Hypodensität), bei höherem Schwächungskoeffizienten als hyperdens (Hyperdensität) und bei gleichem Schwächungskoeffizienten als isodens bezeichnet [BUZUG 2004].

Die durch die CT-Messung ermittelten digitalen Daten werden softwaregestützt im Computer zu einem Volumendatensatz zusammengefügt, aus dem man Schnittbilder und 3D-Ansichten in beliebigen Ebenen rekonstruieren kann.

[GREVERS 1989] vergleicht Messungen der Makroporosität mittels CT mit denen der Dünnschliffherstellung. Beide Verfahren können Porensysteme in den dichtwirksamen Schichten des Oberflächenabdichtungssystems Castrop-Rauxel nachweisen und zur Abschätzung des Einflusses auf die Wasserleitfähigkeit beitragen. Aus diesem Grund werden beide Verfahren in dieser Arbeit parallel zum Einsatz gebracht.

Die Computertomographie bietet ferner die Möglichkeit, die Trockenrohddichte kleinräumig in der gesamten Probe zu bestimmen. Die (Trockenrohddichte,  $k_i$ ) wird verbreitet genutzt, um Bodenverdichtungsphänomene zu beschreiben [PETROVIC 1982]. Die computertomographische Untersuchung auf einem Energieniveau (es handelt sich um einen Einstellungswert am Computertomographen) ermöglicht es, die Trockenrohddichte scheibenweise in den gescannten Bodenproben zu berechnen. So werden Informationen über den strukturellen Zustand und den Makroporenanteil der Probe gewonnen [ROGASIK 2003-1].

Die Gewinnung ungestörter Bodenproben ist im Gelände je nach Bodenart und Bodenverdichtungsgrad, eine schwierige Aufgabe. [GALLMEISTER 2003] gibt an, dass Störungen im Randbereich der Proben durch die Entnahme entstehen können. Die gefügemorphologische CT-Analyse wird als wertvolle Ergänzung zu den herkömmlichen Verfahren der Beurteilung chemischer und physikalischer Einwirkungen auf mineralische Abdichtungen angesehen [WOLF 1996]. Die Computertomographie ist verglichen mit anderen (Standard-, ki)Verfahren der Gefügeanalyse (z. B. der Dünnschliffmikroskopie, ki) sehr schnell [HECKER 2003].

- **Dünnschliffanalytik**

Die computertomographische Gefügeuntersuchung ist in der Auflösung technisch limitiert (s. Kap. 4.2.3). Die Dünnschliffanalytik erzielt eine höhere Auflösung und ist in diesem Bereich der Computertomographie überlegen. Die Dünnschliffmikroskopie besitzt gegenüber der Computertomographie den Vorteil, dass man Materialkomponenten mineralogisch bestimmen kann und durch die höhere Auflösung sehr kleine Hohlraumstrukturen identifizieren kann. Die verschiedenen mineralischen Bestandteile der Proben geben Auskunft über die erdgeschichtliche Herkunft bestimmter Teile des Materials. Mittels Dünnschliffmikroskopie wird auch die Ausrichtung der Minerale sowie Hohlräume in der Probe studiert. Die wichtigsten Einheiten der mikromorphologischen Beschreibung sind „Festphase und Hohlräume“. Hohlräume sind aus präparationstechnischen Gründen harzgefüllt. Die Phasen können nach Größe, Häufigkeit, Form, Oberflächenbeschaffenheit, Orientierung, der Variabilität dieser Eigenschaften [SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. 1998] sowie eventuell daraus resultierenden Mustern beschrieben werden.

Das zu untersuchende Material kann z.B. weiterhin im Rasterelektronenmikroskop mit einem theoretischen maximalen Vergrößerungsfaktor von 1.000.000:1 untersucht werden. Für die Einschätzung des Wasserhaushaltes der kvS kann so eine Abbildung der Wasser leitenden Porensysteme bis zu einer Auflösung von 10 µm erfolgen.

- **Isotopengeochemie**

Wässer in einem bestimmten Umfeld weisen ein charakteristisches Isotopenverhältnis auf, welches vergleichbar mit einem Fingerabdruck ist. Isotope sind als „Atome gleicher Ordnungszahl, jedoch unterschiedlicher Massenzahl definiert [...]“ [MORTIMER 2001]. Der Begriff „Isotop“ (griechisch iso = gleich; topos = Ort) gibt an, dass die Nukliden eines Elements dem gleichen Platz im Periodensystem zuzuordnen sind. Man kann das Isotopenverhältnis der verschiedenen Elemente des Wassermo-



leküls für einen Vergleich von Wässern nutzen. Das Isotopenverhältnis und dessen Veränderlichkeit erfüllen dabei die Funktion eines Tracers (engl.: to trace = verfolgen, aufspüren). Man unterscheidet zwischen natürlichen und künstlichen Tracern, wobei natürliche Tracer auch als Umwelttracer bezeichnet werden. Als natürliche Tracer eignen sich nach [MOSER 1980] besonders die Isotope Deuterium ( $^2\text{H}$ ) und Sauerstoff-18 ( $^{18}\text{O}$ )

In natürlichen Wässern und im Wasserdampf der Atmosphäre befinden sich unter  $10^6$   $^1\text{H}^{16}\text{O}^1\text{H}$  Molekülen etwa 2000  $^1\text{H}^{18}\text{O}^1\text{H}$ -Moleküle und etwa 320 Moleküle  $^2\text{H}^{16}\text{O}^1\text{H}$  [MOSER 2004]. Kombiniert man alle stabilen Wasserstoff- und Sauerstoff-Isotope erhält man neun verschiedene Molekülarten mit molaren Massen von 18 bis 22 g/mol. Das mit 99,8% häufigste Wassermolekül hat die molare Masse von 18 g/mol ( $^1\text{H}^{16}\text{O}^1\text{H}$ ) [HÖLTING 2005]. Danach folgen  $^1\text{H}^{18}\text{O}^1\text{H}$  (20 g/mol) mit ca. 0,2% und  $^2\text{H}^{16}\text{O}^1\text{H}$  (19 g/mol) mit ca. 0,03% [MOSER 1980].

Bei Phasenübergängen, z.B. Verdunstung, Kondensation, aber auch bei Lösungs- und Austauschvorgängen ist mit Isotopenfraktionierungen, d. h. mit Änderungen des Isotopengehaltes der entsprechenden Komponenten oder Verbindungen zu rechnen [MOSER 1980].

Die wesentliche Ursache für die Schwankungsbreite der Isotopenzusammensetzung des Wassermoleküls besteht darin, dass der Dampfdruck von isotopisch „leichtem“ Wasser ( $^1\text{H}^{16}\text{O}^1\text{H}$ ) höher als der von Wasser mit den „schweren“ Isotopen  $^2\text{H}$  und  $^{18}\text{O}$  ist.

Der temperaturabhängige Dampfdruck bedingt, dass die Isotopenfraktionierung auch eine Funktion der Temperatur ist. Durch Verdunstung reichern sich  $^2\text{H}$  und  $^{18}\text{O}$  im verbleibenden Wasser an und bei der Kondensation im residualen Wasserdampf ab. Gefrieren von Wasser löst eine Abreicherung von  $^2\text{H}$  und  $^{18}\text{O}$  in der flüssigen Phase aus. Die Isotopenfraktionierung nimmt, unter sonst gleichen Bedingungen, mit abnehmender Temperatur zu [MOSER 1980].

Eine Isotopenfraktionierung kommt in jeder thermodynamisch ablaufenden Reaktion vor. Sie wird durch unterschiedliche Bindungsstärken der Isotope im Wassermolekül ausgelöst [CLARK 1997].

- *Maßeinheit/Standard*

Als Maßeinheit für den  $^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Gehalt eines Wassers wird in der Isotopenhydrologie allgemein statt des nur aufwendig bestimmbareren absoluten Isotopengehalts die Differenz des Isotopenverhältnisses der Probe ( $R_{\text{Probe}}$ ) zu einem Standard ( $R_{\text{Standard}}$ ), angegeben.

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = \left[ \frac{\left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{Pr o b e}} - \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{S t a n d a r d}}}{\left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{S t a n d a r d}}} \right] \cdot 1000 \quad [\text{‰}] \quad (\text{Gl. 3.3})$$

oder

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{(R_{\text{Pr o b e}} - R_{\text{S t a n d a r d}})}{R_{\text{S t a n d a r d}}} \cdot 1000 \quad [\text{‰}] \quad (\text{Gl. 3.4})$$

mit

$$R_{\text{Pr o b e}} = \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right) \text{ (Isotopenverhältnis } ^{18}\text{O zu } ^{16}\text{O in der Probe)}$$

$$R_{\text{S t a n d a r d}} = \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right) \text{ (Isotopenverhältnis } ^{18}\text{O zu } ^{16}\text{O im Standard)}$$

Die Isotopenverhältnisse  $R_{\text{Probe}}$  und  $R_{\text{Standard}}$  werden unter gleichen Bedingungen gemessen [MOSER 2004]. Für  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  wird als international anerkannter Standard Wasser ( $R_{\text{Standard}}$ ) von der Internationalen Atomenergie Behörde (engl. IAEA = International Atomical Energie Agency), Wien, verteilt. Die Isotopenzusammensetzung dieses Standards (V-SMOW = engl. Vienna Standard Mean Ocean Water), entspricht etwa der von Meerwasser.

Da die meisten meteorischen Wässer ein negatives  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Verhältnis zu Meerwasser besitzen, sind Isotopenverhältnisse von Niederschlags-, Oberflächen- und Grundwässern in der Regel negativ [MOSER 1980].

Fraktionierungsprozesse in Niederschlägen treten verstärkt bei folgenden Effekten hervor:

- *Kontinentalitätseffekt*

Dieser Effekt tritt beim Abkühlen einer vom Meer kommenden Luftmasse beim Überqueren einer Landmasse auf. Durch Ausregnen verliert die Luftmasse ihren Wasserdampfanteil. Beim Ausregnen (oder Schneien) werden bevorzugt die Wassermoleküle abgetrennt, welche das schwere Sauerstoffisotop  $^{18}\text{O}$  und/oder Deuterium  $^2\text{H}$  tragen. Dies führt dazu, dass sich die Luftmasse durch diese so genannte „Rayleigh-Fraktionierung“ beim weiteren Fortschreiten über Land sukzessive an  $^{18}\text{O}$  und  $^2\text{H}$  anreichert. Der „Kontinentalitätseffekt“ ist jahreszeiten- und ortsabhängig. Für Europa und Nordafrika werden von [SONNTAG 1978] Werte im Bereich [...] von -0,3‰ für  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  und -2,5‰ für  $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$  pro 100 km Trajektorienstrecke von der

Küste angegeben. Diese Werte sind allerdings bei regionalen Untersuchungen nur als grobe Näherungen anzusehen [MOSER 2004].

- *Jahreszeitlicher Effekt*

Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Monatsmittelwerte im Niederschlag folgen der jahreszeitlich variierenden Temperatur. Im Sommer treten weniger negative  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte auf als im Winter. In den Sommermonaten sind, im Vergleich zum Winter, mehr  $^{18}\text{O}$ -Isotope in Niederschlagswässern zu finden [HÖLTING 1996].

Höhere Strahlungsenergie und dadurch bedingte höhere Temperaturen ermöglichen im Sommer einem größeren Anteil der schwereren  $^{18}\text{O}$ -Isotope in die Gasphase überzuwechseln. Wassermoleküle mit schweren Isotopen kondensieren schneller als leichte Isotope. Der Jahresgang der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte ähnelt einer Sinuskurve [HÖLTING 2005].

[DANSGAARD 1964] wies nach, dass zwischen der Temperatur [°C] und den  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werten von Niederschlägen [‰] eine mathematische Beziehung besteht.

Nach Gl. 3.5 und Gl. 3.6

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = (T_{\text{Monat}} \cdot 0,338) - 11,99 \text{ [‰]} \quad \text{(Gl. 3.5)}$$

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = (T_{\text{Jahr}} \cdot 0,695) - 13,60 \text{ [‰]} \quad \text{(Gl. 3.6)}$$

mit

$T_{\text{Monat}}$  = Monatsmitteltemperatur (2 m über Grund) [°C]

$T_{\text{Jahr}}$  = Jahresmitteltemperatur (2 m über Grund) [°C]

können aus bekannten Temperaturdaten theoretische  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte berechnet werden.

- *Mengeneffekt/Höheneffekt*

Eine Abreicherung schwerer Isotope (z.B.  $^2\text{H}$  und  $^{18}\text{O}$ ) im Niederschlag tritt auch mit zunehmender Menge (Mengeneffekt) sowie durch das Aufsteigen einer Luftmasse an orographischen Hindernissen (Höheneffekt) ein.

Für den Mengeneffekt wurden Änderungen der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte von -1 bis -1,5‰ pro 100 mm monatlicher Niederschlagshöhe gemessen [MOSER 2004]. Der Höheneffekt wird von [HÖLTING 2005] mit -0,15‰ bis -0,4‰ pro 100 m Höhenzunahme angegeben. Zum Höheneffekt trägt neben dem Ausregnen auch die Temperaturabhängigkeit der Isotopenfraktionierung bei.

Die Isotopeneffekte führen zu einer weltweiten, örtlichen und zeitlich charakteristischen Markierung der Niederschläge [MOSER 1980].

## 4 Methoden

### 4.1 Feldarbeiten

Zur Bestimmung der bodenmechanischen und bodenphysikalischen Eigenschaften der kontrolliert verdichteten Schichten (kvS) wurden diese am 24.08.2006 und 25.08.2006 nach 1999 und 2001 erneut beprobt. Die Beprobungen erfolgten im Randbereich der Versuchsfläche und hatten durch die räumliche Distanz (ca. 15-20 m) keinen Einfluss auf die im Kernbereich durchgeführten Untersuchungen.

Die Lage der Baggerschürfe ist in Abb. 4.1 schematisch dargestellt (vgl. Abb. 2.7).

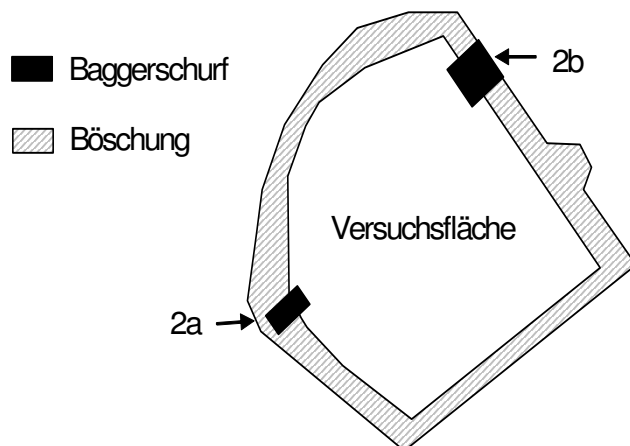


Abb. 4.1 Lage der Baggerschürfe auf der Deponie Castrop-Rauxel (Aufsicht; schematisch)

Schurf 2a lag am südwestlichen Rand drei Meter westlich einer einen Bereich der Versuchsfläche einschließenden Umzäunung. Der Einschnitt in die Böschung war zwei Meter breit und fünf Meter lang.



Abb. 4.2 Aufgrabung Position 2b

Zwei Baggerschürfe (Schurf 2a und 2b) wurden im Böschungsbereich der Versuchsflächen mit einem Grabenräumlöffel (Rundprofil) angelegt, und so die zu untersuchenden Schichten freigelegt. Die aufgegrabenen Flächen verliefen annähernd parallel zum Schichtenaufbau der kontrolliert verdichteten Schichten (Abb. 4.2).

Das über den Probenahmestellen liegende Material wurde in horizontaler Richtung und möglichst anpressdruckfrei (vertikal) abgezogen. Die Begrenzung des vertikal ausgeübten Druckes auf die zu beprobenden Schichten war besonders wichtig, da die Gefügeausprägung der Schichten erhalten bleiben sollte. Die Abteufung erfolgte nur bis auf ein festgelegtes Niveau, ab dem die restliche Freilegung per Hand durchgeführt wurde.

Die Probenahmeebenen in verschiedenen Tiefen wurden schrittweise nacheinander erstellt. Dies sollte mögliche Austrocknungsprozesse an den Schichtoberflächen bestmöglich minimieren.

Die freigelegten Oberflächen der kontrolliert verdichteten Schichten wiesen einen makroskopisch sichtbaren Skelettanteil auf. Das angetroffene Skelett setzt sich aus Ziegel- und Mauerbruch, Teilen von Waschbetonplatten, organischen Bestandteilen, wie z.B. Wurzeln und Ästen sowie kohle-, koksartigen Bestandteilen zusammen. Diese Bestandteile der kontrolliert verdichteten Schichten treten nur im Randbereich der Versuchsanlage auf. Materialproben, entnommen beim Einbau (1999) und bei einer Kontrolluntersuchung, (2001), waren nahezu skelettfrei. Die Drainageschicht aus Schmelzkammergranulat (schwarz) hob sich scharf vom umgebenden Material ab (Abb. 4.3, s. Pfeil).

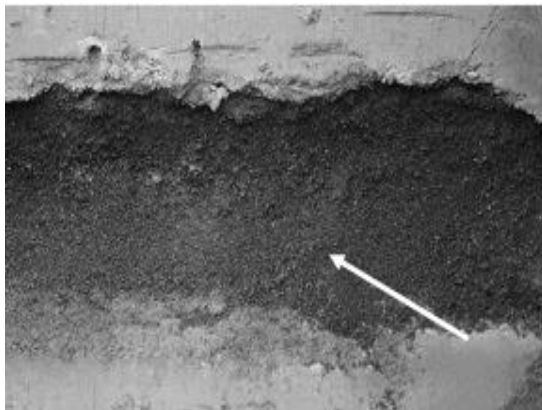


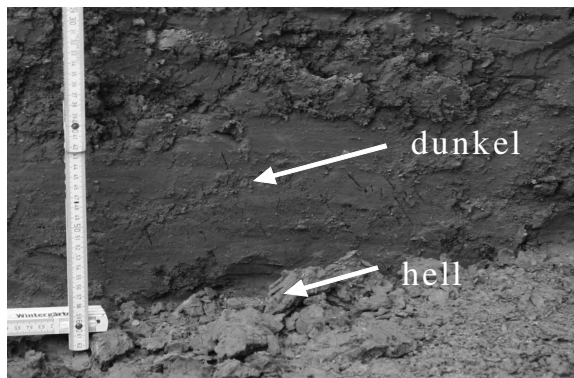
Abb. 4.3 Schmelzkammergranulatschicht

Schurf 2b lag im nordöstlichen Bereich der geböschten Versuchsfläche und 15 m südlich der nordöstlichen Ecke (Abb. 4.1). Der Einschnitt in die Oberflächenabdichtung wurde ca. 6 m breit und 4 m lang angelegt. Die Oberfläche der zu beprobenden kvS wies im Vergleich zu Position 2a einen höheren Skelettanteil aus Ziegel- und Mauerbruch sowie organischen, in den Löß eingearbeiteten Bestandteilen auf (Abb. 4.4).



*Abb. 4.4 Skelettbestandteile Position 2b (s. Pfeile)*

Fünzig Zentimeter oberhalb des anstehenden Müllkörpers konnte ein Sprung in der Korngrößenverteilung ausgemacht werden (Abb. 4.5). Das dort verwendete Material war gröber, daher der Feinsandfraktion zuzuordnen und dunkelgrau bis schwarz gefärbt. Der Zusammenhalt der Mineralkörner war bei einer Fingerprobe fühlbar schlechter als der des überlagernden Lösses.



*Abb. 4.5 Dunkle Verfärbungen durch Methanoxidation an Position 2b*

Eine durch Methanoxidation hervorgerufene Verfärbung des Materials der kontrolliert verdichteten Schichten konnte anhand von rostbraunen bis rostroten knollen- bzw. striemenhafte Texturen belegt werden.

## 4.2 Labormethoden

Probenmaterial wurde aus den vier kontrolliert verdichteten Schichten sowie der Rekultivierungsschicht an zwei voneinander getrennt liegenden Entnahmeorten gewonnen. Die Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte (kf-Wert) wurden im Erdbaulabor Dr. Hennig in der Triaxialzelle nach DIN 18130, Teil 1 [DEUTSCHER NORMENAUSSCHUSS 1998] bestimmt. In die Triaxialzelle werden ungestörte in einen Latexschlauch eingehüllte Bodenproben eingebaut [GUENTHER, D., WIDMOSER, P. 1988]. Die Bestimmung der gravimetrischen Bodenfeuchte erfolgte in Anlehnung an DIN 19682-5:1997-04 [DEUTSCHER NORMENAUSSCHUSS 1997] an der Ruhr-Universität Bochum. Des Weiteren wurde ungestörtes Probenmaterial zur Anfertigung von Bodendünnschliffen und für eine Gefüge-, Poren- und Dichteuntersuchung im Computertomographen entnommen.

### 4.2.1 Probengewinnung und Bezeichnung

Die Proben am Schurf 2a tragen die Bezeichnungen A-G, die an Position 2b die Bezeichnungen L, M, O, P und S. Die Lage der entnommenen Proben innerhalb des Oberflächenabdichtungssystems wird in Abb. 4.6 und Tab. 4.1 dargestellt.

Tab. 4.1 Entnahmetiefen ungestörte Bodenproben

2a	Teufe	2b	Teufe
Zylinder <b>A, B</b>	150-160 cm	Zylinder <b>S</b>	25-35 cm
Zylinder <b>C</b>	160-170 cm	Zylinder <b>L</b>	150-160 cm
Zylinder <b>D</b>	185-195 cm	Zylinder <b>M</b>	180-190 cm
Zylinder <b>E</b>	195-205 cm	Zylinder <b>P</b>	205-215 cm
Zylinder <b>F</b>	205-215 cm	Zylinder <b>O</b>	215-225 cm
Zylinder <b>G</b>	215-225 cm		

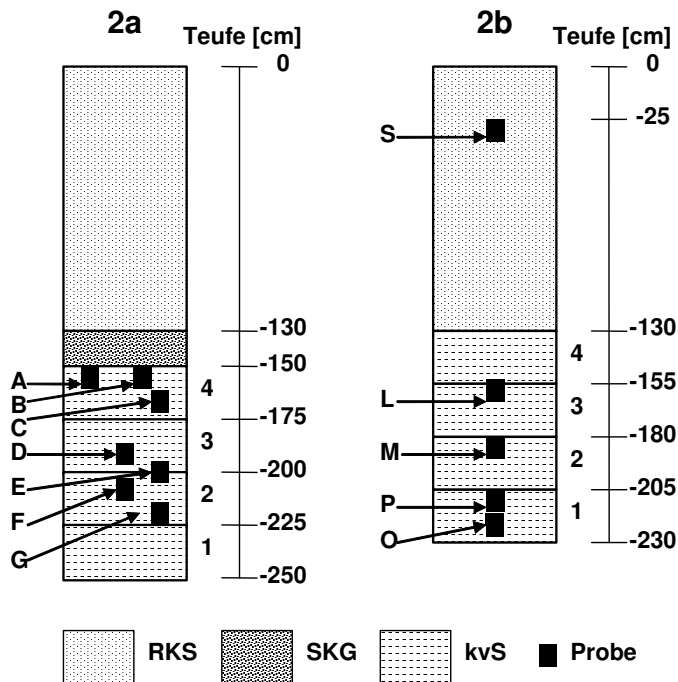


Abb. 4.6 Schematische Darstellung der Entnahmepunkte für die computertomographischen Untersuchungen; RKS = Rekultivierungsschicht, SKG = Schmelzkammergranulat, kvS = kontrolliert verdichtete Schichten (nummeriert)

Zur Probengewinnung wurden maßgefertigte Plexiglaszylinder ( $\varnothing$  10 cm) mit Schneidevorsatz (s. Abb. 4.7, Abb. 4.8) in den Boden eingedrückt. Vor Beginn der Probenentnahme wurden diese an der Innenseite mit Graphitspray zur Reduktion der Wandreibung gesprüht. Die Materialverschleppung konnte so reduziert werden.

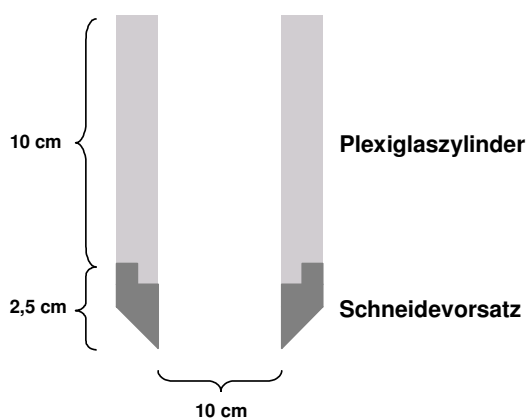


Abb. 4.7 Schematische Darstellung eines verwendeten Plexiglaszylinders mit Schneidevorsatz aus Edelstahl (Vertikalanschnitt) (vgl. Abb. 4.8)



Die CT-Untersuchungen wurden an „ungestörtem Probenmaterial“ durchgeführt. Die Probengewinnung bedarf im Feld einer besonderen Technik und wurde in Anlehnung an [ROGASIK 1997] durchgeführt. Die spezielle Entnahmetechnik sollte den weitgehenden Erhalt aller Gefügestrukturen gewährleisten.

Geeignete Stellen für die Probenahme wurden nach visueller Begutachtung des Materials der kontrolliert verdichteten Schichten festgelegt und markiert. Um die Markierung wurde ringförmig ein 20 cm tiefer und 15 cm breiter Graben ausgehoben (Abb. 4.8). Störungen beim Freilegen des Probenkörpers wurden vermieden, indem kleinräumig mit Spachtel, Schraubenzieher und Messer gearbeitet wurde. Die herauspräparierten Bodensäulen wurden mit einem größeren Durchmesser als dem des sie aufnehmenden Probenahmegefäßes herausgeschnitten (Abb. 4.8).



Abb. 4.8 *Freipräparierte Bodensäule und Entnahmezylinder*

Das Verhältnis zwischen den Abmaßen des Bodenprobenzylinders und der freizuschneidenden Bodensäule stellte einen Kompromiss zwischen der Stabilität der Bodensäule einerseits und einer Minimierung der auszuübenden Press- oder Druckkräfte bei der Probenahme andererseits dar, wie von [ROGASIK 1997] empfohlen.

Das zu beprobende Material war durch eine geringe Restfeuchte (im Mittel 15 Gew.%) und den hohen Verdichtungsgrad sehr hart. Eine in der Werkstatt der Fakultät für Geowissenschaften speziell für die Probenentnahme von lockeren Oberböden entwickelte Apparatur zum Vortrieb und zur Führung der Zylinder, in Anlehnung an [ROGASIK 1997], konnte nicht verwendet werden, da die zum Einbringen der Stechzylinder in den Boden benötigte Kraft nicht aufgebracht werden konnte.

Das abwärts gerichtete Vordringen des Probenahmebehälters in den zu beprobenden Bodenabschnitt wurde gelegentlich durch Steine behindert. An einigen Steinen entwickelte sich durch den Einpressvorgang des Zylinders eine Hebelwir-

kung, wodurch die Gefügestruktur des Probenmaterials zerstört wurde. Gestörtes Probenmaterial wurde verworfen und an anderer Stelle versucht, unversehrtes Probenmaterial zu gewinnen.

Beim Eindrücken von Hand wurde auf die Oberseite des Zylinders ein möglichst gleich verteilter und konstanter Druck ausgeübt. Seitlich überstehendes Material wurde durch den Schneidevorsatz verdrängt und fiel, ohne die Probenahme weiter zu behindern, zur Seite weg. Das Absenken des Probenahmegefäßes erfolgte schrittweise, bis das Probenmaterial vollständig in den Zylinder eingedrückt war (Abb. 4.9).

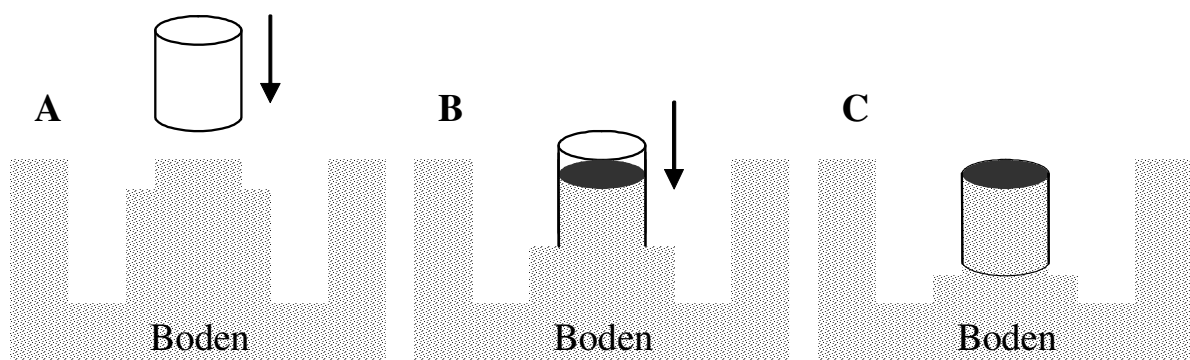


Abb. 4.9 Schematische Darstellung der Probenentnahme



Nach vollständigem Eindrücken wurde der Zylinder vom Untergrund frei geschnitten. Der Schneidevorsatz konnte durch leichtes Drehen abgehoben und überstehendes Material bündig abgeschnitten werden. An der Ober- und Unterseite des Gefäßes verblieb unter den Verschlusskappen ein minimaler Hohlraum.

Abb. 4.10 Entnahme einer Bodenprobe (entspricht B in Abb. 4.9)

Alle Zylinder wurden in Plastikbeuteln luftdicht verpackt. Der Lagerung der Proben wurde während des Transportes analog zur in-situ-Lagerung im Boden durchgeführt. An der Ruhr-Universität Bochum wurden die Proben gewogen und bis zur CT-Untersuchung in Berlin bei neun Grad Celsius unter Lichtausschluss im Kühlschrank gelagert. Vor der Verbringung nach Berlin erfolgte ein erneutes Wiegen, um ggf. Massedifferenzen durch Wasserverlust dokumentieren zu können. Am Transporttag konnte Massekonstanz der Proben nachgewiesen werden.

### 4.2.2 CT-Untersuchung

Am 07.10.2006 wurde das in den Plexiglaszylindern entnommene Material einer Untersuchung im Computertomographen unterzogen. Diese wurde von Dr. Lemke (Virchow-Klinikum Berlin) geleitet und von Dr. Rogasik und Fr. Onasch vom Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V. (ZALF), Müncheberg sowie vom Verfasser wissenschaftlich begleitet.

Verwendet wurde ein 64-Zeilen-Mehrschicht-Computertomograph der Firma General Electric, Modell Lightspeed Volumen-CT (VCT). Die Röntgenquelle wurde mit einer Stromstärke von 300 mA und einer Spannung von 120 kV mit 1 s Aufnahmeintervallen betrieben. Die Beschleunigungsspannung des CT wird in Kilovolt [kV] angegeben [BAYER et al. 2003]. Diese Einstellungen produzierten Bilder mit zufrieden stellendem Kontrast zwischen Hohlräumen (luft- oder wassergefüllt) und der Bodenmatrix. Die XY-Auflösung war 0,25 mm und in Z-Richtung 0,625 mm (Ausgabeformat Dicom).

Mittels einer Führungsschiene wurde das Probenmaterial in der Z-Achse ausgerichtet und die Lagerung über eine eingebaute Libelle kontrolliert. Die Zentrierung des zylindrischen Probenkörpers im CT-Ring wurde über die Ausrichtungsmechanik des Untersuchungstisches (lasergestützt) vorgenommen.

Die Bodenproben wurden von oben nach unten durch synchrones Verschieben entlang der Z-Achse gescannt. Auf der Führungsschiene wurden maximal drei Proben hintereinander (ca. 5 cm Abstand) angeordnet und nacheinander gescannt. Eine Bodenprobe wurde so abgelegt, dass die Scanebene den Kern mit der Oberseite zuerst in einem rechten Winkel zur Längsachse durchleuchten konnte.

Zu Beginn erfolgte ein helikaler Orientierungsscan. Dieser Durchleuchtungstyp diente der Qualitätsbestimmung des Probenmaterials. Nach diesem Scan musste ein Drittel der Proben auf Grund von durch die Probenahme bedingten Rissen im Material aussortiert werden. Risse, welche durch die Probenahme entstanden sind, werden nachfolgend mit dem Begriff „Störung“ bzw. „gestört“ beschrieben. Für weitere Untersuchungen im CT wurden die Zylinder A, B, C, D, E (2a) und M (2b) (vgl. Tab. 4.1) verwendet.

Nach dem Orientierungsscan wurden die Probenkörper im Einzelschichtuntersuchungsverfahren (Schichtdicke: 0,625 mm) mit CT-Einstellung „head scan“ durchleuchtet. Anschließend wurden die Schichtaufnahmen als digitale Datensätze gespeichert und zusätzlich ausgedruckt. Die Datensätze der horizontalen Schichtauf-

nahmen wurden ergänzend in Vertikalscheiben umgerechnet. Die vertikalen Datensätze umfassen nur den Kernbereich der Proben (als Prisma), wobei Randbereiche der Probe wegen struktureller Störungen bei der Probenentnahme nicht berücksichtigt wurden.

Die CT-Daten wurden am Virchow-Klinikum Berlin erzeugt und in Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Agrar-Landschaftsforschung (ZALF) in Müncheberg weiterbearbeitet.

#### 4.2.3 Computertomographische Untersuchung von Böden

Die Aufnahmedarstellung erfolgt als Schichtbild (zweidimensional) oder als Volumenelement. Volumenelemente sind das dreidimensionale Äquivalent zu den Bildpunkten (Pixel) und werden als Voxel (Volumenpixel) bezeichnet [WOLF 1996]. Die Größe eines Elementarvoxel (Volumenpixel) ist vom CT-Typ abhängig.

Am Virchow-Klinikum Berlin ist ein Elementarvoxel durch die Verwendung eines General Electrics Lightspeed Volumen-CT (VCT) technisch auf 0,25 mm 0,25 mm 0,625 mm (X Y Z- Achsen) festgelegt. Jeder Bildpunkt bzw. HU-Wert des Röntgenbildes repräsentiert den Mittelwert der Absorptionen aller Phasen [(Gas, Wasser, Feststoff)] innerhalb des Elementarvoxel [WOLF 1996].

Die Berechnung der Trockenrohddichte aus Hounsfield-Einheiten erfolgt über einen bivariaten Zusammenhang (Gl. 3.9). Die gravimetrischen Bodenwassergehalte im Bereich der zu untersuchenden Proben wurden in Anlehnung an DIN 19682-5:1997-04 [DEUTSCHER NORMENAUSSCHUSS 1997] jeweils für einen Zentimeter Entnahmetiefe bestimmt und anschließend den entsprechenden 0,625 mm dicken Einzelscheiben innerhalb dieses Zentimeters zugeordnet.

HU-Festsubstanz ( $HU_{\text{Festsubstanz}}$ ) kann nach (Gl. 4.1) berechnet werden

$$HU_{\text{Festsubstanz}} = \frac{HU_{\text{mittel}} + (a_v \cdot 1000)}{s_v} \quad (\text{Gl. 4.1})$$

mit:

$HU_{\text{mittel}}$ : Mittelwert aller HU Werte/Scheibe [HU]

$a_v$ : Volumenanteil Luft [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ]

$s_v$ : Volumenanteil Feststoff [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ]

$$s_v = \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (\text{Gl. 4.2})$$

mit:

$\rho_b$ : Trockenrohddichte

$\rho_s$ : Dichte Festsubstanz = 2,65 g/cm<sup>3</sup> (festgelegt)

$$a_v = 1 - s_v - w_v \quad (\text{Gl. 4.3})$$

mit:

$w_v$ : Volumenanteil Wasser [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ]

$$w_v = \frac{w_{\text{berechnet}} \cdot \rho_b}{\rho_w} \quad (\text{Gl.4.4})$$

mit:

$\rho_w$ : Dichte Wasser = 1,00 g/cm<sup>3</sup> (festgelegt)

$\rho_b$ : Trockenrohdichte [g/cm<sup>3</sup>]

$w_{\text{berechnet}}$ : mittlerer Wassergehalt (berechnet)

$$w_{\text{berechnet}} (\text{Masse } \%) = \frac{\text{Masse Wasser}}{\text{Masse Boden}_{\text{trocken}}} \cdot 100 \quad (\text{Gl. 4.5})$$

$$\rho_f = \frac{\text{Boden}_{\text{feucht}}}{V_{\text{Boden}}} \quad (\text{Gl. 4.6})$$

mit:

$\text{Boden}_{\text{feucht}}$ : Masse Boden (feucht) [g]

$V_{\text{Boden}}$ : Volumen der Bodenprobe [cm<sup>3</sup>]

$$\text{Boden}_{\text{feucht}} = \text{Masse Bodensäule} - \text{Tara} [\text{g}] \quad (\text{Gl. 4.7})$$

Die Dichtebestimmung ( $\rho_b(\text{HU})$ ) über die Hounsfieldeinheiten für jede Scheibe erfolgte nach der Gleichung [ROGASIK 2005]

$$\rho_b(\text{HU}) = \frac{\rho_w \cdot \rho_s \cdot (\text{HU}_{\text{Scheibe}} + 1000)}{[\rho_w \cdot (\text{HU}_{\text{fest}} + 1000) + (1000 \cdot w \cdot \rho_s)]} \quad (\text{Gl. 4.8})$$

mit:

$\rho_s$ : Dichte Feststoff = 2,65 g/cm<sup>3</sup> (festgelegt)

$\rho_w$ : Dichte Wasser = 1,00 g/cm<sup>3</sup> (festgelegt)

$\text{HU}_{\text{Scheibe}}$ : Mittelwert aller HU-Werte einer Scheibe.

Die rechnerisch bestimmten Dichtewerte wurden als Funktion der Entnahmetiefe für jeden Zylinder scheibenweise dargestellt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden in Kapitel 5.1 beschrieben.

Der Dichteverlauf des Scheibenstapels wird visualisiert und anhand der Dichteverteilung können Schwächezonen ausgewiesen werden.

Zweidimensionale Schichtbilder vermitteln einen ersten Eindruck vom Strukturzustand der Probe. Diese werden unmittelbar nach dem Scan ausgedruckt und begutachtet. Jedoch können nur Objekte identifiziert werden, welche mindestens zweimal als Pixel nebeneinander liegend (Pixelgröße 0,25·0,25 mm, ki) vorkommen [AYLMORE 1994]. Die Datensätze des Scanvorgangs werden mit Hilfe von spezieller Software zu 3D-Darstellungen verarbeitet. Porenräume die, die Strahlung weniger

abschwächen als umliegendes Bodenmaterial sowie Makroporensysteme können identifiziert werden [GREVERS 1989] (s. Kap. 4.2.4).

Zur Auswertung wurden folgende medizinischen Analyseprogramme verwendet:

- Slicer Dicer, Version: 5.1, Hersteller: Pixotec, LLC. (Bearbeitung, Betrachtung)
- Vol View, Version: 2.0, Hersteller: Kitware. (Betrachtung)

Die Programme bieten die Möglichkeit, ausgewählte Ausschnitte der Hounsfield-Skala getrennt von den restlichen Bereichen zu betrachten.

Vor der Visualisierung mussten die Datensätze am Rechner weiterbearbeitet werden. Der Bodensäule wurde digital ein quadratisches Referenzprisma eingeschrieben, um von der Probenentnahme gestörte Randbereiche auszublenden. Eine vergleichende Betrachtung unterschiedlicher Bodensäulen konnte durch die Verwendung eines standardisierten Prismas (feste Größe) gewährleistet werden.

Die Abmessungen des Prismas betragen 240·240 Pixel (6·6 cm), wobei ein Pixel 0,25 mm<sup>2</sup> groß ist. Das Prisma wurde für 150 Scheiben des Zylinders à 0,625 mm Dicke berechnet. Die zu betrachtende Gesamtlänge beläuft sich daher auf 9,375 cm. Die Fläche der Prismaoberseite beinhaltet 57600 Pixel und ist 36 cm<sup>2</sup> groß. Das quadratische Prisma beinhaltet 337,5 cm<sup>3</sup> der Probe. Dies entspricht 43% des ursprünglichen Zylinderinhalts von 785 cm<sup>3</sup>. Die Darstellung erfolgte mit Slicer Dicer auf einer 32-stufigen Grautonskala.

#### 4.2.4 Bestimmung des Bodenwassergehaltes

Zur Berechnung der Trockenrohichte musste vorher die Bodenfeuchte der Bodenproben bestimmt werden. Da die Probenmasse der für die computertomographischen Untersuchungen vorgesehenen Proben nicht beschädigt werden durfte, wurden zusätzliche ungestörte Bodenproben in unmittelbarer Nähe einer für die Computertomographie bestimmten Probe entnommen (Abb. 4.11).

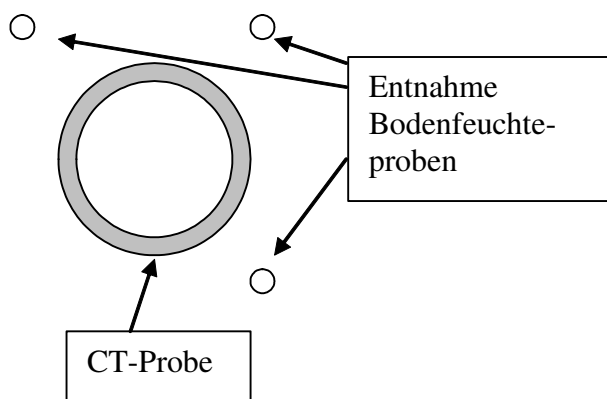


Abb. 4.11 Anordnung der Entnahmestellen (Aufsicht, schematisch)

Um mögliche kleinräumige Schwankungen der Bodenfeuchte abbilden zu können, wurden drei Parallelproben je Entnahmestelle gewonnen. Alle Proben waren ca. zehn Zentimeter lang. Die Bodenfeuchte jedes Zentimeters wurde bestimmt. Jeder CT-Probe konnten so insgesamt drei Bodenfeuchtwerte pro Zentimeter Entnahmetiefe zugeordnet werden.



Abb. 4.12 Einschlaghülsen zur Entnahme von Bodenfeuchtestroben

Das Material wurde in Einschlaghülsen aus Metall (Abb. 4.12) gewonnen, welche mittels eines Gummihammers in die zu beprobenden Schichten eingetrieben wurden. Die Einschlaghülsen wurden zur Reduzierung der Wandreibung als Halbschalen gefertigt. Eine Verschleppung des Bohrgutes konnte so minimiert werden. In die Halbschalen wurde eine Bodensäule eingedrückt. Die Einschlaghülsen wurden nach vollständigem Eindringen manuell gelockert und mit dem Bohrgut aus dem Boden gezogen. Das Bohrgut wurde mit einem Messer in Scheiben à 1 cm unterteilt und diese in luftdicht verschließbare Sarstedt-Röhren (15 ml) überführt. Der feldfrische Wassergehalt konnte durch luftdichtes Verschließen der Proben konserviert werden. Insgesamt 360 Bodenproben wurden am Entnahmetag in der Ruhr-Universität Bochum auf zwei Nachkommastellen [g] gewogen (Waage: Firma Mettler, Typ PJ 3000).

Die Probenmasse der feldfrischen Probe (Feuchtmasse  $m_f$ ) wird nach (Gl. 4.9) bestimmt.

$$m_f = m_{\text{gesamt}} - m_{\text{Behälter}} \quad (\text{Gl. 4.9})$$

mit

$m_f$	Probenmasse [g]
$m_{\text{gesamt}}$	Gesamtmasse der Probe mit Behälter [g]
$m_{\text{Behälter}}$	Masse Sarstedt-Röhre = 6,21 g

Die verwendeten Sarstedt-Röhren wiegen 6,21 g und sind hitzebeständig. Die Gewichtskonstanz bei Erhitzung (105 °C; 36 Stunden) wurde durch Vergleichswägungen von dreißig erhitzten Sarstedt-Röhren bestätigt.

Die Proben wurden aufrecht stehend in feuerfesten Formen (ohne Verschlusskappe) bis zur Massekonstanz getrocknet. Zum Abkühlen wurden die Probengefäße wieder verschlossen und bei Erreichen der Raumtemperatur gewogen. Durch Abzug der Behältermasse konnte die Trockenmasse ( $m_d$ ) bestimmt werden (Gl. 4.10).

$$m_d = m_{\text{gesamt}} - m_{\text{Behälter}} \quad (\text{Gl. 4.10})$$

mit	
$m_d$	Trockenmasse [g]
$m_{\text{gesamt}}$	Gesamtmasse der Probe mit Behälter [g]
$m_{\text{Behälter}}$	Masse Behälter =6,21 g

Der gravimetrische Wassergehalt wird nach

$$w = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100\% \quad (\text{Gl. 4.11})$$

mit	
$w$	Wassergehalt [%]
$m_w$	Wassermasse [g]
$m_d$	Trockenmasse [g]

berechnet. Er bezieht die Wassermasse  $m_w$  auf die Trockenmasse des Materials  $m_d$ . Die Trockenmasse der Proben wurde nach Trocknung bei 105 Grad Celsius (Umlufttrockenschrank; Firma Memmert) über 24 Stunden bestimmt. Die so vorgenommene Bestimmung der Bodenfeuchtwerte erfolgte in Anlehnung an DIN 19682-5:1997-04 [DEUTSCHER NORMENAUSSCHUSS 1997].

Heterogenitäten in der Materialverteilung in den Proben haben im Vergleich zum Löß eine höhere Raumdicke und ein geringes Wasseraufnahmepotential. Der meist geringe Wassergehalt und das hohe Gewicht wirken sich negativ auf den mittleren Wassergehalt der Gesamtprobe aus. Die Heterogenitäten verlieren meist kein Gewicht durch Wasserabgabe, jedoch das umgebende Material. Im Verhältnis zu anderen Proben wird ein geringer Wasserverlust, also ein vor der Trocknung geringer Wassergehalt, vorgetäuscht. Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse über die Standardabweichung auf Plausibilität geprüft und korrigiert.

Es wurden nur Ergebnisse berücksichtigt, welche die 1,5-fache mittlere Standardabweichung der Bodenwassergehalte des zu betrachtenden Zylinders nicht überstiegen. Nach Ausschluss fehlerhafter Werte wurden 272 Werte für weitere Interpretationen genutzt.

Die Methode kann die Bodenwassergehalte der Proben mit hoher Auflösung darstellen. Die hohe Auflösung ist für nachfolgende CT-Untersuchungen notwendig und liegt für diese bezüglich der Auflösung von 1 cm im unteren Grenzbereich.



Zusätzlich zum oben beschriebenen Verfahren wurde die Bodenfeuchte im Erdbau-labor Dr. Hennig aus der Feucht- und Trockenmasse der Proben, welche für die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes bestimmt wurden, berechnet.

#### 4.2.5 Herstellung von Dünnschliffpräparaten

Zur Herstellung von Dünnschliffen [u. a. TUCKER 1988] wurde das zu untersuchen-de Bodenmaterial vollständig im Unterdruckverfahren mit selbst härtendem Kunst-harz (Zwei-Komponenten-Epoxidharz) getränkt. Das Kunstharz wurde mit dem Farbstoff „Sudanblau“ (1% Volumenanteil im Kunstharz) versetzt, um den primären Porenraum sichtbar zu machen. Dieser Prozess kann, je nach Materialbeschaffen-heit, mehrere Wochen beanspruchen.

Nach dem vollständigen Aushärten des Kunstharzes wurde die Probe mit Diamant-gesteinssägen und einer Flächenschleifmaschine (Fa. G&N Müller, Nürnberg) bear-beitet. Die Flächenschleifmaschine nutzt Topscheiben verschiedener Körnung zur Materialbearbeitung.

Das Material wurde auf Gießener Format (28 mm·48 mm) zurechtgeschnitten, auf einen Glasträger geklebt und unter Ölkühlung plan geschliffen. Es wird solange Material abgeschnitten bis ein ca. 25-30 µm dickes Plättchen auf dem Objektträger verbleibt, welches so dünn ist, dass es durchsichtig ist. Der Dünnschliff kann unter dem Licht- oder Rasterelektronenmikroskop (REM) begutachtet werden.

Nicht blau gefärbte Porenräume im fertig gestellten Dünnschliff sind auf präparati-onsbedingtes Herausbrechen von Probenmaterial zurückzuführen.

#### 4.2.6 Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes ( $k_f$ ), der Porensysteme und der Verdichtung von Oberflächenabdichtungssystemen

Die Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes erfolgt nach (Gl. 4.12.)

$$k_f = \frac{Q \cdot l_0}{t \cdot A \cdot h} \cdot \text{Korrekturbeiwert } (T) \quad (\text{Gl. 4.12})$$

mit

h: hydraulischer Druck [bar]

Q: Durchfluss [ml]

t: Messzeitraum

A: Fläche

Probenkörper wurden in Ausstechzylindern der Fa. Röhrenwerke Kupferdreh, Carl Hamm GmbH, Essen gewonnen. Die Ausstechzylinder sind aus galvanisch verzinktem Stahl hergestellt. Sie haben einen Innendurchmesser von 96 mm und eine Länge von 120 mm. Die Ausstechzylinder wurden mit einem Hammer über eine

Schlaghaube (mit Zylinderführung) in den Boden eingetrieben. Anschließend wurden sie mit dem Spaten gelockert, entnommen und mit Verschlusskappen versehen.

Von den so entnommenen Proben wurden die  $k_f$ -Werte in der Triaxialzelle nach DIN 18130-1 [DEUTSCHER NORMENAUSSCHUSS 1998] bestimmt. Das Verfahren sieht vor, dass die Probenkörper seitlich von einer Latexmanschette umhüllt und oben wie unten mit einer Sinterkeramikplatte verschlossen werden. Von unten her wurde mit deionisiertem Wasser Druck (mit der 30-fachen Überstauhöhe des Probenkörpers) an den Probenkörper angelegt. Die Durchlässigkeit wurde über den Durchfluss pro Zeiteinheit bestimmt und bis zur Durchlässigkeitskonstanz fortgeführt. Die Untersuchung wurde vom Erdbaulabor Dr. Hennig durchgeführt.

Nach [LANG, HUBER 1994] ist eine Verdichtungskontrolle mittels des Proctorversuches möglich. Es wurden Proben des eingebauten Materials entnommen und deren Wassergehalt ( $w$ ) und Trockenraumgewicht ( $\gamma_d$ ) bestimmt. Mittels Proctorkurve und Berechnung lässt sich der erzielte Verdichtungsgrad ermitteln und bewerten.

Zusätzlich wurde an identischen Zylinderproben, die zeitgleich entnommen worden waren, die Trockenrohichte und der Bodenwassergehalt des Probenmaterials an der Ruhr-Universität Bochum und im Erdbaulabor Dr. Hennig bestimmt.

#### **4.2.7 Isotopengeochemische Untersuchungen**

Für die Untersuchung verschiedener Wässer der Deponie Castrop-Rauxel wurden isotopengeochemische Methoden genutzt.  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte von Niederschlags- und Bodensickerwässern wurden bestimmt. So sollten die Beziehungen der Bodensickerwässer, welche auf zwei unterschiedlichen Entnahmetiefen des Abdichtungssystems gewonnen wurden, zum Niederschlag bestimmt werden.

Besondere Aufmerksamkeit galt im Rahmen der vorliegenden Arbeit den Betonwanenabflüssen. Dort aufgefangene Wässer haben das auf der Deponie Castrop-Rauxel installierte Oberflächenabdichtungssystem möglicherweise überwinden können. Diese Wässer könnten als Nachweis für eine Funktionsbeeinträchtigung des Oberflächenabdichtungssystems betrachtet werden. Daher wird über die Interpretation der Isotopenverhältnisse die Niederschlags-Abflussbeziehung näher beleuchtet und anschließend eine Aussage zur Funktionsfähigkeit und Langzeitbeständigkeit des Oberflächenabdichtungssystems erfolgen.

Im Zeitraum vom 30.06.2005 bis 22.06.2006 wurden auf der Zentraldeponie Castrop–Rauxel insgesamt 143 Wasserproben zur Bestimmung der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte entnommen.

Es wurden

- Niederschlag (N), (1 Entnahmestelle) (n=39)
- laterale Abflüsse (LA), (2 Entnahmestellen), (n=42)
- und Betonwannenabflüsse (BW) (3 Entnahmestellen). (n=62)

beprobt. Die Auswahl der Entnahmestellen bildet die Quelle (den Niederschlag), eine Versickerungstiefe oberhalb der kontrolliert verdichteten Schichten (laterale Abflüsse) und die Unterseite des Abdichtungssystems (die Betonwannenabflüsse) ab. Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte werden in Beziehung zu ihrem Entnahmeort auf dem Versickerungsweg interpretiert.

#### 4.5.2.1 Niederschlag

Niederschlag wurde in einem Niederschlagsmessbecher mit 57 cm<sup>2</sup> Auffangfläche aufgefangen. Vom 30.06.05 bis 16.02.06 wurde der Niederschlagsmessbecher wöchentlich (Entnahmestelle Nr. 2), ab dem 16.02.06 bis 22.06.1006 täglich (Entnahmestelle Nr. 6) beprobt. Die Entnahmestellen Nr. 2 und Nr. 6 liegen ca. 350 m voneinander entfernt (Abb. 4.13). Der Höhenunterschied beträgt ca. 13 m.

Zur Verdunstungsreduzierung des Probenmaterials empfiehlt die IAEA, generell eine dünne Ölschicht in die Probenahmegefäße (in vorliegender Arbeit: Niederschlagsmessbecher) einzufüllen. Da eine Analyse von so präparierten Wässern an der Ruhr-Universität Bochum nicht möglich gewesen wäre konnte diese Präparationsvorgabe nicht eingehalten werden.

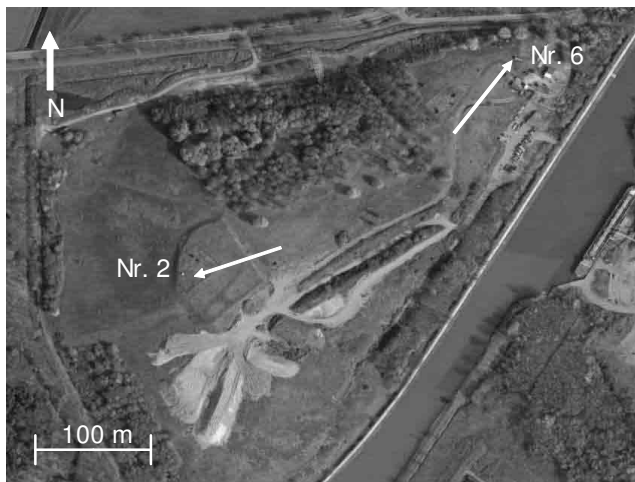


Abb. 4.13 Aufsicht auf die Zentraldeponie Castrop-Rauxel - Lage der Niederschlagsmessbecher Nr. 2 und Nr. 6 (Quelle: Google Maps; 22.12.2008, verändert)

Die Herabsetzung des Probenahmeintervalls reduzierte die Zeit, in der eine unerwünschte Verdunstung stattfinden konnte auf maximal 24 Stunden. So wurde indirekt ein ähnlicher Effekt, wie durch einen Ölfilm beabsichtigt, erzielt.

#### 4.2.7.1 Beprobung laterale Abflüsse

Sickerwasserproben wurden in den ca. 1,8 m tiefen Schächten aus Auffangschalen der zur Sickerwassererfassung installierten Kippzähler (Kap. 2.2) gewonnen. Meist wurden sie einem der Messapparatur kontinuierlich zufließenden Sickerwasserstrom entnommen.

Die Lufttemperatur in den Schächten ist im Vergleich zur Oberfläche niedriger und in der Amplitude gedämpft sowie die Luftfeuchtigkeit wegen geringerem Luftaustausch erhöht. Eine niedrigere Lufttemperatur und erhöhte Luftfeuchtigkeit wirkt der Verdunstung entgegen.

Da die Wässer in einer Vielzahl der Fälle einem kontinuierlichen Zustrom entnommen werden konnten, liegen meist nur kurze Standzeiten (< 1 Minute) vor. Die maximale Standzeit im Kippzähler betrug eine Woche.

#### 4.2.7.2 Beprobung Betonwannenabflüsse

Die Wässer mit der Bezeichnung „Betonwannenabflüsse“ entstammen den kontrolliert verdichteten Schichten und haben möglicherweise zuvor die Oberflächenabdichtung passiert. Sie wurden in einem speziellen Kippzähler als zehnter Teil des Gesamtabflusses in einer PET-Flasche gesammelt. Es konnte wöchentlich beprobt werden<sup>2</sup>.

#### 4.2.7.3 Belastbarkeit der ermittelten $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte

Eine längere Standzeit aufgefangener Wässer in den unterirdischen Bauwerken führt möglicherweise zu Fraktionierungsprozessen durch Verdunstung. Die Belastbarkeit der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte wurde exemplarisch am Entnahmepunkt „Betonwanne“ überprüft. Vier Proben eines  $^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Standards wurden in unverschlossenen Weithalsflaschen an der Beprobungsstelle „Betonwanne“ zur Verdunstung aufgestellt und wöchentlich beprobt. Die mögliche Verdunstungsmodifikation des Standards wurde so über einen Zeitraum von 31 Tagen beobachtet (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

---

<sup>2</sup> Die Entnahmestellen „lateraler Abfluss“ und „Betonwannenabfluss“ können nur unter besonderen Sicherheitsvorkehrungen beprobt werden. Deponiegas dringt in die Schächte ein in denen sich die Probenahmestellen befinden. Eine Gassicherung mit Belüftung der Schächte war für jede Beprobung unerlässlich.

Tab. 4.2 Modifikation des  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  -Standards über einen Zeitraum von 31 Tagen

Standzeit	0 Tage	7 Tage	14 Tage	20 Tage	31 Tage
$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ [‰]	-7,6	-7,5	-7,4	-7,5	-7,3

Innerhalb einer Woche veränderte sich der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  -Wert nicht signifikant.

In der maximalen Standzeit von 31 Tagen jedoch erhöhten sich die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  -Werte signifikant von ursprünglich -7,6 auf -7,3‰ (TTEST,  $\alpha = 0,05$ ).

Da die durchgeführten Beprobungen im wöchentlichen Rhythmus erfolgten und die Proben somit nie länger als eine Woche exponiert waren, sind sie keiner signifikanten Veränderung durch Verdunstung ausgesetzt gewesen. Diese Überprüfung ist auf den Entnahmestandort „laterale Abflüsse“ übertragbar, da an ihm vergleichbare Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) herrschen.

#### 4.2.7.4 Isotopengeochemische Analytik

Die isotopengeochemische Analytik erfolgte im Labor des Lehrstuhls für Sediment- und Isotopengeologie am Institut für Geologie, Mineralogie und Geophysik der Ruhr-Universität Bochum. Die Bestimmung der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  -Werte basiert auf der von [EPS-TEIN und MAYEDA 1953] beschriebenen Äquilibrierung der Wasserprobe mit  $\text{CO}_2$ . Der temperaturabhängige Austausch zwischen dem quantitativ dominierenden Sauerstoff des Probenwassers und demjenigen des Gases über die gelösten  $\text{CO}_2$ -Spezies bis zur Gleichgewichtseinstellung ist die Grundlage dieser Technik. Nach der Überschichtung einer 10 ml großen Wasserprobe mit  $\text{CO}_2$  erfolgte über Nacht die Äquilibrierung in einem abgeschlossenen Reaktionsgefäß unter ständigem Rühren bei 25 °C. Das überstehende  $\text{CO}_2$  konnte anschließend an einer Vakuumdestillationsanlage kryogen von  $\text{H}_2\text{O}$  und nicht kondensierbaren Gasen getrennt werden.

Das Isotopenverhältnis  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  des aus der beschriebenen Präparationstechnik resultierenden Messgases  $\text{CO}_2$  wurde offline an einem Massenspektrometer der Firma Finnigan MAT Delta S bestimmt [SCHULTE 1998].

Aus dem gemessenen  $\delta^{18}\text{O}_{\text{CO}_2}$  -Wert ergibt sich über Korrektur mit dem für die Gleichgewichtseinstellung zwischen  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  bei 25 °C gültigen Fraktionierungsfaktor  $\alpha = 1,0412$  [O'NEIL et al. 1975 zit. in FAURE 1986] der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  -Wert.

Als interner Standard für die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  -Messungen wurde  $\text{H}_2\text{O}_{\text{demin}}$  genutzt. Die Standardabweichung dieses Standards beträgt  $\pm 0,1\text{‰}$ .

#### 4.2.7.5 Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP)

Die Isotope Hydrology Section (Abteilung für Isotopenhydrologie) des Department of Nuclear Applications (Amtes für nukleare Anwendungen) der IAEA betreibt seit

mehreren Jahren ISOHIS das Isotopenhydrologie–Informationssystem (Isotope Hydrology Information System).

ISOHIS ermöglicht den Zugriff auf Niederschlagsanalysedaten von weltweit betriebenen Messstationen. Es werden monatliche Niederschlagsmischproben gesammelt und deren Deuterium- ( $^2\text{H}$ ), Tritium- ( $^3\text{H}$ ) und Sauerstoff-18 ( $^{18}\text{O}$ )-Werte bestimmt. GNIP macht diese Analysewerte über eine Datenbank im Internet verfügbar (<http://isohis.iaea.org>). Die Analysewerte liegen auch als Monats– und Jahresmittelwerte vor. Einzelne Messstationen werden zum Teil seit über dreißig Jahren durchgängig betrieben, so dass über GNIP ein Zugriff auf langjährige Zeitreihen möglich ist.

In Deutschland werden (bzw. wurden) Messstationen in Bad Salzuflen, Berlin, Braunschweig, Cuxhaven, Emmerich, Garmisch–Patenkirchen, Hof–Hohensaas, Hohenpreissenberg, Karlsruhe, Koblenz, Konstanz, Leipzig, Neuherberg, Regensburg, Stuttgart (Cannstatt), Trier, Wasserkuppe (Rhön), Weil am Rhein und Würzburg betrieben.

Zur überregionalen Einordnung der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Niederschläge in Castrop-Rauxel wurden diese mit der GNIP-Datenbank verglichen. Die IAEA-Messstationen Emmerich (Rhein) und Bad Salzuflen wurden als Referenzstationen ausgewählt. Sie liegen dem Untersuchungsgebiet Castrop-Rauxel von allen Messstationen am nächsten. Die Stationen wurden im Zeitraum vom 01.01.1978 bis zum 31.12.2001 betrieben. Obwohl die Messstationen nicht mehr aktiv sind, tragen die dort ermittelten langjährigen Messreihen zu einer Einordnung der Messdaten vom Standort Castrop-Rauxel bei.

## **5 Ergebnisse**

### **5.1 Computertomographische Untersuchungen**

Nach [ROGASIK 2003] können einerseits der HU-Bereich Luft führender Poren (-1000 bis -875 HU) und andererseits der Bereich hoher Dichte (z.B. Steine) (>2500 HU) eindeutig definiert werden. Eine Interpretation von -875 bis 2500 HU ist schwierig, da die Phasen (Luft, Wasser, Matrix) in diesem Bereich nicht klar abgrenzbar sind. Die Wertzunahme auf der Hounsfield-Skala entspricht einer mittleren Dichtezunahme.

Für die Dichtwirkung einer Oberflächenabdichtung sind nicht nur allein Luft führende Porensysteme relevant. Vielmehr sind die durch gezielte Manipulation geschaffenen oder gegen vorhandenen Strukturen im Boden von Bedeutung. Alle Strukturen können über deren Phasenanteile von Wasser, Luft und Matrix beschrieben werden. Die klar definierbaren Bereiche (-1000 bis -875 und 2500 bis 3000 HU) werden für alle Zylinder diskutiert. (Die dargestellten HU-Werte werden aus Gründen der Übersichtlichkeit, mit Ausnahme von -875 HU, auf Dezimalwerte auf- bzw. abgerundet). Die Probenbezeichnung „Zylinder“ bezieht sich auf die Plexiglaszylinder, in denen die Proben gewonnen wurden.

Neben Porensystemen können mittels Computertomographie auch dichte Strukturen, z. B. Aggregate, durch eine, im Vergleich zum umliegenden Material hohe Abschwächung der Strahlung visualisiert werden. Das Vorhandensein von sich wiederholenden Strukturen in bestimmten Hounsfield-Bereichen wird überprüft. Zu diesem Zweck werden auch Bereiche der Hounsfieldskala diskutiert, deren Phasenzugehörigkeit nicht eindeutig zugeordnet werden können.

Zusätzlich zu den unterschiedlichen Hounsfield-Bereichen wird die Verteilung der Dichte scheibenbezogen besprochen. Alle CT-Abbildungen sind in Pixel skaliert. Es wird das durch die Aufbereitung der im CT erzeugten Datensätze eingeschriebene Referenzprisma jedes Zylinders besprochen.

#### **5.1.1 „Zylinder A“ aus Schurf 2a (150-160 cm u. GOK)**

Am unteren linken Rand und im Zentrum des quadratischen Prismas sind Luft führende Hohlräume vorhanden (Abb. 5.1) und im Zentrum liegen abgeflachte sowie kugelförmige Strukturen vor.

Im Randbereich sind Luft führende Porensysteme durch die Probenahme entstanden, da dort Probenmasse abgebrochen ist. Eine Kontinuität der Luft führenden Porensysteme ist nicht belegbar. Luftgefüllte Makroporen liegen isoliert in der Probe

vor. Der HU-Bereich von 2500 bis 3000 HU beinhaltet Objekte hoher Dichte, wie z.B. Steine. In dieser Probe sind die sehr harten Strukturen zumeist flach und horizontal ausgerichtet (Abb. 5.1). Objekte  $>80$  Pixel bzw.  $>20$  mm sind hier vorwiegend horizontal eingeregelt, besitzen gerundete Kanten und sind der Grobkiesfraktion (gG) zuzuordnen. Die verbleibenden harten Bestandteile liegen im Fein- und Mittelkiesbereich (fG, mG) [AD-HOC-AG BODEN 2005].

Von 500 bis 1000 HU treten flächige Strukturen auf (Abb. 5.1). Diese sind an den Grenzflächen der durch die Verdichtung erzeugten Plattengefüge ((pla) [AD-HOC-AG BODEN 2005]) entstanden. Die Grenzflächen der Bodenaggregate sind rau und weisen keine glatten Oberflächen auf. Die Grenzflächen sind horizontal orientiert (z.B. Z-Achse; Scheibe 60). An den Grenzflächen ist die Dichte gegenüber dem umgebenden Material herabgesetzt.

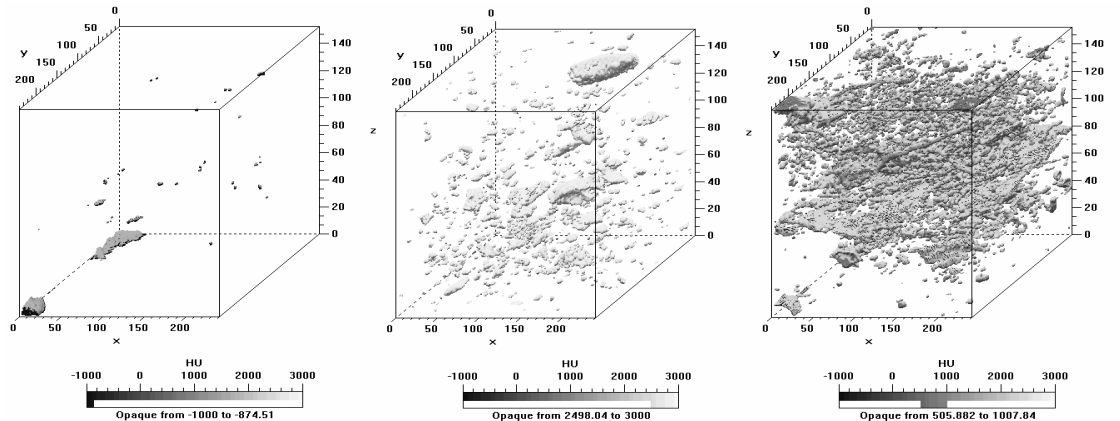


Abb. 5.1 Zylinder A; -1000 bis -875 HU (Links); 2500 bis 3000 HU (Mitte); 500 bis 1000 HU (Rechts)

Von 2000 bis 2500 HU liegen kugelförmige Aggregate in großer Anzahl vor. Diese sind in der Mehrzahl klein ( $<25$  Pixel), wobei einzelne Aggregate  $>50$  Pixel sind.

Überzüge von Härtingen (engl. coatings) treten im mittleren Probenbereich als Hohlformen auf. Während der Verdichtung ist Material an Widerlagern (z.B. Steine) verdichtet worden und hat so eine höhere Dichte als das sie umgebende Material erreicht. Von 2000 bis 2500 HU liegen kugelförmige Aggregate in großer Anzahl vor. Diese sind in der Mehrzahl klein ( $<25$  Pixel), wobei einzelne Aggregate  $>50$  Pixel sind (Abb. 5.2).

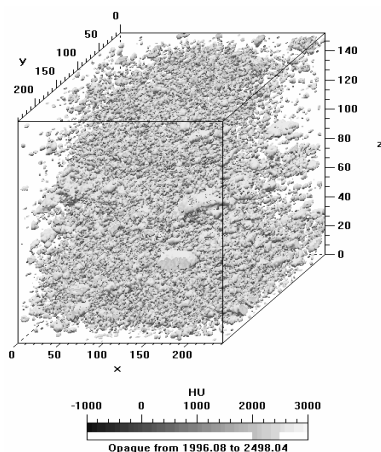


Abb. 5.2 Zylinder A; 2000 bis 2500 HU



Überzüge von Härtlingen (engl. coatings) treten im mittleren Probenbereich als Hohlformen auf. Während der Verdichtung ist Material an Widerlagern (z.B. Steine) verdichtet worden und hat so eine höhere Dichte als das sie umgebende Material erreicht.

Die nachfolgend dargestellten Dichtewerte sind für alle Zylinder berechnet worden. Sie werden in Abhängigkeit zur Entnahmetiefe und zugehöriger Scheibe (Dicke: 0,625 mm) abgebildet. Die Gleichmäßigkeit der Verdichtungsarbeit kann so beurteilt werden.

Die mittlere Dichte, die Standardabweichung und die Schichten, die die Minimal- und Maximaldichte in den einzelnen Zylindern aufweisen, werden diskutiert und mögliche Ursachen für Dichteab- und Dichtezunahme begründet. Analog zur in-situ Lagerung werden die Zylinder mit der Probenoberseite zuerst (Scheibe 1) dargestellt.

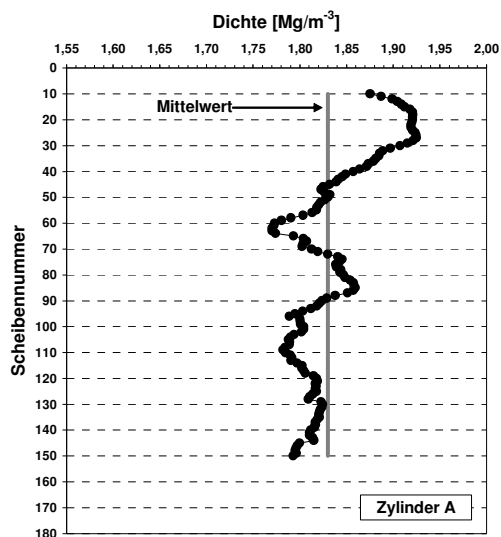


Abb. 5.3 Dichte ( $\rho_b$ ) Zylinder A

Die Dichte ist an der Oberseite der Probe etwas höher und im Bereich ab Scheibe 95 gleich bleibend hoch. Da es sich um die erste Probenahmeebene handelt, könnte diese durch den Bagger im oberen Bereich verdichtet worden sein.

Der Skelettanteil von Scheibe 20 (Abb. 5.4) wird hell abgebildet. Die Probenmasse erscheint gemasert. Die Maserung ist feingliedrig und vorwiegend heller als das umgebende Material. Die Maserung bildet hochdichte Bereiche ab und ist für die Dichte der Scheibe maßgeblich. Sie wurde durch die mechanische Verdichtungsarbeit mit der Schafffußwalze erzeugt.

Auf der linken Bildseite von Scheibe 62 (Abb. 5.4) liegt eine Bruchstruktur. Diese ist teils hohl mit geringem Luftanteil. Die Dichte wird durch den Luftschluss herabge-

Zylinder A ist von Scheibe 1 bis Scheibe 10 durch Probenahmeeffekte beeinflusst (). Die Scheiben 1-10 gehen nicht in die weitere Analyse ein. Das Dichtemaximum ( $1,92 \text{ g/cm}^3$ ) weist Scheibe 20 und das Minimum ( $1,77 \text{ g/cm}^3$ ) Scheibe 62 auf. Die mittlere Dichte beträgt  $1,83 \text{ g/cm}^3$  mit einer Standardabweichung von  $0,04 \text{ g/cm}^3$ . Der Verdichtungsgrad ist als hoch ( $1,6$  bis  $<1,8 \text{ g/cm}^3$ ) bzw. sehr hoch ( $\geq 1,8 \text{ g/cm}^3$ ) zu kennzeichnen [AD-HOC-AG BODEN 2005].

setzt. In Zylinder A weist diese Probe die geringste Dichte auf. In Scheibe 85 zeichnen sich Skelettanteile und Risse ab (Abb. 5.4). Die Risse sind zu einem geringen Teil Luft führend. Helle dargestellte Skelettanteile werden von dunkleren, weniger verdichteten Arealen umgeben.

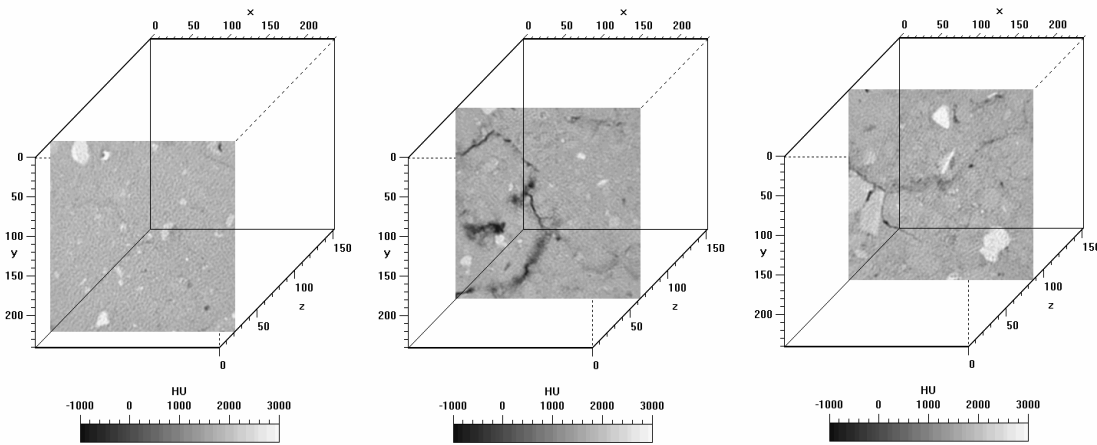
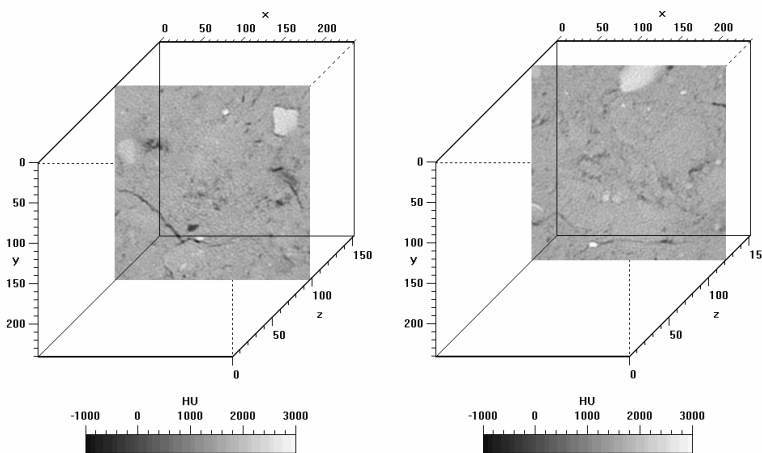


Abb. 5.4 Scheibe 20;  $\rho_b = 1,92 \text{ g/cm}^3$  (Links); Scheibe 62;  $\rho_b = 1,77 \text{ g/cm}^3$  (Mitte); Scheibe 85;  $\rho_b = 1,86 \text{ g/cm}^3$  (Rechts)

Hell hervorgehobene Aggregatstrukturen (Abb. 5.5) bilden die Grundmatrix der Scheibe 101. Zusätzlich finden sich isolierte fingerförmige, weniger dichte Strukturen. Der Großteil dieser Strukturen liegt im Mittel im HU-Bereich um 0.

Am oberen Rand von Scheibe 120 wird eine harte Struktur hell abgebildet (Abb. 5.5). Es verlaufen linienförmige Strukturen mit einer Dichte um 0 HU durch die Probe. Diese Struktur ist zum Zentrum der Probe hin ausgerichtet. Es handelt sich wahrscheinlich um am Rand des Probenbehälters entstandene Störungen, welche sich in



Richtung Zentrum der Probe fortgesetzt haben.

Die gesamte Probe (Zylinder A) kann auf Grund einer Standardabweichung von  $0,04 \text{ g/cm}^3$  und einem Dichtemittelwert von  $1,86 \text{ g/cm}^3$  als einheitlich sehr hoch verdichtet gekennzeichnet werden (Abb. 5.3).

Abb. 5.5 Scheibe 101;  $\rho_b = 1,80 \text{ g/cm}^3$  (Links); Scheibe 120;  $\rho_b = 1,82 \text{ g/cm}^3$  (Rechts)

Es sind keine durchgängigen Luft führenden Makroporensysteme vorhanden. Die Schafffußwalze hat in der kvS hoch verdichtete Untereinheiten (Aggregate) geschaffen. Zusätzlich ist die Ausprägung eines durch die Verdichtungsarbeit entstandenen Plattengefüges belegbar. Die Skelettanteile sind durch die Verdichtungsarbeit größtenteils horizontal eingeregelt worden.

Alle Abbildungen zu Zylinder A finden sich zusätzlich im Anhang unter 5.1.1 in großformatigerer Ausführung. Zusätzlich zur Scheibe aus dem quadratischen Prisma, welche für die Dichtediskussion verwendet wurde, wurde für alle diskutierten Scheiben ein vollständiger Querschnitt zu Übersichtszwecken hinzugefügt.

### 5.1.2 „Zylinder B“ aus Schurf 2a (150-160 cm u. GOK)

Im HU-Bereich von  $-1000$  bis  $-875$  HU sind flächige, aus der Horizontalen leicht zum Zentrum verkippte Bruchstrukturen vorhanden (Abb. 5.6). Es ist kein zusammenhängendes Luft führendes Makroporensystem vorhanden. Die Störungen an der Innenseite des Entnahmegefäßes sind durch die Probenahme entstanden. Die Ausprägung harter Strukturen (2500 bis 3000 HU) ist gegenüber Zylinder A leicht erhöht (Abb. 5.6). Mehrere Objekte ( $>50$  Pixel) liegen in horizontaler Ausrichtung vor. Die Grobbodenfraktion ist vorwiegend abgerundet und so der Kiesfraktion (G) zuzuordnen. Das größte Objekt (am unteren Rand in der Mitte) misst ca. 100 Pixel (25 mm = Grobkiesfraktion (gG)) in der x- Achsen Ausrichtung. Größere Objekte sind in diesem Ausschnitt nicht vorhanden, so dass die restlichen Grobbodenbestandteile der Mittel- und Feinkiesfraktion zuzuschlagen sind [AD-HOC-AG BODEN 2005].

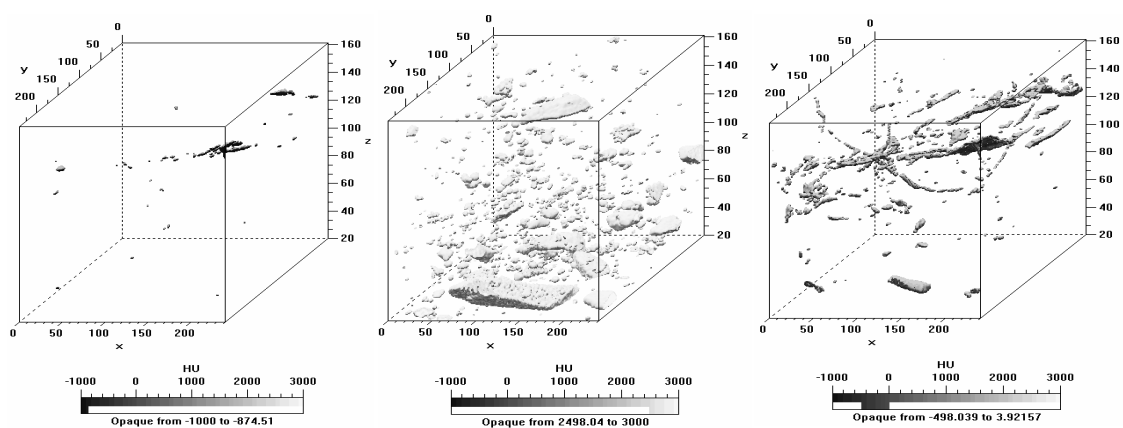


Abb. 5.6 Zylinder B;  $-1000$  bis  $-875$  (Links);  $2500$  bis  $3000$  HU (Mitte);  $-500$  bis  $0$  HU (Rechts)

Im HU-Bereich von  $-500$  bis  $0$  HU werden Strukturen, resultierend aus Störungen des Randbereichs der Probe (Abb. 5.6), fortgeführt. Die flächige Ausprägung ist ein Indiz dafür, dass diese Brüche entlang struktureller Schwächezonen, wie sie sich z.B. an

Grenzen von Plattengefügen finden, entstanden sind. Zusätzlich ist ein Netz röhrenförmiger Strukturen vorhanden. Die Strukturen vergrößern sich, erweitert man den HU-Bereich von  $-500$  bis  $0$  HU um den HU-Bereich von  $0$  bis  $500$  HU (Abb. 5.7).

Im Bereich von  $-500$  bis  $500$  HU werden sie von dichteren Bereichen umschlossen. Im oberen Drittel der Probe liegen zusammenhängende flächige Strukturen vor, welche räumlich leicht aus der horizontalen Ebene verkippt und um ca.  $25-30^\circ$  geneigt sind. Sie zeigen Grenzflächen des Plattengefüges oder Störungen im Probenkörper an. Von  $500$  bis  $1000$  HU (Abb. 5.7) nehmen flächige Strukturen zu. Es verläuft ein „Querriegel“ horizontal durch die Probe hindurch. Dieser bildet eine Grenzfläche von Bodenaggregaten ab, welche leicht gewölbt erscheint und kugelförmige, raue Strukturen aufweist. Im HU-Bereich von  $1000$  bis  $1500$  HU ist ein Einschnitt im Außenbereich der Probe zu erkennen (vorne, rechts oben) an den sich die flächigen Strukturen anschließen (Abb. 5.7). Dieser Einschnitt ist Luft führend und verläuft von außen nach innen entlang einer Plattengefügegrenzfläche. Er resultiert entweder aus einer Verschleppung von Probenmaterial oder aus dem Verkanten des Zylinders während der Probenahme.

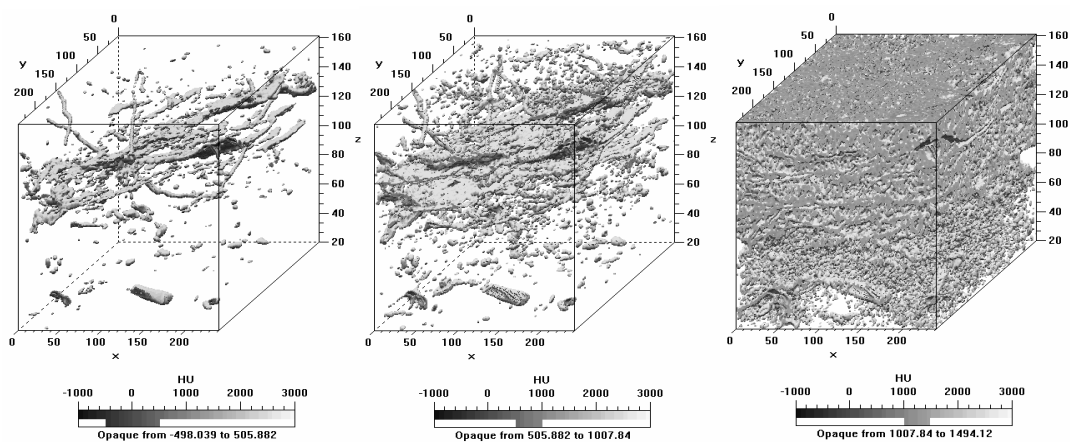
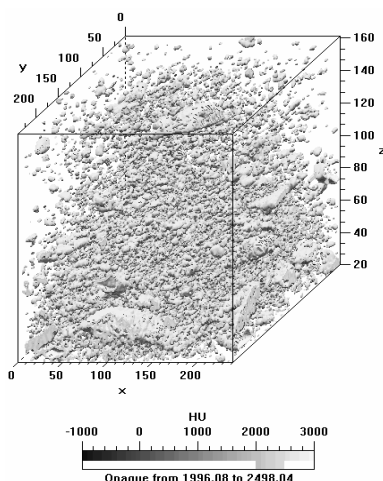


Abb. 5.7 Zylinder B;  $-500$  bis  $500$  HU (Links);  $500$  bis  $1000$  HU (Mitte);  $1000$  bis  $1500$  HU (Rechts)



Von  $2000$  bis  $2500$  HU treten kugelförmige Aggregate in großer Zahl auf (Abb. 5.8). Es sind ferner horizontal orientierte rechteckige Strukturen zu erkennen. Diese sind teilweise als coatings ausgebildet (untere Bildmitte).

Abb. 5.8 Zylinder B;  $2000$  bis  $2500$  HU

Zylinder B wurde aus der gleichen Schicht, 140 cm unter Geländeoberkante (u. GOK), wie Zylinder A gewonnen. Im Vergleich zu Zylinder A ist die mittlere Dichte mit  $1,74 \text{ g/cm}^3$  um  $0,06 \text{ g/cm}^3$  geringer. Die Standardabweichung ist mit  $0,1 \text{ g/cm}^3$  mehr als doppelt so hoch.

Auffällig ist die mit der zunehmenden Entnahmetiefe abnehmende Dichte (Abb. 5.9) vom Maximum ( $1,91 \text{ g/cm}^3$ ; Scheibe 27) bis auf  $1,61 \text{ g/cm}^3$  (Scheibe 129). Die Dichteverteilung in der Probe ist heterogen. Der Verdichtungsgrad ist als hoch ( $1,6$  bis  $<1,8 \text{ g/cm}^3$ ) bzw. sehr hoch ( $\geq 1,8 \text{ g/cm}^3$ ) zu kennzeichnen [AD-HOC-AG BODEN 2005].

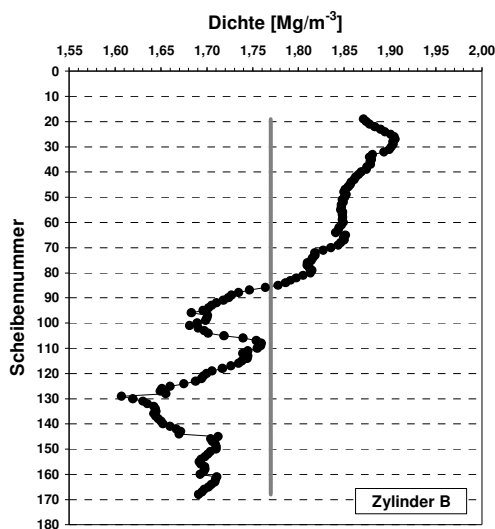


Abb. 5.9 Dichte ( $\rho_b$ ) Zylinder B

Im oberen rechten Bereich der Scheibe 27 (Abb. 5.10) ist eine runde Struktur geringer Dichte (ca. 0 HU) vorhanden. Der Bodenskelettanteil liegt vorwiegend in der Probenmitte, wobei im unteren Teil der Probe dicht gepackte Aggregate vorliegen. Der maximale Dichtewert in Zylinder B, Scheibe 27 ist aus dem hohen Skelettanteil und den vielen Aggregaten abzuleiten.

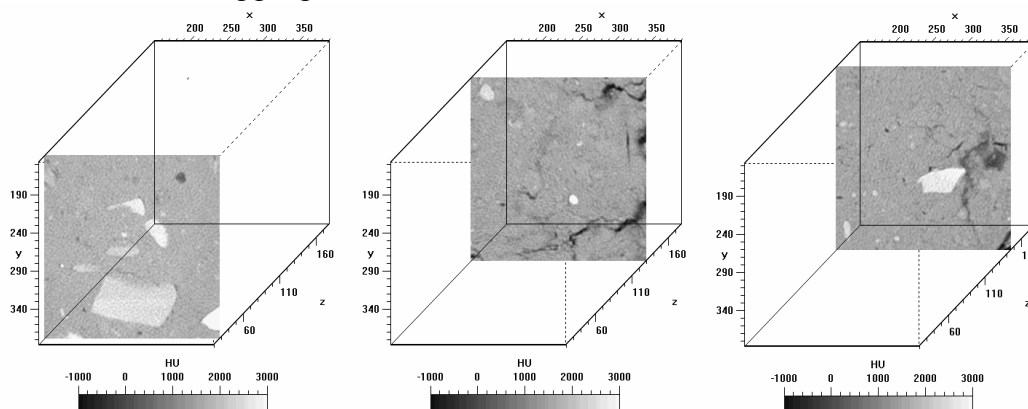


Abb. 5.10 Scheibe 27;  $\rho_b = 1,91 \text{ g/cm}^3$  (Links), Scheibe 129;  $\rho_b = 1,61 \text{ g/cm}^3$  (Mitte); Scheibe 145;  $\rho_b = 1,71 \text{ g/cm}^3$  (Rechts)

Scheibe 129 (Abb. 5.10) weist am rechten Rand Luft führende Hohlräume auf, welche sich fingerförmig ins Zentrum der Probe ausdehnen. Diese Störungen sind bereits in Abb. 5.6 als Luft führende Hohlräume dokumentiert. Scheibe 129 weist die geringste Dichte des Zylinders auf. Die weiße Struktur im Zentrum der Probe ist ein durch ein Metallstück verursachtes Messartefakt.

An eine harte, helle Struktur im Zentrum von Scheibe 145 schließt sich ein halbkreisförmiger Bereich an, welcher sich um ein am Rand liegendes Zentrum ausdehnt. Diese weniger dichte Struktur besteht aus einem Phasengemisch, welches im HU-Wertebereich von Wasser (0 HU) liegt.

Im unteren rechten Bildabschnitt finden sich HU-Bereiche, welche Luft führend sind. Die Störungen sind auf Randeffekte der Probenentnahme zurückzuführen.

Die geringere Dichte von Zylinder B, im Vergleich zu Zylinder A, wird durch das Vorhandensein mehrerer, durch die Probenentnahme entstandener Störungen hervorgerufen. Diese liegen im HU-Wertebereich von 0 HU.

Es wird deutlich, dass nur in den oberen Schichten eine hohe Dichte belegbar ist. Diese ist auf dichte Aggregatstrukturen zurückzuführen. Mit zunehmender Entnahmetiefe verringert sich die Aggregatanzahl und die Dichte nimmt ab.

Alle Abbildungen zu Zylinder B finden sich zusätzlich im Anhang unter 5.1.2 in großformatigerer Ausführung.

### 5.1.3 „Zylinder C“ aus Schurf 2a (160-170 cm u. GOK)

Zylinder C wurde in einer Teufe von 150 cm unter Geländeoberkante entnommen (Abb. 5.11). Im unteren und oberen Bereich der Probe sind von -1000 bis -875 HU Hohlräume zu erkennen. Probenmaterial ist während der Entnahme abgebrochen und fehlt am unteren und oberen Rand. Vertikal kontinuierliche, Luft führende Makroporen sind nicht vorhanden.

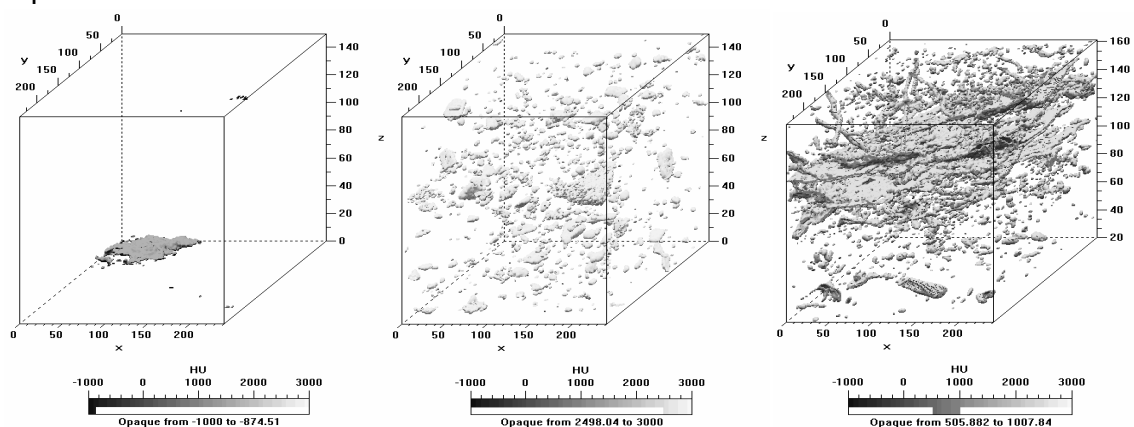


Abb. 5.11 Zylinder C; -1000 bis -875 HU (Links); 2500 bis 3000 HU (Mitte); 500 bis 1000 HU (Rechts)

Zwischen 2500 und 3000 HU (Abb. 5.11) werden horizontal ausgerichtete, flache Objekte dargestellt. Vereinzelt plattige Strukturen sind aus der Horizontalen verkippt worden. Es liegen auch vertikal orientierte Strukturen vor, wobei horizontale Strukturen dominieren und auf die Verdichtungsarbeit und Ausprägung eines Plattengefüges zurückzuführen sind. Runde Strukturen sind deutlich kleiner als plattige Strukturen. Im HU-Bereich von 500 bis 1000 (vgl. Abb. 5.7) sind räumlich begrenzte flächig ausgeprägte Strukturen zu erkennen (Abb. 5.11). Im unteren linken Drittel der Probe deutet sich der Beginn einer solchen Grenzfläche eines Plattengefüges an.

Kugelförmige Aggregate treten, wie in Zylinder A, B, in großer Anzahl im HU-Bereich von 2000 bis 2500 HU zusammen mit coatings auf (Abb. 5.12). Die Struktur ist als dicht zusammen liegend zu kennzeichnen

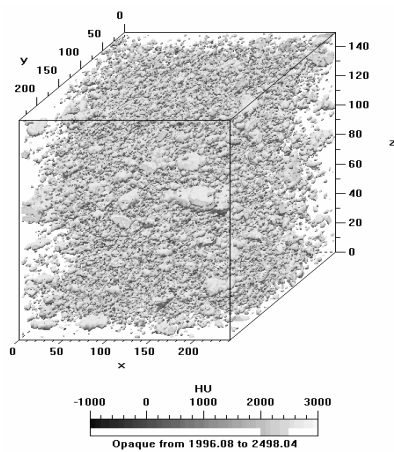


Abb. 5.12 Zylinder C; 2000 bis 2500 HU

Zylinder C wurde aus der zweiten Aufgrabungsebene an Position 2a gewonnen. Die Dichtewerte bis Scheibe 11 und ab Scheibe 145 (Abb. 5.13) werden wegen Entnahme bedingter Störungen nicht berücksichtigt.

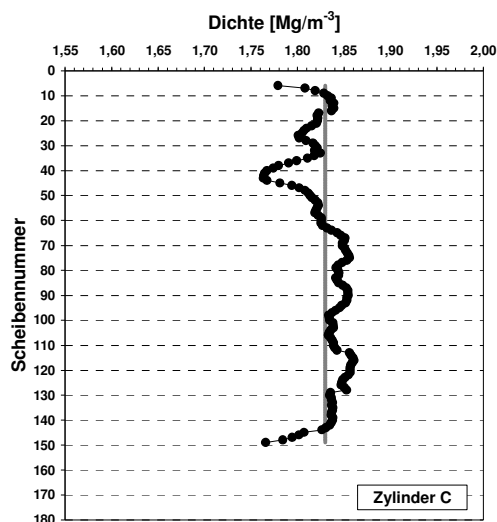


Abb. 5.13 Dichte ( $\rho_b$ ) Zylinder C

Die Verdichtung des Materials ist im Vergleich zu Zylinder A und B homogener. Die mittlere Dichte beträgt  $1,83 \text{ g/cm}^3$  (Standardabweichung  $0,02 \text{ g/cm}^3$ ).

Die Probe wurde von der Freilegung der Probenahme fläche weniger beeinflusst als die Proben A und B. Der Verdichtungsgrad ist als hoch ( $1,6$  bis  $<1,8 \text{ g/cm}^3$ ) bzw. sehr hoch ( $\geq 1,8 \text{ g/cm}^3$ ) zu kennzeichnen [AD-HOC-AG BODEN 2005].

In Schicht 42 nimmt die Dichte den Maximalwert von  $1,76 \text{ g/cm}^3$  an (Abb. 5.14). Das Material ist hier von einer Störung im Randbereich (Probenahme) beeinflusst. Aggregatstrukturen und Steine sind in der Schicht vorhanden.

Scheibe 116 erreicht in Zylinder C das Dichtemaximum von  $1,86 \text{ g/cm}^3$  (Abb. 5.14). Flächige, hell gemaserte Strukturen liegen als Resultat der Verdichtungsarbeit vor. Die Strukturen (Aggregate) sind maßgeblich verantwortlich für den hohen Verdichtungsgrad der Schicht.

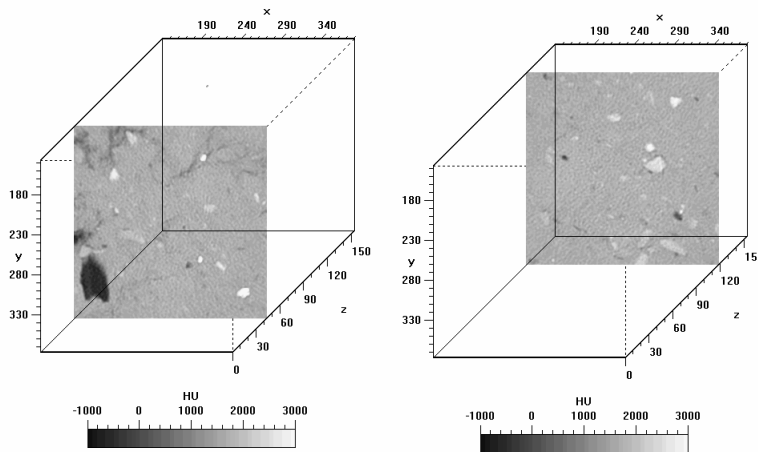


Abb. 5.14 Scheibe 42;  $\rho_b = 1,76 \text{ g/cm}^3$  (Links), Scheibe 116;  $\rho_b = 1,86 \text{ g/cm}^3$  (Rechts)

Alle Abbildungen zu Zylinder C finden sich zusätzlich im Anhang unter 5.1.3 in großformatigerer Ausführung.

#### 5.1.4 „Zylinder D“ aus Schurf 2a (185-195 cm u. GOK)

In Zylinder D sind von  $-1000$  bis  $-875$  HU keine vertikal orientierten, mit Luft gefüllten Makroporensysteme vorhanden (Abb. 5.15). Die Probe ist durch die Entnahmemethode nicht beeinflusst worden und unversehrt erhalten.

Von  $2000$  bis  $2500$  HU (Abb. 5.15, Rechts) sind in Orientierung und Größe vergleichbare Strukturen zu Abb. 5.12 ersichtlich. Plattenförmige Aggregate liegen dicht beieinander und zusätzlich ist eine Vielzahl kleiner kugelförmiger Objekte vorhanden. Eine zahlenmäßige Erhöhung von kugelförmigen und rechteckigen Aggregaten ist im Bereich von  $2000$  bis  $2500$  HU, im Vergleich zu Zylinder A, B, C, zu verzeichnen (Abb. 5.15). Kugelförmige Aggregate haben sich möglicherweise zu größeren Aggregaten im Zuge des Verdichtungsprozesses zusammengeschlossen.



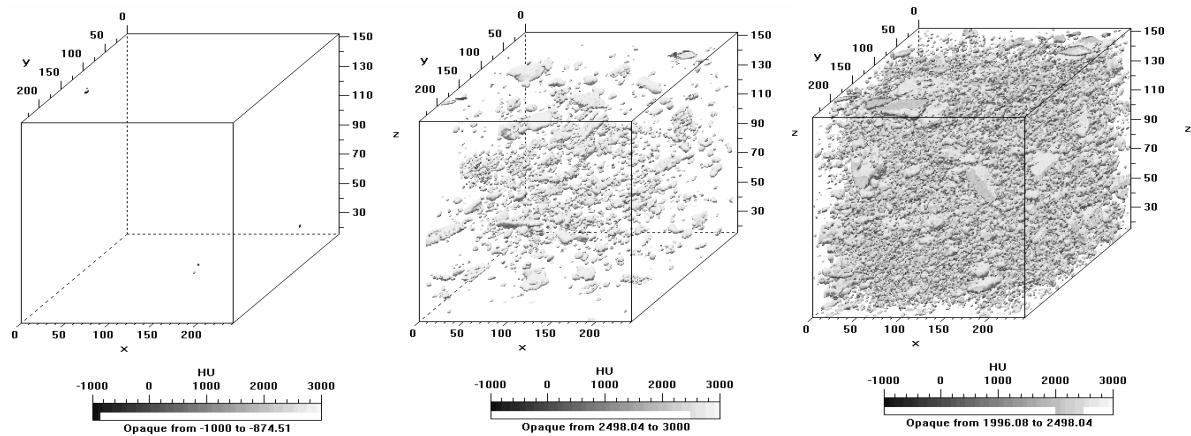


Abb. 5.15 Zylinder D; -1000 bis 0 HU (Links); 2500 bis 3000 HU (Mitte); 2000 bis 2500 HU (Rechts)

Die mittlere Dichte des Zylinders D liegt bei  $1,89 \text{ g/cm}^3$  (Standardabweichung  $0,02 \text{ g/cm}^3$ ) (Abb.5.16). Der Dichteverlauf ist homogen und endet in einem durch die Probenahme beeinflussten Bereich (ab ca. Scheibe 145). Gegenüber Probe C ist eine Dichtezunahme um  $0,1 \text{ g/cm}^3$  zu verzeichnen. Der Verdichtungsgrad ist als sehr hoch ( $\geq 1,8 \text{ g/cm}^3$ ) zu kennzeichnen [AD-HOC-AG BODEN 2005].

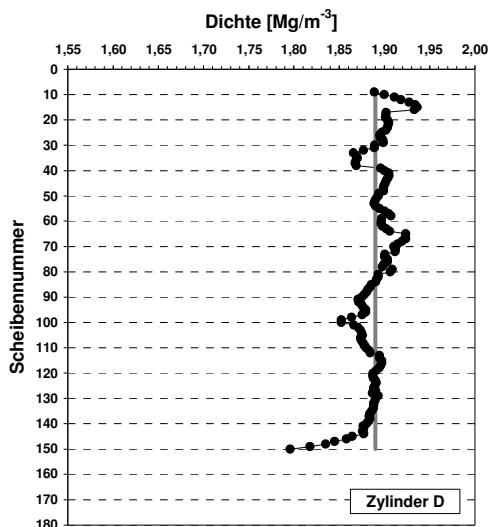


Abb. 5.16 Dichte ( $\rho_b$ ) Zylinder D

Die maximale Dichte wird in Scheibe 15 erreicht. Im direkten Vergleich zu Scheibe 115 werden weniger große harte Strukturen dargestellt. Die Probenmasse weist Aggregate auf, welche die hohe Dichte bedingen (Abb. 5.17). Auffällig an Scheibe 115 ist die hohe Anzahl sehr dichter, heller Objekte. Diese sind von einer gemaserten Struktur umrandet. Aggregate treten in Zylinder D in erhöhter Zahl auf.

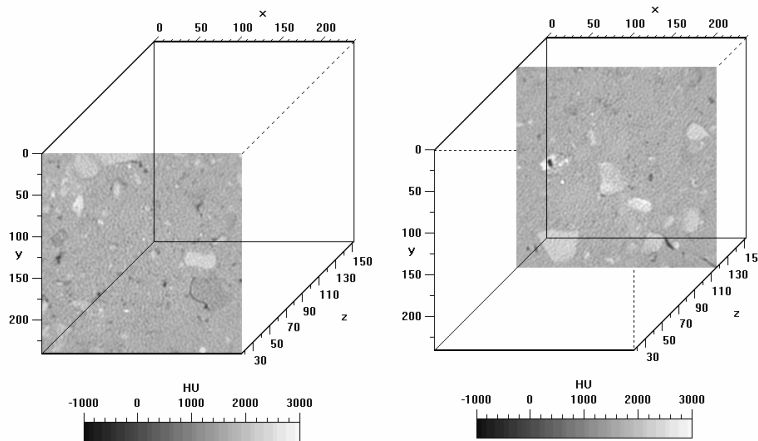


Abb. 5.17 Scheibe 15;  $\rho_b = 1,94 \text{ g/cm}^3$  (Links); Scheibe 115;  $\rho_b = 1,90 \text{ g/cm}^3$  (Rechts)

Alle Abbildungen zu Zylinder D finden sich zusätzlich im Anhang unter 5.1.4 in großformatigerer Ausführung.

### 5.1.5 „Zylinder E“ aus Schurf 2a (195-205 cm u. GOK)

Zylinder E weist von -1000 bis -875 HU keine kontinuierlich durch die Probe verlaufende, Luft führende Makroporen auf (Abb. 5.18). Die vorhandenen Makroporen im unteren und oberen Bereich der Probe resultieren aus Materialverlust während der Probenentnahme. Von -500 bis 500 HU (Abb. 5.18) sind zylinderförmige Strukturen dargestellt, welche durch die Schaffußwalze (Verkneten des Bodenmaterials) aufgerollt worden sind. Sie erreichen einen maximalen Durchmesser von 15 Pixel ( $\approx 3,75 \text{ mm}$ ). Da in den hoch verdichteten Schichten ein Bodenleben unwahrscheinlich ist, scheidet die Möglichkeit aus, diese Strukturen als Lumbricidengänge zu interpretieren. Im HU-Bereich von 2000 bis 2500 HU sind kugelförmige, eng zusammen liegende Aggregate zu erkennen, welche die hohe Dichte dieses Zylinders erklären.

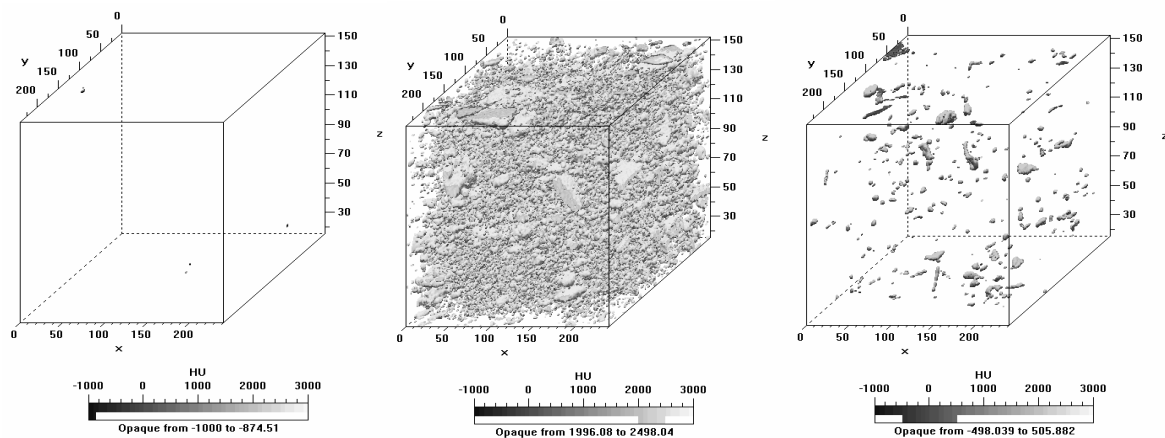
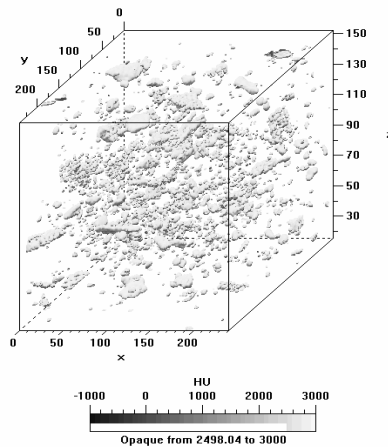


Abb. 5.18 Zylinder E; -1000 bis -875 HU (Links); 2500 bis 3000 HU (Mitte); -500 bis 500 HU (Rechts)



Der HU-Bereich von 2500 bis 3000 HU (Abb. 5.19) zeigt sehr harte Strukturen, die zum Zentrum der Probe verkippt sind. Die Strukturen sind teilweise flächig ausgeprägt. Auffällig sind viele kleine Aggregate <10 Pixel.

Abb. 5.19 Zylinder E; 2000 bis 2500 HU

Die mittlere Dichte des Zylinders E beträgt  $1,81 \text{ g/cm}^3$  (Standardabweichung  $0,02 \text{ g/cm}^3$ ) (Abb. 5.20). Die homogene Dichteverteilung in Zylinder E ist durch einen einheitlichen Bearbeitungseffekt mit der Schaffußwalze erreicht worden.

Der Verdichtungsgrad ist als hoch ( $1,6$  bis  $<1,8 \text{ g/cm}^3$ ) bzw. sehr hoch ( $\geq 1,8 \text{ g/cm}^3$ ) zu kennzeichnen [AD-HOC-AG BODEN 2005]. Der Dichteverlauf schwankt geringfügig über die Entnahmetiefe (Scheibenummer) um den arithmetischen Mittelwert. Die für diesen Zylinder erzielte Verdichtung ist als sehr einheitlich (homogen) zu kennzeichnen. Die abweichenden Dichtewerte in den Anfangs- und Endscheiben des Zylinders sind auf Probenahmeffekte zurückzuführen.

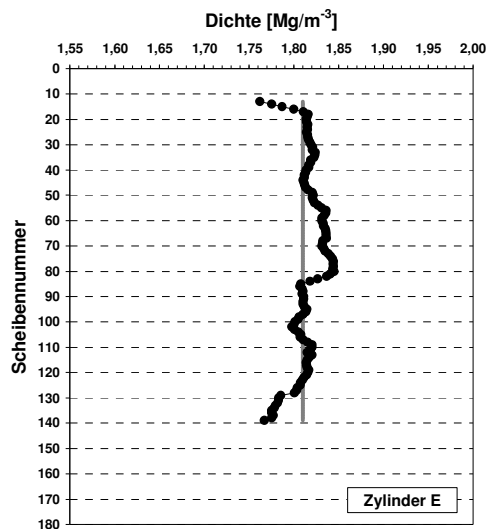


Abb. 5.20 Dichte ( $\rho_b$ ) Zylinder E

Scheibe 80 ist in Zylinder E am höchsten verdichtet ( $\rho_b = 1,85 \text{ g/cm}^3$ ) (s. Abb. 5.21). Im unteren Drittel sind zwei runde Strukturen mit maximaler Dichte (3000 HU) abgebildet. Neben diesen treten helle Aggregate und eine ausgeprägte Maserung der Scheibe hervor. Die dunklere Struktur der Scheibe 136 (Abb. 5.21) deutet auf geringere HU- bzw. Dichtewerte hin. Der Skelettanteil ist im Vergleich zu Scheibe 80 in geringer.

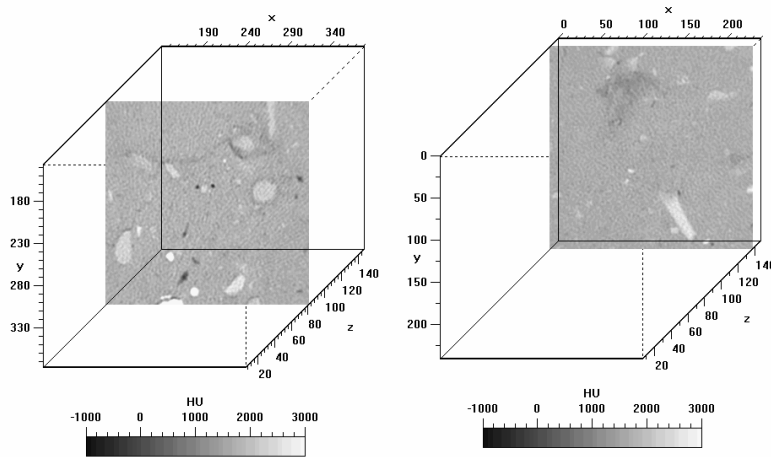


Abb. 5.21 Scheibe 80;  $\rho_b = 1,85 \text{ g/cm}^3$  (Links); Scheibe 136;  $\rho_b = 1,78 \text{ g/cm}^3$  (Rechts)

Alle Abbildungen zu Zylinder E finden sich zusätzlich im Anhang unter 5.1.5 in großformatigerer Ausführung.

### 5.1.6 „Zylinder M“ aus Schurf 2b (180-190 cm u. GOK)

Im Bereich von  $-1000$  bis  $-875$  HU (Abb. 5.22) sind keine kontinuierlichen, Luft führenden Makroporen zu finden. Hohlräume liegen im Randbereich des Ausschnitts und sind durch die Probengewinnung zu erklären.

In Zylinder M sind Steine und kugelförmige Aggregate (2500 bis 3000 HU) (Abb. 5.22) ohne eine dominante räumliche Orientierung vorhanden.

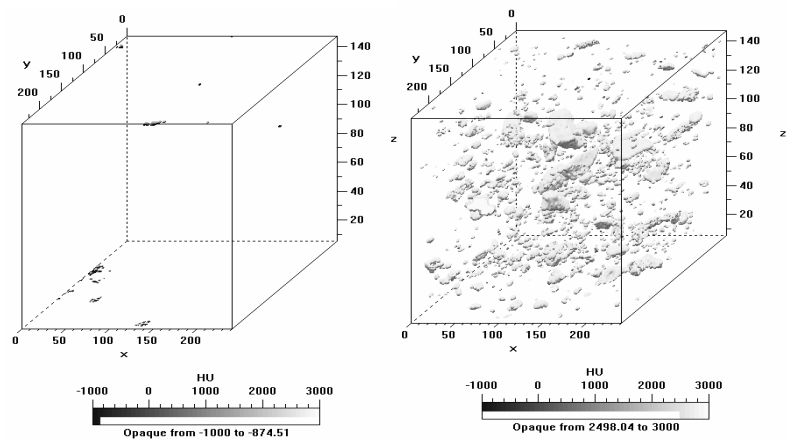


Abb. 5.22 Zylinder M;  $-1000$  bis  $-875$  HU (Links);  $2500$  bis  $3000$  HU (Rechts)

Zwischen 2000 bis 2500 HU (Abb. 5.23) erkennt man sehr kleine und hoch dichte, kugelförmige Aggregate. Von 500 bis 1000 HU (Abb. 5.23) dominieren kugelförmige und plattenförmige Aggregate in horizontaler Orientierung. Coatings sind im Bereich Vorne/Links/Unten und Rechts/Hinten vorhanden. Sie können den in Abb. 5.23 (Rechts) aufgezeigten Steinen, welche als Widerlager bei deren Entstehung fungiert haben, zugeordnet werden.

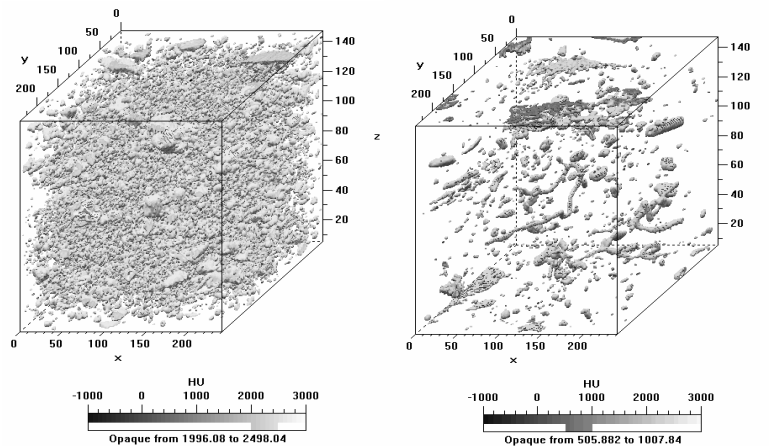


Abb. 5.23 Zylinder M; 2000 bis 2500 HU (Links); 500 bis 1000 HU (Rechts)

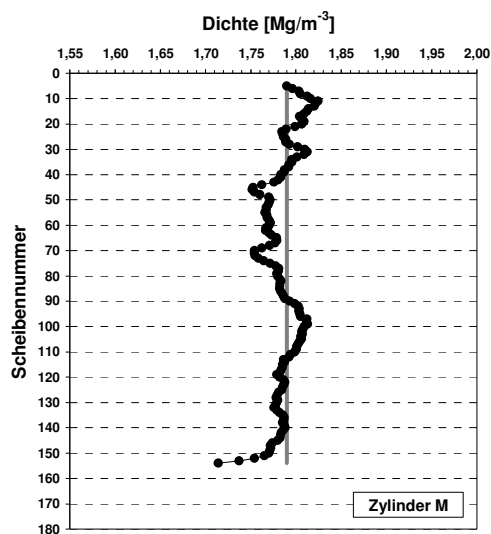


Abb. 5.24 Dichte ( $\rho_b$ ) Zylinder M

Zylinder M ist homogen verdichtet (Abb. 5.24). Die mittlere Dichte liegt bei  $1,79 \text{ g/cm}^3$  (Standardabweichung  $0,02 \text{ g/cm}^3$ ). Der Verdichtungsgrad ist als hoch ( $1,6$  bis  $<1,8 \text{ g/cm}^3$ ) bzw. sehr hoch ( $\geq 1,8 \text{ g/cm}^3$ ) zu kennzeichnen [AD-HOC-AG BODEN 2005]. Im unteren Bereich ab Scheibe 150 ist die Probe geringfügig durch die Probenentnahme beeinflusst.

Die Bereiche maximaler Dichte weisen eine große Anzahl von Aggregaten auf (Abb. 5.25). Am unteren Rand ist Scheibe 46 in zwei Arealen weniger dicht als das umgebende Material. Für diese Bereiche sind isolierte Störungen in Kombination mit dunklen ebenfalls weniger dichten Arealen maßgeblich, die den geringeren Dichtewert bedingen.

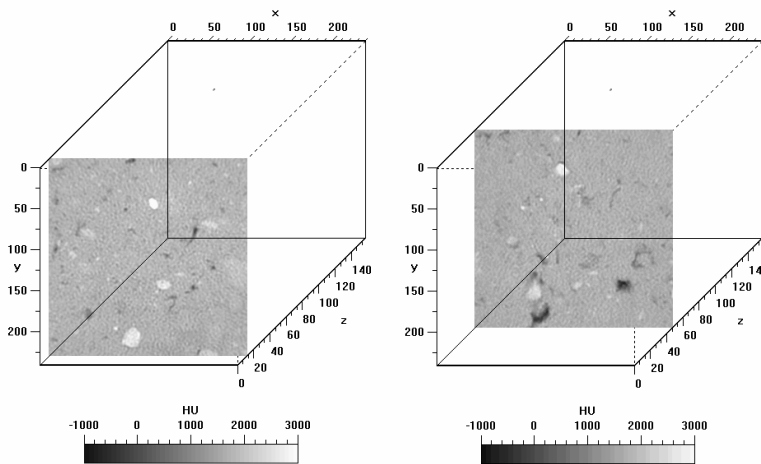


Abb. 5.25 Scheibe 11;  $\rho_b = 1,82 \text{ g/cm}^3$  (Links); Scheibe 46;  $\rho_b = 1,75 \text{ g/cm}^3$  (Rechts)

Alle Abbildungen zu Zylinder M finden sich zusätzlich im Anhang unter 5.1.6 in großformatigerer Ausführung.

### 5.1.7 „Zylinder S“ aus Schurf 2b (25-35 cm u. GOK)

Zylinder S ist als „Nullprobe“ der Kampagne aus der unverdichteten Rekultivierungsschicht (25 cm Tiefe), unmittelbar unterhalb der Gras-Krautvegetation, entnommen worden. Im Gegensatz zu allen anderen Proben ist sie nicht aus den dichtwirksamen Schichten gewonnen worden (Abb. 5.26). Das Probenmaterial ist gut durchwurzelt und Bodenfauna ist vorhanden.



Abb. 5.26 Zylinder S vor der Entnahme

Die Dichte in 30 cm Tiefe der Rekultivierungsschicht liegt bei im Mittel  $1,67 \text{ g/cm}^3$  (Stand 1999).

Die Probe ist zwar nach der Klassifikation von [AD-HOC-AG BODEN 2005] als hoch verdichtet zu kennzeichnen, jedoch liegt die Trockenrohdichte deutlich niedriger als selbst bei dem Zylinder aus der kontrolliert verdichteten Schicht mit der niedrigsten Dichte ( $1,74 \text{ g/cm}^3$ ), obwohl sie beim Einbau nicht aktiv verdichtet wurde.

In Probe S sind von  $-1000$  bis  $-875$  HU (Abb. 5.27) Luft führende kontinuierliche Makroporen zu erkennen. Ein Porenkanal verläuft vom rechten Rand des ausgeschnittenen Quaders abwärts gerichtet ins Zentrum der Probe und verlässt den abgebildeten Bereich an der Unterseite. Bei diesem Makroporenkanal handelt es sich um eine Regenwurmröhre. Der Bereich von  $2500$  bis  $3000$  HU zeigt harte Strukturen, welche vorwiegend horizontal gelagert sind (Abb. 5.27).

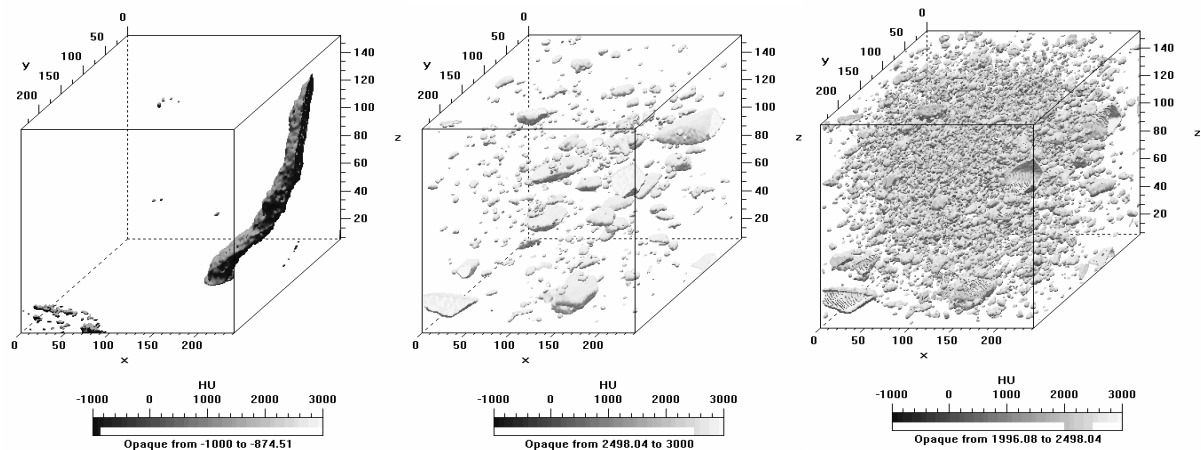


Abb. 5.27 Zylinder S;  $-1000$  bis  $-875$  HU (Links);  $2500$  bis  $3000$  HU (Mitte);  $2000$  bis  $2500$  HU (Rechts)

Von  $2000$  bis  $2500$  HU liegen vorwiegend kugelförmige Aggregate und coatings vor. In diesem Bereich sind im Gegensatz zu Proben aus den kontrolliert verdichteten Schichten fast keine horizontalen plattenförmigen Körper erkennbar.

Das Fehlen horizontaler Strukturen, welche für Plattengefüge charakteristisch sind, belegt das Fehlen der Verdichtung. Es dominieren runde Formen (Abb. 5.27).

Alle Abbildungen zu Zylinder S finden sich zusätzlich im Anhang unter 5.1.7 in großformatigerer Ausführung.

## 5.2 Gravimetrische Bodenwassergehalte

Die gravimetrische Bodenwassergehaltsbestimmung wurde nach der in Kap. 4.2.4 beschriebenen Methoden durchgeführt und nach Gl. 4.11 berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 5.28 dargestellt.

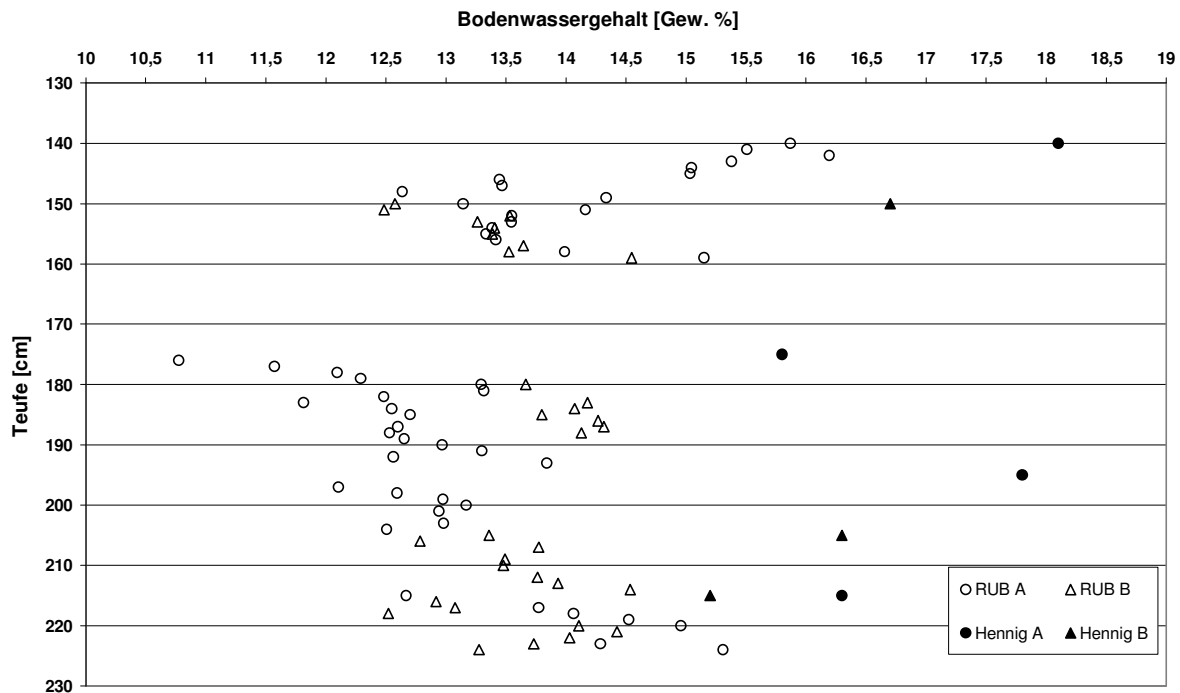


Abb. 5.28 Gravimetrischer Bodenwassergehalt 2a und 2b (RUB A = Bestimmung an der Ruhr-Universität Bochum - Entnahmestelle A; RUB B = Bestimmung an der Ruhr-Universität Bochum - Entnahmestelle B; Hennig A = Bestimmung im Erdbaulabor Dr. Hennig - Entnahmestelle A; Hennig B = Bestimmung im Erdbaulabor Dr. Hennig - Entnahmestelle B)

Der mittlere Bodenwassergehalt (ermittelt an der RUB) liegt für Schurf A bei 13,5 Gew. % (Standardabweichung: 0,6 Gew. %;  $n = 162$ ) und für Schurf B (RUB) bei 13,6 Gew. % (Standardabweichung: 0,5 Gew. %;  $n = 111$ ). Die Wertespreizung von Schurf A reicht von 10,8 bis 16,2 Gew. % und an Schurf B von 12,4 bis 15,1 Gew. %.

Vom Erdbaulabor Dr. Hennig wurde an Schurf A ( $n = 4$ ) ein mittlerer Bodenwassergehalt von 17,0 Gew. % und an Schurf B ( $n = 3$ ) von 16,1 Gew. % ermittelt. Die Anzahl der Messwerte ist im Gegensatz zu den Messungen an der Ruhr-Universität Bochum sehr gering.

Zwischen den an der Ruhr-Universität Bochum bestimmten Bodenwassergehalten und denen des Erdbaulabors Dr. Hennig ergibt sich eine mittlere Differenz von -3 Gew. %. Die Differenz beträgt maximal -5 Gew. % und minimal -1,7 Gew. %.



Diese Differenz resultiert aus den unterschiedlichen Methoden der Bodenwassergehaltsbestimmung.

Das in den kontrolliert verdichteten Schichten nachgewiesene Wasser ist wahrscheinlich nicht über Porenräume infiltriert. Es könnte sich vielmehr um Wasser handeln, welches schon vor dem Einbau des alternativen Oberflächenabdichtungssystems in der verwendeten Bodenmiete vorhanden war und ab dem Einbauzeitpunkt in den kontrolliert verdichteten Schichten konserviert wurde. Demnach würde es sich um Tot-, bzw. Haftwasser aus isoliert vorliegenden Porenräumen der kvS handeln. Diese Porenräume liegen in ihrer räumlichen Ausdehnung außerhalb der technisch bedingten Nachweisgrenze des Computertomographen, welcher nur weite Grobporen abzubilden in der Lage ist. Um die Herkunft des Wassers und die voranstehende These überprüfen zu können, kommen isotopengeochemischen Methoden zum Einsatz. Zusätzlich wurde versucht Porensysteme, welche mittels Computertomographie nicht dargestellt werden konnten, mittels dünnschliffmikroskopischen Untersuchungen nachzuweisen.

Alle gravimetrischen Wassergehalte finden sich zusätzlich im Anhang unter 5.2.

### 5.3 Dünnschliffmikroskopie

Eine zuvor für die CT-Untersuchung verwendete Probe wurde zum Zwecke der dünnschliffmikroskopischen Untersuchung präpariert. Zylinder A (s. Tab. 4.1) wurde zur Herstellung des Dünnschliffpräparates verwendet. Die Probe wurde in einer Tiefe von 175-185 cm den kontrolliert verdichteten Schichten entnommen. Sie wurde für die Dünnschliffherstellung nach dem in Kap. 4.2.4 beschriebenen Verfahren präpariert. Es konnten drei übereinander liegende Dünnschliffe (vertikal) mit der Abmessung 3·4 cm (Breite·Höhe) angefertigt werden.

Die Ergebnisse der bildanalytischen Betrachtungen wurden mit ergänzend hergestellten Dünnschliffpräparaten verglichen, um die von der CT-Analytik formulierten Aussagen zu ergänzen und zu belegen (s. Kap. 4.2.4).

Zur Auswertung wurden die Dünnschliffe auch als Übersichtsdarstellungen digitalisiert. Korrespondierend zur „in-situ“-Lagerung des Materials werden sie nacheinander von oben nach unten beschrieben.

Der Hauptbestandteil des verwendeten Materials ist Löß. Das Material der kontrolliert verdichteten Schichten entstammt verschiedenen Baugruben im Raum Dortmund und der Hellwegzone. Da das Material nicht ausschließlich einer Quelle entstammt, und zudem im Randbereich makroskopisch erkennbare Verunreinigungen nachgewiesen wurden, sollten mittels lichtmikroskopischer Betrachtung die häufigsten für Löß untypischen mineralischen Bestandteile identifiziert und exemplarisch besprochen werden.

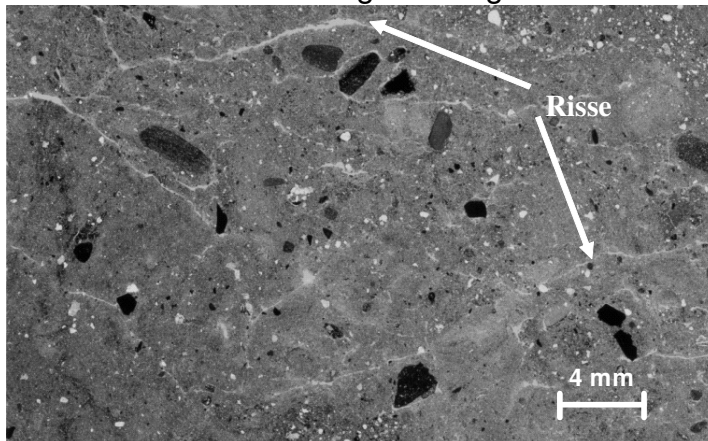
Alle Darstellung im Kapitel Dünnschliffmikroskopie finden sich zusätzlich im Anhang unter 5.3.2.

#### 5.3.1 Übersichtsdarstellungen Dünnschliffe

Die drei Schliffe setzen sich aus einer tonig/siltigen Grundmasse mit Klusten bis zu 6 mm Durchmesser zusammen, wie es für Massenstromablagerungen vom Debrisflow-Typ charakteristisch ist u. a. [FÜCHTBAUER 1988] (Abb. 5.29, Abb. 5.31). Die tonig/siltige Grundmasse mit auffällig kantigen bis splittrigen Quarzen (meist 30-40 µm) weist im Dünnschliff ein unregelmäßiges und unscharf begrenztes Helligkeitsmuster auf. Bei den Klusten können alle Rundungsgrade beobachtet werden. Der Häufigkeit nach treten folgende Typen auf: Gesteinsbruchstücke (Siltsteine, Sandsteine, Tonsteine, Kohle, Schlacke, Karbonatgesteine) und Mineral Körner (monokristalliner Quarz, polykristalliner Quarz, Glaukonit, Chert, Feldspat, Muskovit). Es ist keine Sortierung der Mineralbestandteile zu erkennen. Bestandteile

> 2 mm sind teils gerundet teils eckig, wobei eine dominante räumliche Ausrichtung nicht nachgewiesen werden kann. Die Grundmatrix ist gemasert und weist dunkle zusammenhängende Bereiche auf.

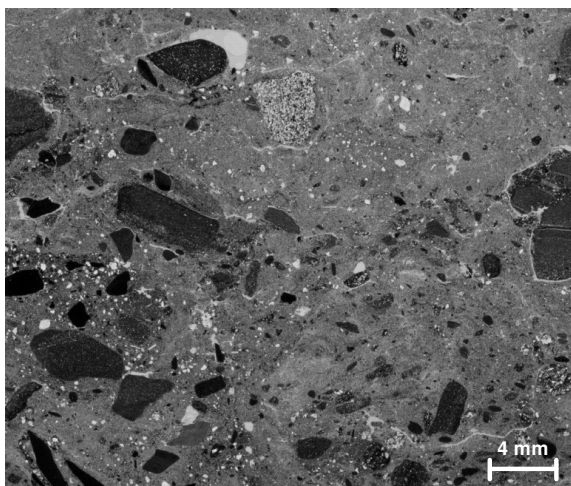
Die Gefügestruktur stellt sich im zuoberst liegenden Dünnschliff als heterogene Grundmatrix dar (Abb. 5.29). Der Dünnschliff ist von mehreren Rissen durchzogen, welche mit sudanblau getränktem Harz gefüllt sind. Diese Risse verlaufen nahezu horizontal oder in einem 45 Grad Winkel durch den Schliff und sind in ihrer jeweiligen Orientierung nahezu parallel zueinander angeordnet. Diese räumliche Ausrichtung der Risse deutet darauf hin, dass sich im Zuge der Verdichtungsarbeit im Material ein Plattengefüge mit vorwiegend subhorizontalem Verlauf ausgebildet hat. Nach [SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. 1998] entstehen Plattengefüge „als Folge von Pressungen, vor allem bei wiederholtem schnellen Wechsel der Belastung“. Die Risse zeichnen bevorzugt entlang von Schwächezonen an den deutlich zu erken-



nenden Plattengrenzen (Rissverläufe mit Pfeilen angedeutet) nach. Die Dicke der Platten liegt mit 8 bis 16 mm im von [SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P.1998] für Plattengefüge angegebenen Bereich von 1 bis 50 mm.

Abb. 5.29 Schliff 1; oben; einfach polarisiertes Licht (epL)

Schliff 2 aus der Mitte der Probenmasse besitzt einen höheren Anteil von Objekten



mit einem Durchmesser > 2 mm. An diese grenzen die vorhandenen Hohlräume unmittelbar an (). Am unteren Rand sind Objekte vertikal orientiert und im Rest der Probenmasse vorwiegend horizontal ausgerichtet. Erneut sind Risse der Probenmasse zu erkennen, die wie in Schliff 1 horizontal zueinander verlaufen und auch hier ein Plattengefüge andeuten.

Abb. 5.30 Schliff 2; Mitte; epL

Schliff 3 (Abb. 5.31) zeigt insgesamt weniger Risse als Schliff 2, obwohl im oberen Teil die Probe stärker gerissen ist. Vorhandene Hohlräume schließen sich an größere Objekte an. Durch die Bearbeitung des Materials mit der Schafffußwalze haben sich die großen Objekte durch die Grundmatrix bewegt. Diese Umlagerungs- und Verdrängungsprozesse haben am Rand von größeren Objekten Hohlräume erzeugt. In dieser Probe sind keine parallelen Rissverläufe zu erkennen.

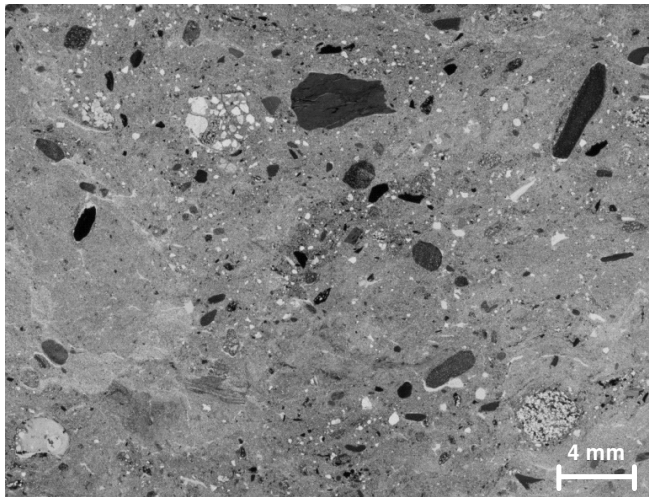


Abb. 5.31 Schliff 3; unten; epL

Die horizontale Orientierung der Gefügeschwachstellen (Plattengrenzen) in den Schliffen 1 und 2 begünstigen vertikale Sickerprozesse nicht. Die in den Proben ersichtlichen Risse können im Rahmen der Probenpräparation an den Plattengrenzen aufgetreten sein. Es können keine vertikal kontinuierlichen Rissverläufe belegt werden. Hoch verdichtete Bereiche zwischen den Plattengrenzen erschweren eine vertikale Durchsickerung.

### 5.3.2 Einordnung der mineralischen Bestandteile

Die mineralischen Bestandteile der kontrolliert verdichteten Schichten spiegeln die Geologie des Entnahmeraumes „Dortmund“ wider. Das kvS-Material ist nicht „sortenrein“. Es besteht vielmehr aus mehreren Komponenten, welche verschiedenen Erdzeitaltern zugeordnet und diskutiert werden können.

Der zum Großteil eingesetzte Lößlehm (Ut2) entstammt quartären Deckschichten der Hellwegzone und ist als entkalktes äolisches Sediment zu kennzeichnen. Diese eiszeitlichen Sedimente aus [...] mineralische[m] Staub und Feinsand bildeten [...] im Münsterland [...] fruchtbare Lößdecken [GRABERT 1998].

Zusätzlich sind Glaukonite aus Sedimentfolgen des Münsterländer Kreidebeckens im Material vorhanden. Sie werden „als Fällungsprodukt aufsteigender kalter Meeres-

ströme aufgefasst“ und sind in NRW typisch für die küstennahe Kreidefazies [GRABERT 1998]. Glaukonit ist ein K-Fe-Hydroxi-Alumosilikatmineral und entsteht in der Flachwasserzone im marinen Milieu. Im Dünnschliff (Abb. 5.32 L) ist eine dunkle umlaufende Umrandung des Glaukonits zu erkennen. Hierbei handelt es sich um Limonit als Folge der Oxidation von im Glaukonit vorkommendem  $\text{Fe}^{2+}$  [ADAMS et al. 1986]. Die Form des Glaukonits kann als angerundet mit hoher Sphärizität bezeichnet werden. Subangulare bzw. angulare Feuersteine (engl. = chert) als Sedimentationsprodukt der Oberkreide weisen eine geringe Sphärizität auf (Abb. 5.32; R).

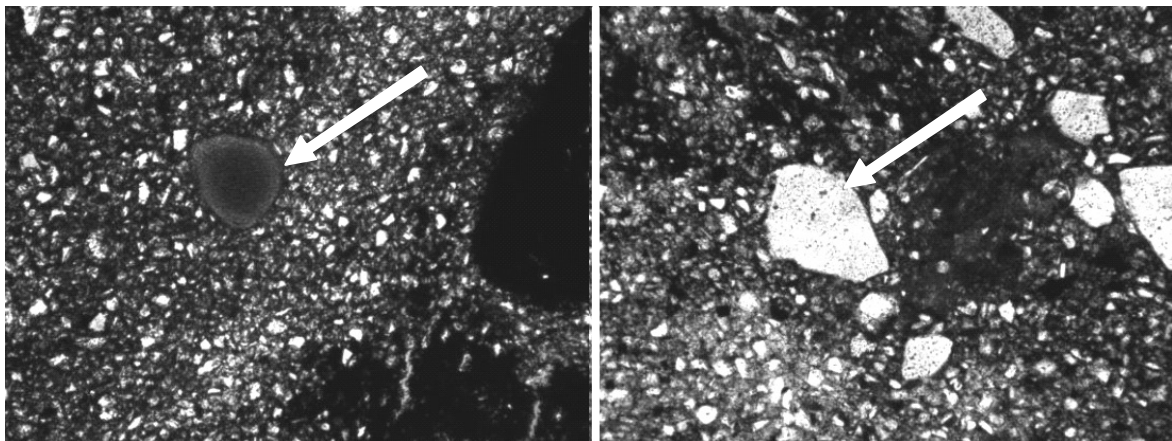


Abb. 5.32 Glaukonit (Links = L); Feuerstein (Rechts = R); epL (Maßstab untere Seite - Einzelbild - ca. 0,5 mm)

Karbonische Sandsteinklasten, Tonsteinklasten und Kohlestücke, wahrscheinlich aus dem Oberkarbon (Westfal A, B), finden sich in Abb. 5.33.

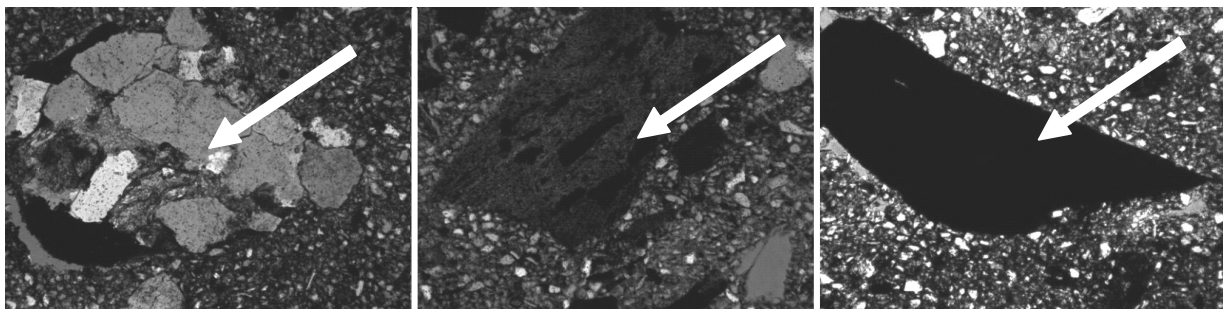


Abb. 5.33 Sandsteinklast (L); Tonstein mit Kohle-Detritus (Mitte = M); Kohle (R); epL (Maßstab untere Seite - Einzelbild - ca. 1 mm)

Bei der Materialentnahme könnten aus dem Unterkarbon flözleere Schichten der Kulm-Fazies angeschnitten worden sein. Diese entstammen einer synorogenen Sedimentation am Nordrand, des in der variszischen Gebirgsbildungsphase aufgeworfenen, Rheinischen Schiefergebirges [GRABERT 1998] und sind durch Karbonatklasten belegt (Abb. 5.34).

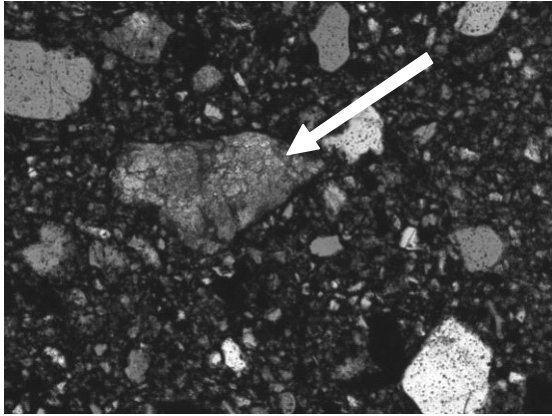


Abb. 5.34 Karbonatklast; epL (Maßstab untere Seite - ca. 1 mm)

Sie könnten allerdings auch umgelagertes Massenstrommaterial (Mittel-/Oberdevon) von der Nordflanke des Remscheid-Altenaer Sattels darstellen. Die Karbonatklasten sind als angular mit geringer Sphärizität zu kennzeichnen.

Im Material sind mikrokline Feldspäte, monokristalline Quarze und polykristalline Quarze vorhanden (Abb. 5.35).

Der mikrokline Feldspat zeigt eine typische Zwillingsgitterung und kann als gerundet mit geringer Sphärizität beschrieben werden. Der monokristalline Quarz ist hingegen gut gerundet und besitzt eine hohe Sphärizität. Im polykristallinen Quarz verläuft eine suturierte Grenze zwischen den Kristallindividuen. Dieser Grenzverlauf ist typisch für Quarze metamorpher Herkunft [u. a. ADAMS et al. 1986]. Mögliche Ursprungsgebiete dieser metamorphen Quarze stellen die mitteldeutsche Kristallinschwelle, das Rheinische Schiefergebirge und die quartärzeitlichen Ablagerungen der norddeutschen Vereisung dar.

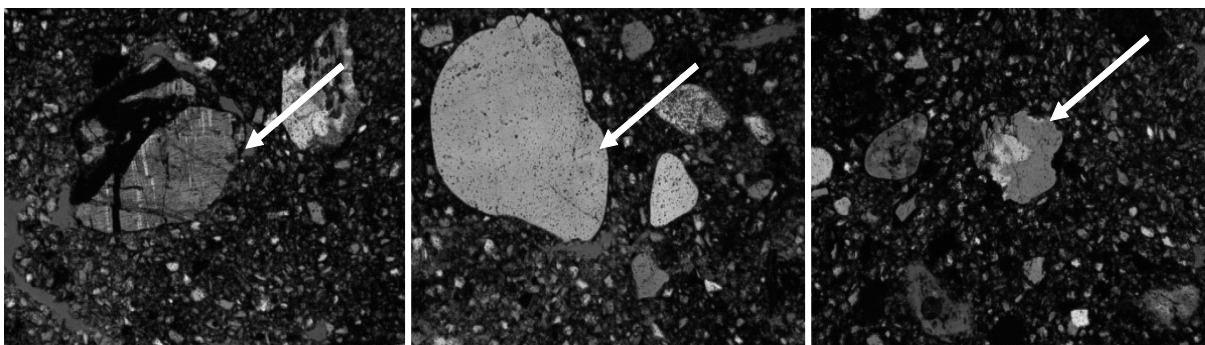


Abb. 5.35 Mikrokliner Feldspat (L), monokristalliner Quarz (M), polykristalliner Quarz (R); gekreuzte Nicols epL (Maßstab untere Seite - Einzelbild - ca. 1 mm)

Als anthropogene Bemengung enthalten die kontrolliert verdichteten Schichten Anteile von Schlacken (Abb. 5.36). Diese stammen wahrscheinlich aus metallurgischen Industrieprozessen und sind als von Industrieflächen stammender Aushub in die kvS gelangt. Eine weitere Möglichkeit ist, wie es vielfach nach dem 2. Weltkrieg

praktiziert wurde, Schlacken von Industriestandorten zur Nivellierung der Bodenoberfläche zu nutzen. Gleiches könnte für die Kohlebestandteile gelten, wobei es ebenfalls möglich ist, dass diese dem Karbon entstammen.

Für die Herstellung der kvS wurden Materialien verwendet, welche sich einerseits vom geologischen Untergrund und andererseits von anthropogenen Überprägungen (Bautätigkeit, Bodenerosion, Kohlenstaubbimmission) des Entnahmeraumes Dortmund ableiten lassen.

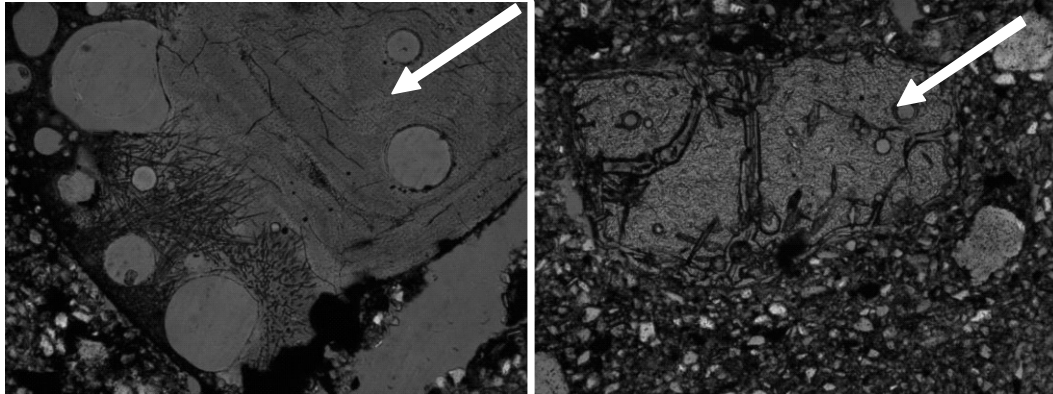
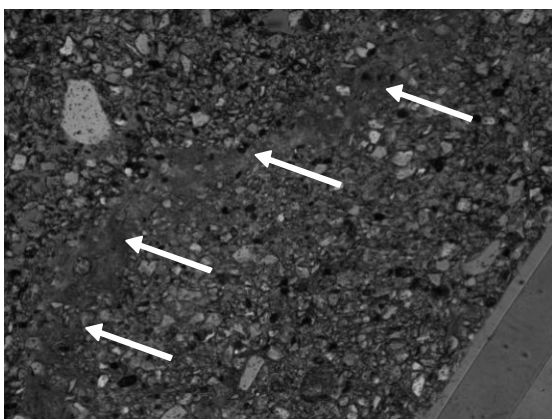


Abb. 5.36 Schlacke I (L); Schlacke II (R); epL (Maßstab untere Seite - Einzelbild - ca. 0,5 mm)

So wurden im Material auch Ziegelbruch, Bauschuttreste, Glasscherben sowie Baumschnittreste und größere Schlackenstücke gefunden. Diese makroskopischen Inhomogenitäten des Materials setzen sich auf der mikroskopischen Betrachtungsebene durch die unterschiedliche Herkunft der Mineralbestandteile fort.

### 5.3.3 Einfluss der Verdichtung auf die Gefügestruktur

Modifikationen der Gefügestruktur sind in Abbildung 5.37 an einer durch die Verdichtung verwürgten tonreichen Partie, deren Verlauf durch Pfeile angedeutet wird, zu erkennen. Es liegt kein gleichförmiger linearer Verlauf vor. Das Band verläuft wellenförmig. Ferner ist die Struktur durch den Eintrag von Mineralkörnern aus dem umliegenden Material in die tonreiche Partie



gekennzeichnet. Die Verformung und der Materialeintrag in die tonreiche Partie resultieren wahrscheinlich unmittelbar aus der Verdichtungsarbeit.

Abb. 5.37 Verwürgte tonreiche Partie, Pfeile markieren den Verlauf; epL (Maßstab untere Seite - ca. 0,5 mm)

## 5.4 Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ )

Aus verschiedenen Entnahmetiefen (Standorte 2a, 2b) wurden ungestörte Bodenproben für die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes ( $k_f$ -Wert) entnommen. Die Ergebnisse sind in Abb. 5.38 dargestellt.

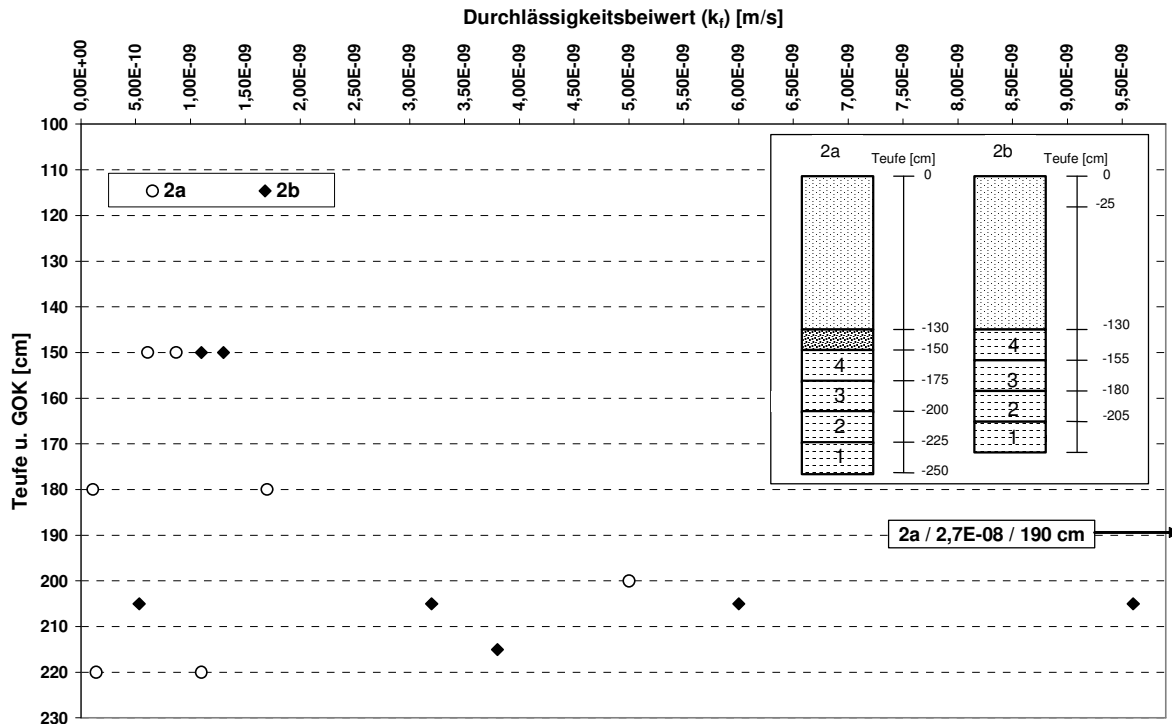


Abb. 5.38 Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ -Werte) der kontrolliert verdichteten Schichten (kvS) der Deponieversuchflächen (2a, 2b) in Castrop-Rauxel (Versuchsanlagenaufbau, schematisch) (RKS = Rekultivierungsschicht; SKG = Schmelzkammergranulat) unter Geländeoberkante (GOK)

Anhand der Entnahmetiefe konnten die Proben den einzelnen kontrolliert verdichteten Schichten zugewiesen werden.

Auf Versuchsfläche 2a wurden für die vierte kontrolliert verdichtete Schicht (kvS)  $k_f$ -Werte von  $6,1 \cdot 10^{-10}$  m/s und  $8,7 \cdot 10^{-10}$  m/s bestimmt. Die dritte kvS wies  $1,1 \cdot 10^{-10}$  m/s und  $1,7 \cdot 10^{-9}$  m/s und die zweite  $5,0 \cdot 10^{-9}$  m/s und  $2,7 \cdot 10^{-8}$  m/s als Durchlässigkeitsbeiwerte auf. Die erste kvS (2a) zeigt die Durchlässigkeitsbeiwerte  $1,4 \cdot 10^{-10}$  m/s und  $1,1 \cdot 10^{-9}$  m/s. Im Übergangsbereich der 2. zur 1. Lage auf Versuchsstation 2a wurde ein  $k_f$ -Wert von  $6,2 \cdot 10^{-10}$  m/s ermittelt.

Die vierte kvS auf Versuchsfläche 2b weist  $k_f$ -Werte von  $1,1 \cdot 10^{-9}$  und  $1,3 \cdot 10^{-9}$  auf und die erste kvS  $k_f$ -Werte von  $5,3 \cdot 10^{-10}$  m/s,  $3,2 \cdot 10^{-9}$  m/s,  $3,8 \cdot 10^{-9}$  m/s,  $6,0 \cdot 10^{-9}$  m/s und  $9,6 \cdot 10^{-9}$ .

Den im Jahr 2006 ermittelten  $k_f$ -Werten werden zum Vergleich  $k_f$ -Werte gegenübergestellt, welche für die kvS unmittelbar nach der Errichtung der Versuchsanlage im



Jahr 1999 bestimmt wurden (Tab. 5.1). Für einzelne kvS-Lagen werden, wie von [ZEPP 2004] empfohlen, arithmetische Mittel und für die gesamte kvS das harmonische Mittel berechnet.

Tab. 5.1 *Arithmetisches Mittel der kf-Werte der Einzellagen der kontrolliert verdichteten Schichten 1999 [ZEPP 2000; verändert]*

2a			2b	
k <sub>f</sub> (m/s)			k <sub>f</sub> (m/s)	
Jahr	1999	2006	1999	2006
4. Lage	$5,2 \cdot 10^{-09}$	$7,4 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^{-09}$	$1,2 \cdot 10^{-09}$
3. Lage	$3,8 \cdot 10^{-10}$	$9,1 \cdot 10^{-10}$	$2,8 \cdot 10^{-10}$	
2. Lage	$2,3 \cdot 10^{-10}$	$1,6 \cdot 10^{-08}$	$3,1 \cdot 10^{-10}$	
1. Lage	$6,3 \cdot 10^{-10}$		$7,3 \cdot 10^{-09}$	$4,6 \cdot 10^{-09}$

Die arithmetischen Mittelwerte dieser kf-Werte liegen sowohl oberhalb, als auch unterhalb des in der Handlungsempfehlung [ZEPP 2004] geforderten Grenzwertes von  $5,0 \cdot 10^{-9}$ . Im Vergleich zu 2006 nehmen die Werte an Station 2a für die Lagen drei und vier zu, und für Lage eins ab. An Station 2b nehmen die Durchlässigkeitsbeiwerte für die entsprechenden Lagen eins und vier ab.

Der mittlere harmonische Durchlässigkeitsbeiwert der kvS nimmt von  $1,5 \cdot 10^{-9}$  m/s (1999) über  $1,0 \cdot 10^{-9}$  m/s (2001) [ZEPP, H., HENNIG, A. 2002] auf bis  $6,0 \cdot 10^{-10}$  m/s (2006) ab.

Nach [ZEPP 2004] ist beim Aufbau eines alternativen Oberflächenabdichtungssystems eine Überschreitung des Durchlässigkeitsbeiwertes für die gesamte kvS von  $1,0 \cdot 10^{-9}$  (harmonisches Mittel) und von  $5,0 \cdot 10^{-9}$  (arithmetisches Mittel) für die Einzellagen der kvS zu vermeiden.

Im Zeitraum von 1998 bis 2006 befinden sich alle Durchlässigkeitsbeiwerte, bis auf  $1,6 \cdot 10^{-8}$  m/s (Versuchsfläche 2a; Lage 2), für das alternative mineralische Oberflächenabdichtungssystem im gesetzlich vorgeschriebenen Rahmen (Grenzwert:  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s) [BUNDESREGIERUNG 1993]. Der unkonforme Einzelwert kann möglicherweise auf probenahmebedingte Störungen zurückgeführt werden.

Die Verdichtung der auf der Deponie Castrop-Rauxel eingesetzten Materialien wurde unter sehr feuchten Umständen durchgeführt. Wetterbedingt musste die Erstellung der Dichtschichten unterbrochen werden. Das Material wurde mit keinem Stabilisator vermischt und der Einbauwassergehalt konnte nicht kontrolliert werden. Dennoch

erzielt das alternative Oberflächenabdichtungssystem eine sehr gute Funktionstüchtigkeit und Dauerhaftigkeit.

Trotz sehr niedriger Wasserleitfähigkeiten wird kontinuierlich Wasser in den Betonwannen registriert. Um die Herkunft dieses Wassers zu klären, sind isotopengeochemische Methoden eingesetzt worden.

Die in diesem Kapitel diskutierten Darstellungen der Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ ) finden sich zusätzlich im Anhang unter 5.4.

## 5.5 Isotopengeochemische Untersuchungen

### 5.5.1 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte

Für die vorliegende Arbeit wurden insgesamt 143  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte bestimmt. In Abb. 5.39 sind die Messwerte je Entnahmestelle zu ungewichteten Mittelwerten zusammengefasst worden. Zusätzlich sind die Standardabweichung sowie Minimal- und Maximalwerte aufgetragen. Die Standardabweichungen sind für jeden Mittelwert als Fehlerindikator (positiv; negativ) eingefügt. Minimal- und Maximalwerte sind abgebildet und die Messwertanzahl angegeben.

Der Gesamtniederschlag ( $N_{\text{ges}}$ ) wurde in Niederschlag aus dem

- hydrologischen Sommerhalbjahr bei wöchentlicher Beprobung (SHJ-W),
- hydrologischen Winterhalbjahr bei wöchentlicher Beprobung (WHJ-W),
- hydrologischen Winterhalbjahr bei täglicher Beprobung (WHJ-T) und
- hydrologischen Sommerhalbjahr bei täglicher Beprobung (SHJ-T) unterteilt.

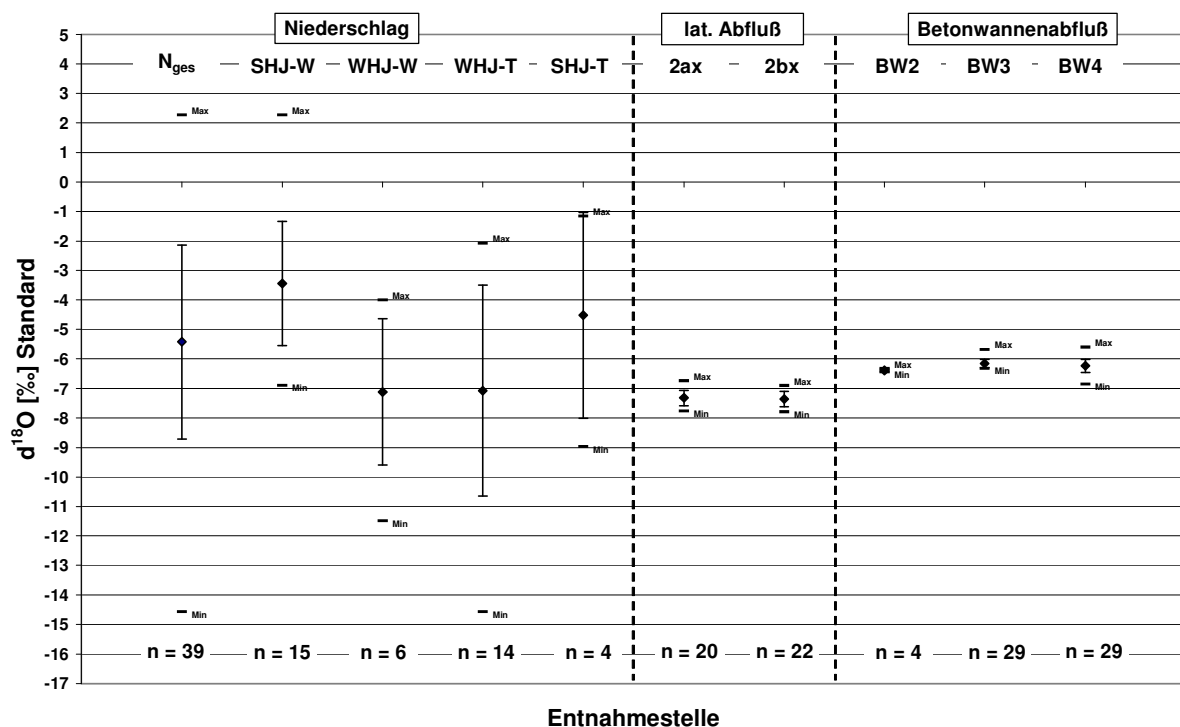


Abb. 5.39 Mittelwerte, Standardabweichungen und Minimal- und Maximalwerte der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Verhältnisse unterschiedlicher Entnahmestellen der Deponie Castrop-Rauxel, 2ax, 2bx = lateraler Abfluss (lateraler Abfluss); BW2 = Betonwannenabfluss 2b, BW3, BW4 = Betonwannenabfluss 2a (weitere Erklärungen der Abkürzungen im Text)

- Niederschlag

Die mittleren  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der hydrologischen Sommerhalbjahre (SHJ) sind höher, als die der hydrologischen Winterhalbjahre (WHJ) (Abb. 5.39). Die Veränderung des

Niederschlagsbeprobungsintervalls im Sommerhalbjahr wöchentlich (W) zu täglich (T) führt zu veränderten  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Mittelwerten. Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Niederschläge im SHJ sind abhängig vom Probenahmeintervall und unterscheiden sich voneinander um 1‰ (Tab. 5.2). Bei kürzeren Standzeiten nehmen die Fraktionierungsprozesse durch Verdunstung einen geringeren Einfluss auf die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte und negativere  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte sind die Folge. Im hydrologischen Winterhalbjahr werden die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Mittelwerte vom Wechsel des Beprobungsintervalls nicht beeinflusst. Die Standardabweichungen bei wöchentlicher Probenahme unterscheiden sich um 0,4‰ voneinander. Bei täglicher Probenahme sind sie nahezu gleich. Die Spreizungen der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte WHJ-W und WHJ-T sind gegenüber SHJ- und SHJ- größer.

Tab. 5.2 Statistische Parameter für die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Niederschläge im hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahr bei wechselndem Beprobungsintervall

	SHJ-W	SHJ-T	WHJ-W	WHJ-T
Mittelwert	-3,4‰	-4,5‰	-7,1‰	-7,1‰
Standardabweichung	2,1‰	3,5‰	2,5‰	3,6‰
Spreizung	2,3 bis -6,9‰	-1,2 bis -9,0‰	-4,0 bis -11,5‰	-2,1 bis -14,6‰

Niedrigere Temperaturen im Winterhalbjahr sind für den Erhalt „originaler“  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte günstiger. Die WHJ-T Proben weisen  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte auf, welche weiter gespreizt sind als WHJ-W und SHJ-W. Die Spreizung der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte im Winter kann durch die natürliche Variationsbreite der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Niederschläge erklärt werden. Die Variationsbreite der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte verringert sich im Sommerhalbjahr. Im Sommerhalbjahr übt die Verdunstungsfractionierung während der maximalen Standzeit von einer Woche einen stärkeren Einfluss auf das Messergebnis aus als im Winterhalbjahr.

Für SHJ-W Proben liegt der niedrigste  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Wert bei -6,9‰. Der maximale  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Wert für SHJ-W wurde mit 2,1‰ bestimmt. Ein positiver  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Wert ist für Niederschläge untypisch. Es muss als ein durch Verdunstungsprozesse erzeugter Extremwert eingeordnet werden. Betrachtet man die Wertespreizung einmal ohne diesen Extremwert, reicht diese von -1,8‰ bis -6,9‰.

Ein ähnlicher Effekt auf die Wertespreizung kann im hydrologischen Sommerhalbjahr 2006 beobachtet werden. Bei täglicher Messung engt sich im Vergleich zum vorangegangenen hydrologischen Winterhalbjahr die Wertespreizung im hydrologischen Sommerhalbjahr deutlich ein.

### 5.5.2 Vergleich der für Castrop-Rauxel ermittelten $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte mit Zeitreihen der IAEA

Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Niederschläge vom Standort Castrop-Rauxel werden mit langjährigen Messreihen aus der GNIP-Datenbank der IAEA verglichen. Als Referenzstandorte wurden auf Grund der geographischen Nähe Emmerich (EM) und Bad Salzuflen (BS) ausgewählt (s. Kap. 4.2.7).

Die IAEA bestimmte die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte in Emmerich und Bad Salzuflen aus Monatsmischproben. Die genutzten Daten entstammen dem Zeitraum vom 01.01.1978 bis 31.12.2001. Die Messkampagnen der IAEA wurden an diesen Standorten 2001 beendet.

In Abb. 5.40 werden die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Niederschläge aus Castrop-Rauxel nach Niederschlagshöhen gewichtet und zu Monatsmittelwerten zusammengefasst aufgetragen. Die Zusammenfassung zu Monatsmittelwerten dient dazu, die Werte aus Castrop-Rauxel besser mit den Monatsmittelwerten der IAEA vergleichen zu können. Die stärkere Gewichtung größerer Niederschlagshöhen berücksichtigt die geringere Anfälligkeit größerer Niederschlagshöhen im Vergleich zu geringeren Niederschlagshöhen gegenüber klimatischen Einflüssen wie z. B. Verdunstung.

Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Station Emmerich verlaufen auf höherem Niveau als die der Station Bad Salzuflen (Abb. 5.40). Dieser Verlauf der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte aus Bad Salzuflen lässt sich aus der geographischen Lage der Messstation herleiten. Mit einer ca. 170 km größeren Entfernung zur Küste ist sie stärker vom Kontinentalitätseffekt beeinflusst als die Station Emmerich (Rhein).

Die Station Castrop-Rauxel liegt annähernd in der Mitte zwischen den Messstationen Emmerich und Bad Salzuflen. Auf Grund der geografischen Lage, und der damit verbundenen Ausprägung des Kontinentalitätseffektes, sollten die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte am Standort Castrop-Rauxel theoretisch zwischen den  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werten der IAEA-Messstationen liegen. Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte in Castrop-Rauxel verlaufen von Juni bis Dezember auf einem höheren Niveau, welches durch den sommerlichen Verdunstungseinfluss auf die Probe hervorgerufen wird.

Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte an den IAEA-Standorten weisen einen jahreszeitlichen Gang, mit einem Maximum im hydrologischen Sommerhalbjahr (SHJ) und einem Minimum im hydrologischen Winterhalbjahr (WHJ) (jahreszeitlicher Effekt), auf. Auch für den Standort Castrop-Rauxel ist ein jahreszeitlicher Gang mit einem Maximalwert von -1,8‰ und einem Minimalwert von -9,0‰ zu erkennen.

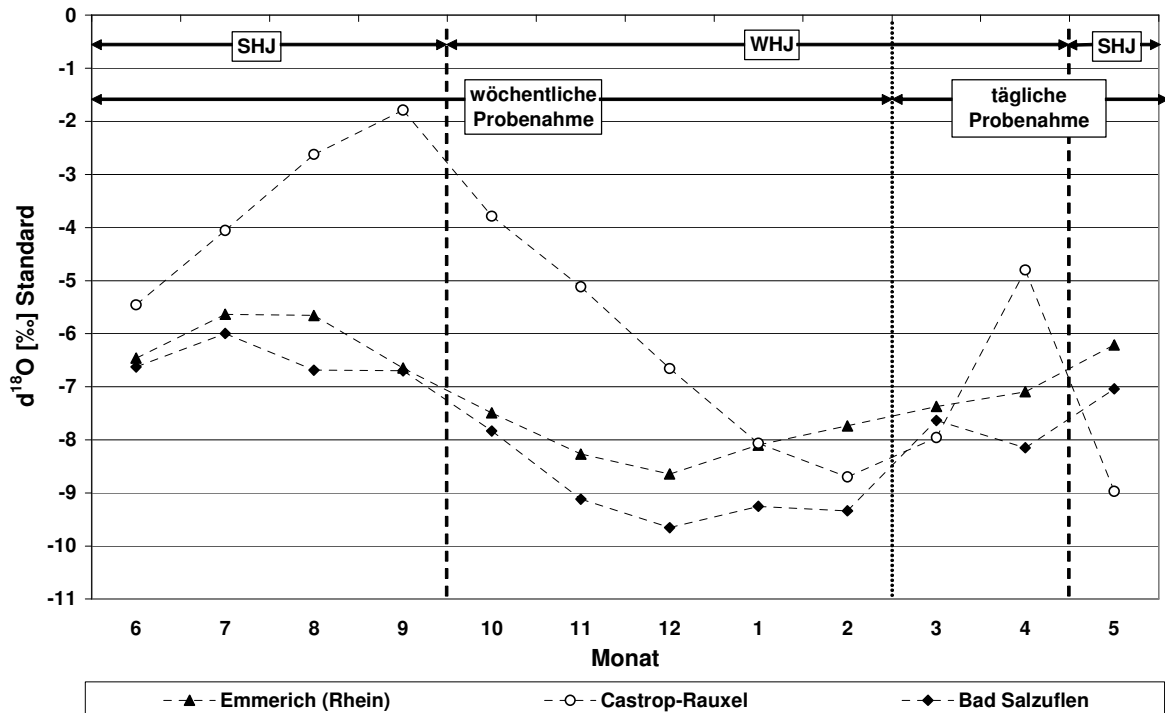


Abb. 5.40  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  \*Werte der Niederschläge zum Standard von Emmerich (EM), Bad Salzuflen (BS) und Castrop-Rauxel (CR) im Vergleich (Castrop-Rauxel gewichtet nach Niederschlagshöhe, IAEA (Monatsmittelwerte 1978-2001); hydrologisches Sommerhalbjahr (SHJ); hydrologisches Winterhalbjahr (WHJ); wöchentliche, tägliche Probenahme

Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Station Castrop-Rauxel verlaufen näherungsweise parallel zu den IAEA-Vergleichsstationen. Der Unterschied von Castrop-Rauxel zu den Referenzstationen wird von Juni bis September zunehmend größer und nimmt zum Winterhalbjahr wieder ab. Im Vergleich zu den IAEA-Daten (Juli/August) wird das Maximum mit einem Monat Verzögerung (September) erreicht.

Von Januar bis März ist eine „Mittelposition“ der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte von Castrop-Rauxel in Ansätzen zu erkennen. Im April und Mai verlaufen die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte sowohl oberhalb, als auch unterhalb der IAEA Referenzwerte. Eine Veränderung des höheren Verlaufs der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte wird durch die Verkürzung des Probenahmeintervalls und die damit verbundene Verkürzung der Verdunstungsdauer des Probenmaterials hervorgerufen.

Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte in Castrop-Rauxel sind durch den sommerlichen Verdunstungseinfluss auf das Probenmaterial erhöht, wobei niedrigere Temperaturen im Winter eine Annäherung der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte an die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der IAEA-Referenzstationen bedingen. Trotz des systematischen Fehlers, der durch den sommerlichen Verdunstungseinfluss bedingt ist, belegt der Jahresgang der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte auch für Castrop-Rauxel eine plausible Dynamik.

Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Niederschläge aus Castrop-Rauxel werden den  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Referenzstationen ungewichtet gegenübergestellt (Abb. 5.41). Durch die langjährige Beobachtung der IAEA an den Standorten können Aussagen zum möglichen Verlauf langjähriger  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte von Niederschlägen im Untersuchungsgebiet formuliert werden.

In Abb. 5.41 werden die mittleren monatlichen  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Stationen Bad Salzuflen, Emmerich (Rhein) zusammen mit einzelnen ungewichteten  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werten der Niederschläge aus Castrop-Rauxel dargestellt. Die von den IAEA Mittelwerten subtrahierten bzw. zu dem Mittelwert addierten Standardabweichungen wurden miteinander verbunden und bilden zwei „Bänder“.

Den  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werten innerhalb der Bänder kann ein größeres Vertrauen entgegen gebracht werden, da sie innerhalb der möglichen Variationsbreite der für den Untersuchungsraum typischen  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte liegen. Aus diesem Grund soll der zwischen der positiven und negativen Standardabweichung der IAEA- $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte liegende Bereich als „Vertrauensband“ bezeichnet werden.

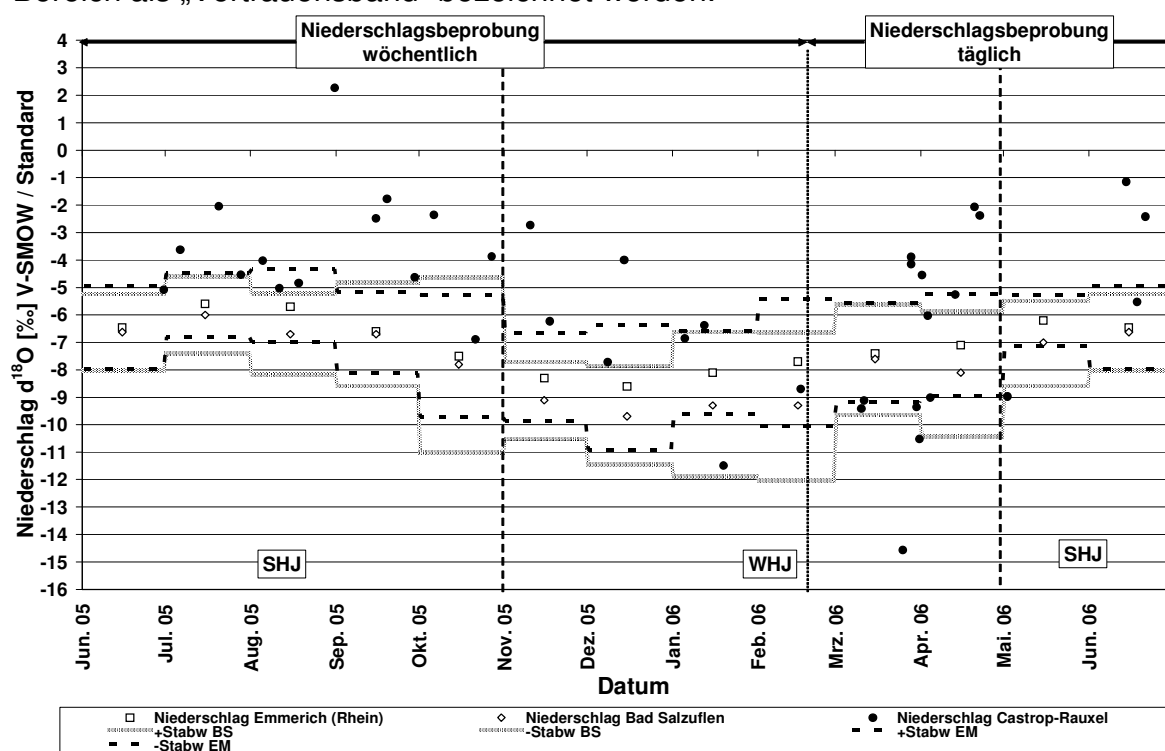


Abb. 5.41 Niederschlags- $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte Castrop-Rauxel im Vergleich zu  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Monatsmittelwerten der IAEA; Positiv- und Negativabweichungen der Standardabweichung vom Mittelwert der Monatsmischproben (pos.) = positiv; neg. = negativ; BS=Bad Salzuflen, EM=Emmerich (Rhein)

Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Niederschläge aus Castrop-Rauxel liegen sowohl innerhalb als auch außerhalb dieser Bänder. Von insgesamt 39 Proben liegen 17 (ca. 44%) innerhalb des Vertrauensbandes (VB) (Tab. 5.3).

Tab. 5.3  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Niederschläge der Deponie Castrop-Rauxel innerhalb und außerhalb des Vertrauensbandes der Referenzstationen

Messzeitraum	Innerhalb VB	Außerhalb VB	Anzahl (n=39)
SHJ-W	5	9	14
WHJ-W	4	4	8
WHJ-T	6	7	13
SHJ-T	2	2	4

Im Winterhalbjahr befinden sich fast die Hälfte aller Werte innerhalb des Vertrauensbandes. Die tägliche Beprobung im Sommerhalbjahr führt ebenfalls zu einer Erhöhung vertrauenswürdiger Werte. Jahreszeitliche Temperaturabnahme und Verkürzung des Probenahmeintervalls führen zu einer Zunahme „vertrauenswürdiger“ Werte.

### 5.5.3 Temperaturabhängige Ausprägung der Isotopenverhältnisse

Anhand der Referenzstationen der IAEA konnte eine Einordnung der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte in Bezug zu langjährigen Zeitreihen der IAEA erfolgen. In diesem Abschnitt wird eine weitere Möglichkeit vorgestellt die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte unabhängig von IAEA Referenzstationen auf Plausibilität zu überprüfen.

$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte sind von der Temperatur abhängig. Nach [DANSGAARD, W. 1964] (Gl.3.2, Gl. 3.3) können theoretische  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte von Niederschlagswässern für bestimmte Temperaturen berechnet werden. Diese theoretischen  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte werden zum Vergleich mit den am Standort ermittelten  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werten genutzt. Durch den Vergleich können Rückschlüsse auf die Qualität der gemessenen  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte gezogen werden.

In Abb. 5.42 werden die mittleren monatlichen Temperaturwerte auf der Deponie Castrop-Rauxel abgebildet. Zusätzlich sind die nach [DANSGAARD, W. 1964] berechneten  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Niederschläge zusammen mit den gemessenen  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werten dargestellt werden.



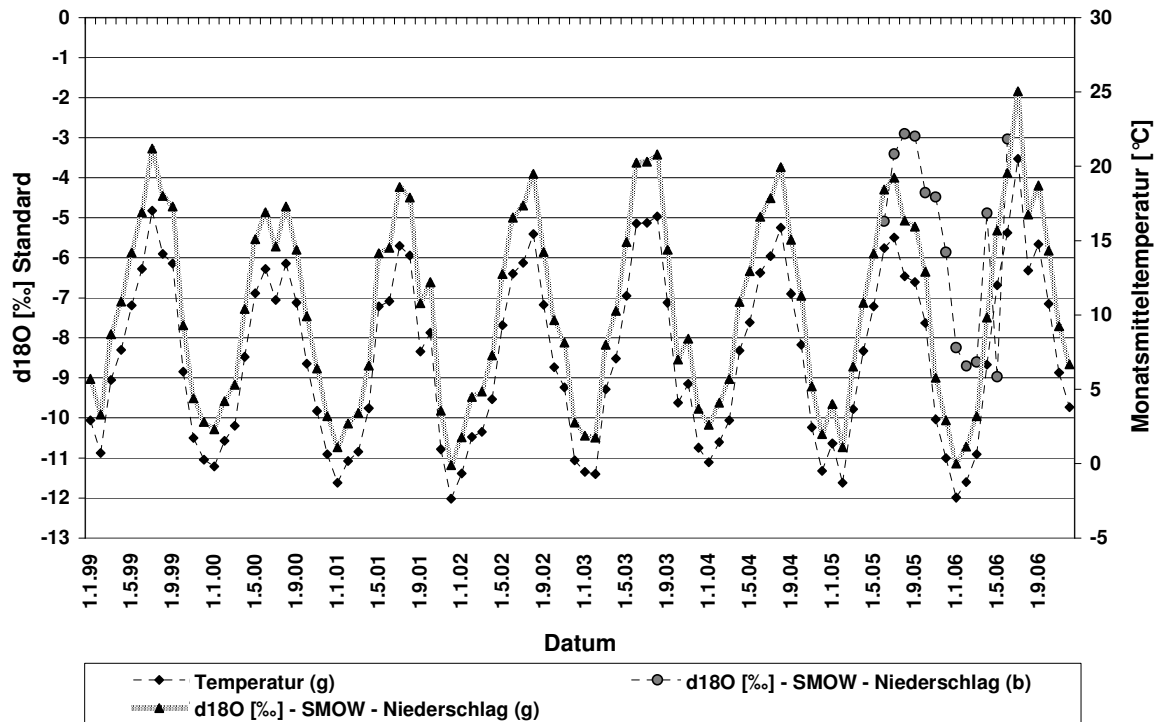


Abb. 5.42 Monatsmitteltemperatur (gemessen (g)) an der Wetterstation auf der Deponie Castrop-Rauxel; Vergleich berechnete (b)  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Monatsmittelwerte der Niederschläge mit gemessenen (g)  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Monatsmittelwerten

Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Niederschläge sind nach Niederschlagshöhe gewichtet und zu Monatsmittelwerten zusammengefasst. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden die Punkte einer Messreihe miteinander verbunden. Die berechneten  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte zeigen einen jahreszeitlichen Verlauf mit Sommermaximum und Winterminimum. Der Verlauf der gemessenen  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte ist an den berechneten Jahrgang angelehnt. Die gemessenen  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte verlaufen um +1 bis +3‰ höher als die berechneten Werte. Die Verschiebung ist erneut durch den Verdunstungseinfluss auf die Probe zu erklären. Der Wechsel des Probenahmeintervalls bedingt, dass im Mai der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Wert (nur ein Messwert) unterhalb des berechneten  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Wertes liegt.

Das Auftreten positiver und negativer Abweichungen vom berechneten Verlauf der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte deutet an, dass die gemessenen Daten keine regelhaften Verzerrungen aufweisen. Der starke Verdunstungseinfluss auf die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte wird durch den gegenüber berechneten  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werten höheren Verlauf belegt.

### 5.5.4 Lateraler Abfluss

Von 42 Proben der lateralen Abflüsse (2ax und 2bx) wurden die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte bestimmt. Die mittleren  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte sind nahezu identisch und die Standardabweichung an beiden Stationen gleich (Tab. 5.4). Die Minimalwerte sind identisch, wobei sich die Maximalwerte geringfügig unterscheiden.

Die Standardabweichung der lateralen Abflüsse ist um mehr als eine Zehnerpotenz geringer als die Standardabweichungen der Niederschläge bei täglicher Beprobung. Bei wöchentlicher Beprobung sind die Standardabweichungen der Niederschläge sieben- bis achtfach höher.

Tab. 5.4 Statistische Parameter für die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der lateralen Abflüsse

	2ax	2bx
Mittelwert	-7,3‰	-7,4‰
Standardabweichung	0,3‰	0,3‰
Spreading	-6,7 bis -7,8‰	-6,9 bis -7,8‰

Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der lateralen Abflüsse (2ax, 2bx) unterscheiden sich vom mittleren  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Wert der Winterniederschläge (7,1‰) um -0,2‰ (2ax) bis -0,3‰ (2bx). Die geringen Unterschiede weisen darauf hin, dass laterale Abflüsse vorwiegend aus Winterniederschlägen gebildet werden. Die geringfügige Änderung der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte erfolgt durch Mischungsvorgänge auf der Sickerstrecke durch das Lysimeter. Über Mischungsvorgänge findet eine Homogenisierung der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte aller im Bodenpaket befindlichen Wässer statt.

Abflussdaten der Folienlysimeter 2ax und 2bx stützen die These, dass die lateralen Abflüsse aus Winterniederschlägen resultieren (Tab. 5.5). Im Beobachtungszeitraum vom hydrologischen Sommerhalbjahr 2005 bis zum hydrologischen Sommerhalbjahr 2006 wurden folgende Niederschlagshöhen und Abflüsse aufgezeichnet (Tab. 5.5):

Tab. 5.5 Niederschlagssumme, lateraler Abfluss und möglicher prozentualer Anteil des Niederschlags am lateralen Abfluss an den Stationen 2ax und 2bx im Zeitraum vom 01.05.2005 bis 31.10.2006

	Niederschlag [mm]	Lateraler Abfluss [mm]		Niederschlag als lateraler Abfluss [%]	
		2ax	2bx	2ax	2bx
01.05.05 - 31.10.05	365,4	8,3	12,2	2,3	3,3
01.11.05 - 30.04.06	323,6	210,0	206,7	65,0	63,9
01.05.06 - 31.10.06	381,5	12,0	29,3	3,1	7,7

Die Niederschlagshöhen im hydrologischen Sommerhalbjahr 2005 liegen bei 365,4 mm und im hydrologischen Sommerhalbjahr in 2006 bei 381,5 mm. Die Abflüsse liegen mit 323,6 mm über denen des hydrologischen Winterhalbjahres 2005.

Die lateralen Abflüsse unterscheiden sich deutlich zwischen hydrologischem Sommer- und Winterhalbjahr. Im hydrologischen Sommerhalbjahr 2005 werden an Station 2ax 8,3 mm und 2006 12 mm Abfluss registriert. In 2005 entspricht dieser Abfluss (2ax) einem Anteil am in diesem Zeitraum gefallenen Niederschlag von 2,3% und 2006 von 3,1%. An Station 2bx beträgt der Anteil 2005 3,3% (12,2 mm) und 2006 7,7% (29,3 mm). Im Winterhalbjahr fließt ein Äquivalent von 65% (2ax) bzw. 63,9% (2bx) des registrierten Gesamtniederschlags als lateraler Abfluss ab.

Abfluss erfolgt hauptsächlich im hydrologischen Winterhalbjahr. Der laterale Abfluss resultiert in diesem Zeitraum hauptsächlich aus Winterniederschlägen.

### 5.5.5 Betonwannenabfluss

Die mittleren  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Verhältnisse der Betonwannenabflüsse (BW 3 und BW 4) betragen -6,2 und -6,1‰ (je 29 Messungen). Der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Wert von BW 2 (-6,3‰) basiert auf insgesamt vier Messwerten, da an dieser Messstelle nur zu Beginn der Messreihen Abfluss gewonnen werden konnte, und wird im Vergleich zu BW 3 und BW 4 schwächer gewichtet. Die Standardabweichung aller Betonwannenabflüsse beträgt gemittelt 0,2‰. Sie ist um mehr als eine Zehnerpotenz geringer als die Standardabweichungen für die Niederschläge.

Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Betonwannenabflüsse unterscheiden sich um +0,9‰ von den Winterniederschlägen und um +1,2‰ von den lateralen Abflüssen. Die Standardabweichungen der Betonwannenabflüsse sind um 0,1‰ (BW3) bzw. 0,2‰ (BW4) geringer als die der lateralen Abflüsse. Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte von Sommerniederschlägen können zur Herkunftsbestimmung der Betonwannenabflüsse keinen Beitrag leisten, da in dieser Jahreszeit nur wenig Abfluss erzeugt wird (Tab. 5.5).

Rechnerisch könnten die Betonwannenabflüsse aus ca. 0,3% des gefallenen Gesamtniederschlags gebildet worden sein. Jedoch passieren, wenn überhaupt, nur sehr geringe Wassermengen die kontrolliert verdichteten Schichten. Es ist eher davon auszugehen, dass es sich beim Betonwanneabfluss um Wasser handelt, welches bereits beim Einbau schon in den kontrolliert verdichteten Schichten vorhanden war.

Das Abflusswasser der Betonwannen ähnelt isotopisch vor allem den Winterniederschlägen. Alle Abflüsse im Oberflächenabdichtungssystem, auch die der Betonwannen, resultieren aus Niederschlagswasser mit unbekanntem Infiltrationszeitpunkt. Ein

zeitlicher Zusammenhang zwischen Niederschlag, lateralem Abfluss und Betonwanneabfluss ist über die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der unterschiedlichen Wässer nicht herzustellen. Die mittlere isotopische Ausprägung der Betonwanneabflüsse unterscheidet sich deutlich von den anderen Wässern des Systems. Eine schnelle Durchsickerung des Systems kann auf Grund dieser Feststellung ausgeschlossen werden.

Die geringe Standardabweichung (0,2‰) der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Betonwannenabflüsse zeigt auf, dass nahezu identische Wässer zum Abfluss beitragen bzw. eine Homogenisierung der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Wässer im Material stattgefunden hat.

Vor dem Einbau war das Material der kontrolliert verdichteten Schichten am Standort Castrop-Rauxel als Bodenmiete oberflächlich abgelagert. Niederschlagswasser konnte in das Material der künftigen kvS eindringen.

Der mittlere  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Wert der Betonwannenabflüsse ist größer als der der lateralen Abflüsse und Winterniederschläge. Es ist aber geringer als der der Sommerniederschläge.

Geht man davon aus, dass es sich beim Betonwannenabfluss um Niederschlagswasser handelt, welches vor dem Einbau in die kvS eingetragen wurde, liegt die Vermutung nahe, dass sowohl Winterniederschläge als auch Sommerniederschläge im Ablagerungszeitraum (uneinheitliche Ablagerungsdauer) in die Miete eingedrungen sind. Die mittleren  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Betonwannenabflüsse liegen innerhalb des Wertebereichs von Winter- und Sommerniederschlägen.

### **5.5.6 Beziehungen von Niederschlag, lateralem Abfluss und Betonwannenabfluss**

Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte von Niederschlag, Betonwannenabfluss und lateralem Abfluss sind als Einzelwerte in Abb. 5.43 für den Standort Castrop-Rauxel aufgetragen.

Zusätzlich wurde für die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Niederschläge eine polynomiale Regressionsfunktion (3. Ordnung) berechnet und zusammen mit den Einzelmesswerten in der Abbildung dargestellt.

Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Niederschläge heben sich von den auf einem Niveau bleibenden  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werten der lateralen Abflüsse und Betonwannenabflüsse ab. Die polynomiale Regressionsfunktion (3. Ordnung) zeigt einen Jahresgang der Niederschlags- $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte auf. Die Funktion zeigt den für Niederschläge typischen jahreszeitlichen Verlauf der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte mit Winterminimum und Sommermaximum. Ein für Abb. 5.40 und Abb. 5.42 beschriebener Jahresgang lässt sich also mathematisch beschreiben. Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte nehmen von September 2005 bis März 2006 ab.

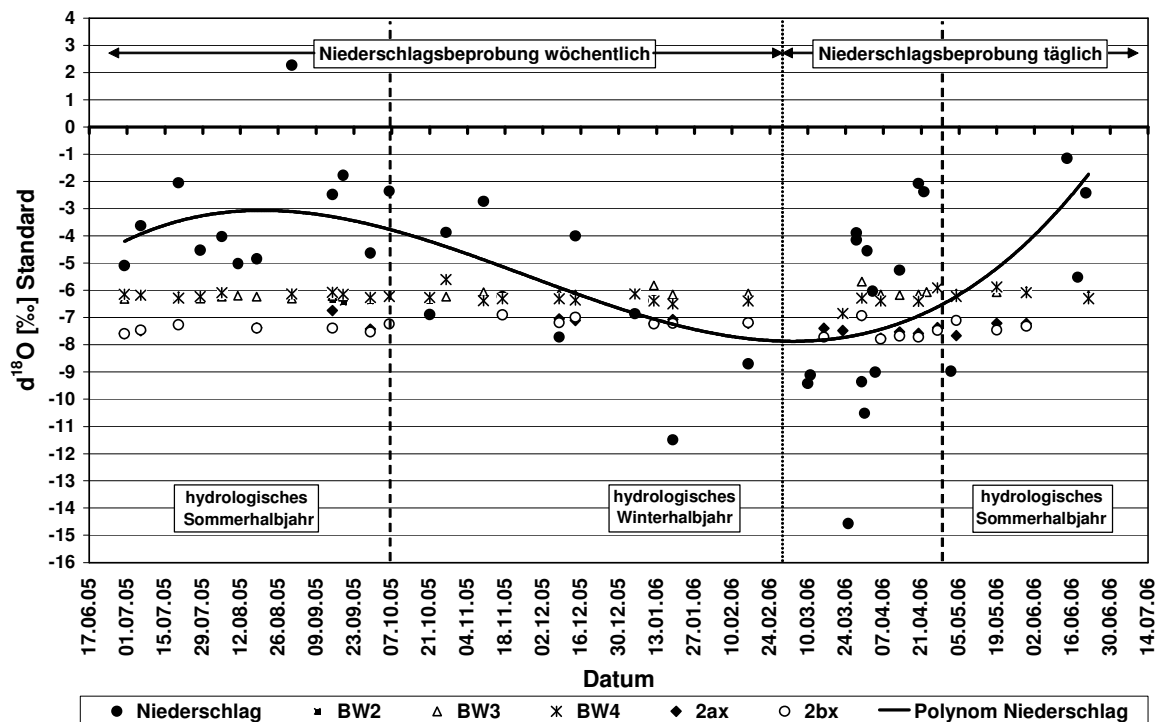


Abb. 5.43  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte für Niederschlag, Betonwannenabfluss und lateralen Abfluss auf der Zentraldeponie Castrop-Rauxel im Zeitraum vom 30.06.05 bis 22.06.06; Polynomische Regression (3. Ordnung) der Niederschlagsisotopie (2ax, 2bx = Abfluss lateral; BW2 = Betonwanne 2b und BW3, BW4 = Betonwanne 2a)

Fraglich war, ob sich der Jahresgang der Niederschlagswässer auf die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der lateralen Abflüsse überträgt. In Abb. 5.43 ist dies nicht zu ersehen. Die in den Boden infiltrierten Niederschläge (vorwiegend Winterniederschläge) vermischen sich mit bereits im Boden befindlichem Wasser. Die lateralen Abflüsse werden auf eine Y-Achse mit eigener Skalierung aufgetragen (Abb. 5.44). Minimale Schwankungen im Verlauf der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der lateralen werden so sichtbar. Die Interpretation der Schwankungen ist, da sich deren Ausprägungen knapp oberhalb der Standardabweichung des RUB-Standard von  $\pm 0,1\%$ . Bewegen, schwierig. Für beide Folienlysimeter wurden polynomiale Regressionsfunktionen (3. Ordnung) in die Abbildung eingefügt.

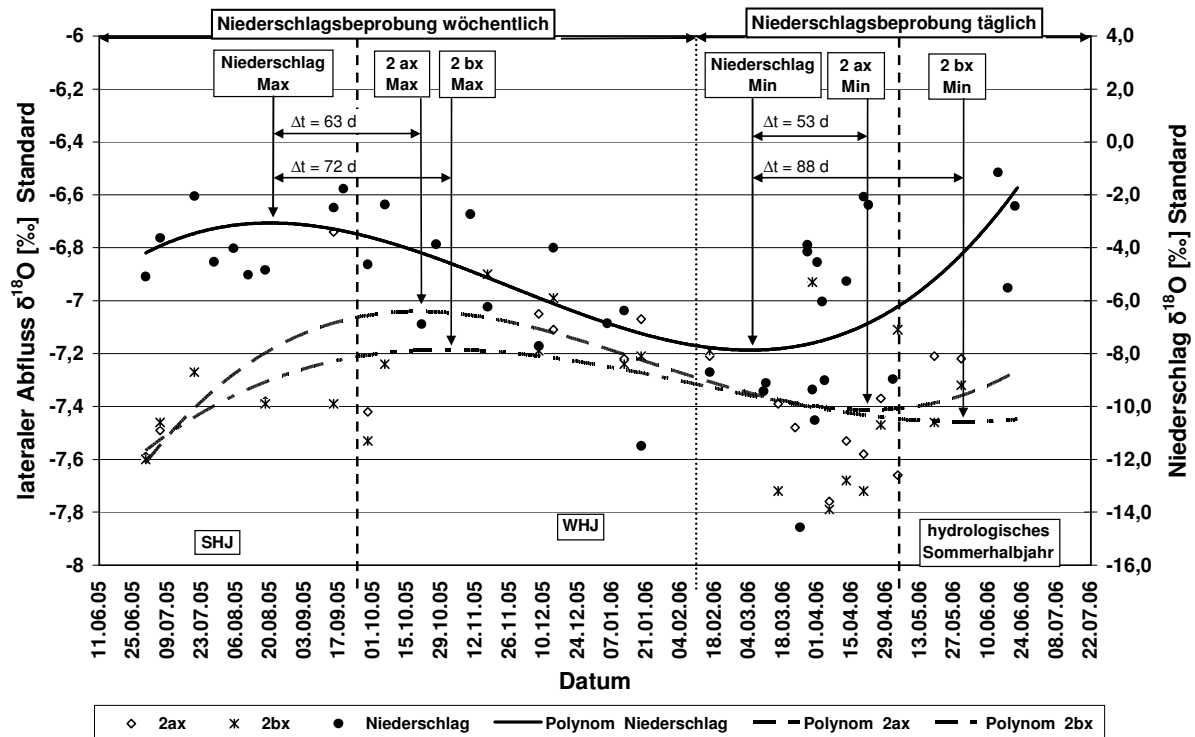


Abb. 5.44 Verlauf der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte von Niederschlag und lateralen Abflüssen; Polynomische Regression (3. Ordnung) von Niederschlag und lateralen Abflüssen; Zeitliche Abfolge der Konzentrationsminima und -maxima

Die polynominalen Funktionen (3. Ordnung) stellen auch für die lateralen Abflüsse (2ax, 2bx) einen Jahresgang dar. Dieser ist im Vergleich zu den Niederschlägen, bezogen auf die Amplitude weniger stark ausgeprägt (Abb. 5.44). Mischungsvorgänge während der Bodenpassage bedingen die Abschwächung der Amplituden im Jahresgang. Ein Jahresgang in den lateralen Abflüssen ist durch die Homogenisierung der Wässer schwer nachzuweisen.

Minimal- und Maximalwerte der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte für Niederschläge und laterale Abflüsse treten mit zeitlichem Versatz zueinander auf. Die Niederschläge zeigen den maximalen  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Wert um den 19.08.2005. Die Maximalwerte der lateralen Abflüsse folgen im Abstand von ca. 60 Tagen (2ax) bzw. ca. 70 Tagen (2bx). Die zeitliche Einordnung der Minima und Maxima erfolgt mit einer visuell ermittelten Genauigkeit von  $\pm 2$  Tagen. Ein für die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Niederschläge beobachtetes Minimum zeigt sich im Abstand von ca. 50 Tagen an 2ax und nach ca. 90 Tagen an 2bx. Die Vermutung liegt nahe, dass das Minimum an die lateralen Abflüsse weitergegeben wurde.

Es lassen sich keine Isotopensignale einzelner Niederschlagsereignisse im lateralen Abfluss erkennen.

Betrachtet man die Minimal- und Maximalwerte der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte für Niederschläge und laterale Abflüsse auf den Regressionsgraden, wird das Ausgleichspotential durch Mischungsprozesse während der Bodenpassage auf infiltrierende Niederschläge deutlich (Tab. 5.6).

Tab. 5.6 *Minimum und Maximum der Regressionsfunktion für Niederschläge und laterale Abflüsse (Näherungswerte)*

	Max ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ [‰])	Min ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ [‰])
Niederschlag	-3,0	-8,0
Lateraler Abfluss (2ax)	-7,1	-7,4
Lateraler Abfluss (2bx)	-7,2	-7,5

Die Spreizung der Minimal- und Maximalwerte reduziert sich vom Niederschlag zu den lateralen Abflüssen.

Um zu überprüfen, ob die Weitergabe von  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Wertmaxima mit einem Austausch des gesamten Wassers innerhalb der Folienlysimeter gleichzusetzen ist, wurde anhand der Wassergehalte der Rekultivierungsschicht und der Höhe der lateralen Abflüsse die Austauschhäufigkeit des Bodenwassers in den Folienlysimeter berechnet.

Die mittlere Wasserspeicherung der Rekultivierungsschicht liegt im Untersuchungszeitraum von Juni 2005 bis Juni 2006 bei 320 mm. Die lateralen Abflüsse im Untersuchungszeitraum betragen an Station 2ax 223,4 mm und an Station 2bx 238,2 mm.

Die Berechnung der Austauschhäufigkeit (AH) über

$$AH = \frac{\text{lateraler Abfluss [mm]}}{\text{mittlerer Wassergehalt [mm]}} \cdot 100 \quad \text{[Gl. 5.1]}$$

ergibt für 2ax einen Wert von 70% und für 2bx 74% pro Jahr. Das gesamte Wasser in der Rekultivierungsschicht wird innerhalb eines Jahres zu 70 bzw. 74% ausgetauscht.

Dem  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Wertmaximum für den Niederschlag im Sommer (19.08.2005) folgen die Maxima der lateralen Abflüsse zeitlich versetzt nach 63 Tagen (2ax) und 72 Tagen (2bx) nach. In diesem Zeitraum werden an der Station 2ax 0,15 mm und an der Station 2bx 0,41 mm Abfluss registriert. Die Abflusshöhen im Sommer sind zu gering, um die Ausprägung des Sommermaximums der Niederschläge durch das gesamte Bodenpaket hindurch an die lateralen Abflüsse weiterzugeben.

An den Stationen 2ax und 2bx werden im Winter 66,45 mm bzw. 87,97 mm Abfluss gemessen. Das  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Niederschlagswerteminimum (10.03.2006) könnte an die Station 2ax nach 53 Tagen und an die Station 2bx nach 88 Tagen weitergegeben

worden sein (Abb. 5.44). Es ist unwahrscheinlich, dass innerhalb der kurzen Zeiträume (zwischen 53 und 88 Tagen) Verhältnisausprägungen, wie Maximal- und Minimalwerte, durch das ganze Bodenpaket hindurch weitergeben werden können, denn der Boden speichert ca. 320 mm Wasser, die durch infiltrierendes Niederschlagswasser erst verdrängt werden müsste.

Möglich wäre es, dass diese Minimal- und Maximalwerte länger als ein Jahr in der Rekultivierungsschicht konserviert sind und schrittweise die Schicht durchlaufen. Die berechnete Austauschhäufigkeit ( $\emptyset$  72% /a) stützt diese These. Der zeitliche Rahmen für die Weitergabe von Minimal- und Maximalwerten der  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte von Niederschlägen an die lateralen Abflüsse kann somit nicht abschließend geklärt werden. Es wird allerdings von einem Zeitraum größer einem Jahr ausgegangen.

Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte der Betonwannenabflüsse liefern nach gesonderter Analyse (keine Abbildung) keinen Hinweis auf einen Jahresgang. Dies unterstreicht die These, dass es sich beim Betonwannenabfluss um Niederschlagswasser handelt, welches innerhalb eines begrenzten Zeitraums in die Bodenmiete (vor Einbau) eindringen konnte. Auf Grund von Mischungsvorgängen des Bodenmaterials während des Einbaus wurde das enthaltene Sickerwasser in Bezug auf die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ -Werte betrachtet homogenisiert.



## 6 Diskussion

Der Forderung der Deponieverordnung [BUNDESREGIERUNG 2002] nach dauerhaftem Schutz von Boden und Grundwasser wird im Untersuchungszeitraum durch die alternative Deponieoberflächenabdichtung in Castrop-Rauxel entsprochen. Die Infiltration von Bodensickerwasser in den Deponiekörper ist im Beobachtungszeitraum (1998-2007) gering. Eine zentrale Aufgabe nach [WITT 2005], die Niederschlagsinfiltration durch die Deponieoberflächenabdichtung zu begrenzen, wird erfüllt. Die Eignung als alternatives Oberflächenabdichtungssystem wurde, wie von [RICHTER et al. 2001] gefordert, durch eine vom Gesetzgeber anerkannte Institution geprüft, im Fall Castrop-Rauxel fungierte als Genehmigungsbehörde die Bezirksregierung Münster.

Die besondere Prüfung eines Bauteils (hier: kontrolliert verdichtete Schichten) der Deponieoberflächenabdichtung zur Feststellung der Langzeitbeständigkeit [WITT 2005] wurde im Rahmen dieser Arbeit vorgenommen.

Die Abhängigkeit der Gas- bzw. Wasserleitfähigkeit von der Porenverteilung und Porengeometrie in Böden [HORN 1996] wurde bestätigt. Der Nachweis der fehlenden Porenkontinuität in den dichtwirksamen Schichten erklärt die geringen Durchlässigkeitsbeiwerte. Die Bodenverdichtung und die damit verbundene Veränderung des Bodengefüges (Aggregatbildung, Einregelung von Bodenbestandteilen) bedingen eine Beseitigung kontinuierlicher Wasser leitender Porensysteme. Die Abhängigkeit der Porenkontinuität von der Textur bzw. dem Gefüge [FREDE, H. G., HORN, R. 1990] wurde für die dichtwirksamen Schichten belegt. Der Fokus lag auf der Verteilungsanalyse der Interaggregatporen, von denen nach [WITT 2007-1] die Wasserdurchlässigkeit abhängig ist. Computertomographische Untersuchungen konnten im Bereich der weiten Grobporen keine durchgängigen Porenräume ermitteln. Der alleinige Einsatz von computertomographischen Untersuchungen ist für eine vollständige Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften nicht ausreichend. Wie [ROTH 2003] beschreibt, können Porensysteme determiniert werden, jedoch ist der Nachweis auf bestimmte Porengrößenbereiche (je nach CT-Gerät) beschränkt. Zur vollständigen Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften müssen neben den weiten Grobporen auch die für Bodensickerwasser relevanten engen Grobporen mitberücksichtigt werden. Deshalb sind ergänzende Dünnschliffuntersuchungen im Hinblick auf eine Auflösungserhöhung anzuraten. Nachteilig im Vergleich zur computertomographischen Untersuchungsmethode ist, dass die räumliche Darstellung von

engen Grobporenstrukturen mit dem Verfahren der Dünnschliffanalytik nicht mehr möglich ist.

Der stark vernässte Einbau der dichtwirksamen Schichten hat zu keiner Beeinflussung der Langzeitbeständigkeit geführt. Die von [BAUER et al. 2003] für einen vernässten Einbau angenommene Zunahme von sekundären Grobporen konnte nicht bestätigt werden. Gegenüber anderen Versuchsreihen (Deponie Hamburg-Georgswerder, Billinghamen [MIEHLICH 2006] oder der Deponie „Im Dienstfeld“ in Aurach [HENKEN-MELLIES, W.U., GARTUNG, E. 2004]) zeigen sich in Castrop-Rauxel kein Auftreten von Sekundärporen, Schrumpfrissen oder Durchwurzelungsphänomenen, welche zu einem Versagen der dichtwirksamen Schichten führen können. Die Verdichtung der mineralischen Bestandteile der dichtwirksamen Schichten auf dem feuchten Ast der Proctorkurve hat nicht wie von [JUNGE 1996] angenommen im Untersuchungszeitraum verstärkt zu Schrumpfrissen oder zu Sekundärporenbildung geführt.

Die Möglichkeit mittels Computertomographie neben der Darstellung von Porensystemen auch verschiedene Dichtebereiche in den Proben gesondert abzubilden ist ein Vorteil dieser Untersuchungsmethode. Wie bereits von [ROGASIK 2003-1] beschrieben, konnte durch die Visualisierung der verschiedenen Dichtebereiche Rückschlüsse auf Bodenstrukturen und die damit zusammenhängende Wasserleitfähigkeit gewonnen werden. Insbesondere die Bereiche erhöhter Dichte wiesen eine Einregelung der mineralischen Bestandteile in horizontaler Orientierung auf. Es konnte ein durch die Verdichtung entstandenes Plattengefüges nachgewiesen werden.

Die Dichte jeder Scheibe kann durch CT-Untersuchungen berechnet werden. Eine Kontrolle der Verdichtung ist so möglich. Der hohe technische Aufwand (CT) und die Probleme bei der Gewinnung von für die Berechnung benötigten Bodenfeuchteproben (Kap. 4.2.4) erschweren die Verwendung dieses Verfahren als „Standardverfahren“ der Bodendichtebestimmung.

Die Wasserabgabe aus den kontrolliert verdichteten Schichten führt nicht zu einer Schrumpfrissbildung. Entgegen [DUMBECK 1985] konnte keine Häufung von Mittelporen in den Dünnschliffpräparaten nachgewiesen werden. Die Anzahl der Dünnschliffuntersuchungen ist jedoch als grenzwertig einzuschätzen. Die Annahme von [HORN 2002], dass zur Erstellung von alternativen mineralischen Oberflächenab-

---

dichtungen auch Material der Tonfraktion bis zu einem Anteil von 10-12% verwendet werden kann, konnte durch den Freilandversuch in Castrop-Rauxel bestätigt werden.

## 7 Zusammenfassung

Die Konzeption alternativer mineralischer Oberflächenabdichtungen für Deponien ist, sowohl unter Umwelt- als auch wirtschaftlichen Gesichtspunkten, ein interessanter Forschungsschwerpunkt. Neue Systeme müssen dem Kriterium der Gleichwertigkeit gesetzlich vorgegebener Rahmenbedingungen genügen und langfristige Beständigkeit nachweisen.

Von der Abfallentsorgungs-Gesellschaft Ruhrgebiet (AGR) wurde für den Standort Castrop-Rauxel ein alternatives Konzept zur Oberflächenabdichtung und Rekultivierung vorgeschlagen. Es sieht eine Abdeckung der Deponieoberfläche mit bindigem Boden in ausreichender Schichtstärke mit optimaler Bodenvorbereitung und Bepflanzung vor. Zu Untersuchungszwecken wurde 1998 auf der Zentraldeponie Castrop-Rauxel eine alternative Oberflächenabdichtung im großtechnischen Maßstab errichtet. Wissenschaftlich wird das System von der Ruhr-Universität Bochum, in Kooperation mit dem Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW (LANUV NRW), betreut.

Um umfassende, kontinuierliche Informationen über den Zustand, den Wassergehalt und die relevanten Prozesse in den Abdeckungsschichten zu erhalten, sind Langzeitbeobachtungen an Großlysimetern erforderlich, wie sie auf der Deponie Castrop-Rauxel oder in Aurach [HENKEN-MELLIES 2004] durchgeführt wurden.

Entscheidend für das Abdichtungssystem ist die Funktionsbeständigkeit der dichtwirksamen Komponenten, welche im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden. Mittels etablierter und alternativer Untersuchungsmethoden wurden die Ursachen für die Langzeitbeständigkeit der Abdichtung ergründet sowie die Herkunft der Bodensickerwässer geklärt. Ferner wurde das Porensystem der dichtwirksamen Schichten mit bildgebenden Verfahren visualisiert und analysiert.

Die Untersuchungen zu dieser Arbeit wurden im Randbereich der Deponieversuchsfläche durchgeführt. Die Materialzusammensetzungen in den beprobten Randbereichen der Versuchsfläche bilden Extremstandorte auf der Deponie ab. Andere bereits im Vorfeld beprobte Teile der kontrolliert verdichteten Schichten im Rand- und Kernbereich der Versuchsabdeckung zeigten eine vergleichsweise homogenere Materialzusammensetzung (vorwiegend Lößlehm).

Die Beimischungen im Randbereich aus den Korngrößenbereichen „Kies“ und „Steine“ (z.B. Bauschutt) bewirkten für die Abdichtungswirkung des Systems keinen negativen Effekt. Die Durchlässigkeitsbeiwerte dieses Materials liegen im Bereich der

gesetzlich für Deponieoberflächenabdichtungen vorgegeben Grenzen. Eine sukzessive Abnahme des harmonischen Mittels der Durchlässigkeitsbeiwerte konnte durch mehrjährige Beobachtungen (Probenentnahme) belegt werden.

Das für die Herstellung der kvS verwendete Material aus dem Entnahmeraum Dortmund weist anthropogene Beeinflussungen (Bautätigkeit, Bodenerosion, Kohlenstaubbimmission) auf. Im Material treten auf der makroskopischen Betrachtungsebene Inhomogenitäten wie Ziegelbruch, Bauschuttreste, Glasscherben sowie Baumschnittreste und größere Schlackenstücke hervor. Inhomogenitäten treten auch auf der mikroskopischen Betrachtungsebene durch die unterschiedliche erdzeitalterliche Herkunft der Mineralbestandteile hervor. In den kontrolliert verdichteten Schichten finden sich Mineralbestandteile aus den geologischen Zeiträumen Devon, Karbon, Kreide bis zur Gegenwart, welche durch Dünnschliffuntersuchungen belegt sind.

Die dichtwirksamen Schichten der Oberflächenabdichtung am Standort Castrop-Rauxel wurden ergänzend mittels ausgewählter DIN-Verfahren untersucht. Die Normverfahren wurden durch die Verwendung alternativer Untersuchungsmethoden (z.B. Computertomographie, isotopengeochemische Untersuchungen) komplettiert. Es konnten Erkenntnisse über die standortspezifischen bodenphysikalischen Eigenschaften gewonnen werden.

Kontinuierliche, mit Luft gefüllte Porensysteme lagen im Probenmaterial aus den kvS nicht vor und konnten daher mittels Computertomographie und Dünnschliffmikroskopie nicht nachgewiesen werden. Durchgängige, vertikal orientierte, Luft führende Poren sind nur in Probe S, welche die „Nullprobe“ der Kampagne ist, (vgl. Abb. 5.27) nachweisbar.

Der HU-Bereich von 2000 bis 2500 HU zeigt für unterschiedliche Proben identische Strukturenformen auf. Aggregate und kugelförmige Strukturen dominieren als Ergebnis der Verdichtungsarbeit mit der Schafffußwalze. Die Proben verfügen über einen ausgeprägten Skelettanteil, wovon die Maximaldichte einer Probe jedoch geringer beeinflusst wird als von einer hohen Anzahl an Aggregatstrukturen.

Zusätzlich konnten die Ausprägungen der Dichteverteilungen aller Proben ermittelt, und so Rückschlüsse auf die Güte der Verdichtungsarbeit gezogen werden. Eine Verdichtung von stark vernässtem Material kann durch parallel stattfindende Verschlammungsprozesse zu einem hochdichten Verbund führen.

Die Ausbildung eines Segregatgefüges, hier eines Plattengefüges, kann in bestimmten HU-Bereichen (z.B.

Abb. 5.7, Abb. 5.11) durch horizontal in der Probe verlaufende Querriegel nachgewiesen werden. Diese sind wahrscheinlich an Nahtstellen des Gefüges entstanden.

Die Trockenrohdichte der kvS nahm im Vergleich zu 2001 um  $0,03 \text{ g/cm}^3$  geringfügig ab (Tab. 7.1). Sie ist, wie in der Vorjahren 1999 und 2001, auch im Jahr 2006 als „hoch“ zu kennzeichnen. Im Vergleich ist die über den Computertomographen bestimmte Trockenrohdichte als „sehr hoch“ zu kennzeichnen [AD-HOC-AG BODEN 2005]. Eine weitere Konsolidierung der kvS gegenüber 2001 ist nach der Methode von Hennig nicht nachzuweisen.

Tab. 7.1 Trockenrohdichten der kvS (1999, 2001 und 2006); (2006 CT = bestimmt mittels CT, unkorrigierter Trockenrohdichtewert CT in Klammern)

	$\rho_b \text{ (g/cm}^3\text{)}$
<b>kvS 1999</b>	1,68
<b>kvS 2001</b>	1,78
<b>kvS 2006</b>	1,75
<b>kvS 2006 CT</b>	1,81 (1,80)

Zylinder D weist die höchste Dichte aller Proben auf, wobei die Zylinder C, E, M homogener verdichtet sind und eine geringere Standardabweichung als Zylinder D aufweisen. Eine von der Entnahmetiefe abhängige Dichteverteilung der Proben ist nicht zu erkennen.

Das alternative Oberflächenabdichtungssystem weist Durchlässigkeitsbeiwerte unterhalb des gesetzlich vorgeschriebenen Rahmens (Grenzwert:  $1,5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ ) [BUNDESREGIERUNG 1993] auf. Die gesättigte Wasserleitfähigkeit nimmt kontinuierlich ab. Die für den Randbereich ermittelten Kennwerte (z.B. harmonisches Mittel des Durchlässigkeitsbeiwertes  $6,0 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ , Verdichtungsgrad) zeigen auf, dass eine genehmigungsfähige Oberflächenabdichtung auch aus bedingt homogenem Material erstellt werden kann.

Die niedrigen  $k_f$ -Werte werden durch das Fehlen kontinuierlicher, Luft führender Makroporen (belegt durch CT, Dünnschliffpräparate), hohe Trockenrohdichten (belegt durch CT-Untersuchungen), dichtwirksame Aggregatstrukturen (belegt durch CT) und das Fehlen vertikal orientierter, Luft führender, enger Grob- sowie Mittelporen in den Dünnschliffpräparaten erklärt. Entscheidend sind die durch die Verdichtung geschaffenen Aggregatstrukturen. Diese wirken der Durchlässigkeit des Materials entgegen, da sie eine Ausprägung durchgängiger Porensysteme erschweren.

Bodensickerwasser, welches kontinuierlich in geringen Mengen an der Unterseite der kontrolliert verdichteten Schichten des Oberflächenabdichtungssystems austritt, war schon vor dem Einbau in diesen Schichten vorhanden. Durch Anwendung isotopengeochemischer Methoden konnte der Nachweis erbracht werden, dass es sich um Tot- bzw. Haftwasser handelt, welches sukzessive durch die Auflast der Rekultivierungsschicht aus den dichtwirksamen Schichten ausgepresst wird. Zwischen im Untersuchungszeitraum analysierten Niederschlags- und Bodensickerwässern im Abdichtungssystem konnte kein Zusammenhang hergestellt werden. Schnelle Sickerwasservorgänge konnten mittels isotopengeochemischer Untersuchungen nicht nachgewiesen werden. Das alternative Abdichtungssystem in Castrop-Rauxel hat über den gesamten Betrachtungszeitraum im Rahmen der gesetzlich vorgegebenen Rahmenbedingungen funktioniert.

Als Ursachen für die geringen Durchlässigkeitsbeiwerte der kontrolliert verdichteten Schichten konnte der Mangel an Porenräumen, die Veränderung der Gefügestrukturen mit der Schafffußwalze und die hohe Verdichtung des Materials ausgemacht werden.

Umfangreiche Monitoring-Maßnahmen werden bis zum heutigen Tag durchgeführt. Ende 2005 wurde das alternative Oberflächenabdichtungssystem für den Standort Castrop-Rauxel genehmigt.

Die Arbeit liefert neue Erkenntnisse zu den Ursachen der Funktionstüchtigkeit und Langzeitbeständigkeit der alternativen Oberflächenabdichtung auf der Deponie Castrop-Rauxel. Die verantwortlichen bodenphysikalischen Prozesse werden am Beispiel der kontrolliert verdichteten Schichten ergründet. Daher ist sie ein Beitrag zur angewandten Forschung.

## Literaturverzeichnis

- ADAM, C., GLÄßNER, W., HÖLTING, B. (2000): Hydrogeologisches Wörterbuch, Enke im Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- ADAMS, A.E., MACKENZIE, W.S., GUILFORD, C (1986): Atlas der Sedimentgesteine in Dünnschliffen, Enke Verlag, Stuttgart.
- AD HOC ARBEITSGRUPPE BODEN der staatlichen geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover.
- AYLMORE, L. A. G. (1994): Application of computer assisted tomography to soil-plant-water studies: an overview. In: ANDERSON, S. H., HOPMANS, J. W. (eds.) Tomography of soil-water-root processes. Soil Science of America, Special Publications, 36, 7-15.
- BAUER, B., TAUBNER, H., TIPPKÖTTER, R. (2003): Strukturbildung in der mineralischen Komponente von Deponiedichtungen, Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 102, Heft 1, S. 39–40, Hannover.
- BAYER, A., VOGEL, H. J., ROTH, K. (2003): Röntgenabsorptionsmessungen zur Quantifizierung hydraulischer Eigenschaften am Übergang von gesättigter zu ungesättigter Zone, Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 102, Heft 1, S. 43–44, Hannover.
- BUNDESREGIERUNG (1993): Technische Anleitung (TA) Siedlungsabfall - TAsi Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz) vom 14. Mai 1993 (BAnz. Nr. 99a vom 29.05.1993)
- BUNDESREGIERUNG (2002): Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV), Bundesgesetzblatt I, S. 2807.
- BUZUG, T. M. (2004): Einführung in die Computertomographie - mathematisch physikalische Grundlagen der Bildrekonstruktion, Springer Verlag, Berlin.
- CLARK, I., FRITZ, P. (1997): Environmental isotopes in hydrogeology, CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, USA.
- DANSGAARD, W. (1964): Stable isotopes in precipitation. Tellus 16, S. 436–468.
- DATHE, A. WALTER, N. EINS, S. GEROLD, G. (1998): Bildanalytische Charakterisierung des Porenraums im Boden im Vergleich mit hydraulischen Prozessparametern, Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 88, S. 359–362, Hannover.
- DEUTSCHER NORMENAUSSCHUSS [Hrsg.] (1998): DIN 18130, Baugrund; Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserleitfähigkeitsbeiwertes - Teil 1, , Beuth Verlag, Berlin.



- DEUTSCHER NORMENAUSSCHUSS [Hrsg.] (1997): DIN 19682-5:1997-04, Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Felduntersuchungen - Teil 5: Bestimmung des Feuchtezustands des Bodens
- DUMBECK, G., HARRACH, T. (1985): Porenverteilung bei Bodenverdichtungen, Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 43, Heft 1, S. 213–218, Hannover.
- EPSTEIN, S., MAYEDA, T. (1953): Variation of  $^{18}\text{O}$  content of waters from natural sources, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4, S. 213-224.
- FAURE, G. (1986): *Isotope geology*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- FAZEKAS, O., HORN, R. (2005): Zusammenhang zwischen hydraulischer und mechanischer Bodenstabilität in Abhängigkeit von der Belastungsdauer, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Volume 168, Issue 1, S. 60–67, Wiley Interscience, Weinheim.
- FREDE, H. G., HORN R. (1990): Die Bedeutung des Bodengefüges für den Gas- und Wassertransport, Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 62, S. 33–34, Hannover.
- FÜCHTBAUER, H. [Hrsg.], HELING, D., MÜLLER, G., RICHTER, D. K., SCHMINCKE, H-U., SCHNEIDER, H-J., VALETON, I., WALTHER, H. W., WOLF, M. (1988): *Sedimente und Sedimentgesteine, Sediment-Petrologie Teil II*, 4. Auflage, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- GALLMEISTER, K., AZZAM, R. (2003): Statistische, bildanalytische Auswertung von Röntgen-Computertomographischen (CT) Aufnahmen eines Lössboden, Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 102, Heft 1, S. 67–69, Hannover.
- GRABERT, H. (1998): *Abriß der Geologie von Nordrhein-Westfalen*, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- GREVERS, M. C. J, DE JONG, E., ARNAUD, R. J. S. (1989): The characterization of soil macroporosity with CT-scanning, *Canadian journal of soil science*, 69, S. 629-637.
- GUENTHER, D., WIDMOSER, P. (1988): Wasserbewegung und Bodenverdichtung - Messungen mit einer modifizierten Triaxialapparatur, Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 57, S. 171–174, Hannover.
- HARTGE K. H., HORN, R. (2009): *Die physikalische Untersuchung von Böden*, 4. Auflage, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- HECKER, J.M., BERKENHAGEN, J., DIESTEL, H. (2003): Computertomographie in der Bodenkunde: Methoden und Anwendungen, Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 101, S. 25–26, Hannover.

- HENKEN-MELLIES, W.U., GARTUNG, E. (2004): Langzeituntersuchung an einem Versuchsfeld in Aurach, in: Müll und Abfall, Nr. 1, S. 29–33.
- HÖLTING, B., COLDEWEY, W. G. (2005): Hydrogeologie - Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie, 6. Auflage, Spektrum akademischer Verlag, Heidelberg.
- HORN, R. (2002): Analyse des Austrocknungsverhaltens von mineralischem Bodenmaterial anhand von Laboruntersuchungen, in: RAMKE, H. G., GARTUNG, E., HEIBROCK, G., LÜKEWILLE, W., MELCHIOR, S., VIELHABER, B. BOHNE, K., MAIER-HARTH, U., WITT, K. J. (Hrsg.): Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen - Status Workshop -, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 3, S. 349–358, Höxter.
- HORN, R., THIENEMANN, J., GRÄSLE, W., BAUMGARTL, T. (1996): Einige prinzipielle Überlegungen zu hydraulischen und mechanischen Prozessen in Deponieabdichtungen, Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 79, S. 47–49, Hannover.
- HÖTZL, H., WOHNLICH, S. (1985): Wasserbewegung in einer dreischichtigen Deponieabdeckung, Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 136, S. 645–657, Hannover.
- HUWE, B. (1985): Wassertransport in porösen Medien bei zeitvariabler Porosität, Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 136 S. 311–319, Hannover.
- JUNGE, TH.; BAUMGARTL, TH.; HORN, R.; THIENEMANN, J. (1996): Bedeutung der „Entwässerungsgeschichte“ bzw. des Grades der Vorentwässerung für das Schrumpfverhalten von mineralischen Abdichtsystemen, Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 79, S. 51–54, Hannover.
- LANG, H. J., HUBER, J. (1994): Bodenmechanik und Grundbau. Das Verhalten von Böden und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte. 5. Auflage. Springer Verlag. Berlin.
- MELCHIOR, S., MIEHLICH, G. (1989): Sicherung von Altlasten durch Oberflächenabdichtung - Ergebnisse aus hydrologischen Felduntersuchungen der Deponie Georgswerder (Hamburg), Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 59, Heft 1, S. 199–204, Hannover.
- MORTIMER, C. E (2001): Chemie - Das Basiswissen der Chemie, 7. Auflage, Thieme Verlag, Stuttgart.
- MOSER, H. (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie, Gebrüder Bornträger Verlag, Berlin.
- MOSER, H. (2004) in KÄSS, W.: Geohydrologische Markierungstechnik, Gebrüder Bornträger Verlag, Berlin, 2004.

- PETROVIC, A. M., SIEBERT, J. E., RIEKE, P. E. (1982): Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning, *Soil Science Society of America Journal*, 46, S. 445-450.
- PFEIFFER, B., BLENCKE, V., GÄTH, S. (2003): Einsatz einer Kapillarsperre aus mineralischen Abfällen als alternative Deponieoberflächenabdichtung - Anforderungen und erste Ergebnisse -Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 101, S. 77–78, Hannover.
- PIERRET, A., CAPOWIEZ, Y., BELZUNCES, L., MORAN, C. J. (2002): 3D reconstruction and quantification of macropores using X-ray computed tomography and image analysis, *Geoderma*, 106, S. 247-271.
- RAMKE, H. G., WITT, K. J., BRÄCKER, M., DÜLLMANN, H., MELCHIOR, S. (2007): Ergebnisse des Status-Workshops - Anforderungen an Deponie - Oberflächenabdichtungssysteme, in: RAMKE, H. G., WITT, K. J., BRÄCKER, W., TIEDT, M., DÜLLMANN, H., MELCHIOR, S. (Hrsg.): Anforderungen an Deponie-Oberflächenabdichtungssysteme. Höxteraner Berichte angewandte Umweltwissenschaften, Band 6, Höxter.
- REINKEN, G.; ZADGORSKI, N.; FÜHR, F. (1995): Eine neuartige hochauflösende Methode der Röntgencomputertomographie zur zerstörungsfreien Analyse der Porenstruktur in Bodenkernen, *Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft*, Band 76, S. 137–140, Hannover.
- REUTER, E. MARKWARDT, N., PACALAJ, C.; SUTORIS, M. (2004): Die schwarzgrüne Barriere - Konzepte für eine nachhaltige und kostengünstige Schließung von Altdeponien. *Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik an der TU Braunschweig*, Heft 74, Eigenverlag Institut für Grundbau und Bodenmechanik TU Braunschweig.
- RICHTER, F.J, HORN, R., FLEIGE, H., KHALIL, A. (2001): Bodenkundliche Bewertung einer temporären Oberflächenabdichtung, in: *Wasser und Boden*, 53/6, S. 17–20, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin.
- ROGASIK, H., WEINKAUF, H., M. SEYFARTH. (1997): Methodik und Technologie zur Entnahme ungestörter Bodenproben. *Archiv Acker- Pflanzenbau Bodenkunde*, 41(3), S. 199–207.
- ROGASIK, H., CRAWFORD, J.W., WENDROTH, O., YOUNG, I. M., JOSCHKO, M., RITZ, K. (1999): Discrimination of soil phases by dual energy X-ray tomography, *Soil Science Society of America Journal*, 63, S. 741–751.
- ROGASIK, H., ONASCH, I., BRUNOTTE, J., JEGOU, D., WENDROTH, O. (2003-1): Assessment of soil structure using X-ray computed tomography, in: MEES, F., SWENNEN, R., VAN GEET, M., JACOBS, P. (eds.). *Applications of X-ray computed tomography in the geosciences*. Geological society London, Special publications, 215, The geological society of London, S. 151–165.

- ROGASIK, H., ONASCH, I., GERKE, H.H. (2003): Characterising soil structure by ct-data variance as a function of the spatial resolution, Geophysical research abstracts, Vol. 5, 05064, European Geophysical society.
- ROGASIK, H., ONASCH, I., TOMANOVA, O., KOCH, H.J., GERKE; H.H. (2005): Morphologische Gefügedifferenzierung bei „natürlichen“ und gestörten Lößböden auf der Grundlage röntgencomputertomographischer Untersuchungen, Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 106, S. 47–48, Hannover.
- ROGASIK, H., JOSCHKO, M., BRUNOTTE, J. (1994): Nutzung der Röntgen-Computertomographie zum Nachweis von Gefügeänderungen durch Mulchsaat, Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 73, S. 111–114, Hannover.
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. 14. Auflage. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- SCHULTE, U. (1998): Isotopengeochemische Untersuchungen zur Charakterisierung biologisch gesteuerter Redoxprozesse in Aquiferen der Niederrheinischen Bucht, Dissertation an der Ruhr-Universität Bochum, Bochum.
- SONNTAG, C., KLITZSCH, E., SHAZLY, E. M., KALINKE, C., MÜNNICH, K. O. (1978): Paläoklimatische Information im Isotopengehalt  $^{14}\text{C}$ -datierter Saharawässer: Kontinentaleffekt in D und  $^{18}\text{O}$ , Geologische Rundschau, 67, S. 413-424, Stuttgart.
- SPERL, C, DU, S.; FUB, C (1995): Erweiterung des Georadar-Verfahrens zur Erfassung der Bodenfeuchte vom 2-dimensionalen auf den 3-dimensionalen Raum, Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 76, S. 1275–1278, Hannover.
- TUCKER, M. (ed.) (1988): Techniques in Sedimentology. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- VIELHABER, B., BERGER, K., MELCHIOR, S. (1993): Feldversuche zur Austrocknungsgefährdung von Kombinationsdichtungen in Deponieabdeckungen durch temperaturbedingte Wasserbewegung, Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 72, S. 1415–1418, Hannover.
- WARNER, G. S., NIEBER, J. L., MOORE, I. D., GEISE, R. A. (1989): Characterizing macropores in soil by computed tomography, Soil Science Society of America Journal, 53, S. 653-660.
- WEIß, K., ZEPP, H.(2004): Wirksamkeit eines alternativen Deponie - Oberflächenabschlussystems mit mineralischer Dichtschicht, In: Müll und Abfall, Nr. 3, S. 131–134.

- WITT, K. J. (2007-1): Bedingungen der Beständigkeit tonmineralischer Komponenten in Oberflächenabdichtungssystemen, in: HENKEN-MELLIES, W. U. (Hrsg.): 18. Nürnberger Deponieseminar 2007, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstitutes, Nürnberg, Heft 86, S. 115–134.
- WITT, K. J. (2007-2): Überlegungen zu geotechnischen Anforderungen an Oberflächenabdichtungssysteme, In: RAMKE, H. G., WITT, K. J., BRÄCKER, W., TIEDT, M., DÜLLMANN, H., MELCHIOR, S. (Hrsg.): Anforderungen an Deponie-Oberflächenabdichtungssysteme. Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 6
- WITT, K. J., ZEH, R. (2005): Wirkungsweise von Kapillarschutzschichten für mineralische Oberflächenabdichtungen, In: HENKEN-MELLIES, W. U. (Hrsg.): 16. Nürnberger Deponieseminar 2005, Veröffentlichungen des LGA - Grundbauinstitutes, Nürnberg, Heft 84, S. 233–246.
- WITT, K. J. (2005): Unorthodoxe Gedanken zur Eignungsfeststellung von mineralischen Abdichtungskomponenten für Oberflächenabdichtungen von Deponien, Vorträge zur 21. Fachtagung „Die sichere Deponie“, SKZ, Würzburg.
- WITT, K. J., ZEH, R. (2004): "Maßnahmen gegen Trockenrisse in mineralischen Abdichtungen", Sonderdruck des Beitrages zum: Vertiefersseminar Zeitgemäße Deponietechnik 2004, FEI, Universität Stuttgart.
- WOLF, H. J., HECKER, J. M., DIESTEL, H. (1996): Die Veränderung des Gefüges auf der Vortriebsfläche einer Basisabdichtung und ihre quantitative Kennzeichnung mit Hilfe der Röntgen-Computertomographie, Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft, Band 79, S. 35–38, Hannover.
- ZEPP, H. (2004): Handlungsempfehlung der Ruhr-Universität Bochum, Anforderung an den Aufbau eines alternativen Oberflächenabdichtungssystems, unveröffentlicht, Bochum.
- ZEPP, H. (2003): Abschlussbericht zum 3. Förderzeitraum zur Vorlage beim Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen - Wasserhaushalt und Niederschlagsinfiltration im Abdecksystem der Zentraldeponie Castrop-Rauxel, unveröffentlicht.
- ZEPP, H., HENNIG, A. (2002): Auflastbedingte Konsolidation einer mineralischen Dichtschicht, in: RAMKE, H. G., GARTUNG, E., HEIBROCK, G., LÜKEWILLE, W., MELCHIOR, S., VIELHABER, B. BOHNE, K., MAIER-HARTH, U., WITT, K. J. (Hrsg.): Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen - Status Workshop -, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 3, S. 157-166, Höxter.
- ZEPP, H., LOHMANN, A (2002): Neue Lösung für Oberflächenabdichtungen von Deponien, In: Abfall-Recycling-Altlasten 27, 63, S. 1-14.
- ZEPP, H. (2000): Abschlussbericht zum 1. Förderzeitraum zur Vorlage beim Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen - Wasserhaushalt und Niederschlagsinfiltration im Abdecksystem der Zentraldeponie Castrop-Rauxel, unveröffentlicht.

ZEPP, H. (2009): Zwischenbericht zum 4. Förderzeitraum zur Vorlage beim Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen - Wasserhaushalt und Niederschlagsinfiltration im Abdecksystem der Zentraldeponie Castrop-Rauxel, unveröffentlicht.

### Internetquellen

HORN, R. (2001): Verbesserung der Langzeitbeständigkeit durch modifizierte Mineralische Abdichtungssysteme, Manuskript von der 12. Abfalltagung im LANU, [http://www.umweltdaten.landsh.de/nuis/abfall/info/tagung12/horn\\_manuskript.pdf](http://www.umweltdaten.landsh.de/nuis/abfall/info/tagung12/horn_manuskript.pdf), 26.07.2008.

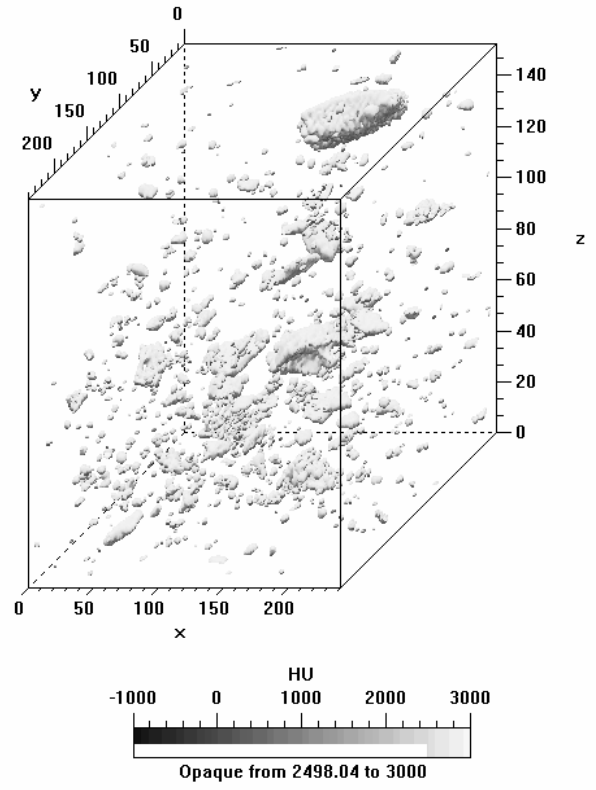
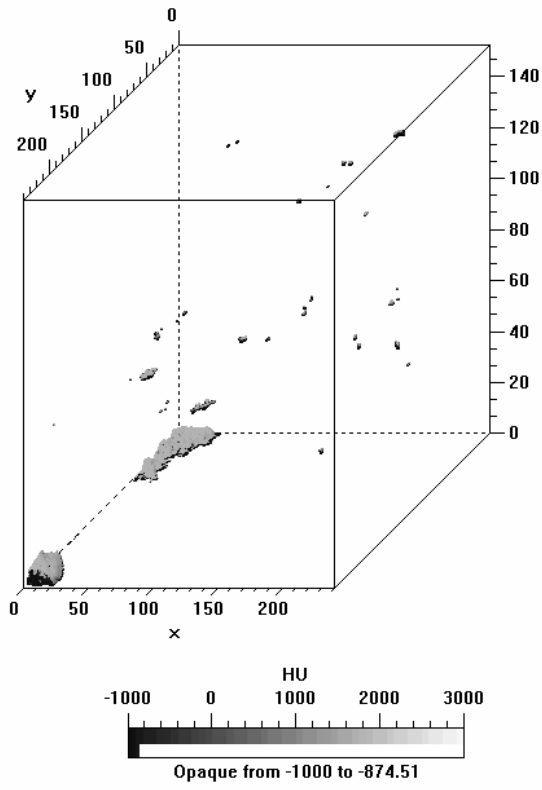
MIEHLICH, G. (2006): Die Altdeponie Hamburg-Georgswerder ein Fallbeispiel für Bodenbelastung und Bodensanierung  
<http://www.geowiss.uni-hamburg.de/i-boden/publrel/MiehlichGeorgswerder.pdf>

ZEH, R. (2007): Die Zugfestigkeit bindiger Böden als Kriterium der Rissgefährdung mineralischer Oberflächenabdichtungen  
URN:urn:nbn:de:gbv:wim2-20070522-8692  
URL: <http://e-pub.uni-weimar.de/volltexte/2007/869/22.05.2007>

<http://www.lanuv.nrw.de/abfall/deponierung/deponierung.htm>; 15.11.2007

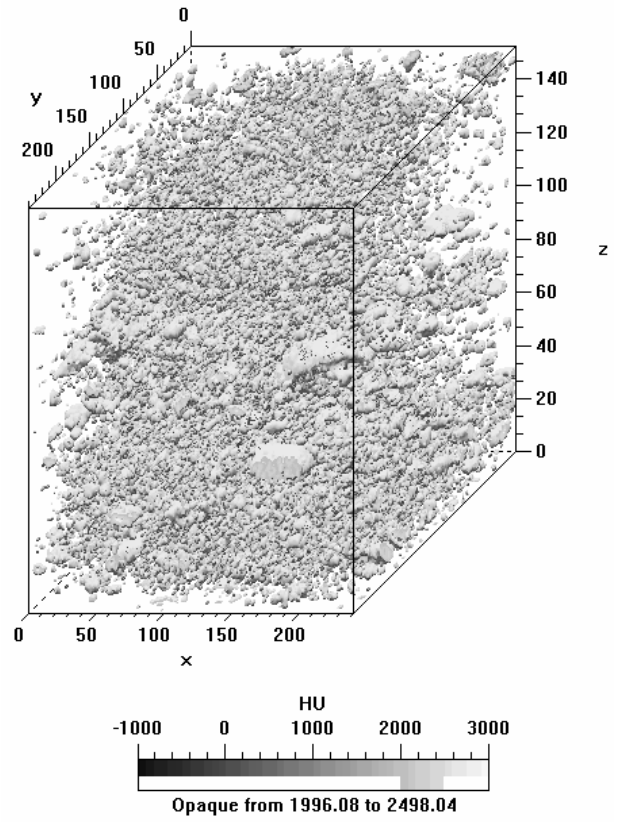
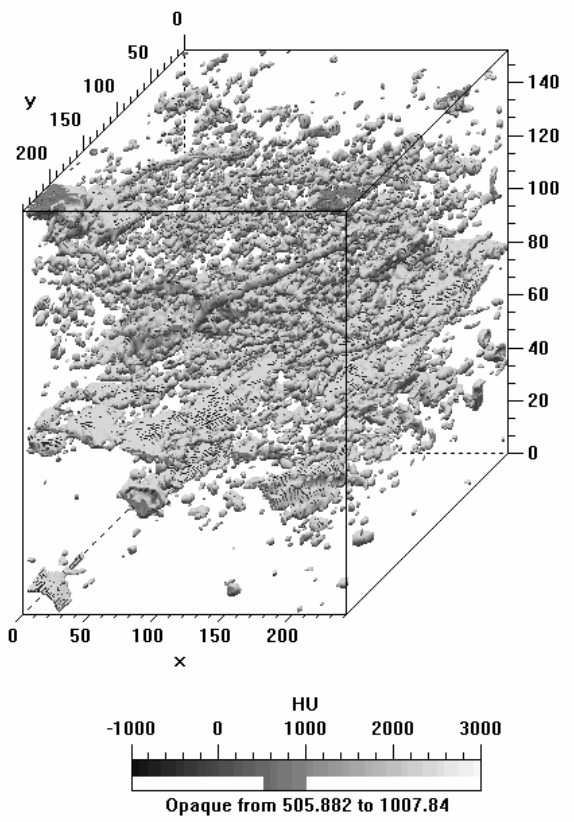
<http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/alfaweb/berichte/tba19-95/uv0016.html>;  
25.09.2008

# Anhang



**-1000 bis -875 HU**

**2500 bis 3000 HU**



**500 bis 1000 HU**

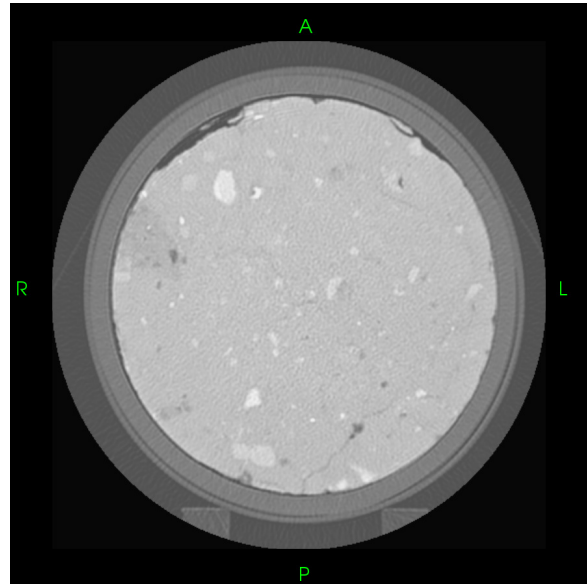
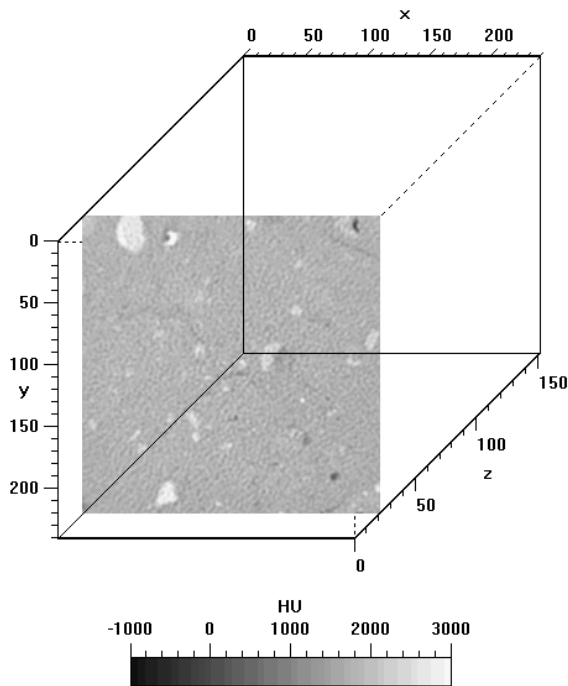
**2000 bis 2500 HU**



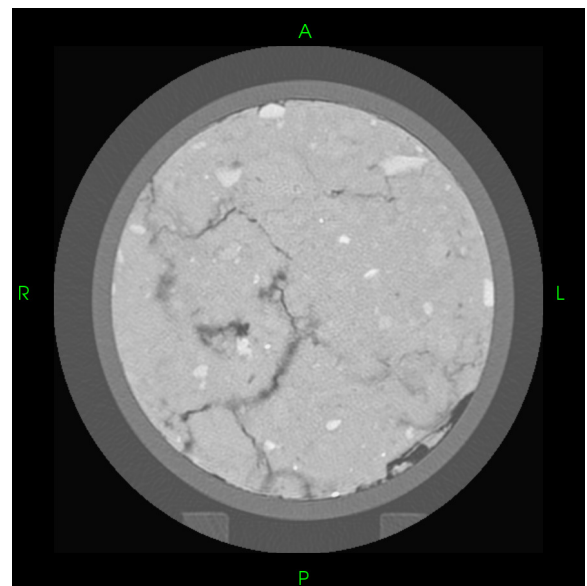
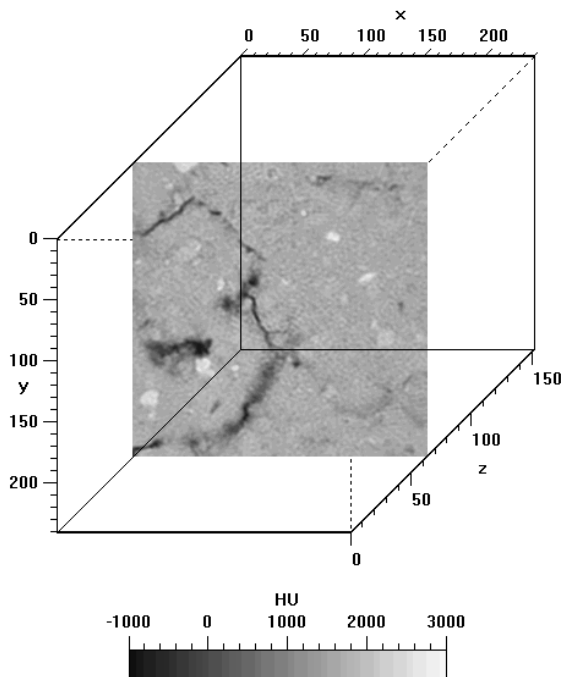
Zur Diskussion des Dichterverlaufs ausgewählte Scheiben.

**Linke Seite** - Ausschnitt quadratisches Prisma (SlicerDicer);

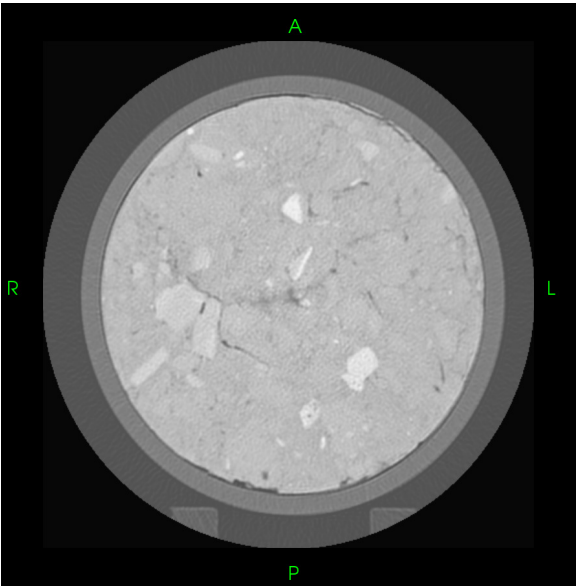
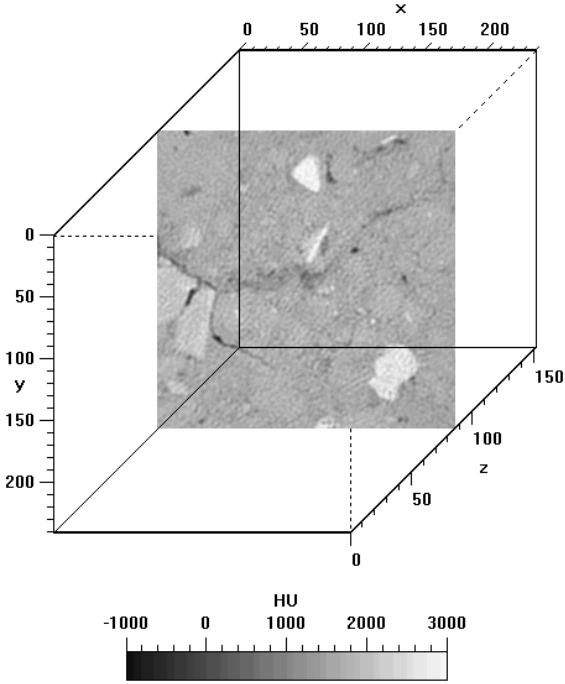
**Rechte Seite** - vollständiger Querschnitt (VolView)



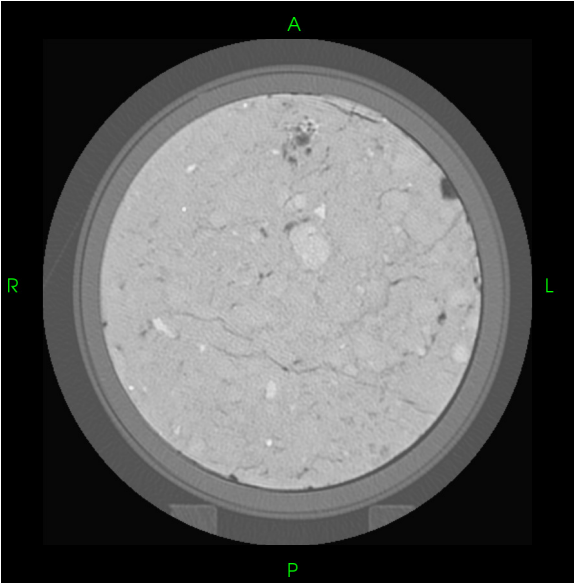
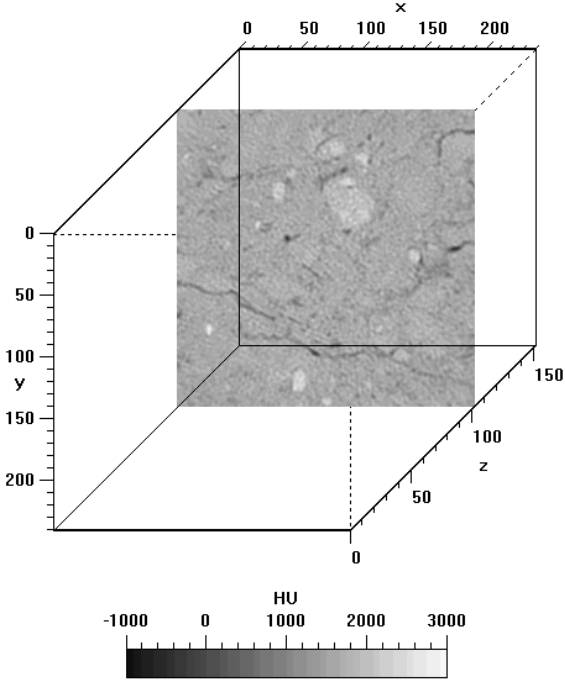
**Scheibe 20**



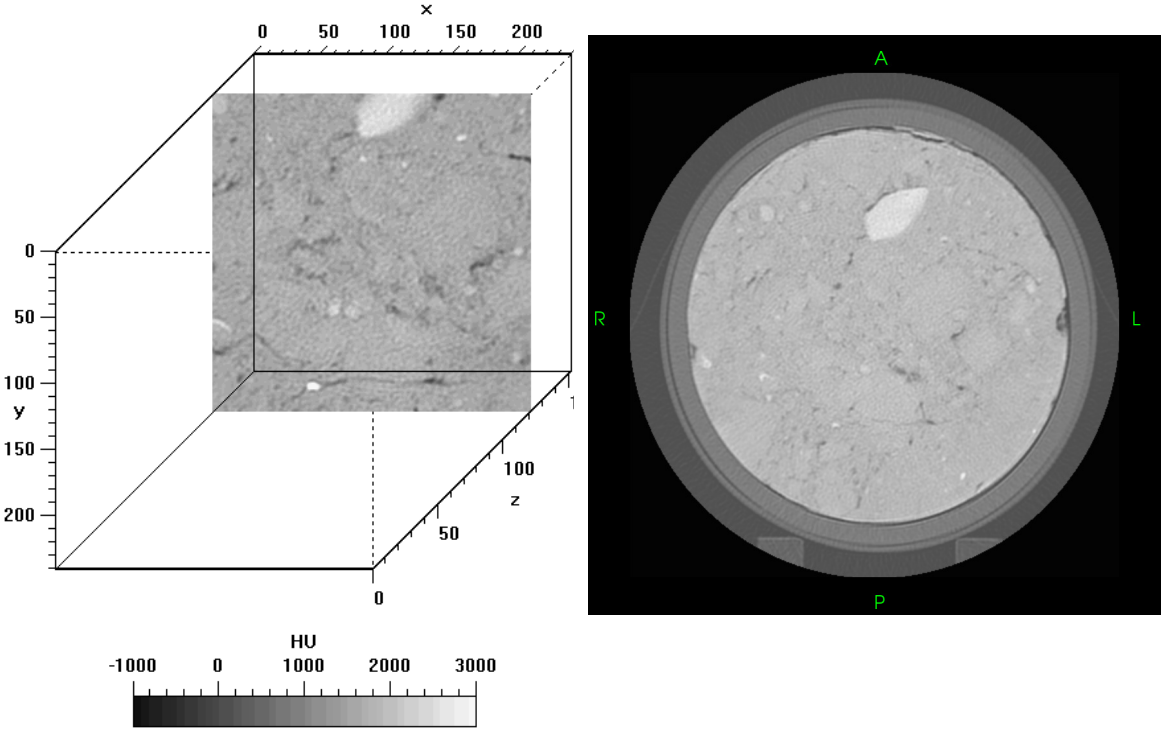
**Scheibe 62**



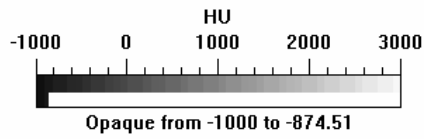
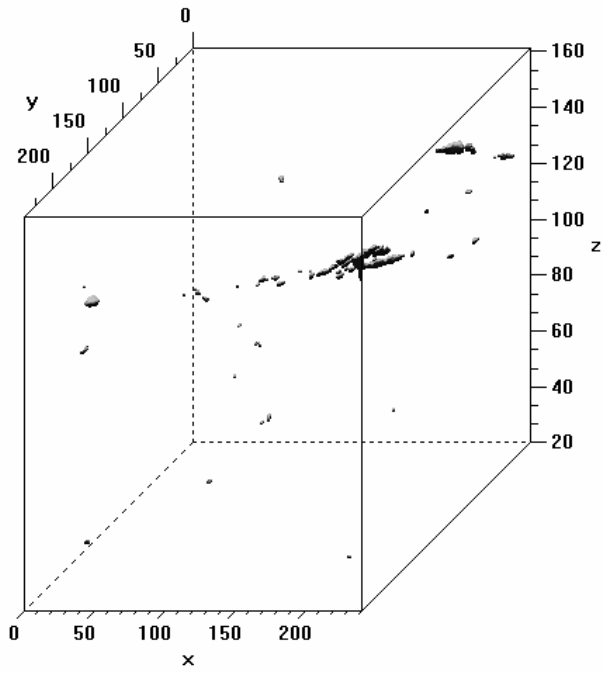
Scheibe 85



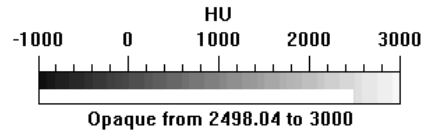
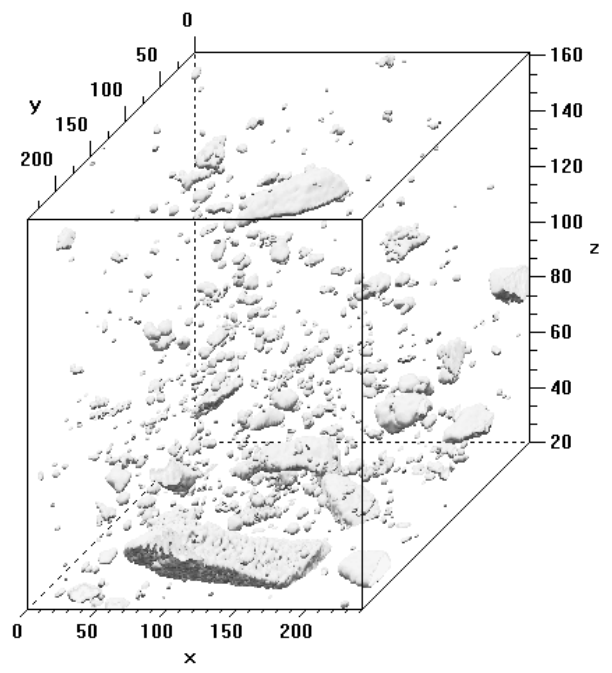
Scheibe 101



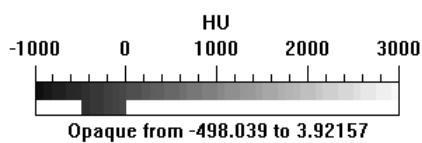
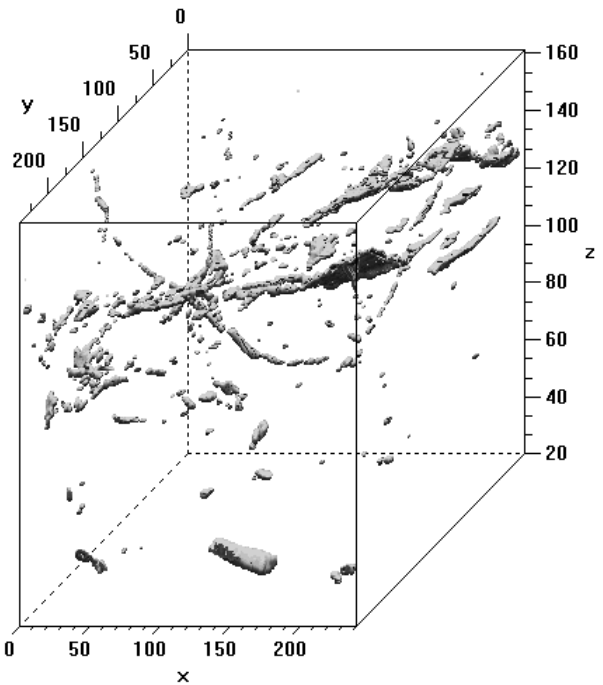
Scheibe 120



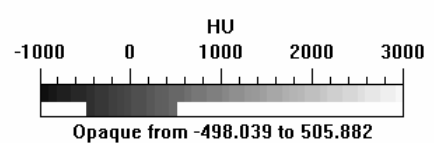
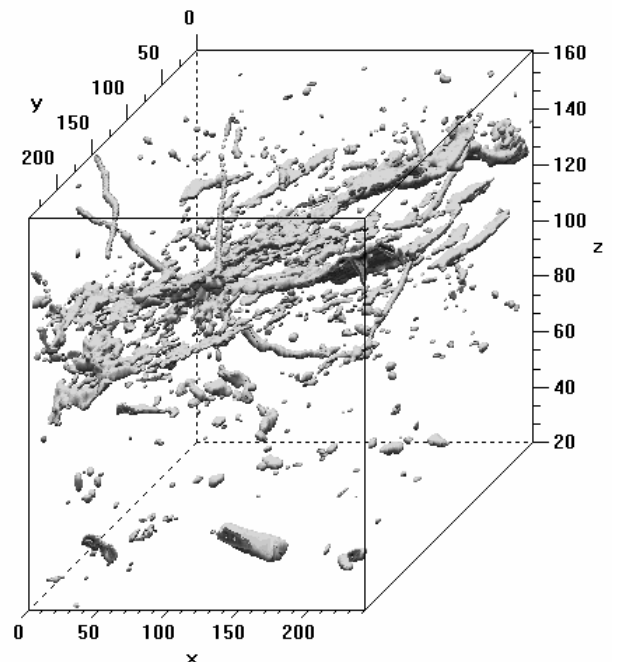
**-1000 bis -875 HU**



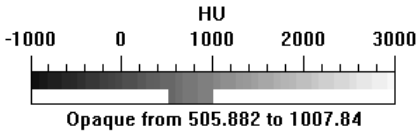
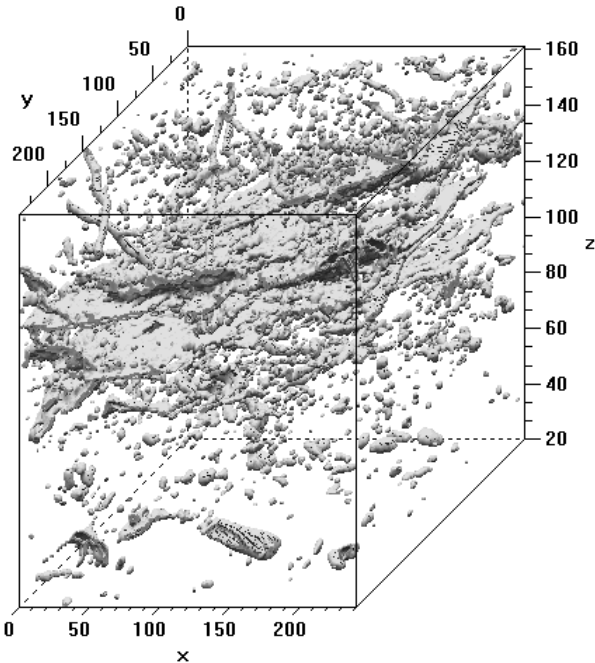
**2500 bis 3000 HU**



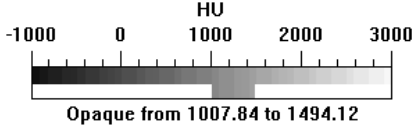
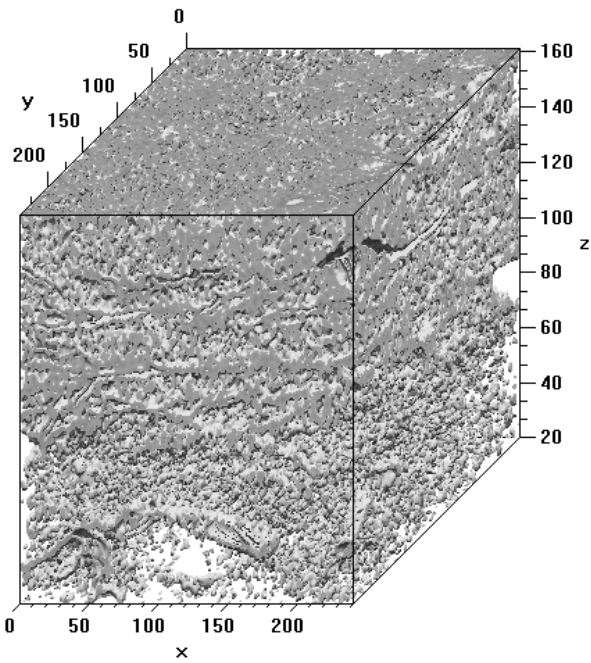
**-500 bis 0 HU**



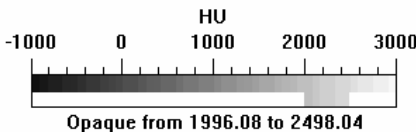
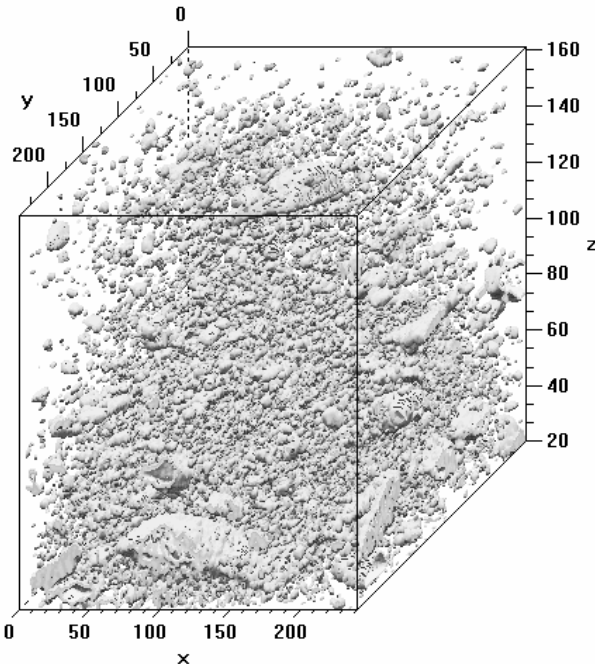
**-500 bis 500 HU**



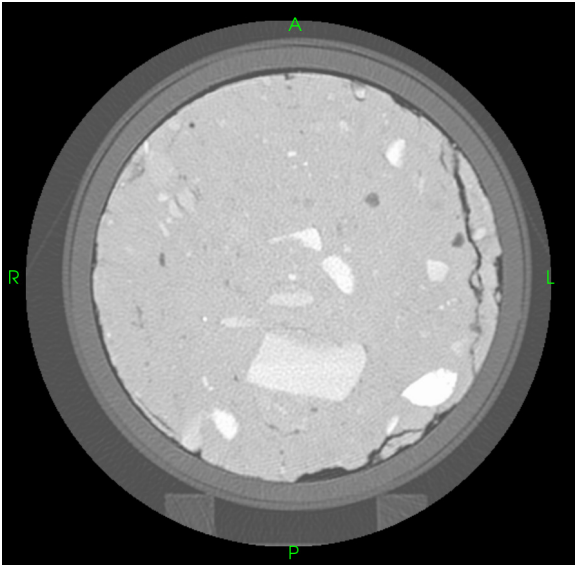
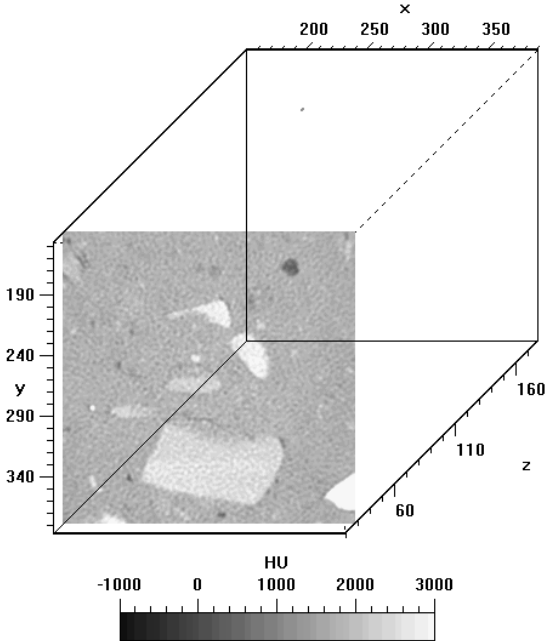
500 bis 1000 HU



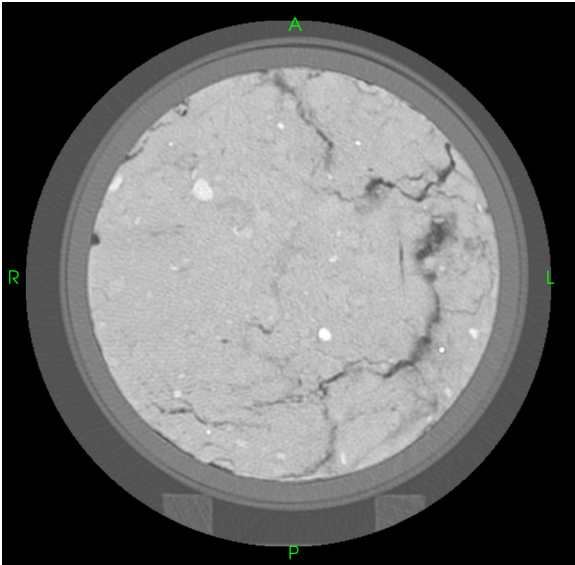
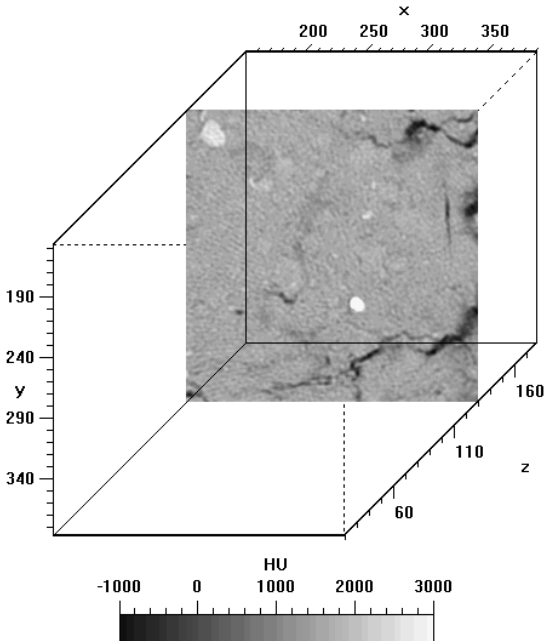
1000 bis 1500 HU



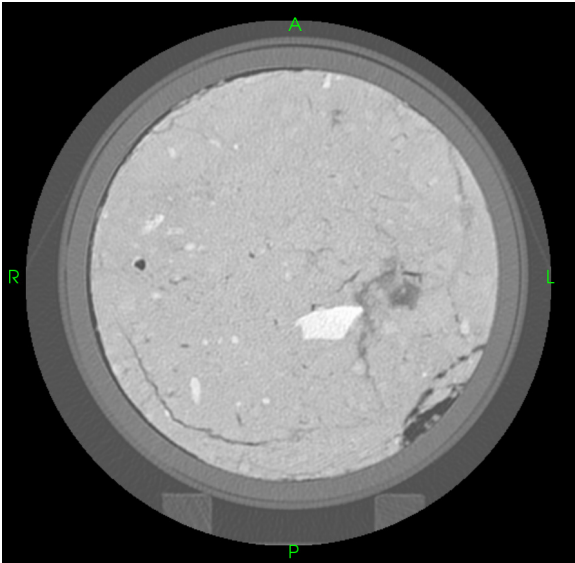
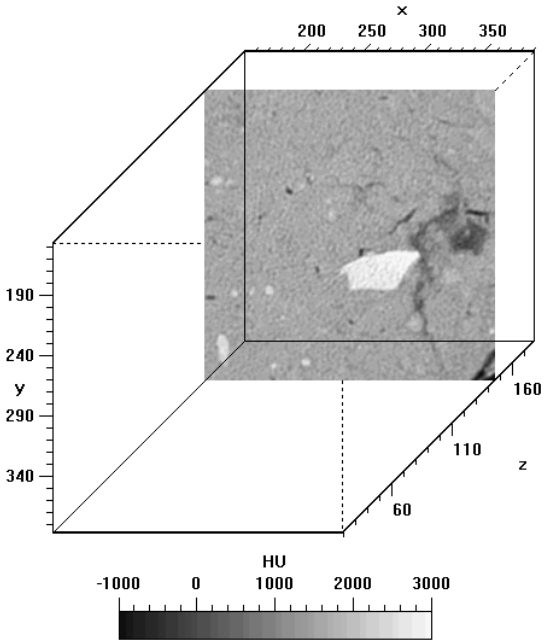
2000 bis 2500 HU



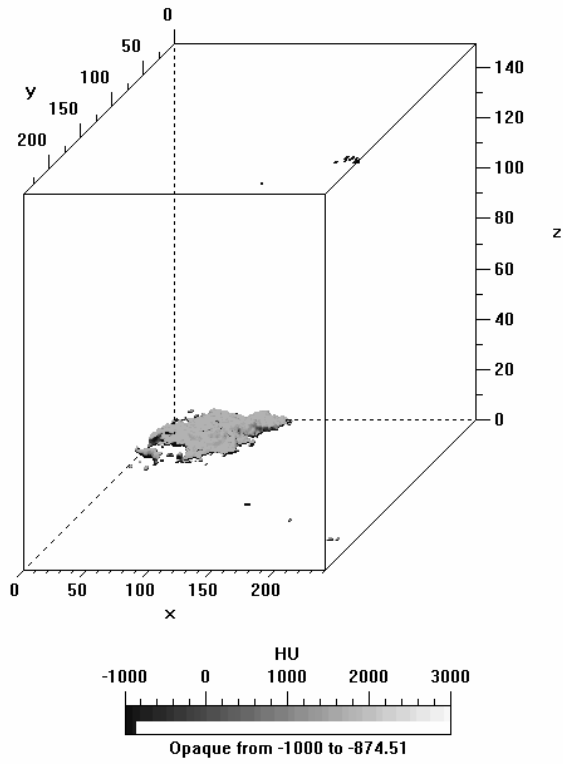
Scheibe 27



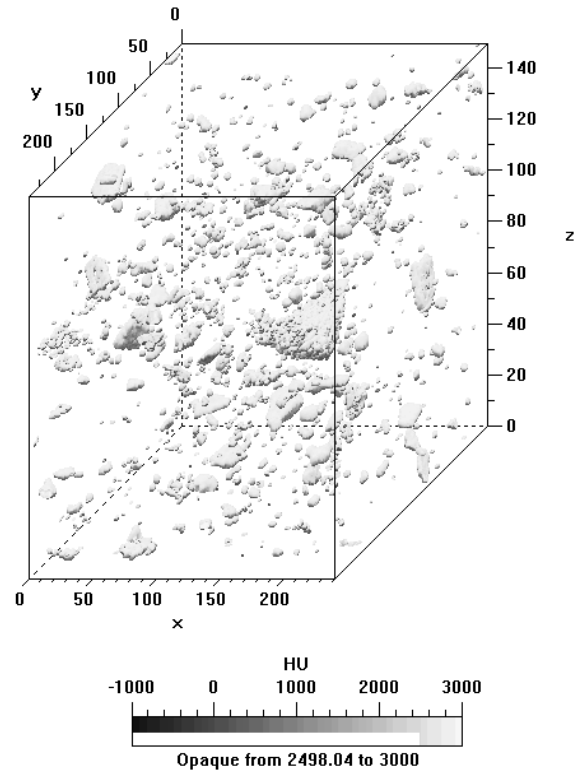
Scheibe 129



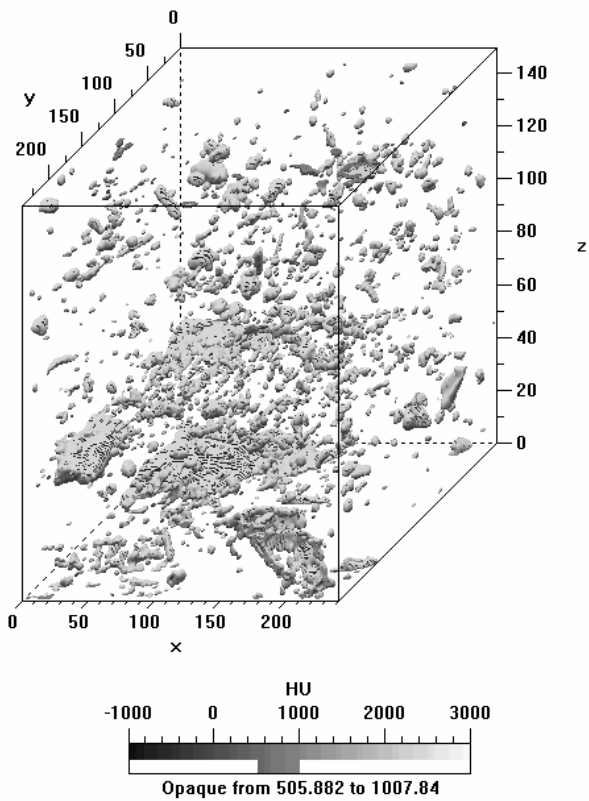
Scheibe 145



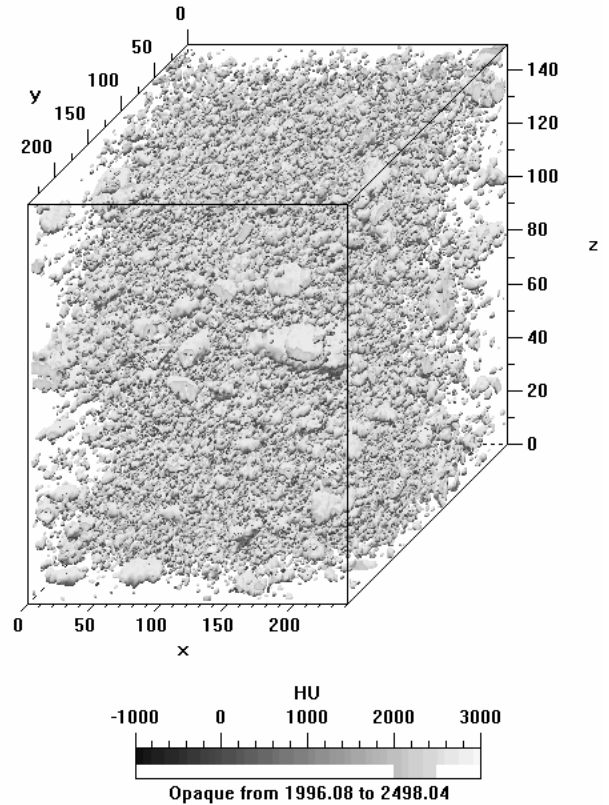
**-1000 bis -875 HU**



**2500 bis 3000 HU**

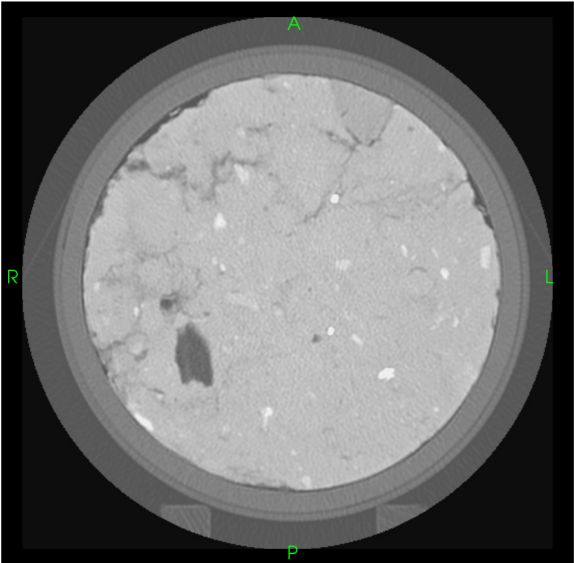
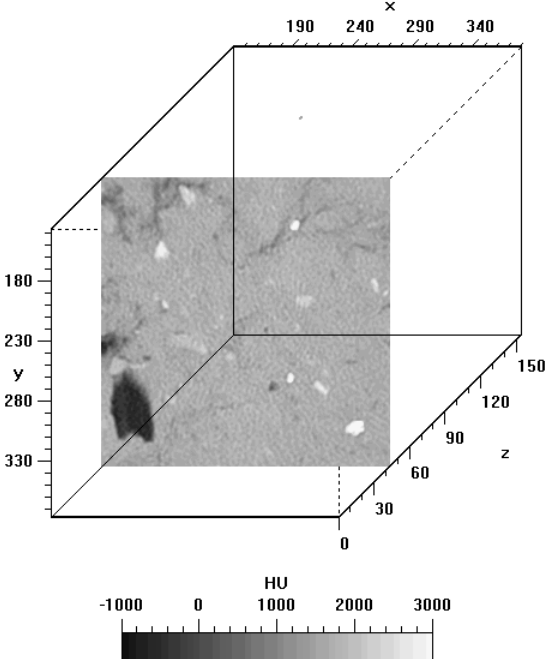


**500 bis 1000 HU**

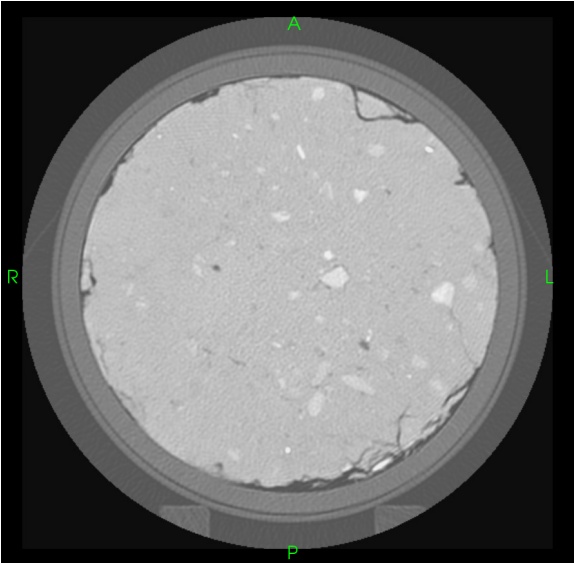
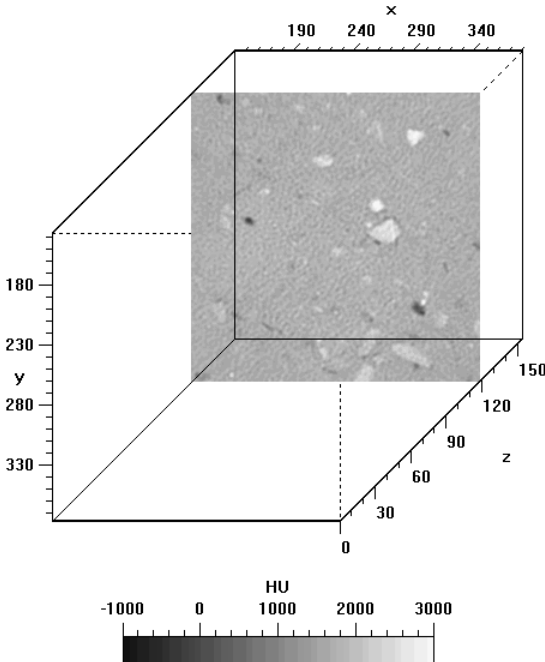


**2000 bis 2500 HU**

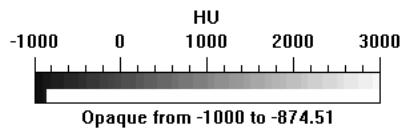
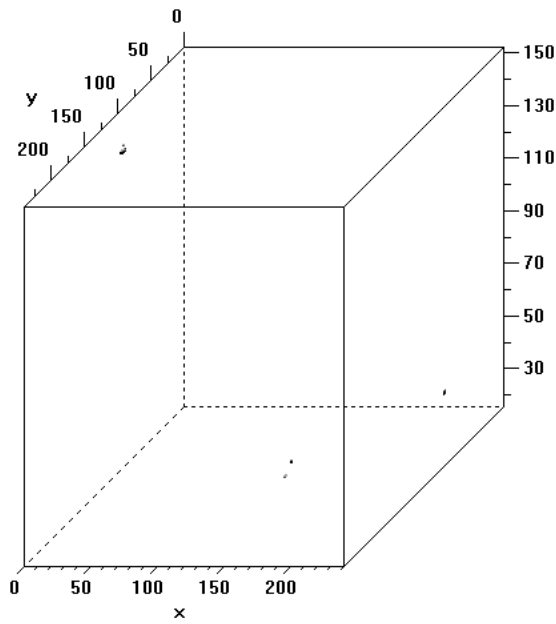




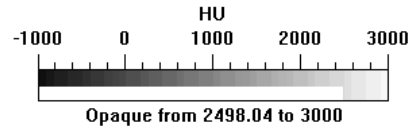
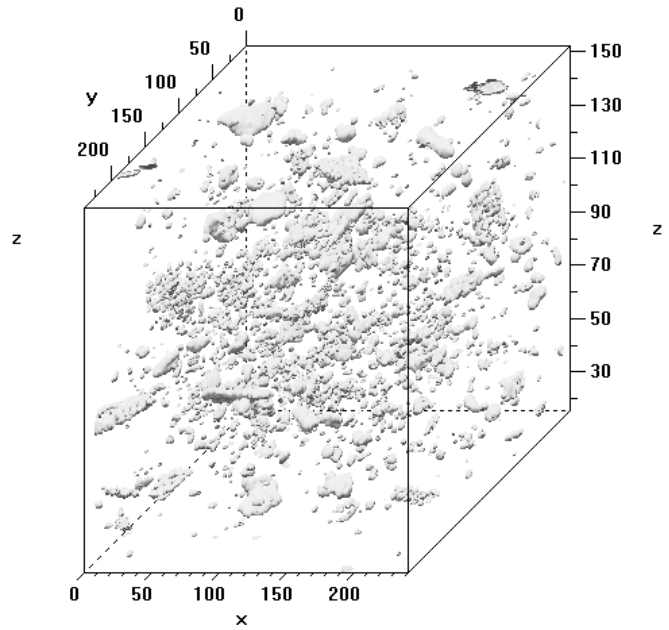
Scheibe 42



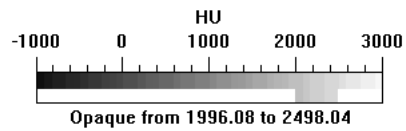
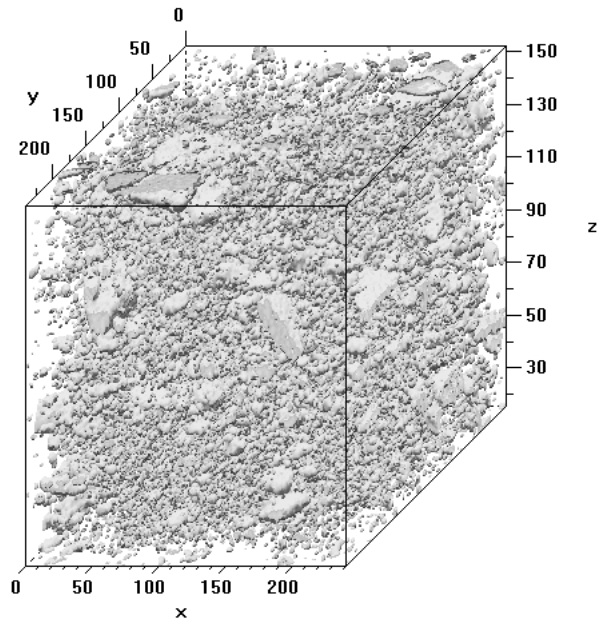
Scheibe 116



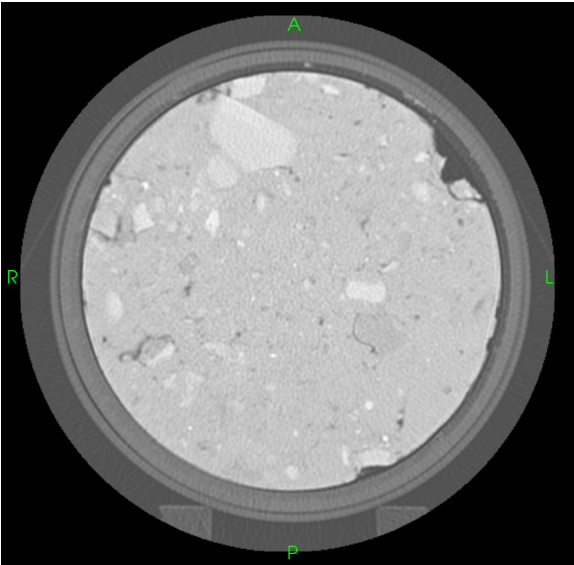
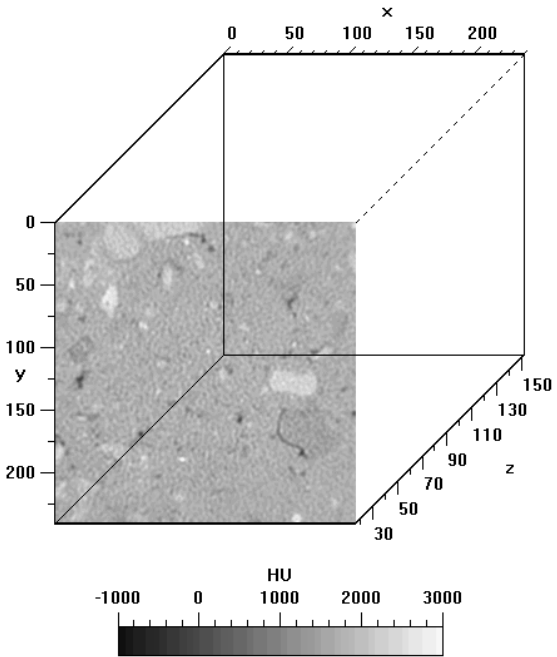
**-1000 bis -875 HU**



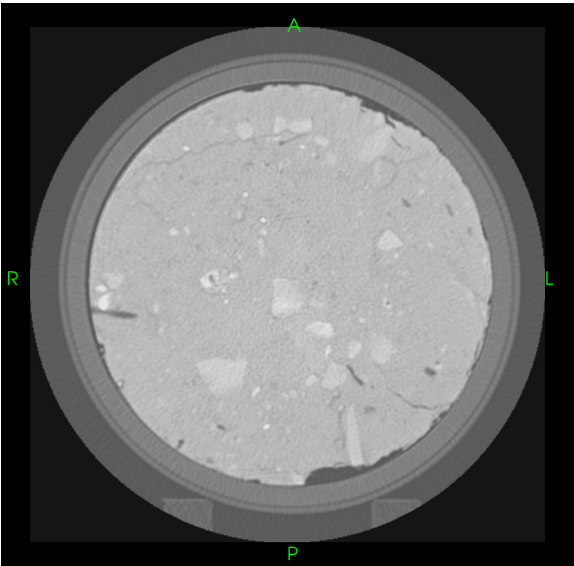
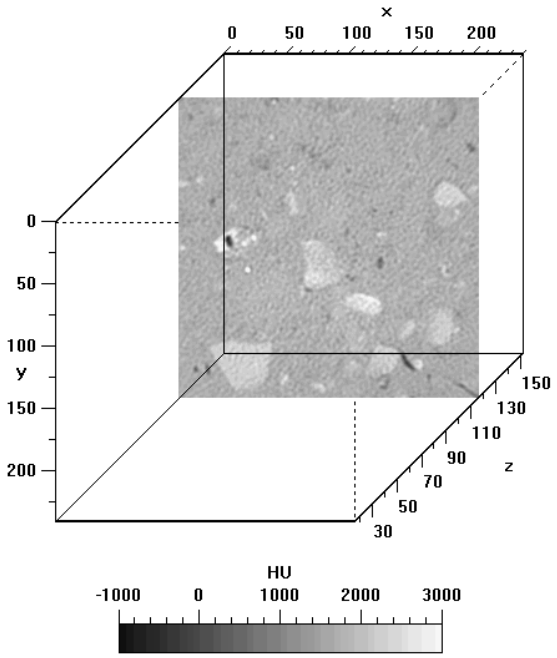
**2500 bis 3000 HU**



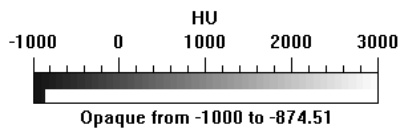
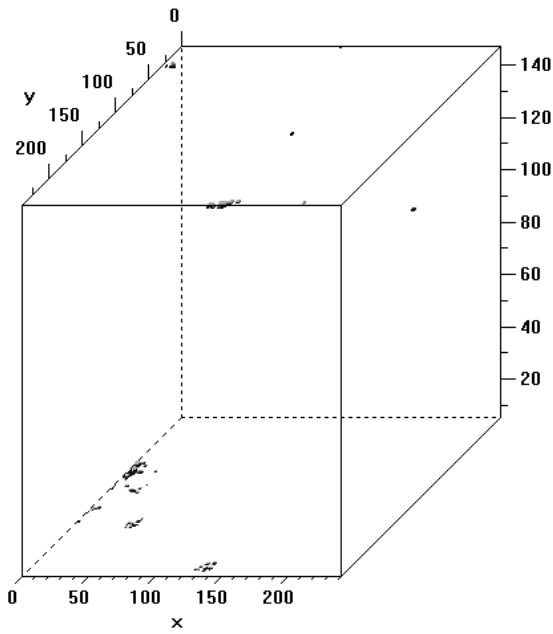
**2000 bis 2500 HU**



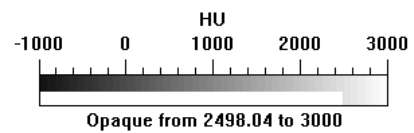
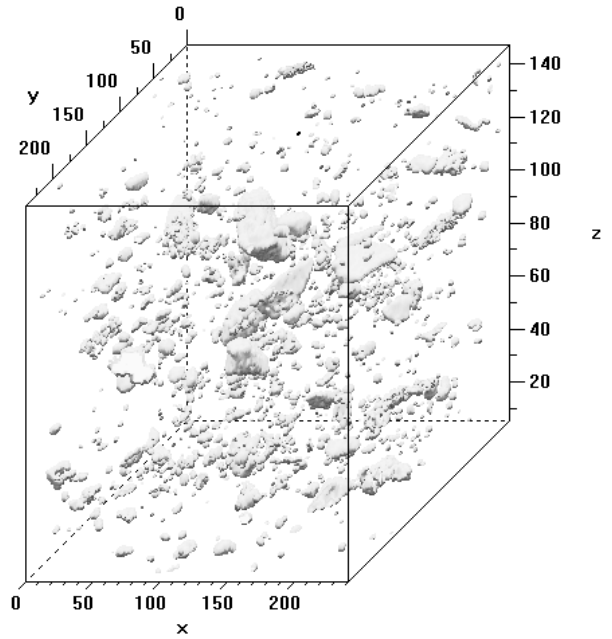
Scheibe 15



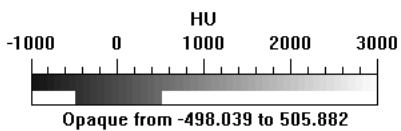
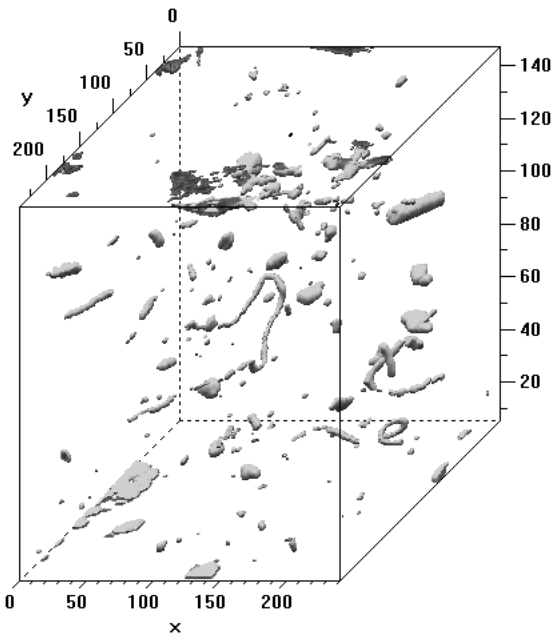
Scheibe 115



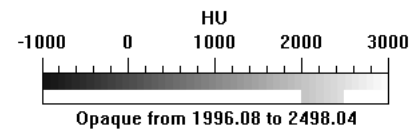
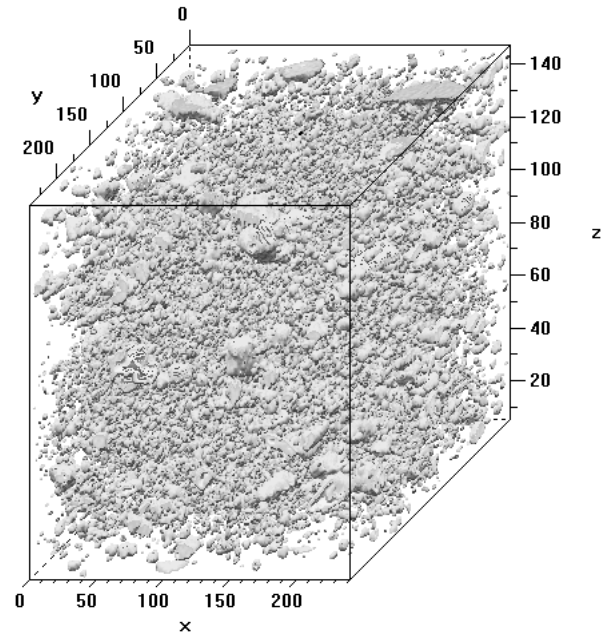
**-1000 bis -875 HU**



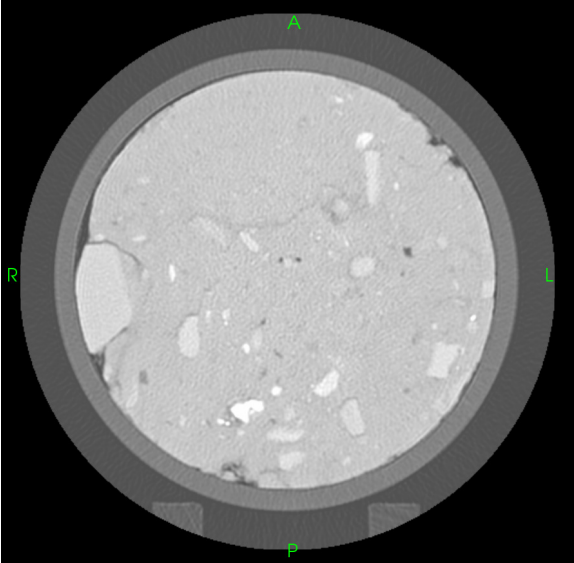
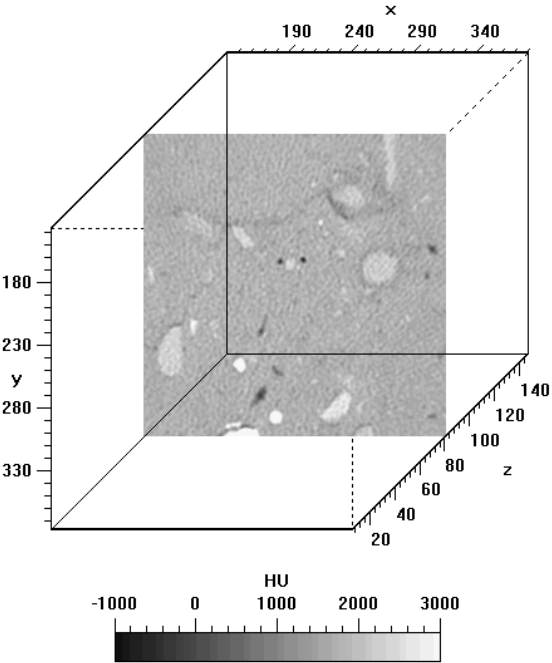
**2500 bis 3000 HU**



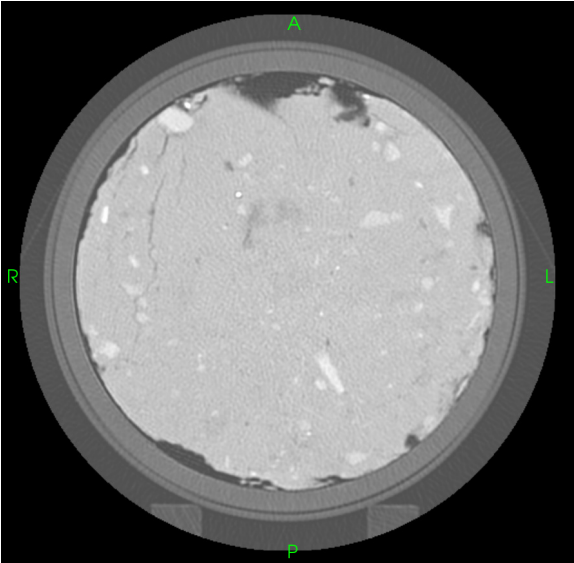
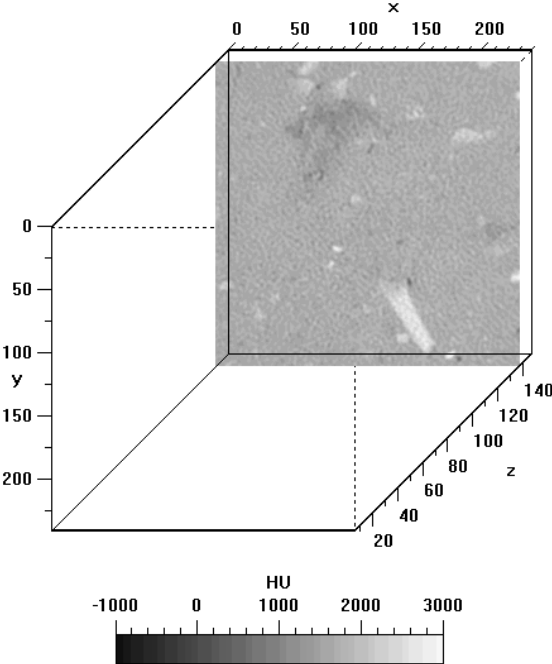
**-500 bis 500 HU**



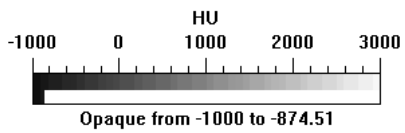
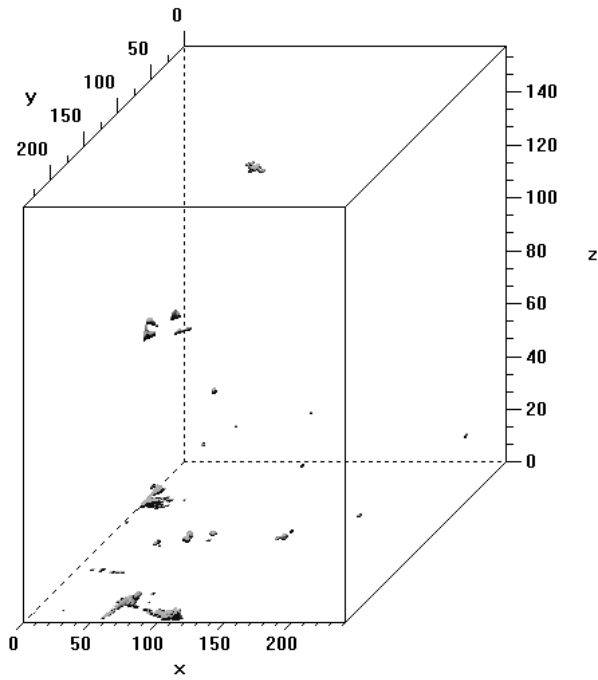
**2000 bis 2500 HU**



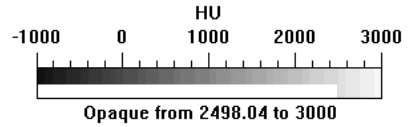
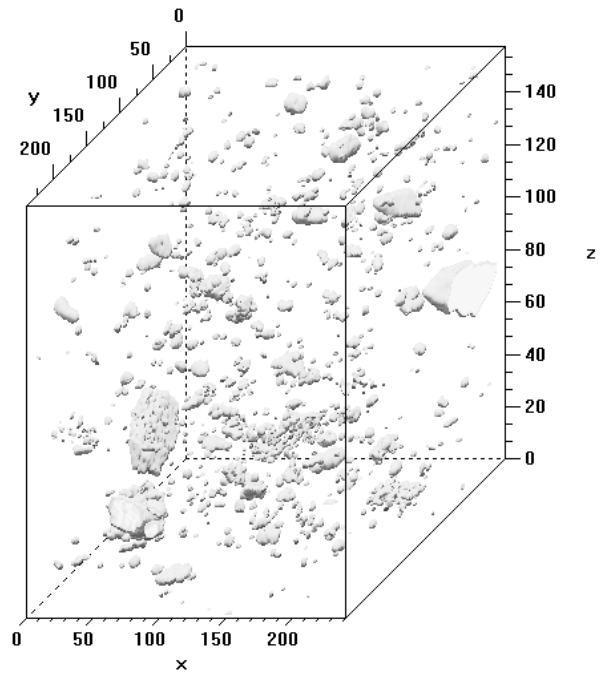
Scheibe 80



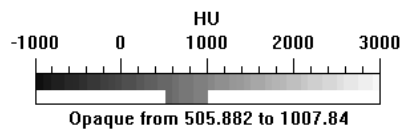
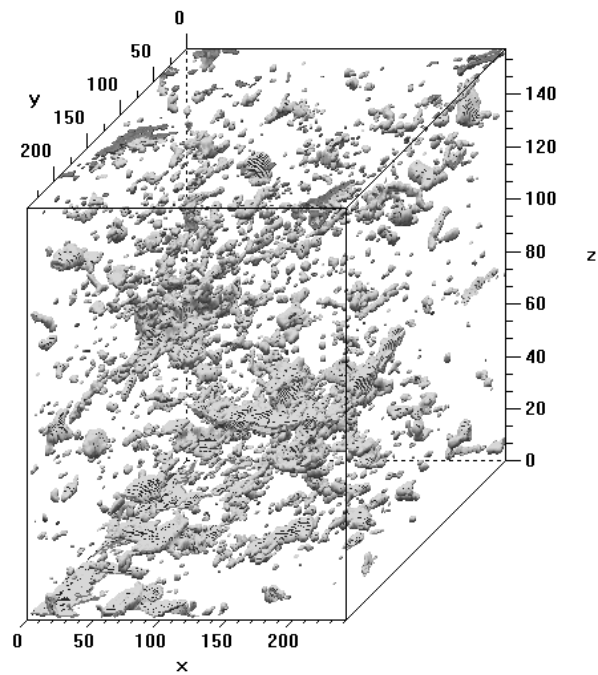
Scheibe 136



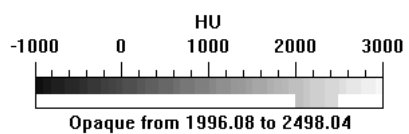
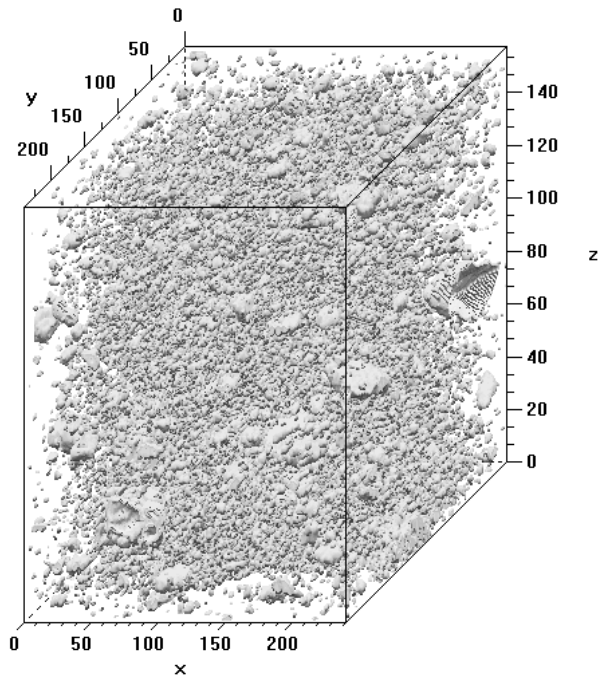
**-1000 bis -875 HU**



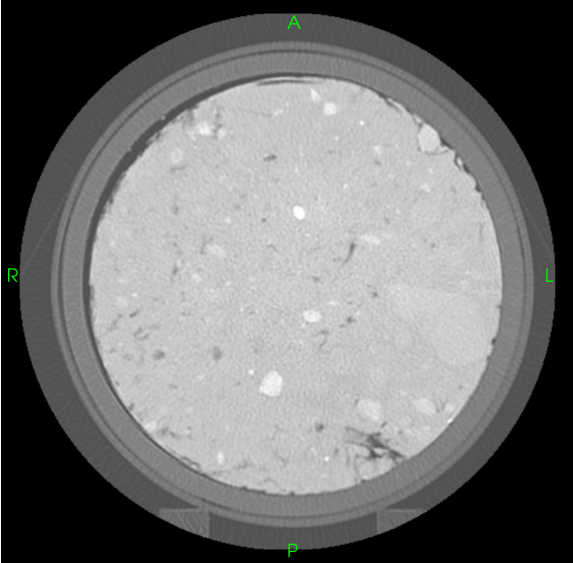
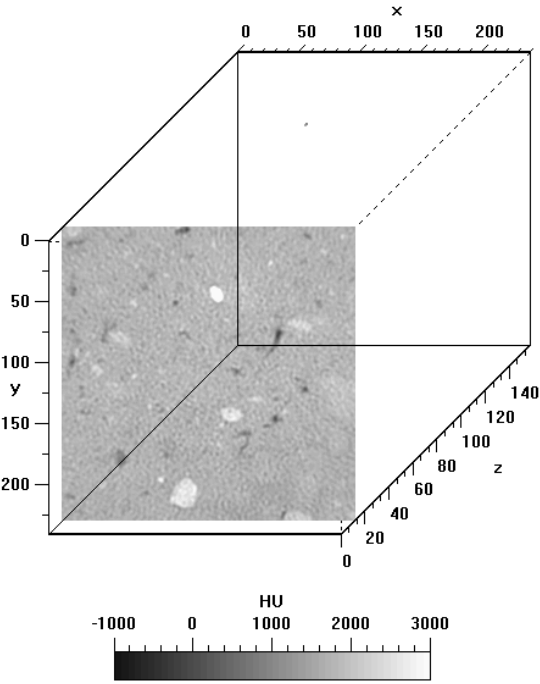
**2500 bis 3000 HU**



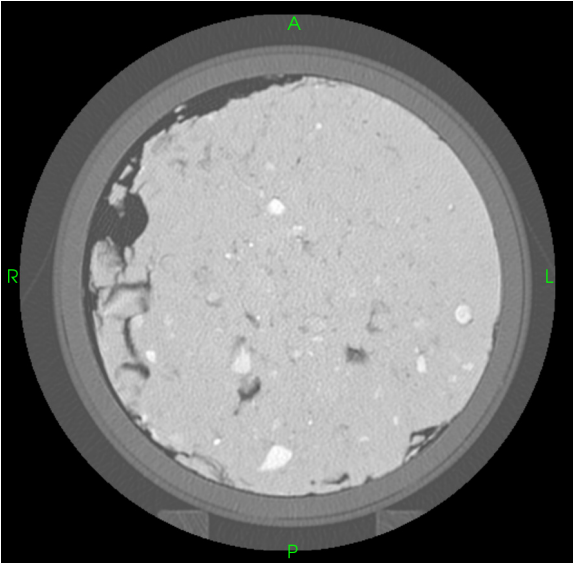
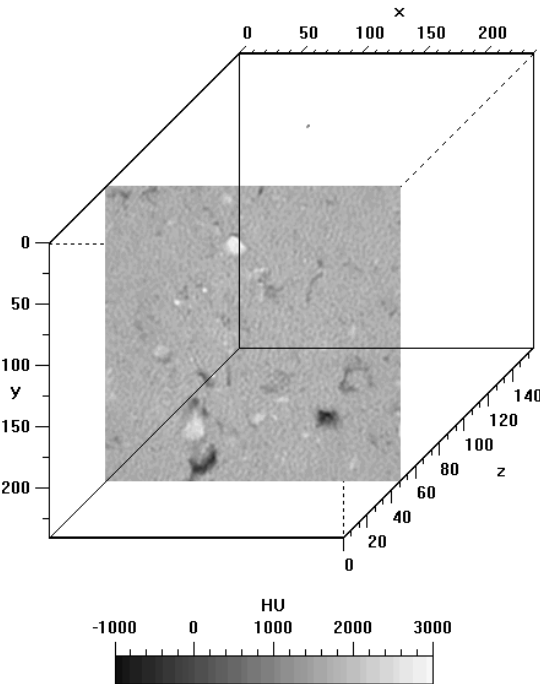
**500 bis 1000 HU**



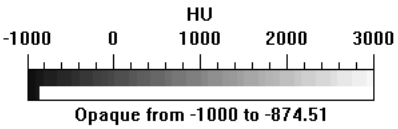
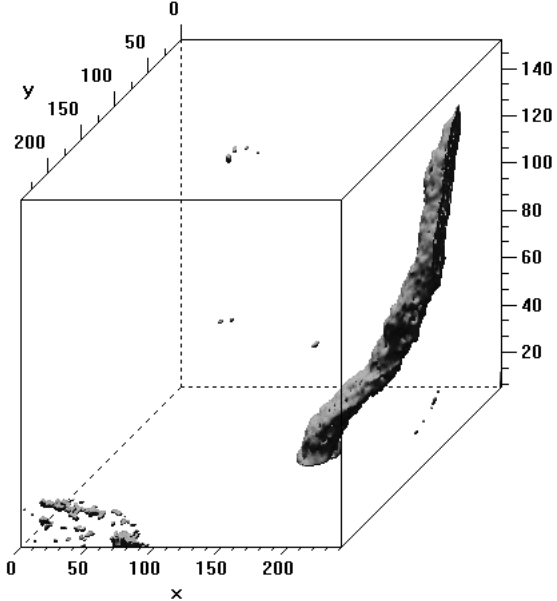
**2000 bis 2500 HU**



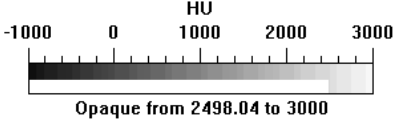
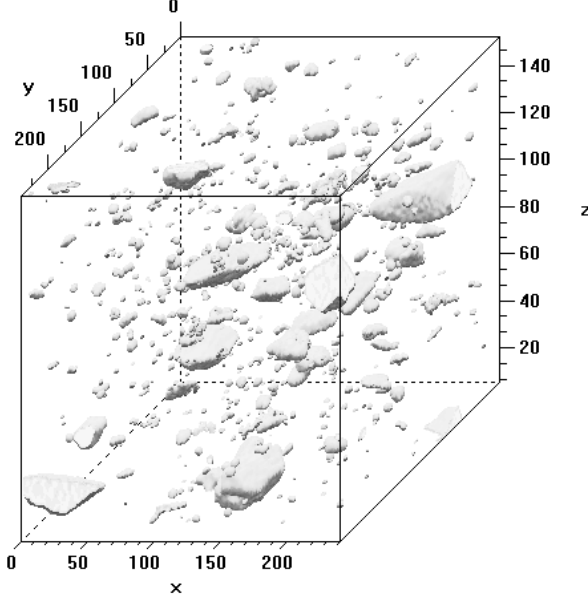
Scheibe 11



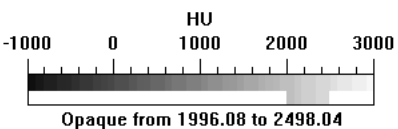
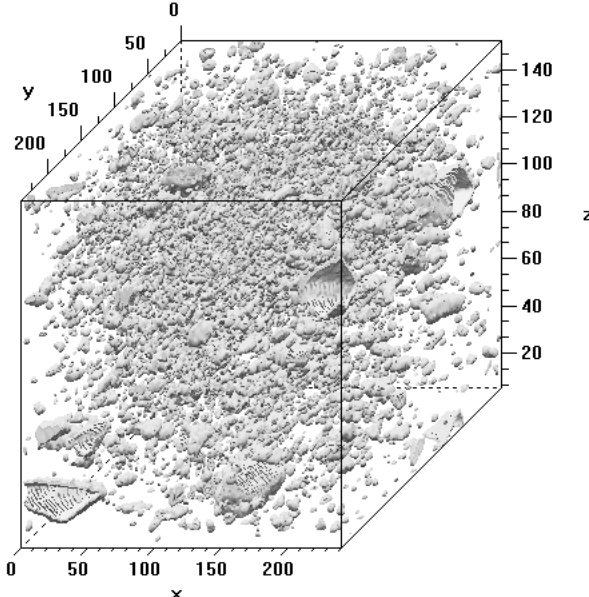
Scheibe 46



**-1000 bis -875 HU**



**2500 bis 3000 HU**



**2000 bis 2500 HU**



Teufe [cm]	RUB A [Gew.%]	RUB B [Gew.%]	HEN A [Gew.%]	HEN B [Gew.%]	Teufe [cm]	RUB A [Gew.%]	RUB B [Gew.%]	HEN A [Gew.%]	HEN B [Gew.%]
25					185	12,7	13,8		
26					186		14,3		
27		15,1			187	12,6	14,3		
28					188	12,5	14,1		
29		13,5			189	12,7			
30		14,4			190	13,0			
31		12,5			191	13,3			
32		12,4			192	12,6			
33		13,2			193	13,8			
34		12,5			194				
140	15,9		18,1		195			17,8	
141	15,5				196				
142	16,2				197	12,1			
143	15,4				198	12,6			
144	15,0				199	13,0			
145	15,0				200	13,2			
146	13,4				201	12,9			
147	13,5				202				
148	12,6				203	13,0			
149	14,3				204	12,5			
150	13,1	12,6		16,7	205		13,4		16,3
151	14,2	12,5			206		12,8		
152	13,5	13,5			207		13,8		
153	13,5	13,3			208				
154	13,4	13,4			209		13,5		
155	13,3	13,4			210		13,5		
156	13,4				211				
157		13,6			212		13,8		
158	14,0	13,5			213		13,9		
159	15,1	14,5			214		14,5		
175			15,8		215	12,7		16,3	15,2
176	10,8				216		12,9		
177	11,6				217	13,8	13,1		
178	12,1				218	14,1	12,5		
179	12,3				219	14,5			
180	13,3	13,7			220	15,0	14,1		
181	13,3				221		14,4		
182	12,5				222		14,0		
183	11,8	14,2			223	14,3	13,7		
184	12,5	14,1			224	15,3	13,3		

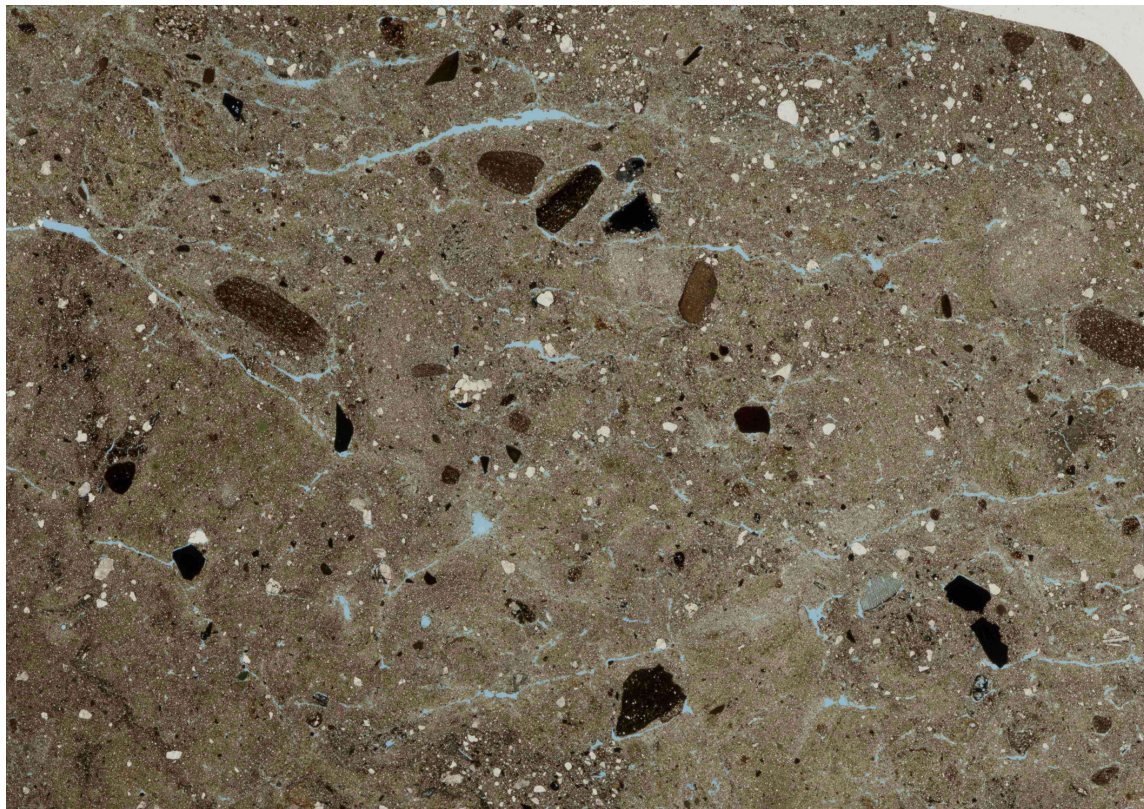
**Legende:**

RUB A = gravimetrischer Wassergehalt Versuchsfeld 2A bestimmt an der Ruhr-Universität Bochum

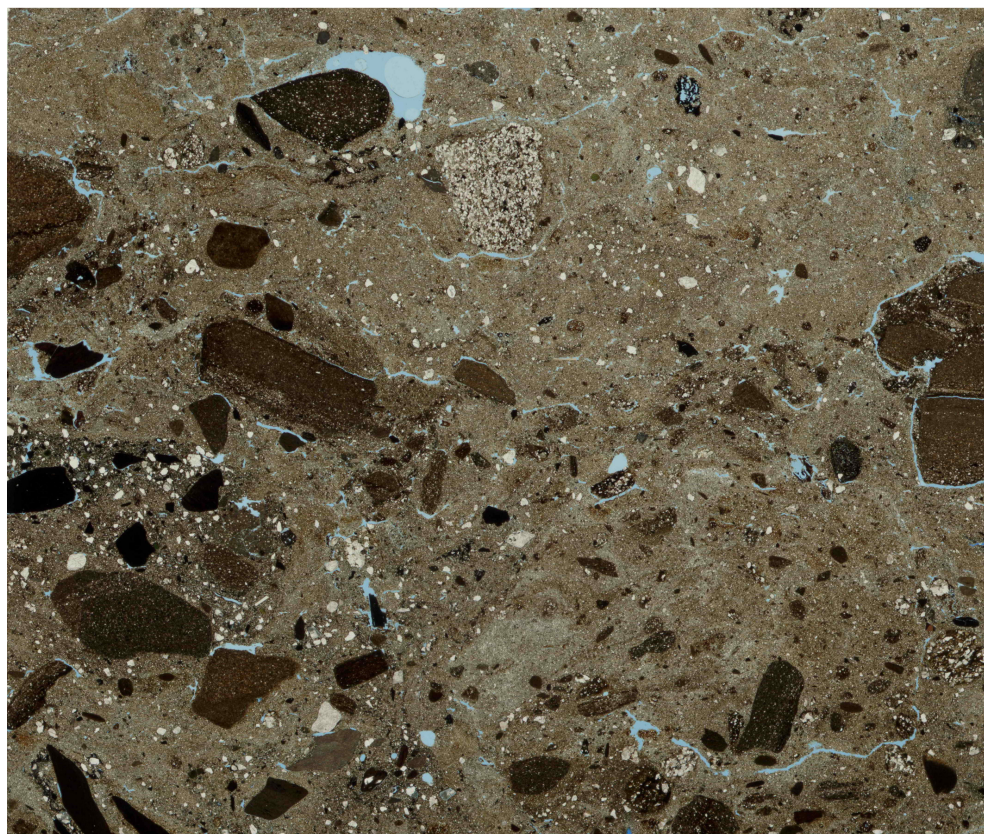
RUB B = gravimetrischer Wassergehalt Versuchsfeld 2B bestimmt an der Ruhr-Universität Bochum

HEN A = gravimetrischer Wassergehalt Versuchsfeld 2A bestimmt im Erdbaulabor Hennig

HEN B = gravimetrischer Wassergehalt Versuchsfeld 2B bestimmt im Erdbaulabor Hennig

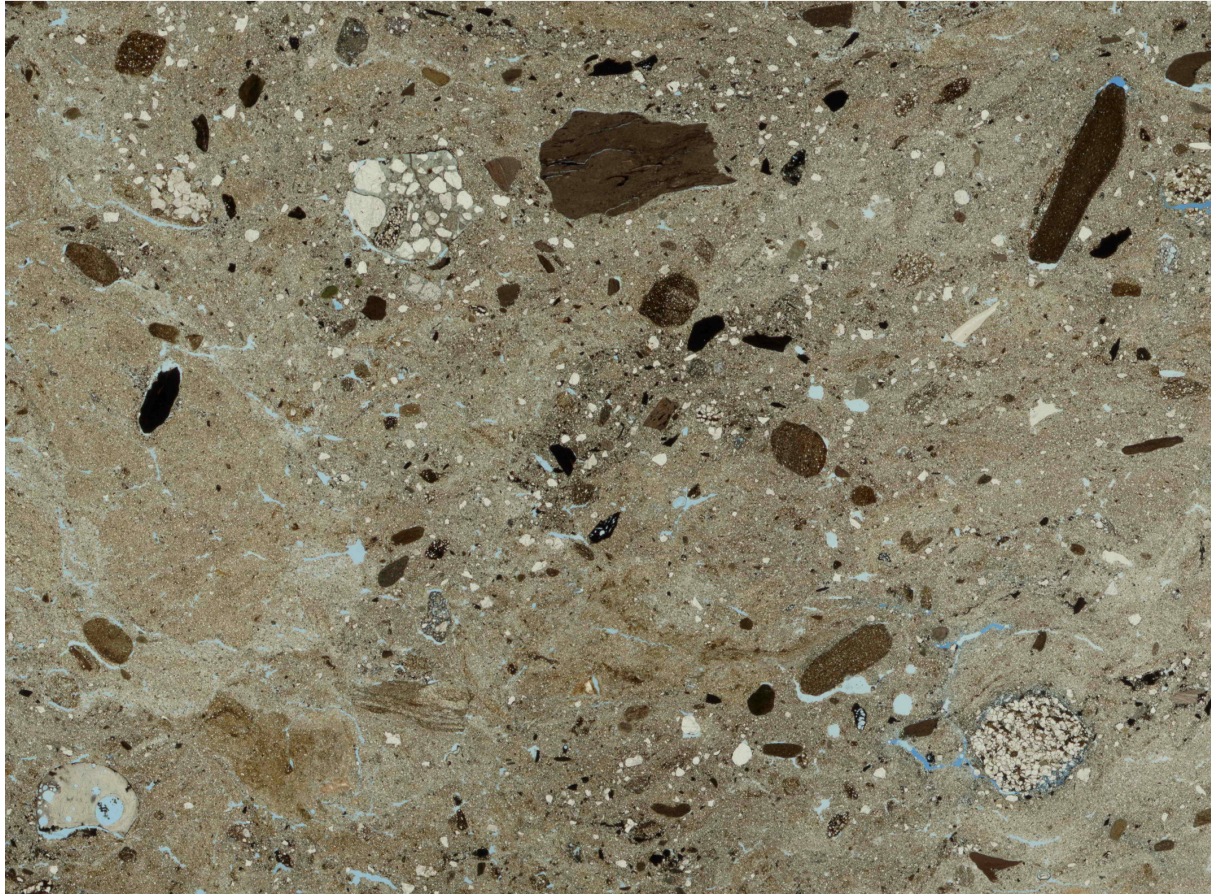


Übersichtsdarstellung Schliff 1 (Oben)



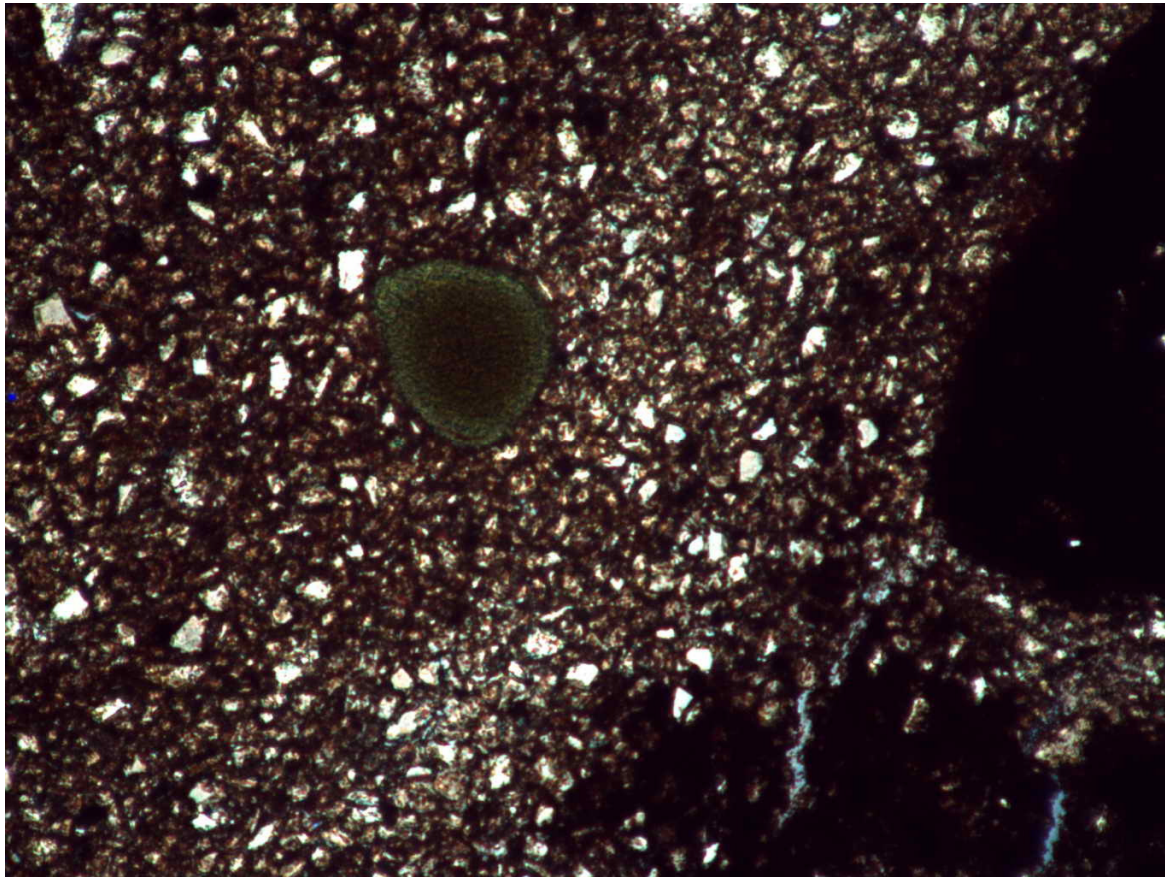
Übersichtsdarstellung Schliff 2 (Mitte)



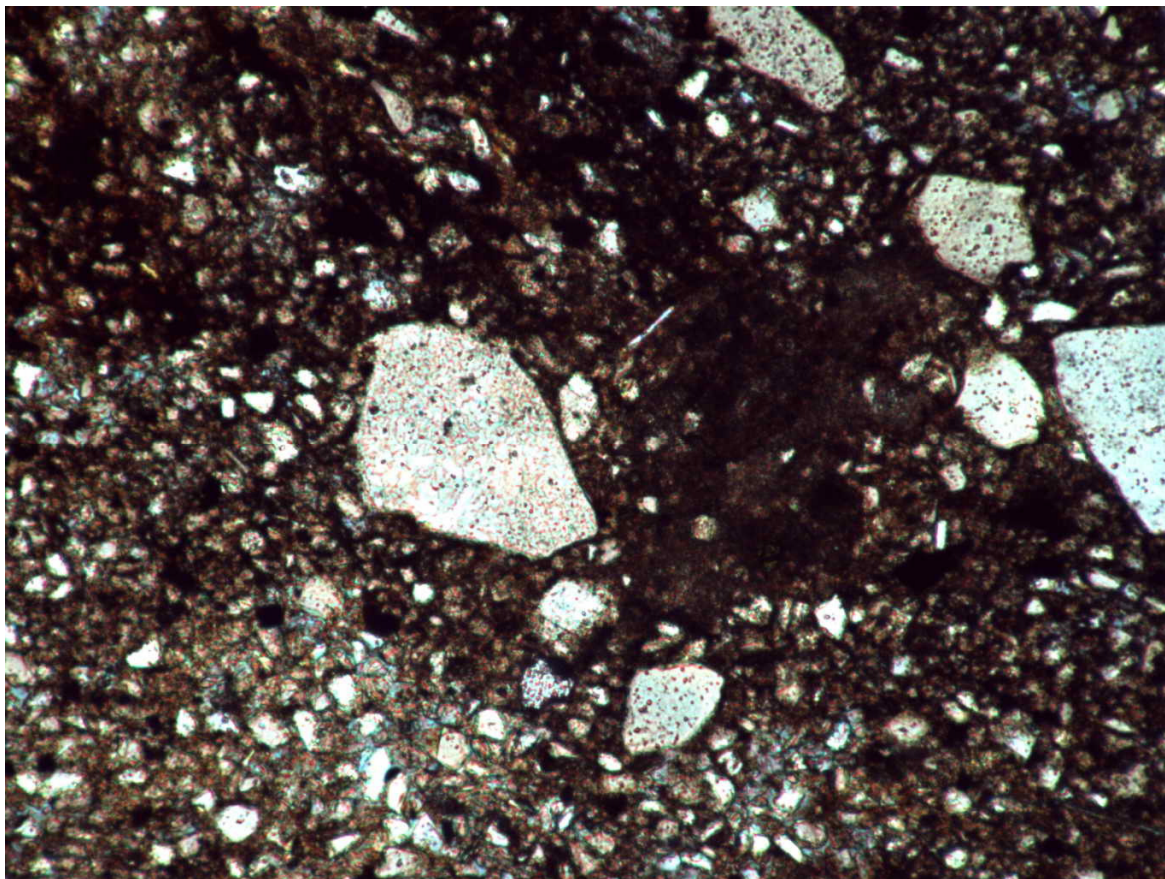


**Übersichtsdarstellung Schliff 3 (Unten)**



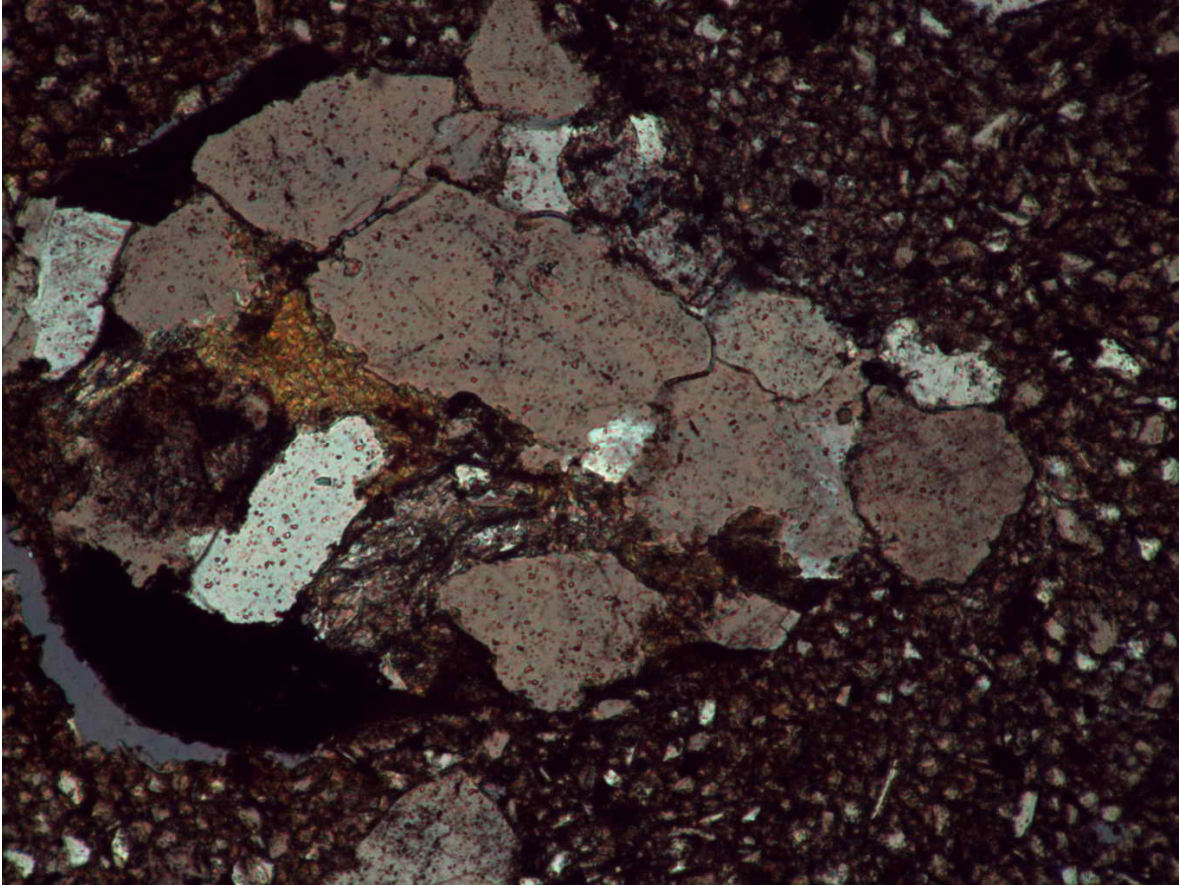


**Glaukonit**

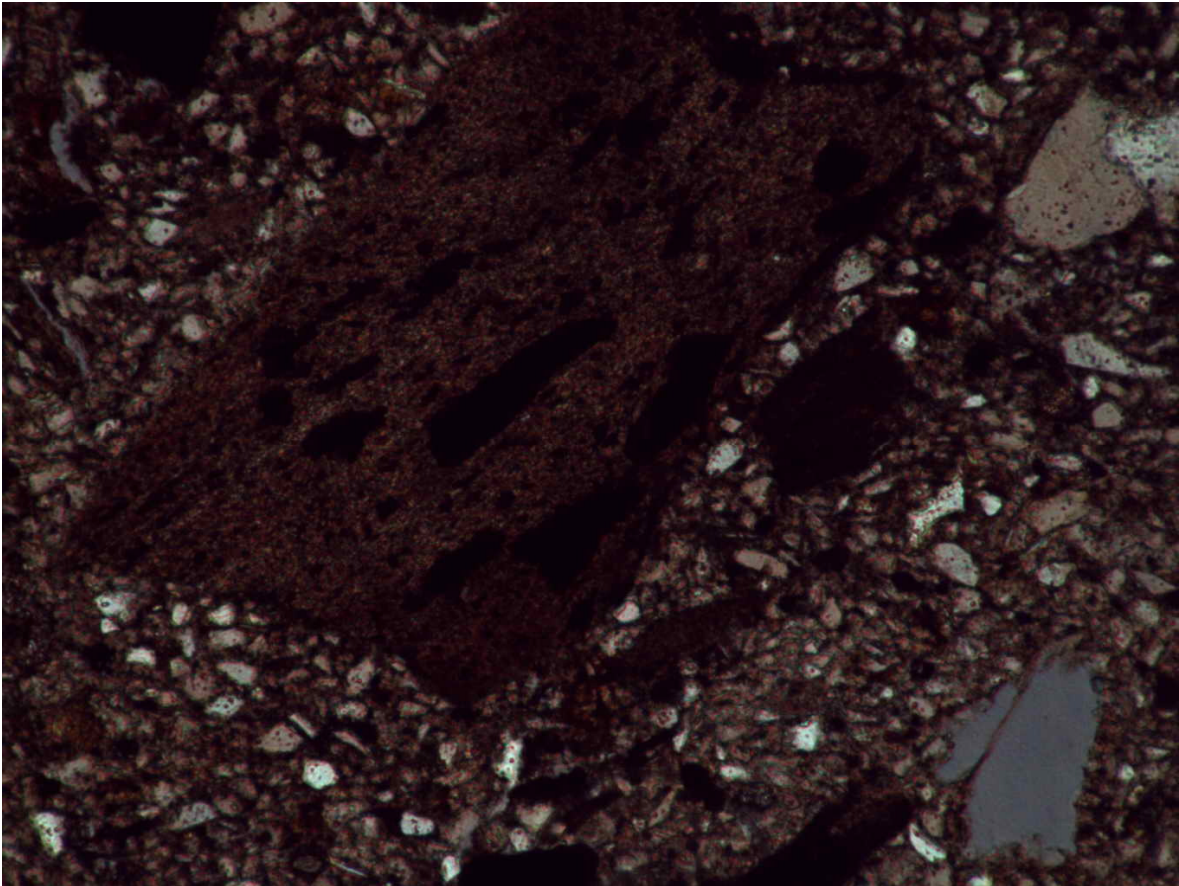


**Feuerstein (engl. = chert)**



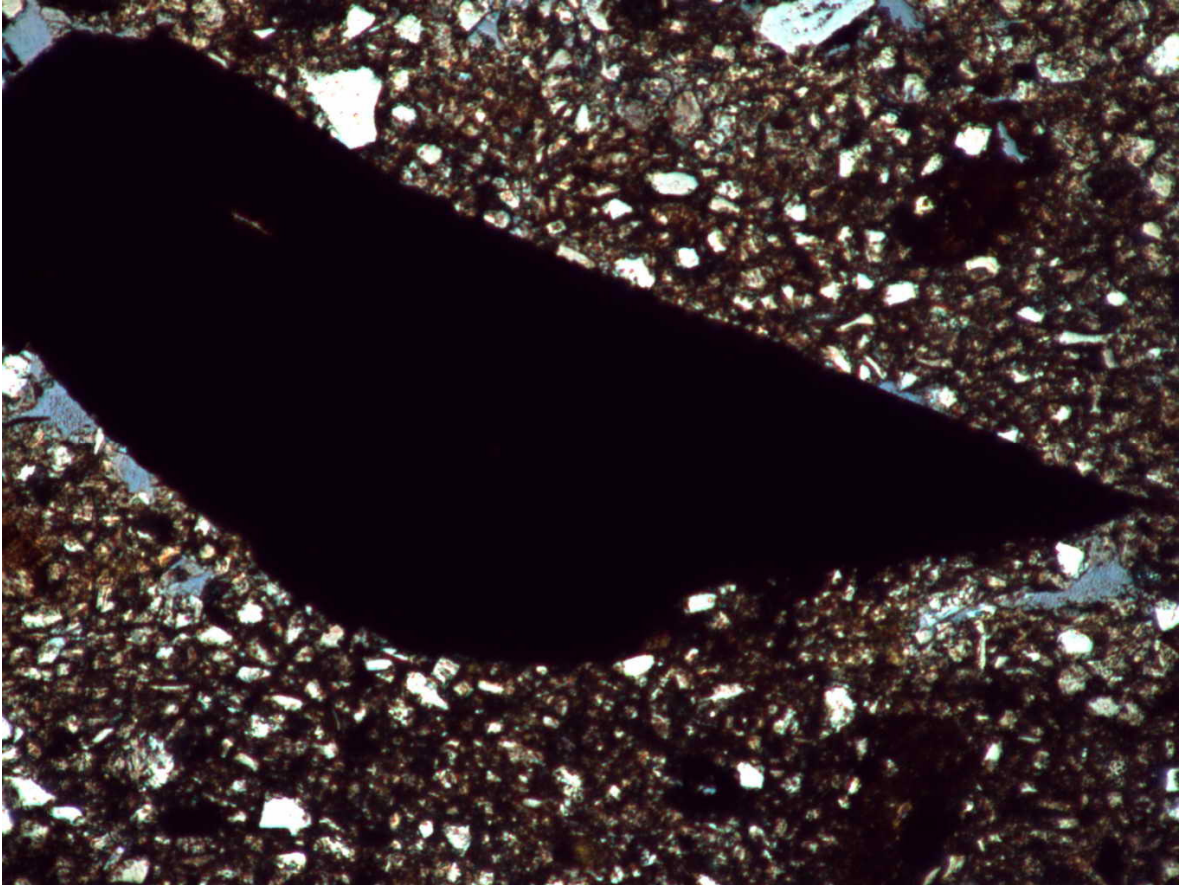


**Sandsteinklast**

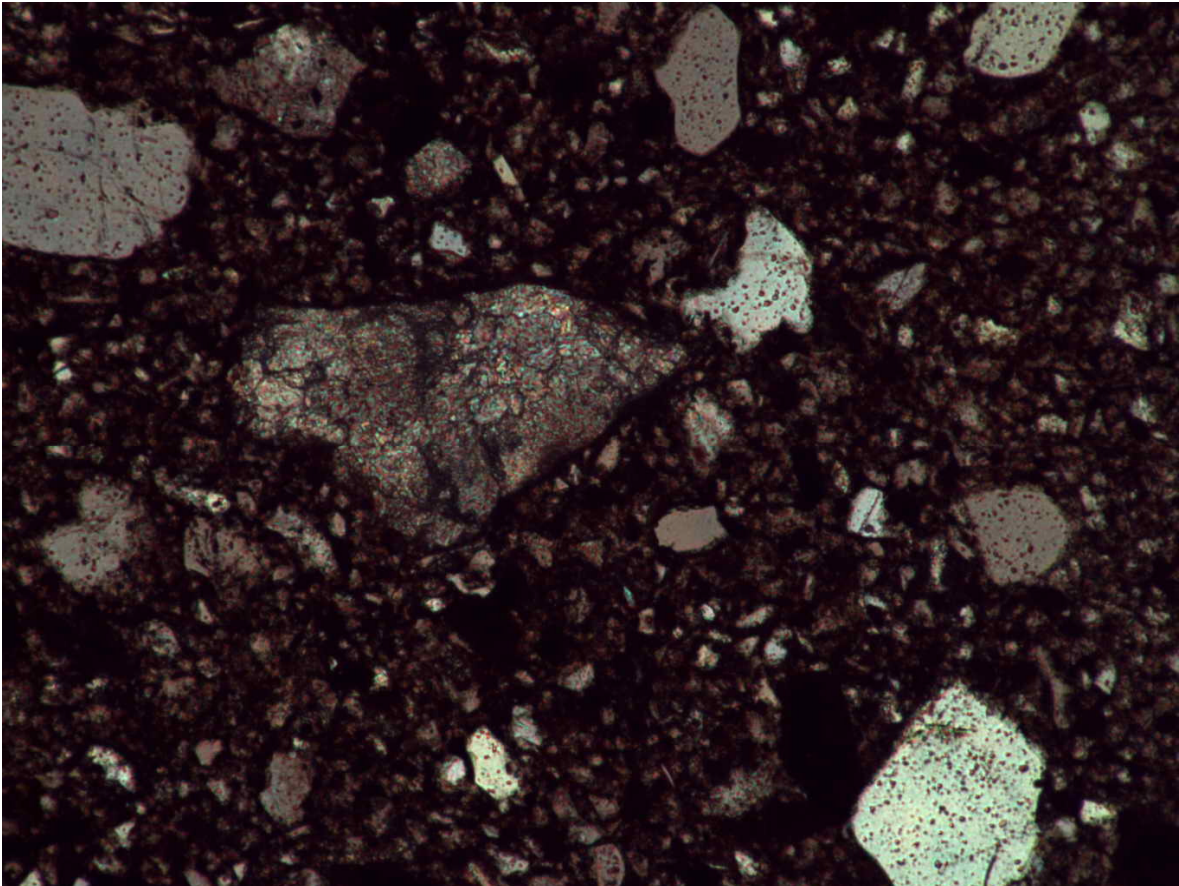


**Tonstein mit Kohle-Detritus**



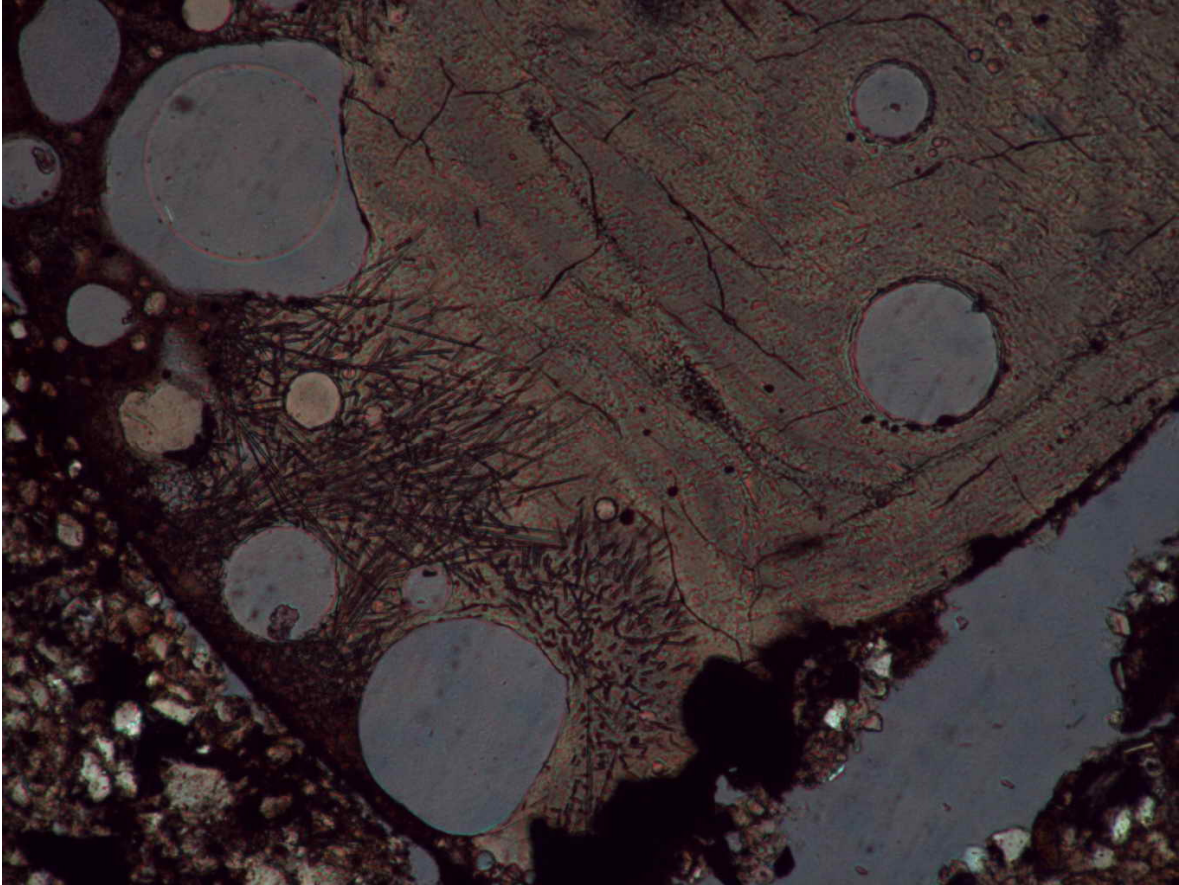


**Kohle**

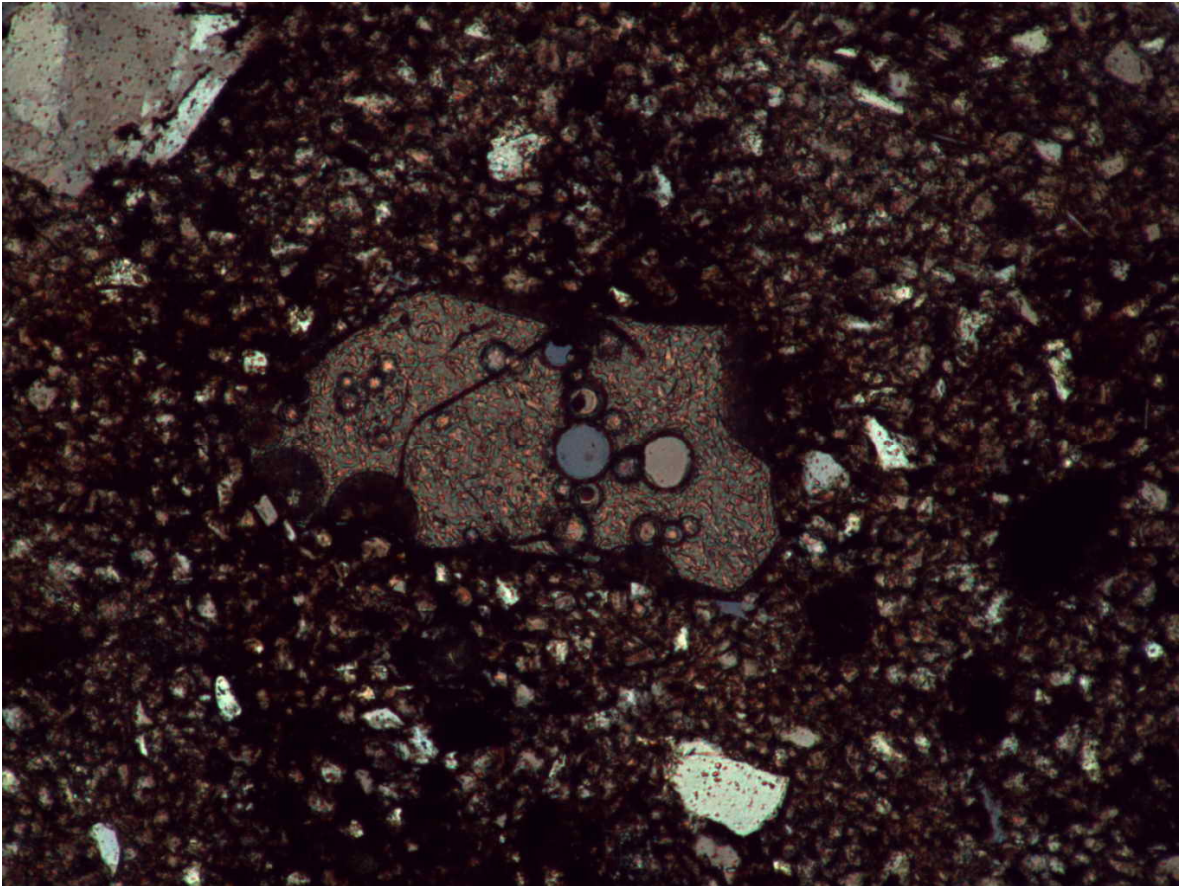


**Karbonatklast**





Schlacke I

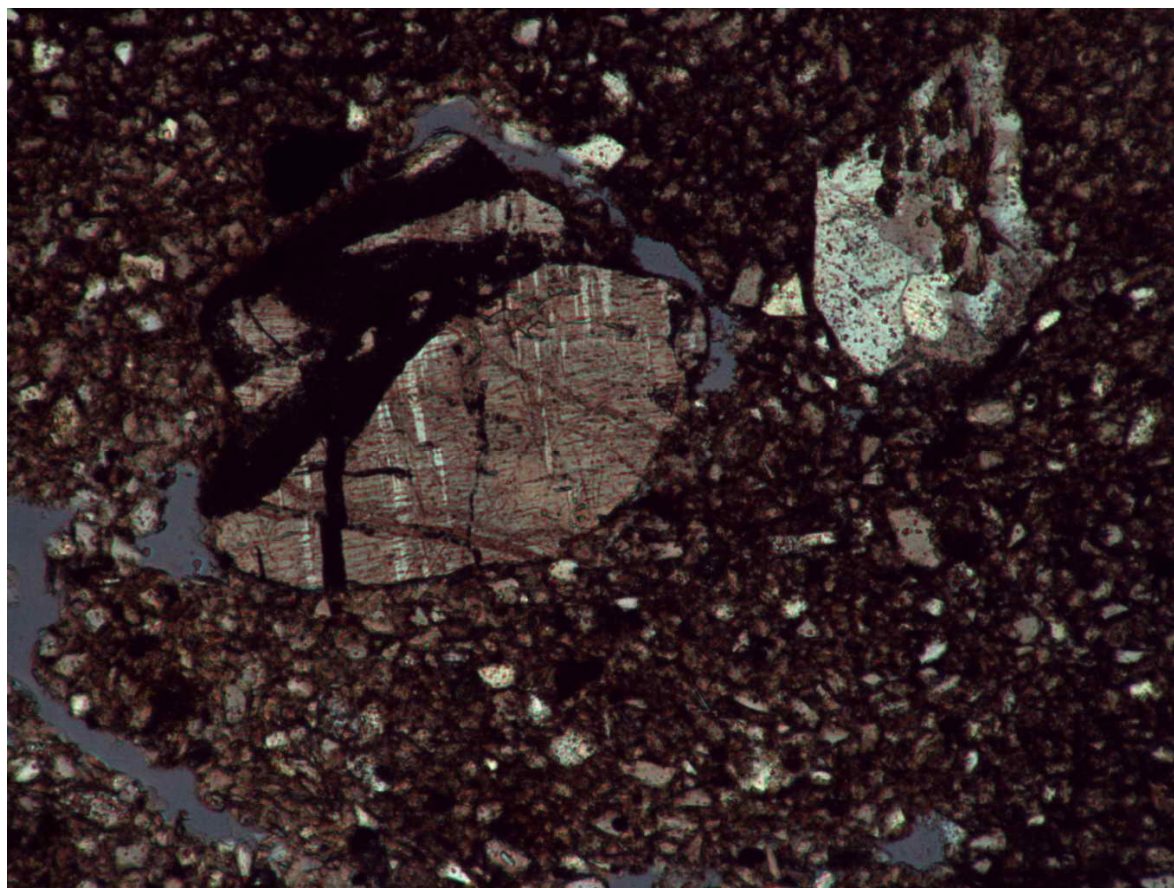


Schlacke II



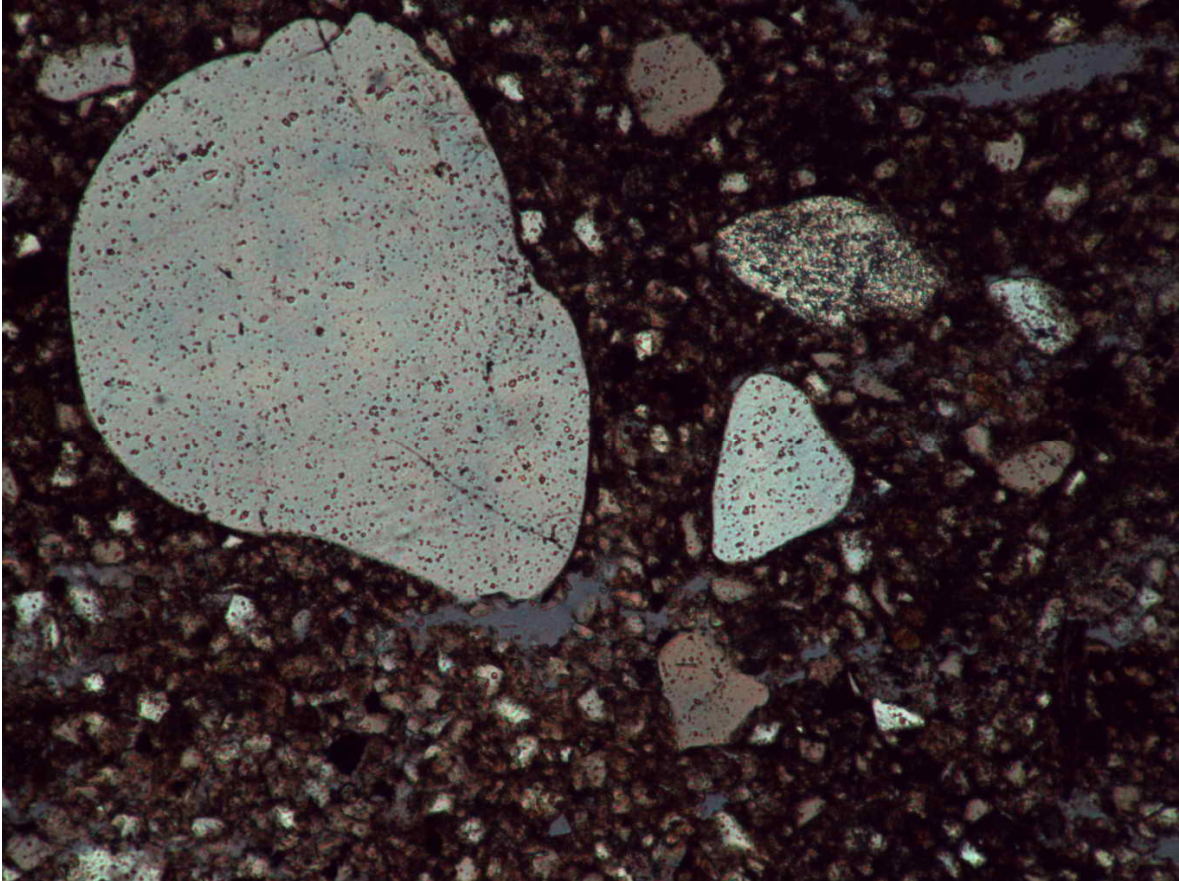


**Verwürgte tonreiche Partie**

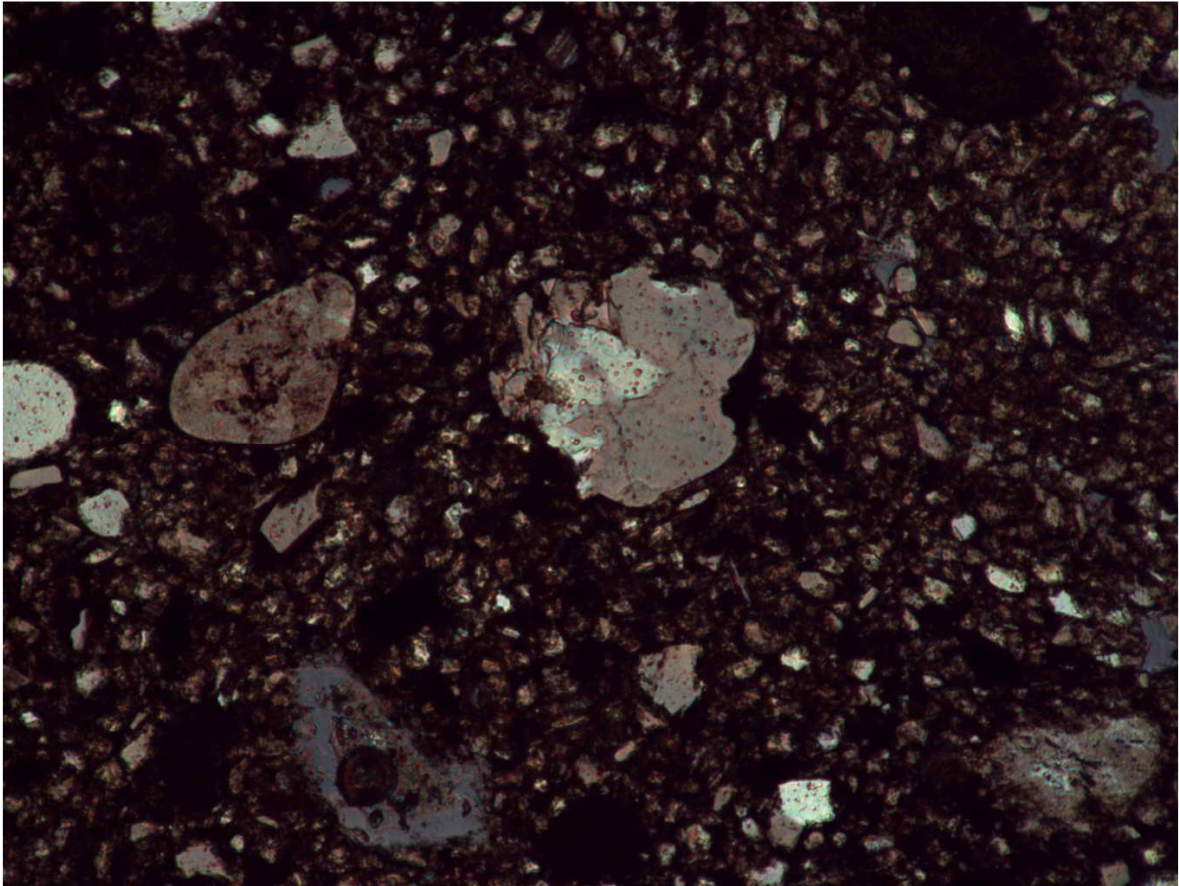


**Mikrokristalliner Feldspat**





**Monokristalliner Quarz**



**Polykristalliner Quarz**

<b>2 A</b>		<b>2 B</b>	
Probenkennung	$k_f$ -Wert [m/s]	Probenkennung	$k_f$ -Wert [m/s]
S-A I	$8,7 \cdot 10^{-10}$	S-L I	$1,3 \cdot 10^{-9}$
S-A II	$6,1 \cdot 10^{-10}$	S-L II	$1,1 \cdot 10^{-9}$
S-D I	$1,1 \cdot 10^{-10}$	S-O	$3,8 \cdot 10^{-9}$
S-D II	$1,7 \cdot 10^{-9}$	S-P I	$9,6 \cdot 10^{-9}$
S-F I	$5,0 \cdot 10^{-9}$	S-P II	$6,0 \cdot 10^{-9}$
S-F II	$2,7 \cdot 10^{-8}$	S-P III	$3,2 \cdot 10^{-9}$
S-G I	$1,1 \cdot 10^{-9}$	S-P IV	$5,3 \cdot 10^{-10}$
S-G II	$1,4 \cdot 10^{-10}$		