

# **Sackungsprozesse in natürlichen Lockergesteinsfolgen infolge Grundwasserwiederanstiegs**

Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

vorgelegt der

Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät  
(mathematisch-naturwissenschaftlicher Bereich)  
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von

**Frau Dipl.-Geol. Simone Grimmer**

geboren am 02. Juni 1970 in Speyer/Rh.

Gutachter:

1. Prof. Dr. Christof Lempp
2. Prof. Dr.-Ing. Horst Düllmann

Halle (Saale), den 20.11.2006

**urn:nbn:de:gbv:3-000010917**

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=nbn%3Ade%3Agbv%3A3-000010917>]

## **Erklärung**

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet zu haben. Den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommene Stellen sind als solche gekennzeichnet.

Halle, 18. April 2006

Simone Grimmer

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	8
Symbole und Abkürzungen	9
Kurzfassung	11
1 Einleitung	12
1.1 Hintergrund	12
1.2 Problemstellung	13
1.3 Zielstellung	15
1.4 Datenerlangung und -handhabung	16
1.4.1 Beispielraum 1: Bitterfeld/Wolfen	16
1.4.2 Beispielraum 2: Hessisches Ried	17
2 Kenntnisstand	18
2.1 Sackungen und Grundwasserwiederanstieg – Definition und allgemeine Zusammenhänge	18
2.2 Übersicht über den bisherigen Entwicklungsstand von Sackungsuntersuchungen	20
2.2.1 Untersuchungen von Erlenbach	20
2.2.2 Untersuchungen von Denisov	20
2.2.3 Untersuchungen von Abelev	21
2.2.4 Untersuchungen von Jaky	21
2.2.5 Untersuchungen von Kézdi	22
2.2.6 Untersuchungen von Kézdi und Egri	22
2.2.7 Untersuchungen von Rethati	23
2.2.8 Untersuchungen von Garbrecht	24
2.2.9 Untersuchungen von Hellweg	25
2.2.10 Untersuchungen von Diener	26
2.2.11 Untersuchungen von Wichter und Kügler	26
2.3 Wichtige Erkenntnisse der recherchierten Sackungs-Untersuchungen	27
2.4 Theoretische Betrachtungen von Sackungen	29
2.4.1 Einfluss des Wassers	29
2.4.2 Wirkung der Kapillarität	30
2.4.3 Wirkung der Oberflächenspannung	31
2.4.4 Sackungsmechanismen und -ursachen	32
3 Angewandte Untersuchungsmethoden	36
3.1 Eindimensionaler Kompressionsversuch (Ödometer-Versuch)	36
3.1.1 Probennahme und -vorbereitung für KD-Versuche	38
3.1.1.1 Versuchsdurchführung	40
3.2 Rasterelektronenmikroskopie mit energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (REM/EDX) und Kryo-REM	41
3.2.1 Kryo-REM Präparation	41
3.3 Ionenchromatographie (IC)	42
3.3.1 Probenvorbereitung für die Ionenchromatographie	43
4 Beispielraum1: Ehemaliges Braunkohlenabbaugebiet Bitterfeld/Wolfen	44
4.1 Geographischer Überblick	44
4.2 Historischer Überblick über das Bitterfelder Revier	46
4.3 Geologischer Überblick	47
4.4 Hydrogeologischer Überblick	49
4.4.1 Tertiäre Grundwasserleiter	51
4.4.2 Quartäre Grundwasserleiter	52
4.5 Zusammenfassung der folgenreichsten Auswirkungen des Braunkohlenbergbaus	52

5	Beispielraum 2: Hessisches Ried	54
5.1	Geographischer Überblick	54
5.2	Historischer Überblick	54
5.3	Geologischer Überblick	56
5.4	Hydrogeologischer Überblick	59
5.5	Auswirkungen der hohen Grundwasserstände	61
6	Ergebnisse	63
6.1	Proben Bitterfeld/Wolfen	63
6.1.1	Probe BVV 472_11_23 (Oberer Bitterfelder Glimmersand)	63
6.1.2	Probe BVV 624, 5-6 m (Niederterrasse)	72
6.1.3	Probe BVV 624, 7 m (Zwischenstauer der Niederterrasse)	77
6.1.4	Probe BVV 0101_13-14m („pleistozäne Tonmudde“)	83
6.2	Proben Hessisches Ried	88
6.2.1	Probe GWM1F_0-1m	88
6.2.2	Probe GWM1F_2-3m	94
6.2.3	Probe GWM1F_3-4m	99
6.2.4	Probe GWM1F_4-5m	105
6.2.5	Probe 537bk3	110
7	Sackungspotenzialabschätzung	115
7.1	Bitterfeld/Wolfen	115
7.1.1	Ergebnisse und Diskussion	115
7.2	Hessisches Ried	117
7.2.1	Sackungsberechnung	117
7.2.1.1	Ergebnisse und Diskussion	117
8	Zusammenfassung der Ergebnisse	119
9	Diskussion	120
10	Forschungsausblick	127
11	Literatur	128
	Anhang	I-XV
	Danksagung	

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Vernässung durch hohes Grundwasser in Nauheim, April 2001 (aus PAPE 2003).	14
Abb. 2:	Bauermeister-Villa und Deutsche Grube Bitterfeld im Juli 2004, nach Beendigung der Wasserhaltung.	14
Abb. 3:	Schematische Darstellung der Grundwasserverhältnisse vor, während und nach der Flutung (LMBV 1997).	15
Abb. 4:	Wirkung der Oberflächenspannung zwischen zwei Kugeln (nach KÉZDI, 1969).	18
Abb. 5:	Darstellung einer Sackung nach ABELEV (1948).	21
Abb. 6:	Druck-Setzungs-Diagramm, Sackung durch Wasserzugabe und Kompressionskurven nach KÉZDI (1969).	22
Abb. 7:	Sackungsdiagramm von RETHATI (1963).	24
Abb. 8:	Abhängigkeit der bezogenen Setzung $\varepsilon$ (Setzung und Sackung) von der Lagerungsdichte (GARBRECHT 1978).	25
Abb. 9:	Erscheinungsformen des Wassers im Boden (KÉZDI 1969).	29
Abb. 10:	Struktur eines erdfeuchten, rolligen Lockergesteins (KÉZDI 1969).	31
Abb. 11:	Boden mit luftgefülltem Porenraum (KÉZDI 1969).	31
Abb. 12:	Boden mit wassergefülltem Porenraum (KÉZDI 1969).	32
Abb. 13:	Schema der auf ein Bodenteilchen bzw. ein Aggregat einwirkende Kräfte: a, bildliche Darstellung der wirkenden Kräfte; b, vektorielle Darstellung (DIENER 1999; HARTGE & HORN 1999).	32
Abb. 14:	Schematische Darstellung der drei Phasen einer Sackung (nach DIENER 1999).	33
Abb. 15:	Schema einer Ödometerzelle mit freischwebendem Ring.	36
Abb. 16:	Druck-Porenzahl-Diagramm und Drucksetzungsdiagramm.	37
Abb. 17:	Setzungsanteile (SCHULTZE & MUHS 1967).	37
Abb. 18:	Schematisierte Darstellung der Probennahme in Gelände und Labor.	38
Abb. 19:	Vorbereitete ungestörte Probe des Oberen Bitterfelder Glimmersands für KD-Versuch.	39
Abb. 20:	Temperierte KD-Versuchsanordnung.	40
Abb. 21:	Schematisierte Versuchsdurchführung mit dem Ödometer.	40
Abb. 22:	Kryo-REM Präparationsprozess zur Visualisierung von bergfeuchten, nichtbindigen Lockergesteinsprobenstrukturen.	42
Abb. 23:	Schematischer Aufbau eines Ionenchromatographen (nach Weiß 2001).	43
Abb. 24:	Bitterfeld und das untere Muldetal (SCHÖNFELDER et al. 2004).	44
Abb. 25:	Landschaftsprofil Brehna – Hohe Jöst (SCHÖNFELDER et al. 2004).	45
Abb. 26:	Klimadiagramm Bitterfeld (VILLWOCK 2004).	45
Abb. 27:	Übersicht über das Mitteldeutsche Braunkohlenrevier (modifiziert nach LMBV 1997).	46
Abb. 28:	Geologisches Profil Bitterfeld (in SCHÖNFELDER et al. 2004, nach KRAPP & RUSKE 1992, verändert).	47
Abb. 29:	Geologischer Überblick über den Raum Bitterfeld/Wolfen (VILLWOCK 2004).	48

Abb. 30:	Idealisierte Profilschnitte um Bitterfeld mit dem damaligen Grundwasserstand (aus SCHÖNFELDER et al. 2004; nach KRAPP & RUSKE 1992, verändert).	51
Abb. 31:	Schematischer hydrogeologischer Schnitt im Raum Bitterfeld (stark vereinfacht nach RUSKE et al. 1999).	52
Abb. 32:	Das Ried im nördlichen Oberrheingraben mit den wesentlichen geologischen Großeinheiten (modifiziert nach HOPPE et al. 1996).	55
Abb. 33:	Vernässungsflächen 2001 (PAPE 2003).	57
Abb. 34:	Mächtigkeit Quartär (HAIMBERGER et al. 2005).	58
Abb. 35:	Stark vereinfachter geologischer Überblick über das Hessische Ried (aus: GÜK Hessen 1:300.000, modifiziert nach: Regierungspräsidium Darmstadt 1999).	60
Abb. 36:	Hydrogeologischer Schnitt durch den Oberrheingraben bei Worms (in Anlehnung an: Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum 1980).	61
Abb. 37:	Langjährige Grundwasserstandsentwicklung mit Konflikten (GERDES 2002).	63
Abb. 38:	REM und Kryo-REM-Aufnahmen der Probe 472_11_23.	65
Abb. 39:	Kryo-REM-Aufnahmen der Probe 472_11_23.	66
Abb. 40:	EDX-Analyse einer Zementierung der Probe 472_11_23.	66
Abb. 41:	Zeit-Setzungsdiagramm der Probe BVV 472_11_23 bei 20°C.	67
Abb. 42:	Im Drucksetzungsversuch beobachtete Sackungen bei 20°C der Probe BVV 472_11_23 (Oberer Bitterfelder Glimmersand) aus Abb. 41 nach Wasserzugabe.	67
Abb. 43:	Zeit-Setzungsdiagramm der Probe BVV 472_11_23 bei 10°C.	68
Abb. 44:	Im Drucksetzungsversuch beobachtete Sackungen bei 10°C der Probe BVV 472_11_23 (Oberer Bitterfelder Glimmersand) aus Abb. 43 nach Wasserzugabe.	68
Abb. 45:	Abhängigkeit des absoluten Sackungsbetrages vom Einbauwassergehalt der Probe BVV 472_11_23.	69
Abb. 46:	Änderung der Porenzahl der Probe BVV 472_11_23 zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.	69
Abb. 47:	Änderung der Porenzahl der Probe BVV 472_11_23 von Beginn des Sackungsversuches bis Versuchsende.	70
Abb. 48:	Änderung des Steifemoduls $E_s$ der Probe BVV 472_11_23 zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.	70
Abb. 49:	Erst- und Wiederbelastungswerte mit und ohne Wasser der Probe BVV 472_11_23.	71
Abb. 50:	Verhältnis der Differenz der Porenzahl und der absoluten Sackung der Probe BVV 472_11_23 von Beginn des Sackungsversuchs bis Versuchsende.	71
Abb. 51:	Kryo-REM-Aufnahmen der Probe BVV 624_5-6m.	74
Abb. 52:	Zeit-Setzungsdiagramm der Probe BVV 624_5-6m bei 10°C.	75
Abb. 53:	Im Drucksetzungsversuch beobachtete Sackungen der Probe BVV 624 aus Abb. 53 nach Wasserzugabe.	75
Abb. 54:	Abhängigkeit des absoluten Sackungsmaßes vom Einbauwassergehalt der Probe BVV 624_5-6m.	76
Abb. 55:	Änderung der Porenzahl der Probe BVV 624_5-6m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.	76
Abb. 56:	Änderung der Porenzahl der Probe BVV 624_5-6m von Beginn des Sackungsversuches bis Versuchsende.	77

Abb. 57:	Änderung des Steifemoduls $E_s$ der Probe BVV 624_5-6m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.	77
Abb. 58:	Erst- und Wiederbelastungswert ohne Wasser der Probe BVV 624_5-6m.	78
Abb. 59:	Verhältnis der Differenz der Porenzahl und der absoluten Sackung der Probe BVV 624_5-6m von Beginn des Sackungsversuchs bis Versuchende.	78
Abb. 60:	Kryo-REM-Aufnahmen der Probe BVV 624_7m und EDX-Diagramm.	79/ 80
Abb. 61:	Zeit-Setzungsdiagramm der Probe BVV 624_7m bei 10°C.	80
Abb. 62:	Im Drucksetzungsversuch beobachtete Sackungen der Probe BVV 624_7m aus Abb. 61 nach Wasserzugabe.	81
Abb. 63:	Abhängigkeit des absoluten Sackungsmaßes vom Einbauwassergehalt der Probe BVV 624_7m.	81
Abb. 64:	Änderung der Porenzahl der Probe BVV 624_7m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.	82
Abb. 65:	Änderung der Porenzahl der Probe BVV 624_7m von Beginn des Sackungsversuches bis Versuchsende.	82
Abb. 66:	Änderung des Steifemoduls $E_s$ der Probe BVV 624_7m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.	83
Abb. 67:	Erst- und Wiederbelastungswerte der Probe BVV 624_7m mit und ohne Wasser.	83
Abb. 68:	Verhältnis der Differenz und der absoluten Sackung der Porenzahl der Probe BVV 624_7m von Beginn des Sackungsversuchs bis Versuchsende.	84
Abb. 69:	REM-Aufnahmen der Probe BVV 0101.	85
Abb. 70:	Zeit-Setzungsdiagramm der Probe BVV 0101 bei 10°C.	85
Abb. 71:	Im Drucksetzungsversuch beobachtete Sackungen der Probe BVV 0101 aus Abb. 70 nach Wasserzugabe.	86
Abb. 72:	Abhängigkeit des absoluten Sackungsmaßes vom Einbauwassergehalt der Probe BVV0101.	86
Abb. 73:	Änderung der Porenzahl der Probe BVV0101 zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.	87
Abb. 74:	Änderung der Porenzahl BVV0101 von Beginn des Sackungsversuches bis Versuchsende.	87
Abb. 75:	Änderung des Steifemoduls $E_s$ der Probe BVV0101 zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.	88
Abb. 76:	Erst- und Wiederbelastungswerte mit und ohne Wasser der Probe BVV0101.	88
Abb. 77:	Verhältnis Differenz der Porenzahl und der absoluten Sackung der Probe BVV0101 von Beginn des Sackungsversuchs bis Versuchsende.	89
Abb. 78:	Kryo-REM-Aufnahmen der Probe GWM1F_0-1m.	90
Abb. 79:	Zeit-Setzungsdiagramm der Probe GWM1F_0-1m.	91
Abb. 80:	Im Drucksetzungsversuch beobachtete Hebungen und Sackungen der Probe GWM1F_0-1m aus Abb. 79 nach Wasserzugabe.	92
Abb. 81:	Abhängigkeit des absoluten Sackungsmaßes vom Einbauwassergehalt der Probe GWM1F_0-1m.	92
Abb. 82:	Änderung der Porenzahl der Probe GWM1F_0-1m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.	93
Abb. 83:	Änderung der Porenzahl der Probe GWM1F_0-1m von Beginn des Sackungsversuches bis Versuchsende.	93

Abb. 84:	Änderung des Steifemoduls $E_s$ der Probe GWM1F_0-1m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.	94
Abb. 85:	Erst- und Wiederbelastungswerte mit und ohne Wasser GWM1F_0-1m.	94
Abb. 86:	Verhältnis der Differenz der Porenzahl der Probe GWM1F_0-1m von Beginn des Sackungsversuchs bis Versuchende und der absoluten Sackung.	95
Abb. 87:	Kryo-REM-Aufnahmen der Probe GWM1F_2-3m.	96
Abb. 88:	Zeit-Setzungsdiagramm der Probe GWM1F_2-3m.	97
Abb. 89:	Im Drucksetzungsversuch beobachtete Sackungen der Probe GWM1F_2-3m aus Abb. 88 nach Wasserzugabe bei kontinuierlicher Aufsättigung.	97
Abb. 90:	Abhängigkeit des absoluten Sackungsmaßes vom Einbauwassergehalt der Probe GWM1F_2-3m.	98
Abb. 91:	Änderung der Porenzahl der Probe GWM1F_2-3m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.	98
Abb. 92:	Änderung der Porenzahl der Probe GWM1F_2-3m von Beginn des Sackungsversuches bis Versuchsende.	99
Abb. 93:	Änderung des Steifemoduls $E_s$ der Probe GWM1F_2-3m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.	99
Abb. 94:	Erst- und Wiederbelastungswerte mit und ohne Wasser GWM1F_2-3m.	100
Abb. 95:	Verhältnis der Differenz der Porenzahl der Probe GWM1F_2-3m von Beginn des Sackungsversuchs bis Versuchende und der relativen Sackung.	100
Abb. 96:	REM-Aufnahmen der Probe GWM1F_3-4m.	101
Abb. 97:	Zeit-Setzungsdiagramm der Probe GWM1F_3-4m.	102
Abb. 98:	Im Drucksetzungsversuch beobachtete Sackungen und Hebungen der Probe GWM1F_3-4m aus Abb. 97 nach Wasserzugabe bei kontinuierlicher Aufsättigung.	102
Abb. 99:	Abhängigkeit des absoluten Sackungsmaßes vom Einbauwassergehalt der Probe GWM1F_3-4m.	103
Abb. 100:	Änderung der Porenzahl der Probe GWM1F_3-4m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.	103
Abb. 101:	Änderung der Porenzahl der Probe GWM1F_3-4m von Beginn des Sackungsversuches bis Versuchsende.	104
Abb. 102:	Änderung des Steifemoduls $E_s$ der Probe GWM1F_3-4m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.	104
Abb. 103:	Erst- und Wiederbelastungswerte mit und ohne Wasser GWM1F_3-4m.	105
Abb. 104:	Verhältnis der Differenz der Porenzahl der Probe GWM1F_3-4m von Beginn des Sackungsversuchs bis Versuchende und der relativen Sackung.	105
Abb. 105:	Kryo-REM-Aufnahmen der Probe GWM1F_4-5m.	107
Abb. 106:	Zeit-Setzungsdiagramm der Probe GWM1F_4-5m.	107
Abb. 107:	Im Drucksetzungsversuch beobachtete Sackungen der Probe GWM1F_4-5m aus Abb. 106 nach Wasserzugabe bei kontinuierlicher Aufsättigung.	108
Abb. 108:	Abhängigkeit des absoluten Sackungsmaßes vom Einbauwassergehalt der Probe GWM1F_4-5m.	108
Abb. 109:	Änderung der Porenzahl der Probe GWM1F_4-5m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.	109
Abb. 110:	Änderung der Porenzahl der Probe GWM1F_4-5m von Beginn des Sackungsversuches bis Versuchsende.	109



Abb. 111:	Änderung des Steifemoduls $E_s$ der Probe GWM1F_4-5m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.	110
Abb. 112:	Erst- und Wiederbelastungswerte mit und ohne Wasser GWM1F_4-5m.	110
Abb. 113:	Verhältnis Differenz der Porenzahl der Probe GWM1F_4-5m von Beginn des Sackungsversuchs bis Versuchsende und der Sackung.	111
Abb. 114:	Kryo-REM-Aufnahmen der Probe 537bk3.	112
Abb. 115:	Zeit-Setzungsdiagramm der Probe 537bk3.	113
Abb. 116:	Änderung der Porenzahl der Probe 537bk3 zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.	113
Abb. 117:	Änderung der Porenzahl der Probe 537bk3 von Beginn des Sackungsversuches bis Versuchsende.	114
Abb. 118:	Änderung des Steifemoduls $E_s$ der Probe 537bk3 zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.	114
Abb. 119:	Erst- und Wiederbelastungswerte mit und ohne Wasser der Probe 537bk3.	115
Abb. 120:	Bildungsmechanismen von Feinsand-Schluff-Hüllen (nach DURNER 1994).	123
Abb. 121:	Kryo-REM-Aufnahme der organischen Substanz der Probe BVV 472.	125
Abb. 122:	Beispiel eines Transformationszustandes und die kinetische Energie während dieses Zustandes (SCHULZ et al. 2006).	125
Abb. 123:	Beispiel eines Transformationszustands nach Beginn der Wasserzugabe bei der Probe BVV 472_11_23/8.	126
Abb. 124:	Mechanismus der Löß-Sackung (Osipov & Sokolov, 1995).	126

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Geologisches Normalprofil für den Raum Bitterfeld. Blau – Grundwasserleiter, schwarz - Grundwassergeringleiter (in HEROLD 2003, nach RUSKE et al. 1999).	48
Tab. 2:	Standardprofil der Schichten für das Blatt Worms (SCHARPFF 1977).	59
Tab. 3:	Korngrößenverteilung der Probe BVV 472_11_23 (Oberen Bitterfelder Glimmersand).	64
Tab. 4 a:	Konzentrationen [mg/l] der Probe 47_1123nass.	72
Tab. 4 b:	Konzentrationen [mg/l] der Probe 47_1123trocken.	72
Tab. 5:	Korngrößenverteilung der Probe BVV 624_5-6m (Niederterrasse).	73
Tab. 6:	Korngrößenverteilung der Probe BVV 624_7m (Zwischenstauer der Niederterrasse).	79
Tab. 7:	Korngrößenverteilung der Probe BVV 0101m_13,0-13,5m („pleistozäne Tonmudde“).	84
Tab. 8:	Korngrößenverteilung der Probe GWM1F_0-1m.	90
Tab. 9:	Korngrößenverteilung der Probe GWM1F_2-3m.	95
Tab. 10:	Korngrößenverteilung der Probe GWM1F_3-4m.	101
Tab. 11:	Korngrößenverteilung der Probe GWM1F_4-5m.	106
Tab. 12:	Korngrößenverteilung der Probe 537bk3.	111
Tab. 13:	Ausgangswerte für die Sackungsberechnung für den Raum Bitterfeld/Wolfen.	116
Tab. 14:	Ergebnisse der Sackungsberechnung für den Raum Bitterfeld/Wolfen.	117
Tab. 15:	Ausgangswerte für die Sackungsberechnung für das Hessische Ried.	118
Tab. 16:	Ergebnisse der Sackungsberechnung für das Hessische Ried.	118

## Symbole und Abkürzungen

$\gamma$	Wichte (Feuchtwichte)
$\gamma_d$	Trockenwichte
$\gamma_r$	Wichte bei Wassersättigung
$\gamma'$	Wichte unter Auftrieb
$\varepsilon$	Porenziffer
$\varphi$	Winkel der inneren Reibung
$\Pi_\sigma$	Dimensionslose Größe
$\rho'$	Dichte unter Auftrieb
$\rho_d$	Trockendichte
$\rho_r$	Dichte bei Wassersättigung
$\rho_s$	Korndichte
$\sigma$	Normalspannung
$\sigma_1$	Vertikale Normalspannung
$\sigma_z$	Vertikale Normalspannung
$\tau$	Scherwiderstand
$c$	Kohäsionsspannung
$d$	Korndurchmesser
$e$	Porenzahl
$e_0$	Natürliche Porenzahl
$\vec{e}$	Ortsvektor
$E_s$	Steifemodul
$D$	Lagerungsdichte
$F$	Kraft
$f_G$	Feinkies
$f_S$	Feinsand
$f_U$	Feinschluff
$g$	Gravitationskonstante
$g_G$	Grobkies
$g_S$	Grobsand
$g_U$	Grobschluff
$G_0$	Gewicht des trockenen Bodens
$G_n$	Gewicht des feuchten Bodens
$\vec{G}$	Vektor der Gewichtskraft
$h$	Höhe der Bodenprobe
$h$	Stunde
$\vec{H}^p$	Vektor der Haftkraft
$i$	Relatives Sackungsmaß
$I_{D,w,0}$	Lagerungsdichte
$KD$	Kompression-Drucksetzung
$m$	Wirksamer Porenkanal
$m_G$	Mittelkies
$m_S$	Mittelsand
$m_U$	Mittelschluff
$n$	Porenanteil
$n_0$	Natürlicher Porenanteil
$\vec{N}$	Vektor der Normalkraft
$\vec{N}_0^p$	Vektor der Normalkraft im trockenen Zustand
$p$	Kraft (Belastung)
$P$	Kraft

PE	Polyethylen
RK	Rundungskoeffizient
s	Sackung
s	Sekunde
$S_r$	Sättigungsgrad
T	Ton
$T_s$	Haftkräfte zwischen Körnern
$\vec{T}$	Vektor der Schubkraft
U	Schluff
U	Ungleichförmigkeitsgrad
$\vec{W}$	Vektor der Wasserkraft

## Kurzfassung

Bisherige Forschungsarbeiten über bodenmechanische Prozesse infolge Grundwasserwiederanstieg beschränkten sich hauptsächlich auf die Untersuchung der Standsicherheit und Wiederbebauung von Kippen in ehemaligen Tagebaugebieten oder das Verhalten von Lössböden bei erstmaliger Durchfeuchtung. Die damit untersuchten Vorgänge sind das Setzungsfließen und die Sackung. Bei natürlichen gemischtkörnigen Böden, die im Gegensatz zu Löss nach ihrer Ablagerung umgelagert und bereits wiederholt durchfeuchtet wurden, wurde bislang davon ausgegangen, dass der größte Teil der Verformungen bereits während der Grundwasserabsenkung in Form von Setzungen vorweg genommen wurde und dass bei einem Wiederanstieg keine bis sehr minimale Verformungen in Form von geringfügigen Hebungen auftreten.

In dieser Arbeit wurde erstmals untersucht, in welchem Ausmaß Sackungen in gewachsenem Boden bei ansteigendem Grundwasser auftreten können und welche Ursachen und Mechanismen den Sackungen im gewachsenen Boden zu Grunde liegen. Ein besonderes Augenmerk wird auf Zementationen in Porenzwischenräumen des Bodens gelegt, da diese einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Bodens haben.

Hierzu wurden zwei Beispielräume ausgewählt, die durch unterschiedliche Ursachen für den Grundwasserwiederanstieg und eine unterschiedliche geologische Entwicklung charakterisiert sind: das ehemalige Braunkohlenabbaugebiet Bitterfeld/Wolfen und das Hessische Ried. Aus diesen beiden Untersuchungsgebieten wurden Proben ausgewählt, die im Zuge von Grundwassermessstellenausbauern mittels Liner-Bohrung gewonnen wurden. In Ödometer-Versuchen wurde unter realitätsnahen Bedingungen für Wassergehalt, Temperatur und Auflast, wie sie in der jeweiligen Tiefe der zu untersuchenden Probe herrschen, ein allmählicher Wasseranstieg simuliert. Parallel dazu wurden weitere bodenmechanische, -physikalische, physiko- und geochemische Untersuchungen durchgeführt. Auf der Grundlage von REM- und Kryo-REM-Untersuchungen erfolgten Aussagen zum Gefügebau, der Verteilung des Wassers im Gefüge und die qualitative Ermittlung der Zementationen. Mit den hieraus und aus den Ödometer-Versuchen gewonnenen Ergebnissen wurde eine Sackungspotenzialabschätzung an ausgewählten Profilen für den Fall Grundwasseranstieg durchgeführt und diskutiert.

Das Vorhandensein von Festkörperbrücken und Überzügen unterschiedlicher Art und Zusammensetzung zwischen und auf den einzelnen Sandkörnern ist eine der Hauptursachen für eine Sackungsneigung bei Wassergehaltsänderungen in den untersuchten Böden. Diese Festkörperbrücken führen zu einer Stabilisierung bzw. temporären Verfestigung des Korngerüsts durch die Bildung von Aggregaten und bedingen damit die Bildung von Inter-Partikular- und Inter-Aggregat-Poren sowie Mikroporen im Inneren der Aggregate (Intra-Aggregat-Poren).

Durch den Grundwasseranstieg und die Grundwasserströmung entstehen eine Vielzahl frei beweglicher, nicht an Aggregate gebundene Feinpartikel, wodurch die Kontaktflächen zwischen den umhüllten Sandkörnern neu ausgebildet werden. Daraus resultiert eine vermehrte Sackungsneigung bei diesen Böden. Die Verkittungen aus leicht löslichen Salzen, wie z. B. Gips, reagieren bei Grundwasserwiederanstieg langsamer und führen erst nach einem allmählichen Aufbrechen bzw. Lösen der „Salzbrücken“ zeitverzögert zu Sackungen.

# Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Seit Jahrzehnten treten in einigen Gebieten in Deutschland Grundwasserspiegelschwankungen auf. In den 70er Jahren traten hauptsächlich Probleme durch Grundwasserabsenkungen auf, die auf einen erhöhten Wasserverbrauch der Industrie, privater Haushalte und Landwirtschaft und niederschlagsarme Jahre zurückgingen. Lange Zeit war der Blickwinkel hauptsächlich auf Wassersparmaßnahmen gerichtet. Das führte in einigen Gebieten zu „Wassernotständen“ (z.B. Südhessen). Die Folgen waren ökologische Schäden durch Austrocknung bzw. Baumsterben, aber auch Gebäudeschäden bedingt durch ungleichmäßige Setzungen der Geländeoberfläche. Seit Ende der 90er Jahre hat sich die Situation gewandelt. Durch einen großflächigen enormen Rückgang des privaten und industriellen Wasserbedarfs kommt es vermehrt zu ansteigenden Grundwasserspiegeln, die teilweise sogar flurnah anstehen. Die Folge sind zunehmende Vernässungsschäden landwirtschaftlicher Flächen und von Gebäuden. In Großstädten wie Berlin ist neben Einzelgebäuden auch die Infrastruktur (U-Bahnen und Kanalisationen) betroffen (KOFOD 2001).

Die Grundwasserschwankungen lassen sich in kurzfristige und langfristige Schwankungen unterteilen, die entweder natürlich oder künstlich bedingt sein können.

Im Folgenden sind die wesentlichen natürlichen und künstlichen Ursachen für Grundwasserabsenkungen und -anstiege aufgeführt:

1. Niederschlagsarme bzw. -reiche Perioden (Trockenperioden, geringe Grundwasserneubildung, extreme Niederschläge, Hochwasser).
2. Fördererhöhungen oder -verringerungen (öffentliche Haushalte, Industrie, Beregnung landwirtschaftlicher Flächen, siehe auch 5.).
3. a, laufende bzw. beendete Grundwasserhaltung im Bergbau (Untertage, Tagebau: Geländesenkungen und Verringerung des Flurabstandes).  
b, Grundwasserhaltung bei größeren Baumaßnahmen (Tiefgaragen, Straßentunnel, U-Bahn- und Kanalbauwerke).
4. Infiltrationsmaßnahmen zur Anhebung von Grundwasserständen (Künstliche Bewässerung von Nutz- und Brachflächen).
5. Landnutzungsänderungen (Umstellung von Forst- auf Landwirtschaft, Grün- auf Ackerland, Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung).

Durch erfolgte Absenkungen und nachfolgende Wiederanstiege kommt es jedoch immer häufiger zu unerwünschten Begleiterscheinungen.

Die Absenkungsbeträge liegen je nach Ursache zwischen mehreren Zehnermetern wie z.B. im Braunkohlen-Bergbau (Rheinisches Revier, Mitteldeutsches Revier) oder aber auch nur bis zu wenigen Metern wie z.B. im Hessischen Ried oder der Pfalz, die ebenfalls zu merkbaren Geländesenkungen und Schadensfällen führten (WESTRUP 1979, PRINZ & WESTRUP 1980). Setzungen durch Absenkung der Grundwasseroberfläche reagieren in der Regel sehr rasch auf Spiegelsenkungen und Beharrungszustände (WOHLRAB 1972). Bei einem Wiederanstieg kommt es in der Regel zu rückläufigen Hebungen, die mit 1%-10% der vorausgegangenen Setzung, jedoch sehr gering sind. Bei stark tonigem Untergrund können sie zum Teil auch einige Zehnerprozent betragen.

Bei Setzungserscheinungen infolge Absenkung der Grundwasseroberfläche ist einerseits ein Setzungsanteil als Folge der Zusatzbelastung des Korngerüsts durch Wegfall des Auftriebs zu berücksichtigen, andererseits treten in bindigen Böden bei einer Abnahme des Wassergehalts so genannte Schrumpfsetzungen auf, die die ersteren im Ausmaß weit übertreffen können (KRABBE 1958, WESTRUP 1979, PLACZEK 1982).

Die Setzmaße sind vom Absenkungsmaß und besonders vom Untergrundaufbau abhängig. So wurde zum Beispiel im Rheinischen Braunkohlenrevier die Grundwasserfläche von 50-100m in den 50er Jahren auf zum Teil über 400 m in den 80er Jahren abgesenkt. Die aufgetretenen Setzungen resultieren hauptsächlich aus den bindigen Schichtanteilen der in dieser Region auftretenden vorwiegend feinsandig ausgebildeten Tertiärsedimenten. Das mittlere relative Setzmaß beträgt in den vorwiegend feinsandigen Tertiärsedimenten 1-3mm auf 1m Grundwasserabsenkung. Zum Vergleich betragen die relativen Setzungen bei mittelfristigen Absenkungen in den vorwiegend tonig ausgebildeten Tertiärsedimenten des Mainzer Becken 1-3mm/m und bei langfristigen Absenkmaßnahmen 5-10mm/m (PRINZ 1990). Bei einem Wiederanstieg des Grundwassers betragen die relativen Setzungen 2-4mm/m.

Besonders bei periodischen Absenkungen und Wiederanstiegen von flurnahem Grundwasser in Talauen mit lokalen weichen oder organischen Einlagerungen wie z.B. Torf können erhebliche Setzungsunterschiede auf kurze Entfernungen auftreten. Das organische Material zersetzt sich relativ schnell bei Zutritt von Luft und bildet ein poröses Gefüge, welches unter der Auflast darüber liegender Schichten oder Gebäude zusammenbricht. Bei Wiederanstieg kann das organische Material sehr viel Wasser aufnehmen und es kann zu Hebungen aber auch zu einer wasserinduzierten Setzung bzw. Sackung kommen. Diese Erfahrungen wurden besonders bei der Grundwasserabsenkung im Hessischen Ried gemacht, wo der Absenkbetrag bei 1 bis 5m lag (WESTRUP 1979, PRINZ & WESTRUP 1980).

## **1.2 Problemstellung**

Die zwei ausgewählten Beispielräume Hessisches Ried und das ehemalige Braunkohlenabbaugebiet Bitterfeld und Halle sind durch unterschiedliche Ursachen für den Grundwasserwiederanstieg und eine unterschiedliche geologische Entwicklung charakterisiert. Im Hessischen Ried ist der Rückgang der privaten und industriellen Wasserentnahme aus lokalen Wasserversorgungsanlagen gepaart mit klimabedingten und anthropogenen (z.B. landwirtschaftliche Beregnung) Einflüssen für erhöhte Grundwasserstände verantwortlich. Ursprünglich stand das Grundwasser in Teilen des Hessischen Rieds in sehr geringer Tiefe an und prägte eine Überschwemmungslandschaft mit Auwäldern. In den Grundwasserhaushalt wurde großräumig durch den Menschen eingegriffen (PAPE 2003). Seit Ende der 1950er Jahre nahm der Bedarf an Trinkwasser und Wasser für die Industrie und die landwirtschaftliche Beregnung stark zu. Die neuen Entnahmen und regelmäßig wiederkehrende Trockenperioden führten zu großflächigen Absenkungen der Grundwasseroberfläche. Seit einigen Jahren sind diese Entnahmen jedoch rückläufig (GERDES 2002). Von 1999 bis Anfang 2003 gab es sehr niederschlagsreiche Jahre mit der Folge weiter ansteigender Grundwasserstände. Im April 2001 wurden vielerorts die höchsten Grundwasserstände seit 40 Jahren erreicht (Abb. 1). Die Folge sind Vernässungsschäden. Im Süden der Region stieg das Grundwasser im Februar 2003 sogar noch etwas höher an und reichte bis an die hohen Wasserstände der 1950er Jahre heran (PAPE 2003).



**Abb. 1:** Vernässung durch hohes Grundwasser in Nauheim, April 2001 (aus PAPE 2003).

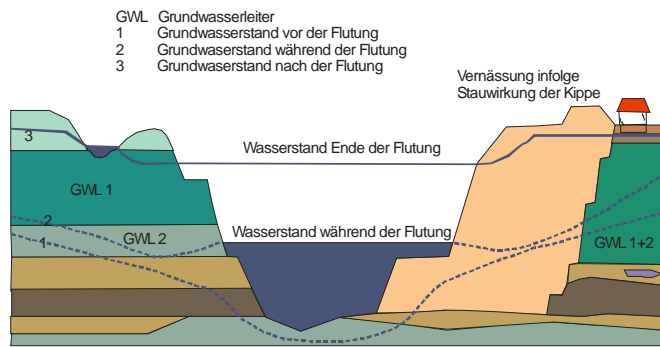
Im Raum Bitterfeld/Wolfen ist aufgrund der enormen Wasserhaltung des ehemaligen Braunkohlenbergbaus der Grundwasserspiegel in einigen Bereichen stark abgesunken. Nach Beendigung des Abbaus wurden die Sumpfungsmaßnahmen eingestellt. Seit 1990 bis ca. 2020 wird ein Teil der offenen Tagebaue planmäßig geflutet, was einen langsamen Anstieg des Grundwasserspiegels zur Folge hat (Abb. 2 a und b).



**Abb. 2 a und b:** a, Bauermeister-Villa (links) und b, Deutsche Grube Bitterfeld (rechts) im Juli 2004, nach Beendigung der Wasserhaltung. Das Haus wurde im August 2004 abgerissen (GRIMMER & LEMPP 2005).

Der Wiederanstieg des Grundwassers ist kein reziproker Vorgang des Absenkungsprozesses. Durch die Devastierung bedingte veränderte Lagerung und Durchlässigkeit der Sedimente, Hohlräume, Wasserscheiden, Evapotranspiration und Milieubedingungen ermöglichen keine Wiederherstellung der ursprünglichen hydrogeologischen Verhältnisse im ehemaligen Bergbauggebiet. Verlegte Vorfluter und veränderte Morphologie tragen ebenfalls dazu bei. Teilweise liegt der Grundwasserspiegel nach dem Wiederanstieg sogar höher als ursprünglich, da Halden infolge Sättigung mit Niederschlagswasser und Restlöcher mit künstlicher Auffüllung entsprechende Folgen für den Grundwasserspiegel haben können (Abb. 3). Dieser Anstieg führt in natürlichen Lockergesteinsfolgen zu einer Umlagerung des Korngerüsts und damit zu Sackungen.





**Abb. 3:** Schematische Darstellung der Grundwasserverhältnisse vor, während und nach der Flutung (LMBV 1997).

Da im Hessischen Ried wie auch im ehemaligen Braunkohlenabbaugebiet Bitterfeld/Wolfen durch die großräumigen Absenkungen in Abhängigkeit der Komplexität der geologischen Schichtenfolge bereits viele Schäden an Bauwerken entstanden sind, ist es nun schwierig, die Schäden von denen zu unterscheiden, welche durch den Wiederanstieg des Grundwassers verursacht wurden. Möglich ist, dass die in letzter Zeit entdeckten Schäden an Bauwerken in diesen Regionen nicht nur auf Absenkungsschäden, sondern bereits auf ansteigendes Grundwasser zurückgehen. Eine Überprüfung dieses Sachverhaltes gestaltet sich jedoch wegen der komplizierten Rechtslage äußerst schwierig, da viele laufende Gerichtsverfahren dahingehende Untersuchungen bis auf weiteres nicht erlauben.

### 1.3 Zielstellung

Es wurde bereits in zahlreichen Forschungsstudien untersucht, dass der Grundwasserwiederanstieg zu Sackungen in unverfestigten und verfestigten Kippenflächen und in Lößböden führt (ERLENBACH 1936, ABELEV 1948, JAKY 1948, KÉZDI 1969, DIERICHS 1987). Bisher nicht untersucht wurde, ob bei einem allmählichen Grundwasserwiederanstieg auch der gewachsene Boden zu Sackungen neigt.

In dieser Arbeit wurde erstmals untersucht, in welchem Ausmaß Sackungen in gewachsenem Boden bei ansteigendem Grundwasser auftreten können und welche Ursachen und Mechanismen den Sackungen im gewachsenen Boden zu Grunde liegen. Ein besonderes Augenmerk wird auf Zementationen in Porenzwischenräumen des Bodens gelegt, da diese einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Bodens haben (DENISOV 1946, FEESER et al. 2001).

Dazu wurden aus den beiden oben erwähnten Untersuchungsgebieten Proben ausgewählt, die im Zuge von Grundwassermessstellenausbau mittels Liner-Bohrung gewonnen wurden. In Ödometer-Versuchen wurde unter realitätsnahen Bedingungen für Wassergehalt, Temperatur und Auflast, wie sie in der jeweiligen Tiefe der zu untersuchenden Probe herrschen, ein allmählicher Wasseranstieg simuliert. Parallel dazu wurden weitere bodenmechanische, -physikalische, physiko- und geochemische Untersuchungen durchgeführt. Auf der Grundlage von REM- und Kryo-REM-Untersuchungen erfolgten Aussagen zum Gefügebau, der Verteilung des Wassers im Gefüge und die qualitative Ermittlung der Zementationen. Mit den hieraus und aus den Ödometer-Versuchen gewonnenen Ergebnissen wurde eine Sackungspotenzialabschätzung an ausgewählten Profilen für den Fall Grundwasseranstieg durchgeführt und diskutiert.

## **1.4 Datenerlangung und –handhabung**

### **1.4.1 Beispielraum 1: Bitterfeld/Wolfen**

Trotz des ungefähr ein Jahrhundertlang betriebenen Braunkohlenbergbaus und der intensiven Nutzung auch anderer Bodenschätze (Steinkohle, keramische Rohstoffe, Grundwasser) bildeten weite Gebiete des mittleren und nördlichen Saale-Elbe-Raumes bis Ende der 1950er Jahre eine „terra incognita“ (EISSMANN & LITT 1994). Das gilt insbesondere für das Tertiär und Prätertiär. Erst im Rahmen der Braunkohlenerkundung, der Erforschung der hydrogeologischen Verhältnisse und der Uran- und Steinkohlenprospektion nach dem Zweiten Weltkrieg wurden die Lücken geschlossen. Eine größere Anzahl von Bohrungen wurde auch zur Klärung geophysikalischer Anomalien und für Zwecke der geologischen Kartierung im Maßstab 1 : 200.000 niedergebracht (EISSMANN & LITT 1994).

Die Befunde sind in Hunderten von nach wie vor unveröffentlichten Berichten niedergelegt. Die meisten von ihnen waren bis zur Zeit der Wende 1989 „vertraulich“ oder sogar „streng vertraulich“ und daher nur wenigen Personen zugänglich. Aus Gründen des „Geheimsschutzes“ kam eine schon vor drei Jahrzehnten geplante monographische Bearbeitung des Tertiärs und Prätertiärs nicht zur Ausführung. So existieren daher gegenwärtig über einen der am besten erkundeten Räume der Erde nur knappe, dem tatsächlichen Kenntnisstand nicht gerecht werdende Regionalarbeiten und Übersichten. EISSMANN und LITT stellten 1994 einen Leitfaden über das Quartär Mitteldeutschlands zusammen. Leider fehlen immer noch aktuelle hydrogeologische und ingenieurgeologische Übersichten, deren Gründe im Folgenden näher beleuchtet werden.

Zuerst nahmen die Lausitzer Bergbau-Verwaltungsgesellschaft (LBV) bzw. die Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft (MBV) die Aufgaben der Sanierung und Wiedernutzbarmachung in den Revieren nach der Wende wahr. Seit dem 1. Januar 1995 übernahm die Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) als Holding die gezielte Beendigung des nichtprivatisierbaren auslaufenden Braunkohlenbergbaus, die Bewältigung der Bergbaualtlasten in der Lausitz und in Mitteldeutschland sowie die Verwertung der sanierten Liegenschaften. Die LMBV ist ein Unternehmen der öffentlichen Hand, das sich heute im Besitz des Bundes befindet (LMBV 2003).

Am 1. Januar 1996 fusionierten MBV und LBV mit der Holding LMBV; die ehemaligen Revierstrukturen wurden durch eine länderbezogene Organisation des Unternehmens abgelöst.

Ende 1999 wurden planmäßig die letzten Produktionsstätten außer Betrieb genommen. Seit der Verschmelzung der BMGB auf die LMBV im Jahr 2000 ist die Bundesrepublik Deutschland alleiniger Gesellschafter der LMBV. Das Bundesministerium für Finanzen nimmt die Rolle des Gesellschafters wahr. Der Sanierungsbergbau und die anschließende Verwertung sind in den Mittelpunkt der Tätigkeit des Unternehmens gerückt. Die LMBV ist als Bergbauunternehmen und Projektträger insbesondere verantwortlich für Sanierungsplanung, Projektmanagement und Sanierungscontrolling (LMBV 2003).

Im Rahmen der Umstrukturierung der staatlichen Geologischen Forschung und Erkundung (GFE) nach der Wiedervereinigung in ein Landesamt für Geologie und Bergbau und eine Auslagerung von Teilen des GFE als private Unternehmen in Form verschiedener Consulting- und Ingenieurbüros sind leider viele der sehr umfangreichen Unterlagen und Daten der ehemaligen Braunkohlenerkundung und Vorratsberechnung verloren gegangen. Die Archive wurden aufgegliedert auf die einzelnen Länder Sachsen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg.

Die seit der Wiedervereinigung nicht mehr geheimen Unterlagen durften bei der LMBV nur bedingt eingesehen und ein Großteil unter keinen Umständen für die vorliegende Arbeit verwendet werden. Begründet wurde dies mit der Befürchtung, diese Arbeit könnte die laufenden Planfeststellungsverfahren und Gerichtsverfahren, welche mit der Flutung in dem bearbeiteten Gebiet zusammenhängen, in irgendeiner Weise beeinflussen. Leider wurde auf mehrere Anfragen nie mitgeteilt, welche tatsächlichen Bedenken seitens der LMBV bestehen.

Aufgrund dieser Einschränkungen konnten für die Kapitel Geologie, Hydrogeologie und Hydrologie im ehemaligen Braunkohlenabbaugebiet Bitterfeld/Wolfen nicht die aktuellsten Daten zur Grundwasserneubildung bzw. aktuelle Grundwasserisohypsenkarten in Form von Abbildungen verwendet werden. In diesem Fall wurde nur auf bereits publizierte Daten zurückgegriffen.

#### **1.4.2 Beispielraum 2: Hessisches Ried**

Die ingenieurgeologischen, bodenmechanischen und hydrogeologischen Daten über das Hessische Ried konnten aufgrund einer anderen rechtlichen Lage umgehend vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG), dem Regierungspräsidium Darmstadt und verschiedener Ingenieurbüros zur Verfügung gestellt werden. Daher konnte dieser Raum entsprechend ausführlicher und aktueller dargestellt werden.

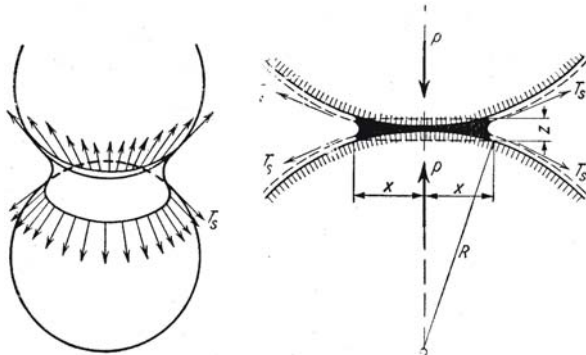
Probenmaterial wurde ebenfalls zur Verfügung gestellt. Leider wurden in dem Zeitraum keine aktuellen Bohrungen im Hessischen Ried abgeteuft, so dass auf ältere Linerbohrungen zurückgegriffen werden musste, die bereits seit längerem im Bohrkernlager des HLUG verschlossen aufbewahrt wurden. Die Linerbohrungen vom Ingenieurbüro Brand, Gerdes & Sitzmann (BGS) aus Darmstadt wurden am Rand des Hessischen Rieds zum Sprendlinger Horst abgeteuft, enthielten aber genügend Material aus dem Quartär des Hessischen Rieds ohne störende Beeinflussung von Ablagerungen des Sprendlinger Horst, so dass diese Proben zum Hessischen Ried zählend bearbeitet werden konnten.

## 2 Kenntnisstand

### 2.1 Sackungen und Grundwasserwiederanstieg – Definition und allgemeine Zusammenhänge

In der modernen Literatur werden die Begriffe Sackung und Setzung im Zusammenhang mit dem Aspekt des Grundwasserwiederanstiegs nicht einheitlich gebraucht. Im Gegensatz zu einigen Autoren, u.a. KÉZDI (1969) und HALLBAUER (1981), die in Abhängigkeit von der Größe des eintretenden Verformungsbetrages in Sackungen (größerer Verformungsbetrag, plötzliches Eintreten) und Setzungen bei Grundwasserwiederanstieg (geringerer Verformungsbetrag, gleichmäßiges Eintreten) unterscheiden, werden in dieser Arbeit die Definitionen der DIN 4019-100 verwendet. Die DIN 4019-100 definiert „Sackung“ als „die Verschiebung in Richtung Schwerkraft infolge einer Umlagerung des Korngerüsts bei starker Durchnässung des Bodens, verursacht durch den Verlust der scheinbaren Kohäsion“. In der Regel wird eine Sackung im cm bis dm Bereich gemessen. Das ist in dieser Arbeit jedoch nicht der Fall, aber der zugrunde liegende Mechanismus kommt der oben genannten Definition aus der DIN 4019-100 am nächsten.

Nach KÉZDI (1969) entstehen Sackungen dadurch, dass sich in den Winkeln eines rolligen Bodens mit geringem Wassersättigungsgrad das Wasser um die Berührungspunkte der Körner sammelt. Zwischen den Körnern treten Haftkräfte  $T_s$  auf und daher können die Körner keine dichte Struktur bilden. Das Porenvolumen ist relativ groß. Die Wirkung der Oberflächenspannung zwischen den Körnern wird nach KÉZDI (1969) idealisiert in Abb. 4 dargestellt.



**Abb. 4:** Wirkung der Oberflächenspannung zwischen zwei Kugeln (nach KÉZDI, 1969).

Entlang der Berührungslinien der Wassermenisken mit den Körnern entstehen Zugkräfte, die ein Aneinanderdrücken der Körner mit der Kraft  $P$  bewirken. Verschieben sich die Körner, so entsteht eine Reibungskraft. Diese durch die Oberflächenspannung hervorgerufene Reibung zwischen den Körnern wird als scheinbare Kohäsion bezeichnet. Wird nun ein unter Auflast stehender und nicht wassergesättigter Boden mit Wasser gesättigt, dann tritt in den meisten Fällen eine plötzliche Zusammendrückung auf und die Kapillarspannungen werden abgebaut. Diese Zusammendrückung, bei der im Gegensatz zur reinen Kompressionssetzung im wesentlichen eine Transformation von einer metastabilen in eine stabile Kornlagerung stattfindet, wird als „Sackung“ bezeichnet (KÉZDI 1969, FEESER et al. 2001).

Der Anstieg des Grundwassers läuft in naturfeuchten Böden in drei Phasen ab (WÖHLBIER 1959, NEUMANN 1964):

- Wasserfilmbildung
- Füllung der Porenräume mit Wasser
- Beginn der Auftriebswirkung

Besonders stark tritt diese Erscheinung in Lößböden und in nichtbindigen, gleichförmigen/feinkörnigen Böden auf. Initial dafür ist eine Schwächung beziehungsweise Zerstörung der interpartikularen Bindungen (Zementierungen, Schichtsilikatbrücken). Die Sackungen können bei solchen Bodenarten größer werden als die aufgrund von Berechnungsverfahren abgeschätzten Setzungen (FEESER et al. 2001). So waren Sackungen nichtbindiger Böden infolge Durchnässung wahrscheinlich bereits mehrfach eine Ursache für Schadensfälle (HELLWEG 1981).

Die Bestimmung der Sackung kann im Labor im Ödometer, mit Hilfe der Porenzahl nach ABELEV (1948) oder mittels speziell entwickelter Versuchsstände wie z. B. bei HELLWEG (1981), durchgeführt werden. Fast alle Geräte sind im Prinzip Kompressionsgeräte, bei denen eine Durchfeuchtung bzw. Flutung von oben oder unten her erfolgte. Bei fast allen Versuchen wurde eine Belastung auf die zu untersuchenden Proben gegeben (s. Kapitel 2.2).

Sackungsfähige Materialien sind nach ELDEMERY (1971) Sande mit einem Körnungsbereich von 0,02 bis 0,08 mm.

Das Sackungsverhalten eines Sandes wird nach HELLWEG (1981) durch bodenphysikalische Faktoren wie:

- Korngröße und Korngrößenverteilung,
- Kornform,
- Dichte des Bodens und Porenzahl,
- Wassergehalt sowie
- Durchlässigkeitsbeiwert

und durch äußere Faktoren wie:

- Erschütterungen (Stoß, Vibration),
- Auflastspannung
- Zeitpunkt der Flutung (erstmalig oder wiederholt)

bestimmt, wobei der Ausgangslagerungsdichte und damit der Porenzahl eine übergeordnete Rolle zukommt (ELDEMERY 1971, HELLWEG 1981).

Zusätzlich haben verschiedene Autoren wie SCHUBERT (1957), IDEL (1960), RETHATI (1963) und SCHÄFFNER (1965) bei Laborversuchen die Bedeutung der Probengeometrie bzw. der Versuchgeräteabmessung als Einflussgröße auf das relative Sackungsmaß herausgearbeitet. Sie empfehlen bei Sackungsversuchen im Labor folgende Verhältnisse einzuhalten:

- Probendurchmesser : Korndurchmesser = 12 : 1 bis 40 : 1
- Probendurchmesser : Probenhöhe  $\geq 5$  und
- Probenvolumen  $\geq 500 \text{ cm}^3$ .

## **2.2 Übersicht über den bisherigen Entwicklungsstand von Sackungsuntersuchungen**

### **2.2.1 Untersuchungen von Erlenbach**

ERLENBACH (1933) führte Untersuchungen über das Verhalten von Sanden bei Belastungs- und Grundwasserspiegeländerung durch. Er untersuchte die Reaktion trockener und nasser Sandschüttungen bei verschiedenen Belastungen und Wasserspiegeländerungen. Die Belastungen als auch die Wasserzufuhr und -absenkung wurden in bestimmten, wechselnden Intervallen vorgenommen.

Bei den ersten Wasserspiegelhebungen kam es zu erheblichen Setzungen der Druckplatte, die von ERLENBACH (1933) als „ruckartig“ bezeichnet wurden. Nach mehrtägiger Wasserabsenkung bei gleichzeitiger Laststeigerung und erneutem Wasseranstieg kam es wieder zu einer plötzlichen Setzungszunahme der Druckplatte. Für einen dicht gelagerten feinsandigen Mittelsand mit einem Ungleichförmigkeitsgrad von 1,57 und einer Porenzahl von 0,647 ergeben sich bei den Versuchen in einem Gefäß von 70 cm Höhe und 30,4 cm Durchmesser bei einer Auflast von 70 kN/m<sup>2</sup> absolute Setzungen von 6,4 mm. Dies entspricht einer relativen Sackung von 0,94% der Gesamthöhe. Nach einem eintägigen Entlasten und Austrocknen der Probe wurde eine erneute Belastung von 100 kN/m<sup>2</sup> aufgegeben und anschließend aufgesättigt. Die sofort eintretenden Setzungen betragen absolut 3,5mm entsprechend 0,51% der Gesamthöhe. Bei Anwendung der von KÈZDI (1969) gegebenen Erklärung handelt es sich hier um Sackungen. Dieser Begriff wurde jedoch wahrscheinlich erst von ihm eingeführt.

### **2.2.2 Untersuchungen von Denisov**

DENISOV (1946) führte u.a. Untersuchungen über die Eigenschaften und den Mechanismus der Verformung lößartiger Lehme bei Durchnässung durch, welche die Grundlage für alle nachfolgenden Sackungsuntersuchungen mit makroporigen Böden bildeten. In diese Gruppe feinkörniger, nichtbindiger, außerordentlich locker strukturierter Böden gehören Löß und in der Regel durch Windablagerungen von vulkanischen Aschen oder feiner Sande entstandene Böden.

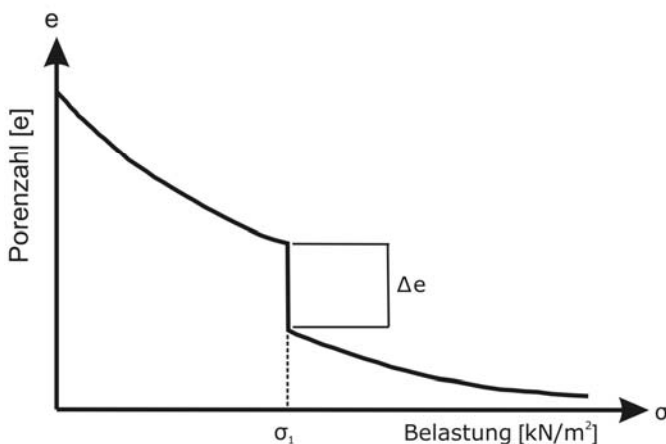
Nach DENISOV (1946) wirken zwischen den Körnern verschiedene Bindungskräfte. Als primäre Kräfte werden die molekularen Wirkungen genannt. Eine sekundäre Wirkung üben die unter Kapitel 2.1 genannten Menisken aus, die durch die Oberflächenspannung des Wassers die scheinbare Kohäsion verursachen. Dazu kommt noch eine Verkittung der Körner durch dünne Salzhäute. Neben der unter Kapitel 2.1 beschriebenen Aufhebung der scheinbaren Kohäsion bei Wasserzufuhr entwickeln die eingeschlossenen Luftbläschen bei der Wassereindringung eine Sprengwirkung, in den Salzhäuten entstehen dadurch Haarrisse, und die Molekularkräfte werden ebenfalls reduziert. Durch die schnelle Verminderung dieser verschiedenen Bindungskräfte kommt es zu Kornumlagerungen und infolgedessen zu einer Strukturveränderung, die zu einer Verminderung der Schichtdicke führt. Es tritt eine Sackung ein. Die Sackungsfähigkeit kann durch die Formel  $e_f/e$  beurteilt werden; hierbei sind  $e_f$  die Porenzahl der Fließgrenze und  $e$  die Porenzahl in natürlichem Zustand. Ist diese Zahl  $> 1$ , dann ist der Boden sackungsfähig. Nach DENISOV (1946) ist der Sackungsgrad eine Funktion der Dichte. Bei einer Lagerungsdichte für Löss von  $D = 0,8$  ist die relative Sackung kleiner als 0,02; über  $D = 0,85$  ist sie kleiner als 0,01.

### 2.2.3 Untersuchungen von Abelev

ABELEV (1948, 1952) führte Versuche zur Ermittlung von Kennziffern der Makroporigkeit und der Sackungsempfindlichkeit in einem Spezialödometer durch. Sein besonderes Interesse galt dem Einfluss der erstmaligen Durchfeuchtung makroporiger Böden infolge Grundwasseranstiegs auf die Setzung von Fundamenten.

Zur Untersuchung dieser Vorgänge im Labor schlug er Versuche mit einem Spezialödometer vor. Die Probe wurde in dem Ödometer durch einen auf eine obere Abdeck- und Filterplatte drückenden Hebelarm bis zu einem bestimmten Wert  $p$  belastet und dann von oben her mit Wasser durchtränkt. Dabei traten Sackungen auf, deren Größe auf einer Messuhr abgelesen werden konnte. Das überschüssige Wasser konnte sowohl nach oben als auch nach unten durch Filterplatten entweichen und nach außen abgeleitet werden. Für die zahlenmäßige Bewertung der Sackungsfähigkeit von Böden hat ABELEV (1948) die Begriffe der „relativen Setzung“ (relative Sackung) und der „Gesamtsetzung“ (Gesamtzusammendrückung) eingeführt. Dabei wird die Gesamtzusammendrückung durch die Abnahme der Porenzahl  $e$  ( $\Delta e$ ) infolge Wasserzugabe ausgedrückt (Abb. 5). Die relative Sackung beträgt dann

$$i = \frac{\Delta e}{1 + e_0}; \text{ hierbei ist } e_0 \text{ die Porenzahl vor Wasserzugabe.}$$



**Abb. 5:** Darstellung einer Sackung nach ABELEV (1948).

Eine Lössschicht ist sackungsgefährdet, wenn  $i > 0,02$  ist. Für einen Löss mit einem Wassergehalt von 6%, einer Trockendichte von  $1,43 \text{ kN/m}^3$  erhielt ABELEV bei einer Auflast von  $300 \text{ kN/m}^2$  relative Sackungen von  $i = 0,083$ . Dies entspricht einer relativen Sackung von 7,75%. Diese Darstellungsweise von Sackungen wurde von JAKY (1948) sowie KÉZDI & EGRI (1963) übernommen.

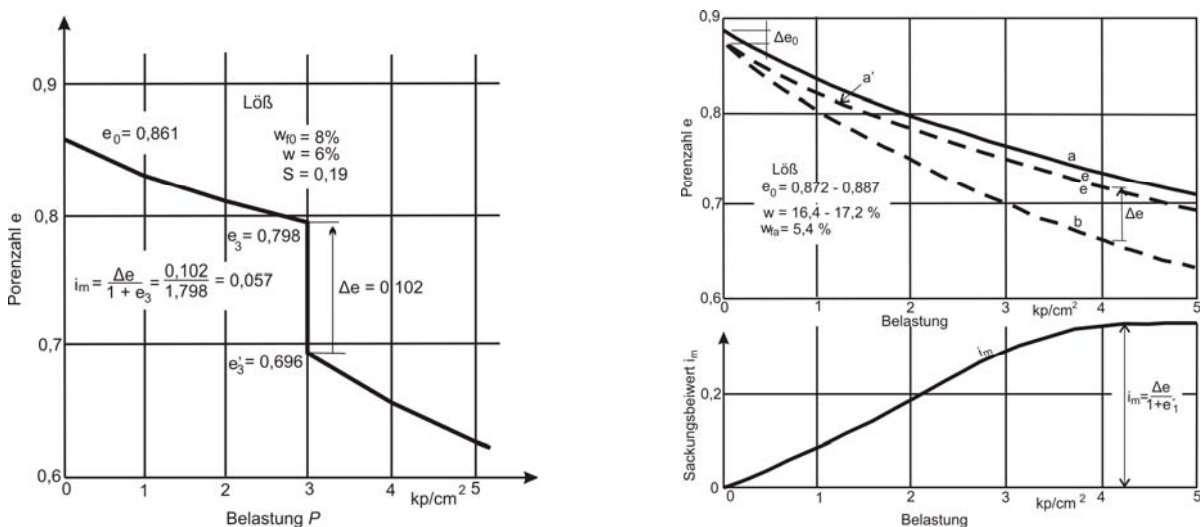
### 2.2.4 Untersuchungen von Jaky

JAKY (1948) führte Sackungsuntersuchungen mit Donaukiesen und -sandem in 60 cm hohen Stahlzylindern und mit 25 cm Probendurchmesser durch. Die eingebauten Bodenproben wurden statisch belastet und anschließend von unten durch Wassereinleitungen geflutet. Dabei traten Sackungen auf, die für Donaukies bei  $120 \text{ kN/m}^2$  Größtwerte erreichten (5,23 %). Mit dieser Belastung wurden alle weiteren Untersuchungen durchgeführt. Für eine nach der Setzung 43,6 cm hohe Probe ergab sich bei verschiedenen Wasserständen bei locker

gelagertem sandigem Donaukies Sackungen von mehr als 5% der Schichtdicke, bei dicht gelagertem Kies bis rund 2%. Eine wiederholte Flutung nach Austrocknung hatte eine geringere Wirkung, jedoch betrug die Sackung noch 10% derjenigen, die bei der ersten Flutung auftrat. JAKY (1948) hat insbesondere den Zusammenhang zwischen Porenanteil und Sackung untersucht.

### 2.2.5 Untersuchungen von Kézdi

Ähnlich wie bei ABELEV (1948) hat auch KÉZDI (1969) Versuche mit einem speziellen Ödometer zur Ermittlung der Sackungen von Lössböden durchgeführt. Für die Durchnässung wurde das Wasser von oben zugeführt. Zu diesem Zweck wurde die verstärkte Belastungsplatte mit Bohrungen versehen und der Führungszylinder gegenüber der Normalausführung eines Ödometers verlängert, so dass ein kleiner Speicherraum für das Wasser entstand. KÉZDI (1969) hat für seine Versuche nur ungestörte Lössproben verwendet, die aus den Seitenwänden von Schürftgruben oberhalb der Grundwasseroberfläche entnommen wurden. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden in Druck-Setzungsdiagrammen aufgetragen. Die Proben wurden mit 200, 300, 400 und 500 kN/m<sup>2</sup> stufenweise belastet. Nachdem sich die Probe bei 300 kN/m<sup>2</sup> konsolidiert hatte, wurde sie vorsichtig von oben mit Wasser überflutet. Dabei trat eine Sackung ein, die mit einer Messuhr abgelesen werden konnte. Neben diesen Versuchen führte KÉZDI (1969) Parallelversuche durch, bei denen eine Probe normal wie bei einem Kompressionsversuch untersucht wurde, während die andere noch vor der Belastung im Gerät mit Wasser gesättigt wurde. Der Vergleich der beiden ermittelten Kurven diente der Beurteilung zur Sackungsfähigkeit (Abb. 6 a und b).



**Abb. 6 a und b:** a (links): Druck-Setzungs-Diagramm, Sackung durch Wasserzugabe. b (rechts): Kompressionskurven nach KÉZDI (1969).

### 2.2.6 Untersuchungen von Kézdi und Egri

KÉZDI & EGRI (1963) haben in einem Lössgebiet in Ungarn großflächige Messungen von Setzungen und Grundwasserstandshebungen in Beobachtungsbrunnen durchgeführt. Infolge von Industrieansiedlungen in dem untersuchten Gebiet bildete das aus den neuen Betrieben und Kanälen versickernde Wasser mit der Zeit Grundwasserdome, da Lössschichten die Eigenschaft haben, in vertikaler Richtung viel durchlässiger zu sein als in



horizontalen Richtung. Der Grundwasseranstieg bewirkte erhebliche Sackungen. Durch eine mathematische Analyse der Messungen von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Kompressionssetzung und der Sackung war es möglich, diese getrennt zu bestimmen. So konnten die Ergebnisse gemessener Setzungen von bestimmten Gründungskörpern in Diagrammen dargestellt werden.

Die Veränderungen der relativen Sackung  $i$  bzw.  $i_m$  wurde hierbei näherungsweise als linear angenommen. Unter dieser Voraussetzung und der Annahme eines Polynoms zweiten Grades für den Verlauf der Erhöhung des Grundwasserstandes wurde die gemessene Zeit-Gesamtsetzungs-Kurve zweimal grafisch differenziert und so die Setzungsbeschleunigung errechnet. Da diese Kurve verhältnismäßig schnell in einem annähernd horizontalen Ast übergeht, wurde dieser näherungsweise als eine Konstante angenommen. Mit dieser Konstante ließen sich die Geschwindigkeit und die Zeitsetzungskurve der Sackung mathematisch bestimmen.

Nach Beendigung der Setzungen unter der Gründung mit einer Sohlpressung von  $15,5 \text{ kN/m}^2$  wurden bei einem Anstieg des Grundwassers bis unter die Gründungssohle absolute Sackungen von 8 mm über einen Zeitraum von 2 Jahren gemessen.

### 2.2.7 Untersuchungen von Rethati

Nach den Untersuchungen von RETHATI (1963) kann eine Sackung nicht nur durch den Anstieg des Grundwassers oder Durchnässung von oben her, sondern auch durch die Durchfeuchtung auf kapillarem Weg entstehen. Diese Sackung ist besonders bei Dämmen aus Sand gefährlich. Wenn der Sand verhältnismäßig trocken verdichtet wurde, kann die erste Durchfeuchtung die Standsicherheit des Bauwerkes gefährden.

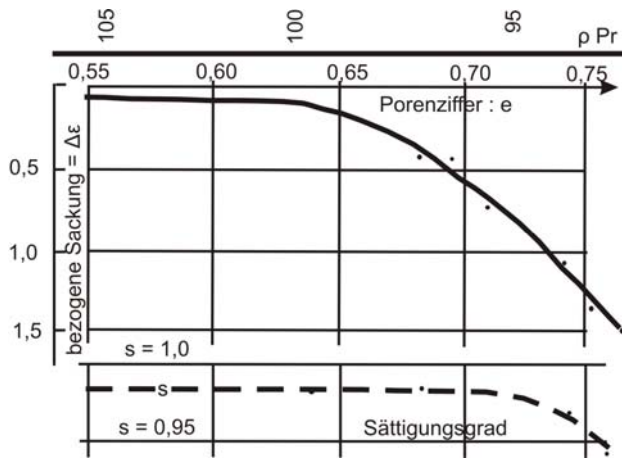
RETHATI (1963) hat eine statistische Auswertung von erdbaumechanischen Untersuchungen durchgeführt, die von dem ungarischen Unternehmen für Geodäsie und Bodenforschung an mehreren hundert beschädigten Gebäuden auf verschiedenen Böden vorgenommen wurden. Die Auswertung ergab, dass nur 15 bis 20% der Schäden auf ungleichmäßige Setzungen infolge statischer Belastung, jedoch 70 bis 80% der Schadensfälle auf unter die Gründungskörper gelangtes Wasser und damit verbundene Sackungen zurückzuführen war. Neben diesen statistischen Auswertungen führte RETHATI (1963) nahezu 300 Laborversuche unter Verwendung von Metallringen mit 4 bis 12,5 cm Durchmesser zur Ermittlung von Kapillaritätskennwerten sowie zur Bestimmung des Wassersättigungsgrades und der Sackung rolliger Böden durch. Der nach der Wasseraufnahme zustande gekommene Sättigungsgrad wurde von RETHATI (1963) nach folgender Formel berechnet:

$$S = \frac{(G_n - G_0) \cdot \gamma_s}{F \cdot h \cdot (1 - 0,01 \Delta \varepsilon) - G_0}$$

Hierin bedeuten  $G_n$  und  $G_0$  das nasse bzw. das trockene Gewicht der Bodenprobe,  $\gamma_s$  die Kornwichte des Bodens,  $F$  die Querschnittsfläche und  $h$  die ursprüngliche Höhe der Bodenprobe. Außerdem ist die bezogene Sackung in der Formel enthalten:

$$\Delta \varepsilon = \left( \frac{\Delta h}{h} \right) \cdot 100$$

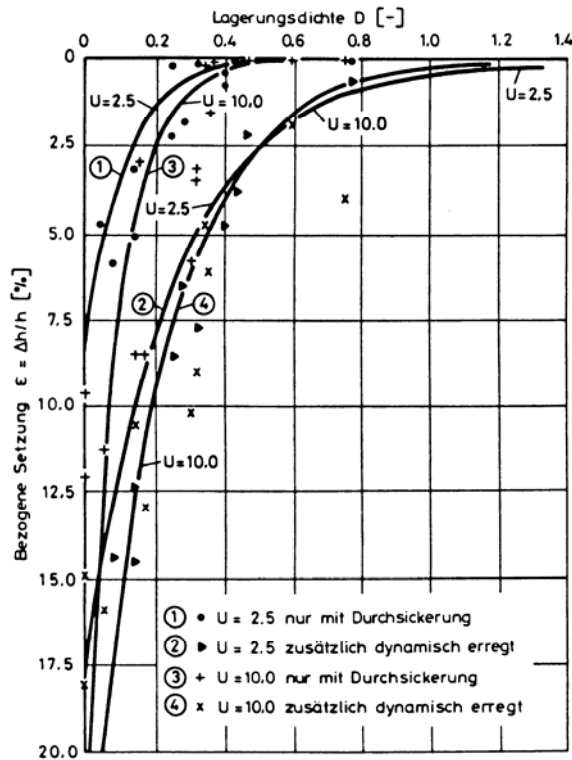
$\Delta h$  ist die aus dem Einfluss des Wassers entstandene Verminderung der Höhe. Als Ergebnis der Untersuchungen konnte die Veränderlichkeit der bezogenen Sackung  $\Delta \varepsilon$  und des Sättigungsgrades  $S_r$  abhängig von der Porenzahl  $e$  bzw. der mit  $\rho_{Pr}$  bezeichneten Proctordichte in Diagrammen dargestellt werden (Abb. 7).



**Abb. 7:** Sackungsdiagramm von RETHATI (1963).

### 2.2.8 Untersuchungen von Garbrecht

GARBRECHT (1978) stellte auf der Deutschen Baugrundtagung Untersuchungen mit vertikal durchsickerten nichtbindigen Böden in Betonringen von rund 1m Durchmesser und insgesamt rund 1m Höhe vor. Es wurden zwei erdfeuchte Sande mit einer Ungleichförmigkeit  $U = 2,5$  und  $10,0$  untersucht. Dabei wurde der Sand lagenweise eingebaut und verdichtet und dann ohne Belastung so lange von Wasser durchsickert, bis die Verformungen zur Ruhe kamen. Die bezogene Setzung  $\varepsilon$  (hier eigentlich bezogene Gesamtzusammendrückung = geringe Setzung infolge Boden-Eigengewicht + große Sackung infolge Durchsickerung) wurde in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte aufgetragen. Bei allen Versuchen wurden die Vertikalverformungen nur im mittleren Bereich der Proben gemessen, um den Einfluss der Wandreibung möglichst gering zu halten (Abb. 8).



**Abb. 8:** Abhängigkeit der bezogenen Setzung  $\epsilon$  (Setzung und Sackung) von der Lagerungsdichte (GARBRUCHT 1978).

### 2.2.9 Untersuchungen von Hellweg

HELLWEG (1981) führte Untersuchungen an Sanden und einem Sand-Kies-Gemisch durch. Er entwickelte für seine Sackungsversuche eine eigene Versuchsanlage. Die in Stahlzylinder eingebrachten Proben wurden trocken, leicht erdfeucht, erdfeucht und mit ungefähr „optimalem“ Wassergehalt, der aus Proctorversuchen ermittelt wurde, eingebaut. Untersucht wurden die Proben in lockerster, sehr lockerer, mitteldichter und dichter Lagerung, wobei die Proben mit lockerster Lagerung wegen zu großer Störanfälligkeit abgebrochen wurden. Die Verformungen konnten mit Hilfe von in den Stahlzylinder eingebrachten farbigen Messkugeln, die sich hinter Plexiglasscheiben befanden, in verschiedenen Höhen gemessen werden. Nach dem Einbau erfolgte eine Belastung von  $p = 11, 70, 125, 200, 300$ , bzw.  $500 \text{ kN/m}^2$ , welche zu Setzungen führten. Mit dem Abklingen der Setzungen erfolgte eine langsame Flutung von unten. Die auftretenden Sackungen traten bei allen Höhen sofort mit der Wasserzuführung ein. Nach der Flutung wurde die Gesamtzusammendrückung abgelesen. Für alle untersuchten Böden wurden ebenfalls Versuche mit kapillarem Wasseranstieg durchgeführt. Zusätzlich wurden zum Vergleich Sackungsversuche im normalen Kompressionsgerät mit Auflasten von  $p = 50, 100, 200$  und  $400 \text{ kN/m}^2$  durchgeführt. Für einen mitteldicht gelagerten mittelsandigen Feinsand ( $U = 2$ ) mit einem Wassergehalt von 13% und einer Belastung zwischen  $300$  und  $500 \text{ kN/m}^2$  wurden absolute Sackungen von  $0,01$  bis  $0,03 \text{ mm}$  in den oberen  $10 \text{ cm}$  der Probe gemessen. Dies entspricht relativen Sackungen von  $0,01\%$  und  $0,03\%$ .

### **2.2.10 Untersuchungen von Diener**

DIENER (1999) legte den Schwerpunkt ihrer Forschung bei der Sackung von Kippen neben theoretischen Untersuchungen zur Sackungsursache und der eindeutigen Klärung des Mechanismus aller Sackungen auf die Ermittlung folgender Zusammenhänge:

- Existenz eines kritischen Wassergehaltes für das Eintreten von Sackungen,
- Relation zwischen wirksamer Spannung und Sackung,
- Einfluss der Wasseranstiegsgeschwindigkeit auf die Größe des relativen Sackungsmaßes.

Ebenso werden die Kornform und die Ungleichförmigkeitszahl berücksichtigt und das relative Sackungsmaß aus einfachen bodenphysikalischen Parametern bestimmt. Dazu wurden Sackungsversuche in einem Ödometer und in einem speziell entwickelten und gebauten Gerät, dem Sackungskasten, durchgeführt. Scherversuche in einem vollautomatischen Kreisringschergerät und Zugversuche in einem speziell für Böden geeigneten Zugfestigkeitsprüfgerät ergänzten das Versuchsprogramm. Eine Struktur- und Gefügeanalyse gab Aufschluss über entsprechende Kornanordnungen.

Für einen mitteldicht gelagerten Mittelsand mit einem Einbauwassergehalt von 1% bei Belastungen von  $100 \text{ kN/m}^2$  lagen die absoluten Sackungen bei 0,02mm. Dies entspricht bei einer Probenhöhe von 4 cm einer relativen Sackung von 0,05%. Ab einem Einbauwassergehalt von 10% tendierten die relativen Sackungen gegen Null.

### **2.2.11 Untersuchungen von Wichter und Kügler**

WICHTER & KÜGLER (2001) untersuchten das Verhalten locker gelagerter Aufschüttungen (z.B. Tagebauschüttungen in der Niederlausitz) bei Änderungen der hydraulischen Verhältnisse unter anderem auch bei Grundwasserwiederanstieg. Sie erfassten exemplarisch die Sackungen während des Grundwasserwiederanstiegs an einer Tagebaukippe und erarbeiteten eine Prognose zur Oberflächenverformung von Kippenmassiven infolge Sackungen und Setzungen. Untersucht wurde die Innenkippe des stillgelegten Tagebaus Gräbendorf anhand von Langzeitmessungen zur Beobachtung des Verformungsverhaltens von verkipptem Material während des Grundwasseranstiegs. Bis zum Grundwasserstand zu Projektende (ca. 50% der Kippenhöhe) konnten nur geringe Sackungen in den durchfluteten Bereichen der Kippe gemessen werden. Ursache hierfür ist nach WICHTER & KÜGLER (2001) die relativ hohe Lagerungsdichte in größerer Kippenteufe. Anhand von Erkenntnissen aus experimentellen Sackungsversuchen kann für den oberen ungesättigten Kippenbereich ein mögliches Sackungsmaß von 2-4% nach Wassersättigung prognostiziert werden. Nach Abschluss der Flutung in situ ist für die untersuchte Kippe mit einer Oberflächensetzung von mehr als 50 cm zu rechnen.

Eine wesentliche Einflussgröße für die Stabilität der Kippen vor der Flutung ist eine im Laufe der Zeit sich bildende Verfestigung des Korngerüsts. Eine derartige Verfestigung des ungestörten Korngerüsts durch so genannte Phasenkontakte konnte experimentell nachgewiesen werden. Diese im Laufe der Zeit sich bildende Verfestigung äußerte sich in der Zunahme der Druck- und Zugfestigkeit. Die Zementierung kann bis zum 1,5-fachen der Festigkeit eines nicht-verfestigten Bodens betragen. Unter dem Rasterelektronenmikroskop konnten Verkittungen und Brückenbildungen innerhalb des Korngerüsts gezeigt werden. Die Zerstörung der Bindungen infolge Grundwasserwiederanstiegs ermöglicht

eine Kornumlagerung (Sackung). Initial für die Kornumlagerung kann schon eine geringfügige Änderung des Wassergehaltes sein. Sackungen eines verfestigten (ungestörten) Kippenbodens können bis zu doppelt so hoch ausfallen wie diejenigen eines nicht-verfestigten (gestörten) Bodens. Bei Untersuchungen von Kippenböden im Labor musste dieser Tatsache Rechnung getragen werden, da hier in der Regel nur nicht-verfestigter (gestörter) Boden zur Verfügung stand.

### **2.3 Wichtige Erkenntnisse der recherchierten Sackungs-Untersuchungen**

Bisher wurden Sackungsversuche hauptsächlich mit Lössböden oder an Kippenböden durchgeführt. Nur JAKY (1948), HELLWEG (1981), DIENER (1999), WICHTER & KÜGLER (2001) und in geringem Umfang, aber mit anderer Zielsetzung auch GARBRECHT (1978), haben bisher bedeutende Sackungsuntersuchungen mit nichtbindigen Böden vorgenommen. Die in Kapitel 2.2 beschriebenen Untersuchungen wurden, mit Ausnahme der Versuche von GARBRECHT (1978) und HELLWEG (1981), mit relativ kleinen Laborversuchgeräten durchgeführt bzw. basieren auf statistischen Auswertungen von Schadensfällen sowie großflächigen Setzungs- und Grundwasserspiegelmessungen. Insbesondere war es erst durch die Untersuchungen von HELLWEG (1981), Diener (1999) und WICHTER & KÜGLER (2001) möglich, die Vorgänge im Inneren der untersuchten Bodenproben sowie wirksamen Vertikalspannungen zu beobachten und zu erfassen. HELLWEG (1981) stellte fest, dass die Zusammendrückung über die Probenhöhe nicht linear ist, d.h. in den oberen Bereichen ist sie größer als in den unteren. Die Versuche ergaben die größten Setzungen und Sackungen für mittelsandigen Feinsand, geringere Werte für Kies-Sand-Gemische und die geringsten Werte für Mittelsand. Er kam durch seine Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass bei gleichen Einbau-Wassergehalten und Einbau-Dichten die Summe der Setzungen und Sackungen gleich ist, unabhängig von der Vertikalspannung. Bei den ebenfalls durchgeführten Kompressionsversuchen konnte das jedoch nicht festgestellt werden.

Um festzustellen, wie groß die Sackungen sind, wenn nichtbindige Böden nach einer Durchnässung austrocknen und anschließend ein weiteres Mal oder weitere Male geflutet werden, wurden von BLÜMEL (1977) Sackungsversuche ohne Auflasten mit normalen Labor-Kompressionsversuchsgeräten und einigen relativ gleichförmigen Böden aus dem Fein- bis Grobsandbereich durchgeführt.

Bei den erstmaligen Durchnässungen ergaben sich für die verschiedenen Böden maximale Sackungen von ca. 2 bis 3,5% der Ausgangshöhe. Nach der anschließenden Ofentrocknung in Anlehnung an DIN 18121 betrug die wiederholten Sackungen noch maximal rund 0,2 bis 0,5 % und nach einer weiteren Trocknung und nochmaliger Durchnässung rund 0,1%. Die Höchstwerte wurden jeweils bei sehr locker eingebauten Proben ermittelt. Diese angegebenen Größen sind wegen der kleineren Abmessungen der benutzten Versuchgeräte nur als Anhaltswerte zu betrachten. Sie liegen jedoch in der Größenordnung der von JAKY (1948) ermittelten Werte von ca. 10 % der ursprünglichen Sackung.

In der Natur kommt es jedoch praktisch nicht vor, dass alles Wasser infolge Austrocknung aus einem Boden entfernt wird. Aus diesem Grund sind die in den Vorversuchen ermittelten Werte für wiederholte Sackungen nach völliger Austrocknung für natürliche Verhältnisse als obere Grenzwerte anzusehen.

Nach DAVIDENKOFF (1964) und WICHTER & KÜGLER (2001) ist insbesondere in Deichen und Erddämmen die Kapillarität von großer Bedeutung. Auch in Lößgebieten ist sie von entscheidender Wichtigkeit, da hier kapillare Steighöhen von 10m und mehr erreicht werden. Infolge der Kapillarwirkung können entsprechende Sackungen infolge von Durchnässung entstehen.

Die Untersuchungen von DIENER (1999) ergaben, dass Sackungen prinzipiell so lange eintreten, wie das Wasser in der Probe ansteigt. Die Verformungen finden sowohl im Bereich der kapillaren Steighöhe als auch der freien Wasseroberfläche statt. Der Sackungsvorgang läuft im Allgemeinen gleichmäßig und kontinuierlich ab. In Abhängigkeit von Gefügeinhomogenitäten können sich Hohlräume über der Kapillarwasserzone ausbilden, die nachbrechen, sobald die freie Wasseroberfläche diese überflutet. Das relative Sackungsmaß  $i$  ist von folgenden

dimensionslosen Größen abhängig:  $i = i \left( I_{D,w,0}, \Pi_{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{Flut}}}{\sigma_z}, RK, U \right)$ . Hierbei sind  $I_{D,w,0}$

die Lagerungsdichte,  $\sigma_{\text{Flut}}$  die Spannung zu Flutungsbeginn,  $\sigma_z$  die Zugfestigkeit, RK der Rundungskoeffizient und U die Ungleichförmigkeitszahl.  $\Pi_{\sigma}$  stellt eine dimensionslose Größe dar, die dem  $\Pi$ -Theorem der Dimensionsanalyse entspricht. Weiterhin haben der Korndurchmesser und der Wassergehalt einen Einfluss. Beide Parameter gehen in die Berechnung der Zugfestigkeit  $\sigma_z$  ein.

Proben mit einem definierten Wassergehalt neigen gegenüber trockenem Material verstärkt zum Sacken. In Abhängigkeit von diesem bildet sich ein Maximum des relativen Sackungsmaßes aus. Bei Wassergehalten  $> 10\%$  tendiert das relative Sackungsverhalten gegen Null. Mit größer werdendem Rundungskoeffizienten bis  $RK > 0,82$  nimmt das relative Sackungsmaß linear zu. Für Materialien mit  $RK > 0,82$  nähert sich das relative Sackungsmaß dem maximalen Sackungsmaß bei  $RK = 1$  an.

Die Untersuchungen der oben genannten und verschiedener anderer Autoren (KÉZDI & EGRI 1963, SCHÄFFNER 1965, KINZE 1969, HALLBAUER 1981, DIENER 1999, WICHTER & KÜGLER 2001) führen zusammengefasst zu folgenden Ergebnissen:

- Sande sind nur in lockerer bis mitteldichter Lagerung sackungsfähig. Bei dicht gelagerten Sanden treten – wenn überhaupt – nur Sackungen in sehr geringem Umfang ein.
- Nichtbindiges Material (Feinkorn  $< 15\%$ ) neigt gegenüber bindigem Material (Feinkorn  $> 40\%$ ) eher zu Sackungen.
- Laborversuche ergaben, dass sich maximale Sackungen bei geringen Belastungen einstellen. Bei Spannungen, die größer sind als eine bestimmte kritische, treten nur noch geringe Sackungsbeträge ein.
- Die Summe aus Setzung und Sackung (Gesamtzusammendrückung) ist bei grobkörnigen Böden bei gleichen Einbauwassergehalten und Einbaulagerungsdichten unabhängig von der Vertikalspannung.
- Die oben genannten Autoren haben festgestellt, dass sich Sackungen innerhalb der ersten Minuten bei Grundwasseranstieg einstellen. Bei wiederholter Flutung treten nur noch geringe Sackungen auf (1/10 der Sackung bei erstmaliger Flutung).
- RETHATI (1963), SCHÄFFNER (1969) und ELDEMERY (1971) erkannten, dass auch der Korndurchmesser bzw. der Ungleichförmigkeitsgrad Einfluss auf das Sackungsmaß haben. Es wurde bemerkt, dass mit zunehmendem

Ungleichförmigkeitsgrad bzw. Korndurchmesser das Material weniger sackungsgefährdet ist.

- Es konnte weder anhand von Laborversuchen noch theoretisch eine Abhängigkeit des relativen Sackungsmaßes von der Flutungsgeschwindigkeit festgestellt werden.

Einen ersten, in eine Formel gefassten Lösungsansatz findet man bei EGRI (1969). Er schlug die Bestimmung des relativen Sackungsmaßes in Abhängigkeit von der Porenzahl  $e$  und der Sättigungszahl  $S_r$  gemäß folgender Gleichung vor:

$$i = (e - 0,54) \cdot (0,125 - 0,108 \cdot S_r - 0,107 \cdot S_r).$$

ELDEMERY (1971) bestimmte das relative Sackungsmaß auf der Grundlage von Scher- und Sackungsversuchen. Die Parameter  $m$  und  $k$  wurden mittels Regressionsanalyse bestimmt. Er stellte folgende Beziehung auf:

$$s' = m \cdot \tau + k.$$

$\tau$  entspricht der Scherspannung.

Einen Lösungsansatz neueren Datums bot HALLBAUER (1981). Der analytischen Auswertung seiner Versuche legte er eine Exponentialfunktion der Form

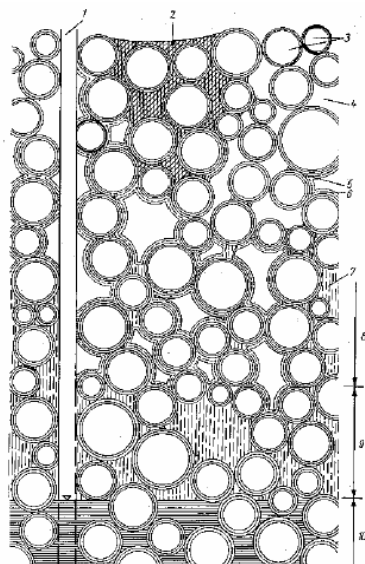
$$s'_{WA} = f(\sigma) = a \cdot e^{c \cdot \sigma} + b$$

zugrunde, wobei  $a$ ,  $b$  und  $c$  Funktionsparameter sind und  $\sigma$  die Spannung zu Flutungsbeginn. In den Ansätzen von ELDEMERY (1971) und HALLBAUER (1981) ist die fehlende Dimensionseinheit als Nachteil anzusehen.

## 2.4 Theoretische Betrachtungen von Sackungen

### 2.4.1 Einfluss des Wassers

Die Anwesenheit von Wasser im Porenraum zwischen den Mineralteilchen und gegebenenfalls den organischen Partikeln hat stets einen Einfluss auf die Stabilität der Lagerung (HARTGE & HORN 1999).



**Abb. 9:** Erscheinungsformen des Wassers im Boden (KÉZDI 1969).

1 Beobachtungsrohr, 2 Gravitationswasser, 3 mit hygroscopischem Wasser umhülltes Teilchen, 4 Wasserdampf, 5 Porenwinkelwasser, 6 Haftwasser, 7 Beobachtungsrohr.

offenes Kapillar, 8 Luft und Wasser, 9 geschlossener Kapillarwasserbereich und 10 Grundwasser

Das durch Menisken begrenzte Wasser übt eine kontrahierende Wirkung auf die Bodenmatrix aus. Im Fall zusammenhängender, bis zum freien Grundwasserspiegel reichender Wassersäulen, wirkt sich dies vor allem als Zug in Richtung auf die Grundwasseroberfläche aus. Das Wasser wirkt damit wie eine vertikale mechanische Kompression auf die Bodenmatrix. Die Folge ist eine Erhöhung der Normalspannungen und daher auch der mobilisierbaren Scherspannungen. Diese Wirkung wird noch ergänzt und in manchen Fällen weitaus überboten durch die von den Menisken ausgeübte Kontraktion auf jede Berührungsfläche, die allseitig wirksam ist. In diesem Zustand erhöht der Wasseranteil die Stabilität der gesamten Matrix (Abb. 9).

Wird die feste Phase zusammengepresst und damit die Kompression erhöht, verkleinert sich der Porenanteil, und das in ihm enthaltene Wasser muss sich neuen Platz suchen. Dies geschieht durch Formveränderung der Menisken und damit des auf ihrer Wasserseite herrschenden Drucks. In dem Augenblick, in dem sich die Menisken nach außen wölben, hört ihre kontrahierende Wirkung auf. Die Folge ist eine drastische Verminderung der Stabilität, die so lange anhält, bis sich die ursprüngliche Meniskenform durch Abfließen des überschüssigen Wassers wieder einstellt.

Bei bindigen Böden trägt infolge Kompression beim Erhöhen einer Last hier das Wasser plötzlich mit, weil es durch die Poren nicht schnell genug entweichen kann. Dies bedeutet eine erhebliche Stabilitätsabnahme.

#### **2.4.2 Wirkung der Kapillarität**

Die Kapillarität und damit die Wirkung von Haftkräften können in einem konsolidierten gemischtkörnigen Boden einen großen Einfluss auf die Lagerung der Körner haben. In Abhängigkeit vom Anfangs- bzw. Einbauwassergehalt kommt es zur Entstehung von Kapillarkräften, welche eine Gefügestabilisierung bewirken. Ein Wasseranstieg stört durch Aufheben der Flüssigkeitsbrücken das Kräftegleichgewicht des Bodens; es kommt zu Sackungen. Da Kapillarkräfte durch Oberflächen- bzw. Grenzflächenspannungen hervorgerufen werden, haben sie einen großen Einfluss auf das Sackungsmaß bedingt durch Grundwasseranstieg (DIENER 1999, HARTGE & HORN 1999).

Die Kapillarkräfte gehören zu den Haftkräften. Diese können zwischen den einzelnen Körnern im Boden zum einen durch Festkörperbrücken und zum anderen durch Grenzflächenkräfte an frei beweglichen Flüssigkeitsflächen entstehen (HARTGE & HORN 1999).

Festkörperbrücken können sich nach RUMPF (1958) bilden durch:

1. Sinterung, Rekristallisation und Kornwachstum (Diffusion von Molekülen an den Berührungsstellen infolge thermischer Beweglichkeit).
2. Chemische Reaktionen.
3. Schmelzhaftung für Stoffe mit niedriger Schmelztemperatur.
4. Erhärtende Bindemittel.
5. Auskristallisation gelöster Stoffe.

Grenzflächenkräfte und kapillare Haftkräfte zeigen sich in:

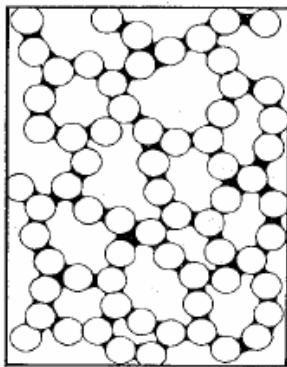


1. Flüssigkeitsbrücken zwischen den einzelnen Körnern.
2. Kapillarkräfte an der Oberfläche flüssigkeitsgefüllter Lockergesteine.
3. Oberflächenspannungen an Grenzflächen.

Weiterhin zählen zu den Haftkräften die Anziehungskräfte zwischen den Feststoffteilchen (van der Waalsche-Kräfte, elektrostatische Kräfte). Während die van der Waalschen Kräfte hauptsächlich im feinkörnigen Bereich (Schluff und Ton) eine große Rolle spielen, sind Festkörperbrücken und kapillare Haftkräfte in Sanden und Kiesen gegenüber den Anziehungskräften dominant (HARTGE & HORN 1999).

### 2.4.3 Wirkung der Oberflächenspannung

Wie in Kapitel 2.4.1 dargestellt, bewirkt die Oberflächenspannung das Aneinanderhaften von Einzelkörnern in rolligen Böden mit drei Phasen (Abb. 10).

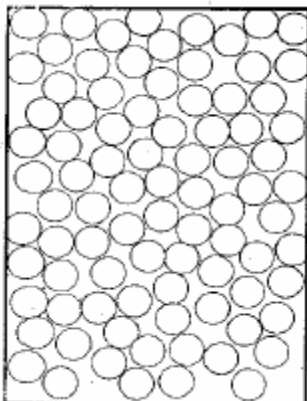


**Abb. 10:** Struktur eines erdfeuchten, rolligen Lockergesteins (KÉZDI 1969).

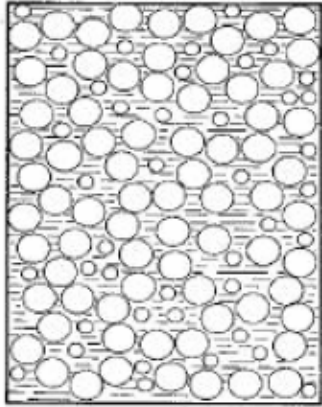
Der Boden besteht aus den drei Komponenten Feststoff, Flüssigkeit (i.d.R. Wasser) und Gas (i.d.R. Luft). Der größte Teil des Porenraums zwischen den Einzelkörnern ist mit Luft gefüllt, während Wasser lediglich in den Zwickeln der Kornberührungspunkte vorhanden ist.

Die Oberflächenspannung des Porenzwickelwassers bewirkt einen zusätzlichen Zusammenhalt der Körner, die so genannte scheinbare Kohäsion.

Um den Berührungspunkt (Abb. 10) befindet sich Wasser. Der Meniskus berührt die Kugeloberfläche, entlang dieser Berührungslinie kommt die Oberflächenspannung zur Geltung. Zwischen den Körnern tritt Adhäsion auf, wodurch z.B. ein Sand Zug- und Druckfestigkeit erhält. Werden die Poren vollständig mit Wasser gefüllt oder trocknet der Sand aus, dann verschwinden die Menisken und diese Kraft hört auf zu wirken (Abb. 11 u. 12).



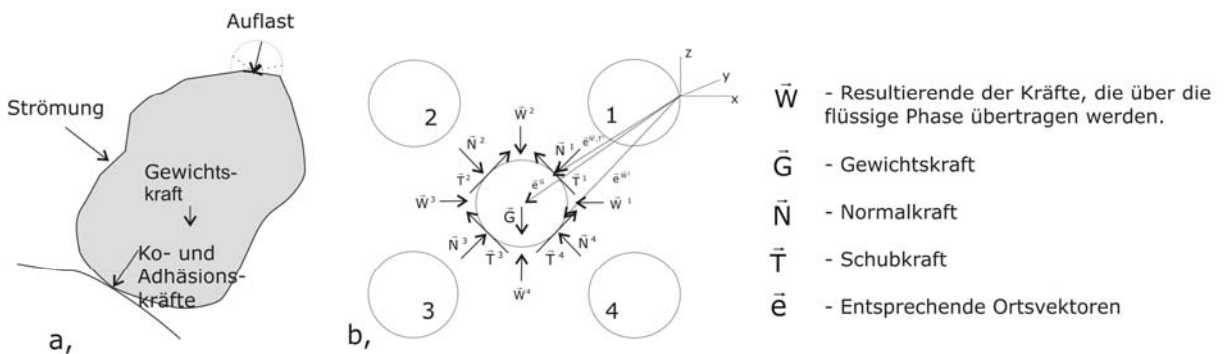
**Abb. 11:** Boden mit luftgefülltem Porenraum. Der Boden besteht lediglich aus zwei Komponenten: Feststoff und Luft oder Feststoff und Wasser. Der Zusammenhalt des Bodens wird nur durch die Normal- und Scherkräfte zwischen den Einzelkörnern hergestellt (KÉZDI 1969).



**Abb. 12:** Boden mit wassergefülltem Porenraum. Ist der Porenraum zum größten Teil mit Wasser gefüllt, verschwindet die scheinbare Kohäsion. Eine dichtere Lagerung der Körner stellt sich ein. Dieser Vorgang wird als „Sackung“ bezeichnet (KÉZDI 1969).

#### 2.4.4 Sackungsmechanismen und -ursachen

Um die Ursache und den Mechanismus von Sackungen klären zu können, ist es sinnvoll, als erstes die in einem rolligen Boden wirkenden Kräfte zu betrachten. Nach HARTGE & HORN (1999) wirken an einem Korn vier verschiedene Kräftegruppen. Dabei handelt es sich jeweils um Vektoren. Diese sind in Abb. 13 a und b schematisch dargestellt.



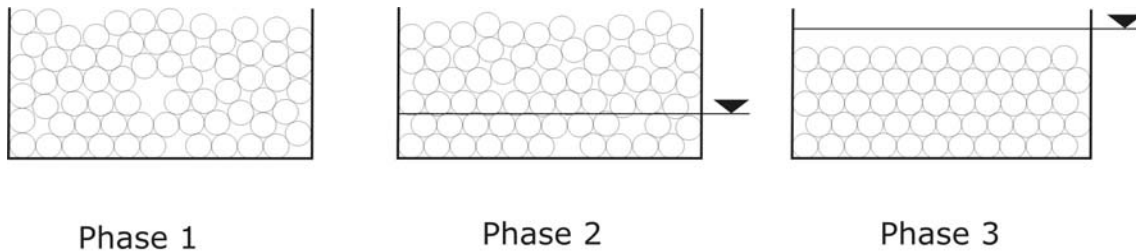
**Abb. 13 a und b:** Schema der auf ein Bodenteilchen bzw. ein Aggregat einwirkende Kräfte: a, bildliche Darstellung der wirkenden Kräfte; b, vektorielle Darstellung (DIENER 1999; HARTGE & HORN 1999).

Der Vektor der Normalkraft  $\vec{N}$  wirkt stets senkrecht zu seiner Berührungsfläche und kann je nach Lage der einzelnen Körner aus verschiedenen Richtungen angreifen. Zwischen den einzelnen Körnern wirkt an jeder Berührungsstelle ein Reibungswiderstand. Er verhindert die Bewegung der Körner. Erst wenn der Vektor der Schubkraft  $\vec{T}$  größer als der Reibungswiderstand wird, tritt eine Verschiebung der Körner relativ zueinander ein. Der Vektor der Gewichtskraft  $\vec{G}$  greift im Massenschwerpunkt des Teilchens an und wirkt in vertikaler Richtung. Ähnlich wie die Normalkraft kann auch die Wasserkraft  $\vec{W}$  aus verschiedenen Richtungen an dem betrachteten Korn angreifen. Sie ist die Resultierende der Kräfte, die über die flüssige Phase übertragen werden.

Der Sackungsvorgang lässt sich nach DIENER (1999) in drei Phasen einteilen (Abb. 14):

Phase 1: Gleichgewichtszustand vor der eigentlichen Sackung.

- Phase 2: Störung des Gleichgewichtszustandes durch äußere Einflüsse (Grundwasserwiederanstieg).
- Phase 3: Ausbildung eines neuen Gleichgewichtszustandes nach beendetem Grundwasserwiederanstieg unter Bildung einer dichteren Lagerung.



**Abb. 14:** Schematische Darstellung der drei Phasen einer Sackung (nach DIENER 1999).

Es wird angenommen, dass die wirkende Auflast während des Sackungsvorgangs konstant bleibt und sich das Gewicht (Gewichtskraft) der Körner nicht ändert. Die Ermittlung der tatsächlich wirkenden Reibungs- und Normalkräfte in einem Boden ist nach HARTGE & HORN (1999) nicht möglich, da die Größe und Richtung der Haftreibungskraft nicht bestimmt werden kann. Erst wenn Bewegung eintritt, bekommt die Reibungskraft eine bestimmte Richtung und kann nach Formel 2-4 bestimmt werden.

Phase 1:

Ein gewachsener Boden weist einen stabilen Gleichgewichtszustand auf und die einzelnen Körner haben eine bestimmte Lagerungsdichte. Die Summe der an jedem Korn angreifenden resultierenden Kräfte und Momente ist gleich Null. Zusätzlich muss der Vektor eines möglichen Reibungswiderstandes größer oder aber mindestens gleich dem wirkenden Schub sein können. Die Gleichgewichtsbedingungen sind nach den Formeln 2-1 und 2-2 zusammengefasst.

Bei trockenem Material wird der Gleichgewichtszustand bzw. die Art der Lagerung hauptsächlich durch den die Reibungskraft beeinflussenden Reibungswinkel  $\bar{\varphi}$  (Reibungswinkel zwischen zwei Körnern) bestimmt. In Abhängigkeit von diesem kann für jedes Korn p der Vektor der Schubkraft  $\vec{T}$  berechnet werden, den das Korn aufzunehmen vermag:

$$\vec{T} \leq \vec{N}^p \cdot \tan \bar{\varphi} + c^p \quad (2-1)$$

Dabei ist zu beachten, dass sich der Vektor der Normalkraft wie folgt zusammensetzt:

$$\vec{N}^p = \vec{N}_0^p + \vec{H}^p \quad (2-2)$$

$\vec{N}_0^p$  ist dabei der Vektor der Normalkraft im trockenen Zustand und  $\vec{H}^p$  der Vektor der Haftkraft, der durch Flüssigkeitsbrücken hervorgerufen wird, sobald der Boden einen Wassergehalt besitzt.

Die für die Ausbildung eines Gleichgewichtszustandes notwendigen Bedingungen sind für ein Korn  $p$  in den Formeln 2-3 und 2-4 zusammengefasst:

$$\vec{G} + \sum_{p=1}^k \vec{N}^p + \sum_{p=1}^k \vec{T}^p + \sum_{p=1}^k \vec{W}^p = 0 \quad (2-3)$$

und

$$\vec{e} \cdot \vec{G} + \sum_{p=1}^k \vec{e}^{\vec{N}, \vec{T}, p} \cdot (\vec{N}^p + \vec{T}^p) + \sum_{p=1}^k \vec{e}^{\vec{W}, p} \cdot \vec{W}^p = 0. \quad (2-4)$$

Hierin bedeuten  $k$  die Koordinationszahl und  $m$  die Anzahl der wirksamen Porenkanäle.  $\vec{e}$  ist der jeweilige Ortsvektor, ausgehend von dem Bezugssystem  $(x, y, z)$ .

Besitzt der Boden einen definierten Anfangswassergehalt, so nimmt statt dem Reibungswinkel im trockenen Zustand (Reibung zwischen zwei Körnern) der Reibungswinkel der Körner bei Anwesenheit von Wasser eine wesentliche Rolle bei der Charakterisierung des Gleichgewichtszustandes ein. Zusätzlich zu der Normalkraft im trockenen Zustand gewinnt die kapillare Haftkraft der Flüssigkeitsbrücke für die Gefügestabilisierung eine Rolle. Es kann sich ein Gefüge mit einer lockereren Lagerung als im trockenen Zustand einstellen.

Bei sehr eckigen oder rauen Körnern ist es durchaus möglich, dass die Rauigkeitsspitzen den Wasserfilm bzw. die Flüssigkeitsbrücken „durchstoßen“. In diesem Fall bleibt die Reibung der Körner untereinander voll wirksam und ist damit die wesentliche Größe bei der Ausbildung des Gleichgewichtszustandes.

Phase 2:

Wirkt auf die in Phase 1 im Gleichgewicht befindlichen Körner eine zusätzliche Kraft oder Einflussgröße, so wird dieses gestört. Das System befindet sich in einem Ungleichgewicht und es treten Kornverschiebungen, d.h. Sackungen auf.

Für den trockenen Boden bedeutet dies, dass die Reibung durch Wasser herabgesetzt wird und die mobilisierende Reibungskraft nicht ausreicht, den Gleichgewichtszustand aufrecht zu erhalten. Durch die Verminderung der aufnehmbaren Schubkraft wird auch die Summe der Kräfte und Momente ungleich Null. Damit ist keine der Gleichgewichtsbedingungen erfüllt. Zusätzlich hat der Wasseranstieg einen gewissen Einfluss auf die Kohäsion. Mögliche Festkörperbrücken, wie z.B. Zemente, können aufgelöst bzw. ihre kohäsive Wirkungen können herabgesetzt werden.

Bei Böden mit einem definierten Anfangswassergehalt werden durch den Wasseranstieg die kapillaren Haftkräfte und damit die wirkenden Normalkräfte verringert. Die Gleichgewichtsbedingungen des Systems sind nicht mehr erfüllt. Es kommt zu Kornumlagerungen. Dabei ist es unwesentlich, ob die Zunahme der Sättigungszahl durch Kapillarwasser oder den Anstieg des freien Grundwasserspiegels verursacht wird.

Phase 3:

Die Kornbewegungen finden bis zur Ausbildung eines neuen Gleichgewichtszustandes statt. Sobald der neue Gleichgewichtszustand erreicht ist treten keine Sackungen mehr auf. Die Folge ist eine Erhöhung der Lagerungsdichte.

Aus diesen Betrachtungen kann geschlossen werden, dass Sackungen immer dann auftreten, wenn der sich im Gleichgewicht befindende Boden durch Erhöhung der Sättigungszahl gestört wird.

Es erscheint durchaus möglich, dass bestimmte Erdstoffe, die ein großes Gewicht besitzen (Steine) und eine große Rauigkeit aufweisen, ausgehend vom trockenen Zustand, größere Sackungen erleiden als bei einem Anfangswassergehalt. Hier muss davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der Gewichtskraft und des Reibungswiderstands (Kornrauigkeit) den einer Flüssigkeitsbrücke übertreffen. Das unterscheidet die Ergebnisse von KINZE (1969).

Bei Erdstoffen mit geringem Korngewicht kann die kapillare Haftkraft voll zur Wirkung kommen, und ist damit die das Gleichgewicht bestimmende Größe. Es können sich lockerere Lagerungen als im trockenen Zustand ausbilden. Maximale Sackungen sind damit für diese Lockergesteine bei einem spezifischen Anfangswassergehalt zu erwarten.

Bei einem gleichmäßigen und genügend langsamen Wasseranstieg liegt keine Abhängigkeit des relativen Sackungsmaßes von der Wiederanstiegsgeschwindigkeit vor.

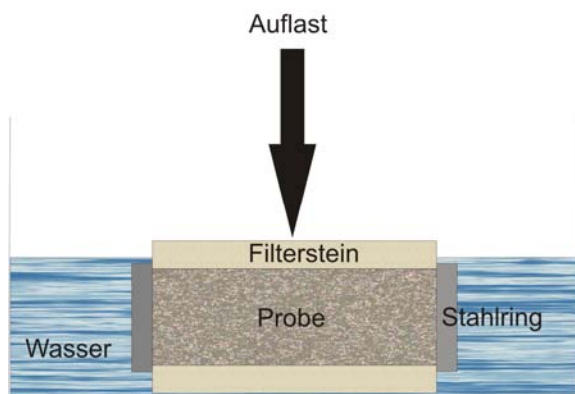
### 3 Angewandte Untersuchungsmethoden

In diesem Kapitel werden nur die Untersuchungsmethoden näher beschrieben, bei denen von der gängigen Versuchsdurchführung abgewichen wurde. Die im folgenden aufgeführten bodenmechanischen Standardversuche wurden gemäß den DIN-Vorschriften durchgeführt und werden daher nicht extra beschrieben:

- Siebung nach DIN 18 123-4
- Schlämmanalyse nach DIN 18 123-5
- Korndichte nach DIN 18124
- Glühverlust nach DIN 18128

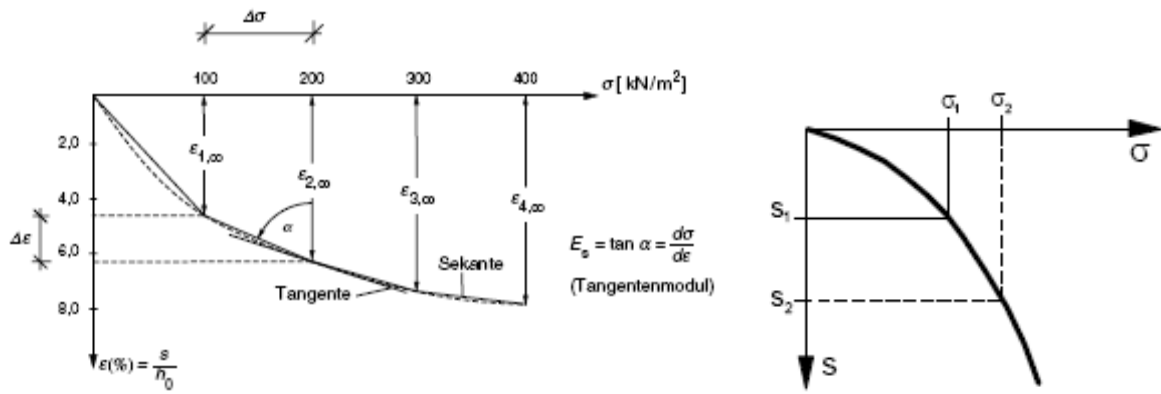
#### 3.1 Eindimensionaler Kompressionsversuch (Ödometer-Versuch)

Im Labor wird der Kompressionsversuch (Ödometer-Versuch) nach dem Entwurf der DIN 18135 verwendet, um die Zusammendrückbarkeit eines Bodens unter vertikaler Spannung und verhinderter Seitendehnung zu ermitteln. Aus diesem Versuch lässt sich der Steifemodul, die Verdichtungszahl, der Kompressionsbeiwert, Verdichtungsbeiwert, Schwellbeiwert und der Rekompansionsbeiwert bestimmen. Wenn zusätzlich der zeitliche Verlauf der Setzung während einer Laststufe aufgezeichnet wird, können weiterhin der Kriechbeiwert und der Konsolidationsbeiwert bestimmt werden. Die Durchlässigkeit des Bodens kann ebenfalls abgeleitet werden.



**Abb. 15:** Schema einer Ödometerzelle mit freischwebendem Ring.

Die Probe wird mit einem Metallring aus einer Sonderprobe herausgeschnitten oder mit einer bestimmten Lagerungsdichte bzw. Konsistenz in einen Metallring eingebaut. An den plan bearbeiteten Endflächen der Probe liegen Filterplatten zur Ableitung des Porenwassers an (Abb. 15). Im Kompressionsgerät oder Ödometer wird die zylindrische Bodenprobe mit einem Durchmesser von 70 mm und einer Höhe von 20 mm in axialer Richtung stufenweise belastet und/oder entlastet, wobei in jeder Laststufe das Abklingen der Primärsetzungen abgewartet werden muss. Die vertikale Verformung der Probe wird gemessen. Bei Entlastung der Probe wird die Hebung der Probe protokolliert. Die gemessenen Verformungen und die dazugehörigen wirksamen Spannungen werden im Druck-Setzungs-Diagramm oder Druck-Porenzahl-Diagramm (Abb. 16 a und b) dargestellt.



**Abb. 16 a und b:** a, Druck-Porenzahl-Diagramm (links). b, Drucksetzungsdiagramm (rechts).

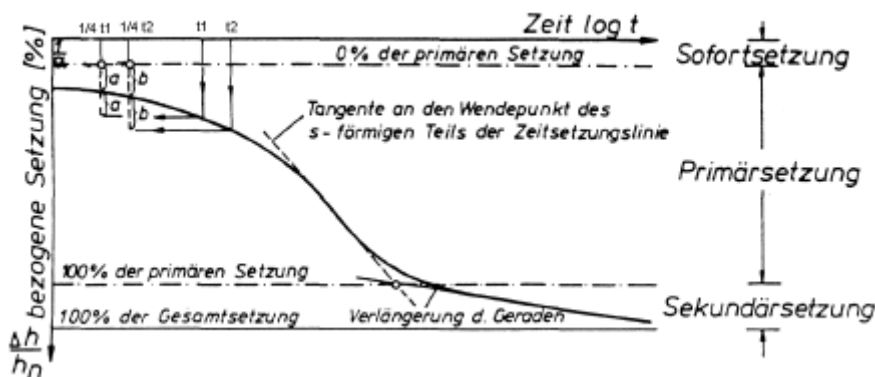
Die Tangentensteigung der jeweiligen Drucksetzungskurve wird Steifemodul genannt (Abb. 16a). Aus dem Drucksetzungsdiagramm kann der Steifemodul

mittels der Sekante nach  $E_s = \tan \alpha = \frac{\Delta \sigma}{\Delta S}$  ermittelt werden (Abb. 16b). Aus dem

Verlauf der Druckporenzahlkurve werden Kompressionsbeiwert und Schwellbeiwert ermittelt.

Die Drucksetzungslinien und Druckporenzifferlinien geben die eindimensionale Formänderung unter einer vertikalen Last bei eindimensionaler Entwässerung. Mit dem Steifemodul werden Setzungen von Bauwerken berechnet. Der zeitliche Verlauf der Setzungen kann mit der Zeit-Setzungs-Linie rechnerisch abgeschätzt werden. Die Gesamtsetzung (Abb. 17) setzt sich zusammen aus:

- Sofortsetzung (unverzögliche Setzung)
- Primärsetzung (zeitabhängige Setzung), bedingt durch Konsolidation
- Sekundärsetzung (Kriechsetzung)



**Abb. 17:** Setzungsanteile (SCHULTZE & MUHS 1967).

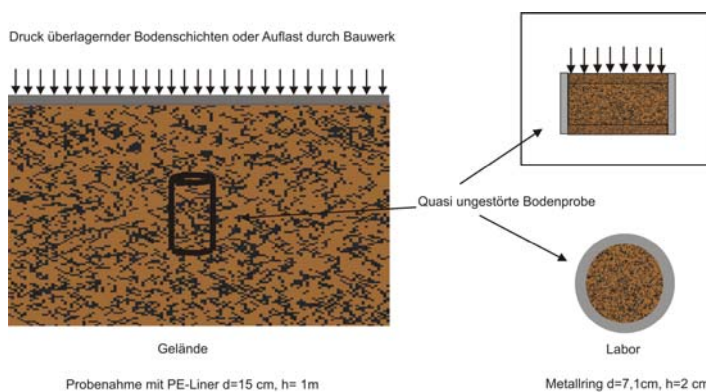
Beim Normalversuch ist die Probe hierbei durch die starren Wände des Gerätes am seitlichen Ausweichen gehindert und wird infolgedessen während des Versuchs verdichtet (Abb. 16). Der Versuch wird deshalb als „Druckversuch mit behinderter Seitenausdehnung“ oder kurz als „Kompressionsversuch“ bezeichnet. Durch ihn wird die Zusammendrückbarkeit des Bodens untersucht und die „Steifezahl bei behinderter Ausdehnung  $E_s$ “ ermittelt, die gewöhnlich der Steifezahl des Bodens im Untergrund gleichgesetzt wird und dazu dient, die in ihm bei einer Belastung durch ein Bauwerk auftretenden Formänderungen, vor

allein die in senkrechter Richtung verlaufenden Setzungen, zu berechnen. Bei diesen handelt es sich in ganz überwiegendem Maße um nicht elastische Formänderungen, für deren Ermittlung mit Annahme der Sofortsetzung die Kenntnis des Elastizitätsmoduls des Bodens im Allgemeinen nicht erforderlich ist. Die bei der Druckbelastung eines Bodens auftretenden Erscheinungen sind sehr verschieden, je nachdem, ob es sich um einen bindigen oder nichtbindigen Boden handelt. In beiden Fällen ist eine elastische Zusammendrückung vorhanden, die normalerweise vernachlässigt werden kann. Beherrschend für die durch die Belastung ausgelösten Formänderungsvorgänge ist die infolge des verhältnismäßig großen Hohlraumes im Boden vorhandene starke Neigung der einzelnen Bodenkörner, in eine neue Lage zu kommen. Hierbei verhalten sich bindige und nichtbindige Böden verschieden (SCHULTZE & MUHS 1967).

In einem nichtbindigen Boden stützen sich die einzelnen harten Quarz-, Kalk- oder Feldspatkörner zum Teil starr gegeneinander ab. Sofern instabile Abstützungen vorhanden sind, fallen sie bei dem Aufbringen der Belastung zusammen, und kleinere, dadurch frei werdende Körner fallen in die Hohlräume zwischen den größeren Körnern. Das eigentlich tragende Korngerüst aber bleibt davon ziemlich unbeeinflusst, es sei denn, die Lagerung ist sehr locker oder die Belastung sehr hoch. Sonst liefern der verhältnismäßig große Reibungsbeiwert des Sandes und die in den Berührungspunkten vorhandenen Normaldrücke einen genügenden Reibungswiderstand, um zu große Verschiebungen und eine umwälzende Umlagerung der Körner im Sinne einer wirklich hohlraumarmen Lagerung zu verhindern. Eine solche kann nur bei einer dynamischen Belastung eintreten. Bei rein statischer Belastung aber ist nichtbindiger Boden gewöhnlich wenig zusammendrückbar und nicht setzungsempfindlich. Dies wird normalerweise durch die Gegenwart von Wasser nicht geändert (SCHULTZE & MUHS 1967).

### 3.1.1 Probennahme und -vorbereitung für KD-Versuche

Die Probennahme im Gelände erfolgte mittels Liner-Bohrungen (PE-Liner mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Länge von 1m). Dies ermöglichte eine weitestgehend ungestörte Probennahme, so dass zumindest der Kornverband nicht sehr verändert wurde, sondern maximal eine Veränderung des Korngerüsts bedingt durch das Bohrverfahren zu berücksichtigen ist. Zur Erlangung reproduzierbarer Ergebnisse, stellten sich aus Liner-Bohrungen gewonnene Proben als am besten geeignet heraus.



**Abb. 18:** Schematisierte Darstellung der Probennahme in Gelände und Labor.

Im Labor wurden die Liner an den gewünschten Stellen zersägt, um mit dem Stahlring des Drucksetzungsgerätes eine Probe auszustechen (Abb. 18). Nach dem Einbau der Probe in die Ödometerzelle, wurde sie anschließend mit



Stickstoff ohne Verwirbelungen durchströmt und getrocknet, so dass der gewünschte Einbauwassergehalt ohne weitere Veränderungen des Probenmaterials eingestellt werden konnte.



**Abb. 19:** Vorbereitete ungestörte Probe des Oberen Bitterfelder Glimmersands für KD-Versuch.

Die nichtbindigen und schwach bindigen Proben wurden mit Hilfe des Ringes direkt aus dem Liner ausgestochen. Um zu verhindern, dass die Proben aus dem Ring rutschen, wurde die Probe nach dem Abschneiden direkt auf eine umgedrehte Petrischale aus Glas geschoben. Die Probenoberfläche wurde anschließend bis zur Ringoberkante mit einem scharfen Messer eben abgearbeitet. Danach wurde die Probe durch Drehen auf eine zweite Petrischale aus Glas gelegt, um die andere Seite ebenfalls plan zu arbeiten (Abb. 19). Beim Einbau in die Ödometerzelle wurde darauf geachtet, dass die Filterplatten der Ödometerzelle den gleichen Wassergehalt aufwiesen wie der Probenkörper. Zwischen Probenkörper und Filterplatte befindet sich noch ein Filterpapier, das ein Eindringen von feineren Bodenteilchen in die Filtersteine verhindert.

Um den gewünschten Einbauwassergehalt zu erhalten, wurde die Ödometerzelle bei gleichmäßigem Druck mit gasförmigem Stickstoff mit einer Flussrate von ungefähr 14 ml/s durchströmt. Dabei wurde in Vorversuchen darauf geachtet, dass Feinanteile bei zunehmendem Trocknen der Probe durch den Stickstoffstrom nicht verlagert werden. Nach dem Einstellen des gewünschten Einbauwassergehaltes wurde die Probe in das Ödometer eingebaut. Die ersten Versuche mit einem feinsandigen Mittelsand wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Um alle Temperatureinflüsse auszuschalten und realitätsnahe Grundwassertemperaturen zu simulieren, wurde die komplette Apparatur bei durchschnittlich 10°C ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) temperiert.

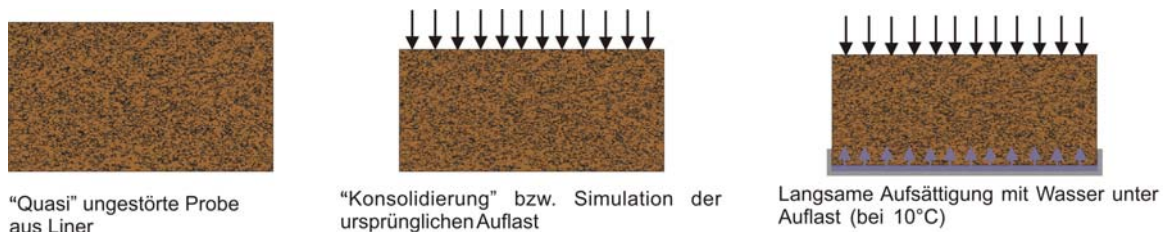


**Abb. 20:** Temperierte KD-Versuchsanordnung.

Dazu wurde das Ödometer in einen Kühlschrank mit entsprechender Kühlleistung gestellt (Abb. 20). Damit sich die Vibrationen des Kühlschrankkompressors nicht auf den Innenraum übertragen und somit die Versuche beeinflussen könnten, wurde der Kompressor ausreichend vom Gehäuse entkoppelt und gedämpft. In Vorversuchen wurde kein Einfluss der Vibrationen auf die Messungen festgestellt.

### 3.1.1.1 Versuchsdurchführung

Die experimentelle Untersuchung des Sackungsverhaltens wurde im kleinmaßstäblichen Versuch durchgeführt (Abb. 21). Die Methode wurde in Anlehnung an die Untersuchungen von KÉZDI (1969) und HELLWEG (1981) modifiziert. Für die Versuche wurden die Proben in ein Drucksetzungsgerät mit schwebendem Ring eingebaut, über eine Belastungseinrichtung wurde die Belastung eingestellt, die der Teufe der Probe im Gelände entsprach. Die Belastung wurde so lange aufrechterhalten, bis keine Setzungen mehr zu beobachten waren. Die Drucksetzungsversuche wurden, um Vergleiche ziehen zu können, so durchgeführt, dass die Aufsättigung der Probe erst nach Abklingen der Setzungen erfolgte, die durch die statische Belastung vorher verursacht wurden. Die Flutung erfolgte kontinuierlich mit ca. 1,6 mm/h bis zur vollständigen Sättigung der Probe unter Belastung.



**Abb. 21:** Schematisierte Versuchsdurchführung mit dem Ödometer.

### **3.2 Rasterelektronenmikroskopie mit energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (REM/EDX) und Kryo-REM**

Die Mikrogefüge-Analyse der trockenen Proben wurde mittels Rasterelektronenmikroskop mit energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (EDX) durchgeführt.

Das EDX-System erlaubt eine qualitative chemische Analyse ebenso wie eine semi-quantitative Analyse. Die quantitative Analyse leichter Elemente erfordert allerdings den Einsatz von Eichproben. Punktanalysen von Probendetails, Fremdpartikeln und Einschlüssen können ab ca.  $1 \mu\text{m}^3$  Größe erstellt werden. Daneben kann die Elementeverteilung entlang einer vorgegebenen Linie (Linescan) oder auf einer vorgegebenen Fläche (Mapping) dargestellt werden (GOLDSTEIN 1975).

Ein besonderes Problem stellt die Vermeidung von Strukturveränderungen bei der Präparation wasserhaltiger Proben dar. Mit einem konventionellen REM können nur absolut trockene Präparate bearbeitet werden, weil ansonsten nicht das erforderliche Hochvakuum (ca.  $5 \times 10^{-5}$  mbar) erreicht wird. Eine Trocknung führt jedoch zu Artefakten und ist daher für mikro-strukturelle Untersuchungen von bergfeuchten, nichtbindigen Lockermaterialien ungeeignet.

Beim Kryotransfer-Verfahren wird das in der Probe enthaltene Wasser nach dem Schockgefrieren und dem Gefrierbruch durch ständiges Tiefkühlen der Probe erhalten. In diesem Zustand wird das Präparat beschichtet und anschließend unter Vakuum auf einen Kühltisch in das REM überführt.

Ein Vorteil ist, dass mit Hilfe des EDX-Systems die Zusammensetzung der gefrorenen Fluide bestimmt werden kann. Der Nachteil ist, dass Kryotransferproben nicht als Dauerpräparat geeignet sind.

Um wasserhaltige bzw. biologische und/oder zähflüssige Proben naturnah zu untersuchen, ist eine gezielte Anwendung von Kryo-Präparationstechniken unumgänglich.

Zur quantitativen Analyse der Partikelanordnung bzw. der inneren Struktur einer wässrigen Suspension oder einer feuchten Probe wird ein kryogenes Raster-Elektronenmikroskop (Kryo-REM) verwendet. Üblicherweise werden solche Geräte für biologische Fragestellungen und in der Lebensmittel-Verfahrenstechnik eingesetzt. Die Anwendung auf feuchte, rollige Lockergesteinsproben stellt ein neues Einsatzgebiet dar, so dass im folgenden auf die Kryo-REM Technik und Präparation von rolligen Lockergesteinsproben eingegangen wird.

#### **3.2.1 Kryo-REM Präparation**

Die Kryo-Fixierung erfordert ein separates Probenstück. Durch den sogenannten „Kryoschock“ werden sämtliche Probenbestandteile, einschließlich Feuchtigkeit, Salze bzw. Salzlösung, in ihrer Form und Lage fixiert („Einfrieren der Dynamik“). Hierzu wird beim Evakuieren in einem Rezipienten flüssiger Stickstoff durch den Entzug von Verdampfungswärme eingefroren. Das Gemisch von festem und flüssigem Stickstoff, auch „Stickstoff-slush“ genannt, besitzt die Temperatur von schmelzendem Stickstoff ( $-210,5^\circ\text{C}$ ).

Die zu fixierenden Probenstücke (max.  $0,5 \text{ cm}^3$ ) werden mit einem speziellen Kältekleber auf einem Kryo-Probenhalter befestigt und sofort nach der Öffnung des Rezipienten in den schmelzenden Stickstoff getaucht (Kryoschock). Die mit der Probe zugeführte Wärme wird zunächst zum Schmelzen der Stickstoffkristalle verbraucht, bevor es zum Verdampfen des Stickstoffs kommt. Auf diese Weise wird das Leidenfrost'sche Phänomen, die Bildung einer isolierenden Gashülle um die Probe, vermieden.

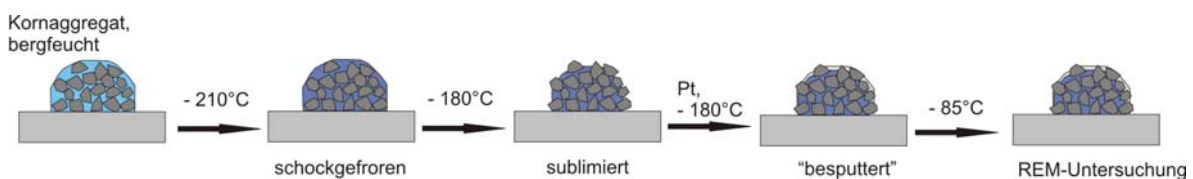
Die schockgefrorene Probe wird über eine Schleuse in eine auf  $-150\text{ °C}$  gekühlte, evakuierte Präparationskammer transferiert. Dort besteht die Möglichkeit, die Probe zu brechen, um Strukturinformation sowohl von der Probenoberfläche als auch dem Probeninneren zu erhalten. Nach der Präparation, die nach wenigen Minuten abgeschlossen ist, wird die vollständig gefrorene Probe über eine Vakuumschleuse auf einen Kühl-/ Heiztisch in das REM transferiert. Dort erfolgt zur Kontrastierung eine Sublimation des Oberflächenwassers bei  $-95\text{ °C}$  bis  $-85\text{ °C}$ . Dieser Sublimationsprozess wird im REM visuell kontrolliert und ist nach ca. 10 bis 20 Minuten abgeschlossen. Die an der Oberfläche partiell gefriergetrocknete Probe wird dann zurück in die Präparationskammer befördert und dort zur Vermeidung von Aufladungseffekten bei  $-180\text{ °C}$  mit Gold oder Platin beschichtet. Die Probe ist nun fertig präpariert und kann bei  $-180\text{ °C}$  im Kryo-REM betrachtet werden.

Zur Durchführung der Kryo-REM Untersuchungen wurde ein LEO 1530 VP Gemini REM mit einem angeflanschten Kryo-System (ALTO 2100, Gatan) am Zentrum für Werkstoffanalytik Lauf (ZWL) verwendet.

### 3.2.1.1.1 Probenvorbereitung und -präparation für Kryo-REM-Untersuchungen

Die bergfeuchte Probe aus dem Liner wurde mit einem Kälte-Kleber auf dem Probenhalter befestigt, in flüssigen Stickstoff getaucht und in die auf  $-150\text{ °C}$  gekühlte Präparationskammer des Kryo-Transfersystems überführt. Auf dem Heiztisch des REM wurde die Probe bei  $20\text{ Pa}$  und  $-85\text{ °C}$  ca. 13 Minuten sublimiert. Danach wurde sie in der Präparationskammer ca. 190 Sekunden mit Platin beschichtet und dann zur Untersuchung wieder in das REM transferiert.

Die trockenen Proben aus dem KD-Versuch wurden vor der Befestigung auf dem Probenhalter mit einem kleinen Tropfen destillierten Wassers befeuchtet, dann in kleinere Aggregate geteilt und auf den Probenhalter geklebt. Die Sublimation der Probe erfolgte bei  $16\text{ Pa}$  auf  $-85\text{ °C}$  für eine Dauer von 9 Minuten. Für die REM-Untersuchung wurde die Probe anschließend 160 Sekunden mit Platin beschichtet („besputtert“) (Abb. 22).



**Abb. 22:** Kryo-REM Präparationsprozess zur Visualisierung von bergfeuchten, Lockergesteinsprobenstrukturen.

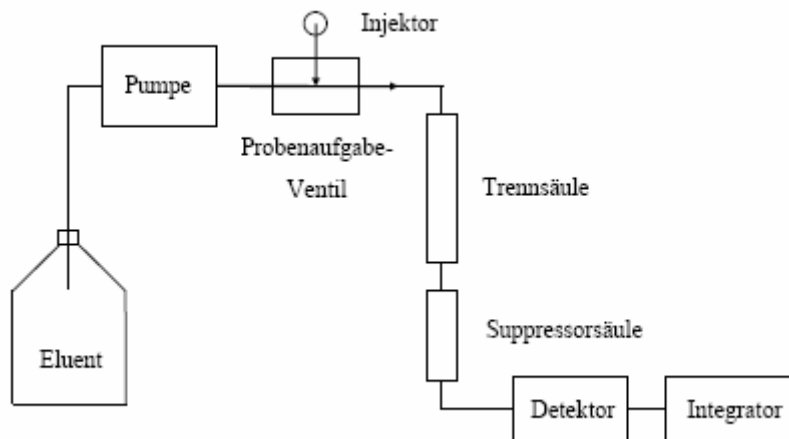
## 3.3 Ionenchromatographie (IC)

Um Aussagen über den Gehalt an Gips und eventuell anderen Salzen zu erhalten, wurde die Ionenchromatographie gewählt. Hier können die Anionen und Kationen in wässrigen Lösungen bestimmt werden.

Die Ionenchromatographie (IC) ist ein Online-Verfahren zur Trennung und Detektion von Ionen mit Hilfe der Ionenaustauschchromatographie. Diese Analysemethode wird bevorzugt als Routinemethode zur Bestimmung von Anionen in Wässern verwendet (WEIß 2001).

Die Trennung der Analytionen erfolgt an einem Ionenaustauscher aufgrund unterschiedlicher elektrostatischer Wechselwirkungen. Das Ionenaustauschermaterial besteht aus einer Trägersubstanz (meist wird Kieselgel

oder ein Polystyrol-Divinylbenzol-Copolymer eingesetzt), an der funktionelle Gruppen gebunden sind, die den Ionenaustausch bewirken. Zur Bestimmung wird die Analytlösung zunächst über eine Probenschleife auf die Trennsäule aufgegeben. Der Nachweis erfolgt in den meisten Fällen durch Leitfähigkeits- oder UV-Detektion. Bei Verwendung geeigneter Eluenten kann durch Einsatz von Suppressorsäulen die Grundleitfähigkeit des Eluenten abgesenkt und damit die Nachweisgrenze verbessert werden (Abb. 23).



**Abb. 23:** Schematischer Aufbau eines Ionenchromatographen (nach Weiß 2001).

### 3.3.1 Probenvorbereitung für die Ionenchromatographie

Für die Ionenchromatographie wurden jeweils Proben des bergfeuchten und des bereits im KD-Versuch untersuchten Oberen Bitterfelder Glimmersandes genommen. Dazu wurde eine definierte Probenmenge mit einer bestimmten Menge vollentsalzten, entlüfteten Wassers versetzt. Die Proben wurden über 24h bei Raumtemperatur gerührt. In regelmäßigen Abständen wurde der pH-Wert bestimmt. Nach den 24h wurde die Lösung abfiltriert und dieselben Proben noch einmal mit vollentsalztem, entlüftetem Wasser versetzt. Im zweiten Lösungsversuch wurden die Proben für 72h bei Raumtemperatur gerührt. Danach wurde die Suspension ebenfalls abfiltriert.

#### 3.3.1.1.1 Versuchsdurchführung

Für die Messungen wurden die Lösungen mit einem 0,45 µm-PTFE-Filter gereinigt. Gelöstes CO<sub>2</sub> wurde vor Beginn der Messungen entfernt. Die Bestimmung der Konzentrationen in den wässrigen Lösungen mittels Ionenaustauschchromatographie erfolgte über die Kalibration mit Standardlösungen. Teilweise waren die Konzentrationen so hoch, dass die Lösungen für einen zweiten Messdurchgang entsprechend verdünnt werden mussten.

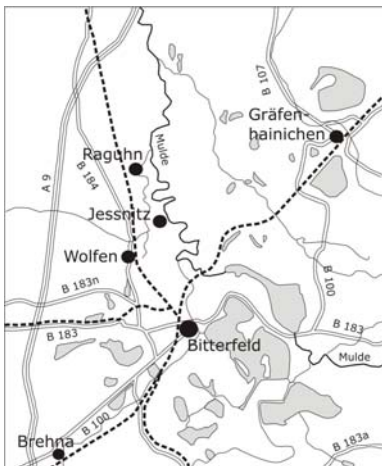
Diese Untersuchung wurde nur an einer rolligen Probe durchgeführt.

## 4 Beispielraum1: Ehemaliges Braunkohlenabbaugebiet Bitterfeld/Wolfen

### 4.1 Geographischer Überblick

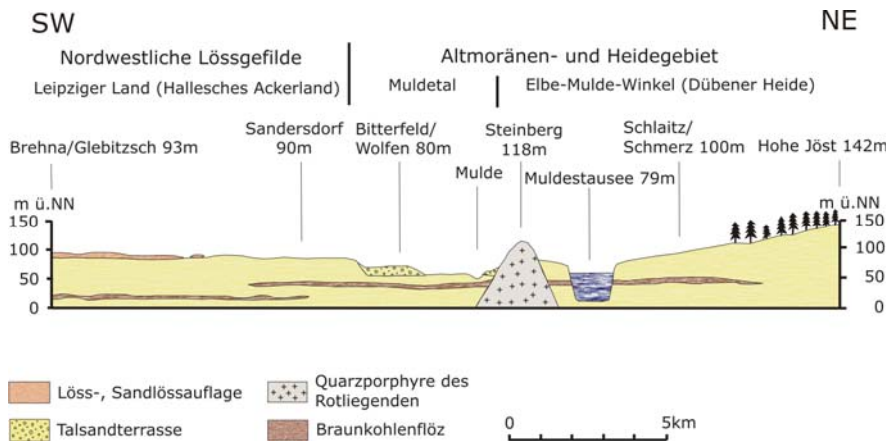
Der Landkreis Bitterfeld liegt im Regierungsbezirk Dessau, im Südosten des Landes Sachsen-Anhalt. Im Westen befinden sich Lößgefilde mit intensiver Landwirtschaft, in der Mitte ein stark industrialisierter Bereich mit Bergbau, Chemieindustrie und Besiedlung sowie im Norden und Osten Heiden mit Forstwirtschaft und naturnahen Räumen.

Der zentrale Teil mit der Stadt Bitterfeld und Wolfen ist Untersuchungsgebiet dieser Arbeit. Es wird im Osten durch den Verlauf der Mulde und den Tagebau Goitzsche begrenzt. Im Süden endet es in etwa an der B 100 auf Höhe der Ortschaft Roitzsch und im Westen an der A 9. Am nördlichen Rand liegen die Ortschaften Thurland und Raguhn (Abb. 24).



**Abb. 24:** Bitterfeld und das untere Muldetal (SCHÖNFELDER et al. 2004).

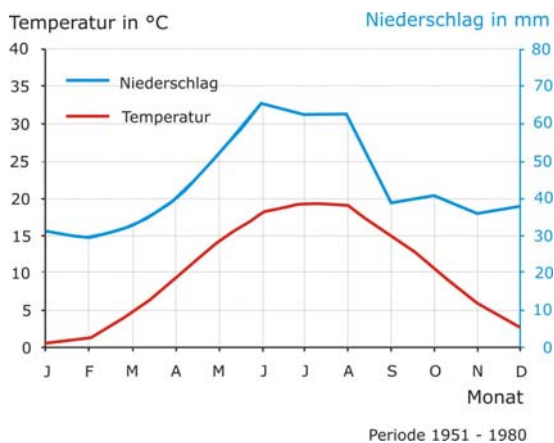
Der Bitterfelder Raum ist vorwiegend dem Altmoränengebiet der glazial bestimmten Norddeutschen Tiefebene zuzuordnen (SCHÖNFELDER et al. 2004). Die Höhenlagen des gesamten Gebiets mit Ausnahme des Anteils der Dübener Heide liegt um die 90 m NN. Nur an wenigen Punkten, geologisch-geomorphologisch bedingt (Steinberg 117 m NN, Hohe Jöst 142 m NN) oder durch den Bergbau bewirkt (Barbara Höhe 139 m NN, Bitterfelder Berg 109 m NN), ragt das Gebiet über das 100 m Geländeniveau hinaus (Abb. 25). Der vom SE nach N gerichtete Muldelauf, dessen 3 bis 6 km breite Talung sich an den Rändern in die benachbarten, zumeist ebenen Platten bis zu 15 m tief einsenkt, gliedert das Gebiet in zwei unterschiedliche Teilräume: Zum einen in ein Areal von intensiver pflanzenbaulicher Nutzung auf Lössstandorten von hoher Bonität im SW (Köthener und Hallesches Ackerland, Leipziger Land), zum anderen in einen überwiegend von sandigen Substraten bedeckten, flachwelligen, teilweise hügeligen Raum im NE, der reich an Forstarealen ist (Dübener Heide) (SCHÖNFELDER et al. 2004).



**Abb. 25:** Landschaftsprofil Brehna – Hohe Jöst (SCHÖNFELDER et al. 2004).

Der Bitterfelder Raum wird anhand der großräumigen Ausprägung von Lufttemperatur, Niederschlag und Kontinentalität dem Klimabezirk der Leipziger Bucht zugeordnet, der zum Gebiet des stärker kontinental beeinflussten Ostdeutschen Binnenland-Klimas gehört (Klima-Atlas der DDR 1953). Regionalklimatische Differenzierungen ergeben sich vor allem aus den Reliefunterschieden zwischen den Randbereichen der Dübener Heide im E, dem Muldetal im W, während lokal klimatische Unterschiede auf die Auswirkungen der Bebauung und der in den Tagebaurestlöchern entstehenden großen Wasserflächen zurückzuführen ist (VILLWOCK 2004).

Der Bitterfelder Raum liegt an der Ostgrenze des Mitteldeutschen Trockengebietes, einem der niederschlagsärmsten Gebiete in Deutschland (Abb. 26).



**Abb. 26:** Klimadiagramm Bitterfeld (VILLWOCK 2004).

Durch die Lage im Regenschatten des Harzes ergibt sich eine deutliche Differenzierung der Niederschlagsmenge, die im SW (mittlere Jahressumme 500 – 550 mm) nach NE zur Dübener Heide (550 – 600 mm) hin zunimmt. Die größten Niederschlagsmengen treten in den Monaten Juni bis August auf, während das Niederschlagsminimum im Februar liegt. In relativ trockenen Jahren können die Niederschlagsmengen nur um 300 mm betragen. Den mittleren Niederschlägen steht eine reale Verdunstung von ca. 400 bis 500 mm gegenüber, so dass die Grundwasserneubildung zeitweise sehr eingeschränkt ist (SCHUMANN & MÜLLER 1995).



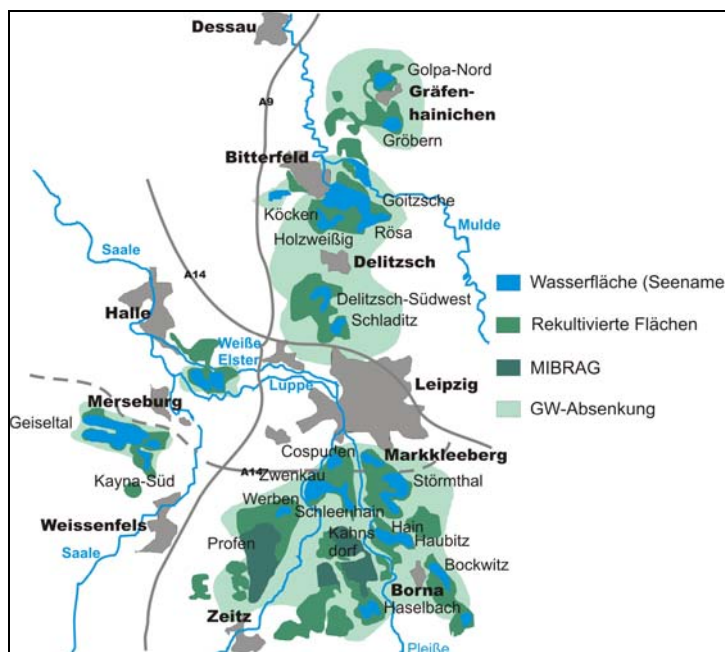
Das Jahresmittel der Lufttemperatur liegt um 9 °C, bei mittleren Temperaturen im Winterhalbjahr zwischen 0 und -1 °C und im Sommerhalbjahr zwischen 18 und 19 °C. Damit gehört das Gebiet zu den wärmebegünstigten Räumen in Deutschland. Das nähere Umfeld von Bitterfeld und Wolfen gilt mit über 19 °C im Juli als das wärmste Gebiet in Ostdeutschland und ist vergleichbar mit dem Oberrheingraben zwischen Freiburg und Mainz (SCHUMANN & MÜLLER 1995).

## 4.2 Historischer Überblick über das Bitterfelder Revier

Das Bitterfelder Braunkohlenrevier stellt den zentralen Teil der mitteldeutschen Braunkohlenlagerstätte dar (Abb. 27).

Das Mitteldeutsche Braunkohlengebiet erstreckt sich von Altenburg im Süden bis nördlich der Ortslage Gräfenhainichen im Norden, von der Elbe im Osten bis nach Niedersachsen (Helmstedter Revier) im Westen.

Die Braunkohlevorräte wurden im Tagebaubetrieb um die Stadt Bitterfeld mit den Tagebauen Holzweißig, Goitzsche, Muldenstein, Köckern, Sandersdorf, Wolfen, Löbnitz, Rösa abgebaut. In nördlicher Richtung erstreckte sich der Abbau bis in den Bereich um die Ortslage Gräfenhainichen (Golpa, Gröbern) und in südlicher Richtung bis in den Randbereich der Stadt Leipzig (Breitenfeld, Delitzsch-SW).



**Abb. 27:** Übersicht über das Mitteldeutsche Braunkohlenrevier (modifiziert nach LMBV 1997).

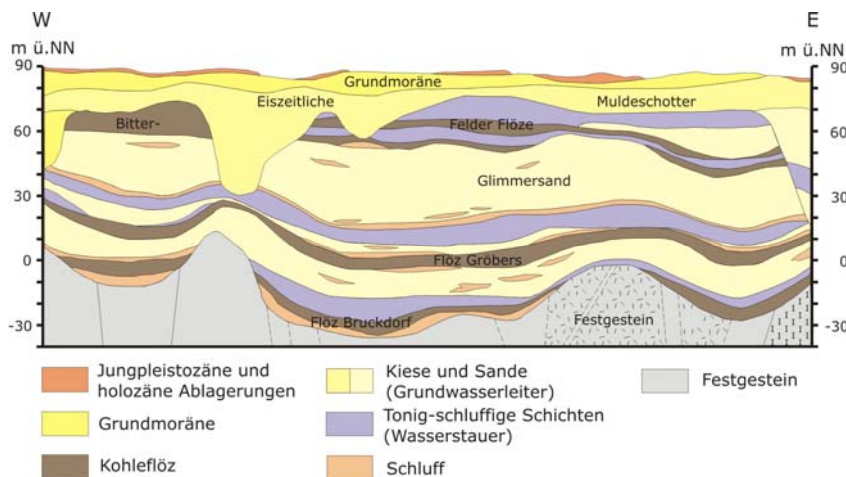
Mit Beginn des industriellen Braunkohlenabbaus im Bitterfelder Revier 1839 (Grube Auguste) mussten aufgrund des relativ geringen Grundwasserflurabstands Wasserhaltungsmaßnahmen eingeleitet werden. Da sich der Abbau der Braunkohle im Tagebaubetrieb als die wirtschaftlichste Variante herausstellte, wurden großflächige Absenkungsmaßnahmen notwendig, die im Einflussbereich der Tagebaue und Gruben eine nachhaltige Veränderung der hydraulischen Verhältnisse bis in die heutige Zeit bewirkten. Die Wasserhaltungsmaßnahmen erforderten ein Absenkungsniveau bis unter ca. 50 m NN, was eine zusätzliche Entspannung des Liegendgrundwasserleiters erforderlich machte. Das entspricht einem Wasserspiegel, der sich ca. 25 m unter dem derzeitigen Ruhewasserspiegel für diesen Raum befindet. Ein



Grundwassergleichenplan aus dem Jahr 1921 belegt diese Situation (WEISS et al. 2004).

### 4.3 Geologischer Überblick

Geologisch ist das Revier durch bis zu 200 m mächtige tertiäre Beckensedimente gekennzeichnet, die von relativ schichtbeständigen quartären Bildungen überlagert werden (Abb. 28 und 29). Die Sedimente des Tertiärs sind eozänen bis miozänen Alters. Im Liegenden und Hangenden der Kohleflöze treten fluviatil-limnische und marin-brackische, teils feinkohle- und schwefelhaltige, grob bis feinkörnige Sande, Schluffe und Tone auf. Die pleistozänen Ablagerungen setzen sich aus elster- und saalekaltzeitlichen Grundmoränen (Geschiebemergel/-lehm), glaziofluviatilen Sanden (Schmelzwassersande, Talsande) sowie weichselkaltzeitlichem Löß, Sandlöß und Geschiebedecksand zusammen. Holozäne Ablagerungen (Auenlehm/-schluff über Schotter) kommen in den breiten Flusstälern der Saale, Elster, Pleiße und Mulde vor (BELLMANN et al. 1990, EISSMANN & LITT 1994).



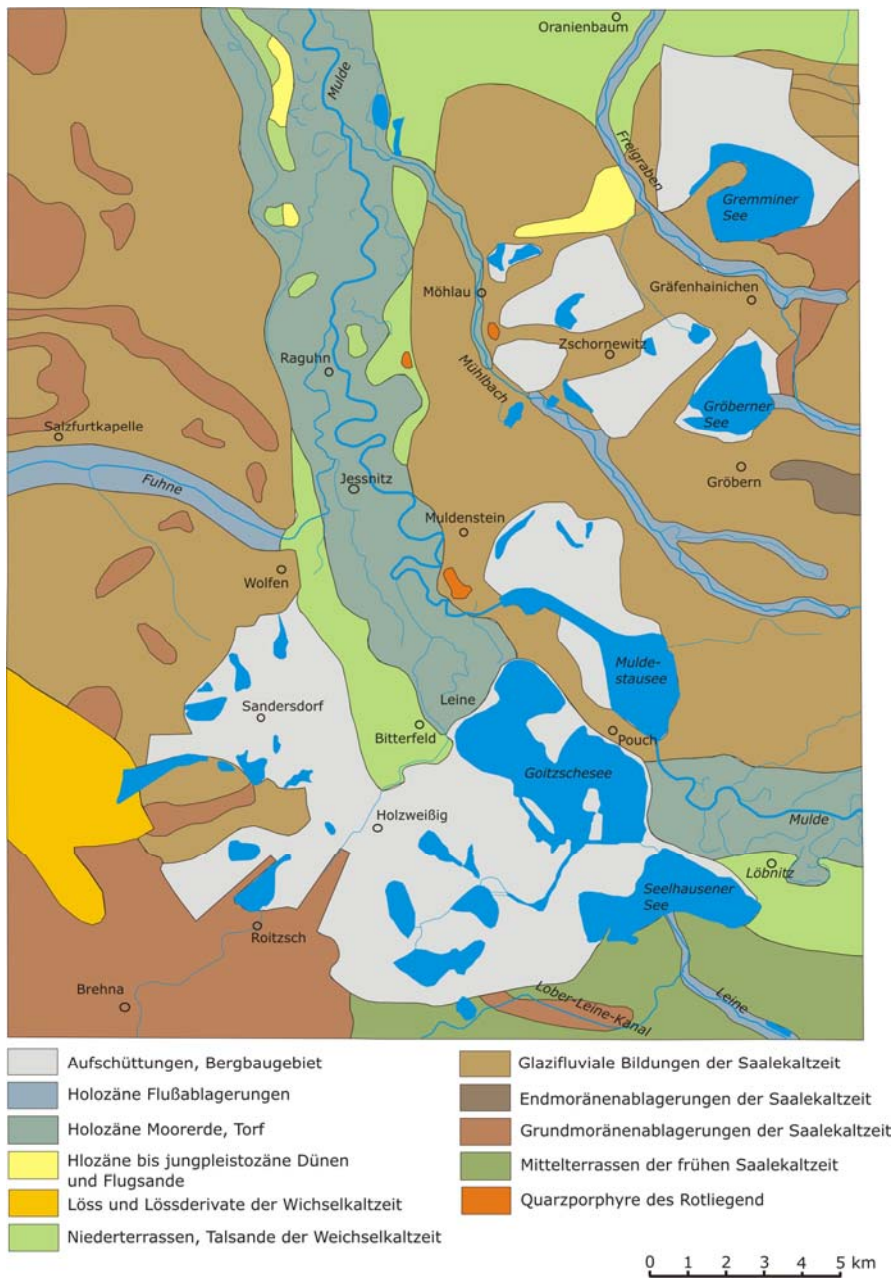
**Abb. 28:** Geologisches Profil Bitterfeld (in SCHÖNFELDER et al. 2004, nach KRAPP & RUSKE 1992, verändert).

Der prätertiäre Untergrund in Mitteldeutschland ist aus permisch-mesozoischen Bruchschollen aufgebaut, deren Heraushebung während der saxonischen Tektogenese in der Kreide vor etwa 80-100 Mio. Jahren stattfand (KNOTH et al., 1998). Die Bruchstörungen streichen vorherrschend in NW-SE.

Die prätertiäre Basis des Bitterfelder Raumes gehört zur Halle-Wittenberger Scholle (KNOTH & SCHWAB, 1972). Sie ist im Südwesten an der Halleschen Störung und im Nordosten am Wittenberger Abbruch, der den Rand zum Norddeutschen Becken bildet, herausgehoben. Durch die Köthen-Bitterfelder Störungszone wird sie in eine südwestliche Teilscholle, die Hallesche Mulde, und eine nordöstliche, die Südanhaltinische Mulde, geteilt (JORDAN & WEDER, 1995).

Die Scholle besteht aus mehreren tausend Meter mächtigen Gesteinen des Karbons und Perms. In eine Folge von siliziklastischen Gesteinen (Sandsteine, Konglomerate, Grauwacke, Tonschiefer und Schluffsteine) intrudierten im Rotliegenden über 1000 m mächtige Porphyre, während parallel dazu an der Oberfläche Tuffe abgelagert wurden (EISSMANN & LITT 1994, ALTERMANN & RUSKE, 1997). Da das Untersuchungsgebiet während der kreidezeitlichen Hebung Abtragungsgebiet war, fehlen die mesozoischen Schichtfolgen der Trias, des Jura und der Kreide. Die paläozoischen Gesteine wurden zum Teil erodiert, zum Teil verwitterten sie zu einer bis zu 85 m mächtigen, kaolinreichen Deckschicht

(EISSMANN & LITT 1994, KNOTH et al., 1998). Mit Ausnahme einiger oberflächennah anstehenden Flächen mit Prätertiär im Muldetal, befindet sich die Oberfläche des Prätertiärs in etwa 80-100 m Tiefe (KRAPP & RUSKE, 1992).



**Abb. 29:** Geologischer Überblick über den Raum Bitterfeld/Wolfen (VILLWOCK 2004). In blau sind die derzeitigen Oberflächengewässer dargestellt.

Einen Überblick über die lithostratigraphische Abfolge im Bereich Bitterfeld vermittelt die Tabelle 1.

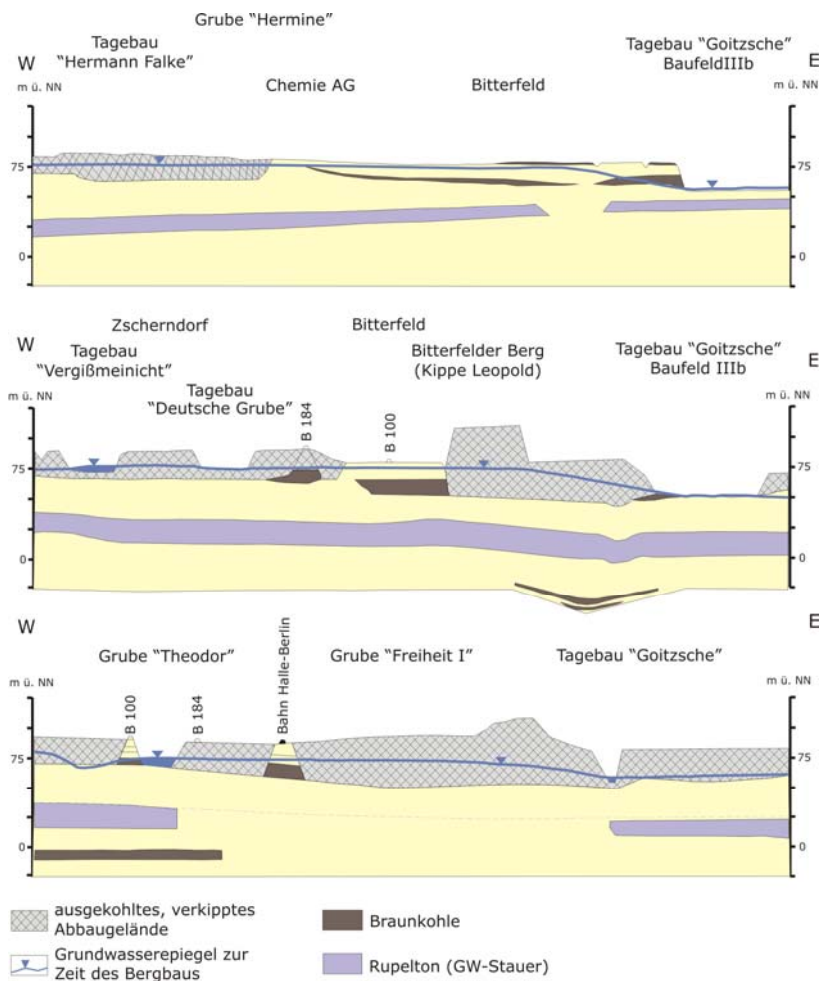
**Tab. 1:** Geologisches Normalprofil für den Raum Bitterfeld. Blau – Grundwasserleiter, schwarz – Grundwassergeringleiter (in HEROLD 2003, nach RUSKE et al. 1999).

Stratigraphie	Lithologie			Mächtigkeit
Anthropogen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auffüllungen, allgemein</li> <li>• Kippen, Braunkohlentagebau</li> <li>• Industriedeponiegut</li> </ul>			Bis 25 m
Holozän	<ul style="list-style-type: none"> <li>• torfartige Bildungen</li> <li>• Auelehm, Ton</li> <li>• Sande und Kiese</li> </ul>			1-2 m
Weichsel Glazial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sandlöss</li> <li>• Geschiebedecksand</li> </ul>			0,5-3 m
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Niederterrasse</b></li> </ul>	Oberer Teil <ul style="list-style-type: none"> <li>• Strengbachschotter</li> <li>• Muldenterrasse</li> </ul>	Uferrand, fluviale Rinnen	8-12m
Periglazialhorizont Unterer Teil <ul style="list-style-type: none"> <li>• Niederterrasse der Mulde</li> <li>• Terrassensande der Fuhne</li> </ul>				
Eem Interglazial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Torfe, Tone, Mudden</li> </ul>			0,5-2 m
Saale Glazial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• glaziofluviale Sande (Nachschüttsande)</li> <li>• Grundmoräne</li> <li>• glaziofluviale Sande und Kiese (Vorschüttsande)</li> <li>• <b>Hauptterrassen der Mulde/Elster</b></li> </ul>			5-10m
Holstein Interglazial				
Elster Glazial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Glaziolimnische Schluffe, Tone und Sande</li> <li>• Grundmoräne</li> </ul>		Rinnen (50-70 m)	10-20 m
Miozän	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bitterfelder Decktonkomplex</li> <li>• Bitterfelder Flöze</li> </ul>			Bis 8 m Bis 10 m
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Glimmersand</b></li> </ul>	Oberer Teil		
Oligozän	„Breitenfelder Horizont“			20-30 m
	Unterer Teil			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Glaukonitsand</b></li> <li>• Glaukonitschluff</li> <li>• Rupelton</li> </ul>			10-25 m

#### 4.4 Hydrogeologischer Überblick

Die ursprünglich vorhandenen hydrologischen und hydrographischen Verhältnisse im Mitteldeutschen Braunkohlenrevier wurden durch den Braunkohlenabbau und der damit verbundenen Grundwasserabsenkung sehr stark gestört (Abb. 30). Die hydrologischen Verhältnisse für den gesamten Bereich des Bitterfelder Reviers zusammenzufassen ist sehr kompliziert. Sie können deshalb nur sehr allgemein erläutert werden. Über die ursprünglich vorhandenen hydrologischen Verhältnisse vor Beginn des Bergbaus existieren kaum Unterlagen, da bereits seit über hundert Jahren Bergbau betrieben wurde. Die erste hydrologische Übersicht für das Gebiet um Bitterfeld wurde 1921 durch Dr. Ing. Thiem großräumig dargestellt (KALINA & SCHACHER 1996).

Die Grundwasserverhältnisse für das Bitterfelder Revier wird durch folgende Haupteinzugsbereiche charakterisiert: im N durch die Elbe, im W durch die Saale, im S durch die Weiße Elster und im E durch die Mulde.



**Abb. 30:** Idealisierte Profilschnitte um Bitterfeld mit dem damaligen Grundwasserstand (aus SCHÖNFELDER et al. 2004; nach KRAPP & RUSKE 1992, verändert).

Bestimmt werden die hydrogeologischen Verhältnisse durch die verschiedenen Grundwasserleiter, die sich über, unter und auch zwischen den Braunkohlenflözen als Sande und Kiese großflächig abgelagert haben. Durch Versickerung von Niederschlagswasser, Oberflächenwasser aus Vorflutern werden die Grundwasserleiter ständig gespeist. Getrennt werden die Grundwasserleiter durch stauende Schichten wie Tone, Schluffe und Kohleflöze. Wo diese Stauer fehlen, bestehen hydraulische Verbindungen zwischen den Grundwasserleitern (KALINA & SCHACHER 1996).

Ausgehend von den Erfordernissen der hydrologischen Projektierung und Auswertung für die Belange der Braunkohlenindustrie wurde vor über drei Jahrzehnten ein einheitliches System der Bezeichnungen der Grundwasserleiter und Flöze entwickelt, welches seit dem generell angewendet wurde. Es basiert auf einer lithostratigraphischen Gliederung der Schichtenfolge, d.h. als Grundwasserleiter werden die Sedimente eingestuft, die lithologisch als Sand oder Kies angesprochen werden (KALINA & SCHACHER 1996).

Es werden tertiäre und quartäre Grundwasserleiter unterschieden. Die quartären Grundwasserleiter werden in ihrer Gesamtheit als GWL 1 zusammengefasst, werden aber zur Untergliederung mit GWL 1.0 bis 1.8 bezeichnet. Die Bezeichnung der tertiären Grundwasserleiter ergibt sich aus der Lage zu den Flözen. So bezeichnet man die Grundwasserleiter über dem Flöz als GWL 2, die Sande im Flöz als GWL 3 und zwischen den Flözen (Bitterfelder Ober- und

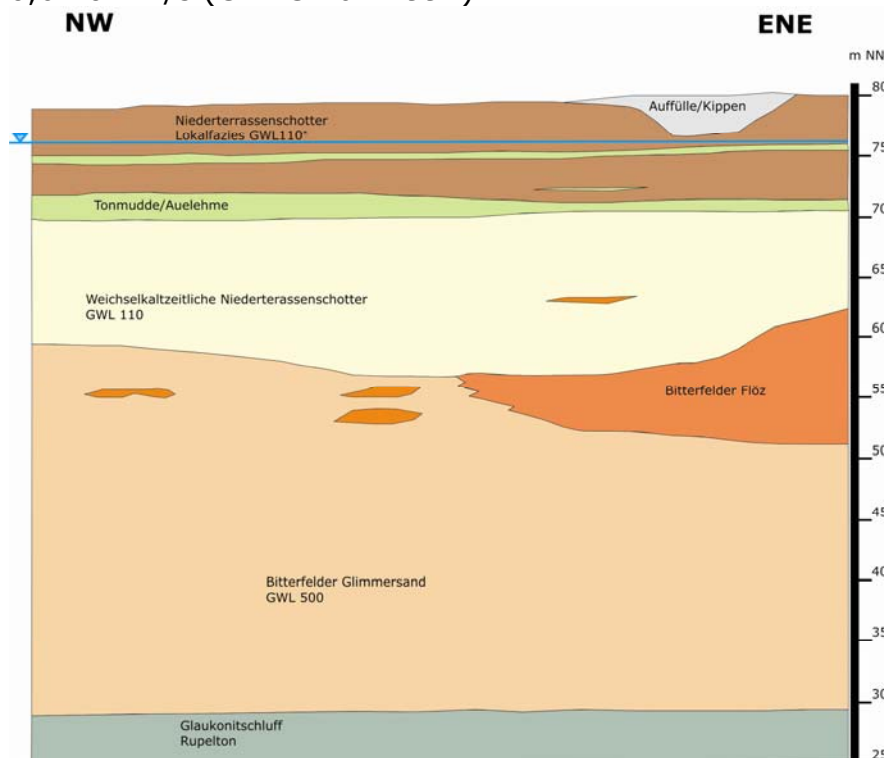
Unterbank) als GWL 4, die Sande unter dem Bitterfelder Flöz als GWL 5. Die Deckgebirgsgrundwasserleiter wurden durch die Abraumgewinnung teilweise, in einigen Tagebaubereichen vollständig abgebaut (KALINA & SCHACHER 1996).

Für die Gewinnung der Braunkohle spielte die Absenkung des Grundwassers eine entscheidende Rolle. Im unverritzten Gebirge standen teilweise gespannte Grundwasserverhältnisse an. Durch die Entwässerungsmaßnahmen während des Tagebaubetriebs wurden die Grundwasserleiter des Deckgebirges fast vollständig entwässert bzw. bis auf geotechnisch noch vertretbare Restwasserstände für die Standsicherheit der einzelnen Abraumböschungen abgesenkt. Im GWL 50 wurde der Druckwasserspiegel abgebaut (GFE GmbH 1992, KALINA & SCHACHER 1996).

#### 4.4.1 Tertiäre Grundwasserleiter

Die älteren Sedimente des Obereozäns und Mitteloligozäns sind von den jüngeren tertiären Ablagerungen durch einen mächtigen, im gesamten Arbeitsgebiet verbreiteten Schluff-Ton-Komplex, den Rupelton, getrennt (Abb. 32). Seine Mächtigkeit beträgt durchschnittlich 15 m. Mit einem mittleren  $k_f$ -Wert von  $0,9 \cdot 10^{-10}$  m/s bildet er einen gut abdichtenden Horizont, der als Basis für den Grundwasserleiterkomplex der oberen quartären und tertiären Grundwasserleiter von Bedeutung ist. Meist wird der Rupelton von mehreren Metern mächtigen glaukonitführenden Schluffen und Tonen überlagert (GFE GmbH 1992, KRAPP & RUSKE, 1992).

Über diesem Stauhorizont sind die bis 35 m mächtigen oberoligozänen Bitterfelder Glimmersande verbreitet (GWL 50). Diese bestehen aus glimmerführenden, zum Liegenden hin zunehmend schluffigen und an der Basis oft stark schluffigen und glaukonitischen Fein- bis Mittelsanden mariner bis brackiger Genese. Sie bilden den wichtigsten tertiären Grundwasserleiter. Für die obere Hälfte wurden  $k_f$ -Werte von  $0,94 \cdot 10^{-4}$  m/s bis  $1,7 \cdot 10^{-4}$  m/s angegeben, wobei durchschnittlich ein Wert von  $1,1 \cdot 10^{-4}$  m/s ergibt. Die geringere Durchlässigkeit des unteren Teils spiegelt sich in  $k_f$ -Werten von  $0,28 \cdot 10^{-4}$  m/s bis  $0,6 \cdot 10^{-4}$  m/s (GFE GmbH 1992).



**Abb. 31:** Schematischer hydrogeologischer Schnitt im Raum Bitterfeld (stark vereinfacht nach RUSKE et al. 1999).



In den ehemaligen Braunkohlenabbaugebieten im Süden des Arbeitsgebietes befinden sie sich häufig in unmittelbarem Kontakt zu Kippenablagerungen und zahlreichen in ehemaligen Tagebaurestlöchern angelegten Deponiekörpern, da nach dem Kohleabbau keine Grundwasserstauer mehr existieren bzw. stark dezimiert sind und keine zusätzlichen Basisabdichtungen eingebracht wurden (GFE GmbH 1992).

Der im stratigraphisch Hangenden der Bitterfelder Glimmersande auftretende Flözkomplex Bitterfeld ist im Arbeitsgebiet nur stellenweise ausgebildet. Er wurde ursprünglich durch bis 10 m mächtige Braunkohle und durchschnittlich 4-5m mächtige Tonschichten gebildet. Im Süden wurde er durch den Bergbau weitestgehend ausgeräumt. Zur Durchlässigkeit des Braunkohlenflözes sind keine Angaben bekannt (GFE GmbH 1992).

#### **4.4.2 Quartäre Grundwasserleiter**

Das Quartär wird vor allem durch die im W verbreiteten Kiese, Kiessande der Hauptterrasse und der Schmelzwassersande und der im E verbreiteten Schotter der holozänen Niederterrasse gebildet (Abb. 31). Grundwasserführend sind die jüngeren Flussschotter der Mulde sowie die Sande und Kiese der Saale- und Elster-Kaltzeit. Lithologisch handelt es sich um Grobsande bis Feinkiese, die teilweise erhebliche Mittelkies- und Grobkiesanteile, aber auch Fein- bis Mittelsandbeimengungen aufweisen können und stellenweise in reine Mittelkieslagen übergehen. Die Durchlässigkeit schwankt von  $4 \cdot 10^{-4}$  m/s bis  $14 \cdot 10^{-4}$  m/s und beträgt im Mittel etwa  $10 \cdot 10^{-4}$  m/s, die Mächtigkeit beträgt im Mittel 10 bis 15 m (GFE GmbH 1992, KRAPP & RUSKE, 1992).

Als Grundwassergeringleiter fungiert der saalezeitliche Geschiebemergel. Er tritt nur kleinflächig im SW des Arbeitsgebietes auf.

Die gut durchlässigen Schichten sind großräumig hydraulisch miteinander verbunden, so dass sie als einheitliches quartäres Grundwasserstockwerk (GWL 100) betrachtet werden können; es ist etwa 15 m mächtig (GFE GmbH 1992, KRAPP & RUSKE, 1992). In der Flussniederung der Mulde wird der Grundwasserleiter zum Teil von Auelehmen überdeckt, so dass gespannte Verhältnisse auftreten können. Durch den zyklischen Wechsel der Sedimentationsbedingungen sind die Terrassenschotter jedoch horizontal gegliedert, was zu wechselnder Korngrößenzusammensetzung und damit zu unterschiedlichen Durchlässigkeiten führt (RUSKE et al., 1997).

An der Basis des Quartärs sind häufig bis 2m mächtige, schluffig-tonige Schichten anzutreffen, die jedoch keinen flächenhaften Horizont bilden.

Wie auch der Bitterfelder Flözkomplex ist das Quartär durch den Bergbau stellenweise vollständig ausgeräumt. Die Auffüllung der Tagebaue mit Abraummasse führte zur Bildung von bis zu 25 m mächtigen Mischkippen mit überwiegend rolligen Anteilen, aber auch bis zu mehrere Meter mächtigen bindigen Bereichen (GFE GmbH 1992).

#### **4.5 Zusammenfassung der folgenreichsten Auswirkungen des Braunkohlenbergbaus**

Durch die im gesamten Gebiet auftretende Vielgestaltigkeit der känozoischen Schichtenfolge, die durch Verzahnung von terrestrischen mit marinen Sedimenten und hinsichtlich der Lagerung durch epirogene und subrosive Vorgänge gekennzeichnet ist (BELLMANN et al. 1990, EISSMANN & LITT 1994), blieb der massive Eingriff in den Naturhaushalt nicht ohne beträchtliche Folgen. Neben der direkten Zerstörung durch Auskohlung führte die dafür notwendige

technologisch bedingte Grundwasserabsenkung zu nachhaltigen Auswirkungen auf die hydrologischen Verhältnisse (Abb. 30).

In Anlehnung an GLÄBER (1994) sind im Folgenden die langfristig wirkenden Bergbau bedingten Veränderungen zusammengefasst:

A) Veränderung des geologischen Verbandes:

- Veränderung der lithologischen Abfolge unter Entfernung des Rohstoffkörpers (Massendefizit wird teilweise durch einen Wasserkörper ersetzt).
- Veränderung der Faziesverhältnisse (natürliche Fazies werden durch anthropogen umgelagerte Mischfazies ersetzt).
- Störung der natürlich entstandenen Korn- und Fließgefüge.

B) Veränderung des grundwasserhydraulischen Systems:

- Durch bergbauliche Wasserhaltung (Schaffung von Absenkungstrichtern, die eine Belüftung von Grundwasserleitern und -stauern zur Folge haben).
- Veränderung der regionalen Fließsysteme.
- Beeinflussung der regionalen Grundwasserneubildung.
- Veränderung des Grundwasserabflusses einschließlich der Interaktion mit tieferliegenden Grundwasserleitern.

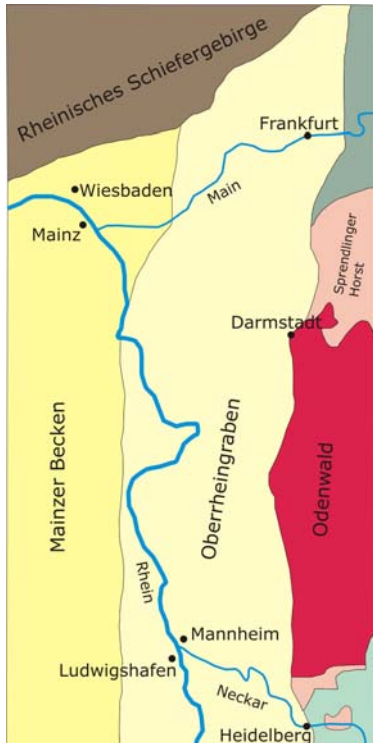
C) Veränderung der bodenmechanischen Eigenschaften der Lockergesteinsmassen bedingt durch Grundwasserabsenkung und -wiederanstieg:

- Setzungsfließgefährdung von Kippen.
- Bauwerkschäden durch Setzungen während der Sümpfung.
- Bauwerkschäden durch ansteigendes Grundwasser bei Flutung der Restseen.

## 5 Beispielraum 2: Hessisches Ried

### 5.1 Geographischer Überblick

Das Arbeitsgebiet umfasst den rechtsrheinischen Teil des Oberrheintals zwischen dem Main im Norden und dem Neckar im Süden (Abb. 32). Nach Osten reicht er bis an den Odenwald bzw. bis an den Höhenzug des Sprendlinger Horstes heran.



**Abb. 32:** Das Ried im nördlichen Oberrheingraben mit den wesentlichen geologischen Großeinheiten (modifiziert nach HOPPE et al. 1996).

Die Geländehöhen erreichen am Odenwaldrand im Raum Darmstadt bis 140 m NN und im SE 110 m NN. Nach W fällt die Geländeoberfläche bis zum Rhein auf etwa 90 m NN bzw. bis auf 84 m NN im NW ab. Morphologische Besonderheiten stellen Dünenzüge aus Flugsand dar, die beispielsweise südwestlich von Darmstadt anzutreffen sind. Entlang der Linie Weinheim, Crumstadt, Groß-Gerau, Astheim treten die reliktschen Altneckarschlingen als lang gestreckte gekrümmte Geländesenken in Erscheinung (Abb. 33).

Das Hessische Ried gehört dem sudwestdeutschen Klimaraum an. Die durchschnittliche Jahrestemperatur beträgt 9,5°C, bei mittleren Temperaturen im Winterhalbjahr zwischen 0 und +1°C und im Sommerhalbjahr um 18 und 19°C. Mit einem langjährigen mittleren Niederschlag von 653 mm zählt das Hessische Ried zu den regenarmen Regionen Deutschlands. Die feuchten vorwiegend von Westen und Südwesten zuströmenden Luftmassen kondensieren an den vorgelagerten Höhen. Das gesamte Hessische Ried liegt im Regenschatten der westlichen Vorberge. Erst am Odenwaldrand kommt es verstärkt durch Steigungsregen zu Niederschlägen (REGIERUNGSPRÄSIDIUM DARMSTADT 1999).

### 5.2 Historischer Überblick

Die Bezeichnung „Ried“ stand für eine natürliche Auen- und Sumpflandschaft, die vom Rhein und seinen westlichen Nebenarmen - insbesondere auch des so

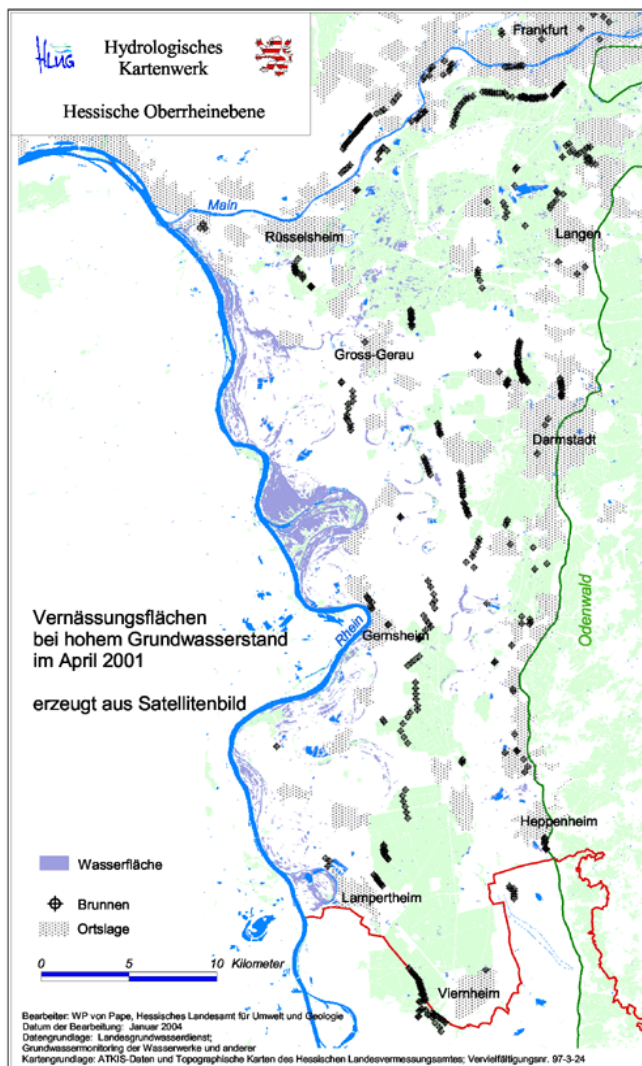


genannten Altneckars - geschaffen wurde. Diese ursprüngliche Landschaftsform wurde seit den späten zwanziger Jahren des 20. Jahrhunderts durch eine intensiv genutzte Kulturlandschaft ersetzt (IVEN 1996).

Erste Schritte zu dieser Veränderung wurden bereits im Mittelalter mit der Ausbreitung der Siedlungsstätten von höher liegenden Sandrücken in die tieferen Lagen des Rieds eingeleitet. Sie sind mit der Rodung von Wäldern zur Gewinnung von Ackerland verbunden und werden mit dem Bau von Dämmen sowie mit ersten Anlagen zur Binnenentwässerung zum Schutz und zur Erweiterung des Lebensraumes ergänzt. Die Durchstiche von Weschnitz, Winkelbach und Modau oder das Landgrabensystem im Verlauf des Altneckars sind noch heute als frühe Maßnahmen zur Entwässerung des „Neckarrieds“ allgemein bekannt (IVEN 1996). Die Regulierung des Gewässerverlaufs des Rheins, die 1928 begann, führte zu stetiger Vertiefung der Gewässersohle und damit zu Absenkungen der Grundwasseroberfläche in Rheinnähe. In den 1930er Jahren veränderten Maßnahmen zur Regulierung der Grundwasseroberfläche durch Entwässerungssysteme die Landschaft und den Grundwasserhaushalt nachhaltig. Außerdem gab es große Brunnenanlagen für die Wasserversorgung der Städte Frankfurt, Mainz, Darmstadt, Worms und Mannheim schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Bis Ende der 1950er Jahre war aber die Absenkung infolge der Grundwasserentnahmen auf den nahen Bereich der Brunnen beschränkt, und die Auswirkungen waren lokal begrenzt (PAPE 2003).

Seit Ende der 1950er Jahre nahm der Bedarf an Trinkwasser und Brauchwasser für die Industrie und die landwirtschaftliche Beregnung enorm zu. Vor allem Mitte der 1960er Jahre und Anfang der 1970er Jahre wurden weitere Brunnenanlagen errichtet. Die neuen Entnahmen führten zu großflächigen Absenkungen der Grundwasseroberfläche. Nach einer Folge von Trockenjahren Anfang und Mitte der 1970er Jahre und gleichzeitig hohen Wasserentnahmen sanken die Grundwasserstände im Herbst 1976 auf Rekordtiefe ab. In der Folge entstanden Trockenheitsschäden an der Vegetation und Setzungsschäden an Bauwerken (PAPE 2003).

Die danach folgenden Jahre fielen wieder in eine relativ niederschlagsreiche Periode, während gleichzeitig die Grundwasserentnahmen reduziert wurden. Das Grundwasser stieg Ende der 1970er Jahre an und erreichte hohe Stände insbesondere in den Jahren 1982 und 1988. Eine weitere Trockenperiode von 1989 bis 1993 führte erneut zu niedrigen Grundwasserständen, die aber nicht an die Situation von 1976 heranreichten. Von 1999 bis Anfang 2003 gab es wieder sehr niederschlagsreiche Jahre mit der Konsequenz ansteigender Grundwasserstände. Vielerorts wurden im April 2001 die höchsten Grundwasserstände seit 40 Jahren erreicht mit der Folge von Vernässungsschäden (Abb. 35).



**Abb. 33:** Vernässungsflächen 2001 (PAPE 2003).

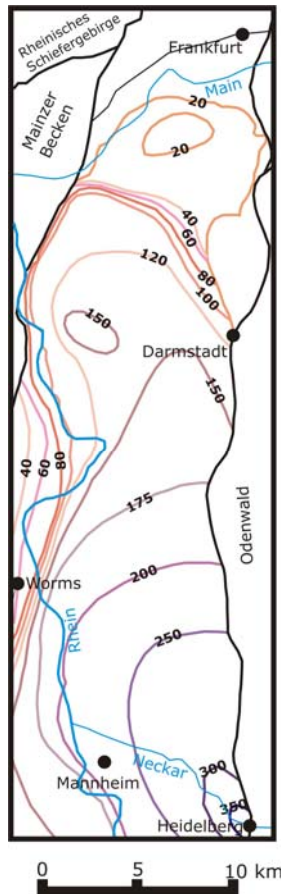
Im Süden von Lampertheim und Viernheim stieg das Grundwasser im Februar 2003 sogar noch etwas höher und reichte bis an die hohen Grundwasserstände der 1950er Jahre heran (PAPE 2003). Die Grundwasserflurabstände betragen weithin 3 bis 7 m. Geringe Flurabstände kennzeichnen rheinnahe Gebiete (besonders die ehemaligen Mäander), die ehemalige Alt-Neckaraue, z.B. bei Heppenheim, Hähnlein und Büttelborn, und Teile des Schwarzbach-Systems. Am Odenwaldrand, besonders W Darmstadt, und im Untermaingebiet (Kelsterbach – Neu-Isenburg – Langen – Walldorf-Mörfelden) erreicht der Flurabstand über 30 m. Dies war auch schon vor Bau der Großwasserwerke so (PAPE 2003).

### 5.3 Geologischer Überblick

Das Hessische Ried gehört dem nördlichen Teil des Oberrheingrabens an, der sich von Basel bis in das Rhein-Main-Gebiet erstreckt und durch eine seit dem Alttertiär anhaltende Absenkung gekennzeichnet ist. Der nördliche Oberrheingraben wird im W vom Pfälzer Wald und im E vom Odenwald und seiner nördlichen Fortsetzung, dem Sprendlinger Horst, begrenzt.

Der Oberrheingraben entstand im Gefolge der im Alttertiär beginnenden und bis heute andauernden Grabenbildung (PFLUG 1982, PLEIN 1993). Das Quartär des hier betrachteten Teils wird aus einer Wechselfolge fein- und grobklastischer,

fluvio-lakustriner Sedimente aufgebaut. Die größten Mächtigkeiten werden im Südosten zwischen Heidelberg und Mannheim erreicht (Abb. 34). Im so genannten „Heidelberger Loch“ wurden mehr als 2500 m Pliozän und Quartär erbohrt (SCHARPFF 1977, FETZER et al. 1995). Absenkungsbewegungen im nördlichen Oberrheingraben lassen sich bis heute nachweisen und erfolgten während des Quartärs in einer Größenordnung von 0,2-0,9 mm/a (PFLUG 1982). Quartäre Störungen sind also durchaus zu erwarten.



**Abb. 34:** Mächtigkeit Quartär (HAIMBERGER et al. 2005).

Die Grenze Tertiär/Quartär ist am vermehrten Auftreten von Tonpaketen erkennbar und anhand von Pollenanalysen stellenweise belegt (BARTZ 1982, HOTTENROTT et al. 1995). Während des jüngsten Pliozän hatte der Rhein im südlichen Grabenabschnitt die Kaiserstuhl-Wasserscheide überwunden. Alpine Gerölle und entsprechende Schwerminerale in den Ablagerungen im Ried können damit als Hinweise auf quartäre Alter der Sedimente gelten (BARTZ 1982, FETZER et al. 1995). Im Südwesten des Hessischen Rieds untergliederte KÄRCHER (1987) die quartären Ablagerungen in ein Altquartär aus Ton-Schluff-Feinsand-Wechselfolgen mit gelegentlichen Einschaltungen von gröberem Sand, Kies, Braunkohlen und Holzresten sowie in ein Jungquartär, das aus drei Kieslagern aufgebaut wird, die durch feinklastische Zwischenhorizonte getrennt werden. Der Sedimentationsraum ist durch einen raschen vertikalen und horizontalen Fazieswechsel gekennzeichnet (HOPPE et al. 1996). Haupttransportrichtungen weisen nach Norden. Nur gelegentlich schalten sich aus dem Osten kommende, grobkörnige alluviale Schwemmfächer ein (z.B. bei Darmstadt und bei Zwingenberg), die aber bereits nach 2-3 km in westlicher Richtung auskeilen. Junges, odenwaldnahes Grobmaterial wurde überwiegend über den „Urneckar“ antransportiert (KUPFAHL et al. 1972, WEIDNER 1990). Charakteristisch ist eine

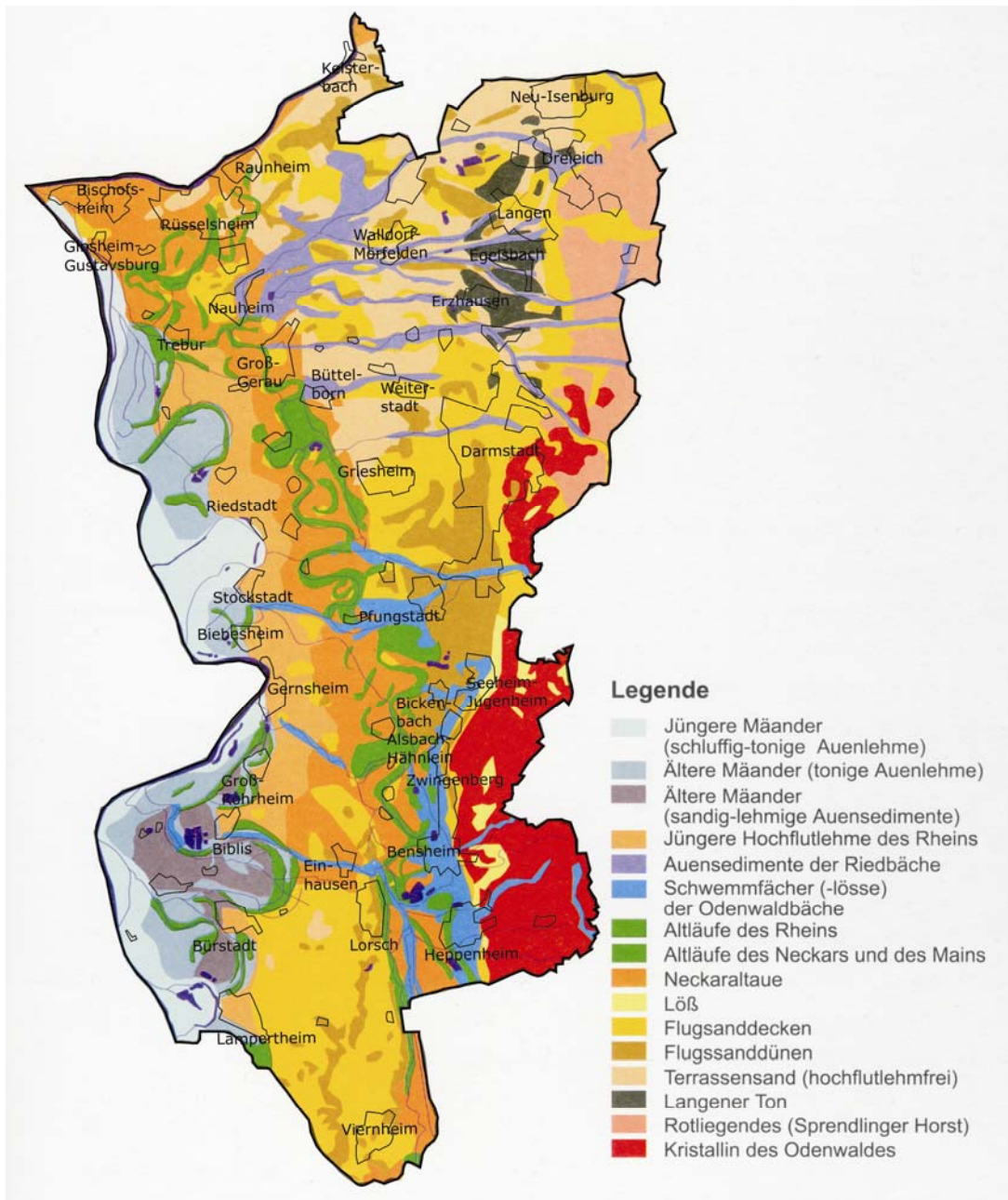
stärker kalkige Matrix, die aus mesozoischen Gesteinen des Neckareinzugsgebietes abgeleitet werden kann.

Einen Überblick über die chrono- und lithostratigraphische Abfolge im Bereich Bürstadt/Biblis vermittelt die Tabelle 2 nach SCHARPFF (1977).

**Tab. 2:** Standardprofil der Schichten für das Blatt Worms (SCHARPFF 1977).

Chronostratigraphie		Lithostratigraphie	Mächtigkeit
Pleistozän (Hangendes)			680-685 m
Obermiozän		Jungtertiär I	162-168 m
		Jungtertiär II	625-737 m
Untermiozän	Aquitän	Obere Hydrobienschichten	625-737 m
		Untere Hydrobienschichten	115-117 m
		Corbicula-(inflata-)Schichten	158-262 m
		Cerithienschichten	192-271 m
Oligozän	Chatt	Bunte Niederrödderner Schichten	127-142 m
		Cyrenenmergel	(128 ?)-300 m
		Meletta-Schichten	
	Rupel	Rupelton (Septarienton)	49-56 m
		Pechelbronner Schichten	205-301 m
Sannois			
Rotliegendes (Liegendes)			

Die Abbildung 35 zeigt eine geologische Übersicht des Hessischen Rieds. Es wird ersichtlich, dass das Hessische Ried eine kleinräumige differenzierte geologische Strukturierung aufweist, die überwiegend auf jungpleistozäne und holozäne Landschaftsentwicklungen zurückzuführen sind.



**Abb. 35:** Stark vereinfachter geologischer Überblick über das Hessische Ried (aus: GÜK Hessen 1:300.000, modifiziert nach: Regierungspräsidium Darmstadt 1999).

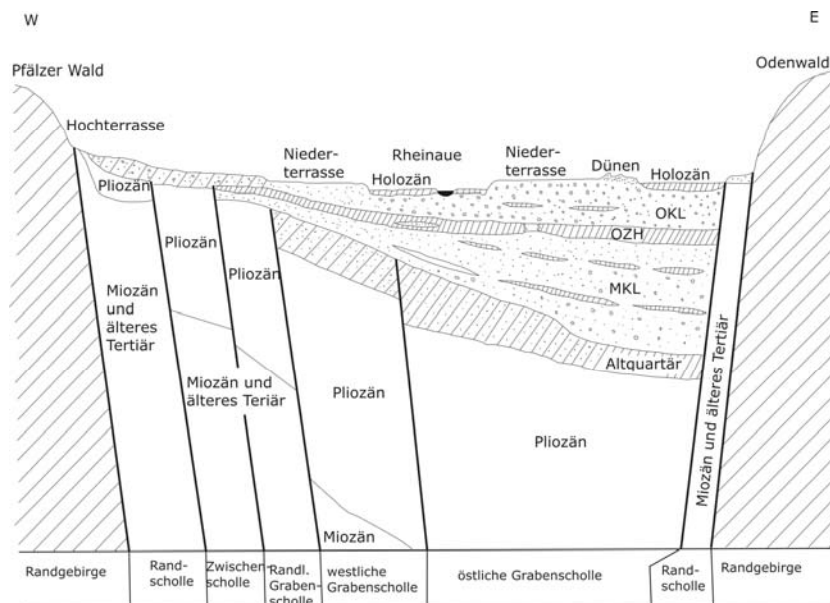
## 5.4 Hydrogeologischer Überblick

In der quartären Folge sind im südlichen Hessischen Ried bis zum Rheinbogen bei Gernsheim drei Grundwasserleiter zu unterscheiden, im nördlichen Hessischen Ried nur zwei, zum Teil nur ein in sich differenzierter Grundwasserleiter (Abb. 36).

Das sog. „Obere Kieslager“ (OKL) bildet flächendeckend den sandig-kiesigen Oberen Grundwasserleiter (OGWL) mit Mächtigkeiten zwischen 20 m in Rheinnähe und 50 m am Odenwaldrand. Im OKL verursachen Schluff- und Tonlinsen geohydraulische Differenzierungen. Ein gut kartierbarer schluffig-toniger Zwischenhorizont (ZH1) ist auf den östlichen Grabenrand mit Schwerpunkt um Heidelberg beschränkt, wo die Lockergesteine des Oberrheingrabens ihre größte Mächtigkeit aufweisen („Heidelberger Loch“, Abb. 34). Nach W wird der ZH1 zunehmend sandig, seine Mächtigkeit schwankt

zwischen 15 m im E und 1 bis 2 m im W. Der ZH1 trennt den OGWL in einen oberen (OGWLo) und einen unteren Teil (OGWLu).

Der liegende Obere Zwischenhorizont (OZH), nur im südlichen Hessischen Ried flächenhaft ausgebildet, bildet die Basis des OGWL und besteht überwiegend aus Ton- und Schlufflagen, bereichsweise aus Feinsand. Die Mächtigkeit schwankt zwischen 5 und 10 m, steigt am Odenwaldrand bei Seeheim-Jugenheim und südlich Heppenheim lokal auf über 20 m und ist bei Bensheim und E Biblis deutlich reduziert, stellenweise unter 5 m. Von Ausnahmen abgesehen („hydraulische Fenster“) wirkt er bei tonig-schluffiger Ausbildung als Trennhorizont, auch wenn die Ton- und Schlufflagen nur geringmächtig sind. Bei Auskeilen des OZH, im mittleren Hessischen Ried in Rheinnähe und nördlich Worfelden, verschwindet die Stockwerksgliederung (KÄRCHER 1987, HOPPE et al. 1996, EBHARDT et al. 2001).



**Abb. 36:** Hydrogeologischer Schnitt durch den Oberrheingraben bei Worms.

OKL: Oberes Kieslager, OZH: Oberer Zwischenhorizont, MKL: Mittleres Kieslager (in Anlehnung an: Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum 1980).

Die „Mittlere sandig-kiesige Abfolge“ bildet den Mittleren Grundwasserleiter (MGWL). Sie ist stark durch Schluff- und Tonhorizonte und -linsen gegliedert und bis 100 m mächtig. Horizontbeständige, bis mehrere Meter mächtige Schluff- und Tonlagen sind der ZH2 (oft 10 bis 20 m unterhalb des OZH) sowie der ZH3. Sie wurden früher als Unterer Zwischenhorizont bezeichnet. Je nach Vorhandensein der Zwischenhorizonte kann die „Mittlere sandig-kiesige Abfolge“ als zusammenhängender Mittlerer Grundwasserleiter behandelt oder in drei Teilstockwerke gegliedert werden. Auf hessischem Gebiet ist eine eindeutige Ansprache von ZH2 und ZH3 problematisch, da sich die Horizonte meist in Einzellagen auffächern. Zwischen die Niveaus von ZH2 und ZH3 schieben sich weitere Ton-Schlufflinsen. Der tiefste, durchgehend kartierbare quartäre Horizont, der Untere Zwischenhorizont (UZH), trennt den Mittleren vom Unteren Grundwasserleiter. Dieser besteht aus einer Wechselfolge von sandigen und schluffigen Schichten, die früher teils dem Altquartär, teils dem Pliozän zugeordnet wurden. Neuere Erkenntnisse zur stratigraphischen Einordnung liegen nicht vor. Die Basis des unteren Grundwasserleiters wird im S und in der Mitte des Hessischen Rieds bis zu einer von Darmstadt nach Rüsselsheim



verlaufenden Störung von pliozänen, N davon (Walldorfer Horst) von miozänen Tonen gebildet.

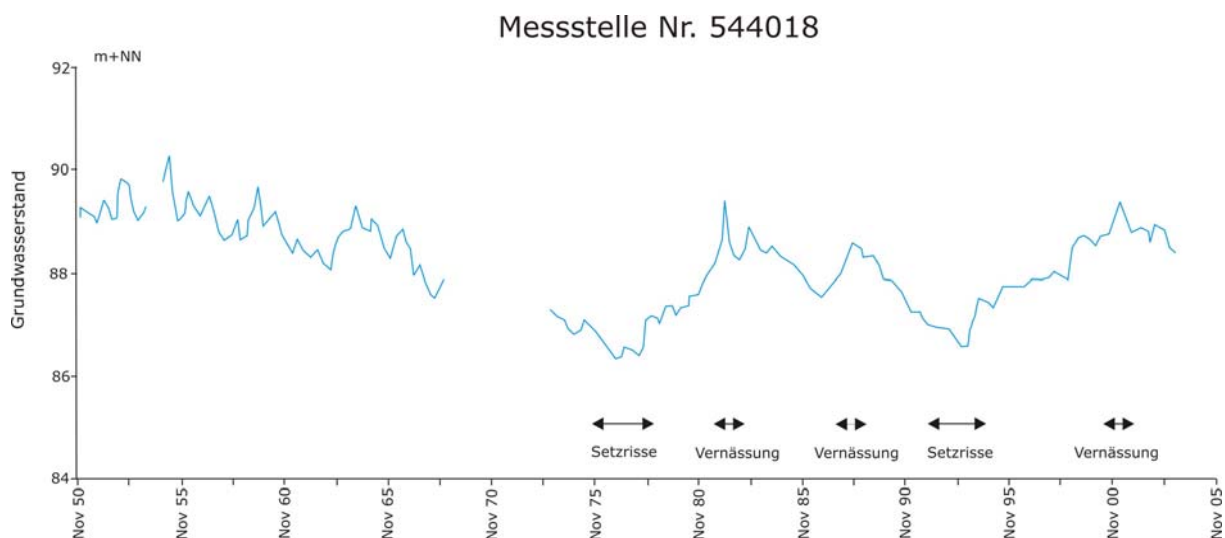
Wo die trennenden Grundwasserstauer fehlen, ist das gesamte Stockwerk südlich der genannten Störung zwischen 170 m (bei Kleinrohrheim) und 50 m (bei Nauheim) mächtig, im Bereich des Walldorfer Horsts 20 bis 40 m. In der Kelsterbacher Tiefscholle ist weithin ein einheitlicher Grundwasserleiter aus 100 bis 170 m pleistozänen und pliozänen Sanden und Kiesen entwickelt, unterlagert von miozänen Tonen. Nur nord-westlich von Sprendlingen trennt lokal toniges oberstes Pliozän einen quartären und einen liegenden pliozänen Grundwasserleiter.

An der Mainspitze und entlang des Grabenrandes nördlich von Langen sinkt die Mächtigkeit des Grundwasserleiters auf weniger als 10 m. Auch nord-östlich von Darmstadt nimmt seine Mächtigkeit an mehreren N-S streichenden Störungen ab (KÄRCHER 1987, HOPPE et al. 1996, EBHARDT et al. 2001).

Nach den Grundwassergleichen fließt das Grundwasser im oberen Stockwerk vorwiegend von E nach W, nur im N fließt es nach NW. Der Mündungsbereich von Rhein und Main, die „Mainspitze“, wird durch die westliche Haupttrandverwerfung vom zentralen Graben getrennt, wodurch sich eine uhrglasförmige Aufwölbung bildet („Bauschheimer Wasserberg“). Die generellen Verhältnisse werden kleinräumig durch die Absenktrichter der Gewinnungsanlagen überprägt. Daneben bilden die Grundwassergleichen den Einfluss von Fließgewässern ab, z.B. durch ein nördliches Vorspringen der Grundwassergleichen südlich von Heppenheim aufgrund der Infiltrationen aus der Weschnitz (REGIERUNGSPRÄSIDIUM DARMSTADT 1999).

## **5.5 Auswirkungen der hohen Grundwasserstände**

Im Jahr 2001 kam es zu den bislang höchsten Grundwasserständen im Hessischen Ried. Landwirtschaftlich genutzte Flächen, die überflutet oder oberflächennah durchweicht waren, konnten lange Zeit nicht befahren und bestellt werden. Die Vegetationsperiode war dort nur eingeschränkt nutzbar. Auf einigen dieser Flächen wurden Vernässungen beklagt, die es in den Nassjahren 1982/83 und 1988 nicht gegeben hatte, obwohl die Grundwasserstände bezogen auf NN nicht höher waren (Abb. 34). Es stellte sich heraus, dass die betroffenen Gebiete ehemalige, mäandrierende Wasserläufe von Alt-Rhein und Alt-Neckar sind, deren Schlingenform sich in der abgesenkten Geländemorphologie widerspiegelt (Abb. 33). Die Vegetation fällt dort durch feuchteliebende Arten auf, die durch die hohen Grundwasserstände sichtlich begünstigt werden. Wahrscheinlich ist es dort in den 90er Jahren zu Geländesetzungen gekommen, als bei besonders niedrigen Grundwasserständen organisches Material im Boden zersetzt wurde. Besonders betroffen von dem hohen Grundwasserstand sind viele Hausbesitzer, in deren Keller Wasser oder Feuchtigkeit eindrang. Es entstanden Vernässungsschäden an Gebäuden und deren Inventar. Durch Schimmelpilze folgten weitere Schäden und Nutzungseinschränkungen (PAPE 2003).



**Abb. 37:** Langjährige Grundwasserstandsentwicklung mit Konflikten (GERDES 2002).

Während zum Ausgleich von Setzrisschäden im Hessischen Ried ein Solidarfonds eingerichtet wurde, in den das Land Hessen und die Wasserwerke des Hessischen Rieds einbezahlt haben, bleiben die Hausbesitzer mit nassen Kellern weitgehend auf sich gestellt. Die Verantwortlichkeit bezüglich der Vernässung wird allein bei den Planern und nicht im Bereich des behördlichen Handelns gesehen. Die Verantwortlichkeit der Planer und Architekten auch für das Auftreten von Setzungsrisen wurde seinerzeit durch den Aufbau des Fonds nicht weiter hinterfragt bzw. gerichtlich geklärt, so dass ohne fachliche Unterscheidung der planerischen Voraussetzungen wie z.B. der Bau vor oder nach Einrichtung der Wasserwerke, alle Hausbesitzer mit grundwasserstandsbedingten Bauschäden finanziell entschädigt wurden. Hierbei ließen sich in unmittelbarer Nachbarschaft Häuser unterscheiden, die mit bautechnisch größerem, auf den Baugrund fachgerechten bezogenen Aufwand in setzungsempfindlicher Bauweise erstellt waren, gegenüber solchen, bei deren Errichtung offensichtlich an der Gründung gespart worden war. Bei den Kellervernässungen findet sich ein vergleichbares Bild: Häuser mit fachgerecht abgedichteten Kellern wurden neben Häusern errichtet, deren Keller in den jüngsten Nassperiode unter Wasser standen und nicht mehr genutzt werden konnten (GERDES 2002).

In der Zukunft soll der Grundwasserspiegel durch gezielte Infiltrationsmaßnahmen nahezu konstant gehalten werden, so dass größere Schwankungen, die zu weiteren Setzungsschäden an Bauwerken durch Absenkung oder Vernässungsschäden führen können, vermieden werden.



## 6 Ergebnisse

### 6.1 Proben Bitterfeld/Wolfen

Insgesamt wurden 40 Proben auf ihr Verhalten bei Grundwasseranstieg untersucht. 31 Proben stammen aus der Bohrung BVV 472 aus dem Raum Wolfen. Einige Versuche waren nicht rechnergestützt auswertbar, da die Datenübertragung aufgrund von Stromausfällen bzw. Hardwareproblemen nicht abgeschlossen war. Soweit die Daten handschriftlich vorhanden waren, wurden sie verwendet.

5 bzw. 4 Proben stammen aus der Bohrung BVV 624 bzw. BVV 0101 aus der Fuhne-Aue. Für die Untersuchung wurden unterschiedliche Bodenarten ausgewählt.

Ein Gesamtüberblick über die Proben, die Sieblinien und Daten befindet sich im Anhang.

Bei einigen Proben wurde der geeignete Korndurchmesser für Untersuchungen im Ödometer überschritten, so dass kein oder nur wenig Probenmaterial zur Verfügung stand. Vereinzelt waren die Mächtigkeiten in den Linern wesentlich geringer als in den Bohrprotokollen angegeben.

Es wurden zweistufige Be- und Entlastungen gefahren. In den Auswertungen werden diese als Erst- und Wiederbelastung in Anlehnung an PRINZ (1997) bezeichnet. Sie geben nicht die Zyklen der Vorbelastung durch zyklische Eisauflasten wieder, sondern die im Labor gewählte Anzahl der Stufen.

#### 6.1.1 Probe BVV 472\_11\_23 (Oberer Bitterfelder Glimmersand)

Direkt nach der Entnahme der Proben aus dem Liner wurden die bodenmechanischen Kennwerte der Probe bestimmt.

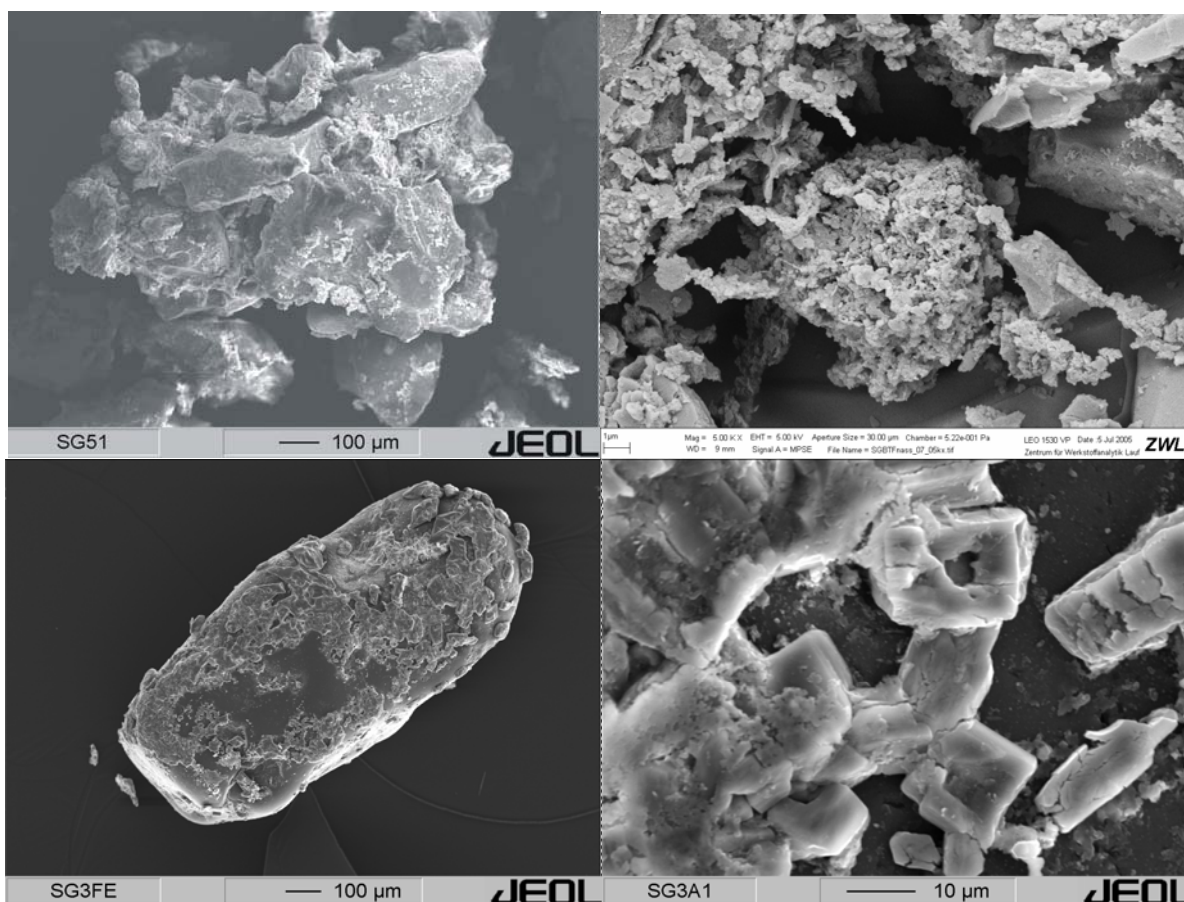
In der Korngrößenverteilung der Proben des Oberen Bitterfelder Glimmersandes dominiert die Sand-Fraktion vor dem Schluff- und Tonanteil. Der Feinkiesanteil ist mit 0,10% gering (Anhang Sieblinie Abb. A1).

**Tab. 3:** Korngrößenverteilung der Probe BVV 472\_11\_23 (Oberen Bitterfelder Glimmersand).

Probe	Teufe [m]	Kornverteilung [Masse-%]				
		gS	mS	fS	Σ S	U/T
472_11_23	23	0,27	66,54	29,13	95,84	4,06

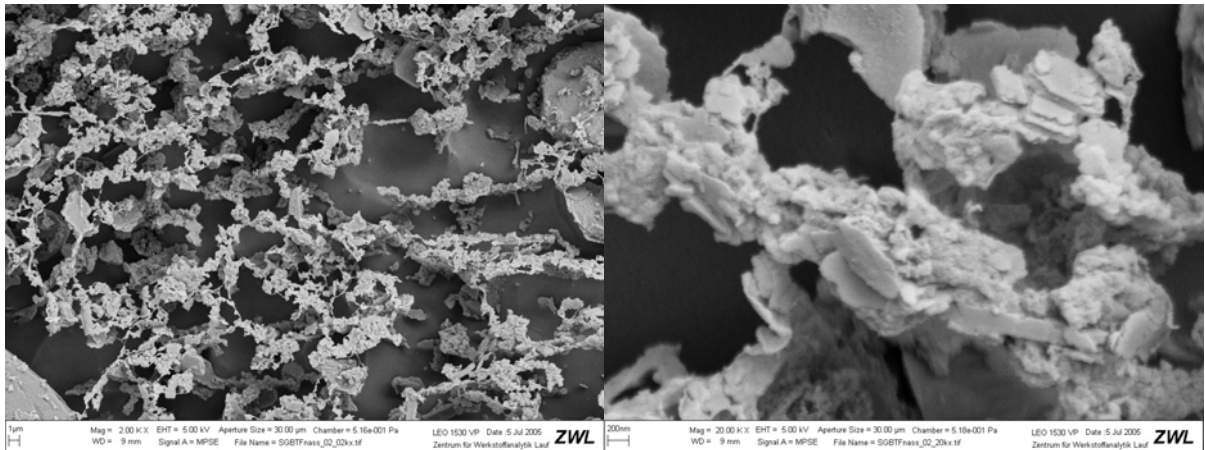
Nach DIN 18196 handelt es sich um einen feinsandigen Mittelsand, schwach grobsandig (mS, fs, gs'). Die Korndichte nach DIN 18124 ist 2,61 g/cm<sup>3</sup>. Der natürliche Wassergehalt der Probe betrug 22,48%. Die Trockendichte variiert von 1,54 g/cm<sup>3</sup> bis 1,70 g/cm<sup>3</sup>. Die natürliche Porenzahl variiert zwischen 0,537 und 0,698. Der Sättigungsgrad ist 0,90. Mit einem Glühverlust (V<sub>gl</sub>) nach DIN 18128 von 2,26% liegt die Probe unter den üblichen Werten von vergleichbaren sedimentären Einheiten ostdeutscher Braunkohlenlagerstätten, bei denen tertiäre Mittelsande im Durchschnitt einen V<sub>gl</sub> von 3% bis 5% haben (FÖRSTER 1996). Die organische Substanz ist im untersuchten Oberen Bitterfelder Glimmersand sehr fein verteilt. Ihr Anteil in Form von kohligen Stücken mit einem Durchmesser von bis zu 0,5 mm schwankte in den Proben zwischen 0,5 und 2%. Die EDX-Analyse des REM weist in den Zementierungen zwischen den einzelnen Körnern der Aggregate sehr viel Kohlenstoff nach (Abb. 40). Diese Anreicherung partikulärer organischer Substanz führt zu einer Reduzierung der Packungsdichte der mineralischen Bestandteile.

Das Gefüge des Oberen Bitterfelder Glimmersandes ist ein Einzelkorngefüge mit darin eingebetteten Aggregaten. Die Sandphase setzt sich überwiegend aus Mineralkörnern der Mittel- und Feinsandfraktion zusammen, die durch Brücken zusammengehalten werden, welche von Feinmaterial gebildet werden. Diese Festkörperbrücken (interpartikulare Bindungen) wurden in allen untersuchten erdfeuchten und trockenen Proben des Oberen Bitterfelder Glimmersandes mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops mit und ohne Kryotransfersystem (REM/Kryo-REM) nachgewiesen (Abb. 38 a-d).

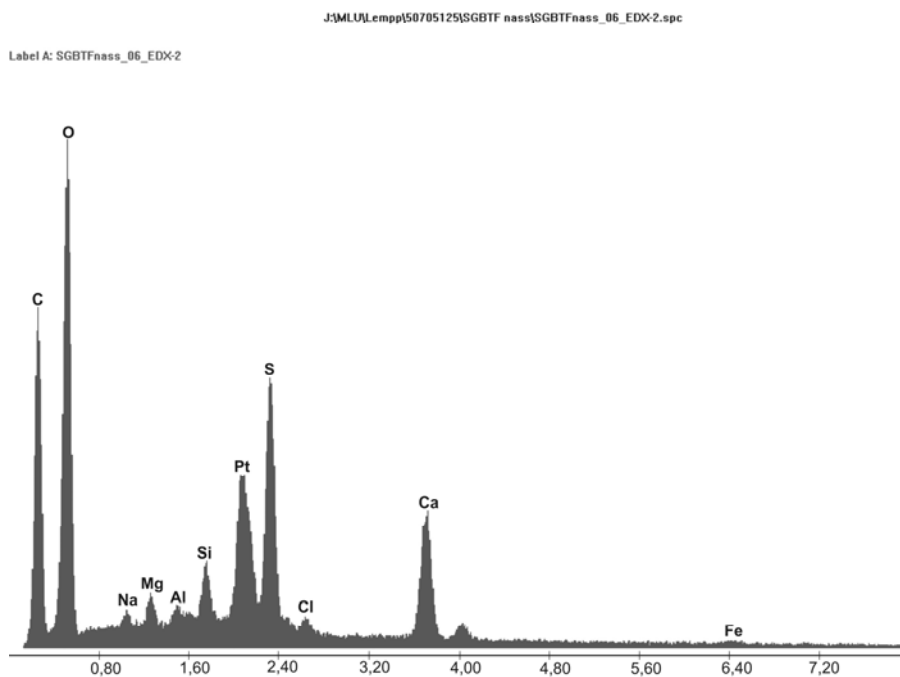


**Abb. 38 a-d:** REM und Kryo-REM-Aufnahmen der Probe BVV 472\_11\_23. a (oben links): Verkittetes Aggregat des Oberen Bitterfelder Glimmersandes (100µm). b (oben rechts): Aggregat aus Feinmaterial zwischen Sandkörnern (1µm). c (unten links): Mit Gips überzogenes Quarzkorn (100µm). d (unten rechts): Vergrößerung der Gipskristalle auf Kornoberfläche aus c (10µm).

Die Brückenbildungen konnten mit dem EDX-Elementmapping als Gips und Fe-, Al-, O-, Si-Anreicherungen bzw. Schichtsilikate nachgewiesen werden. Die Aufnahmen unter dem REM zeigen eine signifikante Anreicherung von Al und Fe in den Kornmenisken. Dabei ist die Menge der Substanz gering, die eine Zementation bewirkten. Ihre Wirkung kommt wahrscheinlich dadurch zustande, dass sie sich an den Kornkontakten konzentriert und individuelle Körner miteinander verbindet (Brückenbildung). Aus den EDX-Untersuchungen konnten jeweilige spezifische Zusammensetzungen und Anteile der unterschiedlichen Zementierungen nicht quantifiziert werden.



**Abb. 39 a und b:** Kryo-REM-Aufnahme der Probe BVV 472\_11\_23. a (rechts): Kohlenstoff-, Silikat- und gipsreiche Brückenbildungen zwischen den Körnern einzelner Aggregate. Die dunkle Phase im Hintergrund ist Wasser (1µm). b (links) Vergrößerung der Brücken (200nm).

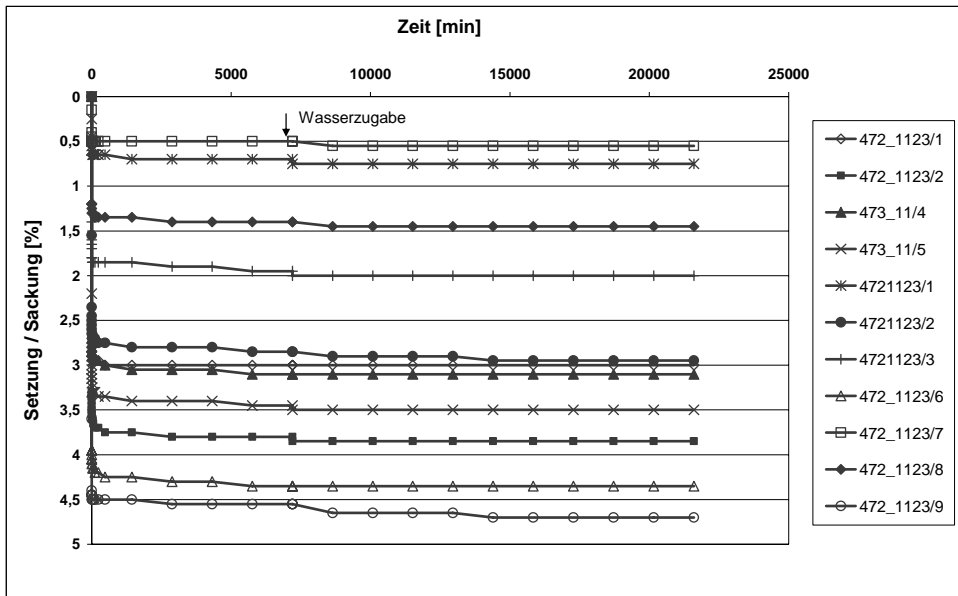


**Abb. 40:** EDX-Analyse einer Zementierung der Probe BVV 472\_11\_23.

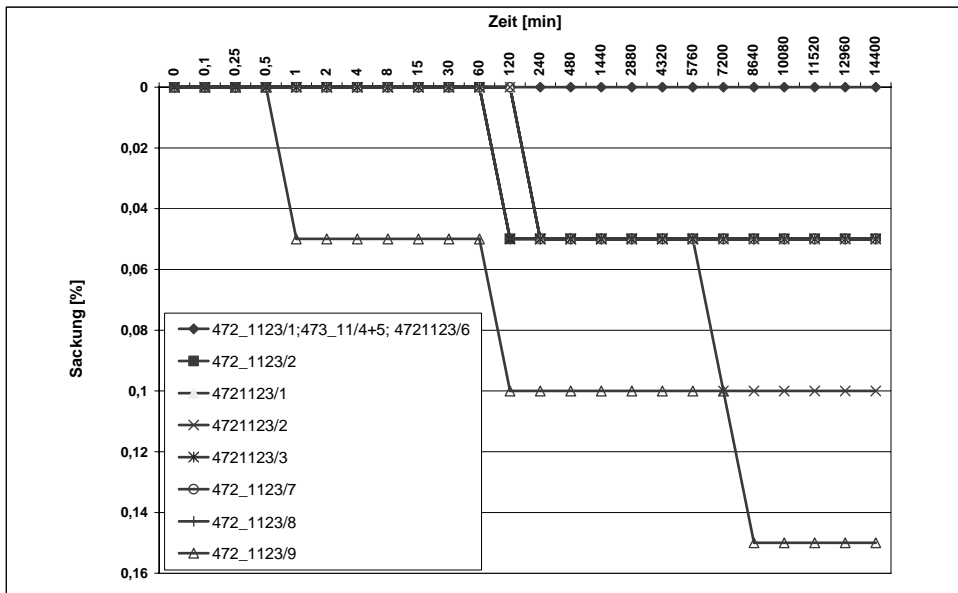
Die REM-Untersuchungen zeigten, dass die Aggregate nicht nur durch Gips verkittet waren (Abb. 38 a und b), sondern auch dass die Körner der Aggregate mit einem dünnen Film aus Gips überzogen waren (Abb. 38 c und d). Die Mineralkörner der Mittelsand-Fraktion sind gut bis kantengerundet, während die Körner der Feinsand- und Schluff-Fraktion kantig sind (Abb. 38 a). In den Kryo-REM- und REM-Aufnahmen sind deutlich größere Poren zu erkennen, die durch die Feststoffbrücken gebildet werden. Das Porengefüge kann in Inter-Partikular- und Inter-Aggregat-Poren sowie Mikroporen im Inneren der Aggregate (Intra-Aggregat-Poren) charakterisiert werden (Abb. 39 a und b).

Insgesamt wurden 31 Proben des Oberen Bitterfelder Glimmersandes untersucht, von denen 16 rechnerisch nicht auswertbar waren. Die Proben wurden bei einer Auflast von 460 kN/m<sup>2</sup> entsprechend der natürlichen Auflastspannung in 23 m

Tiefe untersucht. Im Zeit-Setzungsverlauf wurden zwei Sackungsphasen beobachtet. Die im Labormaßstab nachgewiesenen relativen Sackungen bei Proben des Oberen Bitterfelder Glimmersandes betragen bei 20°C durchschnittlich 0,05 bis 0,15 % der Schichtdicke abhängig vom Einbauwassergehalt, der im Durchschnitt bei 11,47% lag (Abb. 41 und 42). Die ersten Sackungen setzten nach 2 bis 3 Stunden ein, die zweite Phase setzte nach 5 bzw. nach 7 Tagen ein. Der absolute Sackungsbetrag beträgt 1 bis 1,5 mm/m bei 20°C.



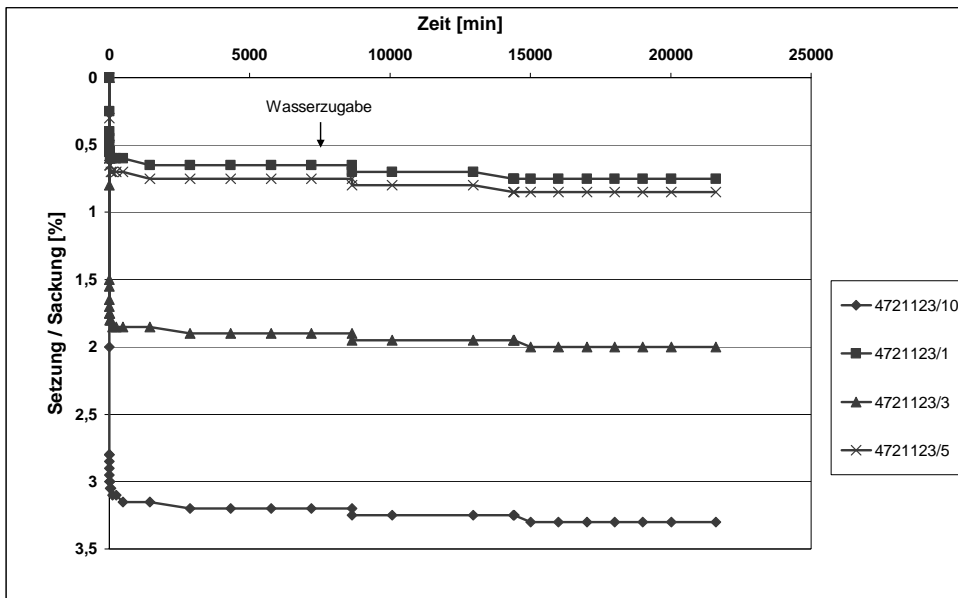
**Abb. 41:** Zeit-Setzungsdiagramm der Probe BVV 472\_11\_23 bei 20°C. Die Proben stammen aus 23 m Tiefe und wurden mit 460 kN/m<sup>2</sup> belastet.



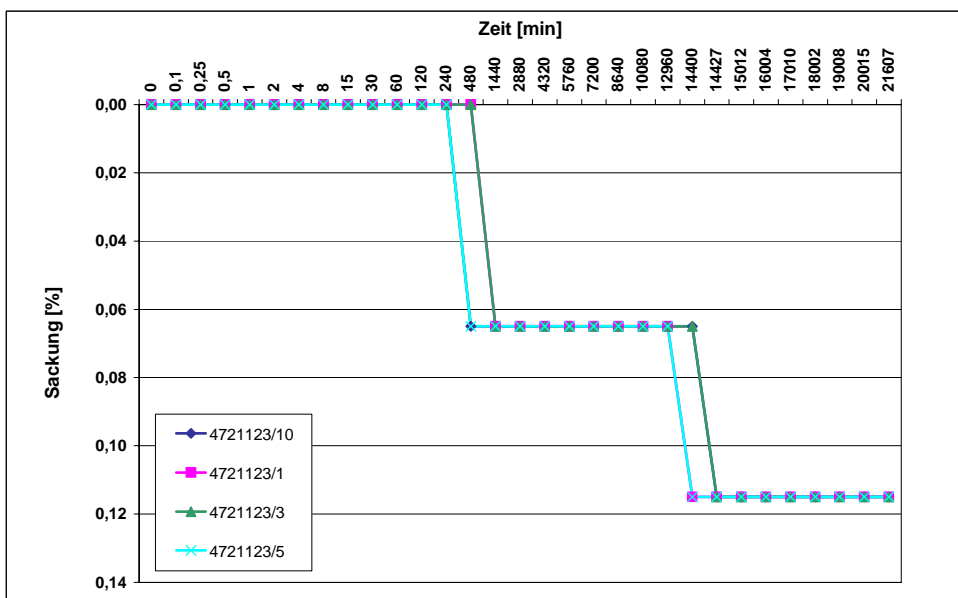
**Abb. 42:** Im Drucksetzungsversuch beobachtete Sackungen bei 20°C der Probe BVV 472\_11\_23 (Oberer Bitterfelder Glimmersand) aus Abb. 41 nach Wassierzugabe.

10 Proben des gleichen Materials wurden dann bei durchschnittlich 10°C und einer Auflast von 460 kN/m<sup>2</sup> im KD-Gerät untersucht (Abb. 43). Die Sackungen setzten um den Faktor 4 - 10 später ein als bei 20°C. Die relativen Sackungen

betragen zwischen 0,065 bis 0,115% der Schichtdicke bei einem Einbauwassergehalt von durchschnittlich 10,12% (Abb. 44). Bei 10°C setzten die ersten Sackungen nach 8 bis 24 Stunden ein, während die zweite Sackungsphase nach 9 bis 10 Tagen einsetzte. Der absolute Sackungsbetrag beträgt 1,15 mm/m bei 10°C. Nach 15 Tagen waren die Sackungen jedoch noch nicht abgeschlossen. In zwei Langzeitversuchen über 21 Tage, betragen die relativen Sackungen insgesamt 0,165% der Schichtdicke.



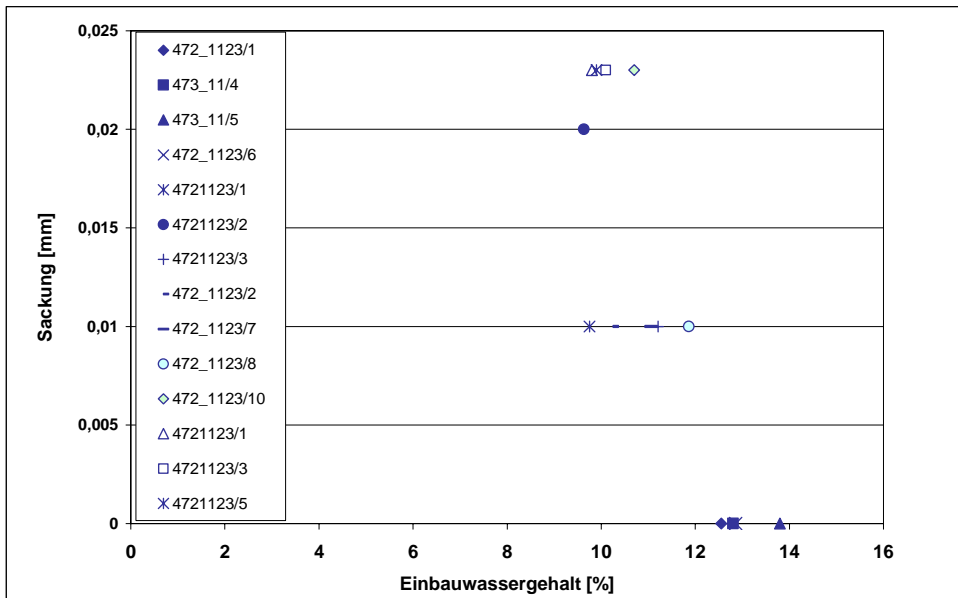
**Abb. 43:** Zeit-Setzungsdiagramm der Probe BVV 472\_11\_23 bei 10°C. Die Proben stammen aus 23 m Tiefe und wurden mit 460 kN/m<sup>2</sup> belastet.



**Abb. 44:** Im Drucksetzungsversuch beobachtete Sackungen bei 10°C der Probe BVV 472\_11\_23 (Oberer Bitterfelder Glimmersand) aus Abb. 43 nach Wasserzugabe.

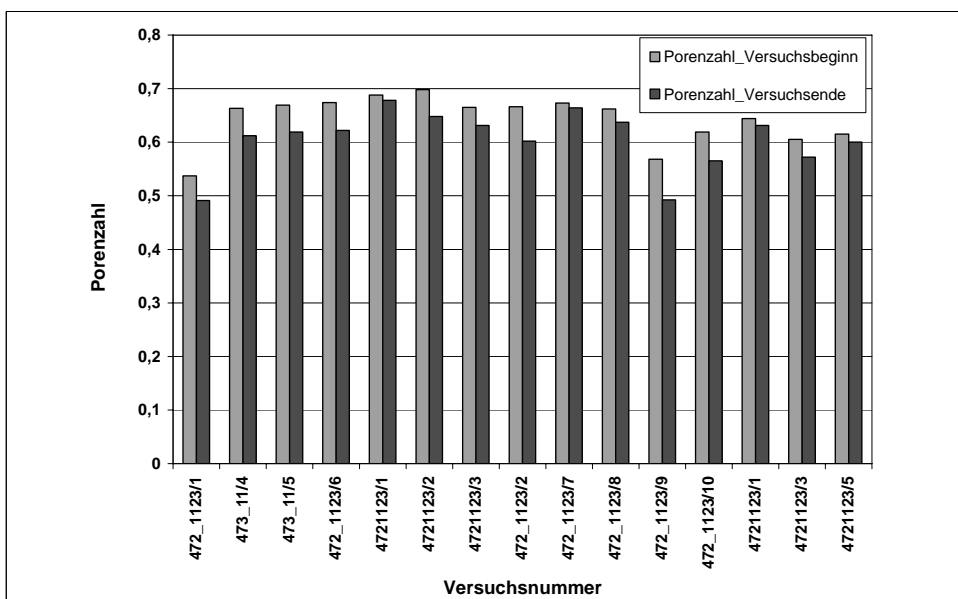
Die ermittelten relativen Sackungsbeträge sind gering. Sie liegen im Bereich der Messgenauigkeit der Messuhr. Ein systematischer Messfehler wird jedoch

aufgrund der guten Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und wegen der deutlich zu erkennenden Temperaturabhängigkeit ausgeschlossen.  
 Eine eindeutige Abhängigkeit des Einbauwassergehaltes und dem absoluten Sackungsmaß kann weder bei 10°C und 20°C festgestellt werden (Abb. 45). Es treten keine Sackungen über einem Einbauwassergehalt von 12 % auf. Der sich nach der Sackung einstellende Sättigungsgrad lag zwischen 80 und 100% (Wassergehalt: 20,2 bis 25,08%).



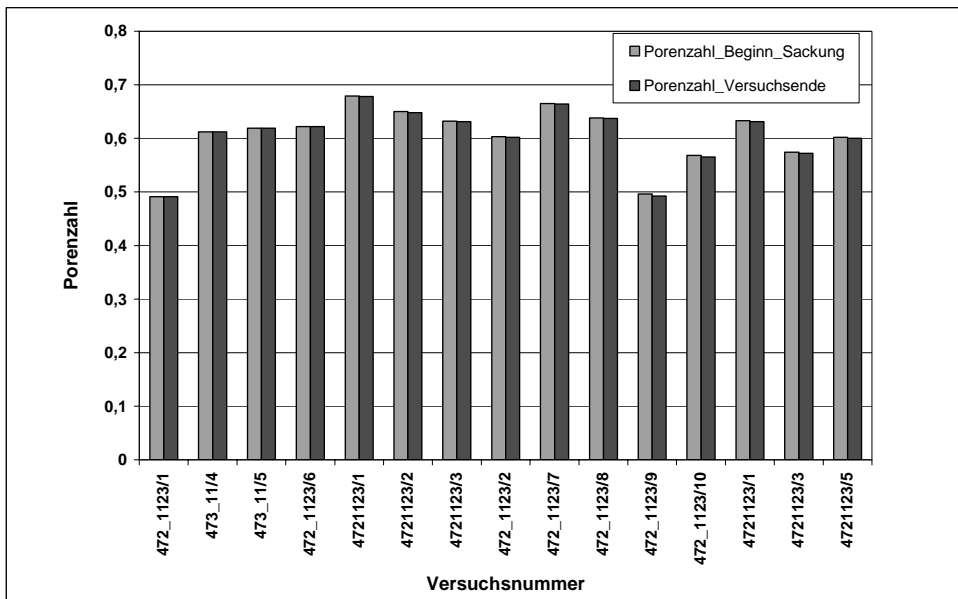
**Abb. 45:** Abhängigkeit des absoluten Sackungsbetrages vom Einbauwassergehalt der Probe BVV 472\_11\_23.

Die Änderung der Porenzahl und des Steifemoduls jeweils zu Beginn und am Ende eines Versuchs sind in Abb. 46 bis 48 dargestellt.

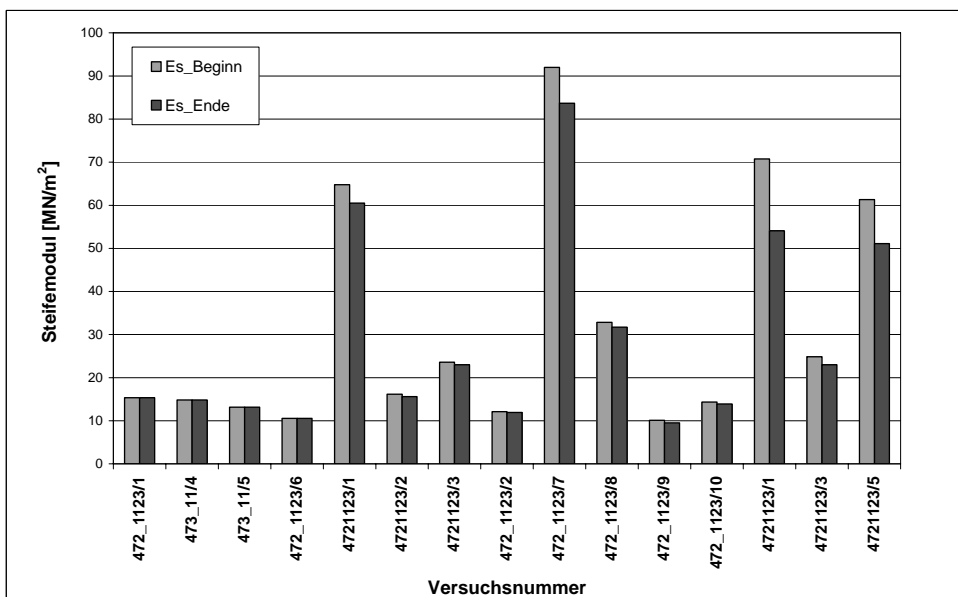


**Abb. 46:** Änderung der Porenzahl der Probe BVV 472\_11\_23 zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.

Die Porenzahl verringert sich in allen Versuchen. Die relative Änderung liegt zwischen 1,34% bis 13,38% (Abb. 46). Im Vergleich dazu ist die Änderung der Porenzahl von Beginn des Sackungsversuches bis zum Versuchsende geringer und ändert sich nicht mehr bei allen Versuchen. Die relative Änderung liegt nur noch zwischen 0% und 0,81% (Abb. 47). Die Porenzahl zu Beginn der Sackung ist die Porenzahl, die sich nach Konsolidation zu Beginn des Versuches der Probe ergibt. Die Konsolidation dauerte so lange bis alle Setzungen abgeklungen waren. Danach fand keine Entlastung statt, sondern der Sackungsversuch wurde direkt gestartet.

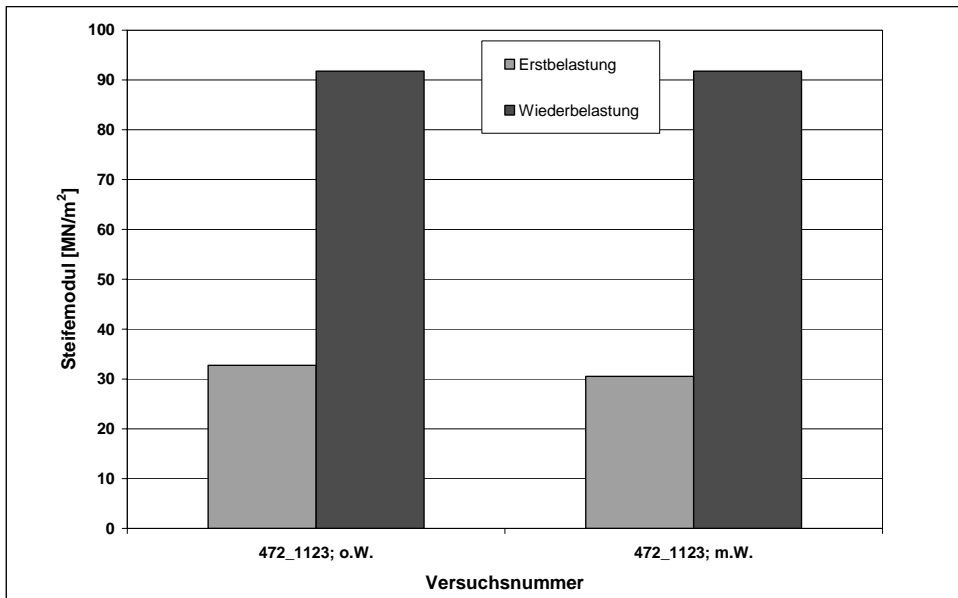


**Abb. 47:** Änderung der Porenzahl der Probe BVV 472\_11\_23 von Beginn des Sackungsversuches bis Versuchsende.



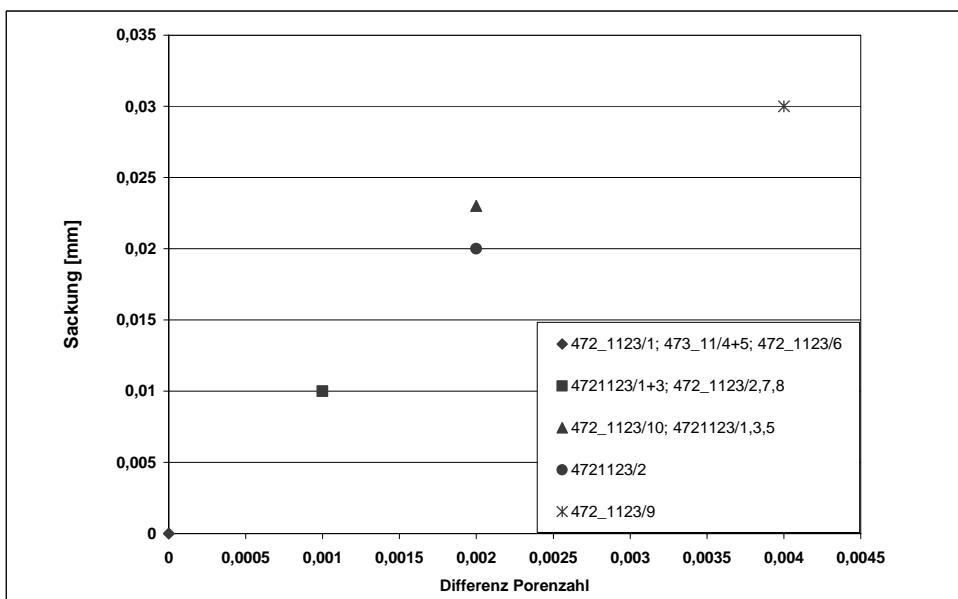
**Abb. 48:** Änderung des Steifemoduls  $E_s$  der Probe BVV 472\_11\_23 zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.

Der Steifemodul  $E_s$  ist entsprechend der hohen Setzungsraten zu Beginn der Konsolidation teilweise sehr niedrig (Abb. 41 und 44). Er verringert sich nicht bei allen Versuchen. Die relative Änderung liegt zwischen 0% und 23,53% (Abb. 48). Im Drucksetzungsversuch ohne Wasser liegt der Wert für den Steifemodul bei der Erstbelastung bei  $32,71 \text{ MN/m}^2$  und bei der Wiederbelastung bei  $91,8 \text{ MN/m}^2$ . Im Drucksetzungsversuch mit Wasser liegt der Erstbelastungswert bei  $30,50 \text{ MN/m}^2$  und der Wiederbelastungswert bei  $91,8 \text{ MN/m}^2$  (Abb. 49).



**Abb. 49:** Erst- und Wiederbelastungswerte mit und ohne Wasser der Probe BVV 472\_11\_23.

Die Differenz der Porenzahl zu Beginn des Sackungsversuches und der absolute Sackungsbetrag korrelieren sehr gut. Je größer die Änderung der Porenzahl desto höher ist auch der Sackungsbetrag (Abb. 50).



**Abb. 50:** Verhältnis der Differenz der Porenzahl und der absoluten Sackung der Probe BVV 472\_11\_23 von Beginn des Sackungsversuchs bis Versuchsende.



Mittels der EDX-Analyse im REM konnte der Gehalt an Gips in den Festkörperbrücken nur qualitativ nachgewiesen werden. Mit Hilfe der Ionenchromatographie wurde der quantitative Nachweis des Gipsgehaltes, wie in Kapitel Methodik unter Ionenchromatographie beschrieben, durchgeführt. Mit der Ionenchromatographie wurden die folgenden Ionenkonzentrationen bestimmt:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  und  $\text{SO}_4^{2-}$ . Die Bodenprobe 472\_1123nass (Tab. 4a) direkt aus dem Liner wies folgende Konzentrationen auf:

**Tab. 4a:** Konzentrationen [mg/l] der Probe 47\_1123nass.

<b>Probe 472_1123nass, 21.07.05</b>						
<b>pH-Wert 4-5</b>						
	<b>Kationen</b>				<b>Anionen</b>	
	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$
<b>Konzentration [mg/l]</b>	1,657	2,730	17,060	25,495	2,213	30,268
<b>Probe 472_1123nass, 28.07.05</b>						
<b>Konzentration [mg/l]</b>	0,842	1,170	6,040	8,750	0,777	11,408
<b>Mindestgehalt in 100g Boden [mg]</b>	2,499	0,390	2,310	34,245	2,990	41,676

Die Probe 472\_1123trocken (Tab. 4b) war eine bei 105°C getrocknete Probe aus einem Sackungsversuch. Sie wies folgende Konzentrationen auf:

**Tab. 4b:** Konzentrationen [mg/l] der Probe 47\_1123trocken .

<b>Probe 472_1123trocken, 21.07.05</b>						
<b>pH-Wert 4,5</b>						
	<b>Kationen</b>				<b>Anionen</b>	
	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$
<b>Konzentration [mg/l]</b>	18,63	3,140	13,160	108,550	18,570	150,050
<b>Probe 472_1123trocken, 28.07.05</b>						
<b>Konzentration [mg/l]</b>	8,380	1,310	5,080	41,930	6,500	54,37
<b>Mindestgehalt in 100g Boden [mg]</b>	2,674	0,445	1,824	15,048	2,507	20,442

Der Hydrogenkarbonat-Gehalt in beiden Lösungen wurde mit Hilfe des m-Wertes durch Titration bestimmt. Die Probe 472\_1123nass enthält 0,33 mg/l  $\text{HCO}_3^-$ , die Probe 472\_1123trocken enthält 0,21 mg/l  $\text{HCO}_3^-$ .

Als mögliche einfache Verbindungen, die wahrscheinlich aus dem Boden gelöst wurden, kommen Anhydrit, Gips, Halit, Dolomit und Calcit in Frage. Da in den EDX-Analysen des REM nur Gips und vereinzelt Halit nachgewiesen wurden, werden nur dafür die Gehalte in 100 g Boden errechnet. Aus der Ionenchromatographie ergibt sich der Mindestgehalt von  $\text{CaSO}_4$ , unter der Annahme, dass alles  $\text{SO}_4^{2-}$  als  $\text{CaSO}_4$  vorliegt, zu mindestens 59,495 mg  $\text{CaSO}_4$  pro 100 g Boden. Hierbei ergibt sich ein Ca-Überschuss, welches aus Karbonaten oder dem Grundwasser stammen könnte.

In der geochemischen Analyse (Anhang Tab. A5) der Bodenprobe wurde für CaO eine Konzentration von 0,06% gemessen. Unter der Annahme, dass der gesamte Ca-Gehalt ebenfalls als  $\text{CaSO}_4$  vorliegt, ergeben sich maximal 146,06 mg  $\text{CaSO}_4$  pro 100 g Boden. Hierbei ergibt sich ein Schwefel-Überschuss, der sehr wahrscheinlich Fe-Sulfiden (Pyrit, Markasit) zuzuordnen ist. Der  $\text{CaSO}_4$ -Gehalt ist

somit zwischen ca. 60 und ca. 145 mg pro 100 g Boden eingegrenzt. Unter der Annahme, dass alles  $\text{Cl}^-$  als NaCl gebunden war, ergibt sich ein Gehalt von 4,93 mg NaCl pro 100 g Boden. Hierbei ergibt sich ein Überschuss an  $\text{Na}^+$ , das aus Karbonaten, Tonmineralen oder dem Grundwasser stammen könnte. Aus der geochemischen Analyse der Bodenprobe (Anhang, Tab. A5) wurde für  $\text{Na}_2\text{O}$  eine Konzentration von 0,02% gemessen. Unter der Annahme, dass der gesamte Natriumgehalt als NaCl vorliegt, ergeben sich maximal 37,725 mg NaCl pro 100 g Boden. Der NaCl-Gehalt ist somit zwischen ca. 5 und ca. 37 mg pro 100 g Boden eingegrenzt. Der Nitrat-Gehalt lag unterhalb der Nachweisgrenze von 1 mg/l, was den möglichen Einfluss von Düngemitteln ausschließt.

### 6.1.2 Probe BVV 624, 5-6 m (Niederterrasse)

Direkt nach der Entnahme der Proben aus dem Liner wurden die bodenmechanischen Kennwerte der Probe bestimmt. In der Korngrößenverteilung der Proben der Niederterrasse dominiert die Sandfraktion vor dem Schluff- und Tonanteil (11%). Der Mittel- und Feinkiesanteil liegt jeweils bei 2 Masse-% (Anhang Sieblinie Abb. A2).

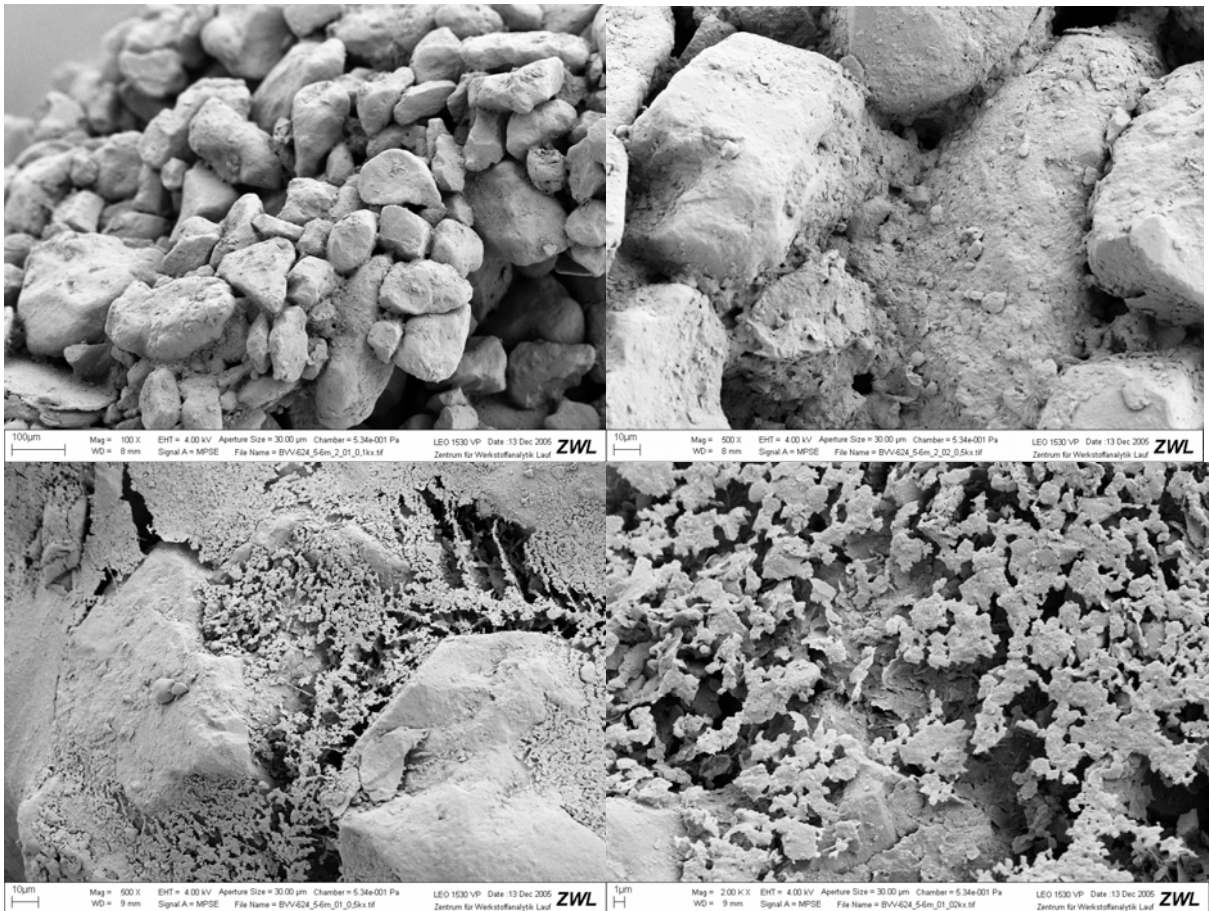
**Tab. 5:** Korngrößenverteilung der Probe BVV 624\_5-6m (Niederterrasse).

Probe	Teufe [m]	Kornverteilung [Masse-%]								
		gS	mS	fS	$\Sigma S$	gU	mU	fU	$\Sigma U$	T
BVV 624	5-5,75	3,59	25,54	53,01	82,14	5,07	0,93	0,76	6,76	4,44

Nach DIN 18196 handelt es sich um einen Sand, schwach kiesig (S, g'). Die Korndichte nach DIN 18124 ist  $2,66 \text{ g/cm}^3$ . Der natürliche Wassergehalt der Probe betrug 17,53%. Die Trockendichte variiert von  $1,68 \text{ g/cm}^3$  bis  $1,78 \text{ g/cm}^3$ . Die natürliche Porenzahl variiert zwischen 0,538 und 0,631. Der Sättigungsgrad ist 0,83. Der  $V_{gl}$  nach DIN 18128 ist 0,44%.

Das Gefüge der Probe BVV 624\_5-6m weist hauptsächlich eine Sandphase mit einem Einzelkorngefüge und darin eingebetteten Aggregaten auf. Die Sandphase setzt sich überwiegend aus Mineralkörnern der Mittel- und Feinsandfraktion zusammen, die durch Brücken zusammengehalten werden, welche von Feinmaterial gebildet werden. Diese Festkörperbrücken (interpartikuläre Bindungen) wurden in allen untersuchten erdfeuchten und trockenen Proben der Niederterrasse mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops mit Kryotransfersystem (Kryo-REM) nachgewiesen (Abb. 51 a-d).

Die einzelnen Körner der Sandphase sind teilweise vollständig von Feinmaterial umhüllt. Die Hüllen setzen sich aus Feinsand, Schluff und Ton zusammen. Während die Mineralkörner der Grob- und Mittelsandfraktion angerundet bis gut gerundet sind, ist die Grundform der Feinsand- bzw. Grobschluffkörner kantig. Die Kornverteilung der Aggregate ist mit der sie umgebenden Sandmatrix identisch.

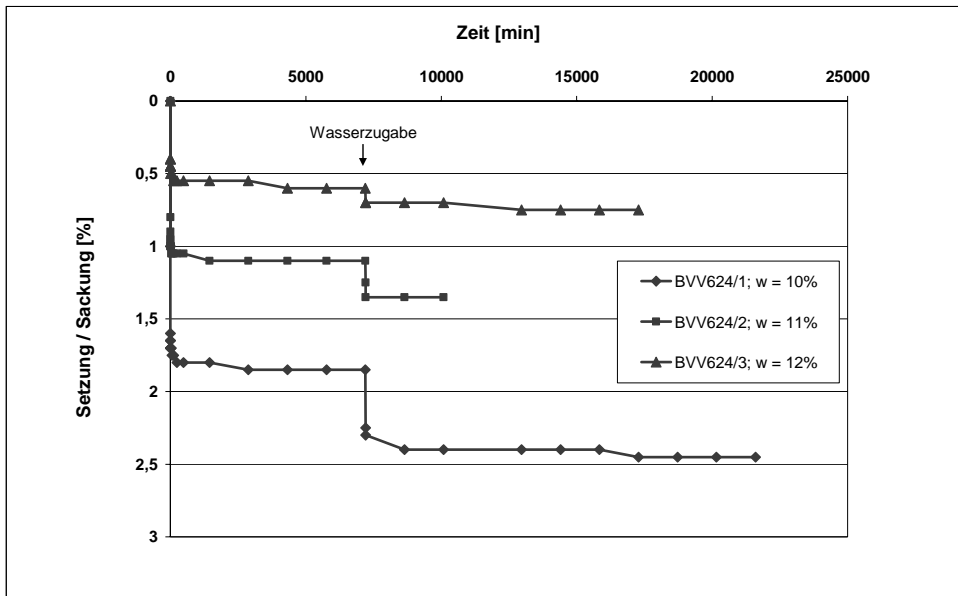


**Abb. 51 a-d:** Kryo-REM-Aufnahmen der Probe BVV 624\_5-6m.

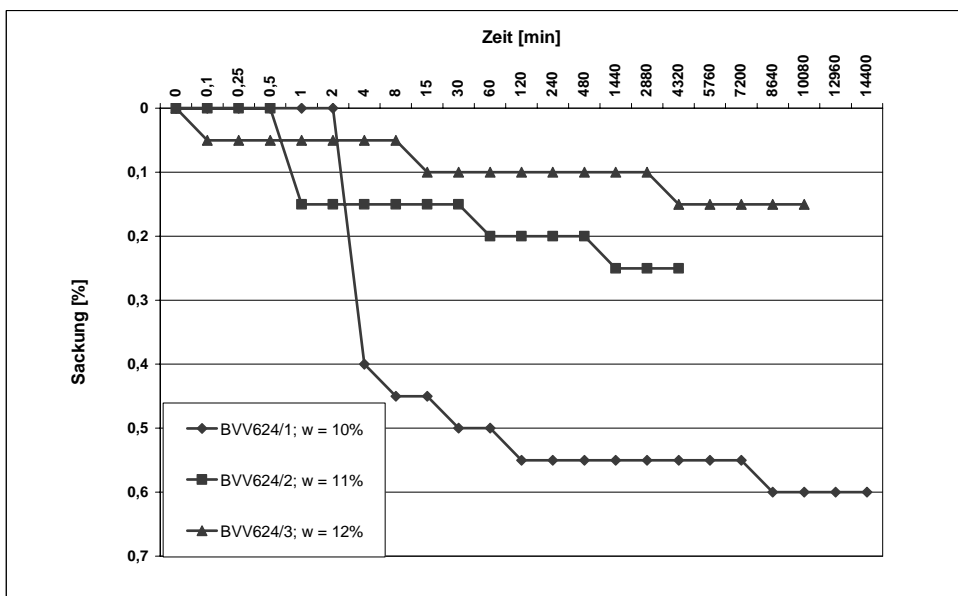
a (links oben): Aggregat aus Sandkörnern mit Brücken und Hüllen der Feinfraktion zwischen und auf den Körnern (100µm). b (rechts oben): Deutlich erkennbare Hülle aus Feinmaterial (Feinsand, Schluff, Ton) auf dem Korn in der rechten Bildmitte (10µm). c (links unten): Brücken aus Feinmaterial zwischen den Körnern (10µm). d (rechts unten): Vergrößerung der Brücken zwischen den Körnern mit deutlich erkennbarer Einregelung der Plättchen nach Sublimation des Wassers (1µm).

In den Kryo-REM-Aufnahmen sind deutlich größere Poren zu erkennen, die durch die Feststoffbrücken gebildet werden. Das Porengefüge kann in Inter-Partikular- und Inter-Aggregat-Poren sowie Mikroporen im Inneren der Aggregate (Intra-Aggregat-Poren) charakterisiert werden.

Insgesamt wurden 3 Proben im KD-Versuch bei einer Auflast von 115 kN/m<sup>2</sup> entsprechend der natürlichen Auflastspannung in 5,50 m Tiefe untersucht. Im Zeit-Setzungsverlauf wurden drei bis vier Sackungsphasen beobachtet. Die relativen Sackungen betragen bei 10°C durchschnittlich 0,05 bis 0,6 % der Schichtdicke bei einem Einbauwassergehalt von durchschnittlich 9,3% (Abb. 52 und 53).



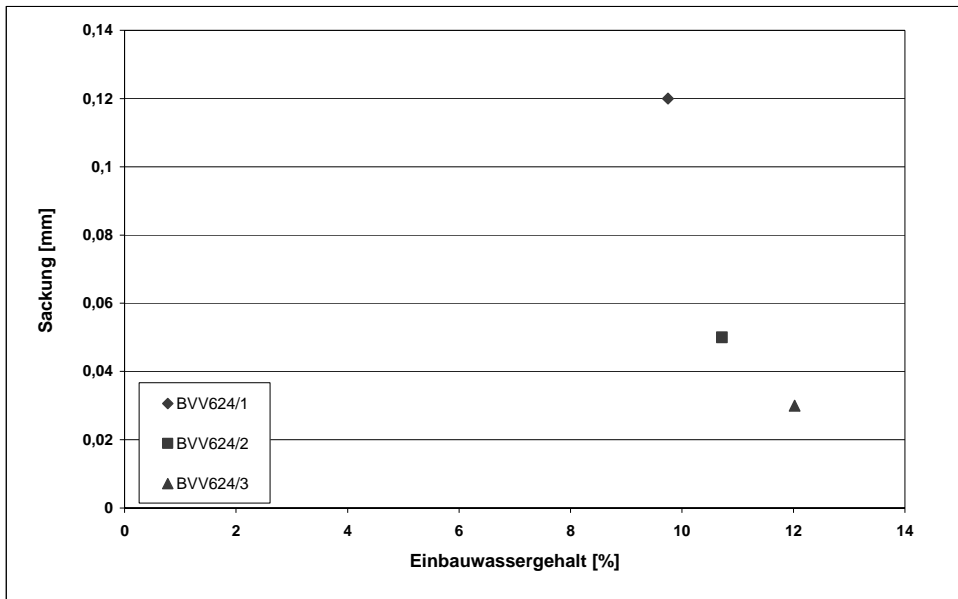
**Abb. 52:** Zeit-Setzungsdiagramm der Probe BVV 624\_5-6m bei 10°C. Die Proben stammen aus 5,50 m Tiefe und wurden mit 115 kN/m<sup>2</sup> belastet.



**Abb. 53:** Im Drucksetzungsversuch beobachtete Sackungen der Probe BVV 624 aus Abb. 52 nach Wassergabe.

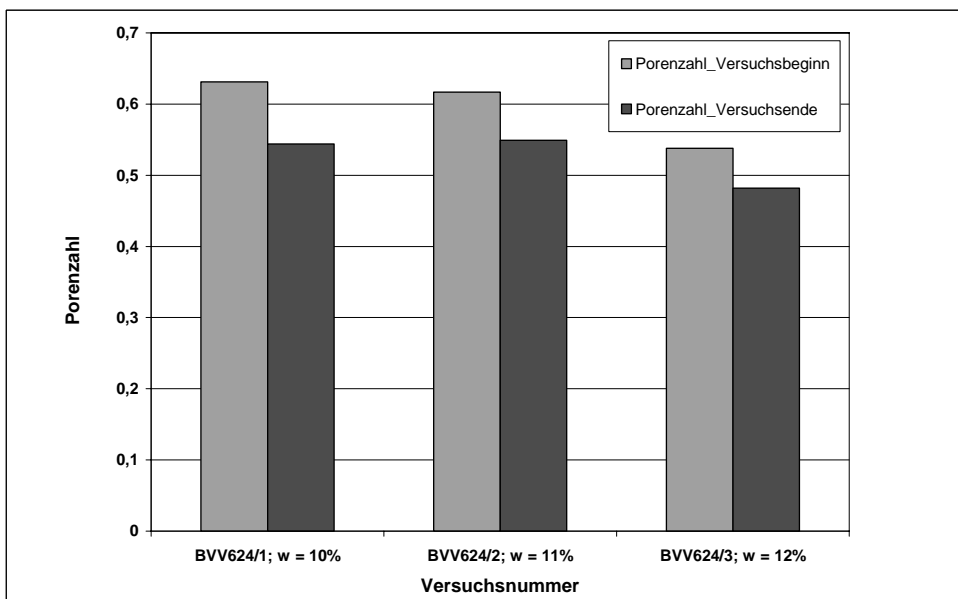
Die ersten Sackungen setzten frühestens 1 s (BVV 624\_3), 1 min (BVV 624\_2) bzw. 4 min (BVV 624\_1) nach Flutung ein. Die zweite Sackungsphase setzt nach 6 min (BVV 624\_1), 8 min (BVV 624\_3) und 30 min (BVV 624\_2) ein. Die dritte Sackungsphase setzt bei Probe BVV 624\_2 nach 8 Stunden, bei Probe BVV 624\_3 erst nach 2 Tagen und bei Probe BVV 624\_1 nach 3 Tagen ein. Bei der Probe BVV 624\_1 setzt die vierte Sackung nach insgesamt etwas über 4 Tagen ein. Der absolute Sackungsbetrag reicht von 1,5 bis 6 mm/m bei 10°C.

Je geringer der Wassergehalt, desto größer fielen die absoluten Sackungen aus (Abb. 54). Der sich nach der Sackung einstellende Sättigungsgrad lag zwischen 63 und 99% (Wassergehalt: 13,36 bis 20,97%).



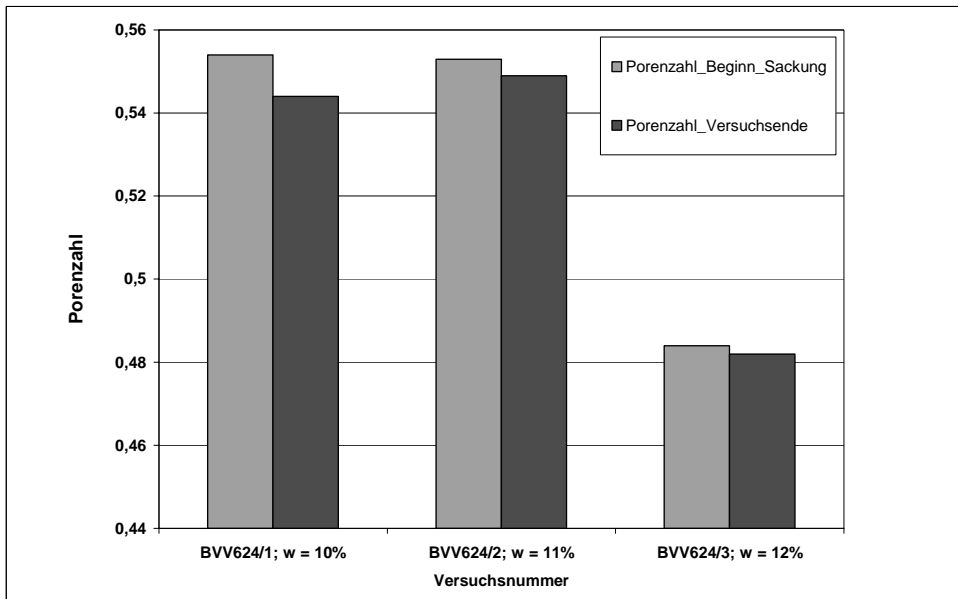
**Abb. 54:** Abhängigkeit des absoluten Sackungsmaßes vom Einbauwassergehalt der Probe BVV 624\_5-6m.

Die Änderung der Porenzahl und des Steifemoduls jeweils zu Beginn und am Ende eines Versuchs sind in Abb. 55 bis 57 dargestellt.

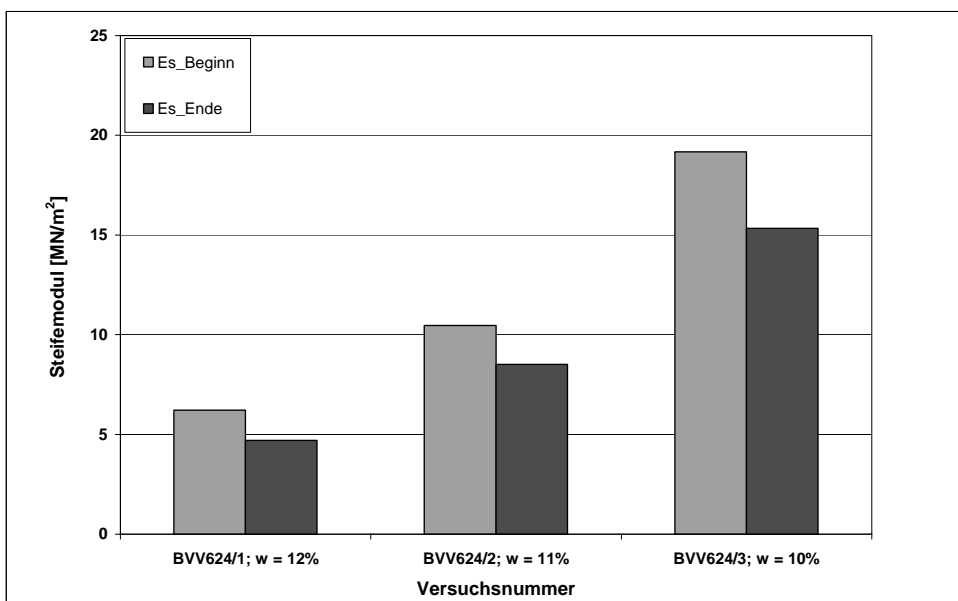


**Abb. 55:** Änderung der Porenzahl der Probe BVV 624\_5-6m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.

Die Porenzahl verringert sich bei allen Versuchs. Die relative Änderung liegt zwischen 10,41% und 13,79% (Abb. 55). Im Vergleich dazu ist die Änderung der Porenzahl vom Beginn des Sackungsversuches bis zum Versuchsende geringer. Die relative Änderung liegt nur noch zwischen 0,41% und 1,81% (Abb. 56). Die Porenzahl zu Beginn der Sackung ist die Porenzahl, die sich nach Konsolidation zu Beginn des Versuches der Probe ergibt. Die Konsolidation dauerte so lange bis alle Setzungen abgeklungen waren. Danach fand keine Entlastung statt, sondern der Sackungsversuch wurde direkt gestartet.



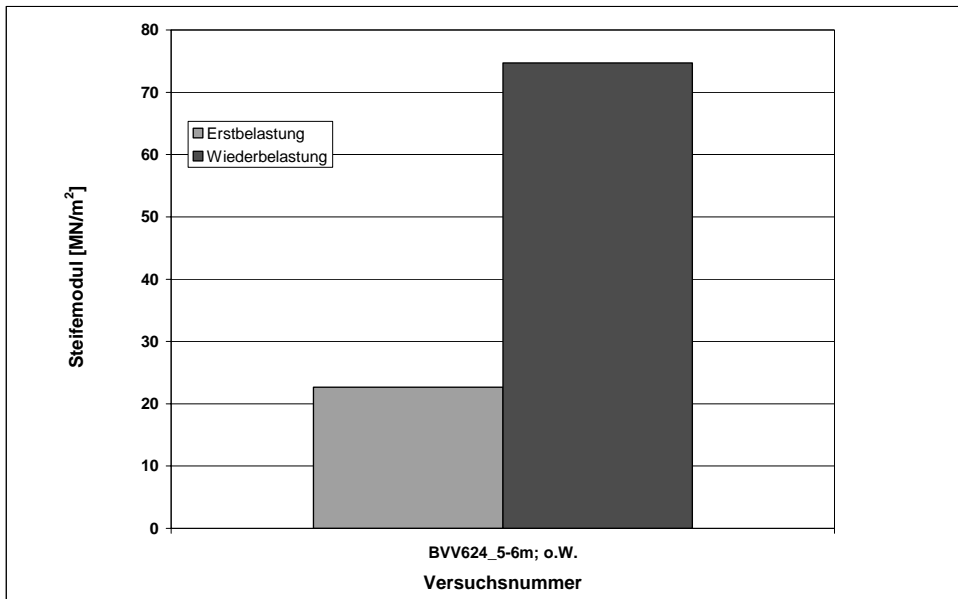
**Abb. 56:** Änderung der Porenzahl der Probe BVV 624\_5-6m von Beginn des Sackungsversuches bis Versuchsende.



**Abb. 57:** Änderung des Steifemoduls  $E_s$  der Probe BVV 624\_5-6m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.

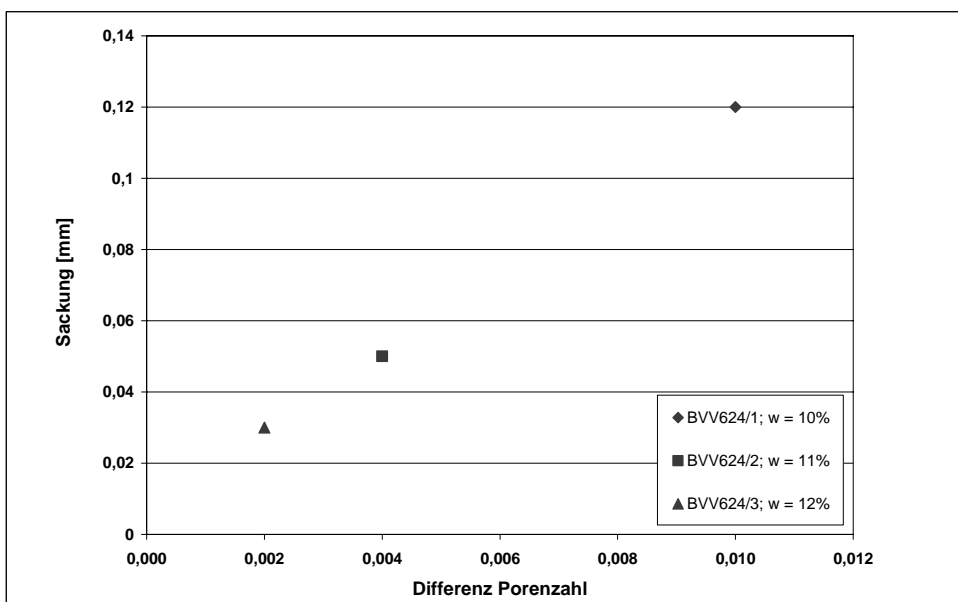
Der Steifemodul  $E_s$  verringert sich vom Beginn des Versuches bis zu Versuchsende. Die relative Änderung liegt zwischen 18,52% und 24,49% (Abb. 57).

Im Drucksetzungsversuch ohne Wasser liegt der Wert für den Steifemodul bei der Erstbelastung bei 22,64 MN/m<sup>2</sup> und bei der Wiederbelastung bei 74,73 MN/m<sup>2</sup>. Ein weiterer Drucksetzungsversuch mit Wasser konnte wegen mangelndem Probenmaterials nicht mehr durchgeführt werden (Abb. 58).



**Abb. 58:** Erst- und Wiederbelastungswert ohne Wasser der Probe BVV 624\_5-6m.

Die Differenz der Porenzahl zu Beginn des Sackungsversuches und der absolute Sackungsbetrag korrelieren sehr gut. Je größer die Differenz der Porenzahl, desto höher liegt auch der Sackungsbetrag (Abb. 59).



**Abb. 59:** Verhältnis der Differenz der Porenzahl und der absoluten Sackung der Probe BVV 624\_5-6m von Beginn des Sackungsversuchs bis Versuchsende.

### 6.1.3 Probe BVV 624, 7 m (Zwischenstauer der Niederterrasse)

Diese Probe war im Liner geringmächtiger als ursprünglich erwartet. Daher konnten nur zwei Proben im KD-Versuch untersucht werden, da aufgrund einer Havarie das Ödometer den Versuch nicht ordnungsgemäß beendete. Diese Daten wurden der handschriftlichen Versuchsauswertung entnommen.

Direkt nach der Entnahme der Proben aus dem Liner wurden die bodenmechanischen Kennwerte der Probe bestimmt.

In der Korngrößenverteilung der Proben der Niederterrasse dominieren die Schluff- und Ton-Fractionen vor dem Sandanteil. Der Mittel- und Feinkiesanteil liegt bei jeweils 2,7 Masse-% (Anhang Sieblinie Abb. A3).

**Tab. 6:** Korngrößenverteilung der Probe BVV 624\_7m (Zwischenstauer der Niederterrasse).

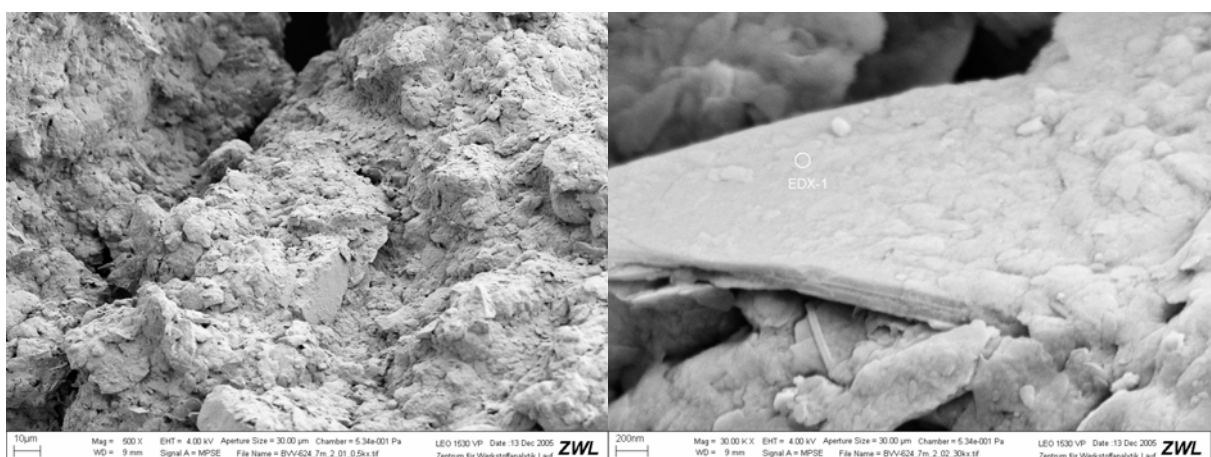
Probe	Teufe [m]	Kornverteilung [Masse-%]								
		gS	mS	fS	Σ S	gU	mU	fU	Σ U	T
BVV 624	7	3,9	7,43	24,09	35,42	11,46	14,26	12,86	38,58	20,61

Nach DIN 18196 handelt es sich um einen tonigen, mittelsandigen Schluff, schwach kiesig, schwach feinsandig und schwach grobsandig (U, t, ms, g', fs', gs'). Die Korndichte nach DIN 18124 ist 2,58 g/cm<sup>3</sup>. Der durchschnittliche natürliche Wassergehalt der Probe betrug 15%. Die Trockendichte variiert von 1,82 g/cm<sup>3</sup> bis 1,83 g/cm<sup>3</sup>. Die natürliche Porenzahl variiert zwischen 0,407 und 0,416. Der Sättigungsgrad ist 0,84. Der V<sub>gl</sub> nach DIN 18128 ist 3,12%. Somit handelt es sich bei dieser Probe um einen Boden mit organischen Beimengungen. Die organische Substanz ist nicht fein verteilt in der gesamten Probe, sondern lagig angereichert.

Das Gefüge der Probe BVV 624\_7m weist hauptsächlich eine matrixgestützte Phase auf, in welche die einzelnen Sandkörner eingebettet sind. Die Feinkornphase setzt sich überwiegend aus Mineralkörnern der Schluff-Fraktion zusammen.

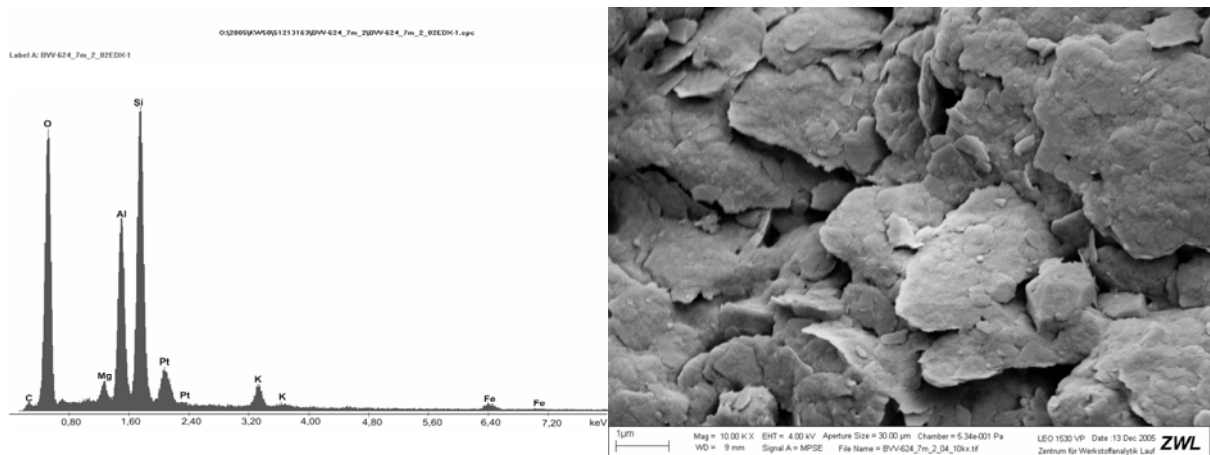
Die einzelnen Körner der Sandphase sind teilweise vollständig von Feinmaterial umhüllt. Die Hüllen setzen sich aus Schluff und Ton zusammen. Während die Mineralkörner der Mittel- und Feinsandfraktion angerundet bis gut gerundet sind, ist die Grundform der Schluffkörner kantig (Abb. 60 a,b,d).

In den Kryo-REM-Aufnahmen sind deutlich größere Poren zu erkennen, die durch die Feststoffbrücken gebildet werden. Das Porengefüge kann in Inter-Partikular- und Inter-Aggregat-Poren sowie Mikroporen im Inneren der Aggregate (Intra-Aggregat-Poren) charakterisiert werden.



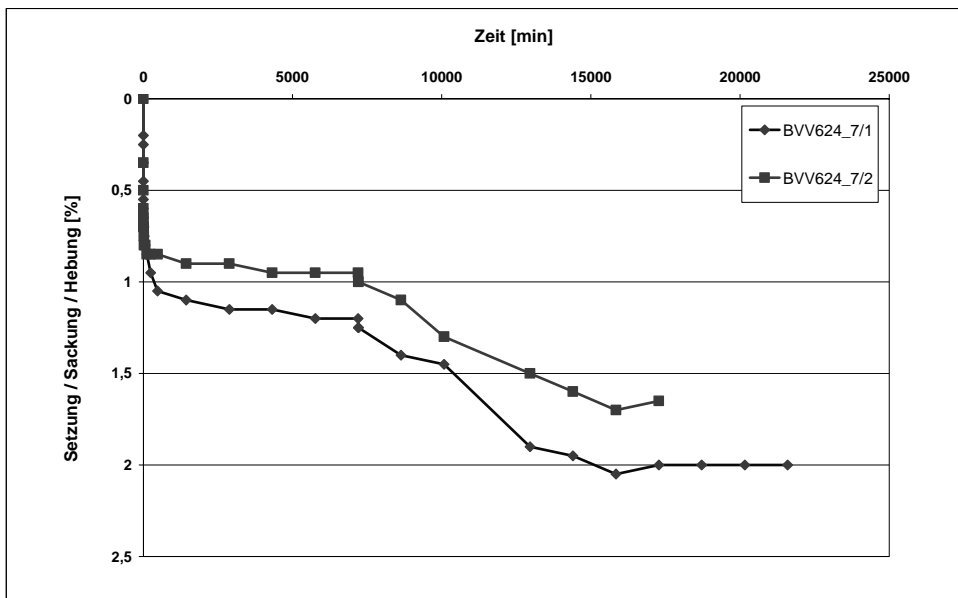
**Abb. 60 a – b:** Kryo-REM-Aufnahmen der Probe BVV 624\_7m. a (links): Durch Feinmaterial ummantelte Körner (10µm). b (rechts): Schichtsilikat, wahrscheinlich Glimmer (200nm).



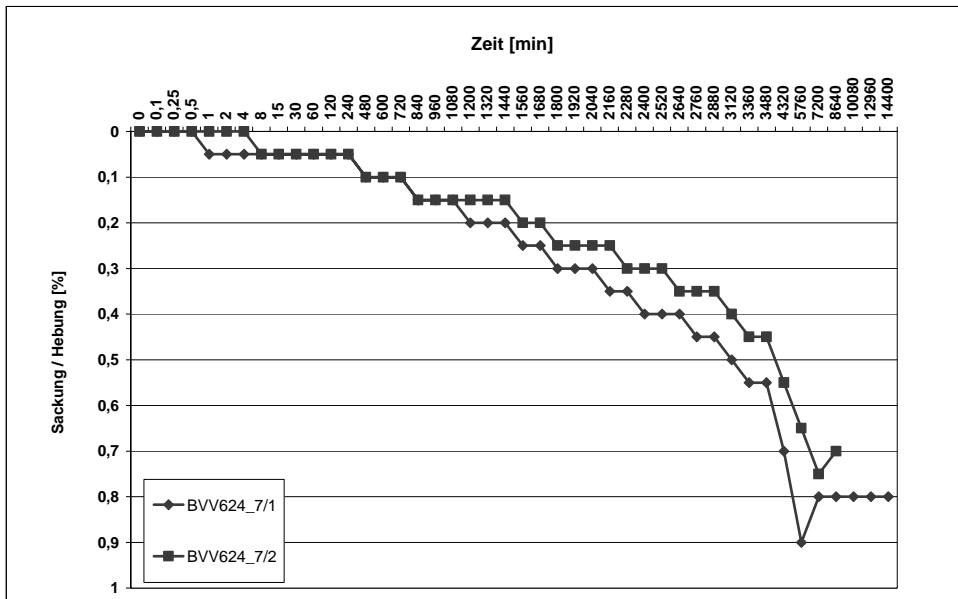


**Abb. 60 c – d:** Kryo-REM-Aufnahmen der Probe BVV 624\_7m und EDX-Diagramm. c (links): EDX des Schichtsilikates. Es handelt sich um Biotit. d, (rechts): Anordnung des Feinmaterials nach Sublimation des Wassers (1µm).

Insgesamt wurden 2 Proben im KD-Versuch bei einer Auflast von  $140 \text{ kN/m}^2$  entsprechend der natürlichen Auflastspannung in 7m Tiefe. Im Zeit-Setzungsverlauf wurden mehrere Sackungsphasen beobachtet. Die relativen Sackungen betragen bei  $10^\circ\text{C}$  durchschnittlich 0,05 bis 0,8 % der Schichtdicke bei einem Einbauwassergehalt von durchschnittlich 15% (Abb. 61 und 62).

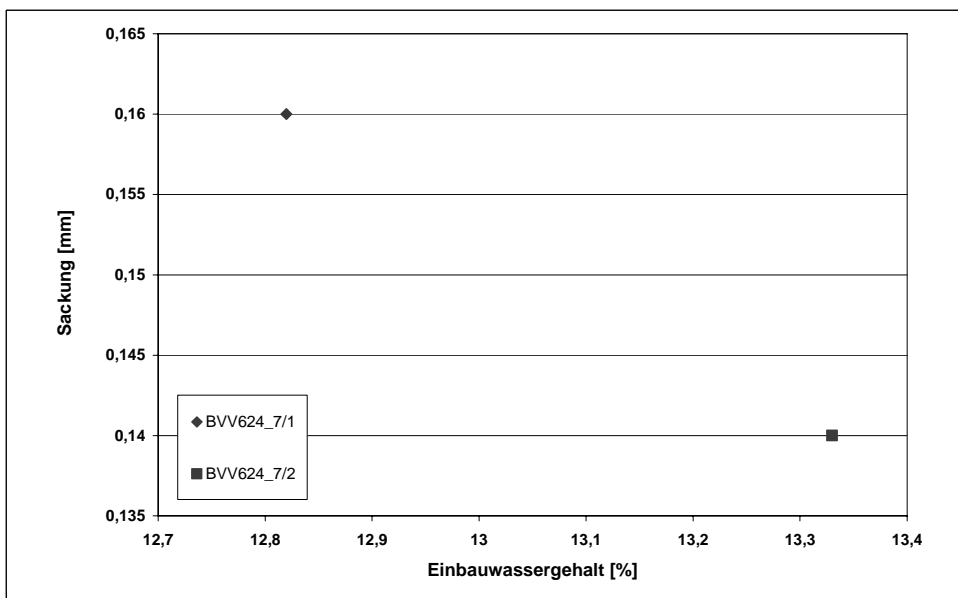


**Abb. 61:** Zeit-Setzungsdiagramm der Probe BVV 624\_7m bei  $10^\circ\text{C}$ . Die Proben stammen aus 5,50 m Tiefe und wurden mit  $140 \text{ kN/m}^2$  belastet.



**Abb. 62:** Im Drucksetzungsversuch beobachtete Sackungen der Probe BVV 624\_7m aus Abb. 61 nach Wasserzugabe.

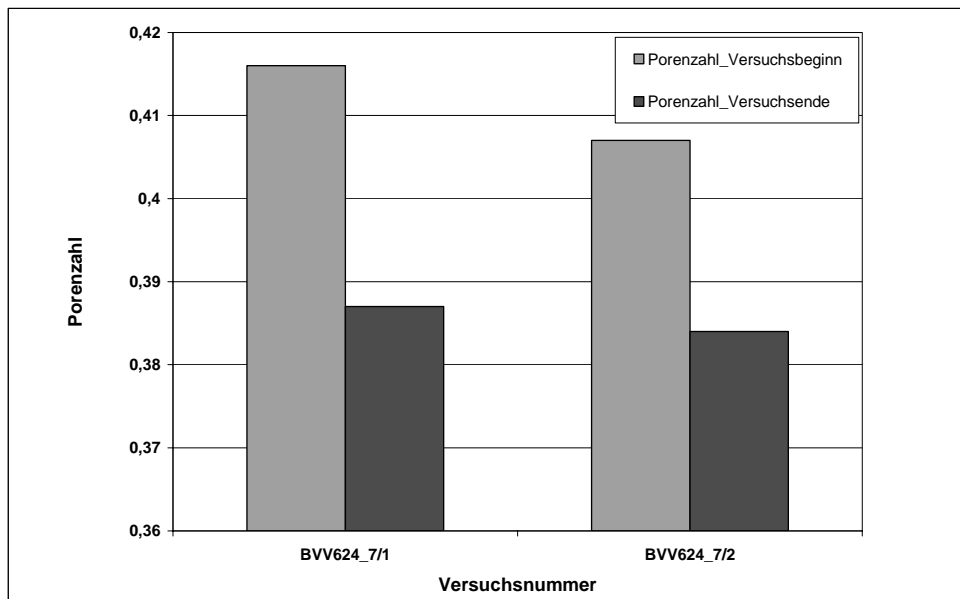
Die ersten Sackungsphasen setzten frühestens 1 min (BVV624\_7\_1) bis zu 5 min (BVV 624\_7\_2) nach Flutung ein. Die weiteren Sackungsphasen um 0,05% setzten ungefähr alle 120 min ein (Abb. 62). Bei diesen weiteren Phasen könnte es sich aber auch um Setzungen handeln, da der zeitliche Verlauf der Formänderung über mehrere Tage reicht. Bei beiden Versuchen ist zum Ende der Versuchszeit eine Hebung von 0,05% zu erkennen. Der absolute Sackungsbetrag reicht von 7,5 bis 8 mm/m bei 10°C.



**Abb. 63:** Abhängigkeit des absoluten Sackungsmaßes vom Einbauwassergehalt der Probe BVV 624\_7m.

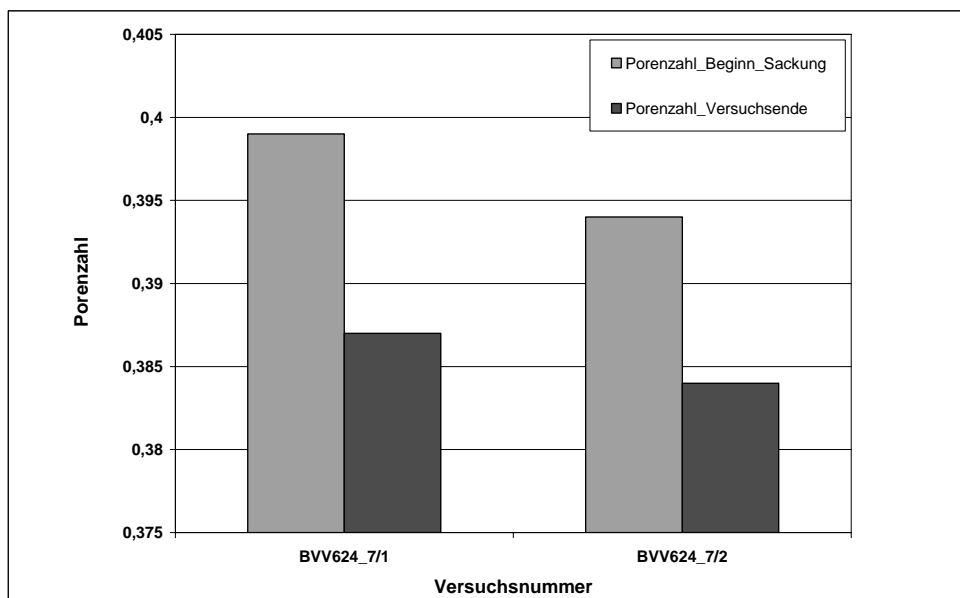
Obwohl der Unterschied im Einbauwassergehalt gering ist, weist die Probe mit dem höheren Einbauwassergehalt eine etwas höhere Sackung auf (Abb. 63). Der sich nach der Sackung zu Versuchsende einstellende Sättigungsgrad lag bei 84% bis 97% (Wassergehalt: 14,93 bis 17,41%).

Die Änderung der Porenzahl und des Steifemoduls jeweils zu Beginn und am Ende eines Versuchs sind in Abb. 64 bis 66 dargestellt.

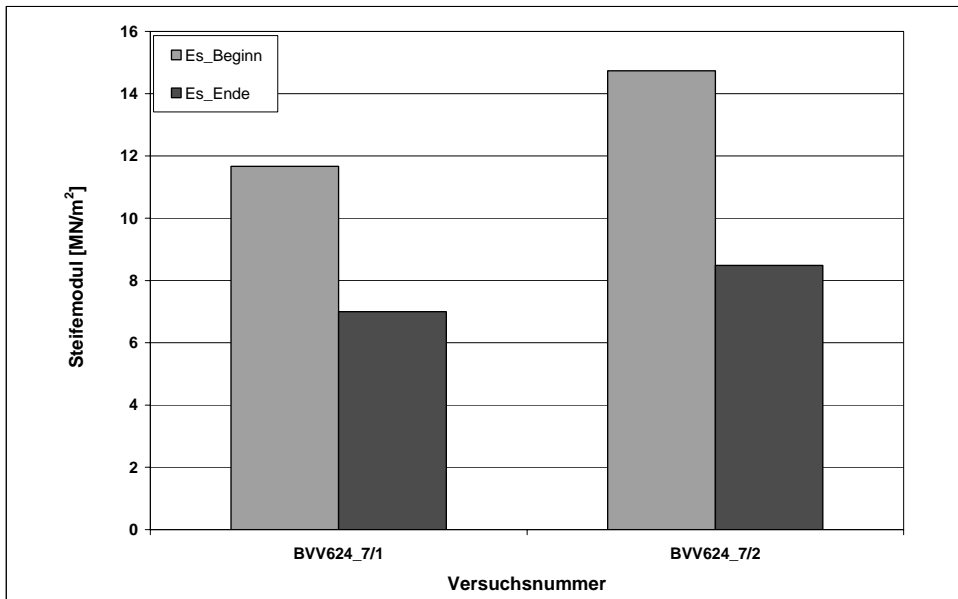


**Abb. 64:** Änderung der Porenzahl der Probe BVV 624\_7m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.

Die Porenzahl verringert sich bei allen Versuchen. Die relative Änderung liegt zwischen 5,65% und 6,97% (Abb. 64). Im Vergleich dazu ist die Änderung der Porenzahl von Beginn des Sackungsversuches bis zu Versuchsende geringer. Die relative Änderung liegt nur noch zwischen 2,54% und 3,01% (Abb. 65). Die Porenzahl zu Beginn der Sackung ist die Porenzahl, die sich nach Konsolidation zu Beginn des Versuches der Probe ergibt. Die Konsolidation dauerte so lange bis alle Setzungen abgeklungen waren. Danach fand keine Entlastung statt, sondern der Sackungsversuch wurde direkt gestartet.

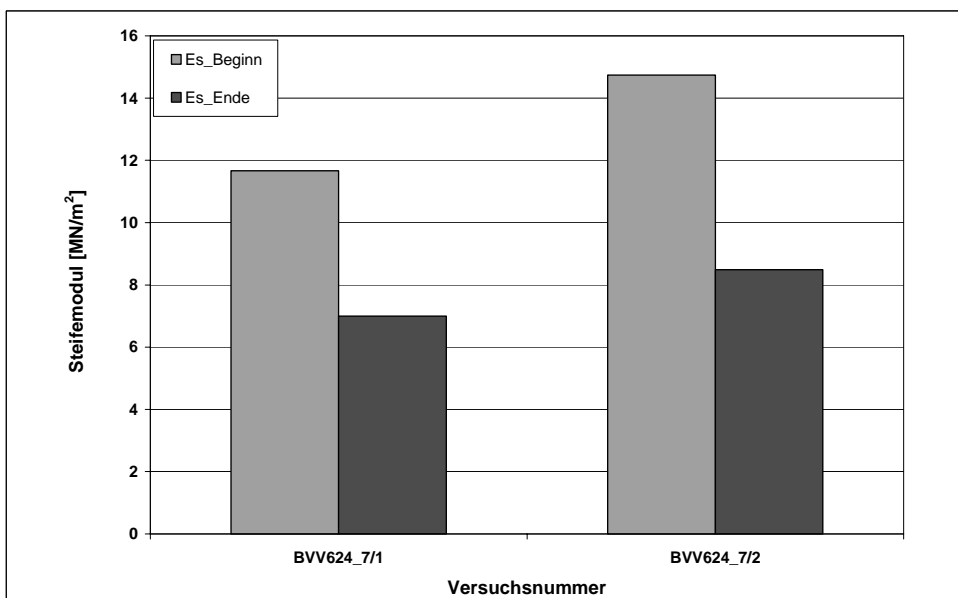


**Abb. 65:** Änderung der Porenzahl der Probe BVV 624\_7m von Beginn des Sackungsversuches bis Versuchsende.



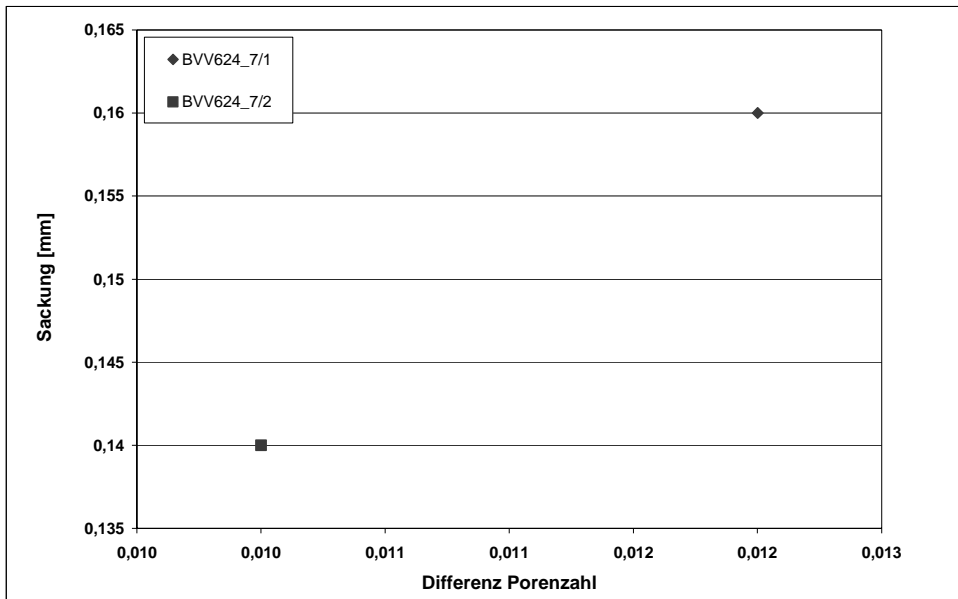
**Abb. 66:** Änderung des Steifemoduls  $E_s$  der Probe BVV 624\_7m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.

Der Steifemodul  $E_s$  verringert sich vom Beginn des Versuches bis zu Versuchsende. Die relative Änderung liegt zwischen 40% und 42,42% (Abb. 66). Im Drucksetzungsversuch ohne Wasser liegt der Wert für den Steifemodul bei der Erstbelastung bei 4,72 MN/m<sup>2</sup> und bei der Wiederbelastung bei 14,94 MN/m<sup>2</sup>. Im Drucksetzungsversuch mit Wasser liegt der Erstbelastungswert bei 7,18 MN/m<sup>2</sup> und der Wiederbelastungswert bei 24,47 MN/m<sup>2</sup> (Abb. 67).



**Abb. 67:** Erst- und Wiederbelastungswerte der Probe BVV 624\_7m mit und ohne Wasser.

Die Differenz der Porenzahl zu Beginn des Sackungsversuches und der absolute Sackungsbetrag korrelieren sehr gut. Je größer die Differenz der Porenzahl, desto höher liegt auch der Sackungsbetrag (Abb. 68).



**Abb. 68:** Verhältnis der Differenz und der absoluten Sackung der Porenzahl der Probe BVV 624\_7m von Beginn des Sackungsversuchs bis Versuchsende.

#### 6.1.4 Probe BVV 0101\_13-14m („pleistozäne Tonmudde“)

Direkt nach der Entnahme der Proben aus dem Liner wurden die bodenmechanischen Kennwerte der Probe bestimmt.

In der Korngrößenverteilung der Proben der Niederterrasse dominieren die Schluff- und Ton-Fraktion vor dem Sandanteil (Anhang Sieblinie Abb. A4).

**Tab. 7:** Korngrößenverteilung der Probe BVV 0101m\_13,0-13,5m („pleistozäne Tonmudde“).

Probe	Teufe [m]	Kornverteilung [Masse-%]								
		gS	mS	fS	Σ S	gU	mU	fU	Σ U	T
BVV 0101	13,0-13,5	0,26	2,29	27,61	30,16	21,84	19,84	14,51	56,19	13,65

Nach DIN 18196 handelt es sich um einen feinsandigen Schluff, schwach tonig (U, fs, t'). Die Korndichte nach DIN 18124 ist 2,68 g/cm<sup>3</sup>. Der durchschnittliche natürliche Wassergehalt der Probe betrug 42,23%. Die Trockendichte variiert von 1,29 g/cm<sup>3</sup> bis 1,32 g/cm<sup>3</sup>. Die natürliche Porenzahl variiert zwischen 1,034 und 1,073. Der Sättigungsgrad ist 0,77. Der V<sub>gl</sub> nach DIN 18128 ist 7,77%. Somit handelt es sich bei dieser Probe um einen Boden mit organischen Beimengungen. Die organische Substanz ist in der gesamten Probe fein verteilt. Ihr Anteil an in Form von kohligen und faserigen Stücken und mit einem Durchmesser von bis zu 0,5 mm schwankte in den Proben zwischen 2 und 4%.

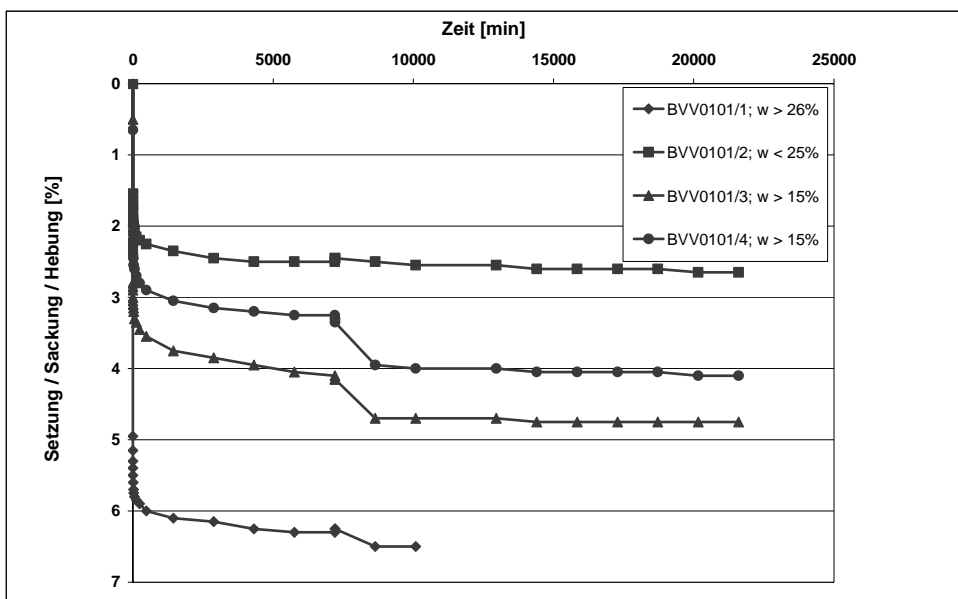


**Abb. 69 a und b:** REM-Aufnahmen der Probe BVV 0101.  
 a (links): Mit Feinmaterial überzogene Sandkörner (20µm). b (rechts): Vergrößerung des Feinmaterials (10µm).

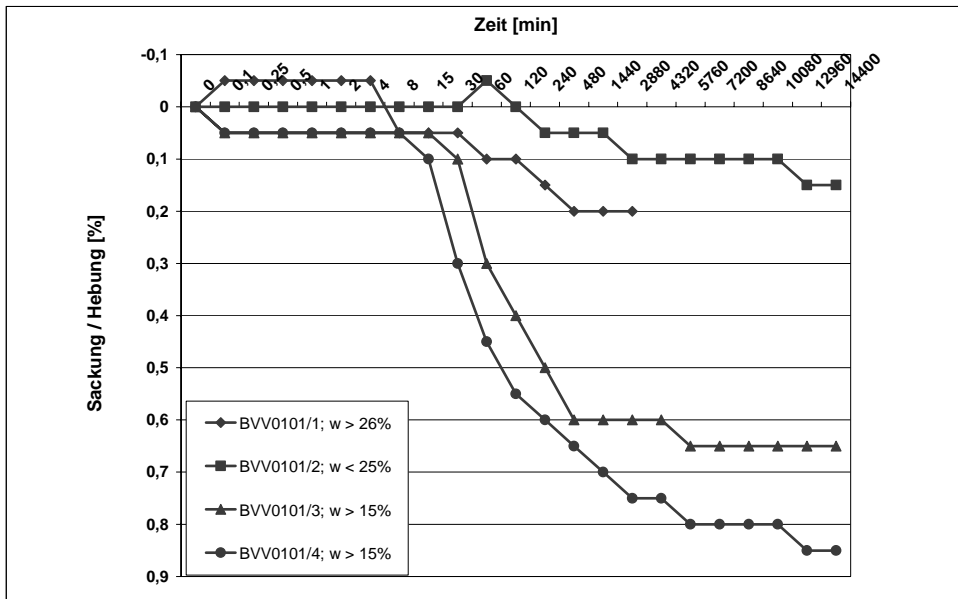
Das Gefüge der Probe BVV 0101 weist hauptsächlich eine matrixgestützte Phase auf, in welche die einzelnen Feinsandkörner eingebettet sind. Die Feinkornphase setzt sich überwiegend aus Mineralkörnern der Schluff- und Ton-Fraktion zusammen (Abb. 69 a und b).

Die einzelnen Körner der Sandphase sind teilweise vollständig von Feinmaterial umhüllt. Die Hüllen setzen sich aus Schluff und Ton zusammen.

Insgesamt wurden 4 Proben im KD-Versuch bei einer Auflast von 260 kN/m<sup>2</sup> (BVV0101/1) und 270 kN/m<sup>2</sup> entsprechend der natürlichen Auflastspannung in 13 bis 13,50m Tiefe. Im Zeit-Setzungsverlauf wurden drei bis fünf Sackungsphasen beobachtet. Die im Labormaßstab bei 260 bzw. 270 kN/m<sup>2</sup> nachgewiesenen relativen Sackungen betragen bei 10°C durchschnittlich 0,05 bis 0,85% der Schichtdicke bei einem Einbauwassergehalt von 21,5 bis 26,6 % (Abb. 70 und 71).



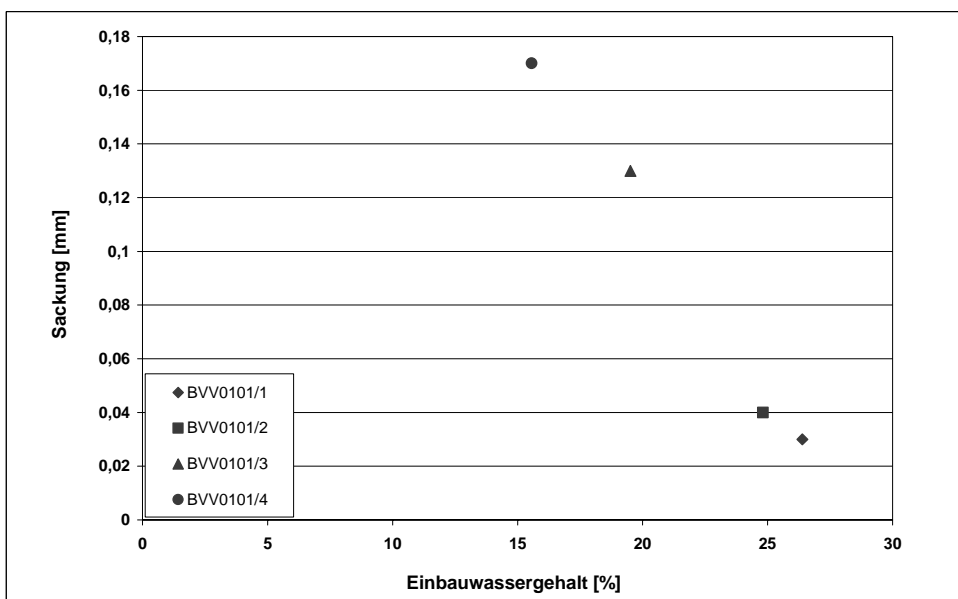
**Abb. 70:** Zeit-Setzungsdiagramm der Probe BVV 0101 bei 10°C. Die Proben stammen aus 13 bis 13,50 m Tiefe und wurden mit 260 (BVV0101/1) und 270 kN/m<sup>2</sup> belastet.



**Abb. 71:** Im Drucksetzungsversuch beobachtete Sackungen der Probe BVV 0101 aus Abb. 70 nach Wasserzugabe.

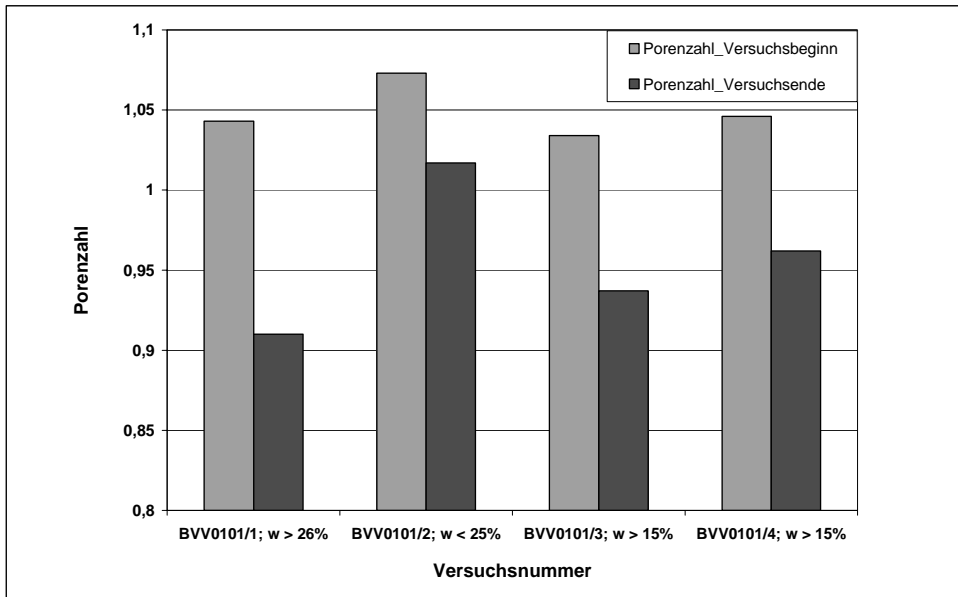
Die Sackungen setzten frühestens nach 6 s (BVV 0101\_3 und 4) bis zu 15 min (BVV 0101\_2) nach Flutung ein. Bei den Proben BVV 0101\_1 und 2 fällt kurz nach Beginn der Flutung eine Hebung um 0,55% auf, die nach 4 bzw. 30 Minuten in eine Sackung übergeht. Der Versuch BVV 0101\_1 wurde mit 270 kN/m<sup>2</sup> belastet, der Versuch BVV 0101\_2 mit 260 kN/m<sup>2</sup>. Der absolute Sackungsbetrag beträgt 1,5 mm/m bis 8,5 mm/m bei 10°C.

Je kleiner der Einbauwassergehalt, desto höher waren die absoluten Sackungen (Abb. 72). Der sich nach der Sackung zu Versuchende einstellende Sättigungsgrad lag bei 59% bis 89% (Wassergehalt: 32,29 bis 48,78%).



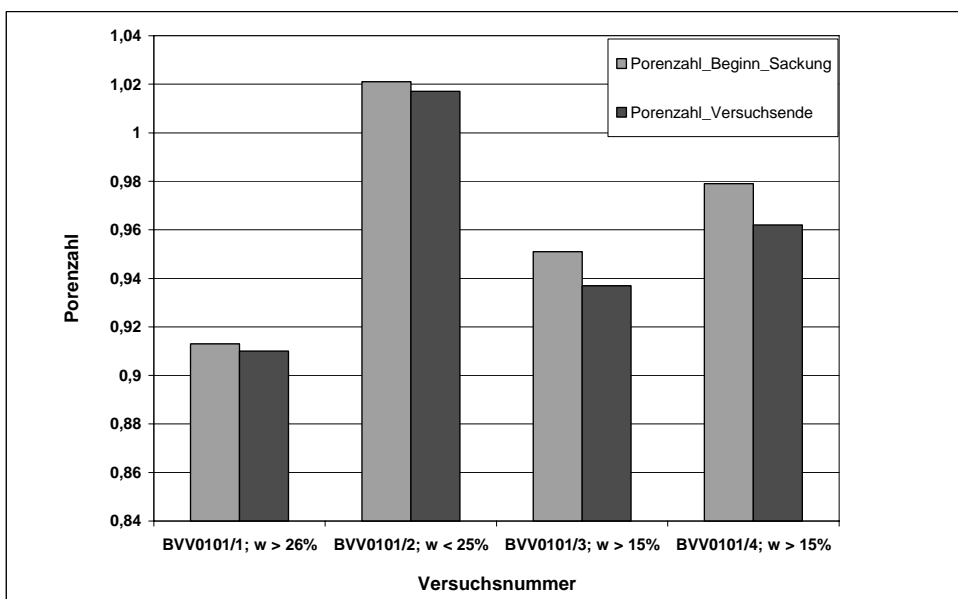
**Abb. 72:** Abhängigkeit des absoluten Sackungsmaßes vom Einbauwassergehalt der Probe BVV0101.

Die Änderung der Porenzahl und des Steifemoduls jeweils zu Beginn und am Ende eines Versuchs sind in Abb. 73 bis 75 dargestellt.



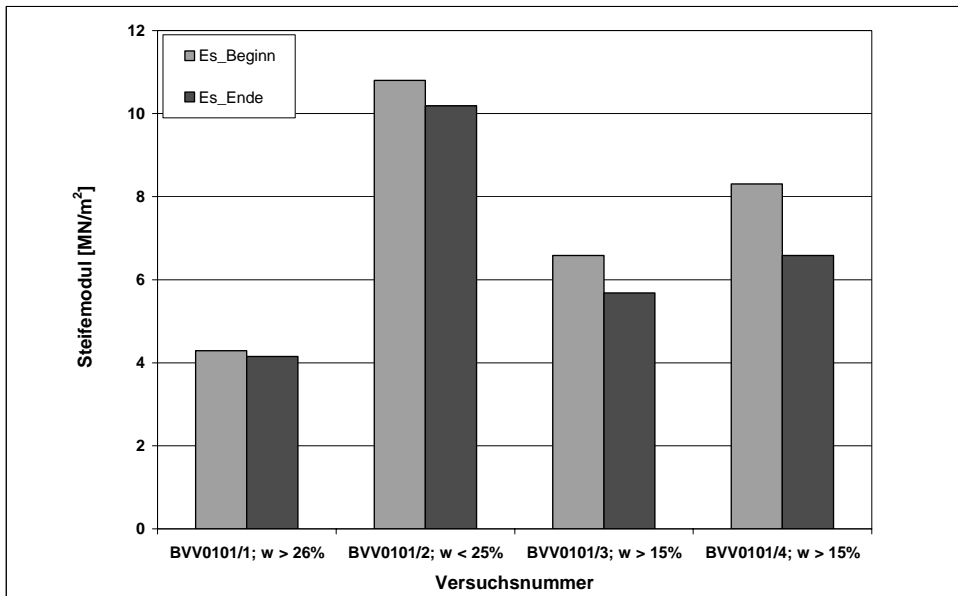
**Abb. 73:** Änderung der Porenzahl der Probe BVV0101 zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.

Die Porenzahl verringert sich bei allen Versuchen. Die relative Änderung liegt zwischen 5,22% bis 12,75% (Abb. 73). Im Vergleich dazu ist die Änderung der Porenzahl von Beginn des Sackungsversuches bis zu Versuchsende geringer. Die relative Änderung liegt nur noch zwischen 0,33% und 1,74% (Abb. 74). Die Porenzahl zu Beginn der Sackung ist die Porenzahl, die sich nach Konsolidation zu Beginn des Versuches der Probe ergibt. Die Konsolidation dauerte so lange bis alle Setzungen abgeklungen waren. Danach fand keine Entlastung statt, sondern der Sackungsversuch wurde direkt gestartet.



**Abb. 74:** Änderung der Porenzahl BVV0101 von Beginn des Sackungsversuches bis Versuchsende.

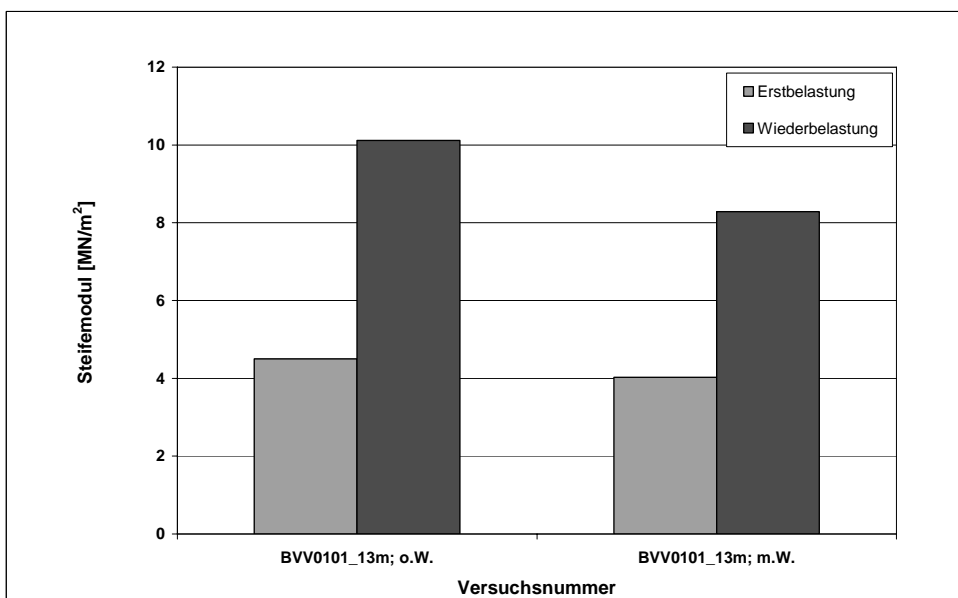




**Abb. 75:** Änderung des Steifemoduls  $E_s$  der Probe BVV0101 zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.

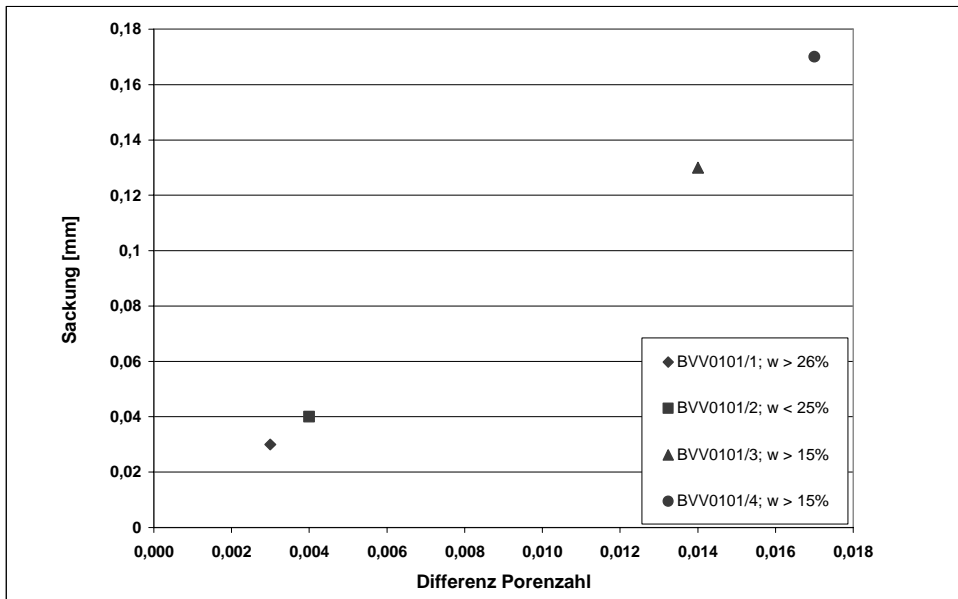
Der Steifemodul  $E_s$  verringert sich vom Beginn des Versuches bis zu Versuchsende. Die relative Änderung liegt zwischen 3,08 % und 20,74% (Abb. 75).

Im Drucksetzungsversuch ohne Wasser liegt der Wert für den Steifemodul bei der Erstbelastung bei 4,50 MN/m<sup>2</sup> und bei der Wiederbelastung bei 10,12 MN/m<sup>2</sup>. Im Drucksetzungsversuch mit Wasser liegt der Erstbelastungswert bei 4,03 MN/m<sup>2</sup> und der Wiederbelastungswert bei 8,28 MN/m<sup>2</sup> (Abb. 76).



**Abb. 76:** Erst- und Wiederbelastungswerte mit und ohne Wasser der Probe BVV0101.

Die Differenz der Porenzahl zu Beginn des Sackungsversuches und der absolute Sackungsbetrag korrelieren sehr gut. Je größer die Differenz der Porenzahl, desto höher liegt auch der Sackungsbetrag (Abb. 77).



**Abb. 77:** Verhältnis Differenz der Porenzahl und der absoluten Sackung der Probe BVV0101 von Beginn des Sackungsversuchs bis Versuchsende.

## 6.2 Proben Hessisches Ried

Insgesamt wurden 19 Proben auf ihr Verhalten bei Grundwasserwiederanstieg untersucht. 15 Proben mit der Bezeichnung GWM1F wurden aus der 6m Grundwassermeßstellen-Bohrung aus der Aue des Hahnwiesenbachs am nördlichen Rand des Hessischen Rieds zum Sprendlinger Horst bearbeitet. 4 Proben mit der Bezeichnung 537bk3 stammen aus einer Forschungsbohrung aus dem Jahr 2003 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG) aus dem zentralen Teil des Hessischen Rieds, der Neckaraltaue westlich Zwingenberg. Für die Untersuchungen wurden unterschiedliche Bodenarten ausgewählt. Für die Proben 537bk3 stand nur sehr wenig geeignetes Material zur Verfügung, da die Liner bereits seit 2003 geöffnet waren und im Kernlager des HLUG aufbewahrt wurden. Nur aus dem Liner aus einer Tiefe von 5-6 m war noch ungestörtes Probenmaterial zu gewinnen.

Ein Gesamtüberblick über die verwendeten Proben, die Sieblinien und den verwendeten Daten befindet sich im Anhang.

Bei einigen Proben wurde der geeignete Korndurchmesser für Untersuchungen im Ödometer überschritten, so dass kein oder nur wenig Probenmaterial zur Verfügung stand.

Die Proben GWM1F/3 + 4, GWM1F\_34/4, GWM1F\_45/2+4 sowie die Proben 537bk3/3-4 wurden wegen mehrfachen Absturzes des Steuerrechners aus Handaufzeichnungen errechnet.

Es wurden ebenfalls zweistufige Be- und Entlastungen gefahren. In den Auswertungen werden diese als Erst- und Wiederbelastung in Anlehnung an PRINZ (1997) bezeichnet. Sie geben nicht die Zyklen der Vorbelastung durch zyklische Eisaufasten wieder, sondern die im Labor gewählte Anzahl der Stufen.

### 6.2.1 Probe GWM1F\_0-1m

Direkt nach der Entnahme aus dem Liner wurden die bodenmechanischen Kennwerte der Probe bestimmt.

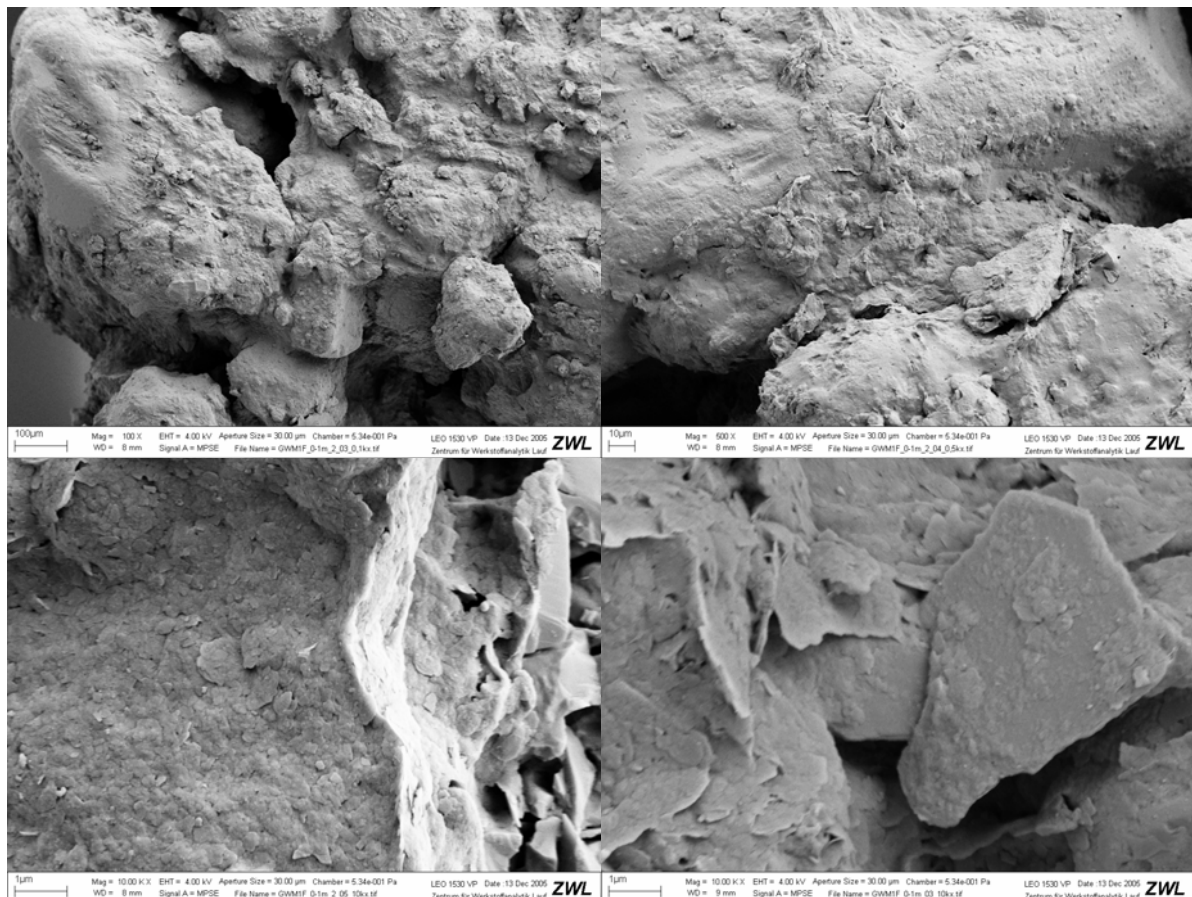
In der Korngrößenverteilung der Probe GWM1F\_0-1m dominiert die Sandfraktion vor dem Schluff- und Tonanteil. Der Feinkiesanteil ist mit 1,63 Masseprozent gering (Anhang Sieblinie A5).

**Tab. 8:** Korngrößenverteilung der Probe GWM1F\_0-1m.

Probe	Teufe [m]	Kornverteilung [Masse-%]								
		gS	mS	fS	Σ S	gU	mU	fU	Σ U	T
GWM1F	0 – 1	1,71	32,59	32,86	67,16	6,45	2,62	3,43	12,50	15,10

Nach DIN 18196 handelt es sich um einen tonigen Sand, schwach schluffig (S, t, u'). Die Korndichte nach DIN 18124 ist 2,64 g/cm<sup>3</sup>. Der natürliche Wassergehalt der Probe betrug 16,87%. Die Trockendichte variiert von 1,77 g/cm<sup>3</sup> bis 1,89 g/cm<sup>3</sup>. Die natürliche Porenzahl variiert zwischen 0,398 und 0,493. Der Sättigungsgrad ist 0,97. Der V<sub>gl</sub> nach DIN 18128 ist 2,49%.

Das Gefüge der Probe GWM1F\_0-1m weist hauptsächlich eine Sandphase mit einem Einzelkorngefüge und darin eingebetteten Aggregaten auf. Die Sandphase setzt sich überwiegend aus Mineralkörnern der Mittel- und Feinsandfraktion zusammen, die durch Brücken zusammengehalten werden, welche von Feinmaterial gebildet werden. Diese Festkörperbrücken (interpartikulare Bindungen) wurden in allen untersuchten erdfeuchten Proben GWM1F\_0-1m mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops mit Kryotransfersystem (Kryo-REM) nachgewiesen (Abb. 78 a-d).



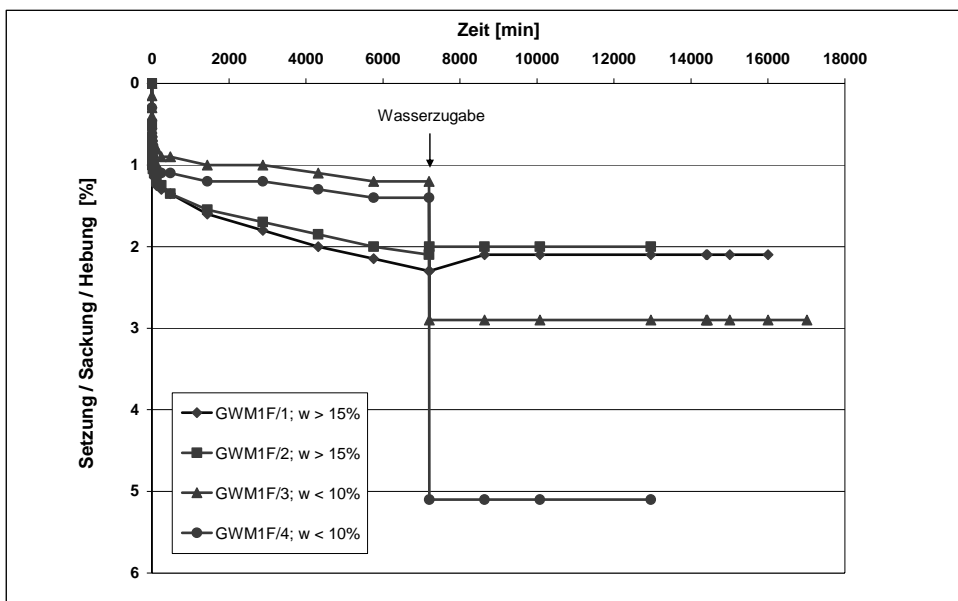
**Abb. 78 a-d:** Kryo-REM-Aufnahmen der Probe GWM1F\_0-1m.

a (oben links): Verkittetes Aggregat der Probe GWM1F (100µm). b (oben rechts): Aggregat aus Feinmaterial zwischen Sandkörnern (10µm). c (unten links): Abbruchkante des Feinmaterials (1µm) . d (unten rechts): Feinmaterial rechts der Abbruchkante (1µm).

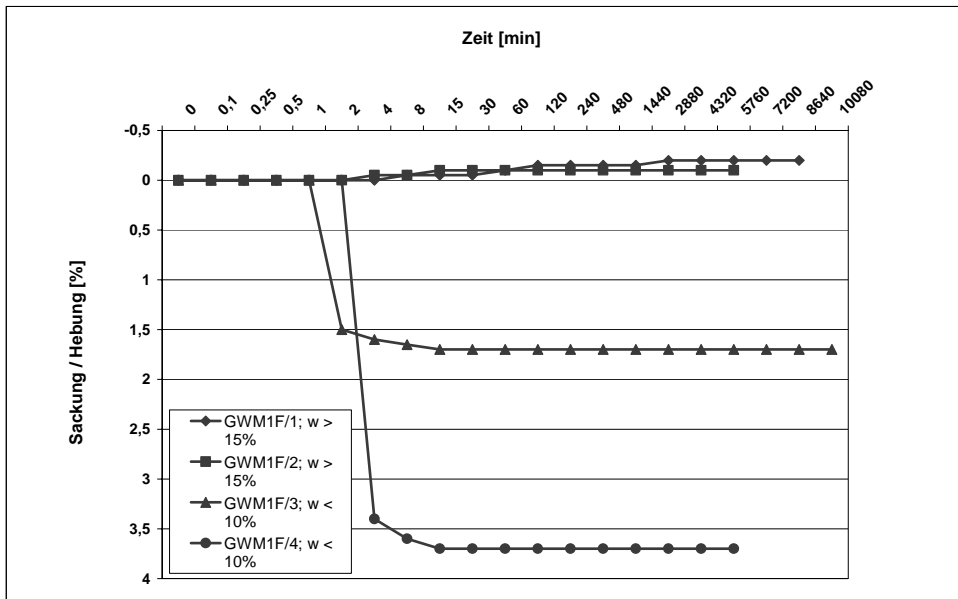
Die einzelnen Körner der Sandphase sind teilweise vollständig von Feinmaterial

umhüllt. Die Hüllen setzen sich aus Feinsand, Schluff und Ton zusammen. Während die Mineralkörner der Grob- und Mittelsandfraktion angerundet bis gut gerundet sind, ist die Grundform der Feinsand- bzw. Grobschluffkörner kantig. Die Kornverteilung der Aggregate ist mit der sie umgebenden Sandmatrix identisch.

Insgesamt wurden 4 Proben im KD-Versuch untersucht. GWM1F/1 wurde bei einer Auflast von 15 kN/m<sup>2</sup> entsprechend der natürlichen Auflastspannung in 0,50 m Tiefe und GWM1F/3-4 wurden bei 18 kN/m<sup>2</sup> entsprechend der natürlichen Auflastspannung in 0,70m Tiefe untersucht. Im Zeit-Setzungsverlauf wurden bei einem Einbauwassergehalt 16,83% bzw. 16,32% ungefähr vier Minuten nach Wasserzugabe eine Hebungsphase beobachtet. Bei einem Einbauwassergehalt von 7,12% bzw. 7,95% wurde eine Sackungsphase nach 1 bis 2 Minuten nach Wasserzugabe in jedem Versuch beobachtet. Die im Labormaßstab nachgewiesenen relativen Hebungen bei den Proben GWM1F\_0-1m betragen bei 10°C 0,2 bis 0,1 % der Schichtdicke abhängig vom Einbauwassergehalt. Die relativen Sackungen betragen bei 10°C 1,7 bis 3,7% der Schichtdicke abhängig vom Einbauwassergehalt (Abb. 79 und 80). Der absolute Hebungsbetrag beträgt 1 bzw. 2 mm/m, der absolute Sackungsbetrag beträgt 17 bzw. 37 mm/m bei 10°C.

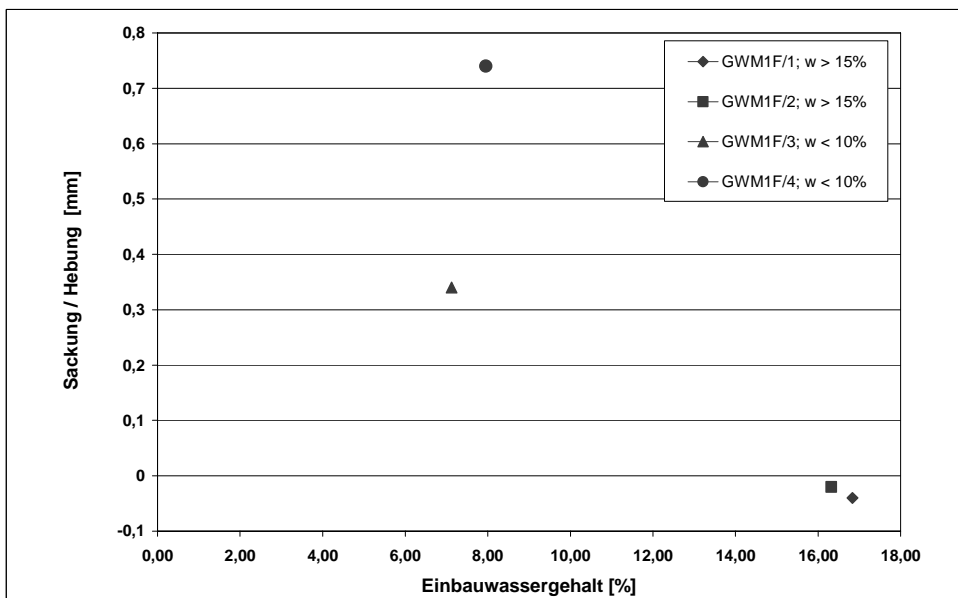


**Abb. 79:** Zeit-Setzungsdiagramm der Probe GWM1F\_0-1m. Die Proben stammen aus 0,50 bis 0,70 m Tiefe und wurden bei 10°C mit 15 und 18 kN/m<sup>2</sup> belastet.



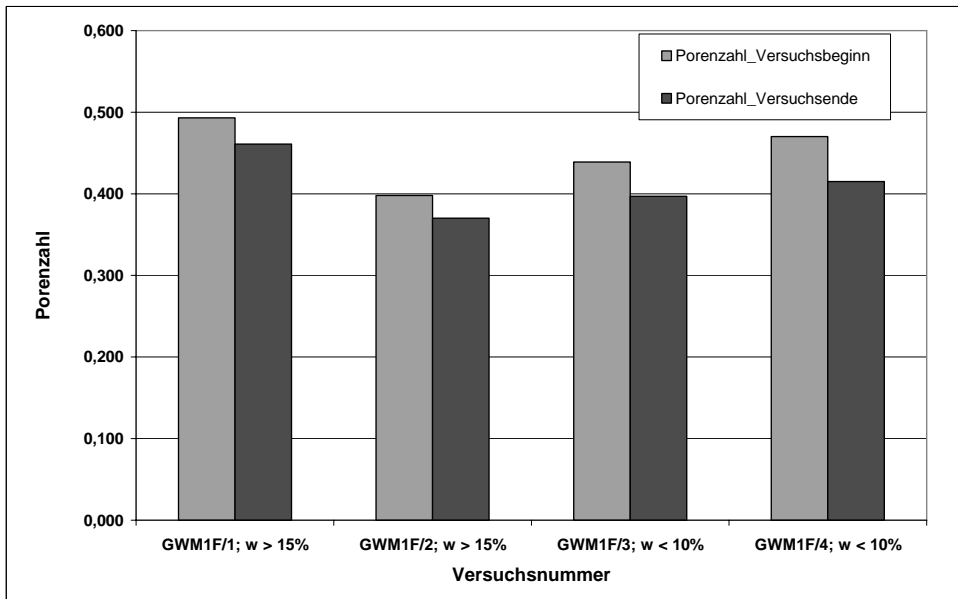
**Abb. 80:** Im Drucksetzungsversuch beobachtete Hebungen und Sackungen der Probe GWM1F\_0-1m aus Abb. 79 nach Wasserzugabe.

Mit steigendem Wassergehalt in den untersuchten Proben bei 10°C traten keine Sackungen, sondern Hebungen ein. Je geringer der Wassergehalt, desto größer fielen die relativen Sackungsbeträge aus (Abb. 81). Der sich nach der Sackung bei den Proben GWM1F/1 und GWM1F/2 einstellende Sättigungsgrad lag zwischen 99% bzw. 95% (Wassergehalt: 17,26 bis 16,44%). Bei den Proben GWM1F/3 und GWM1F/4 lag der Sättigungsgrad nach der Flutung bei 92% bzw. 85% (Wassergehalt: 15,98 bis 14,79%).



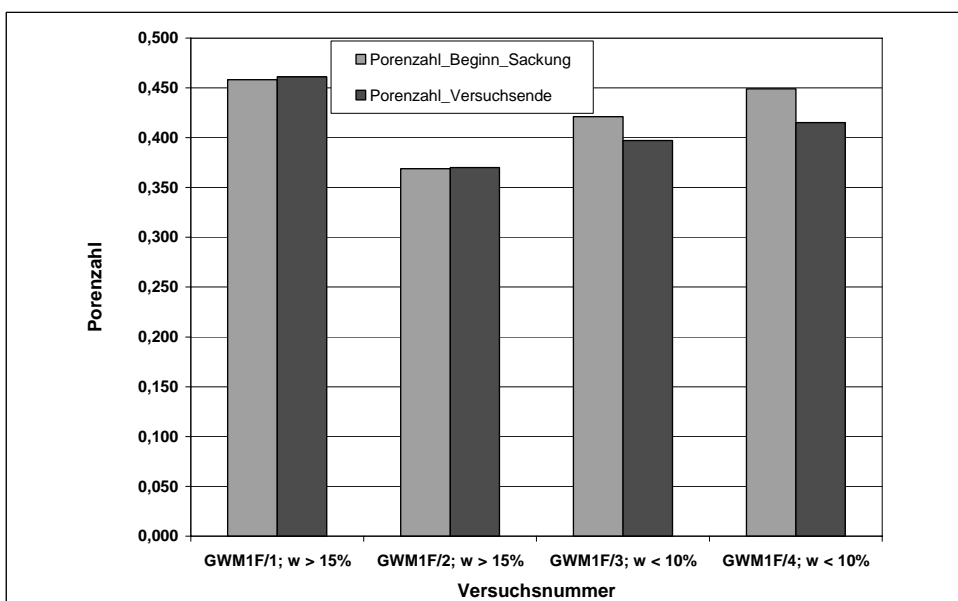
**Abb. 81:** Abhängigkeit des absoluten Sackungsmaßes vom Einbauwassergehalt der Probe GWM1F\_0-1m.

Die Änderung der Porenzahl und des Steifemoduls jeweils zu Beginn und am Ende eines Versuchs sind in Abb. 82 bis 84 dargestellt.

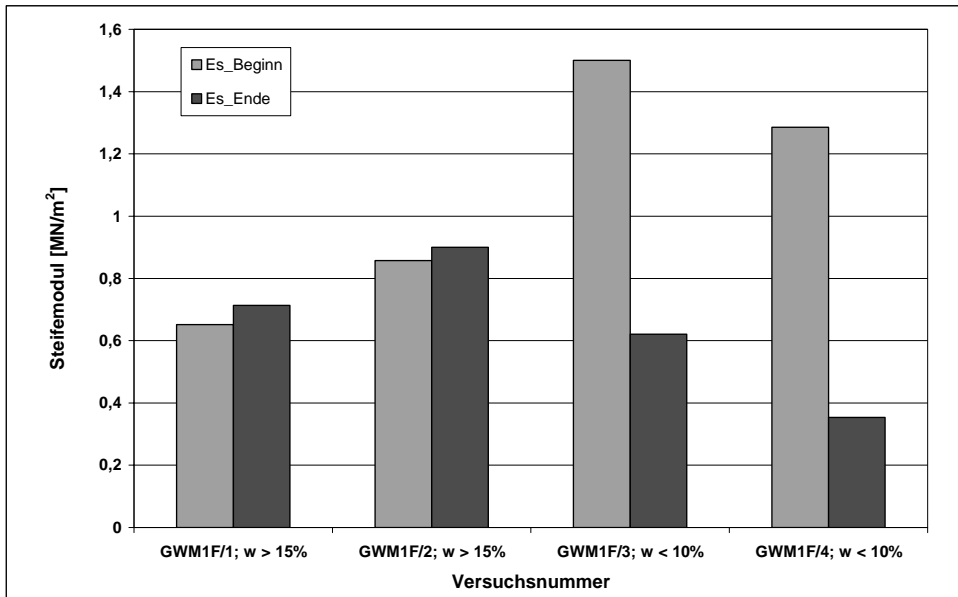


**Abb. 82:** Änderung der Porenzahl der Probe GWM1F\_0-1m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.

Die Porenzahl verringert sich in allen Versuchen. Die relative Änderung reicht von 6,49% bis 11,70% (Abb. 82). Im Vergleich dazu fallen die Unterschiede in der Änderung der Porenzahl von Beginn des Sackungsversuches bis zum Versuchsende zwischen den beiden Versuchen mit hohem Einbauwassergehalt und den beiden Versuchen mit niedrigerem Einbauwassergehalt auf. Bei der Probe GWM1F/1 und 2 kommt es zu einer Vergrößerung der Porenzahl zwischen 0,66% und 0,27%. Bei den Proben GWM1F/3 und 4 liegt die relative Änderung zwischen 5,70 und 7,57% (Abb. 83). Die Porenzahl zu Beginn der Sackung ist die Porenzahl, die sich nach Konsolidation zu Beginn des Versuches der Probe ergibt. Die Konsolidation dauerte so lange bis alle Setzungen abgeklungen waren. Danach fand keine Entlastung statt, sondern der Sackungsversuch wurde direkt gestartet.



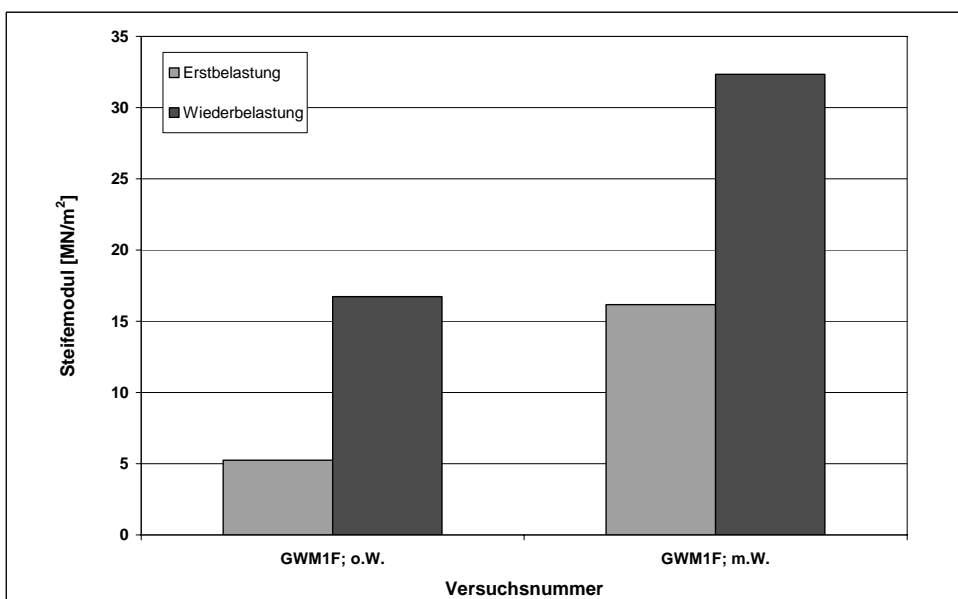
**Abb. 83:** Änderung der Porenzahl der Probe GWM1F\_0-1m von Beginn des Sackungsversuches bis Versuchsende.



**Abb. 84:** Änderung des Steifemoduls  $E_s$  der Probe GWM1F\_0-1m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.

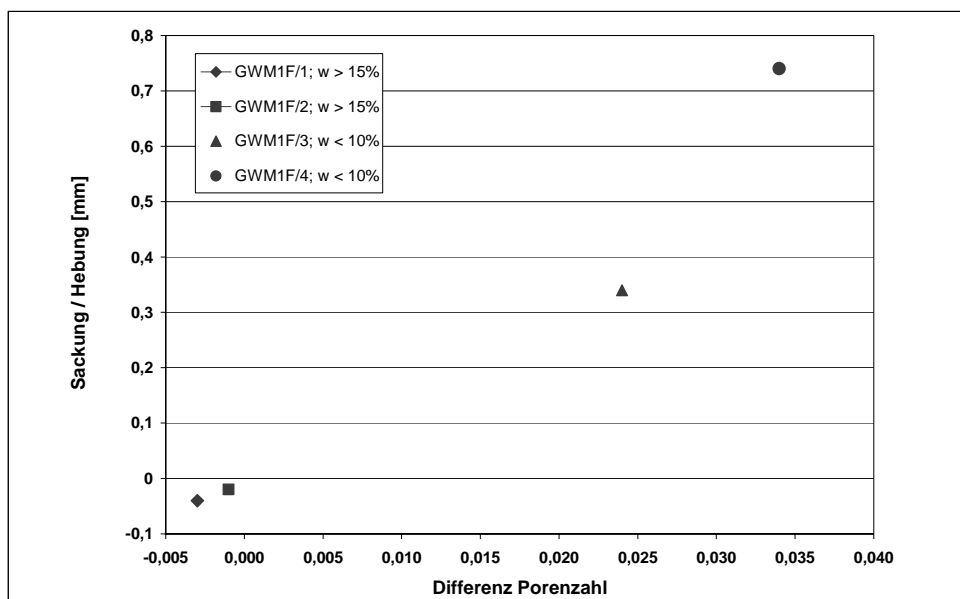
Der Steifemodul  $E_s$  ist entsprechend der geringen Auflastspannung von 15 bzw. 18  $\text{kN/m}^2$  sehr niedrig. Es ist ein eindeutiger Unterschied zwischen den Versuchen mit hohem und niedrigem Einbauwassergehalt festzustellen. Bei den Proben GWM1F/1 und 3 verringert sich der Steifemodul nicht, sondern vergrößert sich um 9,51% bzw. 5,02%. Bei den Proben GWM1F/3 und 4 liegt die relative Änderung zwischen 58,60% und 72,53% (Abb. 84). Die Proben mit hohem Anfangswassergehalt weisen einen sehr niedrigen Steifemodul auf. Mit niedrigerem Wassergehalt nimmt der Wert des Steifemoduls zu.

Im Drucksetzungsversuch ohne Wasser liegt der Wert für den Steifemodul bei der Erstbelastung bei 5,25  $\text{MN/m}^2$  und bei der Wiederbelastung bei 16,72  $\text{MN/m}^2$ . Im Drucksetzungsversuch mit Wasser liegt der Erstbelastungswert bei 16,14  $\text{MN/m}^2$  und der Wiederbelastungswert bei 32,32  $\text{MN/m}^2$  (Abb. 85).



**Abb. 85:** Erst- und Wiederbelastungswerte mit und ohne Wasser GWM1F\_0-1m.

Die Differenz der Porenzahl zu Beginn des Sackungsversuches und der absolute Sackungsbetrag korrelieren sehr gut. Je größer die Änderung der Porenzahl desto höher ist auch der Sackungsbetrag (Abb. 86).



**Abb. 86:** Verhältnis der Differenz der Porenzahl der Probe GWM1F\_0-1m von Beginn des Sackungsversuchs bis Versuchsende und der absoluten Sackung.

### 6.2.2 Probe GWM1F\_2-3m

Direkt nach der Entnahme aus dem Liner wurden die bodenmechanischen Kennwerte der Probe bestimmt. In der Korngrößenverteilung der Proben der Niederterrasse dominiert die Sand-Fraktion vor dem Schluff- und Tonanteil. Der Feinkiesanteil liegt bei 11,59% (Anhang Sieblinie Abb. A6).

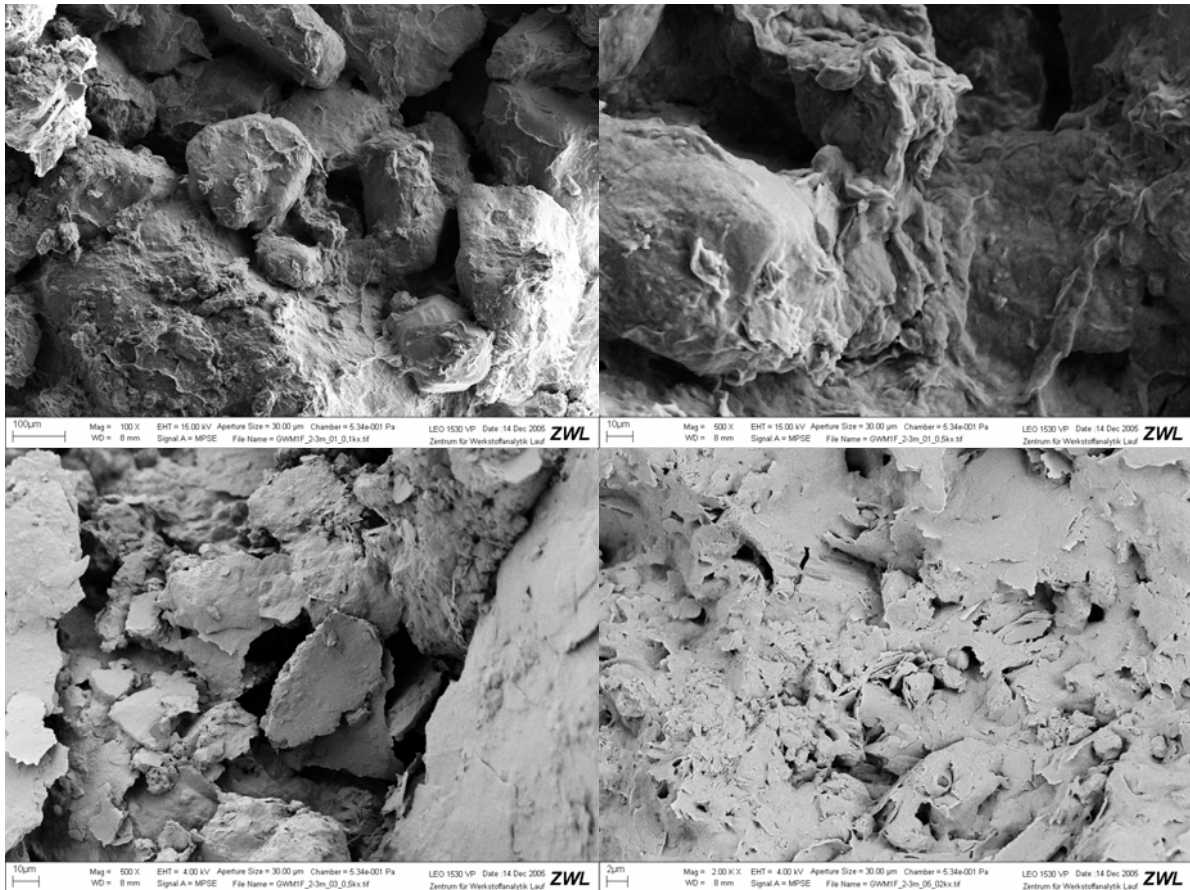
**Tab. 9:** Korngrößenverteilung der Probe GWM1F\_2-3m.

Probe	Teufe [m]	Kornverteilung [Masse-%]								
		gS	mS	fS	Σ S	gU	mU	fU	Σ U	T
GWM1F	2 - 3	17,50	32,78	16,13	66,41	4,84	3,76	1,67	10,27	11,46

Nach DIN 18196 handelt es sich um einen Sand, schwach tonig, schwach schluffig und schwach feinkiesig (S, t', u', fg'). Die Korndichte nach DIN 18124 ist 2,66 g/cm<sup>3</sup>. Der durchschnittliche natürliche Wassergehalt der Probe betrug 7,11%. Die Trockendichte variiert von 1,74 g/cm<sup>3</sup> bis 1,85 g/cm<sup>3</sup>. Die natürliche Porenzahl variiert zwischen 0,435 und 0,525. Der Sättigungsgrad ist 0,35. Der V<sub>gl</sub> nach DIN 18128 ist 1,53%.

Das Gefüge der Probe GWM1F\_2-3m weist hauptsächlich eine Sandphase mit einem Einzelkorngefüge und darin eingebetteten Aggregaten auf. Die Sandphase setzt sich überwiegend aus Mineralkörnern der Mittel- und Feinsandfraktion zusammen, die durch Brücken zusammengehalten werden, welche von Feinmaterial gebildet werden. Diese Festkörperbrücken (interpartikuläre Bindungen) wurden in allen untersuchten erdfeuchten Proben GWM1F\_2-3m mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops mit Kryotransfersystem (Kryo-REM) nachgewiesen (Abb. 87 a-d).





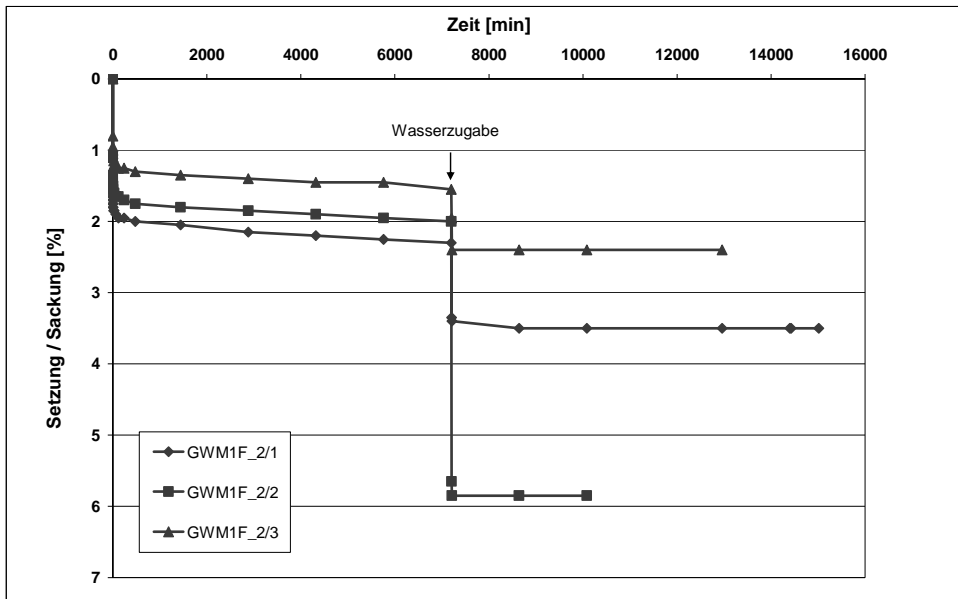
**Abb. 87 a-d:** Kryo-REM-Aufnahmen der Probe GWM1F\_2-3m.

a (links oben): Aggregat aus Sandkörnern mit Brücken und Hüllen der Feinfraktion zwischen und auf den Körnern (100µm). b (rechts oben): Deutlich erkennbare Hülle aus Feinmaterial (Feinsand, Schluff, Ton) auf den Körnern und geschaffenen Porenräumen (10µm). c (links unten): Brücken aus Feinmaterial zwischen den Körnern (10µm). d (rechts unten): Vergrößerung der Brücken zwischen den Körnern und teilweise deutliche Einregelung der Plättchen zu erkennen, nach Sublimation des Wassers (2µm).

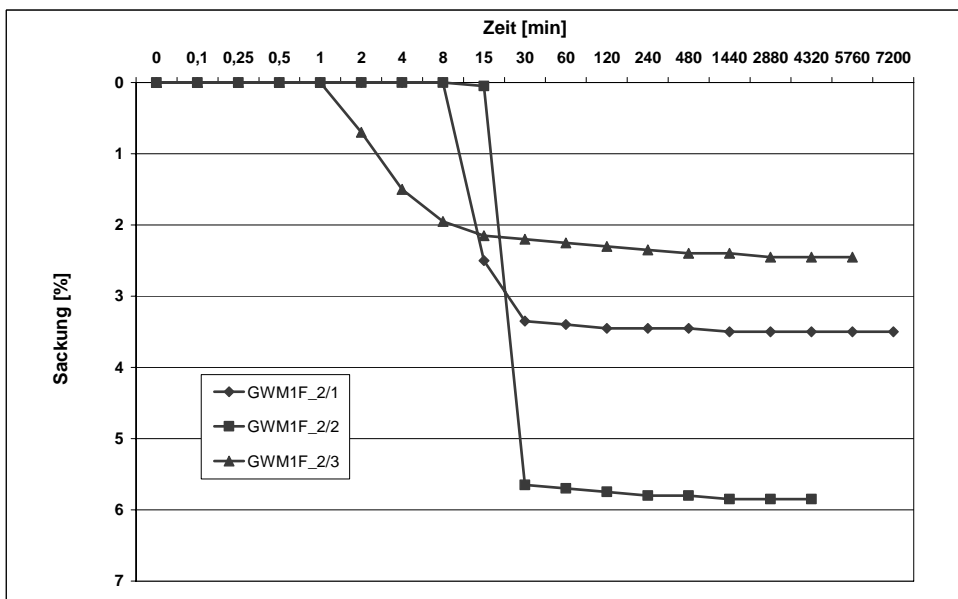
Die einzelnen Körner der Sandphase sind teilweise vollständig von Feinmaterial umhüllt. Die Hüllen setzen sich aus Feinsand, Schluff und Ton zusammen. Während die Mineralkörner der Grob- und Mittelsandfraktion angerundet bis gut gerundet sind, ist die Grundform der Feinsand- bzw. Grobschluffkörner kantig. Die Kornverteilung der Aggregate ist mit der sie umgebenden Sandmatrix identisch.

In den Kryo-REM-Aufnahmen sind deutlich größere Poren zu erkennen, die durch die Feststoffbrücken gebildet werden. Das Porengefüge kann in Inter-Partikular- und Inter-Aggregat-Poren sowie Mikroporen im Inneren der Aggregate (Intra-Aggregat-Poren) charakterisiert werden.

Insgesamt wurden 3 Proben im KD-Versuch bei einer Auflast von 50 kN/m<sup>2</sup> entsprechend der natürlichen Auflastspannung in 2,50m Tiefe untersucht. Im Zeit-Setzungsverlauf wurden bei einem Einbauwassergehalt zwischen 5,08 und 7,04% ungefähr 30 Sekunden nach der Wasserzugabe bei 2, 4 und 8 Minuten eine Sackungsphase beobachtet. Die im Labormaßstab nachgewiesenen relativen Sackungen bei den Proben GWM1F\_2-3m betragen bei 10°C 2,4 bis 5,85% der Schichtdicke abhängig vom Einbauwassergehalt (Abb. 88 und 89). Der absolute Sackungsbetrag beträgt 35 mm/m, 58,5 mm/m und 24 mm/m bei 10°C.

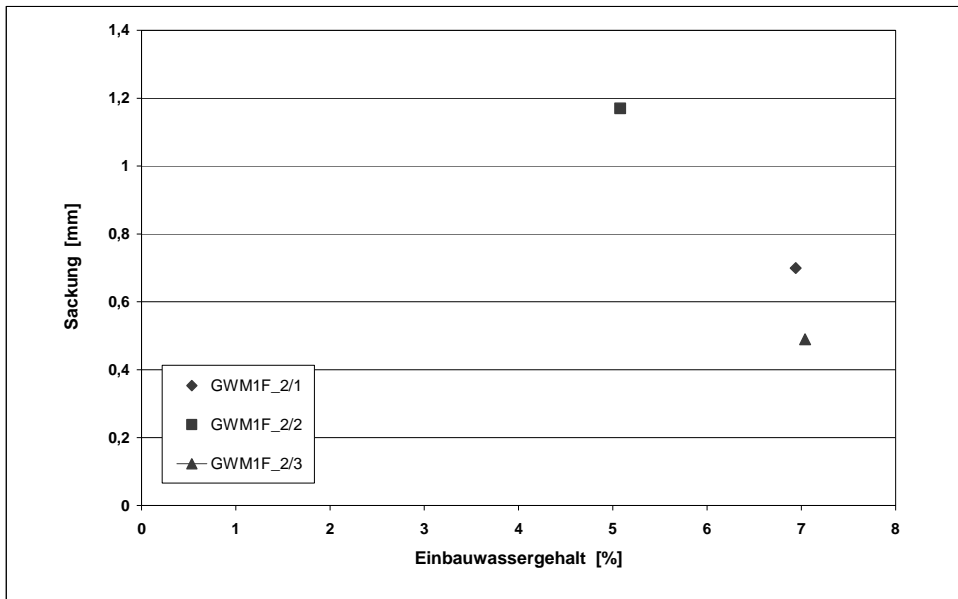


**Abb. 88:** Zeit-Setzungsdiagramm der Probe GWM1F\_2-3m. Die Probe stammt aus 2-3 m Tiefe und wurde bei 10°C mit 50 kN/m<sup>2</sup> belastet.



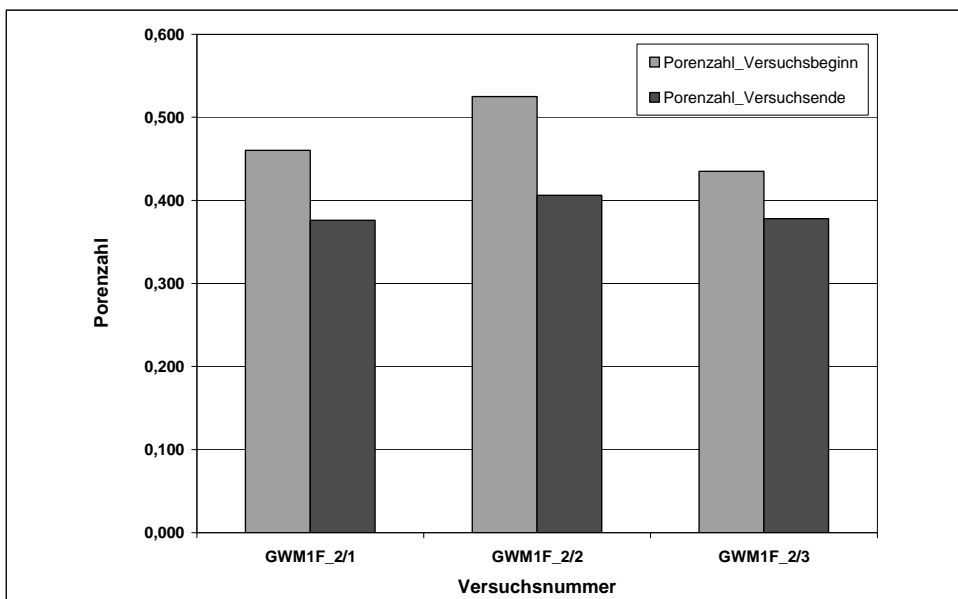
**Abb. 89:** Im Drucksetzungsversuch beobachtete Sackungen der Probe GWM1F\_2-3m aus Abb. 88 nach Wassergabe bei kontinuierlicher Aufsättigung.

Je geringer der Wassergehalt, desto größer fielen die absoluten Sackungsbeträge aus (Abb. 90). Der sich nach der Sackung bei den Proben einstellende Sättigungsgrad lag zwischen 75%, 40% und 71% (Wassergehalt: 15,18%, 8,03% und 14,31%).



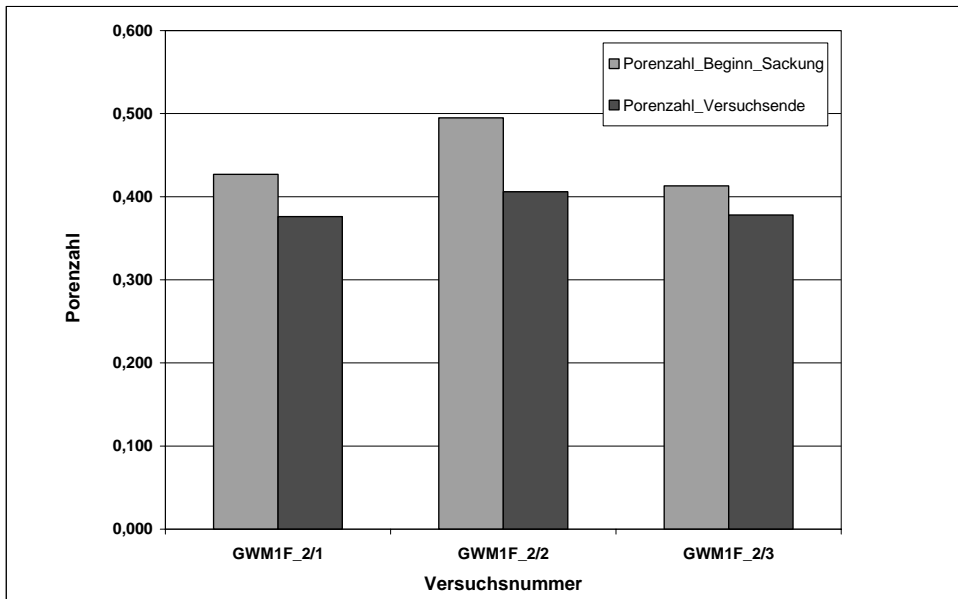
**Abb. 90:** Abhängigkeit des absoluten Sackungsmaßes vom Einbauwassergehalt der Probe GWM1F\_2-3m.

Die Änderung der Porenzahl und des Steifemoduls jeweils zu Beginn und am Ende eines Versuchs sind in Abb. 91 bis 93 dargestellt.

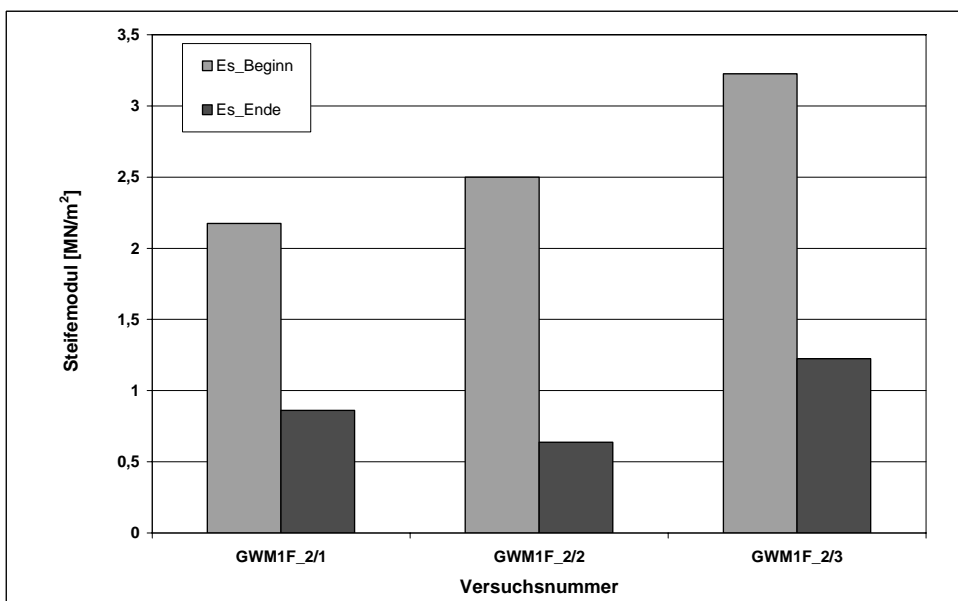


**Abb. 91:** Änderung der Porenzahl der Probe GWM1F\_2-3m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.

Die Porenzahl verringert sich bei allen Versuchs. Die relative Änderung liegt zwischen 13,10% und 22,67% (Abb. 91). Die Änderung der Porenzahl vom Beginn des Sackungsversuches bis zum Versuchsende ist ebenfalls groß. Die relative Änderung liegt zwischen 8,47% und 17,98% (Abb. 92). Die Porenzahl zu Beginn der Sackung ist die Porenzahl, die sich nach Konsolidation zu Beginn des Versuches der Probe ergibt. Die Konsolidation dauerte so lange bis alle Setzungen abgeklungen waren. Danach fand keine Entlastung statt, sondern der Sackungsversuch wurde direkt gestartet.



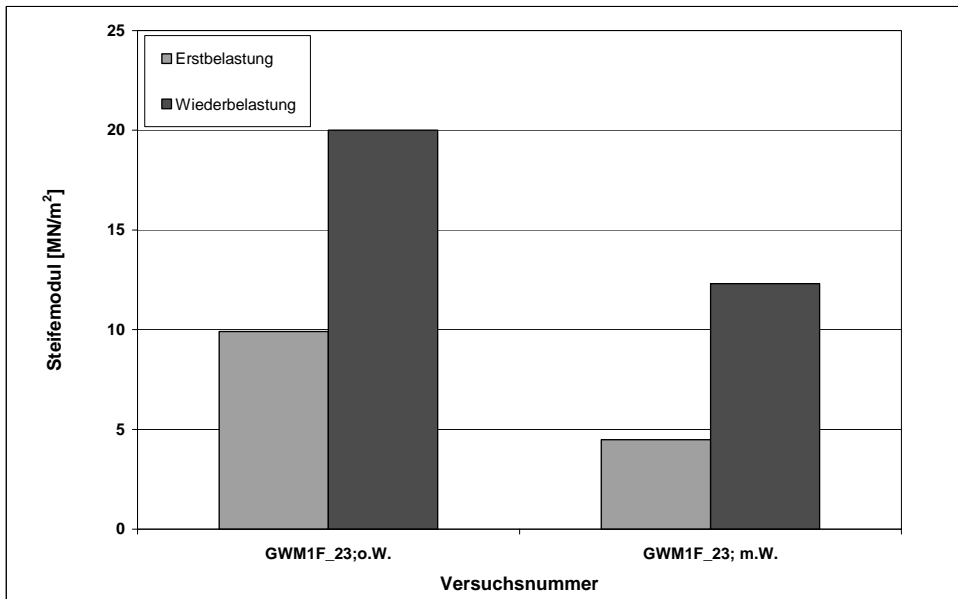
**Abb. 92:** Änderung der Porenzahl der Probe GWM1F\_2-3m von Beginn des Sackungsversuches bis Versuchsende.



**Abb. 93:** Änderung des Steifemoduls  $E_s$  der Probe GWM1F\_2-3m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.

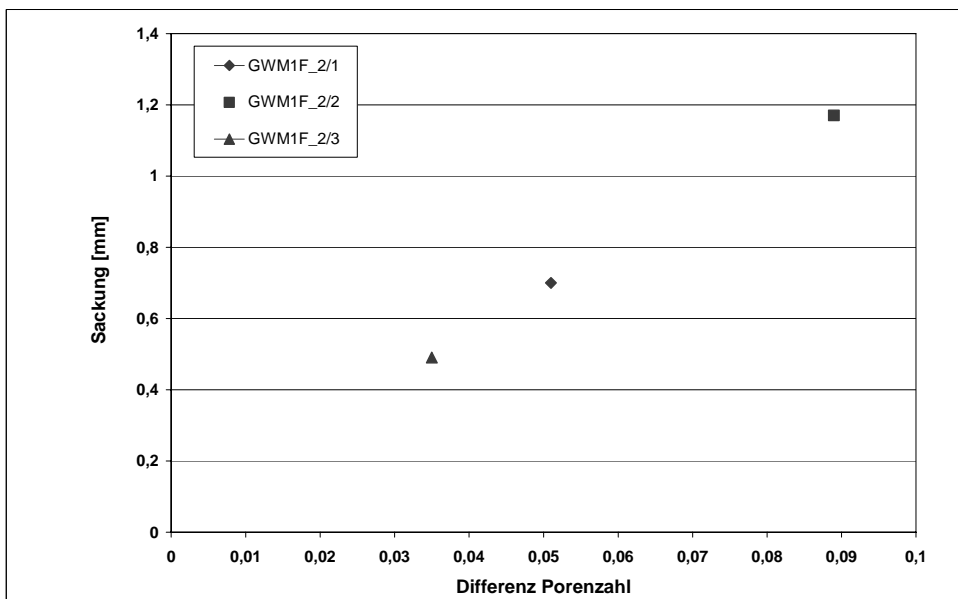
Der Steifemodul  $E_s$  ist entsprechend der geringen Auflastspannung von  $50 \text{ kN/m}^2$  sehr niedrig. Der Steifemodul  $E_s$  verringert sich vom Beginn des Versuches bis zu Versuchsende. Die relative Änderung liegt zwischen  $60,35\%$  und  $74,52\%$  (Abb. 93).

Im Drucksetzungsversuch ohne Wasser liegt der Wert für den Steifemodul bei der Erstbelastung bei  $9,09 \text{ MN/m}^2$  und bei der Wiederbelastung bei  $20 \text{ MN/m}^2$ . Im Drucksetzungsversuch mit Wasser liegt der Erstbelastungswert bei  $4,48 \text{ MN/m}^2$  und der Wiederbelastungswert bei  $12,31 \text{ MN/m}^2$  (Abb. 94).



**Abb. 94:** Erst- und Wiederbelastungswerte mit und ohne Wasser GWM1F\_2-3m.

Die Differenz der Porenzahl zu Beginn des Sackungsversuches und der absolute Sackungsbetrag korrelieren sehr gut. Je größer die Differenz der Porenzahl, desto höher liegt auch der Sackungsbetrag (Abb. 95).



**Abb. 95:** Verhältnis der Differenz der Porenzahl der Probe GWM1F\_2-3m von Beginn des Sackungsversuchs bis Versuchende und der relativen Sackung.

### 6.2.3 Probe GWM1F\_3-4m

Direkt nach der Entnahme aus dem Liner wurden die bodenmechanischen Kennwerte der Probe bestimmt.

In der Korngrößenverteilung der Probe GWM1F\_3-4m dominiert die Sandfraktion vor dem Schluff- und Tonanteil. Der Mittel- und Feinkiesanteil liegt bei 1,78 bzw. 8,34 Masseprozent (Anhang Sieblinie Abb. A7).

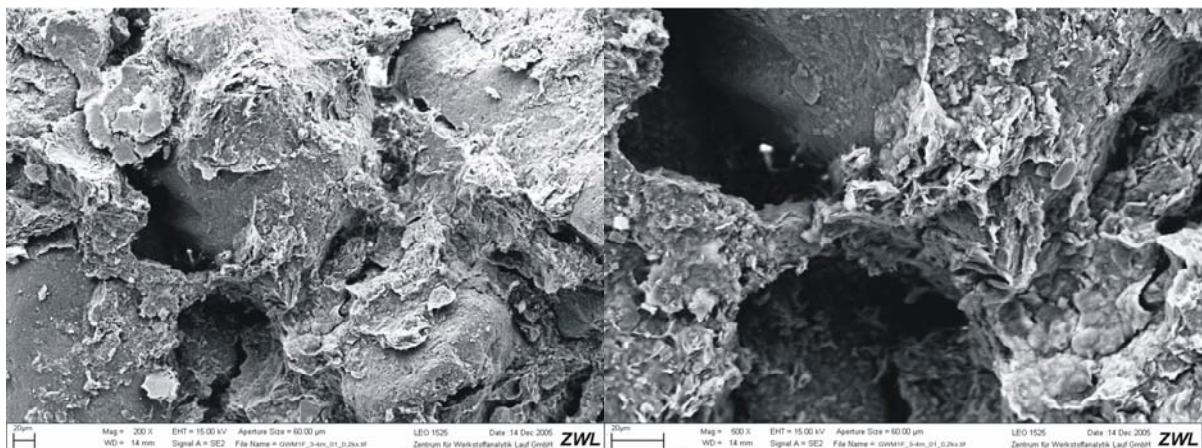
**Tab. 10:** Korngrößenverteilung der Probe GWM1F\_3-4m.

Probe	Teufe [m]	Kornverteilung [Masse-%]								
		gS	mS	fS	Σ S	gU	mU	fU	Σ U	T
GWM1F	3 - 4	14,80	20,49	23,41	58,70	11,67	6,66	1,83	20,16	10,95

Nach DIN 18196 handelt es sich um einen schluffigen Sand, schwach tonig, schwach mittel- bis feinkiesig (S, u, t', fg', mg'). Die Korndichte nach DIN 18124 ist  $2,74 \text{ g/cm}^3$ . Der durchschnittliche natürliche Wassergehalt der Probe betrug 12,27%. Die Trockendichte variiert von  $1,93 \text{ g/cm}^3$  bis  $2,02 \text{ g/cm}^3$ . Die natürliche Porenzahl variiert zwischen 0,354 und 0,422. Der Sättigungsgrad ist 0,75. Der  $V_{gl}$  nach DIN 18128 ist 1,72%.

Das Gefüge der Probe GWM1F\_3-4m weist hauptsächlich eine matrixgestützte Phase auf, in welche die einzelnen Sandkörner eingebettet sind. Die Feinkornphase setzt sich überwiegend aus Mineralkörnern der Schluff- und Tonfraktion zusammen.

Die einzelnen Körner der Sandphase sind teilweise vollständig von Feinmaterial umhüllt. Die Hüllen setzen sich aus Schluff und Ton zusammen. Während die Mineralkörner der Mittel- und Feinsandfraktion angerundet bis gut gerundet sind, ist die Grundform der Schluffkörner kantig (Abb. 96 a und b).



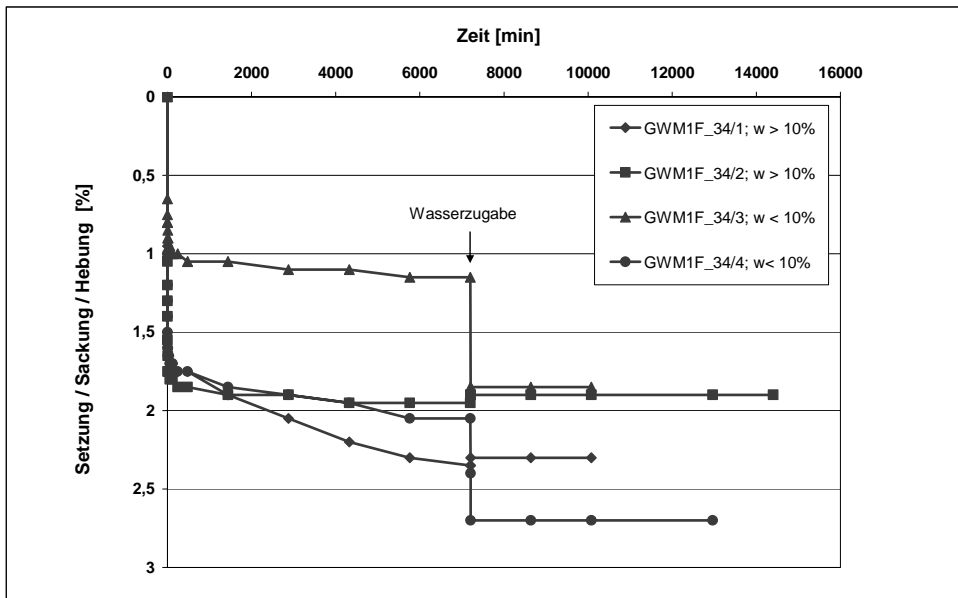
**Abb. 96 a und b:** REM-Aufnahmen der Probe GWM1F\_3-4m.

a (links): Aggregat aus Sandkörnern mit Brücken und Hüllen der Feinfraktion zwischen und auf den Körnern (20 $\mu\text{m}$ ). b (rechts): Brücke aus Feinmaterial zwischen zwei Körnern (20 $\mu\text{m}$ ).

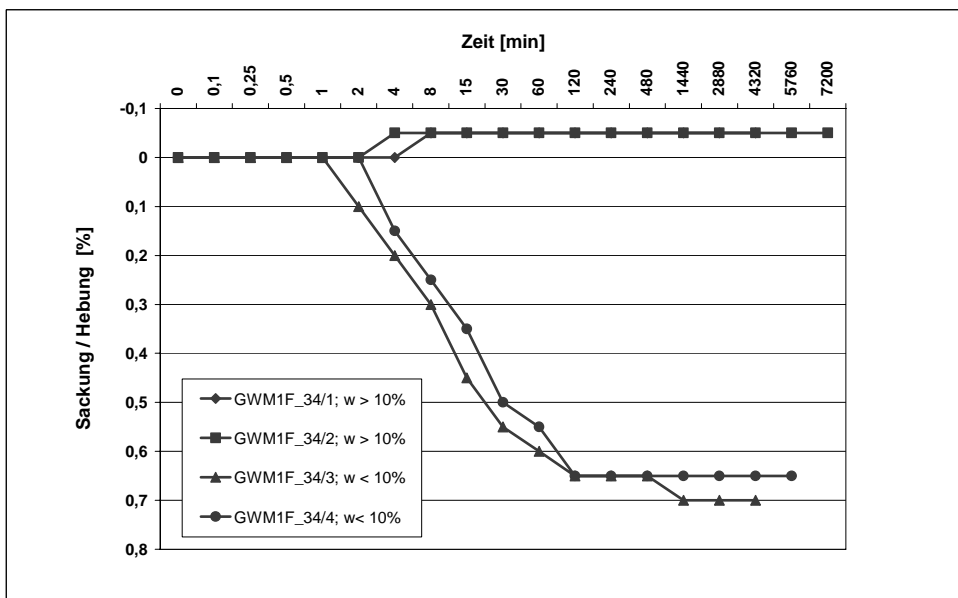
In den REM-Aufnahmen sind deutlich größere Poren zu erkennen, die durch die Feststoffbrücken gebildet werden. Das Porengefüge kann in Inter-Partikular- und Inter-Aggregat-Poren sowie Mikroporen im Inneren der Aggregate (Intra-Aggregat-Poren) charakterisiert werden.

Insgesamt wurden 4 Proben im KD-Versuch bei einer Auflast von  $70 \text{ kN/m}^2$  entsprechend der natürlichen Auflastspannung in 3,50m Tiefe untersucht. Im Zeit-Setzungsverlauf wurden bei einem Einbauwassergehalt 11,18% bzw. 11,55% ungefähr zwei bis vier Minuten nach Wasserzugabe eine Hebungsphase beobachtet. Bei einem Einbauwassergehalt von 5,74% bzw. 6,79% wurde eine Sackungsphase nach ein bzw. zwei Minuten nach Wasserzugabe in jedem Versuch beobachtet. Die Sackungsphase war nach 15 bzw. 120 Minuten abgeschlossen. Die im Labormaßstab nachgewiesenen relativen Hebungen bei

den Proben GWM1F\_3-4/1 und 2 betragen bei 10°C 0,2 bis 0,05 % der Schichtdicke abhängig vom Einbauwassergehalt. Die relativen Sackungen der Proben GWM1F\_3-4/3 und 4 betragen bei 10°C 0,65 bis 0,7% der Schichtdicke abhängig vom Einbauwassergehalt (Abb. 97 und 98). Der absolute Hebungsbetrag beträgt 1 mm/m, der absolute Sackungsbetrag beträgt 32,5 mm/m bzw. 35 mm/m bei 10°C.



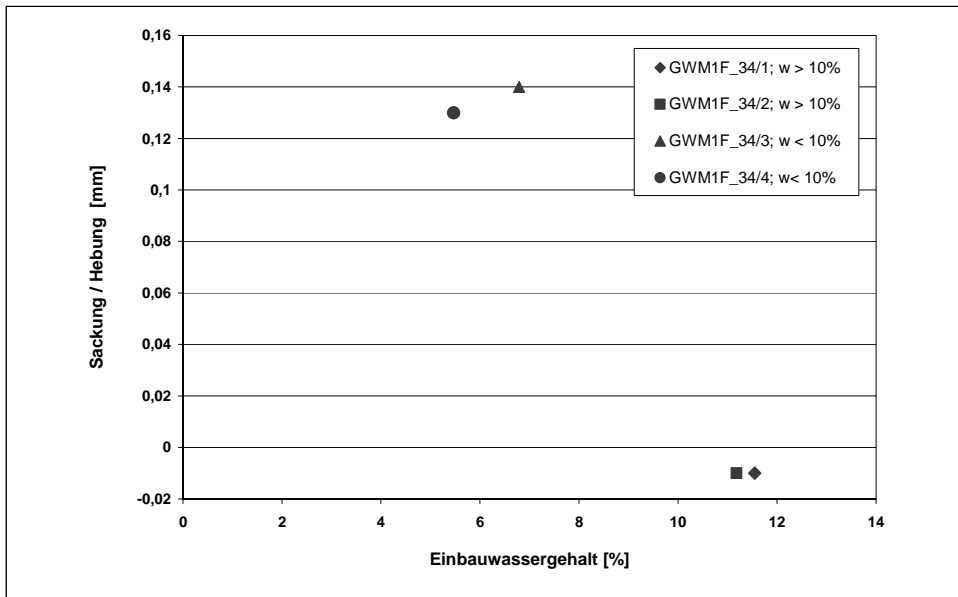
**Abb. 97:** Zeit-Setzungsdiagramm der Probe GWM1F\_3-4m. Die Probe stammt aus 3-4 m Tiefe und wurde bei 10°C mit 70 kN/m<sup>2</sup> belastet.



**Abb. 98:** Im Drucksetzungsversuch beobachtete Sackungen und Hebungen der Probe GWM1F\_3-4m aus Abb. 97 nach Wasserzugabe bei kontinuierlicher Aufsättigung.

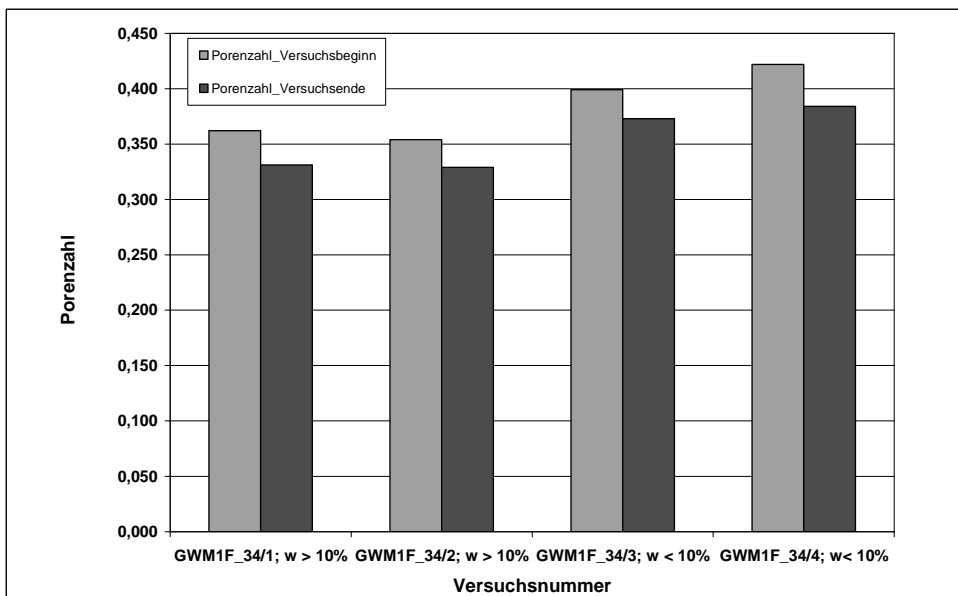
Mit steigendem Wassergehalt in den untersuchten Proben bei 10°C traten keine Sackungen, sondern Hebungen ein. Je geringer der Wassergehalt, desto größer fielen die absoluten Sackungsbeträge aus (Abb. 98 und 99). Der sich nach der Sackung bei den Proben GWM1F\_3-4/1 und GWM1F\_3-4/2 einstellende Sättigungsgrad lag zwischen 82% bzw. 84% (Wassergehalt: 13,47 bis 13,70%).

Bei den Proben GWM1F\_3-4/3 und GWM1F\_3-4/4 lag der Sättigungsgrad nach der Flutung bei 69% bzw. 74% (Wassergehalt: 11,33 bis 12,17%).



**Abb. 99:** Abhängigkeit des absoluten Sackungsmaßes vom Einbauwassergehalt der Probe GWM1F\_3-4m.

Die Änderung der Porenzahl und des Steifemoduls jeweils zu Beginn und am Ende eines Versuchs sind in Abb. 100 bis 102 dargestellt.

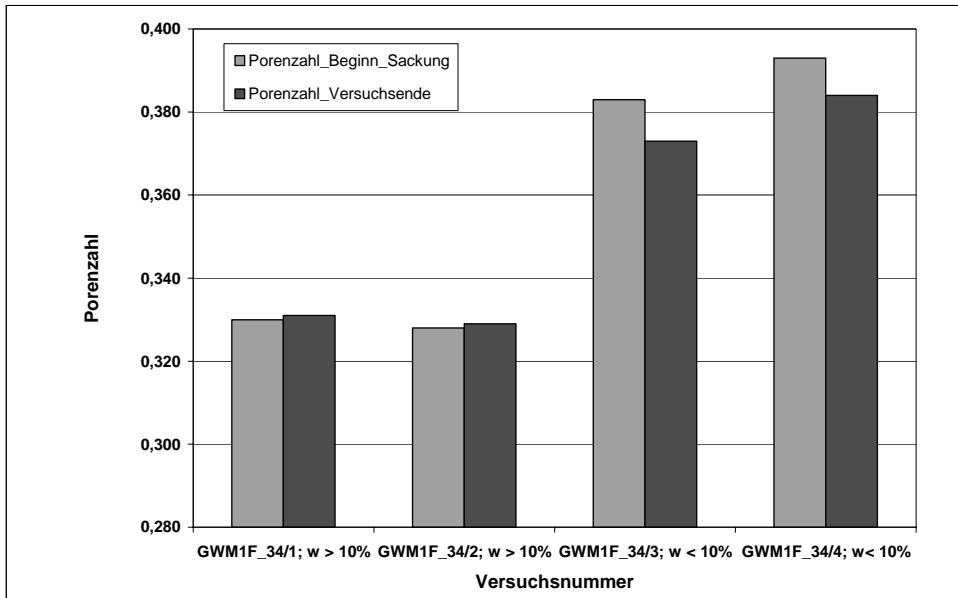


**Abb. 100:** Änderung der Porenzahl der Probe GWM1F\_3-4m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.

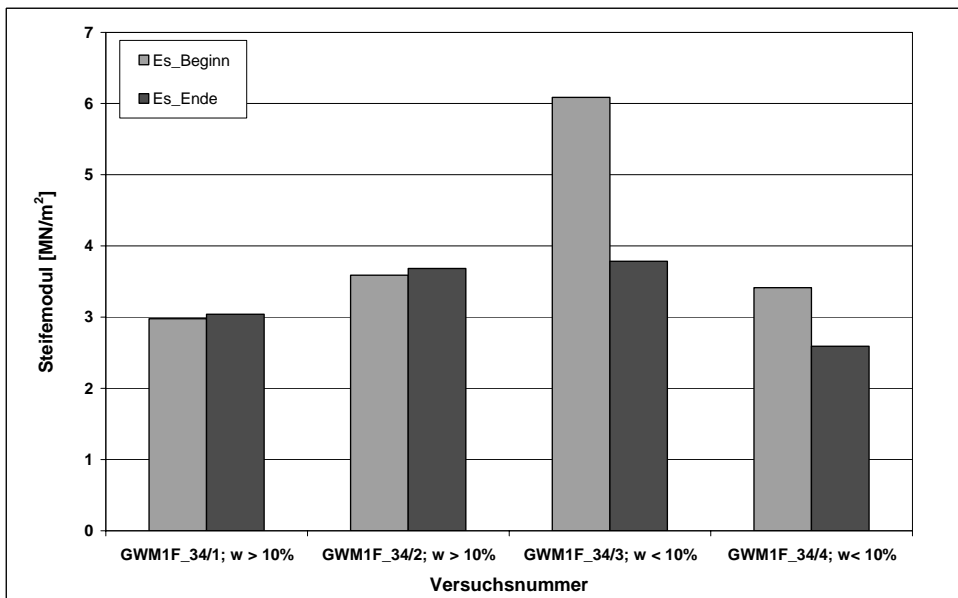
Die Porenzahl verringert sich bei allen Versuchen. Die relative Änderung liegt zwischen 6,52% und 9% (Abb. 100). Im Vergleich dazu fallen die Unterschiede in der Änderung der Porenzahl von Beginn des Sackungsversuches bis zum Versuchsende zwischen den beiden Versuchen mit hohem Einbauwassergehalt und den beiden Versuchen mit niedrigerem Einbauwassergehalt auf. Bei den



Proben GWM1F\_3-4/1 und 2 Fall kommt es zu einer Vergrößerung der Porenzahl nach Wasserzugabe um 0,3%. Bei den Proben GWM1F\_3-4/3 und 4 liegt die relative Änderung zwischen 2,29 und 2,61% (Abb. 101). Die Porenzahl zu Beginn der Sackung ist die Porenzahl, die sich nach Konsolidation zu Beginn des Versuches der Probe ergibt. Die Konsolidation dauerte so lange bis alle Setzungen abgeklungen waren. Danach fand keine Entlastung statt, sondern der Sackungsversuch wurde direkt gestartet.



**Abb. 101:** Änderung der Porenzahl der Probe GWM1F\_3-4m von Beginn des Sackungsversuches bis Versuchsende.

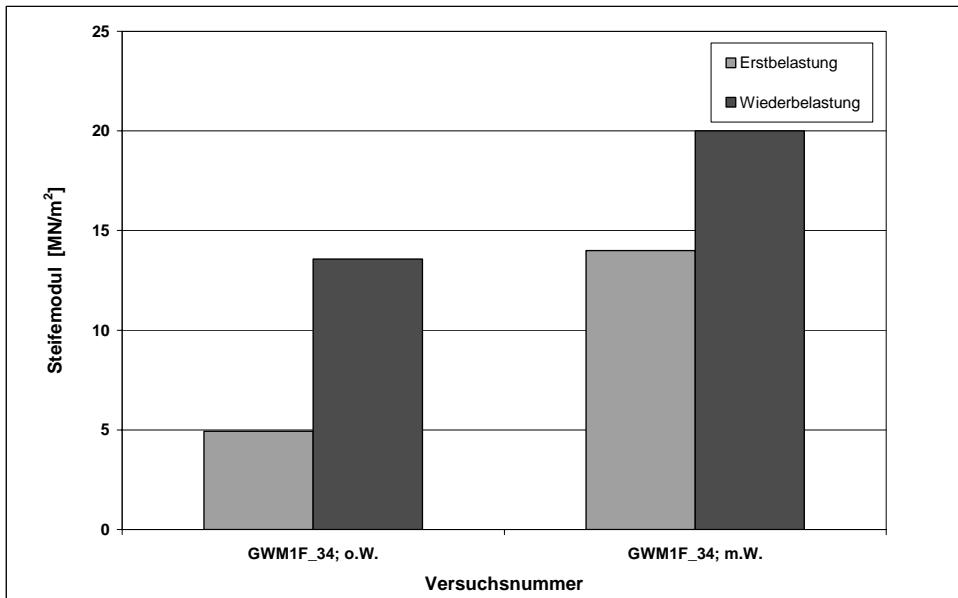


**Abb. 102:** Änderung des Steifemoduls  $E_s$  der Probe GWM1F\_3-4m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.

Der Steifemodul  $E_s$  ist entsprechend der geringen Auflastspannung von 70 kN/m<sup>2</sup> sehr niedrig. Es ist ein eindeutiger Unterschied zwischen den Versuchen mit hohem und niedrigem Einbauwassergehalt festzustellen. Bei den Proben GWM1F\_3-4/1 und 2 verringert sich der Steifemodul nicht, sondern vergrößert

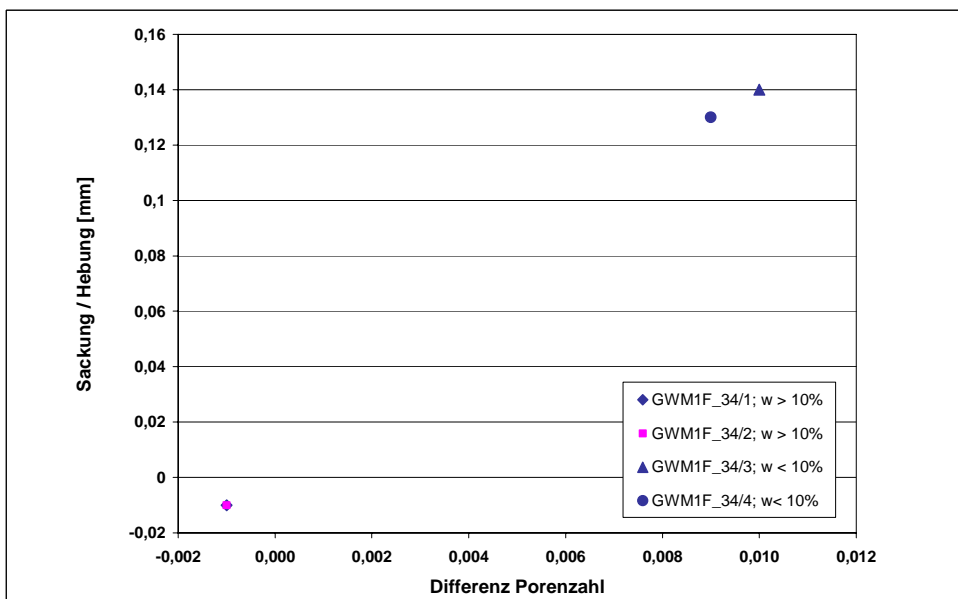
sich um bis zu 2,65%. Bei den Proben GWM1F\_3-4/3 und 4 liegt die relative Änderung zwischen 24,08% und 37,83% (Abb. 102). Die Proben mit hohem Anfangswassergehalt weisen einen sehr niedrigen Steifemodul auf. Mit niedrigerem Wassergehalt nimmt der Wert des Steifemoduls zu.

Im Drucksetzungsversuch ohne Wasser liegt der Wert für den Steifemodul bei der Erstbelastung bei 4,93 MN/m<sup>2</sup> und bei der Wiederbelastung bei 13,57 MN/m<sup>2</sup>. Im Drucksetzungsversuch mit Wasser liegt der Erstbelastungswert bei 14,0 MN/m<sup>2</sup> und der Wiederbelastungswert bei 20 MN/m<sup>2</sup> (Abb. 103).



**Abb. 103:** Erst- und Wiederbelastungswerte mit und ohne Wasser GWM1F\_3-4m.

Die Differenz der Porenzahl zu Beginn des Sackungsversuches und der absolute Sackungsbetrag korrelieren sehr gut. Je größer die Differenz der Porenzahl, desto höher liegt auch der Sackungsbetrag (Abb. 104).



**Abb. 104:** Verhältnis der Differenz der Porenzahl der Probe GWM1F\_3-4m von Beginn des Sackungsversuchs bis Versuchende und der relativen Sackung (Probe 1 und 2 liegen aufeinander).

### 6.2.4 Probe GWM1F\_4-5m

Direkt nach der Entnahme aus dem Liner wurden die bodenmechanischen Kennwerte der Probe bestimmt.

In der Korngrößenverteilung der Probe GWM1F\_4-5m dominiert die Sandfraktion vor dem Schluff- und Tonanteil. Der Mittel- und Feinkiesanteil liegt bei 1,55 bzw. 3,46 Masseprozent (Anhang Sieblinie Abb. A8).

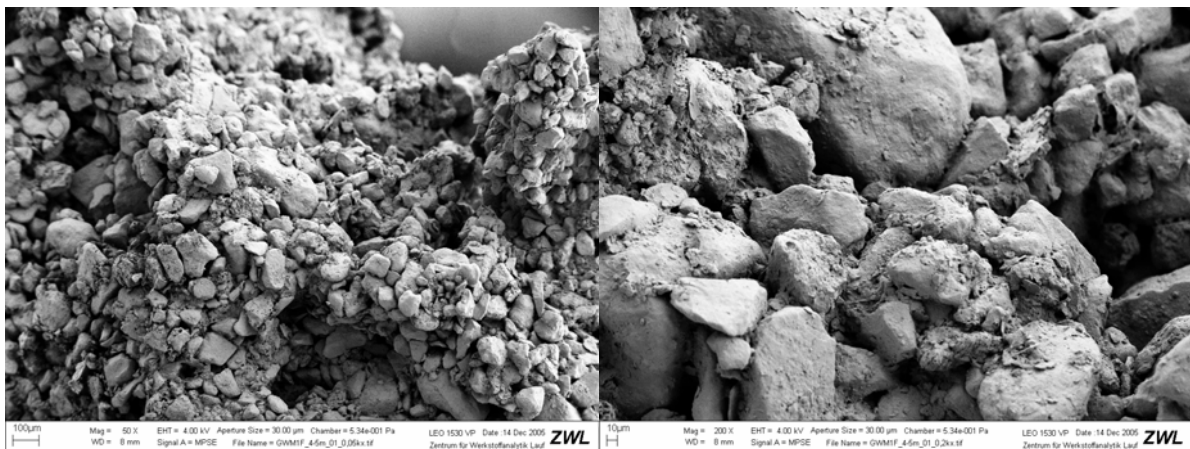
**Tab. 11:** Korngrößenverteilung der Probe GWM1F\_4-5m.

Probe	Teufe [m]	Kornverteilung [Masse-%]								
		gS	mS	fS	Σ S	gU	mU	fU	Σ U	T
GWM1F	4 - 5	8,43	34,78	32,31	75,52	8,66	2,73	0,77	12,16	6,27

Nach DIN 18196 handelt es sich um einen grobsandigen Feinsand, stark mittelsandig, schwach feinkiesig (fS, m $\bar{s}$ , gs, fg'). Die Korndichte nach DIN 18124 ist 2,65 g/cm<sup>3</sup>. Der durchschnittliche natürliche Wassergehalt der Probe betrug 15,87%. Die Trockendichte variiert von 1,82 g/cm<sup>3</sup> bis 1,86 g/cm<sup>3</sup>. Die natürliche Porenzahl variiert zwischen 0,424 und 0,454. Der Sättigungsgrad ist 0,89. Der V<sub>gl</sub> nach DIN 18128 ist 1,20%.

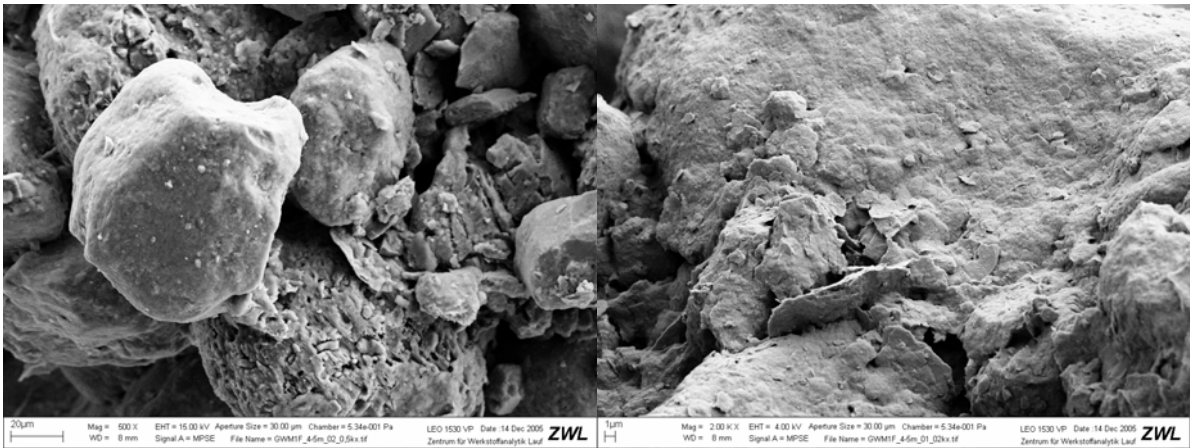
Das Gefüge der Probe GWM1F\_4-5m weist hauptsächlich eine Sandphase mit einem Einzelkorngefüge und darin eingebetteten Aggregaten auf. Die Sandphase setzt sich überwiegend aus Mineralkörnern der Mittel- und Feinsandfraktion zusammen, die durch Brücken zusammengehalten werden, welche von Feinmaterial gebildet werden. Diese Festkörperbrücken (interpartikulare Bindungen) wurden in allen untersuchten erdfeuchten Proben GWM1F4-5m mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops mit Kryotransfersystem (Kryo-REM) nachgewiesen (Abb. 105 a-d).

Die einzelnen Körner der Sandphase sind teilweise vollständig von Feinmaterial umhüllt. Die Hüllen setzen sich aus Feinsand, Schluff und Ton zusammen. Während die Mineralkörner der Grob- und Mittelsandfraktion angerundet bis gut gerundet sind, ist die Grundform der Feinsand- bzw. Grobschluffkörner kantig. Die Kornverteilung der Aggregate ist mit der sie umgebenden Sandmatrix identisch.



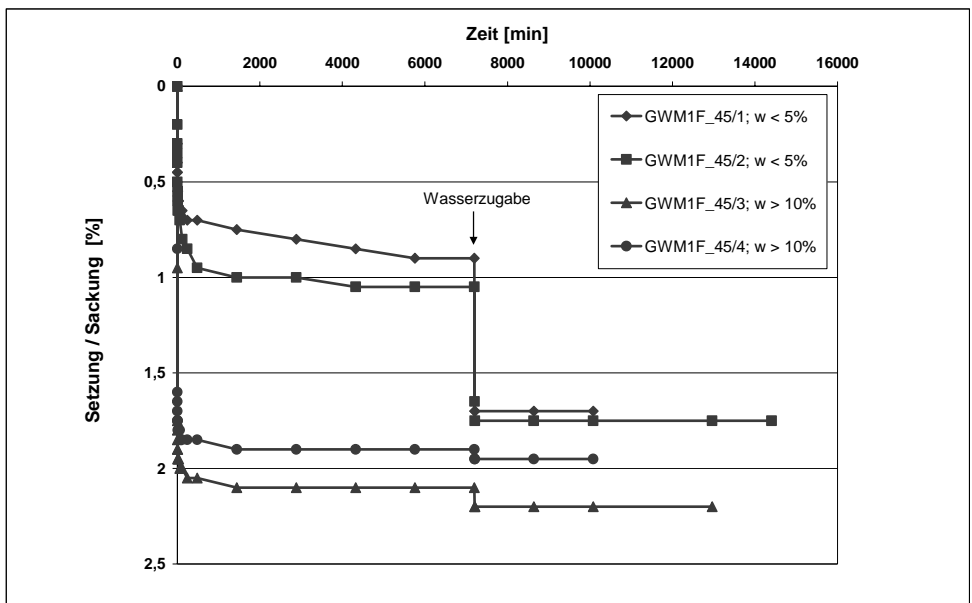
**Abb. 105 a-b:** Kryo-REM-Aufnahmen der Probe GWM1F\_4-5m.

a (links): Aggregat aus Sandkörnern mit Brücken und Hüllen der Feinfraktion zwischen und auf den Körnern (100µm). b (rechts): Deutlich erkennbare Hülle und Brücken aus Feinmaterial (Feinsand, Schluff, Ton) auf den Körnern und geschaffenen Porenräumen (10µm).

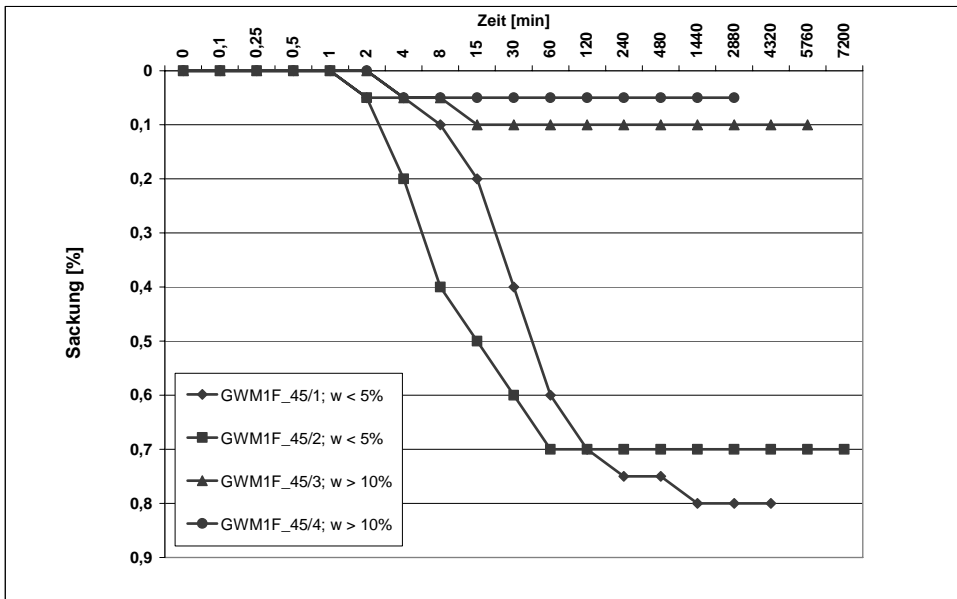


**Abb. 105 c-d:** Kryo-REM-Aufnahmen der Probe GWM1F\_4-5m.  
 c (links): Brücken aus Feinmaterial zwischen den Körnern (20µm). d (rechts): Vergrößerung der Brücken und Überzüge zwischen bzw. auf den Körnern und teilweise deutliche Einregelung der Plättchen zu erkennen, nach Sublimation des Wassers (1µm).

Insgesamt wurden 4 Proben im KD-Versuch bei einer Auflast von 90 kN/m<sup>2</sup> entsprechend der natürlichen Auflastspannung in 4,50m Tiefe untersucht. Im Zeit-Setzungsverlauf wurden bei einem Einbauwassergehalt zwischen 4,02% und 11,42% nach der Wasserzugabe bei ein, zwei und acht Minuten eine Sackungsphase beobachtet. Die im Labormaßstab nachgewiesenen relativen Sackungen bei den Proben GWM1F\_4-5m betragen bei 10°C 0,05 bis 0,8% der Schichtdicke abhängig vom Einbauwassergehalt (Abb. 106 und 107). Der jeweilige absolute Sackungsbetrag beträgt 8, 7, 1 und 0,5 mm/m bei 10°C.

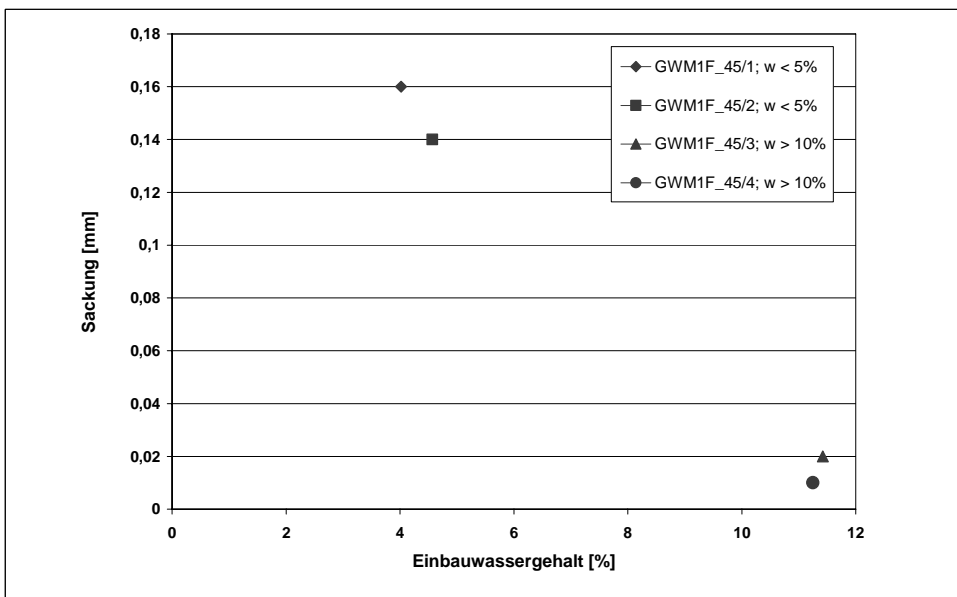


**Abb. 106:** Zeit-Setzungsdiagramm der Probe GWM1F\_4-5m. Die Probe stammt aus 4 - 5 m Tiefe und wurde bei 10°C mit 90 kN/m<sup>2</sup> belastet.



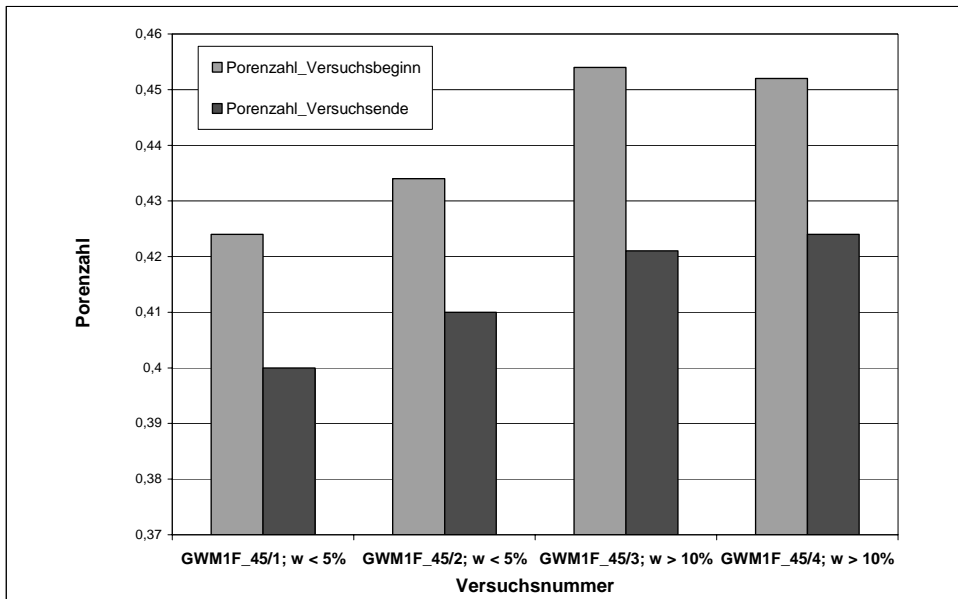
**Abb. 107:** Im Drucksetzungsversuch beobachtete Sackungen der Probe GWM1F\_4-5m aus Abb. 106 nach Wasserzugabe bei kontinuierlicher Aufsättigung.

Je geringer der Wassergehalt, desto größer fielen die absoluten Sackungsbeträge aus (Abb. 107 und Abb. 108). Der sich nach der Sackung bei den Proben einstellende Sättigungsgrad lag bei 69%, 68%, 85% und 93% (Wassergehalt: 12,4%, 12,24%, 15,23% und 16,56%).



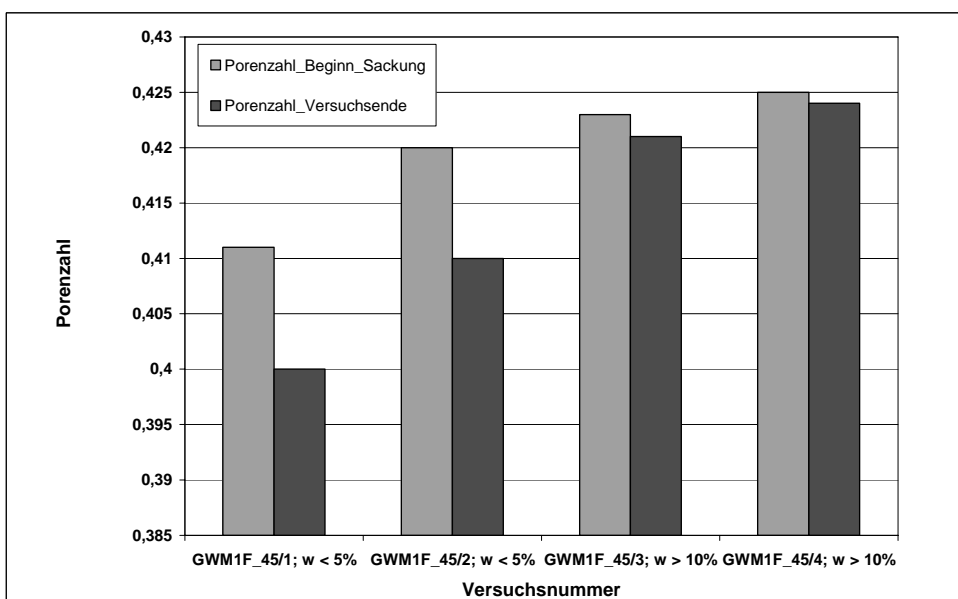
**Abb. 108:** Abhängigkeit des absoluten Sackungsmaßes vom Einbauwassergehalt der Probe GWM1F\_4-5m.

Die Änderung der Porenzahl und des Steifemoduls jeweils zu Beginn und am Ende eines Versuchs sind in Abb. 109 bis 111 dargestellt.

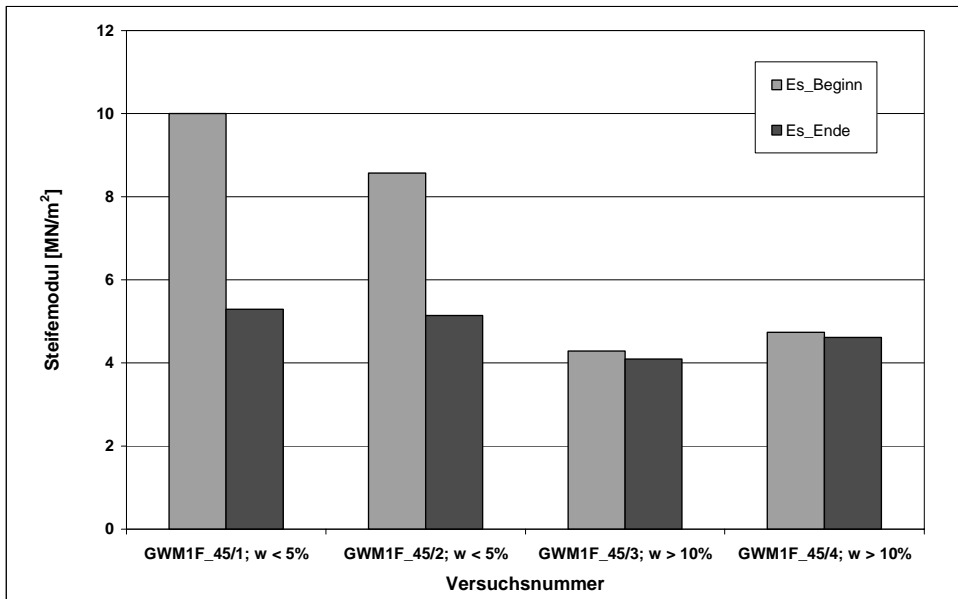


**Abb. 109:** Änderung der Porenzahl der Probe GWM1F\_4-5m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.

Die Porenzahl verringert sich bei allen Versuchen. Die relative Änderung liegt zwischen 3,07% und 6,83% (Abb. 109). Im Vergleich dazu ist die Änderung der Porenzahl von Beginn des Sackungsversuches bis zu Versuchsende geringer. Die relative Änderung liegt nur noch zwischen 0,24% und 2,68% (Abb. 110). Bei den Proben mit geringem Anfangswassergehalt fiel die Veränderung der Porenzahl etwas größer aus als bei höherem Wassergehalt. Die Porenzahl zu Beginn der Sackung ist die Porenzahl, die sich nach Konsolidation zu Beginn des Versuches der Probe ergibt. Die Konsolidation dauerte so lange bis alle Setzungen abgeklungen waren.



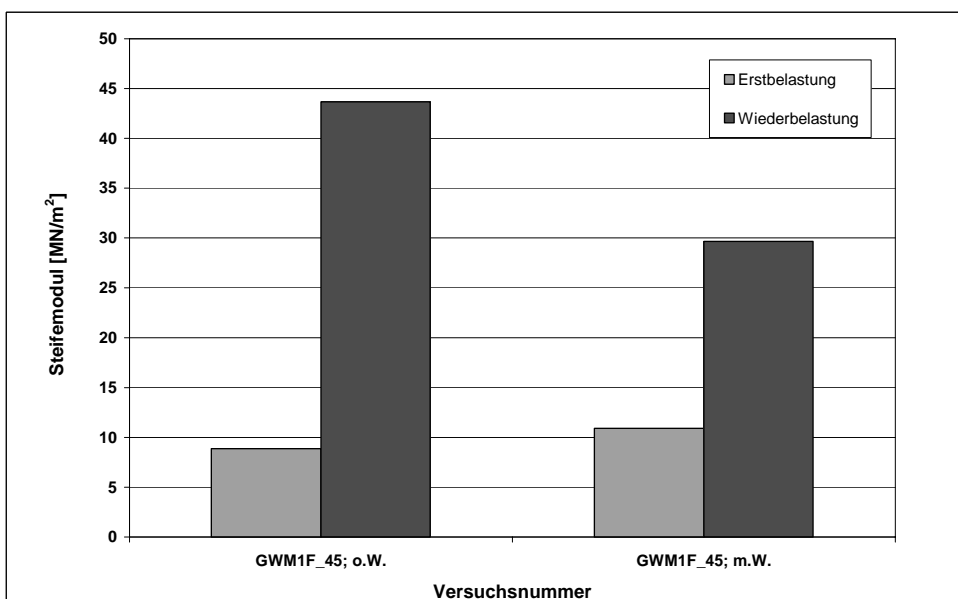
**Abb. 110:** Änderung der Porenzahl der Probe GWM1F\_4-5m von Beginn des Sackungsversuches bis Versuchsende.



**Abb. 111:** Änderung des Steifemoduls  $E_s$  der Probe GWM1F\_4-5m zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.

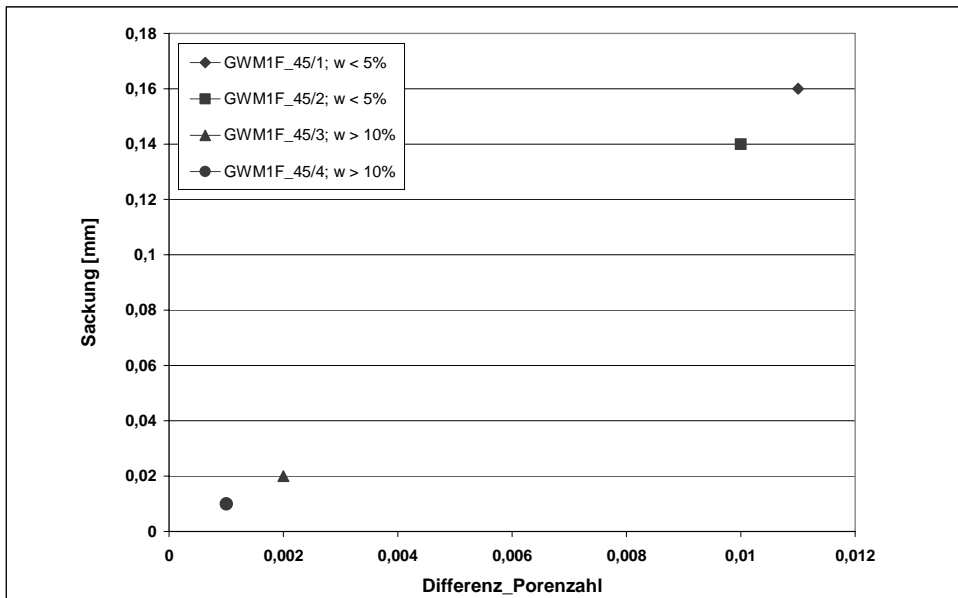
Der Steifemodul  $E_s$  ist entsprechend der geringen Auflastspannung von  $90 \text{ kN/m}^2$  sehr niedrig. Hier ist ein eindeutiger Unterschied zwischen den Versuchen mit hohem und niedrigem Einbauwassergehalt festzustellen. Bei den Proben GWM1F\_4-5/1 und 2 verringert sich der Steifemodul um 47,06% bzw. 40%. Bei den Proben GWM1F\_4-5/3 und 4 liegt die relative Änderung zwischen 4,53% und 2,58% (Abb. 111). Die Proben GWM1F\_4-5/3 und 4 mit hohem Anfangswassergehalt weisen einen sehr niedrigen Steifemodul auf. Mit niedrigerem Wassergehalt bei den Proben GWM1F\_4-5/1 und 2 nimmt der Wert des Steifemoduls zu.

Im Drucksetzungsversuch ohne Wasser liegt der Wert für den Steifemodul bei der Erstbelastung bei  $8,86 \text{ MN/m}^2$  und bei der Wiederbelastung bei  $43,65 \text{ MN/m}^2$ . Im Drucksetzungsversuch mit Wasser liegt der Erstbelastungswert bei  $10,89 \text{ MN/m}^2$  und der Wiederbelastungswert bei  $29,65 \text{ MN/m}^2$  (Abb. 112).



**Abb. 112:** Erst- und Wiederbelastungswerte mit und ohne Wasser GWM1F\_4-5m.

Die Differenz der Porenzahl zu Beginn des Sackungsversuches und der absolute Sackungsbetrag korrelieren sehr gut. Je größer die Differenz der Porenzahl, desto höher liegt auch der Sackungsbetrag (Abb. 113).



**Abb. 113:** Verhältnis Differenz der Porenzahl der Probe GWM1F\_4-5m von Beginn des Sackungsversuchs bis Versuchsende und der Sackung.

### 6.2.5 Probe 537bk3

Direkt nach der Entnahme aus dem Liner wurden die bodenmechanischen Kennwerte der Probe bestimmt.

In der Korngrößenverteilung der Probe 537bk3 dominiert die Sand-Fraktion vor dem Schluff- und Tonanteil. Die Kiesfraktion ist nicht vorhanden (Anhang Sieblinie Abb. A9).

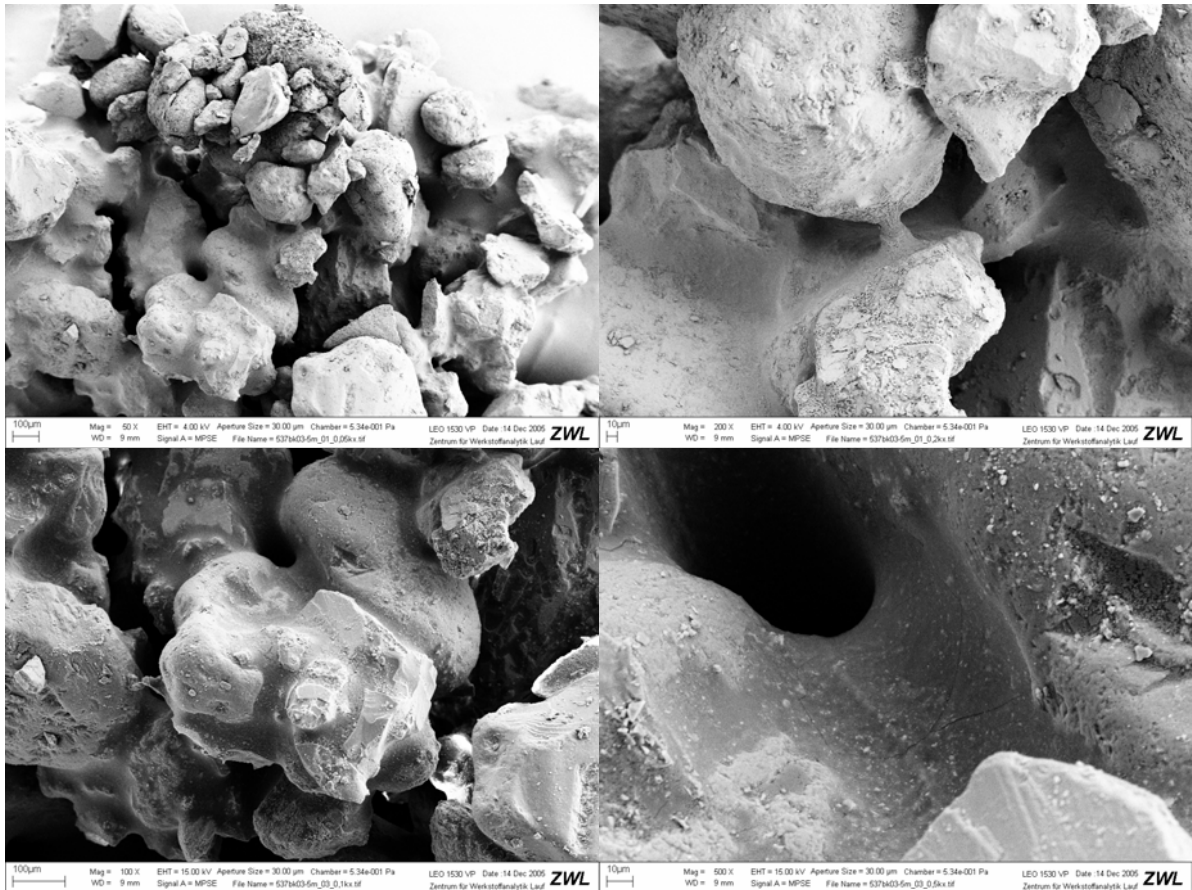
**Tab. 12:** Korngrößenverteilung der Probe 537bk3.

Probe	Teufe [m]	Kornverteilung [Masse-%]				
		gS	mS	fS	Σ S	U/T
537bk3	5 - 6	0,94	90,76	6,36	98,06	0,93

Nach DIN 18196 handelt es sich um einen grobsandigen Mittelsand, schwach feinsandig (mS, gs, fs'). Die Korndichte nach DIN 18124 ist  $2,65 \text{ g/cm}^3$ . Der durchschnittliche natürliche Wassergehalt der Probe betrug 2,02%. Die Trockendichte variiert von  $1,51 \text{ g/cm}^3$  bis  $1,58 \text{ g/cm}^3$ . Die natürliche Porenzahl variiert zwischen 0,673 und 0,745. Der Sättigungsgrad ist 0,08. Der  $V_{g1}$  nach DIN 18128 ist 0,23%.

Das Gefüge der Probe 537bk3 ist ein Einzelkorngefüge ohne Aggregate. Die Sandphase setzt sich überwiegend aus Mineralkörnern der Mittel- und Feinsandfraktion zusammen, die durch Wasserbrücken zusammengehalten werden und so eine scheinbare Kohäsion hervorrufen. Diese Wasserbrücken wurden mit Hilfe des Kryo-REM nachgewiesen (Abb. 114 a-d).

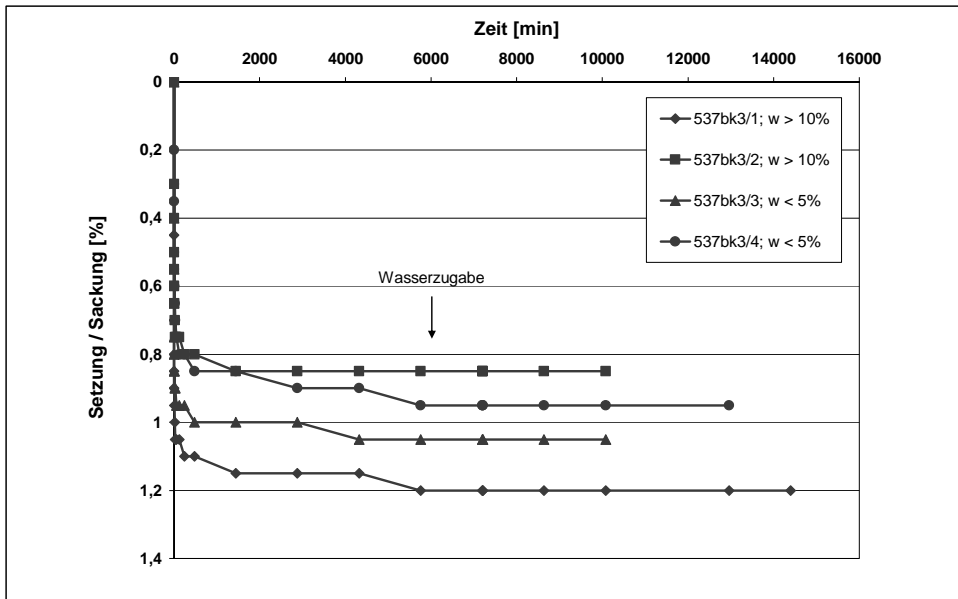




**Abb. 114 a-d:** Kryo-REM-Aufnahmen der Probe 537bk3.

a (links oben): Aggregat aus Sandkörnern mit Wasserbrücken zwischen den Körnern (100µm). b (rechts oben): Deutlich erkennbarer Wassermeniskus zwischen zwei Körnern (10µm). c (links unten): Aggregate durch Wasserbrücken verbunden (100µm), d (rechts unten): Vergrößerung eines sich zurückziehenden Wassermeniskus während der Sublimation zwischen den Körnern (10µm).

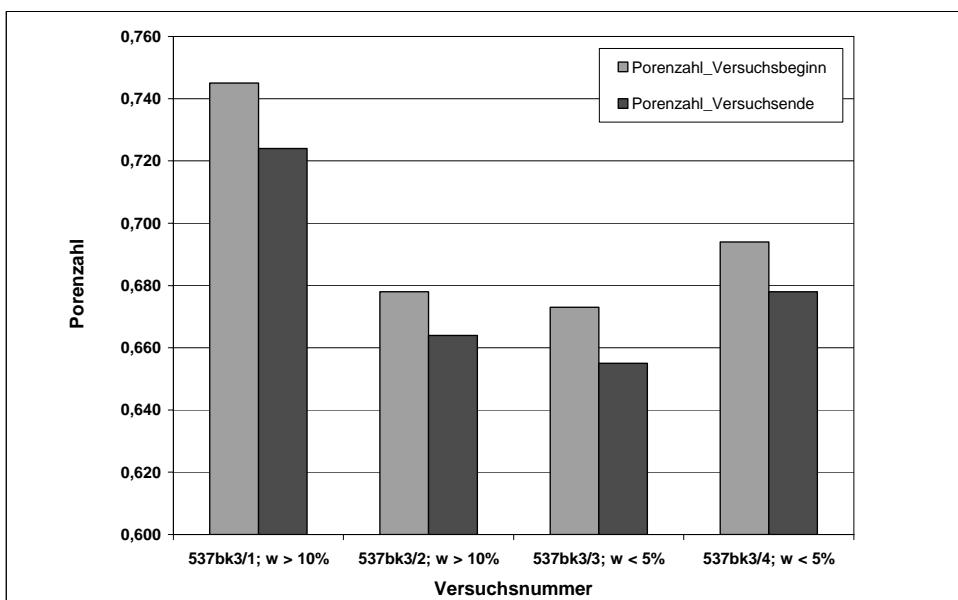
Insgesamt wurden 4 Proben im KD-Versuch bei einer Auflast von 110 kN/m<sup>2</sup> entsprechend der natürlichen Auflastspannung in 5,50m Tiefe untersucht. Im Zeit-Setzungsverlauf wurden bei einem Einbauwassergehalt zwischen 2,23 und 11,07% keine Sackungen beobachtet (Abb. 115).



**Abb. 115:** Zeit-Setzungsdiagramm der Probe 537bk3. Die Probe stammt aus 5 - 6 m Tiefe und wurde bei 10°C mit 110 kN/m<sup>2</sup> belastet.

Eine Abhängigkeit zwischen Wassergehalt und Sackungsmaß besteht nicht. Der sich bei Versuche bei den Proben einstellende Sättigungsgrad lag bei 94%, 87%, 83% und 91% (Wassergehalt: 23,54%, 21,78%, 20,72% und 22,64%).

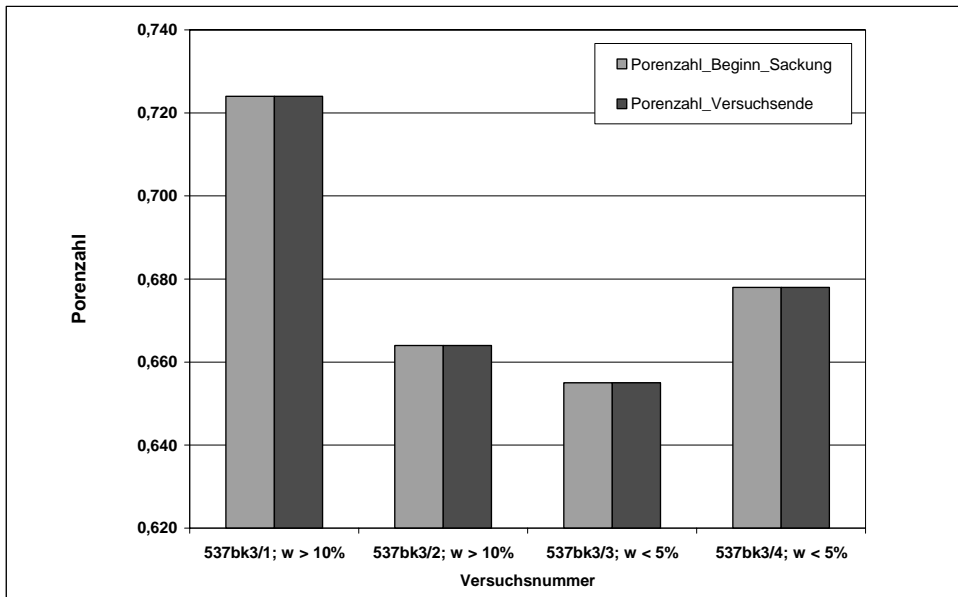
Die Änderung der Porenzahl und des Steifemoduls jeweils zu Beginn und am Ende eines Versuchs sind in Abb. 116 bis 118 dargestellt.



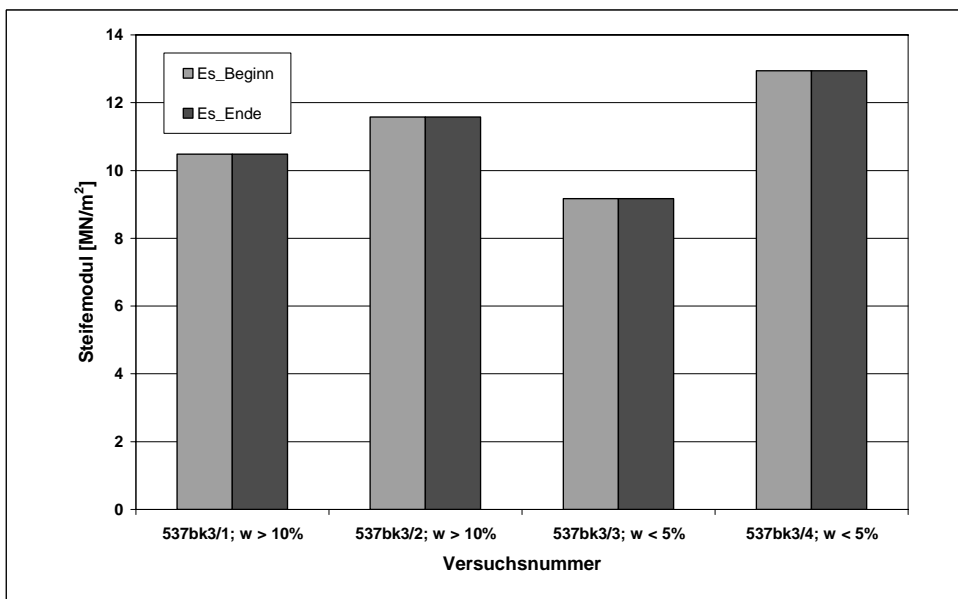
**Abb. 116:** Änderung der Porenzahl der Probe 537bk3 zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.

Die Porenzahl verringert sich bei allen Versuchen. Die relative Änderung liegt zwischen 2,06% und 2,82% (Abb. 116). Es gibt keine Änderung der Porenzahl von Beginn des Sackungsversuches bis zu Versuchsende (Abb. 117). Die Porenzahl zu Beginn der Sackung ist die Porenzahl, die sich nach Konsolidation

zu Beginn des Versuches der Probe ergibt. Die Konsolidation dauerte so lange bis alle Setzungen abgeklungen waren.

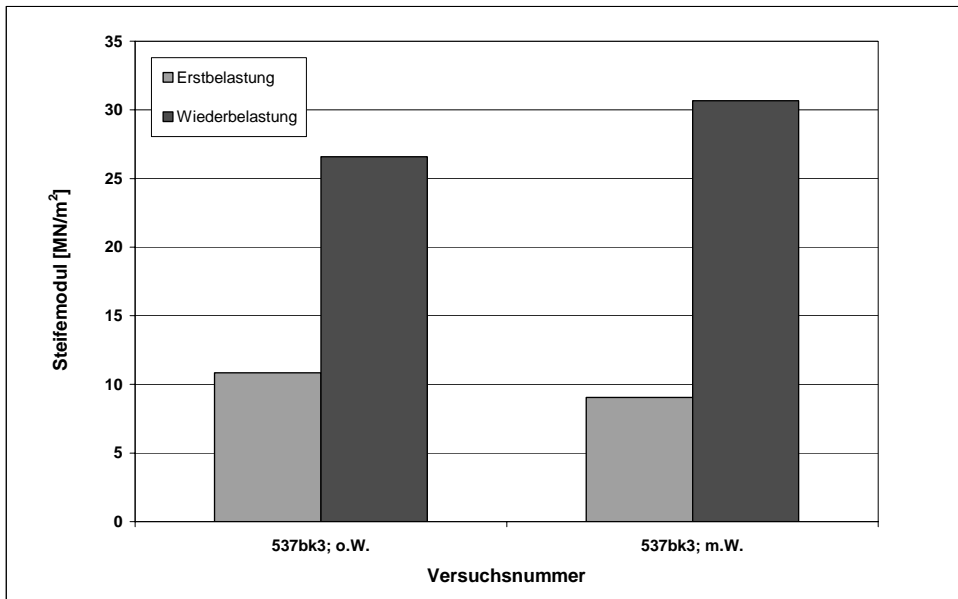


**Abb. 117:** Änderung der Porenzahl der Probe 537bk3 von Beginn des Sackungsversuches bis Versuchsende.



**Abb. 118:** Änderung des Steifemoduls  $E_s$  der Probe 537bk3 zu Beginn und am Ende jedes Versuchs.

Der Steifemodul  $E_s$  ist entsprechend der geringen Auflastspannung von  $110 \text{ kN/m}^2$  und der lockeren Lagerung des Sandes sehr niedrig. Es ist keine Änderung von Beginn des Versuches bis zum Abschluss der Aufsättigung zu messen (Abb. 118). Im Drucksetzungsversuch ohne Wasser bei einer Normalspannung von  $110 \text{ kN/m}^2$  liegt der Wert für den Steifemodul der Erstbelastung bei  $10,85 \text{ MN/m}^2$  und bei der Wiederbelastung bei  $26,58 \text{ MN/m}^2$ . Im Drucksetzungsversuch mit Wasser liegt der Erstbelastungswert bei  $9,06 \text{ MN/m}^2$  und der Wiederbelastungswert bei  $30,66 \text{ MN/m}^2$  (Abb. 119).



**Abb. 119:** Erst- und Wiederbelastungswerte mit und ohne Wasser der Probe 537bk3.

Die Differenz der Porenzahl zu Beginn des Sackungsversuches und der absolute Sackungsbetrag korrelieren sehr gut. Die Differenz der Porenzahl ist Null, somit ist auch der Sackungsbetrag Null.

## 7 Sackungspotenzialabschätzung

Die Berechnung der Verformung der Geländeoberfläche ohne zusätzliche Lasteinwirkung durch Gebäude wurde aus den Ergebnissen der Sackungsversuche der untersuchten Lockermaterialien errechnet. Im Gegensatz zur Setzungsberechnung infolge Konsolidation ist bei der Sackungsberechnung keine Grenztiefe definiert. Die Sackungen werden über die Gesamt-Mächtigkeit der jeweiligen Schichten bestimmt, wenn innerhalb der Schicht kein freies Grundwasser vorhanden ist. Bei Vorhandensein von Grundwasser sind die Sackungen über die Mächtigkeit der Schicht oberhalb des Grundwasserspiegels zu bestimmen. In den Berechnungen wurde angenommen, dass eine Aufsättigung bis zur Oberfläche stattgefunden hat.

### 7.1 Bitterfeld/Wolfen

Für die Berechnung wurde ein Idealprofil verwendet, welches aus den GWM-Bohrpunkten BVV 472, BVV 0101 und BVV 624 konstruiert wurde. Als Grundlage wurde das geologische Profil aus Kapitel 4 (Abb. 31) gewählt. Die Bohrprofile zeichnen sich durch sehr variable Mächtigkeiten der unterschiedlichen Lithologien aus. Das für die Modellierung verwendeten Profil wurde so gewählt, dass es trotz der zum Teil erheblichen Variabilität der jeweiligen Mächtigkeiten als repräsentativ für den Raum Bitterfeld/Wolfen angesehen werden kann. Das Profil beinhaltet die Niederterrassensedimente und reicht bis zum Oberen Glimmersand. Die angegebenen Grundwasserpegel für diese Berechnungen basieren auf Grundwassergleichenplänen aus dem Jahr 2002, die im Landratsamt Bitterfeld eingesehen werden konnten. Sie stellen den höchsten je erreichten Grundwasserstand in diesem Raum dar. Aktuelle Grundwassergleichenpläne waren aufgrund laufender Planfeststellungs- und Gerichtsverfahren in diesem Raum nicht zugänglich.

#### 7.1.1 Ergebnisse und Diskussion

In den Tabellen 13 und 14 sind die Ausgangswerte für die Berechnung und die Ergebnisse dargestellt.

In der Berechnung wurde angenommen, dass die Aufsättigung bis zur Oberkante der Niederterrasse stattgefunden hat.

**Tab.13:** Ausgangswerte für die Sackungsberechnung für den Raum Bitterfeld/Wolfen.

Schicht	Versuchsnummer	Lithologie	Teufe [m]	Auflastspannung [kN/m <sup>2</sup> ]	Durchschnittl. Mächtigkeit [m]
1	BVV 624	Niederterrasse	5,5	110	7
2	BVV624_7	„Zwischenstauer“ der Niederterrasse	7	140	3
3	BVV_0101	Tonmudde	13-13,5	260	1,0 - 2,7
4	472_11_23/20	Oberer Bitterfelder Glimmersand	23	460	30

**Tab. 14:** Ergebnisse der Sackungsberechnung für den Raum Bitterfeld/Wolfen.

Schicht	Min. Sackung		Max. Sackung		Min. Sackung/ Schichtmächtigkeit		Max. Sackung / Schichtmächtigkeit	
	[mm]	[mm/m]	[mm]	[mm/m]	[mm]	[cm]	[mm]	[cm]
<b>1</b>	0,03	1,5	0,12	6	10,5	1,05	42	4,2
<b>2</b>	0,14	7	0,16	8	21	2,1	24	2,4
<b>3</b>	0,03	1,5	0,17	8,5	1,5 - 4,05	0,15 - 0,405	8,5 - 22,95	0,85 - 2,295
<b>4</b>	0,01	0,5	0,03	1,5	15	1,5	45	4,5
<b>Σ Sackungen (gerundet)</b>					<b>50</b>	<b>5,0</b>	<b>120 bis 134</b>	<b>12 bis 13</b>

Bei einer Annahme, dass die Sackungen bis zur Geländeoberfläche wirken, beträgt die gesamte vertikale Verformung der Geländeoberfläche minimal 5 cm und maximal 13 cm.

Aufgrund von Inhomogenitäten innerhalb der untersuchten Schichten kann nicht davon ausgegangen werden, dass mit zunehmender Tiefe eine stetige Abnahme der Sackungsfähigkeit verbunden ist.

Im Idealprofil steht die Tonmudde mit 1,0 m an. Somit verringert sich die minimale Gesamtsackung auf 4,8 cm.

Ein Vergleich der aus den Sackungsuntersuchungen erhaltenen Steifemoduln mit denen aus den Erst- und Wiederbelastungsversuchen (Anhang Tab. A11) zeigt, dass der geringere Wert der Oberflächenverformung wahrscheinlicher ist. Der Wiederanstieg des Grundwassers vollzieht sich je nach lateral wechselnden Schichtmächtigkeiten (Abb. 28), Inhomogenitäten in der Lithologie und damit verbundenen schwankenden Durchlässigkeiten innerhalb einer Schicht (vgl. Kap. 4.4.1 und 4.4.2) nicht gleichmäßig und verläuft relativ langsam. Somit laufen auch die Sackungen entsprechend langsam in dem Maße ab wie die Schichten sukzessive mit Wasser gesättigt werden. In der Berechnung nicht berücksichtigt ist das Maß der Kapillarsackungen, mögliche unterschiedliche Spiegelhöhen, die sich aufgrund von Inhomogenitäten innerhalb einzelner Schichten ergeben, und somit lateral zu differenziellen Sackungen führen können. Dadurch können sich auch Diskrepanzen zwischen berechneten und tatsächlichen Sackungen ergeben. Unter der Annahme von gleichmäßigen Sackungen und einer fachgerechten Gründung ist eine Gefährdung von Bauwerken durch Risse oder Verkantungen nach der Sackungsberechnung weitestgehend auszuschließen. Größere Differenzen werden ausgeschlossen, da davon ausgegangen wird, dass mit zunehmender Belastung unter dem Bauwerk auch der Sackungsbetrag abnimmt.

Im ungünstigsten Fall ist es aber durchaus möglich, dass es aufgrund von lateral auftretenden Schichtwechseln und unterschiedlichen Mächtigkeiten zu Setzungsdifferenzen von bis zu 13 cm kommen kann, die aber für Bauwerke in diesem Fall noch innerhalb der zulässigen Winkelverdrehungen liegen. Um für den Einzelfall genaue Werte bestimmen zu können, wird eine Kombination aus kleinmaßstäblicher Felderkundung und Laborversuchen empfohlen.

## 7.2 Hessisches Ried

### 7.2.1 Sackungsberechnung

Für die Berechnung wurde ein Idealprofil verwendet, welches aus den GWM-Bohrpunkten GWM1F und 537bk3 konstruiert wurde. Als Grundlage wurden die oberen 15 m des geologischen Profils aus Kapitel 5 (Abb. 36) gewählt. Die Bohrprofile zeichnen sich durch sehr variable Mächtigkeiten der unterschiedlichen Lithologien aus. Das für die Modellierung verwendete Profil wurde so gewählt, dass es trotz der zum Teil erheblichen Variabilität der jeweiligen Mächtigkeiten als repräsentativ für beide untersuchten Räume des Hessischen Rieds angesehen werden kann. Das Profil beinhaltet holozäne und jungpleistozäne Auesedimente (Hochflutlehme zum Teil mit Geröllen vom Sprendlinger Horst) über den pleistozänen Sanden (Flug- / Dünen sande und Terrassensanden von Rhein und Neckar). Die angegebenen Grundwasserpegel für diese Berechnungen basieren auf Grundwassergleichenplänen aus dem Jahr 2001. Sie stellen den höchsten je erreichten Grundwasserstand in diesem Raum dar.

#### 7.2.1.1 Ergebnisse und Diskussion

In den Tabellen 16 und 17 sind die Ausgangswerte für die Berechnung und die Ergebnisse dargestellt.

**Tab. 15:** Ausgangswerte für die Sackungsberechnung für das Hessische Ried.

Schicht	Versuchsnummer	Lithologie	Teufe [m]	Auflastspannung [kN/m <sup>2</sup> ]	Durchschnittl. Mächtigkeit [m]
1	GWM1F_0-1m	Hochflutlehme Alluvium (Holozän)	0,3 – 1	18	1,8
2	GWM1F_2-3m	Diluvium u. Flugsand mit Geröllen des Untergrundes (Pleistozän)	2 – 3	50	0,4
3	GWM1F_3-4m		3 – 4	70	0,8
4	GWM1F_4-5m		4 – 5	90	0,8
5	537bk3	Pleist. Flugsand	5-30	110	25

**Tab. 16:** Ergebnisse der Sackungsberechnung für das Hessische Ried.

Schicht	Min. Sackung		Max. Sackung		Min. Sackung / Schichtmächtigkeit		Max. Sackung / Schichtmächtigkeit	
	[mm]	[mm/m]	[mm]	[mm/m]	[mm]	[cm]	[mm]	[cm]
1	0,34	19,5	0,74	37	35,1	3,51	66,6	6,66
2	0,49	24,5	1,17	58,5	9,8	0,98	23,4	2,34
3	0,13	6,5	0,14	7	5,2	0,52	5,6	0,56
4	0,01	0,5	0,16	8	0,4	0,04	6,4	0,64
5	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Σ Sackungen (gerundet)</b>					<b>50</b>	<b>5</b>	<b>100</b>	<b>10</b>

Bei einer Annahme, dass die Sackungen bis zur Geländeoberfläche wirken, beträgt die gesamte vertikale Verformung der Geländeoberfläche minimal 5 cm und maximal 10 cm.

Aufgrund von Inhomogenitäten innerhalb der untersuchten Schichten kann nicht davon ausgegangen werden, dass mit zunehmender Tiefe eine stetige Abnahme der Sackungsfähigkeit verbunden ist.

Ein Vergleich der aus den Sackungsuntersuchungen erhaltenen Steifemoduln mit denen aus den Erst- und Wiederbelastungsversuchen zeigt, dass der geringere Wert der Oberflächenverformung wahrscheinlicher ist (Anhang Tab. A12). Der Wiederanstieg des Grundwassers vollzieht sich je nach lateral wechselnden Schichtmächtigkeiten (Abb. 36), Inhomogenitäten in der Lithologie und damit verbundenen schwankenden Durchlässigkeiten innerhalb einer Schicht (vgl. Kap. 5.4) nicht gleichmäßig und verläuft relativ langsam. Somit laufen auch die Sackungen entsprechend langsam in dem Maße ab wie die Schichten sukzessive mit Wasser gesättigt werden. In der Berechnung nicht berücksichtigt ist das Maß der Kapillarsackungen, mögliche unterschiedliche Spiegelhöhen, die sich aufgrund von Inhomogenitäten innerhalb einzelner Schichten ergeben, und somit lateral zu differenziellen Sackungen führen können. Dadurch können sich auch Diskrepanzen zwischen berechneten und tatsächlichen Sackungen ergeben. Unter der Annahme von gleichmäßigen Sackungen und einer fachgerechten Gründung ist eine Gefährdung von Bauwerken durch Risse oder Verkantungen nach der Sackungsberechnung weitestgehend auszuschließen. Im ungünstigsten Fall ist es aber möglich, dass es aufgrund von lateral auftretenden kleinräumigen Schichtwechselln und unterschiedlichen Mächtigkeiten zu Setzungsdifferenzen von bis zu 10 cm kommen kann, die aber für Bauwerke in diesem Fall noch innerhalb der zulässigen Winkelverdrehungen liegen.

Um für den Einzelfall genaue Werte bestimmen zu können, wird eine Kombination aus kleinmaßstäblicher Felderkundung und Laborversuchen empfohlen.



## 8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen semiquantitative Tendenzen des Verhaltens von gewachsenem Boden bei Grundwasserwiederanstieg auf. Eine größere regionale Verteilung von Bohrproben wäre wünschenswert gewesen, war aber aufgrund von rechtlichen Umständen nicht möglich. Die Proben BVV 472\_11\_23 (Bitterfelder Glimmersand) zeigen Verformungen, die im Genauigkeitsbereich der Messuhr liegen. Aufgrund der guten Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und der deutlich zu erkennenden Temperaturabhängigkeit der Sackungen können systematische Messfehler ausgeschlossen werden.

Die geringe Probenhöhe in allen Versuchen ermöglichte keine vollständige Ausbildung eines Kapillarsaumes. Um die Proben möglichst ungestört einbauen zu können, konnte allerdings nicht auf die kleinen Probenabmessungen verzichtet werden. Bei der Aufsättigung konnten aufgrund der gewählten Versuchsdurchführung Belastungsänderungen, die durch die Änderung der Wichte des Lockermaterials hervorgerufen werden, nicht gemessen werden.

Die wichtigsten Tendenzen der Ergebnisse beider Untersuchungsräume sind:

- Bei allen Versuchen - außer den Proben BVV 472\_11\_23 aus dem Raum Bitterfeld und 537bk3 aus dem Hessischen Ried - ist das Maß der Sackung vom Wassergehalt abhängig.
- Je größer die Differenz der Porenzahl zu Beginn der Sackung bis Versuchsende ist, desto größer ist die absolute Sackung. Bei Hebungen vergrößert sich die Porenzahl geringfügig ( $< 1\%$ ).
- Der Steifemodul zeigt eine deutliche Abhängigkeit vom Wassergehalt der Proben. Er verringert sich mit zunehmendem Wassergehalt bei Sackungen und erhöht sich bei Hebungen.
- Es ist eine Abhängigkeit zwischen dem Auftreten von Sackungen und Schluff- bzw. Tongehalt der Proben zu erkennen.
- Es wurde keine Abhängigkeit zwischen Ungleichförmigkeitsgrad und Sackungsmaß festgestellt.

Durch die Verwendung von Proben in Linern sollte eine Konservierung des natürlichen Aufbaus des Bodens erreicht werden. Die Proben weisen vertikal über geringe Mächtigkeiten große Inhomogenitäten auf, wie es für einen natürlichen Boden durchaus normal ist. Nicht ausgeschlossen werden kann, dass das Gefüge von rolligen bis schwachbindigen Böden durch das Probengewinnungsverfahren in Linern aufgelockert und das Gefüge von bindigen Böden verdichtet wurde. Auf die Festkörperbrücken hatte dies jedoch keinen Einfluss. In der Regel sind feinkörnige vorbelastete Böden oft stark strukturiert und weisen neben der Sedimentationsschichtung auch Reiß- und Scherflächensysteme auf. Bei der Entlastung bleibt ein großer Teil der Strukturänderungen erhalten (WÖHLBIER 1959, Neumann 1964).

Die in allen Versuchen niedrigen Steifemodulwerte sind auf einen Einfluss des oben genannten Probengewinnungsverfahrens, auf Inhomogenitäten innerhalb der einzelnen Proben und auf die geringen Auflastspannungen zurückzuführen, die allesamt große Sofortverdichtungswerte zur Folge haben, die bei allen Proben aus beiden Untersuchungsgebieten im Ast der ersten Belastung in den Laborversuchen liegen. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Proben schon bei der Gewinnung im Gelände gestört wurden.

Bei den untersuchten Lockergesteinen der Probe GMW1F aus dem Hessischen Ried handelt es sich um junge, rezente Aueablagerungen, die keine geologische Vorbelastung erfahren haben und somit eine hohe Gesamtverformung bei Belastung zeigen. Von den Proben aus dem Raum Bitterfeld/Wolfen sind nur die tieferen Schichten geologisch vorbelastet. In fünf Versuchen der Probe BVV 472\_11\_23 (4721123/1, 472\_1123/7, 472\_1123/8, 4721123/1\_10°, 4721123/5\_10°) zeigte sich, dass sich der Wert des Steifemoduls nach einer Belastung von 3 Tagen, einer Entlastung von 7 Stunden und einer Wiederbelastung erhöhte, die Sackungsfähigkeit aber bestehen blieb. Daher wurde bei den Untersuchungen der Proben aus Zeitgründen auf mehrtägige Be- und Entlastungszyklen entsprechend zyklischer Eisauflasten vor den Sackungsversuchen verzichtet. Es ist denkbar, dass sich die Verkittung des Korngerüsts im Spannungs-Verformungs-Verhalten wie eine Vorbelastung äußern kann. Die Unterscheidung und Trennung beider Einflüsse ist im Allgemeinen nicht möglich (Kézdi 1969).

Die Mikro-Gefüge-Analyse aller Proben von gewachsenem Boden mit deutlichen Gehalten an Ton und Schluff zeigt ein Gefüge wie es teilweise für Lössböden und Kippenböden typisch ist. Das Gefüge der meisten Proben weist hauptsächlich eine Sandphase mit einem Einzelkorngefüge und darin eingebetteten Aggregaten auf. Die Sandphase setzt sich überwiegend aus Mineralkörnern der Mittel- und Feinsandfraktion zusammen, die durch Brücken zusammengehalten werden, welche von Feinmaterial gebildet werden. Die einzelnen Körner der Sandphase sind teilweise vollständig von Feinmaterial umhüllt. Die Hüllen setzen sich aus Feinsand, Schluff und Ton zusammen. Die Festkörperbrücken (interpartikuläre Bindungen) wurden in allen untersuchten erdfeuchten Proben außer der Probe 537bk3 mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops mit Kryotransfersystem (Kryo-REM) nachgewiesen.

Bei den Proben BVV 472\_11\_23 (Oberer Bitterfelder Glimmersand) konnte eine Temperaturabhängigkeit der Sackungen festgestellt werden. Die Mikro-Gefüge-Analyse ergab mittels EDX-Elementmapping neben Fe-, Al-, O-, Si-Anreicherungen bzw. Schichtsilikate auch Gips und Chloride als Brücken zwischen den einzelnen Körnern. Die geochemische Analyse der Probe ergab einen Gehalt von mindestens 60 mg bis maximal 145 mg Gips pro 100g Boden. Da die Löslichkeit von Gips temperaturabhängig ist, weisen die temperaturabhängigen Sackungen der Probe BVV 472\_11\_23 deutlich daraufhin, dass Gipslösungs- und Ausfällungsprozesse einen Einfluss auf das Sackungsverhalten haben. Da auch andere lösliche Verbindungen aus dem Boden freigesetzt wurden, kann nicht ausgeschlossen werden, dass auch andere Verbindungen (Karbonate, Tonminerale, Chloride und Sulfate) eine Rolle spielen.

## 9 Diskussion

Die untersuchten gemischtkörnigen bindigen Proben zeichnen sich durch folgende Merkmale aus:

- geologisch junge und rezent umgebildete Ablagerungen
- makroporiges Gefüge
- teilweise hoher Porenanteil
- teilweise geringe Trockendichten ( $< 1,9 \text{ g/cm}^3$ )

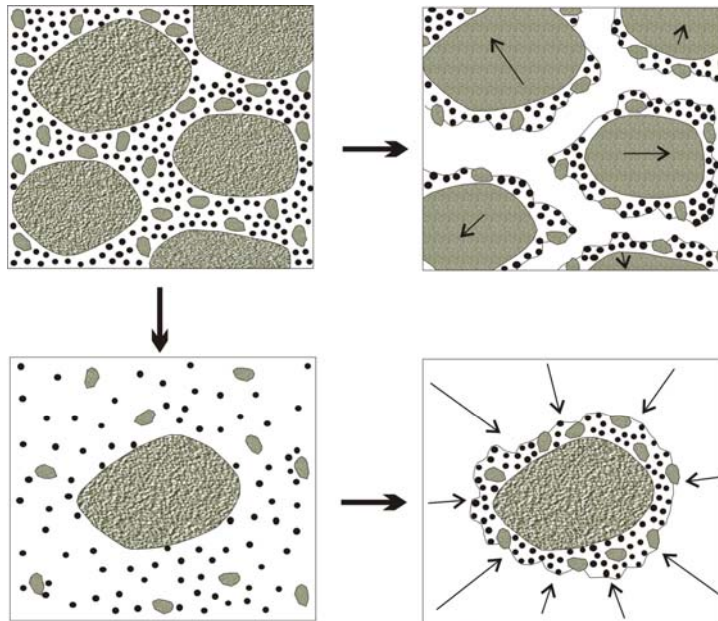
- schwach bis mittlere interpartikulare Bindungskräfte
- der Schluffanteil der Proben liegt zwischen 7 Masse-% und 60 Masse-%, der Feinanteil der Proben liegt zwischen 4 Masse-% und 14 Masse-%. Das Häufigkeitsmaximum liegt im Grobschluffbereich.
- alle Proben sind kalkfrei

Diese Merkmale sind, mit Ausnahme des Kalkgehaltes, auch typisch für Lössböden, lössartige Böden und Kippenböden (ROGERS 1995). Die Sackungsfähigkeit von Löss oder lössartigen Böden beruht zumeist auf einer Reihe von Ursachen, die aus den vielfältigen möglichen Entstehungsbedingungen resultieren. Am weitesten verbreitet sind Lössarten, deren Kornpartikel während trocken-klimatischer Bedingungen durch Wind selektiert, transportiert und abgelagert wurden (Primärlöss). Das tragende Korngerüst erfuhr postsedimentär keine Umlagerung und es fand keine Bodenbildung durch Verlehmung, Vergleyung oder Entkalkung statt (FEESER et al. 2001). Die untersuchten Proben unterscheiden sich jedoch in ihren Ausgangsbedingungen von den Entstehungsbedingungen von Löss, lössartigen Böden und Kippenböden. Die Proben aus dem Bitterfelder Raum reichen von holozänen Aueablagerungen bis Sedimenten mariner bis brackiger Genese (Bitterfelder Glimmersand). Bei den Proben aus dem Hessischen Ried handelt es sich um holozäne Aueablagerungen sowie pleistozäne Flugsande und Terrassensande von Rhein und Neckar. Durch Grundwasserbeeinflussung und Überschwemmungen erfuhren die Sedimente in beiden Gebieten postsedimentäre Umlagerungen und Beeinflussung durch Bodenbildung.

Eine Hauptursache für die Sackungsneigung durch Wassergehaltsänderung der untersuchten Proben ist das Vorhandensein von Festkörperbrücken und Überzügen unterschiedlicher Art zwischen und auf den einzelnen Sandkörnern. Diese Festkörperbrücken führten bei geringen Wassergehalten oder partieller Austrocknung zu einer Stabilisierung bzw. Verfestigung des Korngerüsts durch die Bildung von Aggregaten und bedingen damit die Bildung von Inter-Partikular- und Inter-Aggregat-Poren sowie Mikroporen im Inneren der Aggregate (Intra-Aggregat-Poren).

Die frei beweglichen Mineralkörner der Feinsand- und Schluff-Fraktion sowie Tonpartikel zählen zu den physikalisch wirksamen Bodeninhaltsstoffen. Diese konzentrieren sich beim Rückzug des Wassers in den Wassermenisken an den Kornkontaktpunkten und gehen bei Aufsättigung des Bodens in Suspension (KEMPER et al. 1987, MULLINS et al. 1992 a, 1992 b, WEACH et al. 1992, LAMOTTE et al. 1997). Die Stabilisierung des Korngerüsts erfolgt durch eine Vergrößerung der wirksamen Kontaktflächen zwischen den Mineralkörnern und der damit verbundenen Erhöhung der Anzahl von Wassermenisken. Durch einen hohen Feinsand-, Schluff- bzw. Tonanteil besitzen die untersuchten Proben bis auf die Proben BVV472 (Bitterfelder Glimmersand) und 537bk3 (pleistozäner Sand, Hessisches Ried) ein ausgeprägtes Sackungspotenzial. Die Voraussetzung für eine Neuordnung von Feinpartikeln wird jedoch erst durch die Zerstörung des kohärenten Gefüges geschaffen. Durch den Grundwasseranstieg und die Grundwasserströmung entsteht eine Vielzahl frei beweglicher, nicht an Aggregate gebundener Feinpartikel. Die Kryo-REM-Untersuchungen in den Kapiteln 4 und 5 belegen, dass Feinsand-, Schluff- und Tonpartikel häufig die Mineralkörner der Grob- und Mittelsandfraktion umhüllen.

Der Bildungsmechanismus, der zur Ausbildung dieser Hüllen führt, ist in Abbildung 120 dargestellt.



**Abb. 120:** Bildungsmechanismen von Feinsand-Schluff-Hüllen (nach DURNER 1994).

In Abb. 120 stellt das Bild links oben den Ausgangszustand eines Bodens dar. Zum einen können die Hüllen um die Körner beim Zerstören des Kohärentgefüges entstehen (Abb. 120 rechts oben). Zum anderen besteht die Möglichkeit, dass sich frei bewegliche Feinpartikel des Substrates während des Grundwasser-Absenkungsprozesses an die Grob- und Mittelsandkörner anlagern und dadurch Hüllen aus Feinmaterial bilden (Abb. 120 links und rechts unten). Durch die hüllenartige Verteilung des Feinmaterials entsteht ein duales Porensystem, wie es DURNER (1994) für Böden mit heterogener Porenverteilung beschreibt. Da praktisch jedes Grob- bzw. Mittelsandkorn der untersuchten Proben von Feinpartikeln umgeben ist, werden keine direkten Kornkontakte zwischen Mineralkörnern dieser Korngrößenklassen gebildet. Die Mineralkörner werden jedoch untereinander durch eine Vielzahl von Kornkontakten zwischen den Feinpartikeln der Hüllen miteinander verbunden. Die daraus resultierende wirksame Spannung im Boden ist daher größer als bei direktem Kornkontakt bzw. gleichmäßiger Verteilung der Partikel im Raum. Eine Zerstörung der durch die Hüllen gebildeten Kontaktflächen, z.B. bei Grundwasserwiederanstieg, vermindert die innere Spannung temporär, es vollzieht sich ein Übergang zu einer dichteren Lagerung durch Zusammenbrechen der Festkörperbrücken. Daraus resultiert bei diesen Böden eine Sackungsneigung.

Ein weiterer Umstand, der einen erheblichen Einfluss auf die Sackungsfähigkeit vor allem des Bitterfelder Glimmersandes hat, ist das Vorhandensein temporär zementierender bzw. stabilisierender Stoffe (MULLINS et al. 1990). Die postsedimentär erfolgte Zementierung beruht auf Lösung detritischer Komponenten durch zirkulierende Wässer und anschließender Fällung in Porenzwickeln und Partikelwanderung bei Entwässerung. Als Zemente finden sich mittelmäßig lösliche Salze wie Gips/Anhydrit und leicht lösliche Salze wie Chloride. Die verfestigende Wirkung dieser Stoffe beruht im Wesentlichen auf der Vergrößerung der Spannkraft an den Kontaktflächen zwischen den Mineralkörnern bei Entwässerung. Hierbei sind chemisch und physikalisch wirksame Bodeninhaltsstoffe zu differenzieren. Mit einem Calciumsulfatgehalt zwischen 0,06% und 0,145% der Gesamtmasse und einem Natriumchloridgehalt

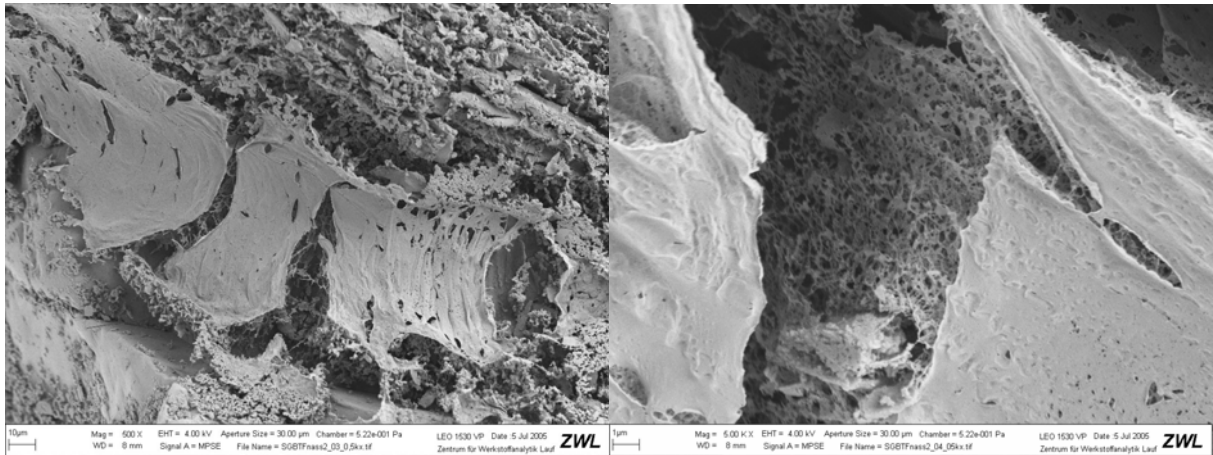
zwischen 0,005 und 0,037% der Gesamtmasse besitzt der Obere Bitterfelder Glimmersand im Bodenwasser relativ leicht lösliche, chemisch wirksame Agenten. Diese sind, wie die REM- bzw. Kryo-REM-Untersuchungen belegen, in der gesamten Matrix der untersuchten Substratproben sowohl als Primärmaterial als auch als sekundäre Neubildung vorhanden. Beim Rückzug der Wassermenisken wird es an den Kornkontaktpunkten konzentriert und fällt bei Übersättigung aus der Lösung aus.

Im Ergebnis werden die Kornkontaktpunkte zementiert, die innere Spannung des Substrates nimmt zu und die Festigkeit des Substrates steigt. Bei einer Zunahme des Wassergehaltes kann das vorhandene Calciumsulfat erneut in Lösung gehen. Ist das Bodenwasser stark mit Calciumsulfat gesättigt, kann erneut Calciumsulfat ausfallen. Eine ähnliche Wirkung haben auch Eisenoxide und -hydroxide sowie amorphes Silizium (CHARTRES et al. 1990, FRANZMEIER et al. 1996).

Für das Grundwasser im Untersuchungsgebiet Bitterfeld/Wolfen sind sehr hohe Eisengehalte, sowie erhöhte Sulfat- und Kalziumgehalte typisch (VEB GEOLOGISCHE FORSCHUNG UND ERKUNDUNG 1980). Dabei ist das Auftreten von "Sulfatanomalien" mit Maximalwerten von weit über 400 mg/l und bis zu 3000 mg/l charakteristisch. Der beschriebene Chemismus ist typisch für Grundwässer von Gebieten, in denen intensiver Tagebaubetrieb zu einem permanenten Eingriff in die tertiären Sedimente und zur Grundwasserabsenkung (=Belüftung) führte. Dadurch wurde die Möglichkeit einer Verwitterung und deren Beschleunigung durch Oxidation von Pyrit und Markasit geschaffen. Diese Minerale sind reichlich in den tertiären Sedimenten enthalten (VEB GEOLOGISCHE FORSCHUNG UND ERKUNDUNG 1980). Diese Verwitterung führte und führt immer noch zur Bildung von  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  und  $\text{FeSO}_4$ , wobei das Eisensulfat in wässriger Lösung einer Hydrolyse unter Bildung weiterer Schwefelsäure unterliegt. Dadurch kommt es zu einer Anreicherung o.g. Verbindungen, die bei abgesenktem Grundwasser durch Ausfällung zu Zementationen im Korngerüst der tertiären Sande führten (WICHTER et al. 1999, ČEŠNOVAR & PENTINGHAUS 2003).

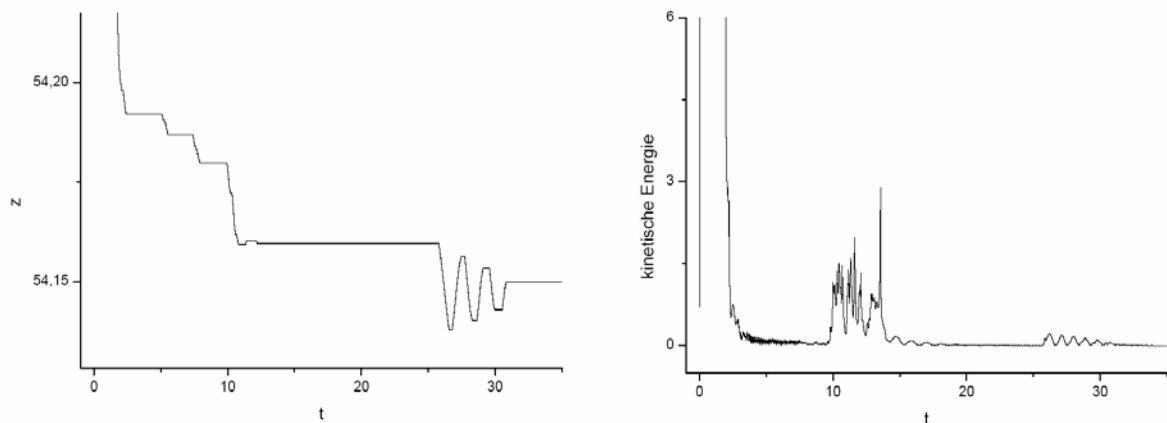
Welche der oben beschriebenen Arten der Partikelbindung (chemisch oder physikalisch) eine größere Stabilität des Korngefüges hervorruft, kann anhand der untersuchten Proben nicht ausgesagt werden.

Da die Gips- und Natriumchlorid-Gehalte sowie der Anteil an Feinmaterial im Bitterfelder Glimmersand sehr gering sind, können sie nicht alleine für die Stabilität des Korngerüsts verantwortlich sein. Einen weiteren Einflussfaktor auf das Gefüge stellt wahrscheinlich der Gehalt an organischer Substanz dar. Bei den Proben BVV 472\_11\_23 (Bitterfelder Glimmersand) konnte die Lagerungsdichte nicht eindeutig bestimmt werden, da es nicht möglich war, die dichteste Lagerung zu erreichen. Die organischen Partikel verringern die Lagerungsdichte (RICHTER et al. 2002) und beeinflussen die wirksamen Spannungen (SOANE 1999). Dieses erfolgt durch die physikochemischen Interaktionen zwischen der organischen Substanz und den Bodenpartikeln sowie innerhalb von Aggregaten (CHANEY & SWIFT, 1984). Die poröse Oberfläche der organischen Partikel bietet eine gute Kontaktfläche für eine Verkittung mit den Hüllen aus Feinmaterial (Abb. 129 a und b). Die elastische Verformbarkeit der organischen Partikel kann die Kohäsion durch eine Art Zugankerwirkung zusätzlich erhöhen (HÄHNE 1991, TOBIAS 1991). Somit haben organische Substanzen eine durchaus nicht zu vernachlässigende Auswirkung auf die Stabilität eines nichtbindigen Korngefüges. Bei der Untersuchung der feuchten Probe BVV 472 im Kryo-REM zeigt sich ebenfalls, dass sich nach Sublimation ein Film aus organischem Material zwischen den einzelnen Körnern eines Aggregates und als Überzug von Körnern eines Aggregates bildet (Abb. 121 a und b).

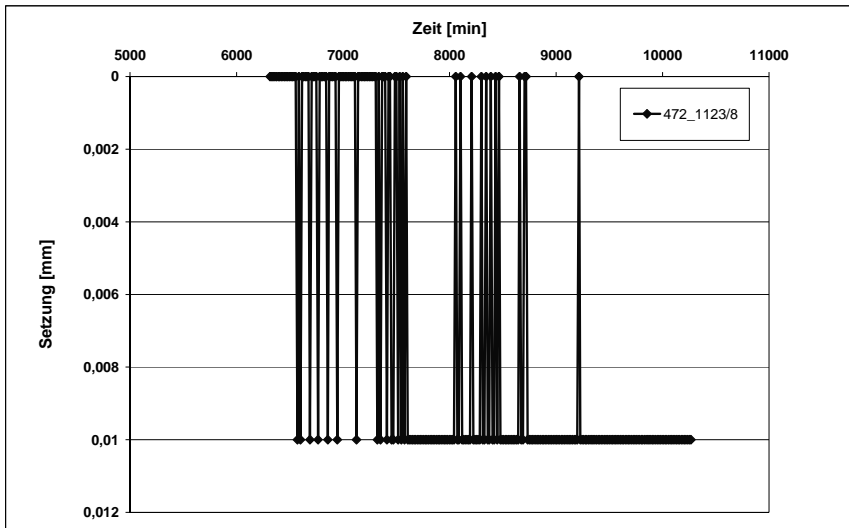


**Abb. 121 a und b:** Kryo-REM-Aufnahme der organischen Substanz der Probe BVV 472. a (links): Film aus organischer Substanz zwischen und als Überzug von Quarzkörnern mit Einbettungen von plattigen Körnern (rechts oben, 10µm). b (rechts): Deutlich zu erkennen die poröse Struktur der organischen Substanz (1µm).

Der Sackungsmechanismus beruht bei den untersuchten gemischtkörnigen Proben außer dem pleistozänen Sand (537bk3) aus dem Hessischen Ried auf einer Transformation einer metastabilen in eine stabile Kornlagerung. Auslöser ist eine Schwächung beziehungsweise allmähliche Zerstörung der interpartikulären Bindungen (Feinmaterialbrücken, Zementierungen) mit zunehmendem Wassergehalt. Hierbei spielen wahrscheinlich Lösungs- und Fällungsprozesse eine Rolle. Dieser Übergang wurde in numerischen Modellierungen am Beispiel des Bitterfelder Glimmersandes (BVV 472\_11\_23) ohne behinderte Seitenausdehnung theoretisch (Abb. 122 a und b) sowie praktisch in den Versuchen mit behinderter Seitenausdehnung bei mehreren Proben nachgewiesen (SCHULZ et al. 2006, GRIMMER et al. 2006).



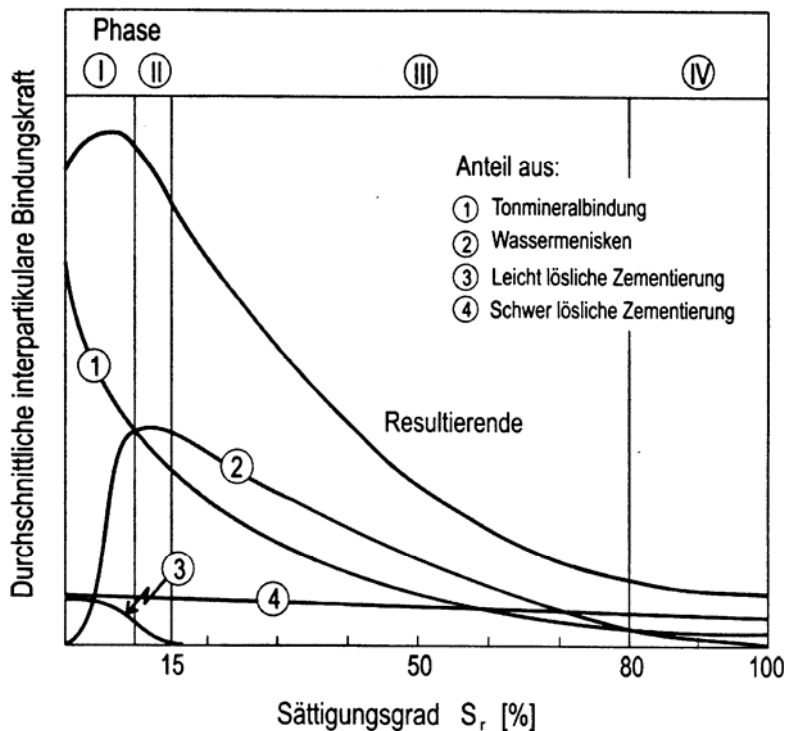
**Abb. 122 a und b:** a, Beispiel eines Transformationszustandes (links) und b, die kinetische Energie während dieses Zustandes (rechts). z = Probenhöhe (mm), t = Zeit (h) (SCHULZ et al. 2006).



**Abb. 123:** Beispiel eines Transformationszustands nach Beginn der Wasserzugabe bei der Probe BVV 472\_11\_23/8.

Die Zerstörung der interpartikulären Bindungen beginnt an der Probenoberfläche nach Aufgabe der Normalspannung auf die Probe. Mit zunehmender Zeit und steigendem Wassergehalt brechen immer mehr Bindungen auf. Dieser Vorgang setzt sich langsam in die Tiefe fort (SCHULZ et al. 2006) Die Transformation wird durch Oszillationen sichtbar, an deren Ende eine Kornumlagerung stattfindet, die als Sackung im Versuch zu erkennen ist (Abb. 123).

Für die Löss-Sackung haben OSIPOV und SOKOLOV (1995) einen Mechanismus postuliert, der in vier Phasen abläuft (Abb. 124).



**Abb. 124:** Mechanismus der Löß-Sackung (OSIPOV & SOKOLOV, 1995).

An diesen im Folgenden beschriebenen Mechanismus anlehnend, kann auch die Sackung in den gemischtkörnigen Lockergesteinen in vier Phasen ablaufen. Die Phasen I und II umfassen den Bereich der Sättigungsgrade  $<15\%$ . In der ersten Phase der Wasseraufsättigung vergrößern sich die adsorptiv gebundenen Wasserhüllen um die Kornpartikel ohne eine Zunahme des freien ungebundenen Porenwassers. Davon betroffen ist vor allem die diffuse Hydratschicht der Schluff- und Feinsandpartikel und der Tonminerale zwischen den größeren Sandkörnern. Daraus resultierend vergrößert sich der Abstand des Feinmaterials (Feinsand, Schluff, Ton), mit der Folge einer überlinearen Abnahme der ionen-elektronischen Bindungskräfte in den Festbrücken und Kornummantelungen. Mit zunehmender Aufsättigung verlangsamt sich die Hydratation der Tonminerale und Schluffpartikel. Ungebundenes Wasser bildet Menisken in den Porenzwickeln, und es entwickeln sich rasch kapillare Adhäsionskräfte. Die Phase II ist gekennzeichnet durch eine nahezu vollständige Lösung leicht löslicher Zemente, wodurch, besonders im Fall von Zementbrückenbildungen, so genannte strukturelle Defekte angelegt werden. In dieser Phase erreichen die kapillaren Adhäsionskräfte ihr Maximum. Der Phase III werden Sättigungsgrade von 15 bis 80% zugeordnet. Mit steigendem Wassergehalt schreitet die Hydratation der Tonminerale und Schluffpartikel in das Innere der Aggregate fort. Es kommt zu deren partieller Disintegration. Gleichzeitig vergrößern sich die lösungsbedingten Strukturdefekte. Die kapillaren Adhäsionskräfte nehmen mit zunehmender Aufsättigung ab, bleiben in dieser Phase jedoch so groß, dass durch sie ein Zusammenhalt des Korn- und Aggregatgerüsts gegeben ist. Erst bei einer Sättigungsphase  $>80\%$  findet eine rapide Abnahme der kapillaren Adhäsionskräfte statt. Mit dem Verschwinden der Adhäsionskräfte in dieser vierten Phase erfolgt die Destabilisierung des bereits partiell geschwächten Korn- und Aggregatgerüsts. Je nach Grad der chemischen Zementierung erfolgt nun ein Auseinanderbrechen der Brücken des Korngerüsts mit unterschiedlicher Sackungsintensität. Der Betrag der Sackung hängt neben den Gefügemerkmalen und petrographischen Eigenschaften des gemischtkörnigen Lockergesteins von den wirksamen Korn-zu-Korn-Spannungen infolge Bodeneigengewichts sowie eventuell zusätzlich wirkenden Lasten aus Bauwerken ab (OSIPOV & SOKOLOV 1995, FEESER et al. 2001).

Nach erfolgter Sackung ist die Ummantelung der Grobfraktion mit Feinmaterial beträchtlich gestört. Neu gebildete Ansammlungen von Feinmaterial bilden stellenweise eine kohärente Matrix. Die Proben zeichnen sich nun durch ein heterogenes Gefüge aus. Bei jedem Aufsättigen des Bodens werden die Kontaktflächen zwischen den umhüllten Sandkörnern neu ausgebildet (DURNER, 1994, STOCK 2005). Und bei jeder Wassergehaltsabnahme zu einer Verfestigung des Korngerüsts durch die Bildung von Festkörperbrücken.

Die Sackungspotenzialabschätzungen und Modellierungen ergaben keine signifikanten Setzungsdifferenzen und somit keine Beeinträchtigungen von Gebäuden durch Risse oder größere Schäden. Leider konnte dieser Sachverhalt nicht in der Praxis an betroffenen Gebäuden überprüft werden.



## 10 Forschungsausblick

Aus den im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuche ergeben sich Befunde, die einer weiteren grundlagenorientierten Forschung bedürfen. Zum einen ist die Anzahl der untersuchten Proben gering. Um quantitative Aussagen treffen zu können, wäre es notwendig, systematische Reihenuntersuchungen mit größeren Probenmengen und unterschiedlichen Belastungsstufen unter anderem auch in Großödometern und Bodentriaxialzellen durchzuführen, bei denen die Möglichkeit gegeben ist, die Bildung und Auswirkung eines Kapillarsaumes zu untersuchen und die bei der Aufsättigung durch die Änderung der Wichte des Lockermaterials hervorgerufenen Belastungsänderungen zu messen. Ein weiterer Befund betrifft den Einfluss der organischen Substanz auf die Zusammendrückung und die Sackung. Hierzu wären Reihenuntersuchungen mit Sanden interessant, um zu überprüfen, ab welchem Anteil organischer Substanz in der Probe erhebliche bodenmechanische Veränderungen bei Aufsättigung messbar sind und welchen Einfluss sie unter anderem auf das Sackungsverhalten ausüben. Des Weiteren konnten keine Aussagen getroffen werden, welche der oben beschriebenen Arten der Partikelbindung (chemisch oder physikalisch) eine größere Stabilität des Korngefüges hervorruft. Hierzu wären Untersuchungen von Modellböden mit unterschiedlichen Anteilen an Feinmaterial einerseits sowie zugesetzten unterschiedlich löslichen Salzen wie beispielsweise Sulfate (Gips/Anhydrit), Karbonaten und Chloriden denkbar.

Praktisch könnte eine Überprüfung und Analyse der tatsächlichen Bauschäden in beiden Regionen und ein Vergleich mit dem Modell anhand der Schadensursachen wie Sackungen, differenzielle Setzungen, deren Ausmaße und Beträge unter Beachtung der Einflussabgrenzung der unterschiedlichen Gründungsarten und der jeweiligen Baugrundsituation durchgeführt werden.

Für eine anschließende Baugrundmodellierung mit gängigen Computerprogrammen ist zu beachten, dass bei diesen für die Setzungsberechnung infolge Konsolidation eine Grenztiefe definiert ist. Bei der Setzungsberechnung infolge Sackung ist jedoch keine Grenztiefe definiert. Somit sind die Sackungen auch hier über die gesamte Mächtigkeit der Schichten zu bestimmen, was in dem Berechnungsprogramm jedoch nicht vorgesehen ist. Für die Berechnung der Sackung einer Teilschicht sollte die vertikale Spannung in der Mitte der Teilschicht herangezogen werden zuzüglich der vertikalen Spannung aus der Bauwerksauflast.

## 11 Literatur

- ABELEV, JM (1948): Osnovy proektirovanija i stroitel'stva na makroporistych gruntach. (Grundlagen der Projektierung und des Baus auf makroporigen Böden).- S predisloviem člana-korrespondenta akademii nauk SSSR, Stroivojenmorisdat, Moskwa.
- ALTERMANN M & RUSKE R (1997): Die Region Leipzig-Halle-Bitterfeld: Geologie und Böden. In: FELDMANN R, HENLE K, AUGÉ H, FLACHOWSKY J, KLOTZ S, KRÖNERT R (Hrsg.): Regeneration und nachhaltige Landnutzung - Konzepte für belastete Regionen., S. 8-12; Springer, Berlin, Heidelberg.
- ARBEITSGRUPPE RHEIN-NECKAR-RAUM (1987): Hydrogeologische Kartierung und Grundwasserbewirtschaftung Rhein-Neckar-Raum.
- BARTZ J (1982): Quartär und Jungtertiär II im Oberrheingraben im Großraum Karlsruhe.- Geol.Jb. **A63** : 237 S.
- BELLMANN H-J, EISSMANN L & MÜLLER A (1990): Das marine und terrestrische Tertiär in den Grossaufschlüssen der südlichen Leipziger Bucht.- Ber. Fachber. Geowiss. Univ. Bremen **10**: 2-12.
- BLÜMEL W (1977): Ermittlung von Sackungen nichtbindiger Böden.- Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik Univ. Hannover, unveröffentl.
- CHANEY K & SWIFT RS (1984): The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils.- J. Soil Sci. **35**: 223-230.
- CHARTRES CJ & NORTON LD (1994): Micromorphological and chemical properties of Australian soils with hardsetting and duric horizons.- in: RINGROSE-VOASE AJ & HUMPHREYS GS (Hrsg.): Soil micromorphology: 825-834.
- ČEŠNOVAR R & PENTINGHAUS HJ (2003): Pyritbedingte Oxidationszonen im Abraum des Braunkohlenbergbaus in Mitteldeutschland und ihr besonderes Gefährdungspotential für das Grundwasser: Beispiel Cospuden-Zwenkau.- Z. geol. Wiss. **31**(2): 111-128.
- DAVIDENKOFF R (1964): Deiche und Erddämme, Sickerströmung – Standsicherheit.
- DENISOV NJA (1946): O prirode prosadočnych javlenij v lessovidnych suglinkach. (Über die Natur der Setzungseffekte lößartiger Lehme).- Sovetskaja Nauka.
- DIENER U (1999): Sackungen von Kippen – Modellversuche und statistisch gestützte Betrachtungen.- Veröffentl. Inst. f. Geotechn. TU Bergakad. Freiberg, Heft 99-2: 128 S.
- DIERICHS D (1987): Untersuchungen zum Verhalten locker gelagerter wassergesättigter Sande als Basis für die Bewertung der Standsicherheit von Kippenböschungen. - Freiburger Forschungshefte **A758**: 75 S.
- DURNER W (1994): Hydraulic conductivity estimation for sils with heterogeneous pore structure.- Water Resource Res. **30**: 211-233.
- EBHARDT G, HARRIS H-P, IVEN H, PÖSCHL W, TOUSSAINT B & VOGEL H (2001): Hydrogeologie, Wasserwirtschaft und Ökologie im Hessischen Ried (Exkursion H am 20. April 2001).- Jber. Mitt. Oberrhein. Geol. Ver. **83**: 185-210.
- EGRI G (1969) Untersuchungen von Lössböden und Bauerfahrungen in Ungarn.- Fachtagung Grundbau und Baugrundmechanik, VEB Baugrund.

- EISSMANN L & LITT T (1994): Das Quartär Mitteldeutschlands - Ein Leitfaden und Exkursionsführer.- Altenburger Naturwiss. Forsch. **7**: 458 S.
- ELDEMERY M (1971): Konsolidierungssackung.- Diss. Fak. f. Bau-, Wasser- und Forstwesen, TU Dresden.
- ERLENBACH L (1933): Über das Verhalten des Sandes bei Belastungsänderungen und Grundwasserbewegung.- Diss. Techn. Hochschule Berlin; 16 S.
- FRANZMEIER DP, CHARTRES CJ & WOOD JT (1996): Hardsetting soils in Southeast Australia: landscape and profile processes.- Soil Sci. Soc. Am. J. **60**: 1178-1187.
- FEESER V, PETH S & KOCH A (2001): Löß-Sackung. Ursachen – experimentelle Bestimmung – Bewertung – Prävention.- Geotechnik **24** (2): 107-116.
- FETZER KD, LARRES K, SABEL K-J, SPIES E-D & WEIDENFELLER M (1995): Hessen, Rheinland-Pfalz und Saarland.- In: BENDA L (Hrsg.): Das Quartär Deutschlands: 221-254.
- FÖRSTER W (1996): Mechanische Eigenschaften der Lockergesteine. 228 S.
- GARBRECHT D (1978): Einfluss der Ungleichförmigkeit auf das Verformungsverhalten von Sand bei vertikaler Sickerbeanspruchung.- Diskussionsbeitrag zur Baugrundtagung 1978 in Berlin, Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, Hamburg.
- GFE GMBH (1992): Hydrogeologische Grundlagen für das Grundwasserüberwachungsnetz und –monitoring im Einflussbereich der Filmfabrik Wolfen.- unveröffentl. Bericht.
- GFE GMBH (1992): Grundwasserströmungsmodell Filmfabrik Wolfen, Teil 1, hydrogeologische Grundlagen.- unveröffentl. Bericht.
- GFE GMBH (1992): Grundwasserströmungsmodell Filmfabrik Wolfen, Teil 2, Strömungsmodell.- unveröffentl. Bericht.
- GERDES H (2002): Nutzungskonflikte bei ansteigenden Grundwasserständen – Lösungsansätze anhand von Fallbeispielen.- Schriftenreihe WAR **146**: 57-70.
- GRIMMER S, SCHULZ BM, LEMPP CH & SCHULZ M (2006): Investigations on the mechanism of sagging experiments.- in Vorbereitung.
- GRIMMER S & LEMPP CH (2005): Änderungen der bodenmechanischen Eigenschaften ausgewählter Lockergesteine unter dem Einfluss regionaler Grundwasserwiederanstiege.- Geotechnik **28** (2): 112-118.
- GLÄBER W (1995): Erläuterungen zur geologischen Karte 1:25 000 von Thüringen, Blatt 5040 Altenburg.- Thüringer Landesanstalt f. Geol..
- GOLDSTEIN JI (1975): The Teaching of Scanning Electron Microscopy and Electron Probe Microanalysis.- Scanning Electron Microscopy (**I**): 601-608.
- HÄHNE K (1991): Der Einfluß von Gräser- und Gehölzwurzeln auf die Scherfestigkeit von Böden und damit Standsicherheit von Hängen und Böschungen.- Diss. Technische Univ. Berlin.
- HAIMBERGER R, HOPPE A & SCHÄFER A (2005): High-resolution seismic survey on the Rhine River in the northern Upper Rhine Graben.- Internat. Jour. Earth Sci. **94**(4): 657-668.

HALLBAUER C (1981): Geotechnische Grundlagen für die Errichtung von Eisenbahnstrecken auf Tagebaukippen des Braunkohlenbergbaus unter besonderer Berücksichtigung des Eigensetzungsverhaltens.- Diss. A, HfV Dresden.

HARTGE KH & HORN R (1999): Einführung in die Bodenphysik. 3., überarb. Aufl.; 304 S., Enke.

HELLWEG V (1981): Ein Vorschlag zur Abschätzung des Setzungs- und Sackungsverhaltens nichtbindiger Böden bei Durchnässung.- Mitt. Inst. f. Grundbau, Bodenmechanik u. Wasserbau, Univ. Hannover, Heft 17.

HEROLD M (2003): Kartierung einer stark industrie- und bergbaugeprägten Region am Beispiel Bitterfeld/Wolfen.- unveröffentl. Dipl.-Kartierung, Geowiss. Fakultät, FB Umweltgeologie, Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenberg.

HOPPE A, KÖTT A, MITTELBACH G & ULMER D (1996): Ein Raumbild quartärer Grundwasserleiter und Grundwassernichtleiter im nördlichen Oberrheingraben.- Geol.Jb. Hessen **124**: 149-158.

HOTTENROTT M, KÄRCHER T & SCHILL I (1995): Zur Pliozän/Pleistozän-Grenze im nördlichen Oberrheingraben bei Eich (Bl. 6216 Gernsheim) anhand neuer Bohrergebnisse.- Jb. Nass. Ver. Naturk. **116**: 41-64.

IDEL KH (1960): Die Scherfestigkeit rolliger Erdstoffe.- Veröff. Inst. f. Bodenmechanik und Grundbau TH Fridericiana Karlsruhe, Heft ??.  
IVEN H (1996): Die Grundwasseranreicherung im Hessischen Ried.- Geol.Jb.Hessen **124**: 159-173.

JAKY J (1948): Influence of Ground Water Level Oscillation on Subsidence of Structures.- Proc. Europ. On Soil Mech. and Found. Eng., Vol. II.

JORDAN H & WEDER H-J (1995): Hydrogeologie: Grundlagen und Methoden; Regionale Hydrogeologie: Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Berlin, Sachsen-Anhalt, Sachsen, Thüringen.- 2. Auflage, Enke Verlag, Stuttgart, S. 388-447.

KALINA S & SCHACHER S (1996): Geologisch-hydrologische Verhältnisse im Revier. In: LIEHMANN G (1996): Beiträge zur Bitterfeld-Wolfener Industriegeschichte: Braunkohlenrevier Bitterfeld – Eine Standortbeschreibung.- In: Verein der Freunde und Förderer des Kreismuseums Bitterfeld e.V. (Hrsg.): Zur Industriegeschichte der Bitterfelder Region, Heft **6**:39-46.

KÄRCHER T (1987): Beiträge zur Lithologie und Hydrogeologie der Lockergesteinsablagerungen (Pliozän, Quartär) im Raum Frankenthal, Ludwigshafen-Mannheim, Speyer.- Jber. Mitt. Oberrhein. Geol. Verein **69**: 279-320.

KEMPER WD, ROSENAU RC & DEXTER AR (1987): Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature.- Soil Sci. Soc. Am. J. **51**: 860-867.

KÉZDI A (1969): Handbuch der Bodenmechanik I.- 259 S.; VEB Verlag f. Bauwesen.

KÉZDI A & EGRI G (1963): Setzungen im Löß infolge der Erhöhung des Grundwasserstandes.- Proc. Europ. Conf. On Soil Mech. and Found. Eng., Vol. I.

KINZE M (1969): Setzungsverhalten von durchfeuchtetem Steinschüttmaterial.- Braunkohle **3**: 17-18.

KNOTH W & SCHWAB M (1972): Abgrenzung und Bau der Halle-Wittenberger Scholle.- Geologie **21**(10): 1153-1172.

KNOTH W, KRIEBEL U, RADZINSKI K-H & THOMAE M (1998): Die geologischen Verhältnisse von Halle und Umgebung.- Hallesches Jahrbuch Geowissenschaften, Reihe B, Beiheft 4:7-34.

KOFOD M (2001): Rückgang der Grundwasserförderung und Veränderung des Grundwasserspiegels in städtischen Regionen – Berlin, Hamburg, London.- GWF Wasser-Abwasser **142(5)**: 356-360.

KRABBE W (1958): Über die Schrumpfung bindiger Böden.- Mitt. Hann. Vers.-Anst. Grund u. Wasserbau, Franzius Inst. **13**: 256-342.

KRAPP L & RUSKE R (1992): Geologische Verhältnisse von Bitterfeld und ihre Relevanz zu Kontaminationen des Grundwassers und Bodens. In: Hille J, Ruske R, Scholz J, Walkow F (Hrsg.): Bitterfeld: Modellhafte ökologische Bestandsaufnahme einer kontaminierten Industrieregion - Beiträge der 1. Bitterfelder Umweltkonferenz. ESV, Berlin, S. 85-92.

KUPFAHL H-G, MEISL S & KÜMMERLE E (1972): Erläuterungen Geol. Karte Hessen 1:25 000, Bl. 6217 Zwingenberg a.d. Bergstrasse.- 2. Aufl.: 276 S.; Hess. Landesamt für Bodenforschung.

LAMOTTE M, BRUAND A, HUMBEL FX, HERBILLON AJ & RIEU M (1997): A hard sandy-loam soil from semi-arid Northern Cameroon: I. Fabric of the groundmass.- Eur. J. Soil Sci. **48**: 213-225.

LMBV (1997): Nach der Braunkohle kommt das Wasser. - Informationsbroschüre Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbauverwaltungsgesellschaft mbH.

LMBV (2003): Einblicke 2003 – Portrait des Unternehmens.- Informationsbroschüre Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbauverwaltungsgesellschaft mbH.

METEREOLOGISCHER UND HYDROLOGISCHER DIENST DER DDR (1953): Klima-Atlas für das Gebiet der Deutschen Demokratischen Republik nebst Erläuterungen Akademie-Verl., Berlin.

MULLINS CE, BLACKWELL PS & TISDALL JM (1992a): Strength development during drying of a cultivated, flood-irrigated hardsetting soil. I. Comparison with structurally stable soil.- Soil Tillage Res. **25**: 113-128.

MULLINS CE, CASS A, MACLEOD DA, HALL DJM & BLACKWELL PS (1992b): Strength development during drying of a cultivated, flood-irrigated hardsetting soil. II. Trangle soil, and comparison with theoretical predictions.- Soil Tillage Res. 25: 129-147.

NEUMANN B (1964): Die Setzung mächtiger Schichtpakete aus Lockergestein. Braunkohle **6**.

OSIPOV VI & SOKOLOV VN (1995): Factors and mechanism of Loess collapsibility.-in: Debryshire E, Dijkstra TA & Smalley IJ (eds.): Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Genesis and Properties of Collapsible Soils: 49-63.

PAPE VON W-P (2003): Höchste Grundwasserstände im Hessischen Ried als Planungskriterium für Bauwerke.- in: Jahresbericht 2003 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie: 45-52.

PFLUG R (1982): Bau und Entwicklung des Oberrheingrabens.- Erträge der Forschung **184**, 154 S., Wiss. Buchgesellschaft.

PLACZEK D (1982): Untersuchungen über das Schwindverhalten bindiger Böden bei der Trocknung unter natürlichen Randbedingungen.- Mitt. Fachgebiet f. Grunbau u. Bodenmech. **3**: 204 S.

- PLEIN E (1993): Voraussetzungen und Grenzen der Bildung von Kohlenwasserstoff-Lagerstätten im Oberrheingraben.- Jber.Mitt.oberrhein.geol.Ver. **75**: 227-253.
- PRINZ H (1997): Abriß der Ingenieurgeologie.- 3. Aufl.: 546 S.; Enke.
- PRINZ H (1990): Grundwasserabsenkung und Baumbewuchs als Ursache von Gebäudesetzungen.- Aachener Bausachverständigentage 1990: 61-68.
- PRINZ H & WESTRUP J (1980): Zusammenhänge zwischen den festgestellten Höhenwertveränderungen und anthropogenen Einflüssen im nördlichen Oberrheingraben.- Z. f. Vermessungswesen **105**: 377-382.
- REGIERUNGSPRÄSIDIUM DARMSTADT (1999): Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried.- 151 S.
- REGIERUNGSPRÄSIDIUM DARMSTADT (1999): Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried, Anlage Teil A: Grundlagen und Begründungen.- 275 S.
- REGIERUNGSPRÄSIDIUM DARMSTADT (1999): Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried, Anlagen Teil B und C: Grundwassermodell und Fachbeiträge.
- RETHATI L (1963): Die Sackungen von rolligen Böden infolge der Aufnahme von Kapillarwasser.- Proc. Europ. Conf. Soil Mech. Found. Eng. 1: 295-300.
- RICHTER W, LAVES D & SUNTHEIM L (2002): Bodenphysikalische Bewertung der Kompostwirkung durch Laboruntersuchungen.- J. Plant Nutr. Soil Sci. **165**: 79-81.
- RICHTER H & HAASE G (1970): Periglazial-Löß-Paläolithikum im Jungpleistozän der Deutschen Demokratischen Republik.- Petermanns Geograph.Mitt.; Ergänzungsheft 294.
- ROGERS CDF (1995): Types and distribution of collapsible soils.- in: Debryshire E, Dijkstra TA & Smalley IJ (eds.): Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Genesis and Properties of Collapsible Soils: 1-17.
- RUMPF H (1958): Grundlagen und Methoden des Granulierens – Teil 1.- Chemie-Ing.-Techn. **30**: 3.
- RUSKE R, WIEHLE P, GUHRA CH. & HARTMANN E (1997): Komplexanalyse Bitterfeld-Wolfen – Teil Grundwasser.- GFE GmbH.
- RUSKE R, BÖHME O & FALKE P (1999): Ergebnisse der erweiterten geologisch-hydrogeologischen Standorterkundung. In: WEIß H, DAUS, B & TEUTSCH G (Hrsg.): SAFIRA (2. Statusbericht). UFZ-Bericht 17/1999, Leipzig, S. 15-22.
- SCHARPFF H-J (1977): Geologische Karte von Hessen, Blatt Worms, Erläuterungen.
- SCHÄFFNER HJ (1965): Zur Erfassung des Einflusses von Ungleichförmigkeitsgrad und Kornverteilungsziffer auf die Lagerungsdichte von Kornhaufwerken.- Bautechnik **15**: 6.
- SCHÖNFELDER G, GRÄNITZ F, PORADA HT (2004): Bitterfeld und das untere Muldetal – eine landeskundliche Bestandsaufnahme im Raum Bitterfeld, Wolfen, Jeßnitz (Anhalt), Raguhn, Gräfenhainichen und Brehna. 367 S.; Böhlau-Verlag.
- SCHUBERT K (1957): Einfluss der Versuchszylinderabmessungen auf die lockerste Lagerung rolliger Böden.- Wiss. Zeitschrift, Hochschule f. Bauwesen 1.
- SCHULZ BM, GRIMMER S & SCHULZ M (2006): Compression of clustered granular matter: a numerical study.- in Vorbereitung.

SCHULTZE E & MUHS H (1967): Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten.- 2., überarb. Auflage, 722 S., Springer.

SCHUMANN A & MÜLLER J (1995): Klimatologische Kennzeichnung des mitteldeutschen Trockengebietes.- Mitt. deutsch. bodenkundl. Gesell. **77**: 43-48.

SOANE BD (1990): The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects.- Soil Tillage Res. **16**: 179-201.

STOCK O (2005): Untersuchungen zum Verfestigungsverhalten saalezeitlichen Geschiebemergels am Beispiel landwirtschaftlicher Rekultivierungsstandorte der Niederlausitzer Bergbaufolgelandschaft.- Diss. Techn. Univ. Cottbus, Cottbuser Schriften z. Bodenschutz u. Rekultivierung, Bd. 30.

TOBIAS S (1991): Bautechnisch nutzbare Verbundfestigkeit von Boden und Wurzel.- Diss. ETH Zürich.

VEB GEOLOGISCHE FORSCHUNG UND ERKUNDUNG (1980): Vorratsberechnung Braunkohle: Ergebnisbericht Braunkohlenerkundung Delitzsch-Süd: Berichtsteil III: Hydrogeologie. Unveröffentlicht.

VILLWOCK G (2004): Geologie, Grundwasser und Lagerstätten, Klima, Böden. In: SCHÖNFELDER G, GRÄNITZ F, PORADA HT (Hrsg.): Bitterfeld und das untere Muldetal – eine landeskundliche Bestandsaufnahme im Raum Bitterfeld, Wolfen, Jeßnitz (Anhalt), Raguhn, Gräfenhainichen und Brehna: 2-9, 11-12.

WEAICH K, CASS A & BRISTOW KL (1992): Use of penetration resistance characteristic to predict soil strength development during drying.- Soil Tillage Res. **25**: 149-166.

WEIDNER E (1990): Bodenkarte der nördlichen Oberrheinebene 1:50.000.- Hess. Landesamt für Bodenforschung (Hrsg).

WEISS H, TEUTSCH G & DANS B (2004): SAFIRA (Sanierungsforschung in regional kontaminierten Aquiferen) – Abschlussbericht zum Projektverbund.- UFZ-Bericht **13**: 366 S.

WEIß J (2001): Ionenchromatographie.- 3., überarb. Auflage, 940 S., Wiley-VCH.

WESTRUP J (1979): Nachsetzungen infolge sinkender Grundwasseroberfläche.- Ber. 2. Nat. Tag. Ingenieurgeologie, Fellbach: 309-313.

WICHTER L & KÜGLER M (2001): Beobachtungen von Setzungen und Sackungen locker gelagerter Schüttungen während des Grundwasserwiederanstiegs am Beispiel einer Kippe des Lausitzer Braunkohlentagebaus (Teilprojekt 14).- In: HÜTTL R, WEBER E & KLEM D: Ökologisches Entwicklungspotential der Bergbaufolgelandschaften im Niederlausitzer Braunkohlenrevier: 199-218.

WICHTER L, KÜGLER M & LEMKE K (1999): Untersuchungen zum Setzungsverhalten von Kippen des Lausitzer Braunkohlentagebaus beim Wiederanstieg des Grundwasserspiegels.-In: Hüttl RF, Klem D & Weber E (1999): Rekultivierung von Bergbaufolgelandschaften: 153-162.

WOHLRAB B (1972): Senkungen und Verformungen der Erdoberfläche.- Z. f.Kulturtechnik: 65-78.

WÖHLBIER H (1959): Die Bedeutung der Bodenmechanik für den Braunkohlenbergbau.- Braunkohle **12**.

## **DIN-Vorschriften**

DIN-Taschenbuch 36, Erd- und Grundbau, Beuth 1991

DIN 18123 Bestimmung der Korngrößenverteilung, April 1983

DIN 18128 Bestimmung des Glühverlusts, November 1990

DIN 18196 Erd- und Grundbau, Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, Oktober 1988



# Anhang

## Bitterfeld/Wolfen

**Tab. A1:** Wassergehalt, Trockenmassen, Trockendichten, Porenzahlen, Porenanteile, Sackungsmaße.

Versuchsnummer	Einbauwasser-gehalt [%]	Trocken-masse [g]	Trocken-dichte Einbau [g/cm <sup>3</sup> ]	n Einbau [-]	e Einbau [-]	Maximale Sackung	
						s [mm]	s [%]
472_1123/1	12,55	134,36	1,70	0,350	0,537	0	0
473_11/4	12,80	124,19	1,57	0,399	0,663	0	0
473_11/5	13,80	123,79	1,56	0,401	0,669	0	0
472_1123/6	12,86	123,40	1,56	0,403	0,674	0	0
4721123/1	9,75	122,14	1,54	0,409	0,691	0,01	0,05
4721123/2	9,63	121,64	1,54	0,411	0,698	0,02	0,1
4721123/3	11,21	124,06	1,57	0,399	0,665	0,01	0,05
472_1123/2	10,25	123,99	1,57	0,400	0,666	0,01	0,05
472_1123/7	11,06	123,45	1,56	0,402	0,673	0,01	0,05
472_1123/8	11,86	124,30	1,57	0,398	0,662	0,01	0,05
472_1123/9	7,12	131,77	1,67	0,362	0,568	0,03	0,15
472_1123/10	10,70	127,56	1,61	0,382	0,619	0,023	0,115
4721123/1	9,80	125,67	1,59	0,392	0,644	0,023	0,115
4721123/3	10,10	128,70	1,63	0,377	0,605	0,023	0,115
4721123/5	9,90	127,90	1,62	0,381	0,615	0,023	0,115
BVV624/1	9,75	132,98	1,68	0,368	0,631	0,12	0,6
BVV624/2	10,72	134,09	1,69	0,363	0,617	0,05	0,25
BVV624/3	12,02	140,96	1,78	0,330	0,538	0,03	0,15
BVV624_7/1	12,82	143,67	1,82	0,294	0,416	0,16	0,8
BVV624_7/2	13,33	144,56	1,83	0,289	0,407	0,14	0,7
BVV0101/1	26,39	103,82	1,31	0,511	1,043	0,04	0,2
BVV0101/2	24,82	102,32	1,29	0,518	1,073	0,03	0,15
BVV0101/3	19,51	104,27	1,32	0,508	1,034	0,14	0,75
BVV0101/4	15,56	103,67	1,31	0,511	1,046	0,17	0,85

Fortsetzung **Tab. A1.**

Versuchsnummer	Volumen Sackung [cm <sup>3</sup> ]	Trocken-dichte Sackung [g/cm <sup>3</sup> ]	n Sackung [-]	e Sackung [-]
472_1123/1	76,76	1,75	0,329	0,491
473_11/4	76,68	1,62	0,379	0,612
473_11/5	76,8	1,61	0,382	0,619
472_1123/6	76,69	1,61	0,383	0,622
4721123/1	78,58	1,55	0,404	0,679
4721123/2	76,88	1,58	0,394	0,650
4721123/3	77,59	1,60	0,387	0,632
472_1123/2	76,13	1,63	0,376	0,603
472_1123/7	78,74	1,57	0,399	0,665
472_1123/8	78,03	1,59	0,390	0,638
472_1123/9	75,53	1,74	0,332	0,496
472_1123/10	76,61	1,67	0,362	0,568
4721123/1	78,62	1,60	0,417	0,633
4721123/3	77,63	1,66	0,395	0,574
4721123/5	78,51	1,63	0,405	0,602
BVV624/1	77,67	1,71	0,356	0,554
BVV624/2	78,27	1,71	0,356	0,553
BVV624/3	78,66	1,79	0,326	0,484
BVV624_7/1	78,19	1,84	0,285	0,399
BVV624_7/2	78,39	1,84	0,282	0,394
BVV0101/1	74,11	1,40	0,477	0,913
BVV0101/2	77,16	1,33	0,505	1,021
BVV0101/3	75,89	1,37	0,487	0,951
BVV0101/4	76,57	1,35	0,495	0,979

Fortsetzung Tab. A1.

Versuchsnummer	Ausbauwasser- gehalt [%]	Trocken- dichte Ausbau [g/cm <sup>3</sup> ]	Volumen Ausbau [cm <sup>3</sup> ]	n Ausbau [-]	e Ausbau [-]
472_1123/1	20,08	1,75	76,76	0,329	0,491
473_11/4	25,08	1,62	76,68	0,379	0,612
473_11/5	24,80	1,61	76,80	0,382	0,619
472_1123/6	23,50	1,61	76,69	0,383	0,622
4721123/1	22,78	1,56	78,54	0,404	0,678
4721123/2	22,09	1,58	76,80	0,393	0,648
4721123/3	20,62	1,60	77,54	0,387	0,631
472_1123/2	20,61	1,63	76,09	0,376	0,602
472_1123/7	23,50	1,57	78,70	0,399	0,664
472_1123/8	21,60	1,59	77,98	0,389	0,637
472_1123/9	20,20	1,75	75,31	0,330	0,492
472_1123/10	20,78	1,67	76,48	0,361	0,565
4721123/1	20,63	1,60	78,54	0,387	0,631
4721123/3	20,69	1,66	77,54	0,364	0,572
4721123/5	22,57	1,63	78,43	0,375	0,600
BVV624/1	13,36	1,72	77,20	0,352	0,544
BVV624/2	20,27	1,72	78,07	0,354	0,549
BVV624/3	20,97	1,79	78,54	0,325	0,482
BVV624_7/1	14,93	1,85	77,56	0,279	0,387
BVV624_7/2	17,41	1,86	77,83	0,277	0,384
BVV0101/1	32,29	1,40	73,98	0,476	0,913
BVV0101/2	39,22	1,33	77,02	0,504	1,021
BVV0101/3	48,87	1,38	75,38	0,484	0,951
BVV0101/4	48,78	1,37	75,89	0,490	0,979

Tab. A2: Normalspannung, Teilzusammendrücke Beginn und Ende, Steifemodul.

Versuchsnummer	Normalspannung [kN/m <sup>2</sup> ]	Zusammendrücke Anfang [%]	Zusammendrücke Ende [%]	Es_Anfang [MN/m <sup>2</sup> ]	Es_End [MN/m <sup>2</sup> ]
472_1123/1	460	3	3	15,333	15,333
473_11/4	460	3,1	3,1	14,839	14,839
473_11/5	460	3,5	3,5	13,143	13,143
472_1123/6	460	4,35	4,35	10,575	10,575
4721123/1	460	0,71	0,76	64,789	60,526
4721123/2	460	2,85	2,95	16,140	15,593
4721123/3	460	1,95	2	23,590	23,000
472_1123/2	460	3,8	3,85	12,105	11,948
472_1123/7	460	0,5	0,55	92,000	83,636
472_1123/8	460	1,4	1,45	32,857	31,724
472_1123/9	460	4,55	4,85	10,110	9,485
472_1123/10	460	3,2	3,3	14,375	13,939
4721123/1	460	0,65	0,85	70,769	54,118
4721123/3	460	1,85	2	24,865	23,000
4721123/5	460	0,75	0,9	61,333	51,111
BVV624/1	115	1,85	2,45	6,216	4,694
BVV624/2	115	1,1	1,35	10,455	8,519
BVV624/3	115	0,6	0,75	19,167	15,333
BVV624_7/1	140	1,2	2	11,667	7,000
BVV624_7/2	140	0,95	1,65	14,737	8,485
BVV0101/1	270	6,3	6,5	4,286	4,154
BVV0101/2	260	2,5	2,65	10,800	10,189
BVV0101/3	260	4,1	4,75	6,585	5,684
BVV0101/4	260	3,25	4,1	8,308	6,585

**Tab. A3:** Wassergehalte, Sättigungsgrade.

Versuchsnummer	Ausbau-Wassergehalt [%]	Max. Wassergehalt [%]	Sättigungsgrad
472_1123/1	20,08	25,1	0,80
473_11/4	25,08	25,1	1,00
473_11/5	24,8	25,1	0,99
472_1123/6	23,5	25,1	0,94
472_1123/2	21,67	25,1	0,86
4721123/1	22,78	25,1	0,91
4721123/2	22,09	25,1	0,88
4721123/3	20,62	25,1	0,82
472_1123/2	20,61	25,1	0,82
472_1123/7	23,5	25,1	0,94
472_1123/8	21,6	25,1	0,86
472_1123/9	20,2	25,1	0,80
472_1123/10	20,78	25,1	0,83
4721123/1	20,63	25,1	0,82
4721123/3	20,69	25,1	0,82
4721123/5	22,57	25,1	0,90
BVV624/1	13,36	21,1	0,63
BVV624/2	20,27	21,1	0,96
BVV624/3	20,97	21,1	0,99
BVV624_7/1	14,93	17,87	0,84
BVV624_7/2	17,41	17,87	0,97
BVV0101/1	32,29	54,66	0,59
BVV0101/2	39,22	54,66	0,72
BVV0101/3	48,87	54,66	0,89
BVV0101/4	48,78	54,66	0,89
Versuchsnummer	Natürl. Wassergehalt [%]	Max. Wassergehalt [%]	Sättigungsgrad
472_11_23/S	22,48	25,1	0,90
BVV624_5-6m	17,53	21,1	0,83
BVV624_7m	15	17,87	0,84
BVV0101_13m	42,23	54,66	0,77

**Tab. A4a:** Ergebnisse Ionenchromatographie Probe 472\_11\_23; pH: 4-5 in Suspension bestimmt (mit Lackmuspapier)

Probe 472_1123nass, 21.07.05						
	Kationen				Anionen	
Elementname	$Na^+$	$K^+$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$	$Cl^-$	$SO_4^{2-}$
Konzentration [mg/L]	1,657	2,730	17,060	25,495	2,213	30,268
Probe 472_1123nass, 28.07.05						
Konzentration [mg/L]	0,842	1,170	6,040	8,750	0,777	11,408
Mindestgehalt in 100g Boden [mg]	2,499	0,390	2,310	34,245	2,990	41,676

**Tab. A4b:** Ergebnisse Ionenchromatographie Probe 472\_11\_23; pH: 4-5 in Suspension bestimmt (mit Lackmuspapier)

Probe 472_1123trocken, 21.07.05						
	Kationen				Anionen	
Elementname	$Na^+$	$K^+$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$	$Cl^-$	$SO_4^{2-}$
Konzentration [mg/L]	18,63	3,140	13,160	108,550	18,570	150,050
Probe 472_1123trocken, 28.07.05						
Konzentration [mg/L]	8,380	1,310	5,080	41,930	6,500	54,37
Mindestgehalt in 100g Boden [mg]	2,674	0,445	1,824	15,048	2,507	20,442

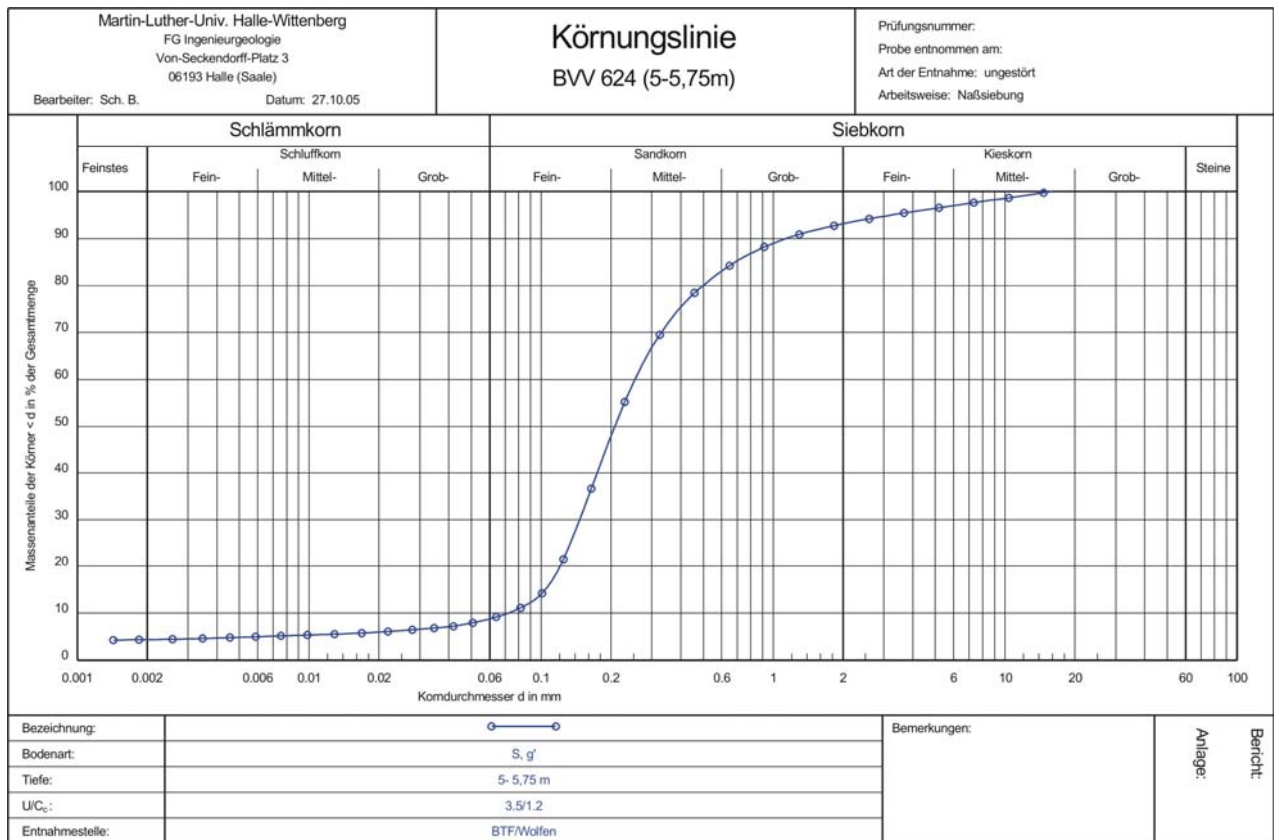
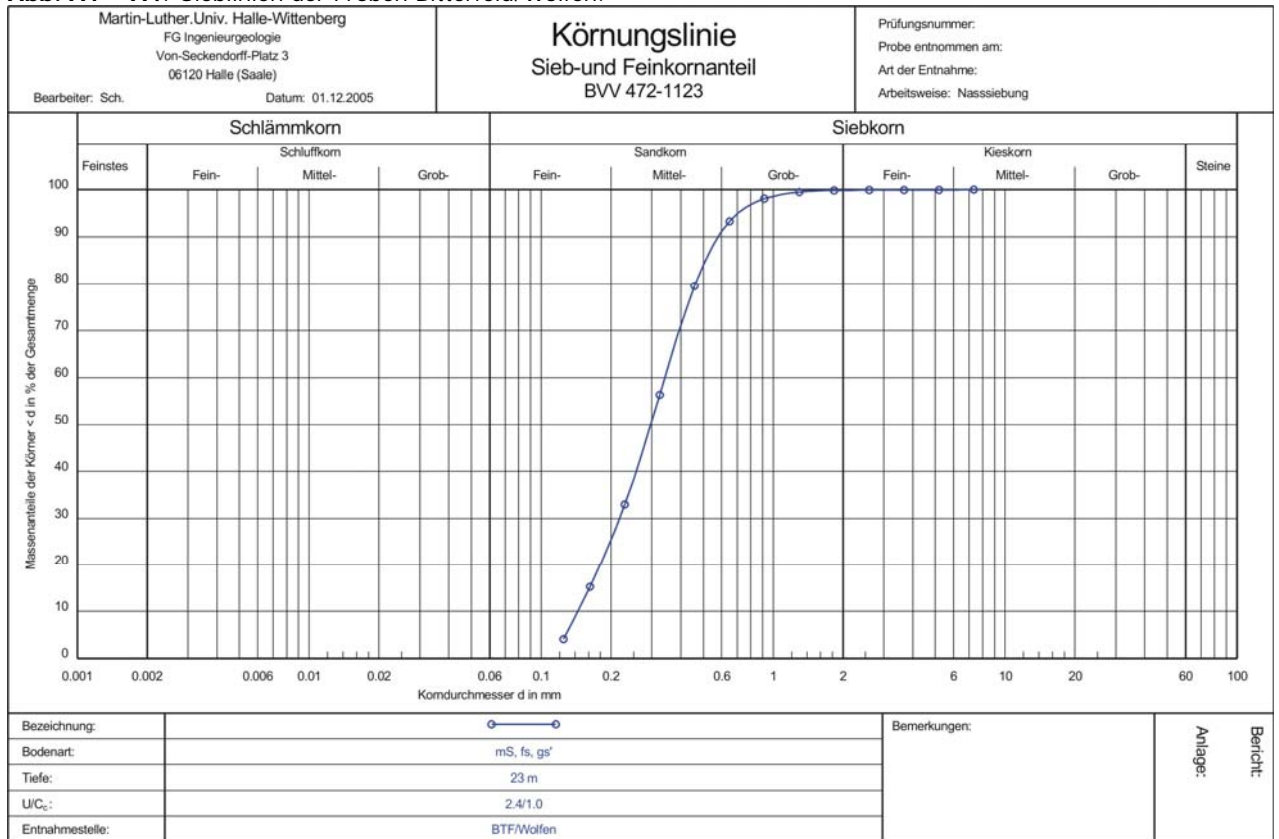
**Tab. A5:** Geochemische Analyse der Probe BVV 472\_11\_23 (ACME Analytical Laboratories, Canada)

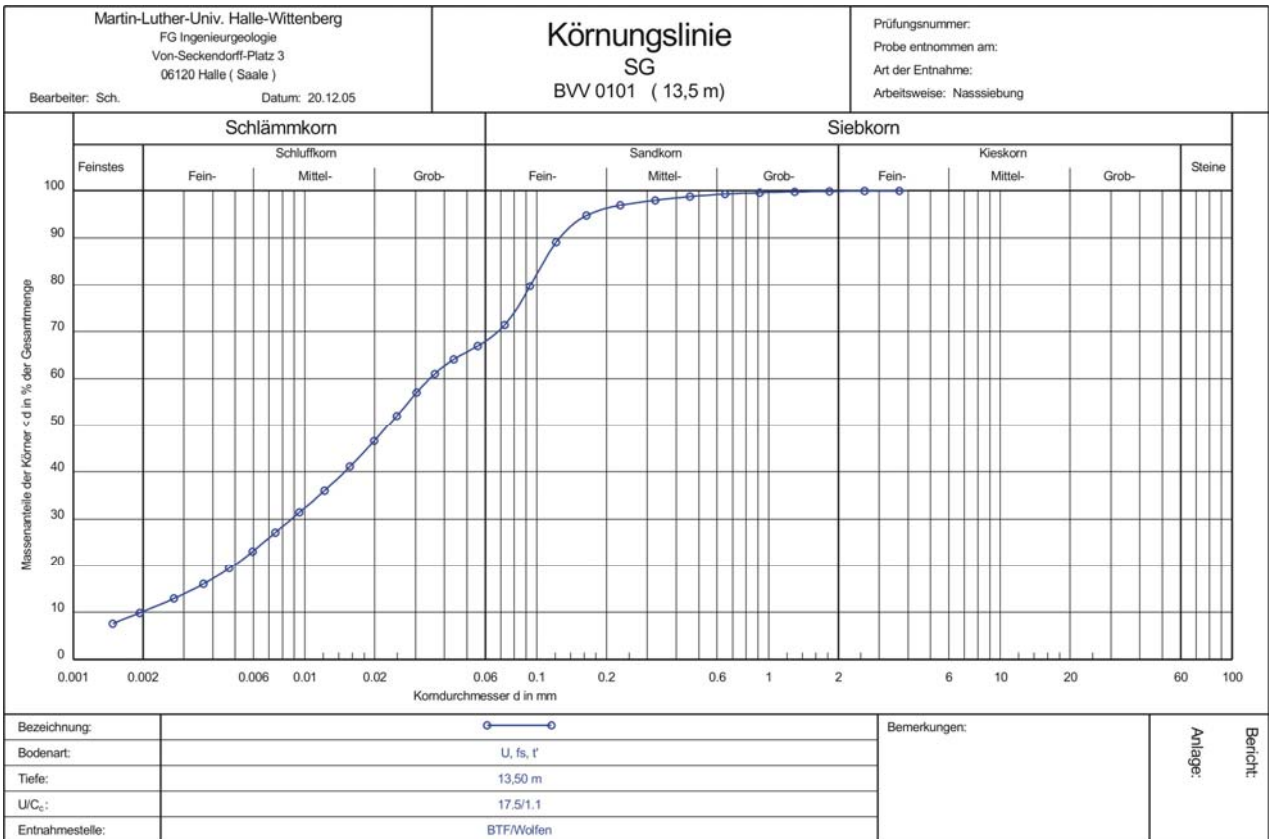
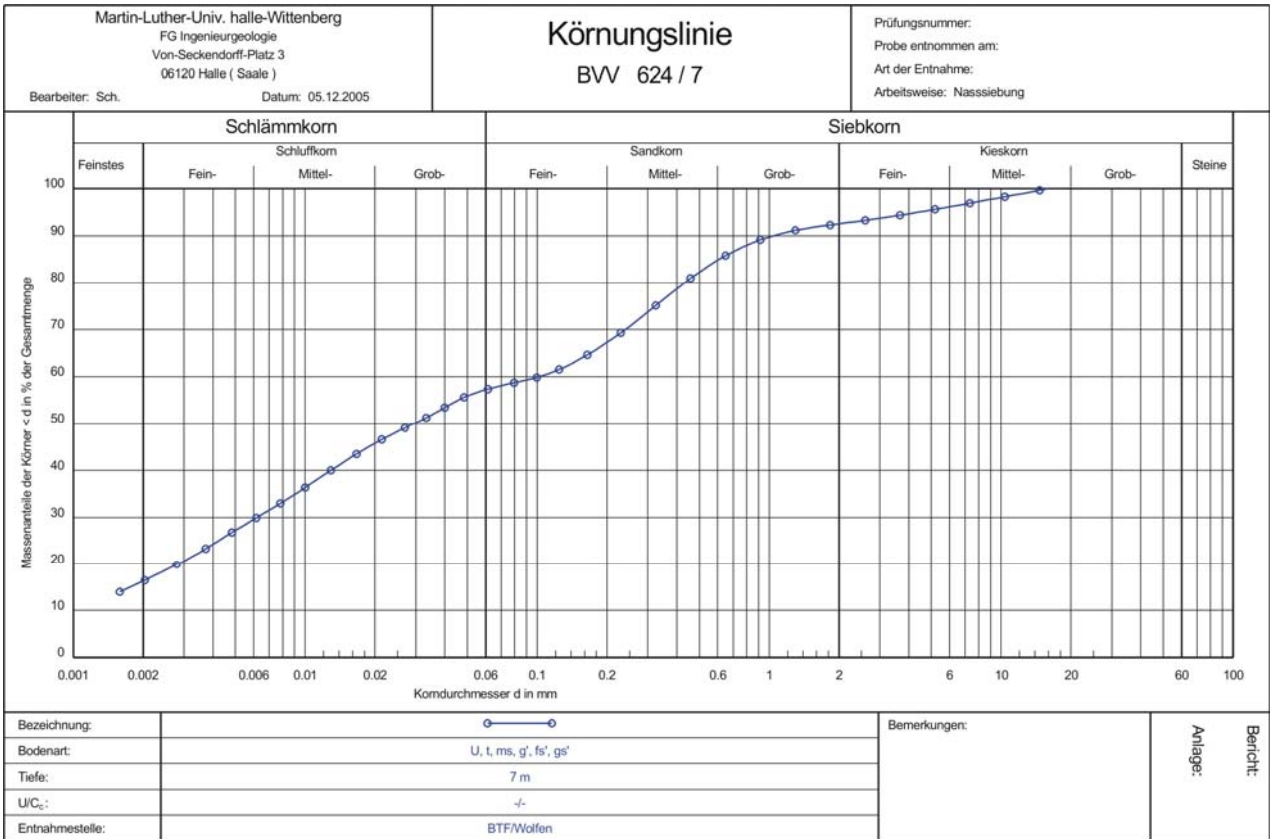
Element	Konzentration		Element	Konzentration		Element	Konzentration	
SiO2	%	87,62	U	ppm	0,1	Au	ppb	<,5
Al2O3	%	0,81	V	ppm	<5	Hg	ppm	<,01
Fe2O3	%	0,10	W	ppm	<,1	Tl	ppm	<,1
MgO	%	0,01	Zr	ppm	27,9	Se	ppm	<,5
CaO	%	0,06	Y	ppm	1,1			
Na2O	%	0,02	La	ppm	1			
K2O	%	0,49	Ce	ppm	2,1			
TiO2	%	0,04	Pr	ppm	0,19			
P2O5	%	0,01	Nd	ppm	0,9			
MnO	%	0,01	Sm	ppm	0,1			
Cr2O3	%	0,001	Eu	ppm	<,05			
Ni	ppm	5	Gd	ppm	0,14			
Sc	ppm	1	Tb	ppm	0,02			
LOI	%	1,7	Dy	ppm	0,17			
TOT/C	%	0,87	Ho	ppm	<,05			
TOT/S	%	0,20	Er	ppm	0,11			
SUM	%	90,85	Tm	ppm	<,05			
Ba	ppm	97,6	Yb	ppm	0,14			
Be	ppm	<1	Lu	ppm	0,02			
Co	ppm	<,5	Mo	ppm	<,1			
Cs	ppm	0,2	Cu	ppm	0,1			
Ga	ppm	1,2	Pb	ppm	0,5			
Hf	ppm	0,8	Zn	ppm	2			
Nb	ppm	0,6	Ni	ppm	0,3			
Rb	ppm	15,3	As	ppm	<,5			
Sn	ppm	<1	Cd	ppm	<,1			
Sr	ppm	11,6	Sb	ppm	<,1			
Ta	ppm	<,1	Bi	ppm	<,1			
Th	ppm	0,3	Ag	ppm	<,1			

**Tab. A6:** Korngrößenverteilung der Proben Bitterfeld/Wolfen.

Probe	472_11_23	BVV 624	BVV 624	BVV 0101
Teufe [m]	23	5 - 5,75	7 - 8	13 - 14
Kornverteilung [Masse-%]				
gG	—	—	—	—
mG	—	2,07	2,71	—
fG	0,10	2,08	2,69	—
<b>Σ G</b>	<b>0,10</b>	<b>4,15</b>	<b>5,4</b>	<b>—</b>
gS	0,27	3,59	3,9	0,26
mS	66,54	25,54	7,43	2,29
fS	29,13	53,01	24,09	27,61
<b>Σ S</b>	<b>95,84</b>	<b>82,14</b>	<b>35,42</b>	<b>30,16</b>
gU	—	5,07	11,46	21,84
mU	—	0,93	14,26	19,84
fU	—	0,76	12,86	14,51
<b>Σ U</b>	<b>—</b>	<b>6,76</b>	<b>38,58</b>	<b>56,19</b>
T	—	4,44	20,61	13,65
U bzw. T	4,06	—	—	—
U (d60/d10)	2,4	3,5	—	17,5

Abb. A1 – A4: Sieblinien der Proben Bitterfeld/Wolfen.





## Hessisches Ried

### GWM1F: Hahnwiesenbach (NW-Rand Hessisches Ried/Sprendlinger Horst) 537bk3: Neckaraltaue, Rodauer Forst, Westl. Zwingenberg

**Tab. A7:** Wassergehalt, Trockenmassen, Trockendichten, Porenzahlen, Porenanteile, Sackungsmaße.

Versuchsnummer	Einbau- wasser- gehalt [%]	Trocken- masse [g]	Trocken- dichte Einbau [g/cm <sup>3</sup> ]	n Einbau [-]	e Einbau [-]	Maximale Sackung	
						s [mm]	s [%]
GWM1F/1	16,83	139,96	1,77	0,330	0,493	-0,04	-0,2
GWM1F/2	16,32	149,42	1,89	0,285	0,398	-0,02	-0,1
GWM1F/3	7,12	145,23	1,84	0,305	0,439	0,34	1,7
GWM1F/4	7,95	142,17	1,80	0,320	0,470	0,74	3,7
GWM1F_2/1	6,94	144,17	1,82	0,315	0,460	0,70	3,50
GWM1F_2/2	5,06	138,02	1,74	0,344	0,525	1,17	5,85
GWM1F_2/3	7,04	146,68	1,85	0,303	0,435	0,48	2,40
GWM1F_34/1	11,55	159,19	2,01	0,266	0,362	-0,01	-0,05
GWM1F_34/2	11,18	160,10	2,02	0,262	0,354	-0,01	-0,05
GWM1F_34/3	6,79	155,00	1,96	0,285	0,399	0,14	0,7
GWM1F_34/4	5,74	152,53	1,93	0,297	0,422	0,13	0,65
GWM1F_45/1	4,02	147,28	1,86	0,298	0,424	0,16	0,8
GWM1F_45/2	4,57	146,24	1,85	0,303	0,434	0,14	0,7
GWM1F_45/3	11,42	144,26	1,82	0,312	0,454	0,02	0,1
GWM1F_45/4	11,25	144,39	1,82	0,312	0,452	0,01	0,05
537bk3/1	10,45	119,70	1,51	0,427	0,745	0	0
537bk3/2	11,07	124,50	1,57	0,404	0,678	0	0
537bk3/3	2,50	124,87	1,58	0,402	0,673	0	0
537bk/4	2,23	123,31	1,56	0,410	0,694	0	0

Fortsetzung **Tab. A7.**

Versuchsnummer	Volumen Sackung	Trocken- dichte Sackung	n Sackung	e Sackung
	[cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[-]	[-]
GWM1F/1	77,31	1,81	0,314	0,458
GWM1F/2	77,47	1,93	0,269	0,369
GWM1F/3	78,19	1,86	0,296	0,421
GWM1F/4	78,03	1,82	0,310	0,449
GWM1F_2/1	77,31	1,86	0,299	0,426
GWM1F_2/2	77,55	1,78	0,331	0,495
GWM1F_2/3	77,91	1,88	0,292	0,413
GWM1F_34/1	77,28	2,06	0,248	0,330
GWM1F_34/2	77,59	2,06	0,247	0,328
GWM1F_34/3	78,23	1,98	0,277	0,383
GWM1F_34/4	77,51	1,97	0,282	0,392
GWM1F_45/1	78,42	1,88	0,291	0,411
GWM1F_45/2	78,34	1,87	0,296	0,420
GWM1F_45/3	77,47	1,86	0,297	0,423
GWM1F_45/4	77,67	1,86	0,298	0,425
537bk3/1	78,19	1,53	0,420	0,724
537bk3/2	78,46	1,59	0,399	0,664
537bk3/3	78,30	1,59	0,396	0,655
537bk/4	78,38	1,57	0,404	0,678

Fortsetzung **Tab. A7.**

Versuchsnummer	Ausbau- wasser- gehalt [%]	Trocken- dichte Ausbau [g/cm <sup>3</sup> ]	Volumen Ausbau [cm <sup>3</sup> ]	n Ausbau [-]	e Ausbau [-]
GWM1F/1	17,26	1,81	77,47	0,316	0,461
GWM1F/2	16,44	1,93	77,55	0,270	0,370
GWM1F/3	15,98	1,89	76,84	0,284	0,397
GWM1F/4	14,79	1,87	76,21	0,293	0,415
GWM1F_2/1	15,18	1,93	74,55	0,273	0,375
GWM1F_2/2	8,03	1,89	72,92	0,288	0,405
GWM1F_2/3	14,31	1,93	76,01	0,275	0,378
GWM1F_34/1	13,47	2,06	77,31	0,248	0,331
GWM1F_34/2	13,70	2,06	77,63	0,247	0,329
GWM1F_34/3	11,30	2,00	77,67	0,272	0,373
GWM1F_34/4	12,17	1,98	77,04	0,277	0,384
GWM1F_45/1	12,40	1,89	77,79	0,286	0,400
GWM1F_45/2	12,24	1,88	77,79	0,291	0,410
GWM1F_45/3	15,23	1,86	77,39	0,297	0,421
GWM1F_45/4	16,56	1,86	77,63	0,298	0,424
537bk3/1	23,54	1,53	78,19	0,420	0,724
537bk3/2	21,78	1,59	78,46	0,399	0,664
537bk3/3	20,72	1,59	78,30	0,396	0,655
537bk/4	22,64	1,57	78,38	0,404	0,678

**Tab. A8:** Normalspannung, Teilzusammendrücke Beginn und Ende, Steifemodul.

Versuchsnummer	Normalspannung [kN/m <sup>2</sup> ]	Zusammendrückung Anfang [%]	Zusammendrückung Ende [%]	Es_Anfang [MN/m <sup>2</sup> ]	Es_End [MN/m <sup>2</sup> ]
GWM1F/1	15	2,3	2,1	0,652	0,714
GWM1F/2	18	2,1	2	0,857	0,900
GWM1F/3	18	1,2	2,9	1,500	0,621
GWM1F/4	18	1,4	5,1	1,286	0,353
GWM1F_2/1	50	2,3	5,8	2,174	0,862
GWM1F_2/2	50	2	7,85	2,500	0,637
GWM1F_2/3	50	1,55	3,95	3,226	1,266
GWM1F_34/1	70	2,35	2,3	2,979	3,043
GWM1F_34/2	70	1,95	1,9	3,590	3,684
GWM1F_34/3	70	1,15	1,85	6,087	3,784
GWM1F_34/4	70	2	2,65	3,500	2,642
GWM1F_45/1	90	0,9	1,7	10,000	5,294
GWM1F_45/2	90	1	1,7	9,000	5,294
GWM1F_45/3	90	2,1	2,2	4,286	4,091
GWM1F_45/4	90	1,85	1,9	4,865	4,737
537bk3/1	110	1,2	1,2	9,167	9,167
537bk3/2	110	0,85	0,85	12,941	12,941
537bk3/3	110	1,05	1,05	10,476	10,476
537bk3/4	110	0,95	0,95	11,579	11,579



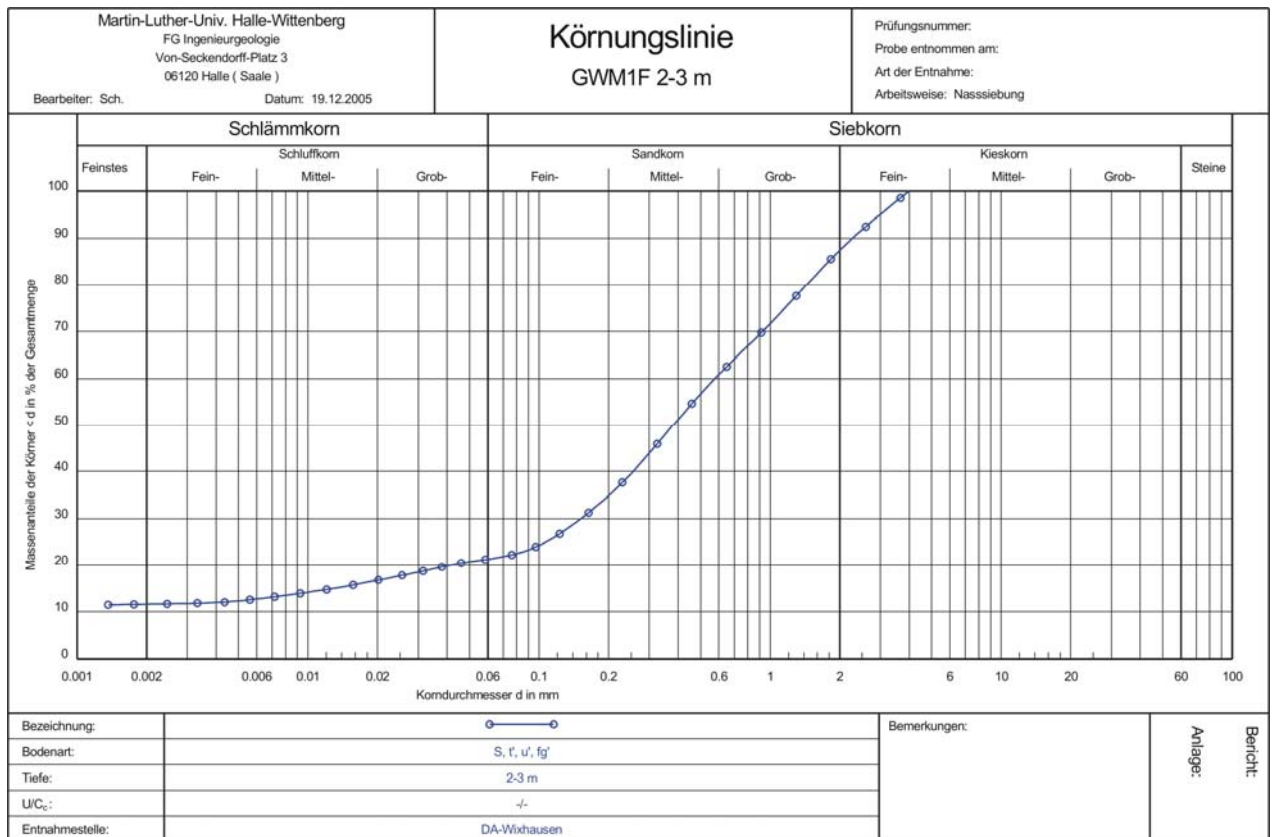
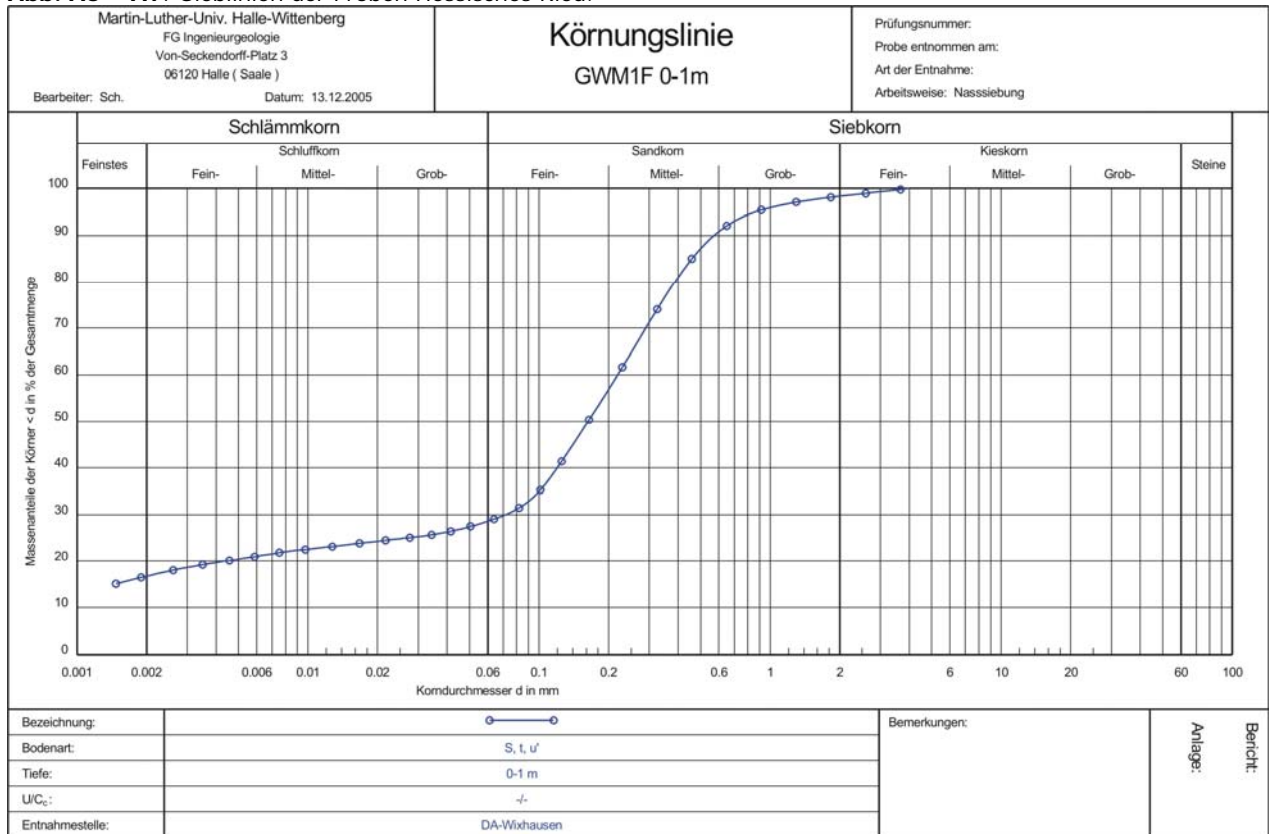
**Tab. A9:** Wassergehalte, Sättigungsgrade.

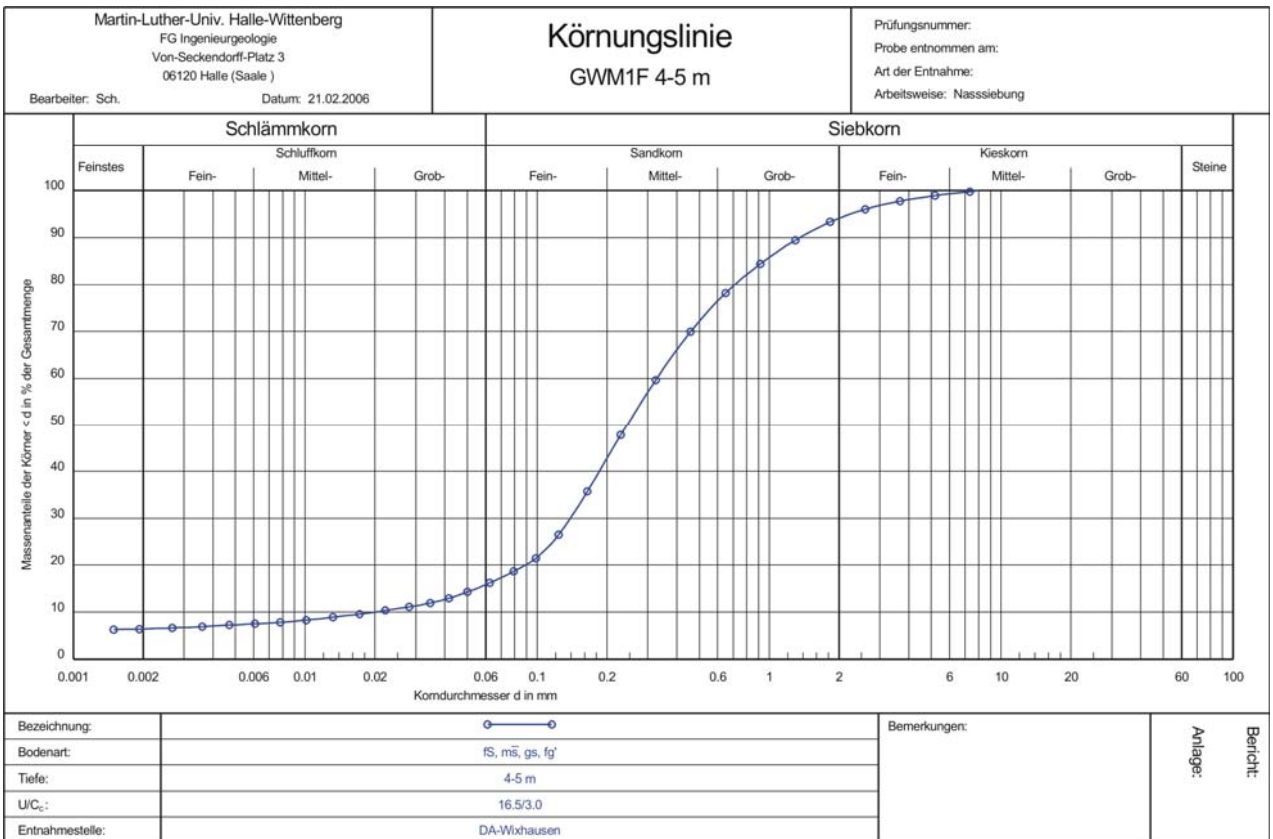
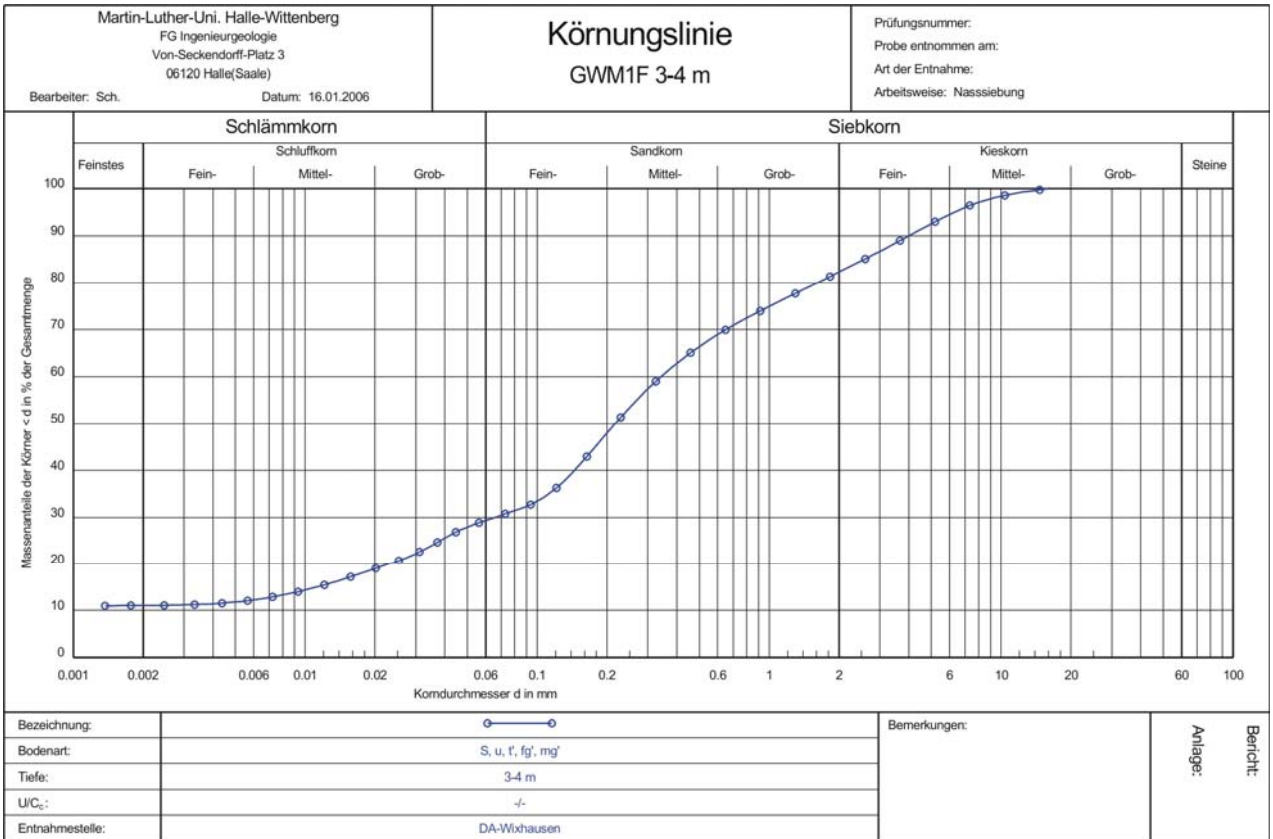
Versuchsnummer	Ausbau-Wassergehalt [%]	Max. Wassergehalt [%]	Sättigungsgrad
GWM1F/1	17,26	17,37	0,99
GWM1F/2	16,44	17,37	0,95
GWM1F/3	15,98	17,37	0,92
GWM1F/4	14,79	17,37	0,85
GWM1F_2/1	15,18	20,24	0,75
GWM1F_2/2	8,03	20,24	0,40
GWM1F_2/3	14,31	20,24	0,71
GWM1F_34/1	13,47	16,4	0,82
GWM1F_34/2	13,7	16,4	0,84
GWM1F_34/3	11,3	16,4	0,69
GWM1F_34/4	12,17	16,4	0,74
GWM1F_45/1	12,4	17,92	0,69
GWM1F_45/2	12,24	17,92	0,68
GWM1F_45/3	15,23	17,92	0,85
GWM1F_45/4	16,65	17,92	0,93
537bk3/1	23,54	24,94	0,94
537bk3/2	21,78	24,94	0,87
537bk3/3	20,72	24,94	0,83
537bk3/4	22,64	24,94	0,91
Versuchsnummer	Natürl. Wassergehalt [%]	Max. Wassergehalt [%]	Sättigungsgrad
GWM1F_0-1m/S	16,87	17,37	0,97
GWM1F_2-3m/S	7,11	20,24	0,35
GWM1F_3-4m/S	12,27	16,4	0,75
GWM1F_4-5m/S	15,87	17,92	0,89
537bk3/S	2,02	24,94	0,08

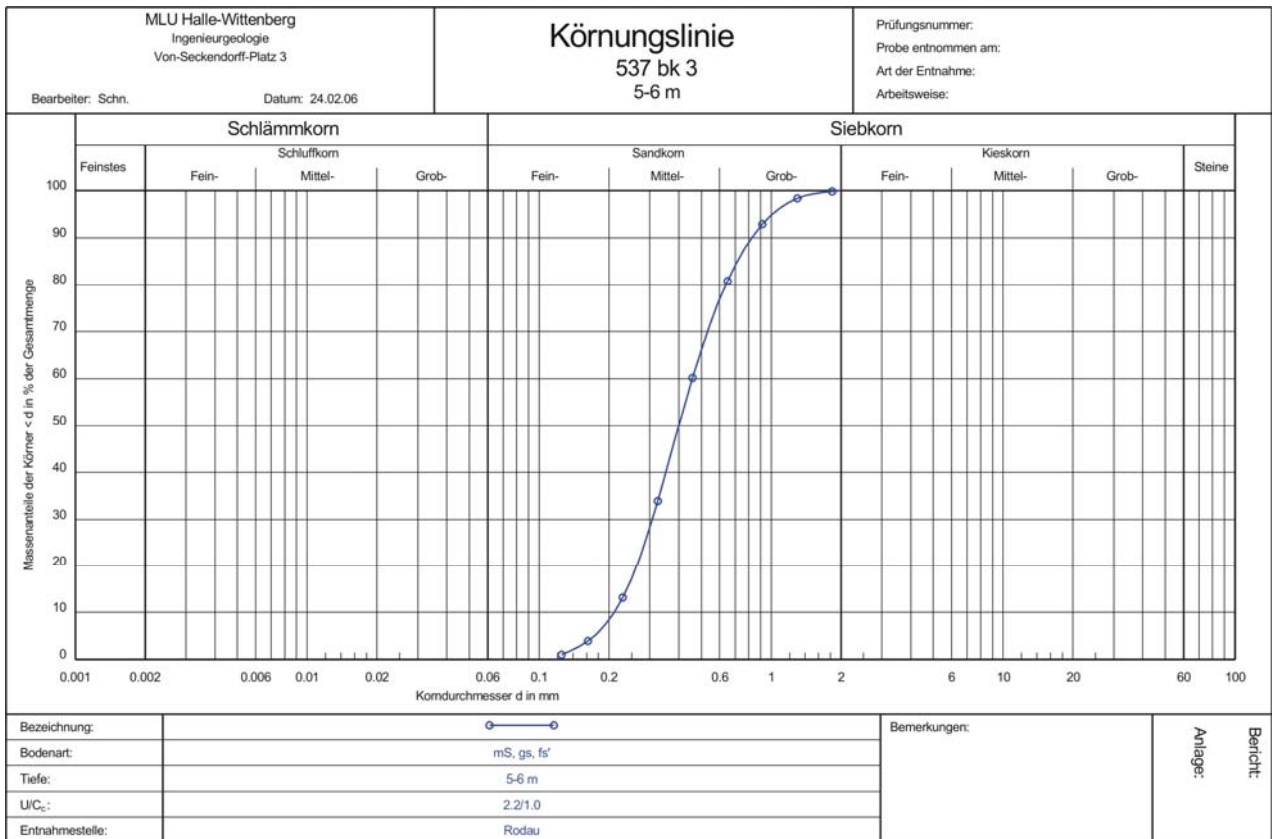
**Tab. A10:** Korngrößenverteilung der Proben Hessisches Ried.

Probe	GWM1F	GWM1F	GWM1F	GWM1F	537bk3
Teufe [m]	0 – 1	2 – 3	3 – 4	4 – 5	5 – 6
Kornverteilung [Masse-%]					
gG	—	—	—	—	—
mG	—	—	1,78	1,55	—
fG	1,63	11,59	8,34	3,46	—
<b>Σ G</b>	<b>1,63</b>	<b>11,59</b>	<b>10,12</b>	<b>5,01</b>	<b>—</b>
gS	1,71	17,50	14,80	8,43	0,94
mS	32,59	32,78	20,49	34,78	90,76
fS	32,86	16,13	23,41	32,31	6,36
<b>Σ S</b>	<b>67,16</b>	<b>66,41</b>	<b>58,70</b>	<b>75,52</b>	<b>98,06</b>
gU	6,45	4,84	11,67	8,66	—
mU	2,62	3,76	6,66	2,73	—
fU	3,43	1,67	1,83	0,77	—
<b>Σ U</b>	<b>12,50</b>	<b>10,27</b>	<b>20,16</b>	<b>12,16</b>	<b>—</b>
T	15,10	11,46	10,95	6,27	—
U bzw. T	—	—	—	—	0,93
U (d60/d10)	—	—	—	16,5	2,2

Abb. A5 – A9: Sieblinien der Proben Hessisches Ried.







## Baugrundmodellierungen

### Bitterfeld/Wolfen

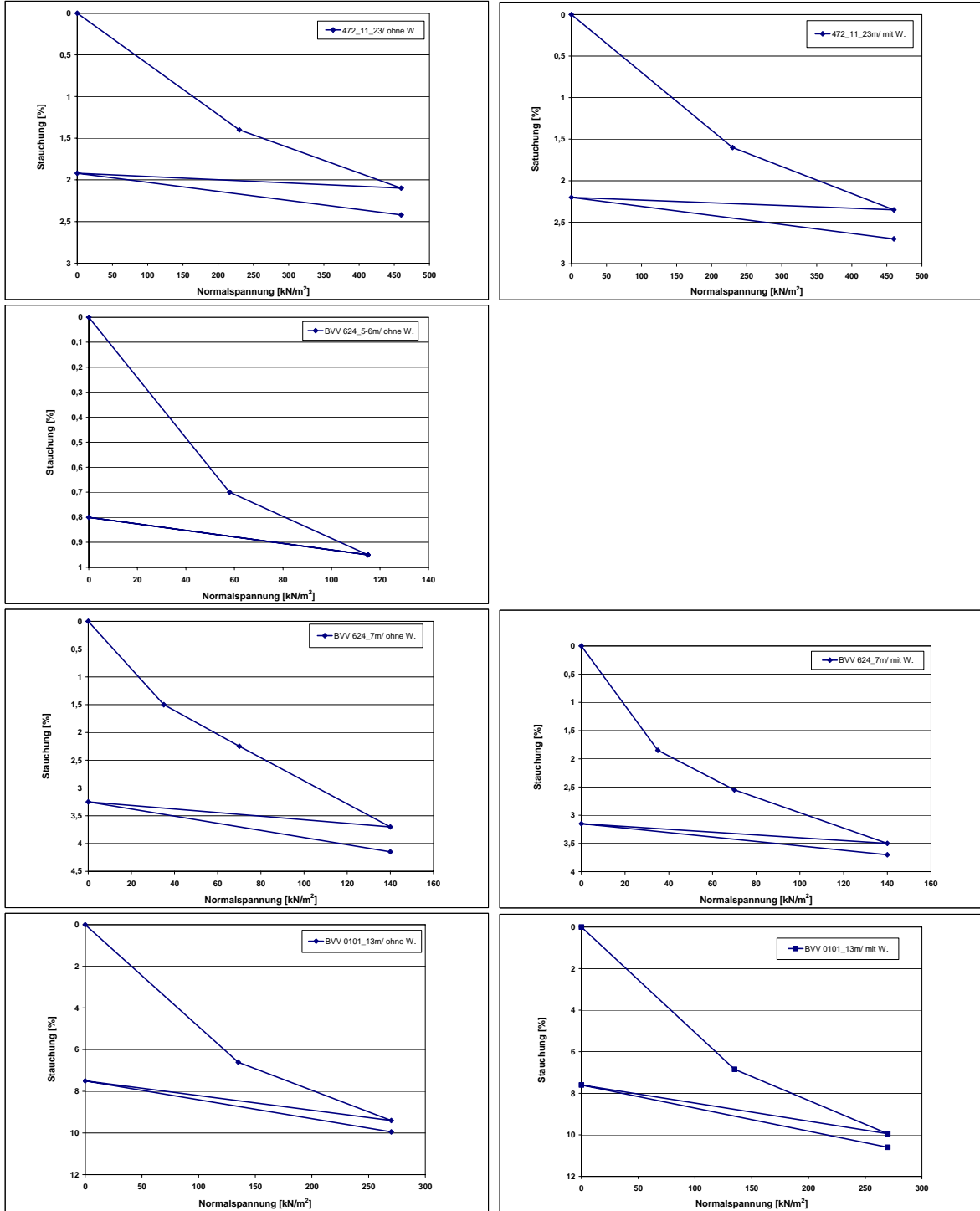
### Belastungs-Entlastungs-Versuche

Tab. A11: Erst- und Wiederbelastungsversuche.

Versuchsnummer	Temp. [°C]	Wassergehalt [%]		Belastungsstufen	Steifemodul [MN/m <sup>2</sup> ]
		Anfang	Ende		
472_1123/KD1	10	10,10	10,10	230/460/0/460	15,985/32,714/-/91,800
472_1123/KD2	10	12,50	20,61	230/460/0/460	14,806/30,500/-/91,800
BVV 624_5-6m	10	14,35	14,35	50/110/0/110	8,134/22,640/-/74,731
BVV 624_7m/KD1	10	17,14	16,96	70/140/0/140	4,465/4,719/-/14,943
BVV 624_7m/KD2	10	13,38	10,93	70/140/0/140	4,908/7,181/-/24,477
BVV 0101_13m/KD1	10	46,04	38,93	130/260/0/260	2,030/4,503/-/10,118
BVV 0101_13m/KD2	10	28,25	38,03	130/260/0/260	1,971/4,026/-/8,285

Von Probe BVV 624\_5-6m war leider nicht genügend Material für einen Belastungs-Entlastungs-Versuch unter Wasserbedeckung vorhanden.

Abb. A10-A16: Druck-Setzungsdiagramme der Erst- und Wiederbelastungsversuche (ohne und mit Wasser).

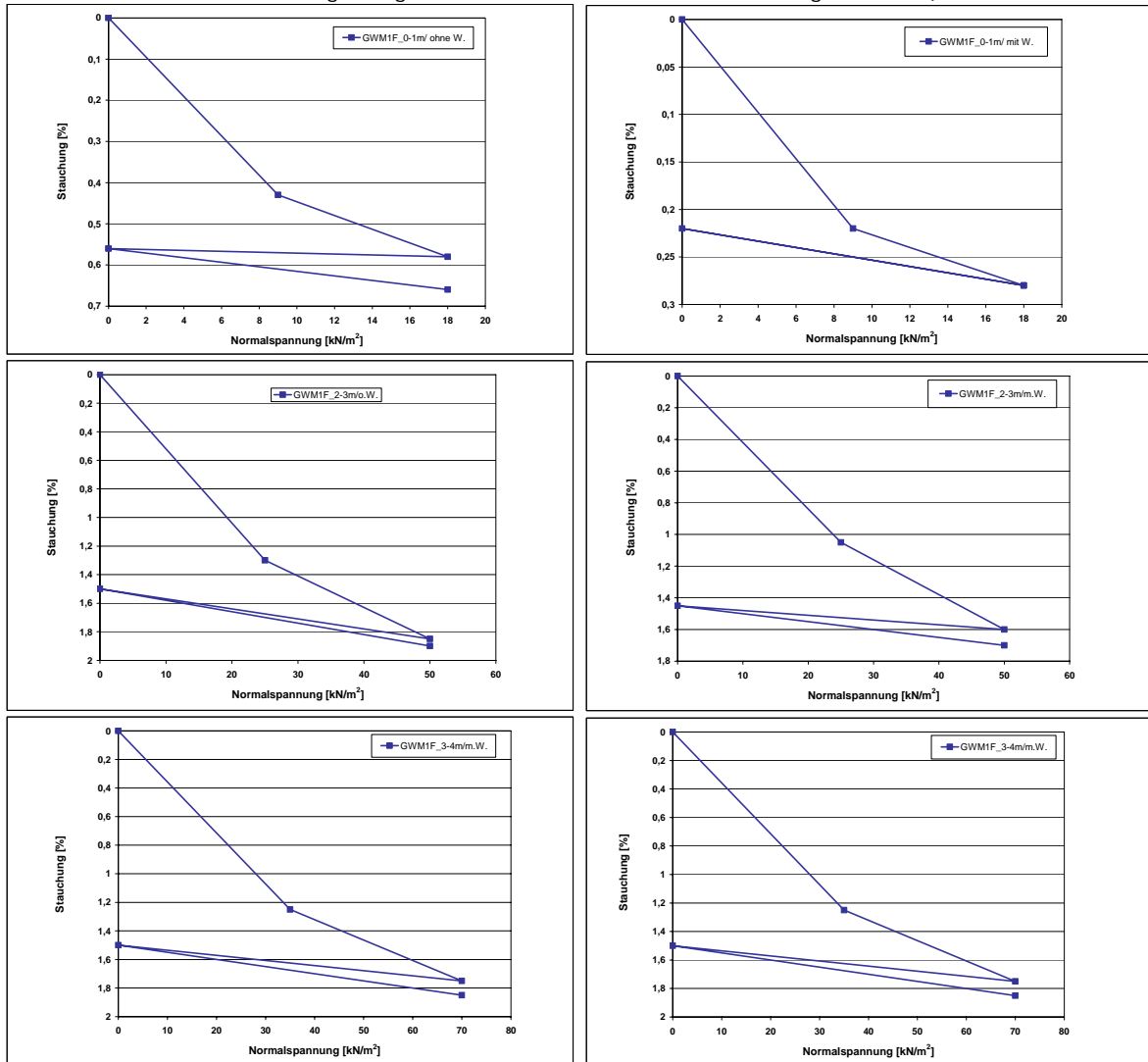


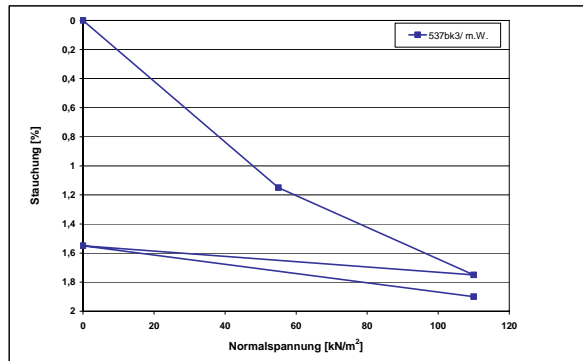
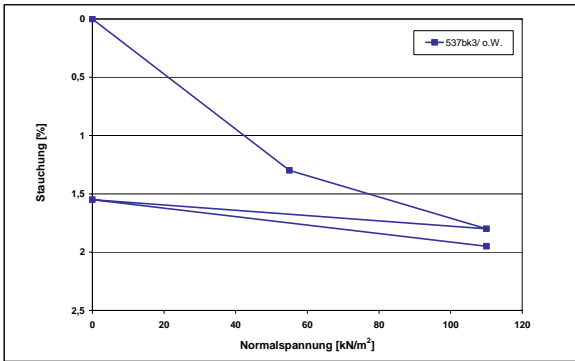
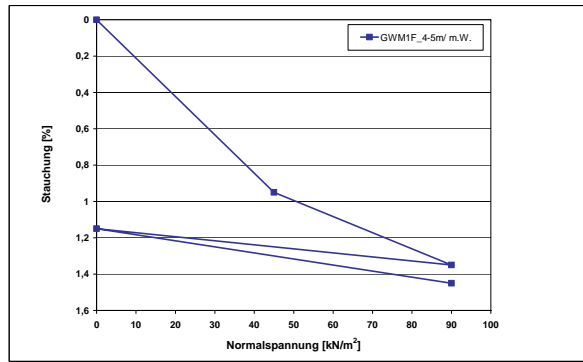
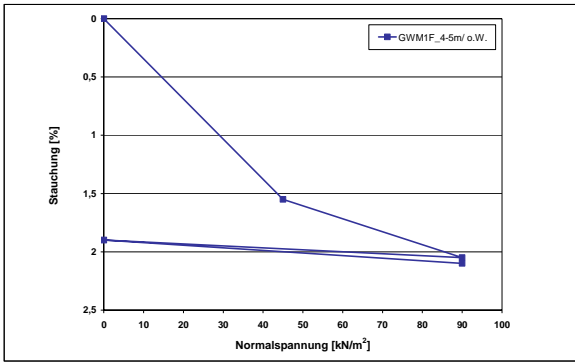
## Hessisches Ried

Tab. A12: Erst- und Wiederbelastungsversuche.

Versuchsnummer	Temp. [°C]	Wassergehalt [%]		Belastungsstufen Normalspannung [kN/m <sup>2</sup> ]	Steifemodul [MN/m <sup>2</sup> ]
		Anfang	Ende		
GWM1F_0-1m/KD1	10	13,46	13,46	8/17/0/18	2,095/5,235/-/16,724
GWM1F_0-1m /KD2	10	12,72	13,94	8/17/0/18	3,600/16,164/-/32,328
GWM1F_2-3m/KD1	10	11,13	11,13	25/50/0/50	1,846/4,486/-/12,313
GWM1F_2-3m/KD2	10	8,76	14,06	25/50/0/50	2,286/3,125/-/2,882
GWM1F_3-4m/KD1	10	9,25	9,25	35/70/0/70	2,519/4,933/-/13,572
GWM1F_3-4m/KD2	10	10,54	14,24	35/70/0/70	2,720/4,000/-/3,730
GWM1F_4-5m/KD1	10	9,53	9,53	45/90/0/90	2,839/8,860/-/43,654
GWM1F_4-5m/KD2	10	9,47	15,02	45/90/0/90	4,737/10,895/-/29,655
537bk3/KD1	10	1,97	1,97	55/110/0/110	4,154/10,857/-/26,582
537bk3/KD2	10	2,10	23,98	55/110/0/110	4,696/9,061/-/30,660

Abb. A19-A28: Druck-Setzungs-Diagramme der Erst- und Wiederbelastungsversuche (ohne und mit Wasser).





# Danksagung

*Die Kunst ist, einmal mehr aufzustehen, als man umgeworfen wird.*

Winston Churchill

Eine Dissertation braucht Unterstützung:

finanzielle, materielle, geistige und moralische.

Diese Dissertation habe ich während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Geologische Wissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg bearbeitet.

Herrn Prof. Dr. Christof Lempp danke ich für seinen engagierten Einsatz, diese Arbeit zu ermöglichen, seine fachliche Beratung und Betreuung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Horst Düllmann danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Herrn Prof. Dr. Gregor Borg danke ich für den Zugang zum REM und Frau Angelika Seiferheld für die Unterstützung bei der Durchführung der Untersuchungen.

Herrn Prof. Dr. Dr. Herbert Pöllmann danke ich für den Zugang zur Ionenchromatographie sowie fachliche Hilfe und Frau Gabriele Kummer für die Unterstützung bei den Messungen.

Herrn Prof. Dr. Rafiq Azzam danke ich für die Bereitstellung und den Zugang zu schwierig zu erlangender Literatur.

Für die finanzielle und materielle Unterstützung, die Bereitstellung von Literatur und Probenmaterial sowie für Anregungen und Diskussionen danke ich allen beteiligten Institutionen und Kooperationspartnern:

Frauenförderung der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und Frau D. Kley sowie Katrin Kärner; Frau Dr. B.M. Schulz, Inst. für Theoretische Physik, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg; Herr Dr. habil. M. Schulz, Inst. f. Physik, Universität Ulm; Herr Dr.-Ing. H. Gerdes, Herr Dr.-Ing. M. Kämpf, Brandt-Gerdes-Sitzmann Umweltplanung GmbH, Darmstadt; Herr Dr. B. Hartmann, Fa. Geoscop, Halle; Frau Dipl.-Ing. K. Büscher, Herr Dr. habil. R. Ruske, GFE Consult GmbH Halle; Herr Dr. R. Becker, Herr Dr. A. Schraft, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie; Herr Dr. C.-B. Ehling, Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt; Herr Dr. F. Walkow, Landratsamt Bitterfeld, Amt für Umweltschutz; Herr Dipl.-Ing. D. Bundesmann, LMBV Lausitzer- und Mitteldeutsche Bergbauverwaltungsgesellschaft mbH; Herr Dipl.-Chem. R. Albrecht, MDSE Mitteldeutsche Sanierungs- und Entsorgungsgesellschaft mbH, Bitterfeld; Frau Dipl.-Ing. P. Vogel, Regierungspräsidium Darmstadt, Abt. Staatl. Umweltamt; Frau Dipl.-Geol. H. Fabisch, Herr Dipl.-Geol. H. Kaufmann, Regierungspräsidium Leipzig, Unterabteilung „Umweltfachbereich“; Herr Dr. J. Göske, Herr Dipl.-Ing. M. Fylak, Zentrum für Werkstoffanalytik Lauf.

Ganz besonders danke ich meiner Mutter für ihre Unterstützung in jeglicher Form auch und vor allem während ihrer kurzen und schweren Krankheit bis zu ihrem Tod knapp ein Jahr vor Ende dieser Arbeit. Es ist traurig, dass sie das Ende



dieser Arbeit nicht mehr miterleben kann. Meinem Vater danke ich für die moralische Unterstützung zu jeder Zeit, die vielen wertvollen Hinweise und anregende Diskussionen. Meinem Mann Jens danke ich für die kritische Durchsicht des Manuskriptes.

Frau Patan danke ich für die jederzeitige unkonventionelle Hilfe bei administrativen Hürden. Frau Schnerch, Juri Buchantschenko und Gerald Tröber danke ich für die Unterstützung bei der Laborarbeit. Mehman Godjaew für die jederzeitige und vor allem schnelle Hilfe bei Soft- und Hardwareproblemen. Ihnen allen danke ich ganz herzlich dafür, dass sie mir durch eine schwere Zeit geholfen haben.

# Lebenslauf

**Simone Grimmer, Diplom-Geologin**

**Geb. 02.06.1970**

**Geburtsort: Speyer / Rhein**

- |                   |   |
|-------------------|---|
| Seit 06/2006      | <b>Field Service Engineer</b><br>Baker Hughes INTEQ, Aberdeen   |
| 08/2002 – 05/2006 | <b>Wissenschaftliche Mitarbeiterin</b><br>Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, FB Geowissenschaften, Inst. für Geologische Wissenschaften, Ingenieurgeologie   |
| 01/2001 - 05/2002 | <b>Lehrkraft für besondere Aufgaben</b><br>TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie, Lehrstuhl für Hydrogeologie   |
| 11/1999 - 12/2000 | <b>Wissenschaftliche Hilfskraft</b><br>TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie, Lehrstuhl für Hydrogeologie   |
| 1993 - 1999       | <b>Studium der Geologie</b><br>Schwerpunkt „Angewandte Geologie“ (Ingenieurgeologie, Hydrogeologie) und Geochemie/Lagerstättenkunde an der Bayerischen Julius Maximilians Universität Würzburg<br><b>Diplomarbeit</b> „Geotope als schützenswerte Bestandteile der Landschaft unter besonderer Berücksichtigung der Rohstoffgewinnung – Modellgebiet Donnersbergkreis, Rheinland-Pfalz“ am Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, Mainz (Geol. Dir. Dr. Häfner, Rohstoffgeologie/Prof. Lorenz, Univ. Würzburg) |
| 1990 - 1993       | <b>Grundstudium der Chemie</b><br>Bayerische Julius Maximilians Universität Würzburg  |
| 1981 - 1990       | <b>Gymnasium</b> im Paul-von-Denis Schulzentrum, Schifferstadt  |
| 1977 - 1981       | <b>Grundschule-Süd</b> , Schifferstadt  |