

Mitteilung des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität Braunschweig



Heft Nr. 47

IGB·TUBS

Frosteinwirkung auf mineralische Deponieabdichtungen

von
Thomas Voigt

Braunschweig 1994

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. W. Rodatz

Vorwort des Herausgebers

Das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig ist seit vielen Jahren mit Problemstellungen des Deponiebaues in praktischer Tätigkeit in enger Zusammenarbeit mit Planern, Aufsichtsbehörden und Bauausführenden befaßt. Mit der wissenschaftlichen Bearbeitung von wichtigen Fragestellungen aus der Praxis hoffen wir, einen Beitrag zum Bau sicherer Deponien liefern zu können.

Zur Abdichtung von Deponien in der Basis werden sogenannte Kombinationsdichtungen ausgeführt, die aus einer mehrlagig eingebrachten mineralischen Schicht, einer Kunststoffdichtungsbahn (KDB), einer Schutzlage für die KDB und einer Dränageschicht besteht.

Nicht selten kommt es vor, daß Deponiedichtungen aus unterschiedlichen Gründen nicht rechtzeitig vor Eintritt des Winters fertiggestellt werden können. Es besteht in diesem Fall die Gefahr, daß durch die Einwirkung des Frostes die mineralische Dichtungsschicht zerstört wird. Es ist daher für den Deponiebau von großem Interesse, die möglichen negativen Auswirkungen des Frostes abschätzen zu können, um eine wirtschaftliche Entscheidung treffen zu können, ob Schutzmaßnahmen zu ergreifen sind, oder ob die Auswirkungen tolerierbar oder im Frühjahr reparierbar sind.

Herr Dr.-Ing. Thomas Voigt hat in seiner Arbeit die sich aus dieser Problematik ergebenden Fragen aufgegriffen und Antworten erarbeitet. Die wesentlichen Fragen sind:

- Welche Veränderungen sind in einer mineralischen Dichtung nach einem oder mehreren Frostdurchgängen zu erwarten?
- Sind die Veränderungen reversibel und damit tolerierbar?
- Ist die Frosteindringung und Frostdauer in einer mineralischen Dichtungsschicht ohne direkte Messung sicher ermittelbar?
- Welche ggf. temporären Schutzmaßnahmen gegen eine Frosteindringung sind möglich?

Bei den Feld- und Laborversuchen wurden Ton, Geschiebelehm, Geschiebemergel und in einem Kollergang aufbereiteter Ton verwendet, die den Anforderungen der Vorschriften für den Deponiebau weitestgehend genügten und bereits bei konkreten Baumaßnahmen verwendet wurden.

Braunschweig, im Dezember 1994



Prof. Dr.-Ing. W. Rodatz

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Veranlassung.....	1
1.2	Ziel der Arbeit.....	2
1.3	Aufbau der Arbeit.....	2
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Einwirkende Parameter in situ	3
2.1.1	Klima.....	4
2.1.1.1	Temperatur	5
2.1.1.2	Strahlung	8
2.1.1.3	Luftfeuchte und Niederschlag	12
2.1.1.4	Luftbewegung	13
2.1.1.5	Luftdruck.....	13
2.1.2	Örtliche Physiognomie.....	14
2.1.2.1	Oberflächenexposition	14
2.1.2.2	Oberflächenbeschaffenheit.....	15
2.1.3	Untergrundsituation	17
2.1.4	Übergangsfaktoren	17
2.2	Materialeigenschaften von Boden und Wasser	18
2.2.1	Klassifizierung.....	18
2.2.2	Tonmineralart und -struktur.....	18
2.2.3	Das Porenflüssigkeits-Feststoff-System	24
2.2.4	Wasserdurchlässigkeit.....	28
2.2.5	Wasser und Eis	31
2.3	Thermodynamische Grundlagen und Vorgänge	33
2.3.1	Wärmeleitfähigkeit.....	33
2.3.2	Wärmekapazität	36
2.3.3	Latente Umwandlungswärme	36
2.3.4	Energie- und Wärmetransport	37
2.3.5	Grenzflächen und Gleichgewicht	39
2.4	Die Bodengefrierung.....	41
2.4.1	Gefrierendes Wasser im Boden.....	41
2.4.1.1	Frosteintrag in nichtbindigen Böden	42
2.4.1.2	Frosteintrag und Eislinsenbildung in bindigen Böden	43
2.4.2	Frosthebungen und Gefrierdruck.....	49
2.4.3	Tausetzung.....	52

3 Grundsätzliche Überlegungen zur Beeinflussung mineralischer Abdichtungsmaterialien durch Frost.....	54
3.1 Frostempfindlichkeit und deren Bestimmungskriterien.....	54
3.2 Bestimmung der Frosteindringtiefe	59
3.3 Zur Methodik und Interpretation von Frostversuchen.....	61
3.3.1 Einfluß der Versuchsstandrandbedingungen.....	62
3.3.2 Einfluß der Probenabmessungen	65
3.3.3 Einfluß der Wasserverfügbarkeit	67
3.3.4 Einfluß des Temperaturregimes.....	67
3.3.5 Einfluß der Auflast	70
3.3.6 Einfluß der Auftaugeschwindigkeit.....	70
3.4 Veränderung bodenmechanischer Kenngrößen	71
3.4.1 Dichte und Wassergehalt	71
3.4.2 Gefüge und Kornfraktionen	72
3.4.3 Spezifische Oberfläche.....	75
3.4.4 Kationenaustauschkapazität.....	77
3.4.5 Plastizität	77
3.4.6 Wasserdurchlässigkeit.....	79
3.4.7 Scherfestigkeit.....	82
3.4.8 Elektrische Leitfähigkeit und Konzentrationsveränderungen	85
3.4.9 Zum Einfluß des Verdichtungsgrades.....	86
3.4.10 Zum Einfluß der Probenherstellung.....	86
3.4.11 Zum Einfluß der Tonmineralart	88
4 Eigene Versuche zum Verhalten von mineralischen Dichtungsmaterialien unter Frosteinwirkung.....	90
4.1 Allgemeines	90
4.2 Auswahl und Beschreibung der eingesetzten Materialien.....	91
4.3 Feldversuche	95
4.3.1 Konzeption der Versuchsfelder.....	96
4.3.2 Installierte Meßeinrichtungen und Meßprogramm.....	100
4.3.3 Ergebnisse der Temperaturmessungen.....	104
4.3.3.1 Langfristige Veränderungen	104
4.3.3.2 Kurzfristige Veränderungen	118
4.3.3.3 Temperaturgradienten	121
4.3.4 Ergebnisse der Probennahmen	124
4.3.4.1 Gefüge.....	124
4.3.4.2 Dichte und Wassergehalt.....	130
4.3.4.3 Wasserdurchlässigkeit.....	144
4.3.4.4 Scherfestigkeit	152
4.3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Felduntersuchungen	154

4.4	Laborversuche	155
4.4.1	Vorbemerkungen	155
4.4.2	Konzeption und Meßeinrichtungen	155
4.4.3	Großmaßstäbliche Laborversuche.....	160
4.4.3.1	Herstellung.....	160
4.4.3.2	Meßprogramm	161
4.4.3.3	Durchführung und Temperaturverläufe.....	161
4.4.3.4	Versuchsergebnisse	164
4.4.3.4.1	Gefüge	164
4.4.3.4.2	Dichte und Wassergehalt.....	169
4.4.3.4.3	Wasserdurchlässigkeit	174
4.4.3.4.4	Scherfestigkeit	176
4.4.4	Kleinmaßstäbliche Laborversuche.....	178
4.4.4.1	Allgemeines	178
4.4.4.2	Versuchsergebnisse	179
4.4.4.2.1	Gefüge.....	179
4.4.4.2.2	Dichte und Wassergehalt.....	179
4.4.4.2.3	Wasserdurchlässigkeit	186
4.4.5	Reversibilität	193
4.4.6	Zusammenfassung der Laboruntersuchungen	195
4.5	Vergleich der Ergebnisse mit Literaturangaben	196
4.6	Empfehlungen zur Untersuchung der Frostgefährdung mineralischer Abdichtungen.....	199
5	Der Schutz von mineralischen Abdichtungsmaterialien vor Frost.....	202
5.1	Allgemeines	202
5.2	Theoretische Untersuchungen.....	204
5.3	Eigene Versuche	210
5.3.1	Feldversuche	210
5.3.2	Ergebnisse der Messungen	210
5.3.3	Laborversuche.....	214
5.3.4	Ergebnisse der Messungen	217
5.4	Möglichkeiten zur Ausbildung von thermischen Schutzlagen.....	219
6	Zusammenfassung und Ausblick	222
7	Literaturverzeichnis.....	227

8 Anlagen	249
1 bis 12 Tagesmittelwerte und tägliche Schwankungsbreiten aller Bodentemperaturen und Wetterbeobachtungen an den Versuchsfeldern in situ.....	249
13 bis 36 Tagesmittelwerte und tägliche Schwankungsbreiten aller Bodentemperaturen und Wetterbeobachtungen an den Versuchsfeldern in situ mit Angabe der maxi- malen Tagesschwankungen, Detailzeiträume Winter	263
37 bis 40 Temperaturgradienten zwischen den obersten Tempe- raturfühlern im mineralischen Material und den angege- benen Tiefen mit einer angepaßten Ausgleichskurve (Fit), gesamter Meßzeitraum	289
41 Zusammenstellung der Fits der Temperaturgradienten zwischen den obersten Temperaturfühlern im minerali- schen Material und den angegebenen Tiefen, gesamter Meßzeitraum	294
42 bis 49 Temperaturgradienten für die Winterzeiträume zwischen den obersten Temperaturfühlern im mineralischen Material und den angegebenen Tiefen.....	297
Synopsis.....	307
Effects of frost on mineral landfill liners	
Summary	315

1 Einleitung

1.1 Veranlassung

Im Bereich des Deponiebaus ist die zur Zeit am häufigsten ausgeführte Dichtungsvariante die Kombinationsabdichtung mit einer mineralischen Abdichtungsschicht und einer aufgelegten Kunststoffdichtungsbahn (KDB). Auf dieses Dichtungssystem wird eine Schutzschicht für die KDB und ein Drainagesystem für das Sickerwasser aufgebracht, auf das anschließend der Abfall abgelagert wird.

Ganz oder teilweise hergestellte Dichtungssysteme werden aufgrund fehlender, zu gering dimensionierter oder zu spät aufgebrachtener schützender Einrichtungen zeitweise dem Frost ausgesetzt. Dieser zu vermeidende Sonderfall, der eigentlich durch eine gute Bauplanung nicht eintreten sollte, in der Praxis jedoch aus den unterschiedlichsten Gründen immer wieder vorkommt, kann unter Umständen die Bauleistung von mehreren Monaten zerstören.

Neben einfach zu beprobenden bzw. zu beurteilenden Flächen (wenn die mineralische Abdichtung ohne jede schützende Lage offen überwintert wurde) bereiten die Fälle, in denen die mineralischen Schichten bereits mit einer Kunststoffdichtungsbahn, Schutz- und Drainageschichten abgedeckt wurden, Probleme, weil eine unmittelbare Kontrolle und Beprobung nur mit großem technischem, zeitlichem und finanziellem Aufwand möglich ist. Die Kosten- und Zeitfrage einer erforderlichen Sanierung bei Kennwerten, die nicht den Einbauanforderungen entsprechen, ist hierbei noch unberücksichtigt.

Es ist daher für den Deponiebau von großem Interesse,

- a) die grundsätzliche Art und Größe der möglichen Auswirkungen von Frostbelastungen in der mineralischen Dichtungsschicht einschätzen zu können und
- b) zu untersuchen, inwieweit ohne eine Einzelbeprobung Aussagen darüber getroffen werden können, mit welchen (reversiblen?) Veränderungen bis in welche Tiefen im mineralischen Material bei bestimmten klimatischen und systemimmanenten Randbedingungen zu rechnen ist und welche Abhilfemaßnahmen unter Umständen getroffen werden können.

1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist aufgrund der beschriebenen Situation in der Beantwortung der folgenden Fragen zu sehen:

- Wie groß ist das Problem der natürlichen negativen Temperatureinwirkungen auf eine mineralische Dichtungsschicht (Häufigkeit, Größe usw.)?
- Ist die negative Temperaturbelastung einer mineralischen Dichtungsschicht ohne direkte Messung sicher ermittelbar?
- Welche Veränderungen hinsichtlich der Qualität einer mineralischen Abdichtung sind nach einem oder mehreren Frostdurchgängen zu erwarten?
- Sind evtl. Veränderungen reversibel und damit tolerierbar?
- Welche (temporären?) Schutzmaßnahmen gegen eine Frosteindringung sind möglich?

1.3 Aufbau der Arbeit

Im ersten Teil der Arbeit werden zunächst die zur Untersuchung der Thematik notwendigen theoretischen Grundlagen bezüglich der Materialstrukturen und der thermodynamisch erforderlichen Kennwerte und Zusammenhänge erläutert. Die in der eingesehenen Literatur veröffentlichten Ergebnisse hinsichtlich der bisher bekannten Einwirkungen und Veränderungen der Kennwerte eines mineralischen Materials nach einer oder mehreren Frostbelastungen werden zusammengestellt und bewertet.

Im zweiten Teil der Arbeit werden anhand von Versuchsfeldern in situ und statistischen Klimauntersuchungen die für Laborversuche und Nachrechnungen anzusetzenden thermischen Verhältnisse ermittelt und vorgestellt. Anhand von Laborversuchen und den Versuchsfeldern in situ werden die aus der Literatur bekannten Ergebnisse überprüft und für den speziellen Anwendungsfall ergänzt. Einige Möglichkeiten hinsichtlich der Schutzmaßnahmen für die einzelnen Einbausituationen werden erläutert und bewertet.

Abschließend wird ein allgemeines Schema für das Vorgehen zur Bewertung der Frostgefährdung und der unter Umständen zu treffenden Schutzmaßnahmen für konkrete Projekte vorgestellt.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Einwirkende Parameter in situ

Bei der Untersuchung einer mineralischen Abdichtung hinsichtlich der Frosteinwirkung müssen eine Vielzahl von Randbedingungen berücksichtigt werden (Tabelle 1). Während der Bereich "Material" durch Laborversuche mit definierten Randbedingungen untersucht werden kann, ist der Energie- oder Wärmehaushalt an der Bodenoberfläche in situ durch das Gleichgewicht zwischen der Strahlenbilanz, dem Wind, der Verdunstung, Konvektion¹, Eisbildung, Sublimation, Kondensation, Schneeschmelze, des Niederschlagabflusses, der Wärmekapazität und -leitung in die oder aus der Tiefe bestimmt und damit vielfältigen, in ihrer Gesamtheit nicht exakt berechenbaren Einflüssen unterworfen.

Innere Einflüsse	Äußere Einflüsse	
Bereich Material	Bereich Klima	Bereich Örtlichkeit
<ul style="list-style-type: none"> • Körnungslinie • (Ton-)Mineralarten • Durchlässigkeit *) • Plastizität • Kapillarität • spez. Oberfläche • Kationenaustauschfähigkeit • Quellfähigkeit • Einbauwassergehalt • Ionengehalt der Porenraumlösung • Verdichtungsgrad • (Luft-)Porengehalt • Wärmeleitfähigkeit *) • Wärmespeicherfähigkeit *) 	<ul style="list-style-type: none"> • Lufttemperatur • Solare Strahlung • Terrestrische Strahlung • Bewölkung • Niederschlag • Verdunstung • {Luftfeuchte} • Luftbewegung (Wind und Konvektion) • {Luftdruck} • Übergangsfaktoren <p style="text-align: center;">↑ ⇔ Zeit ! ⇔</p>	<ul style="list-style-type: none"> • thermisch wirksame Schutzschichten (Kies/Schnee/Müll o.ä.) • Oberflächenexposition • Oberflächenbeschaffenheit • Umgebungsmorphologie • Untergundaufbau mit <ul style="list-style-type: none"> ➤ Grundwasserstand ➤ Wassergehalt ➤ Kapillarität ➤ Wärmeleitfähigkeit *) ➤ Wärmespeicherfähigkeit *) • Ausgangsbodentemperatur • Auflast
<p>*) = in Abhängigkeit von der Temperatur; {} = hier nur geringer oder mittelbarer Einfluß</p>		

Tabelle 1: Zusammenstellung der wichtigsten Einflußfaktoren bei der Beurteilung der Frosteinwirkung auf eine mineralische Abdichtung

¹ Konvektion a) in der Klimatologie = ungeordnetes Aufsteigen wärmerer Luftströmungen (LILJEQUIST/CEHAK 1979)
 b) in der Physik = Transport von Energie oder elektr. Ladung durch die kleinsten Teilchen einer Strömung (DUDEN 1991)

Eine Bestimmung der Frosteindringung und eine Bewertung der thermischen Belastung des Bodens kann daher nur über Messungen in situ oder näherungsweise über Berechnungen mit Summenparametern vorgenommen werden.

2.1.1 Klima

Unter Klima versteht man den Zustand und die zeitliche Veränderung der Gesamtheit aller meteorologischen Erscheinungen in einem bestimmten Gebiet. Für die vorliegende Fragestellung ist das Klima die einzige maßgebliche einwirkende Größe, die aus einer Vielzahl von einzelnen physikalischen Zuständen oder Vorgängen besteht. Diese einzelnen Erscheinungen, wie z. B. Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, Strahlung, Wind, sind eng miteinander verflochten. Jede Änderung eines Klimaelementes ist mit der Änderung anderer Klimaelemente in gleicher oder gegenläufiger Richtung verbunden. Lediglich in seltenen Fällen kann eine Erscheinung isoliert betrachtet werden und somit auch nur in seltenen Fällen ausschließlich eine Erscheinung als Ursache für bestimmte Auswirkungen herangezogen werden.

Der Normalfall bei der Bestimmung des Klimas ist die Messung der einzelnen meteorologischen Elemente in Beobachtungshütten oder automatischen Meßstationen. Die in Deutschland durch den Deutschen Wetterdienst betriebenen Stationen ergeben jedoch nur Meßwerte für das sogenannte Groß- oder Makroklima. Das resultiert daraus, daß die Elemente eines Klimas in verschiedenen Höhenlagen über der Erdoberfläche andere Zustandformen oder Größen besitzen. So nimmt die Temperatur in der Regel mit zunehmender Höhe ab und ein gleichmäßiger Wind zu. Diese im Normalfall gleichmäßigen und stetigen Änderungen sind im Bereich der Erdoberfläche in Abhängigkeit von der jeweiligen Oberflächengestaltung auf kurzen Distanzen besonders groß und zum Teil gegenläufig (Inversionen, Windscherwirbel, Turbulenzen durch Gegenstände). Beispielhaft für bodennahe Unstetigkeiten sind die nur wenige Dezimeter mächtigen Erscheinungen eines Bodennebels, der über einer nassen Wiese steht, oder das Flimmern der Luft über einer durch die Sonne bestrahlten Asphaltstraße.

Aus diesen Gründen wird die Messung z. B. der Lufttemperatur standardmäßig in 2 Metern Höhe vorgenommen, um die zufälligen Einflüsse der lokalen Erdoberflächengestaltung weitgehend auszuschalten (GEIGER 1961). Das führt dazu, daß die im Netz der Wetterdienste gemessenen Normalwerte (Lufttemperatur, Luftfeuchte oder Windgeschwindigkeit) nur das Groß- oder Makroklima beschreiben, örtlich in Erdbodennähe durch die morphologische Gestaltung jedoch ein davon erheblich abweichendes Kleinklima vorhanden sein kann. Dieses wird zur Unterscheidung von der Großwetterlage als

Mikroklima bezeichnet und soll im vorliegenden Zusammenhang den Bereich von der Erdoberfläche bis etwa 2 Meter Höhe umfassen.

2.1.1.1 Temperatur

Die Lufttemperatur beschreibt den allgemeinen Energiezustand der Atmosphäre (LILJE-QUIST/CEHAK 1979), den der Mensch in Form von Wärme oder Kälte fühlt. Abhängig und beeinflusst von vielen anderen meteorologischen Erscheinungen ist die Lufttemperatur eine Hauptgröße, die für bestimmte Anwendungszwecke als Summenindikator dienen kann. Sie wird für die meisten technischen Zwecke als Tagesmitteltemperatur angegeben bzw. in Berechnungsformeln eingesetzt. Für die Berechnung einer Tagesmitteltemperatur gibt es drei bevorzugte Verfahren:

- das Mittel der beiden Extremwerte Maximum und Minimum,
- das Mittel nach der Verfahrensweise des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und
- das arithmetische oder gewichtete Mittel aller vorliegenden Messungen.

Das Mittel der Extremwerte kann durch die tägliche Ablesung eines Minimum-Maximum-Thermometers relativ einfach bestimmt werden und ist daher ohne größeren Aufwand und strenge zeitliche Gebundenheit an einem einzigen Ablesetermin möglich. Die Tagesmitteltemperatur nach der Verfahrensweise des DWD wird entsprechend einer internationalen Übereinkunft durch die Mittelbildung der drei Klimatermine 7:00 Uhr, 14:00 Uhr und 21:00 Uhr nach der Formel

$$T_{\text{mittel}} = \frac{T_{700 \text{ Uhr}} + T_{1400 \text{ Uhr}} + 2 * T_{2100 \text{ Uhr}}}{4} \quad (1)$$

bestimmt. Die Festlegung dieser Gleichung resultierte zum einen aus Praktikabilitätsgründen, da es zu Zeiten der rein manuellen Ablesung an den einzelnen Wetterstationen nicht möglich erschien, eine häufigere Ablesung von den zum Teil ehrenamtlichen Ablesern zu verlangen. Auch die Menge der zu verarbeitenden Daten stand einer häufigeren Ablesung entgegen. Zum anderen ist die Verwendung dieser Zeitpunkte auch klimatologisch sinnvoll, da sie markante Punkte der normalen Tagesganglinie darstellen:

Solange sich die Wetterlage durch großräumige Wetterfronten nicht ändert, weist die Lufttemperatur an einem Durchschnittstag durch die nächtliche Abkühlung die tiefsten Tagestemperaturen bei Sonnenaufgang je nach Strahlungseinwirkung etwa gegen 6:00 Uhr bis 7:00 Uhr auf. Die Tageshöchsttemperatur verspätet sich gegenüber dem Sonnehöchststand um 12:00 Uhr in Abhängigkeit von der Bodenart (Energier reflexion ⇔

Energieabsorption \leftrightarrow Bodenwärmeleitfähigkeit), wodurch eine Phasenverschiebung entsteht (LILJEQUIST/CEHAK 1979, s. a. Bild 1). Die höchsten Temperaturen werden im Bereich des Festlandes zwischen 13:00 Uhr und 15:00 Uhr erreicht (Ozeane gegen 12:30 Uhr, WEISCHET 1991), so daß der 14:00 Uhr-Termin über ein ganzes Jahr betrachtet als ein akzeptabler Zeitpunkt für die maximale Tageslufttemperatur erscheint. Der Klimawert um 21:00 Uhr stellt durch den Zustand ohne Sonneneinstrahlung einen Mittelwert zwischen Maximum und Minimum dar und dient der Absicherung oder Korrektur des reinen Extremwertverhältnisses.

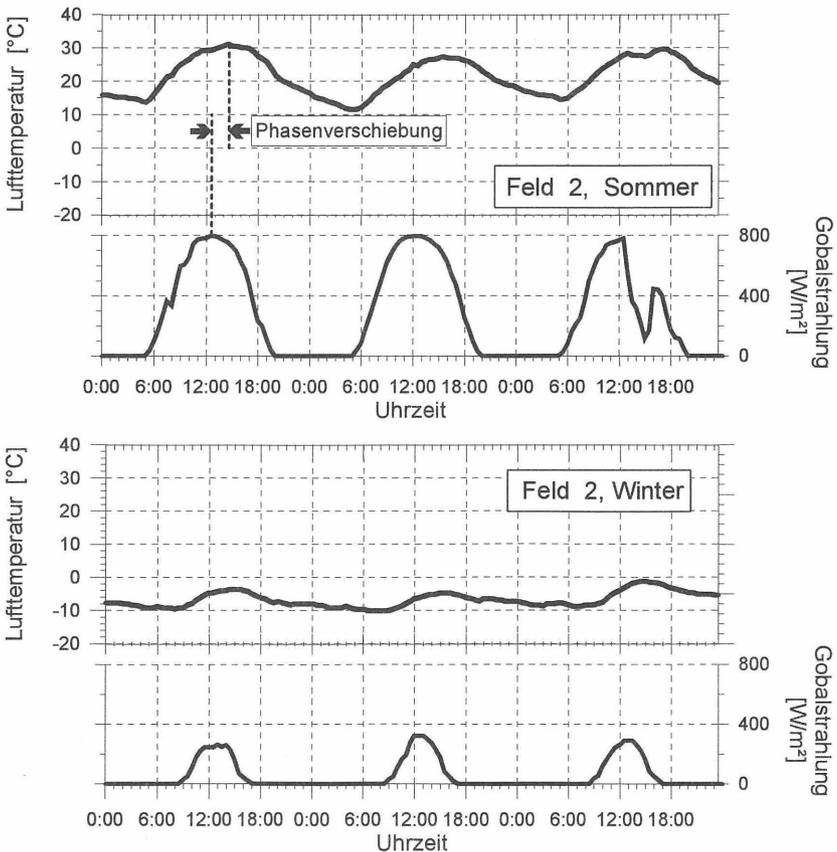


Bild 1: Tagesgang und Phasenverschiebung der Lufttemperatur und der Globalstrahlung als näherungsweise Indikator für die Sonnenscheindauer und -intensität an einem Sommer- und einem Wintertag (MEZ), eigene Meßwerte aus Versuchsfeld 2 (Feldbezeichnungen s. a. Seite 97f.)

Die Unterschiede zwischen den angeführten Mittelbildungen sind nach mündlicher Auskunft der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle in Braunschweig i. d. R. gering, jedoch gibt es keine systematischen Untersuchungen über die Abhängigkeiten. Größere Differenzen treten vor allem bei sehr schnellen oder kurzzeitigen Wetteränderungen auf, die von zwei oder drei Klimaterminen an einem Tag nicht repräsentativ erfaßt werden können.

Die Untersuchung der Meßwerte eines Jahres aus den Feldern 3/4 (Bild 2) hat ergeben, daß sich gegenüber dem vom Deutschen Wetterdienst verwendeten Tagesmittel für das arithmetische Mittel aller 48 Tagesablesungen vereinzelt Unterschiede von maximal ca. $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ergeben haben. 81% der berechneten Werte liegen unter einer Abweichung von $\pm 1^{\circ}\text{C}$, 57% unter $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, die Standardabweichung der Regression beträgt $\pm 0,65^{\circ}\text{C}$.

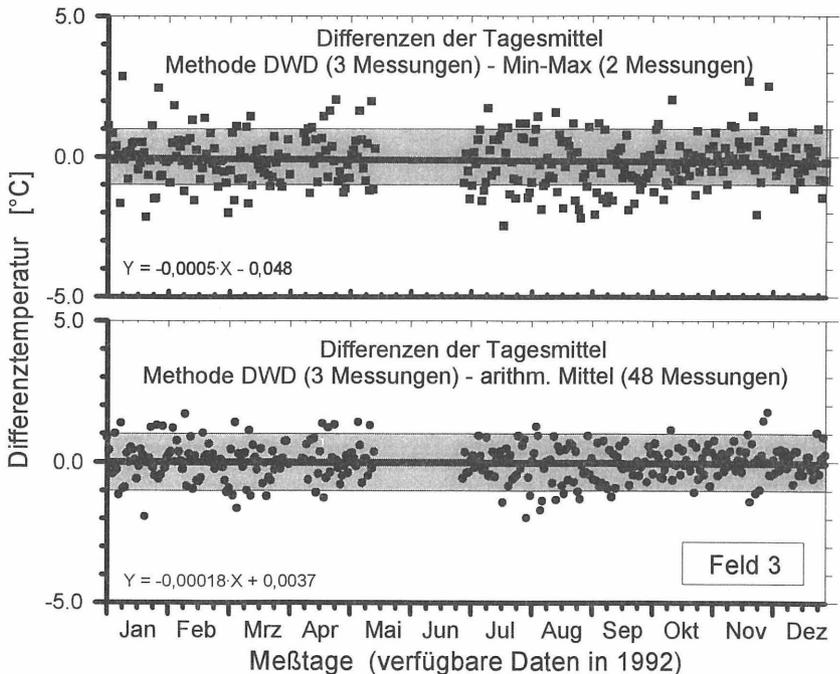


Bild 2: Differenzen zwischen den untersuchten Tagesmitteln zu der Mittelbildung des Deutschen Wetterdienstes (DWD), eigene Meßwerte aus der gemeinsamen Wetterstation der Versuchsfelder 3 / 4 (Feldbezeichnungen s. a. Seite 97f.)

Die Differenzen gegenüber dem Mittel aus den Extremwerten sind mit maximalen Abweichungen von ca. $\pm 2,9^{\circ}\text{C}$, mit 73% Abweichung $< \pm 1^{\circ}\text{C}$ und 43% Abweichung vom DWD-Mittel $< \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ etwas größer (Standardabweichung von der Regressionsgleichung $\pm 0,9^{\circ}\text{C}$). Die Betrachtung der Differenzen über den gesamten Zeitraum ergibt keine signifikanten Unterschiede (z. B. jahreszeitliche Schwankungen oder konstante Differenzen), wie aus den Regressionsgleichungen in Bild 2 zu erkennen ist (X = Anzahl der Tage).

Eine arithmetische Mittelbildung ausreichend häufiger, regelmäßiger Meßwertablesungen stellt grundsätzlich einen zutreffenderen Mittelwert dar. Da sich größere Differenzen zu dem Mittel des DWD über wenige Tage (meist innerhalb von ein bis drei Tagen) ausgleichen und somit kein systematischer Unterschied besteht, wird in der vorliegenden Arbeit für die Tagesmitteltemperaturen, soweit nicht besonders gekennzeichnet, das arithmetische Mittel aller 48 Tagesablesungen zwischen 0:00 Uhr und 24:00 Uhr verwendet.

2.1.1.2 Strahlung

Unter Strahlung versteht man einen Fluß von elektromagnetischen Wellen, der nicht von der Materie abhängt. Durch Absorption kann Strahlungsenergie in Wärmeenergie umgewandelt werden. Die Strahlungsenergie wird daher in der meteorologischen Literatur in äquivalenten Wärmeinheiten angegeben, z. B. in Joule [J] oder in älterer Literatur in Grammkalorien [cal] (LILJEQUIST/CEHAK 1979). Da die Strahlung einen zeitlich andauernden Energietransport darstellt, wird der Strahlungsfluß als Energie pro Zeiteinheit und Fläche angegeben ($[\text{J}/\text{cm}^2 \text{ min}]$ oder $[\text{W}/\text{m}^2]$).

Die Strahlung beeinflusst die Oberflächentemperatur des Erdbodens in einem erheblichen Umfang (JONES 1983, s. a. Kapitel "Kurzfristige Veränderungen", Seite 118) und kann bei Wärmehaushaltsberechnungen nur in Sonderfällen außer acht gelassen werden. Begriffsmäßig unterscheidet man in der Meteorologie zwischen solarer und terrestrischer Strahlung. Beide Strahlungsarten lassen sich im Bereich der Atmosphäre näherungsweise durch die Wellenlänge in die kurzwellige Solarstrahlung (0,3 - 5 μm) und die langwellige terrestrische Strahlung (4 - $\approx 100 \mu\text{m}$) einteilen (MÖLLER 1973b).

Ein Körper wird dabei als "schwarz" bezeichnet, wenn er alle auf ihn einfallende Strahlungsenergie absorbiert. Absorbiert er nur einen Bruchteil der auffallenden Strahlungsenergie, schreibt man ihm ein Absorptionsvermögen $k_{\lambda} < 1$ zu. Dieses Absorptionsvermögen kann mit der Wellenlänge der Strahlung veränderlich sein (MÖLLER 1973b). Ein schwarzer Körper emittiert die absorbierte Strahlungsenergie in Form einer langwelligen definierten Energie E mit bestimmten Intensitäten und Wellenlängen, die nur von seiner Oberflächentemperatur abhängt.

Unter der **solaren Strahlung** versteht man die von der Sonne kommende Strahlung, die direkt oder diffus als Himmelsstrahlung den Erdboden erreicht und kontinuierlich über die Wellenlängen verteilt ist. Die Strahldichte aller Wellenlängen bei einer mittleren Entfernung zwischen Erde und Sonne bezeichnet man als Solarkonstante I_0 , die außerhalb der Erdatmosphäre einen Wert von $I_0 = 1,361 \pm 0,007 \text{ kW/m}^2$ besitzt (MÖLLER 1973b)². Diese Konstante setzt sich zu fast 98% aus den Bereichen der Wellenlängen 0,3 bis 3,0 μm zusammen. Durch die verschiedenen Extinktionen (die Streuung an den Luftmolekülen, die Streuung an größeren Partikeln und die Absorption an den atmosphärischen Gasen) werden bis zur Erdoberfläche die Intensitäten verschiedener Wellenlängen vermindert (Bild 3), so daß die bei den verwendeten Globalstrahlungsgebern registrierten Wellenlängen (Tabelle 18, Seite 103) den größten Teil der Strahlung erfassen.

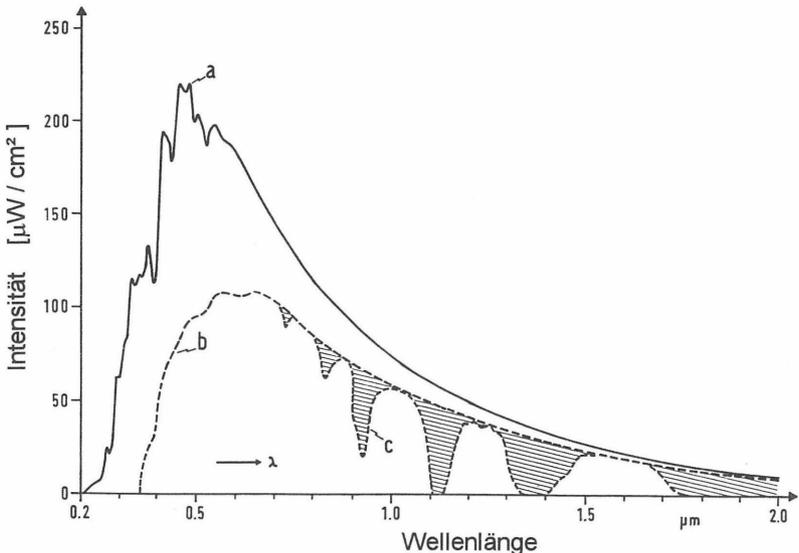


Bild 3: Sonnenspektrum; a) extraterrestrisch, b) unter der Ozonschicht und nach O_3 -, Rayleigh- und Dunstextinktion, c) nach Absorption durch Wasserdampf (nach MÖLLER 1973b)

² Nach LILJEQUIST/CEHAK 1979 beträgt diese Konstante i.M. $I_0 = 1,354 \text{ kW/m}^2$ (1,31 kW/m^2 im Sommer und 1,40 kW/m^2 im Winter auf der Nordhalbkugel); nach SCHÖNWIESE 1988 (1,367 $\pm 0,007$) kW/m^2 ; nach WEISCHET 1991 (1,359 $\pm 0,046$) kW/m^2 , nach McILVEEN 1986 1,38 kW/m^2 , nach KAEMPFERT 1942 1,3537 kW/m^2 .

Die durch die Streuung abgelenkte Sonnenstrahlung wird teilweise in den Weltraum zurückgestrahlt; der Rest gelangt als diffuse Himmelsstrahlung D zum Erdboden oder wird unterwegs absorbiert. Die letztendlich auf den Erdboden einfallende solare Strahlung setzt sich aus den zwei Komponenten

- direkte Sonnenstrahlung I mit dem Strahlungsstrom $I \cdot \cos z_{\odot}$ (mit z_{\odot} = Azimut zur Sonne) und der
- diffusen Himmelsstrahlung D zusammen, die aus allen Richtungen kommt.

Beide zusammen ergeben die Globalstrahlung G , die den gesamten solaren Strahlungsfluß zur Erdoberfläche beinhaltet:

$$G = I \cdot \cos z_{\odot} + D \quad [\text{kW/m}^2] \quad (2)$$

Die Globalstrahlung am Erdboden kann bei klarem Wetter in mittleren Breiten Werte bis etwa $1,0 \text{ kW/m}^2$ erreichen, wobei D nur etwa 10% beiträgt. Bei bedecktem Himmel ($I \cong 0$, $G = D$) kann dieser Wert als Stundenmittel noch bei $G \cong 0,6 \text{ kW/m}^2$ und im Winter bei $0,2 \text{ kW/m}^2$ liegen (McILVEEN 1986, MÖLLER 1973b). Der Einfluß des Luftdruckes auf die Globalstrahlung ist vernachlässigbar (WEISCHET 1991).

Als **terrestrische Strahlung** bezeichnet man alle von irdischen Objekten ausgehende Strahlung, die auch die von der Atmosphäre ausgehende thermische Strahlung beinhaltet. Der gesamte Strahlungsfluß E , der pro Zeiteinheit von 1 m^2 der Oberfläche eines schwarzen Körpers ausgeht, wird nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz zu

$$E = \varepsilon_{\lambda} \cdot \sigma_{\text{t}} \cdot T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (3)$$

ε_{λ} = Emissionskoeffizient \equiv Absorptionsvermögen für langwellige Strahlung ($\varepsilon_{\lambda} < 1$) [-]
 σ_{t} = Stefan-Boltzmann-Konstante = $5,6696 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^4]$
 T = Oberflächentemperatur [K] !

berechnet (LILJEQUIST/CEHAK 1979; SCHÖNWIESE 1990; WEISCHET 1991, McILVEEN 1986). Eine steigende Temperatur hat somit eine mit der 4. Potenz steigende Energieabgabe zur Folge. Diese Energieabgabe geht ständig vonstatten, d. h., sie ist am Tage und bei Sonnenschein infolge der steigenden Oberflächentemperatur größer als in der Nacht und im Winter, wird jedoch von der Einstrahlung überkompensiert.

Die Wellenlängen der stärksten Strahlungen liegen in einem Temperaturbereich von $\pm 30 \text{ C}$ bei $\lambda_{\text{max}} = 11,9 \text{ }\mu\text{m}$ bis $9,6 \text{ }\mu\text{m}$. Da die Atmosphäre für langwellige Strahlungen zwischen $8 \text{ }\mu\text{m}$ und $13 \text{ }\mu\text{m}$ besonders gut durchlässig ist (LILJEQUIST/CEHAK 1979), kann die terrestrische Strahlung bei wolkenlosem Himmel leicht in den Weltraum ab-

Im Vergleich der beiden Werte $I_0/4 \approx 1360/4 \approx 340 \text{ W/m}^2$ (= 100%, s. S. 9) und $E = 390,1 \text{ W/m}^2$, ergibt sich ein extraterrestrischer Strahlungsüberschuß von ca. 50 W/m^2 ($\approx 14\%$). Dieser Energieverlust der Erdoberfläche wird u. a. durch die Rückstreuung in der Atmosphäre soweit überkompensiert, daß sich letztendlich global gesehen eine Strahlungsbilanz von ca. -30% für die Atmosphäre und $+30\%$ für die Erdoberfläche ergibt. Daß die Erdoberfläche nun aber nicht laufend wärmer wird, liegt an der Energieübertragung von Nichtstrahlungsvorgängen vom Boden an die Atmosphäre. Dies sind im wesentlichen der Wassertransport in jeder Form (verdunsten, kondensieren, gefrieren, schmelzen, sublimieren) in der Atmosphäre und am Erdboden und die molekulare und turbulente Wärmeleitung (SCHÖNWIESE 1988; MÖLLER 1973b). Im Globalgleichgewicht sind die weiteren Faktoren Erdwärme und Assimilation der Pflanzen relativ unbedeutend. Sie können jedoch lokal oder jahreszeitlich relevant werden.

2.1.1.3 Luftfeuchte und Niederschlag

Das Wasser ist die einzige Substanz, die in der Atmosphäre in den drei Aggregatzuständen gasförmig (Wasserdampf), flüssig (z. B. Regen) und fest (z. B. Hagel, Schnee) vorkommt. Dies ist insofern relevant, weil die Phasenumwandlungen zwischen gasförmig und flüssig (kondensieren \Leftrightarrow verdunsten/verdampfen), flüssig und fest (gefrieren \Leftrightarrow schmelzen) sowie die direkten Übergänge zwischen gasförmig und fest (sublimieren \Leftrightarrow Deposition)³ einen großen Einfluß auf den Energiehaushalt der Atmosphäre und der Bodenoberfläche haben, da hierbei große Energiebeträge freigesetzt bzw. benötigt werden. Die gleichen Vorgänge laufen zum Teil auch bei den Energie- und Wassertransporten in einem Boden ab.

Sieht man vom Aggregatzustand ab, so unterscheiden sich die Niederschläge vor allem durch die Art und die Größe des Abtransportes der bei ihrer Bildung entstehenden Energie. Bei Tau und Reif wird die freigesetzte Energie durch die Ausstrahlung kompensiert, bei Beschlag nimmt sie der beschlagene Gegenstand auf, bei Rauheis spielt der Abtransport in die (kältere) Luft eine wesentliche Rolle (HOFMANN 1955). Einen kurzfristigen Einfluß auf die Bodentemperatur hat die Übertragung von Energie über die Temperatur der Niederschläge. Abhängig von der Durchlässigkeit der Bodenoberfläche kann warmer oder kalter Regen die Bodentemperatur in den oberen Zonen verändern.

³ Das Wort Sublimation wird in der Meteorologie und der physikalischen Chemie teilweise für die genau umgekehrten Vorgänge verwendet. Im vorliegenden Zusammenhang soll Sublimation den direkten Übergang eines festen Stoffes in den Gaszustand bedeuten (Eis in Wasserdampf), Deposition nach WEISCHET 1991 und MÖLLER 1973b den direkten Übergang vom gasförmigen in den festen Zustand (Wasserdampf in Eis).

Im vorliegenden Fall, in dem eine KDB das eigentliche mineralische Material schützt, kann dieser Einfluß nur über die Wärmeleitung durch die KDB bzw. durch die Temperaturänderung in den aufliegenden Schutz- und Drainageschichten wirksam werden.

2.1.1.4 Luftbewegung

Jede Luftbewegung, umgangssprachlich als Wind bezeichnet, hat einen Einfluß auf das aktuelle Energiegleichgewicht. Wind kann Energie an- oder abtransportieren, z. B. direkt in Form von Reibung und Wärmeleitung an der Erdoberfläche oder indirekt durch die Erhöhung der Verdunstung.

Im vorliegenden Fall ist die großräumige Windrichtung oft von untergeordneter Bedeutung. Lokale Geländegegebenheiten, Bewuchs und Bebauung erzeugen ein Mikroklima, das örtlich von der Großwetterlage abweichen kann. Beispiele hierfür sind die sogenannten Kaltluftseen in Niederungen und Senken oder Windschneisen durch Wälder und Städte. Für die Entstehung von Kaltluftseen genügen unter Umständen schon niedrige Begrenzungen von ein bis drei Metern Höhe (GEIGER 1961, LILJEQUIST/CEHAK 1979), wie sie auch bei Randwällen von Deponien vorliegen. Übertragbare Ansätze zur Berücksichtigung des Windes auf den Energiehaushalt der Bodenoberfläche konnten in der eingesehenen Literatur nicht ermittelt werden.

2.1.1.5 Luftdruck

Der Luftdruck beeinflusst alle anderen meteorologischen Elemente. Bei steigendem Luftdruck erhöht sich z. B. die Temperatur und der Sättigungsdampfdruck wird verändert.

Der Luftdruck ist eine wesentliche Komponente der sogenannten Bodenatmung. Zusammen mit der Temperatur führen Luftdruckschwankungen zum Ein- und Ausströmen von Luft im Erdboden. Hierdurch wird bei großsporigen Böden der innere Tauanfall unter Umständen vergrößert oder verkleinert und der Austausch mit der Atmosphäre vergrößert. Bei der vorliegenden Fragestellung wird davon ausgegangen, daß eine Kunststoffdichtungsbahn auf dem mineralischen Material aufliegt und somit keine Austauschprozesse molekularer Art mit der Atmosphäre auftreten können.

Die Kunststoffdichtungsbahn wirkt jedoch wie die Kolbenoberfläche einer pneumatischen Presse. Luftdruckschwankungen führen dadurch theoretisch zu einem gewissen Pump-effekt in der mineralischen Dichtungsschicht, der zu zyklischen Konsolidierungen und Entlastungen führen kann. Auf eine Berücksichtigung dieses Effektes wird wegen der hohen Gefrierdrücke und der vorhandenen Auflasten durch Kies- und Schutzschichten verzichtet.

2.1.2 Örtliche Physiognomie

Lokale Geländeformationen, Bewuchs und Bebauung erzeugen durch die Umleitung von Winden, Bildung von Warm- und Kaltluftseen oder Strahlungsabschirmungen ein Mikroklima, das örtlich von der Großwetterlage abweichen kann, so daß die Verwendung von eigenen Wetterstationen sinnvoll sein kann. Bei ihrer Positionierung sollte ein Klimatologe hinzugezogen werden, da sonst leicht verfälschte Meßwerte erhalten werden. Bei der Verwendung von Klimadaten aus Wetterstationen in einer Stadt muß berücksichtigt werden, daß gegenüber dem Landklima einige Abweichungen auftreten können. Nach LANDSBERG 1981 (zitiert nach SCHÖNWIESE 1990) können folgende Abweichungen auftreten:

<u>Art der Klimadaten</u>	<u>Abweichung bis zu</u>
Globalstrahlung	- 20 %
Sonnenscheindauer	- 10 %
Bewölkungsgrad	+ 10 %
Nebel/Smog	+ 3 %
Lufttemperatur	+ 3 °C
Wind (abgesehen von Düseneffekten)	- 30 %

Tabelle 2: Abweichungen des Stadtklimas gegenüber dem Umlandklima (LANDSBERG 1981)

2.1.2.1 Oberflächenexposition

Wie bereits aus Gleichung 1, Seite 10 ersichtlich, ist der Anteil der auffallenden Globalstrahlung vom Neigungswinkel der betrachteten Oberfläche abhängig. Damit ist es erklärlich, daß auf Südhängen die Temperaturen i. a. höher sind als auf Nordhängen und horizontale Flächen eine Mittelstellung einnehmen (KAEMPFERT 1942). In Untersuchungen von HEIGEL 1960 an unbewachsenem Boden (dünne Humusschicht über Lehmboden) ergeben sich Unterschiede des monatlichen Mittels der Bodentemperatur in 2 cm Tiefe vom Süd- zum Nordhang von bis zu 4°C im Sommer; in 10 cm Tiefe von bis zu 2°C. Diese Differenzen treten in zwei Maxima im Frühjahr und im Herbst auf, wenn die Begünstigung des Südhanges durch die tiefstehende Sonne und die kurze Sonnenscheindauer am ausgeprägtesten ist.

Für die Konzeption von Temperaturmeßquerschnitten bei Wintersicherungsprogrammen bedeutet dies, daß für die Ermittlung der tiefsten Frosteindringung ein Querschnitt im Bereich der Nordhänge im Dauerschatten und für die Ermittlung der Häufigkeit von evtl. Frost-Tau-Wechseln ein Südhangbereich ausgewählt werden sollte.

2.1.2.2 Oberflächenbeschaffenheit

Die Art des Materials und die Ausbildung der Oberfläche (glatt, gebrochen, poliert) entscheidet über den Anteil der absorbierten oder reflektierten Strahlen. In Tabelle 3 sind die Reflexionsanteile einiger Oberflächen für die (kurzwellige) Globalstrahlung angegeben. Es ist ersichtlich, daß helle Flächen mehr Strahlung reflektieren als dunkle. Eine Wasserhülle reflektiert die sie durchlaufenden Strahlungen, die von der Festkörperoberfläche reflektiert werden, aufgrund der Strahlungsgesetze zum Teil wiederum in Richtung Festkörperoberfläche (ÄNGSTRÖM 1925, zitiert nach GEIGER 1961). Daher ist die Reflexion bei feuchten Oberflächen kleiner als bei gleichartigen trockenen Oberflächen.

Die Reflexion der Oberflächen ist neben dem Feuchtezustand auch von der Sonnenhöhe abhängig und damit sowohl tages- als auch jahreszeitlich unterschiedlich. In Bild 4 ist der Jahresgang der reflektierten Globalstrahlungsanteile für eine Wiese mit und ohne Schneeeinfluß und für ein fließendes Gewässer angegeben. Sowohl die Angaben in Tabelle 3 als auch in Bild 4 machen deutlich, daß die Angabe nur eines statischen Reflexionsanteiles für eine Oberfläche nur eine Annäherung sein kann und streng genommen in Abhängigkeit von den sich verändernden Randbedingungen laufend überprüft werden müßte.

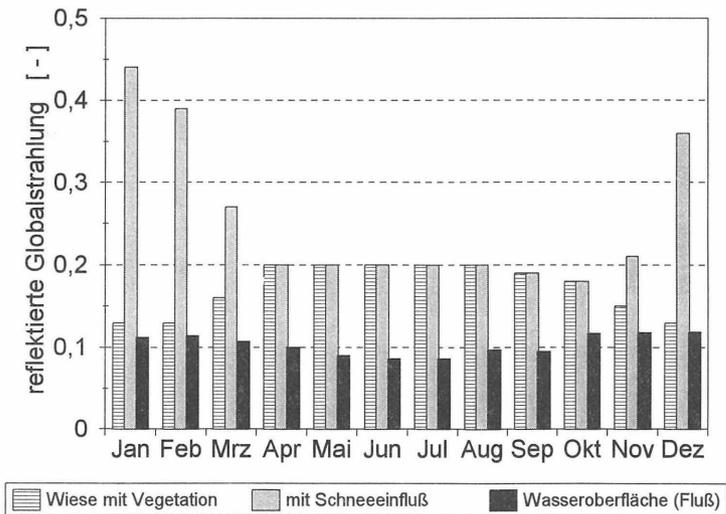


Bild 4: Änderung der reflektierten Anteile der Globalstrahlung im Lauf eines Jahres (nach GEIGER 1961)

Oberfläche	r_s [-]					
	WEISCHET 1991	MÖLLER 1973b	LILJEQUIST /CEHAK 1988	HÄCKEL 1985 GEIGER 1961	ALBRECHT 1940	MCILVEEN 1986
Schnee, frisch	0,75 - 0,95	0,80 - 0,90	0,80 - 0,90	0,75 - 0,95	0,81 - 0,85	
Schnee, alt	0,40 - 0,70	0,40 - 0,60		0,40 - 0,70	0,42 - 0,70	
Schnee, o. weitere Angabe						0,40 - 0,95
Schnee, schmelzend			0,60 - 0,70			
Gletschereis				0,30 - 0,45		
Böden						0,05 - 0,40
Sand und Dünen, trocken		0,25 - 0,35		0,30 - 0,60	0,26 - 0,63	
Sand, trocken	0,35 - 0,45				0,18	
Sand, naß	0,20 - 0,30				0,09	
Sand, ohne weitere Angabe				0,15 - 0,40		
Rasen	0,10 - 0,20	0,25				0,16 - 0,26
Tonboden, grau, feucht	0,10 - 0,20					
Tonboden, grau, trocken	0,20 - 0,35					
Braunerden, feucht	0,07 - 0,12					
Braunerden, trocken	0,20 - 0,23					
Äcker		0,15		0,07 - 0,17	0,16	
Wald (Laubw. > als Nadelw.)		0,05 - 0,18		0,05 - 0,20	0,07 - 0,09	0,05 - 0,20
Flüsse, Seen		0,05 - 0,10				
Meer		0,03 - 0,07	0,10			
Wasser, Sonnenhöhe 40-50°	0,07 - 0,10			0,03 - 0,10	0,09	0,03 - 0,10
Wasser, Sonnenhöhe ca. 20°	0,20 - 0,25			0,80		0,10 - 1,00
Betondecke	0,17 - 0,27					
Asphaltstraße	0,05 - 0,10					

Tabelle 3: Reflexionsvermögen (Albedo) r_s natürlicher Oberflächen für die (kurzwellige) Globalstrahlung (verschiedene Quellen, siehe Tabellenkopf)

2.1.3 Untergrundsituation

Die geothermen Tiefenstufen bewirken wegen der durchschnittlichen Temperaturzunahme von $1^{\circ}\text{C}/33\text{ m}$ Tiefe einen Bodenwärmestrom in Richtung Erdoberfläche. Dieser beträgt nach GEIGER 1961 ca. $0,07\text{ W/m}^2$; extreme Gebiete wie z. B. Vulkane (Eifelgebiet) oder heiße Quellen ausgeschlossen. Die Größe des oberflächennah bei Temperaturschwankungen nutzbaren Anteils hängt jedoch von der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität des Bodens ab.

Die Bodentemperaturen können für allgemeine und kurzfristige Aussagen in einer Tiefe von 6 m bis 8 m als konstant angenommen werden (GEIGER 1961, ARAND et al. 1989, HADER 1982). Bei Zeiträumen, die über 2 bis 3 Jahre hinausgehen, muß eine langfristige Temperaturschwankung auch in diesem Tiefenbereich berücksichtigt werden. In einer 54jährigen Meßreihe wurden Schwankungen der extremen Jahresmitteltemperatur von $1,3^{\circ}\text{C}$ in 12 m Tiefe und $1,5^{\circ}\text{C}$ in 4 m Tiefe ermittelt (GEIGER 1961).

2.1.4 Übergangsfaktoren

Eine Schwierigkeit bei dem Einsatz von Rechenmodellen für die Bestimmung der Bodentemperatur liegt in der Abschätzung der Oberflächentemperatur aus den gemessenen Klimawerten, die für Wärmehaushaltsberechnungen benötigt wird. Wie im Hochbau (DIN 4108) muß auch im vorliegenden Fall aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen der Luft und der Bodenoberfläche bei Berechnungen ein Übergangsfaktor berücksichtigt werden. Dieser ist von allen bisher aufgeführten Klimaelementen und von Oberflächenparametern abhängig, ändert sich damit ständig und ist nicht ohne weiteres quantifizierbar. Vereinfachend wird im Straßenbau mit einem Faktor zwischen 0,6 und 1,0 gerechnet (BEHR 1984).

Der Ansatz eines konstanten Übergangsfaktors ist normalerweise eine sehr grobe Vereinfachung und nur für Überschlagsberechnungen sinnvoll. Im vorliegenden Zusammenhang kann jedoch der Einsatz eines konstanten Faktors in Erwägung gezogen werden, da im betrachteten Winterzeitraum der Einfluß der Globalstrahlung wesentlich kleiner ist als im restlichen Jahr und kurzfristige Schwankungen bei den als vorhanden vorausgesetzten Drainageschichten für die mineralische Abdichtung nicht relevant sind.

2.2 Materialeigenschaften von Boden und Wasser

2.2.1 Klassifizierung

Die für Abdichtungen von Deponien verwendeten Bodenarten sind, bis auf ausgesprochene Bentokiesdichtungen, i. d. R. Ton-Schluff-Gemische, deren Eigenschaften vornehmlich von der Tonfraktion und der Art der Tonminerale bestimmt werden. Die genaue Benennung und Einteilung der Bodenarten erfolgt nach DIN 4022, wobei für die größeren Korngruppen die Kornverteilungen, für die feineren Korngruppen die plastischen Eigenschaften maßgebend sind. Für bautechnische Zwecke ist die Klassifizierung nach DIN 18 196 zu verwenden.

Nach GRAUBNER 1980 sind Tone im Sinn einer allgemeinen geologischen Bezeichnung für feinkörnige Lockergesteine überwiegend aus Tonmineralen bestehende klastische Sedimente mit Korngrößen unter 0,02 mm, umfassen nach dieser Definition also auch teilweise den Korngrößenbereich der Schluffe nach DIN 4022. In der Bodenmechanik wird ein Boden nach DIN 4022 als Ton bezeichnet, wenn die Plastizitätszahl $I_p > 7$ bzw. $I_p \geq 0,73 \cdot (w_l - 20) [\%]$ ist, und nach DIN 18 196, wenn die Einzelteilchen mit einem äquivalenten Korndurchmesser von $d < 0,06$ mm mindestens 40% der Gesamtmasse ausmachen, die Plastizitätszahl $I_p > 7$ und der Boden im Plastizitätsdiagramm über der A-Linie liegt. Der umgangssprachlich in der Bodenmechanik als Ton bezeichnete Korngrößenbereich $d < 0,002$ mm ($= 2 \mu\text{m}$) wird nach DIN 4022 als Tonkorn (Feinstes) bezeichnet. Im Rahmen dieser Arbeit wird, soweit nicht örtliche Namen verwendet werden, die Bezeichnungsweise der DIN 18 196 übernommen.

Die gegenüber anderen Mineralarten und Korngrößen charakteristischen Eigenschaften von Tonen sind insbesondere die großen spezifischen Oberflächen und die elektrischen Ladungsgegebenheiten mit den daraus resultierenden Quelleigenschaften und typischen Plastizitäten. Diese besonderen Eigenschaften erhalten die Tone aufgrund der Strukturen der Tonminerale, die im folgenden als Grundlage zum Verständnis der Auswirkungen kurz dargestellt werden.

2.2.2 Tonmineralart und -struktur

Die Bausteine aller Tonminerale bestehen aus zwei Grundtypen, die über gemeinsame O- und OH-Ionen miteinander verbunden sind. Der im Aufbau einfachere erste Baustein hat die Form eines Tetraeders mit vier O-Ionen an den Eckpunkten und ein kleineres Zentralkation (Si oder Al) in der Mitte (KÉZDI 1969). Der zweite Baustein hat die Form eines Oktaeders. Hier umschließen sechs O- oder OH-Ionen das eingelagerte Zentralkat-

ion, das in der Mehrzahl aller Fälle aus Al-Kationen besteht, aber auch durch Mg- oder Fe-Kationen ersetzt werden kann (MILLOT 1970).

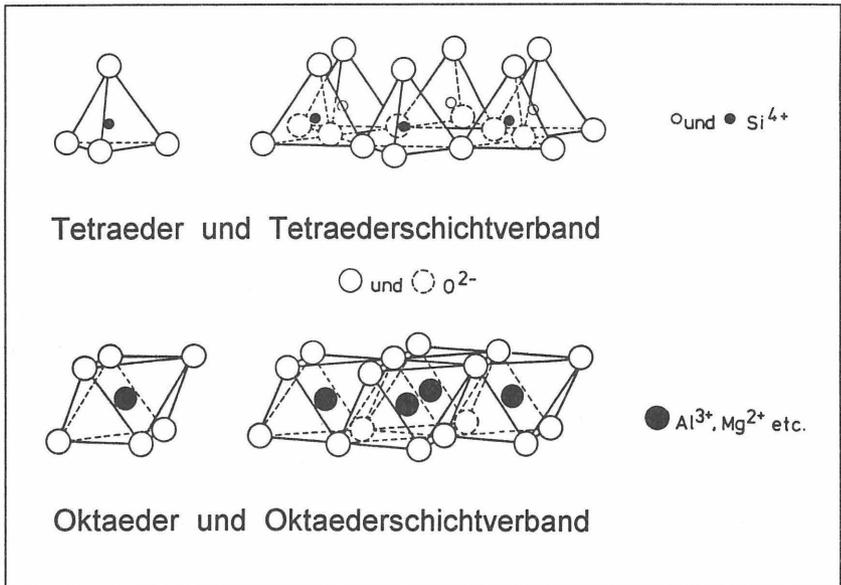


Bild 5: Strukturmodelle eines Tetraeder- und Oktaedermineralbausteins und die einfachsten Schichtverbände (nach FEESER 1981)

Die einzelnen Tetraeder- und Oktaederbausteine verbinden sich über gemeinsame O-Ionen oder OH-Moleküle zu größeren schichtartigen Verbänden (s. a. Bild 5). Diese schichtartigen Verbände lagern sich in bestimmten Abfolgen flächenhaft zu den sogenannten Elementarschichten eines Tonminerals zusammen (JASMUND 1951). Mehrere dieser Elementarschichten kombinierter Tetraeder- und Oktaederschichten übereinandergestapelt bilden letztendlich die eigentlichen Tonminerale. Die flächenhafte Form der Anordnung der Einzelbausteine ist der Grund für die plättchenförmige Gestalt der Tonminerale.

Die Abstände der gleichen Schichtebenen zweier Elementarschichten (s. a. Bild 6) bezeichnet man als Basis- oder Schichtabstand (FEESER 1981, HASENPATT 1988). Er kann röntgenographisch ermittelt werden und dient zur Identifikation der Tonminerale (MADSEN/MÜLLER-VONMOOS 1988, NADEAU 1985, NADEAU 1987).

Eine signifikante Erscheinung der Tonminerale ist der negative Ladungsüberschuß der Elementarschichten durch den möglichen isomorphen Ersatz von Al^{3+} -Ionen durch Ionen niedrigerer Wertigkeit (Fe^{2+} , Mg^{2+} , Li^{2+}) in der Oktaederschicht und der Si^{4+} -Ionen durch Al^{3+} -Ionen in der Tetraederschicht. Zum Ausgleich dieser negativen Ladungen versuchen die Elementarschichten, positiv geladene Kationen an sich zu ziehen und zwischen sich einzulagern (sogenannte Zwischenschichtkationen, s.a. Bild 6, Seite 21). Diese Ionen sind in Abhängigkeit von den Ionenwertigkeiten austauschbar, da sie keine festen Gitterplätze einnehmen (LAGALY 1988, MITCHELL 1976, NÜESCH 1993a und 1993b, SONDEREGGER 1985) und bilden die Grundlage für die hier nicht weiter betrachtete Kationenaustauschkapazität (CZURDA 1994).

Je nach dem Ort des partiellen isomorphen Ersatzes der Si-Ionen (Tetraeder- oder Oktaederschicht) ergeben sich unterschiedliche Randbedingungen für den Zusammenhalt der einzelnen Elementarschichten, der durch Wasserstoffbrücken- oder Ionenbindungen gebildet werden kann. Hierbei sind die Wasserstoffbrückenbindungen von wesentlich höherer Bindungskraft als die meisten der anderen Ionenbindungen.

In Abhängigkeit von der Anzahl und Kombination der einzelnen schichtartigen Verbände zu Elementarschichten unterscheidet man Zwei- bis Vierschichtenminerale.

Zweischichtenminerale, z. B. der Kaolinit, bestehen aus gestapelten Elementarschichten je einer Tetraeder- und Oktaederschicht, bei denen nur die äußeren Bereiche der Tetraederschichten negativ geladen sind (Bild 6). Die einzelnen Elementarschichten werden durch gemeinsam beanspruchte H-Kationen aus den OH-Ionen der einen Schicht mit den gegenüber befindlichen O-Ionen fest verknüpft (Wasserstoffbrückenbindung, MITCHELL 1976)

Das Kaolinitmineral besteht wegen der innerhalb der Elementarschichten erfolgten weitgehenden elektrischen Neutralisation und starken Wasserstoffbindung aus schwer trennbaren Elementarschichten und ist aus diesem Grund relativ stabil. Die Neigung zur Schwellung oder Schrumpfung ist gering, da keine Wassermoleküle zwischen die Elementarschichten eindringen können (LAGALY 1988). Die resultierende Gesamtoberflächenladung ist niedrig, was zu dünnen und nur schwach gebundenen Hydrathüllen führt (s. a. Seite 24).

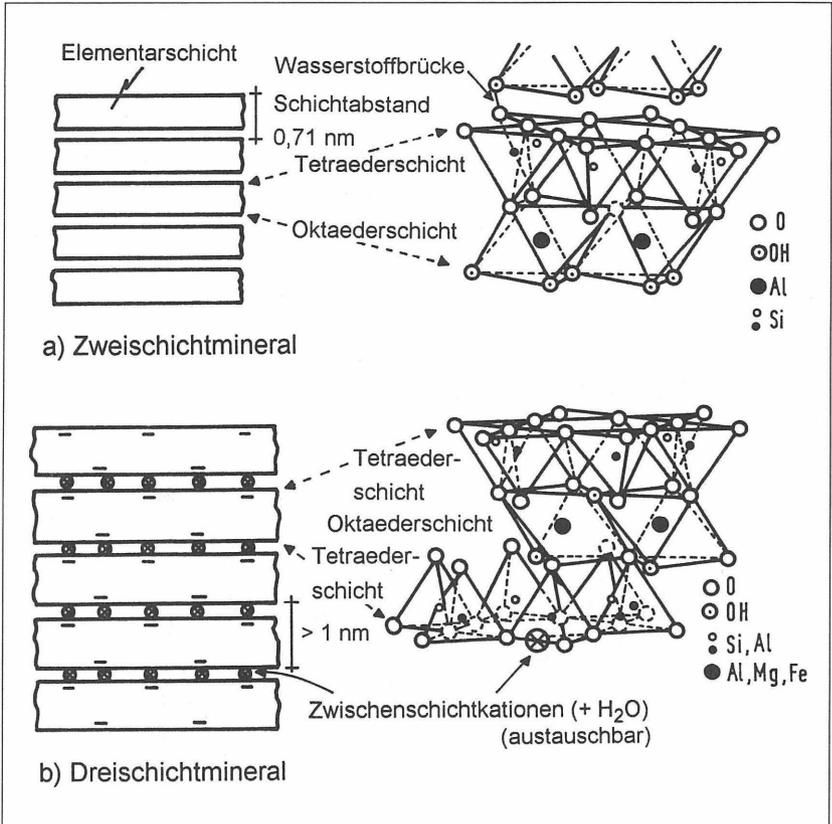


Bild 6: Schichtstrukturen von Zwei- und Dreischichttonmineralen
(nach LAGALY 1988 und SONDEREGGER 1985)

Die Elementarschicht eines **Dreischichtenminerals** besteht aus einer von zwei Tetraederschichten eingeschlossenen Oktaederschicht (Bild 6). Bei den Dreischichtmineralien mit Montmorillonitstruktur (HASENPATT 1988) liegen sich an den Flächen der Elementarschichten beiderseitig gleichgeladene O^{2-} -Ionen gegenüber, die sich grundsätzlich abstoßen. Der Ladungsschwerpunkt liegt zudem in der mittleren Oktaederschicht. Die Bindung der einzelnen Schichten erfolgt nur über die elektrostatischen Anziehungskräfte der eingelagerten Kationen (z. B. K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}). Diese Ionenbindung ist jedoch relativ schwach, so daß Wassermoleküle als starke Dipole leicht zwischen die Elementarschichten eindringen und das Kristallgitter harmonikaartig aufweiten können (KÉZDI 1969, HASENPATT 1988).

Je nach Ladungsstärke und Größe des eingelagerten Kations kann diese Aufweitung durch Wassereingelagerung und dem damit vergrößerten Schichtabstand bis zur vollständigen Aufhebung der Bindungen und damit zum Zerfall der Minerale führen (z. B. Na-Montmorillonit). Das Prinzip dieser Vorgänge, auch innerkristalline Quellung genannt, ist in Bild 7 dargestellt. Die Folge ist eine starke Quell- und Schrumpfungseigung und eine geringe Scherfestigkeit (GARTUNG 1993, MADSEN/MÜLLER-VONMOOS 1988, MÜLLER-VONMOOS/LØKEN 1988, NÜESCH 1993, SONDEREGGER 1985).

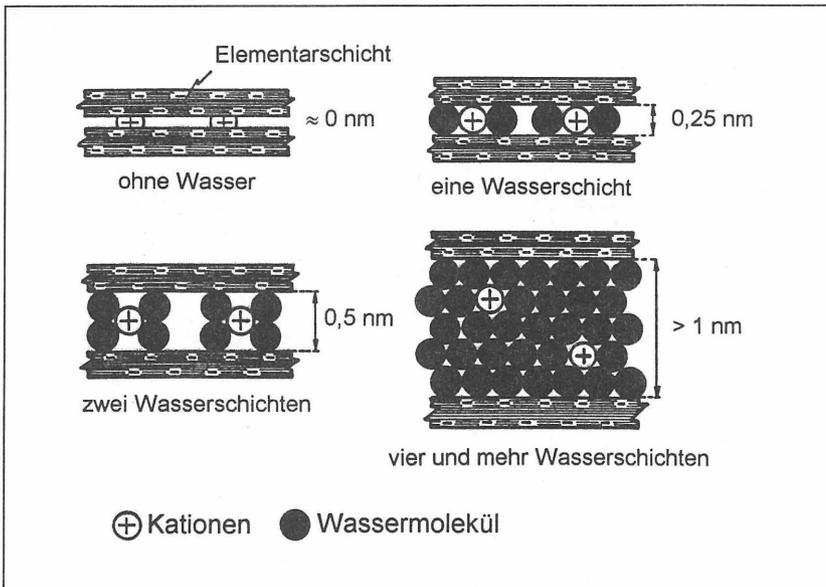


Bild 7: Innerkristalline Quellung mit einwertigen Zwischenschichtkationen bei einer Montmorillonitstruktur (nach HASENPATT 1988)

Der Illit, ebenfalls ein Dreischichtenmineral, ist durch den isomorphen Ersatz in der äußeren Tetraederschicht stark negativ geladen und verfügt mit eingelagerten Kaliumkationen zwischen den Silikatschichten über eine relativ feste Ionenbindung. Illitstrukturen lassen daher keine Wassermoleküle eindringen, so daß es weitgehend nicht zu innerkristallinen Quellungen kommt; sie sind nur teilweise am Rand aufweibar (HASENPATT 1988, LAGALY 1988, SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 1989). Die Neigung zum Quellen und Schrumpfen ist daher gering (VEES 1970). Bei der Bestimmung der Anteile der einzelnen Tonminerale an einer Gesamtprobe werden die randoffenen Illite oft als "quellfähiger Illit" oder "offener Illit" der Klasse der quellfähigen Tonminerale / Montmorillonit / mixed layer zugeschlagen (ZACHMANN 1993).

Das seltener vorkommende Vierschichtenmineral Chlorit mit der Anordnung Tetraeder-/Oktaeder-/Tetraeder-/Oktaederschicht weist wie ein Zweischichtmineral äußerst feste Wasserstoffbrückenbindungen auf und ist durch Wassermoleküle nicht aufweitbar (FEESER 1981). Das Tonmineral Attapulgit, das eine etwas andere Zusammensetzung der Moleküle aufweist und innerkristallin nicht quellfähig ist (VEES 1970), wird hier wegen seiner Seltenheit nicht betrachtet.

Die Struktur an den Kanten und an der Oberfläche der Tonminerale beeinflusst die Plastizität und die Verformungseigenschaften bzw. bildet deren Grundlage (LAGALY 1988). Entsprechend der die einzelnen Teilchen umgebenden Lösung können die Kanten infolge nicht abgesättigter Wertigkeiten im alkalischen Bereich negativ und im sauren Bereich positiv geladen sein (Bild 8).

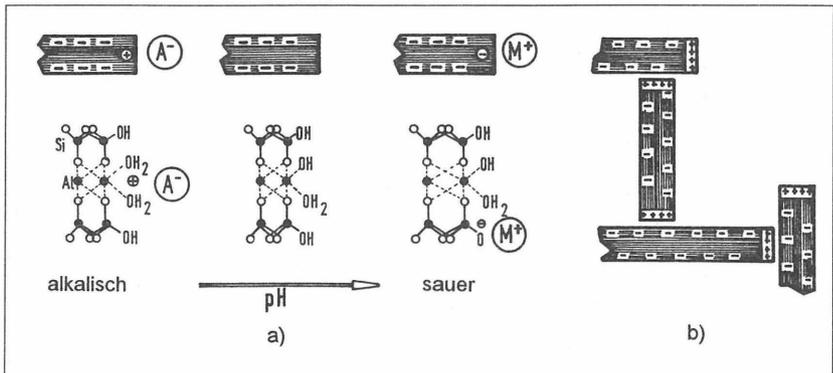


Bild 8: a) Veränderung der Kantenladung der Elementarschichten mit dem pH-Wert
b) Mögliche Wechselwirkungen Kante-Fläche (LAGALY 1988, OSIPOV 1975, WEISS 1988)

Die Lage des Ladungsnullpunktes ist nach LAGALY 1988 nicht bekannt, dürfte jedoch für Smectite bei pH 6 und für Kaolinite bei pH 7 liegen. Bei positiven Kantenladungen kann es zu stabilen Kanten-Flächen-Wechselwirkungen kommen (Face-to-Edge), die auf das Gefüge und damit die bodenmechanischen Eigenschaften Einfluß haben (OSIPOV 1975 nach SONDEREGGER 1988). Auch ein solches stabiles Kartenhausgefüge kann jedoch bei einer Veränderung der Porenraumlösung und einem Wechsel der Ladungsgegebenheiten oder bei erhöhten Drücken unter Umständen bis zum Zusammenbruch der Struktur verändert werden. Diese Vorgänge können bei Deponieabdichtungen im Fall einer Beaufschlagung mit Sickerwasser in Verbindung mit Auflasten relevant werden (KUMOR 1993, MADSEN 1993a und 1993b).

2.2.3 Das Porenflüssigkeits-Feststoff-System

Den Verhältnissen und Vorgängen im Porenflüssigkeits-Feststoff-System eines Bodens kommt eine wesentliche Bedeutung zu, da der Wassergehalt bei bindigen Böden die entscheidende Rolle bei der Prägung der mechanischen und hydraulischen Eigenschaften spielt.

Allgemein entstehen zwischen einzelnen Molekülen u. a. in Abhängigkeit von der elektrischen Ladung und dem Abstand Anziehungs- und Abstoßungskräfte (Bild 9), die zwischen Feststoffmolekülen und Flüssigkeitsmolekülen zu Adhäsionskräften und zwischen einzelnen Flüssigkeitsmolekülen zu Kohäsionskräften führen.

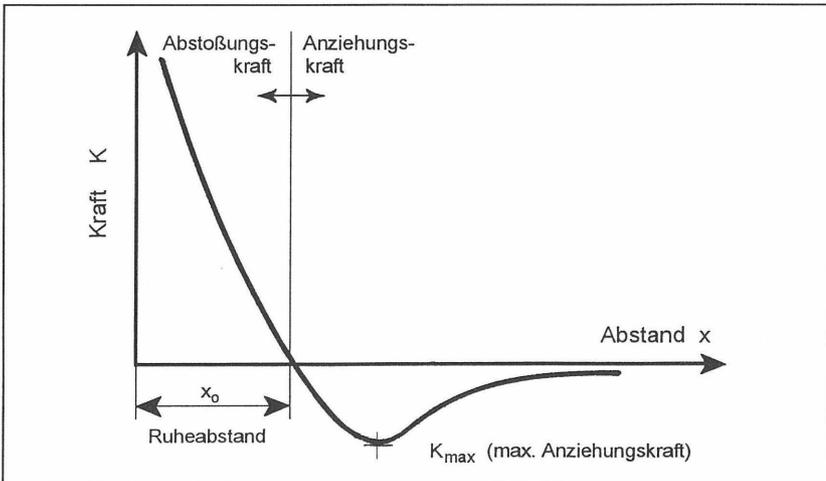


Bild 9: Qualitativer Zusammenhang zwischen Abstoßungs- und Anziehungskräften zwischen zwei Molekülen in Abhängigkeit von ihrem gegenseitigen Abstand (nach NEISS 1982)

Sind die Adhäsionskräfte zum Feststoffrand größer als die Kohäsionskräfte innerhalb der Flüssigkeit, so kann bei einer Belastung der Flüssigkeitsmoleküle durch Zug (z. B. das Absinken eines Grundwasserspiegels) die Verbindung zwischen den einzelnen "freien" Flüssigkeitsmolekülen und den adsorbierten Flüssigkeitsmolekülen verloren gehen. Der Feststoff ist danach trotzdem mit einem Flüssigkeitsfilm benetzt. Die Oberflächenspannung ist dabei ein Maß für die zwischen einzelnen Molekülen aufnehmbaren Zugspannungen. Nach Berechnungen von NEISS 1982 können diese bei 20°C Größenordnungen von 2340 bar erreichen.

Aus dem beschriebenen strukturellen Aufbau der Tonminerale ergibt sich grundsätzlich eine negative Oberflächenladung; die Tonminerale erzeugen somit ein elektrisches Feld. Im Bestreben, diese negativen Ladungen auszugleichen, lagern Tonminerale freie, positiv geladene Teilchen an. In einer wässrigen Lösung sind dies z. B. die positiven Enden der Wasserdipolmoleküle oder freie Kationen. Durch den dipolaren Aufbau der Wassermoleküle entstehen so durch Aneinanderreihung endliche Molekülketten, die sich dem elektrischen Kraftfeld entsprechend ausrichten. In Abhängigkeit von der von der Mineralart bestimmten Feldstärke nimmt die Polarisationskraft jedoch mit dem Abstand von der Teilchenoberfläche exponentiell ab (ANDERSON 1967, VEES 1970, KÉZDI 1969, VAN OLPHEN 1977, LAGALY 1988, VÄHÄÄHO et al. 1989).

Ein von GOUY 1910 und STERN 1924 (zitiert nach REUTER 1988) entwickeltes Porenraummodell teilt die die Feststoffteilchen umgebende Porenraumlösung in drei grundlegende Bereiche ein (Bild 10)⁴:

1. Die an die Oberfläche grenzende STERN-Schicht, in der die adsorbierten Kationen und Dipole aufgrund der großen Feldstärke und Wertigkeiten der Ionen nahezu unverrückbar gebunden sind (Adsorptionsschicht, KÉZDI 1969).
2. Die an die STERN-Schicht angrenzende GOUY-Schicht, in der die Kationen und Dipole zwar noch der elektrischen Anziehung der Feststoffoberfläche und der dort bereits angelagerten Moleküle unterliegen und danach ausgerichtet werden, jedoch beweglich sind. Es herrscht Gleichgewicht zwischen dem anziehenden elektrischen Potential und der entgegengerichteten Diffusionskraft der Lösung (gebundene Schicht).
3. Den Bereich des freien Porenwassers, das normalen bodenhydraulischen Gesetzen folgt (Außenlösung, Absorptionsschicht).

Die Adsorptionsschicht und die gebundene Schicht bilden in Verbindung mit der Partikeloberfläche die sogenannte diffuse Doppelschicht (FEESER 1981, SONDEREGGER 1985, LAGALY 1988), die allgemein als Hydrathülle bezeichnet wird. Die Dicke dieser

⁴ In der Regel wird im allgemeinen Sprachgebrauch gemäß der Definition des Technical Committee on Frost - TC8 nur zwischen zwei verschiedenen Arten von Wasser in einem Boden unterschieden (ISSMFE TC8 1989):

adsorbiertes Wasser, das über physikalisch-chemische Kräfte gebunden wird und bei gleicher Temperatur und gleichem Druck gegenüber freiem, normalem Wasser über veränderte physikalische Eigenschaften verfügt (entspricht der Hydrathülle), und

absorbiertem Wasser, das mechanisch im Boden gehalten wird und bei gleicher Temperatur und gleichem Druck gegenüber freiem, normalem Wasser über keine veränderten physikalischen Eigenschaften verfügt (entspricht der Außenlösung).

Schicht und damit auch die Abstoßung zweier benachbarter Teilchen nimmt nach VEES 1970 ab

- mit kleiner werdender Oberflächenladungsdichte,
- mit zunehmender Größe und Wertigkeit der adsorbierten Moleküle,
- mit zunehmender Elektrolytkonzentration der Porenraumlösung und
- mit abnehmender Temperatur.

Bei höheren Elektrolytkonzentrationen müssen die Teilchen aus Gleichgewichtsgründen und geometrischen Zwängen eine größere Ordnung einnehmen, damit die gegenseitigen elektrischen Abstoßungseffekte bei kleinerem Platzangebot möglichst gering werden (LAGALY 1988, MADSEN/MÜLLER-VONMOOS 1988, WEISS 1988). Je höher die Elektrolytkonzentration ist, um so dünnere wird daher die diffuse Doppelschicht (FEESER 1981). Dies führt zu Auswirkungen auf die Packungsdichte der Tonminerale, die Durchlässigkeit und die Gefriereigenschaften der Porenraumlösung. Die Aufteilung der einzelnen Wasserbindungsarten ist für einige Böden in Tabelle 4 dargestellt.

Material	freies Wasser [%]	gebundenes Wasser [%]	adsorbiertes Wasser [%]
Quarzsand	100	-	-
Plainfield Feinsand	89	11	-
Miami schluffiger Lehm	81	18	1
Vernon toniger Lehm	74	20	6
Marshall schluffiger Lehm	45	34	21
Black toniger Lehm	34	36	30
Houston Ton	15	40	45

Tabelle 4: Aufteilung der verschiedenen Wasserbindungsarten in ausgewählten Böden (nach JOHNSON 1952 aus SCHWARZ 1989)

Die unterschiedlichen Wasserbindungsstärken der Porenflüssigkeit an die Feststoffteilchen und die Einlagerung von Wassermolekülen zwischen die Elementarschichten spielen auch bei der Bestimmung des Wassergehaltes eine wesentliche Rolle. Als Wassergehalt bezeichnet man nach DIN 18 121, Teil 1 die während der Trocknung bei 105 C bis zur Gewichtskonstanz verdunstete Wassermenge in bezug auf die verbleibende Trockenmasse. Bei dieser Temperatur wird jedoch nur ein Teil der diffusen Doppelschicht verdunstet, da gewisse Wassermengen eine zu starke Bindung zum Feststoffteilchen aufweisen.

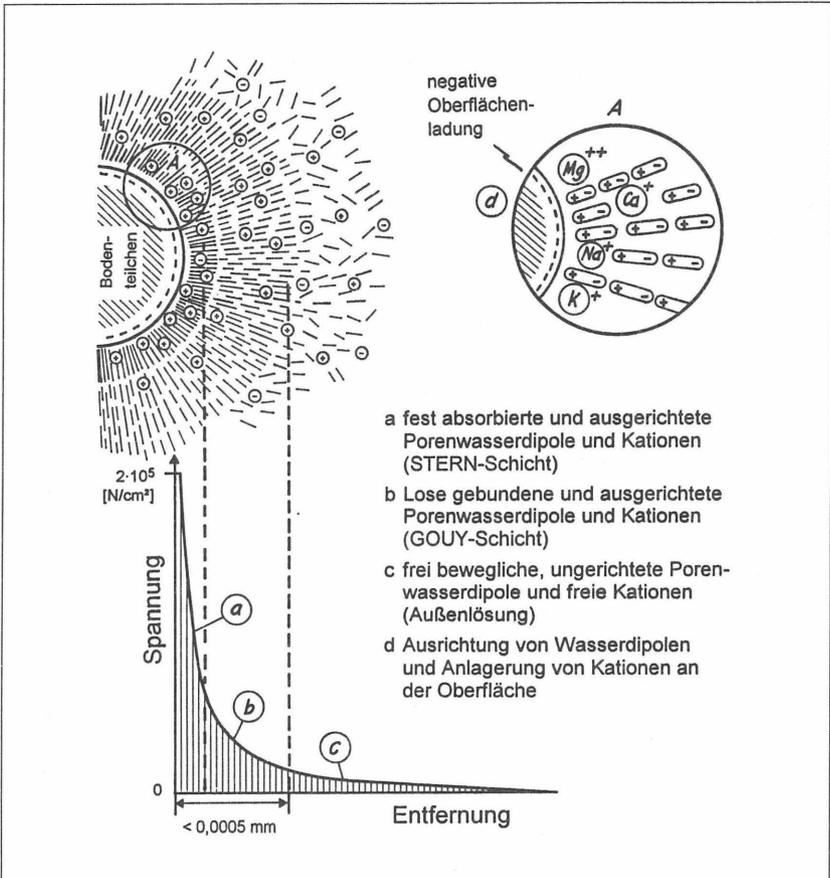


Bild 10: Einteilung der Porenraumlösungen bei Bodenteilchen mit negativen Oberflächenladungen (nach BUSCH/LUCKNER 1974 und KÉZDI 1969)

Durch die Verwendung einer höheren Temperatur oder der nach DIN 18 121, Teil 2 zugelassenen Schnellverfahren, wie z.B. einer Mikrowelle, ergeben sich zum Teil wesentlich höhere Temperaturen (nach DIN 18 121, Teil 2 bei der Mikrowelle bis zu ca. 300°C), so daß weitere Teile der Hydrathülle verdunstet werden. Nach den Vorgaben der DIN 18 121, Teil 2 muß aus diesem Grund bei den Schnellverfahren in Abhängigkeit von der Bodenart mit einem bis zu 2% erhöhten Wassergehalt gerechnet werden. Vergleichsuntersuchungen zur Standardofermittlung sind daher empfehlenswert (KNÜPFER 1990).

2.2.4. Wasserdurchlässigkeit

Für die Wasserdurchlässigkeit, im folgenden verkürzt nur mit Durchlässigkeit bezeichnet, wird allgemein im Bereich der Bodenmechanik und damit auch in der Deponietechnik i. d. R. die Gültigkeit des Darcyschen Gesetzes vorausgesetzt. Dieses beschreibt (in vereinfachter Form ohne den temperaturabhängigen Viskositätsanteil) die Strömung einer Flüssigkeit in einem Porenraum in Form einer linearen Abhängigkeit der Durchflußgeschwindigkeit von dem hydraulischen Gefälle:

$$v = k \cdot i \quad (5)$$

- v = Filtergeschwindigkeit [m/s]
- k = Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
(umgangssprachlich als k-Wert bezeichnet)
- i = hydraulisches Gefälle h_w / h [-] mit
 - h_w = hydraulische Druckhöhe [m]
 - h = Probenhöhe / Sickerstrecke [m]

Die Materialeigenschaften und damit vor allem die Größe der durchflußwirksamen Querschnitte gehen in diesem Zusammenhang bei der Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes k ein. Dieser wird bei definierten Randbedingungen experimentell über die Messung der Menge des Durchflusses Q [m³] in der Zeit t [s] durch die Querschnittsfläche A [m²] mit der Gleichung (6) bestimmt und stellt einen Mittelwert der über die durchströmte Fläche verteilten Durchlässigkeiten dar.

$$k = Q \cdot h / (A \cdot t \cdot h_w) \quad [\text{m/s}] \quad (6)$$

Nach DIN 18 130 wird der ermittelte Wert in der Bodenmechanik wegen der Temperaturabhängigkeit der kinematischen Zähigkeit des Normmediums Wasser umgerechnet und für eine Vergleichstemperatur von 10°C als k_{10} angegeben.

Die Durchlässigkeit eines Bodens wird von der Kornzusammensetzung sowie der Struktur (Verteilung und Orientierung der Einzelkörner) bestimmt. Die hier zu betrachtenden Böden sind alle nicht natürlich abgelagert (z. B. durch Sedimentation und Konsolidation), sondern aus kleineren Aggregateinheiten künstlich verdichtet. Bei diesen künstlich verdichteten Böden wird die Struktur und damit die Durchlässigkeit vor allem feinkörniger Böden maßgeblich von den bei der Verdichtung vorliegenden Material- und Einbaurandbedingungen bestimmt.

So ist es nicht unerheblich, ob ein feinkörniger Boden mit einem Wassergehalt über oder unter dem sogenannten Proctorwassergehalt verdichtet wird (z. B. MITCHELL 1960, SMOLTCZYK 1962). Hinsichtlich der Durchlässigkeit ist eine auf der trockenen Seite der Proctorkurve hergestellte Probe durchlässiger als eine Probe auf der nassen Seite. Dies wird vornehmlich mit der besseren Einregelung der einzelnen (Feinst-)Teilchen durch das Schmiermittel Wasser auf der nassen Seite begründet (KÉZDI 1969, OGATA et al. 1985, PUSCH 1977 zitiert nach SCHABABERLE 1989) und steht im Einklang mit den theoretischen Abhandlungen aus Kapitel "Tonmineralart und -struktur". Das Prinzip dieser Modellvorstellung ist in Bild 11 dargestellt.

Die oben beschriebenen Eigenschaften der Tonmineraleilchen und ihre Anordnung sowie die unterschiedlichen Eigenschaften der Porenlösung hinsichtlich der Mobilität beeinflussen die Durchströmung von Tonen erheblich. Haben natürlich verfestigte Tone und Tonsteine infolge der Partikelstrukturen und -anordnungen Gesamtporenvolumen bis zu 65% (BUSCH/LUCKNER 1974, CZURDA 1994), so liegen nur 3% - 5% in einer Größenordnung, die eine Durchströmung zulassen. Alle anderen Porenräume sind aufgrund der Geometrie grundsätzlich für eine Durchströmung nicht groß genug oder werden durch relativ fest angelagerte Hydrat- bzw. Ionenhüllen so weit verengt, daß anschließend keine Durchströmungen mehr, sondern nur noch Diffusionsbewegungen möglich sind (NIEMINEN 1989).

Nach theoretischen Berechnungen von BASAK/MADHAV 1976 (zitiert nach REUTER 1988) können die molekularen Bindungen die Durchströmung feinkörniger Böden durch die Verengung des durchflußwirksamen Porenquerschnittes im Vergleich zum laminaren Durchfluß eines haftspannungsfreien Mediums um mindestens zwei Zehnerpotenzen verringern. Der durchströmte Querschnitt der Porenkanäle und damit die Größe des Durchlässigkeitsbeiwertes ist deshalb bei Tonen von der chemischen Zusammensetzung des durchströmenden Mediums abhängig und beispielsweise für Luft und Mineralöle größer als für Wasser. Die elektrostatischen Anziehungskräfte werden ab einem Partikelabstand bzw. bei Porenraumgrößen $< 3 - 8 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ (3 - 8 μm) wirksam, schwanken jedoch erheblich in Abhängigkeit von der Oberflächenladung (BUSCH/LUCKNER 1974). Genauere quantitative Untersuchungen zwischen den Porenraumgrößen und den Fließeffekten in Abhängigkeit von den beschriebenen Größen konnten in der eingesehenen Literatur nicht gefunden werden.

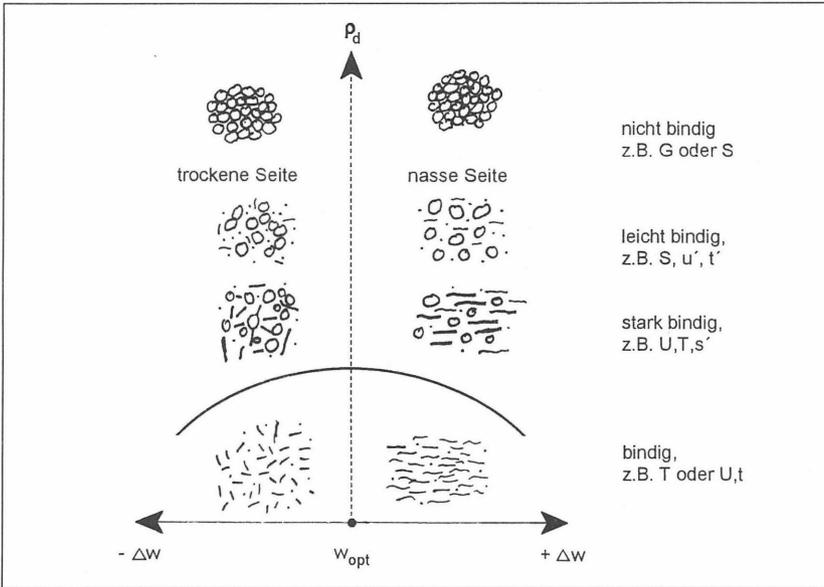


Bild 11: Modellvorstellung über die Bodenstruktur bei verschiedenen Körnungen nach der Verdichtung in Abhängigkeit vom Wassergehalt (ergänzt nach KÉZDI 1970)

Die beschriebene verringerte Mobilität des Porenwassers führt nach Ansicht vieler Autoren dazu, daß das Porenwasser in feinkörnigen Böden in einem prälinearen Bereich erst ab einem bestimmten hydraulischen Gefälle in Bewegung gebracht werden kann, also ein sogenannter Stagnationsgradient i_0 existiert (SWARTZENDRUBER 1968, BASAK 1978, GABENER 1985, FRANKE/MADER 1986). Die Größe dieses Stagnationsgradienten wird von GABENER 1984 aus eigenen Experimenten mit einer Größe bis $i_0 \approx 3,7$ für Tone angegeben und ebenfalls von GABENER 1982 in einer vergleichenden Studie über veröffentlichte experimentelle Werte mit Größen bis zu $i_0 = 30$ bei zunehmenden Werten in Richtung feinkörniger werdender Böden. FRANKE/MADER 1986 geben (umstrittene) Werte bis zu $i_0 = 100$ an. Obwohl die Werte von den jeweiligen Bodenarten und den Randbedingungen der Versuchsdurchführung abhängen, sind Größenordnungen von $i_0 = 20$ bis $i_0 = 30$ auch für Tone im Normalfall als relativ unwahrscheinlich anzusehen. Bei den Durchlässigkeitsprüfungen im Deponiebau werden aufgrund der Vorschriften (s. a. Tabelle 12, Seite 93) die Standardversuche mit einem Gradienten von $i = 30$ durchgeführt und ergeben i. d. R. deutlich meßbare Durchflußmengen.

Die Grundlagen, die eindeutige Existenz und die Größe von i_0 sind allerdings noch nicht umfassend bewiesen und werden teilweise mit der Vermutung in Frage gestellt, daß es

sich bei diesen äußerst geringen Durchlässigkeiten auch um Unzulänglichkeiten in der Meßtechnik handeln könnte (MITCHELL/YOUNGER 1967, GABENER 1983 nach HARDER/BLÜMEL 1987).

Sowohl eine quantitative Abhängigkeit der Fließvorgänge von den Porenraumgrößen, den Eigenschaften der Partikeloberflächen und der Porenflüssigkeit selbst als auch der sichere Nachweis des evtl. hiervon abhängigen Stagnationsgradienten i_0 wären im Zusammenhang mit der Frosteinwirkung interessant, da neben der Entstehung von Rissen und Fissuren eine Veränderung der restlichen Porenräume vermutet wird. Diese könnte nach dem Auftauen bei vorher nicht durchlässigen Porenräumen eine initialisierende Wirkung für Fließeffekte haben.

Zusätzlich zu der von der Mehrheit der Autoren angenommenen Verringerung der Durchströmung hat die Hydrathülle bei der Gefrierung von Tonen eine wichtige Bedeutung, da die in ihr gebundenen Wassermoleküle gegenüber freien (Wasser-)Dipolmolekülen veränderte Eigenschaften aufweisen, so z. B. Teile auch weit unter dem Gefrierpunkt 0°C ungefroren bleiben (s. a. Kapitel "Oberflächenbeschaffenheit", Seite 43).

Da sie an den allgemeinen Fließvorgängen normalerweise nicht teilnehmen, bilden die Hydrathüllen außerdem eine Grenzschicht zwischen den Tonpartikeln und dem strömenden Medium. Bei großen Fließgeschwindigkeiten wird hierdurch zunächst eine Adsorption von Molekülen aus der strömenden Flüssigkeit am Tonpartikel verhindert (CZURDA 1994), was für die Beurteilung des Sorptionspotentials für Schadstoffe von Bedeutung ist. Eventuelle irreversible Veränderungen im "Wasserhaushalt" eines Tonminerals durch eine Frosteinwirkung könnten daher auch auf diese geforderte Eigenschaft der mineralischen Abdichtung von Einfluß sein.

2.2.5 Wasser und Eis

Der geometrische Aufbau eines Wassermoleküls mit einem Sauerstoff- und zwei Wasserstoffatomen weist aus, daß die Zentren der positiven und negativen elektrischen Ladungen in ihrer Lage nicht übereinstimmen und aus diesem Grund ein Dipol entsteht (KAUFMANN 1971). Die sich bildenden Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den einzelnen Wassermolekülen sind sehr ausgeprägt, was sich in einem relativ hohen Siedepunkt von 100°C (Normalbedingungen) äußert. Auch die hohen Werte der spezifischen Wärme, der Wärmeleitfähigkeit, der Viskosität und die Art und Größe ihrer Veränderung werden mit der Existenz der Wasserstoffbrücken erklärt (JESSBERGER 1971, s. a. Tabelle 5, Seite 34).

Im flüssigen Zustand geht ein Wassermolekül mit fünf und mehr anderen Wassermolekülen Bindungen ein, was aufgrund der begrenzten Bindungskraftsumme mit steigender Anzahl eine Abschwächung der Zusammenhaltkräfte zur Folge hat. Im Eis sind die Moleküle meist tetraedisch angeordnet, so daß sich jedes Wassermolekül nur mit vier anderen umgibt und in der Ansicht eine hexagonale Anordnung bildet (OTHMAN et al. 1993). Die einzelnen Wasserstoffbrückenbindungen können daher stärker ausgebildet werden, worauf die Festigkeit des Eises beruht (WINTERKORN 1959, FLETCHER 1970)⁵. Die unterschiedliche Anordnung und Bindungsanzahl der Moleküle hat auch einen maßgeblichen Einfluß auf die Dichte des Mediums, was das Phänomen erklärt, daß sich Wasser beim Gefrieren ausdehnt.

Die Veränderung des Volumens beträgt zwischen der größten Dichte reinen Wassers im flüssigen Zustand bei +4 C mit $\rho = 1,000 \text{ g/cm}^3$ zu der Dichte von "Normaleis" bei 0 C mit $\rho = 0,917 \text{ g/cm}^3$ etwa $1/11 \approx 9\%$ (JUMIKIS 1966). Während des Auftauens ab 0 C zerfällt die geordnete tetraedische Struktur wieder, und es findet eine Art Zusammenballung der Moleküle statt. Dies führt solange zu einer größeren Dichte des Wassers, bis die verstärkte Wärmebewegung etwa ab 4 C wieder eine Zunahme des zwischenmolekularen Abstandes und damit eine Abnahme der Dichte bewirkt (JUMIKIS 1966).

Wasser kann in Abhängigkeit von bestimmten Randbedingungen (u. a. Temperaturgradient, Reinheit des Wassers, Bewegungs- und Spannungszustand, Volumen) auch unter 0 C bis etwa -22 C im flüssigen Zustand in unterkühlter Form (supercooling) vorliegen. Die Phasenumwandlung von unterkühltem Wasser in Eis erfolgt bei einer Veränderung einer der Gleichgewichtsrandbedingungen fast schlagartig mit einer von der Temperatur abhängigen Geschwindigkeit zwischen nahezu 0 cm/s bei 0 C bis ca. 10 cm/s bei -18 C (PRUPPACHER 1967). Die Geschwindigkeit der Abkühlung bzw. Eisbildung hat dabei einen entscheidenden Einfluß auf die Größe der einzelnen Eiskristalle: bei langsamer Abkühlung entstehen wenige große Kristalle, bei schneller Abkühlung bildet sich eine große Anzahl kleiner Kristalle (DROST-HANSEN 1967, KLENGEL 1968, FLETCHER 1970).

⁵ In Abhängigkeit insbesondere vom Druck sind verschiedene Arten von Eis möglich, die sich im Aufbau des Kristallgitters unterscheiden und unterschiedliche Eigenschaften z. B. hinsichtlich der Stabilität aufweisen (FLETCHER 1970, JESSBERGER 1971, JESSBERGER 1980, KLENGEL 1968). Aufgrund der zu berücksichtigenden Randbedingungen der vorliegenden Anwendungsfälle (geringe Auflasten, schmaler Temperaturbereich, kurze Einwirkzeiten) soll hier jedoch ebensowenig darauf eingegangen werden wie auf die mechanischen Eigenschaften von Eis (insbesondere die zeit- und temperaturabhängigen plastischen Verformungen).

2.3 Thermodynamische Grundlagen und Vorgänge

Für die Beschreibung und rechnerische Behandlung der Vorgänge während eines Gefriervorganges sind einige Grundlagen erforderlich, von denen die wichtigsten hier kurz dargestellt werden.

2.3.1 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit λ gibt die Wärmeenergie an, die durch einen Querschnitt von 1 cm^2 unter einem Gradienten von 1°K/cm in einer Sekunde fließt, wird in der Einheit $[\text{W/mK}]$ angegeben und ist die maßgebende Materialgröße für stationäre Wärmeleitungsrechnungen. Sie kann für chemisch reine, homogene und porenfreie Grundsubstanzen, insbesondere Metalle, in engen Grenzen ermittelt werden.

In den vorliegenden Anwendungsfällen handelt es sich jedoch bis auf die Kunststoffdichtungsbahn um Gemische unterschiedlicher Materialien, so daß die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit (und später auch der spez. Wärmekapazität) wegen der Vielzahl der auf den Gesamtwert einflußnehmenden Parameter für jeden Mischungszustand vorgenommen werden müßte. Bei porösen Körpern wie den meisten Böden, also keine sehr dichten Gesteine oder Metalle, ist die Wärmeleitfähigkeit im wesentlichen von den folgenden Parametern abhängig (ELSNER et al. 1993, RAZNJEVIC 1976), die allerdings bei bindigen Böden nicht alle in gleicher Weise ausschlaggebend sind:

- Korndichte
- chemische Zusammensetzung und Eigenschaften des Feststoffes
- molekularer Aufbau der Festsubstanz
- Art der Kontakte zwischen den Einzelbestandteilen
- Art, Größe und Anordnung der Porenräume
- Strahlungsverhältnisse der Porenbegrenzungsflächen
- Art und Druck des Gases in den Poren
- Art und Menge der Flüssigkeit in den Poren
- Ausgangstemperatur

Die für die vorliegenden Anwendungsfälle gravierendsten Änderungen bei einem Material sind bei einer Änderung der Temperatur und des Wassergehaltes zu erwarten. Insbesondere die sprunghafte Änderung der Eigenschaften des Wassers am Gefrierpunkt durch die Phasenumwandlung (Tabelle 5) und die damit verbundene Umsetzung der latenten Wärmeenergie verändern die wärmephysikalischen Kennwerte eines Gemisches, in dem sich größere Anteile an Wasser befinden, erheblich.

	Wasser 20 C	Wasser 10 C	Wasser 0,01 C	Eis -0 C	Eis -20 C	Eis -40 C	Eis -60 C	Einheit
λ	0,600	0,582	0,562	2,218	2,428	2,680	2,930	[W / m K]
c	4182	4193	4217	2093	1967	1800	1675	[J / kg K]

Tabelle 5: Wärmeleitfähigkeit λ und Wärmekapazität c von Wasser und Eis in Abhängigkeit von der Temperatur (nach GEIGER 1961 und ELSNER et al. 1993)

Bei einigen Stoffen kann die Wärmeleitfähigkeit über empirische Formeln, wie z. B. bei Schnee in Abhängigkeit von der Dichte, für Wärmehaushaltsberechnungen abgeschätzt werden (GEIGER 1961):

$$\lambda = c^* \cdot \rho^2 \quad (7)$$

mit: ρ [g/cm³]

λ [cal/cm K s] !

$c^* \cong 0,0067$ [-]

Bei Böden nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Festsubstanz und steigendem Wassergehalt zu (KÉZDI 1969), da beide Materialien gegenüber der dritten Phase Porenluft eine wesentlich größere Leitfähigkeit besitzen. Aus den Arbeiten von KERSTEN 1959 geht resultierend hervor, daß die Wärmeleitfähigkeit für grobkörnige Böden größer ist als für feinkörnige und für einen gefrorenen Boden größer als für einen ungefrorenen Boden.

Die Angabe nur eines Zahlenwertes für ein Bodenmaterial ist daher i. d. R. nicht möglich bzw. sinnvoll, wie auch die Variationsbreite der in der Literatur angegebenen Werte zeigt (Tabelle 6). Zusätzlich ist es sehr schwierig, aus den veröffentlichten Werten eine Vergleichbarkeit abzuleiten, da die Bezeichnung der Böden in den meisten Fällen nur mit Versuchsnummern oder landläufigen Bezeichnungen vorgenommen wird und eine eingehendere Beschreibung fehlt. In der folgenden Tabelle 6 sind jedoch einige Angaben aus der Literatur zur Einschätzung der Größenordnung und der Schwankungsbreiten zusammengestellt.

Material	Korndichte ρ_s [g/cm ³]	(Feucht-) Dichte ρ_m [g/cm ³]	spez. Wärmekapazität c [J/kg K]	thermal conductivity Wärmeleitfähigkeit λ [W/m K]	thermal diffusivity Temperaturleitfähigkeit a [$\cdot 10^{-6}$ m ² /s]
trocken		0,3 1)	1920 1)	0,06 1)	0,1 1)
Moor / Torf	1,4 - 2,0 3)	0,3 - 0,6 3)	1842 2)	0,063 2)	0,1 - 0,3 3)
naß		0,8 - 1 3)	3350 2)	0,837 2)	0,09 - 0,15 3)
Sand		1,5 - 1,74 6)		0,3 - 0,35 6)	
trocken		1,6 1)	800 1)	0,3 1)	0,23 1)
	2,6 3)	1,4 - 1,7 3)	837 2)	0,167 2)	
w = 10 Vol-%			837 3)	0,167 - 0,293 3)	0,2 - 0,5 3)
w = 20 Vol-%		1,5 - 1,8 7)		♦ = 0,930 7)	
gesättigt				0,965 7)	
naß				1,326 7)	
		2,0 6)	712 7)	1,884 7)	
		2,0 1)		1,75 6)	
			1480 1)	2,2 1)	0,74 1)
			1255 2)	1,67 2)	
			837 3)	0,837 - 2,511 3)	0,4 - 1 3)
Fels / Granit	2,5 - 2,9 3)	2,5 - 2,9 3)	837 2)	4,6 2)	
	2,8 5)		712 - 837 3)	1,674 - 4,186 3)	0,6 - 2,3 3)
			879 7)	3,5 5)	
trocken			712 - 837 3)	0,084 - 0,628 3)	0,05 - 0,2 3)
Lehmboden					
naß	2,3 - 2,7 3)	1,7 - 2,2 3)	712 - 837 3)	0,837 - 2,093 3)	0,6 - 1,6 3)
Kies		1,5 - 1,8 7)		0,93 7)	
Sand, Kiessand naturfeucht				1,4 5)	
Ton, w=48Vol-%		1,545 7)		1,256 7)	
Bindige Böden naturfeucht		1,5 6)		2,1 5)	
		1,5 7)		1,75 6)	
		2,0 6)		1,512 7)	
		2,0 7)	1,842 7)	2,5 6)	
				2,559 7)	
Wasser (unbewegt)		1,0 1)	4180 1)	0,57 1)	0,136 1)
	1,0 3)		4186 2)	0,4186 2)	
			4186 3)	0,544 - 0,628 3)	0,13 - 0,15 3)
Eis			2135 2)	2,093 2)	
	0,92 3)		2114 3)	2,093 - 2,93 3)	1,1 - 1,5 3)
Neuschnee		0,2 u.	2135 2)	0,0837 2)	
		0,1 - 0,2 3)	1805 7)	0,084 - 0,126 3)	0,2 - 0,4 3)
Altschnee		0,8 u.	2135 2)	0,293 2)	
		0,3 - 0,5 3)		1,256 - 2,093 3)	0,8 - 1,4 3)
Luft (unbewegt)	0,001 - 0,0014 3)	0,0012 1)	1000 1)	0,025 1)	21 1)
			1004 2)+4)	0,021 2)	
			1004 3)	0,021 - 0,025 3)	15 - 25 3)

1) McILVEEN 1986

5) DIN 4108, Teil 4

9) SCHNEIDER 1984

2) WEISCHET 1991

6) CAMMERER 1962

10) BEHR 1984

3) GEIGER 1961

7) RAZNJEVIC 1976

11) FGSV 1988

4) LILJEQUIST/CEHAK 1979

8) SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 1989

(Die Werte wurden z.T. gegenüber den Originalquellen zu Vergleichszwecken einheitlich umgerechnet, so daß kleinere Rundungsdifferenzen auftreten können.)

Tabelle 6: Physikalische Kennwerte einiger Materialien (♦ = als Durchschnittswert angegeben)

2.3.2 Wärmekapazität

Die Wärmekapazität c ist das Produkt aus spezifischer Wärme und Dichte und gibt die Wärmemenge an, die erforderlich ist bzw. abgeführt werden muß, um eine Einheit Boden (1 g) um eine Wärmeeinheit (1 K) zu erwärmen bzw. abzukühlen. Die Einheit ist demzufolge $[\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})]$ bzw. $[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$. Sie wird teilweise auch als volumetrische Wärmekapazität in $[\text{J}/\text{m}^3\cdot\text{K}]$ angegeben und hat als Beschreibung der Speicherefähigkeit einen großen Einfluß bei Wärmehaushaltsberechnungen mit veränderlichen Temperaturverhältnissen. Weil das Wasser von allen Bestandteilen des Bodens die größte Wärmekapazität besitzt (Tabelle 6, mittlere Spalte), ist die Wärmekapazität eines als Dreiphasengemisch zu betrachtenden Bodens sehr stark vom Wassergehalt abhängig.

Aus den beiden Größen Wärmeleitfähigkeit und spez. Wärmekapazität wird für einige Berechnungen die sogenannte Temperaturleitfähigkeit a , auch Temperaturleitkoeffizient genannt, abgeleitet. Dieser ist ebenfalls materialspezifisch, wird nach der Formel

$$a = \lambda / (\rho \cdot c) \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (8)$$

berechnet und stellt ein Maß für die Geschwindigkeit des Temperatenausgleiches dar (GRIGULL/SANDNER 1990). Große Werte von a (große Wärmeleitung λ oder kleine Speicherefähigkeit c) weisen auf eine schnelle Temperaturänderung hin; kleine Werte (kleine Wärmeleitfähigkeit λ oder große Speicherefähigkeit c) auf eine träge Temperaturanpassung.

2.3.3 Latente Umwandlungswärme

Die latente Umwandlungswärme L (auch spezifische Schmelzwärme genannt, NEISS 1982) ist die Wärme, die beim Übergang von Wasser zu Eis ohne Temperaturänderung freigesetzt wird. Umgekehrt muß diese Wärmemenge beim Schmelzen von Eis zu Wasser zur Verfügung stehen. Für reines Wasser beträgt die latente Umwandlungswärme ca. $333,6 \text{ J/g}$ bzw. J/cm^3 , d. h., es müssen $333,6 \text{ J}$ Energie abgeführt werden, um unter isothermen Bedingungen 1 g (cm^3) Wasser in Eis zu verwandeln. Für einen Boden ergibt sich als latente Umwandlungswärme L

$$L_{\text{Boden}} = 333,6 \cdot w \cdot \rho_d \quad [\text{J}/\text{cm}^3] \quad (9)$$

w = Wassergehalt [-]

ρ_d = Trockendichte $[\text{g}/\text{cm}^3]$

Dieser Zusammenhang gilt exakt nur bei atmosphärischem Druck und unter der Voraussetzung, daß das gesamte vorhandene Wasser gefriert. Da dies bei den Bodenfrostvorgängen i. d. R. nicht der Fall ist, wie weiter unten erläutert, ergeben sich für genauere Wärmebilanzberechnungen vor allem durch die erforderliche Berücksichtigung der Anteile an ungefrorenem Wasser im gefrorenen Boden einige Schwierigkeiten.

2.3.4 Energie- und Wärmetransport

Fast alle der zu untersuchenden Vorgänge sind mit Änderungen der Energieform verbunden. Die zu betrachtenden Energieformen können z. B. in den Formen mechanische Arbeit, Bewegungsenergie, potentielle Energie, Wärme, Strahlung, elektrische oder chemische Energie vorliegen. Die thermodynamischen Prozesse der einzelnen Übergänge sind jedoch zum Teil äußerst komplex und in ihrer Gesamtheit bis heute nicht ganz geklärt (KAY/PERFECT 1988, WILLIAMS 1988).

Energie kann grundsätzlich auf verschiedene Arten transportiert bzw. umgesetzt werden (s. a. Bild 13, Seite 39). Im vorliegenden Fall der Dreiphasengemische Böden sind die maßgebenden Vorgänge die

- Wärmeleitung
- Konvektion und Kondensation
- Strahlung

Die Wärmeleitung transportiert Energie durch die Molekularbewegung in Form der direkten Leitung an den Berührungsstellen der Einzelbestandteile. Dieser Energietransport läuft bei einem vorhandenen Temperaturgefälle immer ab, ist jedoch stark von dem Ausmaß der leitenden Querschnitte abhängig. Da Luft ein schlechter Leiter ist, führt eine große Anzahl ungesättigter Poren in einem Boden zu einer Verschlechterung der Wärmeleitung. Aus dem gleichen Grund verbessert ein hoher Wassergehalt aufgrund der gegenüber Luft rund 20 mal so großen λ -Werte die Wärmeleitfähigkeit des Bodens erheblich. Bereits geringe Wassergehalte sind äußerst wirksam. Durch die Meniskenbildung an den Berührungsstellen der Festteilchen und damit die konzentrierte Vergrößerung der Wärmetransportquerschnitte tritt in Relation zu den Wassergehalten eine überproportionale Steigerung der Wärmeleitfähigkeiten ein. Da jedoch gleichzeitig durch die hohe Wärmekapazität des Wassers große Energiemengen zu dessen Erwärmung verbraucht werden, gibt es einen Punkt, ab dem die Zunahme der Leitfähigkeit durch die Zunahme der Aufnahmekapazität kompensiert wird. Dies führt ab einem bestimmten Verhältnis zu einer Abnahme der Temperaturleitfähigkeit (Bild 12, linkes Diagramm).

Die Konvektion transportiert Energie durch eine Ortsveränderung von Molekülen und die dabei stattfindende Mitnahme von Energie. Sie ist an das Vorhandensein eines mobilen

Trägermediums gebunden, was im Fall der Böden das Porenwasser und die Porenluft sind. In der flüssigen Phase ist das Wasser ein wirksamer Energieträger, da es eine hohe spezifische Wärmekapazität besitzt (vgl. Tabelle 6). In der gasförmigen Phase wird der Energietransport weniger durch die Wärmekapazität, als durch die hohen Verdampfungs- bzw. Kondensationsenergien (ca. 2150 J/g, ELSNER et al. 1993) bestimmt.

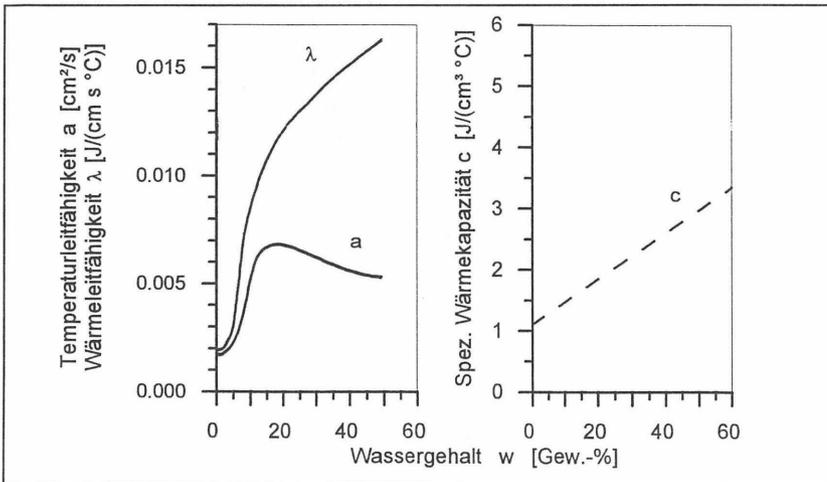


Bild 12: Wärmeleitfähigkeit λ , Temperaturleitfähigkeit ($a = \lambda/c$) und spez. Wärmekapazität (c) in Abhängigkeit vom Wassergehalt (nach SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 1989)

In nicht wassergesättigten Böden mit ausreichend großen Poren spielt das Wasser in Form der Luftfeuchtigkeit oder Wasserdampf als Transportmedium vor allem bei großen Temperaturdifferenzen eine erhebliche Rolle. Das am warmen Ende einer Pore verdunstete Wasser (Energieaufnahme in Form von Verdampfungswärme) kondensiert am kalten Ende der Pore (Energieabgabe in Form von Kondensationswärme) und transportiert auf diese Weise große Mengen an Energie. In ungesättigten Böden liegt somit in Abhängigkeit von der Porenstruktur, der Sättigung und dem Temperaturregime ein gekoppelter Wärme- und Masse-(/Wasser-)transport vor (Bild 13, KESCHAWARZI 1973, JESSBERGER/JAGOW 1989, FRÉMOND/MIKKOLA 1991, FUKUDA/ISHIZAKI 1991).

Elektromagnetische Wellen transportieren Energie in Form von **Strahlung**, ohne hierzu auf Materie angewiesen zu sein. Dazu gehört neben den an der Bodenoberfläche wirkenden Strahlungen auch die Wärmestrahlung der einzelnen Porenoberflächen. Diese wird jedoch im Normalfall zum Wärmetransport im Boden mit Ausnahme der oberflä-

chennahen Bereiche nur äußerst geringe Beiträge liefern, da die Temperaturdifferenzen und damit die Strahlungsbilanzen der sich gegenüberliegenden Porenoberflächen nur minimal sind. Die für die einzelnen Böden relevanten Transportvorgänge sind in Abhängigkeit von der Sättigung in Bild 13 zusammengefaßt dargestellt.

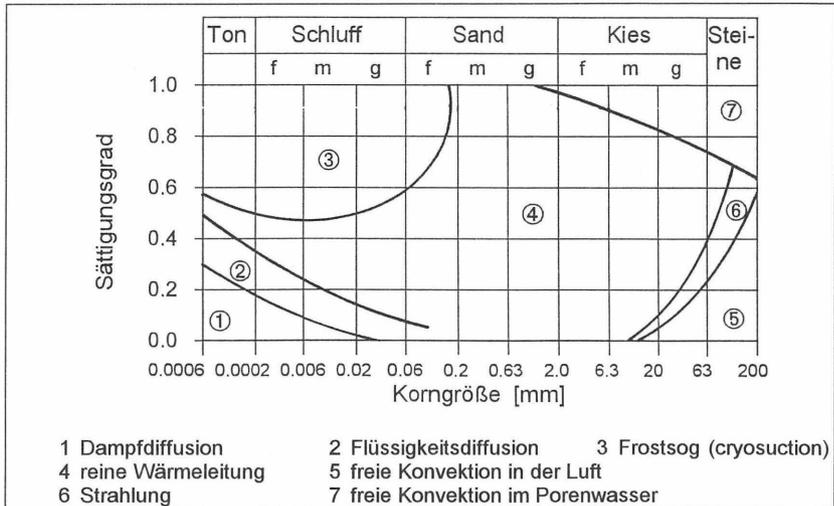


Bild 13: Dominante Wärmetransportmechanismen in Böden in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad (nach JESSBERGER/JAGOW 1989)

2.3.5 Grenzflächen und Gleichgewicht

Bei der Betrachtung der Frosteindringung im Boden spielen die Gleichgewichtszustände an den Grenzflächen von Wasser, Luft und Eis eine bedeutende Rolle.

In einer Flüssigkeit ziehen sich alle Moleküle gegenseitig in jeder Richtung an. An einer freien Oberfläche wirkt diese Kraft jedoch nur von einer Seite, so daß die Bindungen der obersten Molekülschichten größer sind als die der unteren. Dies führt zu einer vergrößerten Oberflächenspannung. Je nachdem, ob die Krümmung der Oberfläche konvex (Wassertropfen auf glatter Fläche, "liegend drückend") oder konkav (Meniskus, "hängend") ist, herrscht im Wasser ein Über- oder Unterdruck, der den Innendruck des Wassers, der aus der Bindungskraft der Moleküle besteht und mit bis zu 1.100 MPa abgeschätzt wird (SCHWARZ 1989), vergrößert oder verkleinert.

Das Gleichgewicht an den Grenzflächen zwischen den verschiedenen Aggregatzuständen wird durch den Dampfdruck gekennzeichnet. An einer Grenzfläche zwischen Was-

ser und Luft wechseln laufend einige Moleküle aus dem Wasser in die Luft (verdunsten) und von der Luft in das Wasser (kondensieren). Die Anzahl ist dabei von dem Energiezustand (insbesondere der Geschwindigkeit) des einzelnen Moleküls abhängig. Der Dampfdruck beschreibt nun den Druck, den diese Moleküle auf eine gedachte Meßebe-
ne an der Grenzfläche ausüben (SIEDEK 1977).

Herrscht an der Grenzfläche ein energetisches Gleichgewicht, so verdunsten ebenso viele Moleküle vom Wasser in den Gaszustand, wie umgekehrt Moleküle aus der Luft in das Wasser zurückdiffundieren. Bei einem energetischen Ungleichgewicht verlassen so viele Moleküle den energiereicheren Zustand, bis sich wieder ein Gleichgewicht eingestellt hat. Im Fall einer überwiegenden Verdunstung durch die Aufheizung des Wassers oder die Trocknung der Luft verlassen z. B. energiereiche (schnelle) Moleküle das Wasser so lange, bis die hierdurch abgesunkene mittlere Geschwindigkeit der verbliebenen Moleküle und die damit einhergehende Abkühlung des Wassers einen kleineren Energiezustand angenommen hat, der wieder im Gleichgewicht zu dem gestiegenen Energiezustand/
Dampfdruck der Luft steht.

Die oben beschriebene Form der konkaven Menisken an den Berührungsstellen und die Adhäsionskräfte entlang der Wandungen der einzelnen Feststoffteilchen führen mit der dadurch bedingten Zugkraft zu einem geringeren Gleichgewichtsdampfdruck über der Meniskusoberfläche, der mit zunehmender Krümmung der Oberfläche kleiner wird. Daraus resultiert ein Wasseraufstieg an den Oberflächen der Feststoffteilchen und in den Porenräumen, bis die Dampfdrücke wieder im Gleichgewicht stehen (SCHEFFER/
SCHACHTSCHABEL 1989). Da die Meniskenausbildung mit feinkörniger werdendem Material ausgeprägter wird, weisen die Tone die größten kapillaren Steighöhen mit Größenordnungen von über 30 m auf (IGB 1992).

Die Betrachtungen zu den energetischen Gleichgewichten sind grundsätzlich auch an den Grenzflächen Wasser / Eis (frieren \Leftrightarrow tauen) und Eis / Luft (sublimieren \Leftrightarrow Deposition, siehe hierzu auch Fußnote 4, Seite 12) gültig. Bei unterschiedlichen Dampfdrücken treten einzelne Wassermoleküle in einen anderen Aggregatzustand über, bis die Dampfdrücke wieder ausgeglichen sind (SIEDEK 1977).

Bei 0 C und einem Umgebungsdruck von 1 bar ist der Dampfdruck über Wasser und Eis mit $p_s = 611 \text{ Pa}$ gleich groß (SCHNEIDER 1984). Beide Aggregatzustände können nebeneinander existieren. Sinkt die Temperatur, ist der Dampfdruck im dann unterkühlten Wasser größer als über der Eisfläche und die Wassermoleküle wandern vom Wasser zum Eis: das Wasser gefriert. Unterkühltes Wasser und Eis können daher an einer ge-

meinsamen Grenzfläche nur dann nebeneinander existieren, wenn das unterkühlte Wasser durch innere Zugspannungen einen kleineren Dampfdruck aufweist (z. B. durch die Adhäsionskräfte zu einem Feststoffteilchen oder durch eine Meniskenbildung).

2.4 Die Bodengefrierung

Entsprechend dem Grundprinzip, daß jedes System dem energieärmsten Zustand zustrebt, wird Energie immer von den energiereicheren Zonen (hier wärmer) zu den energieärmeren Zonen (hier kälter) transportiert (WILLIAMS 1977, MAGEAU/MORGENSTERN 1980, OLIPHANT et al. 1983, NAKANO/TICE 1988, NIEMINEN 1989, NAKANO 1990). Trifft also eine kältere Temperatur auf eine warme Bodenoberfläche, so wird unter isobaren Randbedingungen ein Wärmestrom von warm nach kalt in Gang gesetzt, der aus den oben beschriebenen Mechanismen Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung besteht. Die summarischen Auswirkungen aller im folgenden beschriebenen Vorgänge, die aufgrund dieser Mechanismen während eines Gefriervorganges Wasser transportieren, werden in der Literatur unter dem Begriff "cryosuction" (frei übersetzt: Gefriersog) zusammengefaßt.

2.4.1 Gefrierendes Wasser im Boden

Das Gefrieren von Porenwasser in einem Bodenmaterial geschieht nicht schlagartig bei der Unterschreitung der 0°C-Grenze, sondern ist ein langsam fortschreitender Prozeß, der vor allem von den folgenden Einflüssen abhängig ist, deren Grundlagen zum Teil weiter oben erläutert wurden:

- **Kapillarität**

Je feiner die Kapillaren und damit die Poren eines Bodens sind, um so größer muß das Temperaturgefälle sein, um das Wasser aus dem Verband zu lösen (EVERETT/HAYNES 1965, MILLER 1963).

- **Salzgehalt**

Je höher der Salzgehalt im Porenwasser ist, umso niedriger ist der Gefrierpunkt und um so höher ist der Anteil des ungefrorenen Wassers (KINOSHITA 1989; ERSHOV et al. 1991).

Nach WILLIAMS 1963 (zitiert nach WAHL/KOLBE 1987) ergibt sich durch im Porenwasser gelöste Salze eine Gefrierpunktniedrigung von etwa 0,1° - 0,3°C; ZHANG LIXIN 1991 gibt für Salzgehalte von 5% bezogen auf das Porenwasser noch bei -10°C Werte an ungefrorenem Wasser in etwa der doppelten Größenordnung gegenüber salzfreiem Porenwasser an. Da im Eis bis etwa -21,3°C nur beschränkt Salze (z. B. NaCl) eingeschlossen werden (JESSBERGER 1990, ZHANG LIXIN 1991), erhöht

sich die Konzentration in der verbliebenen flüssigen Lösung, was eine sich steigernde Gefrierpunktniedrigung nach sich zieht (PRUPPACHER 1967). Dies wird durch Beobachtungen von ANDERSON 1989 bestätigt, der auch bei Temperaturen zwischen -40 C und -80 C noch eine Mobilität des ungefrorenen Wassers ermittelt hat, die nach seinen Angaben auch unter Berücksichtigung der Spannungszustände in der Hydrathülle nur über eine zusätzliche Gefrierpunktniedrigung erklärt werden kann. Nach ERSHOV et al. 1991 ist die Migration von Na^+ - und Cl^- -Ionen in einem gefrorenen Boden ebenso proportional zum Temperaturgefälle wie die des ungefrorenen Wassers. Es können dadurch außer Eislinen auch Bereiche mit deutlich erhöhten Salzkonzentrationen entstehen (soweit nicht mittels Diffusion ein Konzentrationsausgleich stattfindet, XU XIAOZU et al. 1991), die sowohl im gefrorenen Boden als auch nach dem Tauen veränderte Bodeneigenschaften bewirken (Abnahme der Fließ- und Ausrollgrenze, VEES 1970).

- **Druck**

Je höher der Druck, um so größer ist der Anteil des noch nicht gefrorenen Wassers und um so tiefer liegt der Gefrierpunkt (LADANYI/SHEN 1989, SHENG/KNUTSSON 1993).

- **Mineralart**

Je stärker die Oberflächenladung der Feststoffteilchen ist, um so größer der Anteil der erst bei tieferen Temperaturen frierenden Hydrathülle (NIEMINEN 1989).

Die Umwandlung zu Eis erfolgt aus diesen Gründen zunächst bei dem freien Porenwasser in den größten Poren und erfaßt mit sinkender Temperatur immer kleinere Porenräume und größere Teile der Hydrathülle. Letztendlich sind bei sehr tiefen Temperaturen nur noch wenige Moleküllagen der Hydrathüllen (auch als "ungefrorener Wasserfilm" bezeichnet) und später innermolekulare Wasseranlagerungen ungefroren. Das Vorhandensein der ungefrorenen Wasserfilme an den Feststoffteilchen bewirkt, daß auch im gefrorenen Boden bei entsprechend hohen Gradienten, die die Adsorptionskräfte überwinden, noch Wasserbewegungen stattfinden können. Sie nehmen mit sinkender Temperatur ab (WILLIAMS 1977). Die Anteile an ungefrorenem Wasser in einem gefrorenen Boden sind wegen der Abhängigkeit von der Mineralart und der Porenraumgröße charakteristisch für ein Material und seinen augenblicklichen Verdichtungszustand.

2.4.1.1 Frosteintrag in nichtbindigen Böden

Nichtbindige Böden, wie z. B. ungesättigte Grobsande, Kiese und Steinschüttungen, weisen hohe Wasserdurchlässigkeiten, kleine Wassergehalte, vernachlässigbare Kapillarität-

ten und im Bereich der frostgefährdeten Oberfläche normalerweise große Luftporositäten auf. Sie gefrieren im Gegensatz zu bindigen oder gemischtkörnigen Böden als Einheit.

Oberhalb des Grundwasserspiegels ist der Wassergehalt wegen der geringen Kapillarität und damit wegen fehlenden Nachschubs an Wasser gering, so daß nur das lokal vorhandene Wasser zum Gefrieren zur Verfügung steht. Die die einzelnen Körner umhüllende Hydrathülle ist wegen der geringen Oberflächenladung sehr dünn und adhäsiv nur schwach gebunden. Bei Frost bildet sich daher eine Eishülle um die Einzelkörner, die den Luftporenraum zur Ausdehnung benutzt. Frosthebungen sind nur in einem sehr geringen Maß bzw. überhaupt nicht vorhanden. Die Struktur des Bodens wird daher im ungesättigten Fall während und nach dem Gefrieren überhaupt nicht und im gesättigten Fall nur temporär während der Frostphase durch eine Gesamtvolumenzunahme leicht verändert. Nach dem Auftauen sind keine relevanten bodenmechanischen Veränderungen zu erwarten.

2.4.1.2 Frosteintrag und Eislinnenbildung in bindigen Böden

Gemischtkörnige und bindige Böden besitzen allgemein geringere Wasserdurchlässigkeiten, im erdfeuchten Zustand relativ große Wassergehalte, ausgeprägte Kapillaritäten und kleine Luftporengehalte. Sie weisen aufgrund dieser Gegebenheiten gegenüber nichtbindigen Böden andere Gefriereigenschaften auf.

Ab einer Temperatur $< 0^{\circ}\text{C}$ friert zunächst das an der Oberfläche befindliche freie Porenwasser an Ort und Stelle und bildet Eiskristalle. Diese wachsen mit fortwährendem Temperaturgefälle in Richtung des Wärmeflusses und in die am wenigsten behinderte Richtung. Bei einer freien Oberfläche also in Richtung Atmosphäre, wo sie das sogenannte Kammeis bilden (BIERMANS et al. 1978, SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 1989). Das Kammeis wächst an seiner Unterseite so lange weiter, wie an der Oberfläche oder in der Pore noch freies Wasser zur Verfügung steht, mit fallender Temperatur weitere Wassermoleküle aus den Hydrathüllen der Feststoffteilchen losgelöst oder aus dem Untergrund antransportiert werden können. Durch die stattfindende Umwandlung von Wasser in Eis wird im Moment der Aggregatänderung die latente Wärmeenergie frei, die abtransportiert werden muß und damit den gesamten Gefrierprozeß verlangsamt (vgl. auch den Knickpunkt bei den Temperaturverläufen kurz unterhalb der 0°C -Grenze bei den Versuchsergebnissen Bild 75, Seite 164 und die Prinzipskizze Bild 14, Seite 44).

Entsprechend dem vorhandenen thermischen (Un-)Gleichgewicht zwischen freigesetzter latenter Umwandlungswärme, Wärmezuleitung und vorhandener Frosttemperatur dringt die Frostfront weiter ein, stagniert oder wird zurückgedrängt (LADANYI/SHEN 1989, CHAMBERLAIN 1989). Kann kein Wasser (und damit Wärmeenergie) mehr aus dem Untergrund oder den Hydrathüllen zur Verfügung gestellt werden und kann der Wärmezuleitung

fluß aus dem Untergrund nicht aufrecht erhalten werden, dringt die 0°C-Isotherme (zunächst näherungsweise als Frostfront bezeichnet) in Abhängigkeit von dem Wärme Gleichgewicht zwischen Wärmezuleitung aus dem Untergrund und Wärmeableitung an die kältere Oberfläche weiter in den Boden ein. Steht wieder freies Porenwasser zur Verfügung, wird dieses gefroren. Einmal initiiert, wachsen die Eiskristalle auch im Boden wie beim Kammeis hauptsächlich in der Richtung des Wärme flusses (hier normalerweise aus dem Erdinneren an die Erdoberfläche) und bilden durch den laufenden Wassernachschub die sogenannten Eislinsen.

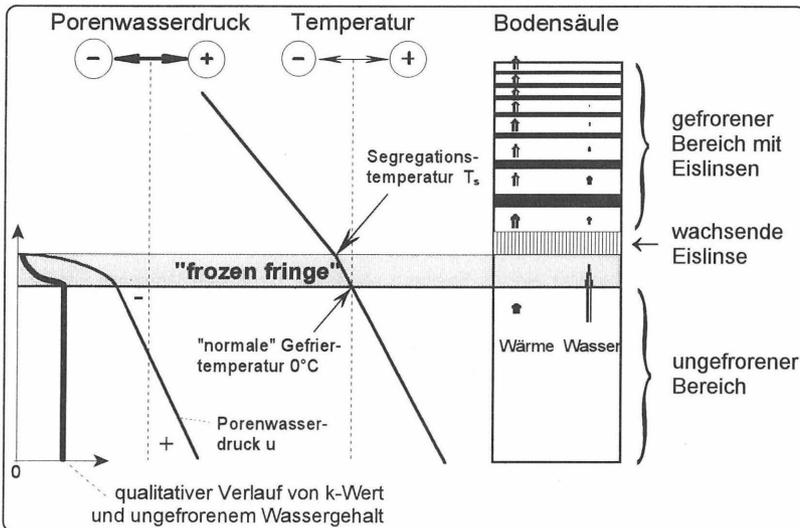


Bild 14: Prinzip der Bodengefrierung im geschlossenen System (Erläuterung im Text)
(ergänzt nach KONRAD/MORGENSTERN 1980 und BENSON/OTTHMAN 1993)

Steht wieder nicht mehr genügend Nachschub an Wasser und damit an latenter Umwandlungsenergie zur Erhaltung der Stagnation zur Verfügung, dringt die Frostfront bei andauerndem Temperaturgefälle erneut tiefer in den Boden ein, bis sich ein neues thermodynamisches Gleichgewicht ausgebildet hat und der Zyklus von vorne beginnt. Diesen Vorgang nennt man rhythmische Eislinsenbildung (s. a. Bild 14). Dabei dringt die Frostfront nach dem Abschluß einer Eislinse bis zur Bildung der nächsten Eislinse relativ schnell tiefer, da sie einen gewissen, zuvor durch den Wasserentzug "ausgetrockneten" Bodenbereich durchläuft, bevor sie durch dann wieder zur Verfügung stehende latente Umwandlungsenergie und ausreichende Wärmezuleitung von unten am weiteren Vordringen zunächst gehindert wird. Dieser Bodenbereich besitzt zwar eine geringere Wärmeleitung, aber auch eine geringere Wärmekapazität.

Die Mächtigkeit von Eislinsen kann je nach Boden, Wassernachschubmöglichkeit und thermischer Randbedingung mehrere Dezimeter betragen (TERZAGHI/PECK 1961). Die Bereiche um die Eislinse werden dabei durch den Wasserentzug ausgetrocknet und schrumpfen zum Teil, sobald durch den entstehenden Porenwasserunterdruck kein Wasser auch aus weiter entfernt liegenden Bereichen antransportiert werden kann. Die so ausgetrockneten Bereiche weisen oft dünne Schumpfrisse und Fissuren auf, die sich bei tieferen Temperaturen mit entstehendem Resteis aus den Hydrathüllen füllen können. Es entsteht somit um die Eislinse ein in viele Einzelaggregate zergliedertes Bodengefüge (Bild 15, s. a. Kapitel "Gefüge und Kornfraktionen", Seite 72).

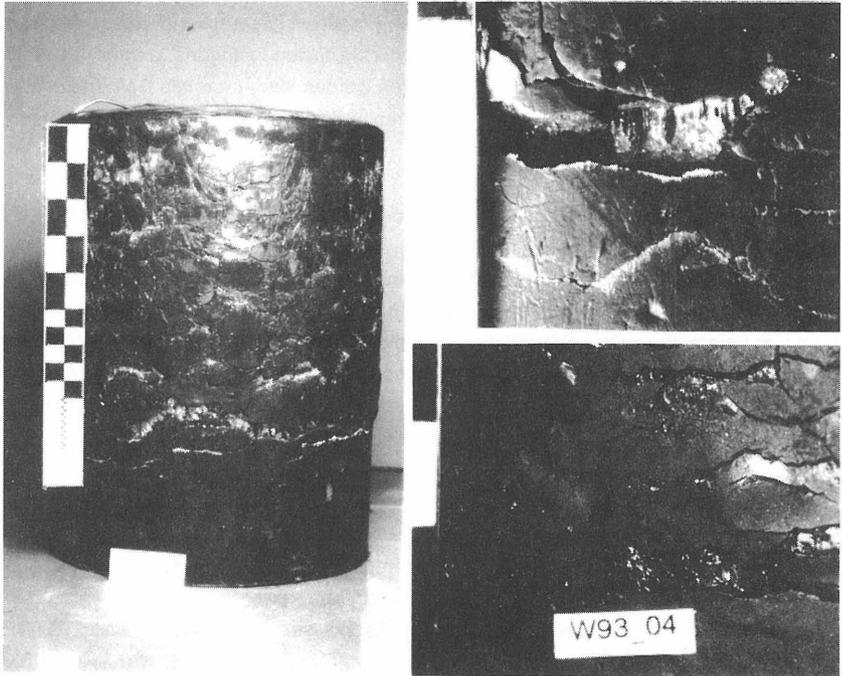


Bild 15: Beispiele für eine Zergliederung und Eislinsenbildung. Links: globale Probenübersicht nach eindimensionaler Gefrierung von oben mit -5°C und einer Bodentemperatur von 0°C . Rechts oben: Detail mit kammeisartiger Eislinse bei geringer Auflast (nur Eigengewicht). Rechts unten: kompakte Eislinse

Die Orientierung der entstehenden Eislinsen erfolgt in erster Linie normal zur Richtung des gekoppelten Wärme- und Massenflusses; in der Natur bei ebener Geländeoberfläche also i. d. R. angenähert waagrecht. Sind im Boden jedoch bereits Inhomogenitäten vorhanden, z. B. aus der Stratigrafie, Einschlüsse oder alte Scherfugen, so werden die

Eislinsen diese Strukturen benutzen, sofern sie einen geringeren Widerstand gegen eine Aufweitung besitzen, bereits vorher größere Wasserwegsamkeiten oder -ansammlungen dargestellt haben und nicht mehr als etwa 30° von der bevorzugten Richtung abweichen (VAN VLIET-LANOË/DUPAS 1991). Dies bedeutet auch, daß bei einer erneuten Gefrierung eines Bodens vornehmlich alte Fissuren verwendet werden, da diese Schwachstellen darstellen und relativ zur Umgebung gesehen meist größere Durchlässigkeiten aufweisen.

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt erläutert, erfolgt die Gefrierung des Wassers im Boden aus verschiedenen Gründen nicht schlagartig. Es kann daher vor allem bei feinkörnigen Böden nicht von einer einheitlichen Frostfront gesprochen werden; es bildet sich vielmehr ein Übergangsbereich zwischen der wärmsten Isotherme, an der das erste freie Porenwasser in den größten Poren gefroren werden kann (normale Gefriertemperatur bei 0°C), und der Isotherme, an der die wärmste Eislinse entsteht (Segregationstemperatur, $T_s < 0^\circ\text{C}$).

Dieser Bereich wird als Frostzone, Frostsaum oder Gefrierbereich (engl. "frozen fringe") bezeichnet (ISSMFE TC-8 1989) und wurde u. a. von MILLER 1972, LOCH/KAY 1978 und NAKANO/HORIGUCHI 1985 nachgewiesen. In ihm wird die Durchlässigkeit und der Gehalt an ungefrorenem Wasser in Richtung kaltem Ende durch die steigende Gefrierung von freiem und später gebundenen Wasseranteilen drastisch vermindert. Gleichzeitig steigen durch die Ausdehnung und das thermische Gefälle der Porenwasserunterdruck und durch das angezogene Wasser der Gesamtwassergehalt in diesem Bereich an (Bild 14, Seite 44).

Auch im gefrorenen Bereich hinter der Frostzone ist nicht alles Wasser gefroren. Die in der Hydrathülle der Feststoffteilchen gebundenen Wassermoleküle werden in Abhängigkeit von der Bindungsstärke und dem Temperaturgradienten nur schrittweise für eine Eisbildung freigesetzt. Dies führt dazu, daß auch in gefrorenen Bodenbereichen an den Feststoffrändern und intermolekular ungefrorenes Wasser vorhanden ist (ANDERSON/HOEKSTRA 1965, ANDERSON 1966, WILLIAMS 1977, GILPIN 1978, NAKANO 1986, ANDERSON 1989, ERSHOV et al. 1991, NAKANO 1991).

Die Existenz dieser ungefrorenen Wasserfilme hat eine wesentliche Bedeutung bei der Gefrierung von feinkörnigen Böden. Da die thermodynamischen Potentiale von Wasser mit sinkender Temperatur abnehmen, entsteht zur Frostfront bzw. zu den schon gefrorenen Bodenbereichen und kälter werdenden Eislinsen hin ein immer größer werdender Gradient. In Bereichen, in denen die Kräfte zur Kristallisation die Adhäsions- und Kohäsionskräfte der Hydrathülle überwinden, werden schließlich einzelne Moleküle aus der verbliebenen Hydrathülle in die angrenzenden Eislinsen überführt oder neue Eisfilme entlang der Hydrathüllen begonnen (VIGNES-ADLER 1977). Diese in der Hydrathülle

nunmehr fehlenden Moleküle werden in den ungefrorenen Wasserfilmen in einer Art Nachrückverfahren zum Teil durch Moleküle aus der wärmeren, energiereicheren Richtung ersetzt (Bild 16). Auf diese Weise sind auch im gefrorenen Bereich weitere Fließvorgänge möglich.

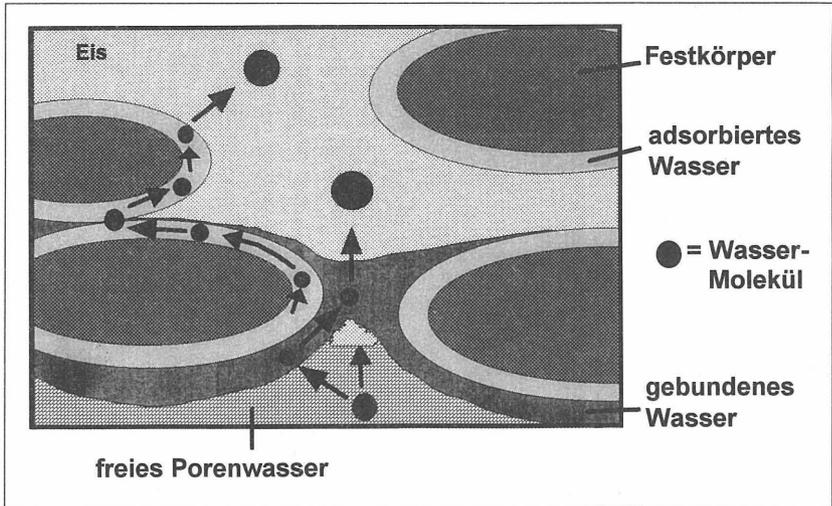


Bild 16: Schemaskizze über die möglichen Pfade der Wasserwanderung bei der Bodengefrierung

Diese Vorgänge erzeugen zusammen mit den Volumenausdehnungen bei der Gefrierung einen Porenwasserunterdruck (Gefriersog, engl. "cryosuction"), der nach Angaben von CHAMBERLAIN 1981 Werte bis zu 500 kPa erreichen kann. ERSHOV et al. 1991 haben nachgewiesen, daß die Migration von ungefrorenem Wasser in bereits gefrorenen Böden proportional zum Temperaturgefälle verläuft; die Dicke des ungefrorenen Wasserfilms zwischen Feststoffteilchen und Poreneis kann nach einem theoretischen Modell von GILPIN 1978 abgeschätzt werden.

Es muß also beachtet werden, daß bei anhaltenden Frösten auch in den bereits gefrorenen Bodenbereichen über die ungefrorenen Wasserfilme Wasser zu dem kälteren Frostkörperende transportiert wird und das Eislinnenwachstum somit auch in bereits gefrorenen Teilen fortgesetzt wird, wenn auch mit wesentlich kleineren Raten (ANDERSON 1989, CHAMBERLAIN 1989, ERSHOV et al. 1991).

HORIGUCHI/MILLER 1983 haben so z. B. für drei verschiedene Schluffe nachgewiesen, daß der Durchlässigkeitsbeiwert bei einem Temperaturabfall von 0°C auf -0,3°C um den Faktor 1/10.000 bis 1/100.000 abnimmt. Umfangreiche und allgemeingültige Versuchs-

gebnisse über die Größe der Durchlässigkeit in Abhängigkeit von dem Material und der Temperatur in größeren Tiefen konnten in der Literatur nicht gefunden werden.

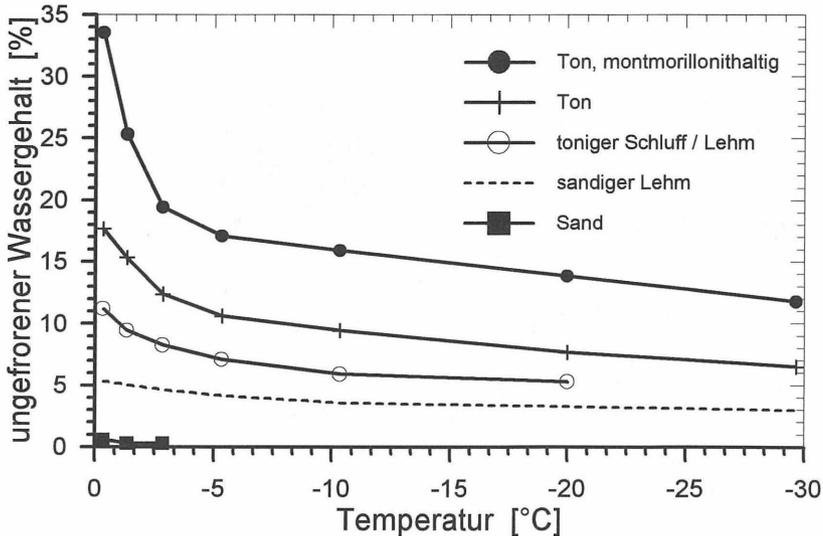


Bild 17: Abhängigkeit der ungefrorenen Wassergehalte verschiedener Böden von der Temperatur (nach ZYTOVICH 1958 aus SCHWARZ 1989)

Die Dicke dieser ungefrorenen Wasserfilme wird von ANDERSON 1989 auf etwa zwei Wassermoleküllagen bei -10 C und etwa eine Wassermoleküllage zwischen -35 C und -50 C geschätzt. Über -10 C steigt die Dicke schnell an. So haben THIMUS et al. 1991 bei einem überkonsolidierten Ton (Kaolinit 40%, Illit 25%, quellfähige Montmorillonite/Illite 30%-35%) bei -10 C ungefrorene Wassergehalte von ca. 10% - 12% ermittelt. In Bild 17 sind beispielhaft einige Kurven der ungefrorenen Wassergehalte in Abhängigkeit von der Bodenart und der Temperatur dargestellt.

Aus diesen Vorgängen wird deutlich, daß eine schnelle Frosteindringung tiefer Temperaturen (Schockgefrierung) aus der Sicht des Bodenmechanikers in bezug auf die Standsicherheit eines Erdbauwerkes günstig ist. Das Bodenwasser wird im Fall der Schnellgefrierung größtenteils dort gefroren, wo es vor dem Gefriervorgang plaziert war. Es verbleibt keine Zeit für die Bildung von großen Eislinsen, die nach dem Auftauen infolge der geringen Durchlässigkeit zu Wasseransammlungen und somit potentiellen Rutschzonen führen. Eine Frosthebung aus dem Gefrieren nur des örtlichen Porenwassers hat an der Gesamthebung eines frostempfindlichen Bodens normalerweise nur einen kleinen Anteil (KONRAD/MORGENSTERN 1980). Die Gesamthebung einer im geschlossenen System gefrorenen Probe beträgt nach TERZAGHI/PECK 1961 nur ca. 3-5 %, während es bei

einem offenen System je nach Material und Temperaturregime bis zu 100% und mehr sein können.

Für die Berechnung oder Abschätzung der Wasserbewegungen im gefrorenen und ungefrorenen Boden sowie der gekoppelten Wärme- und Massentransporte wurden zahlreiche theoretische und halbempirische Modelle entworfen, die in diesem Zusammenhang jedoch nicht weiter ausgeführt werden sollen (z. B. RAATS/KLUTE 1968, RÖMKENS/MILLER 1973, KAY et al. 1977, NAKANO/TICE 1988, KAY/PERFECT 1988, KOZLOWSKI 1989a und 1989b, SLUZALEC 1989, NAKANO 1990 und 1991, BLACK 1991, ERSHOV et al. 1991, XU XIAOZU et al. 1991, DANIELYAN/YANITSKY 1991).

2.4.2 Frosthebungen und Gefrierdruck

Bei der Kristallisation von Wasser zu Eis findet eine volumenmäßige Ausdehnung um ca. 9% statt. Sind im Boden große, zum Teil mit Luft gefüllte Porenräume vorhanden, wachsen die Eiskristalle zunächst in die freien Porenräume. Sind diese nicht vorhanden oder bereits mit Eiskristallen ausgefüllt, entsteht eine Druckkraft, die wegen der gekoppelten Wärme- und Wassertransporte zwar vor allem in die Richtung der allgemeinen Wasserbewegung gerichtet ist (ANDERSON 1989), die aber entsprechend den vorliegenden Randbedingungen nach dem Prinzip des geringsten Widerstandes abgebaut wird. In den meisten Fällen (vor allem bei einer eindimensionalen Gefrierung) äußert sich der Abbau dieser Druckkraft durch eine Hebung der aufliegenden Bodenbereiche; ist der Boden seitlich nicht gestützt, findet eine allseitige Ausdehnung statt, bei der allerdings die gekoppelte Wärme- und Massenflußrichtung bevorzugt wird (HIGHASHI 1958, VAN VLIET-LANOË/DUPAS 1991).

Die Frosthebung repräsentiert die deutlichste Auswirkung des Frosts. Sie entsteht neben der Volumenausdehnung durch das in situ-Gefrieren des Porenwassers aus der Eislinnenbildung und ist daher bei schluffigen Böden mit einem günstigen Verhältnis zwischen Durchlässigkeit, Kapillarität und Zeitbedarf besonders stark ausgeprägt. Bei Tonen kann durch den Einfluß der Mineralogie und die geringe Durchlässigkeit der Antransport von Porenwasser verlangsamt und damit die Eislinnenbildung respektive die Frosthebung vermindert ausfallen (ISSMFE TC-8 1989, LUDWIG 1993).

Weil die Frosthebung von allen in diesem Zusammenhang denkbaren Parametern abhängig ist und die für die meisten Anwendungsfälle kritische Größe ist, wird sie seit dem Beginn von systematischen Untersuchungen in den meisten Laborversuchen als eine der Hauptmeßgrößen zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit verwendet (TABER 1929, BESKOW 1935, DÜCKER 1939, PENNER 1958, HIGASHI 1958, CRONEY/JACOBS 1967, CHAMBERLAIN 1981, ANDERSON 1989, KUMOR 1989, CHEN XIAOBAI/WANG YAQING 1991, OTHMAN et al. 1993, KUJALA 1991 und 1993). In einem Versuch des

britischen "Transport and Road Research Laboratory" (TRRL) wurde beispielsweise eine Hebung von 13 mm bei einer Ausgangsprobenhöhe von 152 mm als Kriterium für die Beurteilung der Frostepfindlichkeit festgesetzt (TRRL SR 318 aus MCCABE/KETTLE 1985). Sie ist allerdings bei allen Versuchen stark von den technischen Randbedingungen der Versuchsdurchführung abhängig (Wasserzufuhr, Gefriergeschwindigkeit, Gradient, Probengröße, Auflast, Zeit usw.), so daß sie nur für einen streng standardisierten Versuchstyp als Einordnungskriterium verwendet werden kann (CHAMBERLAIN/GOW 1979, MCCABE/ KETTLE 1985, OTHMAN et al. 1993).

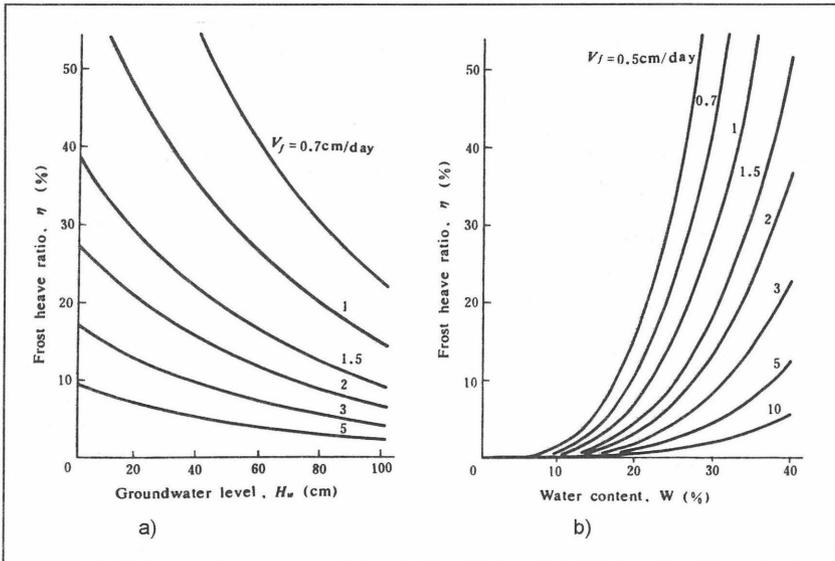


Bild 18: Frosthebungsverhältnis in Abhängigkeit von der Frosteindringgeschwindigkeit und a) dem Wassergehalt b) dem Grundwasserspiegel (CHEN XIAOBAI/WANG YAQING 1991)

Frosthebungen sind um so ausgeprägter, je höher der Wassergehalt, je kleiner der Grundwasserabstand und je dünner die Ionenkonzentration im Porenwasser ist (CHEN XIAOBAI/WANG YAQING 1991). In Bild 18 sind diese Abhängigkeiten beispielhaft im Zusammenhang mit der Frosteindringgeschwindigkeit aus einem Artikel von CHEN XIAOBAI/WANG YAQING 1991 dargestellt. Die Abhängigkeiten resultieren aus empirisch ermittelten Bestimmungsgleichungen und sind daher charakteristisch für einen Boden und bestimmte Randbedingungen.

Auch wiederholte Frost-Tau-Wechsel führen in offenen Systemen i. d. R. zu vergrößerten Hebungen. Der Grund hierfür wird von VAN VLIET-LANOË/DUPAS 1991 in drei Punkten gesehen:

1. In den bei der ersten Gefrierung entstandenen Fissuren wird Wasser zurückgehalten (Retentionspotential von gefrorenen feinkörnigen Böden).
2. Durch die entstandenen Fissuren ist ein größerer und schnellerer Wassernachschub möglich.
3. Im ersten Gefrierzyklus wird überproportional viel Hebungsvolumen durch die Verdichtung der austrocknenden Bodenmatrix kompensiert.

Jede vorhandene Auflast behindert die Hebungen und erzeugt erhöhte Spannungszustände im Eis und im Bodenmaterial. Dies führt neben verringerten Hebungen unter Umständen zu anderen Eisformen mit veränderten Festigkeitseigenschaften (FLETCHER 1970, TAKEDA 1989, GILPIN 1980a). Wird eine Hebung des Bodens gänzlich verhindert, entstehen hohe Gefrierdrücke (0.6 MPa bei feinkörnigen Böden nach KINOSITA 1989, in Devonschluff nach LADANYI/SHEN 1989 1.0 - 1.2 MPa, nach ANDERSON 1989 bei -16°C bis zu 17 MPa (!), nach TABER 1929 bis zu 1.5 MPa, s. a. Tabelle 7). Diese werden nach KINOSITA 1989 mit abnehmender Frostrate und zunehmender Partikelgröße kleiner und mit tieferen Temperaturen größer (ANDERSON 1989).

Bodenart	Gefrierdruck Δp [kPa]
Mittel- bis Feinsand, grober schluffiger Sand	0 - 7,5
Mittelsand mit geringem Anteil $d < 0,006$ mm	7,5 - 15
Feinschluff	15 - 50
schluffiger Ton	50 - 200
Ton	> 200

Tabelle 7: Größenordnungen von Gefrierdrücken (WILLIAMS 1967 nach JESSBERGER 1990)

Hebungen in Böden können nach Angaben von LADANYI/SHEN 1989 in den meisten Fällen mit Drücken von ca. 1 - 2 MPa verhindert werden; um jedoch bereits bestehende Hebungen durch reinen mechanischen Druck durch Verflüssigung rückgängig zu machen, ist bei Eis mit beispielsweise -1°C ein Druck von ca. 13.5 MPa erforderlich (GROB 1984, LADANYI/SHEN 1989).

Weiterführende Zusammenstellungen und Ausführungen zur mathematische Behandlung der Frosthebungen sind z. B. in LADANYI/SHEN 1989, SHENG 1991 und SHENG/KNUTSSON 1993 enthalten. SAARELAINEN 1989 und CHEN XIAOBAI/WANG YAQING 1991 enthalten auch einige aus Laborversuchen abgeleitete empirische Formeln zur Abschätzung der Frosthebung, die allerdings nur regionale und materialbezogene Bedeutung besitzen.

Die relativ hohen Gefrierdrücke bei den als Dichtung verwendeten Materialien bedeuten, daß bei den vorliegenden Anwendungsfällen mit maximalen Auflastspannungen von etwa 15 kPa - 20 kPa (höchstens ca. 1 Meter Material bestehend aus Schutz- und Drainlagen) keine Möglichkeiten zur Verhinderung von Frosthebungen bestehen, wenn das Material diese grundsätzlich aufweist. Die Berücksichtigung von Auflasten ist daher in diesem Zusammenhang nur bedingt relevant, so daß die verschiedenen Eisformen und mechanischen Verhaltensweisen (z. B. kriechen) im gefrorenen Zustand hier nicht betrachtet und Auflasten nicht berücksichtigt werden.

2.4.3 Tausetzung

Wenn ein gefrorener Boden auftaut, schmelzen die Eislinien und -filme und das Wasser wird, soweit es der Boden mit seinen Porenräumen zuläßt, durch die Schwerkraft oder unter der vorhandenen Auflast drainiert. In Abhängigkeit von der Stabilität der sich während der Gefriervorgänge gebildeten Kornstrukturen, der vom Eis freigegebenen Porenräume und der Belastung aus Eigengewicht und/oder Auflast konsolidiert der Boden und weist damit Setzungen auf.

Wenn der Wasseranfall aus den schmelzenden Eisformationen größer ist als die Drainagekapazität des Bodens und/oder keine schnell wasser aufnehmen, quellenden Bestandteile vorhanden sind, kommt es zu Porenwasserüberdrücken, die die Festigkeit des Bodens drastisch verringern können (RYDÉN 1985, NORDAL/REFSDAL 1989). In diesem Zusammenhang ist die Richtung des Auftauens wichtig, da ein Auftauen von oben dem Wasser keine Drainagemöglichkeit durch die noch gefrorenen Bereiche nach unten bietet und das Wasser nur nach oben abwandern kann. Dieser Fall wird besonders dann kritisch, wenn auch in Richtung Oberfläche keine Drainagemöglichkeit gegeben ist, weil diese mit einer undurchlässigen Schicht abgedeckt ist, wie dies z. B. bei Kombinationsabdichtungen durch die aufgelegte KDB der Fall ist.

Nach den Angaben von KUJALA/LAURINEN 1989 ist der absolute Setzungsbetrag während des Tauvorganges größer als die Konsolidationssetzung durch eine später aufgebraute Auflast und die Endsetzung größer, wenn die Auflast bereits während des Taus vorhanden ist, als wenn die gleiche Auflast erst direkt im Anschluß an das Auftauen aufgebracht wird. Dies kann mit der leichteren Einregelung der Bodenteilchen in einer durch die partielle Übersättigung suspensionsartigen Umgebung erklärt werden. In der Labortechnik nutzt man diesen Vorgang aus, indem man für die Herstellung besonders homogener Proben Suspensionen konsolidiert, was allerdings extrem lange Zeiten in Anspruch nimmt.

Wie die Frosthebung ist auch die Berechnung oder Abschätzung der Tausetzung vor allem für Bauwerke in Permafrostgebieten oder Wechselfrostgebieten mit größeren Frosteindringungen wichtig und daher vor allem von Forschern aus diesen Ländern vornehmlich für diese Anwendungsfälle untersucht worden. Die meisten der Untersuchungen haben Laborversuche oder Feldbeobachtungen zur Grundlage und demzufolge meist halbempirische Berechnungsansätze über Korrelationsbildungen, sind jedoch teilweise auf ganz bestimmte Bodenarten oder Randbedingungen zugeschnitten. Modelle und Übersichten sind in BROWN 1964, MORGENSTERN/NIXON 1971, PONOMAREV et al. 1980, GIFFORD et al. 1983, BLANCHARD/FRÉMOND 1985, OSWELL/GRAHAM 1987, PONOMAREV et al. 1988, LADANYI/SHEN 1989 und WU QINGBAI/TONG CHANGJIANG 1991 enthalten.

3 Grundsätzliche Überlegungen zur Beeinflussung mineralischer Abdichtungsmaterialien durch Frost

Bei natürlichen Bodensystemen hat sich im Lauf der Zeit ein Gleichgewicht zwischen Frosthebung und Eislinnenbildung im Winter und der Tausetzung und Austrocknung im Frühjahr/Sommer eingestellt bzw. die im Verlauf eines Jahres im Bereich der Oberfläche stattfindenden Schwankungen und Veränderungen der Eigenschaften werden als naturgegeben akzeptiert.

Anders liegen die Verhältnisse bei erstmalig einem Frost-Tau-Wechsel ausgesetzten bindigen Böden oder künstlich verdichteten Böden (z. B. mineralischen Abdichtungen), die ihre Einbaukenwerte zur Aufrechterhaltung ihrer Funktion behalten sollen. Hier wird neben einer allgemeinen langfristigen Anpassung an die Umgebungsrandbedingungen (z. B. Wasserhaushalt und Dichte in Abhängigkeit von den Feuchtigkeits- und Grundwasser-Verhältnissen der Unterlage und der Auflast) ein erster Frosteintrag grundsätzliche Auswirkungen nach sich ziehen, bei denen sich die für ein Gleichgewicht notwendigen Strukturen einstellen (z. B. Wasserwegsamkeiten für Austauschprozesse bei wechselnden Randbedingungen, passende "natürliche" Wassergehalt/Dichte/Auflast-Verhältnisse).

Die einflußnehmenden Randbedingungen und die Art und Größe der Auswirkungen wurden in der Vergangenheit intensiv untersucht, so daß in der nationalen und vor allem internationalen Literatur zahlreiche Artikel über die Einwirkung von Frost auf alle Arten von Böden veröffentlicht sind. Hierbei nimmt die Bestimmung der Frostempfindlichkeit von Böden einen großen Anteil ein, da bei fast allen Erd- und erdberührten Bauwerken Veränderungen in den Eigenschaften der Böden oder Verformungen, auch kurzfristiger Natur, durch Frosteinwirkungen unerwünscht sind (Straßen, Erddämme, Gründungsflächen).

3.1 Frostempfindlichkeit und deren Bestimmungskriterien

Ausgedehnte, jährlich wiederkehrende Schäden im Bereich des Straßenbaus waren zunächst der Hauptanlaß für eine systematische Untersuchung von Böden hinsichtlich ihrer Frostempfindlichkeit (KÜBLER 1964, DÜCKER 1939, BALDUZZI 1959 und 1968).

Als frostempfindlich wird ein Boden dann bezeichnet, wenn seine Eigenschaften durch einen oder mehrere Frost-Tau-Wechsel gegenüber dem Ausgangszustand verändert werden. Dies betrifft vor allem die Raumbeständigkeit (Hebungen beim Frieren, Setzungen beim Tauen) und die mechanischen Eigenschaften nach dem Tautvorgang (Scherfestigkeit, Tragfähigkeit).

Die Veränderungen nehmen, wie oben bereits erläutert, mit zunehmender Feinheit der Feststoffpartikel deutlich zu. Dies wurde schon sehr früh erkannt, so daß die ersten Kriterien zur Klassifizierung der Frostempfindlichkeit auf der relativ einfach zu bestimmenden Korngrößenverteilung basierten (CASAGRANDE 1931, DÜCKER 1939, SCHAIBLE 1957, BALDUZZI 1968). Hier wurde in krasser Weise zwischen frostempfindlichen und frostunempfindlichen Böden unterschieden.

Zahlreiche Untersuchungen haben sich in der Folge mit der Bestimmung der Frostempfindlichkeit befaßt und nachgewiesen, daß die Körnungslinie allein, als das sogenannte granulometrische Kriterium, keine hinreichende Bedingung darstellt. Verschiedene Ansätze, teilweise aus speziellen Anwendungsgebieten stammend, berücksichtigen daher ergänzend beispielsweise:

- die Kapillarität (SCHEIDIG 1934, BESKOW 1949 aus ISSMFE TC-8 1989, KUJALA 1991),
- die geologisch-petrographische Frostkriterium (KEIL 1959 n. JESSBERGER 1971),
- die Liquiditätszahl (RIEKE et al. 1983),
- die spezifische Oberfläche (RIEKE et al. 1983, NIEMINEN 1989),
- die Porengrößenverteilung aus der Bestimmung der pF-Kurve (LAUTRIDOU/OZOUF 1982, JONES 1987, NIEMINEN 1989, KUJALA 1993),
- die Frosthebungsgeschwindigkeit (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS 1965 nach JESSBERGER 1971),
- den Frosthebungsbetrag nach einer bestimmten Zeit (KUJALA 1991),
- den elastischen Frostfaktor, Verhältnis der verbleibenden Frosthebung nach dem Auftauen zur größten Frosthebung nach 24 Stunden (DYSLI 1991),
- die Wasseraufnahmefähigkeit (STEPKOWSKA/SKARZYNSKA 1989),
- den Gefrierdruck einer Probe (KUJALA 1993),
- das Segregationspotential, s. u. (KONRAD/MORGENSTERN 1980 und 1981, KUJALA 1991), oder
- den Fines-Faktor, einen Verhältnisfaktor zwischen verschiedenen Korngrößen und der Fließgrenze (RIEKE et al. 1983, VINSON et al. 1987, KUJALA 1991).

Aus dieser Liste werden in neuerer Zeit vor allem die Porengrößenverteilung und die spezifische Oberfläche als Kriterien zur Einordnung der Frostempfindlichkeit untersucht, da beide eine bessere Korrelation zu den Laborversuchen ergeben. So hat z. B. NIEMINEN 1989 bei Mergel eine überwiegend gute Übereinstimmung zwischen der Frosthebung, dem Anteil des Porenvolumens von Poren $< 1\mu\text{m}$ und der spezifischen Oberfläche festgestellt. Er weist jedoch darauf hin, daß bei Böden mit gleicher Oberfläche wegen

der unterschiedlich stark gebundenen Wässer und der Oberflächenanteile von Metallen und organischen Bestandteilen nicht zwangsläufig gleiche Frosthebungen erzielt werden und somit für einen allgemeinen Einsatz dieser Kriterien noch eine Einbeziehung dieser Faktoren erforderlich wäre.

Mit den zusätzlichen Parametern wurde auch eine differenzierte Bewertung von Böden eingeführt, die nicht mehr nur zwischen frostempfindlichen und frostunempfindlichen Böden unterscheidet, sondern Zwischenabstufungen zuläßt (FLOSS 1973). Dies erlaubt eine bessere Bewertung der bei einer konkreten Baumaßnahme zu erwartenden Auswirkungen im Bodenmaterial in Relation zu der Sensitivität des Bauwerkes.

Die Korngrößenverteilung ist so zwar auch heute noch "das" Kriterium schlechthin, jedoch werden die nach DIN 18 196 klassifizierten Böden unter Berücksichtigung der plastischen Eigenschaften in den Zusätzlichen Technischen Vorschriften und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTVE-StB 1976) in drei statt zwei Klassen eingeteilt (vgl. Bild 19a). Diese drei Klassen wurden auch in das Merkblatt für die Verhütung von Frostschäden an Straßen (FGSV 1991) übernommen. Nach Bild 19 und DIN 18 196 sind alle Böden frostunempfindlich mit weniger als

$$5 \text{ Gew.-%} \leq \text{Korndurchmesser } 0,063 \text{ mm}$$

$$15 \text{ Gew.-%} \leq \text{Korndurchmesser } 0,063 \text{ mm, wenn } U \leq 6 \text{ (} U = d_{60}/d_{10}\text{)}$$

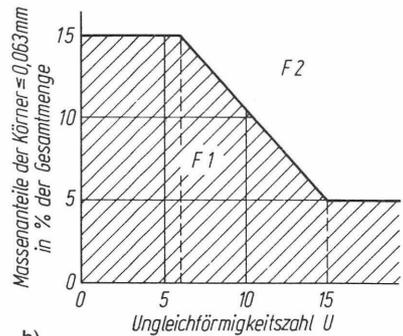
Bei $6 < U < 15$ kann linear zwischen 15 Gew.-% und 5 Gew.-% interpoliert werden (s. a. Bild 19b). Aus diesen Kriterien ist zu ersehen, daß alle für eine mineralische Dichtung in Frage kommenden Materialien potentiell frostgefährdet sind.

Durch die Verwendung der Plastizität werden indirekt auch die tonmineralogischen Unterschiede berücksichtigt. In FGSV 1991 wird weitergehend darauf hingewiesen, daß die Tonmineralart und die mineralchemischen Eigenschaften einflußnehmende Faktoren darstellen. Es werden zwar tendenzielle Eigenschaften einzelner Tonmineralarten aufgeführt, quantitative Angaben für eine Beurteilung sind jedoch wegen der bisher fehlenden Erfahrungen nicht enthalten. Für eine verlässliche Bestimmung der Frostempfindlichkeit eines Bodens ist daher die Durchführung von Frostversuchen im Labor empfehlenswert.

Klasse	Frostempfindlichkeit	Bodenart (DIN 18 196)
F 1	nicht frostempfindlich	GW, GI, GE GW, SI, SE
F 2	gering bis mittel frostempfindlich	TA OT, OH, OK ST, GT *) SU, GU *)
F 3	sehr frostempfindlich	TL, TM UL, UM, UA OU ST, GT̄ ST̄, GÜ

a)

*) zu F1 gehörig, wenn die Körnungsbedingungen nach Bild 19b erfüllt sind.



b)

Bild 19: a) Klassifikation der Frostempfindlichkeit von Bodenarten
b) Abgrenzung der Frostempfindlichkeitsklasse F1 und F2 (ZTVE-StB 1976, FGSV 1991)

Auch das Technical Committee on Frost TC-8 der ISSMFE gibt in seinem Tätigkeitsbericht zu bedenken, daß aufgrund der Vielzahl an Einflußfaktoren Laborversuche, die an Feldversuchen kalibriert wurden, die aussagekräftigsten Ergebnisse hinsichtlich der Beurteilung der Frostempfindlichkeit eines Bodens ergeben. Es weist jedoch ebenfalls darauf hin, daß es zur Zeit nicht möglich ist, einen speziellen Laborversuch als eindeutig besser oder aussagekräftiger als andere zu bezeichnen und als Referenztest auszuwählen (ISSMFE TC-8 1989). Es schlägt grundsätzlich ein dreistufiges Vorgehen für die Beurteilung der Frostempfindlichkeit im Labor vor:

- Level I:** Die Beurteilung erfolgt nur anhand von vorgegebenen Körnungslinien und nur in einem Übergangsbereich zur genaueren Unterscheidung durch die Bestimmung der Kapillarität (geforderte kapillare Steighöhe <math>< 1\text{ m}</math>).
- Level II:** Die Beurteilung erfolgt zusätzlich mit Indexwerten (Liquiditätsindex, kapillare Steighöhe, "Fines Factor" nach VINSON et al. 1987, pF-Kurven) und mit einfachen klassifizierenden Laborversuchen als Indextests. Dieses Vorgehen ist für die Fälle gedacht, in denen die granulometrische Einordnung nicht eindeutig bzw. widersprüchlich oder eine genauere Ansprache erforderlich ist.
- Level III:** Die Beurteilung erfolgt mit Hilfe von standardisierten Frosthebungstests. Sie stellt die beste Methode für die Bestimmung eines Frostempfindlichkeitsgrades dar und läßt die Anpassung an spezielle Randbedingungen zu (z. B. Auflast, Frost-Tau-Wechsel).

Für die endgültige Beurteilung einer projektbezogenen Frostempfindlichkeit sollen nach den Angaben des TC-8 auch die Randbedingungen in situ berücksichtigt und, wenn möglich, durch Beobachtungen und Erfahrungen aus dem Feld ergänzt werden:

- die Frostempfindlichkeit aus der Laborbestimmung mit Berücksichtigung der Möglichkeit des Wasserflusses zur Frostzone
- des lokalen Frostindex
- der Homogenität des Bodens
- der Auflast
- der Sensitivität des Bauwerks (!)

Als Laborversuche werden vor allem Frosthebungsversuche in Verbindung mit der Wasseraufnahmerate bei offenen Systemen (OTHMAN et al. 1993) und Gefrierdruckversuche bei be- oder verhinderter Volumenausdehnung verwendet. In neuerer Zeit wird auch das System des Segregationspotentials zunehmend eingesetzt (KONRAD/MORGENSTERN 1980 und 1981, KONRAD 1993).

Das Segregationspotential SP [$\text{mm}^2/\text{s}\cdot^\circ\text{C}$] wird durch das Verhältnis von Wasseraufnahmerate oder -geschwindigkeit v [mm/s] zu dem Temperaturgradienten $\text{grad } T$ [$^\circ\text{C}/\text{mm}$] in der Frostzone (frozen fringe) während eines Frostversuches mit offenem System gebildet (KONRAD/MORGENSTERN 1981):

$$\mathbf{SP = v / grad } T \quad [\text{mm}^2/\text{s}\cdot^\circ\text{C}] \quad (10)$$

Das Segregationspotential beschreibt in Abhängigkeit von der Zeit, der Auflast und den Gefrierbedingungen das Potential oder die Neigung eines Bodens zur Wasseraufnahme und damit zur Eislinnenbildung. Für die quasistationären Verhältnisse in einer Probe unter einem konstanten Temperaturgradienten ergeben sich nach KONRAD/MORGENSTERN 1982a konstante und bodenspezifische Werte. Große SP-Werte weisen auf frostempfindliche Böden hin. Über die Annahme, daß alles aufgenommene Wasser auch unter der Volumenzunahme von 9% in Eis umgewandelt wird, kann aus dem Segregationspotential rückwärts auch die Frosthebungsrate berechnet werden (JESSBERGER/JAGOW 1989, SAARELAINEN 1989):

$$\mathbf{h_f = 1,09 \cdot v = 1,09 \cdot SP \cdot grad } T \quad [\text{mm}/\text{s}] \quad (11)$$

Weitergehende vergleichende und kommentierende Zusammenstellungen zu Frostkriterien verschiedener Zeitepochen sind in RUCKLI 1950, JESSBERGER 1971, 1973 und

1976 (vor allem europäische Kriterien), GASKIN 1981, LIVET 1981, SAETERSDAL 1981, CHAMBERLAIN 1981 (sehr umfangreich, internationale Kriterien), CHAMBERLAIN 1986 (zitiert nach PHUKAN 1989), ISSMFE TC-8 1989 und KUJALA 1991 und 1993 zu finden.

3.2 Bestimmung der Frosteindringtiefe

Für die Bestimmung der Frosteindringtiefe wurden in der Vergangenheit zahlreiche Messungen vor allem im Bereich des Straßenbaus vorgenommen und Rechenmodelle entwickelt (RUCKLI 1950, BROWN 1964, McCORMICK 1993, NEISS 1982, FGSV 1988).

Aufgrund der großen Streubreite der Eingangsparameter ist jedoch eine aufwendige Berechnung nicht immer sinnvoll. Aus diesem Grunde wurden zahlreiche empirische und halbempirische Formeln für die Abschätzung der Frosteindringtiefe ohne eine umfangreiche Berechnung entwickelt, die allerdings teilweise nur örtliche Bedeutung haben oder vorher zu bestimmende Eingangsparameter besitzen (KINOSITA 1989). Gemeinsam ist diesen Formeln, daß sich die Frosteindringung unter der Hinzuziehung weiterer Faktoren proportional zu der Quadratwurzel der Zeit entwickelt und sich damit im Gegensatz zur Wirklichkeit bei stationären negativen Oberflächentemperaturen keine stationären Frosteindringungen ergeben.

Weit verbreitet ist die sogenannte verbesserte Berggren-Formel (JESSBERGER 1991, PHUKAN 1989)

$$x = \lambda \sqrt{\frac{1728 \text{ kn } l_f}{L}} \quad (12)$$

- mit
- x = Tiefe der Frosteindringung [cm]
 - λ = Korrekturfaktor aus einem Diagramm mit
 - α = To/Ta
 - To = Gefriertemperatur des Wassers [°C]
 - Ta = Oberflächentemperatur [°C]
 - μ = c•Ta/L
 - c = volumetrische Wärmekapazität
 - k = durchschnittliche Wärmeleitzahl [W/mK]
 - l_f = Frostindex [°C•d]
 - L = Latente Wärme im Boden [J/cm³]
 - n = Luftübergangsfaktor nach PHUKAN 1989 (Oberflächenfrostindex / Luftfrostindex)

oder die Näherungslösung nach HAIN (aus FGSV 1988), für deren Einsatz man allerdings von der Materialseite her neben der Trockendichte und dem Wassergehalt die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit im trockenen und feuchten Zustand benötigt.

Die Problematik auch bei den einfachen Näherungsformeln liegt jedoch weniger in der Rechengenauigkeit, als in der Genauigkeit, mit der die thermophysikalischen Kenngrößen der Böden ermittelt bzw. deren Schwankungsbereiche richtig eingeschätzt werden können. Auch die Temperaturrandbedingungen lassen sich oft nur schwer abschätzen. Während für den erforderlichen Ansatz der Bodentemperatur normalerweise nur eine konstante Temperatur in einer konstanten Tiefe ausgewählt werden muß, ist die Ermittlung der anzusetzenden Oberflächentemperatur von zahlreichen, sich laufend ändernden Parametern abhängig (s. a. Kapitel 5.1. "Einwirkende Parameter in situ", Seite 3) und kann oft nur als vereinfachender Summenparameter (z. B. als Frostindex oder Frostsumme) angesetzt werden.

Um unsichere Berechnungen für jeden Einzelfall zu vermeiden, wird für die Beurteilung der Frosteindringung daher oftmals ein auf Erfahrungen beruhender und auf der sicheren Seite liegender Pauschalwert für ein bestimmtes Gebiet angesetzt. In der Bundesrepublik Deutschland wurde für die grobe Einteilung die Frostindexverteilung aus dem strengen Winter 1962/63 verwendet und das Gebiet in Frosteinwirkungszonen aufgeteilt. Diese Einteilung ist jedoch für die Zwecke des Straßenbaus aufgestellt und berücksichtigt nicht das wesentlich empfindlichere System der mineralischen Abdichtung, das auch sehr kurze Gefrierungen nicht erleiden sollte.

Wesentlich ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, daß Erfahrungsberichte vorliegen, nach denen auch bei einer Kiessandschutzschicht von 35 - 60 cm erhebliche Frosttiefen gemessen wurden (DAHMS 1985 bis zu 1,3 m !). Nach einer statistischen Auswertung hat BEHR 1984 eine Tabelle aufgestellt, aus der Frosttiefen hervorgehen.

m	Münster	Hamburg	Bamberg Nürnberg	München	Kahler Asten
3	51	60	64	71	82
5	54	69	71	76	85
10	65	83	86	85	95

Tabelle 8: Mindesteindringtiefe des Frostes in [cm] alle m Jahre (nach BEHR 1984)

Hier wird gezeigt, daß alle drei Jahre mit einer Frosteindringtiefe von 50 bis 60 cm gerechnet werden muß. Diese Werte sind jedoch extrem von der örtlichen Lage abhängig. Es ist daher zu empfehlen, diese Werte und existierende Frostkarten nur als großräumige Hinweise zu verwenden und bei konkreten Projekten die örtlichen Klimabedingungen und Erfahrungen zu berücksichtigen, eigene Statistiken aufzustellen oder Messungen vorzunehmen.

3.3 Zur Methodik und Interpretation von Frostversuchen

Wegen der Vielzahl der Einflußparameter ist es derzeit noch nicht möglich, die Auswirkungen von Frostdurchgängen in mineralischen Materialien aus einzelnen einfach zu bestimmenden Parametern oder Formeln mit ausreichender Sicherheit für alle Anwendungsfälle vorherzusagen. Aus diesem Grund werden Laborversuche durchgeführt, in denen die zu erwartende thermische Belastung mit möglichst identischen Randbedingungen simuliert wird. In diesem Zusammenhang kommen entsprechend der Fragestellung vor allem folgende grundlegenden Versuchstypen zur Anwendung:

- Frosthebungsversuche,
- Gefrierdruckversuche und
- einfache Frostversuche.

Bei den Frosthebungsversuchen werden Bodenproben in eine Frostapparatur eingebaut,

- die starre, zylindrische und durchgehende Wandungen
(z. B. CRREL-Consolidometer nach OTHMAN et al. 1993, SAGE/D'ANDREA 1989, NIEMINEN 1989, CHAMBERLAIN/GOW 1979),
- starre, zylindrische telekopierbare Ringwandungen
(HIETALA 1988, zitiert nach KUJALA/RAVASKA 1989)
- flexible, mit Druckluft gestützte Wandungen
(Triaxialzelle, z. B. JESSBERGER/JAGOW 1989) oder
- definierte Ringspalträume mit festen begrenzenden Wandungen
(z. B. MCCABE/KETTLE 1985)

aufweist und der Probe in mindestens eine Richtung eine meßbare Ausdehnungsmöglichkeit läßt. Bei einigen Apparaturen wurden die Wandungen zur Verhinderung einer gewölbartigen Verspannung im gefrorenen Bereich leicht konisch nach oben offen ausgeführt (SAGE/D'ANDREA 1989). Der Meßwert ist die Hebung nach bestimmten Zeiten oder die Zeit bei bestimmten Hebungsbeträgen jeweils mit oder ohne Auflast. Bei den Gefrierdruckversuchen werden i. d. R. feste Wandungen eingesetzt (Triaxialversuche sind selten). Der Meßwert besteht aus der Kraft, die aufgewendet werden muß, um eine Hebung zu verhindern. Bei den einfachen Frostversuchen wird die Probe ohne weitere Meßwertgewinnung gefroren und anschließend weiteren analysierenden Versuchen zugeführt.

Neben der grundsätzlichen Wahl des Versuchstyps haben vor, während und nach der eigentlichen Versuchsdurchführung zahlreiche Randbedingungen sowohl der Versuchstechnik als auch der Probenaufbereitung einen erheblichen Einfluß auf die Ergebnisse. Bei der Durchführung von Frostversuchen müssen daher die in Tabelle 9 aufgeführten Faktoren auf die jeweilige Fragestellung abgestimmt werden:

Bereich Versuchsapparatur	Bereich Durchführung	Bereich Probendaten
<ul style="list-style-type: none"> • Reibungsverhältnisse an der Wandung • Festfrieren an der Wandung und an Kühlplatten • Ein-/dreidimensionale Frosteindringung • Erforderlicher Probenumbau für nachfolgende Untersuchungen • Verdunstungsschutz für die Probe • Isolierung gegen unerwünschte Wärmeströme 	<ul style="list-style-type: none"> • Frostrichtung • Gefriereschwindigkeit • Auftaugeschwindigkeit • Temperaturgradient • Absolute Temperatur • Auflast • Wasserverfügbarkeit (offenes / geschlossenes System) • Druck/Sog im evtl. Wasserbad • Versuchszeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Probengröße (Länge / Höhe) • Maximaler Korndurchmesser • Einbaudichte • Einbauwassergehalt • Sättigungsgrad • Materialaufbereitung • Verdichtungsmethode (reproduzierbare) • Homogenität • Porengrößen

Tabelle 9: Zusammenstellung der wichtigsten Faktoren bei der Durchführung von Frostversuchen

Die Einflüsse der genannten Faktoren müssen, um nicht zu falschen Resultaten zu gelangen, bei der Interpretation der Versuchsergebnisse berücksichtigt werden. Die wichtigsten Faktoren werden daher in den folgenden Kapiteln kurz erläutert.

3.3.1 Einfluß der Versuchsstandrandbedingungen

Im Bereich der Versuchsstände gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Ausführungen, deren Konzeption von der Ausstattung der Labore, der aktuellen Fragestellung und der Erfahrung mit Frostversuchen abhängig ist. Sie reichen von einfachen Gefrierschränken bis zur Spezialanlage von CHAMBERLAIN/GOW 1979 und HIETALA 1988 (zitiert nach KUJALA/RAVASKA 1989). Die Variationsbreiten der wichtigsten Versuchsparameter sind, soweit die Angaben den jeweiligen Veröffentlichungen entnommen werden konnten, Tabelle 11, Seite 66 zu entnehmen. Diese aus Quellen der neueren Zeit zusammengestellte Übersicht zeigt insbesondere im Bereich der Probenabmessungen eine weite Streuung (siehe hierzu auch Kap. 3.3.2 "Einfluß der Probenabmessungen", Seite 65).

Systematische Untersuchungen zu Vergleichsversuchen mit verschiedenen Apparaturen gibt es bis auf einen Ansatz von HASSON/IRWIN 1988 (zitiert nach KUJALA/RAVASKA 1989), die sich mit dem Vergleich von drei Apparaturen beschäftigt haben, nicht. Es konnten hierzu auch keine neueren Veröffentlichungen nachgewiesen werden. Für die Beurteilung der grundsätzlichen Apparatypen hinsichtlich des hier betrachteten Leitpara-

meters Durchlässigkeit enthält die Tabelle 10 eine Zusammenstellung der wesentlichen Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren.

Methoden	Vorteile	Nachteile
Oedometer, starre Wände z. B. CRREL Consolidometer von CHAMBERLAIN 1973 und CHAMBERLAIN/GOW 1979	<ul style="list-style-type: none"> • 1D-Gefrierung und 1D-Auftauen möglich • Temperaturzustand der Probe steuerbar • offenes und geschlossenes System möglich • minimale Störung der Probe beim Übergang zur Durchlässigkeitsprüfung • Auflast jederzeit möglich • keine Ableitung von Auflasten durch Festfrieren an den Wandungen durch Frieren von unten 	<ul style="list-style-type: none"> • unbekannte Seitendruckkräfte • Umläufigkeiten bei der Durchlässigkeitsprüfung vor allem bei keinen oder kleinen Auflasten wahrscheinlich • umgekehrte Temperaturverhältnisse (Gefrierung von unten, Wasserzugabe bei offenem System von oben) (CRREL) \leftrightarrow Einfluß ? • komplizierte Spezialapparatur • teuer
Flexible, definiert gestützte Wände z. B. Triaxialzelle mit Druckluft oder einem Glycol-Wasser-Gemisch	<ul style="list-style-type: none"> • minimale Störung der Probe beim Übergang zur Durchlässigkeitsprüfung • jederzeit definierter Spannungszustand möglich • keine Umläufigkeiten bei der Durchlässigkeitsprüfung • relativ einfach und billig, wenn eine normale Triaxialzelle und die Gefriereinheiten vorhanden sind 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturgradient ist schwierig einzuhalten • offenes oder geschl. System grundsätzlich möglich, jedoch vornehmlich 3D-Gefrierung, da eine thermische Umläufigkeit über den Zellinhalt nicht verhindert werden kann • Durchlässigkeitsprüfung auch der vom Frost evtl. nicht beeinflussten Bereiche ergibt eine Gesamtdurchlässigkeit
Starre zylindrische Probenbehälter z. B. aus Kunststoff mit Umbau in die k-Wertzelle	<ul style="list-style-type: none"> • 1D-Gefrierung • einfach • kostenextensiv 	<ul style="list-style-type: none"> • Probenstörung beim Umbau für die Durchlässigkeitsbestimmung möglich • nur geschlossene Systeme • undefinierte Seitendrucke • Auflast nur bedingt möglich
Quasiflexible zylindrische Probenbehälter z. B. durch Einschäumen mit Umbau in k-Wertzelle	<ul style="list-style-type: none"> • 1D-Gefrierung • einfach • kostenextensiv 	<ul style="list-style-type: none"> • Probenstörung beim Umbau für die Durchlässigkeitsbestimmung möglich • nur geschlossene Systeme • undefinierte Seitendrucke und Ausdehnungen • keine Auflast möglich
Freistehende Proben	<ul style="list-style-type: none"> • einfach • kostenextensiv • schnell 	<ul style="list-style-type: none"> • 3D-Gefrierung • nur geschlossene Systeme • keine Auflast möglich

Tabelle 10: Zusammenstellung der Vor- und Nachteile von Laborversuchsmethoden zur Bestimmung der Auswirkung von Frost-Tau-Wechseln hinsichtlich der Durchlässigkeit (erweitert nach OTHMAN et al. 1993)

In der Vergangenheit wurden im amerikanischen Raum zahlreiche Frostversuche mit dem "Consolidometer" von Chamberlain durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen bei der Durchlässigkeit fast durchgehend sehr große Steigerungen nach einem oder mehreren Frost-Tau-Wechseln, weswegen hier zur Interpretation auf Folgendes hingewiesen werden soll:

Das Consolidometer hat ebenso wie die Triaxialzelle den großen Vorteil, daß die Proben nach dem Gefrieren für eine Durchlässigkeitsprüfung nicht umgebaut werden müssen und somit auch nicht in ihrem Gefüge gestört werden. Dieser Vorteil wird jedoch m. E. durch drei gravierende versuchstechnische Besonderheiten eingeschränkt, die die Ergebnisse aus diesem Apparat diskussionsbedürftig erscheinen lassen:

1. Erstens bewirkt die Bestimmung der Durchlässigkeit an ein und derselben Probe nach verschiedenen Frost-Tau-Wechseln zur Ermittlung des Einflusses der Zyklenanzahl auf die Durchlässigkeit vor dem nächsten Frostzyklus eine weitgehende Wassersättigung der Probe. Das ergibt veränderte Ausgangsbedingungen, da sich jedesmal mehr Wasser in der Probe befindet, das zu erneuten Hebungen und damit vergrößerten Gefügeveränderungen beiträgt. Es ist den Veröffentlichungen leider nicht zu entnehmen, ob es sich jeweils um eine neue oder um dieselbe Probe handelt.
2. Zweitens werden die Proben von unten gefroren und von oben bewässert. Das Wasser läuft also während des Auftaus in den auftauenden Bereich der Probe hinein und kann nur gegen die Schwerkraft in den ungefrorenen Teil entweichen. In natura wird beidseitig getaut, je nach Witterung und Wärmenachschub aus dem Erdinneren oben oder unten vorrangig.
3. Drittens sind durch den fehlenden Seitendruck grundsätzlich Umläufigkeiten bei der Durchlässigkeitsprüfung vor allem im evtl. geschrumpften ungefrorenen Probenbereich nicht zu vermeiden.

Bei der Konzeption der Versuchsstände muß berücksichtigt werden, daß bei einer Gefrierung von oben gewisse Hebungsteile durch Festfrieren oder über höhere Reibung in die Wandungen abgeleitet und damit nicht sichtbar werden. Durch das Festfrieren wird auch der Spannungszustand im Bereich des "frozen fringe" verändert, was unter Umständen zu modifizierten Eislinsenbildungen führt. Versuche in Triaxialzellen mit flexiblen Seitenwänden weisen zwar im Gegensatz zu starren Wänden eine gewisse allseitige Ausdehnung auf, lassen aber eine weitgehend reibungsfreie Hebung zu.

3.3.2 Einfluß der Probenabmessungen

Bei sehr kleinen Probendurchmessern und starren Wandungen hat die Wandreibung bei der Frosthebung einen Einfluß auf die entstehende Struktur, der durch das Festfrieren am Rand unter Umständen verstärkt wird⁶. Durch die größere Hebung im mittleren Bereich entstehen bei einer eindimensionalen Gefrierung so evtl. zusätzliche Scherzonen im Bereich der Aufwölbung, die weitere, nicht direkt frostbedingte Wasserwegsamkeiten schaffen können.

Es kommt hinzu, daß mit kleiner werdendem Durchmesser das Verhältnis von Umfangsfläche zu Volumen (oder frosteintragender Stirnfläche) immer größer wird und über die Umfangsfläche von der Seite auch trotz guter Isolierung ein gewisser störender Wärmestrom eingetragen wird. Dies führt theoretisch bei gleicher Probenhöhe mit größer werdendem Radius zu einer tiefer eindringenden Frostfront und so unter Umständen zu größeren Hebungen desselben Materials bei als augenscheinlich identisch erachteten Frostbedingungen. Versuche hierzu konnten allerdings in der eingesehenen Literatur nicht nachgewiesen werden.

Größere Probenhöhen können gegenüber kleineren Proben je nach Material zu unterschiedlichen Hebungsraten führen, da die Temperatureindringung bei Vollfrierung eine längere Zeit beansprucht, bei Teilfrierung und konstanten Randtemperaturen der ungefrorene Probenbereich größer bleibt. Es kann daher bei geschlossenen Systemen und "durchlässigen" Böden mehr Wasser für die Eislinienbildung zur Verfügung gestellt werden. Sehr undurchlässige Böden können durch die Behinderung der Wasserzufuhr im vergrößerten ungefrorenen Bereich auch geringere Hebungen aufweisen, wie MCCABE/KETTLE 1985 nachgewiesen haben. Bei Gefrierdruckversuchen können größere Probenhöhen bei gleichen Randtemperaturen unter Umständen durch das Zusammendrücken des vergrößerten ungefrorenen Bereichs kleinere meßbare Gefrierdrücke ergeben.

Zusätzlich muß bedacht werden, daß es mit zunehmender Probengröße immer schwieriger wird, homogene Proben herzustellen. Diese Inhomogenitäten sind nach Ansicht von MCCABE/KETTLE 1985 die Ursache für von ihnen beobachtete Durchlässigkeitssteigerungen bei Durchmesserergrößerungen im Bereich von ca. 10 cm auf 15 cm bei ansonsten gleichen Bedingungen. Bei dem Vergleich von verschiedenen Materialien sollten

⁶ Die Verhinderung des Festfrierens am Rand kann nach Angaben von MCCABE/KETTLE 1985 eine Vergrößerung der Hebung von bis zu 200% bewirken und sollte daher durch spezielle Maßnahmen (z. B. Gleit(-doppel)schichten, flexible oder telekopierbare Wandungen) unterstützt werden.

Quelle	Durchmesser [cm]	Höhe [cm]	Befrostung 1- oder 3-dimens.	Befrostung von oben oder unten	Ausbildung der Wandung	System offen oder geschlossen	Hebung kontin./nach dem Versuch	Auflast	Temperatur oben/unten [°C]
CHEN 1989	10 - 15	10 - 20	1	o	starr	?	k		
KETTLE 1989	15	15	1	o	starr	o	k	3,5 kPa	-12 / 0 ⇔ 3 / 3 FT
JESSBERGER/JAGOW 1989	3,5 u. 10	8 u. 18	1	o	Triaxialzelle	o	k	möglich	
KUJALA/LAURINEN 1989	-	-	1	o	?	o	k		
KUMOR 1989	5 - 10	4,2	3		starr	g	n	keine	-20
MARATO/SAKURADA 1989	3	8	?	?	?	o			
NIEMINEN 1989	(8)	(10)	1	u	starr	o	k	43 kPa	-5/? u. -20/?
STENBERG 1989 a	10	10	1	u	starr	o	k		
VÄHÄÄHO et al. 1989	-	-	1	?	starr	o			-18/+4
WOJTOWICZ 1989	20	10	1	?	?	g			-3 / ?
ERSHOV et al. 1991	15	12	1	o	?	?			-2,2 / -1,1
KUJALA 1991	-	-	1	o	starr	o		keine	-3 / +1
OGAWA et al. 1991	12,5	5	3		flexibel	g			-10
XU XIAOZU et al. 1991	-	12 - 15	1	u	starr	g			
SCHABABERLE 1989	5 u. 10	10u.40	1	o	starr	o	k	keine	
KIM/DANIEL 1992	10,2	11,6	3		starr	g	n	keine	
BONDARENKO/SADOVSKY 1991	15	20	in situ	in situ	Boden	o	nein		Klima in situ
HIETALA 1988	5 - 10	10	1	o / u	starre Ringe	o / g	k	keine	-6 ⇔ +1 / +2 FT

() = Angaben geschätzt ? = nicht ermittelbar FT= Frost-Tau-Wechsel ⇔ = Wechsel zwischen

/ = links von / entspricht der Temperatur am kalten Probenende
rechts von / entspricht der Temperatur am warmen Probenende

Tabelle 11: Zusammenstellung der Probenabmessungen und der wichtigsten Randbedingungen der Versuchsapparatur für Frostversuche aus der neueren Literatur

aus diesen Gründen immer die gleichen Probenkörperabmessungen verwendet werden. Dies kann vor allem bei Vergleichsversuchen mit definierten Anteilen von größeren Feststoffen wie Sanden und Kiesen (z. B. Geschiebemergel o. ä.) wichtig sein.

3.3.3 Einfluß der Wasserverfügbarkeit

Existiert für einen gefrierenden Bodenkörper keine Möglichkeit zur Wasseraufnahme (z. B. aus dem Grundwasser) oder Wasserabgabe, so spricht man von einem geschlossenen System. Es kann nur zu örtlichen Wasserumlagerungen kommen; der Gesamtwassergehalt des Probenkörpers ändert sich nicht.

In einem offenen System kann der Nachschub von Wasser aus dem Grundwasser zur Frostzone hin (in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des ungefrorenen Probenteils) als gewährleistet angesehen werden. Es kann zu erheblichen Eislinnenbildungen kommen und der Gesamtwassergehalt steigt infolge des aufgenommenen Wassers.

Offene Systeme können bei hohen Auflasten oder Gefrierdruckversuchen mit einer Verhinderung der Hebung aber auch dazu führen, daß durch die Volumenausdehnung beim Übergang von Wasser zu Eis an der Gefrierfront ein Porenwasserüberdruck entsteht, durch den das Wasser aus dem ungefrorenen Bereich durch eine Art "Gefrierkonsolidation" in tiefere, noch nicht gefrorene Bodenschichten gedrückt wird. In den betroffenen Bereichen kann es demzufolge bei hohen Auflasten auch zu einer Abnahme der Wassergehaltes kommen.

Ein weiterer zu beachtender Unterschied besteht in der Art der Sättigung der Proben bei Versuchsstart. Hier muß zwischen teilgesättigt "wie hergestellt" und sofortigem Versuchsbeginn, gesättigt über die Möglichkeit der Wasseraufnahme durch kapillare Wasseraufnahme vor oder während des Versuches und Sättigung durch vollkommenes gradientenbehaftetes Fluten der Proben unterschieden werden.

3.3.4 Einfluß des Temperaturregimes

Bezüglich der Temperatur ist zwischen den drei Parametern Eindringgeschwindigkeit, meist angegeben in [mm/h] oder [°C/h], stationärer Temperaturgradient [°C/cm] und tiefster erreichter Temperatur [°C] zu unterscheiden.

Die Frosteindringgeschwindigkeit ist ein Maß für die abgezogene Wärmeenergie und daher sowohl von der einwirkenden Temperatur als auch von den thermischen Eigenschaften des Materials abhängig und vom angelegten Temperaturgradienten gesteuert. Je schneller ein Boden gefriert, um so kleiner sind bei einem offenen System die endgültigen Hebungen, da das Wasser keine Möglichkeit hat, rasch genug an die schnell ein-

dringende Frostfront transportiert zu werden. Die Anfangshebungen sind größer als die bei langsamer Frosteindringung, da in der gleichen Zeit ein größerer Bereich mit dem dort enthaltenen Porenwasser gefroren wird, klingen jedoch relativ schnell ab und bleiben im wesentlichen konstant (s. a. Bild 20).

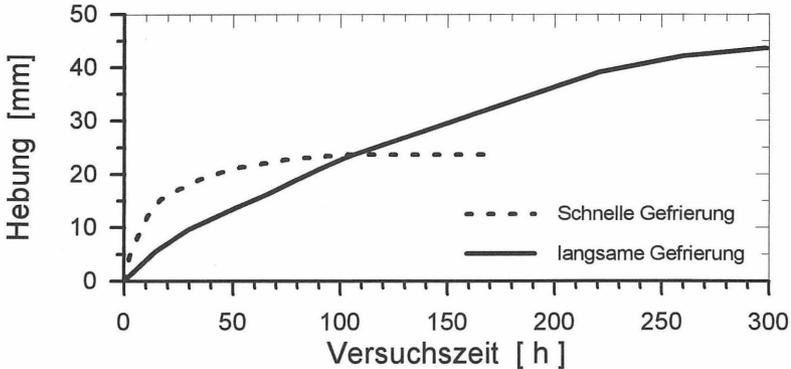


Bild 20: Frosthebung in Abhängigkeit von der Frosteindringgeschwindigkeit (nach McCABE/KETTLE 1985)

OTHMAN 1992 (nach BENSON/OTHMAN 1993) gibt aufgrund von 3D-Versuchen an, daß mit steigender Eindringgeschwindigkeit die Auswirkungen auf die Durchlässigkeit größer werden, da das Wasser örtlich in vielen kleineren Eislinsen gefroren wird und das Gefüge damit zergliederter und durchlässiger wird. Dies wird jedoch von anderen Autoren in entgegengesetzter Richtung gesehen (z. B. McCABE/KETTLE 1985) und ist wahrscheinlich durch das jeweilige Material bestimmt. Außerdem wird durch die schnelle Gefrierung an Ort und Stelle die Erzeugung von Gleitschichten im Bereich der Eislinsen nach dem Auftauen und eine umfangreiche lokale Wassergehaltsänderung durch den Gefriersog verhindert.

Der Temperaturgradient sorgt während der Gefrierphase für die Größe der Frosteindringgeschwindigkeit. Während der Frostphase ist er der wesentliche Motor für die Wasser- und Wärmebewegungen. Je größer der Stagnationsgradient ist, um so extremer fällt die Eislinsenbildung aus, da der Gefriersog proportional vom Temperaturgradienten abhängig ist.

Die absolute Lage der Temperatur ist vor allem für die Anteile an ungefrorenem Wasser im gefrorenen Bereich sowohl in den Hydrathüllen als auch innerhalb der Tonminerale von Bedeutung. Je tiefer die Temperatur, um so mehr Wasser wird gefroren und um so größer sind die irreversiblen Veränderungen bezüglich der Quelleigenschaften der Tone.

Die Eindringung der negativen Temperaturen bei Laborversuchen kann entweder

- eindimensional von oben (z. B. KETTLE 1989, ERSHOV et al. 1991),
- eindimensional von unten (z. B. CHAMBERLAIN 1973, NIEMINEN 1989) oder
- dreidimensional von allen Seiten (z. B. KUMOR 1989, OGAWA et al. 1991)

vorgegeben werden. Entsprechend der Richtung der Gefrierung findet auch der gekoppelte Wärme- und Wasserfluß statt, demzufolge das Eislinnenwachstum erfolgt. Die Entscheidung zwischen ein- und dreidimensionaler Gefrierung ist dabei wichtiger als die zwischen der eindimensionalen Gefrierung von oben oder unten.

Bei der einfachen dreidimensionalen Gefrierung wird das Wasser vom Probeninneren nach allen Seiten "abgesaugt", so daß bei längeren Versuchen oder zahlreichen Frost-Tau-Wechseln das Probeninnere austrocknet und die äußeren Randbereiche vernässen (SKARZYNSKA 1985). Der gekoppelte Wärme- und Wasserfluß nach allen Seiten erzeugt so auch ein anderes Frostgefüge im Boden. Bezüglich der Auswirkungen hinsichtlich der Durchlässigkeit ist dieser Unterschied nach Ansicht mehrerer Autoren allerdings vernachlässigbar (s. a. Abschnitt "Durchlässigkeit", Seite 79). Hinsichtlich der mechanischen Festigkeiten ist jedoch bei einer eindimensionalen Gefrierung eine anisotrope Gefügeausbildung zu erwarten, die nicht vernachlässigt werden darf (s. a. Abschnitt "Scherfestigkeit", Seite 82). Bei Frosthebungsversuchen zur Ermittlung der Hebung als Einordnungskriterium sollte die eindimensionale Gefrierung mit starren Wandungen gewählt werden, da ansonsten unkalkulierbare seitliche Ausdehnungen stattfinden.

Die eindimensionale Gefrierung von oben oder unten weist zwei technische Unterschiede auf:

- Die Schwerkraft wirkt einmal in (Gefrierung von unten) und einmal entgegen (Gefrierung von oben) der temperaturinduzierten Fließrichtung des Wassers.
- Bei offenen Systemen und einer Gefrierung von unten sickert das Wasser ohne thermischen Gradienten von oben in die Probe und sättigt diese auf; bei der Gefrierung von oben muß das Wasser zunächst kapillar ansteigen.

Beide Gründe sind bei den hier verwendeten, sehr undurchlässigen Materialien im Ausgangszustand bei nicht zu hohen Proben und langen Versuchszeiten nicht ganz so relevant. Nach dem Entstehen der ersten Fissuren können jedoch Unterschiede im Wassergehalt auch durch die unterschiedlichen Drainagemöglichkeiten beim Tauen auftreten.

3.3.5 Einfluß der Auflast

Eine Auflast hat während der Frost-Tau-Wechsel folgende Auswirkungen:

- Mit zunehmender Auflast sinkt der Gefrierpunkt der Porenraumlösung (CHEN XIAO-BAI/WANG YAQING 1991). Nach FGSV 1988 beträgt die erforderliche Auflast Δp für eine Gefrierpunktniedrigung von $0,1^\circ\text{C}$ $\Delta p \approx 1,25 \text{ MN/m}^2$.
- Die an der 0°C -Isotherme entstehende Saugspannung wird teilweise kompensiert und die Eisbildung dadurch behindert (PENNER 1958, SHENG/KNUTSSON 1993).
- Die Durchlässigkeit der Probe insbesondere im Bereich des "frozen fringe" wird herabgesetzt, so daß weniger Wasser zur Eislinse transportiert werden kann (KONRAD/MORGENSTERN 1982b).
- Nach dem Auftauen werden die entstandenen Fissuren und "cracks" zusammengepreßt und so die Porenräume und die Trennflächenabstände der Eislinsen verkleinert (BENSON/OTHRMAN 1993).

Die Folge höherer Auflasten sind dünnere Eislinsen, die dafür aber häufiger auftreten (KUJALA/LAURINEN 1989, KONRAD/MORGENSTERN 1982b nach BENSON/OTHRMAN 1993).

3.3.6 Einfluß der Auftaugeschwindigkeit

Die Auftaugeschwindigkeit und Auftaurichtung sind generell von Bedeutung, da durch sie festgelegt wird, ob das Bodensystem sich in drainierten oder undrainierten Verhältnissen befindet und ob evtl. eine sich auswirkende Konsolidierungszeit zur Verfügung steht, die das aus den Eislinsen anfallende Wasser verteilen kann. Bei gering durchlässigen Böden und einem schnellen Temperaturanstieg hat das anfallende Schmelzwasser der Eislinsen keine Möglichkeit zu versickern; es herrschen unkonsolidierte, undrainierte Verhältnisse. Es kommt zu Porenwasserüberdrücken und in deren Folge zu Festigkeitsverlusten, die durch die zu Wasser gewordenen Eislinsen potentielle Rutschflächen bilden.

Eine ähnliche Situation liegt vor, wenn ein gefrorener Bodenkörper von oben zu tauen beginnt (z. B. durch die Sonneneinstrahlung oder zu Beginn einer Tauphase bei vorhergehender tiefer Frosteindringung). Da der untere Teil noch gefroren und damit für größere Mengen Wasser undurchlässig ist, entstehen auch bei ansonsten durchlässigeren Böden die oben beschriebenen Phänomene. Dieser Vorgang wird verstärkt, wenn das Tauwasser auch nach oben nicht entweichen kann, wie es bei den Kombinationsabdichtungen durch die Kunststoffdichtungsbahn der Fall ist. Das sich im Boden gebildete, zergliederte kyrogene Gefüge bleibt nach dem Auftauen insbesondere dann bestehen, wenn die Eiskristalle die Möglichkeit haben, sublimierend zu verdampfen (Frostgare) oder das Schmelzwasser schnell zwischen den entstandenen Aggregaten versickern kann.

3.4 Veränderung bodenmechanischer Kenngrößen

3.4.1 Dichte und Wassergehalt

Die augenfälligste Auswirkung des Frostes in feinkörnigen Böden ist die Frosthebung. Dies kann auf landwirtschaftlichen Flächen im Frühjahr gut beobachtet werden, wenn die Böden durch die sogenannte "Frostgare" aufgelockert sind. Verantwortlich hierfür ist die Veränderung des Wasserhaushaltes durch Oberflächenwässer und angesaugtes Grundwasser und die anschließende Volumenausdehnung des Wassers bei der Gefrierung. Mit der Frosthebung findet eine Veränderung der Kornstruktur statt, die auch durch die anschließende Tausetzung ohne weitere äußere Einwirkung, wie z. B. eine Auflast, i. d. R. nicht mehr vollständig rückgängig gemacht werden kann. Es ergibt sich somit eine Auflockerung des Bodens und damit eine Verkleinerung der Trockendichte der getauten Bereiche (RUCKLI 1950, BALDUZZI 1959, FGSV 1991, ISSMFE TC-8 1989 u. a.).

Auch wenn die Oberfläche gegen eindringendes Wasser geschützt ist, finden innerhalb des Bodens Veränderungen in der Wasserverteilung statt. Diese können in teilgefrorenen, feinkörnigen Böden in zwei Vorgänge unterteilt werden:

1. Transporte von Wasser in der ungefrorenen Zone vom warmen Ende der Probe in Richtung Frostfront und
2. Transport von ungefrorenem Wasser in der gefrorenen Zone von der Frostfront in Richtung kaltem Probenende.

Der Wassertransport steigt mit zunehmendem Ausgangswassergehalt, zunehmender Trockendichte und größerem Temperaturgradienten und sinkt mit zunehmender Gefrierate (XU XIAOZU et al. 1991). Einhergehend mit dem Ausgangswassergehalt und der stattfindenden Vergrößerung des Wassergehaltes durch den Antransport erfolgt die Frosthebung durch die Eisbildung und damit gegenläufig eine Verringerung der Trockendichte (HOEKSTRA 1969).

Ausnahmen bilden hier nur vorher sehr locker gelagerte Böden, bei denen durch die Vorgänge der Wasserströmungen und der Frosthebungs- und Tausetzungsbewegungen eine Verdichtung auftreten kann, und sehr wasserreiche Böden, die während der Frostphase eine Sublimierungsmöglichkeit und/oder während der Tauphase eine ausreichende Drainmöglichkeit besitzen und eine ausgeprägte Aggregation aufweisen (s. a. nächstes Kapitel 3.4.2 "Gefüge und Kornfraktionen"). So berichten VÄHÄÄHO et al. 1989 von einer 10% bis 15%-igen Steigerung der Trockendichte und 33% bis 40%-igen Verringerung des Wassergehaltes (Ausgangswassergehalt der in situ-Sonderproben ca. 100%) bei inaktiven Tonen (Tongehalt 82% - 96%, Tonminerale: Illit, Chlorit und Vermiculite).

CHAMBERLAIN/BLOUIN 1978 weisen auf die "Gefriertrocknung" und damit einhergehende Vergrößerung der Trockendichte durch Aggregation von Baggergut aus Wasserstraßen hin.

3.4.2 Gefüge und Kornfraktionen

Alle Forscher berichten über Beobachtungen, daß Frostdurchgänge in Böden material- und randbedingungsspezifische Änderungen in der Kornstruktur erzeugen (z. B. RUCKLI 1950, JESSBERGER 1971, ALKIRE 1980, YONG et al. 1982, ALKIRE/MORRISON 1983, DATSKO et al. 1983, SKARZYNSKA 1985, KUMOR 1989, VÄHÄÄHO et al. 1989, WOJTOWICZ 1989). Dies äußert sich, wie bereits erwähnt, in Frosthebungen. Diese zunächst nach dem Auftauen bleibende Vergrößerung des Volumens kann nur durch eine Umlagerung und Reorganisation der Feststoffpartikel erklärt werden.

Bei der Bildung von Eislinen in homogenen feinkörnigen Böden entstehen durch den Entzug von Wasser aus der direkten Umgebung der Eislinse trockenere Bodenbereiche, die durch den entstehenden Porenwasserunterdruck schrumpfen und dichter werden (BENOIT 1973, CHAMBERLAIN/GOW 1978, VAN VLIET-LANOË/DUPAS 1991). Der Vorgang der Vergrößerung der Trockendichte wird durch das Entstehen eines neuen mechanischen Korngerüsts durch die Feststoffpartikel in den "ausgetrockneten" Bereichen und durch den einzuhaltenden Gleichgewichtszustand bezüglich des möglichen Wasserentzugs begrenzt. Die entstandenen, in sich weitgehend homogenen Bodenbereiche werden i. a. als Aggregate bezeichnet und der Vorgang als Aggregation. Die Schrumpfung und der Zustand der Aggregate können mit einer Art Überkonsolidation verglichen werden, da aus den Aggregaten mehr Wasser entzogen wird, als dies dem aktuellen Spannungsniveau vor dem Gefrieren entspricht (VÄHÄÄHO et al. 1989). Nach dem Auftauen herrscht in den Aggregaten ein Porenwasserunterdruck (CHAMBERLAIN/GOW 1979, KUJALA/LAURINEN 1989), und zwischen den Aggregaten verbleiben Porenräume, die i. a. als Makroporen bezeichnet werden (STEPKOWSKA/SKARZYNSKA 1989). Nach OTHMAN et al. 1993 sind auch die Aggregate selbst teilweise von dünnen Trennflächen oder vergrößerten Porenräumen durchzogen, die mit Größen von $< 0,005$ mm nur in Rasterelektronenaufnahmen sichtbar werden.

Die Schrumpfung der einzelnen Aggregate kann die Volumenzunahme durch die Eis- und Eislinnenbildung i. d. R. nicht kompensieren, so daß das Gesamtvolumen größer wird (Frosthebung) und die Gesamttrockendichte des gefrorenen Bereichs sinkt. In der Literatur werden jedoch einige (nicht systematisch einzuordnende) Fälle berichtet, bei denen die Schrumpfung durch Wasserentzug in und unter der gefrorenen Zone die Frosthebung ausgeglichen hat (LEBEDENKO/SHEVCHENKO 1988 nach CHAMBER-

LAIN 1989). Die Größe und Form der Bereiche, die entwässert werden, ohne daß sie von einer neuen Eislinse bzw. von einem aus den Hydrathüllen entstehenden dünnen Eisfilm gespalten werden, hängt, wie die gesamte Eislinnenbildung, hauptsächlich von der Boden- bzw. Mineralart, der Ausgangsstruktur und -porengrößenverteilung, dem Ausgangswassergehalt, der Temperatur, der Gefrierdauer, -häufigkeit und -intensität ab (KUMOR 1989, STEPKOWSKA/SKARZYNSKA 1989, SCHABABERLE 1989, VAN VLIET-LANOË/DUPAS 1991, LUDWIG 1993). Die Angaben in der Literatur über die Einflußgröße der einzelnen Faktoren bei dem auch als Zerfrostung bezeichneten Vorgang sind mehr qualitativer Art und wenig umfangreich, da dieser Bereich noch nicht abschließend erforscht ist. Es lassen sich jedoch folgende Schlüsse ziehen:

Die einzelnen Aggregate werden kleiner und das entstandene polyedrische Frostgefüge ausgeprägter,

- je plastischer ein Boden ist, da diese Böden i. d. R. hohe Einbauwassergehalte verbunden mit niedrigen Durchlässigkeiten aufweisen.
- je undurchlässiger der Boden ist, da das Wasser nicht sehr weit zu einer wachsenden Eislinse transportiert werden kann und so eine größere Anzahl kleiner Eislinnen und Fissuren entsteht.
- je schneller die Frosteindringung ist, da hierdurch keine Zeit für die Bildung weniger großer Eislinnen verbleibt.
- je tiefer die Frosttemperatur ist, da bei tiefen Temperaturen mehr Wasser aus den Hydrathüllen kristallisiert und in bereits gefrorenen "ausgetrockneten" Bereichen neue Fissuren durch die Bildung neuer Eisfilme entstehen.
- je häufiger ein Frost-Tau-Wechsel stattfindet.

Die Entstehung dieses polyedrischen Frostgefüges bedeutet jedoch nicht automatisch einen Zerfall des Bodens nach dem Auftauen. So berichtet KUMOR 1989 über Versuche, bei denen gefrorene Bodenwürfel in ein Wasserbad gelegt wurden. Ein kaolinitischer Ton zerfiel dabei mit zunehmender Frost-Tau-Wechselanzahl unter Wasser immer schneller, während ein Bentonit ein fast entgegengesetztes Verhalten aufwies. Kumor führt dies auf das Quellverhalten des Bentonits zurück, der über eine lange Zeit zunächst als Bindemittel in den Fissuren und "frost cracks" wirkt, bevor durch das Überangebot an Wasser doch noch ein Zerfall auftritt. Dem Artikel kann die Art der Befrostung (ein- oder dreidimensional) und des Verdunstungsschutzes (Sublimation möglich?) leider nicht entnommen werden. STEPKOWSKA/SKARZYNSKA 1989 berichten ähnliches, weisen jedoch darauf hin, daß bei einem schluffigen Ton die größten Veränderungen bereits nach dem ersten Frost-Tau-Wechsel auftreten.

Neben dieser deutlich sichtbaren Erscheinung der Zerfrostung finden auch im nicht mehr sichtbaren Bereich, in der sogenannten Mikrostruktur, Veränderungen statt. Als prägnanteste Veränderungen werden die parallele Einregelung der Feststoffpartikel, eine Veränderung der virtuellen Korngrößen und die Erzeugung von Makroporen angeführt (DATSKO et al. 1983, STEPKOWSKA/SKARZYNSKA 1989, KUJALA/LAURINEN 1989, KUMOR 1989).

KUJALA/LAURINEN 1989 berichten von einer zu den Begrenzungen der Eislinsen parallelen Einregelung der plattigen Tonpartikel (Anordnung Face-to-Face), was zu der oben beschriebenen größeren Lagerungsdichte und zu einer kleineren Porosität führt. Sie führen dies auf das erhöhte effektive Spannungsniveau in den Aggregaten durch die Entwässerung zurück. Diese Beobachtung wird von zahlreichen Autoren bestätigt (KUMOR 1989, POREBSKA 1994). Nach WILLIAMS 1988 kommt es bei dem Wachstum der Eislinsen durch den Hebungsdruck zu weiteren Spannungserhöhungen.

Gleichzeitig wird die Struktur des Bodens durch mehrmalige Frost-Tau-Wechsel beeinflusst. Nach KUMOR 1989 hat die Frosthebung bei einer dreidimensionalen Gefrierung in einem starren Behälter bei einem Kaolinit bis zum fünften und bei einem Bentonit bis zum zehnten Frost-Tau-Wechsel zugenommen. Während sich bei dem Kaolinit zwischen der Frosthebung und der Tausetzung nach dem fünften Frost-Tau-Wechsel relativ konstante Werte eingestellt hatten, wurde die Tausetzung bei konstanter Frosthebung bei dem Bentonit immer kleiner, die Probe blieb nach dem Auftauen also immer größer. KUMOR 1989 führt dies auf ein Quellen des Bentonits durch das aus den Eislinsen freigesetzte Wasser zurück.

Mit zunehmenden Frost-Tau-Wechseln verändert sich auch die virtuelle Kornverteilung. Dies bedeutet, daß sich während der Gefriervorgänge innerhalb der Aggregate feinste Teilchen durch den Wasserentzug und die Überkonsolidation zu größeren Partikeln zusammenschließen, die auch nach dem Auftauen stabil bleiben und nur durch mechanische Arbeit (z. B. Vibration, Mahlen) oder sehr langes Wässern und Rühren getrennt werden können (YONG et al. 1982, DATSKO et al. 1983, SKARZYNSKA 1985, KUMOR 1989, STEPKOWSKA/SKARZYNSKA 1989). Dieser Effekt kann bei der Bestimmung der Korngrößenverteilung nach DIN 18 123 (wie bei tonsteinähnlichen Materialien) zu falschen Korngrößenverteilungen führen, wenn das Material nicht ausreichend lange aufbereitet wird. WOJTOWICZ 1989 berichtet über ähnliche Ergebnisse an einem Schluff (ca. $80\% 0,05 > d > 0,002$ mm, Hauptbestandteile: ca. 68% Quarz, Tonmineralanteil 8%, Illit), bei dem er allerdings neben einer Vergrößerung der Sandfraktion und einer Verkleine-

zung der Schluffanteile auch eine signifikante Vergrößerung der Tonanteile um ca. 3% festgestellt hat.

CHUVILIN/YAZYVIN 1988 (zitiert nach CHAMBERLAIN 1989) weisen darauf hin, daß die Größe von Mikroaggregaten (Konglomeraten aus mehreren Feststoffteilchen) durch eine schnelle Frosteindringung und tiefe Frosttemperaturen abimmt, bei einer langsamen Frosteindringung dagegen zunimmt. Dies stützt die These, daß bei einer Schockgefrierung das Wasser an seinem augenblicklichen Platz gefriert. Es erzeugt so fein verteilt viele dünne Eislinsen oder Eisfilme und damit ein Frostgefüge mit sehr kleinen Rasterabständen, in dessen Fissuren der Kontakt zwischen den Feststoffpartikeln unterbrochen wird. Bei einer langsamen Frosteindringung wird das Wasser langsam aus den umliegenden Bereichen "abgesaugt" und hinterläßt größere Bereiche, die durch den Porenwasserunterdruck und den Gefrierdruck komprimiert werden (vgl. auch Bild 14, Seite 44).

DATSKO et al. 1983 berichten u. a. auch über eine Vergrößerung des Feinkornanteils eines wassergesättigten Sandes und eine Stabilisierung dieses Vorganges nach etwa 50 Frost-Tau-Zyklen.

Aus diesen Erkenntnissen läßt sich ableiten, daß in Abhängigkeit von dem Ausgangszustand und den Gefrierbedingungen durch die Bildung virtueller Korngrößen und Aggregate (durch Zusammenschluß) bzw. feinerer Korngrößen (durch Trennung) ein materialtypisches Gefüge mit homogenerer Korn- und Porengrößenverteilung und frostresistenter Art entsteht. Der prinzipielle Vorgang mit den zu erwartenden qualitativen Auswirkungen ist in Bild 21 dargestellt.

3.4.3 Spezifische Oberfläche

Durch die dichtere Lagerung der Feststoffteilchen in den gefrorenen Zonen ergeben sich nach Frostdurchgängen im Boden kleinere meßbare spezifische Oberflächen (YONG et al. 1985, SKARZYNSKA 1985, VÄHÄÄHO et al. 1989). Das steht im Einklang mit der Beobachtung, daß sich bei Frostdurchgängen einzelne Bodenpartikel zu größeren Einheiten verbinden und eine gröbere virtuelle Kornverteilung bilden (SKARZYNSKA 1985).

Die Tendenz zu Verkleinerungen der Oberflächen sind nach YONG et al. 1985 in offenen Systemen ausgeprägter, eine Erklärung hierfür geben Yong et al. in ihrem Artikel jedoch nicht.

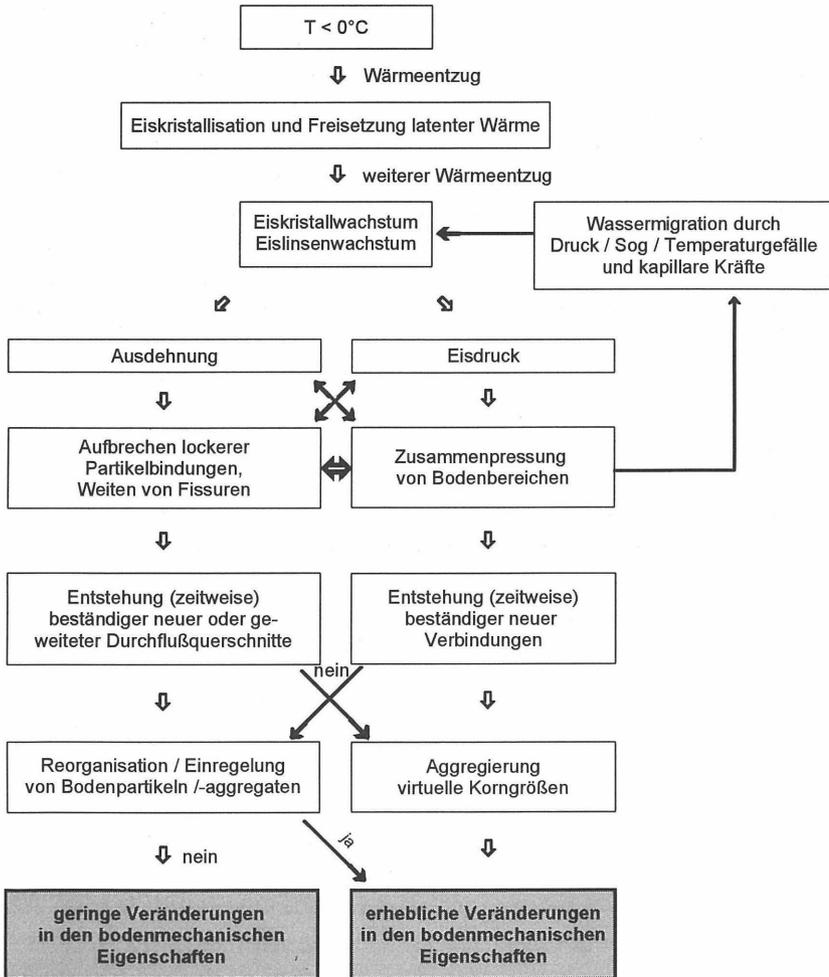


Bild 21: Ablaufschema zur prinzipiellen Wirkungsweise von negativen Temperaturen in bindigen Böden auf die bodenmechanischen Eigenschaften

3.4.4 Kationenaustauschkapazität

Die Kationenaustauschkapazität steigt mit größer werdender spezifischer Oberfläche. Demzufolge sinkt sie nach Frost-Tau-Wechseln im gleichen Maß wie die spezifische Oberfläche (YONG et al. 1985, VÄHÄHO et al. 1989, CHAMBERLAIN 1989).

3.4.5 Plastizität

Der bei bindigen Böden vom Wassergehalt abhängige Festigkeitszustand wird als Konsistenz bezeichnet. Mit abnehmendem Wassergehalt des Bodens geht bindiger Boden vom flüssigen in den bildsamen (plastischen), dann über den halbfesten in den festen Zustand über (DIN 18 122, Teil 1). Der plastische Bereich, der die Zustandsformen breiig, weich und steif beinhaltet, liegt dabei zwischen den sogenannten Konsistenzgrenzen w_p (Ausrollgrenze) und w_l (Fließgrenze) und wird nach DIN 18 122, Teil 1 durch die Plastizitätszahl $I_p = w_l - w_p$ [-] oder [%] beschrieben. Der Wassergehalt w_l (Fließgrenze) bestimmt bei feinkörnigen Böden nach DIN 18 196 den sogenannten Plastizitätsgrad:

$w_l < 0,35$	leicht plastisch
$0,35 < w_l < 0,5$	mittlplastisch
$w_l > 0,5$	ausgeprägt plastisch

Große Plastizitätszahlen weisen darauf hin, daß der Boden gegenüber Wassergehaltsänderungen weniger empfindlich ist; Böden mit kleinen Plastizitätszahlen ändern schon bei geringen Veränderungen des Wassergehaltes ihre Festigkeitsform.

Im Bereich des Deponiebaus werden neben der meist geringeren Durchlässigkeit auch aus baupraktischen Gründen Böden mit großen Plastizitätszahlen bevorzugt, da diese i. d. R. flachere Proctorkurven (DIN 18 127) ergeben. Damit können zum einen größere Schwankungsbereiche hinsichtlich der Einbauwerte des Materials zugelassen werden, was sich bei dem stark witterungsabhängigen Einbau des Materials positiv auf die Arbeitsleistung auswirkt. Im Gebrauchszustand der mineralischen Dichtung ist zum anderen bei diesen als plastisch bezeichneten Böden die Wahrscheinlichkeit der unschädlichen Aufnahme von Setzungen und Setzungsdifferenzen in den Dichtungsschichten durch die Auflast (Basisabdichtungen) und die Setzungen des Mülls (Oberflächenabdichtungen) größer. Aus diesem Grunde wird in einigen Richtlinien für mineralische Dichtungsmaterialien ein Mindestwert für die Fließgrenze gefordert (s. a. Tabelle 12, Seite 92). Veränderungen der Plastizität durch äußere Einwirkungen, wie z. B. Temperaturen oder durchströmendes Sickerwasser, sollten daher nach Möglichkeit vermieden werden.

Mit der auch nach dem Tauen verbleibenden Veränderung des Gefüges sowie der virtuellen Kornfraktionen und der Verkleinerung der spezifischen Oberflächen findet zugleich eine Veränderung der Atterbergschen Grenzen, insbesondere der Fließgrenze statt.

AOYAMA et al. 1985 und YONG et al. 1985 berichten übereinstimmend über eine stetige Verkleinerung der Fließgrenze bei hochplastischen sensitiven Tönen mit tieferer Frosttemperatur und begründen dies mit den im vorigen Abschnitt angegebenen Veränderungen. YONG et al. konnten jedoch für einen Kaolinton und einen Bentonit keine signifikanten Veränderungen feststellen. Sie verwiesen in diesem Zusammenhang darauf, daß ihrer Meinung nach nicht nur die mineralogische Zusammensetzung für die Unterschiede maßgeblich ist, sondern eine ganze Reihe anderer möglicher Faktoren (z. B. organische oder amorphe Gehalte, Art der Porenflüssigkeit, Korngrößenverteilung usw.). Dabei erhielten YONG et al. 1982 größere Abminderungen in offenen Systemen (Bild 22). Sie führen dies auf eine Konzentrationsverminderung von Ionen in der Porenflüssigkeit durch die Ausschwemmung während des Tauvorgangs zurück. Detaillierte Untersuchungen über die Abhängigkeit der Plastizität vom Ionengehalt zur Abklärung dieser These konnten nicht nachgewiesen werden.

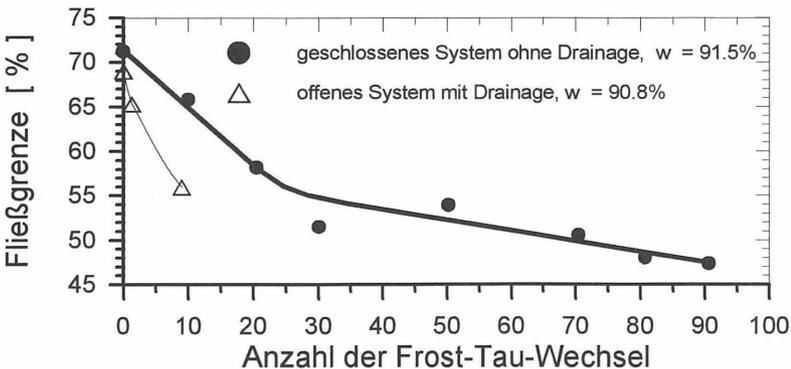


Bild 22: Veränderung der Fließgrenze mit zunehmender Zahl der Frost-Tau-Zyklen (nach YONG et al. 1982)

Reduktionen der Fließgrenze wurden auch von DATSKO et al. 1983 (für Ton ca. 12%), VÄHÄÄHO 1988, NAGASAWA/UMEDA 1985 und LUDWIG 1993 ermittelt. Über Veränderungen der Ausrollgrenze oder der Schrumpfgrenze gibt es nur wenige Angaben, die alle darauf hindeuten, daß diese beiden Zustandsgrenzen nicht verändert werden.

3.4.6. Wasserdurchlässigkeit

Die Veränderungen im Gefüge und den Mikrostrukturen während der Gefrier- und Tautvorgänge beeinflussen auch die Wasserdurchlässigkeit eines Bodens, im folgenden kurz Durchlässigkeit genannt. Die Mehrzahl der eingesehenen Veröffentlichungen beschreibt eine Vergrößerung der vertikalen Durchlässigkeit nach einem oder mehreren Frost-Tau-Wechseln (z. B. CHAMBERLAIN/GOW 1979, AOYAMA et al. 1985, NAGASAWA/UMEDA 1985, SEHRBROCK/RODATZ 1988, CHAMBERLAIN 1989, CZURDA/SCHABABERLE 1990, ZIMMIE/LA PLANTE 1990, KIM/DANIEL 1992, OTHMAN 1992 nach BENSON/ OTHMAN 1993, LUDWIG 1993, BENSON/ OTHMAN 1993, OTHMAN et al. 1993, SOWERS 1993); mit der horizontalen Durchlässigkeit befassten sich nur wenige Untersuchungen (CHAMBERLAIN 1980, CHAMBERLAIN 1989).

CHAMBERLAIN/GOW 1979 und CHAMBERLAIN 1989 geben für einen mittelplastischen, gesättigten Ton, der an der Fließgrenze gefroren wurde, eine Durchlässigkeitssteigerung von bis zu drei Zehnerpotenzen an; wurde der gleiche Ton an der Ausrollgrenze gefroren, ergab sich eine Steigerung von etwa einer Zehnerpotenz (Ausgangsdurchlässigkeiten $k \approx 1 \cdot 10^{-10}$ m/s). Vergleichbare Ergebnisse erhielten KIM/DANIEL 1992 für einen Ton (88% Ton und Schluff, 9% Sand, 3% Kies!) mit einer Steigerung um den Faktor 2 bis 6 auf der trockenen Seite der Proctorkurve und bis zu dem Faktor 100 auf der nassen Seite. MALCOLM PIRNIE 1989 (zitiert nach ZIMMIE/LA PLANTE 1989) geben für den nassen Ast der Proctorkurve Steigerungsfaktoren von ≈ 100 für 30 Frost-Tau-Wechsel an, für den trocknen Ast ≈ 10 (beide näherungsweise linear mit der Zyklanzahl steigend, Ausgangsdurchlässigkeit naß: $k \approx 6 \cdot 10^{-11}$ m/s, trocken: $k \approx 1 \cdot 10^{-10}$ m/s). Im Gegensatz hierzu ermittelten ZIMMIE/LA PLANTE 1990 für die trockene Seite leicht höhere Steigerungsfaktoren (Faktor ≈ 10 -15) als für die nasse (Faktor ≈ 10 , schluffiger Ton, $w_l \approx 39\%$, $w_p \approx 20\%$). Für verschiedene Böden und Auflasten geben CHAMBERLAIN/GOW 1979 die in Bild 23 dargestellten Steigerungen der Durchlässigkeit an.

NAGASAWA/UMEDA 1985 berichten über eine Steigerung der Durchlässigkeit einer ungesättigten Probe in der Größe einer Zehnerpotenz und weisen gleichzeitig darauf hin, daß die Steigerung der Durchlässigkeit mit tieferen Temperaturen zunimmt. Die größten Steigerungen wurden bei Böden mit geringen Plastizitäten festgestellt.

ORLOV/FURSOV 1988 (zitiert nach CHAMBERLAIN 1989), CHAMBERLAIN 1989, KIM/DANIEL 1992 und BENSON/OTHMAN 1993 heben hervor, daß die größten Veränderungen bei dem ersten Frost-Tau-Wechsel stattfinden und die Zuwächse progressiv abnehmen. Die Steigerungen sind nach dem 3. bis 5. Frost-Tau-Wechsel weitgehend abgeschlossen. Die Durchlässigkeitsveränderungen normal zur Frostrichtung sind ihren Ver-

suchsergebnissen zufolge jenen in Richtung der Frosteindringung vergleichbar, was auf eine sich räumlich ähnlich auswirkende Strukturänderung hinweist.

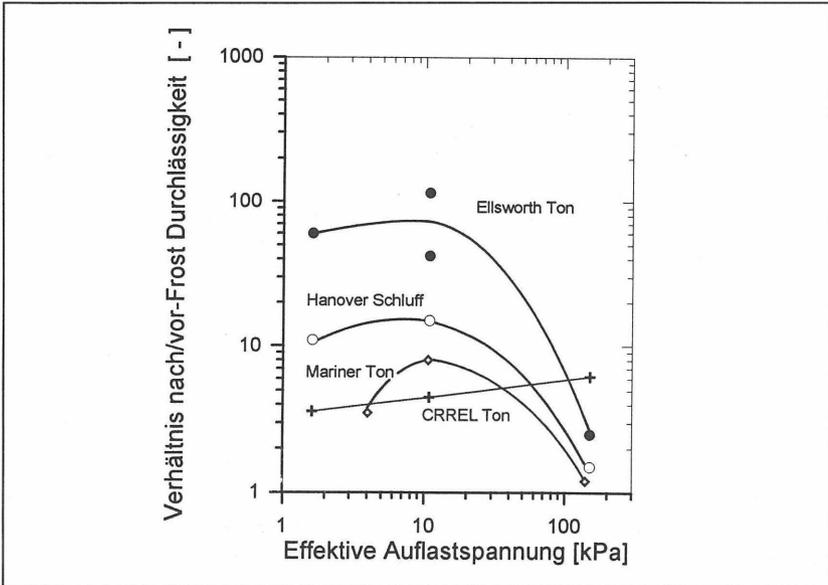


Bild 23: Verhältnis der Durchlässigkeit nach dem Tauen zur Ausgangsdurchlässigkeit im ungefrorenen Zustand (offenes System, Bodengefrierung, Oedometerdurchlässigkeit, nach CHAMBERLAIN/GOW 1979)

ZIMMIE/LA PLANTE 1990 wiesen mit ihren Versuchen ergänzend nach, daß bei ein- und dreidimensionalen Gefriervorgängen mit Materialien bei $w = w_{\text{opt}} \pm \approx 3\%$ tendenziell die gleichen Veränderungen stattfinden. Für Material auf der nassen Seite der Proctorkurve erhielten sie bei den dreidimensionalen Versuchen allerdings etwas geringere Steigerungsfaktoren (≈ 6 gegenüber 10 - 20) und insgesamt eine größere Streuung der Werte. Die Steigerungen waren bei den trockenen Materialien bereits nach dem ersten Frost-Tau-Wechsel in voller Größe ausgebildet und nahmen zum Teil nach mehreren Zyklen wieder leicht ab. Bei den Versuchen mit optimalem Wassergehalt und feuchter wurden progressiv abnehmende Steigerungen festgestellt. OTHMAN 1992 (nach BENSON/OTHMAN 1993) gibt an, daß kein Unterschied zwischen 1D- und 3D-Gefrierung besteht.

Auch wenn keine oder nur wenige Fissuren sichtbar sind, wurden von CHAMBERLAIN 1989 und NAGASAWA/UMEDA 1985 erhebliche Durchlässigkeitssteigerungen beobachtet. Sie führen dies auf die Bildung von Makroporen durch das partielle und innerhalb der

Aggregate stattfindende Schrumpfen des Bodens zurück, ohne daß es bereits zu flächenhaften sichtbaren Rissen kommt. Vor allem bei sandigen Schluffen und schluffigen Tonen schrumpfen die Tonanteile in den Porenräumen des Gerüsts der größeren Partikel und erzeugen so eine größere Porenzahl mit der damit verbundenen größeren Durchlässigkeit (OTHMAN et al. 1993).

Trotzdem gibt es zahlreiche Veröffentlichungen und Hinweise, die eine im wesentlichen unveränderte Durchlässigkeit auch bei voller und mehrmaliger Durchfrostung angeben (z. B. DAHMS 1985; KARCZMARZYK 1989, HUNSICKER 1987, STARKE 1989 nach OTHMAN et al. 1993, HÜTTEROTH 1992).

HUNSICKER 1987 (zitiert nach ZIMMIE/LA PLANTE 1990) hat für einen mit 95% der modifizierten Proctordichte eingebauten Ton mit einer Ausgangsdurchlässigkeit von $k = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s keine signifikanten Veränderungen bezüglich der Durchlässigkeit festgestellt, unabhängig von der Anzahl der Frost-Tau-Zyklen, der Frostrate oder des Temperaturgradienten und trotz des sichtbaren Auftretens eines Frostgefüges. Bei Versuchen an der Ausrollgrenze wurde kein sichtbares Frostgefüge beobachtet.

Eine Begründung für das unterschiedliche Verhalten ist aus den Literaturangaben über die Versuchsdurchführungen bisher nicht mit Sicherheit abzuleiten. Bemerkenswert ist jedoch die Tatsache, daß die Versuche von CHAMBERLAIN/GOW 1979 und CHAMBERLAIN 1989 in einem umgebauten Oedometer mit starren Wandungen durchgeführt wurden. Die bei der Schrumpfung der Proben während der Gefrierung entstehenden Fissuren und Makroporen stehen bei der anschließenden Durchströmung der Probe im Oedometer ohne Störung zur Verfügung, da die Probe nicht angetastet wird. Bei Durchlässigkeitsprüfungen an mit Ausstechzylinderproben aus dem Feld entnommenen Proben wird die Durchlässigkeit in der Mehrzahl der Fälle in einer Triaxialzelle mit flexiblen Wandungen geprüft. Bei dem Ausstechen der Probe und dem Einbau in die Triaxialzelle werden die entstandenen Froststrukturen durch eine nicht zu vermeidende mechanische Belastung und durch den anschließend aufgebrachten Seitendruck wieder zerstört. Die Fissuren werden durch den Seitendruck zusammengepreßt und die Makroporen teilweise unterbrochen, so daß insgesamt ein kleinerer Fließquerschnitt entsteht. Die Richtigkeit dieser Grundüberlegung wird durch die Tatsache belegt, daß man bei höheren Spannungsniveaus in einer Triaxialzelle bei der gleichen Probe kleinere Dichtigkeiten erhält, die bei einer anschließenden Druckreduzierung zumindest teilweise reversibel sind (KIM/DANIEL 1992).

Dies stützt auch die These der wegsamen Schrumpfrisse, die durch den erhöhten Druck weitgehend geschlossen werden. Eine spätere Müllauflast auf eine durch Frost in der

Durchlässigkeit beschädigte Abdichtung kann offensichtlich durch die Konsolidierung wieder eine Verringerung der Durchlässigkeit bewirken.

In diesem Zusammenhang ist noch zu beachten, daß auch unter der eigentlichen Frostzone in dem durch den Gefriersog "ausgetrockneten" Bereich Schrumpfrisse entstehen können. BENSON/OTTHMAN 1993 haben an einer Feldprobe aus einem solchen Bereich, die einen um 7% verringerten Wassergehalt aufwies, eine Durchlässigkeitssteigerung um den Faktor ≈ 10 ermittelt. Es ist zu erwarten, daß diese Steigerung bei einer stagnierenden Frostfront mit zunehmender Zeit größer wird.

3.4.7 Scherfestigkeit

Die Änderung der Struktur während der Gefriervorgänge hat zusätzlich einen Einfluß auf die Scherfestigkeit eines Bodens, die hauptsächlich durch die Änderung des Wassergehaltes und die Art der Aggregation bedingt ist. Sie kann bei feinkörnigen Böden, insbesondere aber Tonen, nach Frost-Tau-Wechseln entsprechend den Veröffentlichungen sowohl ansteigen als auch geringer werden.

Maßgeblich sind auch hier die Gefrierrandbedingungen und das resultierende Frostgefüge. Während die entstehenden einzelnen Aggregate infolge der geringeren Wassergehalte und der erhöhten Dichte an sich eine größere Festigkeit aufweisen, wird die Scherfestigkeit der Gesamtprobe vor allem von den mobilisierbaren Kontaktkräften zwischen den Aggregaten abhängen.

So haben BROMS/YAO 1964 in umfangreichen Versuchen festgestellt, daß die Bruchfestigkeiten von Proben mit hohen Gefriergraden und Proben, die in geschlossenen Systemen gefroren wurden, auch nach mehreren Zyklen Festigkeiten von ca. 50% bis 70% der ungefrorenen Vergleichsproben aufwiesen (UU-Versuche). Proben mit langsamen Frostraten und offenen Systemen kamen nach einem Frost-Tau-Wechsel nur auf Festigkeiten von 5% - 8%, nach mehreren Zyklen auf ca. 10% der Anfangsfestigkeit. Bei den CU-Versuchen wurden fast 90% des Reibungswinkels erhalten; die Kohäsion erreichte bei einer fast vollständigen Sättigung den Wert Null.

Ähnliche Ergebnisse erhielten SAGE/D'ANDREA 1982 bei Versuchen mit Schluffmaterial. Die Scherfestigkeit lag in den ehemals gefrorenen Bodenbereichen zwischen 9% und 19% der Ausgangsfestigkeit (offenes System mit Probensättigung vor Frostbeginn, UU-Versuche). WOOD 1976 (nach ALKIRE/JASHIMUDDIN 1984) gibt für einen gesättigten Ton in einem geschlossenen System eine Reduktion der undrainierten Scherfestigkeit auf etwa 2/3 der ungefrorenen Werte an. SHUSHERINA 1959 berichtet über abneh-

mende und zunehmende Scherfestigkeiten bei demselben Material in Abhängigkeit von den Drainagebedingungen (drainiert: höhere Festigkeiten).

THOMSON/LOBACZ 1973 geben ebenfalls für einen Schluff (Manchester Silt) direkt an der Taugrenze eine Abnahme des Reibungswinkels ($34^\circ \Rightarrow 30^\circ$, direkter UU-Scherversuch, Bruchwerte) und eine Zunahme der Kohäsion (1 kPa \Rightarrow 25 kPa) an. Anhand von Triaxialversuchen wiesen sie nach, daß bei ansonsten unveränderten Bedingungen die höhere Sättigung einer Probe eine Verkleinerung der Scherfestigkeit bei großen erforderlichen Wegen erbrachte. Bei Sättigungen $< 95\%$ war die Scherfestigkeit höher und wurde schneller aktiviert. Nach THOMSON/LOBACZ 1973 ähnelt das Verhalten bei Sättigungen $> 95\%$ einem undrainierten Zustand, der durch die Dilatation bei größeren Verschiebungen partiell drainiert wird und dadurch einen Festigkeitszuwachs aufweist.

Das Argument der Dilatation der vergrößerten virtuellen Korngrößen wurde auch von ALKIRE/MORRISON 1982 herangezogen, um zu erklären, warum bei ihren Versuchen mit einem dichtgelagerten Schluff und einem Ton sowohl nach einem Frost-Tau-Wechsel als auch nach wiederholten Belastungen vor der Brucherzeugung insgesamt höhere Festigkeiten gegenüber dem ungefrorenen Zustand bei kleinen Konsolidierungsspannungen gemessen wurden. Dabei steigert die wiederholte Belastung einer Probe die Scherfestigkeit um 20% bis 35%. Bei Befrostung mit anschließender wiederholter Belastung (600 Belastungszyklen) wurden allerdings verminderte Festigkeiten festgestellt, was auf einen erhöhten Porenwasserdruck zurückgeführt wurde.

GRAHAM/AU 1985 geben für aus ungestörten Bohrproben gewonnene Proben aus mittel- bis hochplastischem Material nach Frost-Tau-Wechseln in geschlossenen und offenen Systemen höhere Porenwasserdrücke im Bruchzustand, kleinere Steifemoduli und kleinere Scherfestigkeiten an. NAGASAWA/UMEDA 1985 berichten, daß die Scherfestigkeit mit zunehmender Frost-Tau-Zyklusanzahl abnimmt, und begründen dies mit den durch die wiederholten Zyklen "spröderen Brüchen" in den Aggregaten.

YONG et al. 1982 geben für einen sensitiven Ton eine drastische Reduktion der undrainierten Scherfestigkeit an und führen dies auf den Verlust der Kontakte zwischen den Tonpartikeln und eine Verkleinerung der Mikroaggregate zurück. Sie verweisen in ihrem Artikel auch darauf, daß die thixotropen Festigkeitseigenschaften von Tonen durch eine Frostbelastung ungünstig beeinflusst werden. Entsprechend der oben gemachten tonmineralogischen Ausführungen ist anzunehmen, daß mit der durch mehrere Frostzyklen steigenden Durchlässigkeit und zunehmender Frosttiefe innerkristallines Wasser abgezogen wird. Da die Schrumpf- und Quellvorgänge bei Tonmineralen eine Hysterese auf-

weisen, wird durch den Wasserentzug das Quellverhalten verändert. Sowohl NAGASAWA/UMEDA 1985 als auch YONG et al. 1985 haben ähnlich den Ergebnissen bei der Durchlässigkeit die größten Veränderungen in der Scherfestigkeit nach dem ersten Frost-Tau-Wechsel festgestellt; nach CHAMBERLAIN 1973 sind die größten Veränderungen in den ersten ein bis drei Frost-Tau-Wechseln zu erwarten.

Für einen hochplastischen alluvialen Ton haben OGATA et al. 1985 große Reduktionen der Scherfestigkeit ermittelt, solange die Konsolidierungsspannung kleiner war als die ursprüngliche Vorkonsolidierung. Bei einem mittelpplastischen Kaolinton ergaben sich Vergrößerungen, solange das Überkonsolidierungsverhältnis (OCR-Ratio) kleiner als 8 war. Bei beiden Böden wurden eine Erhöhung des inneren Reibungswinkels und eine Abnahme der Kohäsion festgestellt, insbesondere bei dem alluvialen Ton. Diese Veränderung der Scherparameter wurde auch von AOYAMA et al. 1985 an Tonen beobachtet; bei einer hochplastischen vulkanischen Asche war der Reibungswinkel allerdings nahezu unverändert. Sie stellten ergänzend fest, daß die Reduktion der Scherfestigkeit mit tieferen Temperaturen zunimmt und die Bruchform von spröde nach duktil wechselt. Auch CHUVILIN/YAZYININ 1988 ermittelten eine Steigerung der Scherfestigkeit bei Tonen. Sie begründeten dies ebenso wie OGATA et al. 1985 mit der Zunahme der Trockendichte während der Frost-Tau-Wechsel.

VÄHÄÄHO et al. 1989 berichten von in situ-Frostversuchen an einem finnischen Ton (Hauptbestandteile: Illit, Vermiculit und Chlorit). Sie ermittelten nach der ersten Frostperiode eine Abnahme der mit einer Flügelsonde ermittelten Scherfestigkeit auf 40% - 80%, nach der zweiten Frostperiode jedoch eine Zunahme auf ca. 100 - 180% der Ausgangsfestigkeit von 8 - 15 kPa. In einem anderen Feldversuch ergaben sich nach einem Frostdurchgang Vergrößerungen der Scherfestigkeit um 33% bis 60% in Verbindung mit einer Abnahme des Wassergehaltes um 30% bis 40% (Ausgangswassergehalte 40% bis 110%). Dabei wurde vor allem eine Erhöhung des Reibungswinkels und ein weitgehender Verlust der Kohäsion festgestellt.

BONDARENKO/SADOVSKY 1991 stellten einen deutlichen Abfall der Schubspannungen mit zunehmendem Wassergehalt fest. Dabei waren die Schubspannungen bei Ausgangswassergehalten in der Nähe der Ausrollgrenze bei ungefrorenen, tauenden und getauten Böden gleich groß; bei höheren Ausgangswassergehalten wies der ungefrorene Boden die höchste Schubspannung auf, gefolgt von dem getauten Boden. Der Auftauzustand besitzt die geringsten Werte, da die Drainage des Schmelzwassers nur nach einer Richtung erfolgen kann und somit hier sowohl die höchsten Wassergehalte als auch die größten Porenwasserüberdrücke entstehen. Der Abnahmefaktor der Schub-

spannung bei sandigem Lehm wurde von Bondarenko/Sadovsky gegenüber dem Wassergehalt an der Ausrollgrenze mit 0.25 bei $w \approx w_l$ im ungefrorenen Zustand, 0.17 bei aufgetautem Boden und 0.08 bei tauendem Boden angegeben. Dies ergibt bei einem Wassergehalt an der Fließgrenze eine Abnahme auf ungefähr 70% der Ausgangsfestigkeit des ungefrorenen Bodens.

ALKIRE/JASHIMUDDIN 1984 ermittelten in eigenen Untersuchungen und in einem Vergleich veröffentlichter Werte für einen bestimmten Boden (Manchester Silt), daß die Bruchscherfestigkeit (Flügelsonde) von den Sättigungs- und Strukturbedingungen abhängig ist und

1. bei teilgesättigten Proben aus geschlossenen Systemen ansteigt,
2. bei gesättigten Proben abfällt,
3. nach einem Frost-Tau-Wechsel in Frosteindringrichtung (meist vertikal) ansteigt (hier um ca. 20%),
4. nach einem Frost-Tau-Wechsel normal zur Frosteindringrichtung (horizontal, in Richtung der Eislinsen) abfällt (hier ebenfalls um ca. 20%).

In diesem Zusammenhang muß also beachtet werden, daß die Scherfestigkeiten von der Orientierung der Eislinsen abhängen können. So berichten auch SUSHERINA/TSYTOVICH 1967 (zitiert nach THOMSON/LOBACZ 1973) von Scherfestigkeitssteigerungen normal zur Hauptrichtung der Eislinsen um bis zu einem Faktor von 10 gegenüber dem ungefrorenen Zustand, während sich die parallele Scherfestigkeit wenig veränderte.

Entsprechend den Literaturergebnissen können Festigkeitszunahmen somit dann erwartet werden, wenn eine Konsolidierung stattfinden kann, die das Überschußwasser während des Auftauvorganges aus den Eislinsen drainiert und damit die Trockendichte zunimmt, oder wenn während der Frostphase Eis in die Umgebung sublimieren kann und damit die höhere Festigkeit der trockeneren Aggregate zum Tragen kommt. Festigkeitsverluste müssen dahingegen bei hoch vorbelasteten (überkonsolidierten) Tonen, bei Böden, die eine Verkittung aufweisen (z. B. durch Kalk), und bei solchen, die undrainiert tauen, erwartet werden. Hier wird der Festigkeitsverlust in den Kontaktflächen der Einzelaggregate wirksam.

3.4.8 Elektrische Leitfähigkeit und Konzentrationsveränderungen

Durch eine Gefrierung wird auch die elektrische Leitfähigkeit eines Tones verändert. Wie bereits beschrieben (s. a. Bild 7), dringt bei einer Befeuchtung Wasser zwischen die einzelnen Elementarschichten der Tone ein. Bei einer Gefrierung wird dieses durch den Ge-

friersog dem Molekül wieder entzogen. Dabei transportiert das abströmende intermolekulare Wasser auch einige der Zwischenschichtionen ab und verändert damit sowohl die Eigenschaften des Tones bezüglich der Quellfähigkeit als auch die Leitfähigkeit des Porenwassers. Dieser Vorgang ist während und nach dem Tauen nicht ganz reversibel, da die Ionen nicht in die überkonsolidierten, mit dünneren Hydrathüllen bestehenden Aggregate eindringen können (DATSKO et al. 1983, HANLEY/RAO 1980, RAO/HANLEY 1980).

YONG et al. 1982 berichten über eine abnehmende Konzentration löslicher Kationen (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) in der Porenflüssigkeit mit zunehmenden Frost-Tau-Wechseln. Als Begründung führen sie an, daß in den mit offenen Systemen gefahrenen Versuchen das abfließende Porenwasser die gelösten Kationen mit abtransportiert.

3.4.9 Zum Einfluß des Verdichtungsgrades

Bleiben alle anderen Parameter unverändert (Mineralogie, Wassergehalt und thermische Randbedingungen), so sind die Auswirkungen bei einer höheren Dichte größer (KIM/DANIEL 1992). Dies resultiert aus der Tatsache, daß für das gefrierende Wasser weniger Ausdehnungsraum in Form von Poren zur Verfügung steht und so mit kleiner werdendem Porenraum größere Hebungen verbunden sind.

OTHMAN 1992 (nach BENSON/OTHMAN 1993) gibt an, daß Böden mit modifizierter Proctordichte geringere Durchlässigkeitssteigerungen aufweisen als Böden mit Standardproctoreinbaubedingungen. Dieses Ergebnis dürfte trotz der höheren Dichte aus dem bei den modifizierten Proctorbedingungen erhaltenen geringeren optimalen Wassergehalt resultieren.

3.4.10 Zum Einfluß der Probenherstellung

Die Art der Probenherstellung hat unter Umständen einen verfälschenden Einfluß auf das erhaltene Gefüge. In der Literatur werden vor allem drei Verfahren zur Herstellung von Proben für Frostversuche beschrieben:

1. die Konsolidierung von Tonsuspensionen oder Tonschlammern,
2. die Gewinnung von ungestörten Bodenproben aus Bohrungen oder Schürfen und
3. die Verdichtung aufbereiteter natürlicher (stückiger) Materialien.

Die besten Proben hinsichtlich der Homogenität werden durch die Konsolidierung nach 1. erreicht. Dieses Verfahren ist jedoch sehr zeitaufwendig und beansprucht unter Umständen mehrere Monate bis Jahre der Probenvorbereitung. Die zweite Möglichkeit läßt

bei einem homogenen Vorkommen ebenfalls sehr gute Probenqualitäten erwarten, allerdings ist man sich evtl. Fehlstellen oder Einschlüsse vor Versuchsbeginn nie ganz sicher.

Die dritte Möglichkeit ist die wohl am weitesten verbreitete. Die Kompaktion wird i. d. R. mit den in den jeweiligen Ländern vorgeschriebenen Verdichtungsenergien mittels fallender Gewichte vorgenommen (Proctorbedingungen o. ä.). Hierfür wird das Material mit dem gewünschten Wassergehalt angemischt und in kleinen Aggregaten in mehreren Schichten in einen Topf eingebracht und lagenweise verdichtet. Bei nicht ausgeprägt feuchtem Material hat die Größe der einzelnen Aggregate eine entscheidende Bedeutung, da sie auch im verdichteten Zustand für das Auge nicht sichtbare Trennflächen bilden. Diese Trennflächen werden bei der Strukturbildung bevorzugt verwendet, da die "Verzahnung" der einzelnen Ton- und anderen Feststoffpartikel hier unvollkommen ist und größere Porenräume aufweist.

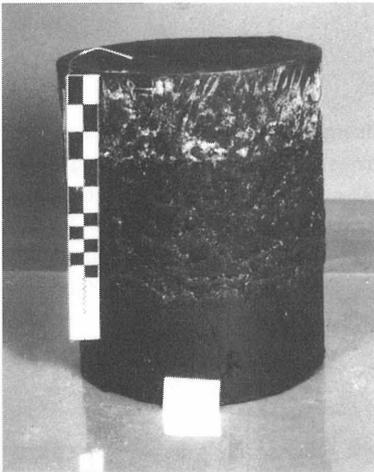


Bild 24: Beeinflussung der Frosteindringung und der Struktur durch die lagenweise Verdichtung bei der Herstellung. Links: Äußerlich unterschiedliches thermisches Verhalten zwischen zweiter und dritter Proctorlage (eindimensionale Gefrierung. Rechts: bevorzugte Zerfrostung an der Trennfläche zwischen zweiter und dritter Proctorlage (hier offene, dreidimensionale Gefrierung)

Besonders deutlich wird dies in den Trennflächen der einzelnen Lagen. Wird deren Oberfläche vor der Aufbringung und Verdichtung der jeweils nächsten Lage nicht aufgeraut, so ergeben sie durch die glatte Oberfläche (und wahrscheinlich parallele Anordnung zumindest der oberen Minerallagen) eindeutig erkennbare Trennflächen im Frost-

gefüge (Bild 24), die zu künstlichen Barrieren für die Wasserbewegungen werden. Diese Trennflächen sind auch sehr ausgeprägt, wenn die Oberflächen der Aggregate oder Lagen angetrocknet sind und so eine innige Verbindung nicht stattfindet (McCABE/KETTLE 1985). Nach BENSON/DANIEL 1990 ist die Durchlässigkeit bei auf der trockenen Seite der Proctorkurve verdichteten Böden bis zu einem Faktor von 10^6 (!) kleiner, wenn das aufbereitete Material statt aus Aggregatgrößen von 19 mm aus solchen von ca. 4,6 mm bestand. Auf der nassen Seite konnten Benson und Daniel keine signifikanten Unterschiede feststellen.

Einen weiteren großen Einfluß hat die Art der Kompaktion. Nach McCABE/KETTLE 1985 nimmt der Hebungsdruk bei Frostversuchen ab, wenn die Verdichtung statt mit fallenden Gewichten statisch pressend oder vibrierend erfolgt. Bei den Verdichtungsarten "statisch pressend" und "vibrierend" tritt bereits bei mittleren Wassergehalten während der Verdichtung Wasser aus der Probe aus. Bei der vibrierenden Verdichtung sind die einzelnen Lagen besonders deutlich auszumachen.

3.4.11 Zum Einfluß der Tonmineralart

Die Tonmineralart hat auf die Ausbildung des Gefriergefüges, die Eislinnenbildung und damit auch auf die mechanischen Eigenschaften eines bindigen Bodens den prägnantesten Einfluß. Dieser besteht darin, daß bei den verschiedenen Tonmineralarten infolge der mineralchemischen Gegebenheiten die Wasserwanderung zur Eislinne hin in den Hydrathüllen unterschiedlich ist, sie unterschiedliche innerkristalline Wasserpotentiale zur Freisetzung bei tieferen Temperaturen haben und die Wasserwiederaufnahmen (Quelleigenschaften) nach dem Auftauen nicht identisch sind.

Der Einfluß der Kationenbelegung bei den Tonmineralen wirkt sich wie folgt aus:

- a) Na^+ -Ionen führen zu einer relativ dicken Schicht gebundenen Wassers, das so wenig beweglich ist und den Boden so undurchlässig macht, daß eine Eislinnenbildung nur in begrenztem Umfang möglich ist (GRIM 1952). Das Wasser wird überwiegend in situ gefroren, was nach ENDELL et al. 1939 und CHUVILIN/YAZYININ 1988 zu einer ausgeprägten Aggregation führt. CZURDA/SCHABABERLE 1990 und LUDWIG 1993 führen aus ihren Versuchen an verschiedenen Bentoniten an, daß beim Na-Bentonit das durch den Gefrierprozeß erworbene Gefüge durch das Quellen während des Auftauvorganges größtenteils wieder rückgängig gemacht wird.
- b) Bei Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionen ist die Hydrathülle dünner. Eine Eislinnenbildung ist erst ab einem bestimmten (nicht angegebenen) Wassergehalt der Probe relevant (GRIM 1952). Infolge der geringeren äußeren Gesamtladung der Ca- und Mg-Bentonite las-

sen sie leichter einen Wasserfluß und damit eine Eislinnenbildung zu als Na-Bentone. Die Neigung zur Aggregation ist nach CHUVILIN/YAZYNIN 1988 aus diesem Grund geringer als bei Na^+ -Ionen.

- c) Bei K- und Fe-Ionen ist die Dicke der gebundenen Wasserschicht noch geringer als bei Ca- oder Mg-Ionen. Schon bei geringen Wassergehalten ist daher bewegliches Wasser vorhanden und eine Eislinnenbildung möglich (GRIM 1952).

Die Tonmineralarten Illit und Kaolinit lassen wegen der dünneren und weniger fest gebundenen Wasserhüllen größere Wasserbewegungen und damit ausgeprägte Eislinnenbildungen zu (ENDELL et al. 1939, GRIM 1952 nach JESSBERGER 1971, CZURDA/SCHABABERLE 1990, LUDWIG 1993).

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, daß das entstehende Frostgefüge in direktem Zusammenhang mit der Quellfähigkeit der Tonminerale zu sehen ist. Hoch quellfähige Tonminerale erzeugen ein ausgeprägt polyedrisches Frostgefüge. Die entstandenen Makroporen und Trennflächen bleiben zwar potentiell erhalten und werden bei späteren Befrostungen zunächst bevorzugt wiederverwendet, jedoch durch die nach dem Tauen wieder stattfindende Aufquellung und das Zusammenpressen infolge des Eigengewichts des Bodens zunächst weitgehend wieder geschlossen. Bei wenig quellenden Tonmineralien oder anderen feinkörnigen Materialien findet eine ausgeprägte Eislinnenbildung mit flankierender Aggregation statt. Da nach dem Auftauen die quellenden Bestandteile fehlen und das veränderte Korngerüst wegen des spröderen Verhaltens größtenteils erhalten bleibt, sind die Auswirkungen hinsichtlich der Durchlässigkeit größer.

Ergänzend soll angemerkt werden, daß nach Ansicht einiger Autoren die Tonminerale durch den Frost in ihrem Typus verändert werden können. So berichten z. B. DATSKO et al. 1983 über eine Veränderung der Tonmineralogie nach Frost-Tau-Wechseln. Bei einem polymineralischen Seeton mit hohen Anteilen an Montmorillonit und Kaolinit wurden nach 50 Frost-Tau-Wechseln eine Vergrößerung des mixed-layer-Anteils und weniger stabile Kristallstrukturen ermittelt. Diese Untersuchungen sind jedoch aufgrund der ungenauen quantitativen Bestimmungsmöglichkeiten von Tonmineralanteilen noch nicht abschließend anerkannt.

4 Eigene Versuche zum Verhalten von mineralischen Dichtungsmaterialien unter Frosteinwirkung

4.1 Allgemeines

Zum Zeitpunkt der ersten Beschäftigung mit der vorliegenden Thematik gab es in der nachweisbaren Literatur nur wenig Aussagekräftiges über die Frosteinwirkungen auf mineralische Deponieabdichtungsschichten, insbesondere im Hinblick auf die hohen Anforderungen bezüglich der Undurchlässigkeit. Dies betraf auch andere an eine Abdichtung zu stellende Anforderungen (z. B. die Standsicherheit). Die gesichtete Literatur enthielt zudem widersprüchliche Angaben. Diese Widersprüche bezogen sich sowohl auf Unterschiede zwischen Feld- und Laborversuchen und den dort gemachten Beobachtungen als auch auf Differenzen in den Ergebnissen der in den Laboratorien durchgeführten Untersuchungen.

Schlüssige Erklärungen über die unterschiedlichen Ergebnisse konnten seinerzeit ohne weitere Untersuchungen nicht gegeben werden. Die vorgefundenen Veröffentlichungen ließen jedoch den Schluß zu, daß sowohl die eingesetzten unterschiedlichen Materialien, die angelegten, zum Teil unzutreffenden und nicht vergleichbaren thermischen Randbedingungen als auch die jeweils angewandte Versuchstechnik zur Befrostung und anschließenden weiteren Untersuchung des Probenmaterials die Hauptgründe für die Unterschiede waren. Hinzu kam, daß die überwiegende Zahl der Untersuchungen aus anderen Beweggründen durchgeführt und die Ergebnisse anschließend auf die mineralische Abdichtung übertragen werden mußten. Im Bereich der Feldversuche konnten keine Untersuchungen über die Entwicklung der Temperaturen in der mineralischen Schicht eines bauseits fertig hergestellten Abdichtungssystems in Verbindung mit den erfolgten Veränderungen im mineralischen Material nachgewiesen werden.

Aus diesen Gründen sollten die eventuellen Veränderungen bei verschiedenen mineralischen Materialien in vergleichbar angelegten Feldversuchen bei gleichzeitiger Messung der klimatischen Einwirkungen in einer Winterperiode untersucht und Hinweise auf die Größe der Schutzfunktion der Drainageschichten gewonnen werden. Parallel sollten in Laborversuchen die grundsätzlichen Vorgänge bei der Gefrierung nachgewiesen und die Größe der Auswirkungen im Hinblick auf die Funktionsfähigkeit der Abdichtung ermittelt werden. Hierfür war im Gegensatz zu der überwiegenden Zahl der gesichteten Veröffentlichungen die spezielle Situation der Abdichtungsschicht als geschlossenes System zu berücksichtigen.

4.2 Auswahl und Beschreibung der eingesetzten Materialien

An die bei eigenen Untersuchungen im Feld und im Labor eingesetzten Böden wurden folgende Hauptanforderungen gestellt:

- Sie sollten, zumindest unter evtl. Zugabe von Bentoniten oder Tonmehlen, die Anforderungen für eine mineralische Abdichtung nach den gängigen Vorschriften erfüllen.
- Sie sollten ein möglichst weites Spektrum der grundsätzlich einsetzbaren Materialien umfassen. Aus diesem Grunde wurden sowohl Tone als auch gemischtkörnige Böden verwendet.
- Bei gleichen Körnungslinien sollte die tonmineralogische Zusammensetzung unterschiedlich sein.
- Sie sollten nach Möglichkeit bereits bei Baumaßnahmen verwendet worden sein.

Die wichtigsten Anforderungen bei der Auswahl eines mineralischen Abdichtungsmaterials sind entsprechend den einschlägigen Vorschriften in Tabelle 12 zusammengestellt, in Tabelle 13 sind die für die vorliegenden Fragestellungen wichtigsten Bodenkennwerte der ausgewählten Materialien enthalten.

Bei der allgemeinen Benennung wurden die auf den einzelnen Baustellen verwendeten Bezeichnungen beibehalten. Bei den Feldversuchen handelt es sich danach um einen Ton (Feld 1), einen Geschiebelehm (Feld 2), einen Geschiebemergel (Feld 3) und einen gebrochenen, in einem Kollergang aufbereiteten Tonstein (Feld 4). Im Labor wurden vornehmlich Tone untersucht und die Materialmatrix daher um zwei Tone (Laborboden 1 und Laborboden 2) ergänzt. Die Körnungslinienbereiche sind in Bild 25, die Proctorkurven in Bild 26 dargestellt. Bei den Proctorkurven wurde im Interesse der Übersicht nur die Sättigungslinie für eine Korndichte von $\rho_s = 2,75 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ eingezeichnet.

Die selbst ermittelten Materialparameter wurden teilweise durch die freundlicherweise von den einzelnen Eigen- oder Fremdüberwachern überlassenen Ergebnisse von Eignungsprüfungen und/oder Berichten zur Baustellenüberwachung ergänzt bzw. überprüft. Angegeben sind jeweils die gemittelten Werte. Die zur Klassifizierung der Materialien erforderlichen tonmineralogischen Untersuchungen wurden vom Institut für Geowissenschaften der TU Braunschweig durchgeführt und sind in Tabelle 14 enthalten.

Parameter	Anforderung	Quelle
Feinstkornanteil < 2 μm	≥ 20 Gew.-% ≥ 15 Gew.-%	TA Abfall RdErl. Nds.
Tonmineralanteil	≥ 10 Gew.-% ≥ 10 Masse-% ≥ 50 % des Feinstkornanteils	TA Abfall NRW-Richtl. RdErl. Nds.
organischer Anteil (fein verteilt)	≤ 5 Gew.-% ≤ 10 Masse-% bezogen auf den Feinkornbereich ≤ 15 Gew.-%	TA Abfall NRW-Richtl. RdErl. Nds
Kalziumkarbonatanteil	≤ 15 Masse-% ≤ 10 Masse-% bei kalkaggressivem Sickerwasser ≤ 20 Gew.-% i. M.	TA Abfall NRW-Richtl. RdErl. Nds.
Aggregatgröße	≤ 32 mm	TA Abfall NRW-Richtl. RdErl. Nds
Einbauwassergehalt	$w_{pr} < w < 0,95 w_{pr}$ (nasse Seite)	TA Abfall RdErl. Nds
Verdichtungsgrad	$D_{pr} > 95$ % $D_{pr} > 95$ % $D_{pr} > 95$ % und $n_a < 5$ %	TA Abfall RdErl. Nds NRW-Richtl.
Durchlässigkeit (im Labor)	$k \leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s (i=30) $k \leq 1 \cdot 10^{-10}$ m/s (i=30)	TA Abfall RdErl. Nds NRW-Richtl.
Plastizität	$w_L \geq 35$ %	NRW-Richtl.
Konsistenz	$0,75 \leq I_c \leq 1,0$	NRW-Richtl.
TA Abfall = TA ABFALL 1991, Anhang E, zugleich Teil der TA Siedlungsabfall 1993 NRW-Richtl. = NRW-RICHTL. 1993 RdErl. Nds = RDERL. NDS 1988		

Tabelle 12: Anforderungen verschiedener Vorschriften an ein mineralisches Dichtungsmaterial

Obwohl alle in den Feldversuchen verwendeten Böden auch für konkrete Deponiebauprojekte eingesetzt waren, erfüllten sie nicht alle immer sämtliche Anforderungen nach Tabelle 12. Sie wurden teilweise dennoch für die Laborversuche ausgewählt, um nach Möglichkeit eine weitgehende Rückkopplung zu den Feldversuchen zu gestatten.

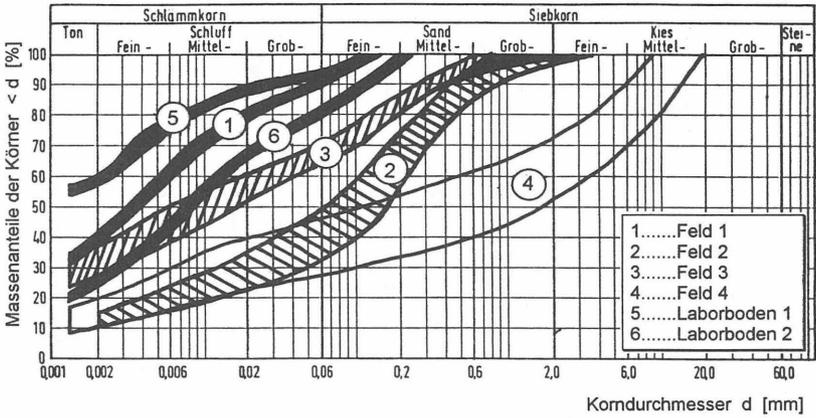


Bild 25: Körnungslinienbereiche der verwendeten Böden

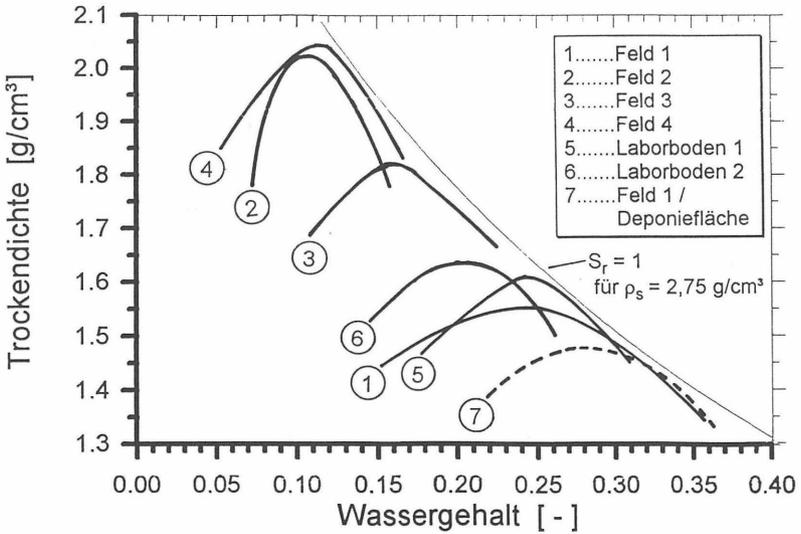


Bild 26: Proctorkurven der verwendeten Böden

Parameter		Feld 1 Ton	Feld 2 Geschiebe- lehm	Feld 3 Geschiebe- mergel	Feld 4 aufbereit. Tonstein	Labor <u>Boden 1</u> Ton	Labor <u>Boden 2</u> Ton	<u>Fläche 1</u> Ton
Interne Nomenklatur		I	WO	PS	PT	A	W	M
Bodengruppe n. DIN 18 196		TA	UL - UM	TM - TL	TL	TA	TM	TA
Überwiegendes Tonmineral (s.a. Tabelle 14)		Montm.	(Illit)	Illit+Montm	Kaolinit	Kaolinit	Montm.	Montm.
Korndichte	ρ [g/cm ³]	2,68	2,75	2,68	2,73	2,72	2,67	-
Proctordichte	ρ_{pr} [g/cm ³]	1,565	2,030	1,830	2,045	1,606	1,640	1,535
opt. Wassergehalt	w_{opt} [-]	0,24	0,105	0,155	0,120	0,243	0,205	0,245
95% Proctordichte	ρ_{95} [g/cm ³]	1,487	1,929	1,739	1,943	1,526	1,558	1,458
Wasserg. bei	w_{95} [-]	0,302	0,135	0,200	0,152	0,285	0,248	0,295
Fließgrenze	w_L [-]	0,669	0,236	0,353	0,320	0,592	0,490	0,641
Ausrollgrenze	w_p [-]	0,259	0,125	0,109	0,143	0,236	0,185	0,239
Plastizität	I_p [-]	0,410	0,111	0,244	0,177	0,356	0,305	0,402
Glühverlust	v_{gl} Gew.-%	7,0	3,6	2,3	5,0	0,356	6,0	4,81
Kalkgehalt (Scheibler)	v_{ca} Gew.-%	1,0	2,2	25,6	9,1		6,8	20,5
Wasseraufnahme	w_b [%]	81	58,6	69	63,5	86	73	69,3

Tabelle 13: Zusammenstellung der wichtigsten Materialparameter der bei den Feld- und Laborversuchen verwendeten Böden

[Gewichts-%] bezogen auf die Gesamtprobe	Feld 1	Feld 2	Feld 3	Feld 4	Labor	Labor	Fläche1
	Ton	Geschie- belehm	Geschie- bemergel	aufbereit. Tonstein	Boden 1 Ton	Boden 2 Ton	Ton
Tonmineralanteil der Tonfraktion	in 35	12	21	10	35	12	k. A.
Tonmineralanteil der Schlufffraktion	in 21	3	5	28	18	16	k. A.
Tonmineralanteil ges.	56	15	26	38	58	28	20
Montmorillonit und offener Illit	26,4	3,0	9,0	0,5	11,6	14,2	10
Illit	10,0	8,0	12,0	11,2	14,3	6,1	5
Kaolinit	19,6	4,0	5,0	24,3	32,1	7,7	5
Chlorit	-	-	-	2,0	-	-	-
Kalkanteil (Karbonat C)	1,7	4,8	20,9	4,0	3,1	8,4	14,5

Tabelle 14: Tonmineralogische Zusammensetzung der verwendeten Materialien

4.3 Feldversuche

Im Deponiebau wird jedes Jahr zu Beginn der Wintersaison die Frage nach einem ausreichenden Schutz der mineralischen Dichtungsschicht vor Frost gestellt. Die Angaben in der Literatur geben jedoch nur grobe Anhaltspunkte, insbesondere über die zu erwartenden Temperaturen in einer mineralischen Schicht in verschiedenen Aufbausituationen.

Zu Beginn der Untersuchungen bekannte Temperaturmessungen im Boden basierten i. d. R. auf anderen Randbedingungen als den im Deponiebau vorliegenden: in der Landwirtschaft und anderen allgemeinen Bodenoberflächen ist der Boden meistens ein lockeres Haufwerk mit großen Porenräumen oder undefiniert verdichtet. Er ist von oben potentiell durchlässig für Niederschläge, der zum Teil tiefreichenden Verdunstung ausgesetzt und, von Pflanzendecken abgesehen, ohne eine die Temperatur beeinflussende Deckschicht. Im Straßenbau liegen relativ wasserdichte Oberflächenmaterialien mit anderen physikalischen Kennwerten und Untergrundbedingungen vor.

Bei der Kombinationsabdichtung sind für die hier betrachteten Zeiträume weniger Monate oder Winterzeiträume zwei Besonderheiten zu beachten:

- Die fragliche Bodenschicht liegt durch den Einbau hinsichtlich Wassergehalt, Verdichtung, Partikelorientierung usw. in einem frisch aufgeprägten künstlichen Zustand vor, der erhalten werden soll, bei dem aber das Gleichgewicht zu den neuen (z. T. klimabedingten) Umgebungsbedingungen noch nicht wieder hergestellt worden ist.
- Die fragliche Bodenschicht besitzt in der KDB eine nach oben wirksame Abschottung gegen Feuchtigkeitseinträge oder -abtransporte mit allen Konsequenzen für den Feuchtigkeits- und Wärmehaushalt.

Aus diesen Gründen wurden zunächst als Datenbasis die Temperaturverläufe und die Eindringung von negativen Temperaturen in eine mineralische Dichtungsschicht an ausgeführten Abdichtungssystemen ermittelt. Untersucht wurden hierbei die verschiedenen Bauzustände

- nicht abgedeckte mineralische Oberfläche,
- aufgelegte KDB,
- aufgelegte KDB plus Schutzvlies sowie
- aufgelegte KDB plus Schutzvlies plus Drainageschicht.

Die Ermittlung der natürlichen Temperaturgradienten während der Frost- und Tauperioden diente auch der Überprüfung bzw. Festlegung der anzulegenden Temperaturgradienten für evtl. Laborversuche an mineralischen Materialien.

4.3.1 Konzeption der Versuchsfelder

Das vorherrschende Ziel bei der Konzeption der Versuchsfelder war die Beantwortung der Frage nach den im Winter zu erwartenden Temperaturen im mineralischen Material einer nach dem Stand der gängigen Ausführungspraxis der Jahre 1990/91 erstellten Kombinationsabdichtung. Zum Zeitpunkt der Planung der Versuche waren es vor allem Vliese, die in der Kombinationsdichtung als Schutzschicht für die KDB eingesetzt wurden. Sandschutzschichten oder andere Schutzmaterialien wurden daher - und aus Gründen der Begrenzung der Versuchsmatrix - zunächst nicht einbezogen.

Bei insgesamt fünf verschiedenen mineralischen Materialien an vier Standorten konnten an eigens hergestellten Versuchsfeldern, nicht mehr benötigten Probefeldern oder bestehenden Basisabdichtungen Temperaturmeßfühler in der mineralischen Schicht installiert werden. Die geographische Lage der Felder ist in Bild 27 eingezeichnet, das zugleich die Ausdehnung der Frosteinwirkungszonen zeigt.

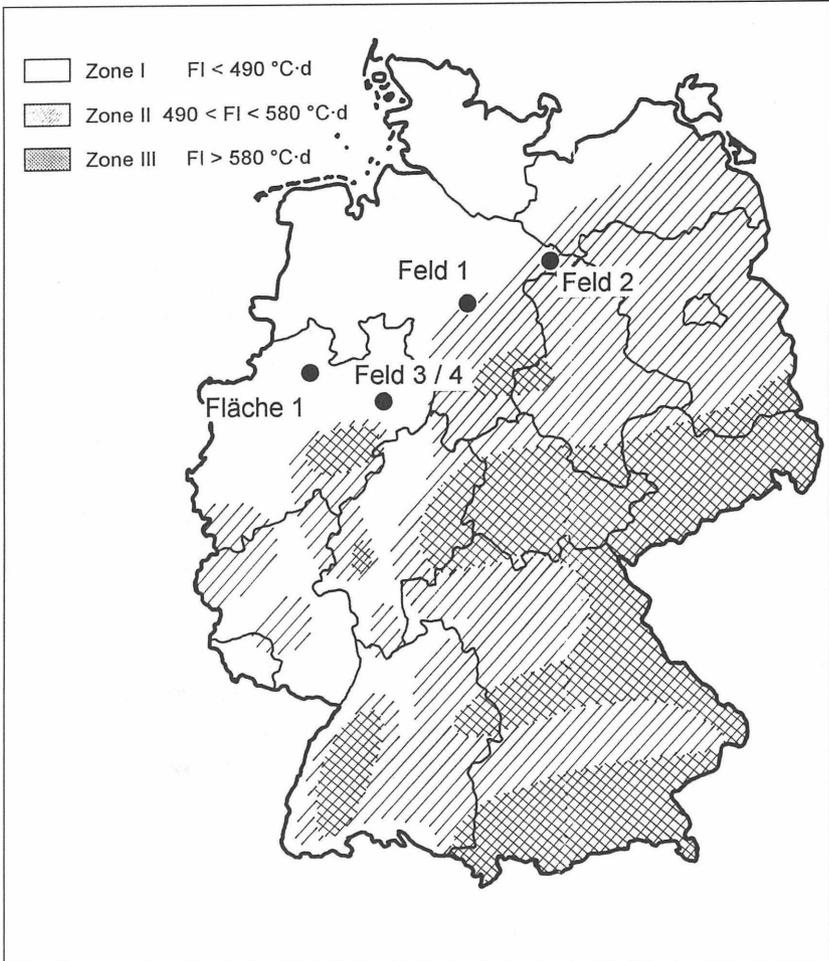


Bild 27: Die geographische Lage der Versuchsfelder und -flächen in Bezug zu den Frosteinwirkungszonen (FGSV 1991, BEHR 1984)

Die mineralischen Schichten der eigens hergestellten Versuchsfelder und der übernommenen Probefelder wurden oberflächlich leicht profiliert, damit evtl. Niederschlagswasser abfließen konnte und anschließend mit einer KDB (2,5 mm, beidseitig glatt) oder einer KDB mit aufgelegtem Vlies (2000 g/m²) abgedeckt. Die Hälfte des Feldes wurde anschließend mit Kiesschichten von ca. 35 cm bis ca. 60 cm Mächtigkeit überschüttet, die Seitenränder der KDB beschwert. Die einzelnen Schichtanordnungen und -mächtigkeiten zu Beginn der Messungen sind in der nachfolgenden Tabelle 15 enthalten.

Zusätzlich zu den Versuchsfeldern konnten in einer Winterperiode die Bodentemperaturen an einer teilweise erstellten Basisabdichtung (Fläche 1) bei den beiden Bauzuständen mit KDB/Vlies/Kies abgedeckte und freie mineralische Oberfläche gemessen werden (Tabelle 15, Reihe 5).

Ort	Material	Aufbau (ohne Maßstab)
Feld 1	Kreideton	<p>Kies 60 cm Vlies KDB min. Material 75 cm</p>
Feld 2	Geschiebelehm	<p>Kies 50 cm Vlies KDB min. Material 75 cm</p>
Feld 3	Geschiebemergel	<p>Kies 35 cm KDB min. Material 50 cm</p>
Feld 4	aufbereiteter Tonstein	<p>Kies 40 cm KDB min. Material 50 cm</p>
Fläche 1	Ton	<p>Kies Vlies KDB 30 cm min. Material 75 cm</p>

Tabelle 15: Übersicht über die Materialien, die Schichtanordnungen und -mächtigkeiten bei den Versuchsfeldern und -flächen

Ergänzend zu den Temperaturen in der mineralischen Schicht wurden auch die wesentlichsten Klimadaten zur Beschreibung der einwirkenden Klimabedingungen aufgezeichnet. Neben der Lufttemperatur wurden die Windgeschwindigkeit, die Globalstrahlung und die Luftfeuchte gemessen (s. a. Bilder 28 und 29).

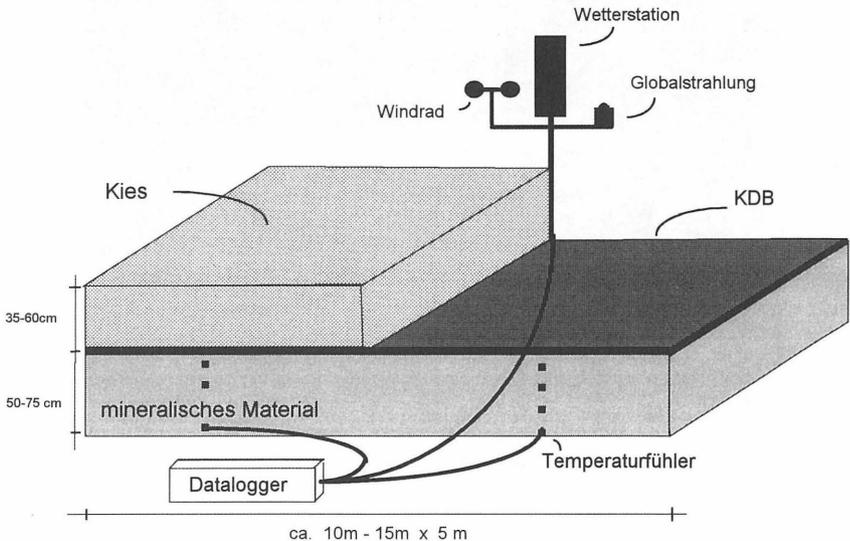


Bild 28: Prinzipskizze der angelegten Versuchsfelder

Die Untersuchungen sollten sich konzeptionsgemäß vor allem auf die Bauzustände konzentrieren, in denen die mineralischen Schichten mindestens mit einer KDB abgedeckt sind. Da eine ordnungsgemäß verlegte KDB ein Eindringen von Oberflächenwasser in die mineralische Schicht verhindert und somit die direkte Beeinflussung der Bodentemperaturen durch Niederschläge z. B. durch Versickerung als untergeordnet einzustufen ist, wurde die Messung der Regenmenge nicht vorgenommen. Dabei wird davon ausgegangen, daß größere Mengen an Wasser durch die Drainageschichten abgeführt werden. Dann steht dies näherungsweise im Einklang mit den meisten Untersuchungen zum Wärmehaushalt an Straßenoberflächen, nach denen der energetische Gewinn durch die vor allem nachts erfolgende Kondensation von Wasser an der Oberfläche durch die bei Sonnenaufgang beginnende Verdunstung wieder kompensiert wird (ARAND et al. 1989).

Das zweite Ziel der Versuchsfelder war die Ermittlung der evtl. Veränderungen von bodenmechanischen Kennwerten nach einer Frostbelastung. Hintergrund ist die Frage, ob

nach einem oder mehreren Frostdurchgängen die Qualität der mineralischen Schicht in größerem Ausmaß beeinträchtigt ist.



Bild 29: Versuchsfeld 2 während der Einrichtung

Zu diesem Zweck wurden vor und nach dem Winter Ausstechzylinderproben nach DIN 18 125, Teil 2 entnommen und nach der optischen Ansprache hinsichtlich Dichte, Wassergehalt, Durchlässigkeit und mechanischer Festigkeit untersucht.

4.3.2. Installierte Meßeinrichtungen und Meßprogramm

Die Bodentemperaturen und Klimadaten wurden in den einzelnen Feldern in den in Tabelle 16 aufgeführten Tiefen- bzw. Höhenlagen gemessen. Zur Verfügung standen bei den eingesetzten Dataloggern neben den Wetterdaten 12, wenn keine Wetterdaten gemessen wurde, insgesamt 16 Bodentemperaturkanäle. Sie wurden so angeordnet, daß insbesondere die Temperaturen im oberen Bereich der mineralischen Schicht möglichst engmaschig erfaßt werden konnten. Hier war auch auf eine gewisse Redundanz zu achten, so daß bei dem Ausfall eines Fühlers keine zu großen Meßlücken entstehen konnten.

Als Bezugsgröße für alle Höhenangaben wurde die Fuge zwischen der Oberkante der mineralischen Schicht und der KDB gewählt.

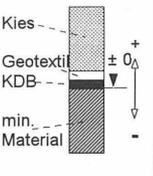
	Boden- temperaturen freie Ober- fläche [cm]	Boden- temperaturen KDB / Vlies ohne Kies [cm]	Boden- temperaturen KDB / Vlies mit Kies [cm]	Luft- temperatur Luftfeuchte Wind [cm]	Global- strahlung [cm]
Feld 1	-	bis ab 8.10.92 ± 0 ± 0 -10 - 5 -20 -10 -24 -17,5 -31 -25 -47 -45 -65 -65	bis ab 12.5.93 - 3 ± 0 - 7 - 5 -14 -10 -27 -20 -43 -40	+ 130	+ 50
Feld 2	-	± 0 - 5 -10 -17,5 -25 -45 -65	± 0 - 5 -10 -20 -40	+ 170 Wind + 250	+ 50
Feld 3	-	± 0 - 5 -10 -15 -20 -30 -40 -60	± 0 - 5 -10 -15 -20 -30 -40 -60	aus Feld 4	aus Feld 4
Feld 4	-	± 0 - 5 -10 -17,5 -25 -45 -65	± 0 - 5 -10 -20 -40	+ 150	+ 50
Fläche 1	- 5 -10 -15 -20 -30 -50 -75	-	± 0 - 5 -15 -40	+ 200	+ 50

Tabelle 17: Höhenmäßige Anordnung der Meßpunkte in den Feldern und Flächen

Für die Registrierung und Speicherung der zu messenden Daten wurden akkubetriebene Datalogger nach Dr. Weihofen der Fa. Thies, Göttingen, verwendet. Diese Datalogger gestatten die Abspeicherung der Meßwerte als Mittel einer zu wählenden Zeitspanne zwischen 1 und 60 Minuten auf auswechselbaren Eproms. Das Mittel wird dabei aus den alle 15 Sekunden abgefragten Meßwerten als arithmetisches Mittel über die gewählte Zeitspanne gebildet.

Als Kompromiß zwischen dem Wunsch nach möglichst kontinuierlicher Registratur der Meßwerte, der Speicherkapazität der Eproms und dem zu erwartenden Datenhandling wurde als Abspeicherintervall der Mittelwert einer halben Stunde gewählt. Mit den somit 48 Meßwerten pro Kanal und Tag können auch kurzfristige Änderungen im Wettergeschehen und den Temperatur- bzw. Meßwertganglinien ausreichend dokumentiert werden. Dies ist vor allem bei gering thermisch wirksamen Schutzlagen für die Erklärung einiger Phänomene der oberen Temperaturfühler hilfreich gewesen.

Die Speicherkapazität der Eproms beträgt mit der gewählten Speicherfrequenz bei den Dataloggern mit gleichzeitiger Registratur der Wetterdaten ca. 36 Tage; sind nur Bodentemperaturfühler angeschlossen ca. 38 Tage. Es empfiehlt sich jedoch eine häufigere Überprüfung, um Datenverlustzeiträume möglichst gering zu halten. Die auf den Eproms gespeicherten Daten werden nach dem Auswechseln über ein Lesegerät und die entsprechende Software des Herstellers auf einen PC ausgelesen und zur Weiterverarbeitung in den ASCII-Code transferiert (s. a. Bild 30).

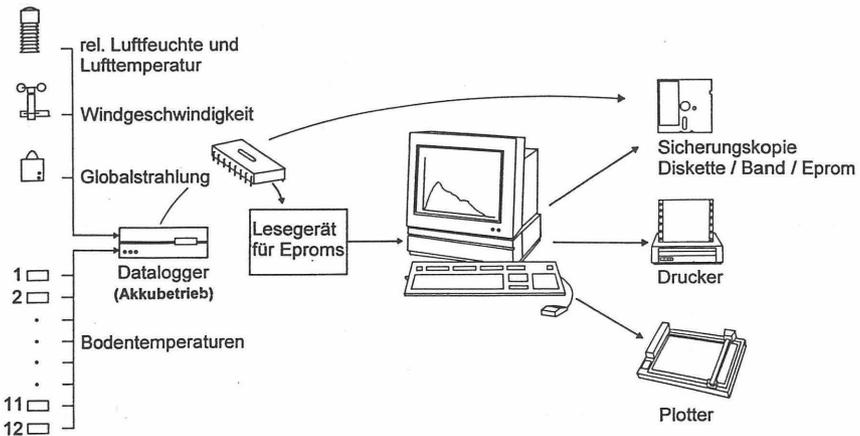


Bild 30: Übersicht über die Meß- und Auswertekette

Einzelne fehlende oder falsche Meßwerte wurden dabei von Hand korrigiert, soweit die Datenlücken eine sinnvolle und eindeutige Ergänzung gestatteten. Das weitere Datenhandling und die Darstellungen wurden mit den Programmen Quattro-Pro und Grapher durchgeführt.

Falsche oder fehlende Werte traten vereinzelt vor allem im Hochsommer bei sehr hohen Temperaturen und starken Sonneneinstrahlungen auf, während in kälteren Zeiträumen nur wenige gerätebedingte Datenverluste zu verzeichnen waren. Bei weiteren Messungen ist es daher ratsam, noch mehr Augenmerk auf den Schutz des Dataloggers zu legen. Dies betrifft vor allem den Wärmeschutz mit der Empfehlung, für eine ausreichende Ventilation zu sorgen. Einige der Datalogger waren an der Seite der Felder in Erdbodenhöhe angebracht und zum Schutz gegen Tiere und Regen mit einer schwarzen KDB abgedeckt. Dies hat bei starker Sonneneinstrahlung offenbar zu einem Hitzestau geführt. Gegen Feuchtigkeit und Kondenswasser im Gerät wurde erfolgreich eine Einlage aus hygroskopischer Katzenstreu in einem Filterpapierbeutel verwendet.

Die eingesetzten Meßgeber weisen folgende technische Daten auf:

Meßgeber	Bezeichnung	Meßbereich	Auflösung des Gebers	zul. Abweichung	kleinste Differenz im ASCII-Code
Lufttemperatur	Siemens Heißeiter M847/X3/5K	-25 ... +50°C	± 0,1 K	± 0,2 K	± 0,3 K
Bodentemperatur	Siemens Heißeiter M847/X3/5K	-25 ... +50°C	± 0,1 K	± 0,2 K	± 0,3 K
Luftfeuchte	Thies Haarhygrometer 1.1005.51912	10 ... 100 % rel. Feuchte	± 0,2 % rel. Feuchte	± 2 % rel. Feuchte	± 1 % rel. Feuchte
Windgeber	Thies Kleinwindgeber 4.3711.30.000	0,5 ... 35 m/s	± 0,2 m/s	± 0,05 m/s	± 0,01 m/s
Globalstrahlung	Siemens Siliziumfotoelement TP60P	0,4 ... 1,1 µm	± 5 W/m ²	± 10 W/m ²	± 5 W/m ²

Tabelle 18: Technische Daten der eingesetzten Meßgeber

4.3.3 Ergebnisse der Temperaturmessungen

4.3.3.1 Langfristige Veränderungen

Die Messungen der Bodentemperaturen und der Klimawerte konnten über einen Zeitraum von zwei Jahren zwischen dem Herbst 1991 und dem Spätsommer 1993 durchgeführt werden.

In den Bildern 31 bis 33 sind beispielhaft die Tagesmittelwerte der Luft- und Bodentemperaturen, der Globalstrahlung und der Windgeschwindigkeit aus Feld 4 für den gesamten Meßzeitraum dargestellt. Die Balken am unteren Rand der Grafiken stellen maßstabsgerecht die Größe der täglichen Schwankungsbreiten als Differenz zwischen Temperaturmaximum und Temperaturminimum dar. Die während des gesamten Meßzeitraums in jeder Tiefe maximal gemessene Tagesschwankung ist explizit mit angegeben. Die Ganglinien der Tagesmittel aller Felder und Meßstellen über die gesamten Meßzeiträume sind in den Anlagen 1 bis 12 enthalten. Für die Winterzeiträume sind die Meßwerte in einem größeren Maßstab in den Anlagen 13 bis 36 dargestellt.

In allen Temperaturganglinien ist der jährliche sinusförmige Gang zwischen Winter und Sommer deutlich erkennbar. Wie zu erwarten, nehmen sowohl die jährlichen als auch die täglichen Schwankungen mit zunehmender Tiefe ab. Die Amplituden werden kleiner; die Ganglinien werden ausgeglichener. Mehrtägige markante Klimaveränderungen sind jedoch, abgeschwächt und zeitverzögert, auch bei den tieferen Temperaturfühlern und unter den Kiesschichten erkennbar.

Bei allen Temperaturganglinien kommt der insgesamt als kühl und naß empfundene Sommer 1993 durch niedrige Durchschnittstemperaturen und Maximalwerte gegenüber dem Vorjahr auch zahlenmäßig zum Ausdruck. Auch die einstrahlende Energie in Form der Globalstrahlung (Bild 33) weist 1993 gegenüber dem Sommer 1992 geringere Werte auf. Dies führt vor dem Winter 1993/94 im Vergleich zum Vorjahr zu allgemein niedrigeren Ausgangstemperaturen, so daß gleiche Frostereignisse durch die schnellere Erreichung der Frostgrenze bzw. eine tiefere Eindringung größere Auswirkungen aufweisen werden.

Die folgenden Bilder 34 bis 38 und Tabellen 19 bis 23 enthalten jeweils für die Winter- und Sommerhalbjahre die tiefsten bzw. höchsten Temperaturen in den einzelnen Tiefen. Als Summenindikator ist für die Winterhalbjahre in den Tabellen die Frostsumme [°C-d] und die Anzahl der Frosttage mit angegeben. Die Halbjahre wurden auf die Zeiträume 1. November bis 30. April für das Winterhalbjahr und 1. Mai bis 31. Oktober für das Sommerhalbjahr festgelegt. Die Festsetzung beruht sowohl auf Angaben von HADER 1982

als auch auf den Ergebnissen der Temperatúrauswertungen für die Frostsummen an zwei Standorten über 40 Jahre (z. B. Bild 39, Seite 116), bei der außerhalb dieses Zeitraumes nur vereinzelte Frosttage festgestellt wurden. Dies betrifft dann vor allem die letzten Oktobertage, die jedoch meist nur aus leichten und kurzen Nachtfrösten (oft Strahlungsfröste) bestehen.

Aus den Darstellungen läßt sich ableiten, daß eine mineralische Schicht, die nur durch eine KDB abgedeckt ist, naturgemäß die größten täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen aufweist. Sowohl im Sommer als auch im Winter kann, bedingt durch die Globalstrahlung und die Absorptionsfähigkeit der schwarzen KDB, die Temperatur unter der KDB wesentlich höher liegen als die Lufttemperatur (s. a. Bilder 36 und 38 bei der Sommertemperatur ohne Kies und Bild 42, Seite 119). Zwischen der Lufttemperatur und der Temperatur unter der KDB wurden Differenzen von bis zu $+10^{\circ}\text{C}$ bei den Tagesmitteln und bis zu $+15,2^{\circ}\text{C}$ als Differenz der halbstündigen Meßwerte gemessen.

Die Größe der Differenz hängt dabei neben der Ausbildung der KDB von der Wärmeleitfähigkeit des mineralischen Materials und der Aufwölbung der KDB ab. Ohne Auflast kann nicht verhindert werden, daß die KDB infolge der Wärmeausdehnung eine Wellenbildung aufweist, die unter Umständen dazu führen kann, daß zwischen der KDB und dem im mineralischen Material eingebetteten Temperaturfühler zeitweise eine isolierende Luftschicht entsteht. Es muß daher davon ausgegangen werden, daß die Differenzen noch größer werden können.

Eine große Wärmeleitfähigkeit des mineralischen Materials kann die Differenz durch Ableitung von Wärme in die Tiefe mindern. Ein signifikanter Unterschied bei den direkt benachbarten Feldern 3 (Geschiebemergel) und 4 (aufbereiteter Tonstein) konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

Feld 4

Tagesmittel und tägliche Schwankungen

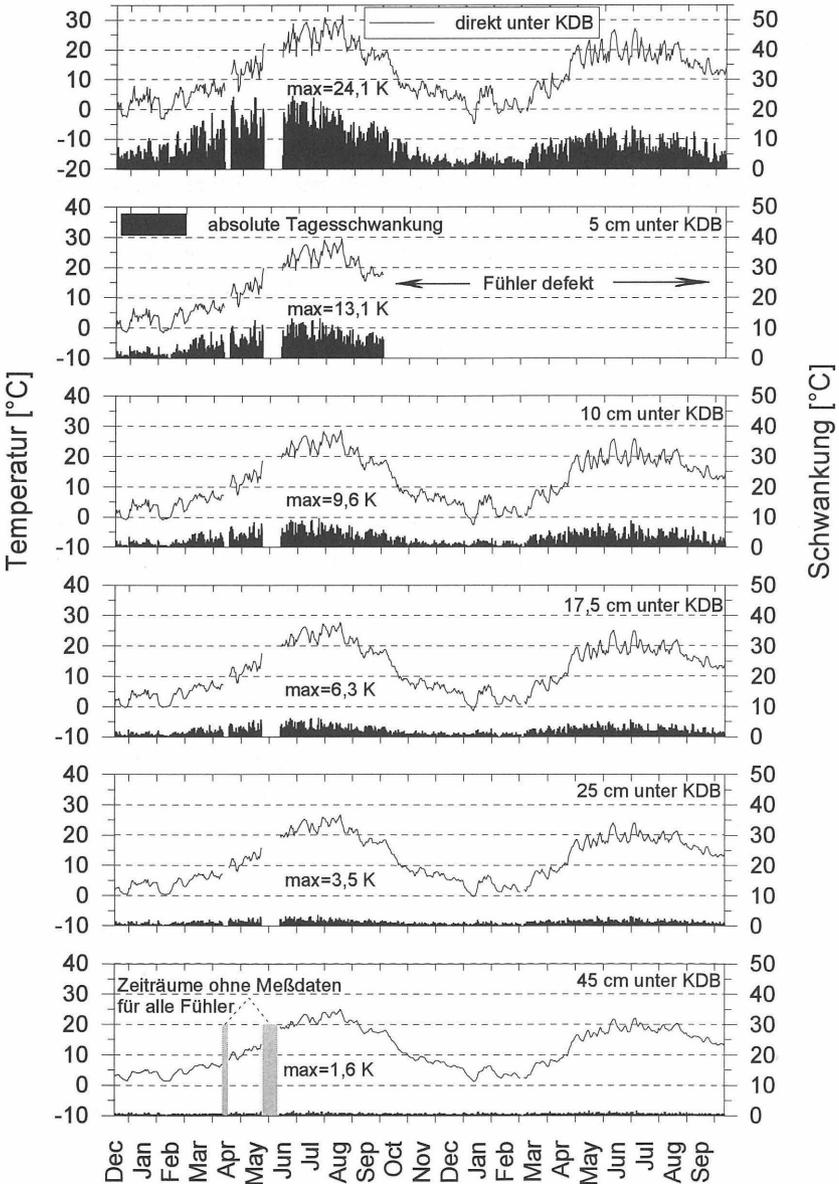


Bild 31: Tagesmitteltemperaturen und tägliche Schwankungsbreiten aus Feld 4 (Aufbau nur KDB ohne Vlies und ohne Kiesabdeckung, 12.1991-10.1993)

Feld 4 Tagesmittel und tägliche Schwankungen

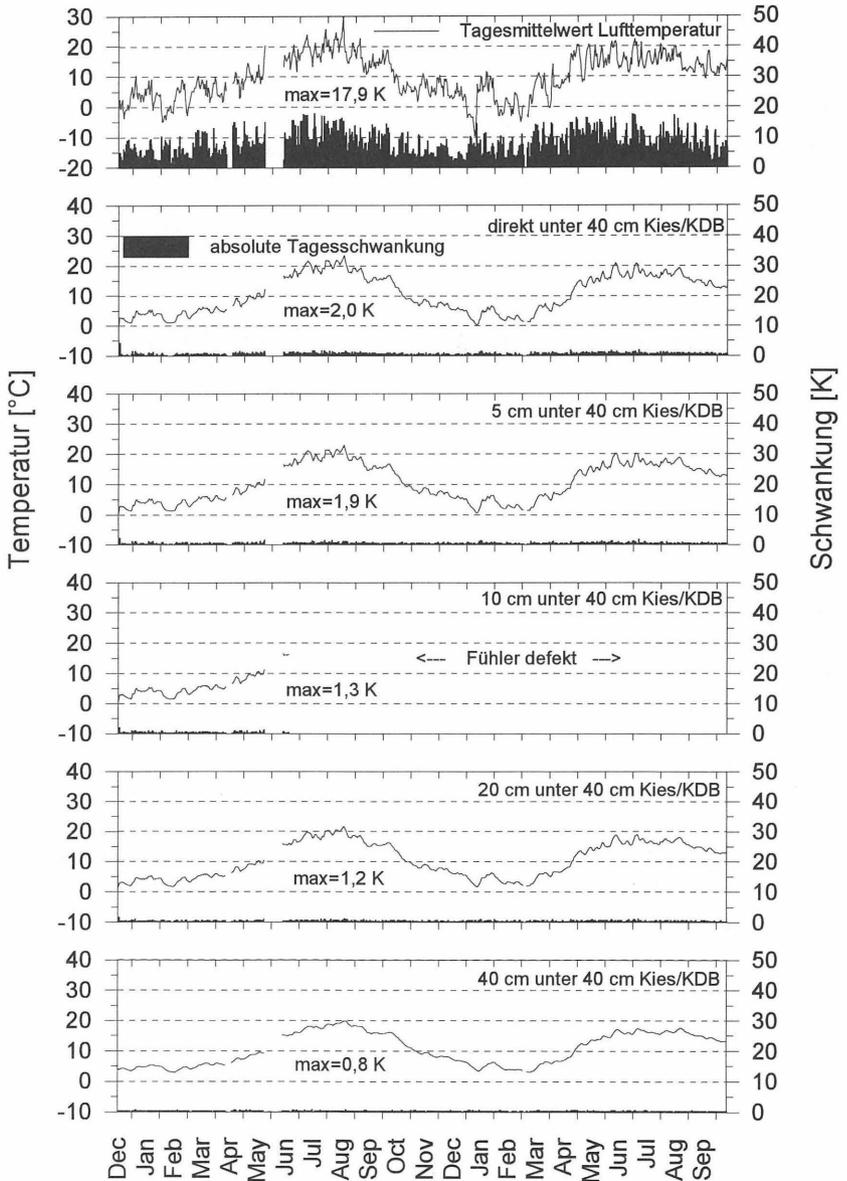


Bild 32:

Tagesmitteltemperaturen und tägliche Schwankungsbreiten aus Feld 4
(Aufbau mit KDB und 40 cm Drainagekies, Zeitraum 12.1991 - 10.1993)

Feld 4

Tagesmittel und tägliche Schwankungen

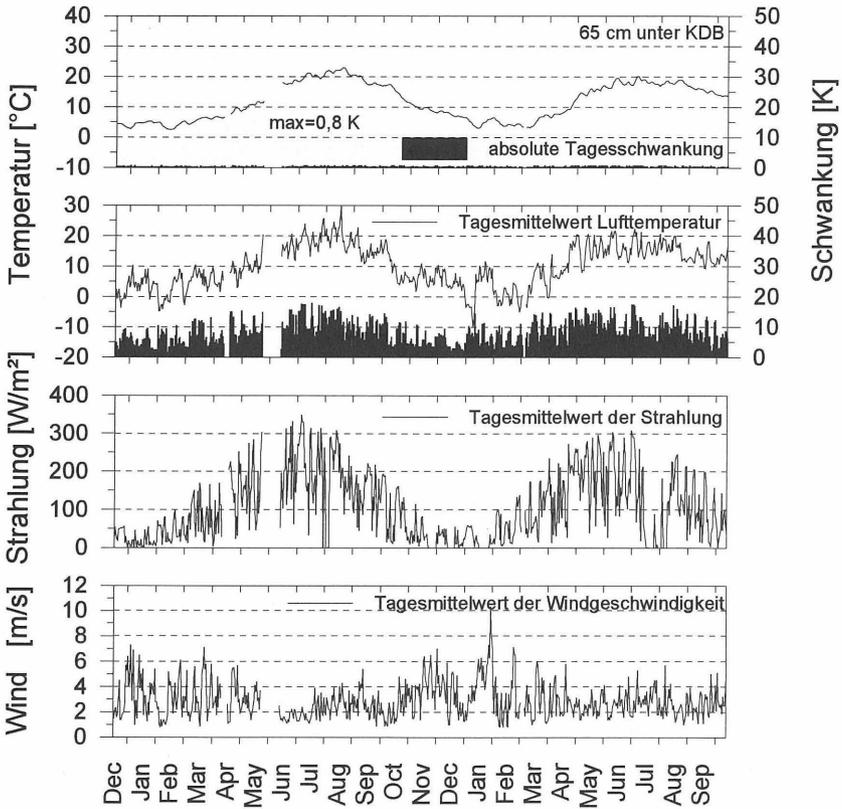


Bild 33: Tagesmittelwerte und Schwankungsbreiten von Temperaturen sowie Tagesmittelwerte der Globalstrahlung und der Windgeschwindigkeit aus Feld 4
Zeitraum: Dezember 1991 bis Anfang Oktober 1993

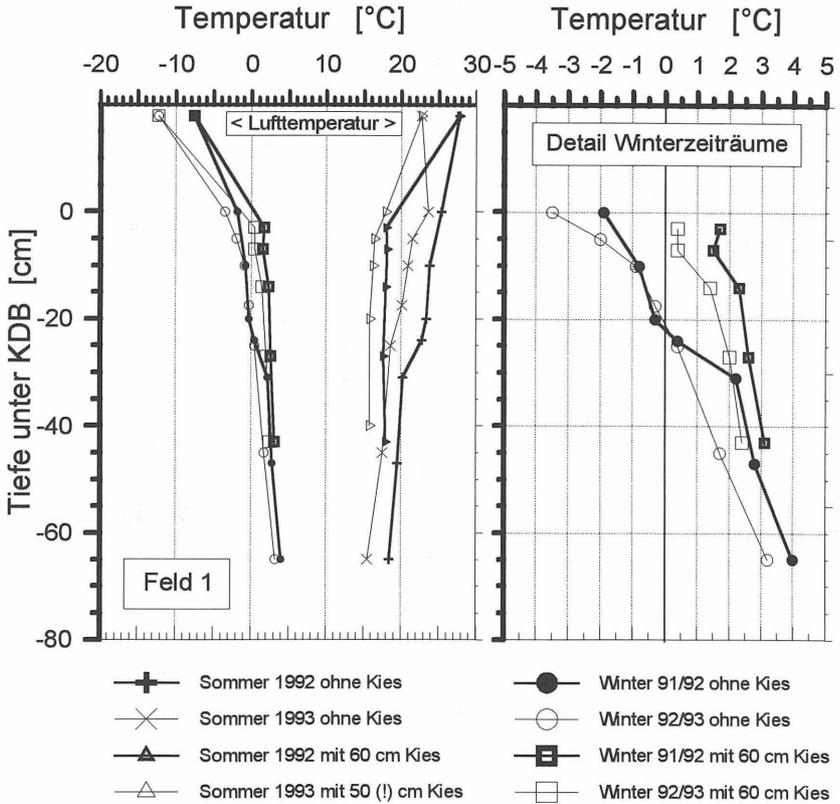
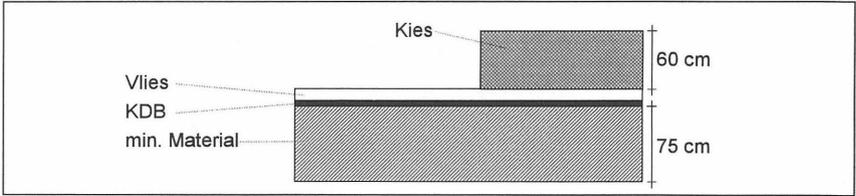


Bild 34: Darstellung der höchsten und tiefsten Werte der Tagesmitteltemperaturen in den einzelnen Höhenlagen je Halbjahr aus Feld 1

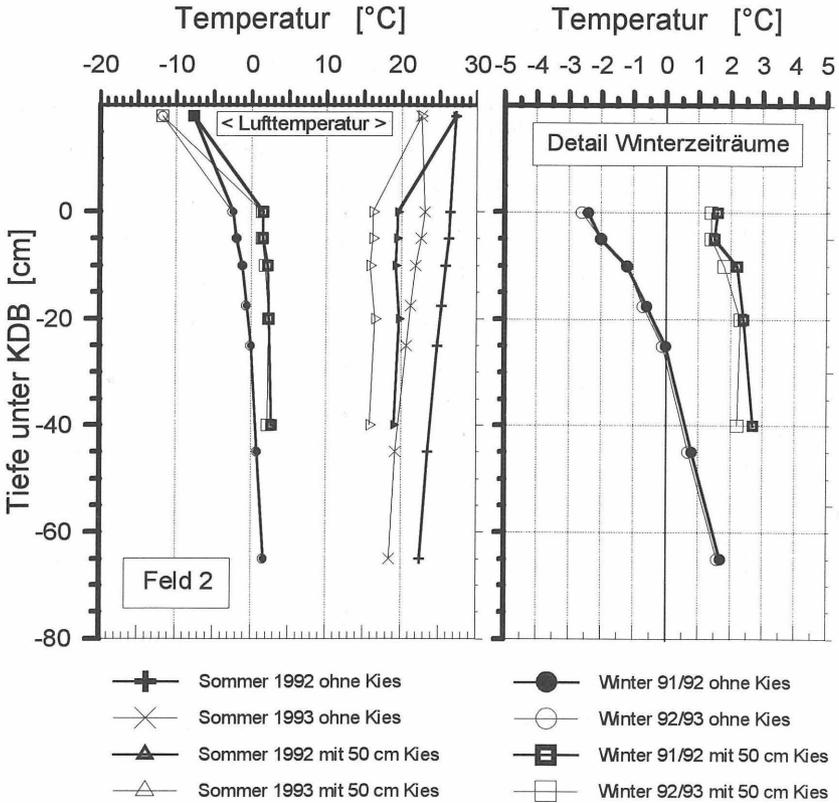
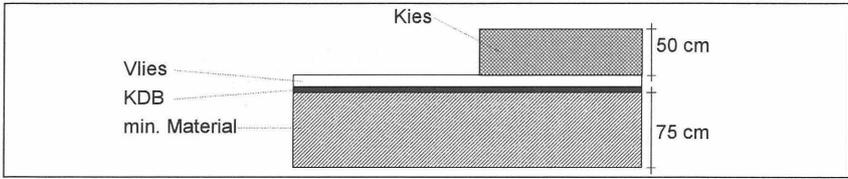


Bild 35: Darstellung der höchsten und tiefsten Werte der Tagesmitteltemperaturen der Temperaturfühler in den einzelnen Höhenlagen je Halbjahr aus Feld 2

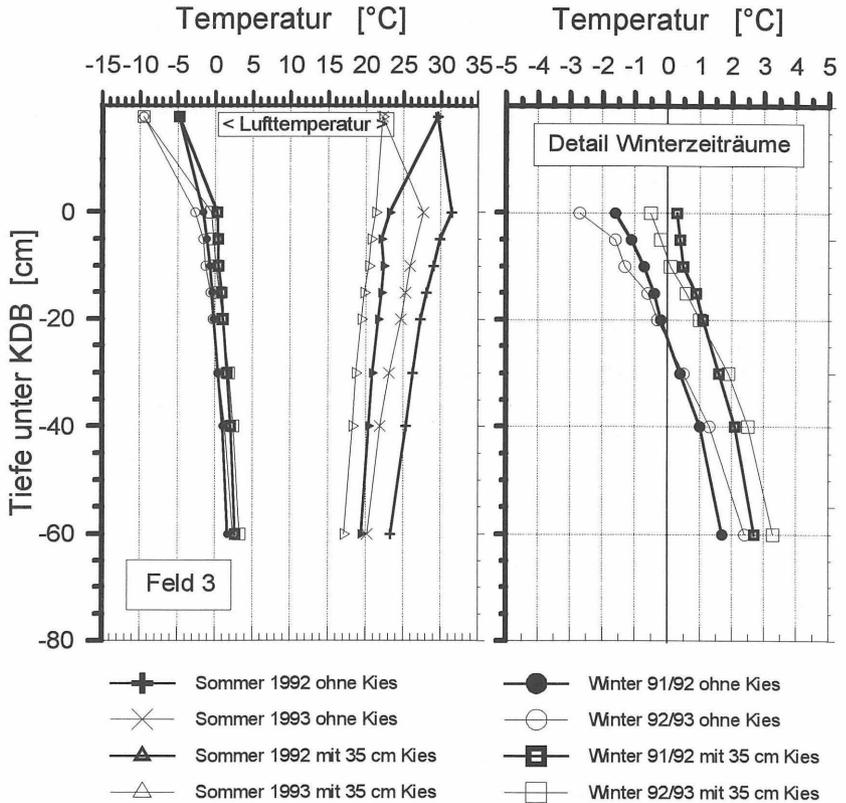
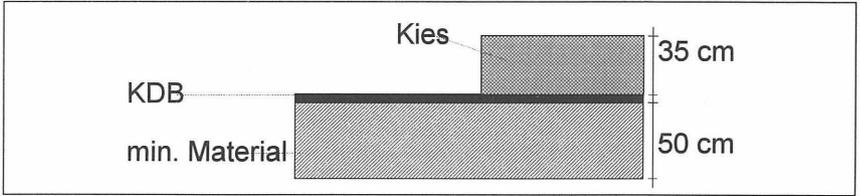


Bild 36: Darstellung der höchsten und tiefsten Werte der Tagesmitteltemperaturen der Temperaturfühler in den einzelnen Höhenlagen je Halbjahr aus Feld 3

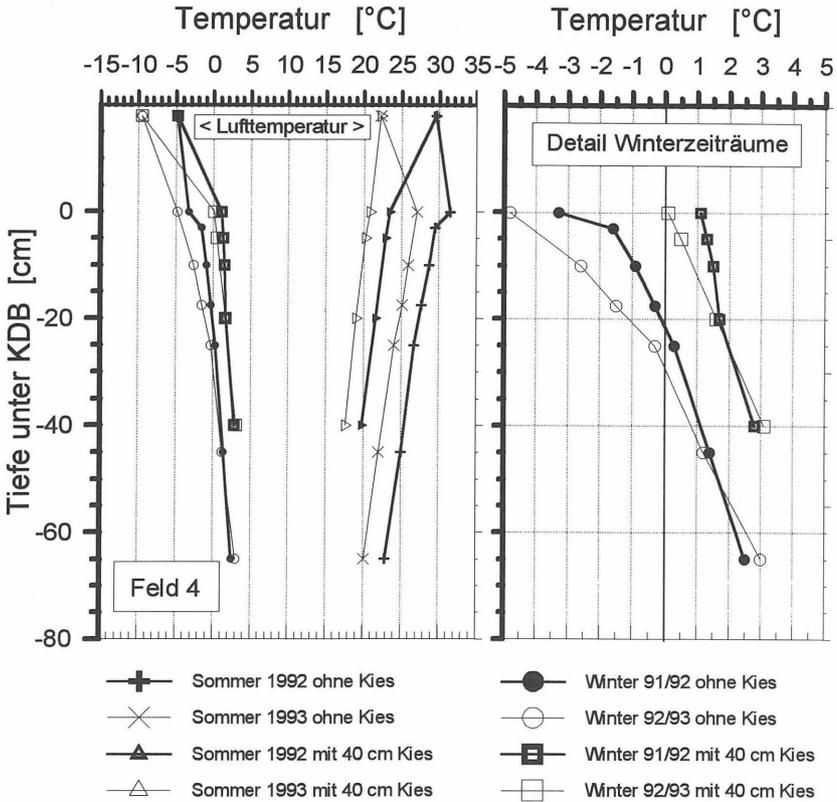
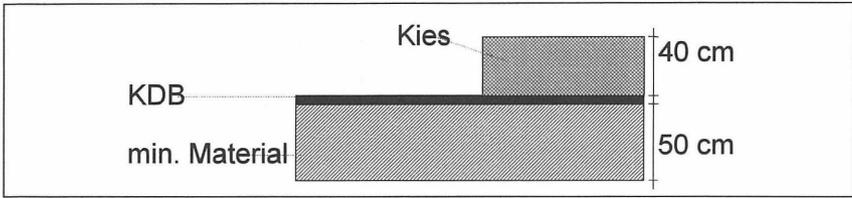
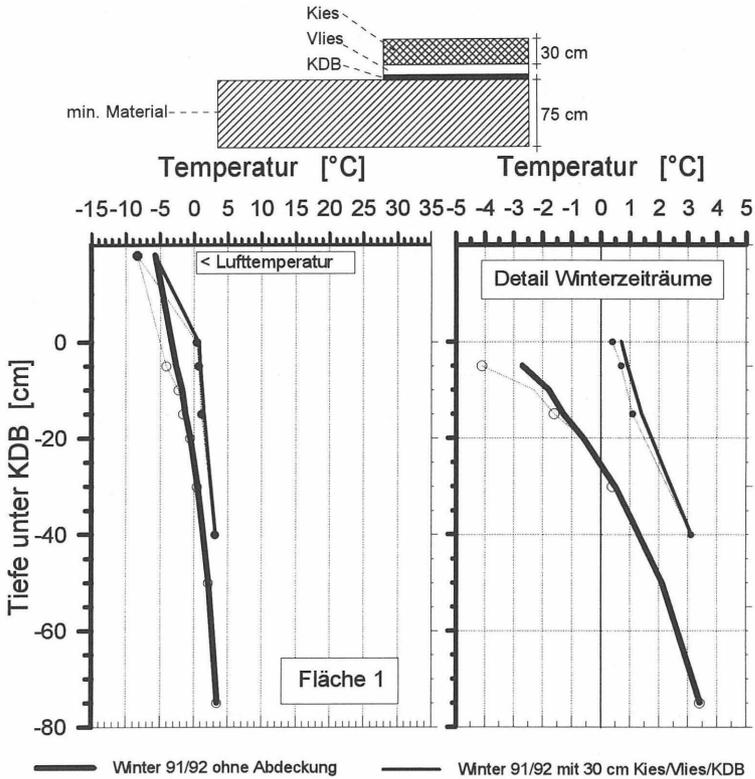


Bild 37: Darstellung der höchsten und tiefsten Werte der Tagesmitteltemperaturen der Temperaturfühler in den einzelnen Höhenlagen je Halbjahr aus Feld 4



(Die gestrichelten Linien stellen zum Vergleich die absoluten Meßwertminima dar)

Bild 38: Darstellung der tiefsten Werte der Tagesmitteltemperaturen der Temperaturfühler in den einzelnen Höhenlagen je Halbjahr aus Fläche 1

Fläche 1		Winter 1991/92 Minimum [°C]	
Frostsumme [°C·d] →		42,6 (19Tage)	
Luft →		-5,8	
↓Tiefe unter offener GOK		Tiefe ↓ unter KDB/Vlies/30 cm Kies [cm]	
±0 cm	nicht gemessen	±0 cm	0,7
-5	-2,7	-5	0,9
-10	-1,8	-15	1,4
-15	-1,3	-40	3,1
-20	-0,6		
-30	0,5		
-50	2,1		
-75	3,4		

Tabelle 19: Tabelle der Minimaltemperaturen der Tagesmittel des Meßzeitraums in den einzelnen Höhenlagen der Temperaturfühler aus Fläche 1

Feld 1	Winter 1991/92 Minimum [°C]	Sommer 1992 Maximum [°C]		Winter 1992/93 Minimum [°C]		Sommer 1993 Maximum [°C]	Max. ΔT im Meß- zeitraum [K]
Frostsumme [°C·d]	70,8 25 Tage			132,1 43 Tage			(es gelten die letzten Tiefen)
Luft	-7,6	27,8		-12,3		22,7	40,1
↓ Tiefe unter KDB/Vlies			↓ neue Tiefen				
±0 [cm]	-1,9	25,4	±0 cm	-3,5		23,6	28,9
-10	-0,8	23,8	-5	-2,0		21,5	
-20	-0,3	23,4	-10	-0,9		20,9	24,7
-24	0,4	22,8	-17,5	-0,3		20,1	
-31	2,2	20,2	-25	0,4		18,6	18,2
-47	2,8	19,5	-45	1,7		17,5	17,8
-65	4,0	18,4	-65	3,2		15,5	15,2
↓ Tiefe unter KDB/Vlies/60 cm Kies				↓ neue Tiefen/50 cm Kies			
-3	1,7	18,0		0,4	±0	17,9	
-7	1,5	18,1		0,4	-5	16,4	
-14	2,3	17,9		1,4	-10	16,2	
-27	2,6	17,6		2,0	-20	15,8	
-43	3,1	17,9		2,4	-40	15,8	

Tabelle 20: Tabelle der Extremtemperaturen der Tagesmittel je Halbjahr in den einzelnen Höhenlagen der Temperaturfühler aus Feld 1

Feld 2	Winter 1991/92 Minimum [°C]	Sommer 1992 Maximum [°C]	Winter 1992/93 Minimum [°C]	Sommer 1993 Maximum [°C]	Max. ΔT im Meß- zeitraum [K]
Frostsumme [°C·d]	59,7 18 Tage		107,5 40 Tage		
Luft	-7,7	27,2	-11,8	22,6	39,0
↓ Tiefe unter KDB/Vlies [cm]					
±0	-2,4	26,5	-2,6	23,1	29,1
-5	-2,0	26,3	-2,0	22,6	28,3
-10	-1,2	25,9	-1,2	21,9	27,1
-17,5	-0,6	25,3	-0,7	21,2	26,0
-25	0,0	24,8	-0,1	20,7	24,9
-45	0,8	23,9	0,7	19,2	22,8
-65	1,7	22,5	1,6	18,4	20,9
↓ Tiefe unter KDB/Vlies/50 cm Kies [cm]					
±0	1,6	19,5	1,4	16,2	18,1
-5	1,5	19,4	1,4	16,2	18,0
-10	2,2	19,2	1,8	15,8	17,4
-20	2,4	19,1	2,3	16,5	17,4
-40	2,7	19,0	2,2	15,8	16,8

Tabelle 21: Tabelle der Extremtemperaturen der Tagesmittel je Halbjahr in den einzelnen Höhenlagen der Temperaturfühler aus Feld 2 (unterlegte Temperaturwertfelder beinhalten Negativtemperaturen)

Feld 3	Winter 1991/92 Minimum [°C]	Sommer 1992 Maximum [°C]	Winter 1992/93 Minimum [°C]	Sommer 1993 Maximum [°C]	Max. ΔT im Meß- zeitraum [K]
Frostsumme [°C·d]	40,4 21 Tage		90,8 36 Tage		
Luft	-4,8	29,6	-9,5	22,2	39,1
↓ Tiefe unter KDB [cm]					
±0	-1,6	31,1	-2,7	27,7	33,8
-5	-1,1	29,9	-1,6	-	(31,5)
-10	-0,7	29,1	-1,3	25,9	30,4
-15	-0,4	28,1	-0,6	25,3	29,4
-20	-0,2	27,3	-0,3	24,7	27,6
-30	0,4	26,3	0,5	23,1	25,9
-40	1,0	25,4	1,3	21,9	24,4
-60	1,7	23,3	2,4	20,2	21,6
↓ Tiefe unter KDB/35 cm Kies [cm]					
±0	0,3	23,2	-0,5	21,3	23,7
-5	0,4	22,1	-0,2	20,7	22,3
-10	0,5	22,4	0,1	20,4	22,3
-15	0,9	22,1	0,6	19,8	21,5
-20	1,1	21,7	1,0	19,4	20,7
-30	1,6	20,9	1,9	18,7	19,3
-40	2,1	20,4	2,5	18,3	18,3
-60	2,7	19,4	3,3	17,1	16,7

Tabelle 22: Tabelle der Extremtemperaturen der Tagesmittel je Halbjahr in den einzelnen Höhenlagen der Temperaturfühler aus Feld 3

Feld 4	Winter 1991/92 Minimum [°C]	Sommer 1992 Maximum [°C]	Winter 1992/93 Minimum [°C]	Sommer 1993 Maximum [°C]	Max. ΔT im Meß- zeitraum [K]
Frostsumme [°C·d]	40,4 21 Tage		90,8 36 Tage		
Luft	-4,8	29,6	-9,5	22,2	39,1
↓ Tiefe unter KDB [cm]					
±0	-3,3	31,5	-4,8	27,1	36,3
-5	-1,6	29,5	-	-	(31,1)
-10	-0,9	28,7	-2,6	25,9	31,3
-17,5	-0,3	27,7	-1,5	25,1	29,2
-25	0,3	26,7	-0,3	24,0	27,0
-45	1,4	25,0	1,2	22,0	23,8
-65	2,5	22,9	3,0	20,1	20,4
↓ Tiefe unter KDB/Vlies/40 cm Kies [cm]					
±0	1,1	23,4	0,1	20,8	23,3
-5	1,3	22,9	0,5	20,2	22,4
-10	1,5	-	-	-	-
-20	1,7	21,6	1,6	19,0	20,0
-40	2,8	19,8	3,1	17,6	17,0

Tabelle 23: Tabelle der Extremtemperaturen der Tagesmittel je Halbjahr in den einzelnen Höhenlagen der Temperaturfühler aus Feld 4

An den Ganglinien der Lufttemperatur ist ersichtlich, daß in beiden Winterzeiträumen keine sehr tiefen oder lang anhaltende Frostperioden stattgefunden haben. Kennzeichnend hierfür ist ein Vergleich der jeweiligen Frostindizes oder Frostsummen. In Bild 39 oben sind die aus den Meßwerten berechneten Frostsummen der beiden Winterhalbjahre für Feld 4 dargestellt.

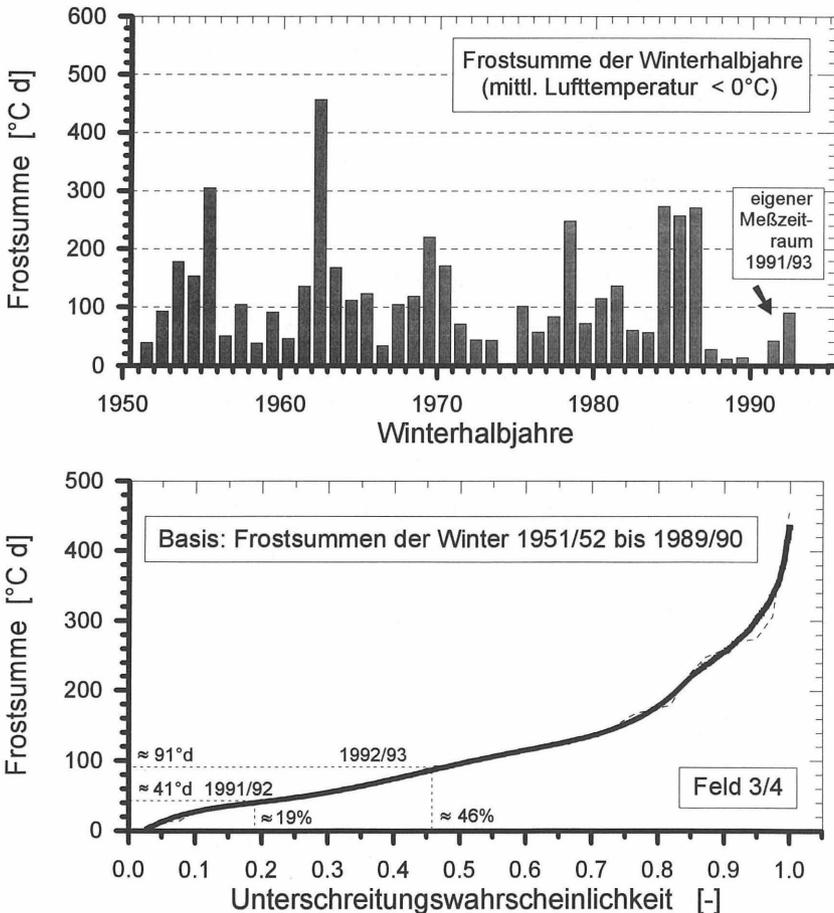


Bild 39: Frostsummen aus dem Zeitraum 1951 bis 1990 der dem Feld 4 nahegelegenen DWD-Station im Vergleich mit den Jahren 1991 bis 1993 (Bild oben) und die daraus abgeleitete Wahrscheinlichkeitskurve (Bild unten) (Quelle: Deutscher Wetterdienst (DWD) und eigene Messungen)

Zum Vergleich sind die aus den offiziellen Tagesmittelwerten errechneten Frostsummen der nächstgelegenen Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD), Offenbach, für den Zeitraum 1951 bis 1990 aufgeführt. Aus der Darstellung ist ersichtlich, daß keinerlei eindeutige Vorhersagen über die im jeweils nächsten Jahr zu erwartenden Frostsummen abgeleitet werden können.

Als Hilfsmittel zur groben Einordnung der Winter kann eine statistische Untersuchung dienen. Bei der Verwendung der vierzig Jahre als Grundgesamtheit ergibt sich z. B. die in Bild 39 unten dargestellte Wahrscheinlichkeitskurve. Nach dieser hatte der Winter 1991/92 eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit von ca. 19%, der Winter 1992/93 von ca. 46%. Die ermittelten Eindringungen der 0°C-Isothermen aus 1991/92 können daher in vier von fünf Wintern, die von 1992/93 in jedem zweiten Winter überschritten werden. Die Frostsumme eines Winterhalbjahres sagt jedoch noch nichts über die Verteilung oder die Intensität des Frostes aus. Kurze und strenge Fröste können die gleichen Frostsummen erzeugen, wie milde, aber langandauernde Frostereignisse. Für die Beurteilung der Frostsummen werden daher die Temperatursummenkurven aufgestellt. Die in Bild 40 dargestellten Temperatursummenkurven weisen für den Winter 1991/92 drei Frostereignisse, für 1992/93 sechs Frostereignisse aus.

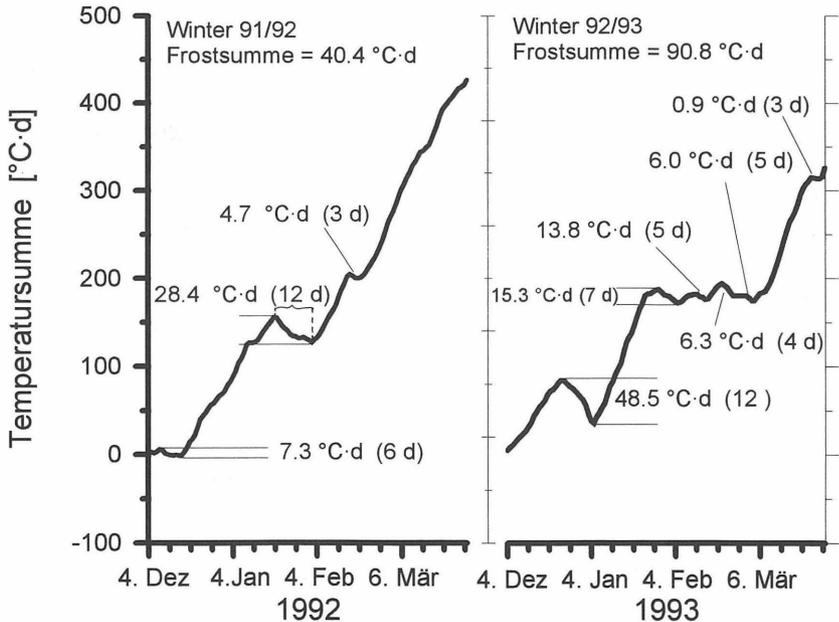


Bild 40: Summenkurven für die beiden Winter 1991/92 und 1992/93 der Tagesmittel der Lufttemperatur aus den Feldern 3 und 4

4.3.3.2 Kurzfristige Veränderungen

Wie in dem vorangegangenen Abschnitt wird auch in der Literatur und für Berechnungen aller Art in den meisten Fällen nicht mit der Ganglinie der Tageseinzelwerte, sondern mit Tagesmitteln gearbeitet. Die Mittelbildung vereinfacht die Darstellung und die Übersicht, es gehen jedoch unter Umständen wertvolle Informationen über die Schwankungsbreiten und zeitlichen Verteilungen verloren. Insbesondere die Bereiche, die täglichen Schwankungen in Form von Frost-Tau-Wechseln unterliegen, können nur noch abgeschätzt werden.

Bild 41 enthält die Tagesmittelwerte aus einem Zeitbereich von 20 Wintertagen aus Feld 4 (17.01.1992 - 06.02.1992). Zum Vergleich sind in Bild 42 die Temperaturganglinien der Tageseinzelwerte für den Zeitbereich 2. bis 8. Tag enthalten.

Die täglichen Schwankungen infolge der Globalstrahlung, deren Einfluß deutlich in Bild 42 abgelesen werden kann, lassen die oberflächennahen Bereiche des mineralischen Materials trotz einer teilweise ganztägigen Lufttemperatur $< 0\text{ C}$ bis in Tiefen von ca. 3 cm auftauen. Dieser Bereich unterlag somit einem täglichen Frost-Tau-Wechsel. In der Ganglinie der Tagesmittel kann dies nicht erkannt werden.

Tägliche Schwankungen der Bodentemperaturen sind hier bis in eine Tiefe von ca. 15 cm (interpoliert) zu erkennen. In tieferen Schichten sind nur noch mittelfristige Änderungen zu verzeichnen, d. h., die Temperaturen werden nicht mehr direkt von täglichen Klimaereignissen beeinflusst. Die Eindringung der 0 C -Grenze im Bereich der nur mit einer KDB abgedeckten mineralischen Schicht betrug in diesem Zeitraum bei einer Frostsumme von $28,4\text{ C-d}$ maximal ca. 20 cm.

Diese Problematik ist jedoch nur in Bauzuständen mit geringen Überdeckungen über der mineralischen Schicht zu berücksichtigen (z. B. nur KDB, KDB mit Vlies oder dünner Sandschutzschicht). Ein Vlies über der KDB verkleinert bereits die Temperaturschwankungen unter der KDB durch die Einschränkung des Einflusses der Globalstrahlung. Die Oberfläche des Geotextils mindert zum einen die Absorption der Globalstrahlung (Heizwirkung), sofern nicht ein schwarzes Vlies verwendet wurde, zum anderen wirkt das Geotextil als Isolatorschicht. In Bild 43 ist ein den Bildern 41 und 42 ähnliches Frostergebnis aus Feld 2 dargestellt. Vor allem die Temperaturen direkt unter der KDB weisen wesentlich kleinere Schwankungen auf und sind insgesamt ausgeglichener. Die Temperaturganglinien der Fühler unter dem Kies wurden, da sie in sich stetig waren, zugunsten der Übersichtlichkeit durch Polynome ersetzt.

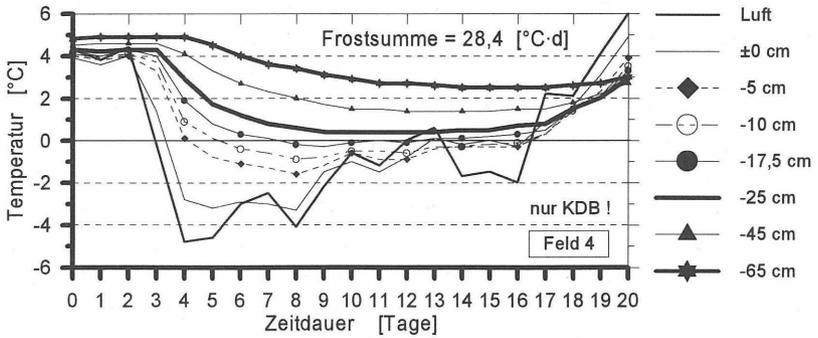


Bild 41: Temperaturanglinien der arithmetischen Tagesmittel über einen Zeitraum von 20 Wintertagen (Feld 4, nur KDB-Auflage)

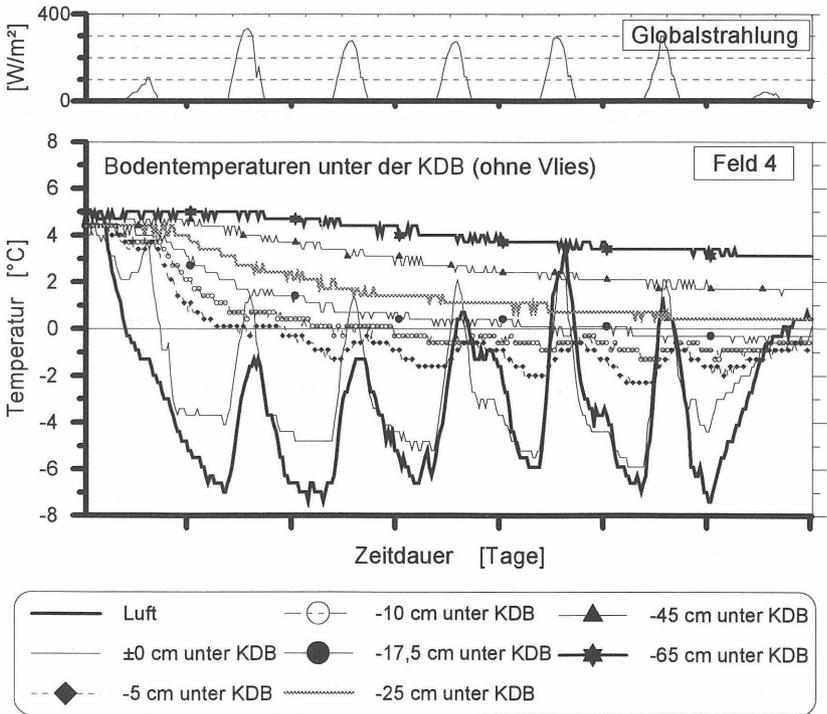


Bild 42: Temperaturanglinien der halbstündigen Meßwerte über einen Zeitraum von 7 Wintertagen (Tage 2 bis 9 aus Bild 41)

Unter Kiesschichten der im Deponiebau üblichen Mächtigkeiten (min $d > 30$ cm) sind nach den vorliegenden Meßergebnissen im Winter bis auf extreme Verhältnisse keine täglichen Schwankungen mehr zu erwarten (s. a. Bild 43 im Vergleich zu Bild 42). Dies hat Relevanz für die erforderliche Ablesehäufigkeit der Meßwerte, wenn für ein Wintersicherungsprogramm an bestehenden Abdichtungssystemen verschiedener Bauzustände ein Meßprogramm konzipiert werden soll. Ist auf der mineralischen Dichtung ein Aufbau bestehend aus KDB, Schutzschicht und mindestens 30 cm Drainageschicht aus Kies vorhanden, ist es für baupraktische Verhältnisse ausreichend, wenn die Temperatur unter oder direkt über der KDB ein bis zwei Mal täglich abgelesen wird. Eine häufigere Ablesung, oder ersatzweise die Ablesung zu bestimmten Uhrzeiten, an denen die geringsten Temperaturen zu erwarten sind, ist nur bei geringeren Mächtigkeiten erforderlich.

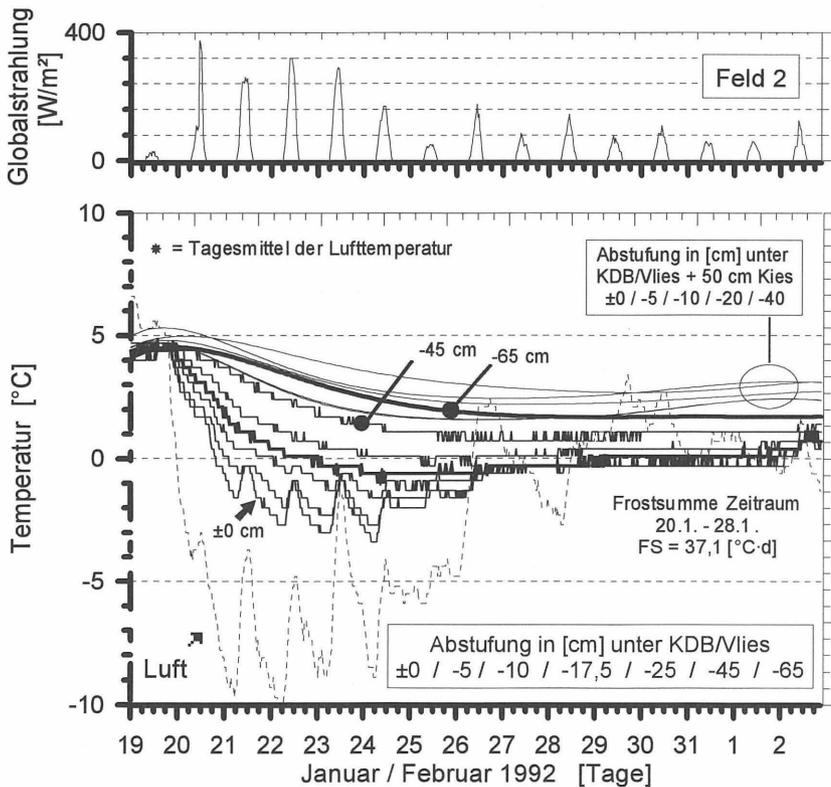


Bild 43: Temperaturanglinien der halbstündigen Meßwerte über einen Zeitraum von 15 Wintertagen aus Feld 2

4.3.3.3 Temperaturgradienten

Für die Durchführung von Laborversuchen ist der Ansatz des Temperaturgradienten eine der Haupttrandbedingungen. Wird er unzureichend gewählt, unter- oder überschätzt man die Auswirkungen durch eine Veränderung der sich einstellenden energetischen Gleichgewichte und erhält unzutreffende Ergebnisse. Aus diesem Grund wurden zu Vergleichszwecken bzw. als Grundlage für weitere Laborversuche die Temperaturgradienten der Versuchsfelder für verschiedene Höhenbereiche berechnet.

Die in den Feldern gemessenen Temperaturen ergeben die in den Anlagen 37 bis 40 enthaltenen Gradienten für die Tiefenbereiche "0 cm bis 20 cm" und "0 cm bis zum jeweils tiefsten angeordneten Fühler" in der mineralischen Schicht. Verwendet wurden die Tagesmittelwerte aus den 48 Ablesungen zwischen 0:00 Uhr und 24:00 Uhr. Für die Höhenlage 20 cm, in der nicht in allen Feldern Fühler installiert waren, wurde zu Vergleichszwecken teilweise zwischen den benachbarten Temperaturfühlern linear interpoliert. Die Maximalwerte sind in Tabelle 23 getrennt für die Sommer- und Winterhalbjahre aufgeführt.

Aufbau mit Vlies									
	Winter					Sommer			
Tiefe	Feld 1		Feld 2			Feld 1		Feld 2	
[cm]	m.Kies	o. Kies	m.Kies	o. Kies		m.Kies	o. Kies	m.Kies	o. Kies
0 - 20	+0,17	+0,19	+0,05	+0,13	[°C/cm]	-0,11	-0,23	-0,05	-0,11
0-60/65		+0,13		+0,09			-0,15		-0,09
0 - 40	+0,07		+0,05			-0,07		-0,04	
Aufbau ohne Vlies									
	Winter					Sommer			
Tiefe	Feld 3		Feld 4			Feld 3		Feld 4	
[cm]	m.Kies	o. Kies	m.Kies	o. Kies		m.Kies	o. Kies	m.Kies	o. Kies
0 - 20	+0,09	+0,14	+0,09	+0,25	[°C/cm]	-0,12	-0,25	-0,11	-0,30
0-60/65	+0,08	+0,10		+0,13		-0,09	-0,18		-0,17
0 - 40			+0,10					-0,11	

Tabelle 23: Maximale Temperaturgradienten [°C/cm] in den Versuchsfeldern, getrennt nach Aufbauart, Sommer- und Winterhalbjahr

Ebenso wie bei den Temperaturganglinien ist auch bei den Gradientenganglinien ein sinusförmiger Verlauf über das Jahr erkennbar. Im Winter ist der Temperaturgradient überwiegend positiv, d. h., die Temperatur steigt mit zunehmender Tiefe an. Im Sommer kommt es durch den Einfluß der Lufttemperatur und Globalstrahlung zu einer Umkehr, so daß in den hier betrachteten Tiefenbereichen bis ca. 65 cm in der mineralischen Schicht die Temperatur nach unten abnimmt und der Gradient negativ ist. Da das im Boden enthaltene Wasser generell in die kältere Richtung transportiert wird, ändert sich damit auch die "Fließrichtung" der thermisch induzierten Wasserbewegungen neben den kurzfristigen täglichen Schwankungen auch in einer Art Grundschwingung im laufenden Jahr zwischen Sommer und Winter. Die kurzfristigen Änderungen werden vor allem bei Böden mit größeren Durchlässigkeiten wirkungsvoll, da hier die Wasserverlagerungen relativ schnell vor sich gehen können.

Obwohl die kurzfristigen und die extremen Gradienten um so kleiner sind, je mehr dämmendes Material auf dem betrachteten Schichtelement liegt oder je tiefer der Beobachtungshorizont liegt, zeigt sich doch eine auffällige Übereinstimmung der Grundschwingung je Aufbauart über die Tiefe. Ersetzt man die Gradientenverläufe durch ein angepaßtes Polynom 9. Grades (Fit), so ergeben sich die in den Anlagen 37 bis 40 eingezeichneten "Ausgleichskurven". Die Fits für die berechneten Gradientenverläufe unter den Aufbauten KDB oder KDB/Vlies (z. B. jeweils 0 cm - 20 cm oder 0 cm - 60 cm) und die unter Kies/KDB oder Kies/Vlies/KDB weisen unter sich etwa die gleichen Kurvenverläufe und Amplituden auf (Beispiel Bild 44 und Anlagen 37-40). Das bedeutet, daß für Langzeituntersuchungen der mittlere Temperaturgradient unter einem gleichartigen Aufbau von der Tiefe (in den hier betrachteten Größenordnungen) nahezu unabhängig ist.

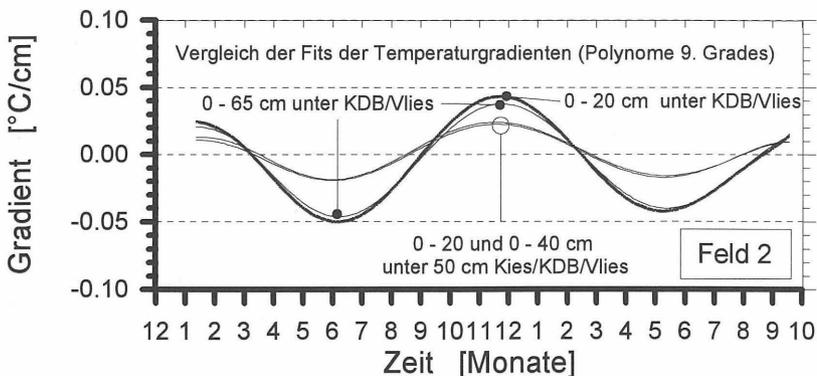


Bild 44: Vergleich der Fits der Temperaturgradienten aus Feld 2

Unterschiedlich sind jedoch die kurzfristigen täglichen bis wöchentlichen Schwankungswerte. Für die hier zu betrachtenden Winterzeiträume sind die Gradienten in einer Ausschnittvergrößerung für die potentiellen Frostzeiträume in den Anlagen 42 bis 50 zeitlich vergrößert und mit den zugehörigen Tagesmitteltemperaturen der Luft dargestellt. Die Gradienten entwickeln sich in diesem kurzfristigen Bereich spiegelbildlich zur Lufttemperatur und folgen deren Verlauf mit unterschiedlicher, von der Tiefe abhängiger Größe. Eine gesonderte Auswertung zur Ermittlung der Gradienten für die gefrorenen Bodenbereiche ist wegen der geringen Anzahl der Meßwerte nicht aussagekräftig.

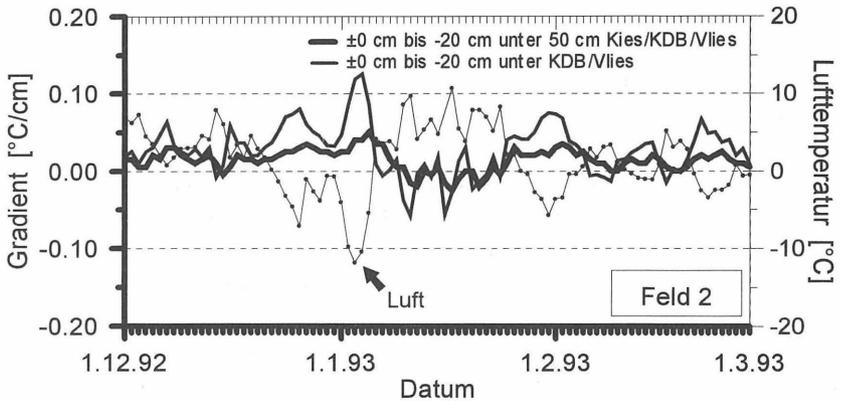


Bild 45: Temperaturgradienten von ± 0 cm bis -20 cm Tiefe mit und ohne Kiesauflage im Vergleich mit den Tagesmitteltemperaturen der Luft im Winter 92/93 für Feld 2

Für Frostversuche im Labor sind aufgrund der ermittelten Gradienten Werte von $0,1$ bis $0,25^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ zutreffend (Vergleiche bei Laborversuchen: OGAWA et al. 1991: $0,13^{\circ}\text{C}/\text{cm}$, WU QINGBAI/TONG CHANGJIANG 1991: $0,12 - 0,26^{\circ}\text{C}/\text{cm}$, WOJTOWICZ 1989: $0,3^{\circ}\text{C}/\text{cm}$). Dabei können die kleineren Werte für die Situation unter einer ausgleichenden Kiesschicht, die größeren Werte für offen liegende oder nur ungenügend geschützte Bereiche in der oberen Bodenzone angenommen werden. Diese Ergebnisse entsprechen in etwa anderen veröffentlichten Werten. So errechnete beispielsweise LUDWIG 1993 für ein Frostereignis im Winter 1992/93 bei einer offen liegenden mineralischen Abdichtung Gradienten von ca. $0,12^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ bis in eine Tiefe von 40 cm.

4.3.4 Ergebnisse der Probennahmen

Vor und nach den Winterzeiträumen wurden die einzelnen Flächen beprobt. Hierbei wurden nach einer visuellen Ansprache der Oberfläche vor Ort Ausstechzylinderproben nach DIN 18 125, Teil 2 entnommen und im Labor untersucht.

4.3.4.1 Gefüge

Bei der visuellen Ansprache wurden die größten Veränderungen erwartungsgemäß bei den nicht abgedeckten mineralischen Schichten festgestellt.

Niederschläge und Frost-Tau-Wechsel führten hier zu einer intensiven Vernässung und räumlichen Zergliederung der oberen Schichten. Zwischenzeitliche Austrocknungsperioden, die Sublimation von gefrorenem Wasser, die damit verbundenen offenen Fissuren und Wiedervernässungen verstärkten in den oberflächennahen Bereichen die Zergliederung (Frostgare). In diesem Bereich konnten optisch keine bevorzugten Ausrichtungen der Fissuren (etwa aus näherungsweise waagerechten Eislinsen) ausgemacht werden. Zu erkennen war vielmehr ein Fissurgefüge, das mit den Fugen eines räumlichen Mauerwerks aus unregelmäßig geformten Steinen verglichen werden kann.

Das offenliegende Tonmaterial in der Fläche 1 war nach einer Winterperiode Ende Februar bis in eine Tiefe von ca. 8 cm so intensiv in ca. 5 mm bis 10 mm große Materialpartikel zergliedert, daß mit dem Ausstechzylinder keine verwertbare Probe gewonnen werden konnte. Das insgesamt sehr feuchte Material zerfiel beim Eintreiben des Ausstechzylinders in größere Bruchstücke (Bild 46).

Unterhalb dieser Zone war das Material zwar vernäßt und weich, die Zahl der Fissuren nahm jedoch sowohl von der Anzahl als auch in ihrer Ausgeprägtheit mit zunehmender Tiefe ab. Unterhalb von ca. 20 cm konnten nur noch vereinzelte Aufweichungen, jedoch keine Klüfte und Risse mehr beobachtet werden. Das Material war hier optisch weitgehend homogen und ohne Zerfall verformbar.

In der dem Versuchsfeld 1 benachbart liegenden, aus dem gleichen Material wie das Versuchsfeld erstellten Deponiefläche konnte der Zustand des mineralischen Materials nach dem ersten Winter in einem Bereich ohne Abdeckung ebenfalls untersucht werden. Auch hier waren bis in größere Tiefen Vernässungen und in den oberen Bereichen Zergliederungen festzustellen.



Bild 46: Durch Frost-Tau-Wechsel und Wassereinfluß vernäßtes und in Partikel zergliedertes Material (Fläche 1, ohne Abdeckung)
 oben: Situation bei der Entnahme
 unten: Material aus ca. 5 - 6 cm Tiefe unter GOK

Ähnliche Erscheinungen konnten neben dem Feld 2 (Geschiebelehm) beobachtet werden, wo ein größerer Bereich des ursprünglichen Probefeldes nicht abgedeckt war. Auch hier ergab sich nach dem Winter in den oberen Bereichen eine intensive Zergliederung. In Bild 47 oben ist die Frontalansicht in einem Schurf ca. 20 cm unter der Geländeoberkante abgebildet, Bild 47 unten enthält eine vergleichbare Situation am seitlichen Rand des Feldes, das hier nur von losem Material befreit wurde, das zusätzlich leicht ange-trocknet war. Beide Bilder wurden nach dem zweiten Winter aufgenommen.

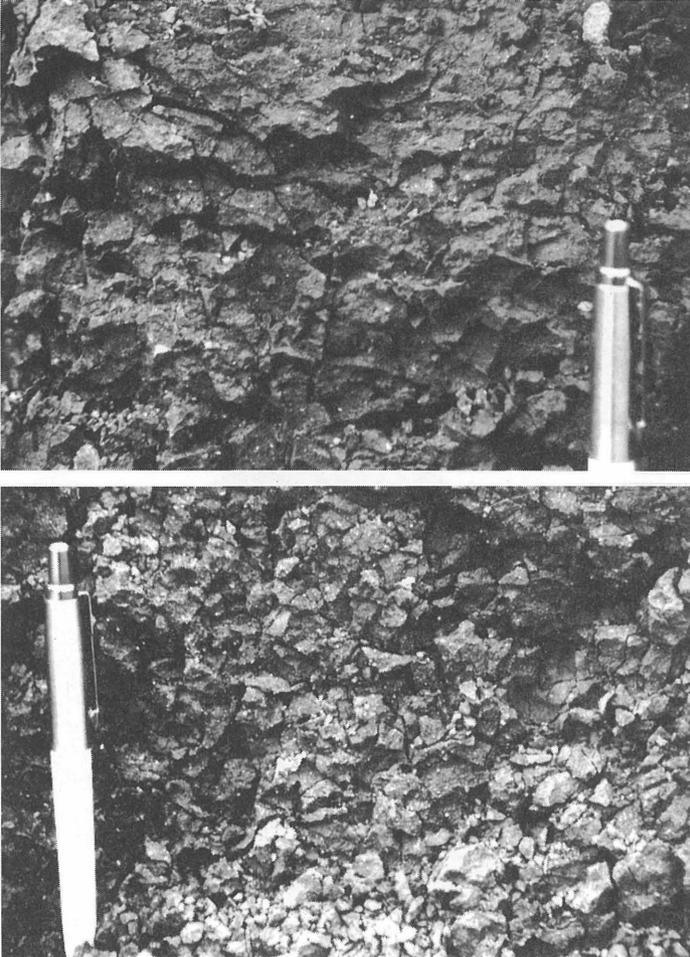


Bild 47: Gefüge des Materials aus Feld 2 nach dem zweiten Winter im Bereich ohne Abdeckung oben: Frontalansicht im Schurf ca. 20 cm unter GOK
unten: Frontalansicht an der Feldseite (angetrocknet)

Bei den nur mit einer KDB abgedeckten Feldern 3 und 4 konnten nach dem ersten Winter oberflächlich deutlich zwei Bereiche ausgemacht werden. Die Kunststoffdichtungsbahn wies infolge von Wärmeausdehnungen eine ausgeprägte Wellenbildung auf. In Bereichen unter den Hochpunkten der KDB erschien das Material in den obersten ca. 3 bis 4 cm trockener als in den Tiefpunkten.

Offensichtlich ist das im Bereich der Hochpunkte unter der KDB gebildete Kondenswasser an der Bahn in die Tiefpunkte gelaufen und hat dort zu Vernässungen geführt. In den Bildern 48 links und rechts sind die trockeneren Bereiche durch die hellere Farbe gut erkennbar. Zum Teil sind einige kreisförmige Vernässungen zu sehen, die durch abtropfendes Kondenswasser beim Öffnen der KDB entstanden sind.

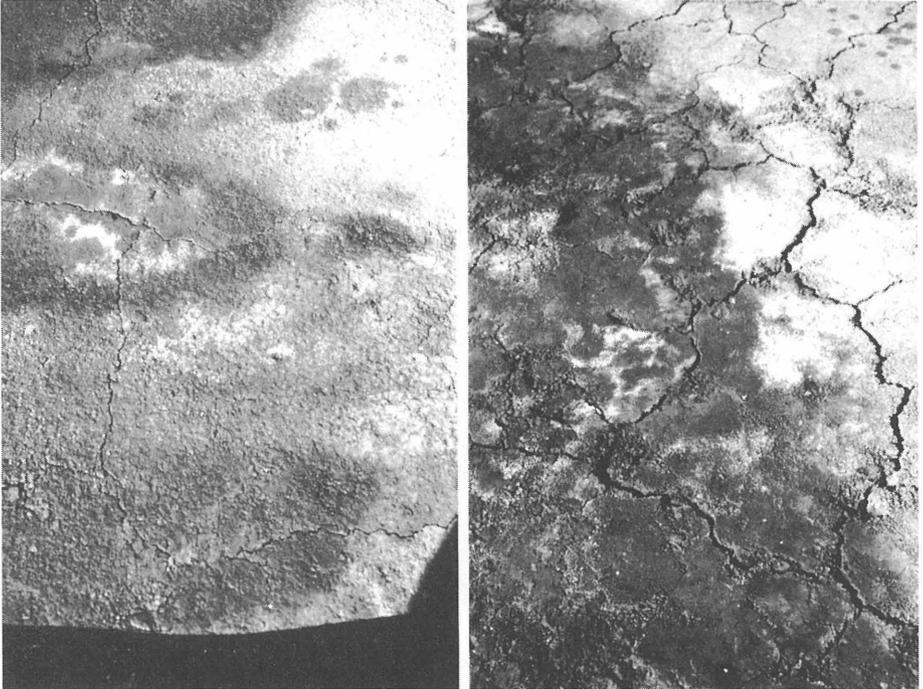


Bild 48: links: Oberfläche nach dem Öffnen der KDB bei Feld 4
rechts: Oberfläche bei Feld 3 (beide nur mit KDB, Ende Februar 1992)

Die Oberflächen der Felder 3 und 4 waren nach einem Winter mit größeren Rissen durchzogen, die im aufbereiteten Tonsteinmaterial des Feldes 4 mit einem Raster von ca. 0.5 m, oberen Öffnungsweiten bis etwa 0.5 cm und einer Tiefe von ca. 2 cm bis 5 cm geringer ausgebildet waren als im Bereich des Geschiebemergels des direkt benachbarten Feldes 3 (Raster ca. 20 cm bis 50 cm, Öffnungsweiten bis zu 1 cm und Tiefen bis zu ca. 10 cm). Nach dem zweiten Winter waren in einem den ersten Probenahmestellen benachbarten Bereich keine ausgeprägten Risse zu erkennen (Bild 49). Die gesamte

Oberfläche war jedoch insbesondere in den ersten Zentimetern gut durchfeuchtet. Kleinstäumige Zergliederungen und Fissuren, wie bei den Materialien der nicht abgedeckten Flächen, konnten bei beiden Materialien nicht eindeutig festgestellt werden.



Bild 49: Oberfläche Feld 3 nach dem Öffnen der KDB im April 1993. Deutlich erkennbar ist die Wellenbildung der KDB und die Vernässung in den Tiefpunkten

Obwohl die Seitenränder der KDB gegen ein Abheben gut beschwert waren, kann nicht ausgeschlossen werden, daß bei den Feldern 3 und 4 in den nicht mit Kies überschütteten Bereichen infolge der intensiven Wellenbildung durch die entstandenen Hohlräume und die unter der schwarzen KDB entstehenden hohen Dampfdrücke umfangreiche, nicht quantifizierbare Austauschprozesse mit der Umluft stattgefunden haben.

Bei den mit einer KDB und einem Vlies abgedeckten Feldern waren in den oberen Zentimetern nach beiden Wintern Veränderungen des Gefüges erkennbar, die nach dem zweiten Winter ausgeprägter und eindeutiger waren.

Das Material aus Feld 1 war nach dem ersten Winter etwa in den ersten 2 cm bis 3 cm, nach dem zweiten Winter in den ersten ca. 3 cm bis 5 cm mit vielen kleineren Rissen durchzogen und an der direkten Oberfläche intensiv vernäßt. Beim Abrollen der KDB blieben dadurch zahlreiche Materialteile aus der obersten Schicht an der KDB kleben und ließen an den Fehlstellen, wie bei den nicht abgedeckten Flächen beschrieben, ein fein zergliedertes Gefüge erkennen (Bild 50). Unterhalb dieser 3cm bis 5cm-Schichten konnten visuell keine eindeutigen Veränderungen mehr festgestellt werden.

Bei dem Geschiebelehm in Feld 2 waren nach dem ersten Winter unter KDB und Vlies nur geringe Zergliederungen bis in eine Tiefe von etwa 3 cm bis 5 cm erkennbar. Lediglich die direkte Oberfläche bis ca. 1 cm war umfassend zergliedert und aufgelockert. Die Veränderungen waren nach dem zweiten Winter intensiver, jedoch konnte visuell im Gegensatz zu Feld 1 keine eindeutig größere Eindringtiefe festgestellt werden. Bei der Teilung der Proben im Labor zerfiel jedoch zum Teil der obere Bereich in kleinere Bruchstücke, so daß keine Dichte mehr bestimmt werden konnte.

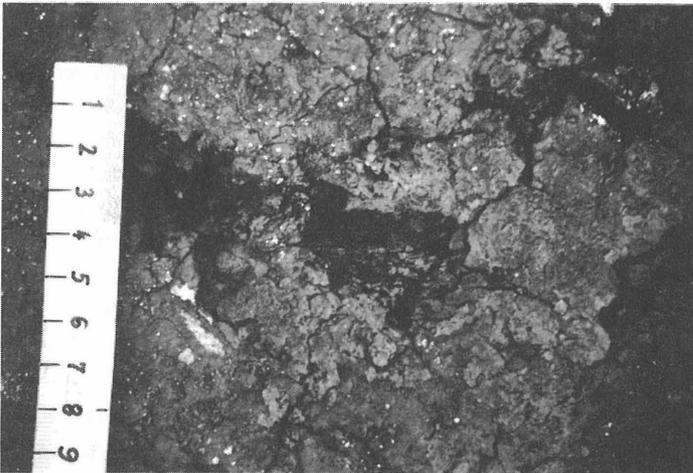


Bild 50: Detailaufnahme der Oberfläche aus Feld 1 nach dem zweiten Winter (April 1993, Abdeckung: KDB und Vlies 2000 g/m²)

Unter allen mit Kies überschütteten Bereichen konnten hinsichtlich des Gefüges keine signifikanten Unterschiede gegenüber der Einbausituation beobachtet werden. In diesen Bereichen wurden allerdings bis auf einen kurzen Zeitraum in Feld 3 auch keine negativen Temperaturen gemessen.

4.3.4.2 Dichte und Wassergehalt

An den mit Ausstechzylindern gewonnenen Proben wurden, soweit dies Art und Zustand des Materials gestatteten, in Scheibendicken von 2 cm die Parameter Dichte (Tauchwägung nach DIN 18 125, Teil 1) und Wassergehalt (DIN 18 121, Teil 1) bestimmt. Auf diese Weise sollten evtl. Vernässungen und Auflockerungen infolge von Eislinnenbildungen mit einer feineren Unterteilung besser lokalisiert werden, als dies mit einer rein visuellen Betrachtung oder mit Zylinderproben der üblichen Abmessungen von 5 cm oder 12 cm Höhe möglich ist.

Bei einigen Materialien und Zuständen war diese feine Unterteilung jedoch nicht immer möglich. Sehr trockene Bereiche oder eine intensive Zergliederung ließen die Proben trotz sorgfältiger Behandlung zerbröseln; Steine und größere Tonsteinpartikel machten die Gewinnung ausreichend großer Probenstücke für eine Dichtebestimmung mittels Tauchwägung unmöglich.

Die letztendlich ermittelten Dichten und Wassergehalte entsprechen im Grundsatz den in der visuellen Ansprache vor Ort gemachten qualitativen Feststellungen.

Bei der nicht abgedeckten Fläche 1 betrug die gemessene Eindringung der 0°C-Grenze im Tagesmittel maximal ca. 25 cm (s. a. Bild 38). Etwa in dieser Tiefe erreichten nach dem Winter Trockendichte und Wassergehalt wieder die für einen Einbau vom Fremdüberwacher freundlicherweise mitgeteilten zulässigen Werte. Bei der Installation der Meßanlage am 10.12.91 war die Oberfläche bis in eine Tiefe von ca. 10 cm gefroren. Die an diesem Tag entnommenen Proben wiesen bereits eine erhebliche Veränderung in der oberen Zone bis ca. 14 cm Tiefe auf. Die weitere Entwicklung von Trockendichte und Wassergehalt für verschiedene Probenahmestellen und -zeiten ist in Bild 51 dargestellt.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die neben dem Versuchsfeld 1 nach dem ersten Winter mögliche Probenentnahme in der ebenfalls nicht abgedeckten Deponiefläche (Bild 52). Die Proben stammen jeweils von einem Hochpunkt und einem Tiefpunkt der dachartig profilierten Deponiefläche. Aufgrund der Lage der Entnahmestellen kann davon ausgegangen werden, daß der Tiefpunkt längere Zeit mit Wasser überflutet war. Bis auf eine deutlich nässere und lockerere Zone im Tiefenbereich von ca. 25 cm bis 31 cm im Tiefpunkt ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Proben des Hoch- und des Tiefpunktes. Die erhöhten Wassergehalte und verringerten Trockendichten erreichten im wesentlichen bei beiden Stellen in ca. 35 cm bis 40 cm Tiefe wieder die zulässigen Einbaugrenzen.

Im oberen Bereich ist bei beiden Stellen bereits der Beginn einer leichten Abtrocknung des Materials ersichtlich. Eine Temperaturmessung der nicht abgedeckten Schicht mit der Anlage im nebenliegenden Feld 1 war leider nicht gestattet.

Bei der **neben Feld 2 offen liegenden Oberfläche** wurde insgesamt eine leichte Austrocknung von $\Delta w \approx 1\% - 2\%$ Wassergehalt in den oberen etwa 30 cm festgestellt. Die Trockendichte stieg in diesen Bereichen um im Mittel $\Delta \rho \approx 0,07 \text{ g/cm}^3$ (Bild 53). Die bei den Tonmaterialien zum Teil lange anhaltenden Vernässungen konnten hier unterhalb von ca. 5 cm nicht festgestellt werden. Die ersten 3 cm bis 5 cm konnten bei der offenen Oberfläche wegen der Zerfallserscheinungen der Ausstechzylinderproben bereits während des Eintreibens oder bei der Aufbereitung meistens nicht für eine Dichtebestimmung verwendet werden.

Bei den mit KDB oder KDB und Vlies abgedeckten Flächen ergaben sich bis auf die obersten Zentimeterbereiche keine so signifikanten und stetigen Veränderungen (Bilder 54 bis 57):

In **Feld 1** wurden gegenüber dem Einbau (keine eigene Probennahme) bei allen folgenden Probenahmen einheitlich niedrigere Wassergehalte ermittelt. Der Unterschied kann nur mit der unterschiedlichen Ermittlung des Wassergehaltes erklärt werden. Die eigenen Wassergehalte wurden mittels Ofentrocknung bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz bestimmt. Die Wassergehalte während des Einbaus wurden abweichend hiervon in der Mikrowelle ermittelt, eine Methode, die nach Untersuchungen von KNÜPFER 1990 durch die Mobilisierung von Kristallwasser zum Teil höhere Werte ergeben kann. Bei einigen nachträglichen Paralleluntersuchungen im Labor wurden mit dem vorliegenden Material Unterschiede bis zu $\Delta w \approx 3\%$ gemessen.

Die Ergebnisse zeigen nur nach dem ersten Sommer in den obersten ca. 10 cm eine leichte Austrocknung; zu den anderen Zeitpunkten oder Tiefen sind keine signifikanten Veränderungen feststellbar. Am Feldrand (ca. 10 cm vom KDB-Rand unter der KDB) wurde nach dem ersten Winter an einer besonders auffälligen Stelle, an der die KDB eine kleine Welle aufwies, eine leichte Vernässung der Oberfläche einhergehend mit einer Verringerung der Trockendichte analog zu den nicht abgedeckten Flächen festgestellt (dünn durchgezogene Kurve ohne Symbole). Alle anderen Wassergehalte liegen im Rahmen der zu erwartenden Schwankungen bei der Ermittlung der Werte.

Die Trockendichten verhalten sich oberflächlich spiegelbildlich zu den Wassergehalten. Bei den Vernässungen am Rand um $\Delta w \approx 10\%$ ist zugleich eine deutliche Verringerung

der Trockendichte um $\Delta\rho \approx 0,17 \text{ g/cm}^3$ festzustellen. Nach dem Sommer 1992 ist einhergehend mit der leichten Abtrocknung der Oberfläche um $\Delta w \approx 3,5\%$ eine Vergrößerung der Trockendichte um $\Delta\rho \approx 0,07 \text{ g/cm}^3$ verbunden. Im weiteren Tiefenverlauf der Trockendichten sind in etwa in den Tiefen der gemessenen 0 C- bis 0,5 C-Isotherme bzw. im zweiten Winter etwa ca. 5 cm tiefer leichte Auflockerungen zu erkennen. Im Gefüge dieser Proben waren jedoch keine Besonderheiten zu erkennen, so daß nicht mit Sicherheit auf Auflockerungen infolge einer Eislinsenbildung geschlossen werden kann.

Im **Feld 2** wurden gegenüber dem Einbau unter der KDB und dem Vlies ebenfalls keine signifikant veränderten Wassergehalte ermittelt (Bild 55). Es ergaben sich jedoch nach dem ersten Winter (3/92) in den obersten ca. 5 cm deutliche Auflockerungen, die sich in einer um ca. 10% geringeren Trockendichte äußerten. In den obersten 2 cm war eine Dichtebestimmung durch den Zerfall der Probe nicht möglich. Eine Parallelprobennahme ca. einen Monat später (4/92, dünnere Linie ohne Symbole) ergab ein ähnliches Bild, zeigt jedoch auch die möglichen Schwankungsbreiten der Ergebnisse. Signifikante Auflockerungszonen im Bereich der Frosteindringungsgrenze (0 C-Grenze im 1. Winter bei ca. 25 cm, im 2. Winter bei ca. 28 cm Tiefe im min. Material) sind nicht erkennbar.

Im **Feld 3** wurden nach den Winterzeiträumen gegenüber dem Einbau keine veränderten Wassergehalte festgestellt (Bild 56). Eine Ausnahme bildet hier die Probennahme nach dem ersten Sommer in einem oberflächlich trocken aussehenden Bereich unter einer KDB-Welle. Wie bereits erläutert, kann es hier infolge der intensiven Wellenbildung und der extrem hohen Temperaturen unter der schwarzen KDB über den Austausch mit der Umluft unter Umständen zu einer Austrocknung gekommen sein. Die Proben für die Dichtebestimmung konnten wegen Zerfalls des Materials im oberen Bereich nicht verwendet werden. Nach dem ersten Winter, in dem die KDB noch relativ flach lag, und dem zweiten Winter, nach dem die Proben aus einem oberflächlich nicht ausgetrockneten Bereich entnommen wurden, wurden keine größeren Veränderungen festgestellt. Die Ermittlung der Trockendichte wurde bei diesem Material wegen sehr vieler eingelagerter Steine bis zur Kiesgröße erschwert und daher teilweise an größeren Probenstücken vorgenommen. Bei den feineren Unterteilungen ergeben sich aus diesem Grund sehr unterschiedliche Dichten.

Bei **Feld 4** sind ähnliche Verhältnisse wie bei Feld 3 zu erkennen. Die Wassergehaltsschwankungen sind hier jedoch absolut gesehen sehr gering und liegen gegenüber dem Einbau $\Delta w \approx \pm 1\%$ an der Nachweisgrenze für größere Erdvolumina. Bei der Trockendichte sind unter der Berücksichtigung der Materialinhomogenitäten und Zusammensetzung des aufbereiteten Tonsteins keinerlei signifikante Veränderungen zu erkennen.

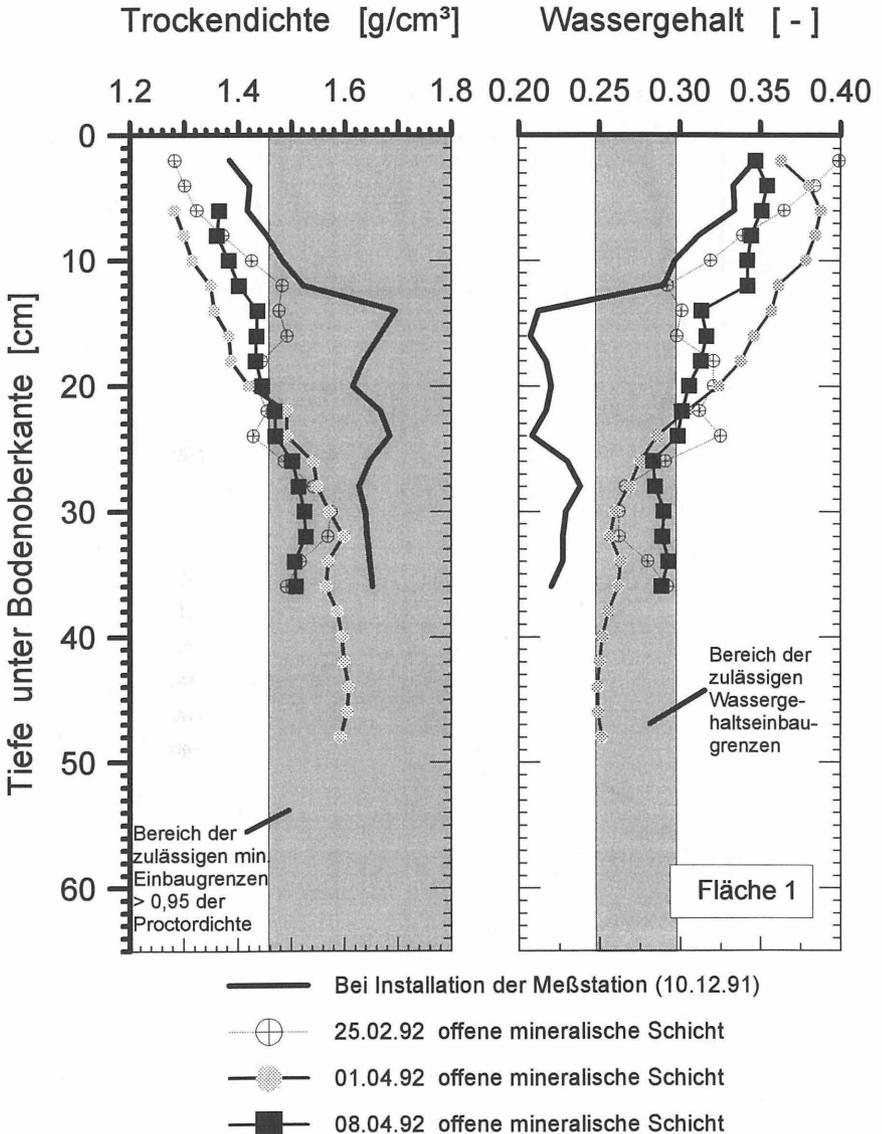


Bild 51: Trockendichte und Wassergehalt über die Tiefe der mineralischen Schicht aus Fläche 1 zu verschiedenen Zeitpunkten nach dem Winter 1991/92 (Abdeckung: keine)

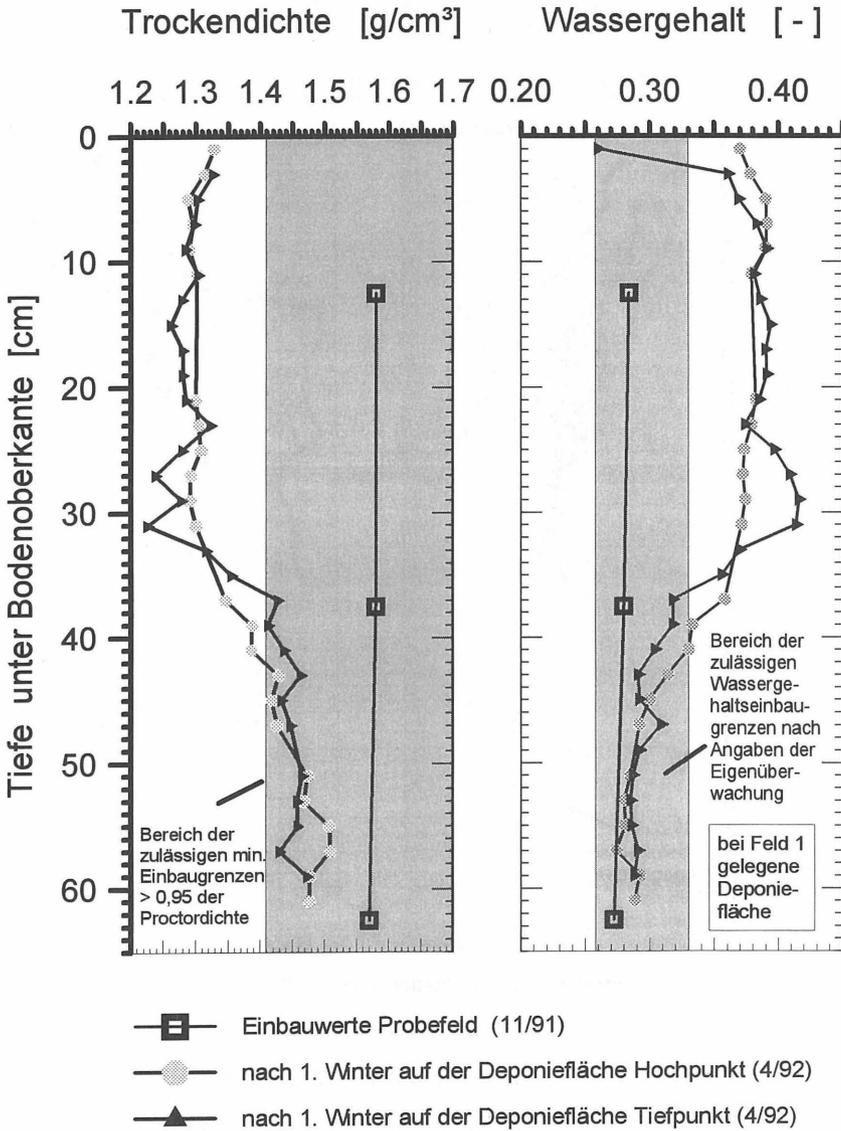


Bild 52: Trockendichte und Wassergehalt über die Tiefe der mineralischen Schicht aus der dem Feld 1 benachbarten Deponiefläche nach dem Winter 1991/92 (Abdeckung: keine)

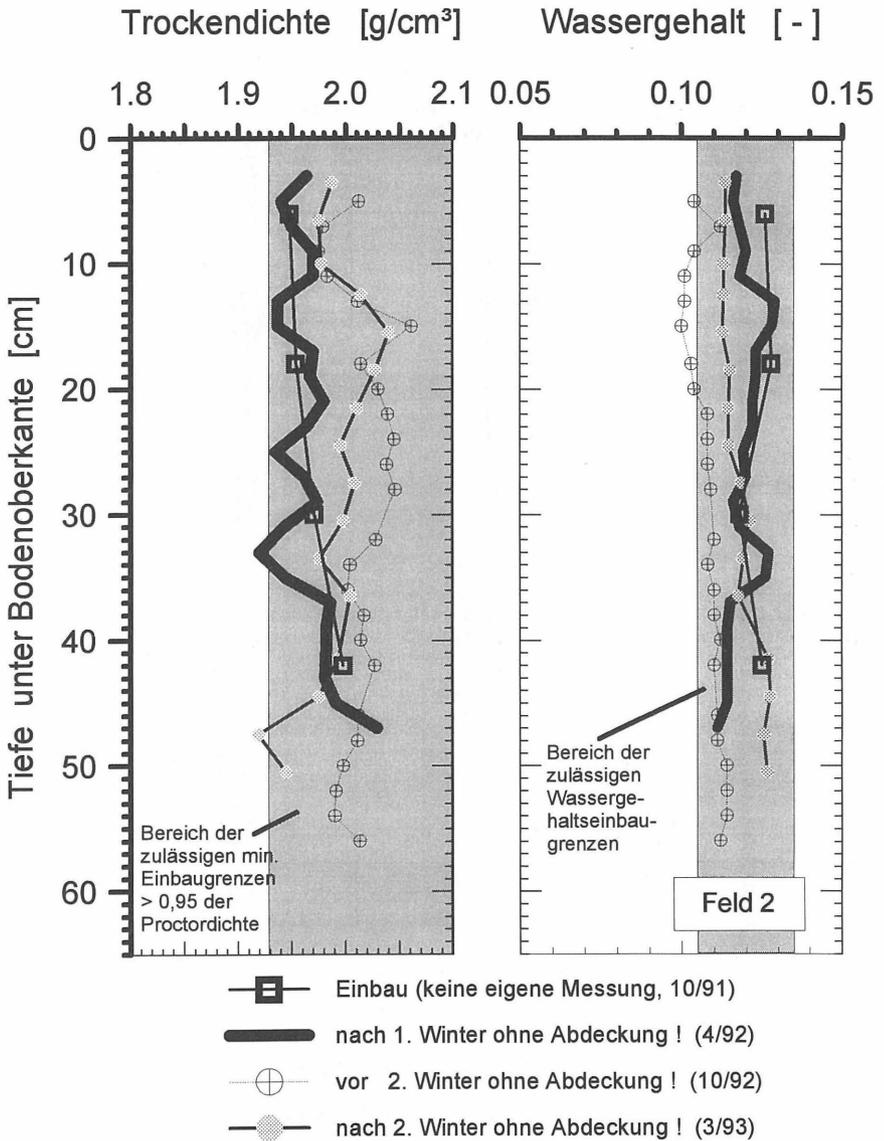


Bild 53: Trockendichte und Wassergehalt über die Tiefe der mineralischen Schicht aus dem neben Feld 2 liegenden Bereich zu verschiedenen Zeitpunkten (Abdeckung: keine)

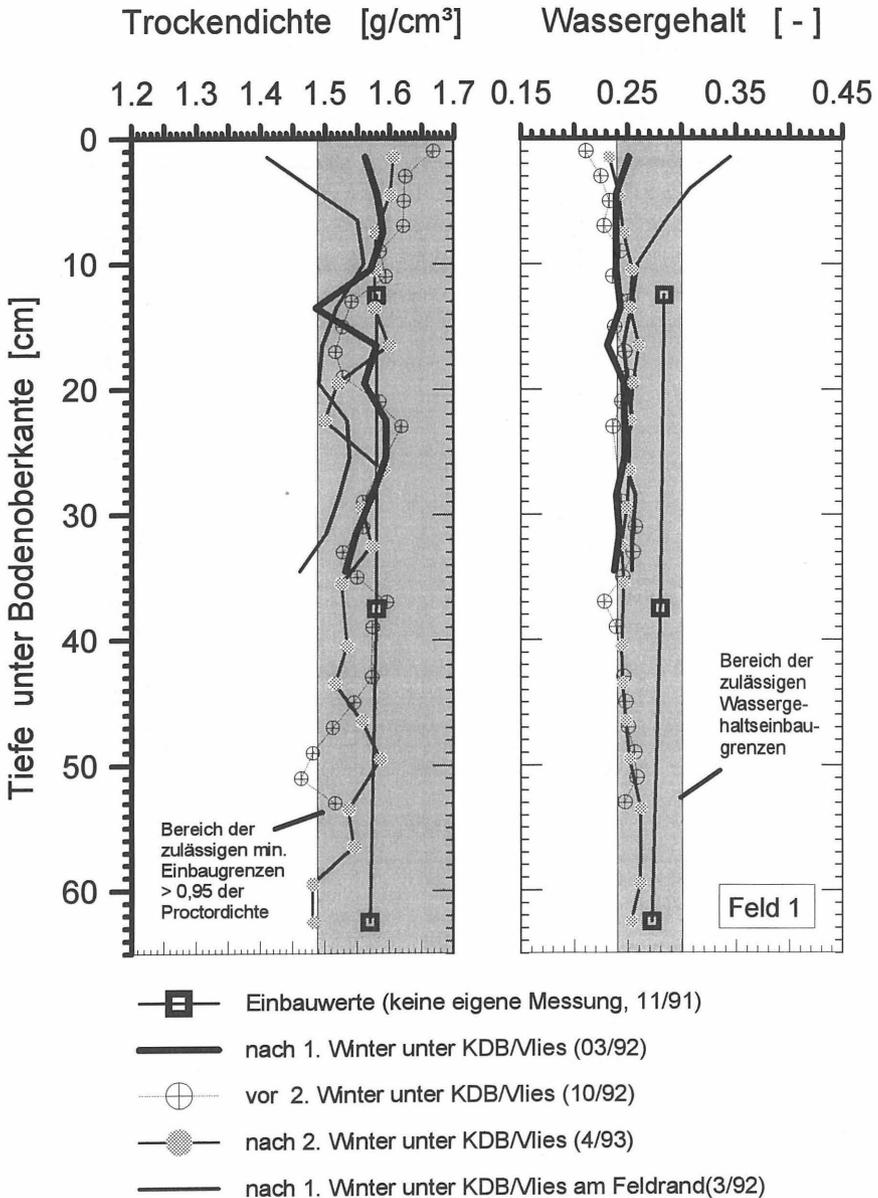


Bild 54: Trockendichte und Wassergehalt über die Tiefe der mineralischen Schicht zu verschiedenen Zeitpunkten (Feld 1, Abdeckung: KDB und Vlies $2000 \text{ g}/\text{m}^2$)

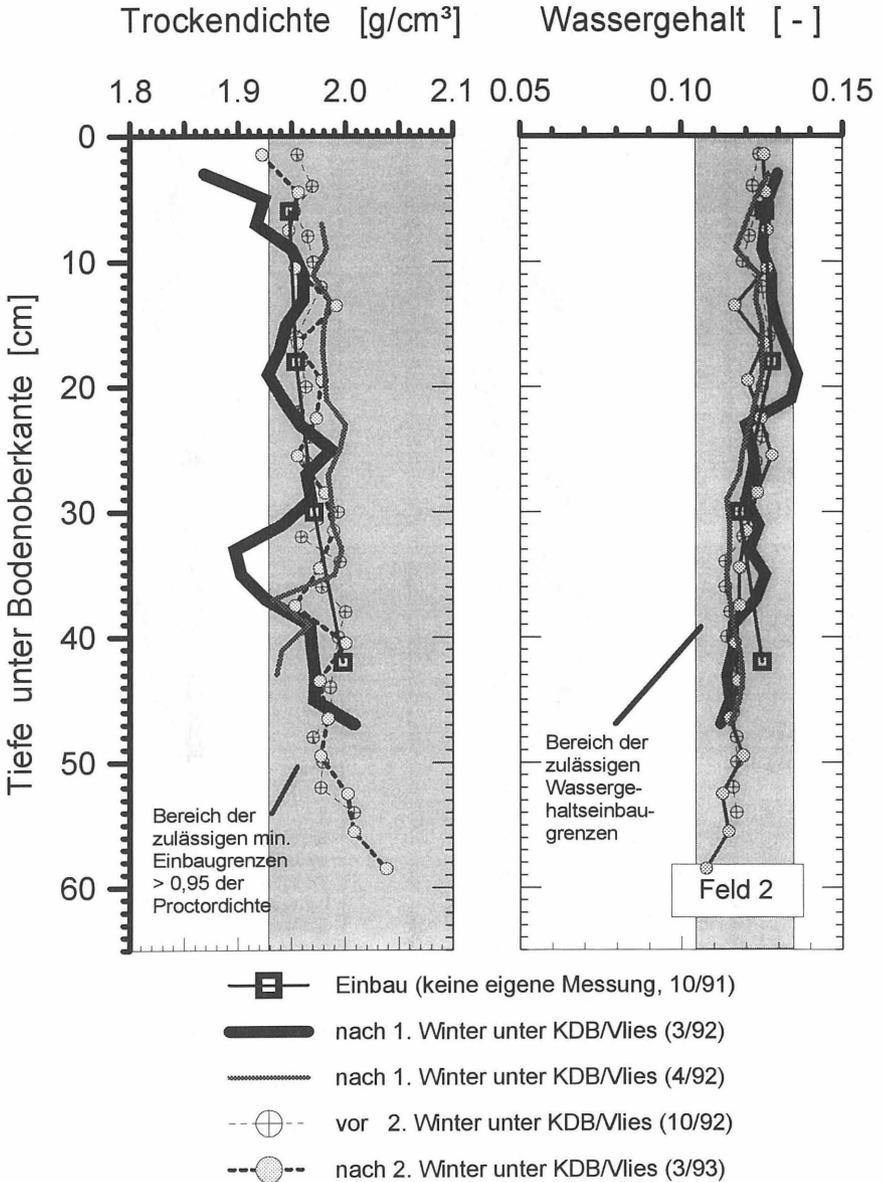


Bild 55: Trockendichte und Wassergehalt über die Tiefe der mineralischen Schicht zu verschiedenen Zeitpunkten (Feld 2, Abdeckung: KDB und Vlies 2000 g/m²)

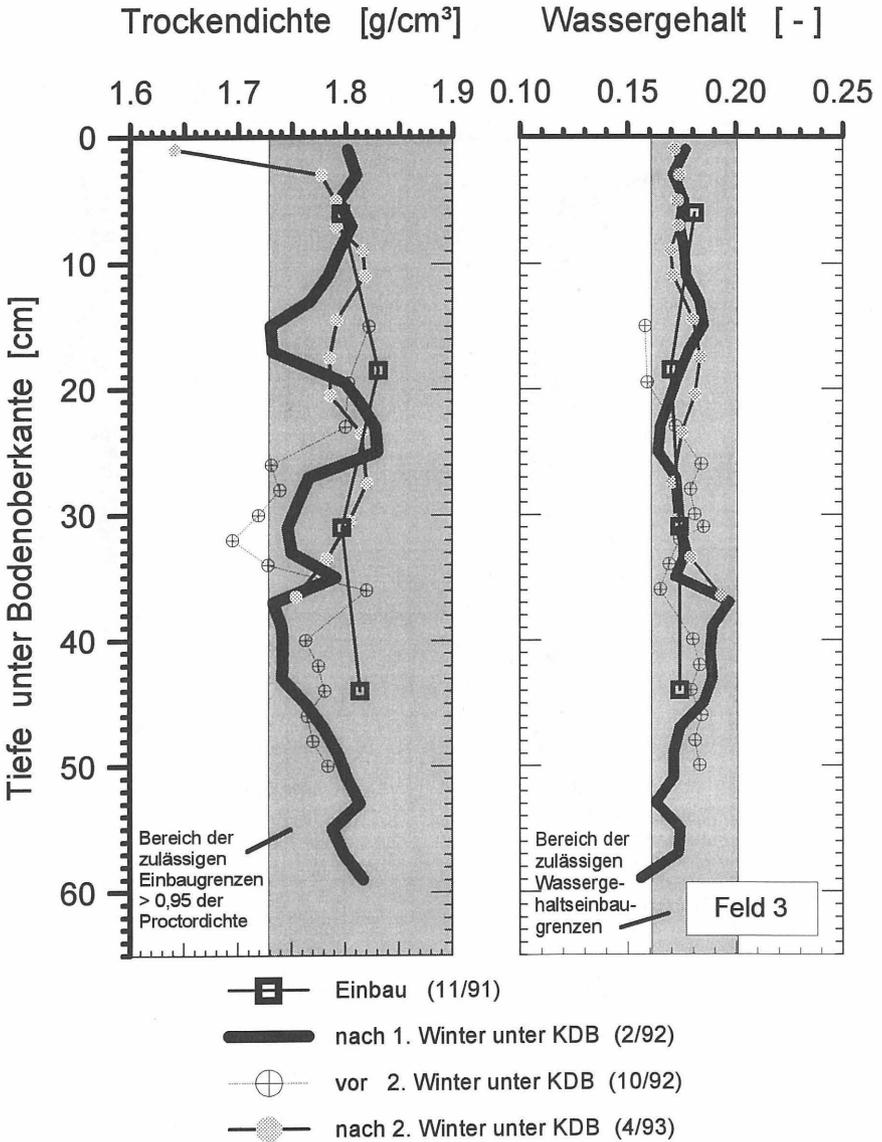


Bild 56: Trockendichte und Wassergehalt über die Tiefe der mineralischen Schicht zu verschiedenen Zeitpunkten (Feld 3, Abdeckung: nur KDB)

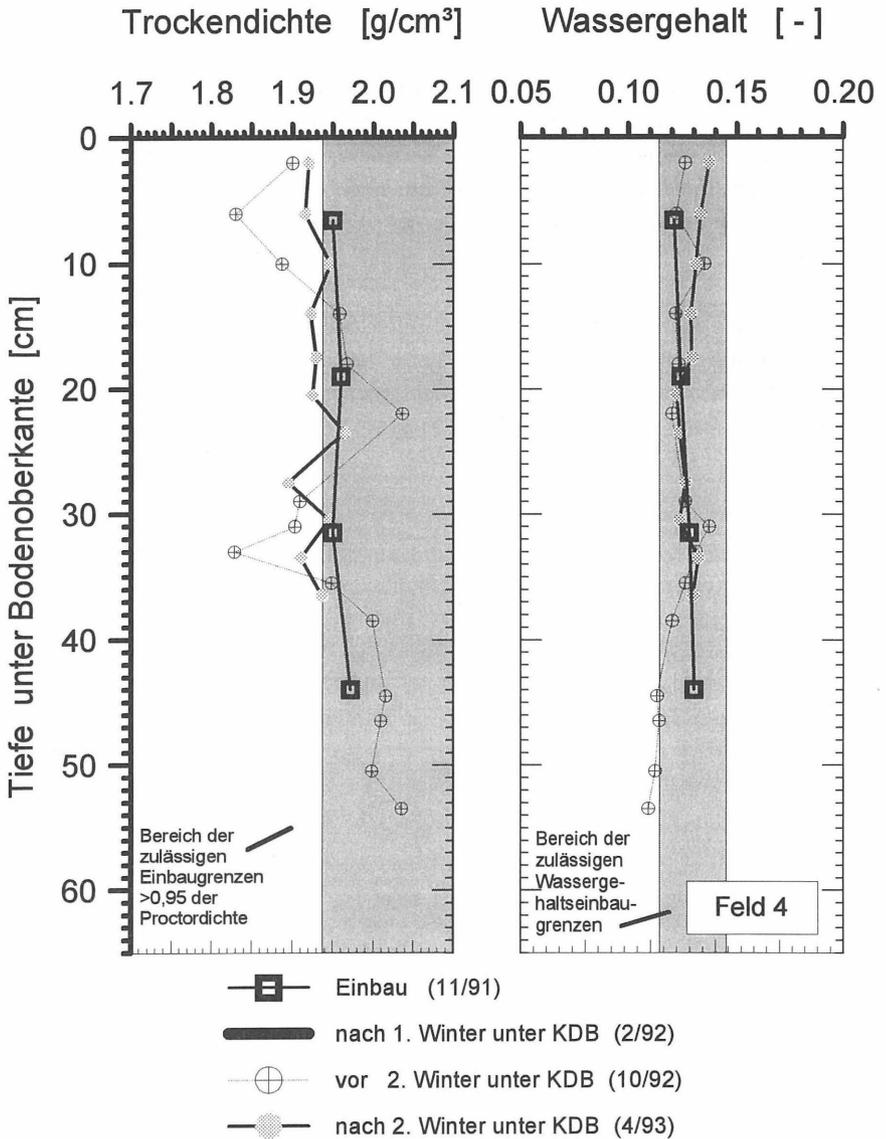


Bild 57: Trockendichte und Wassergehalt über die Tiefe der mineralischen Schicht zu verschiedenen Zeitpunkten (Feld 4, Abdeckung: nur KDB)

Bei den mit Kies belegten Flächen sind nur geringe, im Rahmen der Ermittlungsgenauigkeiten stetige Veränderungen ermittelt worden.

Bei Feld 1 ergibt sich über die gesamte Höhe ein einheitlicher Wassergehalt, der nur in den obersten ca. 4 cm tendenziell geringer wird. Die Dichte ist hier entsprechend leicht erhöht (Bild 58). Gegenüber den unter der Abdeckung mit KDB und Vlies ermittelten Wassergehalten sind in den oberen etwa 25 cm um $\Delta w \approx 1\% - 2\%$ höhere Werte zu erkennen. Bei der Trockendichte läßt sich im übrigen Verlauf kein signifikanter Unterschied erkennen.

Bei den Feldern 3 und 4 sind gegenüber dem Einbauzustand zum Teil geringfügig höhere Wassergehalte um $\Delta w \approx 2\%$ örtlich in ca. 20 cm Tiefe bei Feld 3 und (fast konstant) $\Delta w \approx 1\%$ bei Feld 4 ermittelt worden. Die Dichten liegen um bis zu $\Delta \rho \approx 0,05 \text{ g/cm}^3$ etwas unter den ermittelten Einbaudichten (Bilder 59 und 60).

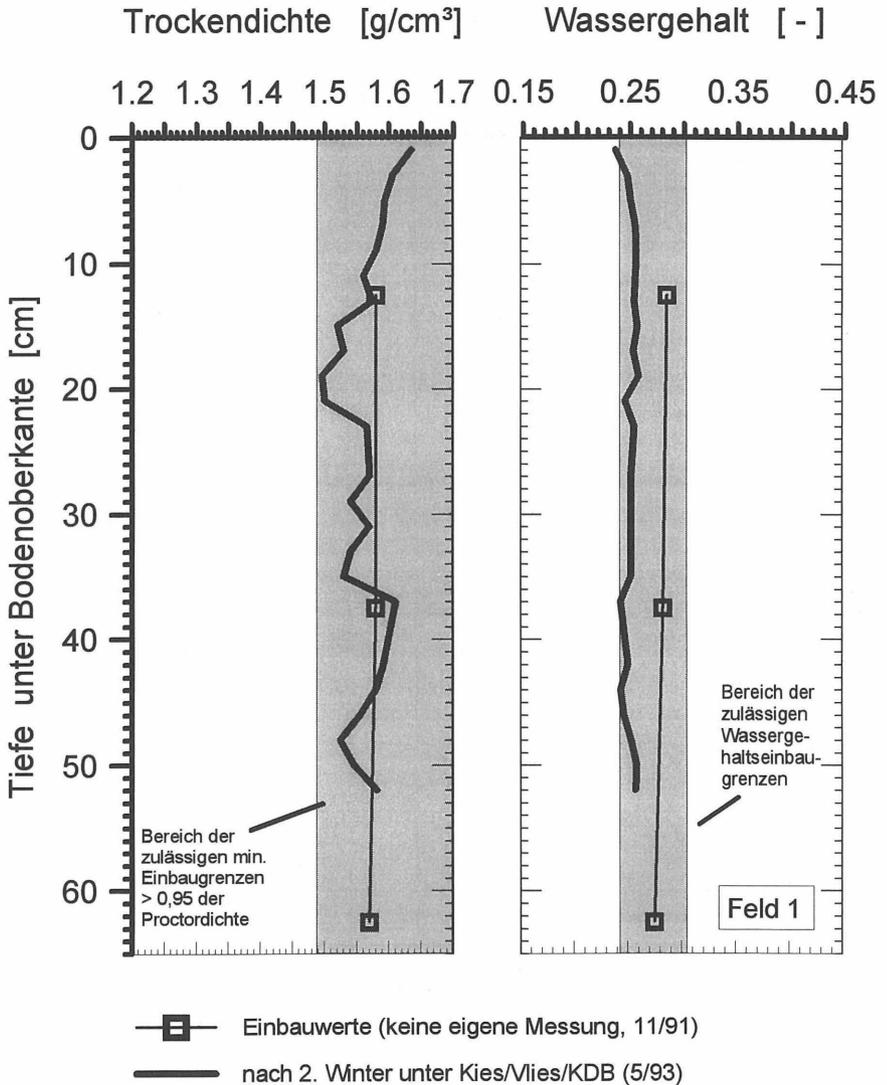


Bild 58: Trockendichte und Wassergehalt über die Tiefe der mineralischen Schicht nach ca. 1 1/2 Jahren (Feld 1, Abdeckung: KDB, Vlies und 60 cm Kies)

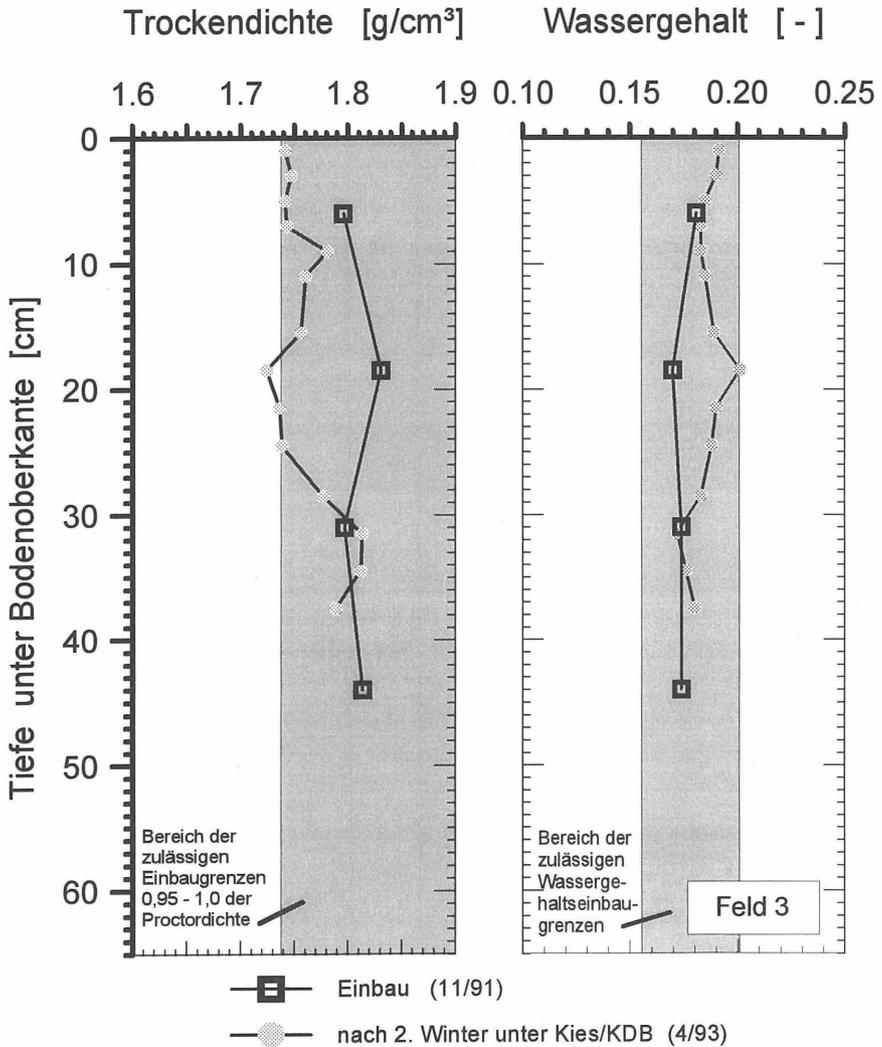


Bild 59: Trockendichte und Wassergehalt über die Tiefe der mineralischen Schicht nach ca. 1 1/2 Jahren (Feld 3, 2 Winterzeiträume, Abdeckung: KDB und Kies)

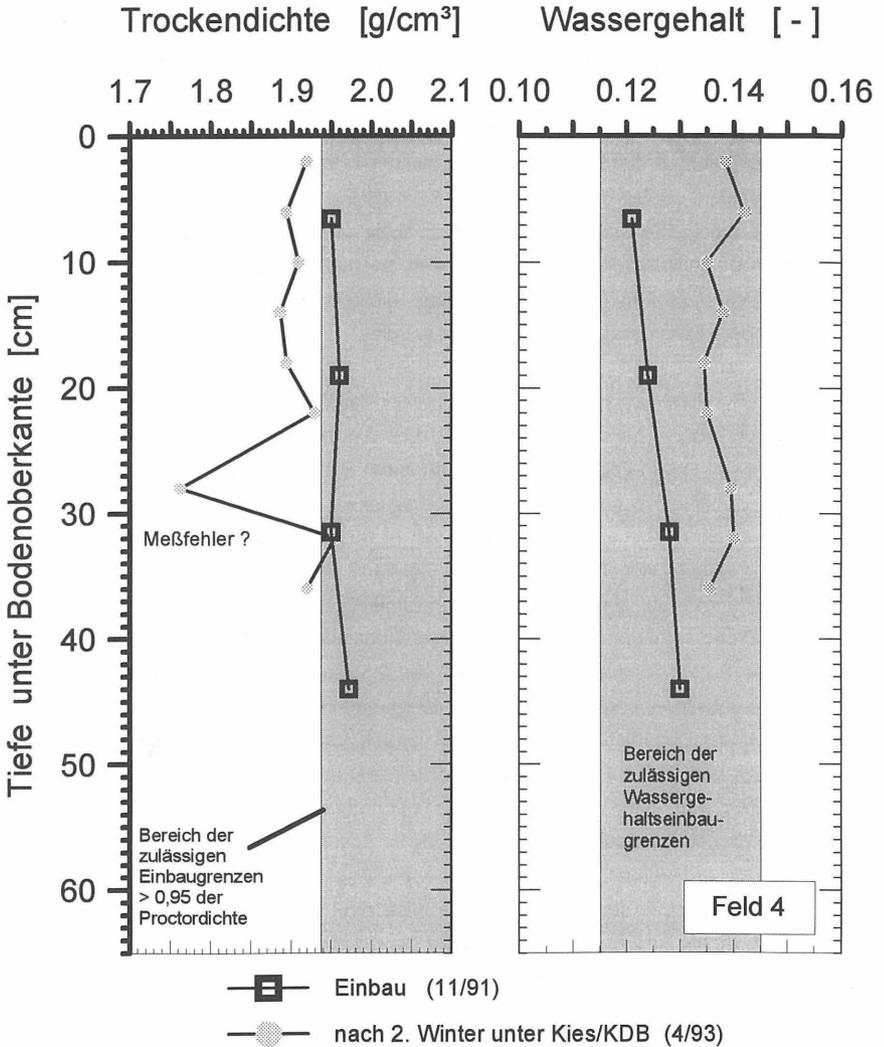


Bild 60: Trockendichte und Wassergehalt über die Tiefe der mineralischen Schicht nach ca. 1 1/2 Jahren (Feld 4, 2 Winterzeiträume)
(Abdeckung: KDB und 40 cm Kies)

4.3.4.3. Wasserdurchlässigkeit

Das wesentlichste Qualitätsmerkmal beim Einbau einer mineralischen Dichtungsschicht ist die Wasserdurchlässigkeit, die nach DIN 18 130, Teil 1 im Labor bestimmt wird.

Um ein möglichst feines Raster über die Schichtdicke der zu untersuchenden Abdichtung zu erhalten, wurden die 12 cm hohen Ausstechzylinderproben für die Durchlässigkeitsprüfung halbiert, so daß die Probenhöhen 5 cm (kleine Ausstechzylinder) bis 6 cm (Normalfall) betragen. Die Halbierung der Proben sollte auch der Bestimmung von falschen, zu kleinen Durchlässigkeiten vorbeugen helfen. Diese entstehen dann, wenn eine 12 cm Probe zu einem großen Teil aus ungestörtem, dichtem Material besteht und die andere Hälfte größere Durchlässigkeiten aufweisen würde.

In einigen Bereichen zu vermutender homogener Verhältnisse oder wenn zu befürchten war, daß die Proben bei der Teilung zu zerfallen drohten, wurden 12 cm Proben durchströmt. Dies ist in den Ergebnisdarstellungen durch Randbemerkungen oder gleiche Nummerierungen kenntlich gemacht. Alle Durchlässigkeitsuntersuchungen wurden bis auf wenige Ausnahmen mit einem Gradienten von $i = 30$ [-] und mit entmineralisiertem Wasser in der Triaxialzelle durchgeführt. Der Zelldruck σ_3 wurde dabei gegenüber dem Durchströmungsdruck zur Vermeidung von Umläufigkeiten zwischen der Gummihülle und dem Probenrand um $\Delta\sigma_3 = 0,2$ bar größer eingestellt. Dies bedeutet bei 6 cm hohen Proben die Aufbringung eines Zelldruckes von 0,38 bar und damit für die Probe eine Konsolidierungsspannung von 38 kPa. Bei 12 cm hohen Proben (normale Ausstechzylindergröße in der Deponieüberwachung) muß berücksichtigt werden, daß bei einem Strömungsdruck von 0,36 bar eine mittlere Konsolidierungsspannung von 56 kPa vorliegt. Bei dem Vergleich von k-Werten aus Proben mit unterschiedlicher Größe müssen daher bei empfindlichen Materialien die Unterschiede im Spannungsniveau beachtet werden.

Bei einer Probenserie des Feldes 1 wurde nach zwei Wochen das Gefälle auf $i = 100$ vergrößert, da bis zu diesem Zeitpunkt keine Durchströmung festgestellt werden konnte. Diese geänderte Randbedingung ist in der Ergebnisdarstellung in Bild 64 gesondert vermerkt.

Im Interesse der Übersichtlichkeit der Darstellung wurde auf eine exakte Tiefeneinordnung der Proben verzichtet. Die zum Teil um 1 cm bis 3 cm tiefenversetzt gewonnenen Proben wurden für die Ergebnisdarstellungen der Bilder 61 bis 67 in Tiefenklassen mit Abstufungen von 6 cm (normale Durchströmungshöhe) nach der Lage der mittleren Probenhöhe eingeordnet. Größere Probenhöhen (12 cm Proben) wurden zwei Tiefenklassen zugeordnet.

Bei den offen liegenden, nicht abgedeckten mineralischen Schichten war die Entwicklung der Durchlässigkeiten sehr vom Material abhängig:

Bei der **Fläche 1** mit nicht abgedecktem Tonmaterial wurden unabhängig vom Wassergehalt und der ermittelten Dichte über die gesamte Höhe k-Werte im Größenordnungsbereich von $k = 5 \cdot 10^{-11}$ m/s bis $k = 5 \cdot 10^{-10}$ m/s ermittelt (Bild 61). Dabei ergab die Durchführung von jeweils drei höhengleichen Parallelproben zur Untersuchung der erzielbaren Ergebnisgleichmäßigkeit bis auf einen Ausreißer nur geringfügige Unterschiede ($k = 7 \cdot 10^{-11}$ m/s bis $k = 1 \cdot 10^{-10}$ m/s).

Zu Vergleichszwecken mit dem Einbauzustand können hier nur die von der Fremdüberwachung zur Verfügung gestellten k-Werte herangezogen werden, da zum Zeitpunkt der frühesten eigenen Probennahmemöglichkeit, bei der Installation der Meßanlage, bereits umfangreiche Veränderungen stattgefunden hatten. Danach lag die ursprüngliche Durchlässigkeit nach dem Einbau bei $k = 2 \cdot 10^{-11}$ m/s bis $k = 7 \cdot 10^{-11}$ m/s. Diese Angaben liegen in der gleichen Größenordnung wie der in der mittleren Tiefe von 45 cm im bezüglich der Dichte und dem Wassergehalt weitgehend unveränderten Bereich ermittelte k-Wert von $k = 6 \cdot 10^{-11}$ m/s.

Dies bedeutet eine Durchlässigkeitssteigerung von maximal etwa einer halben Zehnerpotenz nach einem Winter. Die minimale Anforderungsgrenze beim Einbau von $k \leq 5 \cdot 10^{-10}$ m/s wurde nur einmal von einer Parallelprobe gerade erreicht, ansonsten weit unterschritten. Ein Einfluß der Frosteindringung oder eine Abhängigkeit von der Dichte und dem Wassergehalt kann aus den Ergebnissen infolge der geringen Unterschiede nicht abgeleitet werden.

Bei der dem **Versuchsfeld 1 benachbarten offenliegenden Abdichtung** aus Ton wurden ähnliche Ergebnisse ermittelt. Obwohl auch hier die Abdichtung bis in Tiefen von 35 cm aufgeweicht und aufgelockert war, wurden sowohl im Hoch- als auch im Tiefpunkt der Deponiefläche nur geringfügig größere k-Werte gemessen. Die Einbauwerte auf der Fläche lagen nach Angaben des Eigenüberwachers in der Größenordnung von $k = 2 \cdot 10^{-11}$ m/s bis $k = 8 \cdot 10^{-11}$ m/s, wie sie auch in den tieferen, weitgehend ungestörten Lagen nach dem Winter ermittelt wurden. Die nach dem Winter an den aufgeweichten Materialien ermittelten Werte liegen zwischen $k = 6 \cdot 10^{-11}$ m/s und $k = 2 \cdot 10^{-10}$ m/s (Bild 64, zum Vergleich sind die Werte aus dem benachbarten Versuchsfeld eingetragen). Auch bei diesem Material muß daher mit einer Vergrößerung der Durchlässigkeit von maximal etwa einer halben Zehnerpotenz oder dem Faktor 5 gerechnet werden.

Bei der **neben Feld 2 offen liegenden Oberfläche** des Geschiebelehms wurden insbesondere nach dem zweiten Winter bei einigen Proben erhebliche Steigerungen der Durchlässigkeit festgestellt (Bild 63). Die nach dem Einbau ermittelten k -Werte lagen in der Größenordnung von $3 \cdot 10^{-10}$ m/s bis $1,5 \cdot 10^{-10}$ m/s. Während nach dem ersten Winter in der obersten Schicht eine Steigerung auf $k = 4 \cdot 10^{-10}$ m/s gemessen wurde, lagen alle anderen Werte in der Größenordnung des Einbaus. Nach dem Sommer wurden teilweise, nach dem zweiten Winter überwiegend erhöhte Werte festgestellt.

Nach dem zweiten Winter ergab die oberste Probe, die bei der visuellen Ansprache nur eine leichte Zergliederung aufwies, einen Anfangswert von $k = 3 \cdot 10^{-8}$ m/s, der innerhalb von 5 Tagen auf einen Wert von $k = 2,5 \cdot 10^{-9}$ m/s abfiel. Die während der Durchströmung kleiner werdenden k -Werte waren bei diesem Material in unterschiedlicher Größenordnung und Zeitdauer an mehreren Proben zu beobachten (s. a. Bild 63). Da das Material mit ca. 1% Bentonit und Tonmehl versetzt und insgesamt relativ trocken war, haben wahrscheinlich Quellvorgänge und Verlagerungen von Feinmaterial während der Durchströmung ein Zusetzen der Wasserwegsamkeiten verursacht.

Zusätzlich kann durch die Wasseraufnahme bei der Durchströmung eine gewisse Plastifizierung auftreten, die das Material verformungswilliger macht und unter dem Zelldruck der Triaxialzelle im Lauf der Zeit konsolidieren läßt. Diese Erscheinung der dichter werdenden Proben bei erhöhten Zelldrücken wurden u.a. auch von SEHRBROCK/RODATZ 1988 und KIM/DANIEL 1992 beschrieben. Insgesamt wurde nach dem zweiten Winter bei diesem offenliegenden Material eine Zunahme der konstanten Durchlässigkeit von bis zu $1\frac{1}{2}$ Zehnerpotenzen oder dem Faktor 50 gemessen; die Anfangsdurchlässigkeit bei der k -Wertermittlung in den ersten Tagen war zum Teil über zwei Zehnerpotenzen oder den Faktor 300 größer als der Mittelwert des Einbaustandes.

Bei den mit einer KDB oder KDB und Vlies abgedeckten Feldern ergaben sich differenzierte Durchlässigkeitsverhältnisse. Bei dem Ton aus **Feld 1** sind über die gesamte Beobachtungszeit des Feldes bis auf einen Wert in der mittleren Tiefe von 21 cm nach dem 2. Winter keine eindeutigen signifikanten Unterschiede zu erkennen (Bild 64). Die ermittelten Differenzen liegen in der Größenordnung der Faktoren 3 - 4 mit langfristigen Steigerungen in den oberen Bodenbereichen des Faktors 2. Sie befinden sich damit bei Durchlässigkeiten der Größenordnung $k = 5 \cdot 10^{-11}$ m/s bis $k = 9 \cdot 10^{-11}$ m/s an der Grenze der mit diesem Verfahren erzielbaren sicheren Meßwertunterschiede. Insgesamt liegen die aus den oberen Bereichen des Versuchsfeldes stammenden k -Werte um etwa den Faktor 3 bis 4 niedriger als die aus der benachbarten, nicht abgedeckten Deponiefläche (vgl. Bild 62).

Bei den Durchlässigkeiten des Geschiebelehms aus **Feld 2** ergeben sich über die Beobachtungszeit und die Tiefe stark streuende Werte. Nach dem ersten Winter sind bis auf den Wert in der Tiefe von 45 cm Durchlässigkeitsabnahmen um den Faktor 3 bis 5 zu verzeichnen, was den Messungen aus dem nicht abgedeckten Bereich entspricht. Nach dem anschließenden Sommer steigen die meisten Durchlässigkeiten um bis den Faktor 7 wieder an und überschreiten die Ausgangsdurchlässigkeiten um ein wenig. Nach dem zweiten Winter wurden Werte in der Größenordnung wie nach der ersten Winterperiode gemessen. Die Ergebnisse der Durchlässigkeitsuntersuchungen dieses Feldes stehen damit in bezug auf die Winterperioden im Widerspruch zu der Annahme, daß die beobachtete Zergliederung auf jeden Fall eine Steigerung der Durchlässigkeit zur Folge hat. Die fast über die gesamte Höhe etwas größeren Durchlässigkeiten nach dem Sommer können auch anhand der Trockendichten und Wassergehalte (s. a. Bild 55, Seite 137) nicht erklärt werden.

Die Durchlässigkeiten des Geschiebemergels aus **Feld 3** weisen nach dem ersten Winter keine großen Unterschiede auf (Bild 66, Seite 150). Einhergehend mit einer Austrocknung der oberen Bereiche (s. a. Bild 56, Seite 138) und der damit verbundenen Schrumpfung und Zunahme der Trockendichte ergaben sich jedoch nach dem anschließenden Sommer vor allem in den oberen 12 cm deutliche Steigerungen der Durchlässigkeit. Die Proben wiesen dabei im Verlauf des Durchlässigkeitsversuches, wie auch einige Proben aus dem nicht abgedeckten Bereich des Feldes 2, eine abnehmende Durchlässigkeit auf. Einige Proben wurden innerhalb von 5 Tagen um bis zum Faktor 100 undurchlässiger. Da ein erneuter Einbau derselben Probe kein wesentlich anderes Ergebnis ergab, kann ein Zusetzen der Filtersteine ausgeschlossen werden und die Zusetzung der Wasserwegsamkeiten mit Feinstteilchen und eine zunehmende Konsolidierung der Probe als Ursache angesehen werden.

Bei den Durchlässigkeiten des aufbereiteten Tonsteins aus **Feld 4** ergeben sich stark streuende Werte, was auch mit dem großen Anteil an größeren Tonsteinpartikeln und der damit verbundenen schwierigen Probenentnahme und Aufbereitung zusammenhängt. Nach dem ersten Winter sind im wesentlichen nur sehr leicht erhöhte Durchlässigkeiten zu verzeichnen, die nicht als signifikant angesehen werden können (Bild 67). Nach dem Sommer und wie in Feld 3 mit der Austrocknung der oberen Bereiche einhergehend sind die oberflächennah entnommenen Proben um eine halbe Zehnerpotenz durchlässiger geworden. Die oberste Probe konnte aufgrund ihres Zerfalls während des Ausdrückens aus dem Ausstechzylinder nicht geprüft werden. Da sie aber relativ trocken und zergliedert erschien, wurde ihr in Bild 67 ein imaginärer k -Wert von $k = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s zugeordnet.

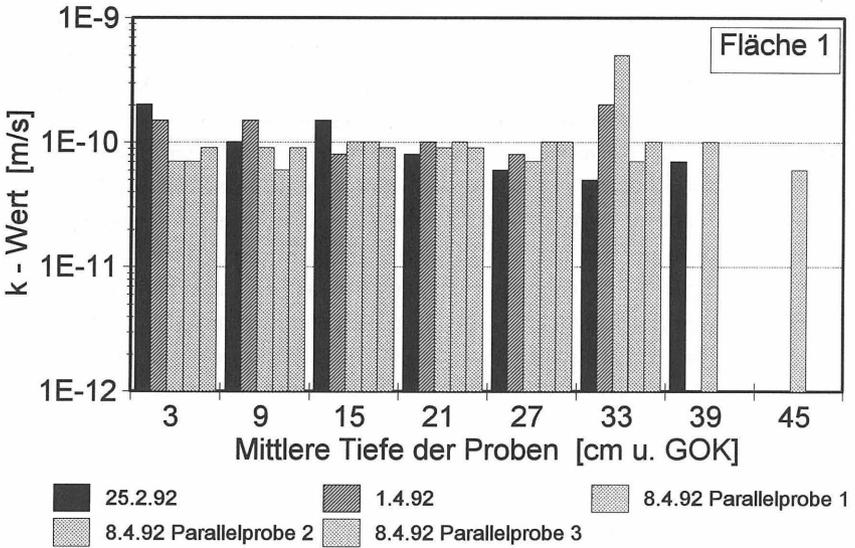


Bild 61: Ergebnisse der Durchlässigkeitsuntersuchungen aus der Fläche 1 (Abdeckung: keine)

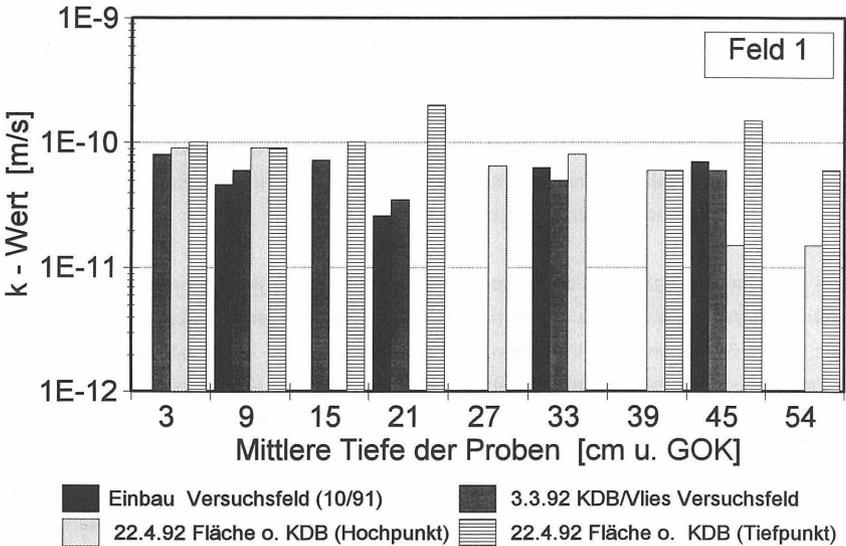


Bild 62: Ergebnisse der Durchlässigkeitsuntersuchungen aus der Feld 1 benachbarten offenen Deponiefläche im Vergleich zu den Werten aus Feld 1 (Abdeckung Fläche: keine; Abdeckung Feld 1: KDB und Vlies)

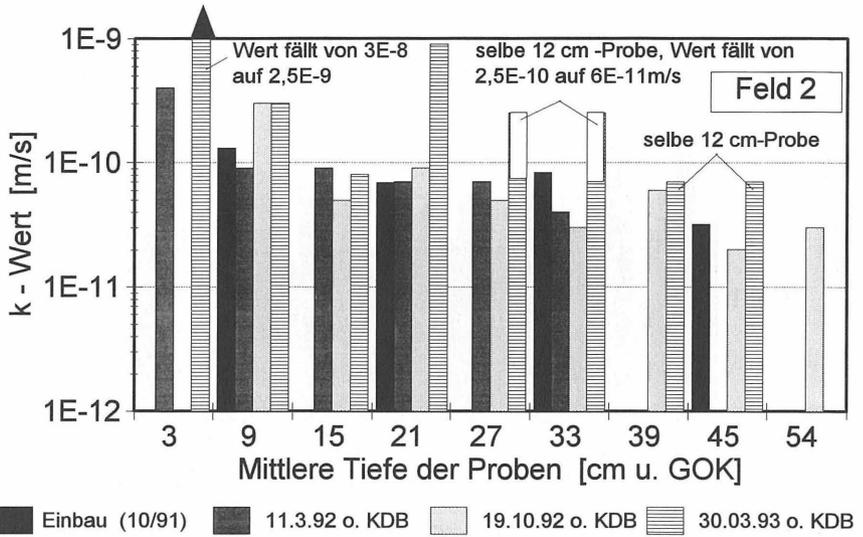


Bild 63: Ergebnisse der Durchlässigkeitsuntersuchungen aus dem neben Feld 2 offen liegenden Bereich (Abdeckung: keine)

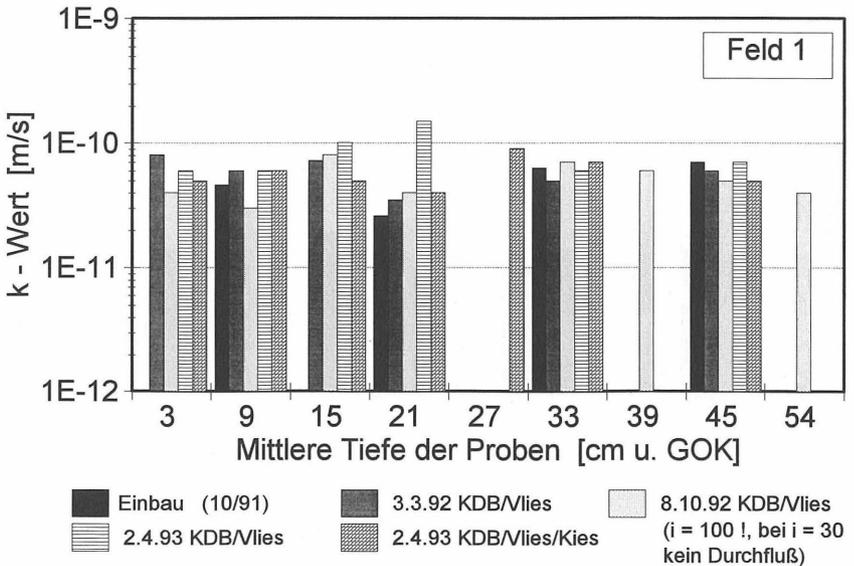


Bild 64: Ergebnisse der Durchlässigkeitsuntersuchungen aus Feld 1 (Abdeckung: KDB und Vlies)

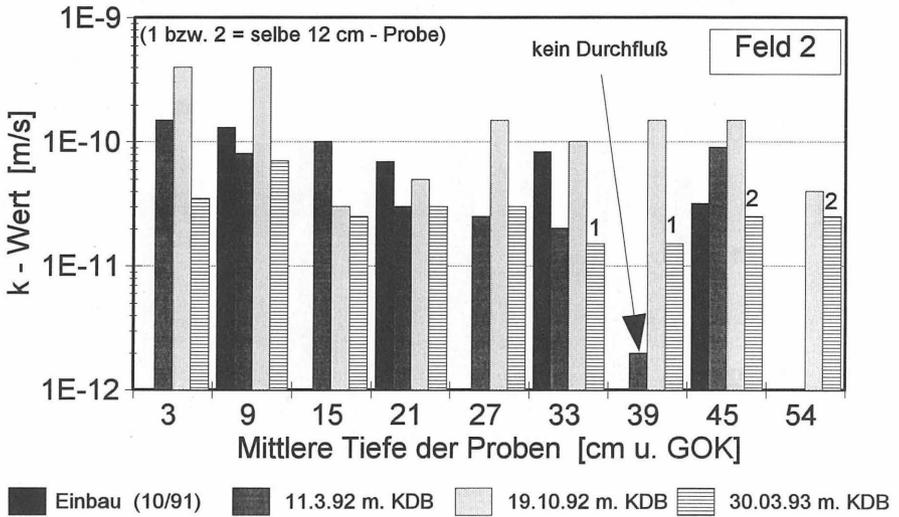


Bild 65: Ergebnisse der Durchlässigkeitsuntersuchungen aus Feld 2 (Abdeckung: KDB und Vlies)

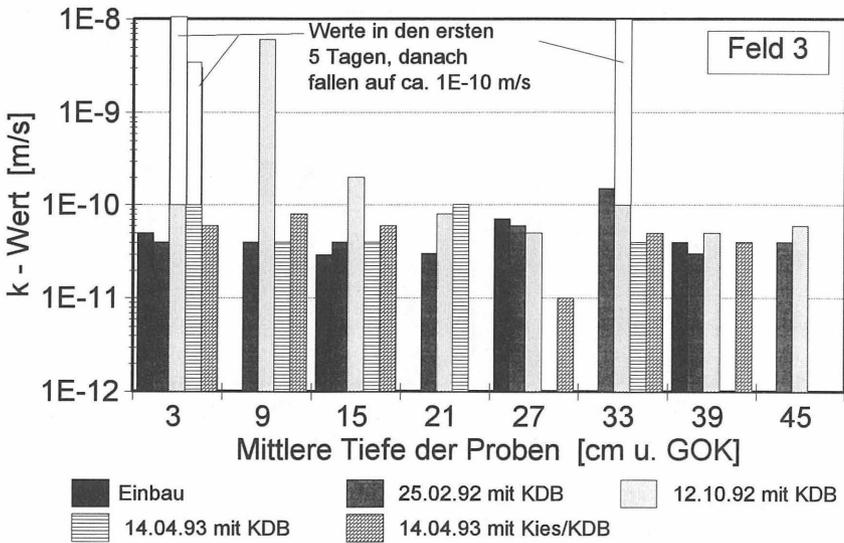


Bild 66: Ergebnisse der Durchlässigkeitsuntersuchungen aus Feld 3 (Abdeckung: KDB und KDB/Kies)

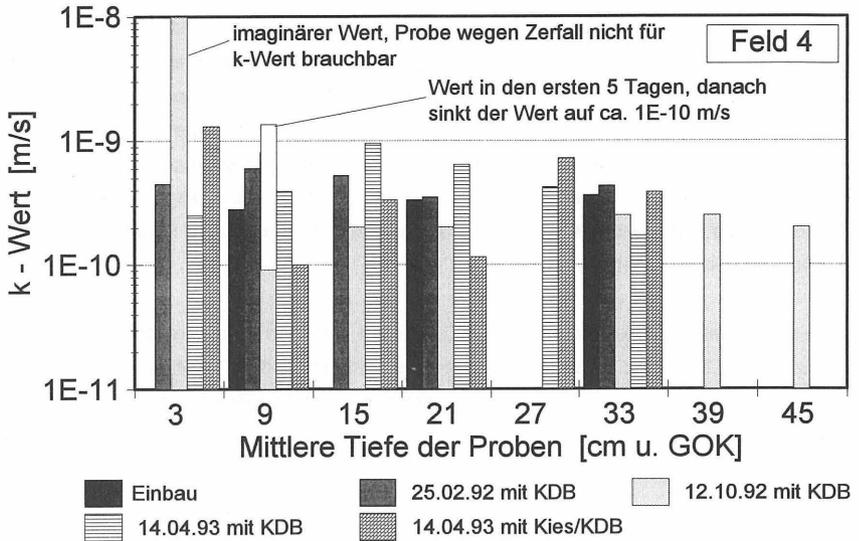


Bild 67: Ergebnisse der Durchlässigkeitsuntersuchungen aus Feld 4 (Abdeckung: KDB und KDB/Kies)

Nach dem zweiten Winter ergaben sich vor allem im Tiefenbereich von 12 bis 24 cm um den Faktor 3 bis 5 leicht erhöhte Durchlässigkeiten. Dies ist zwar in etwa die Tiefe der Frosteindringung (s. a. Tabelle 23, Seite 115), in Anbetracht der übrigen Schwankungsbreiten bei diesem Material und unter Berücksichtigung der ermittelten Trockendichten und Wassergehalte kann jedoch nicht auf einen verursachenden Einfluß des Frostes geschlossen werden.

Bei den mit Kies belegten Flächen der Felder 1, 3 und 4 konnten im wesentlichen keine signifikanten Durchlässigkeitsunterschiede gegenüber den Einbauständen nachgewiesen werden (Bilder 64, 66 und 67). Nur bei Feld 4 waren die Abweichungen etwas größer (bei dem obersten Wert Faktor 5), was sicherlich auch mit der weiter oben angesprochenen generellen Materialproblematik zusammenhängt.

4.3.4.4 Scherfestigkeit

Sollten sich infolge von Frosteinwirkungen Wasserbewegungen und evtl. örtliche Ansammlungen durch Eislinsen einstellen, so ist der noch nicht drainierte und unkonsolidierte Zustand nach dem Auftauen der für die Standsicherheit kritischste. Die Untersuchungsmethode, die für die Proben aus den in situ-Versuchen eingesetzt wurde, sollte auch für die Laborversuche verwendet werden und die Untersuchung auch leicht gemischtkörniger Böden zulassen. Als Indextest zur Ermittlung der Festigkeit des Materials wurde daher der Rahmenscherversuch ausgewählt, da dieser i. d. R. auch bei etwas größeren Böden einsetzbar ist.

Da davon ausgegangen werden mußte, daß nicht von allen zu untersuchenden Proben ausreichend Material für die Untersuchung von mindestens drei Scherfugen der gleichen Höhenlage in der Probe und damit der gleichen Frost-Tau-Geschichte zur Verfügung stehen würde, wurde als Indextest i. d. R. die Schubspannung im unkonsolidierten und undrainierten Zustand unter einer Auflast von 50 kPa bestimmt.

Bei den ermittelten Schubspannungen und Scherfestigkeiten ergaben sich erwartungsgemäß eindeutige Abhängigkeiten vom Wassergehalt. In Bild 69, Seite 153 sind beispielhaft die Ergebnisse aller nach dem Winter durchgeführten Scherverversuche des Materials aus der nicht abgedeckten Fläche 1 in Abhängigkeit vom Wassergehalt dargestellt. Mit zunehmendem Wassergehalt sinken die Festigkeiten erheblich, was eine Reduzierung der Standsicherheit zur Folge hat. Auch bei dem Ton aus Feld 1 konnte für die relativ geringe Wassergehaltsschwankung von $\Delta w = 5\%$ eine Abhängigkeit der Schubspannung vom Wassergehalt mit der erforderlichen Genauigkeit nachgewiesen werden (Bild 68).

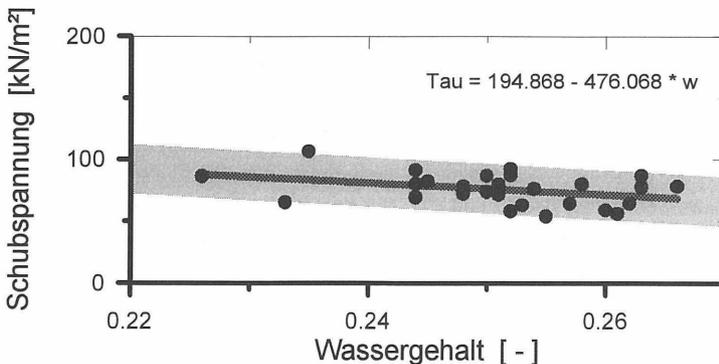


Bild 68: Schubspannung in Abhängigkeit vom Wassergehalt aus 28 Einzelversuchen an Ausstechzylinderproben aus Feld 1 (UU, Tonmaterial)

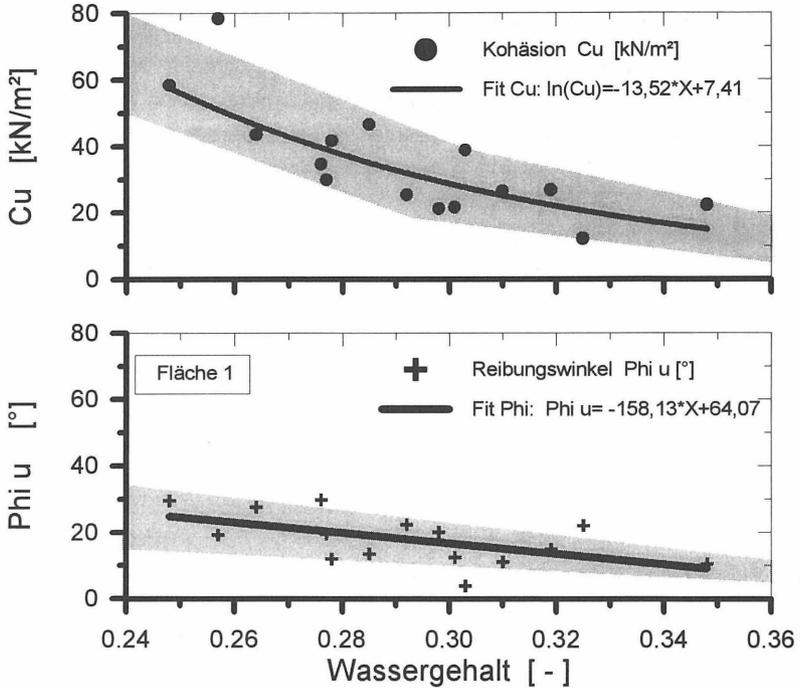


Bild 69: Kohäsion und Reibungswinkel aus 15 unkonsolidierten, undrainierten Rahmenscherversuchen in Abhängigkeit vom Wassergehalt (Fläche 1)

Bei den Untersuchungen der Materialien der abgedeckten Felder mit den gemischtkörnigen Böden Geschiebelehm (Feld 2), Geschiebemergel (Feld 3) und aufbereiteter Tonstein (Feld 4) ließen sich aufgrund der geringen Wassergehaltsunterschiede über die Schichthöhe keine eindeutigen Abhängigkeiten ableiten. Bei diesen Böden ergaben sich zudem durch die zahlreichen zufällig verteilt eingelagerten größeren Partikel (Tonsteinteilchen, Grobsande und Fein-/Mittelkieskörner) erhebliche Unterschiede in den Scherfestigkeiten, die eine sinnvolle Interpretation für die hier vorliegenden Fragestellungen nicht zuließen.

An allen Proben aus den Versuchsfeldern konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen zuvor gefrorenen und ungefrorenen Materialien gleichen Wassergehaltes, etwa in Abhängigkeit von dem visuellen Zergliederungsgrad, ermittelt werden.

4.3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Felduntersuchungen

Insgesamt ist festzustellen, daß sich vor allem bei Tonen nach einer mit einem Wasserzutritt kombinierten Frosteinwirkung Wassergehalte und Trockendichten erheblich und räumlich tiefgreifend verändern und die geforderten Einbaugrenzen bei weitem über- bzw. unterschritten werden.

Kann ein Wasserzutritt von oben verhindert werden, sind bei Frosteinwirkung nur in den oberen Zentimeterbereichen leichte Veränderungen erkennbar. Diese äußern sich vor allem in einer etwas geringeren Trockendichte, soweit das System gegen Austrocknungen durch den Austausch mit der Umluft vor allem in warmen Jahreszeiten geschützt ist. Kann der durch die Verdunstung entstehende Wasserdampf entweichen, tritt eine Abnahme des Wassergehaltes und eine durch Schrumpfung verursachte Erhöhung der Trockendichte ein. Dieses Material ist i. d. R. dann durch zahlreiche Risse und Fissuren zergliedert. Eine durch Frosteinwirkung verursachte Wasserbewegung konnte an den Feldproben nicht mit ausreichender Sicherheit nachgewiesen werden.

Die Durchlässigkeiten liegen bei nicht abgedeckten Tonen nach dem Winter um etwa eine halbe Zehnerpotenz oder den Faktor 5 höher; bei verhindertem Wasserzutritt konnten keine signifikanten Veränderungen gemessen werden.

Bei dem untersuchten, nicht abgedeckten Geschiebelehm wurde zu fast gleichen Untersuchungszeitpunkten ein zu den Tonen und dem abgedeckten Bereich gegensätzliches Ergebnis erhalten. Das Material trocknete nach den Vernässungen des Winters, die während der Wartungsarbeiten an der Wetterstation beobachtet wurden, offensichtlich sehr schnell und relativ einheitlich auch über die Tiefe wieder ab. Die Trockendichte war stets gleich oder größer gegenüber dem abgedeckten Bereich. Dieser Vorgang der größer werdenden Trockendichte bei nur wenig geänderten Wassergehalten konnte auch bei einem anderen, vergleichbaren Material, das mehrere Jahre ohne Abdeckung und ohne Auflast der Witterung ausgesetzt war, beobachtet werden. Es ist zu vermuten, daß sich die Einzelkörner während der Trocknungs-Befeuchtungs-Zyklen zu einer dichteren Lagerung einregulieren.

Die Durchlässigkeiten zeigten bei diesem Material erheblich größere Streuungen, die jedoch vor allem nach dem ersten Sommer höhere Durchlässigkeiten ergaben. Die durch Frostsprengungen und Austrocknungen erhaltenen Fissuren führten hier zu größeren Durchlässigkeiten, die durch eine Wiedervernässung teilweise geschlossen wurden.

Die Materialien Tonstein und Geschiebemergel wiesen nach dem ersten Winter nur geringfügige Veränderungen auf. Nach dem Sommer sind jedoch, einhergehend mit einer Austrocknung, vor allem in den oberen Bereichen erhebliche Durchlässigkeitssteigerungen zu verzeichnen.

Bei allen unter Kies ermittelten bodenmechanischen Werten wurden keine signifikanten Unterschiede zu den Einbauwerten ermittelt.

4.4 Laborversuche

4.4.1 Vorbemerkungen

Bei der Untersuchung von Feldproben sind die Randbedingungen, denen das Probenmaterial ausgesetzt ist, selten in ihrer Gesamtheit bekannt und können daher teilweise nicht berücksichtigt werden bzw. führen zu Fehlinterpretationen. Insbesondere die thermische Vorbelastung durch Wärme oder Frost ist bei Feldproben schwierig einzuordnen. Die Bodentemperaturen in den hier interessierenden Tiefenlagen und Zeiträumen orientieren sich vornehmlich am Klima, sind in den oberen Bereichen damit sehr kurzfristigen Schwankungen unterworfen und bewegen sich nur selten über eine längere Zeit auf einem konstanten Niveau. Dies macht grundsätzliche Aussagen zum Verhalten von Böden unter thermischen Belastungen anhand von Feldproben schwierig und meistens nur in Abhängigkeit von Summenparametern möglich. Um einige grundsätzliche Erkenntnisse über die Einwirkung von Frost auf Bodenmaterialien für mineralische Abdichtungszwecke zu untersuchen, wurden daher Laborversuche unter definierten Randbedingungen durchgeführt.

4.4.2 Konzeption und Meßeinrichtungen

Mit den Laborversuchen sollte der Einfluß von negativen Temperaturen auf Materialien untersucht werden, die für mineralische Abdichtungen eingesetzt werden. Ausgewählt wurden hierfür die Böden aus den Versuchsfeldern, um unter Umständen direkte Vergleiche zwischen Feld- und Laborergebnissen anstellen zu können.

Die zu konstruierende Versuchsapparatur und die Versuchsdurchführung sollten die wesentlichsten Randbedingungen der Situation in situ erfüllen. Daher wurden folgende Randbedingungen und Anforderungen formuliert, die zu berücksichtigen waren:

- Die Gefrierung der Probe soll eindimensional von oben erfolgen, um evtl. Wasserwanderungen aus tieferen Bodenbereichen zu ermöglichen und damit verbundene

Struktur- und Gefügeänderungen zu berücksichtigen, die bei einer dreidimensionalen Gefrierung zum Teil verändert ausfallen.

- Die Eindringung der Frostfront soll möglichst gleichmäßig über die gesamte Probenfläche erfolgen. Dies bedeutet die Notwendigkeit einer ausreichenden Isolierung der Proben an der Seite, um ein Voreilen der Frostfront in der Mitte der Proben durch zuviel Wärmezufuß von den Seiten oder am Rand der Probe durch quasidreidimensionale Gefrierung zu verhindern.
- Die Proben sind mit definierten Temperaturgradienten zu untersuchen. Hierfür ist neben der Aufbringung einer negativen Temperatur an der Oberfläche eine regelbare Beheizung an der Probenunterseite erforderlich.
- Die Gefrierung der Proben soll in einem sogenannten "geschlossenen System" durchgeführt werden. Das bedeutet, daß der Probe während des Versuches keine Möglichkeit gegeben wird, Wasser von außerhalb der Probe aus einem Vorratsgefäß aufzunehmen.

Hierbei wurde von den zwei grundlegenden Randbedingungen ausgegangen, daß zum einen die mineralische Schicht entsprechend den einschlägigen Vorschriften mindestens 1 m über dem zu erwartenden freien Grundwasserspiegel liegen muß (TA ABFALL 1991, RDERL. NDS. 1988) und somit keinen direkten, sondern nur kapillaren Kontakt zum Grundwasser hat. Zum anderen wird vorausgesetzt, daß die Eindringung einer Frostfront nicht die gesamte Schichtdicke der mineralischen Abdichtung erfaßt (i. d. R. $d \geq 0,75$ m zuzüglich isolierender Schutz- und Drainageschichten) und somit ein zum freien Grundwasser hin ungestörter Bereich der Abdichtung verbleibt. Dieser Bereich wird mit seinen ungestörten abdichtenden Eigenschaften als mächtig genug angesehen, für die Dauer der in unseren Breiten zu erwartenden Frostzeiträume keine relevanten Mengen an Wasser für eine verstärkte Eislinnenbildung durchzulassen.

- Die Probe muß während des Versuches gegen Wasserverluste infolge Verdunstung oder Sublimation von Eis geschützt werden. Hierzu wurde die Probe vollständig mit einem wasserdichten, dünnen und adhäsiven Kunststoffmaterial eingeschlossen.
- Die Versuchsapparatur soll verschiedene Durchmesser und Höhen von Probekörpern zulassen. Dies ist vor allem für die spätere Verwendung gemischtkörniger Böden oder von Bentokiesmaterial erforderlich.
- Zur Untersuchung des Zeiteinflusses soll die Versuchsapparatur die Entnahme von Proben gleicher thermischer Belastungsgeschichte zu verschiedenen Zeiten mit möglichst geringem Einfluß auf das restliche Probenmaterial ermöglichen.

Infolge der genannten Randbedingungen wurden zwei verschiedene Konzepte für die Gefrierversuche verfolgt:

1. **großmaßstäbliche Proben** mit der Gewinnung von Einzelproben mittels Ausstechzylinder aus einem Materialblock analog den Verhältnissen in situ (Bild 70) und
2. **kleinmaßstäbliche Einzelproben** in Form von Normproctorproben, die teilweise ohne Störung des Materials direkt weiterverarbeitet werden können (Bild 71).

Die Auswahl der Probengröße für die großformatigen Proben wurde durch Kompromisse zwischen dem Wunsch nach möglichst großen Materialstücken der exakt gleichen thermischen Belastungsgeschichte, der Möglichkeit der Herstellung homogener, reproduzierbarer Proben im Labor, des Breiten/Höhenverhältnisses in bezug auf die Isolierungswirkung, der zu erwartenden Handhabbarkeit in bezug auf das Gesamtgewicht und der Größe des einzustellenden thermischen Gradienten bestimmt. Ausgewählt wurde eine Probengröße mit einem Durchmesser von 25 cm, einer Probenhöhe von ca. 20 cm und einem zu erwartenden mittleren Einbaugewicht von etwa 20 kg (Proctortopf Größe III). Diese Größe wurde als ausreichend erachtet, bei vorsichtiger Arbeitsweise vier Standardausstechzylinderproben mit einem Durchmesser von ca. 10 cm zu gewinnen.

Die Auswahl der Probengröße für die kleinformatigen Einzelproben fiel auf den Standardproctortopf mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Höhe von 12 cm. Die Auswahlkriterien waren hier vor allem das Minimum an sinnvoller Größe für anzulegende thermische Gradienten und Volumina für einfach meßbare Wassergehaltsveränderungen, die erhoffte Reproduzierbarkeit homogener Probenzustände bei der Herstellung und der Vorteil einer "Normgröße" für die evtl. Vergleiche oder Verwendungen in anderen Versuchsgeräten oder Untersuchungen.

Beiden Konzepten gemeinsam ist die gewählte Kühlung der Proben mit Kaltluft. Diese wurde trotz einiger Nachteile gewählt, da sie mit wenigen Modifikationen bezüglich der Probengröße und der Probenanzahl uneingeschränkt variabel ist und bei großformatigen Proben evtl. Kontaktprobleme, wie z. B. isolierende Luftpolster zwischen den Kühlplatten und der Probenoberfläche bei geringen Auflasten, nicht berücksichtigt zu werden brauchen. Zudem sind mit den kältesten Temperaturen und der damit verbundenen Ausscheidung von Luftfeuchtigkeit am Verdampfer keine größeren Vereisungen an den Proben zu erwarten, wie sie ansonsten leicht an den Kühlplatten entstehen und dort zum Festfrieren der Kühlplatten an den Proben und Wandungen führen.

Bei beiden Konzepten bzw. Versuchsständen wurden jeweils in einer durch eine starke Isolierung gut gedämmten Versuchskammer gerollte, handelsübliche Verdampfer aufgehängt, die an eine Kältemaschine angeschlossen waren (s. a. Bilder 70 und 71).

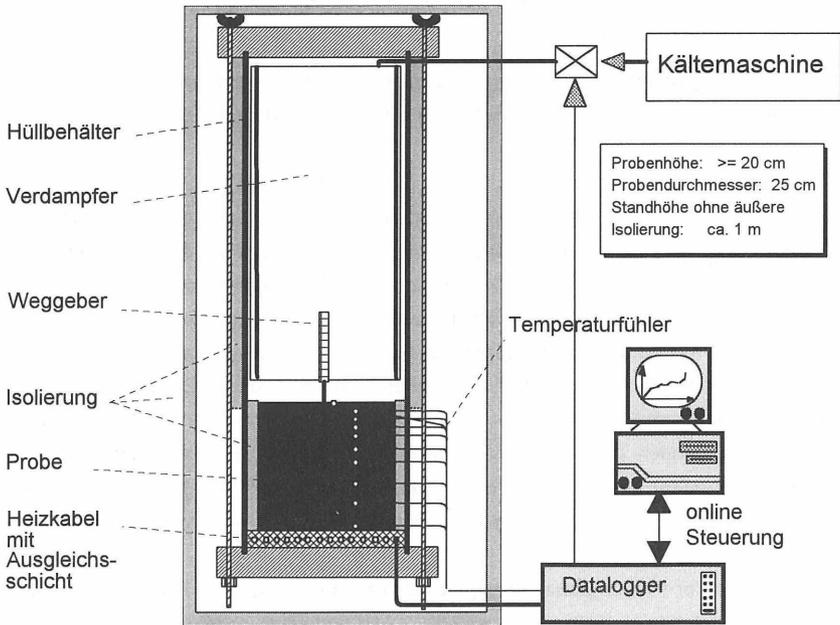


Bild 70: Prinzipskizze des Versuchsstandes für großformatige Proben

Der Luftraum wurde ausreichend groß gewählt, um eine gewisse Pufferwirkung gegen Temperaturspitzen zu besitzen. Bei den volumenmäßig größeren Versuchsständen für die kleinformigen Einzelproben hat es sich als sinnvoll erwiesen, zur Erzielung einer möglichst homogenen Atmosphäre einen Kleinventilator einzusetzen, der für eine langsame, aber stetige Durchmischung der Luft sorgt und damit Kalt- oder Warmluftbereichen vorbeugt.

Die gewählte Solltemperatur wurde bei beiden Konzepten durch Temperaturfühler an der Oberfläche der Probe reguliert, die an einen Analog-Digitalwandler (Peekel Autolog 2005 TF) mit Online-Steuerung über einen handelsüblichen PC angeschlossen waren. Diese regelnden Temperaturfühler wurden hierbei leicht schräg von unten direkt unter der gegen die Verdunstung und Sublimation angeordneten Kunststoffolie angebracht, so daß

Beeinflussungen durch eine thermische Sperrwirkung des Verdunstungsschutzes vermieden wurden (s. a. Prinzipskizze Bild 70).

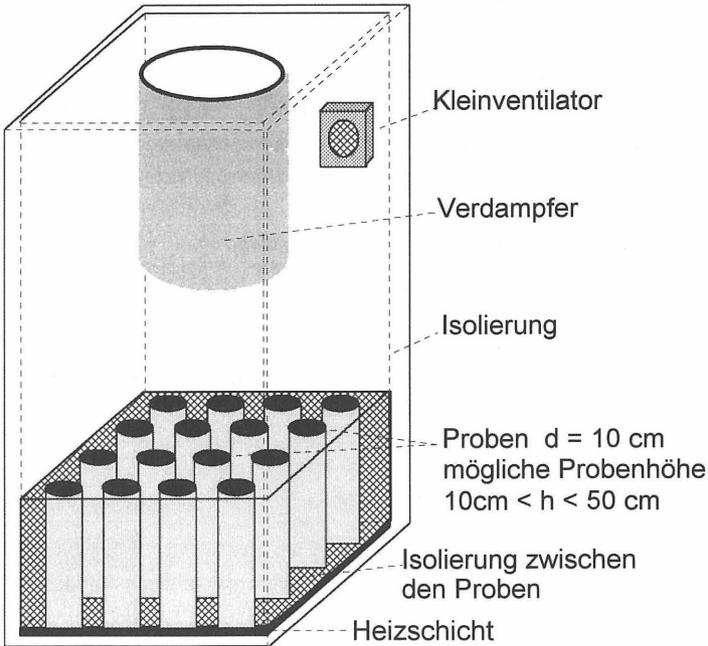


Bild 71: Prinzipskizze des Versuchsstandes für kleinformatige Einzelproben

Weitere Temperaturfühler wurden entsprechend der Probengröße in verschiedenen Höhenlagen zur Registrierung der Temperaturverläufe über die Probenhöhe und der Eindringung der 0°C -Grenze angebracht. Zur Messung der Temperaturen im Bereich der Probenmitte wurden die verwendeten PT 100 - Temperatursensoren in dünne, stabile Metallhülsen mit einem Gesamtdurchmesser zwischen 1,9 mm und 3 mm eingebracht. Diese in Vierleitertechnik geschalteten Temperaturfühler wurden von der Seite her waagrecht in vorgebohrte Löcher eingeschoben. Obwohl die vorgebohrten Löcher die gleichen bzw. für die 3 mm-Fühler etwas dünnere Durchmesser als die Temperaturfühler aufwiesen, wurde die Fühler auf dem letzten halben Zentimeter nicht vorgebohrt, sondern vorsichtig eingedrückt, um einen gesicherten Kontakt zum Boden zu gewährleisten.

Um den zu erwartenden Hebungen während des Gefrierens genügend Raum zu geben, wurde der Hüllbehälter bei den großformatigen Proben im Bereich des Austritts der Tem-

peraturfühler aufgeschnitten und durch verformungswilliges Silikon ersetzt. Hierdurch wurde das Abscheren der Temperaturfühler an der Behälterwandung durch die zu erwartenden Hebungen vermieden. Bei den kleinformatischen Proben mit den geringeren absoluten Hebungsbeträgen wurde Bewegungsspielraum im Bereich der Isolierung gegeben.

Die Temperierung der Proben von unten zur Erzeugung eines definierten Temperaturgradienten erfolgte mit eng verlegten Heizkabeln. Diese wurden zur gleichmäßigen Wärmeverteilung in einer Ausgleichsschicht aus feinem Sand verlegt und mit einer dünnen Weichmetallplatte als Sauberkeits- und zusätzlicher Wärmeausgleichsschicht abgedeckt. Die Steuerung der Bodentemperatur erfolgte analog zu der Oberflächentemperierung mit an den Probenunterseiten angebrachten Temperaturfühlern.

Auf die Registrierung der Hebungen während der Versuche wurde nach einigen Grundsatversuchen verzichtet. Registriert wurden hierfür als Indexwert die Geometrie (Höhe über die Oberfläche und Durchmesser über die Höhe) vor dem Ein- und nach dem Ausbau der Probe.

4.4.3 Großmaßstäbliche Laborversuche

4.4.3.1 Herstellung

Die Proben für die großmaßstäblichen Versuche wurden mittels eines Handproctors in sieben Lagen hergestellt, da eine geringere Lagenzahl insbesondere bei geringen Wassergehalten zu einer nicht zufriedenstellenden Homogenität über die Probenhöhe führte. Die glatten Oberflächen der einzelnen Lagen wurden vor dem Aufbringen des nächsten Materials mit einer Drahtbürste leicht aufgeraut, um eine bessere Verzahnung der einzelnen Lagen zu erreichen und keine potentiellen Ebenen für eine Eislinsenbildung zu schaffen.

Den erforderlichen Zeitbedarf zur Aufbereitung (Zerkleinerung, evtl. Auslese von groben Bestandteilen) und zur Einstellung des richtigen Wassergehaltes nicht gerechnet, der bei den notwendigen Probenmengen und gewünschten Feuchtehomogenitäten bei Tonböden bis zu zwei Wochen betragen kann, muß für eine großformatige Probe ein Arbeitstag zur Probenherstellung, zum Einbau in die Versuchsanlage und zur Vorbereitung der Meßanlage angesetzt werden. Die nach Versuchsende durchgeführte Bestimmung der Dichte- und Wassergehaltsverteilungen sowie der Schubspannungen nimmt in etwa den gleichen Zeitraum ein, die Durchlässigkeitsermittlung über die gesamte Laufzeit und die Auswertung der Ergebnisse ebenfalls.

4.4.3.2 Meßprogramm

Mit den großformatigen Proben wurden insgesamt drei Böden untersucht (Labor 1 (Kaolin/Montmorillonit), Labor 2 (Montmorillonit) und Feld 3 (Geschiebemergel)). Um den Untersuchungsumfang wegen der Vielzahl der Parameter in Grenzen zu halten, wurden zunächst nur die wesentlichsten Parameter Wassergehalt und Frostdauer variiert. Die großformatigen Proben wurden wegen des begrenzten Probendurchsatzes hauptsächlich für grundsätzliche Untersuchungen eingesetzt, da sie mit ihrer Größe die Situation einer mineralischen Abdichtung besser simulieren als die kleinformigen Proben. Der Temperaturgradient wurde zu Beginn der Versuche auf $0,5^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ (Probenoberkante -5°C , unten $+5^{\circ}\text{C}$) festgelegt, da genauere Angaben aus den Feldversuchen noch nicht vorlagen und extreme Verhältnisse simuliert werden sollten.

4.4.3.3 Durchführung und Temperaturverläufe

Die aufgrund der oben beschriebenen Kriterien aufgebaute Versuchsanordnung ist in einer Prinzipskizze in Bild 70, Seite 158 dargestellt. Mit einigen Grundsatzversuchen wurde die Gleichmäßigkeit der Temperatureindringung untersucht, indem über die Fläche verteilt zusätzliche Temperaturfühler angebracht wurden. Die Differenzen ausgewählter Fühler eines Vorversuches sind beispielhaft in Bild 72 dargestellt.

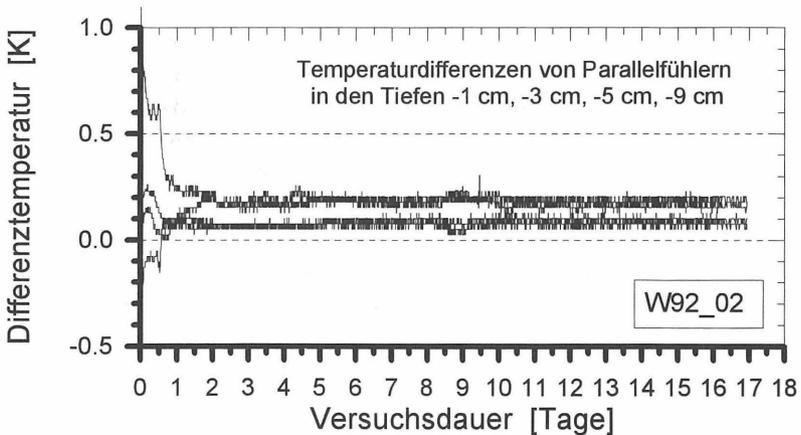


Bild 72: Ergebnisse der höhengleichen Temperaturen in Probenmitte und am Rand

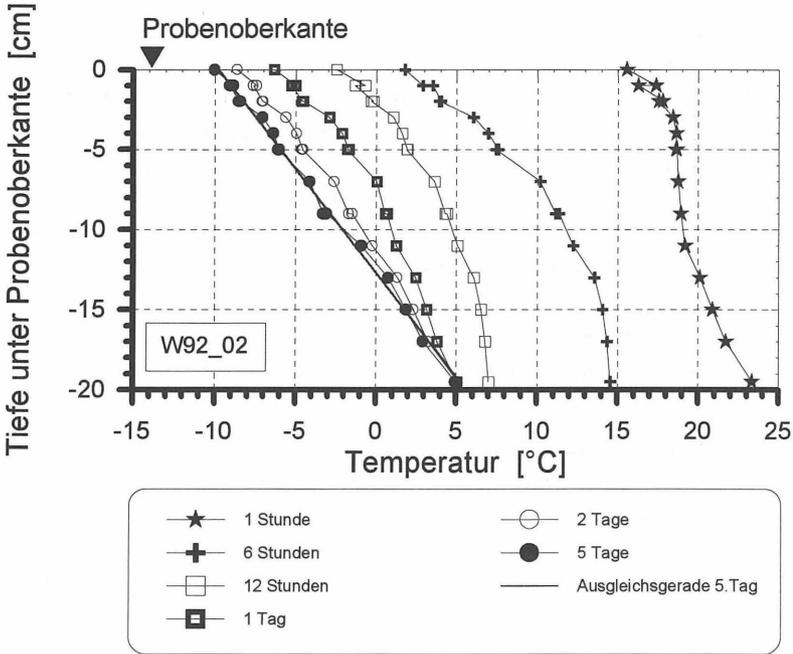


Bild 73: Zeitliche Entwicklung der Temperaturverläufe und Differenzen über die Tiefe

In gleicher Höhenlage ergaben sich von der Probenmitte bis etwa 4 cm vom Rand entfernt in der Abkühlphase bei Beginn der Versuche Temperaturunterschiede von bis zu $\Delta t \approx 1$ C. Während der folgenden Konstanthaltung wurden wesentlich kleinere Temperaturdifferenzen von bis zu $\Delta t \approx 0,25$ C registriert. Dabei waren die im Inneren der Probe gemessenen Temperaturen erwartungsgemäß niedriger, so daß sich im mittleren Bereich der Probe eine leicht nach unten gekrümmte Temperaturfront ergab. Die zeitlich unterschiedlichen Differenzen sind auch in Bild 73 anhand der kleiner werdenden horizontalen Versätze bei den Temperaturen in gleicher Höhenlage (vor allem in 1 cm Tiefe) erkennbar.

Die Temperaturen zwischen dem Verdunstungsschutz und der seitlichen Isolierung ergaben in der Konstanthaltungsphase gegenüber den Temperaturen der gleichen Höhenlage in der Mitte Unterschiede bis zu ca. 1,5 C. Diese Differenz wurde aufgrund der halbseitigen Einbettung der Fühler in die flexible Isolierung und der zu berücksichtigenden Übergangsfaktoren als verträglich angesehen.

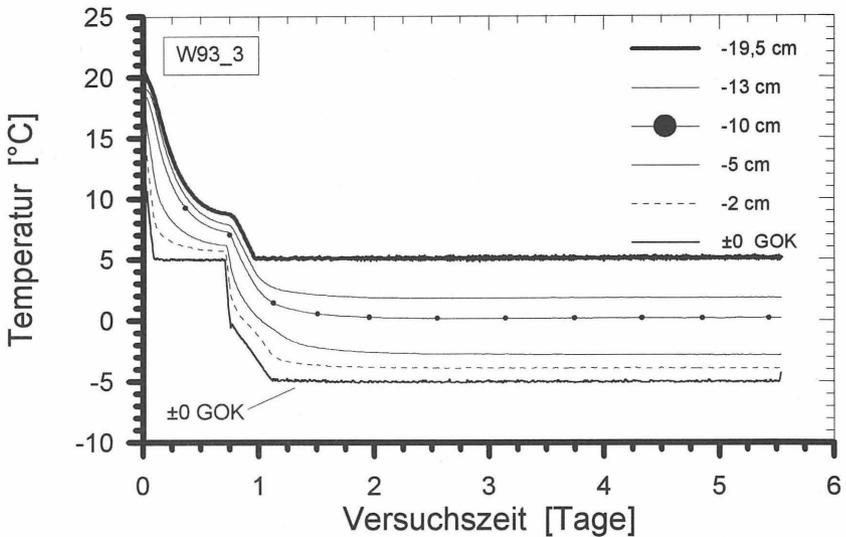


Bild 74: Verlauf ausgewählter Temperaturen über die Probenhöhe während eines Versuches

Die Proben wurden nach dem Einbau in den Versuchsstand zunächst ca. 18 bis 24 Stunden mit einer Oberflächentemperatur von $+5^{\circ}\text{C}$ vortemperierte, um für die einzelnen Versuche vergleichbare Ausgangsbedingungen zu erhalten. Anschließend wurden die vorgesehenen Versuchstemperaturen geschaltet. Beispielhaft sind in Bild 74 die Verläufe der Temperaturen in verschiedenen Probenhöhen während eines Versuches dargestellt.

Wie bei allen anderen Versuchen ist auch hier deutlich die langsamere Eindringung der Temperatur nach dem Unterschreiten der 0°C -Grenze zu erkennen. Diese beruht im wesentlichen auf dem Phänomen der Freisetzung der latenten Wärmeenergie bei der Gefrierung des Porenwassers.

In Bild 75 sind Ausschnitte der Temperaturverläufe der Oberflächenfühler von drei Versuchen mit demselben Material dargestellt, von denen zwei Versuche mit dem gleichen, höheren Wassergehalt von $w \approx 0.275$ [-] (dünne Linien) und ein Versuch mit einem niedrigeren Wassergehalt von $w \approx 0.21$ [-] (dicke Linie) bei ansonsten identischen Randbedingungen durchgeführt wurden. Der Boden mit dem niedrigeren Wassergehalt lässt zwar oberhalb der 0°C -Grenze annähernd die gleiche Temperatureindringung zu, unterhalb der 0°C -Grenze erfolgt jedoch wegen der geringeren latenten Wärmeenergie eine

schnellere Auskühlung. Nach dem Abschluß der Gefrierphase wurden die Proben vermessen, bei Labortemperaturen um ca. 20 C aufgetaut und im getauten Zustand analog zur Überprüfung von mineralischen Dichtungen in situ Proben zur weiteren Untersuchung mittels Ausstechzylindern gewonnen. An den Teilproben wurden anschließend je nach Fragestellung und Meßprogramm die Parameter Wassergehalt und Dichte, Durchlässigkeit und Schubspannung in definierten Probenhöhen bzw. -bereichen bestimmt.

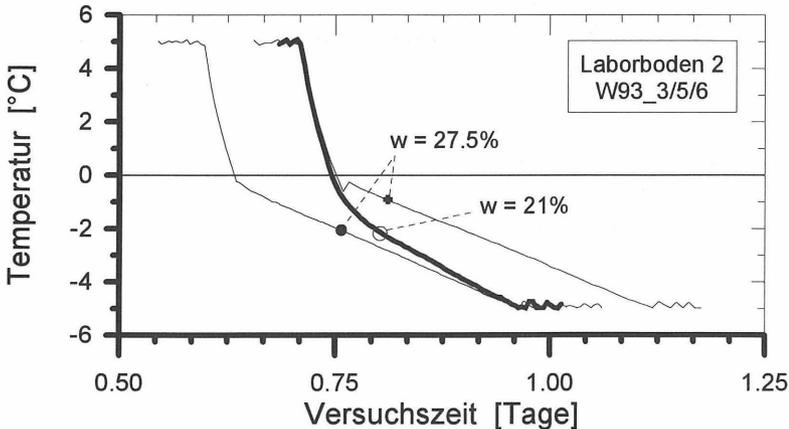


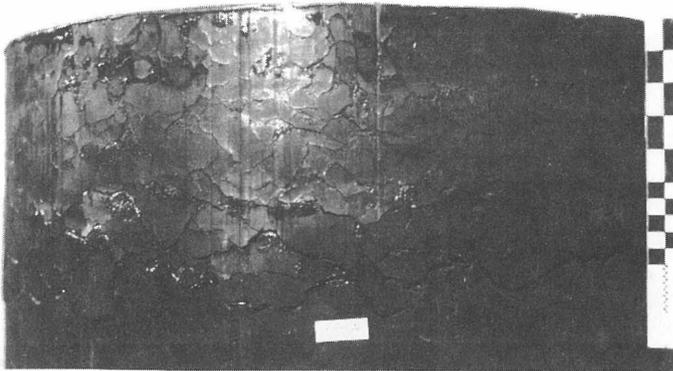
Bild 75: Einfluß des Wassergehaltes auf die Auskühlung

4.4.3.4 Versuchsergebnisse

4.4.3.4.1 Gefüge

Die gefrorenen Bereiche aller Proben wiesen in Abhängigkeit von dem Material und dem Wassergehalt eine zum Teil ausgeprägte Zergliederung auf. Typische Auswirkungen unterschiedlicher Wassergehalte sind in den Bildern 76 (Ton, Laborboden 2) und 77 (Geschiebemergel, Material Feld 3) zu erkennen.

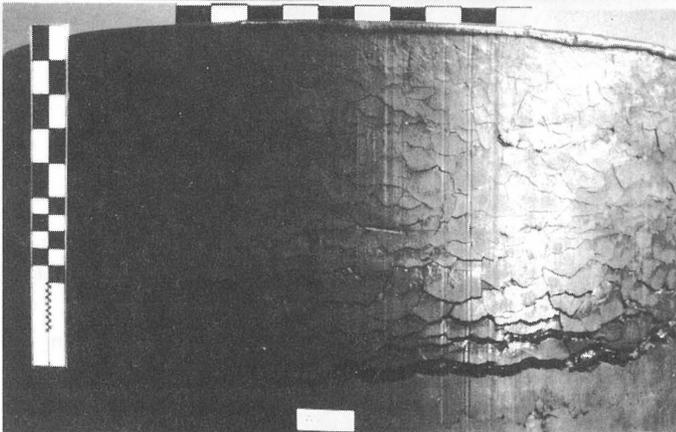
Je höher der Ausgangswassergehalt lag, um so deutlicher war bei allen Versuchen das Frostgefüge ausgebildet. Bei dem Laborboden 2 (Ton) ergaben sich bei einem niedrigen Wassergehalt nahe dem optimalen Wassergehalt größere Aggregate als bei einem um ca. 6% bis 7% höheren Wassergehalt (Bild 76). In den oberen Bereichen der Proben ist die Auswirkung einer relativ schnellen Gefrierung an den kleineren Aggregaten zu erkennen, die mit dünnen Fissuren voneinander getrennt sind. Hier steht dem Wasser nicht genügend Zeit zur Verfügung, um vor der Gefrierung weite Wege zurückzulegen.



w = 21,0 %

6 Frosttage

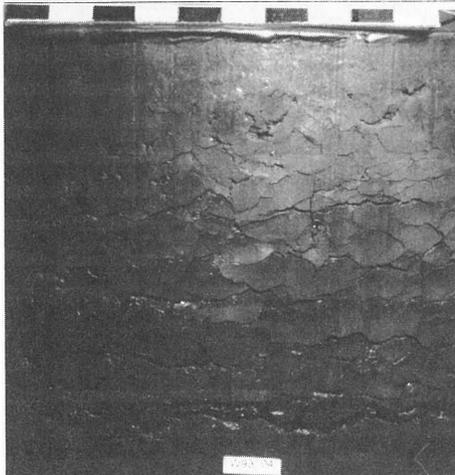
Gefrierung
schnell



w = 27,0 %

5 Frosttage

Gefrierung
schnell



w = 27,8 %

4 Frosttage +
2 Gefrierung

Gefrierung
langsam
in 1 K -Stufen

Bild 76: Gefügeausbildung bei dem Laborboden 2 in Abhängigkeit von dem Wasser-
gehalt und der Temperatureindringgeschwindigkeit (-5°C oben / +5°C unten)



w = 13,6 %
2 Frosttage

Gefrierung
schnell

w = 14,0%
2,5 Frosttage

Gefrierung
schnell

w = 16,0 %
4 Frosttage

Gefrierung
schnell

Bild 77: Gefügeausbildung bei Material aus Feld 3 (Geschiebemergel) in Abhängigkeit von dem Wassergehalt und der Frostdauer (oben: -5°C , unten: -5°C)

In den mittleren Bereichen der gefrorenen Zone sind die Aggregate etwas größer, da hier die Gefrierung durch den länger werdenden Weg des Wärmeabtransportes nach oben langsamer verläuft. Die langsamere Gefrierung ist auch in den flacheren Temperaturkurven der tieferen Temperaturfühler in Bild 79 zu erkennen.

Im Bereich der sich zuletzt bildenden Eislinsen nahe der 0°C-Grenze fallen die letzten zwei bis drei Aggregatschichten i. d. R. wieder sehr dünn aus, da hier die Temperaturfront am langsamsten eindringt. Durch die relativ warmen Temperaturen sind die Anteile des ungefrorenen beweglichen Wassers im Bereich der "frozen fringe" sehr groß und in den entstandenen Fissuren bilden sich mehrere große Eislinsen. Die Größe der Eislinsen entspricht dabei dem Trend des Wassergehalts, so daß der größte Ausgangswassergehalt auch die mächtigsten Eislinsen ergibt.

Zugleich war zu beobachten, daß mit abnehmendem Wassergehalt die vornehmlich horizontalen Eislinsen insbesondere an der stationären Gefrierfront in eine als willkürlich zu betrachtende Lage übergehen. Bei den relativ trockenen Proben sind bei der Herstellung die Verbindungen zwischen den einzelnen Materialteilchen durch die Verdichtung nicht so intensiv ausgebildet wie bei den nasseren Proben, so daß die ursprünglichen Trennflächen eingepreßt sind. Die nicht so innige Verbindung der einzelnen Materialstücke mit kleiner werdendem Wassergehalt kann man bei ungefrorenen Proctorproben ebenfalls feststellen, wenn man sie zerbricht. Diese eingepreßten Trennflächen werden von den Eislinsen bevorzugt, weil hier das Material leichter spaltbar ist, so daß ein unregelmäßiges Frostgefüge entsteht.

Das Fissurengefüge ist grundsätzlich räumlich ausgebildet und auch in den vertikalen und geneigten Fissuren sind Eislinsen entstanden. In Bild 78 wurden die äußeren Aggregateinheiten im gefrorenen Zustand nacheinander entfernt, so daß die Eislinsen in den räumlichen Fissuren deutlich sichtbar werden. Durch die Wärme der Fotolampen schmelzen die Eislinsen und -filme sehr schnell, so daß auf den Bildern zum Teil nur noch verbliebene Bereiche zu sehen sind. Diese waren jedoch direkt nach der Entfernung der Aggregate trocken oder mit dünnen Eisfilmen belegt.

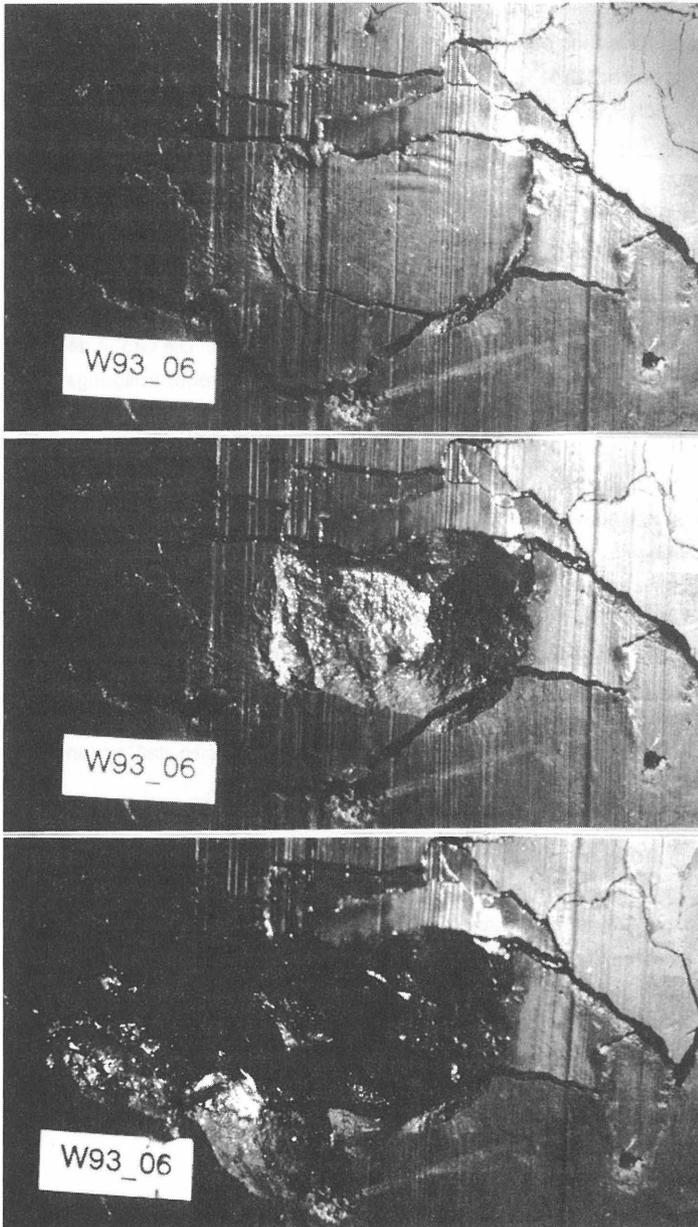


Bild 78: Räumliches Fissurengefüge und eingelagerte Eislinsen bei der Gefrierung nahe des optimalen Wassergehaltes (Ton, Laborboden 2)

4.4.3.4.2 Dichte und Wassergehalt

Wie zu erwarten, wurden bei allen Böden bei der Bestimmung der Dichte in den ehemals gefrorenen Bereichen Verringerungen und in den unterlagernden, ungefrorenen Bereichen leichte Vergrößerungen ermittelt. Bei den Wassergehalten war spiegelbildlich eine tendenzielle Vergrößerung im oberen, gefrorenen und eine Verringerung im unteren, ungefrorenen Bereich feststellbar. In Bild 79 sind exemplarisch die Temperaturverteilungen während eines Versuchsablaufs und die anschließend ermittelten, auf die globalen Ausgangswerte normierten Dichte- und Wassergehaltsverteilungen dargestellt.

Als globale Ausgangswerte dienten hierbei die errechneten Dichten aus der Einwaage bei der Probenherstellung bezogen auf das Volumen des Proctortopfes und die an mehreren Materialstücken bestimmten mittleren Wassergehalte. Zur Abschätzung der höhenmäßigen Verteilung und der Genauigkeit dieser Bezugswerte wurde je Versuchsserie eine zufällig ausgewählte Nullprobe ohne Temperaturbelastung untersucht. Hierbei ergaben sich bei relativ hohen Wassergehalten maximale Abweichungen bis zu $\pm 1\%$ vom globalen Ausgangswert (s. a. Bild 79) und damit eine ausreichende Homogenität der Probenherstellung.

Die Bestimmung insbesondere der Dichte mittels Tauchwägung von Probenabschnitten zwischen 2 cm und 4 cm beinhaltet durch die kleinen Bestimmungsvolumina insgesamt jedoch nicht zu vernachlässigende Fehlerquellen, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen!

Bei sehr trockenen Materialien entstehen gegenüber feuchteren Materialien bei der Herstellung mit gleicher Verdichtungsarbeit kleine Hohlräume durch die wenig verformungswilligen Materialstücke und damit nicht ganz homogene Proben. Während dieses Problem durch eine durchgängig höhere Verdichtungsarbeit teilweise ausgeglichen werden kann, ergeben sich bei Materialien mit zunehmenden Anteilen an größeren Bestandteilen (insbesondere bei Geschiebelehm und Geschiebemergel sowie gebrochenem, aufbereitetem Tonstein durch eingelagerte Steinchen und Tonsteinpartikel) ebenfalls etwas größere, aber kaum zu vermeidende Unterschiede. Einzelne Werte der Nullproben können in diesen Fällen, bezogen auf den globalen Ausgangswert, bei der Trockendichte um bis zu 2% (entspricht etwa $0,032 \text{ g/cm}^3$) und bei den Wassergehalten um bis zu 3% (entspricht je nach Ausgangswassergehalt bis zu $\cong 0,6\%$ absoluten Wassergehaltsprozenten) schwanken.

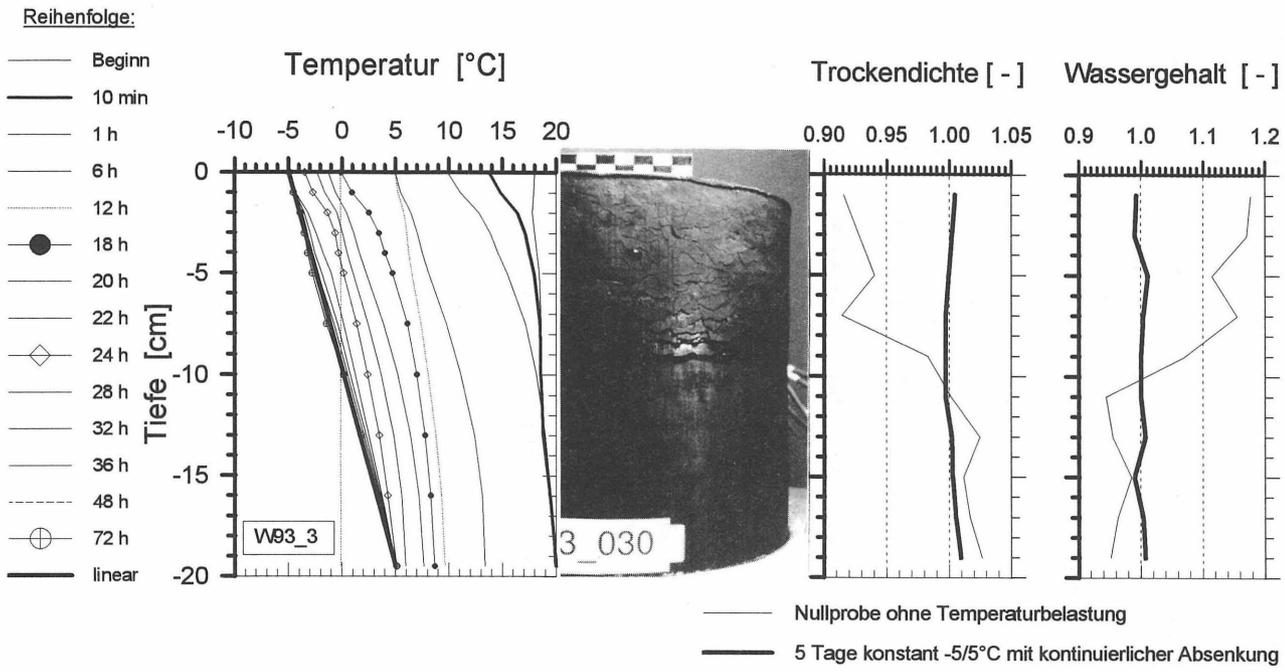


Bild 79: Temperaturverlauf über die Höhe während des Versuchs, gefrorene Probe und die auf die globalen Ausgangswerte bezogenen Ergebnisse von Trockendichte und Wassergehalt (Versuch W93_03, Laborboden 2, Ausgangswassergehalt $w = 27\%$, vgl. Bild 74)

Weiterhin muß bedacht werden, daß durch den erforderlichen Auftauvorgang für die Entnahme von Teilproben ein Abfließen des aus den Eislinsen geschmolzenen Wassers in die Fissuren des oberen und eventuelle Schrumpfrisse des unteren Probenteils auch bei einer schnellen Verarbeitung nicht verhindert werden kann, so daß die Wassergehalte im Bereich der ehemaligen Eislinsen geringer sind, als eigentlich von der Anschauung her zu erwarten ist. Durch das Zusammensacken und die Schließung der Fissuren infolge Eigengewichts und die unvermeidlichen Veränderungen durch das Probenhandling während der Dichtebestimmung sind die Trockendichten im aufgetauten Zustand im Bereich der großen Eislinsen höher als von der Optik des Fissurengefüges im gefrorenen Zustand her anzunehmen ist.

In Bild 80 sind die normierten Ergebnisse von drei Versuchen mit dem montmorillonithaltigen Laborboden 2 bei gleichem Wassergehalt, aber unterschiedlicher Frostdauer dargestellt, die eine tendenzielle Vergrößerung der Auswirkungen auf die Dichte- und die Wassergehaltsverteilung mit zunehmender Frostdauer zeigen.

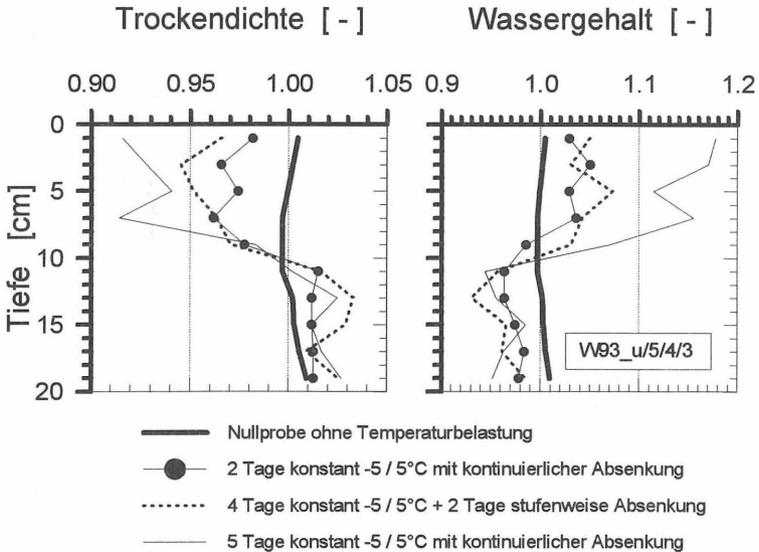


Bild 80: Trockendichte- und Wassergehaltsverteilung in Abhängigkeit von der Gefrierdauer bei Großproben (Laborboden 2; $0.270 \leq w \leq 0.278$)

Ähnliche Ergebnisse erhält man beim Wassergehalt des Geschiebemergels (Material Feld 3, Bild 81). Dieser vergrößert sich ebenfalls im gefrorenen Bereich mit zunehmender Gefrierzeit, weist jedoch zwischen 2.5 Tagen mit einem Ausgangswassergehalt von

$w \approx 14\%$ und 4 Tagen bei einem etwas höheren Ausgangswassergehalt von $w \approx 16\%$ keine wesentliche Steigerung mehr auf. Bei der Trockendichte sind unter Berücksichtigung der Verfahrensungenauigkeiten keine eindeutigen Veränderungen mit zunehmender Gefrierzeit zu beobachten.

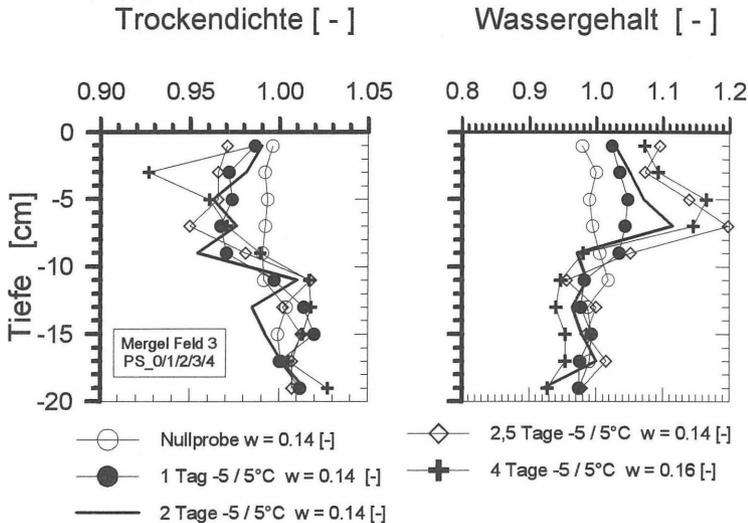


Bild 81: Trockendichte- und Wassergehaltsverteilung in Abhängigkeit von der Gefrierdauer bei Großproben (Material Feld 3, Geschiebemergel, $0.14 \leq w \leq 0.16$)

Veränderungen in der Dichte- und Wassergehaltsverteilung sind neben dem Temperaturgefälle vor allem vom Ausgangswassergehalt geprägt. In Bild 82 sind die Verteilungen in Abhängigkeit vom Wassergehalt bei annähernd gleichen Gefrierzeiten enthalten. Es zeigt sich, daß die bezogenen Veränderungen im Bereich niedriger stationärer Frosttemperaturen (d. h. kurz unter der 0°C -Grenze) keine großen Unterschiede aufweisen. Es ergibt sich jedoch bei der feuchteren Probe eine deutlich größere Vernässung und Auflockerung im oberen Bereich. Die Dichte der trockeneren Probe im ungefrorenen Abschnitt weist in Anbetracht der Schwankungsbreite bei der Probenherstellung so gut wie keine Veränderungen auf.

Ein ähnliches Verhalten ergibt sich bei der wiederholten Gefrierung einer Probe. In Bild 83 sind die Entwicklungen der Dichte und des Wassergehaltes nach einem und nach 6 FT-Wechseln dargestellt (Laborboden 1, Kaolinit/Montmorillonithaltig). Auch hier ergibt sich eine mit der höheren Zahl der FT-Wechsel erhöhte Vernässung im oberen Bereich. Die ausgetrocknete Zone ist leicht nach oben verschoben, was auf eine ausgeprägte

Transportkapazität der FT-Wechsel hinsichtlich des Wassers hinweist. Dies kann mit den bei den ersten Gefrierungen entstehenden Fissuren erklärt werden, die bei folgenden Gefrierungen potentiell gut durchlässige Kanäle für größere Wassertransporte darstellen.

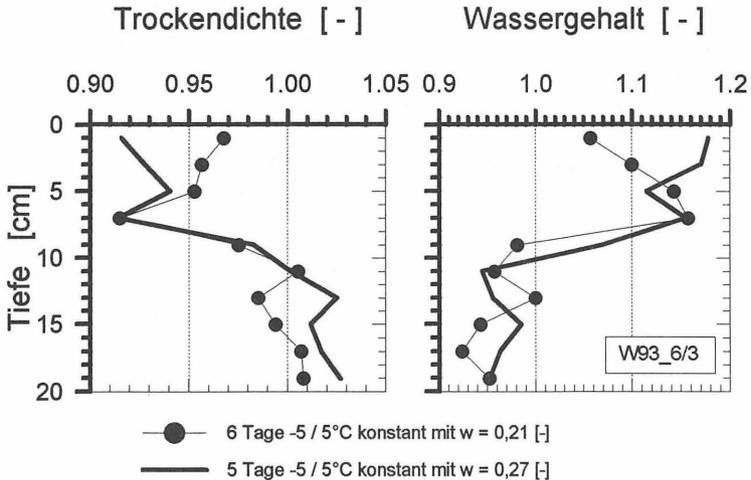


Bild 82: Trockendichte- und Wassergehaltsverteilung in Abhängigkeit von dem Wassergehalt (Laborboden 2)

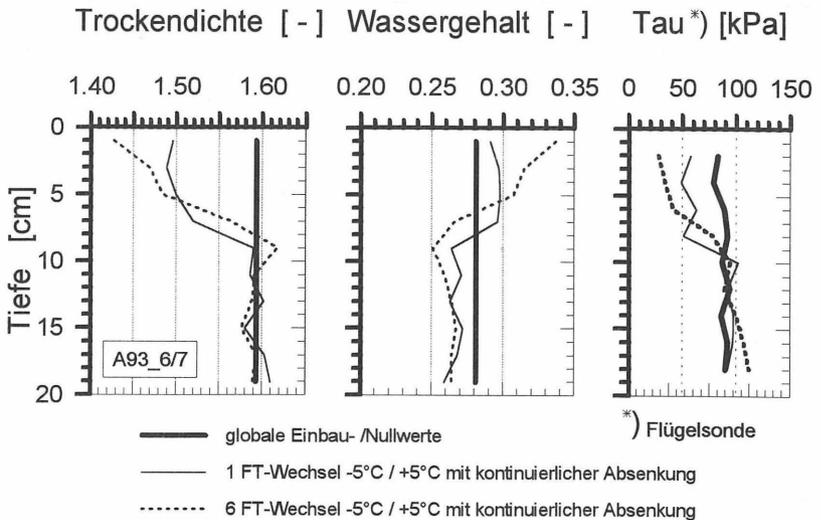


Bild 83: Trockendichte-, Wassergehalts- und Schubspannungsverteilung in Abhängigkeit von der Anzahl der FT-Wechsel (Laborboden 1; Ton, $w \approx 0,28$)

4.4.3.4.3. Wasserdurchlässigkeit

Die Wasserdurchlässigkeit wurde bei den großformatigen Proben an drei Teilproben über die Höhe bestimmt. Bild 84 enthält die zu den Dichte- und Wassergehaltsverteilungen aus Bild 82 gehörenden Durchlässigkeiten. Sie zeigen eine deutlich größere Durchlässigkeitssteigerung bei dem nasserem Material von bis zu einer halben Zehnerpotenz, wengleich Steigerungen mit Faktoren von 2 bezogen auf die Versuchsgenauigkeit und die Reproduzierbarkeit nicht extrem groß sind.

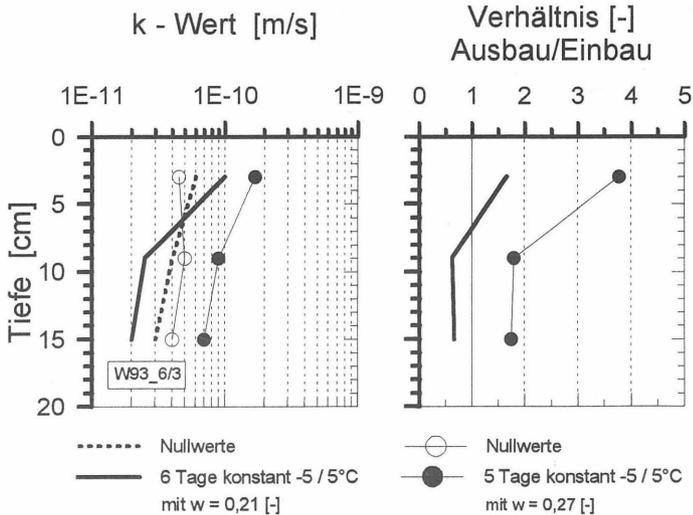


Bild 84: Absolute Durchlässigkeiten und die Verhältnisse vor und nach konstanter Gefrierung mit verschiedenen Wassergehalten (Laborboden 2)

Auch die Durchlässigkeiten bei verschiedenen Gefrierzeiten weisen eine leichte Steigerung von bis zu einer halben Zehnerpotenz gegenüber den Mittelwerten der Nullproben auf (Bild 85, s. a. Bild 80). Eine eindeutige Abhängigkeit der Veränderungen von der Gefrierdauer ist jedoch nicht zu erkennen.

Bei dem Geschiebemergel differierten bei den Durchlässigkeitsversuchen die Ergebnisse (Bild 86). Während die k -Werte in den ungefrorenen Bereichen alle leicht um bis zu $\Delta k \approx 2 \cdot 10^{-11}$ m/s geringer waren, ergaben sich zwar bei den obersten, gefrorenen Probenbereichen ebenfalls leichte Verringerungen um die gleiche Größenordnung wie in den ungefrorenen Bereichen, aber auch eine Steigerung bis zu $\Delta k \approx 4,5 \cdot 10^{-11}$ m/s oder den Faktor $\approx 2,5$.

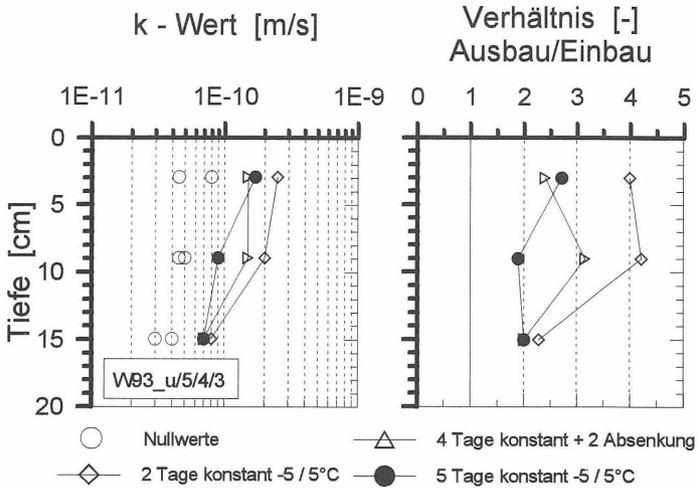


Bild 85: Absolute Durchlässigkeiten und die Verhältnisse vor und nach konstanter Gefrierung mit verschiedenen Gefrierzeiten (Laborboden 2)

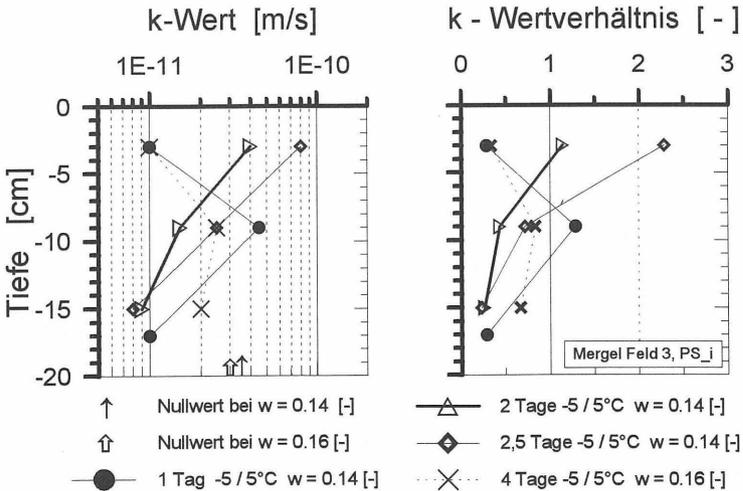


Bild 86: Absolute Durchlässigkeiten und die Verhältnisse vor und nach konstanter Gefrierung mit verschiedenen Gefrierzeiten (Boden Feld 3, Geschiebemergel)

4.4.3.4.4 Scherfestigkeit

Der kritische Fall in bezug auf die Festigkeiten bei der Beaufschlagung einer mineralischen Abdichtung mit Frost ist der Moment des Auftauens, da in diesem Augenblick im Bereich der schmelzenden Eislinsen Sättigungen von 100% und Porenwasserüberdrücke entstehen, die die Scherfestigkeiten drastisch reduzieren und die Standsicherheit insbesondere an den Böschungen gefährden können. Der hier durchzuführende Versuch muß daher die Festigkeiten im unkonsolidierten und undrainierten Zustand untersuchen.

Um evtl. Vergleiche mit anderen Untersuchungen zu gewährleisten und in verschiedenen Höhenlagen Bestimmungen vornehmen zu können, wurde die Bestimmung der undrainierten Scherfestigkeit an Ausstechproben im Kastenschergerät (\varnothing 8 cm) oder an der gesamten Probe mit der Laborflügelsonde in verschiedenen Höhen vorgenommen. Da die Proben in gefrorenem Zustand nicht untersucht werden konnten, wurden sie so bald wie möglich im Anschluß an den Tauvorgang mit der Laborflügelsonde untersucht bzw. mit Hilfe von Ausstechringen in das Kastenschergerät eingebaut. Hierbei wurde darauf geachtet, daß die Wasserverluste so gering wie möglich blieben.

Die ermittelte undrainierte Scherfestigkeit in Form der Schubspannung τ (UU-Versuch bei $\sigma_N = 50$ kPa, $v = 0,33$ mm/min) nimmt tendenziell entsprechend der Wassergehaltsentwicklung in den zuvor gefrorenen Probenbereichen ab und in den unterlagernden, leicht ausgetrockneten Probenbereichen zu. Dabei sind größere Veränderungen bei höheren Ausgangswassergehalten zu verzeichnen (Bild 87).

Bei der Untersuchung der Scherfestigkeit in Abhängigkeit von der Gefrierdauer war zwar dieselbe Tendenz erkennbar, eine stetige Entwicklung konnte jedoch bei den großformatigen Proben aufgrund der geringen Probenanzahl nur bedingt nachgewiesen werden (Bild 88, Bild 89). Die Ergebnisse bei den Versuchen mit dem Laborboden 2 (Ton, Bild 88) verzeichnen nach zwei Tagen Gefrierung in der untersten Teilprobe einen extrem hohen Meßwert, der auch durch eine anschließende Wassergehaltsanalyse nicht erklärt werden konnte; das gleiche ist bei dem untersten Wert nach 2.5 Tagen am Geschiebemergel (Material Feld 3) zu beobachten, bei dem allerdings in der Scherfuge einige kleinere Steinchen eingelagert waren, die zu einer vergrößerten Reibung geführt haben können.

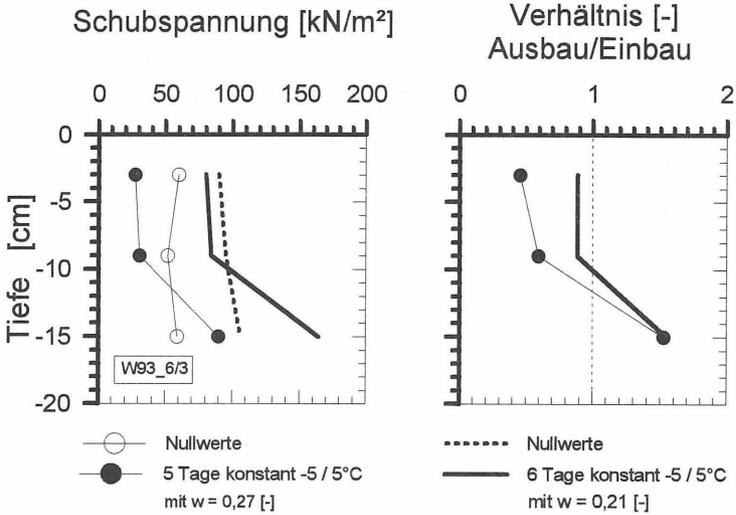


Bild 87: Entwicklung der Schubspannung τ bei unterschiedlichem Wassergehalt (Laborboden 2)

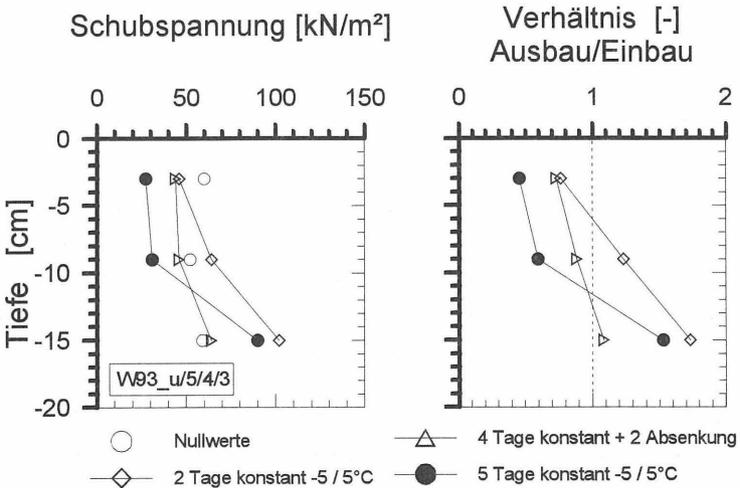


Bild 88: Entwicklung der Schubspannung τ bei unterschiedlicher Gefrierdauer (Laborboden 2)

4.4.3.2 Versuchsergebnisse

4.4.3.2.1 Gefüge

Das bei den großformatigen Proben Angeführte gilt uneingeschränkt auch bei den kleinformatigen Proben und wird daher hier nicht weiter ausgeführt. Wegen der guten Handhabbarkeit konnten bei den kleinen Proben durch Trennen der Probe in der Höhe einer äußerlich erkennbaren Eislinse ein horizontaler Schnitt gewonnen werden (Bild 90). Es ist hier deutlich sichtbar, daß die Eislinsen in einer Ebene liegen und die Probe waagrecht fast durchgängig trennen. Dies ist auch ein Anzeichen für die Güte der Temperatureindringung, da diese zur Erzeugung von Eislinsen in einer Ebene relativ gleichmäßig über die Fläche eingedrungen sein muß.

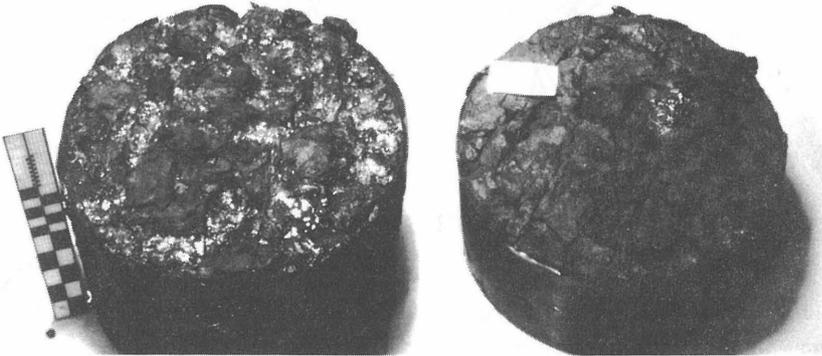


Bild 90: Geteilte Probe nach 5 Tagen konstantem Frost ($-5^{\circ}\text{C}/0^{\circ}\text{C}$).
Links: mit Eislinsen (oberer Probenanteil), rechts: verbliebener unterer, ungefrorener Probenanteil (Laborboden 2)

4.4.3.2.2 Dichte und Wassergehalt

Auch die Trockendichten und Wassergehalte weisen tendenziell die gleichen Entwicklungen auf wie bei den großformatigen Proben. Durch die gestaffelte Entnahme konnten die zeitlichen Veränderungen besser untersucht werden. Bild 91 enthält die über die Probenhöhen ermittelten Trockendichten und Wassergehalte in der zeitlichen Abfolge bis zu 21 Tagen Versuchsdauer für den Laborboden 1 bei optimalen Einbaubedingungen. Bei der Verteilung der Nullprobenwerte ist ersichtlich, daß auch die Verdichtung nach DIN 18 127 keine in sich homogenen Proben garantiert. Deutlich ist bei allen Kurven der eingeprägte Zustand der drei Einbaulagen mit oberen gut und unteren weniger gut verdichteten Bereichen zu erkennen, während der Wassergehalt relativ konstant ist.

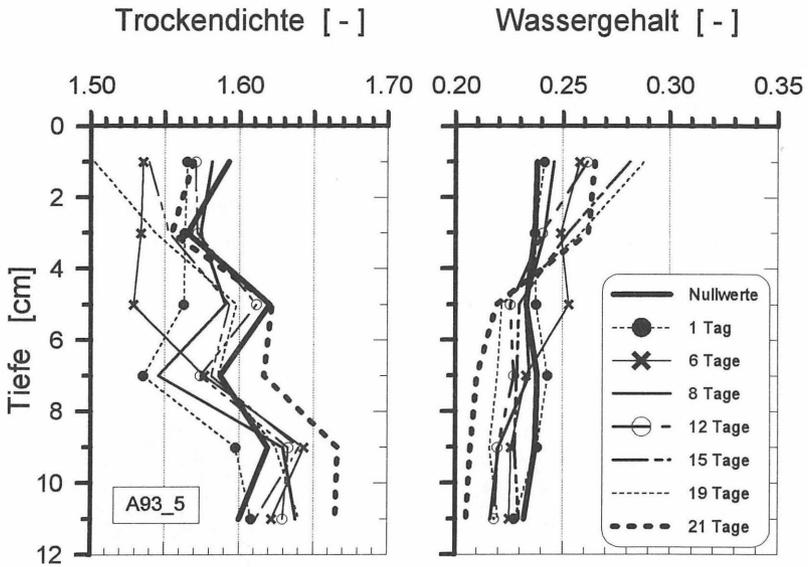


Bild 91: Trockendichte und Wassergehaltsverteilung über die Probenhöhe in Abhängigkeit von der Gefrierzeit (Laborboden 1, stationär -3 C/+2 C)

Für eine übersichtlichere Darstellung wurden die jeweils obersten und untersten 4 cm Probenbereich gemittelt und in Bild 92 über die Zeit dargestellt. Hierbei ist trotz aller einfließenden Streuungen eine deutliche Zunahme des Wassergehaltes im oberen, gefrorenen und eine Abnahme im unteren, ungefrorenen Bereich festzustellen. Die Trockendichte entwickelt sich spiegelbildlich dazu.

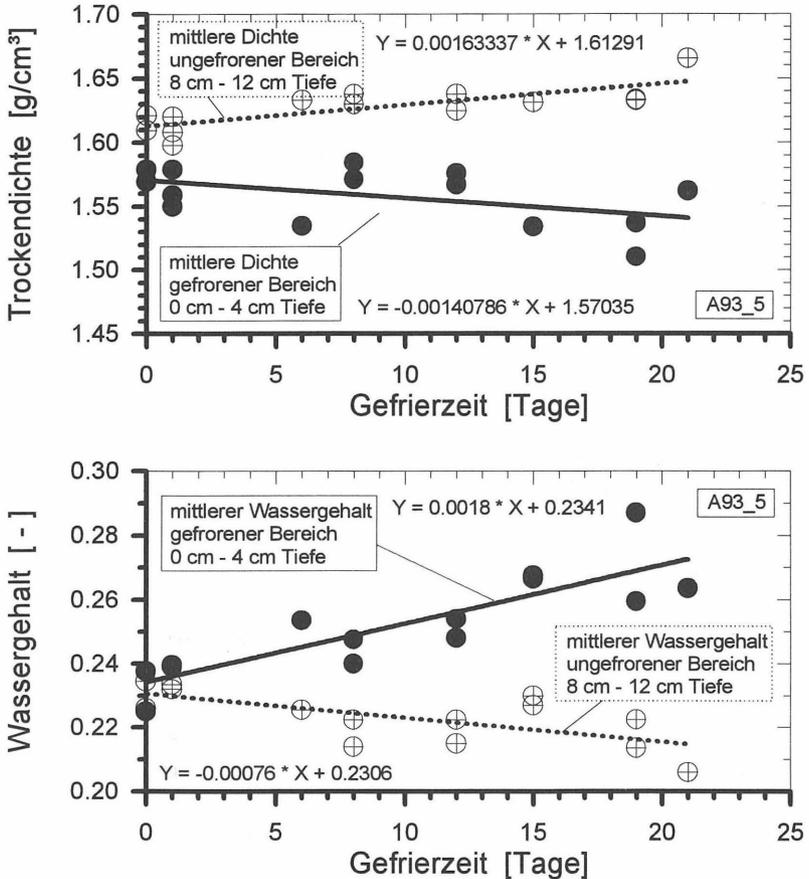


Bild 92: Zeitliche Entwicklung der Trockendichte (Bild oben) und des Wassergehaltes (Bild unten) für den oberen, gefrorenen und unteren, ungefrorenen Probenbereich (Laborboden 1, stationär -3°C/+2°C)

Steht dem Boden keine Möglichkeit zur Verfügung, größere Wassermengen anzusaugen, sind die Entwicklungen ähnlich, jedoch von wesentlich kleinerer Größenordnung und mit größeren Streubreiten behaftet. In den Bildern 93 und 94 sind die Entwicklungen der Wassergehalte und Trockendichten bei einem größeren und einem kleineren Wert als dem optimalen Wassergehalt über die Gefrierdauer aufgetragen. Die Versuchsbedingungen wurden hier mit -5°C oben und 0°C unten so gewählt, daß dem Boden nur eine geringe Menge Wasser in einer ungefrorenen Zone zur Verfügung stand. Demzufolge sind die Entwicklungen der Werte wesentlich kleiner. Bei der nasseren Probe (A93_1) ist

eine geringe, aber deutliche Vernässung des mittleren Bereichs um ca. $\Delta w \approx 1\%$ auszumachen. Der obere Bereich bleibt weitgehend unverändert, das untere Probendrittel weist zunehmende Austrocknungen auf. Bei der trockeneren Probe sind zwar die groben Tendenzen ebenfalls zu erkennen, die Streuungen aber deutlich größer und die Entwicklungen uneinheitlich. Dies dürfte an den Inhomogenitäten der im Bereich der Ausrollgrenze hergestellten Proben liegen. Die Trockendichten ergeben mit fallenden Werten in den gefrorenen und mittleren Bereichen und steigenden Dichten in den unteren Probendritteln das erwartete, spiegelbildliche Bild.

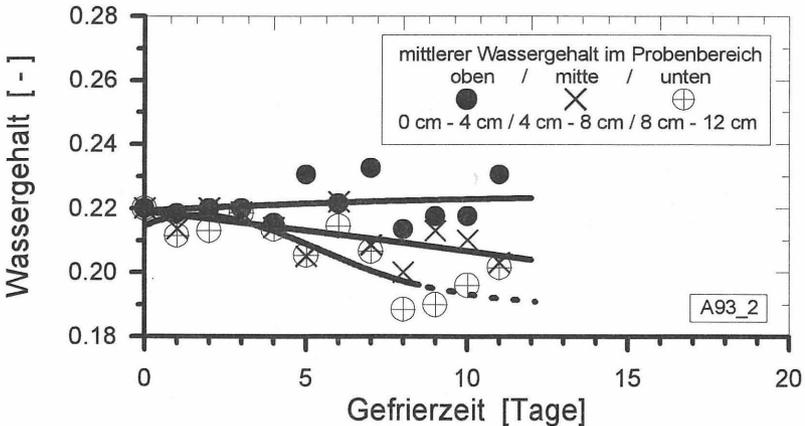
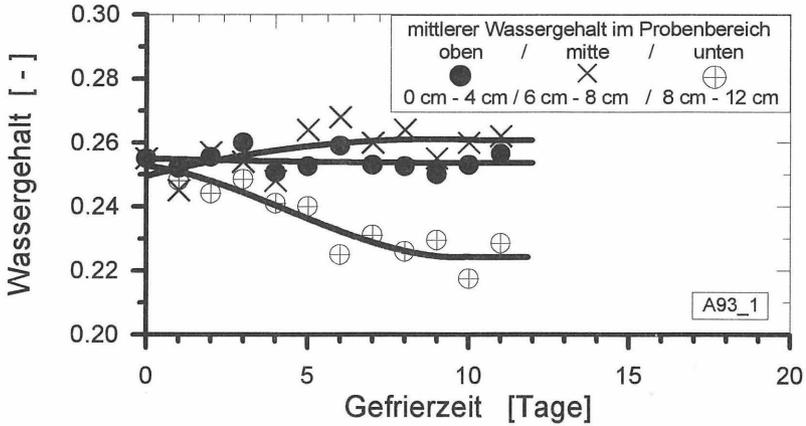


Bild 93: Zeitliche Entwicklung der Wassergehalte für drei höhenmäßige Probenbereiche an Proben auf dem nassen ($\Delta w \approx +1,5\%$) und dem trockenen Ast ($\Delta w \approx -2\%$) der Proctorkurve (Laborboden 1, stationär $-5\text{ C}/0\text{ C}$)

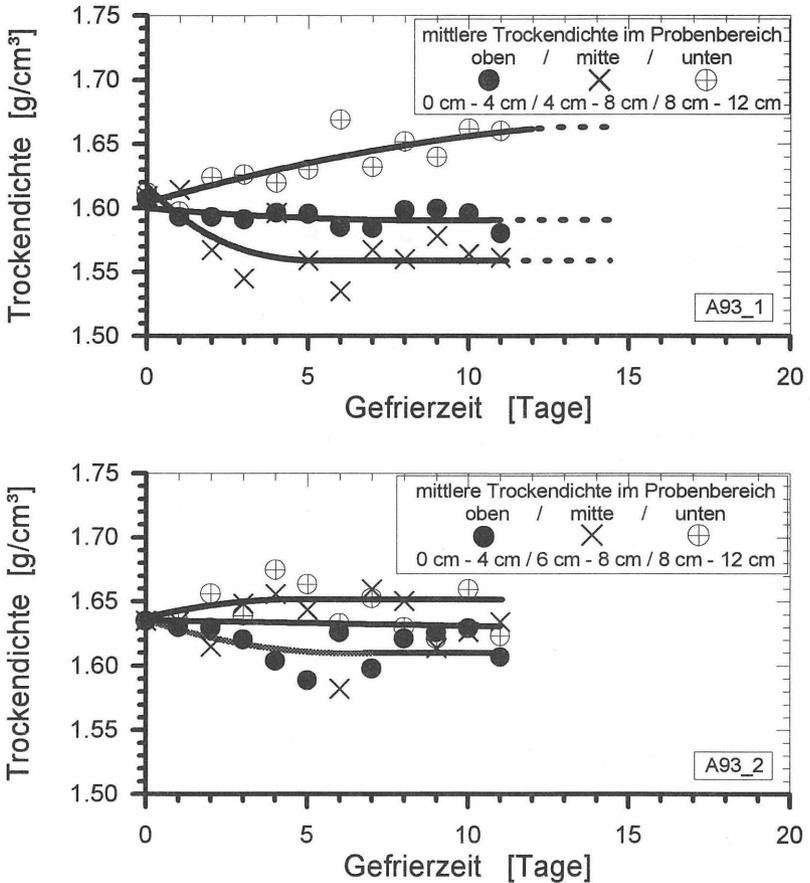


Bild 94: Zeitliche Entwicklung der Trockendichten für drei höhenmäßige Probenbereiche an Proben auf dem nassen ($\Delta w \approx +1,5\%$) und dem trockenem Ast ($\Delta w \approx -2\%$) der Proctorkurve (Laborboden 1, stationär $-5^\circ\text{C}/0^\circ\text{C}$)

Bei den gleichen Wassergehalten über und unter dem optimalen Proctorwassergehalt ($\Delta w \approx +1,5\%$ bzw. $\Delta w \approx -2\%$) und zyklischer Frostbelastung zwischen Frostphasen mit oben -3°C und unten 0°C sowie Tauphasen mit $+1^\circ\text{C}$ an beiden Probenenden ergeben sich wieder deutliche Vernässungen in den Frostwechselbereichen und z. T. leichte Austrocknungen im ungefrorenen Bereich (Bilder 95 und 96). Die Austrocknungen sind bei dem nasserem Material mit $\Delta w \approx -1,5\%$ größer und stetiger als bei dem trockenerem Material mit $\Delta w \approx -0,5\%$, bei dem die Austrocknungstendenz nur wenig ausgeprägt ist und nicht eindeutig auf den Frosteinfluß zurückgeführt werden kann. Sowohl die Trocken-

dichte als auch die Wassergehalte verändern sich nach den fünften Frost-Tau-Wechsel nur noch schwach bzw. im Rahmen der zu berücksichtigenden Schwankungsbreiten.

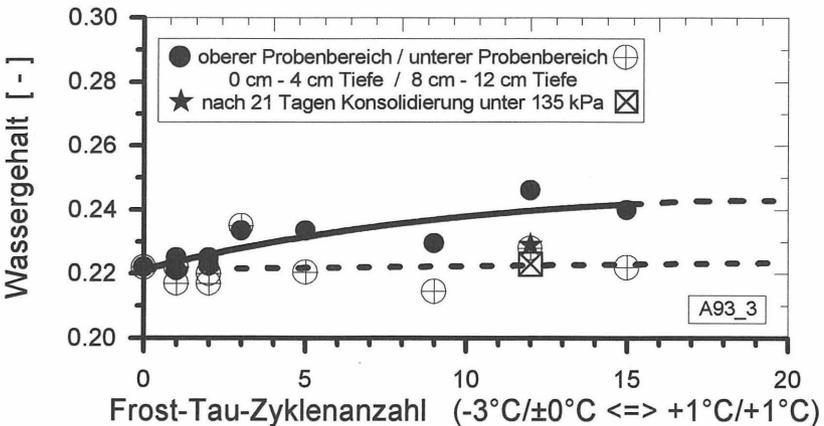
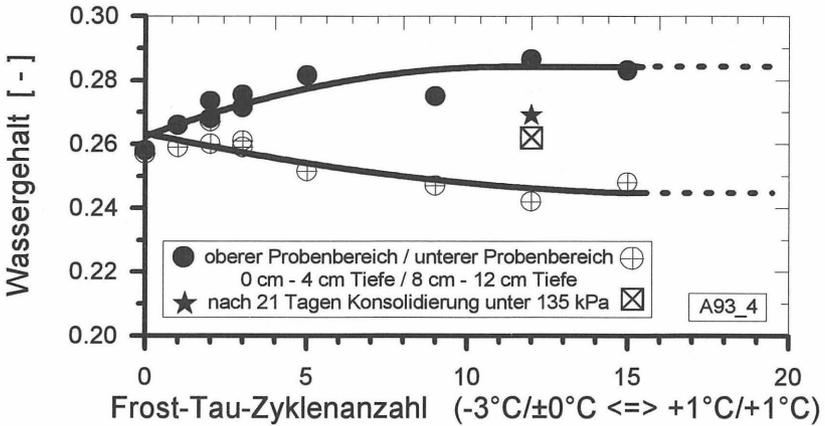


Bild 95: Veränderung der Wassergehalte mit zunehmender Anzahl an Frost-Tau-Wechseln bei unterschiedlichen Ausgangswassergehalten (Laborboden 1, -3 C/0 C \Leftrightarrow +1 C/+1 C)

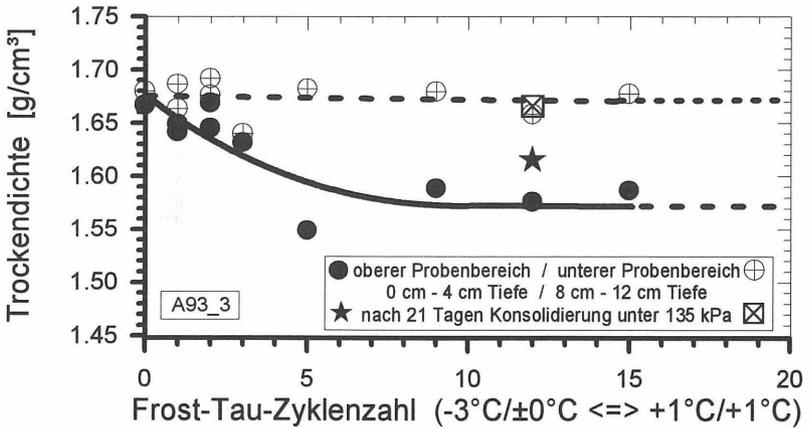
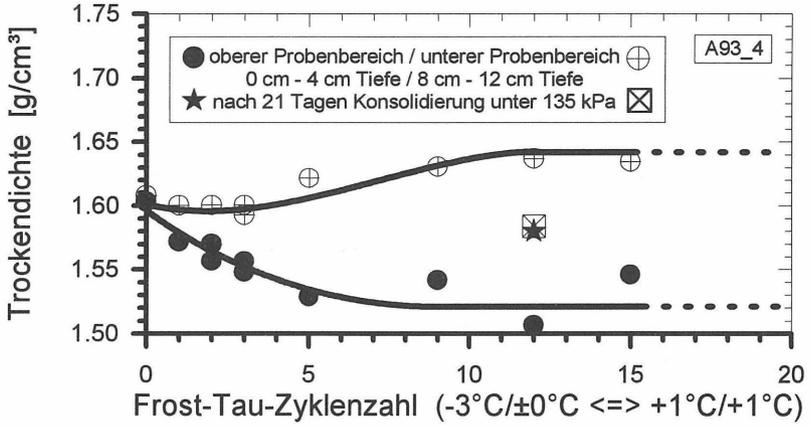


Bild 96: Veränderung der Trockendichten mit zunehmender Anzahl an Frost-Tau-Wechseln bei unterschiedlichen Ausgangswassergehalten (Laborboden 1, $-3^{\circ}\text{C}/0^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow +1^{\circ}\text{C}/+1^{\circ}\text{C}$)

4.4.4.2.3. Wasserdurchlässigkeit

Die Wasserdurchlässigkeit wurde bei den kleinformatischen Proben i. d. R. für die Nullproben an einer ganzen 12 cm Probe ermittelt, da die Werte bei zwei geteilten Nullproben für oben und unten näherungsweise identisch waren. Bei den befestigten Versuchsproben wurden die Proben geteilt und die jeweils obersten und untersten 6 cm für die Durchlässigkeitsbestimmung verwendet. Ein feineres Raster erschien aus verschiedenen Gründen nicht sinnvoll. Alle Proben wurden in der Triaxialzelle bis auf die gekennzeichneten Ausnahmen des Versuches A93_1 bei einem Gradienten von $i = 30$ und einem Zellüberdruck von $\Delta\sigma_3 = 0,2$ bar durchgeführt (Tabelle 24).

Material	Versuch	Wassergehalt [%]	Frostbelastung [°C]	Gefrierdauer / Zykluszahl [d]	Höhe [cm]	k-Wert [m/s]	Bemerkung	
Labor 1	A93_4	25,8	FT -3/0 \leftrightarrow 1/1	Null	0 - 12	< 1·10 ⁻¹²		
					9 FT	0 - 6	2·10 ⁻¹¹	
						6 - 12	2·10 ⁻¹¹	
					15 FT	0 - 6	2·10 ⁻¹¹	
						6 - 12	1,5·10 ⁻¹¹	
					15 FT	0 - 6	< 1·10 ⁻¹²	21 Tage KD
						6 - 12	< 1·10 ⁻¹²	21 Tage KD
	A93_3	22,8	FT -3/0 \leftrightarrow 1/1	Null	0 - 12	< 1·10 ⁻¹²		
					9 FT	0 - 6	3·10 ⁻¹¹	
						6 - 12	1,5·10 ⁻¹¹	
					15 FT	0 - 6	3·10 ⁻¹¹	
						6 - 12	2·10 ⁻¹¹	
					15 FT	0 - 6	< 1·10 ⁻¹²	21 Tage KD
						6 - 12	< 1·10 ⁻¹²	21 Tage KD
	A93_5	24,0	-3 / +2	Null	0 - 12	5·10 ⁻¹¹		
					1	0 - 6	4·10 ⁻¹¹	
						6 - 12	2·10 ⁻¹¹	
					21	0 - 6	3·10 ⁻¹¹	
						6 - 12	1,5·10 ⁻¹¹	
	A93_2	22,0	-5 / 0	Null	0 - 12	6·10 ⁻¹¹		
					27	0 - 6	1,2·10 ⁻¹⁰	
						6 - 12	1,5·10 ⁻¹⁰	
						0 - 12	< 1·10 ⁻¹²	
	A93_1	26,0	-5 / 0	Null	0 - 12	< 1·10 ⁻¹²		
					27	0 - 6	< 1·10 ⁻¹²	i=60 \Rightarrow 1·10 ⁻¹⁰
						6 - 12	< 1·10 ⁻¹²	i=60 \Rightarrow 8·10 ⁻¹¹
					27 *)	0 - 6	< 1·10 ⁻¹²	i=60 \Rightarrow 2,5·10 ⁻¹¹
					*)	6 - 12	< 1·10 ⁻¹²	i=60 \Rightarrow 3·10 ⁻¹¹

Fortsetzung Tabelle 24 nächste Seite,

Fortsetzung Tabelle 24

Material	Versuch	Wassergehalt [%]	Frostbelastung [°C]	Gefrierdauer / Zykluszahl [d]	Höhe [cm]	k-Wert [m/s]	Bemerkung
Feld 1	I93_1	28,4	-5 / 0	Null	0 - 12	$3 \cdot 10^{-11}$	
				10	0 - 6	$1 \cdot 10^{-10}$	
					6 - 12	$5,5 \cdot 10^{-11}$	
				11	0 - 6	$6 \cdot 10^{-11}$	
					6 - 12	$5 \cdot 10^{-11}$	
Feld 1	I93_2	24,3	-5 / 0	Null	0 - 12	$5 \cdot 10^{-11}$	
				11	0 - 6	$9 \cdot 10^{-11}$	
					6 - 12	$4,5 \cdot 10^{-11}$	
				11 *)	0 - 6	$5 \cdot 10^{-11}$	21 Tage KD
				*)	6 - 12	$3,5 \cdot 10^{-11}$	21 Tage KD
Feld 1	I93_4	22,1	-5 / 0	Null	0 - 12	$8,5 \cdot 10^{-11}$	
				11	0 - 6	$2 \cdot 10^{-10}$	
					0 - 12	$7 \cdot 10^{-11}$	
Feld 2	WO93_2	10	-5 / 0	Null	0 - 12	$2 \cdot 10^{-11}$	
				18	0 - 6	$2 \cdot 10^{-10}$	
					6 - 12	$9 \cdot 10^{-11}$	
Feld 2	WO93_3	10,7	-5 / 0	Null	0 - 12	$1 \cdot 10^{-11}$	
				1	0 - 6	$6 \cdot 10^{-11}$	
					6 - 12	$3,5 \cdot 10^{-11}$	
				7	0 - 6	$5,5 \cdot 10^{-11}$	
					6 - 12	$5 \cdot 10^{-11}$	
				21	0 - 6	$1 \cdot 10^{-10}$	
	6 - 12	$7 \cdot 10^{-11}$					
	21 *)	0 - 6	$4,3 \cdot 10^{-11}$	21 Tage KD			
	*)	6 - 12	$5 \cdot 10^{-11}$	21 Tage KD			

*) = Wiedereinbau derselben Proben nach 21 Tagen Konsolidierung bei 135 kPa
 $< 1 \cdot 10^{-12}$ = kein meßbarer stetiger Durchfluß
 FT = Frost-Tau-Wechsel
 KD = Konsolidierung bei 135 kPa

Tabelle 24: Zusammenstellung einiger Durchlässigkeitsbeiwerte nach unterschiedlichen Frostereignissen im Laborversuch bei verschiedenen Böden

Die Böden weisen ein vom Ausgangswassergehalt und von der Frostgeschichte abhängiges Änderungsverhalten hinsichtlich der Durchlässigkeit auf. Bei dem sehr undurchlässigen kaolin-montmorillonithaltigen Material Laborboden 1 zeigen einige Nullproben über den Normalzeitraum von 21 Tagen bei dem angelegten Gefälle von $i = 30$ keinerlei meßbare Durchströmung. Nach den ersten Frosttagen bzw. Frost-Tau-Wechseln werden jedoch i. d. R. in den Proben, in denen zuvor keine Durchströmung nachgewiesen werden

konnte, meßbare Durchflüsse induziert. So weist der Laborboden 1 bei einem Wassergehalt von $w \approx 26\%$ nach einem Gefrierzyklus von 27 Tagen bei einem Gefälle von $i = 30$ noch immer keine Durchströmung auf, während nach 9 Frost-Tau-Wechseln ein Durchlässigkeitsbeiwert von $k = 2 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ gemessen wurde. Dieser erhöhte sich allerdings mit zunehmender Zyklanzahl nicht mehr. Ein ähnliches Verhalten zeigt der Boden bei zyklischer thermischer Belastung bei einem geringeren Wassergehalt von $w \approx 23\%$ (A93_3), wobei hier die obere Hälfte gegenüber dem unteren Probenanteil eine um $1 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ gering höhere Durchlässigkeit aufweist. Deutliche Durchlässigkeitssteigerungen konnten nur an einer Probe mit einem Ausgangswassergehalt von $w \approx 22\%$ (A93_2) registriert werden, bei der nach 27 Tagen konstantem Frost mit -5 C an der Probenoberfläche und 0 C an der Unterseite eine Verdoppelung des k -Wertes um $6 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ auf $1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ zu verzeichnen war.

Nimmt man die Proben, bei denen keine Durchströmung gemessen wurde, als dicht an, so haben sich maximale Steigerungen um $\Delta k \approx 3 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ ergeben. Alle ermittelten Durchlässigkeiten des Laborbodens 1 waren kleiner als $1,5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ und lagen damit unabhängig von der Frostgeschichte weit unter den für eine Abdichtung geforderten Werten.

Die größten Steigerungen bei dem Boden aus Feld 1 (montmorillonithaltiger Ton) wurden mit $\Delta k = 7 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ bei einer oberen Probenhälfte aus dem Versuch I93_1 nach 10 Tagen konstantem Frost gemessen. Alle anderen Werte lagen in der Größenordnung von ca. $3 - 4 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$.

4.4.3.2.3.1 Scherfestigkeit

An den kleinformatigen Proben wurde wie bei den großen Proben die Scherfestigkeit in Form von UU-Versuchen bestimmt. Bild 97 zeigt die Entwicklung der mit der Flügelsonde bestimmten Schubspannungen τ in Abhängigkeit von der Gefrierdauer über die Probenhöhe bei einem konstanten Temperaturgefälle mit -3°C oben und $+2^{\circ}\text{C}$ unten. Es ist ersichtlich, daß alle ermittelten Werte im gefrorenen oberen Bereich kleiner und im ungefrorenen Bereich größer werden und damit dem Trend des Wassergehaltes folgen (vgl. auch Bild 91 rechts, Seite 180). Die auch bei der Nullprobe in die Tiefe zunehmenden Werte resultieren vornehmlich aus dem Fehlen einer globalen Auflast und der leicht nach unten ansteigenden Trockendichte (Bild 91, links). Eine größere Beeinflussung durch Mantelreibung am Gestänge der Flügel kann aufgrund von Versuchen weitgehend ausgeschlossen werden.

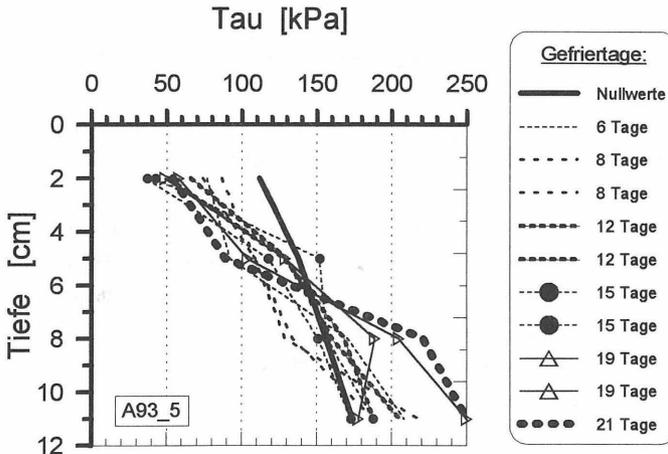


Bild 97: Entwicklung der Schubspannungen in den einzelnen Probenhöhenbereichen in Abhängigkeit von der Gefrierzeit (Laborboden 1, stationär $-3^{\circ}\text{C}/+2^{\circ}\text{C}$, Flügelsonde, ρ_d und w vgl. Bild 91)

Die Veränderungen werden deutlicher, wenn man die Entwicklung der einzelnen Probenhöhenbereiche über die Gefrierzeit aufträgt (Bild 98). Obwohl bedingt durch die Probenherstellung sowie Ungenauigkeiten bei der Gefrierung und Schubspannungsermittlung Streuungen zu verzeichnen sind, ist der beschriebene Trend insbesondere in den oberen drei Lagen ausgeprägt und anhand der Regressionsgeraden durch alle Meßwerte gut sichtbar. Die unterste (trockenste) Lage weist die größten Schwankungen auf, wobei der zweite Wert am 19. Tag mit 178 kPa als wahrscheinlich zu niedrig einzustufen ist. Die

Streuungen lassen jedoch bei keiner Lage eine eindeutige Beurteilung über ein Abklingen oder eine weitere Fortführung der Trends zu.

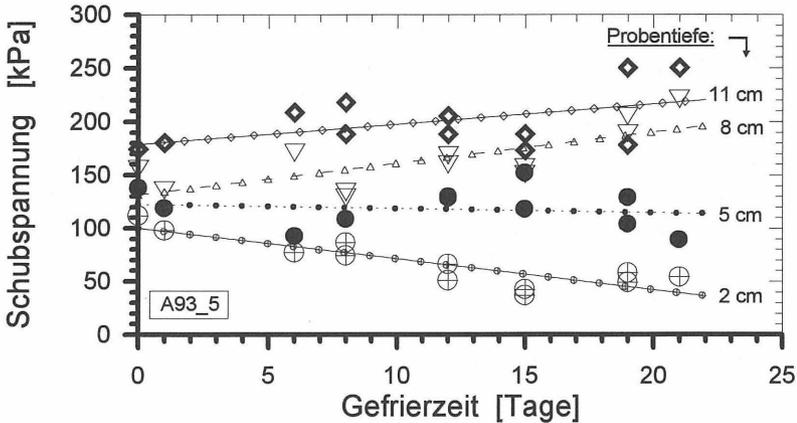


Bild 98: Entwicklung der Schubspannungen über die Probenhöhe in Abhängigkeit von der Gefrierzeit mit eingezeichneten linearen Regressionsgeraden (Laborboden 1, stationär -3 C/+2 C, Flügelsonde, ρ_d und w vgl. Bild 91)

Die Entwicklungen der Schubspannungen bei dem Laborboden 2 mit den Wassergehalten $w \approx 0.25$ und $w \approx 0.22$ bei stationärer Gefrierung mit dem gleichen Temperaturgradienten, aber gegenüber dem vorigen Versuch um 2 C nach unten versetzter Gefriertemperatur (oben -5 C, unten 0 C), ist in den Bildern 99 und 100 dargestellt. Auch hier kann bei beiden Wassergehalten die beschriebene Tendenz der Abminderung und ein nach der Konsolidierung stattfindender Wiederanstieg der Schubspannung im ehemals gefrorenen Bereich beobachtet werden.

Die Scherfestigkeiten bei dem Versuch A93_1 nach 60 Tagen Konsolidierung sind außergewöhnlich hoch, was auf die nach dem Scherversuch ermittelten, um ca. 2% - 3% zu geringen Wassergehalte und damit auf eine Austrocknung infolge eines nicht ganz geschlossenen Systems zurückzuführen ist.

Setzt man das gleiche Material mit vergleichbaren Wassergehalten mehreren Frost-Tau-Wechseln aus, so ergeben sich deutlich größere Abminderungen der Schubspannung (Bild 101). Liegt man nach zwei Frost-Tau-Wechseln noch in der Größenordnung der bei der stationären Gefrierung gemessenen Verringerungen, so ergeben sich nach 9 Frost-Tau-Wechseln nochmals ca. 25% bis 40% Abminderung, so daß nach mehreren Zyklen mit Gesamtabminderungen auf noch verbleibende ca. 50 % der ursprünglichen Schubspannung gerechnet werden muß.

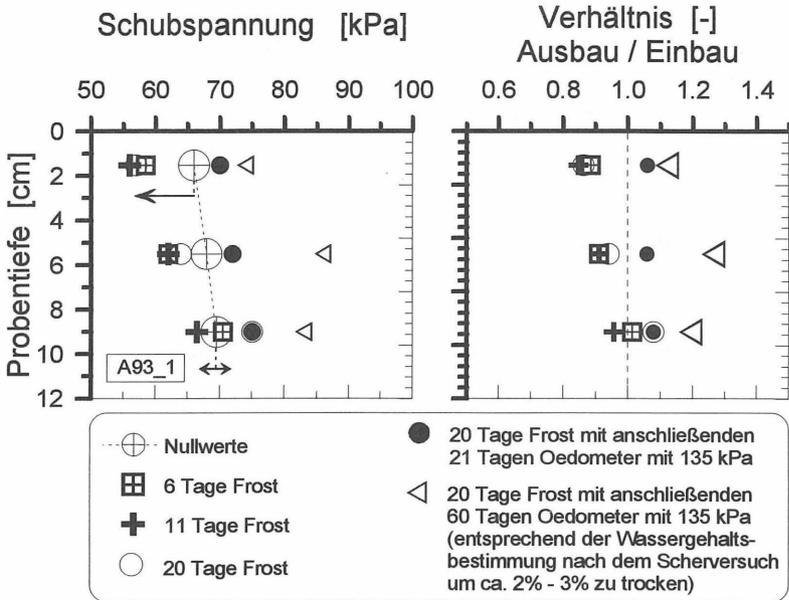


Bild 99: Schubspannung in Abhängigkeit von der Gefrier- und Konsolidationsdauer über die Probtiefe (Laborboden 1, $w \approx 0.25$)

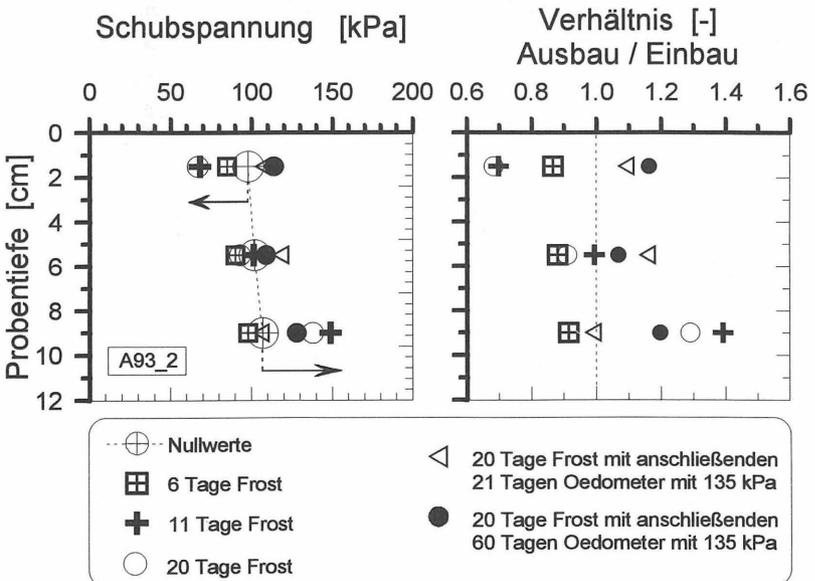


Bild 100: Schubspannung in Abhängigkeit von der Gefrier- und Konsolidationsdauer über die Probtiefe (Laborboden 1, $w \approx 0.22$)

Da hierbei zu berücksichtigen ist, daß durch den erforderlichen Einbau in die Versuchsvorrichtung bereits eine gewisse unvermeidbare Drainage und damit ein Abbau des Porenwasserüberdruckes stattfindet, muß für den Augenblick des Auftauens der Eislinsen in einer Ebene mit noch geringeren Festigkeiten gerechnet werden.

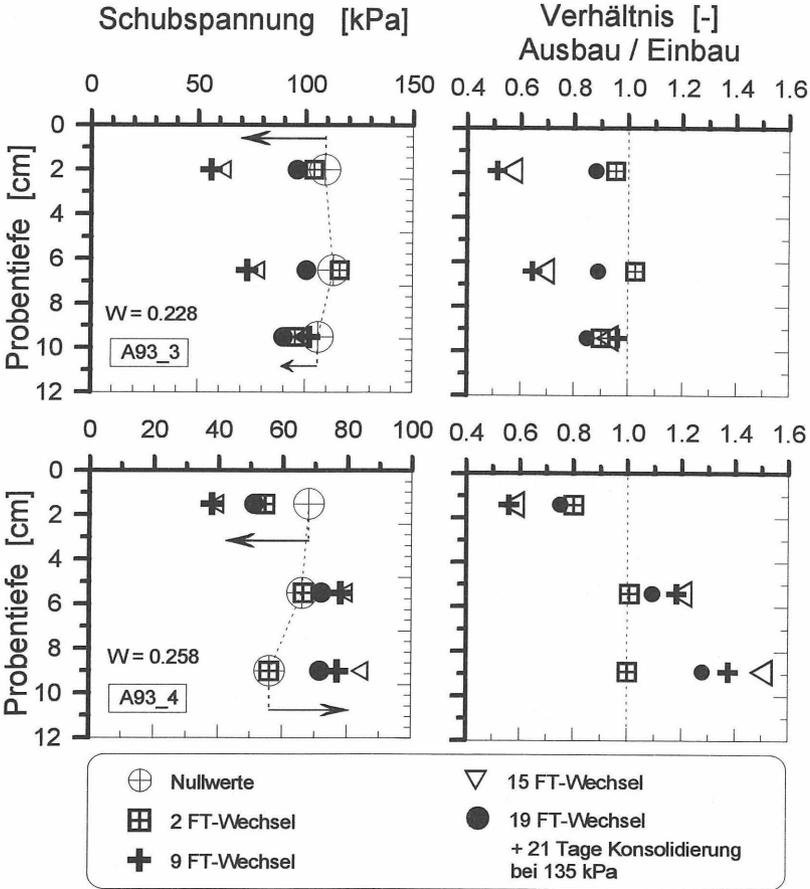


Bild 101: Schubspannung in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel über die Probtiefe (Laborboden 1, $w \approx 0.228$ (Bild oben), $w \approx 0.258$ (Bild unten), FT-Wechsel: $-3^\circ\text{C} / 0^\circ\text{C} \Leftrightarrow +1^\circ\text{C} / +1^\circ\text{C}$)

4.4.5 Reversibilität

Für die praktische Anwendung ist es wichtig, ob die nach einem oder mehreren Frost-durchgängen eingetretenen eventuellen Veränderungen durch eine spätere Auflast reversibel sind. Zur Untersuchung dieser Frage wurden einige Proben nach dem Ausbau sofort in ein Oedometer eingebaut und dort in einem weitgehend geschlossenen System ohne Wasserzufuhr belastet und nach dem Abklingen der Konsolidierungssetzungen weiteren Untersuchungen unterzogen.

In den Bildern 95 und 96 sind die Werte mit eingetragen, die aus Proben aus Laborboden 1 (Ton) stammen, die nach 12 Frost-Tau-Wechseln für 21 Tage unter 135 kPa Auflast konsolidiert wurden. Es ist ersichtlich, daß die Wassergehalte nach der Konsolidierung über die Probenhöhe relativ einheitlich wieder den Ausgangswert erreichen, d. h. sich die trockenen und nassen Zonen angleichen. Bei den Trockendichten findet tendenziell der gleiche Prozeß statt. Die Endwerte nach der Konsolidierung erreichen in den ursprünglich gefrorenen Bereichen nicht ganz die Ausgangswerte. Dabei ist der Ausgleich bei dem Material mit dem höheren Ausgangswassergehalt besser als bei dem trockenen. Hier kann sich das Material wegen der schon vom Ausgangswassergehalt her steifen bis halbtrockenen Konsistenz bei dieser Auflastgröße nicht verformen.

In Bild 102 sind exemplarisch drei Proben aus Laborboden 2 abgebildet, die bei $w \approx 95\%$ auf der nassen Seite hergestellt, bis auf die Nullprobe einem Dauerfrost von 14 Tagen bei Temperaturen von -5°C oben und 0°C unten und einer anschließenden Konsolidation von 18 Tagen unter 7.5 kPa bzw. 135 kPa ausgesetzt wurden. Bereits der optische Vergleich zeigt, daß die Konsolidation in Abhängigkeit von der Auflast zwar die Gesamthöhe reduziert, die ursprüngliche Höhe aber nicht ganz erreicht. Die an den Proben ermittelten Trockendichten und Wassergehalte sind in Bild 103 aufgetragen und belegen den optischen Eindruck. Zum Vergleich sind die Werte einer zeitgleich entnommenen, nicht konsolidierten Probe aufgenommen (Bild 103, dicke Linie).

Fissuren und Trennfugen im Probenmaterial, wie sie an den Stellen ausgeprägter Eislinien entstanden sind, bleiben auch nach einer Konsolidierung als Störung erhalten und erreichen nicht mehr die Qualität einer ungestörten Probe. Bei einer Zugbelastung bricht die Probe sehr schnell an diesen Störzonen auseinander. Bei der Untersuchung der Scherfestigkeit über die Probenhöhe mit der Flügelsode konnte ein Anstieg auf ca. 90% bis ca. 120% der ursprünglichen Scherfestigkeit ermittelt werden; die Störzonen konnten dabei nicht als solche erkannt werden. Dies lag trotz der Verwendung des kleinstmöglichen Flügels an der "Verschmierung" der Festigkeit über die Flügelhöhe.

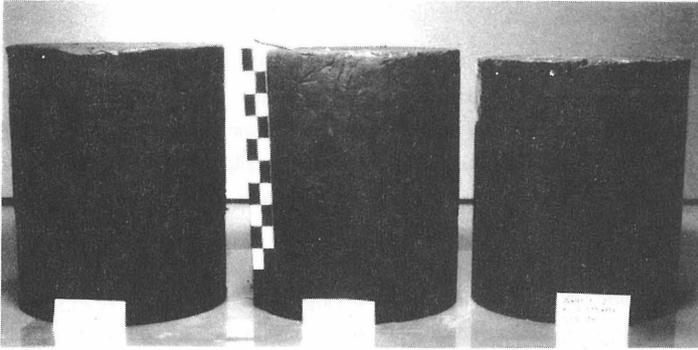


Bild 102: Ansicht von zwei konsolidierten Proben (links: $\sigma_N = 7.5$ kPa, Mitte: 135 kPa) im Vergleich zu einer ebenfalls konsolidierten, nicht befestigten Nullprobe (Auflast $\sigma_N = 135$ kPa, rechts, Laborboden 2)

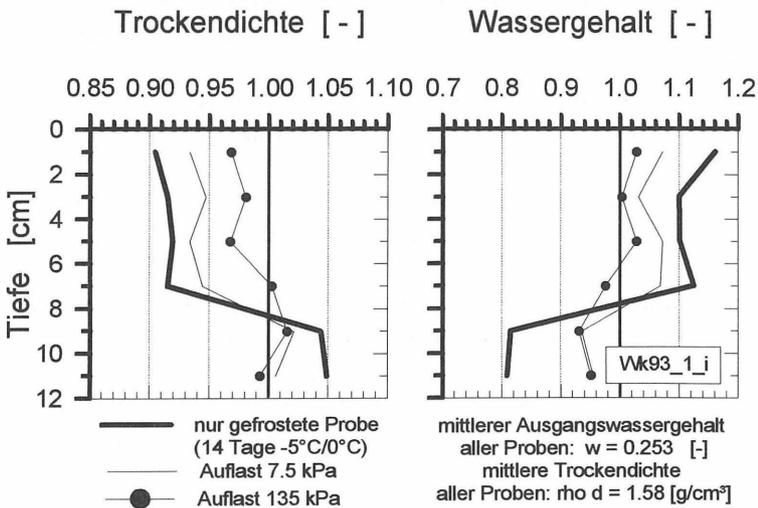


Bild 103: Trockendichten und Wassergehalte der nach der 14-tägigen Befrostung konsolidierten Proben im Verhältnis zu den Nullprobenwerten (Laborboden 2)

Diese Beobachtung entspricht auch den Feststellungen anderer Autoren. So hat LUDWIG 1993 nach verschiedenen Frostbelastungen mit anschließender Konsolidierung ebenfalls eine Wiederzunahme des Verdichtungsgrades beobachtet, der jedoch gleichfalls nicht ganz den einer konsolidierten ungefrorenen Probe erreichte.

Es kann damit festgestellt werden, daß die Veränderungen in der Trockendichte und der Verteilung der Wassergehalte durch eine anschließende Auflast, wie sie z. B. der abzulagernde Abfall darstellt, weitgehend rückgängig gemacht werden können. Die Scherfestigkeit erreicht ebenfalls annähernd die Ursprungswerte. Die Durchlässigkeit wird von Beginn an am wenigsten beinflußt und liegt nach der Konsolidation in oder unter der Durchlässigkeit der Nullproben (s. a. Tabelle 24).

4.4.6. Zusammenfassung der Laboruntersuchungen

Die Laborversuche ergaben im wesentlichen ein qualitativ einheitliches Bild hinsichtlich der Auswirkungen des Frostes.

In den von Frostdurchgängen betroffenen Bereichen steigt der Wassergehalt durch den induzierten Gefriersog an. Gleichzeitig wird die globale Trockendichte infolge der Volumenausdehnung bei der Kristallisation des Wassers zu Eis und durch die Erhöhung des Wassergehaltes wegen des durch den Gefriersog an die Gefrierfront transportierten Wassers herabgesetzt, was zu einer Auflockerung des Materials führt. Die tiefer liegenden ungefrorenen Probenbereiche werden durch den Gefriersog entwässert, weisen dadurch eine größere Trockendichte und unter Umständen Schrumpfrisse auf. Die Schrumpfrisse waren bei den relativ kleinen Probenabmessungen und den zumeist plastischen Materialien innerhalb der Proben nicht nachzuweisen, jedoch fand eine deutliche Verringerung des äußeren Probendurchmessers statt.

Allgemein entsteht ein räumlich gegliedertes Frostgefüge, das von der jeweiligen Materialzusammensetzung und den Randbedingungen maßgeblich beeinflusst wird. Die Veränderungen werden ausgeprägter mit einem höherem Ausgangswassergehalt, zunehmender Gefrierzeit sowie zunehmender Frost-Tau-Wechselanzahl.

Durch das Frostgefüge und die zahlreichen entstehenden Fissuren wurden in der Triaxialzelle um bis zu einer halben Zehnerpotenz, in Ausnahmefällen um bis zu einer ganzen Zehnerpotenz erhöhte Wasserdurchlässigkeiten gemessen. Da die Ausgangsdurchlässigkeiten weit unter den für eine Abdichtung geforderten Werten lagen, überschritten auch die leicht erhöhten Durchlässigkeiten der befestigten Materialien die geforderten Grenzwerte nicht.

Die beobachteten Veränderungen der Scherfestigkeiten waren eng an die Entwicklungen des Wassergehaltes gekoppelt und daher in den gefrorenen Bereichen kleiner werdend. Die ermittelten Veränderungen in den bodenmechanischen Kennwerten konnten durch eine anschließende Konsolidierung der befestigten Proben weitgehend rückgängig

gemacht werden, so daß von einer gewissen Reversibilität der sich verschlechternden Eigenschaften ausgegangen werden kann. Das Frostgefüge bleibt eingeprägt. Dies bedeutet, daß die Proben auch nach einer Konsolidierung zwar wieder in Hinsicht auf eine Dichtungsschicht verbesserte bodenmechanische Kennwerte aufweisen, jedoch kein homogenes Material mehr darstellen.

4.5 Vergleich der Ergebnisse mit Literaturangaben

Die bei den eigenen Feld- und Laborversuchen erhaltenen Ergebnisse bestätigen im wesentlichen das in der Literatur zu findende, vielfältige und zum Teil widersprüchlich erscheinende Bild der Auswirkungen von negativen Temperaturen in mineralischen Dichtungsmaterialien.

Bei den Laborversuchen wurden hinsichtlich der Gefügeausbildung der Materialien nach der Gefrierung die von zahlreichen Autoren beschriebenen räumlichen Zergliederungen und Aggregationen beobachtet, die sowohl in offenen wie auch in geschlossenen Systemen gleichermaßen in Erscheinung treten. Sie sind jeweils um so ausgeprägter, je höher der Ausgangswassergehalt liegt und je länger die Gefrierung andauert. Signifikante Unterschiede in der Art der Gefügeausbildung zwischen den einzelnen Tonböden konnten jedoch im Gegensatz zu LUDWIG 1993 und SCHABABERLE 1989 nicht festgestellt werden.

In den befestigten Bereichen der Proben verringerte sich die globale Trockendichte und der Wassergehalt erhöhte sich. In den die Frostgrenze unterlagernden Probenbereichen nahm die Trockendichte durch den Transport von Wasser in Richtung Frostfront ab. Beide Erscheinungen entsprechen den Ergebnissen der wenigen veröffentlichten Untersuchungen in geschlossenen Systemen und werden mit zunehmender Versuchszeit, steigendem Wassergehalt und größerem Temperaturgradienten ausgeprägter. Bei dreidimensional gefrorenen Proben (KIM/DANIEL 1992) wurden die gleichen Vorgänge mit Wassertransporten in räumlicher Form nach allen Seiten mit der Austrocknung in der Probenmitte festgestellt.

Entgegen der Mehrzahl der veröffentlichten Untersuchungen wurden bei den Durchlässigkeitsprüfungen in der Triaxialzelle an allen untersuchten Materialien im Labor zwar ebenfalls Veränderungen, aber keine extremen Steigerungen gemessen, wie sie z. B. in verschiedenen Versuchen von Chamberlain, Othman, Porebska u. a. mit bis zu drei Zehnerpotenzen ermittelt wurden. Die größten Steigerungen wurden an je einer Probe bei dem Boden aus Feld 1 (montmorillonithaltiger Ton) und Labor 1 (kaolinit/montmorillonithaltiger Ton) mit $\Delta k = 6 \cdot 10^{-11}$ bis $7 \cdot 10^{-11}$ m/s ermittelt; alle weiteren Versuche, auch

bei den anderen untersuchten Böden, ergaben unabhängig von der Frostgeschichte und vom Ausgangswassergehalt maximale Steigerungen von $\Delta k = 3 \cdot 10^{-11}$ bis $4 \cdot 10^{-11}$ m/s. Die möglichen Gründe für die gegenüber den Versuchen von Chamberlain geringeren Veränderungen wurden bereits im Abschnitt "Durchlässigkeit", Seite 79 ff. diskutiert.

Die Scherfestigkeit, die hier vor allem als Schubspannung bei einer Auflaststufe ermittelt wurde, verhält sich in enger Korrelation zu dem sich durch die Befrostung einstellenden Wassergehalt. Diese Beobachtung gilt in der gesamten Bodenmechanik und ist nicht frosttypisch. Die von einigen Autoren beobachteten Abhängigkeiten von dem sich ausgebildeten Aggregatgefüge (Dilatationseffekte bei den virtuellen Korngrößen) konnten bei den durchgeführten Untersuchungen nicht nachgewiesen werden.

Im Bereich der Feldversuche wurden bei den nicht abgedeckten Flächen nach einem Winterzeitraum bei den plastischen Tönen (Fläche 1 und Feld 1) intensive Vernässungen und räumliche Zergliederungen einhergehend mit deutlichen Verkleinerungen der Trokchendichten und der Scherfestigkeiten festgestellt. Die Durchlässigkeiten waren demgegenüber bei diesen Materialien nur wenig betroffen. Bei dem geringplastischen Geschiebelehm aus Feld 2 wurden nach dem ersten Winter ohne Abdeckung nur im obersten Bereich Durchlässigkeitssteigerungen von bis zu einer halben Zehnerpotenz ermittelt. Nach den Austrocknungen während des folgenden Sommers und den Einwirkungen des zweiten Winters ergaben sich intensive Zergliederungen und teilweise Durchlässigkeitssteigerungen von bis zu einer Zehnerpotenz, im obersten Bereich bis zu zweieinhalb Zehnerpotenzen.

Diese Ergebnisse entsprechen den Erfahrungen mit nicht abgedeckten Schichten von STARKE 1989 ("clay liner") und PARUVAKAT 1993 (mehrere "clay liners"), während LUDWIG 1993 nach einem Winter von leichten Steigerungen (kaolinitischer, illitischer Ton) und SOWERS 1993 nach mehrmaliger Gefrierung, Vernässung und Austrocknung im Zeitraum von zwei Jahren von erheblichen Aggregierungen, Durchlässigkeitssteigerungen und ausgeprägten Rissen berichten (leicht bis mittelplastische Tone). Für eine genauere Analyse der Unterschiede stehen leider weder genügend auswertbare Quellen über Versuche in situ und in den verfügbaren Quellen nur ungenügende Angaben über die Materialien und jeweiligen Randbedingungen zur Verfügung. Veröffentlichungen zu Ergebnissen von abgedeckten Schichten (Kombinationsabdichtungen oder vergleichbare Einbausituationen) wurden nicht gefunden, so daß die eigenen Ergebnisse nicht mit Literaturergebnissen verglichen werden können.

Wie in der Mehrzahl der Veröffentlichungen über Beobachtungen in situ haben sich auch bei den eigenen Feldversuchen gegenüber den Laborversuchen - von Ausnahmen abgesehen - geringere frostbedingte Veränderungen in den abgedeckten Flächen ergeben. Dies weist darauf hin, daß die Laborversuche die Situation in situ nicht genau genug widerspiegeln, jedoch hinsichtlich der Bewertung der Frostgefährdung normalerweise auf der sicheren Seite liegen. Ursächlich für die zum Teil unterschiedlichen Ergebnisse sind von den in Tabelle 9, Seite 62 aufgeführten Faktoren vor allem die im Labor oft zu extremen Temperaturverhältnisse (insbesondere der Temperatur(Stagnations-)gradient, gefolgt von der Gefrier- und Auftaugeschwindigkeit) und die Probenherstellung (Herstellart, Homogenität und Probenabmessungen).

Auch der Zeitfaktor kann entscheidend sein. Laborproben werden in den meisten Fällen während oder direkt nach dem Auftauen verarbeitet. Die veröffentlichten Ergebnisse aus den Feldproben stammen jedoch oft aus Untersuchungen, die erst nach der gesamten Frostperiode im Frühjahr durchgeführt wurden. In der Zwischenzeit werden zwar die Gefügeveränderungen ohne äußere Einwirkungen (wie z. B. Auflast, Scherbeanspruchungen durch Deponie- oder Baufahrzeuge) nicht rückgängig gemacht, jedoch kann sich der Wassergehalt durch kapillare Kräfte teilweise wieder ausgleichen und es verbleibt genügend Zeit für eventuelle Quellungsvorgänge bei den Tonmineralen.

Auch bei einer direkten Untersuchung von Feldproben nach Frostereignissen bleibt immer noch die nicht vermeidbare Störung der Probe durch den Ausbau aus dem Feld (meist durch Ausstechzylinder mit den dadurch bedingten Verschmierungen an den Probenrändern und den Belastungen der Gesamtprobe, s. a. Bild 46, Seite 125), den Transport (insbesondere bei schluffigen Materialien), das Auspressen aus dem Entnahmezylinder (vor allem bei stark zerklüfteten Proben) und den Einbau in die jeweilige Versuchsvorrichtung. Adäquate Methoden für Untersuchungen in situ, speziell bei dem Leitparameter Durchlässigkeit, sind bisher noch nicht verfügbar bzw. auch bei ungestörten Verhältnissen nicht vergleichbar mit den bisherigen Labormethoden.

4.6 Empfehlungen zur Untersuchung der Frostgefährdung mineralischer Abdichtungen

Die Untersuchung der Frostgefährdung eines mineralischen Abdichtungsmaterials gliedert sich in zwei Teile:

- die Untersuchung der Auswirkungen von Frost im Abdichtungsmaterial selbst und
- die Untersuchung der Frosteintrittswahrscheinlichkeit.

Für den Bereich des Abdichtungsmaterials kann zunächst anhand der Eignungsprüfungsunterlagen unter Zugrundelegung insbesondere der Kornverteilungen, der Plastizität und der Tonmineralzusammensetzung eine grobe Einteilung vorgenommen werden. Dabei kann davon ausgegangen werden, daß für den Bereich der generell frostempfindlichen Schluffe und Tone tendenziell mit kleiner werdender Korngröße, mit größer werdendem Anteil an quellfähigen Bestandteilen und größer werdender Plastizität eine kleinere Frostgefährdung vorliegt (vgl. ISSMFE TC-8).

Aufgrund der oben angegebenen Vielfalt der einflußnehmenden Parameter und den Widersprüchen in den vorliegenden Erfahrungen muß diese grobe Einteilung mit Erfahrungswerten aus anderen Projekten oder älteren Bauabschnitten ergänzt werden. Sind diese nicht vorhanden und kann aufgrund der Zeitplanung oder des generellen Projektablaufs ein Frosteintrag nicht mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen werden, sind Frostversuche an dem einzubauenden Material vorzunehmen.

Frostversuche für den vorliegenden Anwendungsfall sind bisher nicht genormt und wegen der Vielfalt der Randbedingungen nur beschränkt miteinander vergleichbar (s. a. Seite 57). Bei der Durchführung sind die in Tabelle 9, Seite 62 aufgeführten Faktoren zu berücksichtigen und den aktuellen örtlichen Verhältnissen anzupassen.

Dies betrifft insbesondere die Festlegung der Frosttemperaturen und der Frostzeiträume, die aus einer statistischen Analyse der örtlichen Wetterbedingungen abgeleitet werden müssen.⁷

⁷ Von den Wetterämtern sind teilweise auch Angaben über die örtlich zu erwartenden Frosteintrittstiefen zu erhalten. Bei der Verwendung dieser Frosteintrittstiefen und ihrer Interpretation sind die jeweiligen wärmetechnisch wirksamen Aufbauten auf der Deponiefläche zu berücksichtigen.

Als Versuchsparameter für Standardversuche wird die Verwendung folgender Randbedingungen vorgeschlagen:

- Probengröße $\varnothing \geq 100$ mm, $h \geq 120$ mm (nach Möglichkeit größer, vor allem höher, um die kleinen Gradienten anlegen zu können)
- Herstellung homogener (!) Proben unter Proctorbedingungen oder Verwendung von aus einer Deponiefläche entnommenen Parallelproben
- geschlossenes System mit Verdunstungs-/Sublimationsschutz
- eindimensionale Gefrierung mit Gegentemperierung am anderen Probenende (s. a. Bild 70, Seite 158)
- Temperaturstagnationsgradient:
 - $\Delta t \leq 0,25$ C/cm bei geringer Überdeckung
 - $\Delta t \leq 0,15$ C/cm bei Überdeckung mit Kies > 30 cm
- Einbau der Proben in Versuchsapparaturen für Kennwertbestimmungen im Anschluß an die Befrostung nach Möglichkeit im gefrorenen und Untersuchung im undrainierten Zustand
- zeitgleiche Nullprobenversuche

Die Frosteintrittswahrscheinlichkeit und die Größe der zu erwartenden Frostereignisse für das mineralische Material sind von den geographischen Gegebenheiten und den aktuellen Schichtaufbauten abhängig. Durch eine Analyse der Klimadaten einer nahegelegenen Wetterstation des deutschen Wetterdienstes in Verbindung mit Wärmehaushaltsberechnungen unter Berücksichtigung der vorgesehenen Schichtaufbauten über dem mineralischen Material, können anzulegende Temperaturen, die Versuchsdauer sowie evtl. Frost-Tau-Wechsel festgelegt werden (s. a. Kapitel "5. Der Schutz von mineralischen Abdichtungsmaterialien vor Frost").

Parallel sollte die Gefrierpunktniedrigung und die Kurve für den Anteil an ungefrorenem Wasser in Abhängigkeit von der Gefrieretemperatur ermittelt werden. Diese können dazu verwendet werden, um eine kritische Grenztemperatur festzulegen, die bei Temperaturmessungen auf der Deponiefläche im Winter als Schadensgrenze dienen kann.

Die erforderlichen Untersuchungen bei der Ermittlung der Frostgefährdung und der Beurteilung der Notwendigkeit einer zusätzlichen Frostschutzmaßnahme können analog zu dem Ablaufdiagramm in Bild 104 durchgeführt werden.

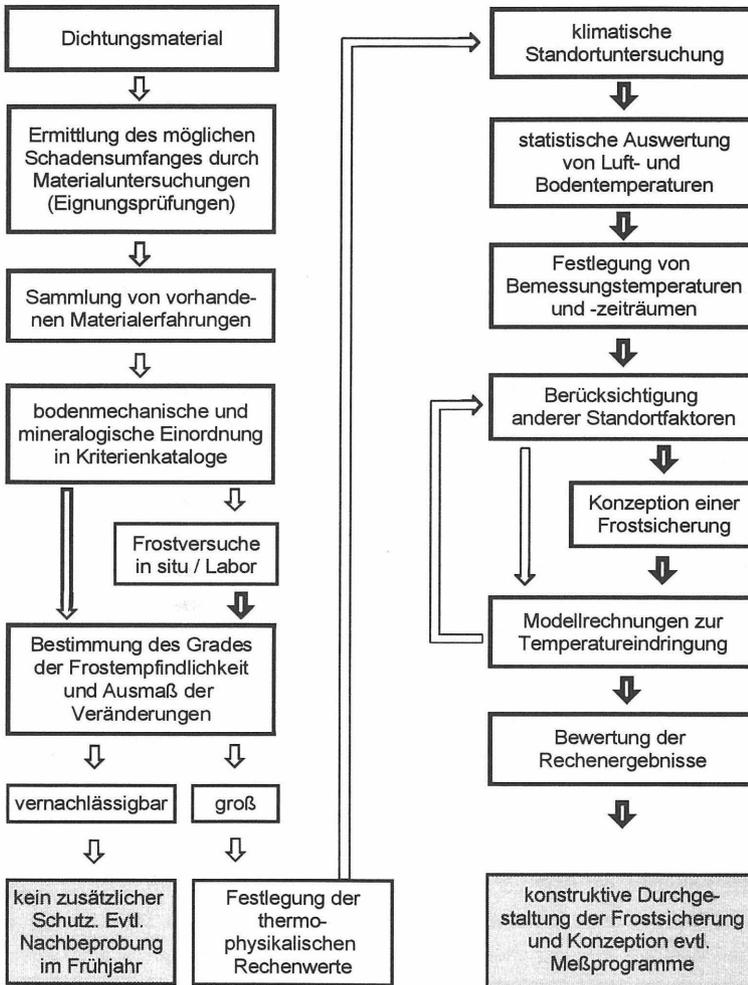


Bild 104: Ablaufdiagramm bei der Untersuchung der Frostgefährdung bzw. der Frostsicherheit von mineralischen Deponieabdichtungen

5 Der Schutz von mineralischen Abdichtungsmaterialien vor Frost

5.1 Allgemeines

Die Tatsache, daß eine mineralische Abdichtung nach einem Frostdurchgang nicht mehr die gleichen Eigenschaften wie vorher aufweist, führt zu der Forderung, diese Schichten grundsätzlich vor einem Frosteintrag zu bewahren. Dafür sollte vorsichtshalber unabhängig davon, in welcher Weise und welchem Ausmaß das aktuell verwendete Material Veränderungen aufweisen könnte, gesorgt werden.

In Abhängigkeit vom jeweiligen Baufortschritt müssen zu Beginn einer Frostperiode grundsätzlich folgende Bauzustände unterschieden werden:

1. Die mineralische Dichtung ist in Teillagen oder in voller Mächtigkeit fertiggestellt

Die freiliegenden mineralischen Dichtungsschichten sind allen Witterungseinflüssen direkt ausgesetzt. Vor allem die Niederschläge bewirken wegen des Fehlens einer KDB im Zusammenwirken mit anderen Vorgängen (Schrumpfrisse, Frostrisse, Erosionen) zum Teil tiefgreifende Vernässungen, so daß eine Aufarbeitung der Fläche erforderlich wird. Eine besondere thermische Schutzschicht ist nicht sinnvoll, solange mit dieser nicht gleichzeitig ein sicherer Schutz vor Niederschlägen oder Austrocknungen verbunden ist. Es ist in der Regel wirtschaftlicher, die obersten Bereiche als Frostschutz- und Verwitterungsschicht zu verwenden und im Frühjahr oder vor Verfüllungsbeginn zu ersetzen.

2. Die Kunststoffdichtungsbahn (KDB) ist verlegt

Die verlegte KDB verhindert zwar eine Vernässung, bietet jedoch nur einen sehr begrenzten Frostschutz bei kurzen, leichten Nachtfrösten. Dieser Bauzustand kann im Regelfall durch die fehlenden Schutz- und Drainageschichten in kurzer Zeit komplettiert werden. Die Komplettierung ist so weit wie möglich durchzuführen, um durch die Auflasten eine Wellenbildung der KDB zu vermeiden und den Preßverbund herzustellen (vgl. auch Bilder und Ausführungen Seite 127). Sie empfiehlt sich auf jeden Fall auch aus Gründen des Schutzes der KDB vor Beschädigungen. Wird das System nicht fertiggestellt, muß im Frühjahr unter Entfernung der KDB in Teilbereichen eine Beprobung des mineralischen Materials vorgenommen werden, soweit nicht durch geeignete Messungen nachgewiesen werden kann, daß kein Frosteintrag stattgefunden und das mineralische Material auch sonst keine unzulässigen Veränderungen erfahren hat. Da die Komplettierung selbst bei ungünstigen Witterungsverhältnissen spät im Jahr in kurzer Zeit vorgenommen werden kann, ist eine gesonderte Untersuchung dieses Bauzustandes nicht erforderlich.

3. Die Schutzschicht(en) sind aufgebracht

Für diesen Bauzustand gilt im wesentlichen das für den Bauzustand 2 (verlegte KDB) Angeführte. Die aufgebrachten Schutzschichten (Sande, Vliese, Verbundmatten) stellen ohne die Drainageschichten keinen ausreichenden Schutz für die KDB und das mineralische Material dar. Generell ist die Aufbringung nur der Schutzschicht ohne weitere Maßnahmen nicht sinnvoll (erforderlich: Windsicherung von Matten und Vliesen, Maßnahmen zur Erosionsverhinderung bei Sandschutzlagen, Verhinderung der Wellenbildung der KDB und von Tierfraß an Vliesstoffen). Schon aus diesen Gründen wird man auch hier bestrebt sein, die Komplettierung des Systems durch die einfache und rasch mögliche Schüttung der Drainageschicht vorzunehmen.

4. Die Drainageschicht ist geschüttet

Mit der Schüttung der Drainageschicht ist das Basisabdichtungs- und Drainagesystem vollendet. Die Drainageschichten stellen in Abhängigkeit von der örtlichen Lage und der Schichtmächtigkeit einen gewissen thermischen Schutz dar. Bei ungünstigen klimatischen Verhältnissen ist dieser Schutz jedoch nicht ausreichend und durch besondere Maßnahmen zu ergänzen. Dies wird am einfachsten mit einer planmäßigen Schüttung von (Fein-) Müll durchgeführt. Hierbei sind jedoch die Kosten für die anfallenden Sickerwassermengen auf der gesamten Fläche in Relation zu anderen Frostschutzmaßnahmen zu setzen. Die aufgebrachten Materialien können entweder vor der Verfüllung entfernt werden oder verbleiben auf der Fläche. In keinem Fall dürfen die Frostschutzmaßnahmen die Funktionsfähigkeit der Drainageschicht beeinträchtigen (z. B. durch Zusetzung und Verstopfung oder Abschottung).

5. Besondere Einbausituationen

Im Gegensatz zu der flach geneigten Basis sind bei Böschungen und teilweise bei Oberflächenabdichtungen spezielle Randbedingungen zu berücksichtigen. Insbesondere die Lagesicherheit des Aufbaus auf den geneigten Flächen muß mit ausreichender Sicherheit gewährleistet und auch bei Starkregenereignissen und größeren Schneeauflasten konstruktiv ermöglicht und nachgewiesen werden. Bei Böschungen im Bauzustand kann die Drainageschicht teilweise erst sukzessive mit der Müllverfüllung aufgebracht werden, so daß hier je nach Dauer des halboffenen Zwischenbauzustandes eine ausreichend dämmende thermische Schutzlage gegen übermäßige Temperatureinflüsse (auch Wärme) vorzusehen ist (vgl. beispielsweise DÜLLMANN et al. 1993).

5.2 Theoretische Untersuchungen

Alle angeführten Bauzustände können ebenso wie aufgebrauchte thermische Schutzlagen mit Wärmehaushaltsberechnungen überschläglich beurteilt bzw. bemessen werden. Wie jedoch bereits in Kapitel 2.1 angeführt, hängt der Wärmeumsatz einer Geländeoberfläche von einer Vielzahl, zum Teil zeitlich kurzfristig veränderbarer und damit schwer erfaßbarer Einflüsse ab (s. a. Tabelle 1, Seite 3). Die Berechnungen zur Wirksamkeit einer thermischen Schutzlage müssen aus diesem Grund gezwungenermaßen mit grob vereinfachenden und auf der sicheren Seite liegenden Annahmen durchgeführt werden.

Der Schutz eines Materials vor Frost kann grundsätzlich auf zwei verschiedenen Wegen erfolgen:

1. Schutz durch eine thermisch dämmende Schicht auf der mineralischen Abdichtung und damit Ausnutzung des Erdwärmeflusses,
2. Schutz durch aktive Temperierung.

Dabei scheidet die aktive Temperierung, also die Beheizung des Materials zur Vermeidung der Unterschreitung der 0 C-Grenze, im vorliegenden Fall wegen der Größe der Flächen aus ökonomischen Gründen im Normalfall aus. Sie kann aber in speziellen Fällen bereichsweise für Frostspitzenzeiten vorgenommen werden, z. B. wenn die Dichtung unter dem Schutz von Zelten oder anderen Überdachungen errichtet wurde und diese noch vorhanden sind.

Ein zweiter Sonderfall der "halbaktiven Beheizung" besteht bei Zwischenabdichtungen über bereits bestehenden Müllkörpern, da diese gegenüber einem normalen Untergrund eine erhöhte Wärmeabgabe nach oben aufweisen. Diese kann jedoch nicht gesteuert werden und wird wegen der Seltenheit dieses Falles nicht gesondert betrachtet. Die erhöhte Wärmeabgabe kann im Bedarfsfall über eine erhöhte Grundtemperatur bei den Wärmehaushaltsberechnungen berücksichtigt werden.

Ein thermischer Schutz für die mineralische Abdichtung wird grundsätzlich durch jedes Material gegeben, welches auf der mineralischen Schicht aufliegt. In Abhängigkeit von ihren thermischen Eigenschaften, der Mächtigkeit der Schutzschicht und den klimatischen Einwirkungen kann für jede mineralische Schicht ein sicherer Schutz konzipiert werden. Die Wirtschaftlichkeit einer solche Schutzmaßnahme muß gesondert betrachtet werden.

Die Aufbringung einer solchen großflächigen Schutzlage bedeutet einen Eingriff in den Wärmehaushalt an der Erdoberfläche. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit der Schutz-

lage soll die Wärmeabgabe aus dem Boden vermindert und damit die Auskühlung verlangsamt werden. In Zeiten einer möglichen Wärmeaufnahme (bei hohen Lufttemperaturen oder intensiver Sonneneinstrahlung) wird allerdings auch die Erwärmung des Bodens verzögert. Die Folge ist ein insgesamt gedämpfter, zeitverzögerter Temperaturgang im mineralischen Material. Dieses Verhalten konnte auch bei den eigenen Messungen auf den Versuchsfeldern zwischen den Bereichen mit und ohne Kiesauflage beobachtet werden.

Gleichzeitig muß mit abnehmender Wärmeleitfähigkeit der Schutzmaterialien an der Schichtoberfläche und in der bodennahen Luftschicht mit größer werdenden Temperaturgegensätzen zwischen Tag und Nacht gerechnet werden. Dies kann bei einigen Schutzkonstruktionen (z. B. starren Isolierplatten) zu verstärkten temperaturinduzierten Spannungen und Verformungen führen, die bei der konstruktiven Ausgestaltung berücksichtigt werden müssen.

Generell sind bei der Untersuchung einer Situation bezüglich der Frostsicherheit einer Deponieabdichtung und der Konzeption einer thermischen Schutzlage die in Tabelle 25 aufgeführten Faktoren zu berücksichtigen.

Um einzelne Aufbausituationen vergleichen zu können, sind stationäre und instationäre Wärmehaushalts- und Wärmedurchgangsberechnungen möglich. Als Beispiel sind in Bild 105 die Kurvenverläufe von Temperaturdurchschlagszeiten für die Oberkante des mineralischen Materials in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur und der Kiesmächtigkeit dargestellt. Verwendet wurde als Eingangsparameter in Ermangelung eines geeigneten Ansatzes zur Berücksichtigung der Übergangsparameter zwischen Luft und Bodenoberfläche direkt die Oberflächen- und nicht die Lufttemperatur. Für überschlagsmäßige Zwecke kann die erhaltene Durchschlagsdauer näherungsweise nach Kapitel "2.1.4 Übergangsfaktoren" mit dem Faktor 1,25 multipliziert werden. Die den Berechnungen zugrundegelegten Ausgangs- und Materialwerte sind in Tabelle 26 aufgelistet. Die Kurven wurden mit Hilfe eines FE-Programms von HUCKFELDT 1993 unter Verwendung von finiten 3-Knotenelementen mit quadratischem Ansatz berechnet. Berechnungen sind jedoch z. B. auch mit Hilfe des Differenzenverfahrens möglich (ERNST 1993, GRIGULL et al. 1990, SCHUH 1957).

Einflußfaktoren bei der Untersuchung einer Frostschutzmaßnahme für die Bereiche

Dichtungsmaterial	therm. Schutzmaterial	Konstruktion	Wirtschaftlichkeit	Standort
<ul style="list-style-type: none"> • thermophysikalische Kennwerte <ul style="list-style-type: none"> - Wärmeleitfähigkeit - Wärmekapazität • zu erwartender Schadensumfang durch Frost <ul style="list-style-type: none"> - Durchlässigkeit - Standsicherheit • tolerierbare Veränderungen in den Materialparametern 	<ul style="list-style-type: none"> • thermophysikalische Kennwerte <ul style="list-style-type: none"> - Wärmeleitfähigkeit - Wärmekapazität • auch der vorhandenen Drainageschichten • Frostbeständigkeit • Wärmebeständigkeit • UV-Beständigkeit • Verrottungsfestigkeit • Nagetiersicherheit • Brennbarkeit • Feuchtigkeitsaufnahme • innere Stabilität (Begehbarkeit) • Verfügbarkeit • darf die Drainageschicht zumindest im Endzustand nicht beeinflussen 	<ul style="list-style-type: none"> • Wirksamkeit (thermische Bemessung) • Lagesicherheit <ul style="list-style-type: none"> - Wind - Niederschläge - thermisch induzierte Verformungen - Hangneigung - Auflasten - Erdbeben • Böschungsstabilität • Übergangsfaktoren • Auftriebssicherheit bei Wanneneinstau durch Niederschläge und Versagen der Drainage • u. U. Demontierbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Größe der Fläche • Risikobereitschaft ⇔ evtl. Sanierungskosten • evtl. Sanierungszeit • Materialkosten • Verlegekosten • Verlegezeit • Einsatzdauer • Wiederverwendbarkeit • evtl. Rückbaukosten • evtl. Rückbauzeit • Deponieraumverlust bei liegenbleibender extra Frostschuttschicht (geringe Konstruktionshöhe gefordert) • Vorhalte- und Wartungskosten bei temporären Maßnahmen (Schneekanonen, Heizeinrichtungen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Mikroklima • Klimastatistik • Untergrundtemperaturen • Umgebungsmorphologie

Tabelle 25: Zusammenstellung der zu berücksichtigenden Einflußfaktoren bei der Untersuchung der Notwendigkeit, der Konstruktion und der Dimensionierung einer Frostschutzmaßnahme

Schicht	Dicke [cm]	Zahl der Elemente [-]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wärmekapazität [J/kgK]	Anfangstemperatur [°C]	Dichte [kg/m³]
Kies	n. Angabe	12	0,800	0,236	7	1600
Vlies	1,5	3	0,025	0,140	7	500
KDB	0,25	3	0,025	0,555	7	1500
min. Material	75	30	2,100	0,333	7	1950
Barriere	300	30	2,000	0,277	7	1900
Untergrund	400	4	2,000	0,277	7	2000

Tabelle 26: Vorgabeparameter für Beispielrechnung zu Bild 105

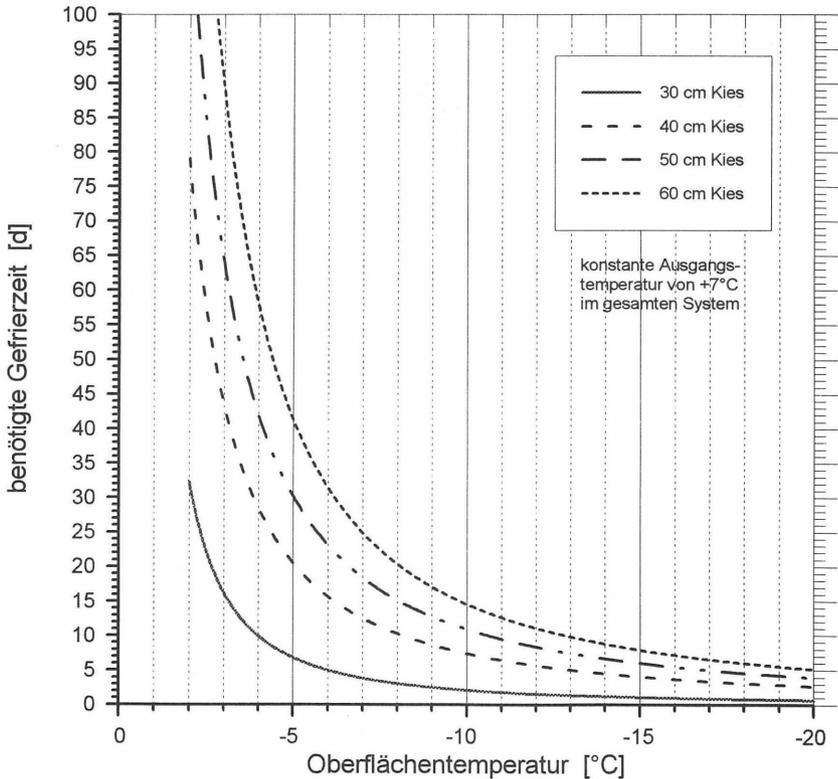


Bild 105: Theoretisch benötigte Gefrierzeit bis zum Durchschlag der negativen Temperaturen an die Oberkante des mineralischen Materials in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur und der Kiesmächtigkeit über einer KDB mit Vlies (Vorgabeparameter siehe Tabelle 26)

Schicht	Dicke [cm]	Zahl der Elemente [-]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wärmekapazität [J/kgK]	Anfangstemperatur [°C]	Dichte [kg/m³]
Schnee	n. Angabe	15	0,150	0,583	2	500
Kies	30	12	0,800	0,236	2	1600
Vlies	1,5	3	0,025	0,140	3	500
KDB	0,25	3	0,025	0,555	4	1500
min. Material	75	30	2,100	0,333	5	1950
Barriere	300	30	2,000	0,277	6	1900
Untergrund	400	4	2,000	0,277	7	2000

Tabelle 27: Vorgabeparameter für Beispielrechnung zu Bild 106

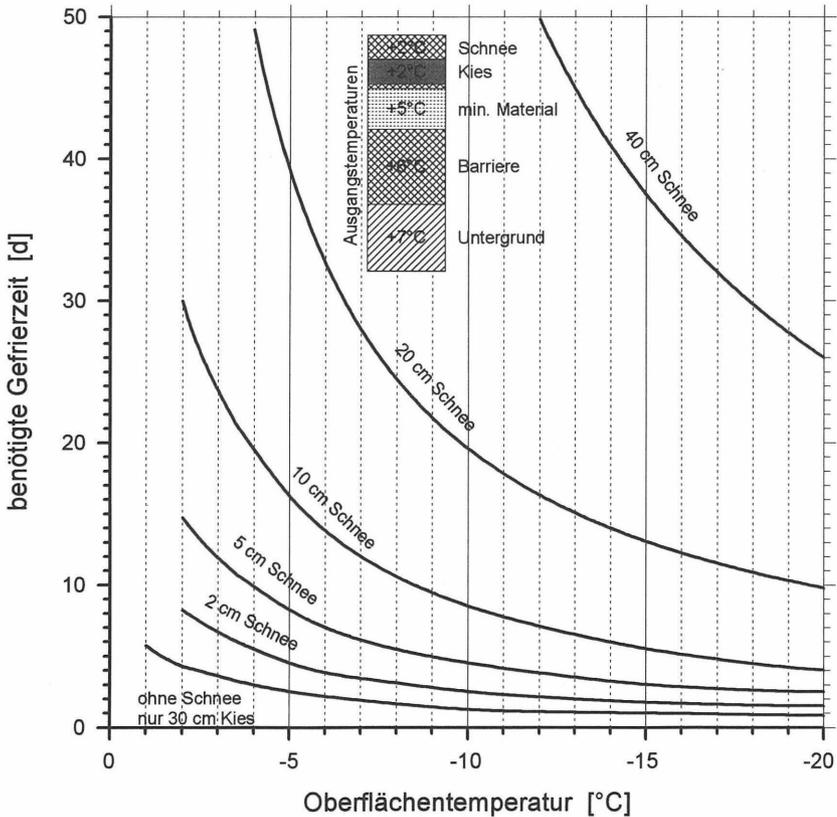


Bild 106: Theoretisch benötigte Gefrierzeit bis zum Durchschlag der negativen Temperaturen an die Oberkante des mineralischen Materials in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur und der Kiesmächtigkeit über einer KDB mit Vlies (Vorgabeparameter siehe Tabelle 27)

Entsprechend den gezeigten Beispielen können für jede gewünschte Aufbauart bzw. Schutzkomponente Vergleichsberechnungen durchgeführt und so einzelne Varianten untereinander verglichen werden. Problematisch ist hierbei nur der Ansatz der vorzugebenen Materialparameter. Sie werden am besten für die jeweiligen Böden im Sommer an in situ-Messungen oder Laborversuchen in Verbindung mit Nachrechnungen kalibriert. Im Winter kann dann mit diesen Werten eine Onlineberechnung der Temperatureindringung mit Meßdaten eines an der Oberfläche angebrachten Temperaturfühlers vorgenommen werden.

5.3 Eigene Versuche

5.3.1 Feldversuche

Bei den Feldversuchen im Rahmen dieser Arbeit wurden die Temperaturverläufe in normal hergestellten Abdichtungssystemen, welche noch nicht über eine spezielle Frostschutzschicht verfügen, im Verlauf von zwei Jahren gemessen. Diese Messungen waren als Datenbasis für die Beurteilung der Notwendigkeit von Frostschutzmaßnahmen und deren Dimensionierung gedacht, da keine vergleichbaren Temperaturmessungen vorlagen (s. a. Kapitel 4.3, Seite 95ff.). Weitergehende Untersuchungen mit verschiedenen Schutzkomponenten waren wegen fehlender großflächiger Versuchsflächen und Finanzmittel für die erforderlichen Arbeiten und zahlreichen Meßeinrichtungen nicht sinnvoll durchführbar. Konzeption und Aufbau der Versuchsfelder wurden bereits in Kapitel 4.3, Seite 95ff. erläutert, so daß hier auf weitergehende Ausführungen verzichtet werden kann.

5.3.2 Ergebnisse der Messungen

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen sind den Anlagen 1 bis 12 (Gesamtmeßzeiträume) bzw. 13 bis 36 (Details Winterzeiträume) in Form von Tagesmitteltemperaturganglinien zu entnehmen.

Gegenüber den Feldbereichen ohne Drainageschichten weisen die Meßfühler unter den Kiesschichten die bereits in Kapitel 4.3 beschriebenen, wesentlich ausgeglicheneren Temperaturverläufe auf. Dieses ist aus den Bildern 41 und 42 auf Seite 119 und in dem folgenden, beispielhaft ausgewählten Bild 107 ersichtlich. Gleichzeitig ist die Phasenverschiebung der Temperaturverläufe mit der Tiefe und im Bereich der Kiesschüttung gegenüber dem nur mit einer KDB und einem Vlies belegten Bereich erkennbar, die bei allen Feldern beobachtet werden konnte. Dies bedeutet, daß bei einfachen Temperaturmessungen mit manueller Ablesung auf einer Deponie nach einer Frostperiode noch ca. 2 bis 4 Tage länger abgelesen werden muß, da die Temperatur in diesem Zeitraum im mineralischen Material immer noch sinken kann.

Insgesamt haben bei den eigenen Messungen bis auf einen Fall die Kiesschichten in beiden Winterzeiträumen negative Temperaturen aus dem mineralischen Material ferngehalten. Die in den Tabellen 19 bis 23 (Seiten 113 bis 115) aufgeführten Ergebnisse der tiefsten gemessenen Tagesmitteltemperaturen der einzelnen Höhenlagen sind in Tabelle 28 für die Oberkante mineralisches Material zusammengefaßt. Ein verwendbarer mathematischer Zusammenhang zwischen Schichtmächtigkeit und Schutzfunktion läßt sich aufgrund der relativ wenigen Meßdaten nicht ableiten.

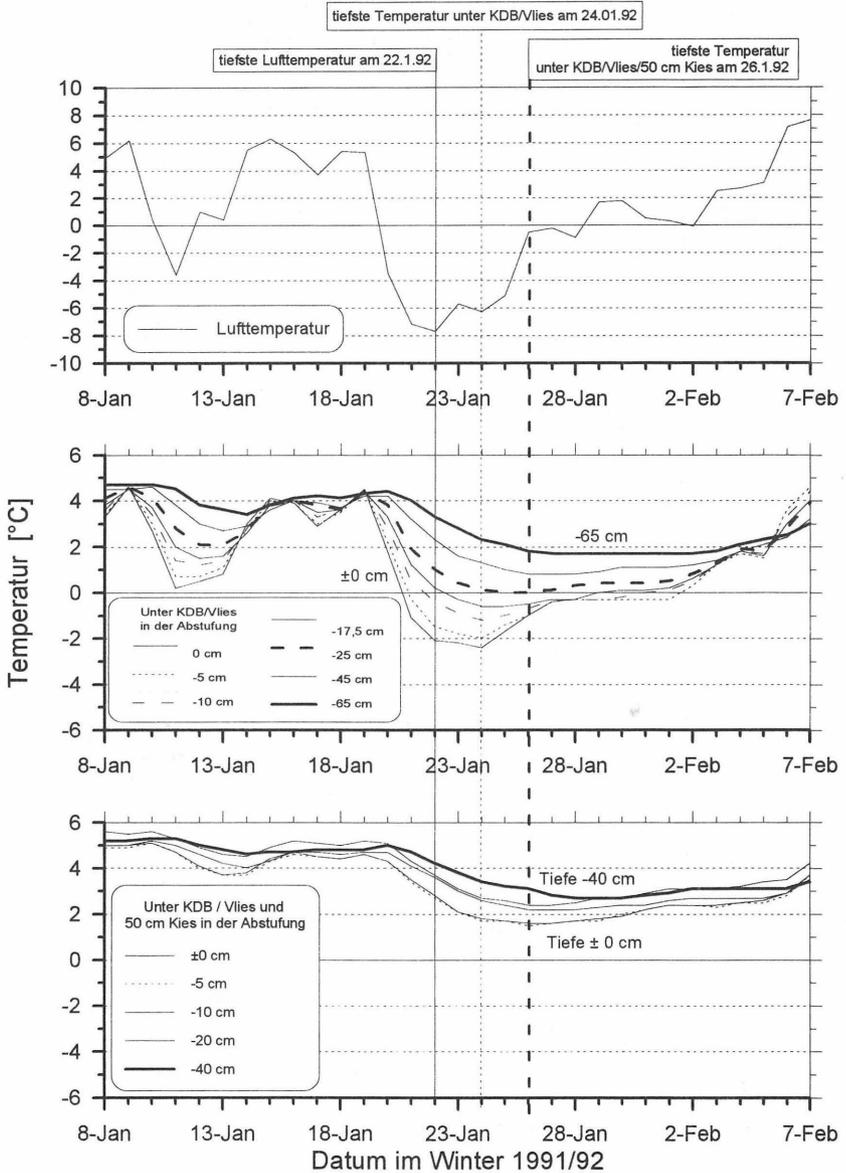


Bild 107: Ausgewählte Temperaturverläufe während eines Frostzeitraums im Bereich unter der KDB mit Vlies und unter der KDB mit Vlies und einer Kiesschüttung von ca. 50 cm (Versuchsfeld 2, Tagesmitteltemperaturen)

Bereich	Zeit- raum [Jahr]	Aufbau über min. Material	Tiefe 0 C [cm]	tiefste Temp. OK min. Material [C]	Δt bei $\pm 0\text{cm}$ [C]	tiefste Luft- tempe- ratur [C]	Frostsumme Σ der Tage $\Sigma \text{Cd} / \Sigma d$ $< 0 \text{ C}$ [C·d] / [d]	mittl. FS / d **) [C/d]
Feld 1	91/92	KDB/Vlies	-22	-1,9	3,6	-7,6	58,8 / 15	3,9
		+60 cm Kies	-	1,7			66,3 / 18	3,7
		Σ Winter					70,8 / 25	2,8
	92/93	KDB/Vlies	-21	-3,5	3,9	-12,3	64,4 / 13	4,9
		+50 cm Kies	-	0,4			70,1 / 14	5,0
		Σ Winter					132,1 / 43	3,0
Feld 2	91/92	KDB/Vlies	-25	-2,4	4,0	-7,7	49,9 / 11	4,5
		+50 cm Kies	-	1,6			55,5 / 13	4,3
		Σ Winter					59,7 / 18	3,3
	92/93	KDB/Vlies	-27	-2,6	4,0	-11,8	60,9 / 12	5,1
		+50 cm Kies	-	1,4			66,3 / 14	4,7
		Σ Winter					107,5 / 40	2,7
Feld 3	91/92	KDB	-23	-1,6	1,9	-4,8	8,8 / 8	1,1
		+35 cm Kies	-	0,3			8,8 / 8	1,1
		Σ Winter					40,4 / 21	1,9
	92/93	KDB	-24	-2,7	2,2	-9,5	45,8 / 11	4,2
		+35 cm Kies	-8	-0,5			45,8 / 11	4,2
		Σ Winter					90,8 / 36	2,5
Feld 4	91/92	KDB	-21	-3,3	4,4	-4,8	28,9 / 15	1,9
		+40 cm Kies	-	1,1			8,8 / 8	1,1
		Σ Winter					40,4 / 21	1,9
	92/93	KDB	-29	-4,8	4,9	-9,5	37,9 / 10	3,8
		+40 cm Kies	-	0,1			48,5 / 12	4,0
		Σ Winter					90,8 / 36	2,5
Fläche 1	91/92	offen	-26	*)	*)	-5,8	42,6 / 19	2,2
		+30 cm Kies	-	0,7				

*) nicht gemessen, Lufttemperatur -5,8 C

**) mittlere Frostsumme pro Tag bis zum Erreichen der minimalen Temperatur

"-." 0 C-Grenze hat das mineralisches Material nicht erreicht

Tabelle 28: Zusammenstellung der interpolierten 0 C-Eindringtiefen der Tagesmittel, der tiefsten Tagesmitteltemperaturen an der Oberkante des mineralischen Materials und der zugehörigen Frostsummen bei den Versuchsfeldern mit und ohne Drainageschichten

Es ist jedoch zu erkennen, daß ab einer Drainageschichtmächtigkeit größer etwa 40 cm die Schutzwirkung des Kieses bezüglich der Tiefsttemperaturen an der Oberkante des mineralischen Materials gegenüber einer Abdeckung nur mit einer KDB oder einer Kombination KDB/Vlies (2000 g/m²) ca. 4°C beträgt. Bei einer Kiesmächtigkeit von 35 cm über einer KDB ohne eine weitere Schutzschicht (Vlies) beträgt diese thermische Schutzwirkung noch ca. 2°C.

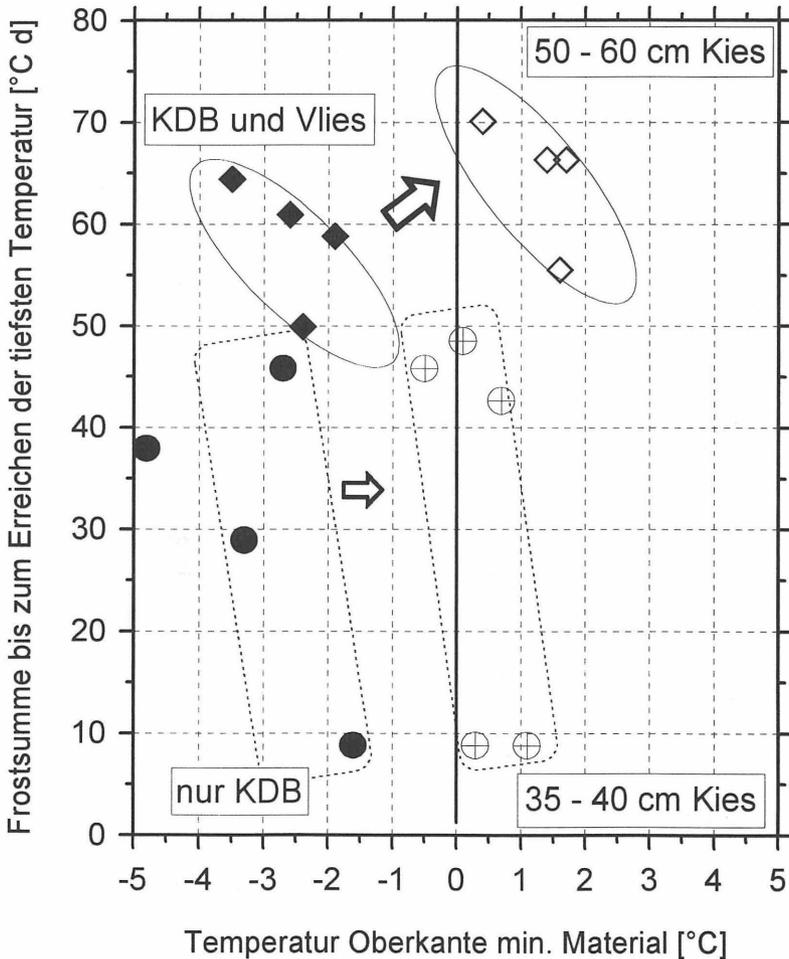


Bild 108: Graphische Darstellung der tiefsten Tagesmitteltemperaturen für die Oberkante des mineralischen Materials in bezug auf die zugehörigen Frostsummen

Diese Temperaturabstände sind nahezu unabhängig von der Frostsumme, der Anzahl der Frosttage (vorletzte Spalte Tabelle 28) und der erreichten niedrigsten Lufttemperatur. Die Differenz in der Schutzwirkung einer KDB oder KDB mit Vlies gegenüber einer hinzukommenden Drainageschicht ist daher bei den Temperaturminima offenbar weitgehend systembedingt und unabhängig von der aktuellen Temperaturlage.

Aufgrund der vorliegenden Meßergebnisse erscheint es nur sehr grob möglich, die Frosteindringtiefe mit Hilfe der Frostsummen bestimmen zu wollen. Wie im Bild 108 dargestellt, ist jedoch bei Frostsummen einer Frostperiode mit Werten unter etwa 70 Cd bei Kiesmächtigkeiten über 50 cm und ca. 35 Cd bei Kiesmächtigkeiten von etwa 35 cm nicht mit einem Frostdurchschlag zu rechnen. Diese Werte sind allerdings stark von der Ausgangstemperatur im Boden vor der Frostperiode abhängig, wie dies die Werte aus Feld 3 zeigen (im Bild 108 die untersten Werte bei FS \approx 9). Hier war die Grundtemperatur wegen der erst sehr spät möglichen Einrichtung der Versuchsfelder niedriger als bei den anderen Feldern, was sich im ersten Jahr in niedrigen Durchschlagszeiten äußerte.

5.3.3 Laborversuche

Die Untersuchung von einzelnen Frostschutzmaßnahmen durch Versuchsfelder in situ erfaßt zwar alle (jeweils örtlichen) Randbedingungen, ist aber für die Vergleichbarkeit einzelner Komponenten oder Systeme und für Zwecke der Übertragbarkeit mit großem Aufwand verbunden. Um die einzelnen Komponenten gleichen Randbedingungen auszusetzen, muß die Untersuchung parallel erfolgen, da die Witterung unterschiedliche, nicht in ausreichendem Maß berücksichtgbare Randbedingungen schafft. Das bedeutet pro parallel zu untersuchender Schutzkomponente Mindestflächen von 25 m² (besser größer), die alle einen gleichen Unterbau aufweisen und bezüglich der klimatischen Verhältnisse (Sonneneinstrahlung, Wind, Niederschläge) vergleichbar sein müssen.

Andere Möglichkeiten zur Untersuchung der Wirksamkeit von Frostschutzmaßnahmen und der Vergleichbarkeit untereinander bietet neben einer thermischen Berechnung der Einsatz von großmaßstäblichen Laborversuchen. Um die Eignung eines Laborversuchsstandes zur Bestimmung der Schutzwirkung verschiedener Materialien zu untersuchen, wurde ein Prüfstand im Labor aufgebaut. Dieser hat die Vorteile, daß bei definierten, weitgehend regelbaren Randbedingungen witterungs- und jahreszeitenunabhängige Untersuchungen möglich sind, allerdings auch den Nachteil, daß bestimmte klimatische Einflüsse nur mit einem erheblichen gerätetechnischen und finanziellen Aufwand näherungsweise simuliert werden können. Die wichtigsten Vor- und Nachteile eines solchen Versuchsstandes sind in Tabelle 29 aufgeführt.

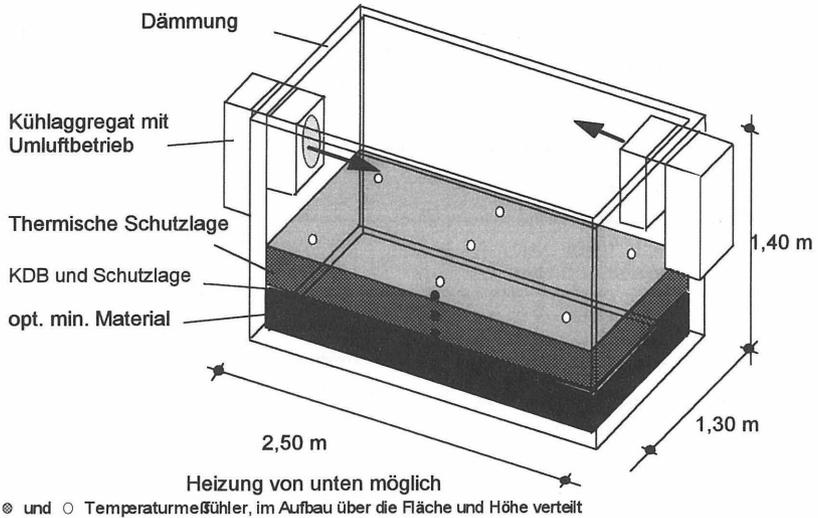
Der installierte Versuchsstand ist als Prinzipskizze in Bild 109 dargestellt. Die Dämmung bestand aus 10 cm dicken Styrodurplatten, die innen mit einer dicken Baufolie ausgekleidet und außen an ca. 20 cm dicken Betonwänden angebracht wurden.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • witterungsunabhängig • definierte Randbedingungen hinsichtlich <ul style="list-style-type: none"> - Temperaturgradient - Temperatureindringgeschwindigkeit • Vergleichbarkeit der Ergebnisse • Wiederholungsmöglichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • nicht alle Einflüsse im vertretbaren Rahmen wirklichkeitsnah simulierbar, z. B. <ul style="list-style-type: none"> - Sonneneinstrahlung - Wind - Niederschläge - Umwandlungsenergien • hoher Aufwand hinsichtlich <ul style="list-style-type: none"> - der Gewährleistung einer vereisungsfreien konstanten Kühlung - des Ein- und Ausbaus • kosten- und zeitintensiv durch lange Vorkühl- und Versuchszeiten (Vortemperierzeiten bis zu 30 Tagen), hierdurch durchsatzarm

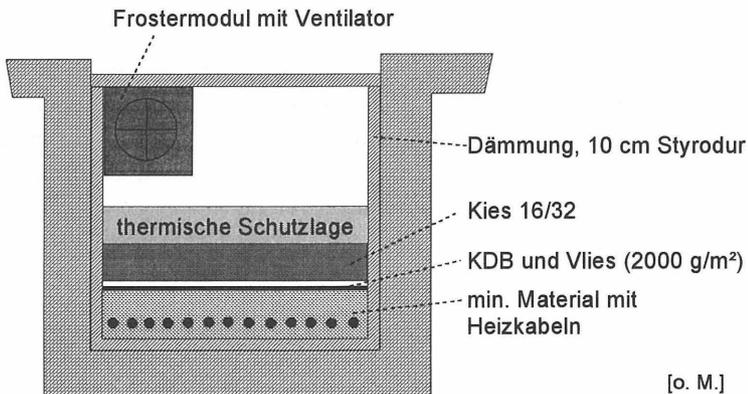
Tabelle 29: Zusammenstellung der wichtigsten Vor- und Nachteile eines Laborversuchsstandes zur Bestimmung der thermischen Schutzwirkung einzelner Komponenten

Die Konzeption des Versuchsstandes wurde bewußt unter einer umfassenden Einschränkung der gewinnbaren Ergebnisse vorgenommen, um den gerätetechnischen Aufwand finanzierbar zu machen: die singuläre Angabe einer Temperaturdurchschlagszeit unter einem bestimmten Aufbau ist für eine thermische Bemessung wegen der unterschiedlichen Randbedingungen zwischen Labor- und in situ-Versuch nicht sinnvoll. So können z. B. die Sonneneinstrahlung und die Windgegebenheiten in einem Versuchsstand dieser Größenordnung noch nicht hinreichend simuliert werden.

Die Ergebnisse der Versuche aus einem solchen "eingeschränkten" Laborversuchsstand können aber über Referenzversuche an Aufbauten ohne Schutzmaterialien die relative Schutzerhöhung quantifizieren und so eine nachvollziehbare Entscheidungshilfe bei der Dimensionierung darstellen. Dies ist vor allem für solche Materialien von Vorteil, deren Materialparameter nicht oder nur in weiten Grenzen bekannt sind (z. B. Müll oder Verbundschutzlagen, wie etwa ausgestopfte und gesteppte Folien oder Matten). Für technisch hergestellte Materialien (z. B. Hartschaumplatten) ist eine Abschätzung mit Hilfe von Berechnungen unter Verwendung von Parametervariationen sinnvoll.



a) Ansicht



b) Querschnitt

Bild 109: Prinzipskizzen des Laborversuchsstandes zur Überprüfung von thermischen Schutzlagen: a) Ansicht, b) Querschnitt

5.3.4 Ergebnisse der Messungen

Mit dem oben beschriebenen Versuchstand wurden insgesamt 5 auswertbare Versuche gefahren. Weitere Versuche waren durch Unregelmäßigkeiten während der Versuchsdurchführung nicht verwendbar (Vereisung bzw. Ausfall der Kühlaggregate mit dadurch unkontrolliertem Temperaturanstieg, Ausfall der Heizungsrelais mit erhöhter Aufheizung des Bodens).

Verwendet wurden nach einigen Nullversuchen zunächst dünne Styroporlagen mit einer Gesamtdicke von 16 mm. Als kurzfristig für Notmaßnahmen bei den Wintersicherungen verfügbares Material wurden Stroh mit einer Schichtmächtigkeit von 15 cm und Kompost mit einer Mächtigkeit von 20 cm eingebaut. Alle Materialien wurden beidseitig mit einer Baufolie belegt, um von oben ein Eindringen von Niederschlagswasser und unten das Einrieseln des Materials in den Drainagekies zu vermeiden. Die Endergebnisse sind in Tabelle 30 dargestellt.

Es zeigt sich, daß durch Auflagen jeder Art auf die Kiesschichten eine beträchtliche Verlängerung der Durchschlagszeiten erreicht werden kann. Der große Sprung in den Durchschlagszeiten bei den relativ dünnen Styroporlagen gegenüber einer reinen Kiesoberfläche dürfte vor allem in der Verhinderung von Luftbewegungen und Austauschprozessen in den obersten Kiesbereichen liegen. Das im Bereich der Kiese dadurch unbewegte Luftpaket stellt in diesem Fall einen guten Isolator dar.

Schutzlage	Ausgangstemperatur [C]	Luftraumtemperatur [C]	Durchschlagszeit für 0 C OK min. Material [d]	Temperatur an der OK min. Material bei Versuchs- ende [C]
nur 30 cm Kies	+6 C	-20 C	3,5	-
nur 30 cm Kies	+8 C	-15 C	5,3	-
+16 mm Styropor	+8 C	-15 C	10,5	-
+20 cm Kompost	+8 C	-15 C	> 20 Tage	3,0
+15 cm Stroh	+9 C	-15 C	> 20 Tage	4,7

Tabelle 30: Durchschlagszeiten der 0 C-Temperatur in der Laborschutzlagenprüfung

Die Temperaturunterschiede zwischen ober- und unterhalb der Kunststoffdichtungsbahn betragen bei diesen Labor- wie auch bei den in situ-Versuchen ca. 1 C (s. a. Bild 110).

Das Vlies (2000 g/m²) ergab bei den Laborversuchen eine Temperaturdifferenz von etwa 3 C und damit eine größere Wärmedämmung, als es einem linearen Temperaturprofil nach zu erwarten wäre.

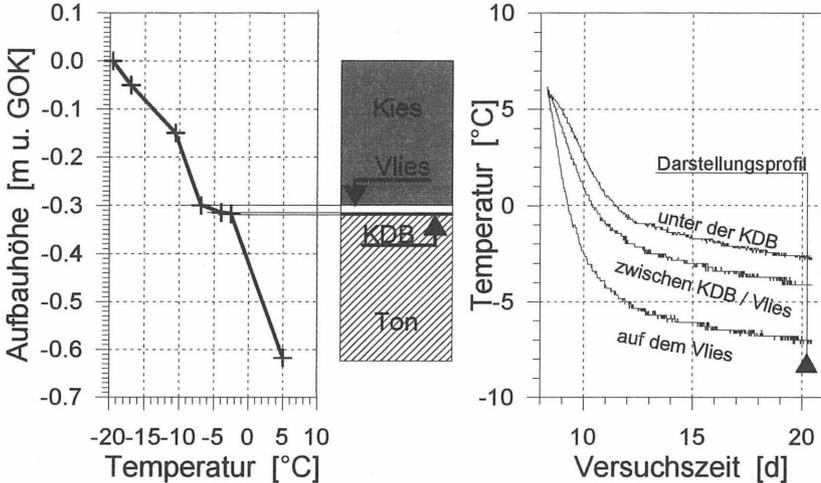


Bild 110: Temperaturen und Profil ausgewählter Fühler während eines Laborversuches zur Schutzlagenprüfung

Für Temperaturmessungen im Rahmen einer Wintersicherung bedeutet das, daß der Temperaturfühler auch auf der Kunststoffdichtungsbahn verlegt und zu der hier gemessenen Temperatur näherungsweise 1 C addiert werden kann, um die Temperatur unter der KDB zu erhalten. Dies erspart eine Durchführung der Meßkabel durch die KDB und die erforderliche sorgfältige Zuschweißung der entstandenen Fehlstelle.

Es hat sich gezeigt, daß der Versuchsstand mit den o. a. Einschränkungen in der Lage ist, bei sorgfältiger Überwachung der Kühlung auswert- und interpretierbare Durchschlagszeiten für die 0 C-Temperatur zu liefern, und die Unterschiede zwischen den einzelnen Materialien deutlich erfaßt werden. Es ist somit möglich, alternative Schutzkomponenten nacheinander zu überprüfen und eine relative Abstufung vorzunehmen.

5.4 Möglichkeiten zur Ausbildung von thermischen Schutzlagen

Sind die Schutzlage und die Drainageschicht eines Abdichtungs- und Entwässerungssystems nicht ausreichend, um einen prognostizierten Frost von dem mineralischen Material fernzuhalten, und kann nicht mit der erforderlichen Sicherheit nachgewiesen werden, daß das mineralische Material die zu erwartenden Frostbeaufschlagungen mit ausreichender Güte übersteht, muß eine thermisch wirksame Schutzlage dimensioniert und angeordnet werden.

Die von einer thermischen Schutzlage zu erfüllenden Anforderungen sind in Tabelle 25, Seite 206 aufgeführt. Sie gelten gleichermaßen für Basis- und Oberflächenabdichtungen. Spezielle Frostschutzmaßnahmen in Form temporärer Schutzlagen sind i. d. R. jedoch nur in Bauzuständen bei Abdichtungen der Basis oder an den Böschungen erforderlich. In Abhängigkeit von diesen Randbedingungen, insbesondere aber von der verbleibenden Planungs- und Verlegezeit sowie der Einsatzdauer, können die nachfolgend mit ihren Vor- und Nachteilen beschriebene Stoffe und Konstruktionen in die Überlegungen mit einbezogen werden. Die erforderliche Dicke ist über Wärmehaushaltsberechnungen abzuschätzen.

Feinmüll

- Vorteile: als geplantes Verfüllmaterial alle Vorteile, steht nicht genügend Feinmüll zur Verfügung, kann sich der Antransport gewisser Mengen aus benachbarten Müllabfuhrgebieten im Vergleich zu anderen, ausschließlich dem Frostschutz dienenden Maßnahmen rentieren
- Nachteile: relativ große zu entsorgende Sickerwassermengen bezogen auf das eingelagerte Müllvolumen durch die gleichzeitige Beaufschlagung aller Polder, an steilen Böschungen nicht einsetzbar

Kies

- Vorteile: Materialkosten relativ gering, wiederverwendbar, kein separater Arbeitsgang bei der Einbringung, flexibel
- Nachteile: thermische Kennwerte nicht besonders gut, bei sehr starken, langanhaltenden Frösten nicht ausreichend, problematisch auf Böschungen steiler ca. 1:3, kann bei langer Liegezeit durch Verdreckung als Drainageschicht unbrauchbar werden, intensive Auskühlung durch Wind in den oberen Bereichen

Stroh

- Vorteile: relativ schnell und kurzfristig beschaffbar, im trockenen Zustand gute Wärmedämmung, leicht verlegbar als Ballen oder Rollbahnen

Nachteile: brennbar, ohne Folienuflage vernässend und verrottend, sickerwasserbildend, nicht lagestabil (Wind), ohne Trennlage die Drainageschicht verunreinigend, muß vor der Müllverfüllung aufwendig entfernt und entsorgt werden

Erde / Kompost / Rindenmulch

Vorteile: leicht verfügbar, schnell einzubauen, preiswert, im trockenen Zustand gut dämmend, geeignet für Zwischenbauzustände ohne KDB mit einer trennenden, sich überlappenden Baufolienunterlage auf flachen Böschungen

Nachteile: ohne Zusatzmaßnahmen (Folien) vernässend, nicht lagestabil an Böschungen (Wind, Niederschläge), auf der Drainageschicht aufwendige Entfernung, da die Schutzfolie zur Drainage nicht zerstört werden darf, nicht für steile Böschungen geeignet

Vliese / Folien / Verbundmatten:

Vorteile: schnell verlegbar, unter Umständen wiederverwendbar, leicht demontierbar, windabweisend, geeignet für Böschungen

Nachteile: begrenzte thermische Wirkung, i. d. R. ohne Zusatzmaßnahmen nicht lagestabil, zum Teil brennbar, nicht unbegrenzt verrottungsfest

Kunstschnee (auf KDB / Schutzschicht / Kies):

Vorteile: gute Dämmwirkung, ohne Entsorgungsprobleme, keine Demontagekosten, nur bei strengen Frösten mit gewissem Vorlauf erforderlich, räumlich flexibel, für Böschungen in begrenztem Maß einsetzbar, geeignet als Zusatzmaßnahme für strenge Fröste und begrenzte Flächen

Nachteile: teuer in Vorhaltung und Wartung, nur bei geeignetem Wetter einsetzbar (Temperatur, Wind \Rightarrow Lagestabilität, Ausbringung), erfordert eine ständige Wetterbeobachtung und vorzuhaltendes fachkundiges Personal, begrenzte Schneeleistung pro Einheit ($\approx 40 \text{ m}^3/\text{h}$ bei -10 C und 90 m Wurfweite), muß unter Umständen mehrere Male pro Winter eingesetzt werden, Gefahr der Zufrierung von Zuleitungen

Hartschaumplatten

Vorteile: leicht verlegbar, sehr gute Dämmwirkung, für Böschungen mit Zusatzmaßnahmen geeignet, wirkt auf der KDB gleichzeitig als mechanische Schutzlage gegenüber der Drainageschüttung, bei tieferen zu erwartenden Deponietemperaturen evtl. gleichzeitig als mechanische Schutzschicht für die KDB verwendbar

Nachteile: ohne Zusatzmaßnahmen i. d. R. feuchtigkeitsempfindlich und nicht lagestabil, teuer, aufwendige Verlegung an den Böschungen, brennbar, auf der Drainageschicht angeordnet vor der Müllverfüllung zu entfernen, nur begrenzt wiederverwendbar, ohne Auflast nicht auftriebsicher bei Wanneneinstau, bei einem Verbleiben unter einer Drainageschicht unter Umständen nicht formstabil bei hohen Deponietemperaturen

Je nach den örtlichen Randbedingungen können unter Umständen auch spezielle Maßnahmen ergriffen werden, um den Frosteintrag hinauszuzögern oder zu verhindern:

- Einzelne, noch unbenutzte Wannenpolder können z. B. vor Beginn der Frostperioden geflutet werden, was in Abhängigkeit von der Wassertiefe trotz der großen Wärmeleitfähigkeit des Wassers durch die Kristallisationswärme eine erhebliche Frostschutzmaßnahme darstellt. Hier müssen nur noch die Wannenränder mit zusätzlichen Maßnahmen geschützt werden (Bild 111).

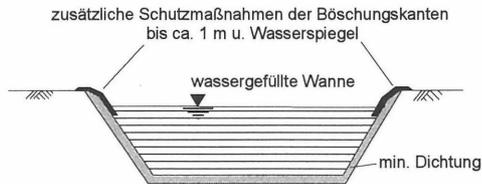


Bild 111: Schutz vor Frost durch Fluten einer noch nicht verfüllten Wanne

- Bei großen, schwach geneigten Flächen mit mehreren Bauabschnitten kann sich die Herstellung von mit inerten Abfallstoffen gefüllten Big Bags rentieren, die, miteinander durch eine wasserableitende Oberflächenfolie verbunden und/oder stoßversetzt angeordnet, entsprechend der Verfüllgeschwindigkeit rückgebaut und im nächsten Bauabschnitt wiederverwendet werden können (Bild 112).

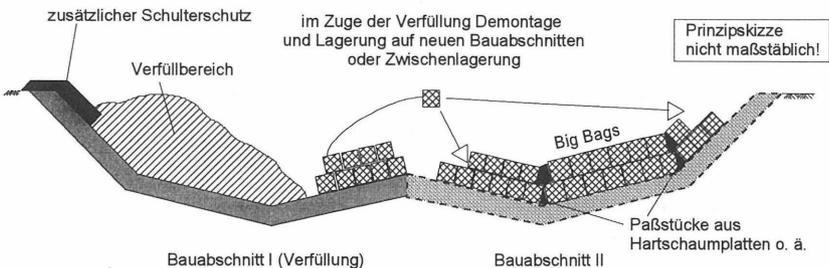


Bild 112: Schutz vor Frost durch versetzbare Big Bags

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Deponiebau kann es vorkommen, daß mineralische Abdichtungsschichten zeitweise dem Frost ausgesetzt werden. Die als Dichtungsmaterial eingesetzten Böden sind dabei nach den Erfahrungen u. a. aus dem Straßenbau als grundsätzlich frostgefährdet einzuordnen. Genauere Aussagen über die Größe der möglichen Veränderungen in den bodenmechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von den jeweiligen Frostbelastungen und damit über die verbleibende Qualität der mineralischen Dichtung waren zu Beginn der vorliegenden Arbeit jedoch nicht nachweisbar, widersprüchlich oder nur qualitativer Natur. Ziel dieser Arbeit war es daher, die grundsätzliche Art und Größe der möglichen Auswirkungen von Frostbelastungen in einer mineralischen Dichtungsschicht zu untersuchen.

Die Untersuchungen gliedern sich nach der Darlegung einiger Grundlagen über die theoretischen thermophysikalischen Vorgänge und zur speziellen Situation der Deponieabdichtung in vier Schwerpunkte:

- Sichtung der einschlägigen veröffentlichten Untersuchungsergebnisse und Theorien
- die experimentelle Ermittlung der Materialveränderungen in situ und im Labor
- die Ermittlung der zu erwartenden Temperaturbelastungen und einflußnehmenden Randbedingungen
- mögliche Schutzmaßnahmen

Verwendet wurden in den Feld- und Laborversuchen insgesamt sechs in aktuellen Deponiebauvorhaben verwendete Böden vom ausgeprägt plastischen Ton bis zum Geschiebemergel und aufbereiteten Tonstein. Die Auswirkungen von Frostdurchgängen in mineralischen Dichtungsmaterialien lassen sich aufgrund der eigenen Laboruntersuchungen und der veröffentlichten Ergebnisse verallgemeinert wie folgt zusammenfassen:

1. In den von Frostdurchgängen betroffenen Bereichen steigt der globale Wassergehalt durch den induzierten Gefriersog an. Er steigt mit zunehmendem Temperaturgradienten, höherem Ausgangswassergehalt, größerer Trockendichte, durchlässigerem Material, kleinerer Frosteindringgeschwindigkeit und der Gefrierzeit.
2. Die globale Trockendichte wird durch die Volumenausdehnung bei der Kristallisation des Wassers zu Eis und durch die Erhöhung des Wassergehaltes durch das antransportierte Wasser herabgesetzt.

3. Es entsteht ein material- und randbedingungsspezifisches Frostgefüge, bei dem sowohl eine virtuelle Kornverteilung durch Zusammenballung zu größeren Materialeinheiten (Aggregation) und/oder Zerfrostung in kleinere Bestandteile entstehen als auch lediglich eine veränderte (eislinsenparallele) Einregelung der Bodenpartikel stattfinden kann. Die einzelnen Aggregate weisen durch den Wasserentzug eine vergrößerte Trockendichte auf und werden durch die Eislinsen und Eisfilme in den entstehenden Fissuren eingehüllt. Die Aggregation wird i. d. R. ausgeprägter mit höherer Frosteindringgeschwindigkeit, tieferen Temperaturen, höherem Ausgangswassergehalt, kleinerer Durchlässigkeit und damit plastischeren Böden sowie zunehmender Frost-Tau-Wechselanzahl.
4. Die tiefer liegenden ungefrorenen Schichten werden durch den Gefriersog entwässert, weisen dadurch eine größere Trockendichte und unter Umständen Schrumpfrisse auf.
5. Durch das Frostgefüge und die zahlreichen entstehenden Fissuren kann die in der Triaxialzelle bestimmte Durchlässigkeit um bis zu einer halben Zehnerpotenz, in Ausnahmefällen bis zu einer ganzen Zehnerpotenz, erhöht werden. Extreme Durchlässigkeitssteigerungen von bis zu drei Zehnerpotenzen, wie sie zum Teil in der Literatur berichtet werden, konnten nicht beobachtet werden. Die Steigerungen werden größer bei geringer plastischen Böden, höheren Ausgangswassergehalten, tieferen Temperaturen und zunehmender Frost-Tau-Wechselanzahl.
6. Die beobachteten Veränderungen der Scherfestigkeiten sind eng an die Entwicklungen des Wassergehaltes gekoppelt und daher in den gefrorenen Bereichen kleiner werdend. Die in der Literatur beschriebene Abhängigkeit von dem sich einstellenden Aggregatgefüge (Dilatationseffekte bei den virtuellen Korngrößen) bzw. von dem Fissurengeflecht konnte nicht nachgewiesen werden.

Bei den insgesamt vier eigens angelegten Versuchsfeldern in situ und den zwei verwendeten Versuchsflächen auf Deponiebaustellen konnten folgende Ergebnisse ermittelt werden:

1. In Bereichen ohne jede Abdeckung und damit möglichem Niederschlagswasserzutritt waren im Bereich der Frosteindringung erhebliche Veränderungen der Wassergehalte und Trockendichten über die geforderten Einbaugrenzen hinaus zu verzeichnen. Die wiederholten Frost- und Niederschlagsereignisse führten hier durch die entstehenden Eissprengrisse zu immer neuen Wasserwegsamkeiten und damit tiefgreifen-

deren Vernässungen, als es bei einer normalen Wasserbeaufschlagung zu erwarten wäre.

2. In den nur mit einer KDB oder KDB/Vlies abgedeckten Bereichen wurden in den beiden relativ milden Wintern 1991/92 und 1992/93 Eindringungen der 0 C-Grenze von bis zu ca. 30 cm in das mineralische Material gemessen. Die Beprobung der Felder in diesen Bereichen vor und nach den Winterzeiträumen ergab nur geringe Veränderungen der wesentlichen Qualitätsparameter Trockendichte und Durchlässigkeit vor allem in den obersten ca. fünf Zentimetern.
3. Bei den mit Drainagekies belegten Flächen konnte ab einer Kiesmächtigkeit von mehr als 40 cm in den beiden Winterzeiträumen eine Eindringung der 0 C-Grenze unter die KDB verhindert werden. Hier wurden keine signifikanten Unterschiede in den bodenmechanischen Kennwerten festgestellt. Auch bei dem nur mit einer KDB belegten und ca. 35 cm Kies überschütteten Geschiebemergel, bei dem ein einmaliger Frostdurchschlag bis ca. 8 cm Tiefe zu verzeichnen war, konnten keine signifikanten Unterschiede zu den Einbaukennwerten ermittelt werden.

Insgesamt kann festgestellt werden, daß nach einem Frostdurchgang eine Veränderung der deponietechnisch relevanten Bodeneigenschaften der mineralischen Materialien stattfindet, besonders ausgeprägt dann, wenn gleichzeitig ein Wasserzutritt, z. B. wegen des Fehlens einer KDB, möglich ist. Das Ausmaß der Veränderung hängt jedoch stark von den jeweiligen Randbedingungen, vor allem aber der mineralogischen Zusammensetzung ab und kann wegen der Vielzahl der Einflüsse bei den vorliegenden Ergebnissen zur Zeit noch nicht allgemeingültig für alle Böden und Temperaturbelastungen beschrieben werden.

Bei einigen Materialien, insbesondere ausgeprägt plastischen Tonen, werden die geforderten Einbauwertgrenzen während der Herstellung weit übertroffen. Die beobachteten Veränderungen für die Trockendichte, den Wassergehalt und die Durchlässigkeit liegen dann teilweise wegen der vorhandenen Übererfüllung der Grenzwerte bei nur leichter Befrostung noch im Rahmen des Zulässigen. Zudem konnte in Laborversuchen festgestellt werden, daß durch eine spätere Auflast eine Rekonsolidierung stattfindet, die einen erheblichen Teil der Veränderungen wieder rückgängig macht.

Trotzdem muß auch bei diesen Materialien ein Frosteintrag vermieden werden, da die entstehenden Fissuren eingepreßt bleiben und sich bei evtl. Setzungen und Verformungen des Dichtungspakets bei gleichzeitiger Wärmeeinwirkung und möglicher Schrump-

fung wieder aufweiten können. An Böschungen besteht außerdem während bzw. nach dem Auftauen die Gefahr eines Abrutschens in den entstehenden Trennfugen der sich böschungsparell, normal zur Frosteindringrichtung bildenden Wasserlinsen bzw. aufgeweichten Bereiche.

Ist die Frostgefährdung für ein Material zu ermitteln, sind über Laborversuche die zu erwartenden Veränderungen für das jeweilige Material zu bestimmen. Da es für Frostversuche noch keine genormten Ansätze gibt, werden im Rahmen dieser Arbeit Durchführungsvorschläge gemacht. Die anzulegenden Stagnationsgradienten können den durchgeführten Temperaturmessungen zufolge zu $\Delta t \leq 0,25 \text{ °C/cm}$ bei geringen Überdeckungen $< \text{ca. } 30 \text{ cm}$ und $\Delta t \leq 0,15 \text{ °C/cm}$ bei Überdeckung mit Kies $> 30 \text{ cm}$ oder thermisch gleichwertigen Materialien gewählt werden. Bei der Bewertung der Laborergebnisse ist zu berücksichtigen, daß die Veränderungen in den Laborversuchen i. d. R. größer sind als die bei den mit mindestens einer Kunststoffdichtungsbahn abgedeckten und so vor einem Feuchtigkeitseintrag geschützten Materialien in situ. Die Gründe hierfür liegen vor allem in der Temperaturbelastung und dem Probenhandling. Laborversuche liegen damit hinsichtlich einer Frostschadensbeurteilung normalerweise auf der sicheren Seite.

Bei den Kiesdrainageschichten konnten ab ca. 40 cm Mächtigkeit in den beiden Wintern 1991/92 und 1992/93 keine Frostdurchschläge unter die KDB mehr gemessen werden. Der Temperaturunterschied gegenüber einer Abdeckung nur mit einer KDB bzw. KDB/Vlies betrug nahezu unabhängig von der Frostsumme (max. 70°Cd) und der erreichten niedrigsten Lufttemperatur ca. 4°C; bei einer Kiesmächtigkeit von 35 cm über einer KDB ohne weitere mechanische Schutzschicht betrug dieser Unterschied noch ca. 2°C.

Eine Verallgemeinerung hinsichtlich eines immer ausreichenden Schutzes vor Frost bei einer Drainageschichtmächtigkeit größer 40 cm ist jedoch wegen der unterschiedlichen Frostereignisse nicht möglich. Die Notwendigkeit und die Wirkung verschiedener Frostschutzmaßnahmen können jedoch in Wärmehaushaltsberechnungen ermittelt werden, die hier beispielhaft an zwei Aufbauvarianten in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur durchgeführt werden. Hinsichtlich der Bewertung der erhaltenen Rechenergebnisse sind die Klimadaten von nahegelegenen Stationen des Deutschen Wetterdienstes statistisch zu analysieren und einzuordnen.

Für die Konzeption einer Frostschutzmaßnahme werden abschließend die maßgebenden Einflußparameter dargelegt und einige Materialien und Maßnahmen, die grundsätzlich für den Frostschutz bei Deponien geeignet sind, mit ihren Vor- und Nachteilen erläutert. Anhand von drei Materialien wird die grundsätzliche Eignung eines Laborgroßver-

suchsstandes zur Ermittlung der Schutzwirkung von speziellen Frostschutzschichten, für die keine ausreichenden Berechnungswerte vorliegen, nachgewiesen.

In künftigen Untersuchungen zur Ermittlung der Temperaturbelastungen des mineralischen Materials ist vor allem der Bestimmung der Luftübergangsfaktoren für die Berechnung der Oberflächentemperatur aus gemessenen Klimadaten Aufmerksamkeit zu widmen. Es wäre dann möglich, mit gemessenen Wetterdaten ständig online die Temperaturverhältnisse in der Deponieabdichtung im Rahmen einer instationären Wärmehaushaltsrechnung nachzubilden, ohne daß Meßfühler durch die KDB in das mineralische Material geführt werden müssen.

Im Bereich des mineralischen Materials sind eingehendere Untersuchungen insbesondere zu den Zusammenhängen zwischen der mineralogischen Zusammensetzung und den Frostauswirkungen erforderlich. Auch die Auswirkung von höheren Temperaturen auf zuvor gefrorene Materialien und deren Spannungs-Verformungsverhalten sowie die Durchlässigkeit unter Schubbeanspruchungen bei verschiedenen Auflasten sollten in weiteren Untersuchungen berücksichtigt werden.

Die Einrichtung eines zentralen Registers für die Ergebnisse von Untersuchungen gefrorener Deponieabdichtungen wäre vor diesem Hintergrund zwar sinnvoll, ist aber wahrscheinlich nicht zuletzt aus finanziellen Gründen nicht durchführbar.

7 Literaturverzeichnis

Übergeordnete Literaturstellen:

- Frost in Geotechnical Engineering (1989), edited by H. Rathmayer, International Symposium Saariselkä, Finland, 13-15 March, 1989, Vol. 1 und 2, Espoo, VTT Symposium 94 und 95
- Frost in Geotechnical Engineering (1993), edited by A. Phukan, Proceedings of the 2nd International Symposium on Frost in Geotechnical Engineering, Anchorage, USA, 28 June -1 July 1993, Rotterdam/Brookfield
- Ground Freezing (1985), edited by S. Kinoshita & M. Fukuda, Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing (ISGF'85), Sapporo, 5-7 August 1985, Vol. 1: Rotterdam/Boston; Vol. 2: Sapporo
- Ground Freezing 88 (1988), edited by R. H. Jones & J. T. Holden, Proceedings of the 5th International Symposium on Ground Freezing, Nottingham, 26-28 July 1988, Rotterdam/Brookfield
- Ground Freezing 91 (1991), edited by Yu Xiang & Wang Changsheng, Proceedings of the 6th International Symposium on Ground Freezing (ISGF'91), Beijing, 10.-12.09.1991, Vol. I und II, Rotterdam/Brookfield

Alphabetisches Quellenverzeichnis:

- Albrecht, F. (1940), Untersuchungen über den Wärmehaushalt der Erdoberfläche in verschiedenen Klimagebieten, Reichsanstalt für Wetterdienst, Berlin, Wissenschaftliche Abhandlungen, Band VIII, Nr. 2
- Albrecht, F. (1962), Die Berechnung der natürlichen Verdunstung (Evapotranspiration) der Erdoberfläche aus klimatologischen Daten, Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach a. M., Band 11, Nr. 83
- Alkire, B. D. (1980), A mechanism for predicting the effect of cyclic freeze-thaw on soil behavior [sic!], Proc. 2nd Int. Symp. on Ground Freezing 24.-26.06.1980, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, S. 285-296
- Alkire, B. D. / Jashimuddin, J. (1984), Changes in strength of silt due to freeze-thaw, Journal of Technical Topics in Civil Engineering, Vol. 110, Nr. 1, S. 48-53
- Alkire, B. D. / Morrison, J. M. (1982), Comparative response of soils to freeze-thaw and repeated loading, in: Proc. 3rd Int. Symp. on Ground Freezing, Hanover, S. 89-95
- Alkire, B. D. / Morrison, J. M. (1983), Change in soil structure due to freeze-thaw and repeated loading, Frost Action on Transportation Facilities, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Transportation Research Record 918, S. 15-22
- Anderson, D. M. (1966), Phase composition of frozen montmorillonite-water mixtures from heat capacity measurements, Soil Science Society of America, Proceedings, Vol. 30, S. 670-675
- Anderson, D. M. (1967), The interface between ice and silicate surfaces, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 25, S. 174-191

- Anderson, D. M. (1989), Frost heave properties of soils, in: Frost in Geotechnical Engineering (1989), Vol. 1, S. 105-125
- Anderson, D. M. / Hoekstra, P. (1965), Migration of interlamellar water during freezing and thawing of Wyoming bentonite, Soil Science Society of America, Proceedings, Vol. 29, S. 498-504
- Aoyama, K. / Ogawa, S. / Fukuda, M. (1985), Temperature dependencies of mechanical properties of soils subjected to freezing and thawing, in: Ground Freezing (1985), S. 217-222
- Arand, W. / Dörschlag, S. / Pohlmann, P. (1989), Einfluß der Bitumenhärte auf das Ermüdungsverhalten von Asphaltbefestigungen unterschiedlicher Dicke in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit der Unterlage, der Verkehrsbelastung und Temperatur, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 558
- Autorenkollektiv [Müller, G. et. al.] (1989), Bodenkunde, 3., bearb. Aufl., Berlin
- Balduzzi, F. (1959), Experimentelle Untersuchungen über den Bodenfrost, Dissertation ETH Zürich Nr. 2870
- Balduzzi, F. (1968), [Auszug aus:] Die Lebensdauer der Nationalstraßen, Neue Züricher Zeitung vom 17.04.1968
- Balduzzi, F. (1973), Frost properties of cement stailized [sic] bases and subbases, Swiss Federal Institute of Technology Zurich [sic!], Institute of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zürich
- Basak, P. (1978), Phenomenon of initial gradient and its implications to seepage problems, Indian Geotechnical Journal, Vol. 8, Nr. 3, S. 125-140
- Basak, P. / Madhav, M. R. (1976), Hydraulic conductivity in surface active soils, Australian Journal of Soil Research, Heft 14, S. 121-127
- BASF (1991), Erfahrungen mit Frostschutzschichten aus STYRODUR im Straßenbau, [Produkt-]Information STYRODUR, HSB/ME - D 219, BASF, [Ludwigshafen]
- Behr, H. (1981), Criteria for the determination of the frost-susceptibility of soils in the Federal Republic of Germany, Frost i Jord, Nr. 22, S. 27-34
- Behr, H. (1984), Über klimatische Grundlagen für Frostschutzmaßnahmen im Straßenbau, Straße und Autobahn, Heft 4, S. 135-140
- Behr, H. / Kloss, E. / Meffert, R. / Streit, G. / Vosteen, B. / Weil, G. / Weiß, H. (1972), Anwendung von Dämmschichten im Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg, Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Heft 86
- Benoit, G. R. (1973), Effect of freeze-thaw cycles on aggregate stability and hydraulic conductivity of three soil aggregate sizes, Soil Science Society of America, Proceedings, Vol. 37, S. 3-5
- Benoit, G. R. / Bornstein, J. (1970), Freezing and thawing effects on drainage, Soil Science Society of America, Proceedings, Vol. 34, S. 551-557
- Benson, C. H. / Daniel, D. E. (1990), Influence of clods on the hydraulic conductivity of compacted clay, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 116, Nr. 8, S. 1231-1248
- Benson, C. H. / Othman, M. A. (1993), Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, Nr. 2, S. 276-294
- Benson, C. H. / Zhai, H. / Wang, X. (1994), Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, Nr. 2, S. 366-387

- Berger, K. / Melchior, S. (1989), Meßdatenerfassung und -verarbeitung in einem Forschungsprojekt zur Untersuchung der Wirksamkeit mehrschichtiger Deponieabdecksysteme (Mülldeponie Georgswerder), 4. Symposium Informatik und Umweltschutz, Karlsruhe, 6.-8. November 1989, hrsg. von A. Laeschke, W. Geiger und B. Page, S. 319-328
- Beskow, G. (1935), Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads, Swedish Geological Society, Ser. C., Nr. 375, 26th Yearbook, Nr. 3
- Beskow, G. (1949), Amerikansk och svensk jordklassifikation. Speciellt för vägar och flygfält, Statens väginstitut, Meddelande 76, Stockholm
- Biermans, M. B. G. M. / Dijkema, K. M. / De Vries, D. A. (1978), Water movement in porous media towards an ice front, Journal of Hydrology, Vol. 37, S. 137-148
- Bjerrum, L. (1973), Problems of soil mechanics and construction on soft clays, State-of-the-Art Report to Session IV, 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, S. 1-53
- Black, P. B. (1991), Interpreting unconfined unfrozen water content, in: Ground Freezing 91 (1991), Vol. 1, S. 3-6
- Blanchard, D. / Frémond, M. (1985), Soils frost heaving and thaw settlement, in: Ground Freezing (1985), S. 209-216
- Bondarenko, G. I. / Sadovsky, A. V. (1991), Water content effect of the thawing clay soils on shear strength, in: Ground Freezing 91 (1991), Vol. 1, S. 123-127
- Bourbonnais, J. / Ladanyi, B. (1985), The mechanical behaviour of frozen sand down to cryogenic temperatures, in: Ground Freezing (1985), S. 235-244
- Broms, B. B. / Yao, L. Y. C. (1964), Shear strength of a soil after freezing and thawing, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 90, SM 4, S. 1-25
- Brown, W. G. (1964), Difficulties associated with predicting depth of freeze or thaw, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 1, S. 215-226
- Burckhardt, H. (1956), Vorbeugender Frostschutz und Frostschutz durch Beregnung, Mitteilungen des Deutschen Wetterdienstes, Bad Kissingen, Band 3, Nr. 16, S. 16/26-16/53
- Busch, K.-F. / Luckner, L. (1974), Geohydraulik für Studium und Praxis, 2. Aufl., Stuttgart
- Cammerer, J. S. (1962), Der Wärme- und Kälteschutz in der Industrie, 4. Aufl., Berlin/Göttingen/Heidelberg
- Casagrande, A. (1931), Discussion on frost heaving, Proceedings, Highway Research Board, Vol. 11, Pt. 1, S. 168-172
- Chamberlain, E. J. (1973), A model for predicting the influence of closed system freeze-thaw on the strength of thawed clays, Proceedings of a Symposium on Frost Action on Roads, Oslo, Norwegen, S. 94-97
- Chamberlain, E. J. (1980), Overconsolidation effects of ground freezing, Proc. 2nd Int. Symp. on Ground Freezing, 24.-26.06.1980 (ISGF'80), The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, S. 325-337
- Chamberlain, E. J. (1981), Frost susceptibility of soil, review of index tests, US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL Report 81-2
- Chamberlain, E. J. (1986), Evaluation of selected frost susceptibility test method, US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL Report 86-14

- Chamberlain, E. J. (1989), Physical changes in clays due to frost action and their effect on engineering structures, in: Frost in Geotechnical Engineering (1989), Vol. 2, S. 863-893
- Chamberlain, E. J. / Blouin, S. E. (1978), Densification by freezing and thawing of fine material dredged from waterways, Proc. 3rd Int. Conf. on Permafrost, US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Edmonton, S. 623-628
- Chamberlain, E. J. / Carbee, D. L. (1981), The CRREL frost heave test, USA, Frost i Jord, Nr. 22, S. 55-63
- Chamberlain, E. J. / Cole, D. M. / Johnson, T. C. (1979), Resilient response of two frozen and thawed soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 105, GT 2, S. 257-271
- Chamberlain, E. J. / Gow, A. J. (1978), Effect of freezing and thawing on the structure of soils, Proc. 1st Int. Symp. on Ground Freezing, Ruhr-Univ. Bochum, Deutschland, S. 31-44
- Chamberlain, E. J. / Gow, A. J. (1979), Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils, Engineering Geology, Vol. 13, S. 73-92
- Chen, X. (1989), Current development on frost susceptibility prediction of soils in P. R. China, in: Frost in Geotechnical Engineering (1989), Vol. 2, S. 481-490
- Chen Xiaobai / Wang Yaqing (1991), Prediction and control of frost damage to engineering projects in seasonally frost regions, in: Ground Freezing 91 (1991), Vol. I, S. 7-10
- Chuvilin, Y. M. / Yazynin, O. M. (1988), Frozen soil macro- and microtexture formation, Proc. 5th Int. Conf. on Permafrost, Trondheim, Norwegen, Vol. 1, S. 320-328
- Croney, D. / Jacobs, J. C. (1967), The frost susceptibility of soils and road materials, Road and Research Laboratory, Crowthorne, England
- Czajkowski, R. L. / Vinson, T. S. (1980), Dynamic properties of frozen silt under cyclic loading, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 106, GT 9, S. 963-980
- Czurda, K. A. (1983), Freezing effects on soils: comprehensive summary of the ISGF 82, Cold Regions Science and Technology, Nr. 8, S. 93-107
- Czurda, K. A. (1994), Das multimineralische Barrierensystem, Seminar 'Abfalldeponien' Techn. Akad. Wuppertal, 17.-18.01.94, Wuppertal
- Czurda, K. A. / Schababerle, R. (1990), Zur Frostempfindlichkeit von mineralischen Abdichtungen, Neuzeitliche Deponietechnik, hrsg. von H. L. Jessberger, Rotterdam, S. 237-252
- Czurda, K. A. / Wagner, J. F. (1984), Process of frost-action in swelling soils, Proc. 3rd Int. Offshore Mechanics and Artic Eng. Symp., ASME, New Orleans, Vol. III, S. 111-117
- Czurda, K. A. / Wagner, J. F. (1985), Frost heave and clay expansion in freshwater clays, in: Ground Freezing (1985), S. 129-136
- Dahms, E. (1985), Zur Standortwahl und Abdichtung von Hausmülldeponien in Niedersachsen, Berichte von der 5. Nat. Tagung für Ingenieurgeologie Kiel, DGEG / DGG, S. 99-110
- Daniel, D. E. / Benson, C. H. (1990), Water content-density criteria for compacted soil liners, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 116, Nr. 12, S. 1811-1830

- Danielyan, Y. S. / Yanitsky, P. A. (1991), Heat and moisture exchange for freezing and thawing grounds, in: *Ground Freezing 91 (1991)*, Vol. 1, S. 105-111
- Datsko, P. S. / Kouchukov, E. Z. / Akimov, Y. P. (1983), Mechanism and laws governing the transformation of unconsolidated rocks under the influence of repeated freeze-thaw, *Proc. 4th Int. Conf. on Permafrost, Fairbanks*, S. 217-220
- DIN 18 121, Teil 1, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Wassergehalt, Bestimmung durch Ofentrocknung
- DIN 18 121, Teil 2, Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte, Wassergehalt, Bestimmung durch Schnellverfahren
- DIN 18 122, Teil 1, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen), Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze
- DIN 18 123, Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Korngrößenverteilung
- DIN 18 125, Teil 1, Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte, Bestimmung der Dichte des Bodens, Laborversuche
- DIN 18 125, Teil 2, Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte, Bestimmung der Dichte des Bodens, Feldversuche
- DIN 18 127, Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte, Proctorversuch
- DIN 18 128, Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte, Bestimmung des Glühverlusts
- DIN 18 129, Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte, Kalkgehaltsbestimmung
- DIN 18 130, Teil 1, Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte, Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts, Laborversuche
- DIN 18 137, Teil 1, Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte, Bestimmung der Scherfestigkeit, Begriffe und grundsätzliche Versuchsbedingungen
- DIN 18 196, Erd- und Grundbau, Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke
- DIN 4022, Teil 1, Baugrund und Grundwasser, Benennen und Beschreiben von Boden und Fels, Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernteten Proben im Boden und im Fels
- DIN 4096, Baugrund, Flügelsondierung, Maße des Gerätes, Arbeitsweise, Auswertung
- DIN 4108, Teil 4, Wärmeschutz im Hochbau, Wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte
- Drost-Hansen, W. (1967), The water-ice interface as seen from the liquid side, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 25, S. 131-160
- Dücker, A. (1939), Untersuchungen über die frostgefährlichen Eigenschaften nichtbindiger Böden, Berlin, Forschungsarbeiten aus den Straßenwesen, Band 17
- Duden (1991), Rechtschreibung der deutschen Sprache, 20., völlig neu bearb. und erw. Aufl., Mannheim
- Duwe, S. (1993), Ausbildung von thermischen Schutzmaßnahmen im Grundbau, Entwurf am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, unveröffentlicht
- Dysli, M. (1991), Resilient modulus of freeze-thaw or resilient frost heave, in: *Ground Freezing 91 (1991)*, Vol. 1, S. 225-229
- Dysli, M. (1993), Where does the water go during ice lense thaw?, in: *Frost in Geotechnical Engineering (1993)*, S. 45-50

- Dysli, M. / Pfister, R. (1982), Test of bearing capacity during thaw, Frost i Jord, Nr. 24, S. 14-21
- Ekström, A. / Olofsson, T. (1985), Water and frost-stability risks for embankments of fine-grained soils, Proc. Symp. Failures in Earthworks, Inst. of Civil Eng., London, S. 155-166
- Elshury, B. R. / Sradars, G. A. / Anderson, D. C. / Rehage, J. A. / Sai, J. O. / Daniel, D. E. (1990), Field and laboratory testing of a compacted soil liner, Project summary, Risk Reduction Engineering Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, EPA/600/S2-88/067
- Elsner, N. / Fischer, S. / Huhn, J. (1993), Grundlagen der Technischen Thermodynamik, Band 2: Wärmeübertragung, 8., grundl. überarb. und erg. Aufl., Berlin
- Endell, K. / Loos, W. / Breth, H. (1939), Zusammenhang zwischen kolloidchemischen sowie bodenphysikalischen Kennziffern bindiger Böden und Frostwirkung, Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Band 16
- Ernst, U. (1993), Berechnungen klimainduzierter thermischer Strömungen im Grundbau, Diplomarbeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, unveröffentlicht
- Ershov, E. D. / Lebedenko, I.U. P. / Xu Xiaozu / Deng Yousheng / Zhang Lixing (1991), Water and ion migration of frozen soils in open system, in: Ground Freezing 91 (1991), Vol. I, S. 11-15
- Esch, D. C. / McHatthie, R. L. (1983), Prediction of roadway strength from soil properties, Frost Action on Transportation Facilities, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Transportation Research Record 918, S. 30-34
- Everett, D. H. / Haynes, J. M. (1965), Capillary properties of some model pore systems with special reference to frost damage, Bulletin de la Réunion des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions, Vol. 27, S. 31-38
- Feeser, V. (1981), Einführung in die Geologie für Bauingenieure, Inst. für Geologie und Paläontologie der TU Braunschweig, Braunschweig
- Fetz, L. B. (1981), Frostsusceptibility of soils, Frost i Jord, Nr. 22, S. 39-40
- Fetz, L. B. (1981), Short-cut frost heaving test for soils, Frost i Jord, Nr. 22, S. 41-46
- FGSV (1988), Arbeitsgruppe "Erd- und Grundbau", Merkblatt für die Verhütung von Frostschäden in Straßen, Entwurf Juni 1988, Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- FGSV (1991), Merkblatt für die Verhütung von Frostschäden an Straßen, Ausgabe 1991, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, FGSV 545
- Fletcher, N. H. (1970), The chemical physics of ice, Cambridge
- Floss, R., Zusätzliche technische Vorschriften und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau ZTVE-Stb 76 - Kommentar, Bonn
- Floss, R. (1973), Bodenmechanische Gesichtspunkte bei der Auswahl und Dimensionierung von Straßenbefestigungen, Straße und Autobahn, Heft 1
- Franke, E. / Mader, H. (1986), Zur Durchlässigkeit von Tonen bei geringen Druckgradienten, Geotechnik, Heft 9, S. 137-146
- Frankenberger, E. (1955), Über die vertikalen Temperatur-, Feuchte- und Windgradienten in den untersten 7 Dekametern der Atmosphäre, den Vertikalaustausch und den Wärmehaushalt an Wiesenboden bei Quickborn, Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Bad Kissingen, Band 3, Nr. 20

- Frankenberger, E. (1960), Beiträge zum Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58
1. Meßergebnisse und Berechnungen zum Wärmehaushalt der Erdoberfläche, Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach a. M., Band 10, Nr. 73
- Frémond, M. / Mikkola, M. (1991), Thermomechanical modelling of freezing soil, in: Ground Freezing 91 (1991), Vol. 1, S. 17-24
- Friedewold, C. (1992), Ausbildung und Bemessung von thermischen Schutzmaßnahmen im Grundbau, Diplomarbeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, unveröffentlicht
- Frydman, S. / Melnik, J. / Baker, R. (1979), The effect of prefreezing on the strength and deformation properties of granular soils, Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 19, Nr. 4, S. 31-42
- Fukuda, M. (1974), Rock weathering by freezing-thawing cycles, Low Temp. Sci., Ser. A, 32, S. 243-327
- Fukuda, M. / Ishizaki, T. (1991), General report on heat and mass transfer, in: Ground Freezing 91 (1991), Vol. II, S. 409-415
- Gabener, H.-G. (1982), Über den Durchflußwiderstand feinkörniger Böden beim hydraulischen Grundbruch, Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Universität Essen, Heft 4, S. 251-267
- Gabener, H.-G. (1983), Untersuchungen über die Anfangsgradienten und Filtergesetze bei bindigen Böden, Mitteilungen aus dem Fachbereich Grundbau und Bodenmechanik, Universität Essen, Heft 6
- Gabener, H.-G. (1984), Über die Abweichungen vom Darcyschen Gesetz bei der Durchströmung bindiger Böden, Bautechnik, Heft 10, S. 351-358
- Gabener, H.-G. (1985), Die Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes für gering durchlässige Bodenarten bei kleinem Druckgefälle, 2. Grundbau-Seminar 1985, Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Universität Essen, Heft 10, S. 92-108
- Gartung, E. (1993), Überblick über die geotechnische Problemstellung, in: Tonmineralogie für die Geotechnische Praxis, Veröff. des Grundbauinst. der LGA Bayern, hrsg. von E. Gartung, Nürnberg, Heft 64, S. 5-32
- Gaskin, P. (1981), Review of frost susceptibility classification, Frost i Jord, Nr. 22, S. 3-10
- Geiger, R. (1961), Das Klima in der bodennahen Luftschicht, Braunschweig
- Gifford, G. P. / D'Andrea, R. A. / Sage, J. D. (1983), A device for evaluation of thaw weakening of frost-susceptible soil, Frost Action on Transportation Facilities, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Transportation Research Record 918, S. 10-15
- Gilpin, R. R. (1978), A model of the 'liquid-like' layer between ice and a substrate with applications to wire regelation and particle migration, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 68, S. 235-251
- Gilpin, R. R. (1980a), A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils, Water Resources Research, Vol. 16, Nr. 5, S. 918-930
- Gilpin, R. R. (1980b), Theoretical studies of particle engulfment, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 74, S. 44-63
- Gouy, G. (1910), Sur la constitution de la charge électrique á la surface d'un électrolyte, Ann. Phys., Serie 4, Nr. 9, S. 457-468

- Graham, J. / Au, V. C. S (1985), Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22, S. 69-78
- Graubner, R. (1980), *Lexikon der Geologie, Minerale und Gesteine*, München
- Grigull, U. / Sandner, H. (1990), *Wärmeleitung*, Berlin/Heidelberg
- Grim, R. E. (1952), Relation of frost action to the clay mineral composition of soil materials, *Highway Research Board, Special Report*, 2, S. 167-172
- Grob, H. (1984), Ground freezing as tunnelling support, *Int. Coll. Advances Tunnel Technology & Subsurface Use*, Beijing, China, Vol. 4, S. 265-279
- Gronemeier, K. / Mattheß, G. / Pekdeger, A. / Schenk, D. / Siems, A. (1981), *Geochemie, Mikrogefüge und bodenmechanische Eigenschaften von halbfesten Gesteinen*, *Geotechnik*, Nr. 1, S. 25-33
- Guryanov, I. E. (1985), Thermal-physical characteristics of frozen, thawing and unfrozen grounds, in: *Ground Freezing (1985)*, Vol. II, S. 225-230
- Häckel, H. (1985), *Meteorologie*, Stuttgart
- Hader, F. (1982), *Grundzüge der Tiefbauklimatologie*, Tl. 1 (4/82): S. 190-202, Tl. 2 (6/82): S. 392-398, Tl. 3 (8/82): S. 198-504, Tl. 4 (11/82): S. 700-709, TIS
- Hailikari, T. (1981), The frost susceptibility test for public roads in Finland, *Frost i Jord*, Nr. 22, S. 11-12
- Hanley, T. O. / Rao, S. Ramachandra (1980), Freezing potentials in wet clays, I. Early results, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 3, S. 163-168
- Hardcastle, J. H. / Lottman, R. P. / Tri Buu (1983), Fatigue-based criteria for seasonal load limit selection, *Frost Action on Transportation Facilities*, *Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Transportation Research Record* 918, S. 22-30
- Harder, H. / Blümel, W. (1987), Zur Definition der Durchlässigkeit feinkörniger Böden, *Wasser und Boden*, Heft 10, S. 522-525
- Hartge, K. H. / Horn, R. (1991), *Einführung in die Bodenphysik*, Stuttgart
- Hasenpatt, R. (1988), *Bodenmechanische Veränderungen reiner Tone durch Adsorption chemischer Verbindungen (Batch- und Diffusionsversuche)*, Zürich, *Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik ETH Zürich*, Nr. 134
- Hasenpatt, R. / Degen, W. / Kahr, G. (1988), Durchlässigkeit und Diffusion in Tonen, in: *Tonmineralogie und Bodenmechanik*, Zürich, S. 65-75
- Hasson, P. / Irwin, L. (1988), Comparison of freezing cells used in the determination of soil frost susceptibility, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 11, Nr. 3, 218-220
- Heigel, K. (1960), Über den Einfluß von Exposition und Bewuchs auf die Erdbodentemperaturen, *Mitteilungen des Deutschen Wetterdienstes*, Offenbach, Band 3, Nr. 22
- Hietala, P. (1988), Frost heave test as a method for classifying frost susceptibility of soils, *Diploma thesis*, University of Oulu (in finnisch)
- Higashi, A. (1958), Experimental study of frost heaving, *SIPRE Res. Report* Nr. 45, US Army CRREL, Hanover, NH
- Hoekstra, P. (1965), Conductance of frozen bentonite suspensions, *Soil Science Society of America, Proceedings*, Vol. 29, S. 519-522
- Hoekstra, P. (1969), Water movement and freezing pressures, *Soil Science Society of America, Proceedings*, Vol. 33, S. 512-518

- Hofmann, G. (1955), Die Thermodynamik der Taubildung, Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Bad Kissingen, Band 3, Nr. 18
- Horiguchi, K. / Miller, R. D. (1983), Hydraulic conductivity functions of frozen materials, Proc. 4th Int. Conf. on Permafrost, Fairbanks, S. 504-508
- Hunsicker, S. E. (1987), The effect of freeze/thaw cycles on the permeability and macrostructure of Fort Edwards clay, Master of Engineering Thesis, Dartmouth College, Hanover, NH
- Huckfeldt, J. (1993), BETHYD - Ein FE-Programm zur Berechnung der instationären nichtlinearen Wärmeleitung für hydratisierenden Beton mit Wärmequellung nach Jonasson und Arrhenius/Freiesleben, mündliche Mitteilungen
- Hütteroth, D. (1992), Mündliche Mitteilungen über die Ergebnisse einer Untersuchung von Deponieflächen nach einem Winter, Immenhausen, [unveröffentlicht]
- IGB (1992), Vorlesungsumdruck Grundbau, Bodenmechanik, Unterirdisches Bauen, Studienunterlagen für das Grundfachstudium, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, 8. Aufl., Braunschweig
- ISSMFE Technical Committee on Frost, TC8 (1989), Work report 1985 - 1989 [mit Appendices A - F], in: Frost in Geotechnical Engineering (1989), Vol. 1, S. 15-70
- Jasmund, K. (1951), Die silikatischen Tonminerale, Weilheim
- Jessberger, H. L. (1971), Bodenfrost, Zusammenstellung und Auswertung des neueren Schrifttums über die Wirkung des Frostes auf den Boden, Bonn-Bad Godesberg, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, hrsg. vom Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, Heft 125
- Jessberger, H. L. (1973), Die Tragfähigkeit von frostempfindlichem Boden nach dem Auftauen als Parameter für die Bemessung von Straßen sowie als Maßstab für die Bewertung von Frostkriterien, Straße und Autobahn, Heft 12, S. 511-519
- Jessberger, H. L. (1976), Vergleichende Beurteilung der gebräuchlichen Frostkriterien für Frostschutz-Kies-Sande anhand der Originalveröffentlichungen, Bonn-Bad Godesberg, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 208
- Jessberger, H. L. (1979), Theorie und Anwendungsgrenzen des Gefrierverfahrens im Bauwesen, Gefrierverfahren im Bauwesen, Referate der Studententagung vom 30./31. März 1979, ETH-Zürich, SIA-Dokumentation, Nr. 32, S. 7-29
- Jessberger, H. L. (1980), State-of-the-art-report, Ground freezing: Mechanical properties, processes and design, prepared for: 2nd Int. Symp. on Ground Freezing, June 24. - 26., 1980, Norwegian Institute of Technology
- Jessberger, H. L. (1984), Statische und thermische Berechnung von Frostkörpern, Kurzfassung, Linde Symposium Hamburg, 08.05.1984
- Jessberger, H. L. (1990), Frost im Baugrund, Grundbautaschenbuch, 4. Aufl., Teil 1, hrsg. von U. Smolczyk, Berlin, S. 513-550
- Jessberger, H. L. (1991), Bodenvereisung, Grundbautaschenbuch, 4. Aufl., Teil 2, hrsg. von U. Smolczyk, Berlin, S. 103-130
- Jessberger, H. L. / Jagow, R. (1989), Determination of frost susceptibility of soils, in: Frost in Geotechnical Engineering (1989), Vol. 2, S. 449-469
- Jessberger, H. L. / Jagow, R. / Jordan, P. (1988), Thermal design of a frozen soil structure for stabilization of the soil on top of two parallel metro tunnels, in: Ground Freezing 88 (1988), S. 349-356

- Jessberger, H. L. / Klein, J. / Diekmann, N. (1976), Beitrag zum Spannungs-Verformungsverhalten von gefrorenem Boden, Proc. 6. Europ. Konferenz Bodenmech. und Grundbau Wien, Band I/3-6, S. 233-239
- Jessberger, H. L. / Zenk, H. (1963), Untersuchungen des Bodenfrostes an Tonen und Ton-Sand-Gemischen, Straße und Autobahn, Heft 5, S. 170-176
- Johnson, A. W. (1952), Frost action in roads and airfields, A review of the literature, Highway Research Board, Special Report, Nr. 1
- Jones, C.W. (1983), Solar radiation effects on frost action in soils, Frost Action on Transportation Facilities, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Transportation Research Record 918, S. 43-49
- Jones, R. H. (1987), Development in the British approach to prevention of frost heave in pavements, Transportation Research Record 1146, S. 33-40
- Jumikis, A. R. (1966), Thermal soil mechanics, New Brunswick, New Jersey
- Jumikis, A. R. (1977), Thermal geotechnics, New Brunswick, New Jersey
- Kaempfert, W. (1942), Sonnenstrahlung auf Ebene, Wand und Hang, Berlin, Reichsamt für Wetterdienst (Luftwaffe), Wissenschaftliche Abhandlungen, Band IX, Nr.3
- Kaufmann, H. (1971), Grundlagen der organischen Chemie, Basel/Stuttgart
- Karczmarzyk, W. (1989), Kombinationsdichtung auf der Deponie Wilsun, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Heft 16
- Kay, B. D. / Perfect, E. (1988), State of the art: Heat and mass transfer in freezing soils, Proc. 5th International Symposium on Ground Freezing, Rotterdam, Holland, Vol. 1, S. 3-21
- Kay, B. D. / Grant, C. D. / Groenevelt, P. H. (1985), Significance of ground freezing on soil bulk density under zero tillage, Soil Science Society of America Journal, Vol. 49, S. 973-978
- Kay, B. D. / Sheppard, M. I. / Loch, J. P. G. (1977), A preliminary comparison of simulated and observed water redistribution in soils freezing under laboratory and field conditions, Proc. Int. Symp. Frost Action in Soils, Luleå, Schweden, S. 29-41
- Keil, K. (1959), Geotechnik, Halle/Saale
- Kersten, M. S. (1959), Frost penetration: relationship to air temperature and other factors, Highway Research Board, Bulletin, 225, S. 45-62
- Keschawarzi, S. (1973), Verdunstung und Energiebedarf künstlich beheizter und beregneter Flächen, Dissertation TU Hannover
- Kettle, R. J. (1989), Modification on frost action in subgrade soils, in: Frost in Geotechnical Engineering (1989), Vol. 2, S. 511-521
- Kézdi, A. (1969), Handbuch der Bodenmechanik, Band 1: Bodenphysik, Berlin
- Kézdi, A. (1970), Handbuch der Bodenmechanik, Band 2: Bodenmechanik im Erd-, Grund- und Straßenbau, Berlin
- Khrustalev, L. N. / Vodolazkin, V. M. (1987), Validity of existing estimates of the compressibility of thawing soils frozen for many years, Inzh. Geol, 4, S. 86-90
- Kim, W.-H. / Daniel, D. E. (1992), Effects of freezing on hydraulic conductivity of compacted clay, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 118, Nr. 7, S. 1083-1097

- Kim, W.-H. / Daniel, D. E. (1993), Effects of freezing on hydraulic conductivity of compacted clay, *Closure, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 119, Nr. 11, S. 1865
- Kinosita, S. (1989), Preventing measures against frost action in soils, in: *Frost in Geotechnical Engineering (1989)*, Vol. 2, S. 733-748
- Klengel, K. J. (1968), *Frost und Baugrund*, Berlin
- Knickelmann, F. J. (1980), Schäden durch Frost im Baugrund, *Baumaschinendienst*, Heft 12, S. 944-948
- Knüpfer, J. (1990), Schnellverfahren für die Güteüberwachung mineralischer Deponiebasisabdichtungen, Braunschweig, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft Nr. 32
- Kögler, F. / Scheidig, A. / Leussink, H. (1936), Beurteilung der Frostgefahr im Straßenbau, *Die Straße*, Jahrgang 3, Nr. 5, S. 119-121
- Kohler, E. E. / Ustrich, E. (1988), Tonminerale und ihre Wirksamkeit in natürlichen und technischen Schadstoffbarrieren, *Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe*, hrsg. von Prof. Dr. Dr. K. Czurda / Prof. Dr. H. Hötzl, Nr. 4
- Komodromos, A. / Mattiat, B. (1989), Einsatz von licht- und rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungsmethoden bei der Eignungsprüfung von mineralischen Deponieabdichtungen, *Müll und Abfall*, Nr. 5, S. 253-263
- Konrad, J.-M. (1989), Effect of freeze-thaw cycles on the freezing characteristics of a clayey silt at various overconsolidation ratios, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 26, S. 217-226
- Konrad, J.-M. (1993), Modelling frost heaving in soils, [Vortrag anlässlich des "2nd International Symposium on Frost in Geotechnical Engineering", 28.06.-1.07.1993, Anchorage, Alaska, nicht in schriftlicher Form veröffentlicht]
- Konrad, J.-M. / Morgenstern, N. R. (1980), A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 17, S. 473-486
- Konrad, J.-M. / Morgenstern, N. R. (1981), The segregation potential of a freezing soil, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 18, S. 482-491
- Konrad, J.-M. / Morgenstern, N. R. (1982a), Prediction of frost heave in the laboratory during transient freezing, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 19, S. 250-259
- Konrad, J.-M. / Morgenstern, N. R. (1982b), Effects of applied pressure on freezing soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 19, S. 494-505
- Koopmans, R. W. R. / Miller, R. D. (1966), Soil freezing and soil water characteristic curves, *Soil Science Society of America, Proceedings*, Vol. 30, S. 680-685
- Kozłowski, T. (1989a), Investigation of the supercooling in clayey soils, *Frost in Geotechnical Engineering*, in: *Frost in Geotechnical Engineering (1989)*, Vol. 1, S. 293-299
- Kozłowski, T. (1989a), New method of the unfrozen water content prediction in frozen soils, in: *Frost in Geotechnical Engineering (1989)*, Vol. 1, S. 283-291
- Kreutz, W. (1942), *Das Eindringen des Frostes in Böden unter gleichen und verschiedenen Witterungsbedingungen während des sehr kalten Winters 1939/40*, Berlin, Reichsamt für Wetterdienst (Luftwaffe), Wissenschaftliche Abhandlungen, Band IX, Nr. 2
- Kronfuss, H. / Stern, R. (1978), *Strahlung und Vegetation, Angew. Pflanzenzoologie*, Veröff. der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, Wien, Heft Nr. 23

- Kübler, G. (1954), Die Anzeigegenauigkeit des Frostindikators, Straße und Autobahn, Heft 9, S. 310-313
- Kübler, G. (1964), Der Einfluß der Witterungsfaktoren auf die Frostgefährdung von Straßen, München/Berlin, Bundesanstalt für Straßenbau, Wissenschaftliche Berichte, Heft 3
- Kübler, H. (1963), Theoretische Spannungen beim Gefrieren von Straßen, Baufundamenten und Seen, Der Bauingenieur, 38, Heft 9, S. 358-360
- Kubo, H. / Suzuki, T. (1993), Experiments with frost-heave prevention in concrete troughs, in: Frost in Geotechnical Engineering (1993), S. 89-96
- Kujala, K. (1991), Assessment of frost susceptibility of soils, in: Ground Freezing 91 (1991), Vol. I, S. 49-54
- Kujala, K. (1993), Evaluation of factors affecting frost susceptibility in soils, in: Frost in Geotechnical Engineering (1993), S. 83-87
- Kujala, K. / Laurinen, K. (1989), Freeze-thaw effects on thaw settlement and pore pressure, in: Frost in Geotechnical Engineering (1989), Vol. 2, S. 523-533
- Kujala, K. / Ravaska, O. (1989), Influence of test conditions and equipment on the frost heave test, in: Frost in Geotechnical Engineering (1989), Vol. 2, S. 931-944
- Kumor, M. K. (1989), An increase in clays frost heave resulting from frost change in microstructure, in: Frost in Geotechnical Engineering (1989), Vol. 2, S. 535-545
- Kumor, M. K. (1993), The swelling of cyclic frozen expansive clay soils in the environment contaminated by sodium chloride, in: Frost in Geotechnical Engineering (1993), S. 97-102
- Ladanyi, B. / Shen, M. (1989), Mechanics of freezing and thawing in soils, in: Frost in Geotechnical Engineering (1989), Vol. 1, S. 73-103
- Ladanyi, B. / Shen, M. (1991), Pressure variation on a wellbore casing during permafrost thawing, in: Ground Freezing 91 (1991), Vol. 1, S. 245-250
- Lagaly, G. (1988), Grundzüge des rheologischen Verhaltens wässriger Tonmineraldispersionen, in: Tonmineralogie und Bodenmechanik, Zürich, S. 7-22
- Lahav, N. / Anderson, D. M. (1973), Montmorillonite-benzidine reactions in the frozen and dry states, Clays and Clay Minerals, 21, S. 137-139
- Lautridou, J. P. / Ozouf, J. C. (1982), Experimental frost shattering: 15 years of research at the Centre de Géomorphologie du CNRS, Progress in Physical Geography, 6, 2, S. 215-232
- Lebedenko, Y. P. / Shevchenko, L. V. (1988), Cryogenic deformations in fine-grained soils, Proc. 5th Int. Conf. on Permafrost, Trondheim, Norwegen, Vol. 1, S. 396-400
- Lehmann, P. (1956), Frostschutz durch biologische und Kulturmaßnahmen, ferner durch Bedecken und kombinierte Methoden, Mitteilungen des Deutschen Wetterdienstes, Bad Kissingen, Band 3, Nr. 16, S. 16/55-16/61
- Liljequist, G. H. / Cehak, K. (1979), Allgemeine Meteorologie, Braunschweig/Wiesbaden
- Livet, J. (1981), Experimental method for the classification of soils according to their frost susceptibility, France, Frost i Jord, Nr. 22, S. 13-22
- Livet, J. (1981), Technical and regulatory aspects of traffic restrictions during thawing period for public roads in France, Frost i Jord, Nr. 22, S. 23-26

- Loch, J. P. G. / Kay, B. D. (1978), Water redistribution in partially frozen, saturated silt under several temperature gradients and overburden loads, *Soil Science Society of America, Journal*, 42, Heft 3, S. 400-406
- Loch, J. P. G. / Miller, R. D. (1975), Tests of the concept of secondary frost heaving, *Soil Science Society of America, Proceedings*, Vol. 39, S. 1036-1041
- Low, P. F. (1968), Some thermodynamic relationships for soils at or below the freezing point: 1. Freezing point depression and heat capacity, *Water Resour. Res.*, 4, 2, S. 379-394
- Luckner, L. / Schreiber, G. (1982), Parametermodelle für die Saugspannungs-Sättigungs-Verteilung und den kapillaren k-Wert ungesättigter Böden, *Geol. Geoph. Veröff.*, R IV, Heft 32, S. 99-109
- Ludwig, S. (1993), Frostgefährdung toniger Deponiebarrieren - Gefrierverhalten, bodenmechanische Eigenschaften, Mikrogefüge -, Dissertation Universität Karlsruhe, Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, Nr. 26
- Madsen, F. (1993a), Das Ton-Elektrolytsystem, in: *Tonmineralogie für die Geotechnische Praxis*, Veröff. des Grundbauinst. der LGA Bayern, hrsg. von E. Gartung, Nürnberg, Heft 64, S. 45-52
- Madsen, F. (1993b), Der Einfluß von Chemikalien auf die Eigenschaften von Ton, in: *Tonmineralogie für die Geotechnische Praxis*, Veröff. des Grundbauinst. der LGA Bayern, hrsg. von E. Gartung, Nürnberg, Heft 64, S. 53-64
- Madsen, F. T. / Müller-Vonmoos, M. (1988), Das Quellverhalten der Tone, in: *Tonmineralogie und Bodenmechanik*, Zürich, S. 39-50
- Mageau, D. W. / Morgenstern, N. R. (1980), Observations on moisture migration in frozen soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 17, S. 54-60
- Maksimenko, E. S. / Ponomarev, V. D. / Sorokin, V. A. / Fedoseev, Y. G. (1986), Determination of the deformation characteristics of frozen soils by the method of test thawing, *Osn. Fundam. Mekh, Gruntov*, 6, S. 21-22
- Malcolm Pirnie [Engineers, Inc.] (1989), Palmer street landfill closure/post-closure plan, Report submitted to the N.Y. State Dept. of Environmental Conservation Bureau of Hazardous Waste, White Plains, NY
- Matsuoka, N. (1990), Mechanisms of rock breakdown by frost action: an experimental approach, *Cold Regions Science and Technology*, 17, S. 253-270
- McCabe, E. Y. / Kettle, R. J. (1985), Soil freezing response: Influence of test conditions, *Geotechnical Testing Journal*, 8, Nr. 2, S. 49-58
- McCormick, G. (1993), Frost penetration beneath cleared pavements, in: *Frost in Geotechnical Engineering* (1993), S. 117-126
- McIlveen, J. F. R. (1986), *Basic meteorology*, Berkshire (England)
- Mikhailov, G. D. / Bredyuk, G. P. (1966), Shear strength of clayey ground during thawing (according to laboratory and field studies), [zuerst in: *Materials of the 8th All-Union Interdepartmental Conference on Geocryology*, USSR Academy of Sciences, Siberian Department, Cryopedology Institute, Nr. 5, S. 51-60,] TL 265, CRREL Draft Translations 1971, 71-T-23, S. 1-9
- Miller, R. D. (1963), Phase equilibria and soil freezing, *Proc. Int. Conf. on Permafrost*, S. 193-197
- Miller, R. D. (1972), Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils, *Highway Res. Rec.*, Nr. 393, S. 1-11

- Miller, R. D. (1973), Soil freezing in relation to pore water pressure and temperature. Proc. 2nd Int. Conf. on Permafrost, S. 344-352
- Miller, R. D. / Loch, J. P. G. / Bresler, E. (1975), Transport of water and heat in a frozen permeameter, Soil Science Society of America, Proceedings, Vol. 39, S. 1029-1036
- Millot, G. (1970), Geology of clays, New York
- Mitchell, J. K. (1956), The fabric of natural clay and its relation to engineering properties, Highway Research Board, Nr. 22, S. 673-713
- Mitchell, J. K. (1960), Fundamental aspects of thixotropy in soils, Proc. ASCE - SM - 3, 2522, S. 1952
- Mitchell, J. K. (1976), Fundamentals of soil behaviour, New York/London/Sydney/Toronto
- Mitchell, J. K. / Younger, J. S. (1967), Abnormalities in hydraulic flow through fine-grained soils, Permeability and Capillarity of Soils, ASTM STP 417, Am. Soc. Testing Materials, S. 106-141
- Möller, Fritz (1973a/b), Einführung in die Meteorologie, Band 1 und 2, Mannheim
- Morgenstern, N. R. / Nixon, J. F. (1971), One-dimensional consolidation of thawing soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 8, S. 558-565
- Moroto, N. / Sakurada, T. (1989), Frost susceptibility of soils in Aomori province, Japan, in: Frost in Geotechnical Engineering (1989), Vol. 2, S. 547-556
- Müller-Vonmoos, M. / Løken, T. (1988), Das Scherverhalten der Tone, in: Tonmineralogie und Bodenmechanik, Zürich, S. 23-37
- Nadeau, P. H. (1985), The physical dimensions of fundamental clay particles, Clay Min., Nr. 20, S. 499-514
- Nadeau, P. H. (1987), Clay particle engineering: a potential new technology with diverse applications, Appl. Clay Sciences, 2, S. 83-94
- Nagasawa, T. / Umeda, Y. (1985), Effects of the freeze-thaw process on soil structure, in: Ground Freezing (1985), Vol. II, S. 219-224
- Nakano, Y. (1980), Traveling wave solutions of saturated-unsaturated flow through porous media, Water Resources Research, Vol. 16, Nr. 1, S. 117-122
- Nakano, Y. (1986), On the stable growth of segregated ice in freezing soil under negligible overburden pressure, Adv. Water Resources, Vol. 9, S. 223-235
- Nakano, Y. (1990), Quasi-steady problems in freezing soils: I. Analysis on the steady growth of an ice layer, Cold Regions Science and Technology, 17, S. 207-226
- Nakano, Y. (1991), Transport of water through frozen soils, in: Ground Freezing 91 (1991), Vol. II, S. 65-70
- Nakano, Y. / Horiguchi, K. (1985), Role of phase equilibrium in frost heave of fine-grained soil under negligible overburden pressure, Advances in Water Resources, 8, S. 50-68
- Nakano, Y. / Tice, A. R. (1988), A method for measuring the rate of water transport due to temperature gradients in unsaturated frozen soils, Proc. 5th Int. Conf. on Permafrost, Trondheim, Norwegen, Vol.1, S. 412-417
- Neiß, J. (1982), Numerische Simulation des Wärme- und Feuchtetransports und der Eisbildung in Böden, Düsseldorf, Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 3: Verfahrenstechnik, Nr. 73

- Nieminen, P. (1989), Porosity and related properties of frost susceptible tills, in: Frost in Geotechnical Engineering (1989), Vol. 2, S. 557-564
- Nordal, R. S. / Refsdal, G. (1989), Frost protection in design and construction, in: Frost in Geotechnical Engineering (1989), Vol. 1, S. 127-163
- NRW-Richtl. 1993, Mineralische Deonieabdichtungen - Richtlinie -, Düsseldorf 1993, Abfallwirtschaft NRW, Nr. 18
- Nüesch, R. (1993a), Das Mikrogefüge in Tongesteinen, in: Tonmineralogie für die Geotechnische Praxis, Veröff. des Grundbauinst. der LGA Bayern, hrsg. von E. Gartung, Nürnberg, Heft 64, S. 33-44
- Nüesch, R. (1993b), Quellfähige Gesteine, in: Tonmineralogie für die Geotechnische Praxis, Veröff. des Grundbauinst. der LGA Bayern, hrsg. von E. Gartung, Nürnberg, Heft 64, S. 65-80
- Ogata, N. / Kataoka, T. / Komiya, A. (1985), Effect of freezing-thawing on the mechanical properties of soil, in: Ground Freezing (1985), Vol. 1, S. 201-207
- Ogawa, S. / Nishimura, T. / Fukuda, M. (1991), Influence of freezing and thawing on suction of unsaturated soils, in: Ground Freezing 91 (1991), Vol. 1, S. 71-76
- Oliphant, J. L. / Tice, A. R. / Nakano, Y. (1983), Water migration due to a temperature gradient in frozen soil, Proc. 4th Int. Conf. on Permafrost, Fairbanks, S. 951-956
- Orlov, V. O. / Fursov, V. V. (1988), Settlements of the foundations on seasonally freezing, Proc. 5th Int. Conf. on Permafrost, Trondheim, Norwegen, Vol. 2, S. 1441-1445
- Osipov, V. I. (1975), Structural bonds and the properties of clay, Bull. Int. Assoc. Engineering Geology, Nr. 12, S. 13-20
- Oster, J. D. / Low, P. F. (1964), Heat capacities of clay and clay-water mixtures, Soil Science Society of America, Proceedings, Vol. 28, S. 605-609
- Osterberg, J. O. (1940), A survey of the frost-heaving problem, Civil Engineering, Vol. 10, Nr. 2, S. 100-102
- Oswell, J. M. / Graham, M. D. (1987), Thawing frozen ground: Field trials and analysis, Journal of Cold Regions Engineering, Vol. 1, Nr. 2, S. 76-87
- Othman, M. A. (1992), Effect of freeze-thaw on the structure and hydraulic conductivity of compacted clays, PhD thesis, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisc.
- Othman, M. A. / Benson, C. H. / Chamberlain, E. J. / Zimmie, T. F. (1993), Laboratory testing to evaluate changes in hydraulic conductivity of compacted clays caused by freeze-thaw: State-of-the-art, Hydraulic conductivity and waste containment transport in soils, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1142, Philadelphia
- Paruvakat, N. (1993), Effects of freezing on hydraulic conductivity of compacted clay, Discussion, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, Nr. 11, S. 1862-1864
- Penner, E. (1958), Pressures developed in a porous granular system as a result of ice segregation, Special Report, Transportation Research Board, Nat. Res. Council, Washington, S. 191-199
- Penner, E. (1960), The importance of freezing rate in frost action in soils, Proceedings of ASTM, Vol. 60, S.1151-1165

- Phukan, A. P. E. (1989), Preventing measures against frost actions in soils, in: Frost in Geotechnical Engineering (1989), Vol. 2, S. 749-769
- Ponomarev, V. D. (1984), Evaluation the accuracy of laboratory compression tests of thawing soils, Osn., Fundam. Mekh. Gruntov, 5, S. 24-25
- Ponomarev, V. D. / Sorokin, V. A. / Fedoseev, Y. G. (1988), Compressibility of sandy permafrost during thawing, Soil Mechanics and Foundation Engineering, 25, 3, S. 124-128 [Übersetzung aus: Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov, Nr. 3, 1988, S. 20-22]
- Ponomarev, V. D. / Vodolazkin, V. A. / Sorokin, V. A. / Fedoseev, Y. G. (1980), A method of determining the compressibility of frozen soils during their thawing, Otkr. Izobret., 21, S. 164
- Porebska, M. (1994), mündliche Mitteilungen
- Proceedings of The Third International Symposium on Ground Freezing (1982), 22-24 June 1982, US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, USA
- Pruppacher, H. R. (1967), Some relations between the structure of the ice-solution interface and the free growth rate of ice crystals in supercooled aqueous solutions, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 25, S. 285-294
- Pusch, R. (1973), Influence of organic matter on the geotechnical properties of clays, National Swedish Building Research Summaries, D11:1973, Statens institut för byggnadsforskning, Stockholm
- Pusch, R. (1977), Ice formation in clays with special reference to their microstructural constitution, Proc. Int. Symp. Frost Action in Soils, Luleå, Schweden, S. 137-142
- Raats, P. A. C. / Klute, A. (1968), Transport in soils: The balance of mass, Soil Science Society of America, Proceedings, Vol. 32, S. 161-166
- Rao, S. Ramachandra / Hanley, T. O. (1980), Freezing potentials in wet clays, II. Specific systems, Cold Regions Science and Technology, Vol. 3, S. 169-175
- Raznjevic, K. (1976), Handbook of thermodynamic tables and charts, Washington/ London
- RdErl. Nds. 1988, Durchführung des Abfallgesetzes, Abdichtung von Deponien für Siedlungsabfälle, RdErl. d. MU v. 24.6.1988, - 207-62812/21 - , Nds. MBl. Nr. 22/1988, S. 632-639 [mit der Ergänzung:] Durchführung des Abfallgesetzes, Anforderungen an Deponiestandorte für Siedlungsabfälle, RdErl. d. MU v. 27.11.1991, - 504-62812/21 B -, Nds. MBl. Nr. 3/1992, S. 86-90
- Reuter, E. (1988), Durchlässigkeitsverhalten von Tonen gegenüber anorganischen und organischen Säuren, Braunschweig, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft Nr. 26
- Reuter, E. (1989), Frostempfindlichkeit mineralischer Deponieabdichtungen, Wasser und Boden, Nr. 3, S. 134-136
- Rieke, R. / Vinson, T. / Mageau, D. (1983), The role of specific surface area and related index properties in the frost heave susceptibility of soils, Proc. 4th Int. Conf. on Permafrost, S. 1066-1071
- Römkens, M. J. M. / Miller, R. D. (1973), Migration of mineral particles in ice with a temperature gradient, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 42, S. 103-111
- Ruckli, R. (1950), Der Frost im Baugrund, Wien

- Rydén, C. G. (1985), Pore pressure in thawing soil, in: *Ground Freezing* (1985), Vol. 1, S. 223-228
- Saarelainen, S. M. I (1989), Evaluation of frost heave properties of soils, in: *Frost in Geotechnical Engineering* (1989), Vol. 2, S. 471-480
- Saetersdal, R. (1981), Prediction of the frost susceptibility of soils for public roads in Norway, *Frost i Jord*, Nr. 22, S. 35-36
- Sage, J. D. / D'Andrea, R. A. (1982), Measurement of soil thaw weakening, in: *Proc. 3rd Int. Symp. on Ground Freezing*, Hanover, S. 105-112
- Sage, J. D. / D'Andrea, R. A. (1989), Use of thermal inserts to reduce heaving on existing roadways, in: *Frost in Geotechnical Engineering* (1989), Vol. 2, S. 821-830
- Sanger, F. J. (1959), Diskussion zu Kersten, M. S.: Frost penetration: relationship to air temperature and other factors, *Highway Research Board, Bulletin*, 225, S. 63-73
- Sayles, F. H. / Baker, T. H. W. / Gallavres, F. / Jessberger, H. L. / Kinoshita, S. / Sadovskiy, A. V. / Segó, D. / Vyalov, S. S. (1987), Classification and laboratory testing of artificially frozen ground, *Journal of the Cold Regions Engineering*, Vol. 1, Nr. 1, S. 22-48
- Schababerle, R. (1989), Stofftransport und Gefügeänderungen beim partiellen Gefrieren von Ton-Barrieren, *Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe*, Nr. 7
- Schababerle, R. / Wagner, J.-F. / Czurda, K. A. (1988), Der Einfluß von Frost-Tau-Zyklen auf das Gefüge von Tonen, *Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe*, Nr. 4
- Schababerle, R. / Wagner, J.-F. / Czurda, K. A. (1989), Influence of freeze-thaw cycles on clay structures, *5th Int. Symp. on Ground Freezing*, S. 573-578
- Schaible, L. (1957), *Frost- und Tauschäden an Verkehrswegen und deren Bekämpfung*, Berlin
- Scheffer, F. / Schachtschabel, P. (1989), *Lehrbuch der Bodenkunde*, 12. Aufl., Stuttgart
- Scheidig, A. (1934), Das Kriterium für die Frostempfindlichkeit von Erdstoffen im Straßenbau, *Die Bautechnik*, S. 484
- Schneider, K. (1984), *Bautabellen*, 6. Aufl., Düsseldorf
- Scholz, J. (1989), Zur Bestimmung des Anteils ungefrorener Feuchte in teilweise gefrorenen Böden, *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden*, 38, Heft 5/6, [zugleich:] Separatreihe 5 'Bau, Wasser- und Forstwesen', Nr. 29/30, S. 271-274
- Schönwiese, C.-D. (1990), Grundlagen und neue Aspekte der Klimatologie, Hrsg. vom Fachbereich Geowiss. der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität, Frankfurt am Main, 2. Aufl., Frankfurt a. M., *Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie B, Meteorologie und Geophysik*, Bd. 2
- Schuh, H. (1957), Differenzenverfahren zum Berechnen von Temperatur-Ausgleichsvorgängen bei eindimensionaler Wärmestrahlung in einfachen und zusammengesetzten Körpern, *Düsseldorf, VDI-Forschungsheft 459, Beilage zu "Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens"*, Ausgabe B, Band 23
- Schwarz, T. (1989), Der Einfluß des Frostes auf die bodenmechanischen Eigenschaften von Böden, *Diplomarbeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig*, [unveröffentlicht]

- Sehrbrock, U. / Rodatz, W. (1988), Untersuchung der mineralischen Abdichtung einer Gewerbemülldeponie, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, [unveröffentlicht]
- Sheng, D. (1991), Status of frost heave simulation, Research Report, Tulea 1991:20, University of Technology, Luleå, Sweden
- Sheng, D. / Knutsson, S. (1993), Sensitivity analysis of frost heave - A theoretical study, in: Frost in Geotechnical Engineering (1993), S. 3-16
- Sherwood, P. T. (1981), British experience with the frost-susceptibility of roadmaking materials, Frost i Jord, Nr. 22, S. 49-54
- Shusherina, Y. P. (1959), Variation of physico-mechanical properties of soils under the action of cyclic freeze-thaw, [zuerst in: Seventh Interdepartmental Conference on Permafrostology, Materials on Physics and Mechanics of Frozen Soils, Moscow, S. 48-55,] TL 266, CRREL Draft Translations 1971, S. 1-10
- Siedek, P. (1977), Frostschäden und Frostschutzmaßnahmen, in: Handbuch des Straßenbaus, Band 2
- Skarzynska, K. M. (1985), Formation of soil structure under repeated freezing-thawing conditions, in: Ground Freezing (1985), Vol. II, S. 213-218
- Sluzalec, A. (1989), Groundwater flow effects in processes of soil freezing, Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 15, 399-409
- Smolczyk, H. U. (1962), Neue Erkenntnisse der Tonmechanik, Baugrundtagung Essen, S. 265-283
- Sonderegger, U. C. (1985), Das Scherverhalten von Kaolinit, Illit und Montmorillonit, Zürich, Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der ETH Zürich, Nr. 129
- Sowers, G. F. (1993), Effects of freezing on hydraulic conductivity of compacted clay, Discussion, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, Nr. 11, S. 1864-1865
- Starke, J. O. (1989), Effect of freeze-thaw weather conditions on compacted clay liners, Proc. 12th Annual Waste Conference, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, S. 187-208
- Stenberg, L. (1989a), Application of direct freezing tests in dimensioning frost protection for roads, in: Frost in Geotechnical Engineering (1989), Vol. 2, S. 565-572
- Stenberg, L. (1989b), Laboratory equipment for studies of frost susceptibility of soils [schwedisch], VTI meddelande, 609
- Stephan, K. / Mayinger, F. (1990), Thermodynamik, Band 1: Einstoffsysteme, 13. Aufl., Berlin/Heidelberg/New York
- Stepkowska, E. T. / Skarzynska, K. M. (1989), Microstructural changes in clays due to freezing, in: Frost in Geotechnical Engineering (1989), Vol. 2, S. 573-582
- Stern, O. (1924), Zur Theorie der elektrischen Doppelschicht, Zeitschrift Elektrochemie, Nr. 30, S. 508-516
- Susherina [sic!], Y. P. / Tsytoich, N. A. (1967), Experiments on the effects of freezing and subsequent thawing on clay strength, CRREL Draft Translation 285
- Swartzendruber, D. (1968), The application of Darcy's Law, Proc. Soil Science Society of America, Vol. 32, S. 11-18

- TA Abfall 1991, Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen in der ab 1. April 1991 geltenden Fassung, Bundesanzeiger Verlagsges., Köln
- TA Siedlungsabfall 1993, Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen sowie Ergänzende Empfehlungen zur TA Siedlungsabfall des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bundesanzeiger Verlagsges., Köln
- Taber, S. (1929), Frost heaving, *Journal of Geology*, Vol.37, Nr. 5, S. 428-461
- Takeda, K. (1989), Experimental study on ice segregation during soil freezing, Doctoral thesis, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan
- Terzaghi, K. / Peck, R. B. (1961), *Die Bodenmechanik in der Baupraxis*, Berlin/Göttingen/Heidelberg
- Thimus, J. F. / Aguirre-Puente, J. / Cohen-Tenoudji, F. (1991), Determination of unfrozen water content of an overconsolidated clay down to -160°C by sonic approaches - Comparison with classical methods, in: *Ground Freezing 91 (1991)*, Vol. I, S. 83-88
- Thomson, S. / Lobacz, E. F. (1973), Shear strength at a thaw interface, *Proc. 2nd Int. Conf. on Permafrost, Yakutsk, USSR*, 13.-28.7.1973, S. 419-426
- Thorén, H. (1981), Prediction of the frost susceptibility of soils for public roads in Sweden, *Frost i Jord*, Nr. 22, S. 37-38
- Tonmineralogie und Bodenmechanik (1988), Tagung am 15. Mai 1987 an der ETH Zürich, Zürich, Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der ETH Zürich, Nr. 133
- Tovey, N. K. / Frydman, S. / Wong, K. Y. (1974), A study of swelling clay in the scanning electron microscope, *Proc. 3. Int. Conf. Expansive Soils, Haifa (Israel)*, Band 2, Jerusalem, S. 45-54
- U.S. Army Corps of Engineers (1965), *Pavement design for frost conditions*, Dept. EM 1110-1-306
- Udd, J. E. / Yap, S.-M. (1980), Strength reductions due to the thawing of frozen ores, *Proc. 2nd Int. Symp. on Ground Freezing*, 24.-26.06.1980 (ISGF'80), Trondheim, Norwegen, S. 309-324
- Vahäaho, I. T. (1988), Soil freezing and thaw consolidation results for a major project in Helsinki, in: *Ground Freezing 88 (1988)*, S. 219-223
- Vähäaho, I. / Lappalainen, V. / Ryhänen, H. (1989), Thaw consolidation of frozen clays of post-glacial origin in Helsinki, in: *Frost in Geotechnical Engineering (1989)*, Vol. 2, S. 583-600
- Van Loon, W. K. P. / Zeilmaker, J. (1989), The influence of soil physical and chemical parameters on frost behaviour of granular materials, in: *Frost in Geotechnical Engineering (1989)*, Vol. 1, S. 341-352
- Van Olphen, H. (1977), *Clay colloid chemistry*, New York
- Van Vliet-Lanoë, B. / Dupas, A. (1991), Development of soil fabric by freeze/thaw cycles - Its effect on frost heave, in: *Ground Freezing 91(1991)*, Vol. I, S. 189-195

- Vaupel, A. (1959), Advektivfrost und Strahlungsfrost, Mitteilungen des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach, Band 3, Nr. 17
- Vees, E. (1970), Die Gesetzmäßigkeiten der Ionenbeläge und ihre Heranziehung zur Deutung des Verhaltens bodenmechanischer Kenngrößen, Dissertation Universität Stuttgart
- Vignes-Adler, M. (1977), On the origin of the water aspiration in a freezing dispersed medium, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 60, S. 162-171
- Vinson, T. S. / Ahmad, F. / Rieke, R. (1987), Factors important to the development of frost heave susceptibility criteria for coarse-grained soils, *Transportation Research Record*, 1089, S. 124-131
- Voigt, T. (1992), Einwirkung des Frostes auf mineralische Abdichtungsmaterialien, Standsicherheiten im Deponiebau, Fachseminar 30./31. März 1992, zusammengestellt von O. Hemker / T. Voigt, Braunschweig, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 37, S. 305-322
- Vorträge der Tagungen 'Untergrund' am 15.06.1967 in Kiel und 'Erfahrungsaustausch über Frostschutz durch Dämmschichten' am 21.05.1968 in Würzburg [ohne Jahr], Straße und Untergrund IV, Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Neue Folge, Heft 74
- Wada, S. A. / Nagasato (1983), Formation of silica microplates by freezing dilute silica acid solutions, *Soil Sci. Plant Nutr.* 29, S. 93-95
- Wagner, J. F. / Czurda, K. A. (1986), In-situ observations on an expansive clay subjected to freezing and thawing, *Proc. 5th Int. Congr. Int. Ass. Eng. Geology*, 20.-25. October, Buenos Aires, S. 763-768
- Wahl, K. / Kolbe, H. (1987), Bodenfrost in Schluffen/Tonen, Studienarbeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, [unveröffentlicht]
- Weischet, W. (1991), Einführung in die Allgemeine Klimatologie, Physikalische und meteorologische Grundlagen, 5., überarb. und erw. Aufl., Stuttgart, Teubner Studienbücher der Geographie
- Weiss, A. (1988), Über die Abdichtung von Mülldeponien mit Tonen unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses organischer Bestandteile im Sickerwasser, in: *Tonmineralogie und Bodenmechanik*, Zürich, S. 77-90
- Williams, P. J. (1963), Suction and its effect in unfrozen water of frozen soils, *Proc. Intern. Conf. on Permafrost*, S. 225-229
- Williams, P. J. (1966), Pore pressures at a penetrating frost line and their prediction, *Geotechnique*, Vol. 16, Nr. 3, S. 187-208
- Williams, P. J. (1967), The nature of freezing soil and its field behaviour, *Norges Geotekn. Inst. Publ.* 72, S. 91-119
- Williams, P. J. (1977), Thermodynamic conditions for ice accumulation in freezing soils, *Proc. Int. Symp. Frost Action in Soils*, Luleå, Schweden, S. 42-53
- Williams, P. J. (1988), Thermodynamic and mechanical conditions within frozen soils and their effects, *Proc. 5th Int. Conf. on Permafrost*, Trondheim, Norwegen, Vol. 1, S. 493-498
- Winterkorn, H. F. (1959), Wasser im Boden, Straßen- und Tiefbau, Heft 3
- Winterkorn, H. F. / Fehrman, R. G. (1944), The effect of freezing-thawing and wetting-drying cycles on the density and bearing power of five soils, *Soil Science Society of America, Proceedings*, Vol. 9, S. 248-252

- Wojtowicz, U. B. (1989), Changes in grain size distribution in loess soils submitted to freezing, in: *Frost in Geotechnical Engineering (1989)*, Vol. 2, S. 601-610
- Wood, J. L. (1976), Influence of repetitive freeze-thaw on shear strength of Leda (Messena) clay, Ph. D. Dissertation, Clarkson College of Technology, S. 152
- Wu Qingbai / Tong Changjiang (1991), Thaw-consolidation process and calculation of frozen clayly soil, in: *Ground Freezing 91 (1991)*, Vol. 1, S. 89-92
- Xie Yinqi / Wang Jianguo (1985), Effect of saturation level and freeze-thaw cycling on the properties of clayey soil frost heaving, in: *Ground Freezing (1985)*, Vol. 1, S. 197-200
- Xu Xiaozu et. al. (1991), Water and solute migration of freezing soils in closed system under temperature gradients, in: *Ground Freezing 91 (1991)*, Vol. 1, S. 93-98
- Yamaguchi, H. / Ikenaga, H. / Suzuki, S. (1991), Influence of freezing-thawing on undrained triaxial compression shear behavior of fibrous peat, in: *Ground Freezing 91 (1991)*, Vol. 1, S. 197-204
- Yong, R. N. / Boonsinsuk, P. / Murphy, D. (1982), Short-term cyclic freeze-thaw effect on strength properties of a sensitive clay, in: *Proc. 3rd Int. Symp. on Ground Freezing, Hanover*, S. 97-104
- Yong, R. N. / Boonsinsuk, P. / Yin, C. W. P. (1985), Alteration of soil behaviour after cyclic freezing and thawing, in: *Ground Freezing (1985)*, Vol. 1, S. 187-195
- Zachmann, D. (1993), *Berichte zu tonmineralogischen Untersuchungen*, Braunschweig, unveröffentlicht
- Zhang Lixin (1991), The law of unfrozen water content change in frozen saline (NaCl) soils, in: *Ground Freezing 91 (1991)*, Vol. 1, S. 113-119
- Zhestkova, T. N. (1968), Strength and thixotropic properties of thawed soil, [zuerst in: *Transportnoye Stroitel'stvo (Transport Construction)*, Nr. 12, S. 36-38,] CR-REL Draft Translations 1971, 71-T-25, S. 1-6
- Zimmie, T. F. / La Plante, C. (1990), The effect of freeze/thaw cycles on the permeability of a fine-grained soil, *Hazardous and Industrial Waste, Proceedings, 22nd Mid-Atlantic Industrial Waste Conference*, Philadelphia, Pennsylvania, S. 580-593
- ZTVE-StB (1976), *Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau*, Berichtete Fassung 1978, Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen- und Verkehrswesen, Köln
- Zytovich, N. A. (1958), *Unterbauten und Fundamente auf gefrorenem Boden*, Verlag der AN der UDSSR

Anlagen

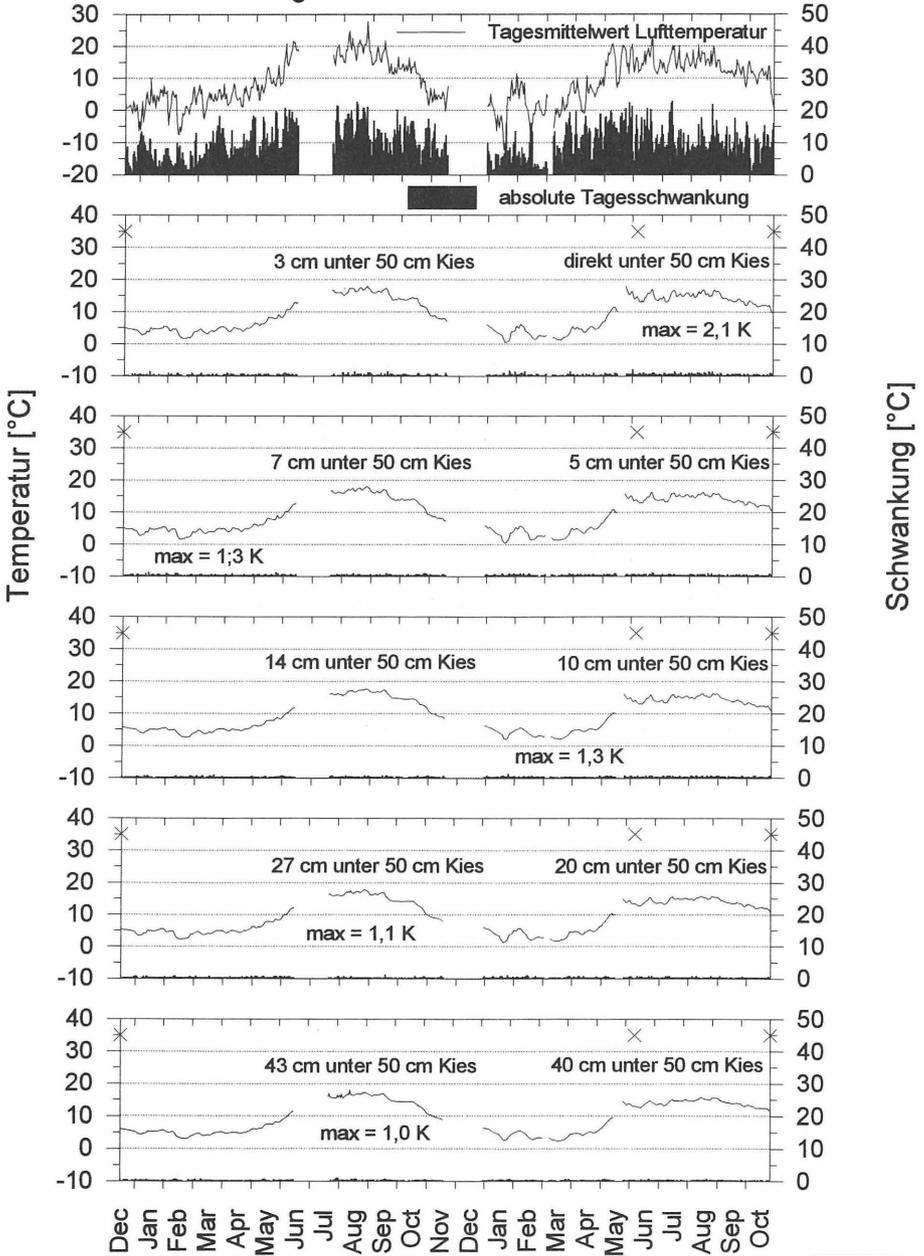
1 bis 12

Tagesmittelwerte
(0:00 Uhr - 24:00 Uhr)
und tägliche Schwankungsbreiten
aller Bodentemperaturen
und Wetterbeobachtungen
an den Versuchsfeldern in situ

Zeitraum :
Dezember 1991 - Oktober 1993

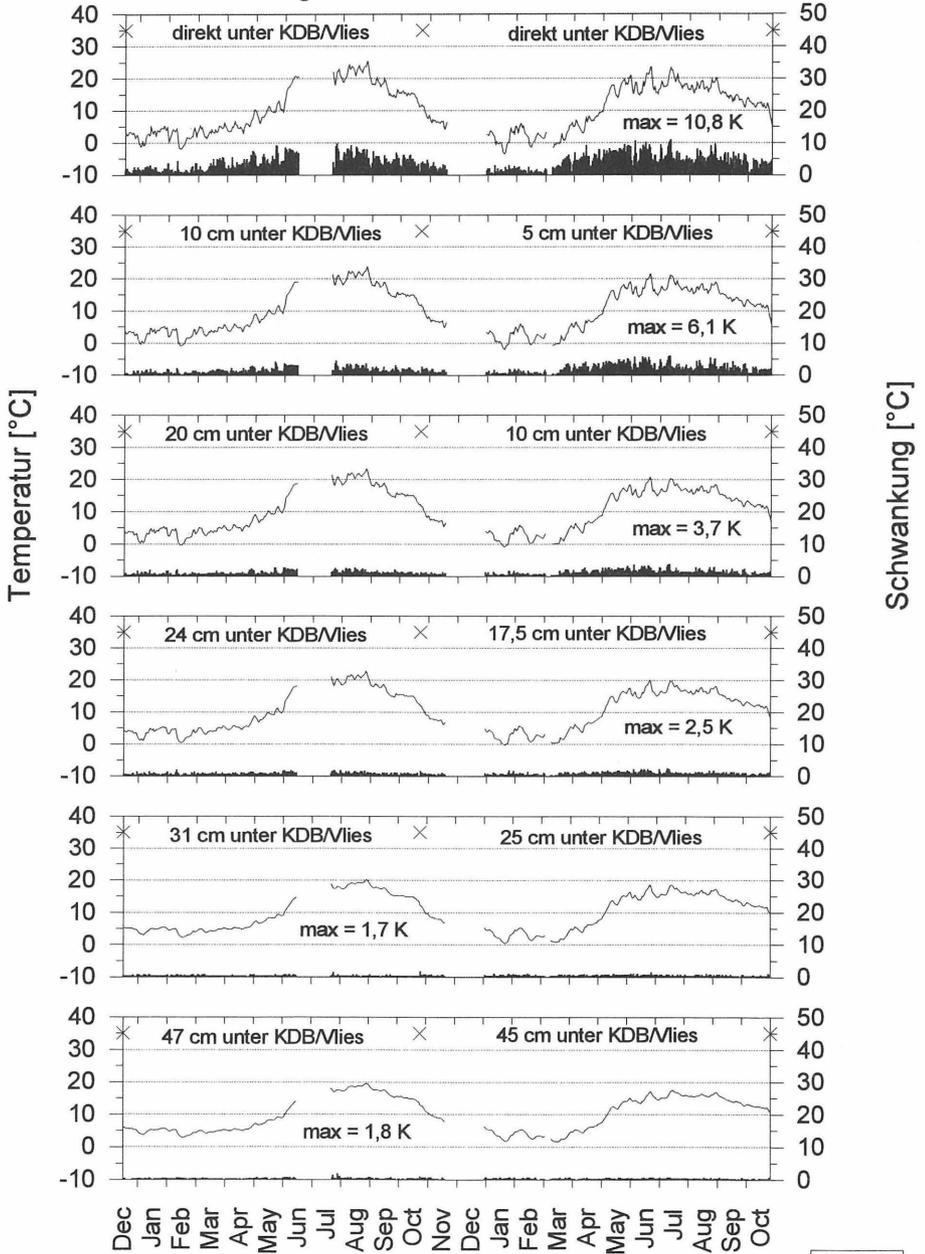
Feld 1

Tagesmittel und tägliche Schwankungen gesamter Meßzeitraum



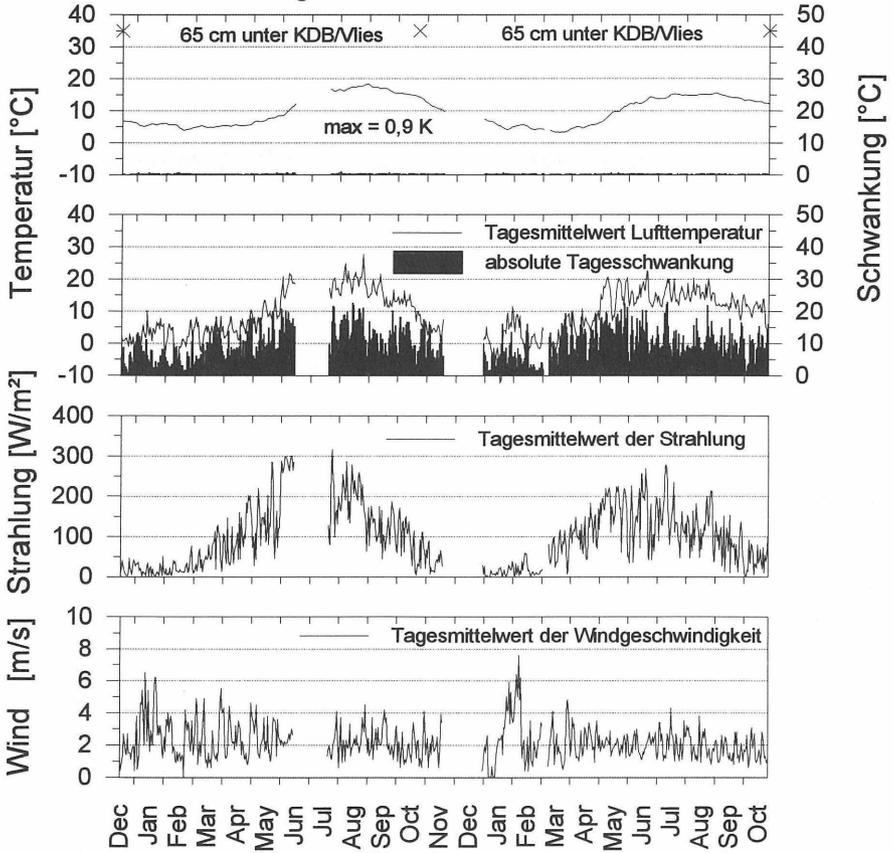
Feld 1

Tagesmittel und tägliche Schwankungen gesamter Meßzeitraum



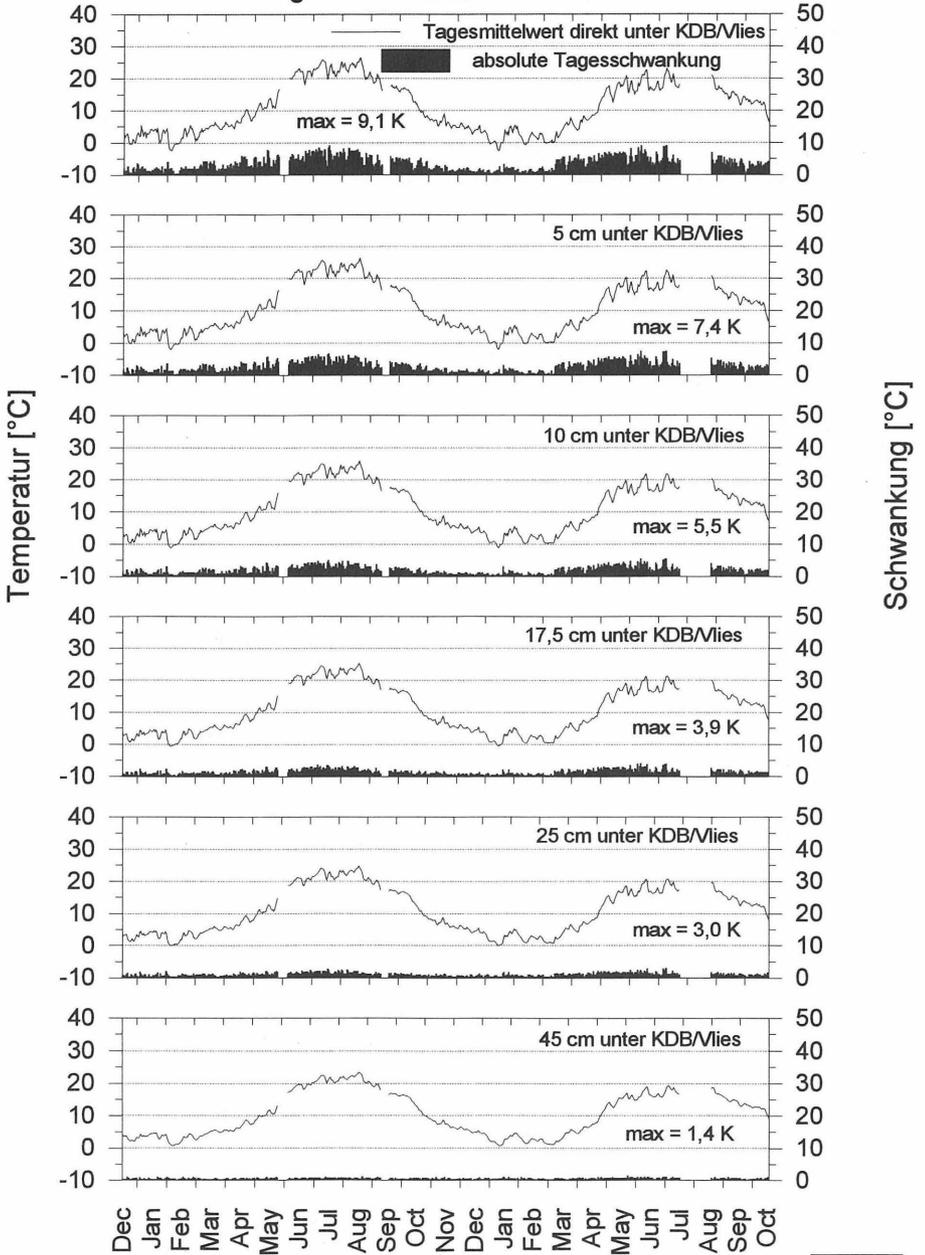
Feld 1

Tagesmittel und tägliche Schwankungen gesamter Meßzeitraum



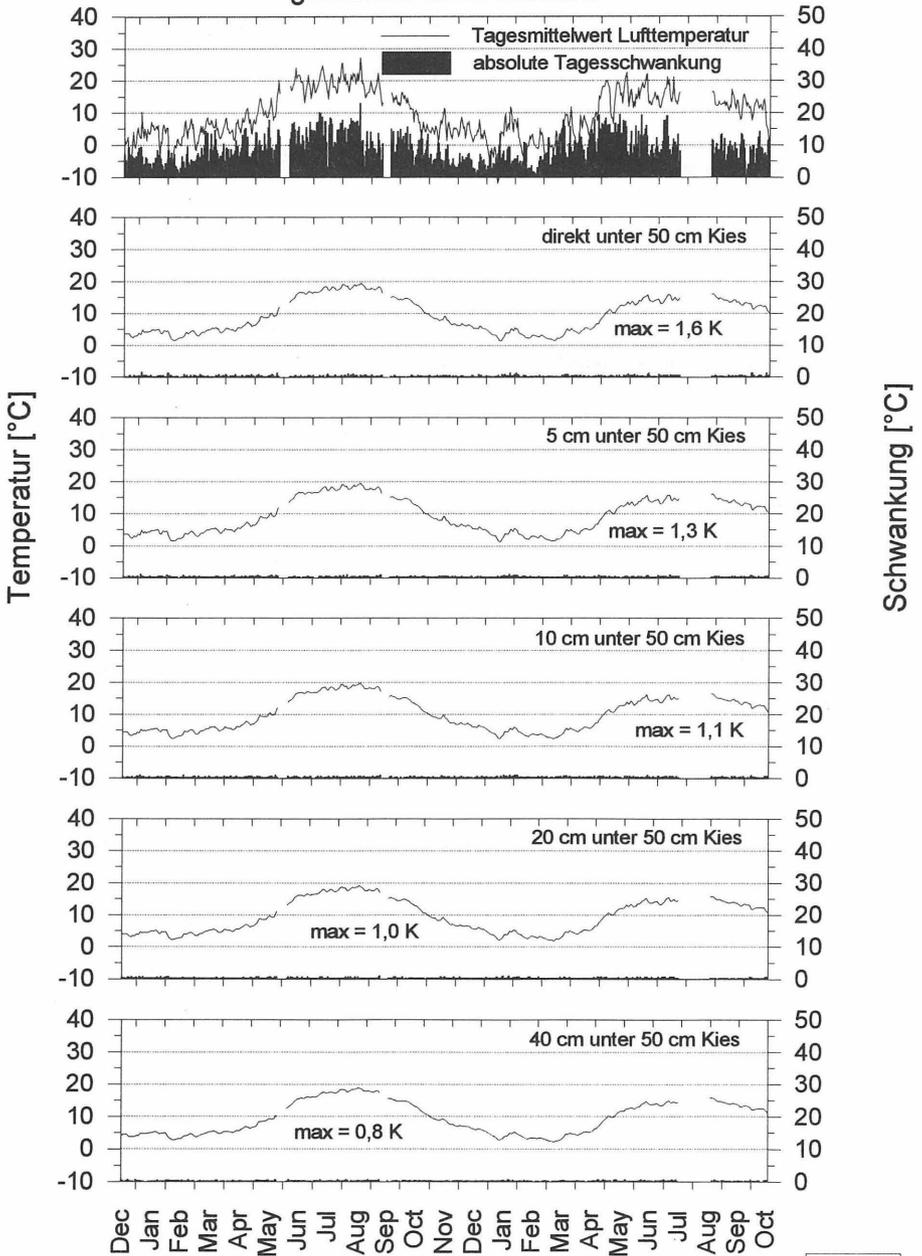
Feld 2

Tagesmittel und tägliche Schwankungen gesamter Meßzeitraum



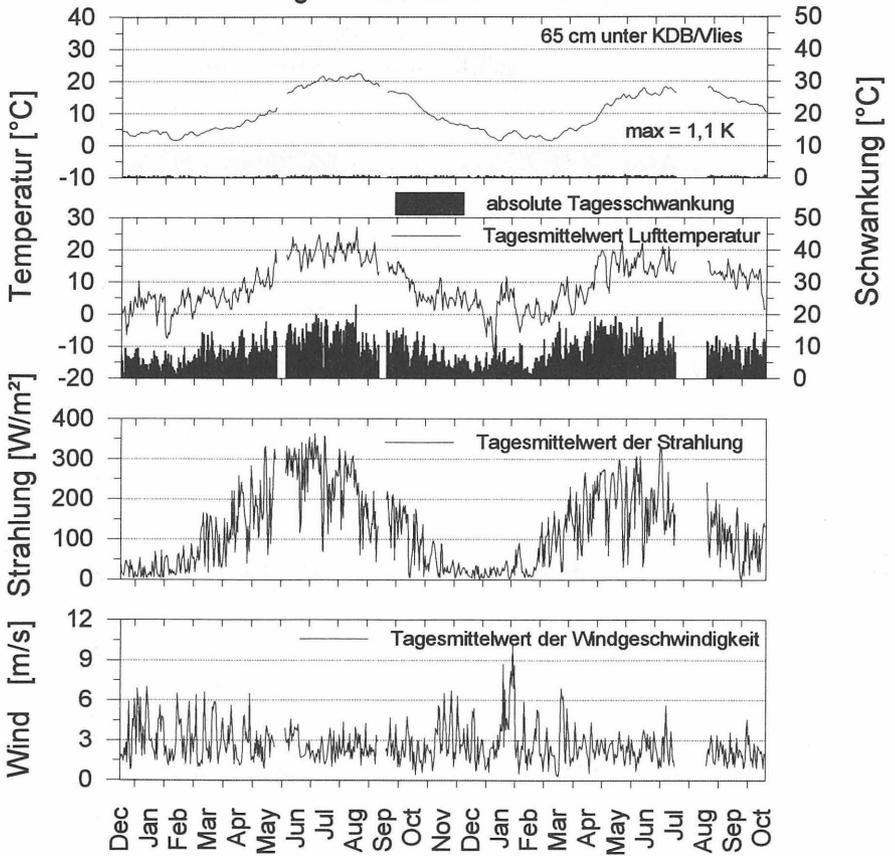
Feld 2

Tagesmittel und tägliche Schwankungen gesamter Meßzeitraum



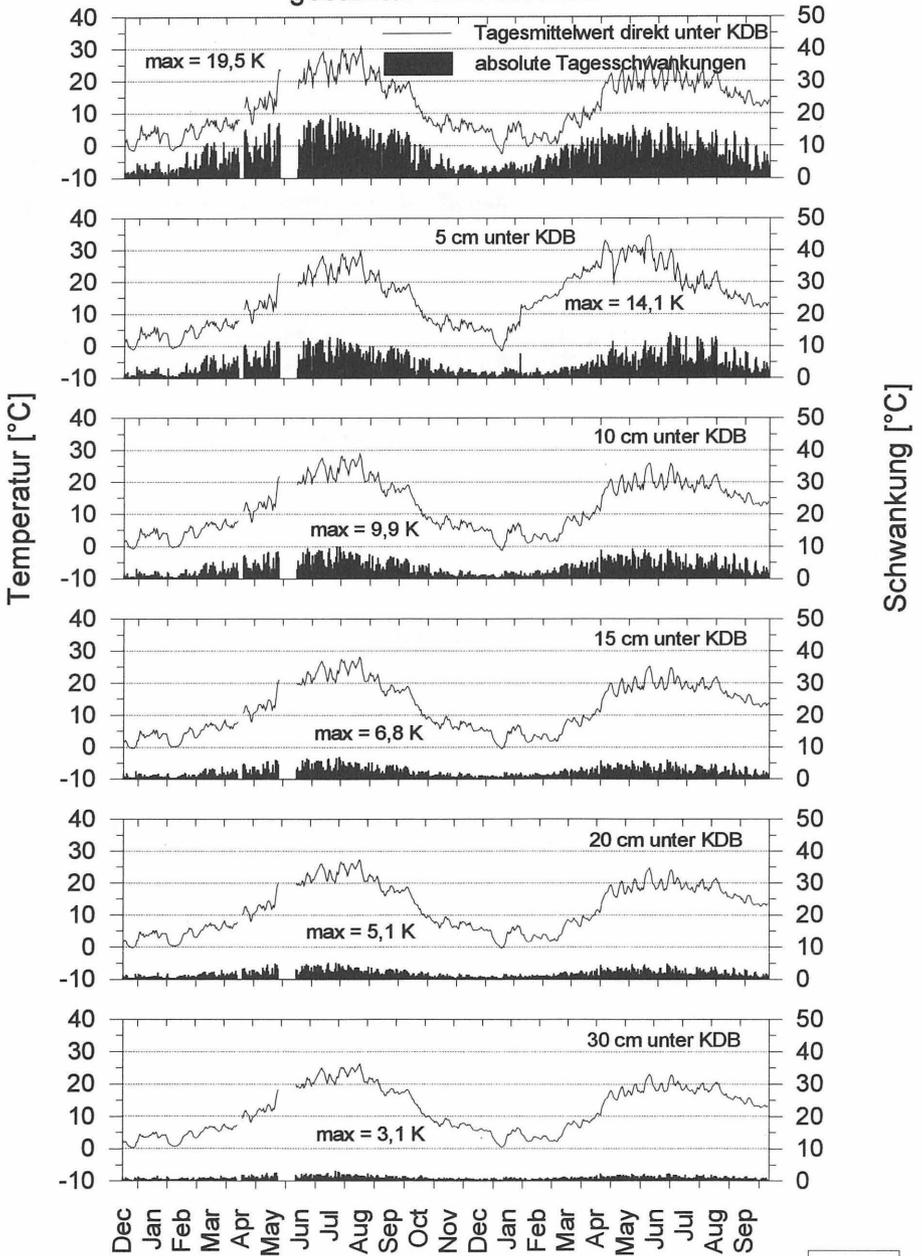
Feld 2

Tagesmittel und tägliche Schwankungen gesamter Meßzeitraum

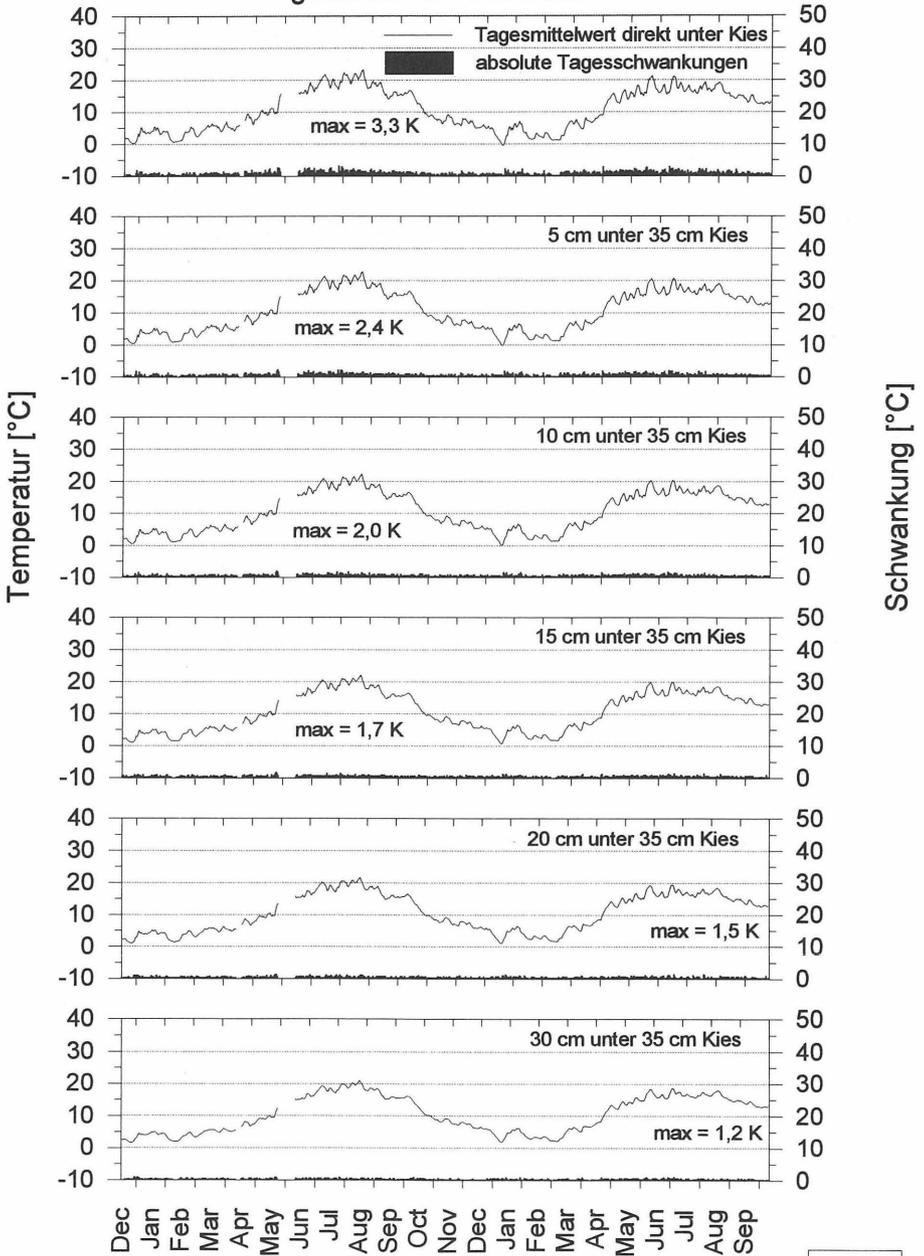


Feld 3

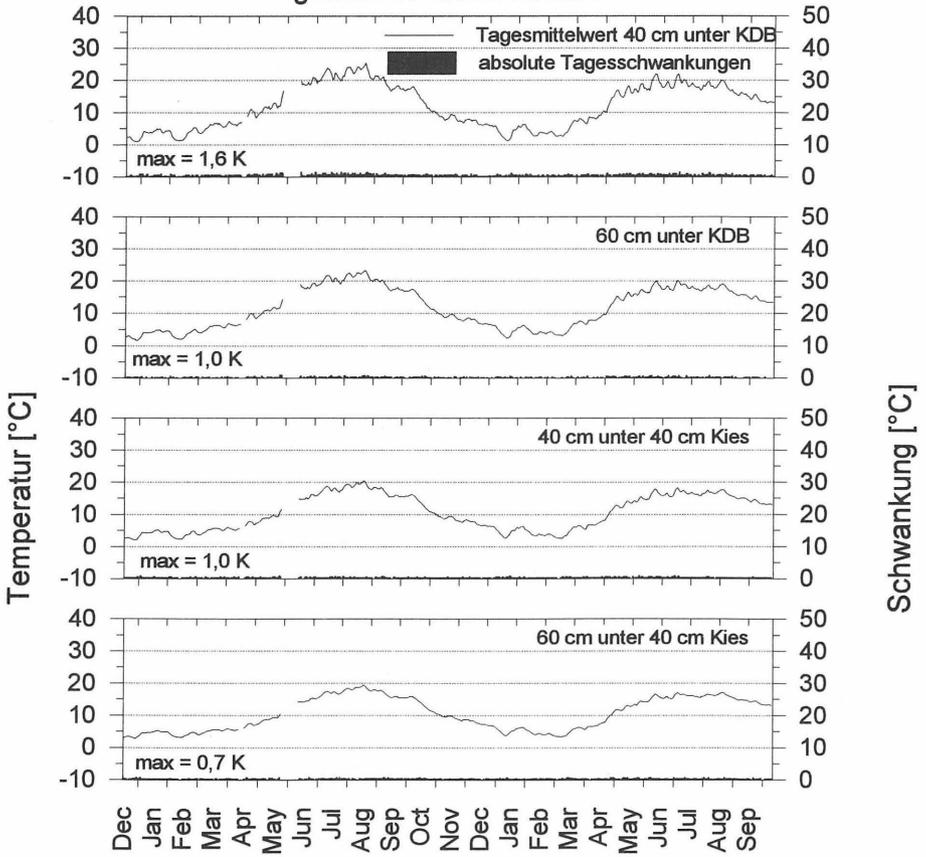
Tagesmittel und tägliche Schwankungen gesamter Meßzeitraum



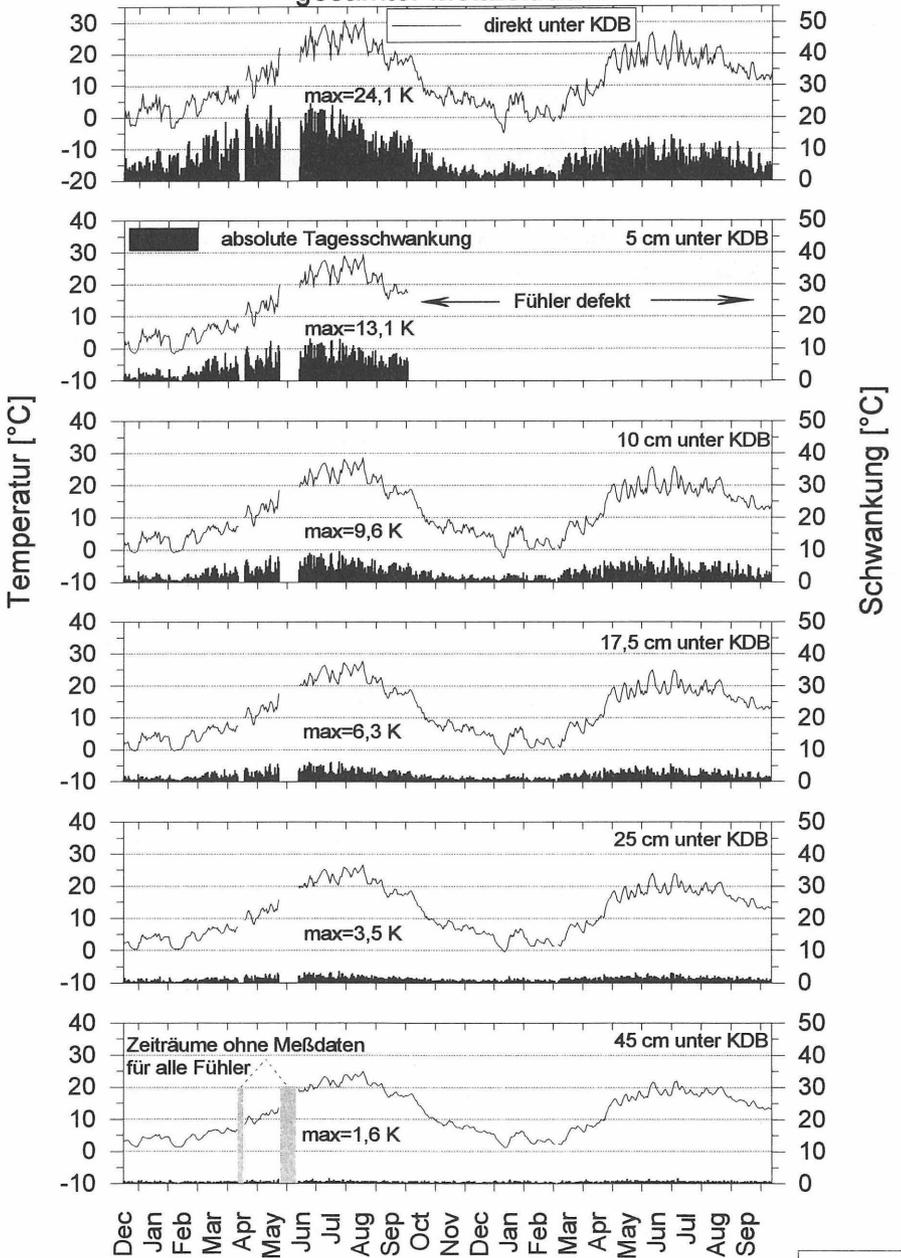
Feld 3 Tagesmittel und tägliche Schwankungen gesamter Meßzeitraum



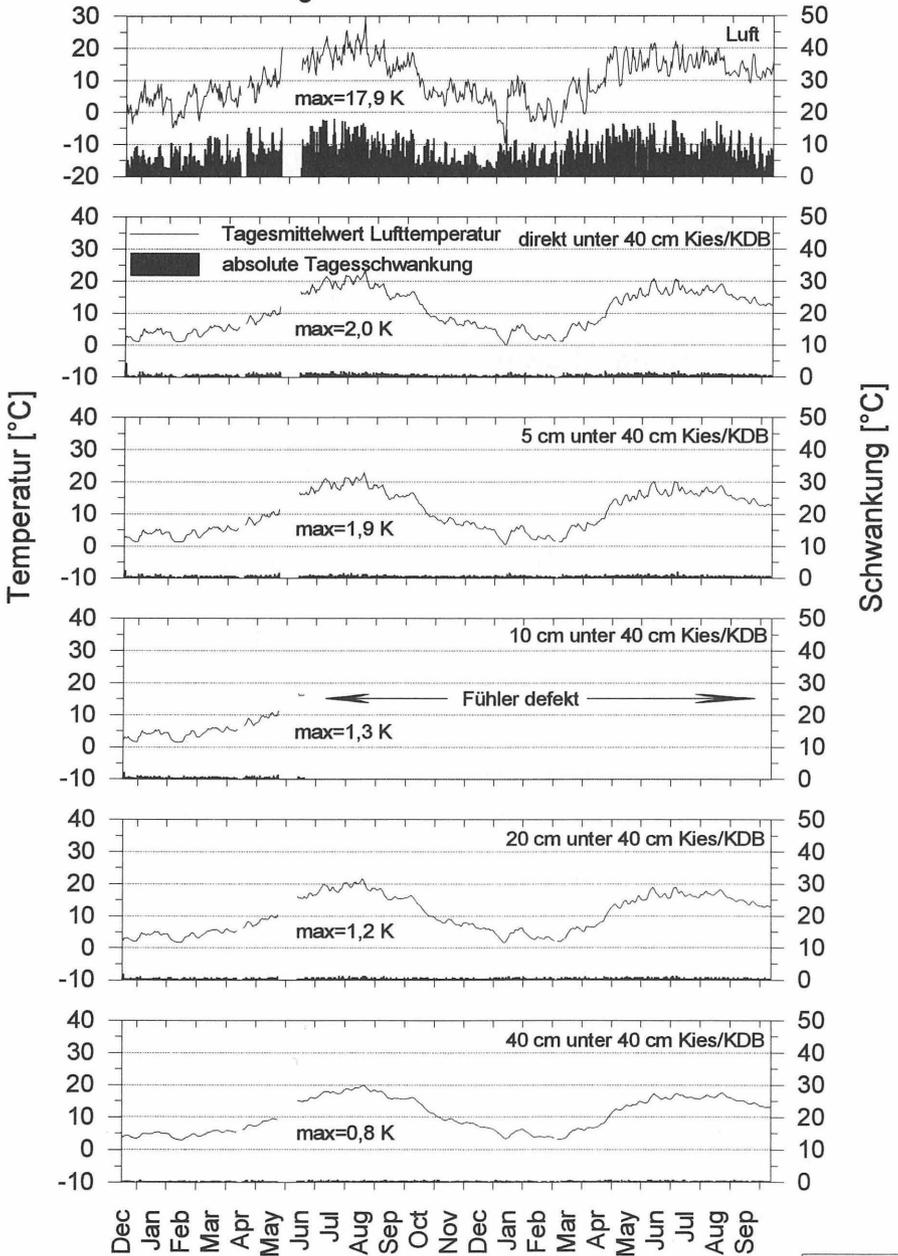
Feld 3 Tagesmittel und tägliche Schwankungen gesamter Meßzeitraum



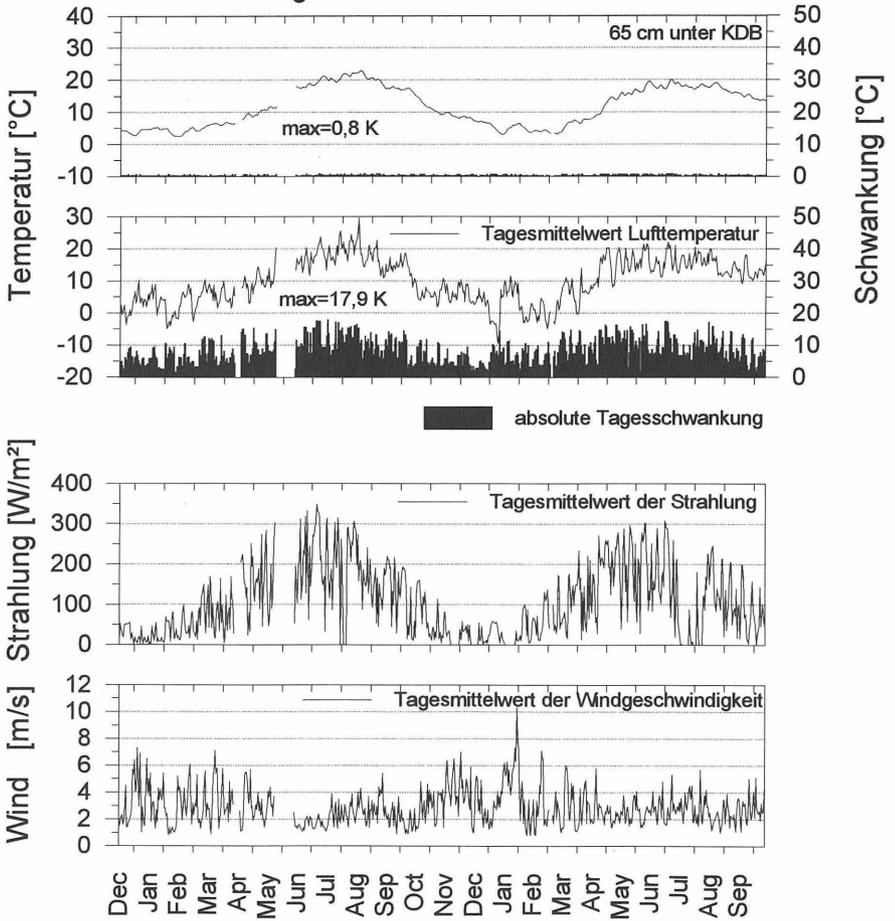
Feld 4 Tagesmittel und tägliche Schwankungen gesamter Meßzeitraum



Feld 4 Tagesmittel und tägliche Schwankungen gesamter Meßzeitraum



Feld 4 Tagesmittel und tägliche Schwankungen gesamter Meßzeitraum



Anlagen

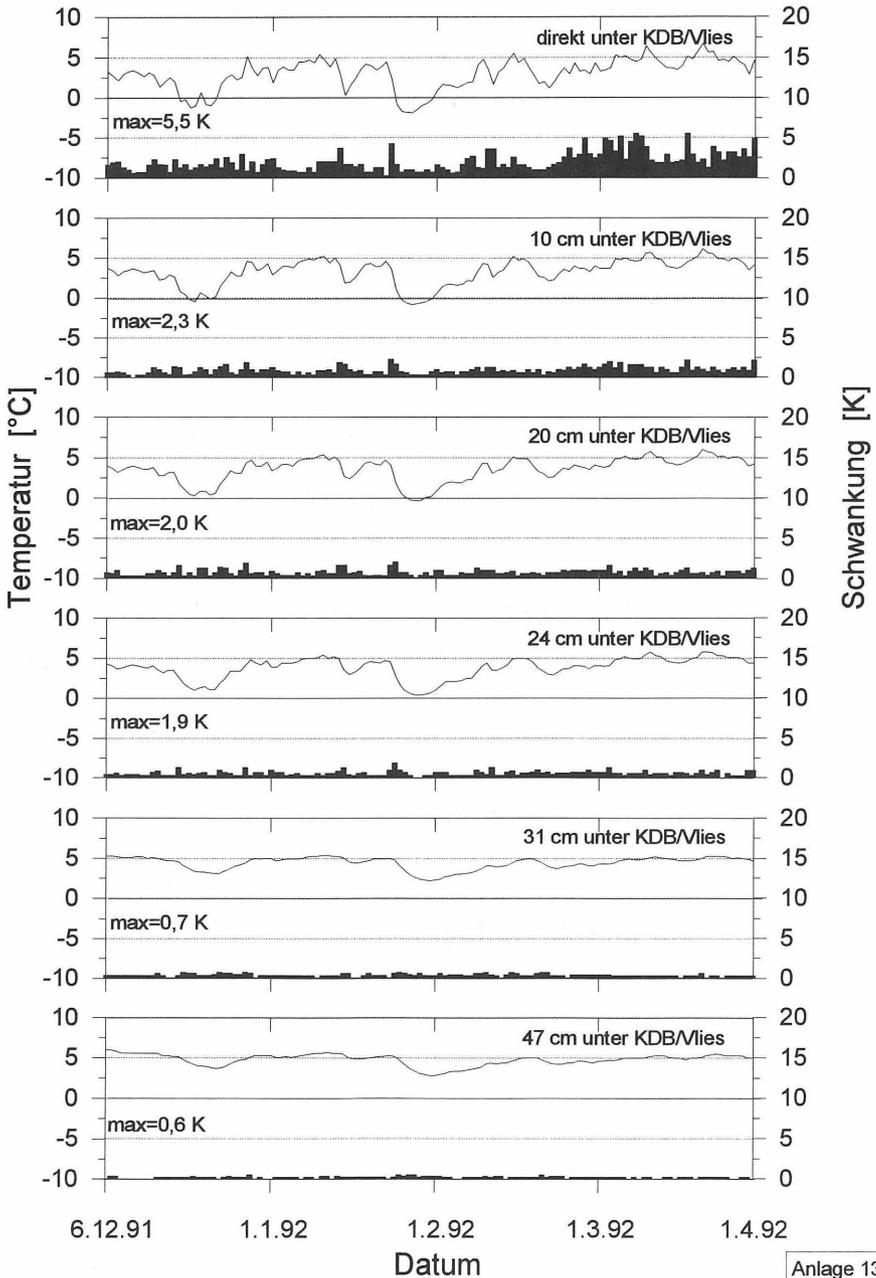
13 bis 36

Tagesmittelwerte
(0:00 Uhr - 24:00 Uhr)
und tägliche Schwankungsbreiten
aller Bodentemperaturen
und Wetterbeobachtungen
an den Versuchsfeldern in situ
mit Angabe der maximalen Tagesschwankungen

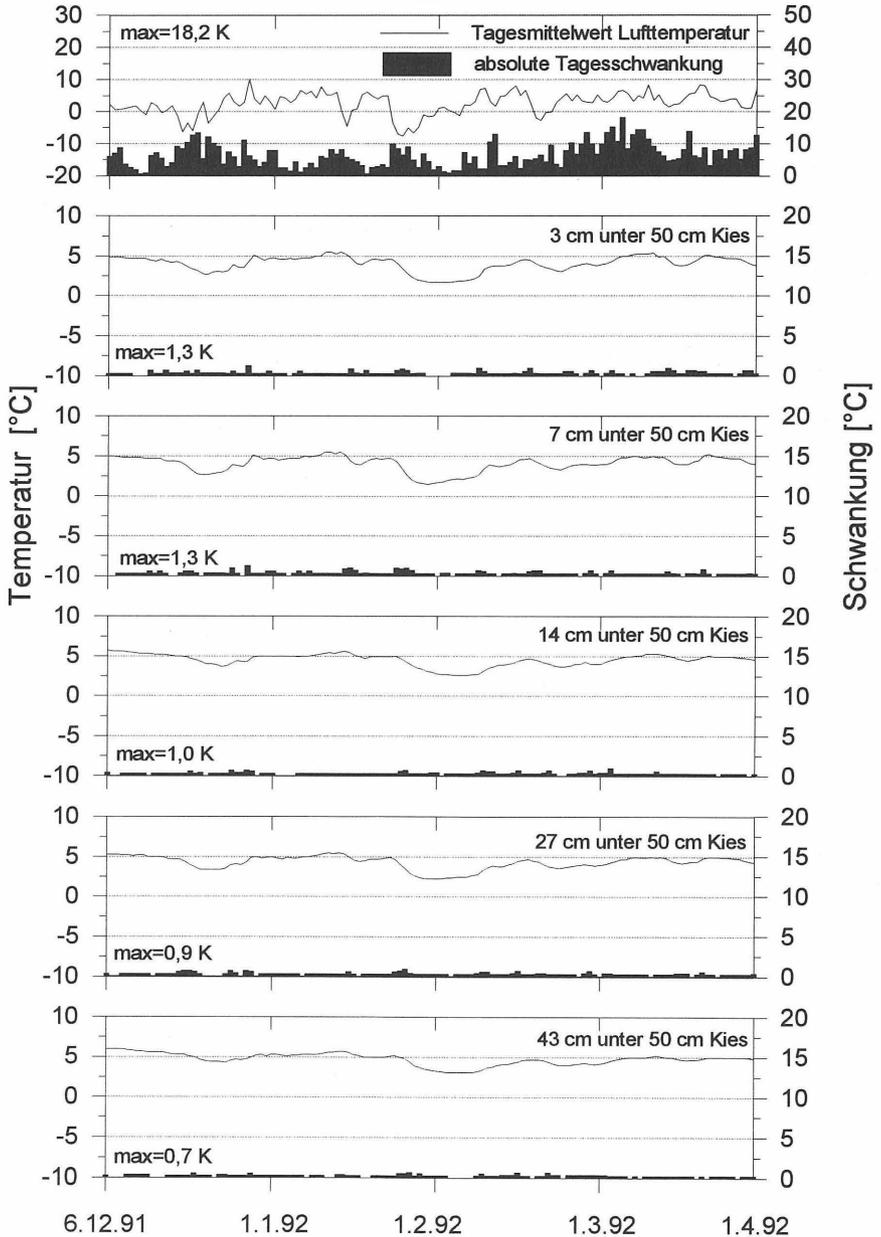
Detailzeiträume

- a) Winterzeitraum 1991 / 92
- b) Winterzeitraum 1992 / 93

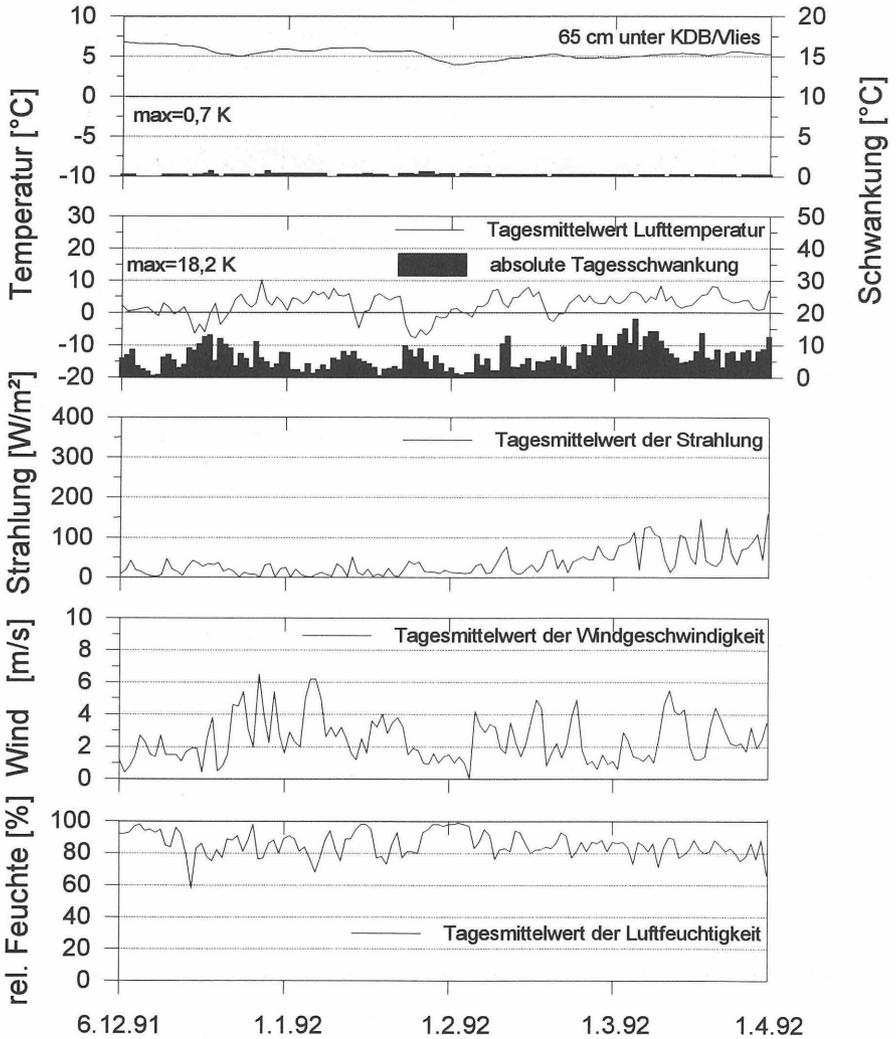
Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1991/92 Feld 1



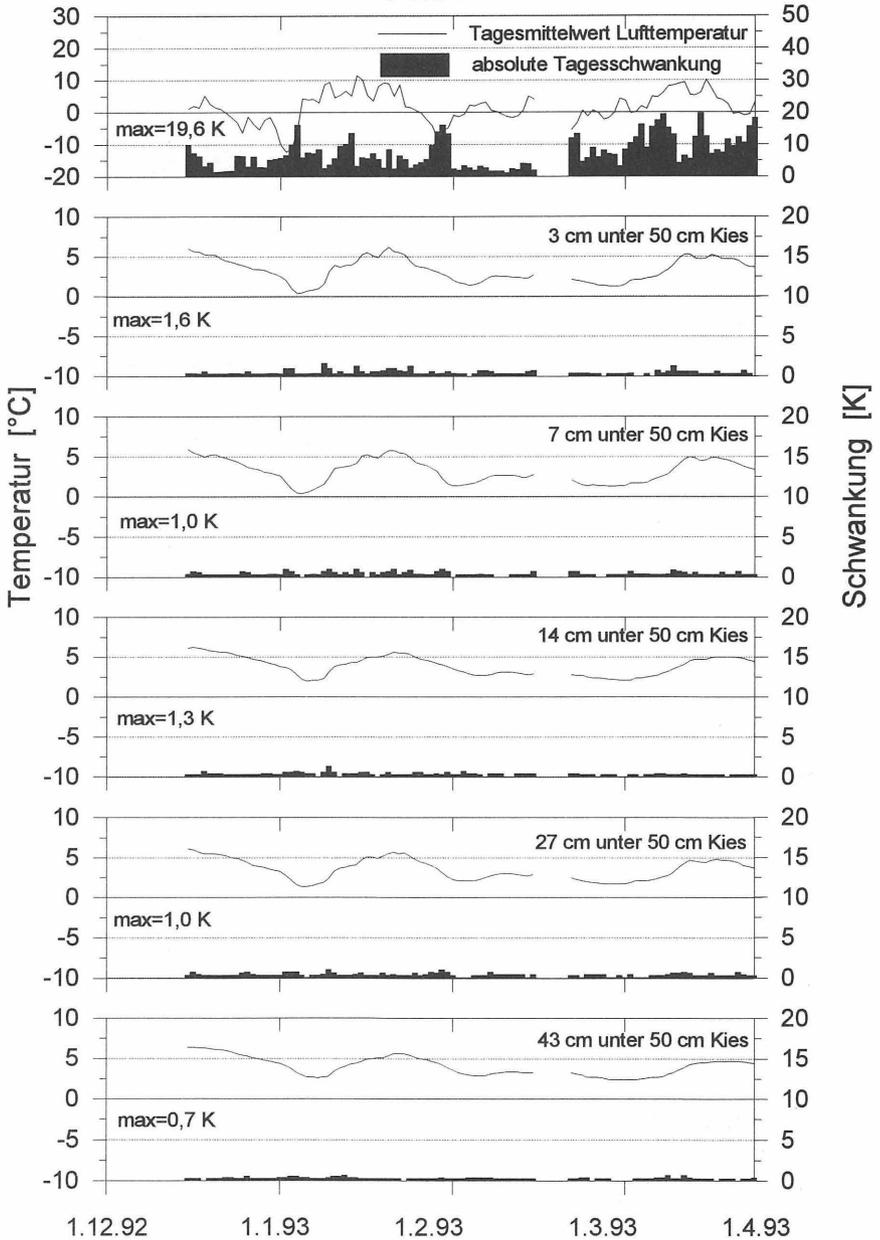
Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1991/92 Feld 1



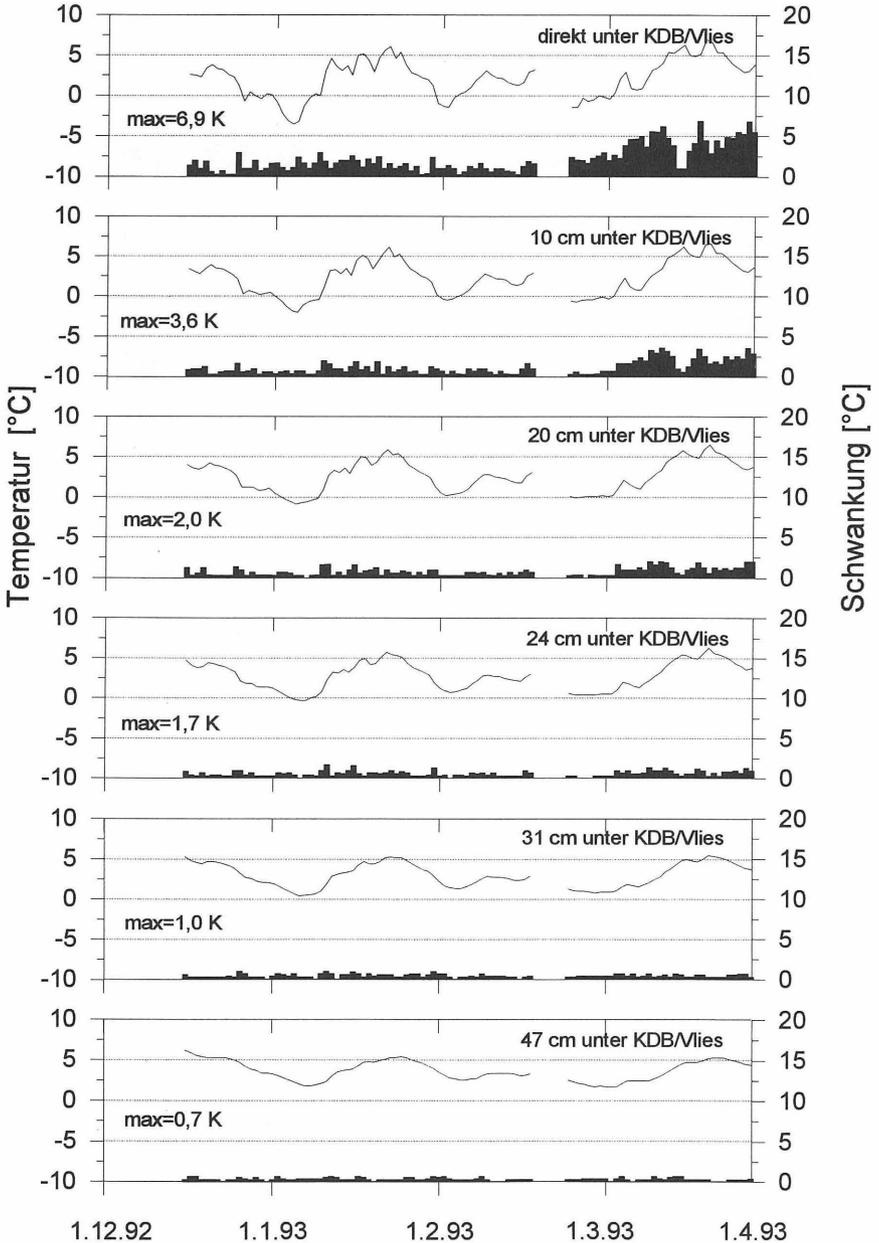
Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1991/92 Feld 1



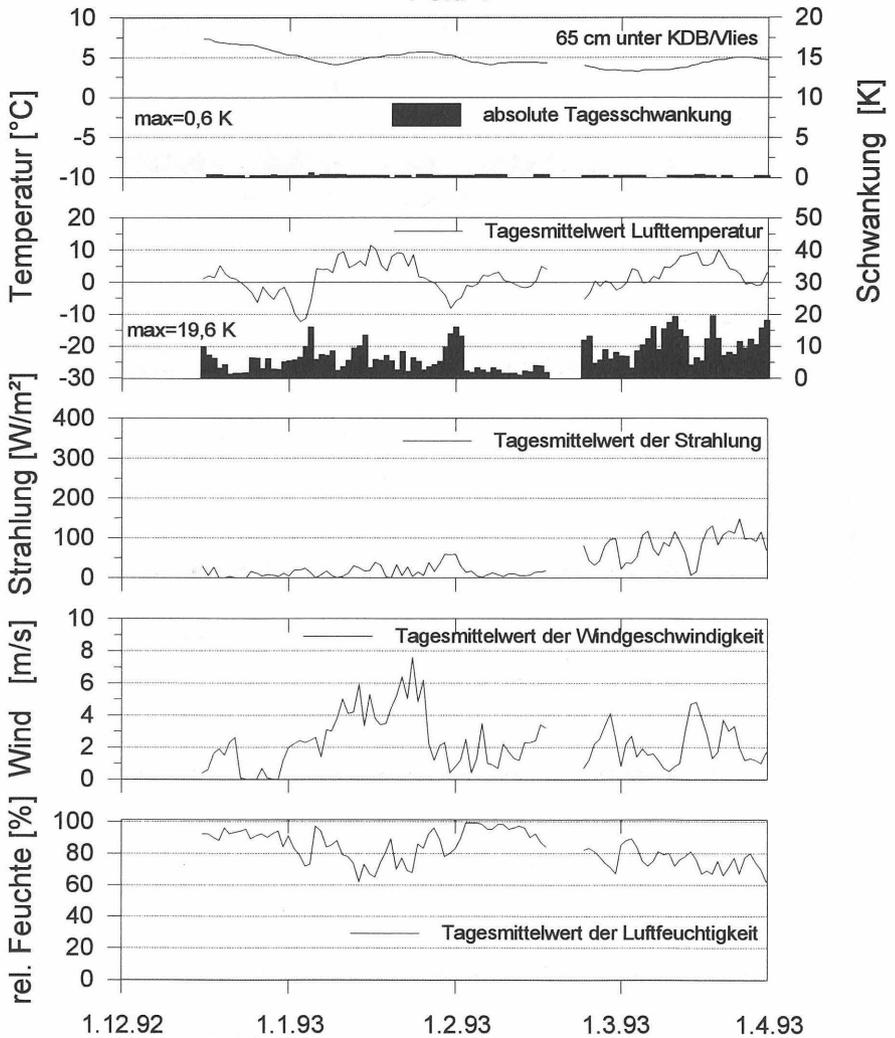
Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1992/93 Feld 1



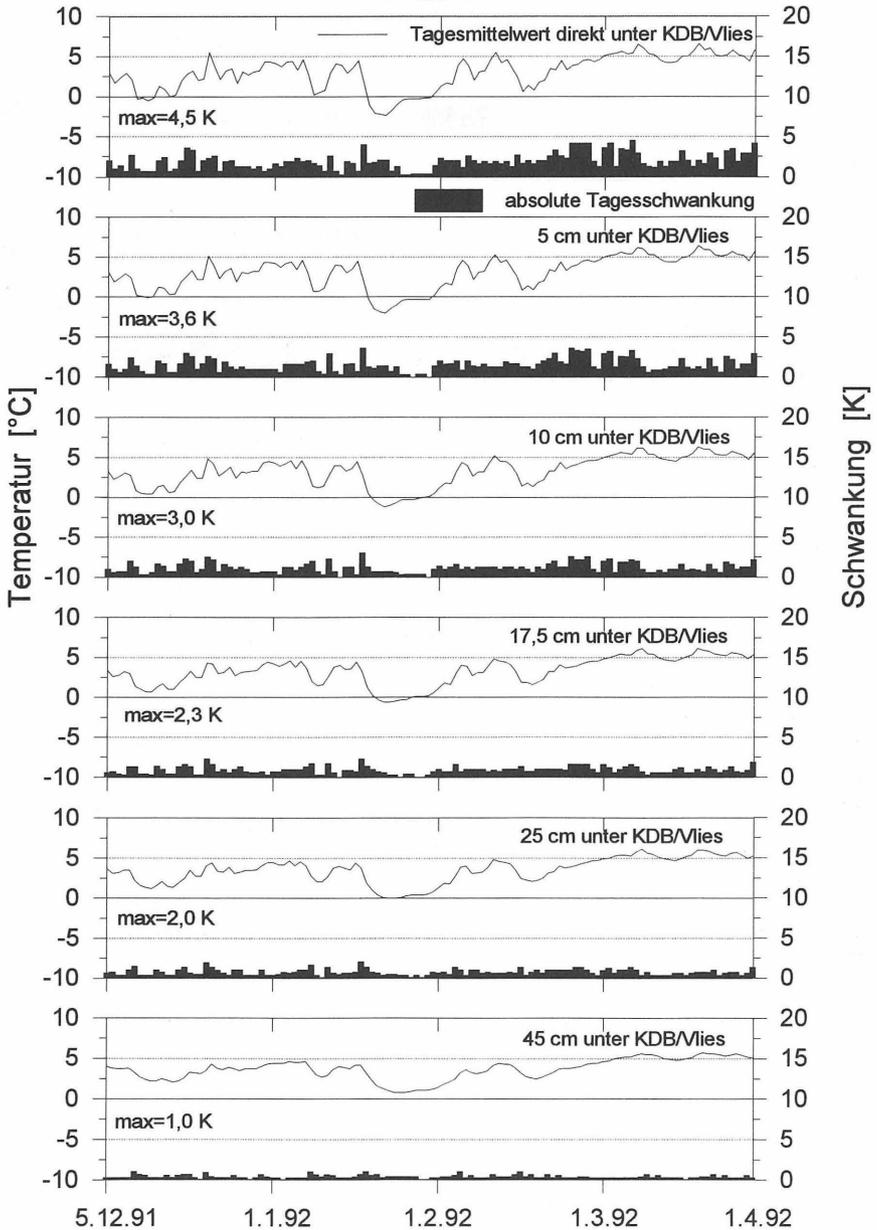
Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1992/93 Feld 1



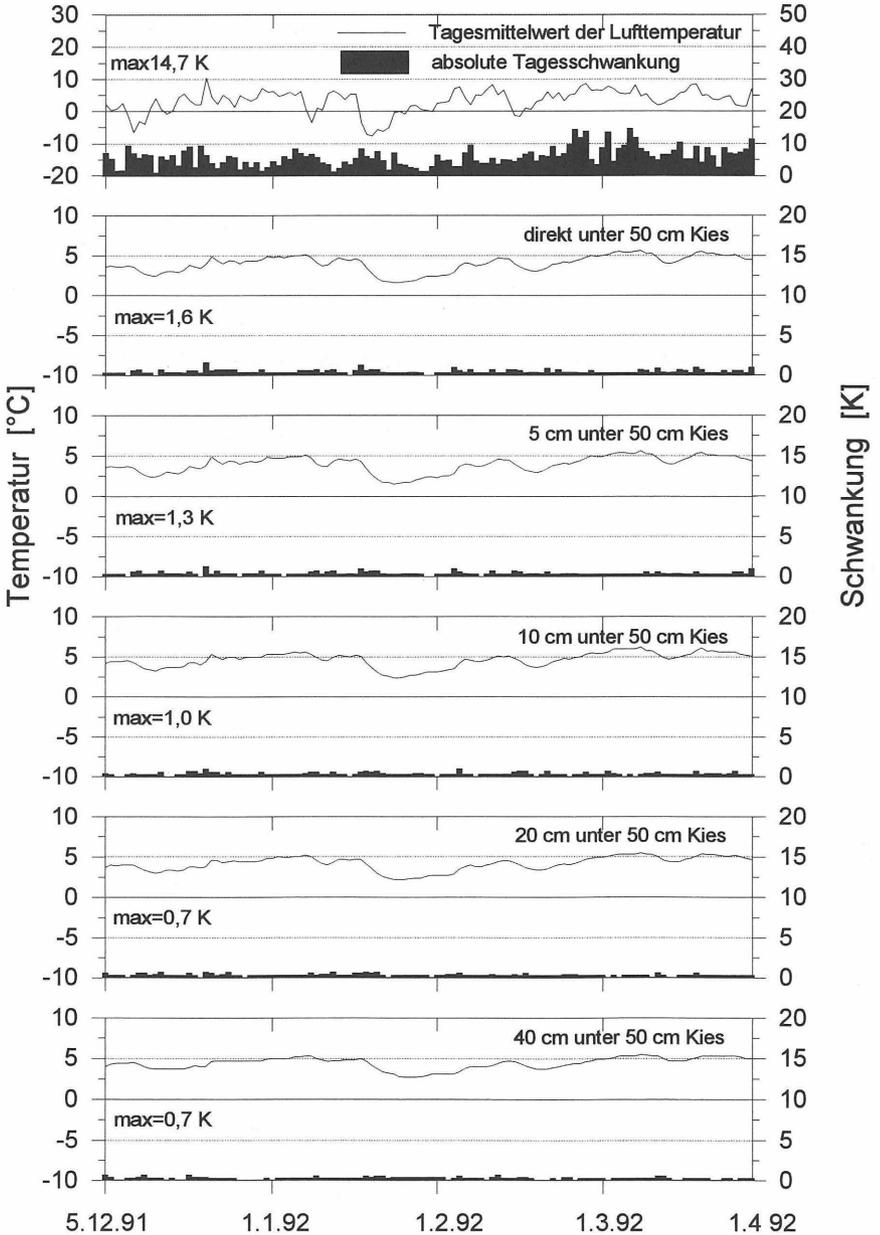
Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1992/93 Feld 1



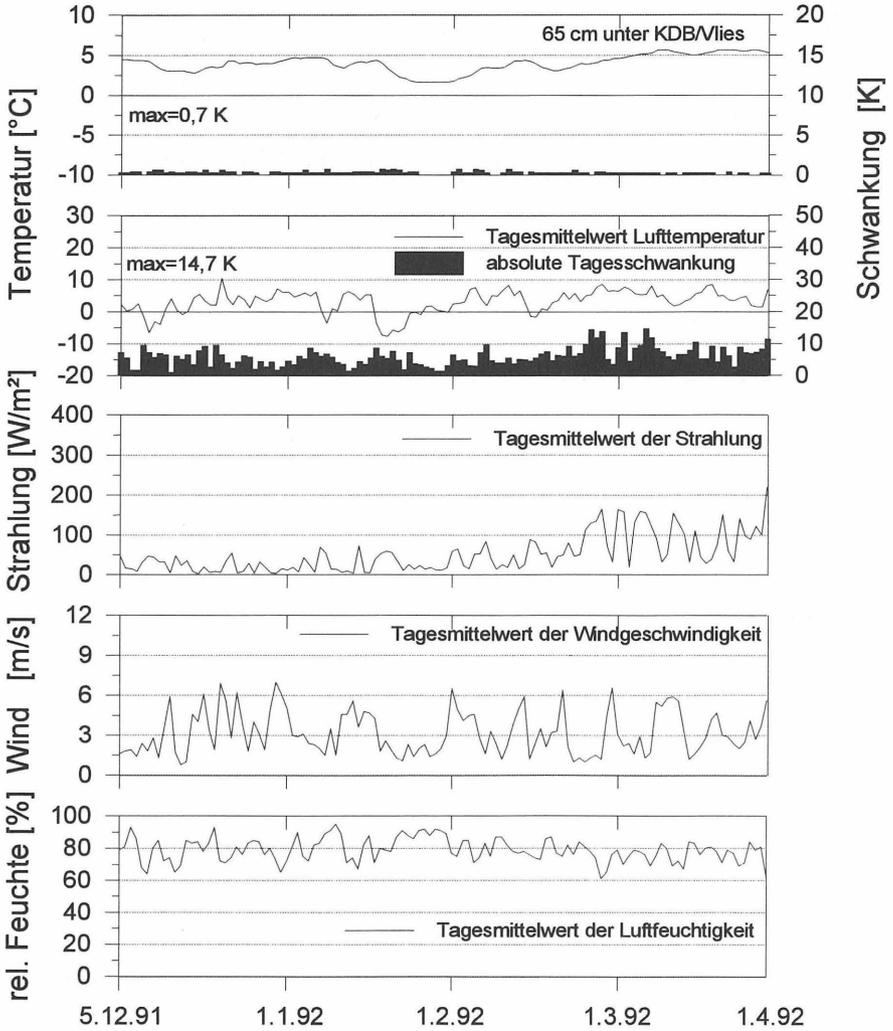
Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1991/92 Feld 2



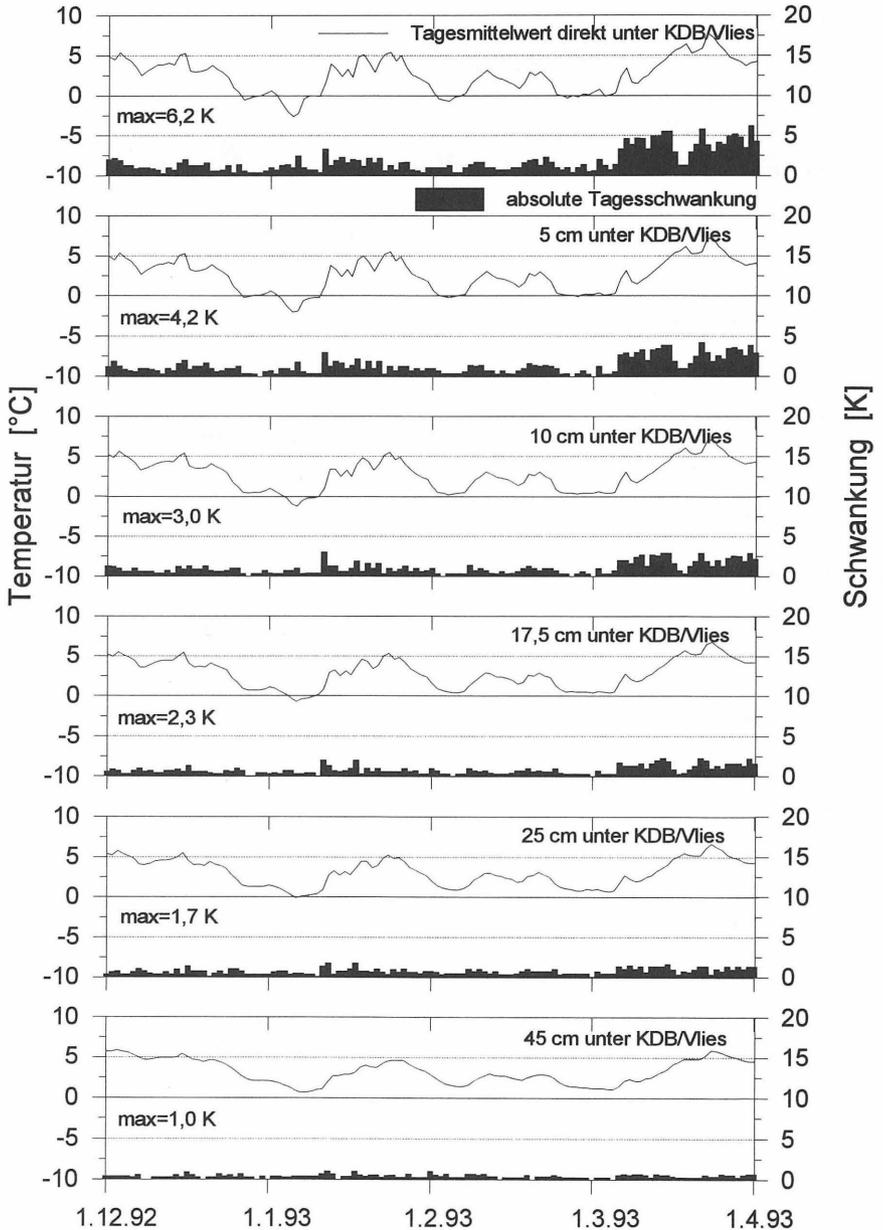
Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1991/92 Feld 2



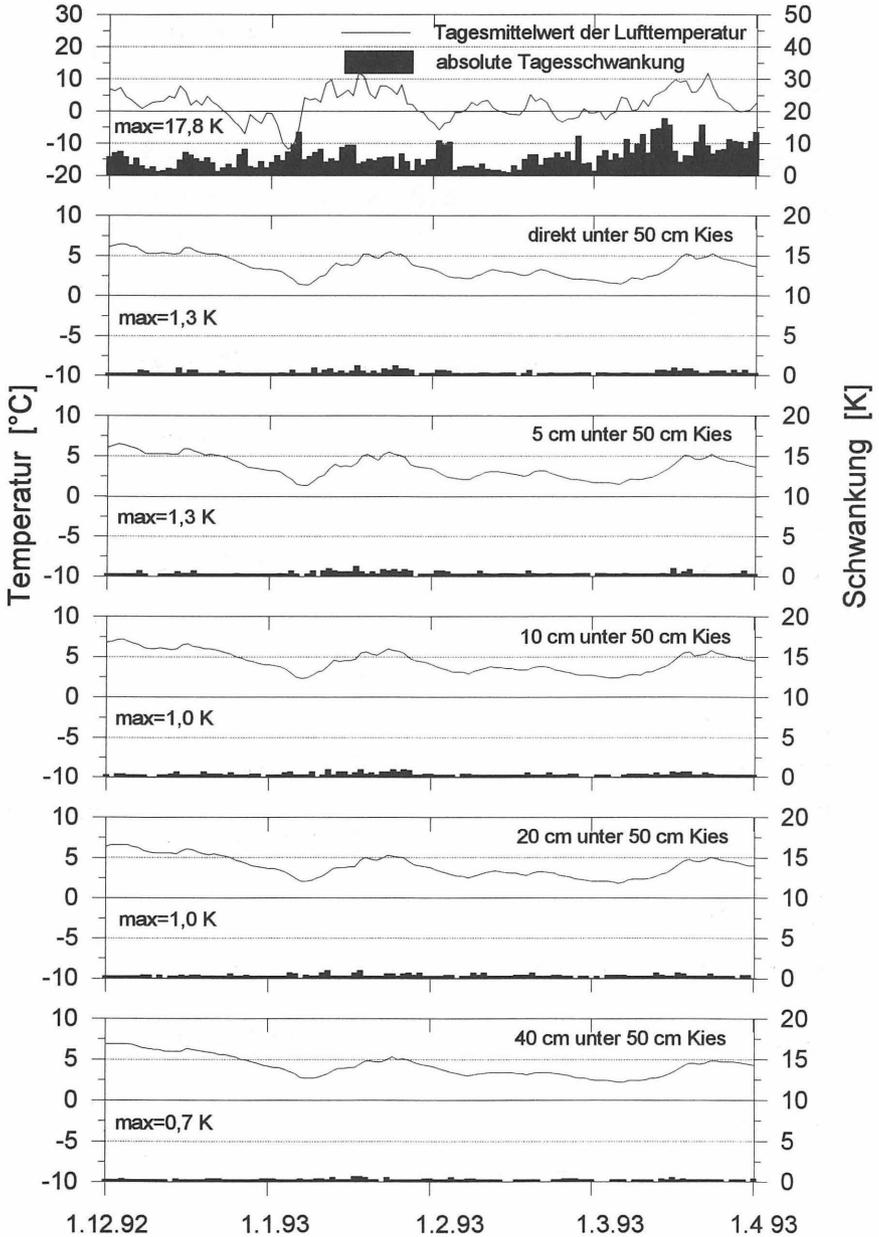
Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1991/92 Feld 2



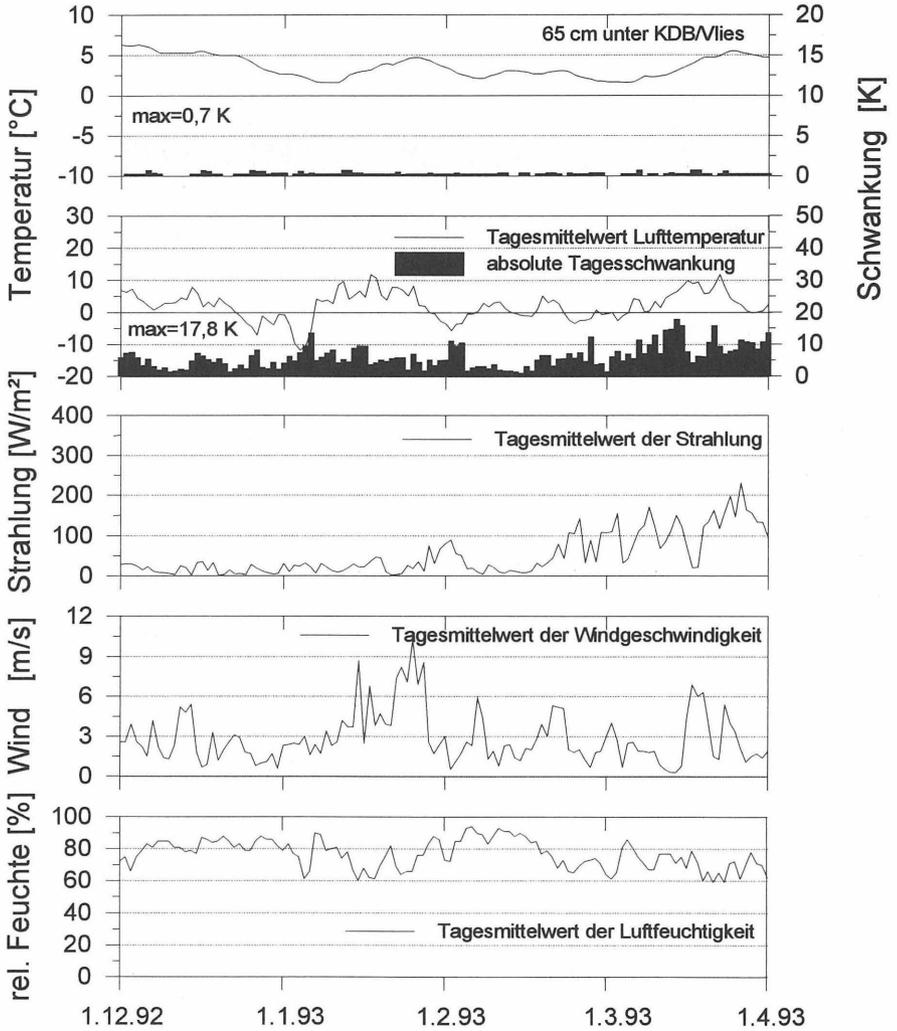
Tagesmittel und tägliche Schwankungen
Winterzeitraum 1992/93
Feld 2



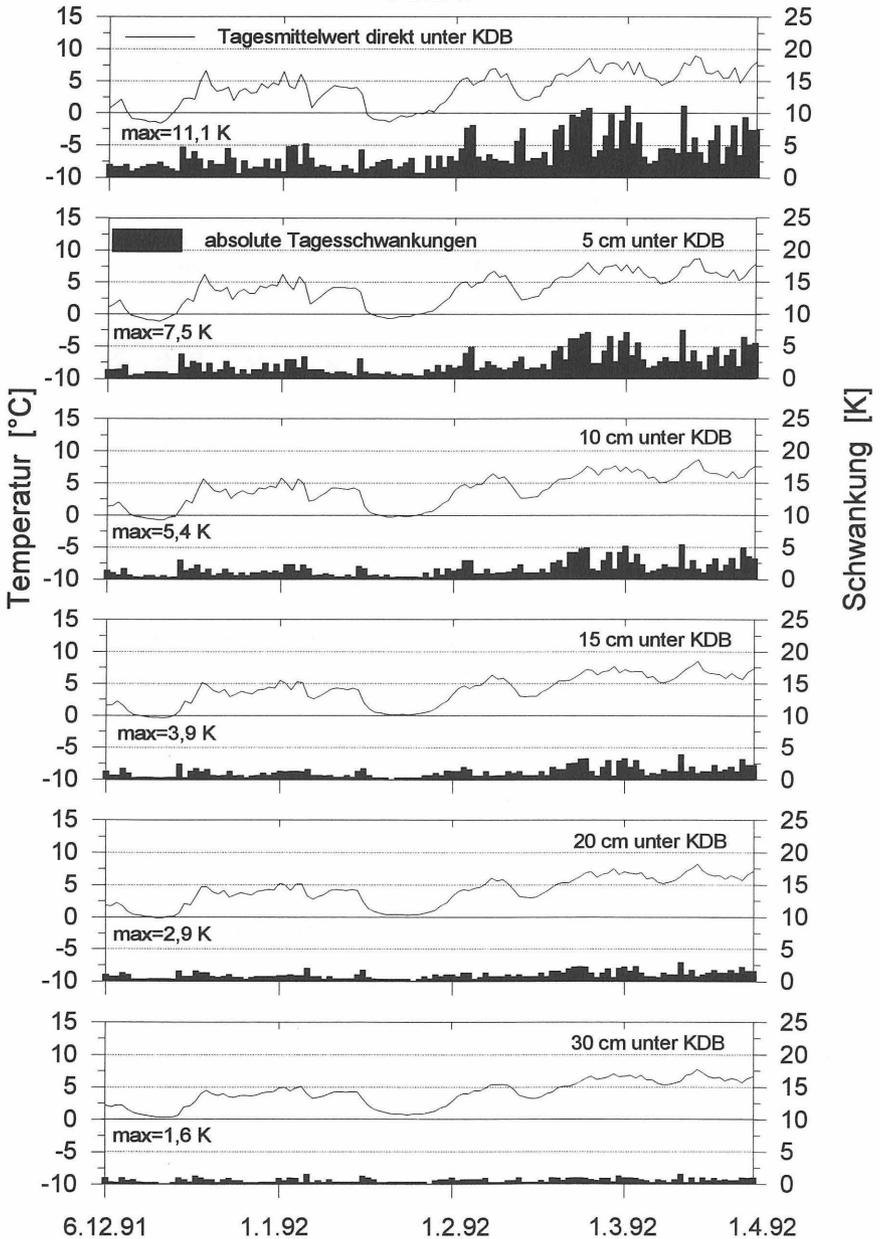
Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1992/93 Feld 2



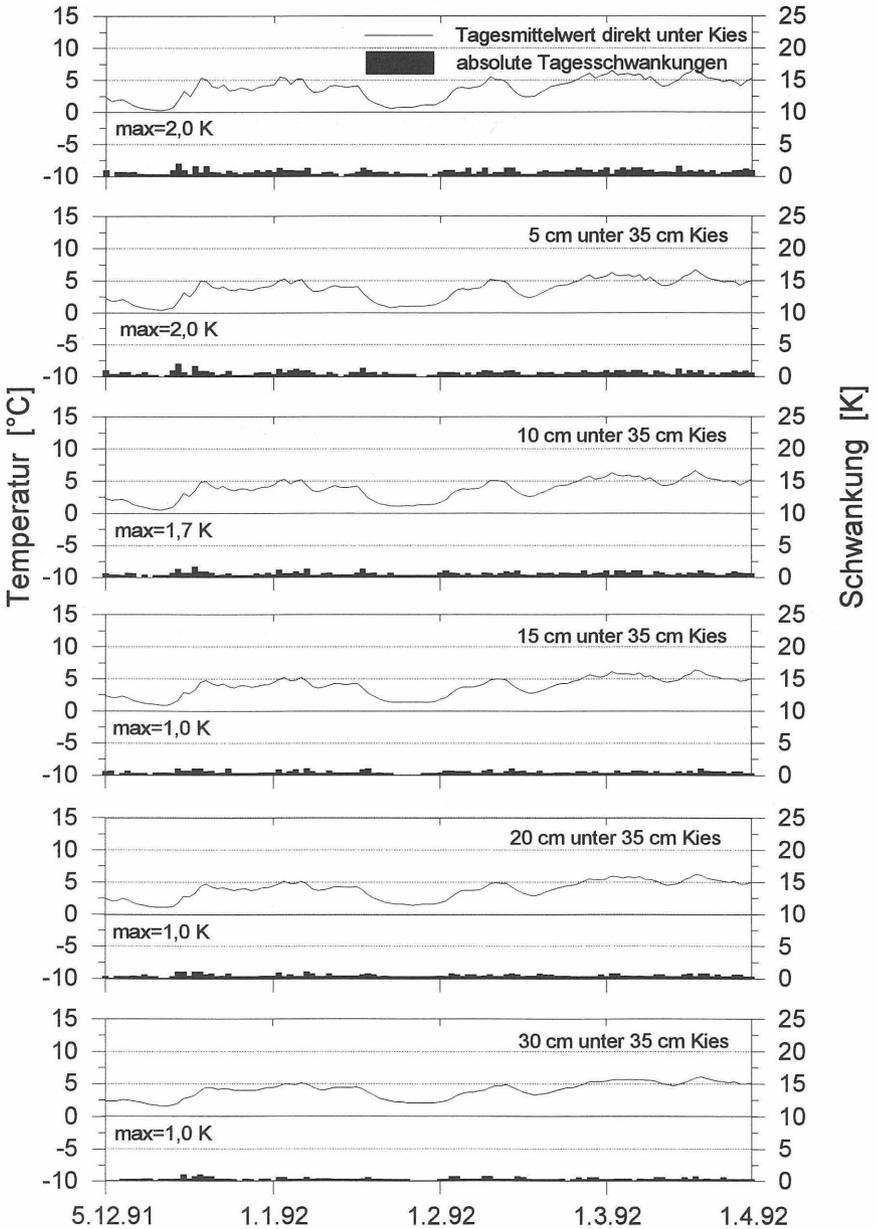
Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1992/93 Feld 2



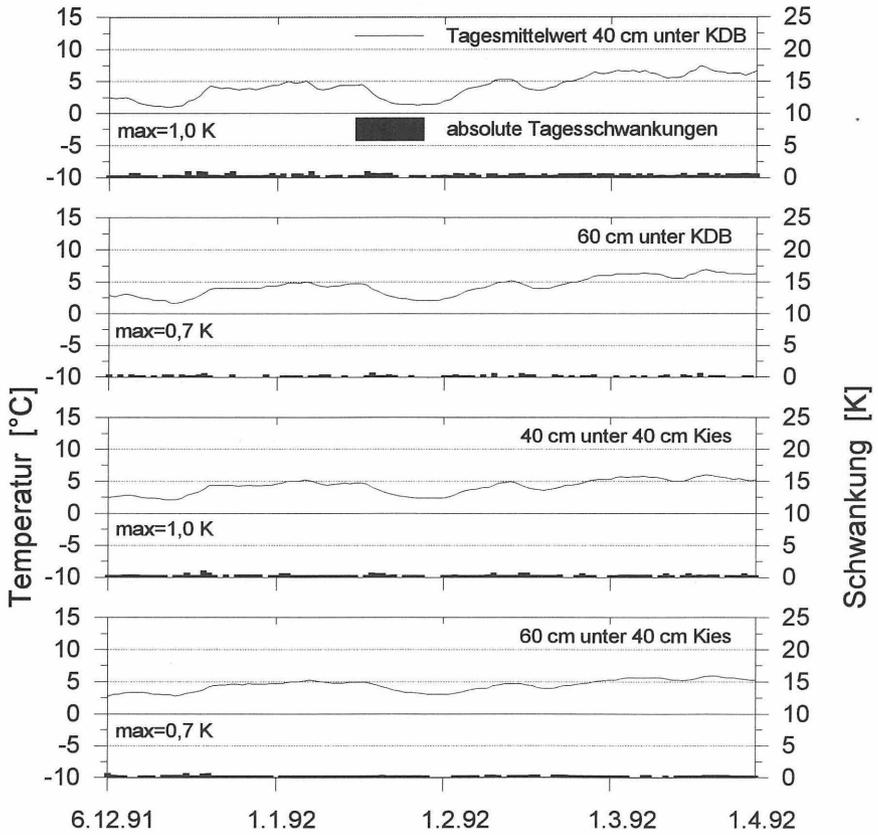
Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1991/92 Feld 3



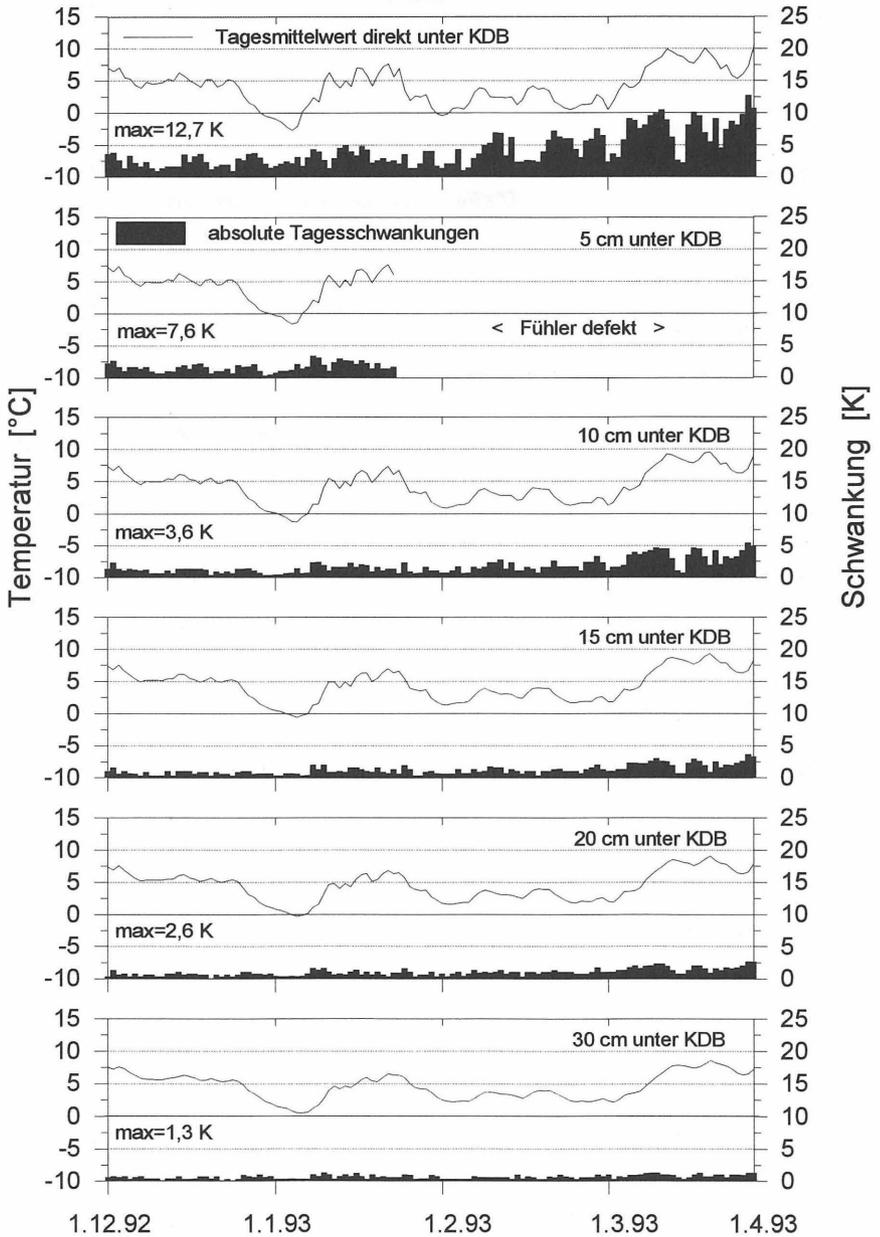
Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1991/92 Feld 3



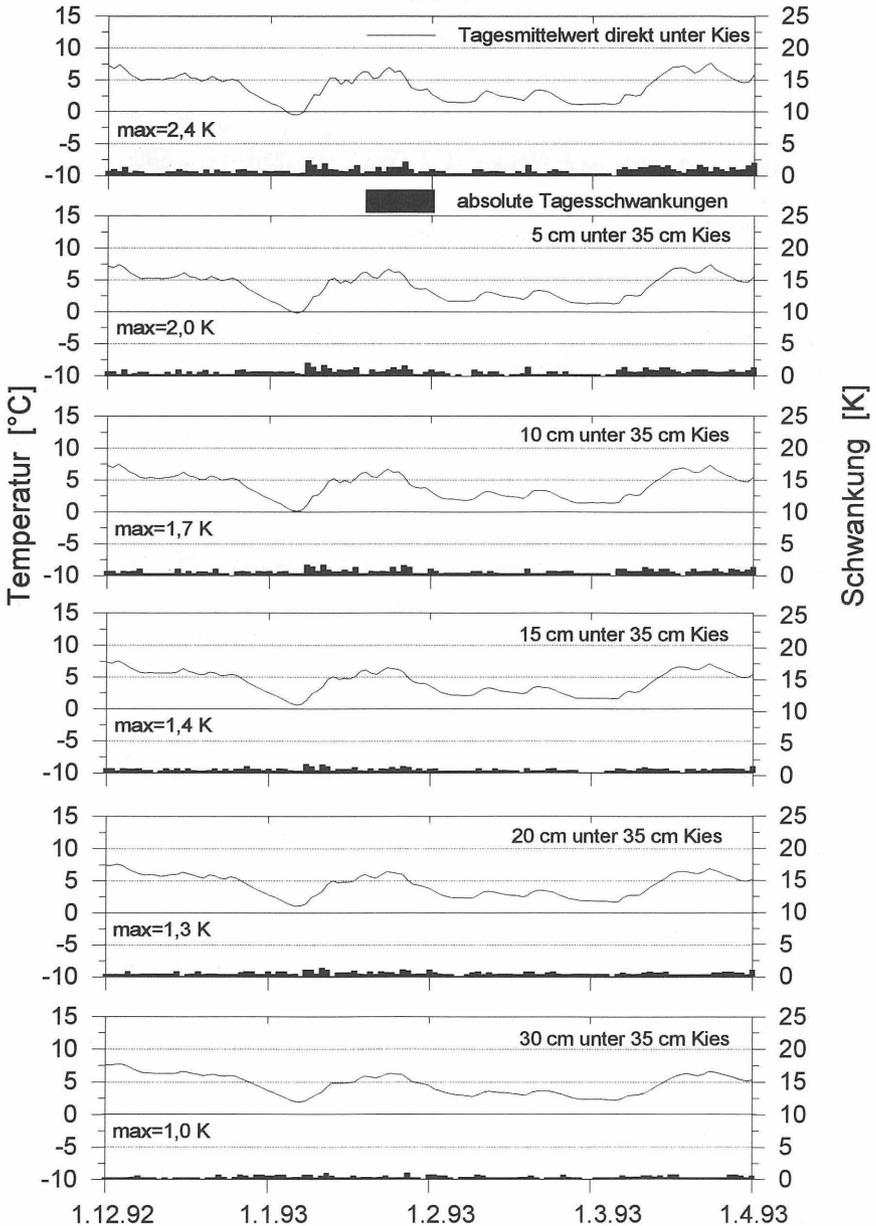
Tagesmittel und tägliche Schwankungen
Winterzeitraum 1991/92
Feld 3



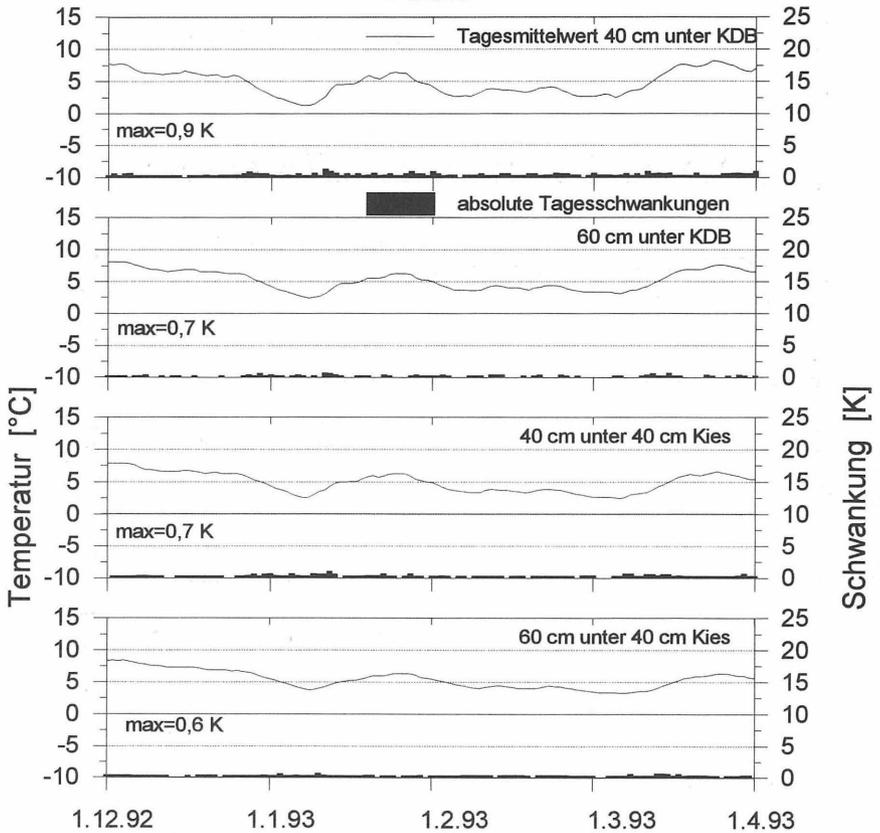
Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1992/93 Feld 3



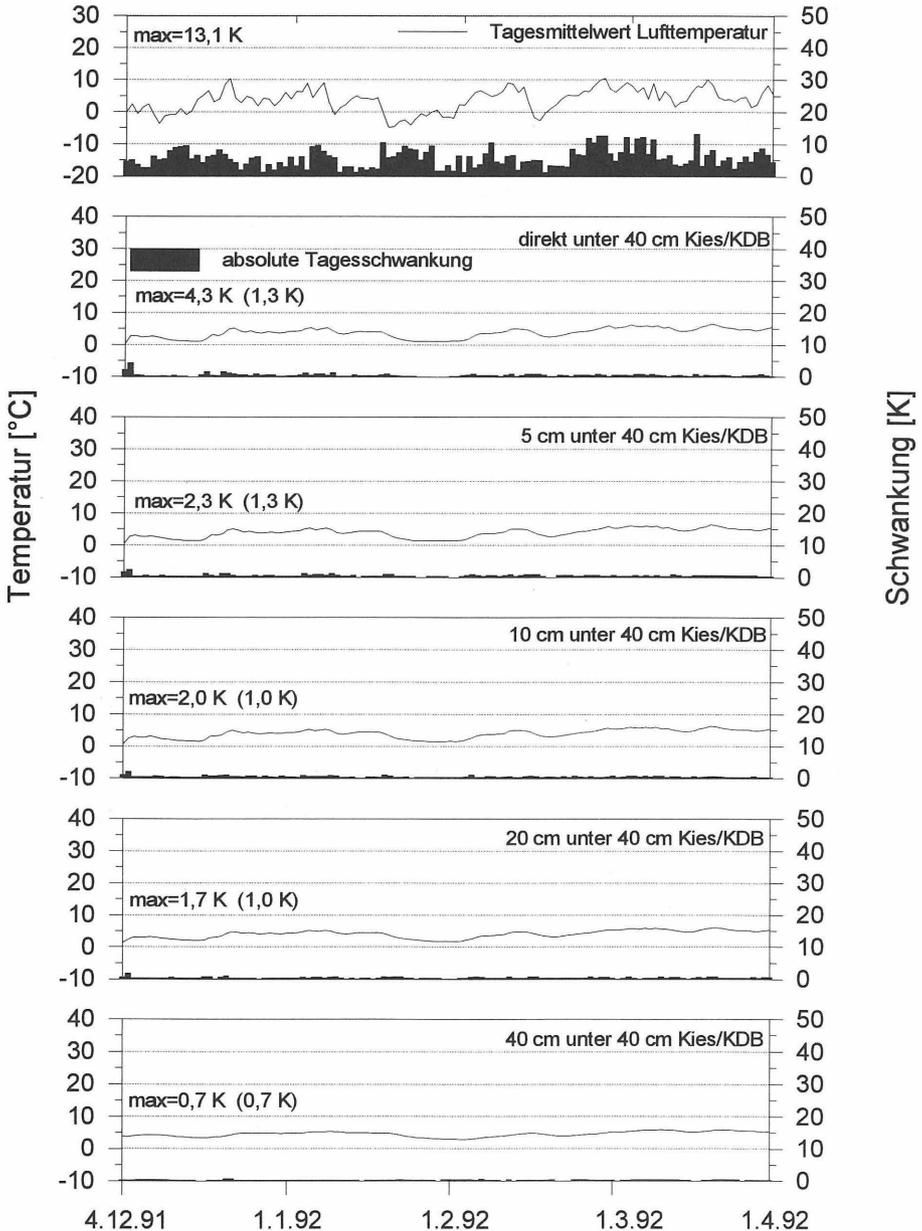
Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1992/93 Feld 3



Tagesmittel und tägliche Schwankungen
Winterzeitraum 1992/93
Feld 3

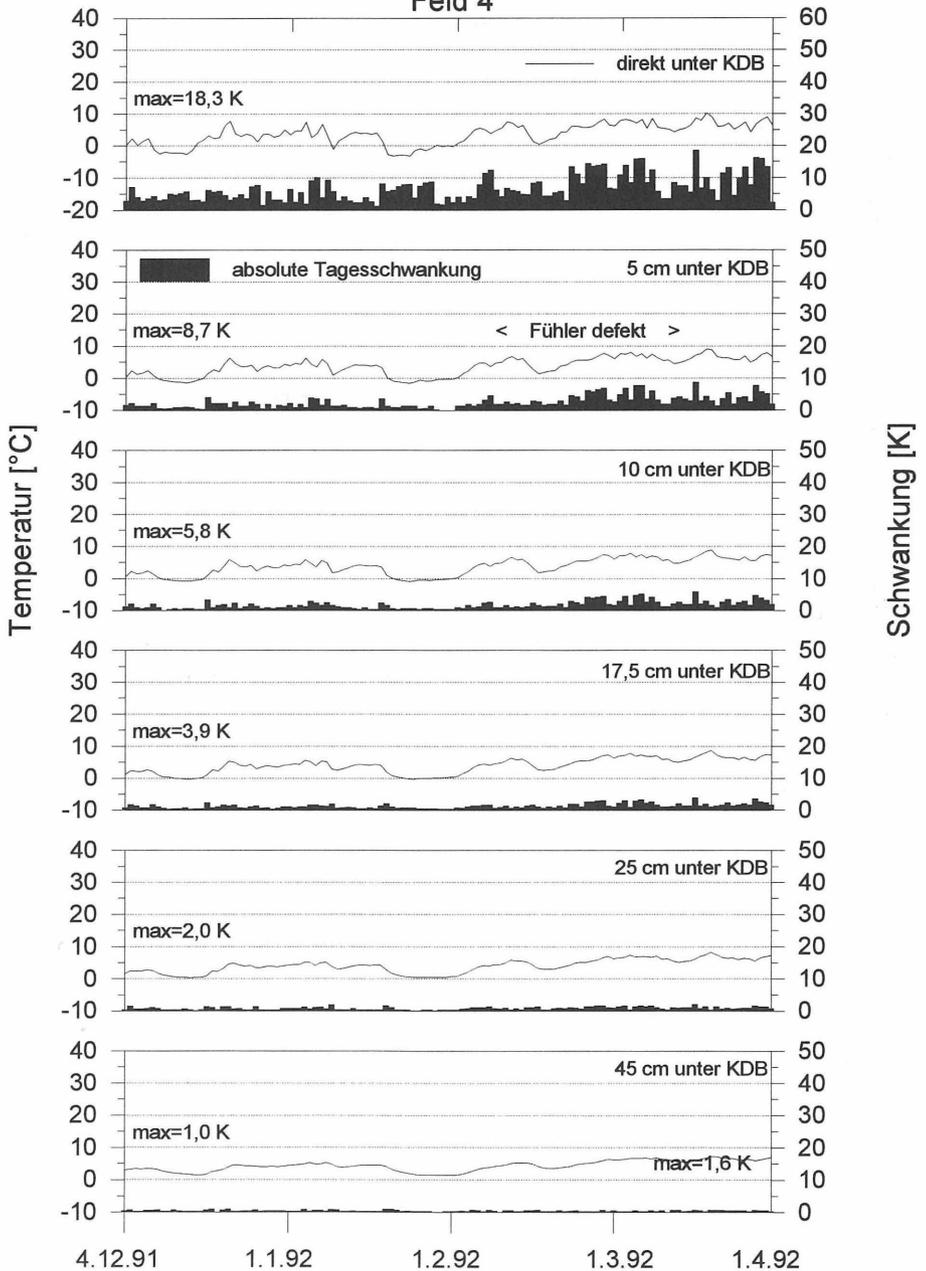


Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1991/92 Feld 4

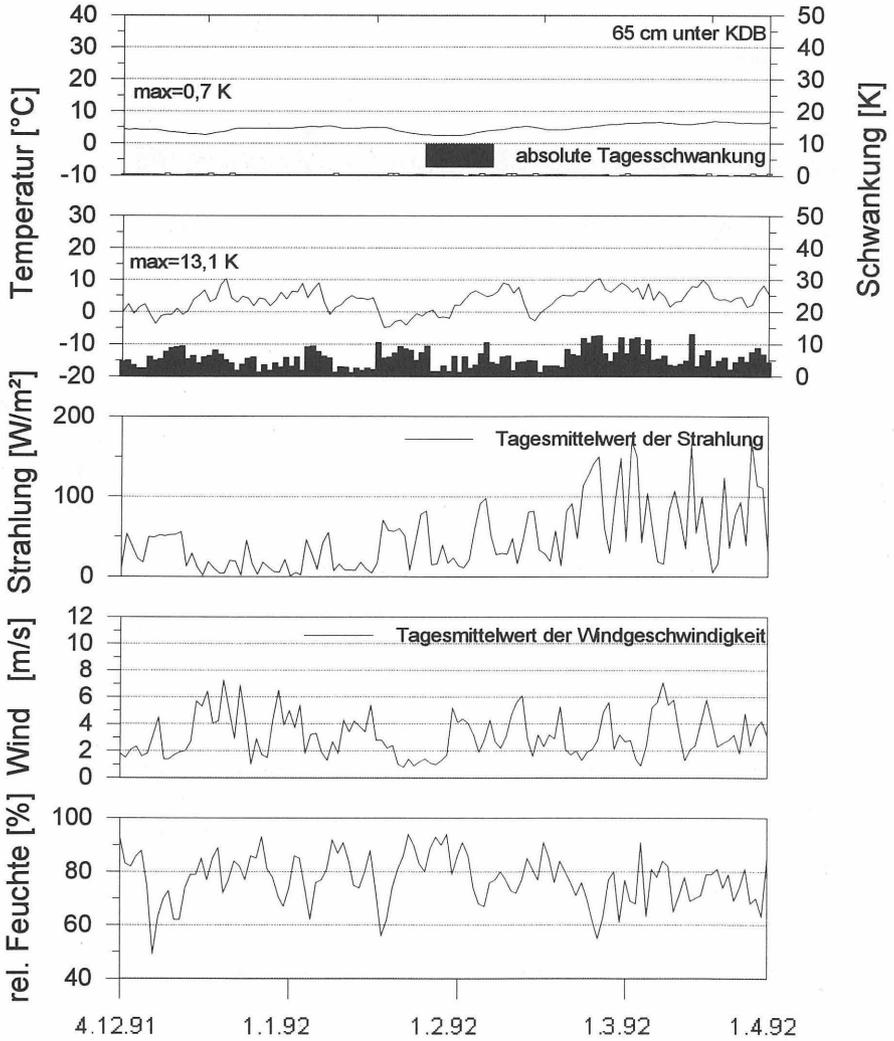


max. Schwankungswerte liegen in den ersten
zwei Tagen nach dem Einbau (außer Luft!)
Klammerwerte gelten für hinterher.

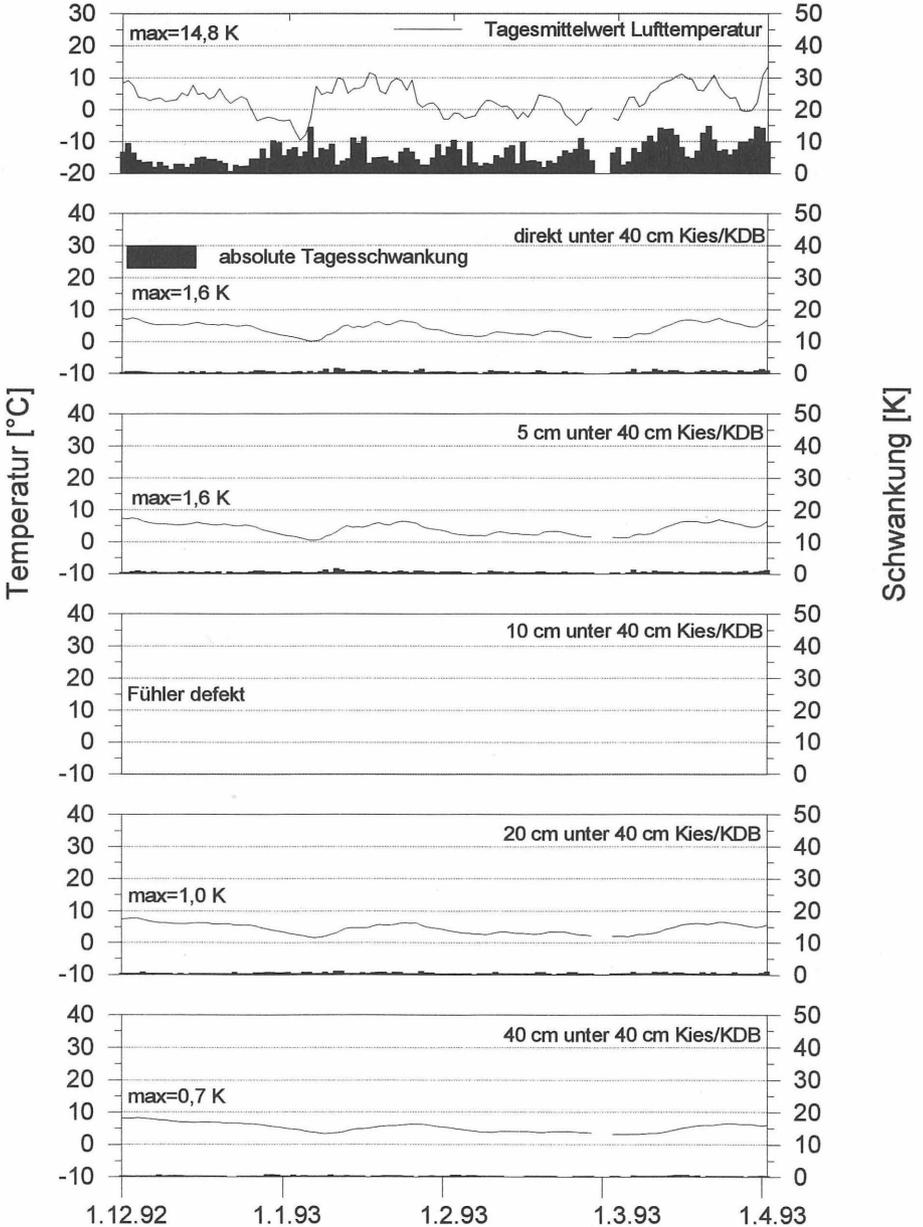
283
 Tagesmittel und tägliche Schwankungen
 Winterzeitraum 1991/92
 Feld 4



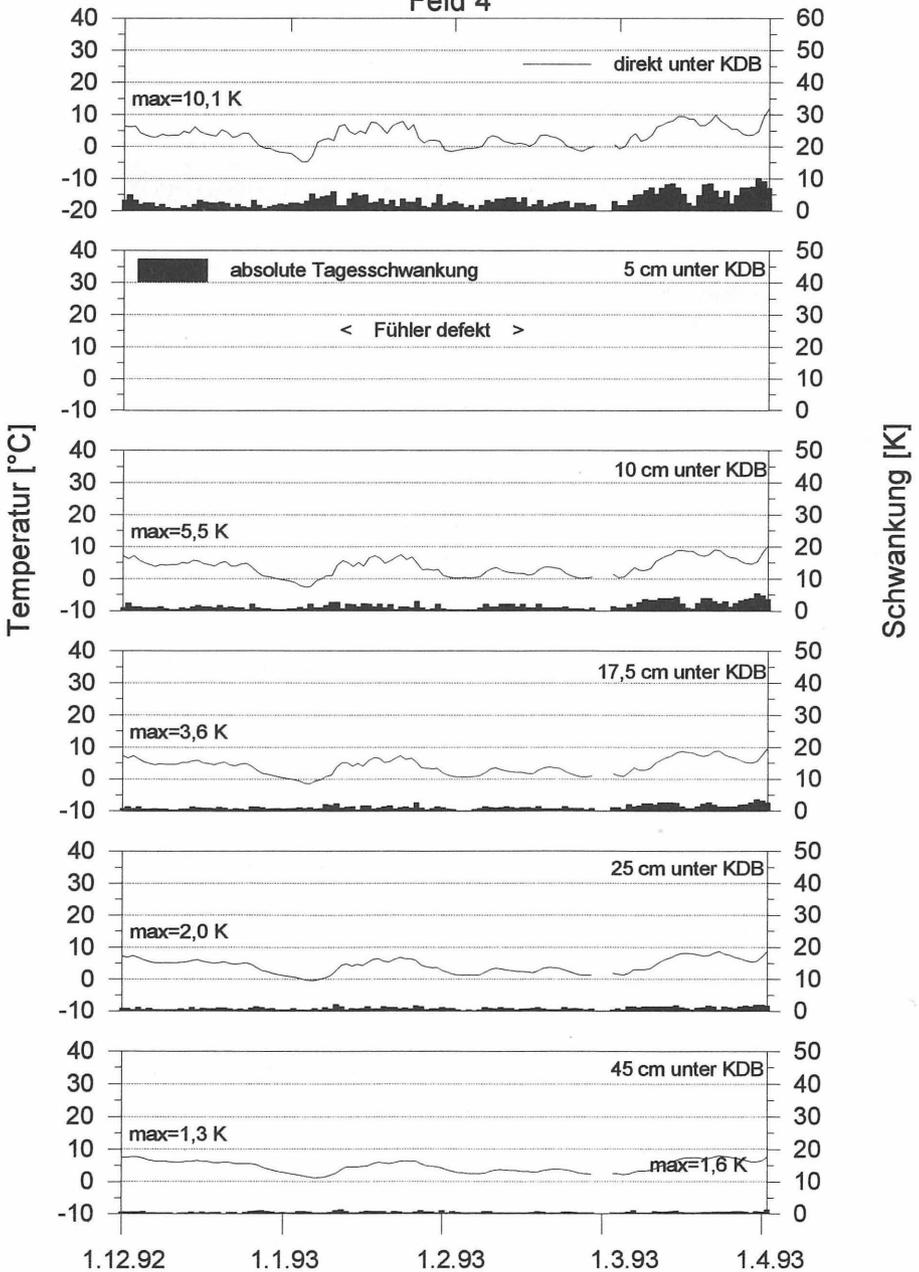
Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1991/92 Feld 4



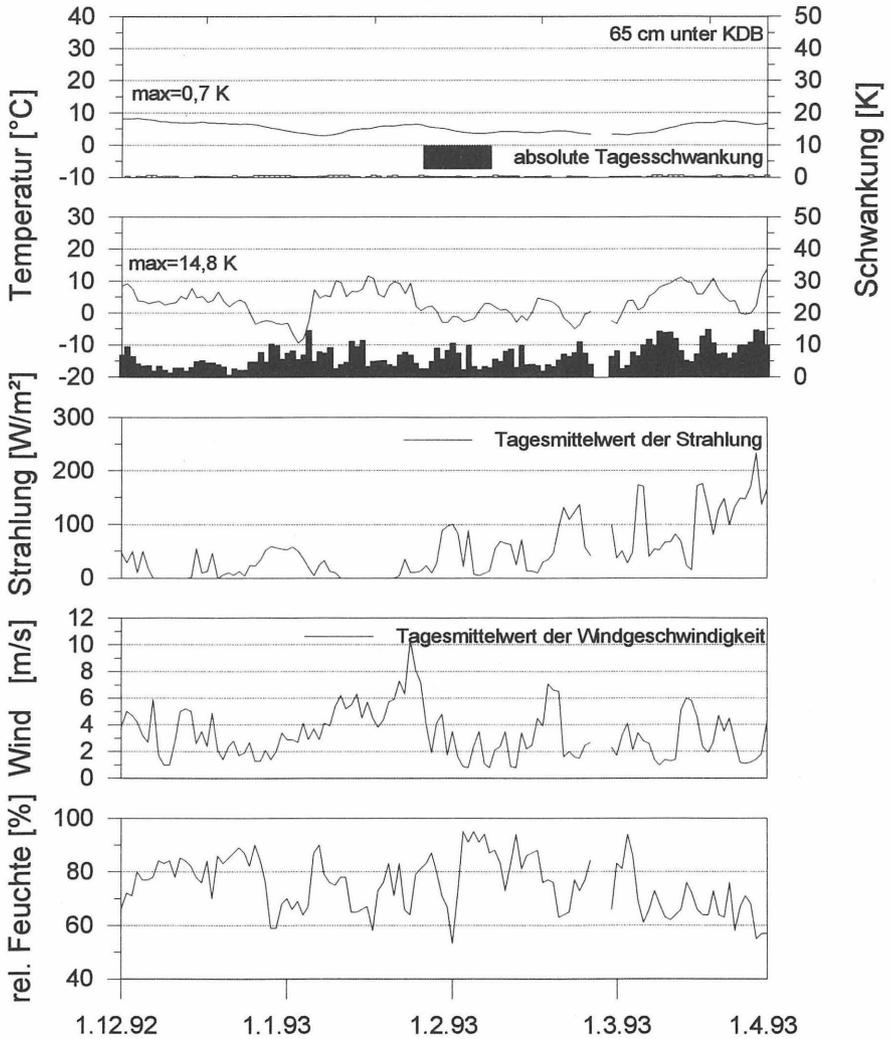
Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1992/93 Feld 4



286
Tagesmittel und tägliche Schwankungen
Winterzeitraum 1992/93
Feld 4



Tagesmittel und tägliche Schwankungen Winterzeitraum 1992/93 Feld 4



Anlagen

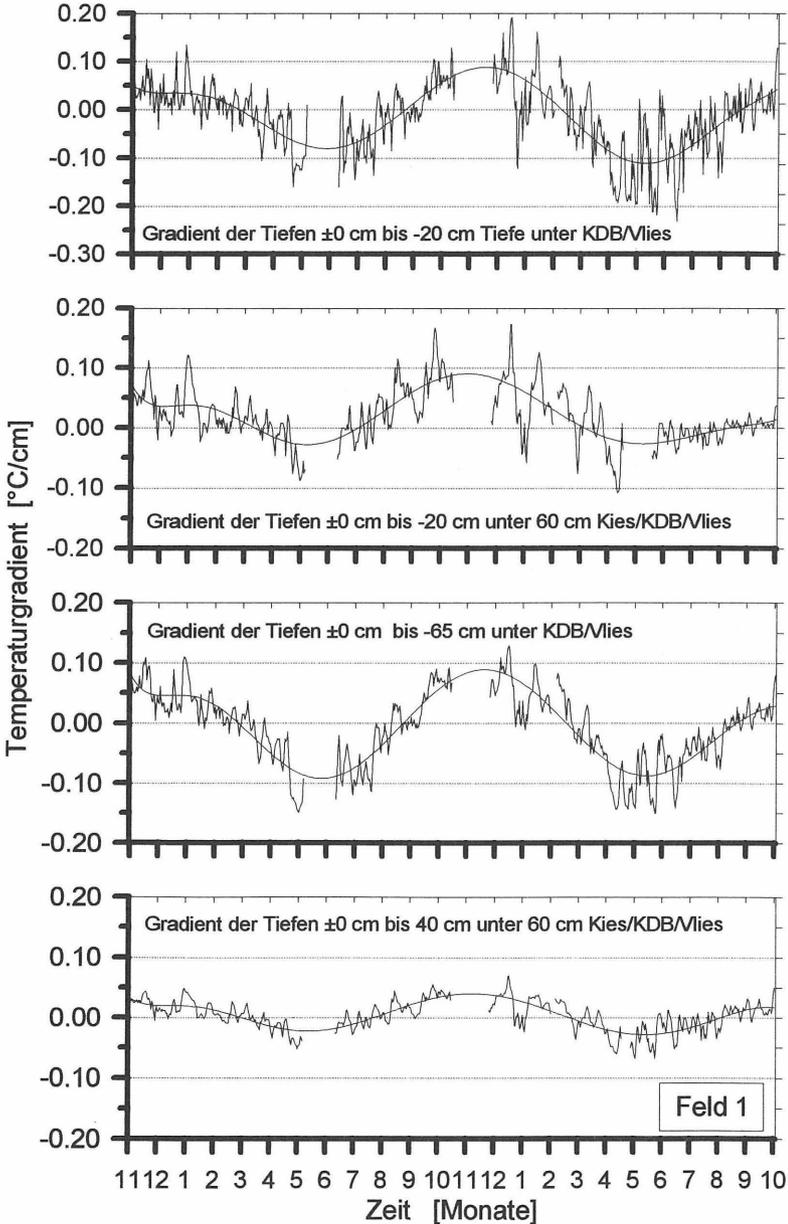
37 bis 40

Temperaturgradienten
zwischen den obersten Temperaturfühlern im
mineralischen Material und
den angegebenen Tiefen
mit einer angepaßten Ausgleichskurve (Fit)

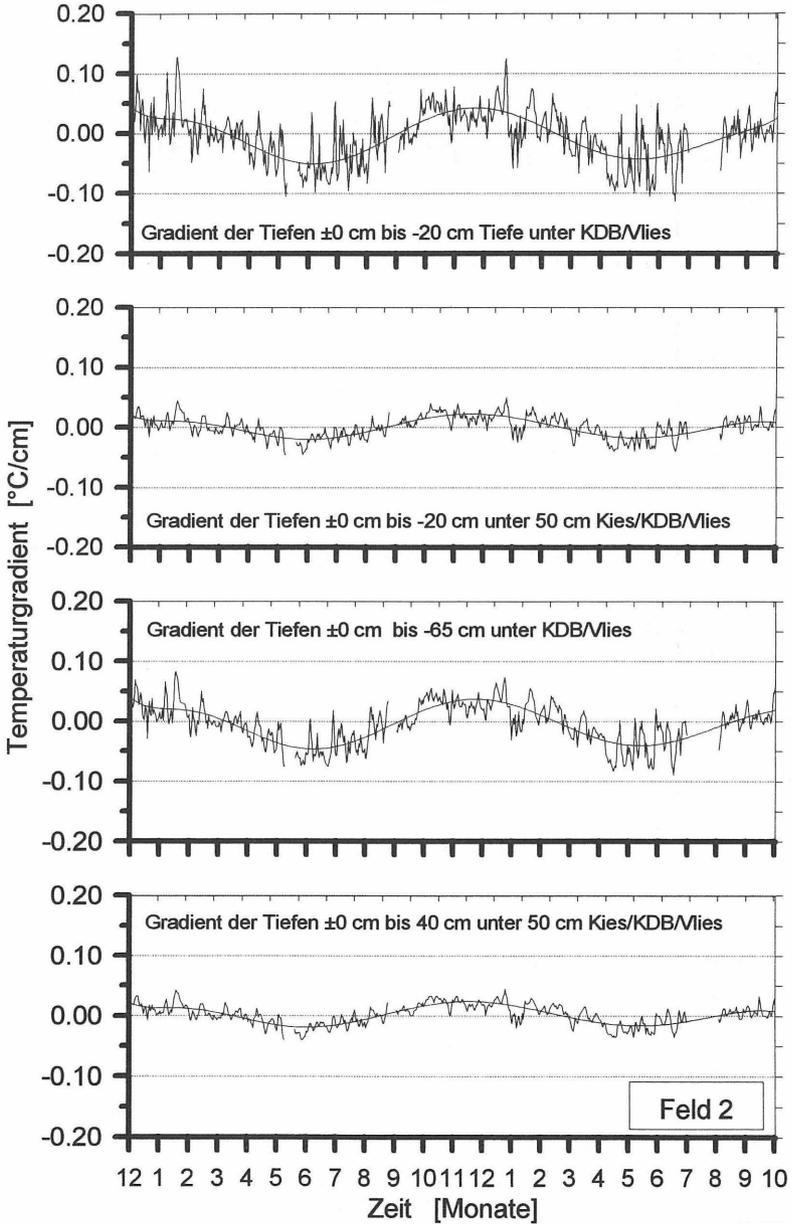
(Gebildet aus den Tagesmittelwerten)

Gesamter Meßzeitraum

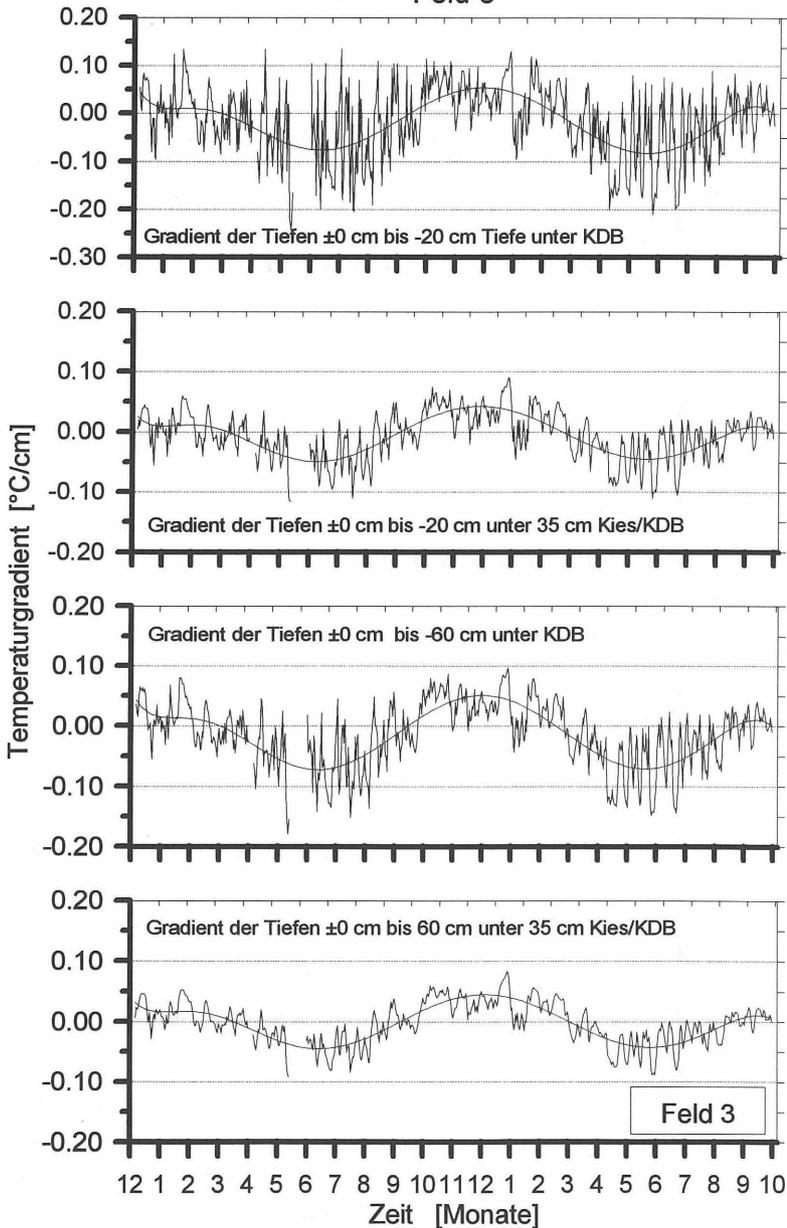
Temperaturgradienten für verschiedene Tiefenbereiche gesamter Meßzeitraum Feld 1



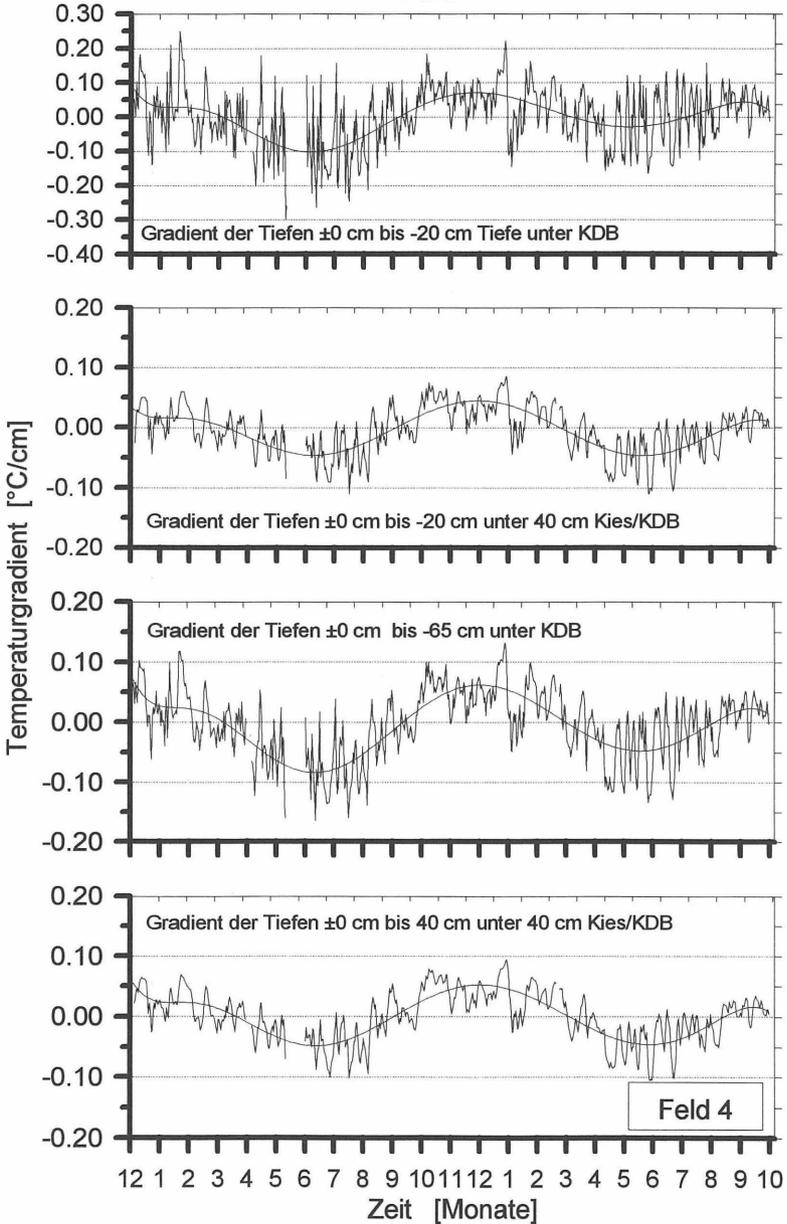
Temperaturgradienten für verschiedene Tiefenbereiche gesamter Meßzeitraum Feld 2



Temperaturgradienten für verschiedene Tiefenbereiche
gesamter Meßzeitraum
Feld 3



Temperaturgradienten für verschiedene Tiefenbereiche gesamter Meßzeitraum Feld 4



Anlage

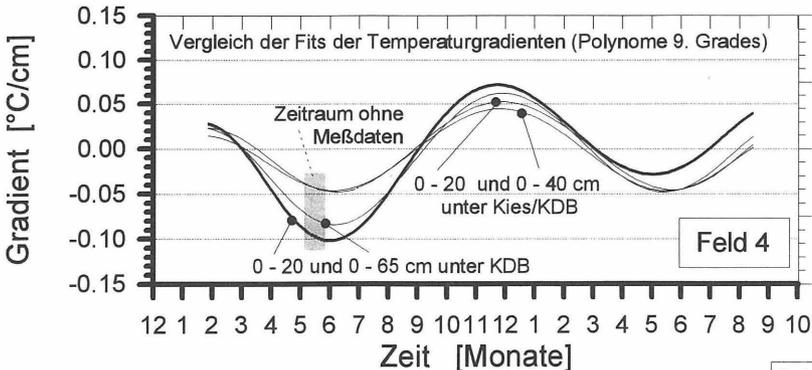
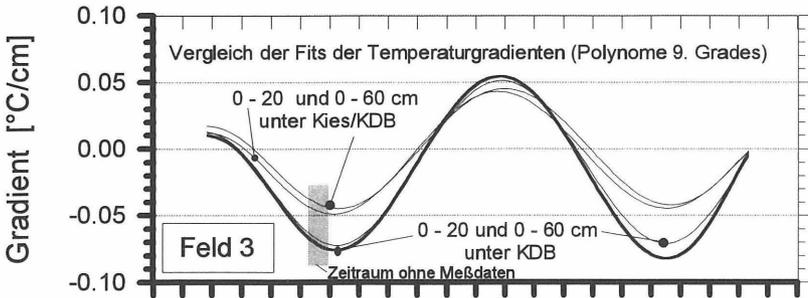
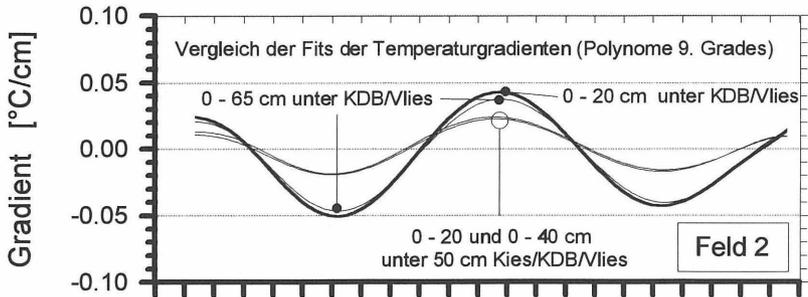
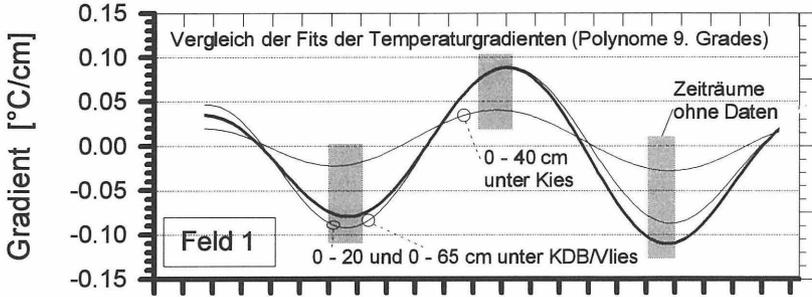
41

Zusammenstellung der Fits
der Temperaturgradienten
zwischen den obersten Temperaturfühlern im
mineralischen Material und
den angegebenen Tiefen

(Gebildet aus den Tagesmittelwerten)

Gesamter Meßzeitraum

Zusammenstellung der Fits der Temperaturgradienten aus den Anlagen 37 - 40



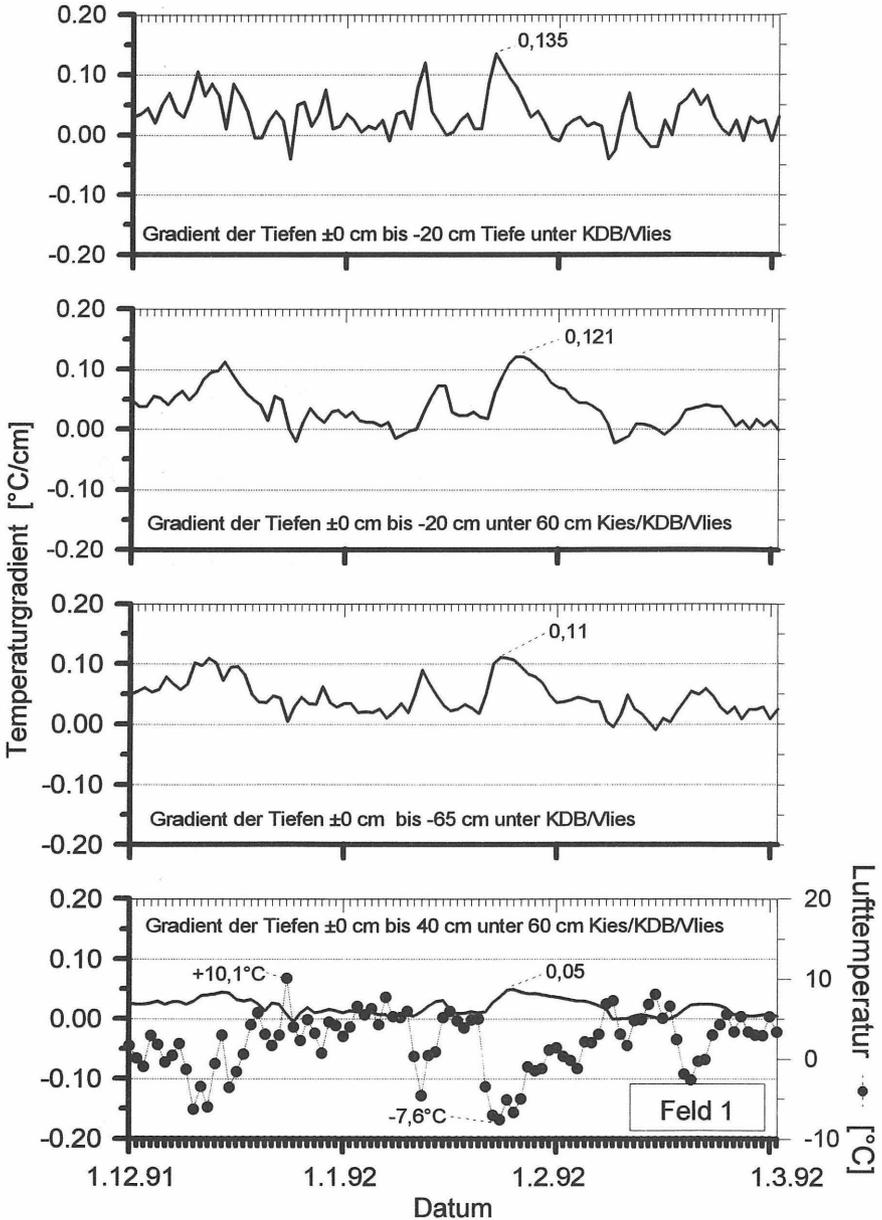
Anlagen

42 bis 49

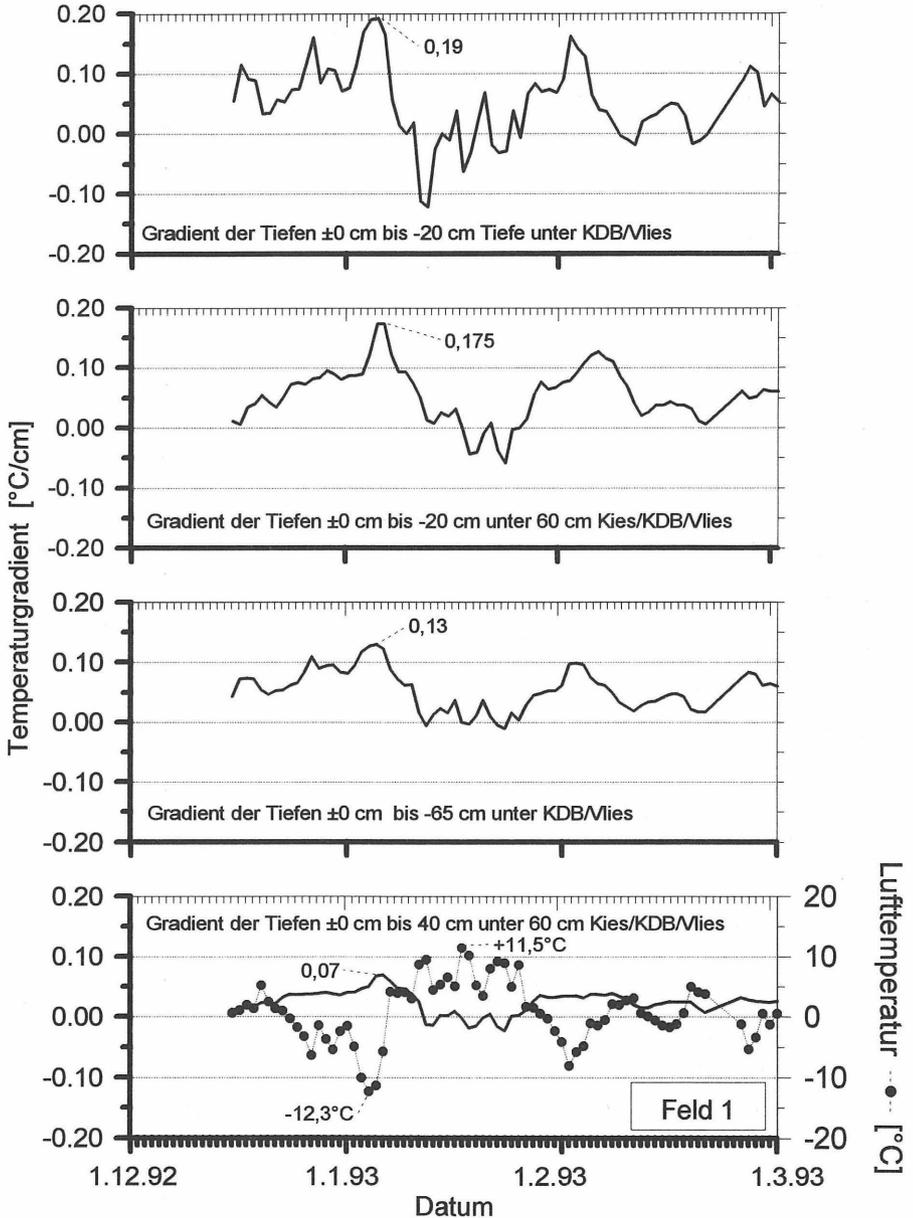
**Temperaturgradienten
für die Winterzeiträume
zwischen den obersten Temperaturfühlern
im mineralischen Material und
den angegebenen Tiefen**

(Gebildet aus den Tagesmittelwerten)

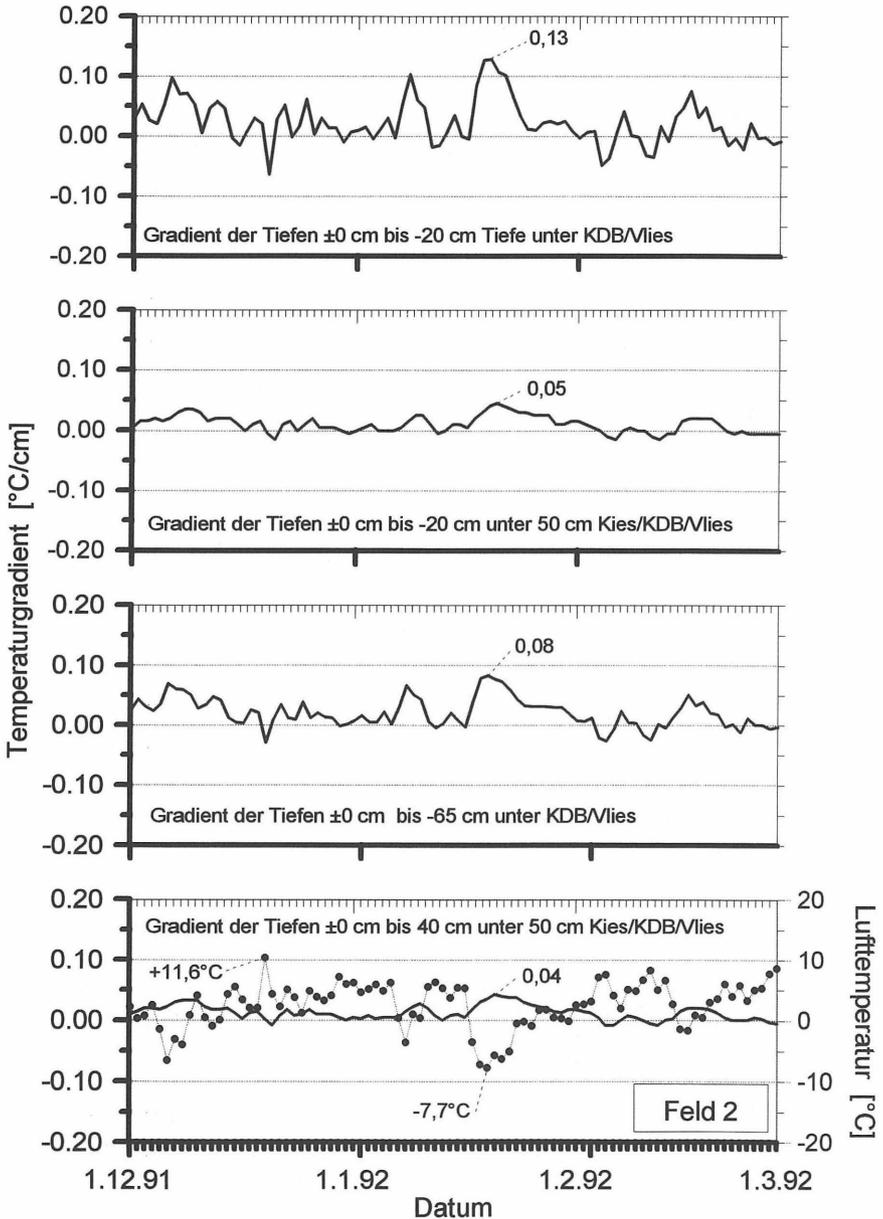
Temperaturgradienten für verschiedene Tiefenbereiche im Vergleich zur Lufttemperatur im Winter 1991/92 Feld 1



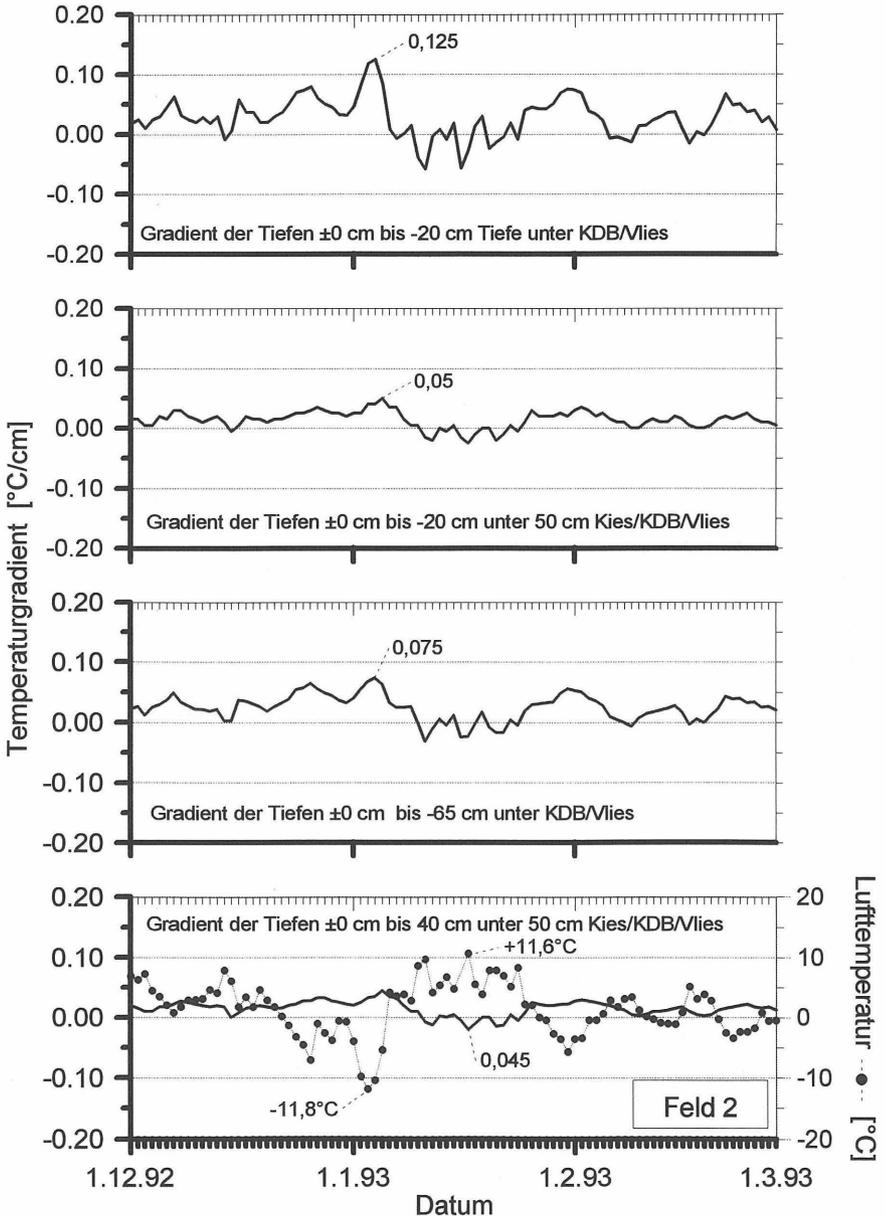
Temperaturgradienten für verschiedene Tiefenbereiche im Vergleich zur Lufttemperatur im Winter 1992/93 Feld 1



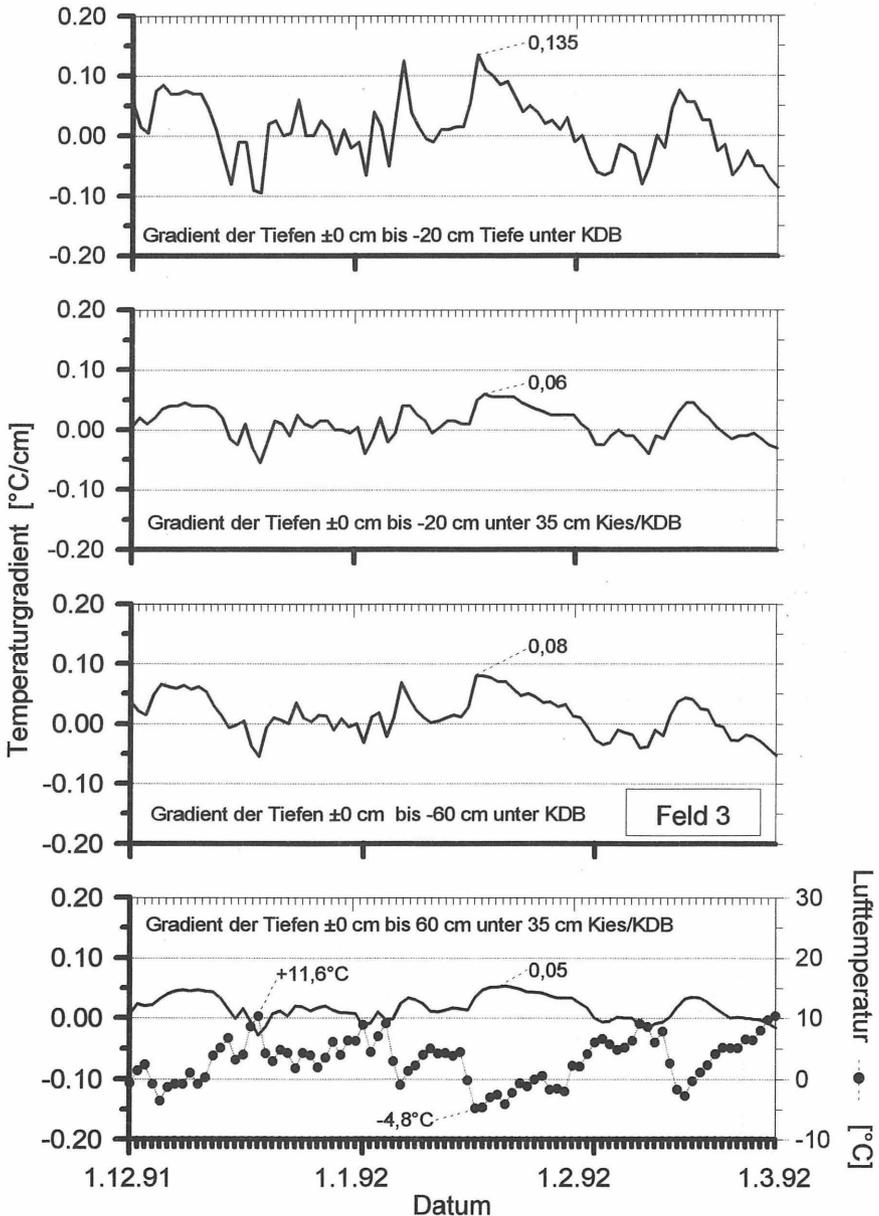
Temperaturgradienten für verschiedene Tiefenbereiche im Vergleich zur Lufttemperatur im Winter 1991/92 Feld 2



Temperaturgradienten für verschiedene Tiefenbereiche im Vergleich zur Lufttemperatur im Winter 1992/93 Feld 2

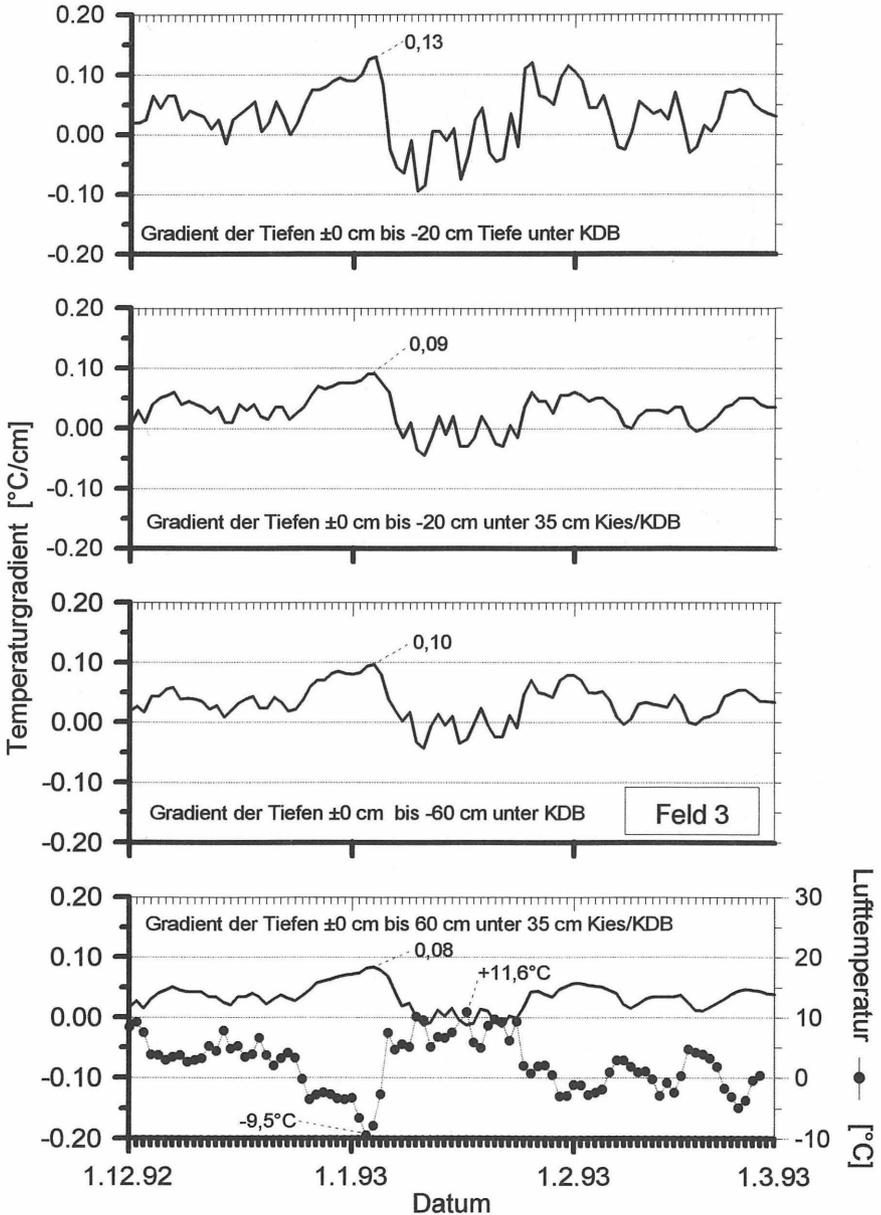


Temperaturgradienten für verschiedene Tiefenbereiche im Vergleich zur Lufttemperatur im Winter 1991/92 Feld 3

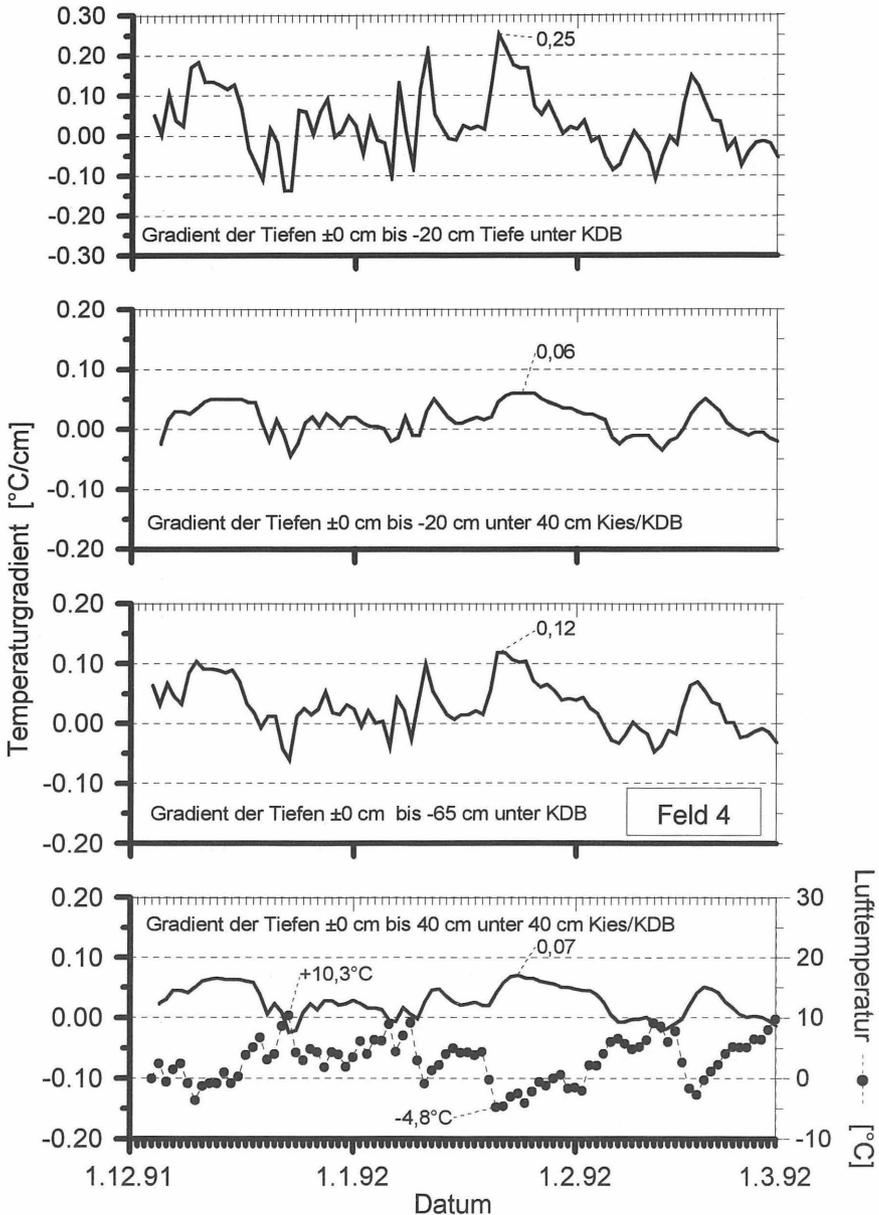


Temperaturgradienten für verschiedene Tiefenbereiche im Vergleich zur Lufttemperatur im Winter 1992/93

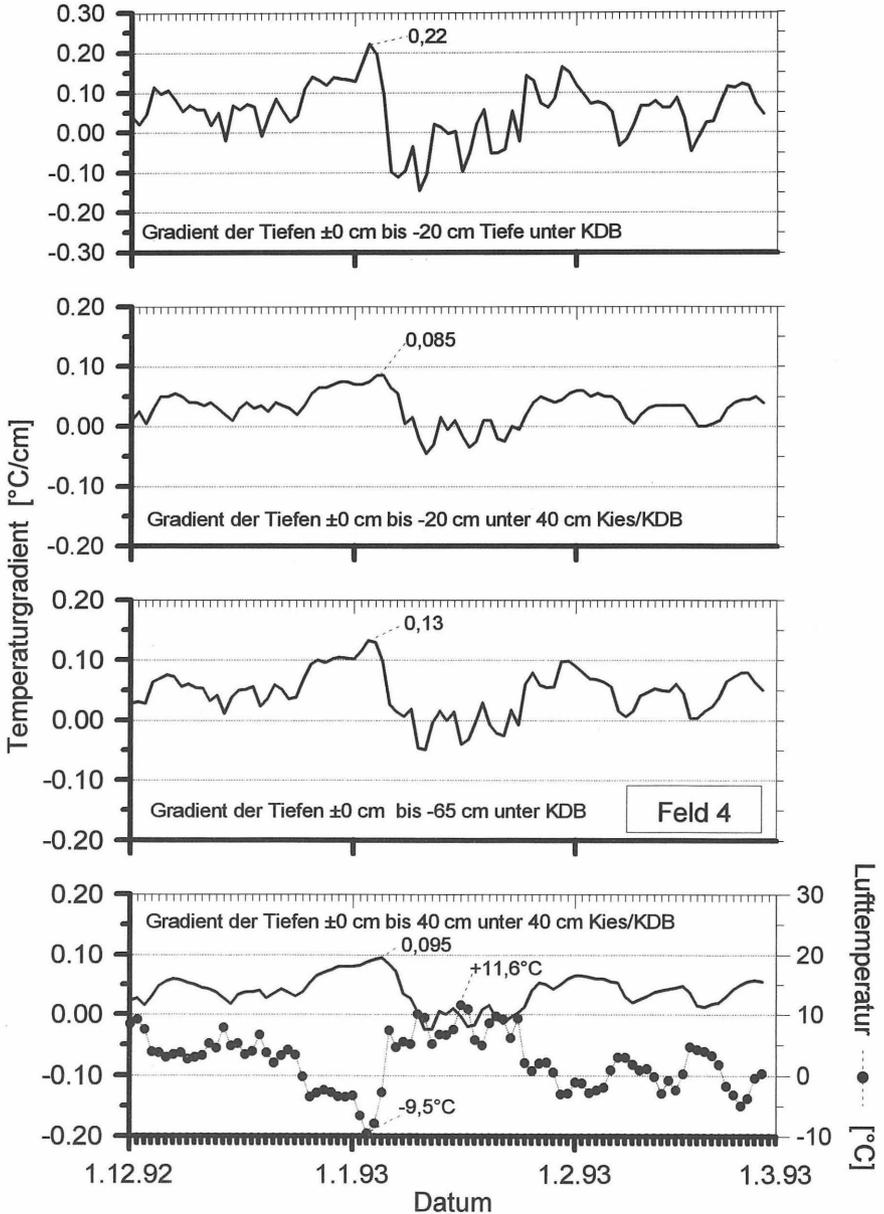
Feld 3



Temperaturgradienten für verschiedene Tiefenbereiche im Vergleich zur Lufttemperatur im Winter 1991/92 Feld 4



Temperaturgradienten für verschiedene Tiefenbereiche im Vergleich zur Lufttemperatur im Winter 1992/93 Feld 4



Synopsis

Effects of frost on mineral landfill liners

(Diagram numbers refer to the unabridged German version.)

1 Introduction

On landfill sites it may happen that partly or entirely completed landfill liners are temporarily subjected to sub-zero temperatures. Although such special on-site conditions should normally be avoided through good project planning, they can be encountered in practice for a wide variety of reasons.

Experience gained from road construction, for example, shows that all soils used as mineral liners must be regarded as sensitive to sub-zero temperatures. However, more precise details about the extent of potential changes in the soil characteristics as a function of the respective frost load - and consequently about the remaining suitability of the soils as mineral liners - had not yet been established, or were contradicting or only quantitative in nature when work on this paper began. The aim of this project was therefore to examine kind and extent of the effects of frost loads acting on a mineral landfill liner.

2 Scope of this paper

Following the compilation of some basics of the theoretic thermophysical processes involved and the special situation of lining landfills, the work program centred on four main points:

1. examination of the relevant published investigations and theories
2. experimental determination of the changing material properties in-situ and in the laboratory
3. determination of the expected temperature loads and intervening boundary conditions
4. potential protection methods

3 Tests

Field and laboratory tests were performed to gain information about the changes of the soil parameters relevant to landfills (dry density, moisture content, shear strength, permeability), and about soil structure formation and clay mineralogy.

3.1 Materials used

Six different soils from markedly plastic clay over glacial till to claystone were taken from actual landfill sites and used in the field and laboratory tests (tables 13 and 14, illustrations 25 and 26).

Although the examined soils did not always meet the requirements of the various regulations covering landfill liners (TA Abfall ** technical guideline for waste **, NRW Richtlinie ** guideline of the federal state of North Rhine-Westphalia **, Runderlaß Niedersachsen ** ministerial decree of the federal state of Lower Saxony **), they were not only used in the field trials on actual landfill sites, but also in laboratory tests to obtain, whenever possible, a substantial feedback for the field trials. The examinations of

the clay mineralogy required for classification were carried out by the Institut für Geowissenschaften at the Technische Universität Braunschweig.

3.2 Field trials

For an estimation of the hazard potential involved the resulting temperatures, effectively acting on the landfill depending on a given layer arrangement, were examined in-situ in the field trials, and also the influences of frost on the soil mechanics.

When compared to similar situations in road construction work or agricultural work, combined liners show two distinct particularities for the periods of a few months or winter periods that are considered in this paper:

- Due to its placement the soil layer in question is in a freshly imposed artificial state regarding soil parameters such as moisture content, compaction and particle orientation. This artificial state is to be preserved but its equilibrium in the new ambient conditions, which are partly dependent on the climate, has not yet been re-established.
- Trough a plastic sealing strip at its top the soil layer in question is shielded from moisture ingress or moisture loss with all resulting consequences for the moisture and heat balance.

Measurements were made with built-in temperature sensors and on-site meteorological stations according to illustration 28 and table 15 on five materials and with a total of 10 cross sections using several observation times and layer arrangements:

- uncovered mineral surface
- covered with plastic sealing strip
- covered with plastic sealing strip + geotextile
- covered with plastic sealing strip + drain layer
- covered with plastic sealing strip + geotextile + drain layer of varying thickness

Over a period of up to 2 years air temperature, air humidity, wind velocity, and solar and sky radiation were measured and stored at 30-minute intervals. Before and after winter periods sampling spoons were used to take soil specimen from the fields for subsequent examination in the laboratory.

3.3 Laboratory tests

Taking into account the numerous boundary conditions that have to be observed for laboratory tests, such as direction of frost penetration, quality of temperature regime, type of irrigation system, model factors and sample handling, two different types of freezing tests were used (illustrations 70 and 71).

4 Results

4.1 Theoretic processes involved in freezing soils

In correspondence with the basic principle that all systems tend towards the lowest energy state energy is always transported from places of higher energy (here warmer) to places of lower energy (here colder). If a colder temperature meets a warm ground surface, heat will consequently start flowing from warm to cold under isobaric boundary conditions. This heat flow will consist of the following elements: thermal conduction, convection and thermal radiation. The general effects of all processes transporting water

during a freezing process due to the mentioned elements are summarised in literature under the term "cryosuction".

The freezing of interstitial water in a soil material does not take place abruptly on temperature falling below the 0-°C limit. Instead it is a slowly progressing process that depends above all on the influences of capillarity, salt content, pressure, released latent thermal energy and type of mineral (size and strength of the hydrate cover). Conversion to ice of the free interstitial water takes place at first in the largest pores, then - on falling temperature - also in ever smaller pores and an increasing part of the hydrate cover. Finally only few molecule layers of the hydrate cover, and later of the intramolecular bound water, remain unfrozen at very low temperatures.

The transition zone between the 0-°C isothermal line and the isothermal line at which the warmest ice lens appears is known as frozen fringe. In this fringe the permeability and the content of unfrozen water are drastically decreased towards the cold end by the effect of the gradual freezing of free water at first and bound water later. At the same time the pressure of the interstitial water is raised by the volume expansion of the freezing water and the thermal gradient, and the total moisture content in this zone is increased due to the attracted water (illustrations 14 and 16).

At adequately high gradients the presence of the unfrozen water films around the solid particles still allows water movement even in frozen soils (illustration 17). Water movement decreases on falling temperature. As the quantity of unfrozen water in a frozen soil depends on the type of mineral and the size of the pores, it is a characteristic value for a material and its momentary state of compaction.

Crystallisation once induced, the ice crystals continue to grow in the soil - with preference into the direction of heat flow (here normally from the interior of the soil to its surface) - and form what is known as ice lenses provided sufficient water is available. If the feed of water - and consequently the latent conversion energy required for maintaining the thermal equilibrium - becomes insufficient, the frost front penetrates further into the soil at a maintained temperature gradient until a new thermodynamic equilibrium is found and the cycle restarts. This process is known as rhythmic ice lens formation (illustration 14). Depending on soil type, potential water feed and thermal boundary conditions, the thickness of these ice lenses may be several decimetres. The areas around the ice lenses dry up due to the withdrawal of water and shrink partly as soon as the increasing pressure of the interstitial water interrupts the flow of feed water through open paths from remote areas. Areas dried up in this way often show small shrinkage cracks and fissures, which may fill with residual ice from the hydrate covers at lower temperatures. A soil structure with numerous separate aggregates is consequently formed around the ice lens. This structure is decisively determined, through the intervening hydrate cover, by the type of clay mineral.

The orientation of the appearing ice lenses is primarily perpendicular to the direction of the combined heat and mass flow; in nature generally almost horizontal if the ground surface is even. However, if inhomogeneities are already present in the soil, such as from stratigraphy, inclusions (gravels, lumps of processed materials), or previous shear joints (also layer interfaces from landfilling), the growing ice lenses will use these structures - provided their resistance to widening is low, they have already been part of larger water paths or water accumulations, and they do not deviate by more than 30° from the preferred direction of growth. This means also that old fissures will be used when the soil freezes once again because these fissures represent weak points and have in most cases a higher permeability relative to the surrounding area.

The formation of the polyhedral frost structure together with the generation of macro pores and fissures that is characteristic for a given kind of soil is sometimes accompanied by the formation of a virtual grading curve. Caused by the withdrawal of water and the high local ice pressure, stable grain clusters (micro aggregates) might be formed through overconsolidation. These clusters remain stable even after thawing, and

they can only be separated by mechanical force or extremely long watering, which can result in a smaller measurable specific surface and lower plasticity (in general a decreased yielding point). The freezing pressure causes at the same time a sizing of the clay particles.

4.2 Parameters acting in-situ

In view of the effects of frost numerous boundary conditions have to be considered when examining a mineral liner. The most important boundary conditions are listed in table 1.

While the work field "material" can be examined in the cause of trials with well defined boundary conditions, the energy or heat balance on the ground surface is determined in the field by the equilibrium between radiation (solar and sky), wind, evaporation, convection, ice formation, sublimation, condensation, thaw, wet-weather run-off, and thermal conduction into or from the deep. This balance is therefore influenced by multiple parameters, which cannot be exactly calculated in toto.

A determination of the frost penetration and an evaluation of the thermal load acting on the soil can consequently only be obtained by in-situ measurements or by approximation in a calculation with summation parameters.

4.3 Results of the freezing tests

Based on our own laboratory and field tests as well as on the examined literature the effects of frost action on mineral landfill liners can be summarised in a general manner as follows:

1. In areas subjected to frost action the global moisture content is raised by induced cryosuction (e.g. illustration 79). Moisture content rises with increasing temperature gradient, higher initial moisture content, higher dry density, more permeable material, lower frost penetration speed and freezing time.
2. The global dry density is reduced by the volume expansion during the crystallisation of water into ice and the raise of the moisture content through incoming water (illustration 79).
3. A frost structure characteristic of both material and boundary conditions is formed (illustration 76). This structure shows a virtual grading caused by clustering into larger material units (agglomeration) and/or disintegration into smaller particles due to frost weathering (congelifraction) on the one hand or only a modified sizing (in parallel to the ice lenses) of the soil particles on the other hand. Because of the withdrawal of water, the separate aggregates have an increased dry density, and they are enveloped in the ice lenses and ice films appearing in the fissures produced in the process. Agglomeration is in general more noticeable at higher frost penetration speeds, lower temperatures, higher initial moisture content, lower permeability - and consequently in more plastic soils -, but also at a rising number of frost-thaw cycles.
4. The deeper unfrozen layers are dried up by cryosuction and have therefore a higher dry density and sometimes shrinkage cracks (e.g. illustration 79).
5. Because of the frost structure and numerous appearing fissures, the permeability, which is determined in the triaxcell, is normally raised within the factor of five - in extreme cases even within the factor of ten (table 24, illustrations 62 to 67). An extreme permeability rise up to the factor of thirty, as reported in some of the literature examined, could however not be observed. The permeability rise is more marked in soils of lower plasticity at higher initial moisture content, lower temperatures and increasing frost-thaw cycles.
6. The observed changes in the shear strength are inversely proportional to the development of the moisture content; shear strength decreases therefore in the

frozen zones (illustration 69). The correlation between shear strength and produced aggregate structure (dilatation effects on the virtual grain size) or fissure structure as reported in the literature examined could not be affirmed.

The following results could be obtained from the four in-situ test fields especially set up for the trial and from the two test areas on actual landfill sites:

1. In uncovered areas, where meteoric water can enter the soil, considerable changes of moisture content and dry density above the required limits for placing landfill liners could be observed in the frost penetration zone (illustrations 51 and 62). Repeated frost and rain events caused here ever new water flow paths through developing frost cracks and a correspondingly deeper wetting of the soil than that expected for a normal water flow. This concerns mainly materials with a high clay content. Silt mixtures with fine-sand and low clay content showed a relatively consistent long-term behaviour (illustration 53).
2. In those areas covered with a plastic sealing strip only or with a plastic sealing strip and an additional geotextile penetration of the 0-°C limit into the mineral material was up to approx. 30 cm during the relatively mild winter periods 1991/1992 and 1992/1993. Soil samples taken from the fields in these areas before and after the winter periods showed only slight changes of the basic quality parameters dry density and permeability - above all in the uppermost layer of approx. 5 cm in thickness (illustrations 54 to 57).
3. In the areas covered with a gravel drain layer it could be observed during both winter periods that drain layers of more than 40 cm in thickness prevent the 0-°C limit from penetrating below the plastic sealing strip. In this case significant differences in the characteristic values of soil mechanics could not be noted (illustrations 58 to 60). In the area of glacial till, covered with a plastic sealing strip and a gravel layer of approx. 35 cm in thickness, significant deviations from the characteristics on liner placing could not be observed either - although a single frost penetration to a depth of approx. 8 cm had been recorded.

On the whole it can be said that a change in the soil parameters relevant to mineral landfill liners can be observed following a frost penetration. This change is particularly marked if water ingress is possible at the same time - as in the absence of a plastic sealing strip, for example. However, the extent of the change is very much dependent on the respective boundary conditions - above all the mineralogical composition - and can at present, because of the numerous influence parameters on the existing data, not be described in a general form for all soils and temperature loads.

Some materials, in particular markedly plastic clays, have much better characteristics on placement than those required by liner placement limits. As the actual values are in these cases better than those required, the observed changes in dry density, moisture content and permeability are partly still within the permissible limits during mild frosts. In addition, laboratory test indicated that these changes are partly reversible through re-consolidation by loading at a later time.

Nonetheless, frost penetration must be avoided for these materials as well because the fissures created by frost will remain latent and may widen again following a possible settlement and deformation of the liner together with heat effects and possible shrinking. During and after thawing there is an additional danger of soil slides in the parting lines created by water pockets, which spread parallel to the slope and perpendicular to the direction of frost penetration, or sodden zones.

4.4 Examination of the frost hazards of mineral liners

If the frost hazard for a material has to be determined, the expected changes in the soil parameters of the material have to be specified through laboratory tests following a

rough soil classification on the basis of grading curve and clay content as well as recourse to experience of comparable materials. As standardised methods for frost trials are as yet not available, some suggestions for carrying out such trials will be made in this paper. According to the measurements made the stagnation gradients to be applied can be chosen with $\Delta t \leq 0.25$ °C/cm for low-thickness cover layers of < approx. 30 cm and with $\Delta t \leq 0.15$ °C/cm for gravel layers > 30 cm or materials that are thermally equivalent. For the evaluation of the laboratory tests it has to be taken into account that the changes measured in the laboratory tests are in general greater than those measured in-situ on materials covered with at least one plastic sealing strip and therefore shielded from the infiltration of humidity. The reason for this deviation can be seen mainly in temperature load and soil sample handling. Therefore, the results of the laboratory tests include normally a safety margin with regard to the evaluation of frost hazards.

4.5 Results of the field trials regarding thermal protection layers

On gravel drain layers of more than approx. 40 cm in thickness frost penetration below the plastic sealing strip could not be measured in the winter periods 1991/1992 and 1992/1993. The temperature difference between a cover of one single plastic sealing strip and a cover of plastic sealing strip and geotextile was approx. 4 °C, and almost independent of the frost sum (max. 70 °Cd) and the lowest air temperature measured. For a gravel layer of 35 cm in thickness without an additional mechanical cover on top of a plastic sealing strip the temperature difference fell to approx. 2 °C.

However, a generalisation regarding the permanent frost protection with drain layers of more than 40 cm in thickness is not possible because of the varying (unpredictable) frost events. Nonetheless, necessity and performance of various frost protection methods can be determined by heat balance calculations, which were made on two different liner structures and depending on the surface temperature (illustrations 105 and 106). For the evaluation of the calculation results the climate data from nearby meteorological stations (here stations of the Deutscher Wetterdienst) have to be analysed and co-ordinated.

Potential protection layers may be previously deposited layer packages, in particular the mechanical protection layer and the drain layer. Whenever possible, a fine-waste layer of approx. 1 m in thickness should then be deposited on top. This layer provides in the latitudes discussed here (Germany) and under normal conditions a sufficient protection against frost penetration. Additional permanent or temporary thermal protection layers may be of gravel, straw, earth, compost, shredded bark, geotextile, foil, composite mat, artificial snow, HR-foam board etc. The most important criteria for selecting a suitable protection layer are listed in table 25.

It is also possible to use special constructions such as the temporary flooding of unfilled polders (illustration 111) or big bags filled with inert waste and placed in a staggered arrangement (illustration 112).

5 Conclusion and practical use

In the frozen zones of mineral landfill liners a frost structure is created that is characteristic of both the material and the boundary conditions. This frost structure shows fissures (frost weathering), increased moisture content (cryosuction), lower dry density (loosening, soil disintegration by frost), and in general reduced shear strength. After thawing the capacities for hydraulic conduction (permeability determined in the triaxcell) are increased within the factor of five - in extreme cases even within the factor of ten. The shear strengths are inversely proportional to the developments of the moisture contents. Depending on the composition of the material, the changes in the soil parameters are partly reversible through re-consolidation by loading at a later time.

However, the frost structure remains latent so that the material is not any longer homogeneous.

Depending on the material used, the difference between the obtained placement characteristics on a particular landfill site and the required values (many materials exceed the required values and have consequently a safety margin), the frost load, and the storage conditions after thawing, a landfill liner may still meet the basic requirements for its use after a frost penetration.

Further problems to be considered: temporary loss of soil bearing capacity at the interface between plastic sealing strip and mineral material immediately after thawing through increased moisture content by cryosuction even if other parameters are not substantially changed and frost penetration is short and shallow. Consequences: potential soil slides on slopes

In mild winters with frost events not too late in the season gravel drain layers in a common thickness of up to approx. 50 cm can protect the mineral material against frost (and against important changes through heat in summer); but gravel drain layers alone cannot give absolute protection. If it can be expected that waste cannot be deposited on the site for several years to come, an additional thermal protection layer has to be provided.

6 Future scope

In the field of mineral materials more extensive investigation is required - in particular into the correlation between the mineralogical composition and the effects of frost. Also, the effects of higher temperatures on previously frozen materials, the stress-strain curve of such materials and the permeability under shear stress and different loads should be the subject of further research.

Summary

This paper deals with the processes involved in and consequences of sub-zero temperatures on the soil parameters relevant to landfill liners. The main points discussed in this paper are:

- a) examination of published investigations and theories
- b) determination of the changing material properties by in-situ and laboratory experiments
- c) experimental determination of temperature loads in-situ and of influences of real boundary conditions in laboratory tests
- d) possible thermal protection methods

In general a structure will be formed in the material which is characteristic of the matrix of the material and the main influence parameters. The results are a rising moisture content in the frozen zone (in case of cryosuction), a lower dry density (loosening by ice lenses) and normally a lower shear capacity. The permeability measured in a triaxcell of the thawed material is raised within the factor of five - in extreme cases within the factor of ten. On the whole the changes measured in-situ are smaller than those measured in the laboratory. The changes are partly reversible by loading, but the structure created by frost will remain latent. One of the essential influences on soil parameters and reversibility is represented by the mineralogy of the material.

Frost penetration in the clay liner below a drain layer of about 40 cm (gavel $d = 16/32$) could not be measured during two winter periods with normal to light weather conditions.

Following a frost penetration, landfill liners covered with a plastic sealing strip alone or a plastic sealing strip and a geotextile showed only slight changes in dry density and moisture content. Changes in permeability were even less marked. For uncovered landfill liners alternating cycles of rain, frost and drying resulted in noticeable changes in dry density, moisture content and soil structure.

In conclusion it can be said that this paper discusses some materials with regard to their suitability as a thermal protection for landfill mineral liners. In addition, a flow chart for work on frost-related problems within compacted-clay landfill liners is proposed.

Bisher erschienene Mitteilungshefte des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik

- | | | |
|----------|------------------------------|--|
| Nr. 76-1 | Scheffler, E. | Die abgesteifte Baugrube berechnet mit nichtlinearen Stoffgesetzen für Wand und Boden, 1976 |
| Nr. 78-2 | Frank, H. | Formänderungsverhalten von Bewehrter Erde - untersucht mit Finiten Elementen, 1978 * |
| Nr. 79-3 | Schnell, W. | Spannungen und Verformungen bei Fangedämmen, 1979 |
| Nr. 80-4 | Ruppert, F.-R. | Bodenmechanische Eigenschaften der Lauenburger Serie - Ein Beispiel für Statistik in der Bodenmechanik, 1980 |
| Nr. 81-1 | Schuppener, B. | Porenwasserüberdrücke im Sand unter Wellenbelastung auf Offshore-Bauwerken, 1981 * |
| Nr. 6 | Wolff, F. | Spannungen und Verformungen bei Asphaltstraßen mit ungebundenen Tragschichten, 1981 |
| Nr. 7 | Bätcke, W. | Tragfähigkeit gedrungener Körper im geneigten Halbraum, 1982 |
| Nr. 8 | Meseck, H.
Schnell, W. | Dichtungswände und -sohlen, 1982 * |
| Nr. 9 | Simons, H.
Ruppert, F.-R. | Entwicklung geeigneter Verfahren zum Messen der physikalischen Eigenschaften von Bentonitsuspensionen auf Baustellen, 1982 * |
| Nr. 10 | Beckmann, U. | Einflußgrößen für den Einsatz von Tunnelbohrmaschinen, 1982 |



IGB-TUBS

- Nr. 11 Papakyriakopoulos Verhalten von Erd- und Steinschüttdämmen unter Erdbeben, 1983
- Nr. 12 Sondermann, W. Spannungen und Verformungen bei Bewehrter Erde, 1983
- Nr. 13 Meseck, H. Sonderheft zum 10-jährigen Bestehen des Instituts, 1984
- Nr. 14 Raabe, W. Spannungs-Verformungsverhalten überkonsolidierter Tone und dessen Abhängigkeit von ingenieur-geologischen Merkmalen, 1984
- Nr. 15 Früchtenicht, H. Zum Verhalten nichtbindigen Bodens bei Baugruben mit Schlitzwänden, 1984
- Nr. 16 Knüpfer, J.
Meseck, H. Schildvortrieb bei flüssigkeitsgestützter Ortsbrust, 1984
- Nr. 17 N.N. Ablagerung umweltbelastender Stoffe - Fachseminar in Braunschweig am 6. und 7. Februar 1985 *
- Nr. 18 Simons, H.
Reuter, E. Entwicklung von Prüfverfahren und Regeln zur Herstellung von Deponieabdichtungen aus Ton zum Schutz des Grundwassers, 1985 *
- Nr. 19 Meseck, H. Dynamische Pfahltests - Fachseminar in Braunschweig am 23. und 24. Oktober 1985
- Nr. 20 Meseck, H. Abdichten von Deponien, Altlasten und kontaminierten Standorten - Fachseminar in Braunschweig am 6. und 7. November 1986 *

- | | | |
|--------|---|--|
| Nr. 21 | Balthaus, H. | Zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Pfählen mit dynamischen Pfahlprüfmethoden, 1986 |
| Nr. 22 | Kayser, R.
Meseck, H.
Rösch, A.
Hermanns, R. | Untersuchungen zur Deponierung von Braunkohlenaschen, 1986 |
| Nr. 23 | Meseck, H. | Dichtwände und Dichtsohlen - Fachseminar in Braunschweig am 2. und 3. Juni 1987 |
| Nr. 24 | Krause, Th. | Schildvortrieb mit erd- und flüssigkeitsgestützter Ortsbrust, 1987 |
| Nr. 25 | Meseck, H. | Mechanische Eigenschaften mineralischer Dichtwandmassen, 1987 |
| Nr. 26 | Reuter, E. | Durchlässigkeitsverhalten von Tonen gegenüber anorganischen und organischen Säuren, 1988 |
| Nr. 27 | Wichert, H.-W. | Der Einfluß der Alterung auf die Tragfähigkeit historischer Spick-Pfahl-Gründungen, 1988 |
| Nr. 28 | Geil, M. | Untersuchungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Bentonit-Zement-Suspensionen im frischen und erhärteten Zustand, 1989 |
| Nr. 29 | Kruse, T. | Standsicherheit von Kombinationsabdichtungen auf Deponieböschungen, 1989 |
| Nr. 30 | Rodatz, W.
u.a. | Sonderheft zum 15jährigen Bestehen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, 1989 |



IGB-TUBS

- Nr. 31 Rodatz, W.
 Beckefeld, P.
 Sehrbrock, U. Standsicherheiten im Deponiebau / Schadstoffeinbindung durch Verfestigung von Abfällen - Fachseminar in Braunschweig am 19. und 20. März 1990
- Nr. 32 Knüpfer, J. Schnellverfahren für die Güteüberwachung mineralischer Deponiebasisabdichtungen, 1990
- Nr. 33 Beckefeld, P. Schadstoffaustrag aus abgebundenen Reststoffen der Rauchgasreinigung von Kraftwerken - Entwicklung eines Testverfahrens, 1991
- Nr. 34 He, G. Standsicherheitsberechnungen von Böschungen, 1991
- Nr. 35 Rodatz, W.
 Sehrbrock, U. Probenentnahme bei der Erkundung von Verdachtsflächen (Altlasten), Fachseminar in Braunschweig am 13. September 1991
- Nr. 36 Kahl, M. Primär- und Sekundärspannungszustände in überkonsolidiertem Ton - Am Beispiel eines im Hamburger Glimmerton aufgefahrenen Tiefdückers, Sissertation, 1991
- Nr. 37 Rodatz, W.
 Hemker, O.
 Voigt, Th. Standsicherheiten im Deponiebau, Fachseminar in Braunschweig am 30. und 31. März 1992
- Nr. 38 Rodatz, W.
 Meier, K. Dynamische Pfahltests, Fachseminar in Braunschweig am 21. und 22. Januar 1991
- Nr. 39 Rösch, A. Die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit im Gelände - Entwicklung von Meßsystemen und Vergleich verschiedener Auswerteverfahren, 1992

- | | | |
|--------|---|--|
| Nr. 40 | Sehrbrock, U. | Prüfung von Schutzlagen für Deponieabdichtungen aus Kunststoff, 1993 |
| Nr. 41 | Rodatz, W.
Hartung, M.
Wienholz, B. | Pfahl Symposium 1993
Fachseminar in Braunschweig am 18. und 19. März 1993 |
| Nr. 42 | Rodatz, W.
Gattermann, J.
Hartung, M. | IGB-TUBS Lexikon - Sammlung ca. 5500 technischer Ausdrücke in Deutsch, Englisch, Französisch und Spanisch - zusammengestellt in 4 Bänden, 1993 |
| Nr. 43 | Rodatz, W.
Hemker, O.
Horst, M.
Kayser, J. | Geotechnische Probleme im Deponie- und Dichtwandbau - Fachseminar in Braunschweig am 17. und 18. März 1994 |
| Nr. 44 | Rodatz, W.
Gattermann, J.
Wienholz, B. | Messen in der Geotechnik
Fachseminar in Braunschweig am 26. und 27. Mai 1994 |
| Nr. 45 | Hartung, M. | Einflüsse der Herstellung auf die Pfahltragfähigkeit in Sand, 1994 |
| Nr. 46 | Hemker, O. | Zerstörungsfreie Meßverfahren zur Qualitätsprüfung mineralischer Dichtungen, 1994 |
| Nr. 47 | Voigt, Th. | Frosteinwirkung auf mineralische Deponieabdichtungen, 1994 |
| Nr. 48 | Rodatz, W.
Ernst, U.
Wienholz, B. | Pfahl-Symposium 1995
Fachseminar in Braunschweig am 23. und 24. Februar 1995 |

