

# **Interpretation von Drucksondierungen zur Erkundung von Mischbodenkippen als Baugrund**

Von der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau  
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg  
genehmigte

## **DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur  
Dr.-Ing.

vorgelegt  
von Diplom-Ingenieur Uwe Knobloch

geboren am 20.04.1962 in Meißen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Herbert Klapperich, Freiberg  
Prof. Dr. rer. nat. habil Dr. h. c. Wolfgang Förster, Niederschöna/Hetzdorf  
Dr.-Ing. Alfred Vogt, Senftenberg

Tag der Verleihung: 01.07.2008

## **D a n k s a g u n g**

Diese Arbeit ist im Ergebnis des Forschungsvorhabens „Bauen auf Mischbodenkippen des Braunkohlenbergbaus im Mitteldeutschen Revier“ entstanden. Dank für die Förderung gilt dem BMBF Bundesministerium für Bildung und Forschung und der LMBV Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau- Verwaltungsgesellschaft mbH. Ganz herzlich danke ich Herrn Professor Dr. rer. nat. habil. Dr. h. c. W. Förster für die Anregung und außerordentliche Unterstützung bei der Forschungsarbeit, die schließlich zu dieser Arbeit führte. Herrn Professor Dr.-Ing. H. Klapperich danke ich für die Betreuung und Motivation zu dieser Arbeit sowie Herrn Dr.-Ing. A. Vogt für die Übernahme des Korreferats. Besonderer Dank gehört auch meiner Familie.

Uwe Knobloch

## Inhaltsverzeichnis

|          | Seite                            |           |
|----------|----------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung und Aufgabe</b>    | <b>6</b>  |
| <b>2</b> | <b>Kippencharakteristik</b>      | <b>8</b>  |
| 2.1      | Übersicht                        | 8         |
| 2.2      | Technologie des Kippenaufbaus    | 8         |
| 2.3      | Schüttvorgang                    | 11        |
| 2.4      | Pseudokorn in Mischbodenkippen   | 14        |
| 2.5      | Setzungen der Kippenoberfläche   | 15        |
| 2.6      | Grundwasser                      | 17        |
| 2.7      | Setzungsfließen                  | 18        |
| <b>3</b> | <b>Grundlagen</b>                | <b>19</b> |
| 3.1      | Verwendete statistische Methoden | 19        |
| 3.1.1    | Verteilungs- und Formparameter   | 19        |
| 3.1.2    | Datentransformation              | 20        |
| 3.1.3    | Histogramm                       | 21        |
| 3.2      | Drucksondierungen                | 21        |
| 3.2.1    | Sondengeometrie und Standards    | 21        |
| 3.2.2    | Einflüsse auf das Messergebnis   | 22        |
| 3.2.3    | Gemessene Parameter              | 24        |
| 3.2.4    | Abgeleitete Parameter            | 24        |
| 3.2.5    | Ableitung des Baugrundaufbaus    | 26        |
| 3.3      | Setzungsberechnung               | 29        |

---

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>4</b> | <b>Baugrunduntersuchungen auf Tagebaukippen</b> | <b>30</b> |
| <b>5</b> | <b>Erkundungsstrategie</b>                      | <b>33</b> |
| 5.1      | Vorbemerkung                                    | 33        |
| 5.2      | Grundsätze                                      | 33        |
| 5.3      | Grundgesamtheiten                               | 34        |
| 5.4      | Erkundungsetappen                               | 35        |
| 5.5      | Voruntersuchung                                 | 35        |
| 5.6      | Hauptuntersuchung                               | 36        |
| 5.6.1    | Ziel  | 36        |
| 5.6.2    | Anordnung der Aufschlüsse                       | 36        |
| 5.6.3    | Abstände der Aufschlüsse                        | 37        |
| 5.6.4    | Aufschlusstiefe und Aufschlussmethode           | 37        |
| <b>6</b> | <b>Versuche im Tagebau Zwenkau</b>              | <b>41</b> |
| 6.1      | Standortbeschreibung                            | 41        |
| 6.2      | Erkundungs- und Versuchsprogramm                | 41        |
| 6.3      | Auswertung der Bohrungen                        | 44        |
| 6.4      | Pseudokorn                                      | 54        |
| 6.5      | Drucksondierungen                               | 58        |
| 6.5.1    | Sondierungen auf der Teilfläche B1              | 59        |
| 6.5.2    | Sondierungen auf der Teilfläche B2              | 62        |
| 6.5.3    | Nachsondierungen                                | 64        |
| 6.5.4    | Bewertung und erste Schlussfolgerung            | 66        |
| 6.5.5    | Anforderungen an das Messprotokoll              | 68        |
| 6.6      | Bewertung mittels statistischer Methoden        | 69        |
| 6.6.1    | Vorbemerkungen                                  | 69        |
| 6.6.2    | Ziel der Untersuchungen                         | 71        |
| 6.6.3    | Graphische Darstellung                          | 71        |
| 6.6.3.1  | Boxplot   | 71        |
| 6.6.3.2  | Histogramm                                      | 75        |

---

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 6.6.3.3   | Andere Darstellungen                        | 80         |
| 6.6.4     | Geostatistik                                | 80         |
| 6.6.5     | Eine Alternative                            | 84         |
| <b>7</b>  | <b>Probelastung</b>                         | <b>101</b> |
| 7.1       | Großversuche                                | 101        |
| 7.2       | Standort und Bauwerk                        | 101        |
| 7.3       | Rahmenbedingungen und Dimensionierung       | 101        |
| 7.4       | Mess- und Untersuchungsprogramm             | 102        |
| 7.5       | Messergebnisse                              | 104        |
| 7.6       | Setzungsberechnung                          | 106        |
| <b>8</b>  | <b>Zusammenfassung und Schlussfolgerung</b> | <b>115</b> |
| <b>9</b>  | <b>Literaturverzeichnis</b>                 | <b>118</b> |
| <b>10</b> | <b>Anhang</b>                               | <b>127</b> |

## 1 Einleitung und Aufgabe

Kohle ist ein Energieträger mit gegenwärtig steigender Bedeutung. Braunkohle war bis 1990 Hauptenergieträger der ostdeutschen Bundesländer und bleibt ein wichtiger Energieträger [115].

Der Braunkohlenbergbau nahm große Flächen in Anspruch. Auf diesen Flächen wurde das über dem Rohstoff Braunkohle lagernde Deckgebirge abgetragen, transportiert und unverdichtet abgelagert. Die Größe der überbaggerten Fläche betrug im Mitteldeutschen Revier im Großraum Leipzig ca. 250 km<sup>2</sup> [12].

Teile dieser Kippenflächen, insbesondere der Südraum von Leipzig, wurden in der Vergangenheit nur vereinzelt bebaut. Bereits gegenwärtig zeigt sich ein steigender Bedarf, diese Kippenflächen zu nutzen. Mit weiteren Industrieansiedlungen und Maßnahmen zur Verbesserung der Infrastruktur im Umfeld von Leipzig nimmt der Zwang zu, Kippenflächen bebauen zu müssen. Ursachen dafür sind:

- In ehemaligen Bergbaurevieren können Kommunen nur auf ehemaligen Bergbauflächen zusätzliches Bauland gewinnen.
- Bauwerke auf Kippen schonen unberührte Standorte und sind daher in Bergbaurevieren bevorzugt nur auf ehemaligen Bergbauflächen genehmigungsfähig.
- Verkehrswege und Versorgungsleitungen müssen Kippenflächen queren.

Tagebaukippen unterscheiden sich vom früheren natürlichen Deckgebirge wesentlich in der Variation der verschiedenen Korngrößenfraktionen in der Kippe selbst, in der Dichte des Lockergesteins und den daraus resultierenden Eigenschaften. Kippen sind inhomogen und bevorzugt locker gelagert. Deshalb sind infolge äußerer Lasten große Setzungen, Setzungsunterschiede sowie Sackungen bei Grundwasserwiederanstieg zu prognostizieren.

Für den Baugrundingenieur besteht nun zwangsläufig der Bedarf, die Baugrundverhältnisse an Hand von Aufschlussdaten mit Hilfe von Interpretationsmethoden im Hinblick auf die jeweiligen Baumaßnahmen besser beurteilen zu können. Dazu können statistische Verfahren zur Bewertung der Aufschlussdaten herangezogen werden. Jedoch konnte bisher mit Hilfe der Geostatistik keine zufriedenstellende Prognose bei der Bewertung von Messdaten z. B. aus Drucksondierungen gewonnen werden. Besonders erschwerend bei der Bewertung erscheinen die Besonderheiten der Mischbodenkippen im Braunkohlenbergbau des Mitteldeutschen Reviers.

In der vorgelegten Arbeit werden Besonderheiten der Tagebaukippen, insbesondere Mischbodenkippen, analysiert. Die Problematik der Schüttung und der besonderen Bodenstruktur wird analysiert.

Am Beispiel der Daten eines konkreten Standortes im Mitteldeutschen Revier südlich der Stadt Leipzig werden ausgewählte Erkundungsergebnisse dokumentiert und Besonderhei-

ten einer solchen Kippe gezeigt sowie wichtige Messergebnisse der Probelastungen dargestellt.

Auf einer Teilfläche wurden bei Probelastungen Setzungen gemessen. Diese Setzungen wichen von den Erwartungen ab. Die vorliegenden Erkundungsergebnisse sind hinsichtlich der gemessenen Setzungen nochmals zu interpretieren.

Für eine Beurteilung der Baugrundverhältnisse auf Mischbodenkippen ist die Anwendung geostatistischer Methoden zu prüfen. Der Fall der Nichtanwendbarkeit ist zu begründen.

Eine bessere Übersicht über die Messergebnisse und ihrer wichtigsten Eigenschaften muss ermöglicht werden, die besonders bei einer größeren Anzahl von Sondierungen und umfassenden Tiefenbereichen visuell und gedanklich schwer fassbar sind. Lagerungsverhältnisse sind zu visualisieren, die zu großen Setzungsbeträgen und Setzungsdifferenzen führten und bei der Bemessung vorgesehener Bauwerke Berücksichtigung finden müssen. Schlussfolgerungen für Baugrunduntersuchungen auf Kippen sind zu treffen.

## 2 Kippencharakteristik

### 2.1 Übersicht

Im Kapitel 2.2 werden wichtige Begriffe des Kippenaufbaus erläutert. Technologische Varianten, die den Kippenaufbau beeinflussen, werden aufgezählt. Die speziell am Standort Zwenkau angewandte Technologie zur Schüttung der Kippe wird erklärt. Weitere Begriffserklärungen enthält der Anhang 11.

Kapitel 2.4 behandelt Besonderheiten der Kippenstruktur, wobei bezüglich der Pseudokornstruktur bereits auf Erkundungsergebnisse vorgegriffen wird. In Kapitel 2.5 werden die Setzungsanteile, die zur Senkung der Kippenoberfläche führen, genannt. Kapitel 2.6 weist auf die wichtigsten Besonderheiten bezüglich des Grundwassers hin.

### 2.2 Technologie des Kippenaufbaus

Durch die aufgeführten Faktoren wird das spätere Verhalten der Kippe beeinflusst:

- *Liegendrelief*. Das Liegende der Tagebaukippe wird durch den Tagebauprozess entlastet und anschließend wieder belastet. Besondere Betrachtungen sind im Bereich überschütteter Randböschungen notwendig. Hier ist wegen der sich rasch ändernden Kippenhöhe mit ungleichen Setzungen und Sackungen zu rechnen.
- *Lockergesteinsdurchmischung*. Im Tagebauprozess werden verschiedene, auf der gewachsenen Seite anstehende Lockergesteinshorizonte durch Gewinnung, Transport und Ablagerung mehr oder weniger stark durchmischt. In Mischbodenkippen bilden diese Bestandteile keine homogene Masse. Teilweise bleiben Klumpen der ursprünglichen Lockergesteine erhalten.
- *Kippscheiben*. Kippen werden meist schichtweise durch Schüttgeräte hergestellt. Volumenbereiche dieser Schichten werden als Kippscheiben bezeichnet [55].

Die Art der Rohstoffgewinnung im Tagebau ist vom geologischen Aufbau der Lagerstätte abhängig. Die Stratigraphie des Deckgebirges muss demzufolge bekannt sein. Die Varianten der Kippen resultieren wiederum aus technologischen Bedingungen. Hierzu zählen u. a. [126]:

- Art der Gewinnung:
  - die Art des Verhiebs (Blockverhieb, Seitenverhieb),
  - die Art der Gewinnungsgeräte und Besonderheiten der Gewinnung,
  - Abtragsmächtigkeit, Anzahl der Gewinnungsschnitte,

- Art des Transports:
  - Abraumförderbrücke (AFB), Bandanlage, Gleis (Zugtransport),
  - Direktversturz (Bagger - Absetzer - Kombination),
  - LKW – Transport,
- Art der Ablagerung:
  - kontinuierlicher oder diskontinuierlicher Betrieb,
  - AFB-Kippe, Bandabsetzerkippe, Zugabsetzerkippe,
  - Spülkippe, Pflugkippe, LKW-Kippe und Handkippe.



*Bild 1: Zugabsetzer links der Bildmitte[48]*

Einen Überblick zur Technologie eines Zugabsetzers zeigt Bild 1. Der den Abraum liefernde Zug mit Selbstentladewaggons befindet sich rechts der Bildmitte auf der Gleisanlage neben dem Absetzer links der Bildmitte. Aus den Waggons wird der Abraum in den in der Abbildung nicht sichtbaren Kippgraben zwischen Absetzer und Zuggleis gekippt. Durch ein am Absetzer angebrachtes Aufnahmeggerät, z. B. einen Bagger, wird der Abraum erneut aufgenommen und über Förderbänder bis zum Ausleger transportiert. Am Ende dieses Auslegers fällt der Abraum herab und bildet die Abraumkippe. Bild 2 zeigt die vom Zugabsetzer gekippte und durch Planierraupen bereits eingeebnete Fläche, die für spätere Probelastungen vorbereitet wird.



*Bild 2: Zugabsetzer neben den Flächen der vorgesehenen Probelastungen [48]*

Einen Überblick über den Einfluss der bereits genannten technologischen Bedingungen auf zu erwartende geotechnische Parameter gibt Tabelle 1.

Umfassende Darstellungen zur Tagebautechnik, Tagebautechnologie und zur Verkippung sind in einschlägiger Fachliteratur enthalten, z. B. in [55] und [126]. Die Mächtigkeit der Ablagerungen reicht von wenigen Metern bis über 100 m [27].

Tabelle 1: Einfluss technologischer auf geotechnische Parameter [48]

| <b>technologischer Parameter</b>  | <b>geotechnischer Parameter</b>  |
|---|--|
| Art der Gewinnung:  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwässerung des Deckgebirges,</li> <li>• Art des Verhiebs,</li> <li>• Art der Gewinnungsgeräte und Besonderheiten der Gewinnung,</li> <li>• Abtragsmächtigkeit, Anzahl der Gewinnungsschnitte,</li> </ul> | Wassergehalt,<br>Art und Durchmischung der Lockergesteine,<br>Wasserspiegelabsenkung   |
| Art des Transports:   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Abraumförderbrücke (AFB), Direktversturz,</li> <li>• Bandanlage, Gleis (Züge)</li> <li>• LKW-Transport, Planierraupe</li> </ul>  | Mischung mit Material verschiedener Gewinnungsstellen, Entmischung durch Transport, Änderung des Wassergehalts, Änderung der Konsistenz bei bindigen Böden, Festigkeitsverlust bei thixotropen Böden |
| Art der Ablagerung:   |  |
| • LKW-Kippe und Handkippe   | wechselnde, lockere Ablagerungen   |
| • Pflugkippe  | gleichmäßig, sehr locker   |
| • Spülkippe   | klassierte Ablagerung, inhomogen durch Mäanderbildung [76]   |
| • Zugabsetzer (diskontinuierlicher Betrieb)   | Material- und Dichteverteilung, Kippenaufbau   |
| • Bandabsetzer (kontinuierlicher Betrieb)   | Material- und Dichteverteilung, Kippenaufbau   |
| • Abraumförderbrücke (AFB)  | Material- und Dichteverteilung, Kippenaufbau   |

## 2.3 Schüttvorgang

### *Dichteverteilung*

Im unmittelbaren Aufschlagbereich des Massenstroms entsteht zunächst eine verdichtete Zone. Nur ein Teil der abgeworfenen Massen verbleibt im unmittelbaren Aufschlagbereich, während der überwiegende Teil abgleitet bzw. abrollt. Klumpen werden allerdings im gesamten Schüttbereich und nicht überwiegend im Fußbereich festgestellt. Ausnahmen jedoch werden ebenso für möglich erachtet [97][98]. Die Verteilung der Dichte im Schüttkegel ist abhängig von verschiedenen Parametern. In den Abrollbereichen eines Schüttkegels wurde eine geringere Schüttdichte als in der Kegelmittle im Aufschlagbereich nachgewiesen [26][27][28]. Tabelle 2 dokumentiert die Zunahme der Dichte im Schüttkegel mit

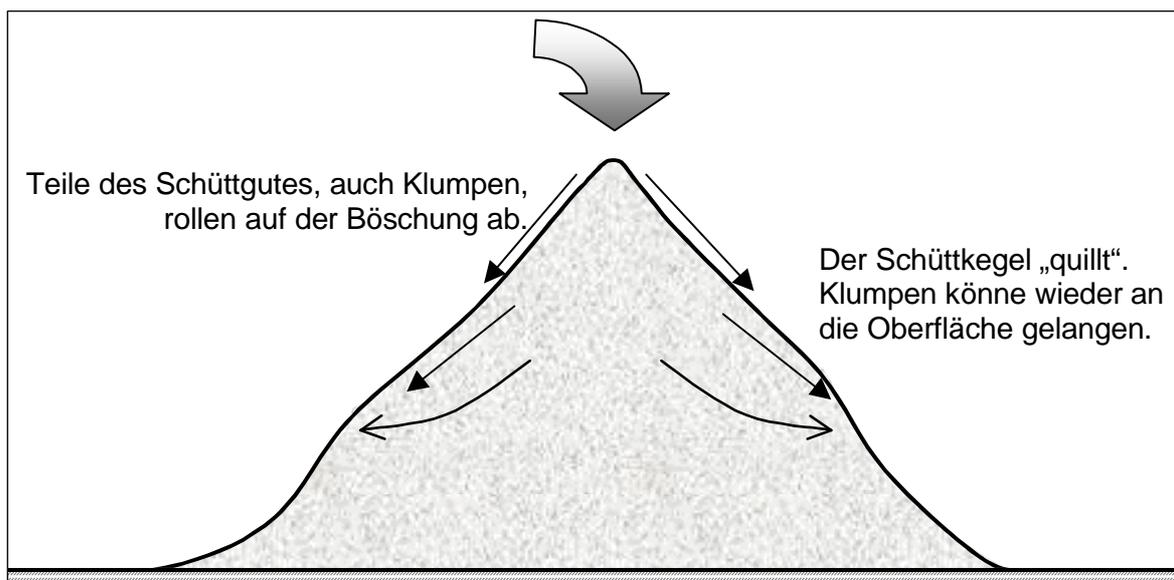
der Schütthöhe für verschiedene Böden. Eine ungleichmäßige, aber mit der Schütthöhe zunehmende Dichteverteilung in Schüttkegeln bestätigen weitere Untersuchungen [8][87]:

*Tabelle 2: Rohwichte verschiedener Kippenmaterialien*

| Material        | Rohwichte $\gamma$ bei einer Versturztiefe von |                         |              |
|-----------------|--|-------------------------|--------------|
|                 | 3 m bis 4 m                                    | 25 m                    | $\Delta\rho$ |
| Sand            | 15,75 kNm <sup>-3</sup>                        | 17,17 kNm <sup>-3</sup> | + 9,0 %      |
| Schluff und Ton | 15,44 kNm <sup>-3</sup>                        | 19,08 kNm <sup>-3</sup> | + 23,5 %     |
| Kies            | 15,70 kNm <sup>-3</sup>                        | 17,07 kNm <sup>-3</sup> | + 9,0 %      |

### *Fließen*

Mit zunehmendem verteilten Feinkornanteil und zunehmendem Anteil an Ton- und Schluffklumpen nehmen auch Entmischungsvorgänge zu. Bei einem größeren Massenstrom während des Versturzens wurde eine geringere Entmischung beobachtet [97]. Während des Schüttvorganges treten im Schüttmaterial große Verformungen auf. Diese Verformungen resultieren aus einem ständigen Fließen des Schüttguts. In den gescherten Bereichen des Schüttkörpers muss mit der kritischen Porenzahl gerechnet werden [56]. Bei länger anhaltenden Schüttvorgängen an Schüttkegeln wurde beobachtet, dass auf die Spitze des Schüttkegels auftreffende Schüttmassen nur zu einem geringen Teil auf der Oberfläche des Schüttkegels abrollen, während ein bedeutender Anteil des Massenstroms in den Schüttkegel hinein fließt und den Schüttkegel dadurch allmählich seitlich vergrößert. Der Schüttkörper „quillt“ infolge des Aufpralls. Ein Teil des Materials fließt oberflächennah ab. Bild 3 skizziert den beobachteten Massenstrom.



*Bild 3: Massenstrom im Schüttkegel nach [116]*

Die Partikel an der Oberfläche eines auf einer schiefen Ebene gleitenden Haufens verbleiben zum größten Teil an der Oberfläche, während im unteren Teil des Haufwerks starke Umlagerungen zu verzeichnen sind. Diese Umlagerungen sind auf ständiges Fließen in

Bereichen des abgleitenden Haufens zurückzuführen [70]. Bindige Klumpen rollen den Schüttkegel hinab und lagern sich vor dem Böschungsfuß ab. LEIBIGER stellte sowohl im Laborversuch als auch bei Messungen auf Kippen fest, dass Klumpen umso weiter von der Böschung wegrollen, je größer sie sind. Bei den Neigungen der Kippenböschungen spielte die Form der Klumpen eine untergeordnete Rolle. Die Entmischungsvorgänge innerhalb von Schüttkegeln bis zu 10 m Höhe waren unwesentlich [87].

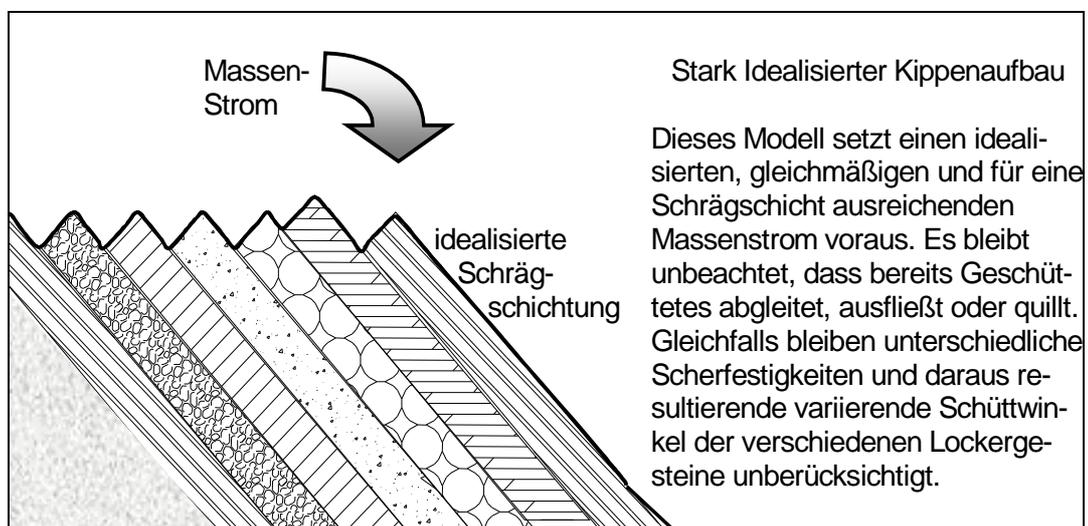
In granulatphysikalischen Studien zeigte sich eine Entmischung des Schüttgutes durch Fließen und die Entstehung von Schichten. Durch eingelagerte Klumpen, Druck und Trägheitseinflüsse geht diese Schichtung teilweise wieder verloren [57].

Wird ein Schüttkegel aus einer einzigen kleinen Quelle - z. B. einer Trichteröffnung - geschüttet, so gleitet der Sand schubweise auf dem Kegel ab. Der größte Druck herrscht anschließend nicht in der Mitte der Auflagefläche des Schüttkegels, sondern in gewisser Entfernung davon. Gewölbeartige Strukturen oder Druckketten führen zu diesem Phänomen. Rieselt der Sand durch ein Sieb, werden sich die Körner gleichmäßig übereinander legen. Der Druck in der Auflagerungsfläche hängt in diesem Fall nur von der Überlagerungshöhe ab. Sein Maximum wurde im Laborversuch in der Mitte dieser Fläche gemessen [10].

### *Schrägschichtung*

Ein idealisiertes Modell für eine Schrägschichtung wurde von JOLAS vorgestellt und ist in Bild 4 skizziert [73].

Die tatsächliche Schichtung wird jedoch viel unregelmäßiger und chaotischer sein.



*Bild 4: Idealisierter Aufbau einer Kippscheibe einer Tagebaukippe [73]*

Von einer kritiklosen Übernahme dieses Modells wird abgeraten.

Bei geringen Schütthöhen und geringem Massenstrom bei wechselnden Materialeigenschaften könnte davon ausgegangen werden, dass

- die Materialien oberflächennah abgleiten oder abrollen,
- Materialien am Schüttkörper teilweise abgleiten, sich von unten beginnend aufbauen

und möglicherweise eine derartige mehr oder weniger gleichmäßige Schrägschichtung entsteht. Dieses Modell ist stark idealisiert und wurde so ausgeprägt kaum beobachtet. In Kippen ist eine ideale durchgehende Schrägschichtung nicht bestätigt worden, obwohl auch in kleinen Abständen erkundet wurde [47]. Realistischer ist eine regellose Kippenstruktur. Bei Erkundungen auf der Mischbodenkippe Zwenkau [88] wurde nur in einem Fall in 2 Aufschlüssen eine Schichtenfolge festgestellt, die eine mögliche Schrägschichtung bestätigen könnte. Eine regellose, chaotische Lagerung wurde angetroffen.

Die bindigen Anteile (z. B. Schluffe, Tone, Geschiebemergel) werden mit den nichtbindigen Böden nicht zu einer homogenen Masse vermengt, sondern zu einer Mischung aus Lockergesteinen mit bindigen Klumpen. Sie bilden eine besondere Bodenstruktur, die sogenannte Pseudokornstruktur.

## 2.4 Pseudokorn in Mischbodenkippen

Beim Abbau und Schneiden bindigen Lockergesteins mit der Baggerschaufel entstehen je nach Gewinnungsgerät, Technologie und Lockergestein unterschiedlich große und unterschiedlich geformte Späne, die auf dem Transportweg zur Kippe mehr oder weniger zerstört, zum Teil als Klumpen abgelagert werden. Diese Klumpen werden als Pseudokörner, Lockergestein 2. Grades, Sekundärkörnung und Aggregationen bezeichnet [16][30][36][118]. In den Schüttmassen ist diese besondere Lockergesteinsstruktur wiederzufinden. Nur das Gefüge kohäsionsloser Böden bricht bei der Gewinnung vollständig zusammen.

Die Klumpen der bindigen Böden werden in Abhängigkeit von ihrer Festigkeit zerstört und mit anderen Böden gemischt auf der Kippe abgelagert. Die Größe der Klumpen ist abhängig vom Material: Geringe Festigkeit bei Löß führt dazu, dass nur kleinere Klumpen aus Löß auf der Kippe zu finden sind. Der Feinkornanteil aus dem Ursprungsgestein Löß und Lößlehm ist relativ gut mit anderem Material vermischt. Jüngerer, nicht vorbelasteter Geschiebemergel aus der Saale-Eiszeit wurde an einem beispielhaft untersuchten Schüttkegel etwas häufiger als Löß in kleinen Klumpen angetroffen. Der überwiegende Anteil der Klumpen und auch der Anteil der größten Klumpen mit einem Durchmesser von bis zu 1,0 m bestand aus älterem, vorbelasteten Geschiebemergel [118].

In der Kippe findet also keine vollständige Mischung aller Kornfraktionen statt. Die Klumpen schwimmen in den nichtbindigen Bestandteilen, oder der nichtbindige Anteil füllt die Zwischenräume der Klumpen (Pseudokörner). Im Inneren eines Klumpens kann die Struktur des ursprünglichen Lockergesteins noch erhalten geblieben sein. Die Form der Klumpen und Pseudokörner ist veränderlich.

Wesentlicher Unterschied der Kippe gegenüber einem natürlich entstandenen Lockergestein ist die fehlende gleichmäßige Durchmischung der Kornfraktionen innerhalb einer Bodenschicht. Der Begriff Mischboden bezeichnet eine besondere technogene Bodenstruktur und ist nicht identisch mit dem Begriff des „gemischtkörnigen Bodens“, der in der Norm DIN 18196 verwendet wird.

## 2.5 Setzungen der Kippenoberfläche

Das Deformationsverhalten von Kippen wird von mehreren Setzungsanteilen geprägt, die zur Setzungsvorhersage für Bauwerke quantifiziert werden müssen. Für diese gilt:

$$s_g = s_e + s_s + s_l \quad (2-1)$$

mit  $s_g$  Gesamtsetzung,  
 $s_e$  Eigensetzung, Eigengewichtssetzung,  
 $s_s$  Setzung durch Sackungen infolge Grundwasseranstieg,  
 $s_l$  Setzungen durch Bauwerkslasten, Bautätigkeit u. a..

FORMAZIN gab im Jahr 1988 in einem Modell an, dass sich die einzelnen Deformationskomponenten in zeitlicher Aufeinanderfolge überlagern [43]. Deformationen des Liegenden des ehemaligen Rohstoffs unter der Kippenlast werden in der Regel eine untergeordnete Rolle spielen. Ausnahmen, z. B. bei Tiefgründungen, sollen gesondert beachtet werden.

Die *Eigensetzungen* von Kippen lassen sich erklären aus den

- sofortigen Setzungen der Kippe unmittelbar nach dem Schütten infolge der Lasten aus dem eigenen Gewicht und dem Gewicht überlagernder Schichten in Verbindung mit Kornumlagerungen, dem Ausdrücken sowie Zusammendrücken von Porenhalten unter ständiger Änderung des Mikrogefüges. Dieser Setzungsanteil wird in einem Zeitraum  $t_1 \leq 3$  Monaten abgeschlossen sein [49].
- verzögerten Setzungen der Kippe durch weitere Umlagerungen und Porendruckausgleich. Erst danach hat sich ein stabiles Gefüge eingestellt. Richtwerte für die Zeitdauer dieses Vorgangs sind:
  - für Mischbodenkippen aus mehreren Kippscheiben im Mitteldeutschen Revier mehrere Jahre, mindestens jedoch ca. (3 ... 5) Jahre [31],
  - im Rheinischen Braunkohlenrevier ca. (9 ... 16) Jahre [103],
  - im Lausitzer Revier je nach Kippenzusammensetzung (1 ... 3) Jahre.

Diese Setzungen erfolgen in lockeren Kippenbereichen. Durch kleine Scherinitiale infolge von Spannungsumlagerungen wird ein kontraktiles Verhalten erzwungen. Die Intensität nimmt mit fortschreitenden Eigensetzungen ab, kann aber durch zusätzliche Initiale wieder angeregt werden. Es kommt zum Abbau kapillarer Porenwasserunterdrücke und kapillarer Festigkeiten zwischen den Körnern. Das ursprüngliche Gefüge kann nicht mehr aufrechterhalten werden. Ein neues Gefüge entsteht.

Überkippte Randböschungen zum Gewachsenen, im Liegenden der Tagebaukippe vorhandene Tiefbaufelder und ein in Richtung zum Hinterland der Kippenböschung ansteigendes Liegendes der Kippe führt zu verzögerten Eigensetzungen [31]. Der sekundäre Anteil der Eigensetzungen klingt erst nach sehr langer Zeit ab.

Der *Kippenuntergrund* wird durch das Gewicht der Kippe belastet. Die Setzungen des Kippenuntergrundes nach dem Ende des Tagebaubetriebes werden jedoch gering sein.

*Sackungen* treten vorwiegend in Lockergesteinen mit geringem Feinkornanteil auf. Ursache ist die Aufsättigung infolge des Grundwasseranstiegs. Dadurch kommt es zum Abbau kapillarer Porenwasserunterdrücke und kapillarer Festigkeiten zwischen den Körnern. Das ursprüngliche Gefüge kann nicht mehr aufrechterhalten werden. Es bricht zusammen und ein neues Gefüge entsteht. Das oben erwähnte Niederschlagswasser führt ebenfalls zum Abbau der Kapillarfestigkeit und damit zu dem Prozess, der als Sackung definiert wird. Es kommt dabei zu einer Verdichtung der oberflächennahen Schicht mit einer Dicke von (1 ... 3) m.

Die Zusammenhänge lassen sich wie folgt zusammenfassen [29]:

- Es existiert ein Wassergehaltsbereich, innerhalb dessen Sackungen ausgeprägt auftreten. In schwachbindigen Kippen sind spätestens bei einem Wassergehalt von  $w > 0,15$  nur noch geringe Sackungen zu erwarten.
- Die Größenordnung der Sackung liegt in der Größenordnung von 5 % der Schichtdicke der vom Grundwasseranstieg betroffenen Kippe.
- Mit zunehmender wirksamer Spannung nimmt der Betrag der Sackung ab. Bei Vertikalspannungen von  $\sigma_v \geq (400 \dots 600) \text{ kN/m}^2$  werden die Sackungen sehr gering ( $s_s < 1 \%$ ).
- Die Summe der Sackungen und Setzungen einschließlich der Setzungen aus äußeren Belastungen wird als konstant angenommen.
- In vorbelasteten Bereichen reduzieren Setzungen infolge einer Vorbelastung die eintretenden Sackungen.
- Treten lokale Porenwasserüberdrücke auf, sind plötzliche Sackungen durch Verringerung der wirksamen Spannungen zu erwarten.
- Im nichtbindigen Lockergestein klingen die Sackungen rasch ab.

Die größten Deformationen traten unmittelbar oberhalb des Grundwasserspiegels auf [25]. Aus dieser Tatsache kann abgeleitet werden, dass die stabilisierenden Kräfte zwischen den Lockergesteinspartikeln bereits im Bereich des aufsteigenden Kapillarsaums aufgehoben werden, bevor eine vollständige Wassersättigung eingetreten ist.

Zu gleichen Ergebnissen führten spezielle Untersuchungen im Oedometer. Hier sackten die sandigen Bodenproben bereits, als der Wasserspiegel die Unterseite des unteren Filtersteins erreichte. Über 80 % der Sackungen waren abgeklungen, nachdem der Wasserstand die Unterkante der sandigen Probe erreichte [41][48].

In Mischböden kommt es ebenfalls zu Verdichtungen, die aber nicht dem Mechanismus für Sackungen genügen. Die Pseudokörner werden an Festigkeit verlieren, aufweichen und plastifizieren, zerdrückt werden und sich so verformen, dass in einer späteren Probe die Klumpenstruktur nicht mehr erkennbar ist. Auch damit sind Verdichtungs Vorgänge - eine

Verminderung der Porenzahl - verbunden. Diese Verformungen verlaufen zeitlich verzögert.

*Lastsetzungen* treten infolge von Auflasten, z. B. aus Aufschüttungen, Bauwerken und Verkehr durch Umlagerungen des Korngerüsts, Zerdrücken von Klumpen und Ausdrücken von Porenhalten auf. Die Zuverlässigkeit einer Setzungsprognose basiert auf der richtigen Beurteilung folgender Sachverhalte:

- dem mittlerem Setzungsverhalten,
- der Betrachtung ungleichmäßiger Setzungen, die zu Schiefstellungen und Krümmungen und somit zu Bauwerksbelastungen führen und
- der Zeitsetzung.

Die Genauigkeit der Setzungsprognose ist begrenzt:

- Der Kippenaufbau ist nur an wenigen Stellen bekannt. Der Aufbau zwischen diesen Stellen (Aufschlusspunkte im Grundriss) kann nur vermutet werden.
- Anteil und Verteilung der Materialien und deren Strukturen, z. B. Klumpen, sind ungenügend bekannt.
- Die Verteilung der Belastung auf der belasteten Fläche und die Spannungsverteilung im Untergrund werden stark vereinfacht angenommen.
- Das den Berechnungen zugrundeliegende mathematische Modell ist unvollkommen und stark vereinfacht.

Ohne eine Ermittlung von Verformungsparameter im Feldversuch ist die Prognose von Deformationen immer mit erheblichen Unsicherheiten belegt.

## 2.6 Grundwasser

Während des aktiven Bergbaus wurde der Grundwasserspiegel abgesenkt. Mit der Einstellung der bergbaulichen Wasserhaltungsmaßnahmen wird sich wieder ein Grundwasserstand einstellen, der von der neuen hydrogeologischen Situation bestimmt wird. Dabei sind Grundwasserstände in der Höhe der Grundwasserstände vor Beginn des Bergbaus, der über 100 Jahre zurückliegen kann, möglich.

Die Grundwasserneubildung in Kippen erfolgt durch:

- Zufluss von der Seite der Kippe bzw. durch die Randböschungen des ehemaligen Tagebaus,
- Zufluss von unten bzw. durch das Liegende der Kippe,
- Niederschlagswässer und

- künstliche Zuflüsse bei Fremdfutung von Restseen.

In Kippen kann nicht von horizontal ausgebildeten Grundwasserleitern und -stauern ausgegangen werden. Durch technologische Bedingungen werden unterschiedlich durchlässige Böden abgelagert. Weiterhin existieren auf ehemaligen Kippenoberflächen Feinkornansammlungen in den Tälern zwischen den Schüttrippen. Über bindigen Bereichen muss mit wassergesättigten Bereichen, mit den „temporären Grundwasserleitern“ gerechnet werden [117]. Durch unterschiedliche Durchlässigkeiten sowohl zwischen Kippe und umgebendem Gebirge als auch innerhalb der Kippe kann es zum Umfließen ganzer Kippenbereiche kommen [127].

Wegen der variierenden Durchlässigkeiten und der unregelmäßigen Struktur konnte in den Aufschlüssen auf einer Mischbodenkippe kein gleichmäßig ausgeprägter Grundwasserstand nachgewiesen werden [88].

Durch unterschiedliche Durchlässigkeiten der Mischbodenkippen sowohl in der Horizontalen und in der Vertikalen muss in der Kippe auch mit ungleichen Wassergehalten sowie Sättigungsgraden gerechnet werden. Einen ersten indirekten rechnerischen Nachweis lieferte BUCZKO [23].

Durch Reaktionen im Kippenmaterial verändert sich dessen Chemismus. Das im Abraum enthaltene Pyrit, ein sulfidisch gebundenes zweiwertiges Eisen, oxidiert unter Zutritt von Sauerstoff und Wasser zu schwefliger Säure und Schwefelsäure. Kippenwässer neigen zum versauern und es ändert sich der ursprüngliche Mineralbestand des Abraums [11][106]. Dieser Umstand ist bei der Beurteilung der Beton- und Stahlaggressivität der Grundwässer und des Bodens zu beachten.

## 2.7 Setzungsfließen

Wassergesättigte, locker gelagerte Kippenböden mit Feinkornanteilen ( $d \leq 0,63$  mm) von bis zu 30 % können zur Bodenverflüssigung neigen. Damit besteht an wassergefüllten Restlöchern mit gekippten Böschungen bei ausreichendem Initialeintrag Setzungsfließgefahr und bei unzureichender erdfeuchter Überdeckung Grundbruchgefahr.

Einen Leitfaden zur Beurteilung enthält [45].

### 3 Grundlagen

#### 3.1 Verwendete statistische Methoden

##### 3.1.1 Verteilungs- und Formparameter

Der *Modus* ist der häufigste Wert. Sind die mindestens ordinalskalierten Merkmale der Reihe nach geordnet, so ist der *Median* oder Zentralwert der in der Mitte der geordneten Merkmale stehende Wert.

Der *arithmetische Mittelwert*  $\bar{x}$  einer Stichprobe wird berechnet mit [15]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ; \quad n \dots \text{Anzahl der Wiederholungen, } i = 1, \dots, n. \quad (3-1)$$

Die mittlere quadratische Abweichung vom Mittelwert der einzelnen Messwerte beschreibt die empirische *Varianz*  $s^2$  (Streuung, Stichprobenstreuung) mit [15]

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (3-2)$$

Die empirische Kovarianz  $s_{xy}^2$  ist eine Maßzahl bivariater Messreihen und wird berechnet mit [15]:

$$s_{xy}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \quad (3-3)$$

$\bar{x}, \bar{y}$  ... arithmetisches Mittel aller  $x_i$  bzw.  $y_i$ .

Die *Standardabweichung*  $\sigma$  beschreibt die durchschnittliche mittlere Abweichung der einzelnen Werte der Stichprobe vom Mittelwert:

$$\sigma = \sqrt{s^2}. \quad (3-4)$$

Bei normalverteilten Werten befinden sich ca. 68 % der Werte innerhalb des Bereichs, der durch Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung begrenzt ist (z. B.  $\bar{x} \pm s$ ).

Die *Schiefe*  $\zeta$  ist eine Maßzahl der Verteilung:

$$\zeta = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \frac{1}{s^3} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}). \quad (3-5)$$

Für eine linksschiefe Verteilung wird ein negativer Wert berechnet, für eine rechtsschiefe Verteilung ein positiver Wert. Eine genau symmetrische Verteilung liefert für die Schiefe den Wert Null.

Mit der *Wölbung* (Kurtosis, Exzess) wird die Wölbungsform der Verteilung beschrieben. Eine Wölbung = 0 bedeutet normal gewölbt wie bei der Normalverteilung.

### 3.1.2 Datentransformation

Transformationen können erfolgen im Sinne [15][52][66][119]

- eines Klassierens stetiger Merkmale, z. B. für eine Häufigkeitsverteilung,
- eines Klassifizierens eines kardinalskalierten Merkmals auf eine niedrigere Skala, z. B. auf eine Ordinalskalierung:

lockere Lagerung bei einer Lagerungsdichte von  $D < 0,30$ ,

mitteldichte Lagerung bei einer Lagerungsdichte von  $D = (0,30 \dots 0,50)$  usw.,

- eines Klassifizierens von Objekten nach einem zu errechnenden Index. Der Plastizitätsindex

$$I_p = w_L - w_P \quad (3-6)$$

kann im statistischen Sinn als Indizierung von Objekten (hier Bodenproben) aus den beiden an den Proben bestimmten Merkmalen  $w_L$  und  $w_P$  aufgefasst werden.

- eines Standardisierens. Eine Zufallsgröße  $Z$  heißt standardisiert, wenn ihr Erwartungswert  $\mu = 0$  und ihre Streuung  $s^2 = 1$  ist. Eine oft verwendete Methode ist die  $Z$ -Transformation (Standardisierung, Studentisierung) [125]:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad \text{für } i = 1, \dots, n. \quad (3-7)$$

$x_i$      ... Messwert,  
 $\bar{x}$      ... Mittelwert,  
 $s$      ... Standardabweichung.

### 3.1.3 Histogramm

Das Histogramm stellt in graphischer Form die Häufigkeitsverteilung einer klassierten Variablen dar. Die Rechteckhöhe entspricht der Häufigkeitsdichte als Quotient aus Klassenhäufigkeit und Klassenbreite. Die Fläche des Rechtecks ist proportional zur Klassenhäufigkeit als Produkt aus Rechteckhöhe und Klassenbreite. Eine Faustregel zur Wahl der Klassenanzahl  $K$  gibt ECKSTEIN [33]:

$$K = 10 \cdot \lg n \quad n \dots \text{Anzahl der Werte} \quad (3-8)$$

Diese Beziehung liefert allerdings eher zu große Werte für  $K$ . Die Klassenbreite  $d$  kann durch

$$d \approx \frac{x_{\min} - x_{\max}}{K} \quad (3-9)$$

ermittelt werden.

## 3.2 Drucksondierungen

### 3.2.1 Sondengeometrie und Standards

Die äußeren Teile der Sonde und deren Abmessungen nach der zur Zeit der Ausführung der Erkundungsarbeiten gültigen DIN 4094 (Stand: Dezember 1990) sind:

- die Sondenspitze:  
Spitzenöffnungswinkel  $\alpha = 60^\circ$ , Durchmesser  $d_c = 35,7 \text{ mm}$ ,  
Querschnittsfläche  $A_c = 1\,000 \text{ mm}^2$ ,
- die Reibungshülse:  
Länge  $l = 133,7 \text{ mm}$ , Reibungsfläche  $A_s = 15\,000 \text{ mm}^2$  und
- Filter mit dahinter liegenden Porenwasserdruckgeber.

Die Abmessungen sind in Bild 5 erläutert.

Diese Sondenspitze entspricht der Sondenart CPTU 10 nach Tabelle 2 der DIN 4094 Teil 1 (Stand Juni 2002).

Zur Durchführung und Auswertung von Spitzendrucksondierungen mit und ohne Porenwasserdruckmessung existieren u. a. folgende Richtlinien ([92], ergänzt):

- ISSMFE International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Reference Test Procedure (Begriffe, Toleranzen der Sonde, Messgenauigkeiten),
- Recommend Standard for Cone Penetration Testing, Swedish Geotechnical Society,

- American Society For Testing and Materials, ASTM D 1586,
- Nederlands Normalisatie Institut NEN 5140,
- Deutsches Institut für Normung, DIN 4094-1, Drucksondierungen.

Die Einteilung der Sondierspitzen nach Genauigkeit erfolgt nach dem Recommend Standard for Cone Penetration Testing (1993) in 3 Klassen. Das niederländische System Dutch NEN5140 (1996) kennt 4 Klassen mit Genauigkeiten von (3 ... 5) % für den Spitzendruck und (10 ... 20) % für die Mantelreibung. Die Kraftmessung kann durch ein elektrisches, mechanisches oder hydraulisches System erfolgen [92].

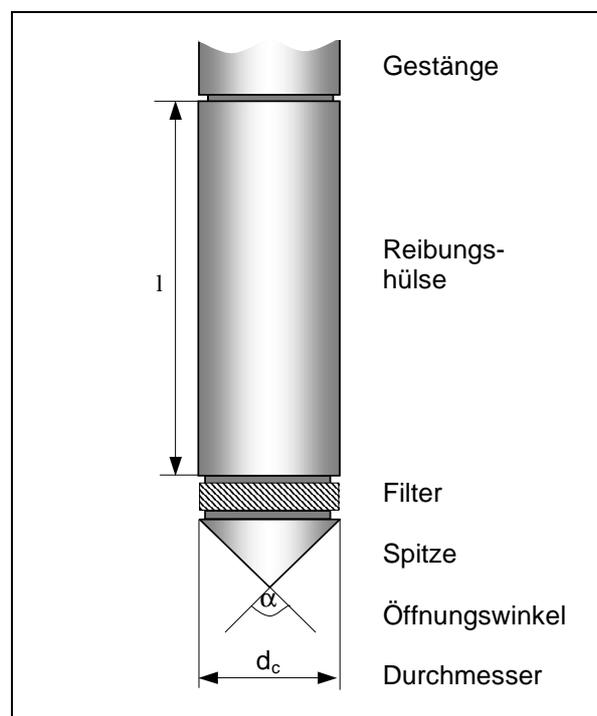


Bild 5: Geometrie der Sonde, nach DIN 4094 (Stand: Dezember 1990)

### 3.2.2 Einflüsse auf das Messergebnis

Im Überblick werden nachfolgend Einflüsse auf das Messergebnis aufgelistet:

- Einflüsse auf das Messergebnis von Spitzendruck  $q_c$ , Mantelreibung  $f_s$  und Porenwasserdruck  $u$ :
  - Korngröße, Kornrauhigkeit, Kornform,
  - Zusammendrückbarkeit, Dichte, Scherfestigkeit,

- Zementation, besonders in älteren Böden,
- OCR (Überkonsolidierungsgrad, geologische Spannungsgeschichte),
- Schichtdicke, Einfluss benachbarter Schichten. Die Eigenschaften dünner Schichten werden durch die Sondierspitze nicht vollständig erfasst [114].
- Kalibrierfehler,
- Der Temperatureinfluss kann insbesondere bei weichen oder locker gelagerten Böden erheblich sein. Moderne Sonden sind bereits temperaturkompensiert.
- Abnutzung der Sondenspitze und der Mantelhülse,
- Materialien vor und hinter der Sondierspitze beeinflussen den Spitzenwiderstand. In weichen Materialien reicht der Materialeinfluss auf den Spitzendruck bis in eine Umgebung von zwei bis drei Sondendurchmessern. Bei dicht gelagerten Materialien ist mit einem Einflussbereich vom 10...20fachen des Sondendurchmessers zu rechnen.
- Einflüsse insbesondere auf Spitzendruck  $q_c$  und Mantelreibung  $f_s$  :
  - Spannungssituation  $\sigma_v$ ,  $\sigma_h$  (benachbarte Bohrung, Erddruckbeiwert),
  - Porenwasserdruck, Porenwasserdruckdifferenzen,
  - Neigung der Sonde,
- Einflüsse insbesondere auf den Porenwasserdruck  $u$ :
  - Dränierte oder undränierte Penetration. Beträgt die Durchlässigkeit des Bodens weniger als  $(1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-6}) \text{ cm s}^{-1}$ , so kann von einer undränierten Penetration ausgegangen werden [92].
  - Eindringgeschwindigkeit (Schergeschwindigkeit).
  - Wechselwirkung zwischen Spitzendruck und Porenwasserdruck. Durch geeignete Form und Auswahl des Filterelements kann dieser Effekt eliminiert werden [22].
  - Anordnung des Filters. Der Filter kann in der Spitze, zwischen Spitze und Reibungshülse und über der Reibungshülse angeordnet sein.
  - Der Porenwasserdruck  $u_1$  in der Spitze ist in stark überkonsolidierten Böden hoch und durch Verformung des Filterelements beeinflusst. Der Porenwasserdruck zwischen Spitze und Reibungshülse  $u_2$  ist kleiner als  $u_1$ , oft auch kleiner als der Gleichgewichtswasserdruck  $u_0$ . Ausnahme sind zementierte oder empfindliche weiche Tone, in denen große Porenwasserdrücke  $u_2$  zum Zusammenbruch der Struktur führen können. Ist der Porenwasserdruck zwischen Sondenspitze und Reibungshülse  $u_2$  negativ, ist überkonsolidierter Ton wahrscheinlich [92].
  - Grundwasserverhältnisse.

### 3.2.3 Gemessene Parameter

Die gemessenen Parameter während einer Drucksondierung sind:

- Tiefe  $t$ , Dimension: Länge,
- Spitzendruck  $q_c$ , Dimension: Kraft/Fläche,
- Mantelreibung  $f_s$ , dimensionslos  
und
- Porenwasserdruck  $u$ , Dimension: Kraft/Fläche.

Bei einem Verdrängungstest (Dissipation) wird die Änderung des Spitzendrucks mit der Zeit gemessen.

### 3.2.4 Abgeleitete Parameter

Der am meisten verwendete abgeleitete Parameter ist das Reibungsverhältnis

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \cdot 100 \%, \quad (3-10)$$

$f_s$  ... Mantelreibung,  $q_c$  ... Spitzendruck.

Spitzendruck und Reibungsverhältnis können mit der Vertikalspannung  $\sigma_{v,u}$  normiert werden [92]:

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad \text{und} \quad F_R = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \cdot 100 \%. \quad (3-11) \quad (3-12)$$

Zahlreiche Korrelationen gelten zwischen Spitzendruckwert, Mantelreibung bzw. Reibungsverhältnis und Bodenart. Das Porendruckverhältnis

$$B_q = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (3-13)$$

mit  $\Delta u = u - u_0$ ,  $u$  ... gemessener Porenwasserdruck,

$u_0$  ... statischer Porenwasserdruck,  
 $\sigma_{v0}$  ... Vertikalspannung (Gebirgsspannung),  
 $\sigma'_{v0}$  ... wirksame Vertikalspannung,  $\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u$ ,  
 $q_t$  ... korrigierter Spitzendruck (s.u.)

gibt ebenfalls nach verschiedenen empirischen Beziehungen Auskunft über die Bodenart. Parameter werden abgeleitet, die von Porenwasserdruck, Spannungssituation, Mantelreibung und Spitzendruck abhängen [9][92][108][110][111]. Spezielle Beziehungen sind u. a.

an normal- und überkonsolidierten Tonen ermittelt worden. Beim Verdrängungstest (Dissipation) beschreibt der normierte Porenwasserüberdruck  $U$

$$U = \frac{u_t - u_0}{u_i - u_0}, \quad (3-14)$$

$u_t$  ... gemessener Porenwasserdruck zur Zeit  $t$ ,  
 $u_i$  ... gemessener Porenwasserdruck zur Zeit  $t = 0$ ,  
 $u_0$  ... statischer Porenwasserdruck

die Änderung des Porenwasserüberdruckes während der Verweilzeit. Diese Kennlinie zeigt das charakteristische Zeit- Setzungsverhalten eines Bodens [92].

Aus den gemessenen Parametern werden genannte korrigierte Werte bestimmt. Diese Korrekturen sind insbesondere für weiche Böden mit Spitzendrücken  $q_c \leq 1,0$  MPa bedeutsam.

Beispiel: Korrektur der Auswirkung des Porenwasserdrucks  $u$  auf  $q_c$  [92]:

$$q_t = q_c + u(1-a), \quad (3-15)$$

$q_c$  ... gemessener Spitzendruck,  
 $a = A_n / A_c$ ,  $a$  meist zwischen 0,9 ... 0,38,  
 $A_n$  ... Querschnittsfläche des Druckstempels oder der Lastzelle,  
 $A_c$  ... horizontale Querschnittsfläche der Sondenspitze.  $A_c$  und  $A_n$  sind von der Bauart der Sonde abhängig.

In der Tabelle 3 ist beispielhaft die Änderung des Spitzendrucks  $\Delta q_c$  für einen Porenwasserdruck zwischen Spitze und Reibungshülse von  $u = (0,01$  und  $0,10)$  MPa berechnet, um den Einfluss der Korrektur auf das Messergebnis beurteilen zu können.

Tabelle 3: Änderung des Spitzendrucks  $\Delta q = u(1-a)$

| Parameter $a$ | Änderung $\Delta q_c$ für |                |
|---------------|---------------------------|----------------|
|               | $u = 0,01$ MPa            | $u = 0,10$ MPa |
| 0,9           | 0,001 MPa                 | 0,01 MPa       |
| 0,4           | 0,006 MPa                 | 0,06 MPa       |

Bei sehr niedrigen Spitzendrücken und hohen Porenwasserdrücken - besonders bei weichen bindigen Böden - sollte diese Korrektur der Drucksondierung beachtet werden. Bei Drucksondierungen in der Mischbodenkippe des Tagebaus Zwenkau wurden Porenwasserdrücke  $u < 0,10$  MPa gemessen. Nach der Abschätzung der Tabelle 3 liegt der Betrag einer eventuellen Korrektur des Spitzendrucks in der Größenordnung der Messgenauigkeiten. Diese Korrektur kann somit entfallen.

Während weiche Schichten schon bei Schichtdicken von 10 cm erfasst werden können, ist für das richtige Erfassen steifer Schichten eine Schichtdicke von über 75 cm notwendig.

Unter Annahme elastischer Verhältnisse erhielt VREUGDENHIL [131] eine Abhängigkeit des Spitzendrucks von der Schichtdicke in einer gegenüber der Umgebung dichteren Schicht:

$$q_{c2}^* = K_c \cdot q_{c2}, \quad (3-16)$$

$$K_c = 0,5 (1,45-H)^2 + 1,0, \quad (3-17)$$

|                |  |
|----------------|--|
| $K_c$ ...      | Korrekturfaktor,   |
| $q_{c1}$ ...   | Spitzendruck des umgebenden Bodens,                                |
| $q_{c2}$ ...   | gemessener Spitzendruck der dünneren Schicht,<br>$q_{c1} < q_{c2}$ |
| $q_{c2}^*$ ... | korrigierter Spitzendruck der dünneren Schicht,                    |
| $H$ ...        | Dicke der Schicht in Meter, $H \leq 1,45$ m.                       |

Voraussetzung ist, dass die Dicke der dünneren Schicht bekannt ist. Auf Mischbodenkippen sind die einzelnen Schichtdicken jedoch unbekannt.

Eine Glättung der Messwerte kann in Anlehnung an ein Verfahren, welches für Tone entwickelt wurde, erfolgen. Die Mittelwertbildung über 0,2 m Tiefe für Ton eignet sich auch für die Materialgemische der Teilfläche B2. Die Untersuchungen von MORTENSEN [101] mit unterschiedlichen Glättungsintervallen (0,04 ... 0,40) m haben gezeigt, dass die spezifischen Eigenschaften bei 0,20 m Glättungsintervall erhalten bleiben und die Bereichsgrenzen nicht verschoben werden [101]. Ein Beispiel zeigt Bild 23 auf Seite 62.

### 3.2.5 Ableitung des Baugrundaufbaus

In der Literatur sind Korrelationen zu finden, die es ermöglichen, aus gemessenen und abgeleiteten Parametern auf die Bodenarten zu schließen. Diese Beziehungen können allerdings nicht kritiklos benutzt werden, da sie immer unter speziellen Spannungsverhältnissen sowie laborativen oder geologischen Bedingungen ermittelt wurden.

Eine einfache Korrelation lieferte BEGEMANN [9], die in Bild 6 dargestellt ist.

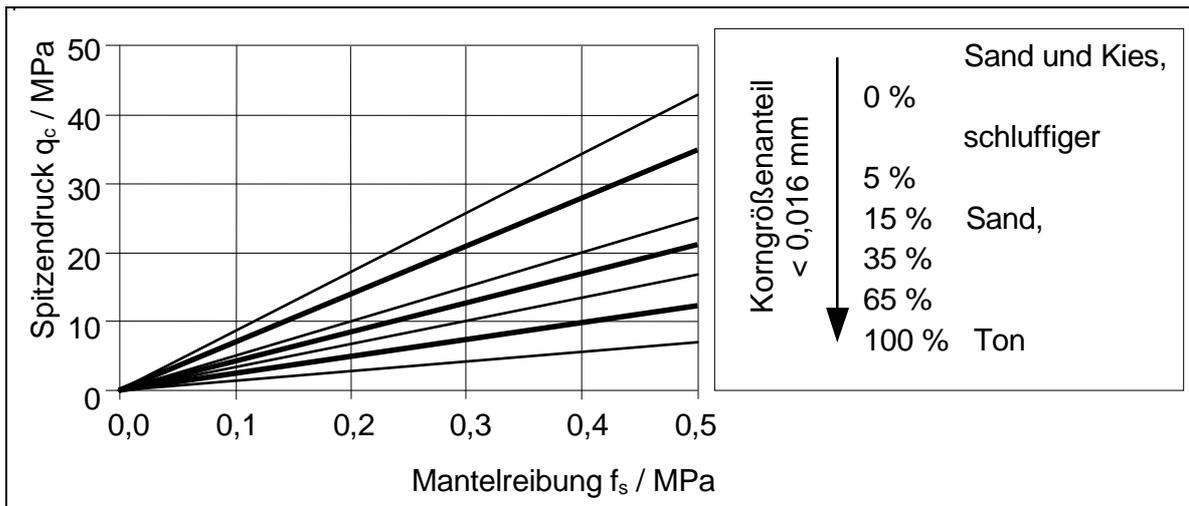


Bild 6: Bodenansprache auf Basis von Spitzendruck und Mantelreibung nach BEGEMANN [9]

Der reziproke Wert des Anstiegs der Geraden in Bild 6 entspricht dem Reibungsverhältnis  $R_f$ . Die auf Sondierdiagrammen von ausführenden Betrieben angegebene Korrelation zwischen Reibungsverhältnis und Bodenart stimmt mit diesen Angaben von BEGEMANN überein [9][39][88].

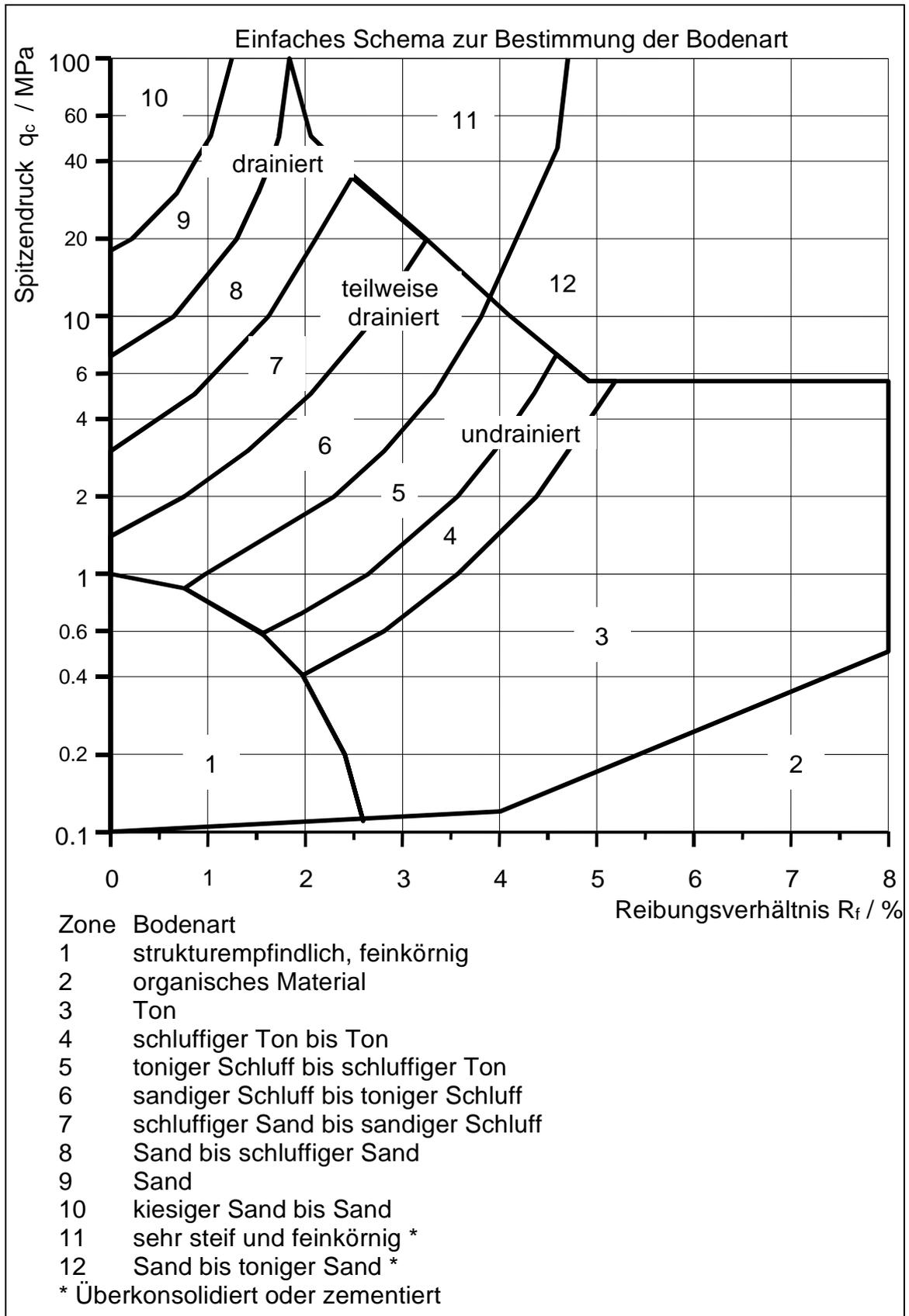
Tabelle 4: Ableitung der Bodenart aus  $R_f$  nach Bild 6 [9]

| Reibungsverhältnis<br>$R_f$ / % | Boden<br>-             | Feinkornanteil<br>FKA / % |
|---------------------------------|------------------------|---------------------------|
| 1,2 ... 1,4                     | Sand und Kies bis Sand | 0 ... 5                   |
| 1,4 ... 2,0                     | Sand                   | 0 ... 5                   |
| 2,0 ... 2,4                     | Sand                   | 5 ... 15                  |
| 2,4 ... 3                       | Sand                   | 5 ... 35                  |
| 3 ... 4                         | Schluff oder Ton       | 35 ... 65                 |
| 4 ... 7                         | Schluff oder Ton       | > 65                      |

Der Vorteil eines Vorschlages von ROBERTSON gegenüber dem Vorschlag von BEGEMANN ist, dass bei der Bestimmung der Bodenart nicht nur das Reibungsverhältnis, sondern auch das Reibungsverhältnis in Abhängigkeit vom Spitzendruck berücksichtigt wird. Wird dieses Schema verwendet, ist für Spitzendruckwerte  $q_c \leq 1$  MPa in weiteren Bewertungen anstelle von  $q_c$  der korrigierte Spitzendruck  $q_t$  einzusetzen.

Weitere Korrelationen zur Bodenart berücksichtigen die gemessenen Porenwasserdrücke durch Verwendung des Porenwasserdruckparameters  $B_q$  sowie der Vertikalspannung  $\sigma_{v0}$  [92][109][110][111].

Beziehungen, die aus den Spitzendruckwerten den Reibungswinkel  $\phi'$  und in Größenordnungen die Lagerungsdichte ermitteln, gelten immer nur für die jeweiligen Lagerungsverhältnisse. Werden diese Beziehungen auf andere Standorte angewandt, kann es sich immer nur um eine Schätzung handeln.



*Bild 7: Einfaches Schema zur Bestimmung der Bodenart nach ROBERTSON [108]*

### 3.3 Setzungsberechnung

Durch Belastung deformiert sich der Baugrund. Die vertikale Verschiebung der Geländeoberfläche wird als Setzung bezeichnet. Unter schlaffen Bauwerken, zu denen eine Dammschüttung gehört, bildet sich eine Senkungsmulde aus.

Zur Berechnung der Größe der Setzungen muss zunächst der Spannungszustand infolge der Wirkung von Einzelkräften an der Oberfläche des Halbraumes bekannt sein. BOUSSINESQ gab Lösungen für eine vertikal gerichtete Kraft  $F$  an, aus der sich für die vertikale Verschiebung  $w$  an einem beliebigen Punkt im Halbraum ergibt [44]:

$$w = \frac{F(1+\nu)}{2\pi ER} \left( 2(1-\nu) + \frac{z^2}{R^2} \right), \quad (3-18)$$

$E$             Elastizitätsmodul,  
 $\nu$             Querdehnungszahl,  
 $R, z$         Abstand  $R$  zwischen Angriffspunkt der Kraft  $F$  und dem betrachteten Punkt  $P$  in der Tiefe  $z$ , an dem  $w$  berechnet wird.

Daraus folgt an der Oberfläche mit  $z = 0$  für die Setzung  $s$  infolge der Einzelkraft  $F$ :

$$s = \frac{1-\nu^2}{\pi} \frac{F}{ER}. \quad (3-19)$$

Die Setzung einer beliebigen Fläche durch die Wirkung vieler differenzieller Einzellasten der Größe  $dF = q(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{x} d\bar{y}$  am Punkt  $P(x, y)$  ist dann

$$s(x, y) = \frac{1-\nu^2}{\pi E} \iint_A \frac{q(\bar{x}, \bar{y})}{r(\bar{x}, \bar{y}, x, y)} d\bar{x} d\bar{y}, \quad (3-20)$$

$A$             Flächenelement.

Bei noch folgender Betrachtung der Setzungen durch Probeschüttungen werden horizontale Verformungen nicht betrachtet. Durch das verwendete Messsystem bedingt wurden sie nicht erfasst. Deshalb werden die Lösungen für die Horizontal- und Schubspannung nicht berücksichtigt [44].

Zur Berechnung der Setzungen muss zunächst die Spannung im Untergrund berechnet werden. Dabei wird zwischen der Spannung aus dem Eigengewicht der Schichten  $\sigma_\gamma$  und der durch zusätzlich eingetragenen Spannung  $\sigma_q$  unterschieden.

Für die Berechnung der Vertikalspannung  $\sigma_{zz,q}$  unter dem Eckpunkt einer gleichmäßig belasteten Rechteckfläche existiert folgende Lösung [68]:

$$\sigma_{zz,q} = \frac{q}{2\pi} \cdot \left[ \arctan \frac{L \cdot B}{z \cdot R_3} + \frac{L \cdot B \cdot z}{R_3} \cdot \left( \frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} \right) \right], \quad (3-21)$$

|      |   |
|------|---|
| q    | Spannung, die über die Rechteckfläche eingetragen wird,                 |
| L, B | Länge, Breite der Rechteckfläche,                                       |
| z    | senkrechter Abstand (Tiefe) zum Eckpunkt,                               |
| R    | $R_1^2 = L^2 + z^2$ ; $R_2^2 = B^2 + z^2$ ; $R_3^2 = L^2 + B^2 + z^2$ . |

#### 4 Baugrunduntersuchungen auf Tagebaukippen

Bautechnische Maßnahmen auf Kippen sind wegen

- der jungen geologischen Ablagerung,
- der unkontrolliert geschütteten Geländeauffüllung,
- der lockeren Lagerung und
- der Inhomogenitäten

als Baumaßnahmen unter schwierigen Baugrundverhältnissen gemäß der Norm DIN 4020 in die *geotechnische Kategorie 3* einzugliedern. Sie bedürfen der Beurteilung durch einen in geotechnischen Fragen sachverständigen Ingenieur.

Eine Baugrundbeschreibung auf Grund der Bestimmung von Eigenschaften an wenigen Proben ist wegen der Inhomogenität des Baugrundes – insbesondere auf Mischbodenkippen, aber darüber hinaus auf allen Kippen - nicht ausreichend. Es müssen Informationen aus anderen Quellen herangezogen werden. Eine Minderung des *Risikos* beim Bauen auf gering tragfähigen Böden - im vorliegenden Falle auf Mischbodenkippen - kann langfristig nur durch eine Verbesserung des Wissens über das mechanische Verhalten von Kippen erfolgen.

Bei natürlich entstandenem Baugrund liegt meist konkretes Wissen auf unterschiedlichen Kenntnisstufen zur regionalen Geologie vor. Für Tagebaukippen muss solches Wissen erst zusammengetragen werden. Dazu ist es notwendig, alle Informationen zu Kippen in der Kippendokumentation zu erfassen und dieses Wissen zur Verfügung zu stellen. Die Untersuchung einer Kippe kann effektiver gestaltet werden, wenn die Entstehung der Kippe bekannt ist. Informationen, die in einer Kippendokumentation enthalten sein sollten, sind:

- Geologie, Hydrogeologie und Morphologie vor Beginn des Bergbaus,
- Grenzen, Lage und Höhenangaben zu Bergbaubereichen, Markscheide, Liegendes, Böschungssysteme, schiefe Ebenen,
- konkrete Angaben zur Tagebautechnologie, z. B. Anzahl und Lage der Gewinnungsschnitte, Arbeitsebenen, Transport- und Versturztechnologie, Strossenverläufe,
- zeitliche Abfolge des Abbaus und des Kippenaufbaus, Liegezeiten der Kippen,
- Sondertechnologien, separate Ablagerungen, auch aus anderen Tagebauen,
- untertägige Strecken, Schächte, Besonderheiten, Rutschungen,
- bisherige und zu erwartende Wasserstände, Wasserstandsschwankungen, hydrologische Situation nach Ende des Bergbaus,
- Maßnahmen nach dem Bergbau, möglicherweise im Zusammenhang mit einer neuen Nutzung, z. B. Wiederurbarmachung, Böschungsgestaltung und- sicherung,
- bisherige Kippennutzung,
- bisherige Untersuchungen, baugrundvergütende Maßnahmen und Bauwerke auf der Kippe, bisherige Aufschlüsse, Pegel, Messungen aller Art.

Das z. B. im Rheinischen Braunkohlenrevier eingesetzte Navigationssystem „Global Position System“ (GPS)“ liefert eine Basis für eine solche Kippendokumentation [112].

Leider liegt eine Kippendokumentation, die den genannten Ansprüchen genügt, in den seltensten Fällen vor. Daher ist es häufig unumgänglich, mit Beginn der Baugrunduntersuchung das vorangehende Tagebaugeschehen zu erfassen. Das so erhaltene Wissen wird zur Basis der Baugrunduntersuchung.

Bodenbereiche, die unter vergleichbaren natürlichen Bedingungen entstanden sind, bilden oft zusammenhängende Homogenbereiche. In Abhängigkeit von der Entstehungsgeschichte variieren die Eigenschaften dieser Homogenbereiche innerhalb bestimmter Grenzen. Die Abmessungen von Schichten ergeben sich aus natürlichen Gegebenheiten und werden aber auch während des Aufbaus der Kippe vom Ingenieur beeinflusst.

Auf Basis aller verfügbaren Angaben entwickelt meist der Baugrundingenieur das Baugrundmodell. Werden Messdaten verwendet, so ist zu bedenken, dass für statistisch befriedigende Aussagen auch immer eine größere Anzahl von Messwerten vorliegen muss, wobei der Ingenieur die einzelnen Versuchsergebnisse und daraus abgeleitete charakteristische Größen kritisch zu bewerten hat. Prinzipiell ist bei Baugrunduntersuchungen auf Tagebaukippen besonders umsichtig zu verfahren. Diesen Hinweis gibt bereits DIN 4020. Der Frage, welche Grundwasserverhältnisse sich nach dem Ende des Bergbaus in der Region einstellen, ist in hydrologischen Untersuchungen zu bewerten bzw. diesen zu entnehmen. In einem Baugrundgutachten werden die bodenmechanischen und gründungstechnischen Rahmenbedingungen definiert. Diese Rahmenbedingungen erlauben es, die Interaktion zwischen Bauwerk und Baugrund zu beschreiben.

Baugrundrisiken ergeben sich z. B. aus folgenden Gründen [34][77]:

- Unmöglichkeit einer umfassenden Erkundung,
- nicht erkundete Veränderungen der Baugrundeigenschaften,
- ungewöhnlich große und sich lokal ändernde Verformungen und
- nicht bekannte Kontaminationen.

Zusätzliche „Baugrundrisiken“ - die ihre Ursache nicht im Baugrund Kippe haben, aber zu nennen sind - sind Ausschreibungs- und Ausführungsfehler [34][77]:

- fehlende Baugrunderkundungen,
- fehlende Bauwerksangaben im Vorfeld der Baugrunderkundung,
- mangelhafte Baugrundbewertung wegen fehlender Aufschlussarbeiten oder ungenügender Qualifikation,
- unvollständige Leistungsbeschreibung, Mängel in der Leistungsbeschreibung, die offensichtlich sind, vom Auftragnehmer aber nicht gerügt werden,
- ungenügendes Erkennen der Problematik, fehlende Bedenken und Hinweise seitens des Auftragnehmers und kein Arbeiten nach den Regeln der Technik.

## **5 Erkundungsstrategie**

### **5.1 Vorbemerkung**

Im folgenden Abschnitt werden Hinweise für die Baugrunderkundung auf Kippenflächen gegeben, die insbesondere auch auf Mischbodenkippen gelten. Grundlage sind die Forderungen der DIN 4020 “Geotechnische Untersuchungen für Bautechnische Zwecke”, die auf Grundlagen von Forschungsarbeiten und eigenen Erfahrungen kippenspezifisch präzisiert wurden [40][47].

### **5.2 Grundsätze**

Die korrekte Einschätzung bodenmechanischer Eigenschaften des Baugrundes auf Grundlage einer sachgemäßen Baugrunderkundung ist Voraussetzung für einen sicheren und wirtschaftlichen Gründungsentwurf. Die zulässigen Belastungen des Baugrundes sind durch die bauwerksverträglichen Baugrundverformungen und die Grundbruchsicherheit begrenzt. Bezüglich der Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Baugrund sind generell und bei Tagebaukippen besonders zu beachten:

a) Setzungen:

- Setzungen durch Eigensetzung des Baugrundes,
- Setzungen und Setzungsunterschiede durch Einwirkungen aus baubegleitenden, zeitweilig wirkenden Lasten und Verkehrslasten,
- Setzungen durch dynamische Einwirkungen, auch während der Baumaßnahme,
- Setzungen und Setzungsunterschiede aus der Baugrundverformung durch die Last des Bauwerks, räumliche und zeitliche Verteilung der Verformungen,
- Setzungen des Baugrundes durch Sackungen infolge Grundwasserwiederanstieg,
- Setzungen durch andere Einflüsse, z. B. eindringendes Oberflächenwasser,

b) Grenzzustände:

- Grundbruch durch Lasten des Bauwerks,
- Geländebruch, Auftrieb, Gleiten, Kippen usw.,
- Grundbruch nach Verflüssigung des Untergrundes,
- Versagen durch ein Setzungsfließen,

- c) Auswirkungen des Bauwerks und seiner Funktionen auf die Umgebung,
- d) Wechselwirkungen zwischen Bauwerk und Baugrund in Form von Kraftumlagerungen,
- e) Auswirkungen der Baudurchführung und zusätzlicher Maßnahmen während der Bauausführung auf Umgebung und Bauwerk, z. B. Baugrube, Baugrubensicherung, Grundwasserhaltung usw.,
- g) zu erwartende umweltrelevante Ereignisse, deren Folgen und Behebung.

Der Baugrund ist zusätzlich zu untersuchen hinsichtlich:

- ihrer Eignung als Baustoff, Möglichkeiten der Gewinnung, Verbesserung,
- der Boden- und Felsklasse,
- der Veränderung bei Gewinnung, Transport, Einbau und Verdichtung,
- der Entwässerbarkeit,
- der Grundwasserverhältnisse.

### 5.3 Grundgesamtheiten

Um aus den Eigenschaften einer repräsentativen Stichprobe auf die Eigenschaften des gesamten Untersuchungsgebietes schließen zu können, muss das Untersuchungsgebiet einschließlich der Stichprobe einer gemeinsamen Grundgesamtheit angehören. In der mathematischen Statistik gehören solche Stichproben zu einer Grundgesamtheit, die sich durch gleiche Merkmale beschreiben lassen. Ob zwei Stichproben zu einer gemeinsamen Grundgesamtheit gehören, wird durch statistische Tests nachgewiesen.

Einer geologischen Grundgesamtheit GGG werden Objekte mit gleichen Merkmalen zugeordnet, die in einer geologischen Untersuchung von Interesse sind [86]. Bei der Einteilung in GGG wird vorausgesetzt, dass die Eigenschaften innerhalb der GGG weniger schwanken als zwischen verschiedenen Grundgesamtheiten. Aus Voruntersuchungen lassen sich die zu erwartenden Grundgesamtheiten abschätzen.

Schließlich werden die Stichproben auf Zusammengehörigkeit nach bodenphysikalischen Merkmalen geprüft und in bodenmechanischen Grundgesamtheiten BGG zusammengefasst. Eine bodenmechanische Grundgesamtheit kann einer oder verschiedenen statistischen Grundgesamtheiten entstammen.

Bei der Beschreibung von Korrelation tritt ein „Maßstabs“-Effekt auf, der von der Auflösung des untersuchten Objektes abhängt. Bei Erkundungen ist er vom Aufschlussabstand geprägt. Die räumliche Abgrenzung der Grundgesamtheiten bei künstlichen Lockergesteinen auf der Kippe wird von technologischen Entstehungsprozessen bestimmt.

## 5.4 Erkundungsetappen

Wird ein geeigneter Standort für das Bauen auf einer Kippe gesucht, empfiehlt sich folgende Vorgehensweise für die effektive Kippenerkundung [48]:

*Regionalerkundung:* Erkundung der Tagebaukippe mit dem Ziel, Gebiete mit ähnlichen zu erwartenden geotechnischen Eigenschaften zu bestimmen und abzugrenzen. Ausgewertet werden die Kippendokumentation und Erkundungsergebnisse an einzelnen Aufschlüssen. Die Ergebnisse dieser Aufschlüsse sind dahingehend zu prüfen, ob sie zur statistischen Beschreibung des Kippengebietes herangezogen werden können.

*Detailerkundung:* Auswahl eines günstig erscheinenden begrenzten Kippengebietes als Untersuchungsbereich. Erkundungsarbeiten werden mit dem Ziel durchgeführt, für das Aufschlussgebiet gültige Aussagen zu formulieren und die Größenordnung charakteristischer bodenphysikalischer Parameter festzulegen. Die Gültigkeit von Korrelationsbeziehungen zu Berechnungskennwerten ist zu prüfen.

*Objekterkundung, Baustandort:* Für ein definiertes Bauvorhaben werden ein Erkundungsprogramm durchgeführt, ein Baugrundmodell und ein Gründungsvorschlag erarbeitet, Datenbasis und Wissensstand sukzessiv erweitert.

Ist ein Baustandort bereits vorgegeben, entfällt die Standortsuche. Ziel der Untersuchung ist die Erkundung des Kippenaufbaus am Baustandort. Statistische Methoden und Techniken zur Auswertung und Beschreibung der Erkundungsergebnisse sollen herangezogen werden.

## 5.5 Voruntersuchung

Bei Verhältnissen der geotechnischen Kategorie 3 nach DIN 4020 sind Voruntersuchungen vorzunehmen. Die Voruntersuchung auf Kippen sollte folgendes umfassen:

a) die Sichtung und Bewertung der vorhandenen Unterlagen,

- konstruktive Angaben zum Bauwerk,
- Lage der Baustandorte,
- Angaben der Kippendokumentation,
- bergbauliche Stellungnahme sollten angefordert werden,

b) im Rahmen der Voruntersuchung ein weitmaschiges Untersuchungsraaster, das im nächsten Untersuchungsschritt verdichtet wird,

c) Abschätzen der Grenzen möglicher geologischer und bodenmechanischer Grundgesamtheiten, möglicher Teilgesamtheiten, mögliche Richtungsabhängigkeiten und Reichweiten von Variogrammen,

- d) stichprobenhafte Feststellung von maßgebenden Baugrundkenngrößen,
- e) erste Schätzung der Größenordnung der zu erwartenden Verformungen,
- f) Abschätzung der Notwendigkeit und des Erfolgs einer Probelastung bzw. einer Baugrundvergütung.

## **5.6 Hauptuntersuchung**

### **5.6.1 Ziel**

Im Ergebnis der Hauptuntersuchung müssen voraussehbare Varianten der Gründung und Baudurchführung erarbeitet und nachprüfbar beurteilt werden können. Dem ist der Untersuchungsumfang anzupassen.

### **5.6.2 Anordnung der Aufschlüsse**

Um räumliche Veränderungen der Baugrundeigenschaften statistisch zu erfassen, sind Aufschlüsse im Raster oder in Schnittlinien anzuordnen. Die technologischen Besonderheiten sind zu berücksichtigen. Schnittlinien sind vorzugsweise parallel oder senkrecht zur ehemaligen Strossenrichtung anzulegen, sofern durch die Art des Bauwerks eine andere Richtung nicht zwingend erforderlich ist. Erkundungsergebnisse aus rasterförmigen Anordnungen dürfen nur zu einem Datennetz zusammengefasst werden, wenn ein Zusammenhang in den Eigenschaften der Kippe zwischen den Aufschlusspunkten existiert.

Die Eckpunkte der hauptsächlich belasteten Teilflächen sind bevorzugt mit Ansatzpunkten für direkte und indirekte Aufschlussverfahren oder im Wechsel zwischen direkten und indirekten Aufschlussverfahren zu belegen. Bei Schüttungen auf der Kippe sollten die Aufschlusspunkte

- unter der Böschung der Schüttung - nicht unbedingt am Böschungsfuß der Schüttung, der kaum vertikal belastet ist –,
- unter den zentralen belasteten Flächen und
- in Randbereichen bei Bewertung der Reichweite des Einflusses der Schüttung

angeordnet werden.

Weitere Aufschlüsse außerhalb des Grundrisses sind anzuordnen, wenn dazu Notwendigkeit besteht.

Im Übergangsbereich zwischen Kippe und Gewachsenem oder bei deutlichen Höhenunterschieden des Liegenden sind gesonderte Aufschlüsse, der Bauwerksart und -größe angepasst, durchzuführen.

Für die geostatistische Auswertung der Erkundungsdaten sind regelmäßig angeordnete Aufschlusspunkte zweckmäßig.

### **5.6.3 Abstände der Aufschlüsse**

Der Aufschlussabstand sollte den Abmessungen wahrscheinlicher Homogenitätsbereiche und Strukturen angepasst werden. Sie liegen in der Regel bei (10 ... 30) m, können aber auch erheblich kleiner sein. Auf Besonderheiten der Kippe muss eingegangen werden. Der Aufschlussabstand orientiert sich an technologischen Parametern der Kippe, z. B. dem Strossenverlauf. Art und Konstruktionsform des Bauwerkes sind bei Festlegung der Aufschlussabstände ebenso zu beachten.

Ist nach Voruntersuchungen mit einer Baugrundvergütung zu rechnen, ist der Untersuchungsabstand bei klaren technologischen Verhältnissen im Untersuchungsgebiet den Erfordernissen der Baugrundvergütung anzupassen. Eine Baugrundvergütung vergleichmäßig die Lagerungsdichte und damit die Baugrundeigenschaften.

Besondere Überlegungen sind in Übergangsbereichen verschiedener Technologien und im Bereich der ehemaligen Tagebaurandböschung bzw. im Übergangsbereich zum Gewachsenen erforderlich. Die Untersuchungsabstände müssen unter Berücksichtigung der Eigenschaften des Bauwerks gegebenenfalls weiter verringert werden.

### **5.6.4 Aufschlusstiefe und Aufschlussmethode**

Der Aufschluss sollte alle Schichten, die durch das Bauwerk beansprucht werden oder die Ursache für Beanspruchungen des Bauwerks sein können, erfassen. Dazu gehören

- mindestens die oberste Kippscheibe, die wenigstens mit einem direkten Aufschluss und einem indirekten Aufschluss zu durchteufen ist,
- mindestens der Kippenbereich oberhalb des niedrigsten anzunehmenden Grundwasserniveaus,
- bei eventuellen Baugrundvergütungen der durch die Vergütung maximal beeinflusste Tiefenbereich, z. B.:
  - Verdichtung durch ein schweres Fallgewicht: Einflusstiefe je nach Fallgewicht, Fallhöhe und geotechnischen Bedingungen [12][19][62][63];
  - Verdichtung durch Rütteldruck-/Rüttelstopfverdichtung: mindestens die Länge der Rüttelsäulen;

- ist der Kippenaufbau nicht bekannt, sollte mit wenigstens einem indirekten Aufschluss das Liegende der Kippe nachgewiesen werden.

Sind hydrologische Fragen zu klären, ist die Aufschlusstiefe darauf abzustimmen. Die in der DIN 4020 Abs. 7.4.4 festgelegten Richtwerte für Aufschlusstiefen  $z_a$  stellen für Baugrunduntersuchungen auf Tagebaukippen absolute Mindestwerte dar.

Zweck der Aufschlüsse im Baugrund sind die Erkundungen

- des Baugrundaufbaus, Folge, Dicke und Einfallen von Schichten,
- von Art und Eigenschaften der Materialien im Baugrund,
- der Wasserverhältnisse im Baugrund und
- die Gewinnung von Boden- und Wasserproben für weitere Untersuchungen.

Bei der Auswahl der Erkundungsverfahren sind u. a. folgende Kriterien zu beachten:

- Beschaffenheit des zu durchörternden Gebirges, Hindernisse, mit denen gerechnet werden muss, auf Kippen z. B. Findlinge, Bahnschwellen, größere Metallteile u. a.,
- Aufschlusstiefe,
- gewünschte geotechnische Parameter, erforderliche Güteklasse der Proben und durchzuführende Versuche im Bohrloch.

Angaben zur Eignung ausgewählter Erkundungsverfahren enthalten Tabelle 5 und Tabelle 6.

Tabelle 5: Übersicht ausgewählter direkter Aufschlussverfahren (nach DIN 4021, ergänzt)

| Aufschlussart   | Vorteile  | Nachteile   | Eignung )*  |
|---|---|---|---|
| Schurf  | Schichtung, Materialstrukturen erkennbar; ungestörte Probenahme möglich.  | Geringe Aufschlusstiefe, große Massenbewegungen.  | ++ nur oberflächennah bis in etwa 6,0 m Tiefe   |
| Untersuchungsschacht  | Schichtung, Materialstrukturen erkennbar; ungestörte Entnahme von Proben und Einbringen von Messgeräten möglich.  | Aussteifung im Lockergestein notwendig; Erschwerung im Grundwasserbereich, Arbeitsschutz; kostenintensiv.   | o<br>+ bei Tiefgründung   |
| Bohrverfahren: Bohrung mit durchgehender Kerngewinnung                | Schichtung, Materialstrukturen erkennbar; Entnahme von Bodenproben der Güteklasse 2 (1) möglich; Inaugenscheinnahme des Probematerials, Abschätzung mittlerer Dichte aus dem Kerngewinn, Schlagzahl zum Einschlagen des Kernrohrs liefert Rückschlüsse auf Lagerungsdichte. | punktuellem Aufschluss; Kostenintensiv infolge der durchgehenden Kerngewinnung; durch Schlagen und Hantieren mit dem Kernrohr wird bei lockerer Lagerung Gefüge der Probe beeinflusst; wenig geeignet bei Kies,   | ++  |
| Kleinbohrverfahren: Rammkernbohrung, Kleinrammbohrung, Bohrsondierung | Einfaches Gerät, kostengünstig  | Zwischen Materialien unterschiedlicher Eigenschaften und Steifigkeiten Verschiebungen der Schichtgrenzen wahrscheinlich; Materialverlust, Zerstörung des Gefüges beim Bohrvorgang und Probegewinnung; Vermengen der verschiedenen LG möglich; keine Aussage zur Lagerungsdichte; begrenzte Aufschlusstiefe. | + ... o<br>zur Verdichtung bestehender Aufschlussraster, zur groben Feststellung anstehender Lockergesteine, bei einfachem Kippenaufbau |
| Bohrverfahren ohne Kerngewinn   |   | Bei einfachem Kippenaufbau; Nur Proben der Güteklasse 4 möglich.  | o   |
| Spülbohrung   | Einfacher Aufschluss, Bohrlochversuche möglich; Außer im oberen Bereich keine Verrohrung notwendig; aber Auskolkungen möglich;  | Veränderung der physikalischen Eigenschaften des Gebirges in Bohrlochnähe durch Spülung; physikalisch verändertes Probematerial;  | o zur Erkundung<br>+ Abteufen von Bohrungen mit anderem Verwendungszweck  |

)\* Auf Kippen: ++ sehr gut geeignet, + gut geeignet, o teilweise geeignet,

Tabelle 6: Übersicht ausgewählter indirekter Aufschlussverfahren (nach DIN 4021, ergänzt)

| Aufschlussart                                     | Vorteile  | Nachteile  | Eignung  |
|---|---|--|--|
| Rammsondierung                                    | Einfaches Verfahren   | Mantelreibung an der Bohrlochwandung, bei lockerer Lagerung sehr geringe Schlagzahlen $N_{10} \leq 3$ , wenige Korrelationen zu Boden-<br>gruppen, organische Materialien werden nicht erkannt,                  | o Richtwerte:<br>leichte Sonde (DPL) Tiefen bis 4 m (max. 6),<br>schwere Sonde (DPH) bis 8 m (max. 12) |
| Drucksondierung                                   | Effektiv, in Kippen große Tiefen erkundbar, bis ca. 30 m und mehr, Literatur zur Auswertung und Korrelationen vorhanden, Kombinierbar mit geophysikalischen Verfahren | Erfahrung bei der Auswertung ist erforderlich, schweres Gerät als Gegengewicht notwendig; Ablenkung der Sondierung aus der Vertikalen.   | ++   |
| Geophysikalische Erkundung von der Oberfläche aus | Große Flächen können relativ schnell untersucht werden; z. B. Kippenliegendes mit seismischen Verfahren erkundbar.  | Große Tiefen nur mit Aufwand erreichbar.<br><br>Nur mit anderen Informationen interpretierbar.   | +<br>++ zur Auswahl weiterer Aufschlusspunkte  |
| Geophysik im Bohrloch oder Kombinationsdrucksonde | Zusätzliche Parameter werden in situ bestimmt; organische bzw. kohlige Anteile bestimmbar.  | Korrelationsbeziehungen oft auf bestimmte geophysikalische Strukturen eingeschränkt.   | ++   |
| Flügelsonde                                       | Widerstand des Bodens beim Abscheren wird direkt gemessen (undrännierte Scherfestigkeit bei bindigen Böden)   | In den Scherflächen wirkende Spannungen sind unbekannt; Scherfestigkeit in potentiellen Scherflächen im Gebirge kann geringer als ermittelte sein, faserige (organische) Beimengungen erhöhen Scherfestigkeiten. | o ursprünglich für wassergesättigte bindige oder organische Böden bei weicher bis steifer Konsistenz   |

)\* Auf Kippen: ++ sehr gut geeignet, + gut geeignet, o teilweise geeignet.

## 6 Versuche im Tagebau Zwenkau

### 6.1 Standortbeschreibung

Der Untersuchungsstandort befindet sich ca. 15 km südlich der Stadt Leipzig auf der Innenkippe des Tagebaus Zwenkau.

Die Kippe besteht im Wesentlichen aus zwei Kippscheiben. Die untere Kippscheibe ist nicht Gegenstand der Untersuchungen. Die obere Kippscheibe mit einer Dicke von (11 ... 14) m schüttete ein Zugabsetzer. Die Schütttechnologie eines Zugabsetzers wurde im Abschnitt 3.2 erklärt. Die Oberfläche der Zugabsetzerkippe wurde eingeebnet und für eine bessere Befahrbarkeit bekiest. Die Dicke der Kiesschicht betrug ca. 0,50 m [88].

Die Oberfläche der bekiesten Fläche ist relativ eben und liegt im nordwestlichen Teil der Untersuchungsfläche auf einer Höhe von +110 mNN und steigt in südöstlicher Richtung auf +111 mNN an. Einen Lageplan des Untersuchungsgebietes zeigt Anhang 1.

Grundwasser wurde zur Zeit der Untersuchungen nur in den Aufschlüssen der Drucksondierungen angetroffen und in einer Tiefe von (9,0 ... 13,5) m unter Gelände bzw. bei (96,5 ... 101,0) mNN gemessen. Die unterschiedlichen Wasserstände zeigen, dass sich kein freier Grundwasserspiegel eingestellt hatte. Auf Grund der besonderen Kippenstruktur und der unterschiedlichen Wasserdurchlässigkeit muss mit lokal begrenzten gesättigten Bereichen gerechnet werden.

### 6.2 Erkundungs- und Versuchsprogramm

#### *Zweck*

Mit Hilfe des Untersuchungsprogramms sollten zwei Fragen beantwortet werden:

- a) Welche Ergebnisse sind bei Erkundungen auf Mischbodenkippen im Mitteldeutschen Revier zu erwarten?
- b) In welcher Größenordnung können Lastsetzungen durch eine vorhergehende Verdichtung des oberen Baugrundbereichs durch ein schweres Fallgewicht vermindert werden?

Die vorliegende Arbeit wird sich mit der ersten Frage auseinandersetzen. Dazu werden einige spezifische Erkundungsergebnisse gezeigt und bewertet. Die Angaben zur Probebelastung, zur Erkundung der Standorte und zu den Messergebnissen der Probebelastung sind den Unterlagen [88] und [39] entnommen.

Auf der Kippe des Tagebaus Zwenkau wurden zwei Teilfelder (B1 und B2) mit einer Breite von jeweils 37 m und einer Länge von jeweils 75 m eingerichtet und erkundet (Anhang 1). Nach der Erkundung blieb der Untergrund der Teilfläche B1 unbehandelt, während der Baugrund der Teilfläche B2 durch ein schweres Fallgewicht (Fallhöhe 20 m, Masse 20 t) vergütet wurde. Die Belastung der Teilflächen erfolgte durch jeweils einen Damm mit den

Abmessungen (Breite x Länge x Höhe) von 37 m x 75 m x (8 ... 10) m geschüttet, so dass die Teilflächen B1 und B2 vollständig bedeckt waren.

### *Lage*

Die Längsachse der Belastungsflächen ist parallel zur Strossenrichtung des Zugabsetzers ausgerichtet. Der Riss in Anhang 1 zeigt im südwestlichen Teil das vom Zugabsetzer geschüttete Böschungssystem. Die Oberfläche der unteren Kippscheibe, die das Liegende für die Absetzerkippe bildet, liegt hier auf einer Höhe von ca. +100 mNN.

In die Grundflächen der vorgesehenen Dammschüttungen wurden jeweils ein Längsinklinometer in Dammmitte und drei Querinklinometer vor Beginn der Dammschüttung eingebaut.

Unter Berücksichtigung der Technologie des Absetzers, der Größe der Belastungsfläche und der zur Verfügung stehenden Anzahl der Aufschlussbohrungen wurden folgende Aufschlussabstände gewählt:

- in Strossenrichtung, parallel zur Längsachse der Teilflächen: 35 m und
- senkrecht zur Strossenrichtung, in Verhiebsrichtung des Absetzers: 20 m.

Für die Drucksondierungen wurde ein Aufschlussabstand von 20 m, unabhängig von der Strossenrichtung zur Verdichtung des Aufschlussrasters, festgelegt. Werden beide Verfahren an einem Aufschlusspunkt durchgeführt, beträgt der horizontale Abstand zwischen Bohrung und Drucksondierung ca. 2,0 m. Die Lage der Aufschlüsse auf der Teilfläche B1 ist in Anhang 2.1 und die auf der Teilfläche B2 in Anhang 4.1 dargestellt.

In den nachfolgenden Tabellen sind die Erkundungsmaßnahmen auf den beiden Teilflächen aufgelistet. Die Bezeichnung einer Bohrung wird aus der Bezeichnung der Teilfläche und der Nummer der Bohrung gebildet:

z. B. B1Bg7            Teilfläche B1, Bohrung Nr. 7.

Die Bezeichnung der Drucksondierungen erfolgt äquivalent:

z. B. B2DS7N        Teilfläche B2, Drucksondierung Nr. 7  
(N ... nach der Vergütung).

Bei den Bohrungen handelt es sich um Trockenbohrungen mit durchgehendem Kerngewinn. Die Kernrohre, auch als LINER bezeichnet, waren 1,0 m lang.

Tabelle 7: Erkundungen Teilfläche B1 [88]

| Bohrungen                           | Aufschlusstiefe unter Geländeoberfläche | Drucksondierung |        | Aufschlusstiefe unter Geländeoberfläche |
|-------------------------------------|---|-----------------|--------|---|
|                                     |   | Nr.             | Anhang |   |
| B1Bg1<br>(Bohrprofil im Anhang 2.2) | 7,5 m                                   | B1DS1           | 3.1    | 25,3 m                                  |
|                                     |   | B1DS2           | 3.2    | 6,6 m                                   |
|                                     |   | B1DS2a          | 3.3    | 30,5 m                                  |
| B1Bg3                               | 10,0 m                                  | B1DS3           | 3.4    | 30,3 m                                  |
| -                                   | -                                       | B1DS4           | 3.5    | 30,5 m                                  |
| B1Bg5                               | 13,0 m                                  | B1DS5           | 3.6    | 25,2 m                                  |
| -                                   | -                                       | B1DS6           | 3.7    | 30,0 m                                  |
| B1Bg7<br>(Bohrprofil im Anhang 2.3) | 10,0 m                                  | B1DS7           | 3.8    | 30,3 m                                  |
|                                     | -                                       | B1DS8           | 3.9    | 30,0 m                                  |
| B1Bg9                               | 13,0 m                                  | B1DS9           | 3.10   | 25,4 m                                  |

Tabelle 8: Erkundungen vor der Vergütung, Teilfläche B2 [88]

| Bohrungen             | Aufschlusstiefe unter Geländeoberfläche | Drucksondierung |        | Aufschlusstiefe unter Geländeoberfläche |
|-----------------------|---|-----------------|--------|---|
|                       |   | Nr.             | Anhang |   |
| -                     | -                                       | B2DS1           | 5.1    | 30,0 m                                  |
| B2Bg2                 | 14,0 m                                  | B2DS2           | 5.2    | 30,0 m                                  |
|                       | -                                       | B2DS3           | 5.3    | 30,0 m                                  |
| B2Bg4                 | 12,0 m                                  | B2DS4           | 5.4    | 30,0 m                                  |
| -                     | -                                       | B2DS5           | 5.5    | 30,0 m                                  |
| B2Bg6                 | 15,0 m                                  | B2DS6           | 5.6    | 30,0 m                                  |
| -                     | -                                       | B2DS7           | 5.7    | 30,0 m                                  |
| B2Bg8<br>(Anhang 4.2) | 15,0 m                                  | B2DS8           | 5.8    | 30,0 m                                  |
| -                     | -                                       | B2DS9           | 5.9    | 30,1 m                                  |

Tabelle 9: Erkundungen nach der Vergütung, Teilfläche B2 [88]

| Aufschlussart     | Bezeichnung | Aufschlusstiefe unter Gelände | Anhang | Lage zu den Schlagtrichter des Fallgewichts |
|-------------------|-------------|-------------------------------|--------|---|
| Bohrung           | B2Bg10      | 12,0 m                        | -      | -   |
| Drucksondierungen | B2DS1N      | 20,0 m                        | 5.10   | zwischen 2 Schlagtrichtern                  |
|                   | B2DS2N      | 20,0 m                        | 5.11   | in einem Schlagtrichter                     |
|                   | B2DS3N      | 20,2 m                        | 5.12   | in einem Schlagtrichter                     |
|                   | B2DS4N      | 20,0 m                        | 5.13   | zwischen 4 Schlagtrichtern                  |
|                   | B2DS5N      | 20,2 m                        | 5.14   | am Rand eines Schlagtrichters               |
|                   | B2DS6N      | 14,2 m                        | 5.15   | zwischen 4 Schlagtrichtern                  |
|                   | B2DS7N      | 20,2 m                        | 5.16   | in einem Schlagtrichter                     |
|                   | B2DS8N      | 20,2 m                        | 5.17   | in einem Schlagtrichter                     |
|                   | B2DS9N      | 20,2 m                        | 5.18   | in einem Schlagtrichter                     |

### 6.3 Auswertung der Bohrungen

#### *Sichtung der Proben*

Die Kernrohre („LINER“) wurden abgelegt und längs aufgeschnitten, so dass eine Halbschale des Kernrohres aufgeklappt werden konnte. Das Material in den Kernrohren konnte betrachtet werden. Sichtbar wurden für Mischbodenkippen typische Materialanordnungen. In regelloser Anordnung waren verschiedenste Bodenarten anzutreffen. Ebenfalls deutlich wurde die besondere Bodenstruktur. Bild 8 zeigt einen vollständigen Bohrkern eines frisch aufgeschnittenen Kernrohrs. Im linken, oberen Teil des Kerns ist typischer Mischboden aus Schluff- und Tonklumpen, die in einer sandigen Matrix mit kohligen Bestandteilen schwimmen. Im rechten Teil ist gelber Sand zu sehen. Der Übergangsbereich in der Mitte des Kerns zeigt eine zu erwartende Schrägschichtung mit Spuren von möglichen Gleitvorgängen. Vollständige Bohrkern mit Mischboden unterschiedlich großen Schluffklumpen wurden ebenfalls angetroffen (Bild 9).

Im linken oberen Teil der Probe ist dunkler Boden mit bindigen Klumpen sichtbar. Rechts der Mitte ist eine Schrägschichtung sichtbar. Im rechten Teil der Probe befindet sich gelber Sand.

Die Probe besteht aus einem Mischboden: In einer wegen der kohligen Beimengungen dunklen Grundmasse aus Sand und schluffigen Sanden „schwimmen“ Schluff- und Tonklumpen unterschiedlicher Größe.



*Bild 8: Vollständiger Bohrkern, aus Tiefe  $t = (9,0 \dots 10,0)$  m, 1,0 m lang*



*Bild 9: Vollständiger Bohrkern,  $t = (8,0 \dots 9,0)$  m*

Eine weitere besondere Bodenstruktur dokumentiert Bild 10. In einem blassgelben Schluffklumpen sind Kohlestücke eingedrückt. Da sich auch im Inneren dieses Brockens Kohlestückchen mit einer Kantenlänge von  $l = (2 \dots 3)$  cm befanden, muss dieser Klumpen beim Transport zur Kippe entstanden sein.

Bild 11 zeigt ein Ausschnitt aus einem Kernrohr aus einer Tiefe von ca.  $(6,20 \dots 6,55)$  m. In der linken Bildhälfte ist ein grauer Ton sichtbar. Der rechte Ausschnitt zeigt gelbe Schluffklumpen in einem schluffigen Sand. In der Mitte des Bildes befindet sich ein Kohlestück, das durch das Kernrohr angeschnitten wurde.

Die 4 Bilder dokumentieren am Beispiel der Zugabsetzerkippe Zwenkau, dass die besonderen Strukturen der Mischbodenkippen sich in einer besonderen Probenstruktur widerspiegeln.



*Bild 10: Einzelstück eines Bohrkerns,  $t = (1,0 \dots 2,0) \text{ m}$*

In dem gelben Schluffklumpen befinden sich Kohlestücke. Dieses Stück entstand beim Gewinnungs- und Transportprozess.

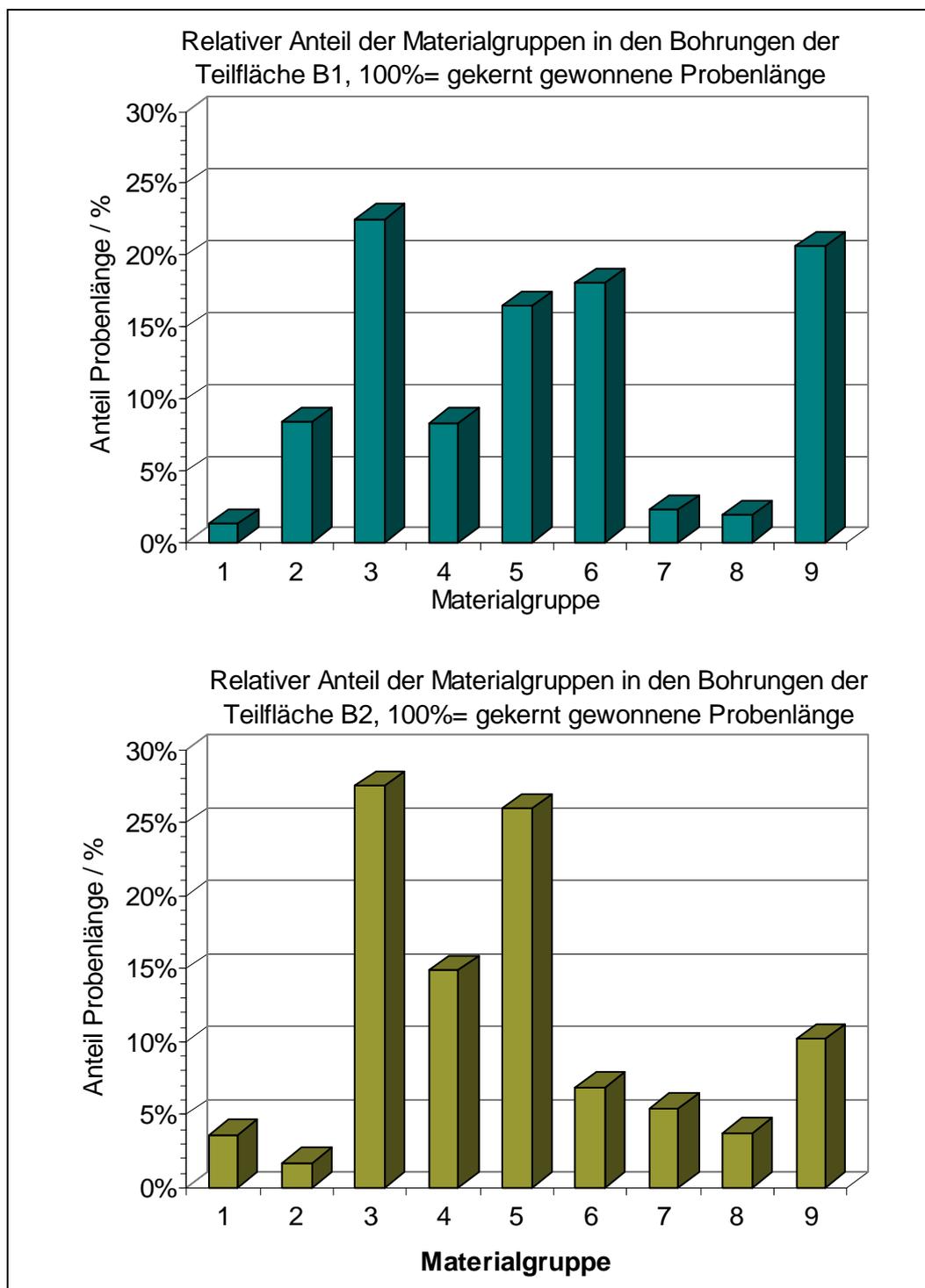


*Bild 11: Kohlestück im Kernrohr zwischen Ton (links) und Schluff (rechts)*

#### *Festlegen der bodenmechanischen Grundgesamtheiten BGG*

Nach Sichtung der Proben aus den Kernrohren und Aufnahme der Bodenprofile wurden diese Materialien zunächst 9 verschiedenen Materialgruppen nach visuell wahrnehmbaren Kriterien, wie Korngrößenverteilung, organischem Anteil (Glühverlust) und Farbe, zuge-

ordnet (Tabelle 10). Die relativen Häufigkeiten der Materialgruppen in den Bohrungen zeigt Bild 12.



*Bild 12: Absolute Häufigkeiten der Materialgruppen*

In der Teilfläche B1 dominieren die Materialgruppen MG 3, MG 5, MG 6 und MG 9 und in der Teilfläche B2 die Materialgruppen MG 3 und MG 5. Werden beide Teilflächen zusammengefasst, so dominieren wegen der größeren Anzahl an Bohr- und Probemetern auf der Teilfläche B2 die Materialgruppen MG 3, MG 4 und MG 5. Die unregelmäßigen Anordnungen der Materialgruppen dokumentieren die graphischen Darstellungen in Anhang 6

und Anhang 7. Die Größe der Quadrate ist proportional der angetroffenen Probenlänge im Kernrohr. Nur im Fall der Bohrungen B2Bg2 und B2Bg8 kann eine Schrägschichtung vermutet werden (Anhang 7).

Für die 9 Materialgruppen wurden an jeweils einer Einzelprobe im bodenmechanischen Labor Korngrößenverteilung, Glühverlust und Korndichte untersucht. Die wichtigsten Untersuchungsergebnisse sind in Tabelle 10 und Tabelle 11 enthalten.

Die Materialgruppen MG 1 [UL] und MG 8 [UA, OU] werden wegen ihres geringen Vorkommens nicht weiter berücksichtigt. Zueinander ähnliche Korngrößenverteilungen weisen die Materialgruppen MG 2 und MG 5 auf.

Tabelle 10: Korndichte und Glühverlust der Materialgruppen [88]

| MG   | Probe Nr.      | Ansprache n. DIN 18196 | Korndichte $\rho_s$ / gcm <sup>-3</sup> | Glühverlust $V_{gl}$ / - | Bemerkung             |
|------|----------------|------------------------|---|--------------------------|-----------------------|
| MG 1 | 17297          | UL                     | 2,58                                    | 0,03                     | -                     |
| MG 2 | 10397          | SU                     | 2,66                                    | 0,01                     | geringer Mengenanteil |
| MG 3 | 10497          | SU*                    | 2,49                                    | 0,07                     | organischer Anteil    |
| MG 4 | 10597          | SU*                    | 2,44                                    | 0,09                     | organischer Anteil    |
| MG 5 | 10697          | SU                     | 2,63                                    | 0,03                     | -                     |
| MG 6 | 10797          | SU                     | 2,58                                    | 0,03                     | -                     |
| MG 7 | 10897          | SU*                    | 2,58                                    | 0,04                     |                       |
| MG 8 | 17097<br>17197 | UA<br>OU               | 2,63<br>2,51                            | 0,06<br>0,14             | geringer Mengenanteil |
| MG 9 | 10997          | SU*                    | 2,65                                    | 0,02                     | -                     |

Sehr ungleichförmig und intermittierend gestufte Materialgruppen sind in der Tabelle 11 unterlegt dargestellt.

Tabelle 11: Aus der Korngrößenverteilung abgeleitete Parameter [88]

| MG   | $d_{10}$ / mm | $d_{30}$ / mm | $d_{60}$ / mm | Ungleichförmigkeit<br>$U = d_{60}/d_{10}$ |                     | $C_C = d_{30}^2/(d_{10} \cdot d_{60})$ | Kornstufung nach DIN 18196 |
|------|---------------|---------------|---------------|---|---------------------|--|----------------------------|
| MG 2 | 0,06          | 0,17          | 0,7           | 11,7                                      | ungleichförmig      | 0,7                                    | intermittierend gestuft    |
| MG 3 | 0,006         | 0,09          | 0,32          | 53,3                                      | sehr ungleichförmig | 4,2                                    | intermittierend gestuft    |
| MG 4 | 0,003         | 0,08          | 0,24          | 80,0                                      | sehr ungleichförmig | 8,9                                    | intermittierend gestuft    |
| MG 5 | 0,04          | 0,15          | 0,36          | 9,0                                       | ungleichförmig      | 1,6                                    | weitgestuft                |
| MG 6 | 0,04          | 0,25          | 0,8           | 20,0                                      | sehr ungleichförmig | 2,0                                    | weitgestuft                |
| MG 7 | 0,005         | 0,08          | 0,23          | 46,0                                      | sehr ungleichförmig | 5,6                                    | intermittierend gestuft    |
| MG 9 | 0,018         | 0,075         | 0,18          | 10,0                                      | ungleichförmig      | 1,7                                    | weitgestuft                |

*Zuordnung*

Den Materialgruppen wurden 4 bodenmechanischen Grundgesamtheiten BGG zugeordnet. Eine Zuordnungsübersicht zeigt Tabelle 12. Die Zuordnung erfolgte nach folgenden Kriterien:

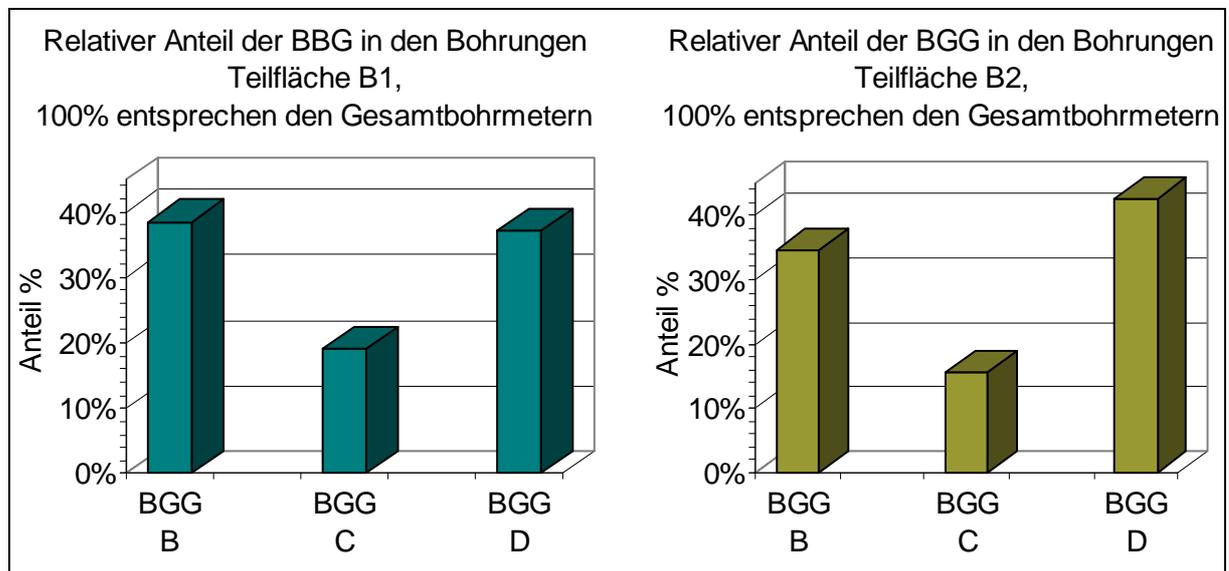
- Glühverlust  $V_{Gl} \leq 0,04$  und Glühverlust  $V_{Gl} > 0,04$ ,
- Feinkornanteil bzw. Ansprache nach DIN 18196 SU und SU\*.

*Tabelle 12: Übersicht der Materialgruppen*

| <b>Bodenmechanische Grundgesamtheit BGG</b>       | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>C</b> | <b>D</b>       |
|---|----------|----------|----------|----------------|
| Materialgruppe (MG) auf den Teilflächen B1 und B2 | 1, 8     | 2, 5, 6  | 9, 7     | 3, 4           |
| Bodenklasse DIN 18196                             | UL       | SU       | SU*      | SU*...ST*... U |

Für weitere Laboruntersuchungen wurden die drei häufigsten Grundgesamtheiten B, C und D ausgewählt.

Die relativen Anteile der BGG an den abgeteufte Bohrmeter zeigt Bild 13. Die Korngrößenverteilungskurven der BGG B, C und D enthält der Anhang 8.



*Bild 13: Absolute Häufigkeiten der Bodenmechanischen Grundgesamtheiten BGG*

*Eine Zusammenstellung laborativ bestimmter Eigenschaften der Grundgesamtheiten nach Wiederholungsversuchen enthält*

Tabelle 13. Angegeben sind die Spannweiten der Versuchsergebnisse, deren Mittelwerte  $\bar{x}$  und die Versuchsanzahlen n.

*In*

Tabelle 13 aufgeführte Versuche, die an kleinen Probenvolumina durchgeführt wurden, z. B. Glühverlust und Korndichte, zeigen große Streubreiten der Versuchsergebnisse.

*Dichten*

An jedem LINER wurde die Dichte des enthaltenen Probenmaterials ermittelt mit:

$$\rho_1 \text{ mit } V = V(\text{ Länge } l \text{ des Kernrohres, Innendurchmesser } d_{\text{innen}}), \quad (6-1)$$

$$\rho_2 \text{ mit } V = V(\text{ Länge } l \text{ des Kernrohres, Vorschneidedurchmesser } d_{\text{vor}}), \quad (6-2)$$

$$\rho_3 \text{ mit } V = V(\text{ Einzelprobe}). \quad (6-3)$$

*Tabelle 13: Übersicht der Versuchsergebnisse ([41], ergänzt)*

| <b>Parameter</b>                                     | <b>Einheit</b>    | <b>BGG B</b>                                     | <b>BGG C</b>                                     | <b>BGG D</b>                                      |
|--|-------------------|--|--|---|
| Bodengruppe  | -                 | SU   | SU*  | SU*... ST*  |
| Dichte Einzelproben<br>$\rho$                        | $\text{gcm}^{-3}$ | 1,56 ... 1,75<br>n=7, $\bar{x}$ =1,63            | 1,58 ... 2,00<br>n=14, $\bar{x}$ =1,85           | 1,70 ... 2,18<br>n=12, $\bar{x}$ =1,91            |
| Korndichte<br>$\rho_s$                               | $\text{gcm}^{-3}$ | 2,37 ... 2,66<br>n=25, $\bar{x}$ =2,59           | 2,53 ... 2,66<br>n=29, $\bar{x}$ =2,61           | 2,37 ... 2,70<br>n=19, $\bar{x}$ =2,58            |
| Wassergehalt<br>$w_n$                                | -                 | 0,02 ... 0,14<br>n=11, $\bar{x}$ =0,11           | 0,05 ... 0,16<br>n=14, $\bar{x}$ =0,12           | 0,08 ... 0,13<br>n=8, $\bar{x}$ =0,10             |
| maximale Porenzahl<br>$e_{\text{max}}$               | -                 | 1,12 ... 1,19<br>n=6, $\bar{x}$ =1,15            | 1,08 ... 1,14<br>n=6, $\bar{x}$ =1,11            | -   |
| kleinste Porenzahl<br>$e_{\text{min}}$               | -                 | 0,41 ... 0,48<br>n=6, $\bar{x}$ =0,44            | 0,50 ... 0,53<br>n=6, $\bar{x}$ =0,51            | -   |
| Fließgrenze<br>$w_L$                                 | -                 | -  | -  | 0,24 ... 0,27<br>n=2                              |
| Plastizitätsgrenze<br>$w_P$                          | -                 | -  | -  | 0,18 ... 0,22<br>n=2                              |
| Glühverlust<br>$V_{\text{GL}}$                       | -                 | 0,01 ... 0,18<br>n=18, $\bar{x}$ =0,08           | 0,02 ... 0,07<br>n=14, $\bar{x}$ =0,05           | 0,01 ... 0,14<br>n=7, $\bar{x}$ =0,05             |
| Proctordichte<br>$\rho_{\text{Pr}}$                  | $\text{gcm}^{-3}$ | 1,73 ... 1,74<br>n=3                             | 1,64 ... 1,65<br>n=3                             | 1,55 ... 1,59<br>n=3                              |
| optimaler Wassergehalt<br>$w_{\text{opt}}$           | -                 | 0,13 ... 0,14<br>n=3                             | 0,15 ... 0,17<br>n=3                             | 0,20 ... 0,22<br>n=3                              |
| modifizierte Proctordichte<br>mod $\rho_{\text{Pr}}$ | $\text{gcm}^{-3}$ | 1,82 ... 1,86<br>n=4                             | 1,75 ... 1,77<br>n=4                             | 1,63 ... 1,72<br>n=3                              |
| modifizierter Wassergeh.<br>mod $w_{\text{opt}}$     | -                 | 0,09 ... 0,11<br>n=4                             | 0,12 ... 0,13<br>n=4                             | 0,14 ... 0,17<br>n=4                              |
| Durchlässigkeitsbeiwert<br>$k_f$                     | $\text{ms}^{-1}$  | $1,4 * 10^{-6} \dots$<br>$3,8 * 10^{-7}$<br>n=10 | $1,6 * 10^{-8} \dots$<br>$5,2 * 10^{-8}$<br>n=10 | $2,1 * 10^{-9} \dots$<br>$6,9 * 10^{-11}$<br>n=10 |

Bild 14 zeigt einen schematisierten Schnitt durch die Vorschneide eines Kernrohres. Der Innendurchmesser des Probebehälters ist geringfügig größer als der Vorschneidedurchmesser. Damit wird gewährleistet, dass die Probe beim Einschlagen des Kernrohres möglichst leicht in das Kernrohr gleitet. Die Dichte  $\rho_1$  liefert somit einen kleineren Zahlenwert als die Dichte  $\rho_2$ . Zwischen beiden Werten besteht folgende Beziehung:

$$\rho_2 \approx \rho_1 + (0,13 \dots 0,18) \text{ gcm}^{-3}. \quad (6-4)$$

Beim Eindrücken der Vorschneide in ein locker gelagertes Lockergestein wird es im Bereich der Vorschneide schwach verdichtet. Im Kernrohr wird das Lockergestein wieder entspannt und in gewisser Weise aufgelockert. Der ursprünglich vorhandene Wert dürfte also im Bereich zwischen  $\rho_1$  und  $\rho_2$  liegen.

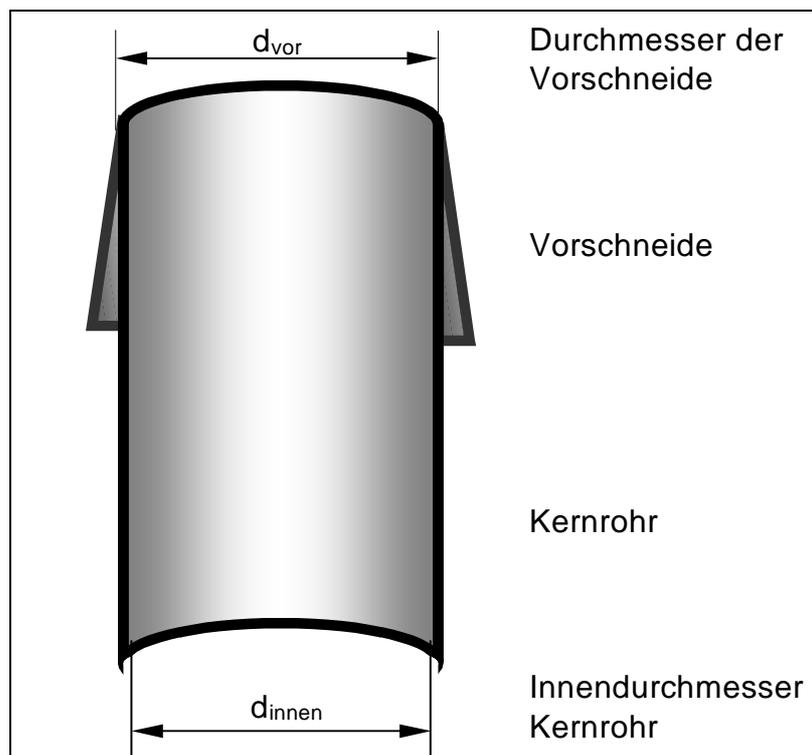


Bild 14: Schematischer Schnitt, Vorschneide und Kernrohr (nach [88])

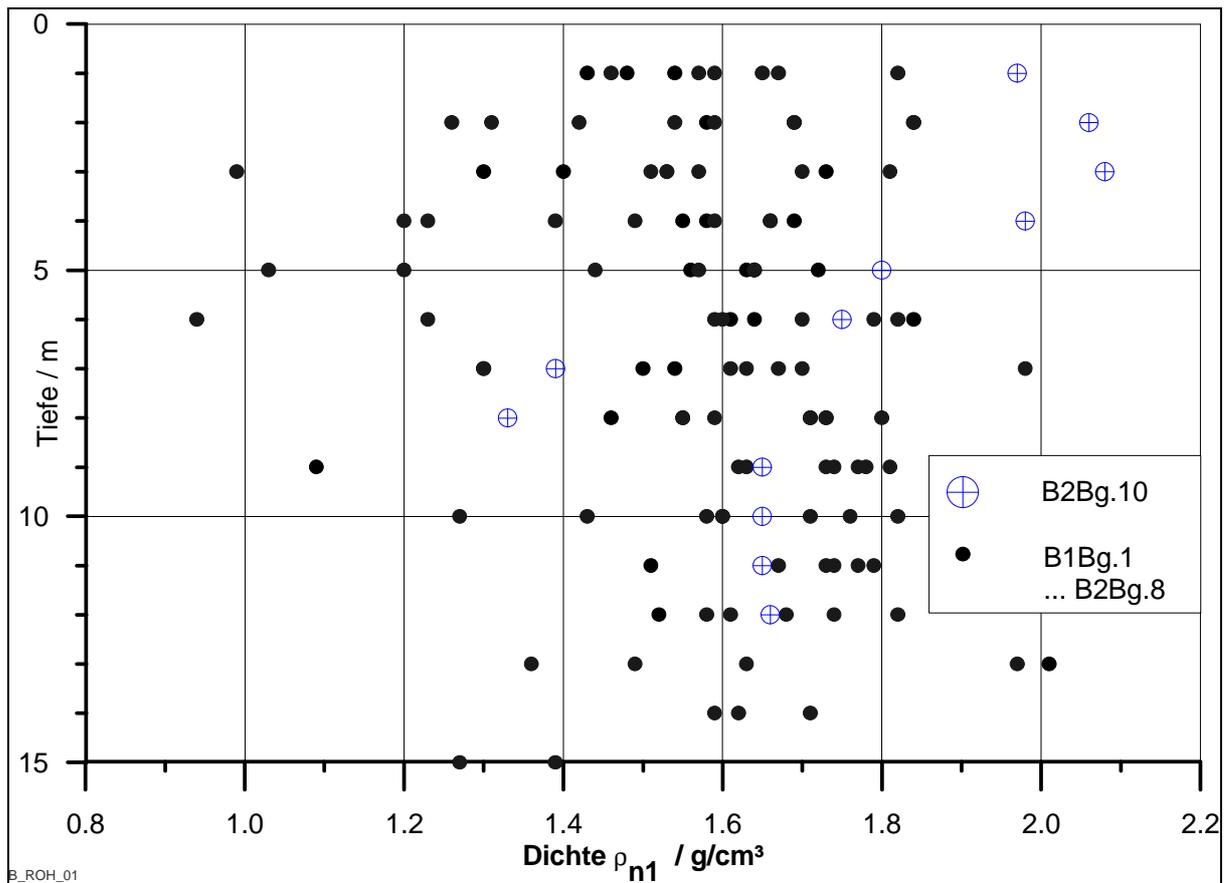


Bild 15: Dichte  $\rho_1$  aller Kernrohrinhalte als Funktion der Tiefe

In Bild 15 sind die mittleren Dichten der Kernrohrproben in Abhängigkeit von der Tiefe aufgetragen. Es kann nur eine geringfügige Dichtezunahme mit der Tiefe im untersuchten Bereich festgestellt werden. Bohrung B2Bg10 wurde nach der Vergütung der Testfläche B2 abgeteuft. Diese Werte sind gesondert gekennzeichnet und weichen von den übrigen Aufschlüssen deutlich ab. Deshalb ist die Bohrung B2Bg10 im Anhang 6.2 nicht enthalten.

In LINERN mit auffallend geringen Dichten  $\rho_1 \leq 1,2 \text{ gcm}^{-3}$  ist ein höherer kohligter Anteil festgestellt worden.

Die Dichte  $\rho_{n3}$  wurde an Einzelstücken des Probematerials aus den Kernrohren bestimmt [88]. Dieser Wert gibt einen Anhalt für die Dichten einzelner Materialgruppen. Der Mittelwert aller Einzelproben beträgt  $\rho_{3,m} = 1,74 \text{ gcm}^{-3}$ . Der Mittelwert aller Dichten der Kernrohrinhalte  $\rho_{1m}$  beträgt  $\rho_{1,m} = 1,59 \text{ gcm}^{-3}$ . Bleibt die Bohrung B2Bg7 wegen der hohen kohligen Anteile unberücksichtigt, so beträgt  $\rho_{1,m} = 1,61 \text{ gcm}^{-3}$  und liegt damit über der mittleren Dichte  $\rho_{1,m}$  der gesamten Kernrohrinhalte, aber noch deutlich unter der Dichte  $\rho_{3,m}$ .

Für den Dichteunterschied sind folgende Erklärungen möglich:

- Die Dichten einzelner Probenteile sind tatsächlich höher als die durchschnittliche Dichte der Kernrohrinhalte. Demzufolge müssen Teile der Proben auch niedrigere Dichten haben können. Diese Bereiche sind möglicherweise nicht beprobte Übergangsbereiche zwischen verschiedenen Materialien oder locker gelagerte Bereiche, in denen keine Proben entnommen wurden.

- Bestandteile der Probe im Kernrohr stammen aus Materialien mit geringer Dichte. Der Vergleich der Dichten  $\rho_1$  und  $\rho_2$  mit den Schichtenverzeichnissen zeigt, dass in Kernrohren mit geringerer Dichte auch kohlige Materialien zu finden sind. In diesem Fall müssen diese Dichtewerte für den Vergleich mit einzelnen Materialdichten  $\rho_{3m}$  nicht repräsentativ für die mittlere Gebirgsdichte sein.

Bisher wurde nur die Dichte  $\rho_1$  betrachtet. Wird mit der Dichte  $\rho_2$  verglichen, ist der Wert für  $\rho_2$  eher zu hoch:

$$\rho_{3,m} = 1,74 \text{ gcm}^{-3},$$

$$\rho_{2,m} = 1,61 \text{ gcm}^{-3} + (0,13 \dots 0,18) \text{ gcm}^{-3} = (1,74 \dots 1,79) \text{ gcm}^{-3}.$$

Eine Übersicht der Dichten  $\rho_3$  enthält Anhang 9. Diese Werte dokumentieren einen leichten Trend der Dichtezunahme um ca.  $(0,1 \dots 0,2) \text{ gcm}^{-3}$  im Tiefenbereich bis ca. 12 m für die BGG B (MG2, MG5), BGG D (MG3, MG4) und BGG C (MG9). Eine Aussage für die Materialgruppen MG6, MG7 und MG8 ist mit der geringen Anzahl an Einzelproben nicht möglich.

Werden die Dichten des Probematerials bestimmt, können folgende Fehler auftreten [41]:

- Beim Einschlagen des Kernrohrs wird zusammenhängendes Material (feste Klumpen, faserige Braunkohle) vor der Vorschneide hergeschoben, schließlich beiseite gedrängt oder in die Schneide gezogen.
- Durch die Schläge wird der Boden verdichtet oder aufgelockert.
- Beim Schlagen verformt sich das Kernrohr radial und axial.
- Beim Ziehen des Rohres bis zum Verschließen tritt Material aus.
- Die Kernrohre werden aufgeschnitten. Die Schnittkanten sind uneben.
- Die Kernrohrhälften sind nach dem Aufschneiden labil und verformen sich.
- Es treten Messungenauigkeiten (Probenmasse, Länge, Durchmesser) auf.

### *Schlagzahlen*

Bild 16 zeigt die Schlagzahlen je Meter Eindringen des jeweiligen Kernrohrs. Vom Tiefenbereich (0 ... 2) m existieren Schlagzahlen zwischen 16 und  $\geq 60$  Schlägen je Meter Eindringung. Die Verdichtung ist auf die Verdichtung des oberflächennahen Bereichs infolge Fahrverkehrs auf der früheren Arbeitsebene zurückzuführen. Unterhalb der Tiefe von 2 m fallen die Werte deutlich ab und steigen mit zunehmender Tiefe allmählich wieder an.

Die Schlagzahlen geben einen integralen Anhalt für die Lagerungsdichte des Untergrundes. Der relativ große Tiefenbereich entspricht der Kernrohrlänge. Korrelationen sind wegen der sich ständig ändernden Materialeigenschaften allerdings nicht möglich.

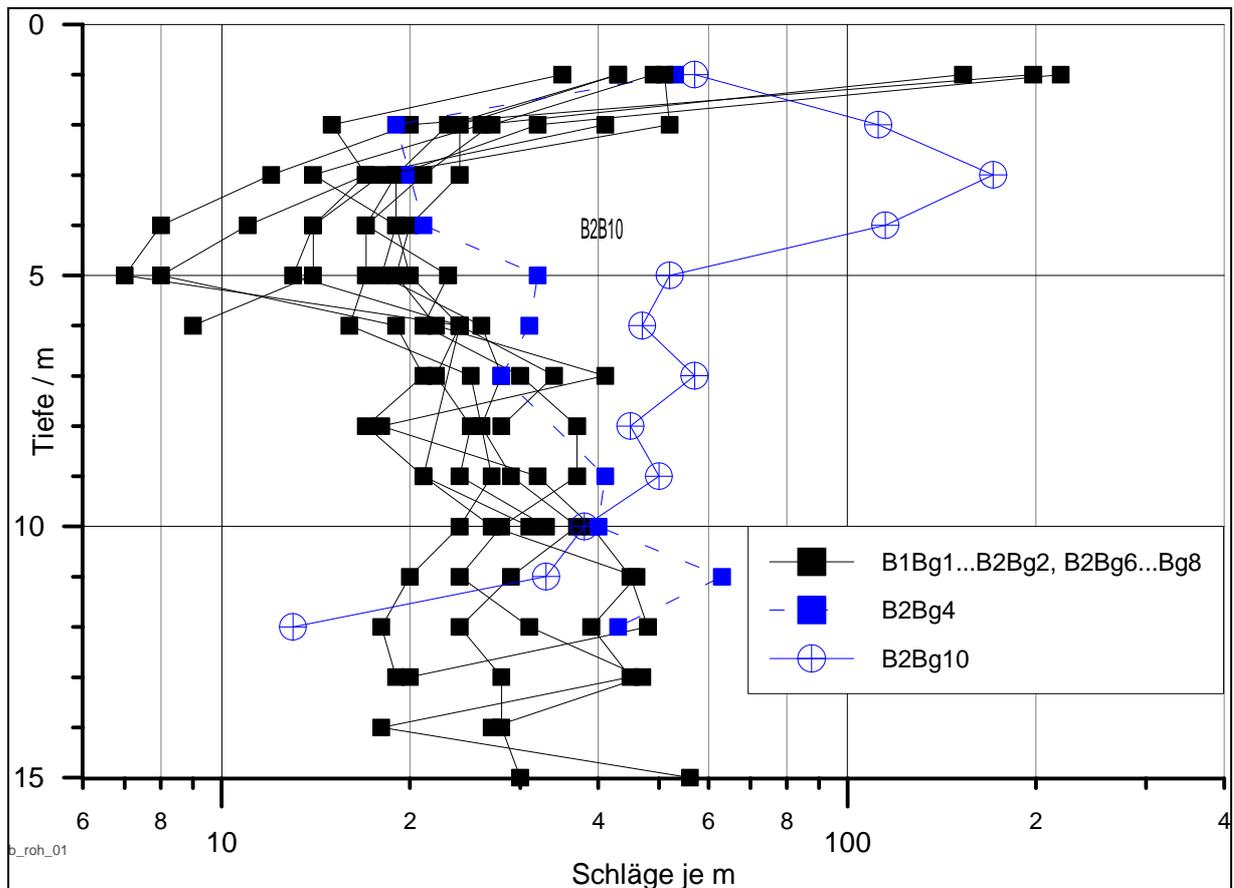


Bild 16: Schlagzahlen zum Einschlagen der Kernrohre

### Wertung

Ungeachtet der Fehlerquellen ist die durchgehende Probenahme mit Kernrohren eine geeignete Methode, um zutreffende Aussagen über Struktur und Dichte an Hand einer größeren Anzahl von Messwerten bei akzeptablen Kosten zu gewinnen.

## 6.4 Pseudokorn

An Probenmaterial aus der Tagebaukippe Zwenkau wurde der Einfluss der Pseudokornstruktur untersucht [36][48]. Sowohl die Einzelkörner als auch die Bestandteile der Klumpen decken das Kornspektrum vom Tonkorn bis zum Kieskorn ab. Das Probenmaterial wurde in Grundmasse und in Aggregationen geteilt. Zu den Aggregationen gehören alle verklumpten Bestandteile mit einem Durchmesser  $d \geq 10$  mm. Aus laborativen Zwängen wurden alle Bestandteile unterhalb dieser Grenze dem Grundmaterial zugeordnet.

Das *Grundmaterial* weist schluffige Aggregationen auf. Nur selten besitzen diese Elemente einen Kern. Neben Quarz und Tonmineralien sind Beimengungen verschiedener Gesteine, organische Bestandteile wie Holz, Xylit und anthropogene Partikel zu finden. Der Rundungsgrad der Pseudokörner ist sehr unterschiedlich und reicht von wenig bis stark gerundet.

Die Zusammensetzung der Pseudokörner unterscheidet sich im Beispiel des Tagebaus Zwenkau nur durch einen höheren Anteil an Ton und Schluff von der Grundmasse. Im Aufbau der Klumpen lassen sich zwei Typen unterscheiden:

- Klumpen nach Art des *Kernes*:
  - 1) Klumpen, deren Kern schluffig oder tonig ist und sich von der Grundmasse unterscheidet,
  - 2) Klumpen mit dichterem Kern, der sich hinsichtlich seiner Bestandteile nicht von der Grundmasse unterscheidet (Materialzusammenballungen ohne ausgeprägten Kern sind vermutlich erst nach dem Abbauprozess entstanden),
- Klumpen nach dem *Zeitpunkt* der Entstehung:
  - 3) Die Klumpen sind natürlich entstanden. Der technische Prozess hat sie nicht verändert.
  - 4) Die Klumpen sind während technologischer Prozesse entstanden. Der Ton- und Schluffanteil ist geringer gegenüber dem im Fall 1).

Bilder 17 bis 19 zeigen charakteristische Klumpen [36]. Die Proben wurden erst nach längerer Lagerung bearbeitet, so dass die Wassergehalte nicht repräsentativ sind. Die Existenz unterschiedlicher Klumpen wird bestätigt. Die Grundmasse enthält weitere Aggregationen im Größenbereich von Sandkörnern, insbesondere solche mit einem Durchmesser  $d < 1$  mm.



Bild 17: Klumpen, schluffiger Kern

- Klumpen mit schluffigem Kern, Kantenlänge ca. 9 cm,
- Die rechteckähnliche Form entstand durch das Entfernen des Mantels aus der Grundmasse.



Bild 18: Klumpen, toniger Kern

- Toniger Kern, Kantenlänge ca. 9 cm, mit glatter, leicht glänzender Schnittfläche,
- Im Original war eine schwache Bänderung zu erkennen.
- Der Klumpen ist durch Transportvorgänge abgerundet.
- Im unteren Teil des Klumpens sind noch Reste des Mantels aus Grundmasse zu erkennen. Dazu gehört auch das Kieskorn in der Mitte unten.



Bild 19: Klumpen, ohne besonderen Kern

- Klumpen, dessen Materialzusammensetzung der Grundmasse entspricht und der keinen besonderen Kern aufweist, jedoch Bruchstückchen bzw. Pseudokörner aus Ton und Schluff mit Kantenlängen > 1 cm enthält.
- Der Klumpen wird durch die zementierende Wirkung der bindigen Anteile zusammengehalten.

Tabelle 14: Kennwerte von 4 Proben, nach [36]

| Beschreibung   | $V_{Gl}$<br>- | w<br>- | $\rho$<br>$gcm^{-3}$ | $\rho_d$<br>$gcm^{-3}$ | $\rho_s$<br>$gcm^{-3}$ | n<br>- | e<br>- |
|--|---------------|--------|----------------------|------------------------|------------------------|--------|--------|
| 1) Kern aus einem Klumpen, Volumen ca. 1,2 dm <sup>3</sup> , 50 % des Gesamtvolumens sind dem schluffigen Kern (Bild 17) zuzuordnen. Der „Mantel“ ähnelt in der Zusammensetzung der „Grundmasse“ und im Erscheinungsbild dem Klumpen 3). | 0,03          | 0,17   | 2,17                 | 1,85                   | 2,68                   | 0,31   | 0,44   |
| 2) ähnelt dem Klumpen 1), jedoch ist der Kern tonig (Bild 18)  | 0,11          | 0,40   | 1,76                 | 1,26                   | 2,62                   | 0,52   | 1,09   |
| 3) Größe ca. 90 mm im Durchmesser, besteht aus der „Grundmasse“ und wird durch die zementierende Wirkung des bindigen Anteils zusammengehalten, enthält gerundete Kiesel (Bild 19)   | -             | 0,11   | 2,24                 | 2,01                   | 2,63                   | 0,24   | 0,31   |
| 4) ähnelt dem Klumpen 3) (Bild 19)   | -             | 0,02   | 2,06                 | 2,02                   | 2,63                   | 0,23   | 0,30   |

Eine Teilmenge des entnommenen Probenmaterials ohne Feinkorn ( $d < 0,063$  mm) wurde ca. 5 Minuten in der *Kugelmühle* „vergleichsmäßig“ und deren Korngrößenverteilung nach manueller Trockensiebung mit der des gleichen, aber nicht gemahlten Materials verglichen. Deutlich war eine Verschiebung der Körnungslinie nach links zum Feinkornbereich erkennbar. Die Verschiebung der Körnungslinie ist auf Kornabrundung und Kornzertrümmerung der Pseudokörner zurückzuführen. Wird trockenes Probematerial in einer Kugelmühle aufbereitet, muss damit gerechnet werden, dass nicht nur die Klumpen zerstört werden, sondern dass sich generell die Korngrößenverteilung des Materials verändert. Feuchtes Probematerial verklumpt wegen des Feinkornanteils sofort wieder [36]. Wird die Korngrößenverteilung durch eine vorsichtige Handsiebung an nicht aufbereitetem Kippenmaterial vorgenommen, ohne dass das Pseudokorn zerstört wird, und mit dem Ergebnis einer Maschinensiebung ohne Wasserzugabe verglichen, so entstehen unterschiedliche Körnungslinien. Solche Körnungslinien sind in Anhang 8.1 bis 8.3 aufgetragen.

Das Verhalten unterschiedlich manuell aufbereiteter Materialien wurde im Oedometer untersucht. Die Versuche wurden jeweils 5-mal durchgeführt. Pseudokörner mit einem Durchmesser  $d > 20$  mm wurden aussortiert. Versuchsparameter und Ergebnisse enthält Tabelle 15.

Im Resultat zeigte sich, dass die Verformungen der nicht homogenisierten Probe bei einem Spannungsbereich (0 ... 50)  $kNm^{-2}$  größer als die Verformungen der zerkleinerten Probe sind. In der nächsten Laststufe von (50 ... 200)  $kNm^{-2}$  streuen die Versuchsergebnisse deutlich weniger. Die Verformungen der zerkleinerten Probe sind jedoch geringfügig größer. Aus den Untersuchungen muss gefolgert werden, dass die Art der Probenaufbereitung die Versuchsergebnisse beeinflusst. Eine gewisse Aufbereitung ist jedoch auf Grund der ge-

ringen Abmessungen der Oedometerzellen mit einer Querschnittsfläche von 40 cm<sup>2</sup> unverzichtbar.

*Tabelle 15: Vergleich manuell aufbereiteter Materialien*

| Parameter  | nicht homogenisierte Probe | Probe, Pseudokorn > 10 mm manuell zerkleinert |
|--|----------------------------|---|
| Korndichte $\rho_s$  | 2,64 gcm <sup>-3</sup>     | 2,63 gcm <sup>-3</sup>                        |
| Glühverlust $V_{Gl}$   | 2,9 %                      | 2,8 %   |
| max $e^*$ <sup>1)</sup>  | 0,92                       | 0,71  |
| Probenquerschnitt  | 40 cm <sup>2</sup>         | 40 cm <sup>2</sup>                            |
| Versuchsdauer  | 1.000 min                  | 1.000 min                                     |
| Vertikaldeformation $\epsilon_v$<br>$\sigma = (0 \dots 50) \text{ kNm}^{-2}$   | (4,5 ... 7,2) %            | (3,6 ... 5,2) %                               |
| Vertikaldeformation $\epsilon_v$<br>$\sigma = (50 \dots 200) \text{ kNm}^{-2}$ | (4,8 ... 5,8) %            | (5 ... 6,2) %                                 |

<sup>1)</sup> max  $e^*$ : Porenzahl bei lockerster Lagerung der trockenen Probe.

Unterschiedliche Makrostrukturen der geschütteten Böden haben großen Einfluss auf die Durchlässigkeit. Während ein gleichmäßig durchmischter stark schluffiger Feinsand (Lockergestein 1. Grades) mit  $k_f \approx (1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-9}) \text{ ms}^{-1}$  gering durchlässig ist, zeigt ein Sand, dessen in Summe gleich großer Feinkornanteil in Pseudokornstruktur vorkommt, eine Durchlässigkeitsbeiwert von ca.

$$k_f = (1 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-7}) \text{ ms}^{-1} [41][129].$$

## 6.5 Drucksondierungen

### *Vergleich mit den geologischen Profilen*

Für den Vergleich der Sondierkurven mit den geologischen Profilen der LINER-Bohrungen wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

- Auswertung der geglätteten Verläufe des Reibungsverhältnisses  $R_f$ ,
- Vergleich der Schichten aus dem Bohrprofil mit dem Sondierkurvenverlauf,
- Vertikale Verschiebung des Sondierprofils aufgrund der technogenen Entstehungsgeschichte,

- zusätzliche Bestimmungen der Bodenart nach einer Korrelationsbeziehung.

### 6.5.1 Sondierungen auf der Teilfläche B1

Beim Vergleich der Schichtenverzeichnisse mit den Sondierprotokollen lassen sich nur einige Bereiche der durchgehend gewonnenen Bodenproben dem Verlauf der Sondierkurven zuordnen.

In der Bohrung B1Bg1 wurden die Grundgesamtheiten B, C und D angetroffen. Im Sondierprotokoll B1DS1 sind in der Tiefe bis  $t = 10$  m überwiegend Spitzendrücke  $q_c < 2,0$  MPa und Reibungsverhältnisse  $R_f < 2$  % ausgewiesen. Unter Verwendung der Beziehung nach BEGEMANN (Tabelle 4) wäre hier Sand mit einem Feinkornanteil von maximal 5 % zu erwarten. Nach ROBERTSON [124] (Bild 7) ist dagegen mit sandigem Schluff bis schluffigem Ton zu rechnen. Der in der Tiefe von  $t = (1,59 \dots 1,79)$  m nachgewiesene Ton (MG 8, BGG A) dürfte Ursache des Reibungsverhältnisses  $R_f = (2,0 \dots 2,5)$  % bei  $t = 2,0$  m im Sondierprotokoll sein. Die kohligen Bereiche im Probenmaterial ab Tiefen  $t \geq 5,78$  m sind im Sondierprotokoll nicht nachweisbar.

In der zur Bohrung B1Bg3 zugeordneten Sondierung B1DS3 sind im Bereich von  $t = (2,0 \dots 6,5)$  m die Reibungsverhältnisse  $R_f \leq 0,5$  %. Der erhöhte Wert bei  $t = (1 \dots 2)$  m kann der BGG D (MG 3,4) zugeordnet werden und dürfte in den höheren organischen Anteilen begründet sein, ebenso die  $R_f = (1 \dots 3)$  % bei  $t = (7,5 \dots 9,0)$  m. Dagegen lassen sich die Peaks bei  $t = (6 \dots 7)$  m nicht zuordnen.

Ebenso ist die Wechsellagerung zwischen BGG B und BGG C in den Sondierergebnissen nicht wiederzufinden.

Die Bewertung der Sondierung B1DS4 nach dem Vorschlag von ROBERTSON [124] in verschiedenen Tiefenbereichen zeigt Bild 20. Der oberflächennahe Bereich  $t = (0 \dots 1)$  m wird als Sand bis schluffiger Sand ausgewiesen. Schluffiger Ton steht nur in Tiefen von  $t = (6,0 \dots 6,2)$  m an. Mit sandigem bis tonigem Schluff ist von  $t = (1 \dots 6)$  m zu rechnen.

In der Sondierung B1DS5 wurden Reibungsverhältnisse  $R_f = (0,5 \dots 3,0)$  % gemessen, im Tiefenbereich  $t = (5,5 \dots 7,5)$  m mit  $R_f = (1,5 \dots 2,0)$  % wurde in der B1Bg5 die BGG D angetroffen und im Tiefenbereich  $t = (1 \dots 2)$  m die BGG C bei einem Reibungsverhältnis von  $R_f = 1,5$  %.

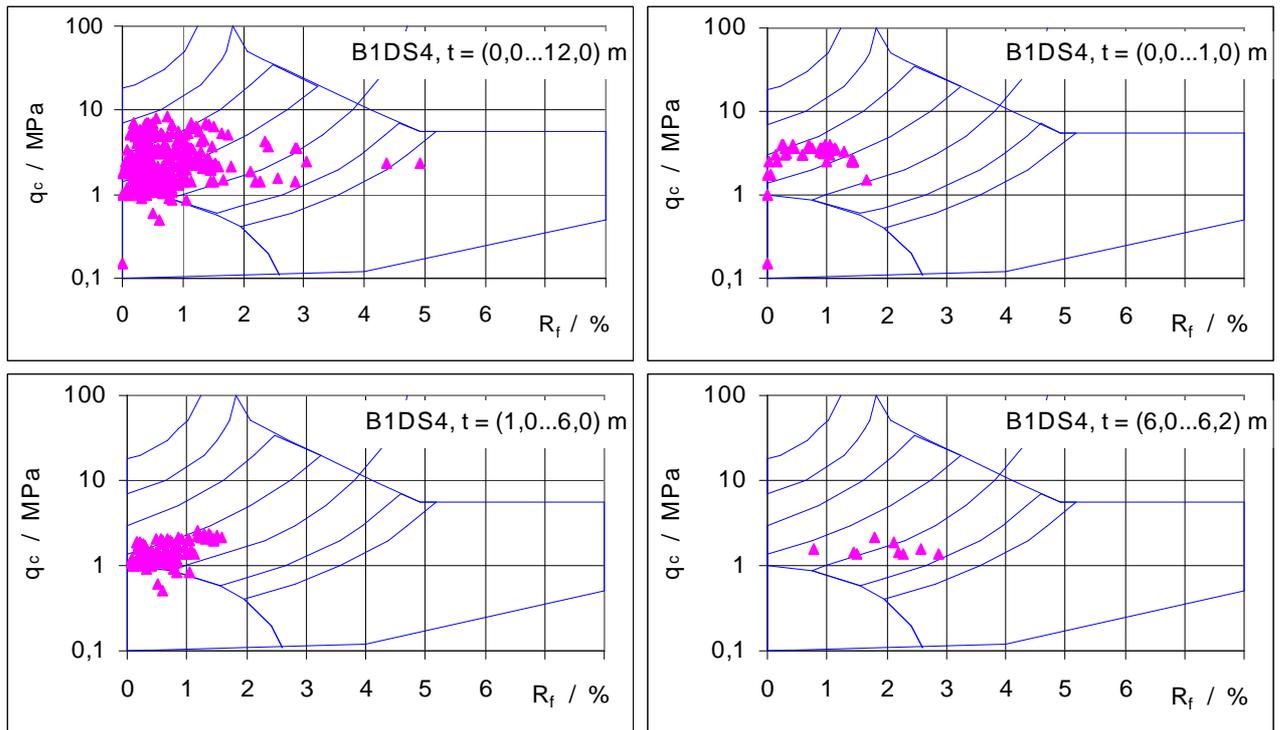


Bild 20: Bestimmung der Bodenart B1DS4 (nach [108])

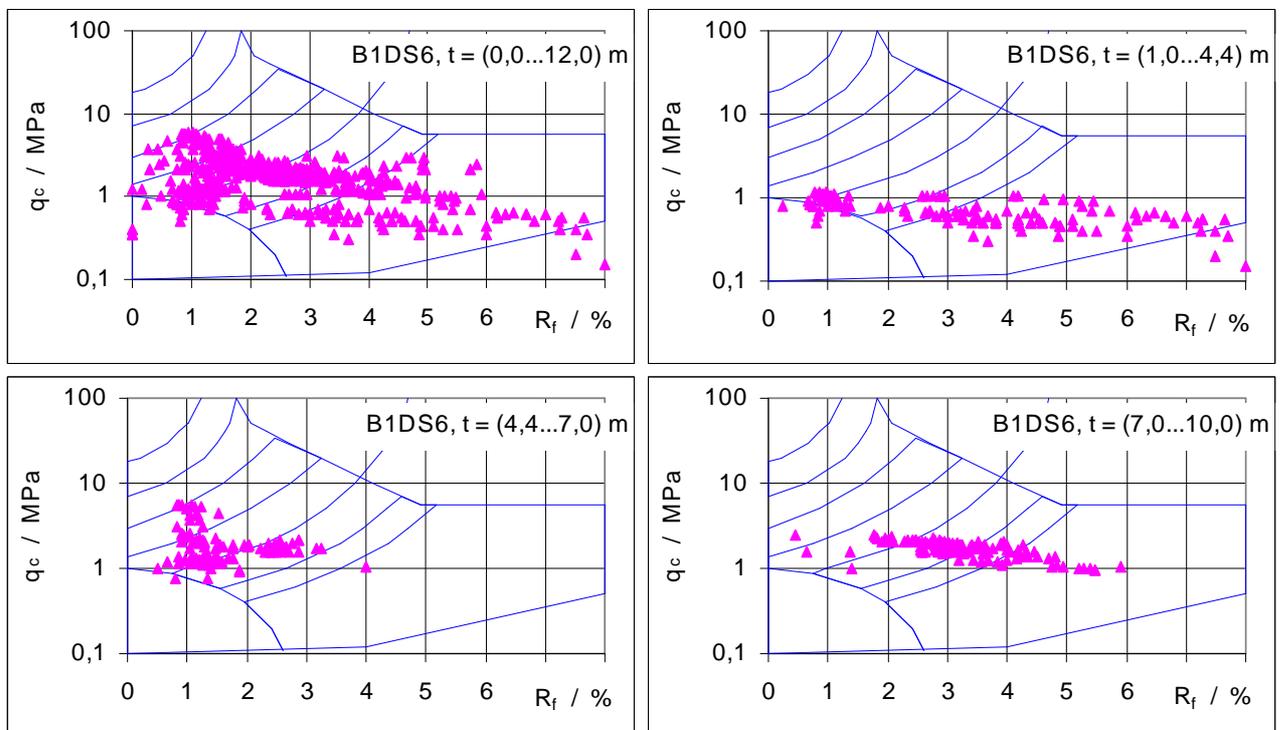


Bild 21: Bestimmung der Bodenart B1DS6 [108]

Mit der Sondierung B1DS6 werden die größten Reibungsverhältnisse im Vergleich zu allen anderen Sondierungen gemessen. Dieser Unterschied wird auch durch Vergleich der linken oberen Diagramme in den Bildern 20 und 21 deutlich.

Die Sondierung B1DS7 (Bild 22) ist ein benachbarter Aufschluss zur Sondierung B1DS6. Das Bodenprofil der Bohrung B1Bg7 reicht bis in eine Tiefe von 10,0 m. In diesem Profil bestehen 50 % der Bodenproben aus Kohle oder stark kohlenhaltigen Böden. Die Reibungsverhältnisse der Sondierung B1DS7 von  $R_f = (0,4 \dots 4,0) \%$  kennzeichnen diesen Kohleanteil jedoch nicht mit Werten, wie sie aus bekannten Korrelationen abgeleitet werden können. Es sind höhere Werte  $R_f \geq (4 \dots 6) \%$  zu erwarten. Möglicherweise erfasste die Sondierung nicht mehr die mit der Bohrung nachgewiesenen Böden, oder die Mantelreibung ist wegen der lockeren Lagerungsverhältnisse gegenüber gewachsenen Böden geringer, so dass keine hohen Reibungsverhältnisse entstehen.

Die Messwerte in Tiefen  $t = (4,0 \dots 7,0) \text{ m}$  grenzen an oder liegen bereits im Bereich der strukturempfindlichen feinkörnigen Böden.

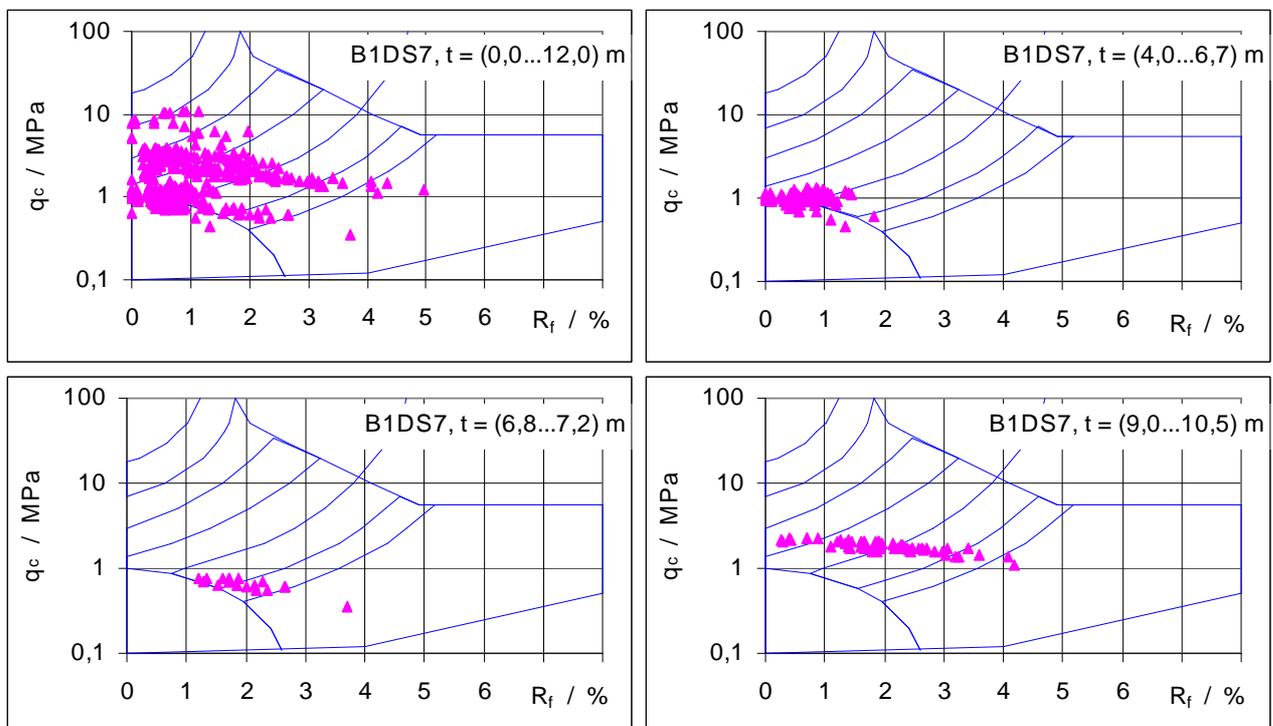


Bild 22: Bestimmung der Bodenart B1DS7 [108]

Der Aufschluss B1Bg9 zeigt zahlreiche Wechsellagerungen, die sich in den Sondierergebnissen kaum wiederfinden lassen. Die größere Probe der BGG D bei  $t = (10 \dots 12) \text{ m}$  ist gekennzeichnet durch ein  $R_f \approx 0,7 \%$ . Dieser Wert ist für die BGG D zu niedrig.

Die Lage der Ansatzpunkte Sondierungen ist in Anhang 2.1 eingetragen. Die Sondierprotokolle zeigen die Anhänge 3.1 ... 3.9.

### 6.5.2 Sondierungen auf der Teilfläche B2

Im Tiefenbereich  $t = (3,0 \dots 5,0)$  m der Bohrung B2Bg2 wurde BGG B angetroffen. Aus dem Sondierprotokoll der Sondierung B2DS2 (Bild 23) lassen sich diesem Bereich Spitzendruckwerte von  $q_c = (1 \dots 2)$  MPa bei Reibungsverhältnissen von  $R_f = (1 \dots 3)$  % zuordnen (Bild 24). Darunter bis  $t = 8,6$  m befindet sich BGG D (MG 3 und 4). Gegenüber dem darüber liegenden Material sind die Spitzendrücke und Reibungsverhältnisse leicht erhöht. Die Schichtenfolge über und unter diesen Schichten ist im Sondierprofil ebenfalls wiederzufinden. Dem nicht einer BGG zugeordneten Material (Diverse) bei  $t = (12,0 \dots 14,0)$  m entspricht gegenüber den übrigen Materialgemischen ein deutlich höheres Reibungsverhältnis  $R_f = (4 \dots 7)$  %. Das Reibungsverhältnis der bodenmechanischen Grundgesamtheit BGG B liegt zwischen 1 % und 3 % und das der BGG D zwischen 1,5 % und 3,5 %.

Im Profil der Bohrung B2Bg4 sind die Schichten nur ca. 0,8 m dick. Ein Vergleich mit dem Sondierprofil ist nur bedingt möglich, da die Materialien auf kürzesten Entfernungen wechseln. Das Reibungsverhältnis  $R_f = (6 \dots 7)$  % im Tiefenbereich  $t = (11,5 \dots 12,2)$  m kann der Tonschicht (BGG A) entsprechen.

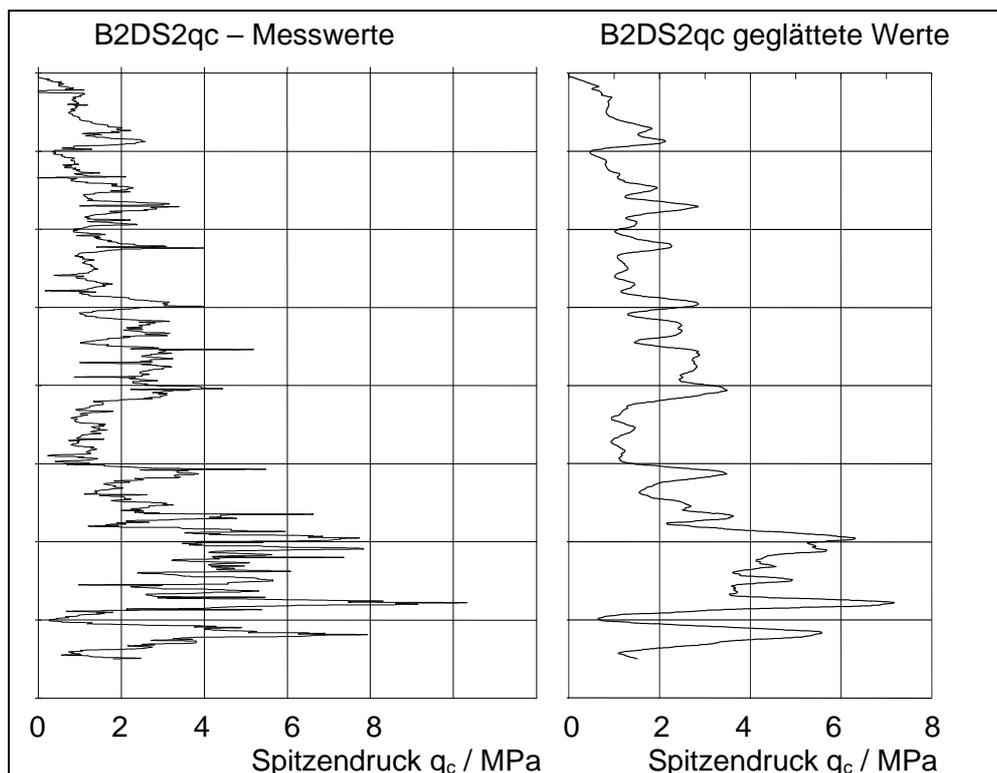


Bild 23: Original- (links) und geglättete Kurve (rechts) B2DS2

Das Profil der LINER-Bohrung B2Bg8 ähnelt im oberen Bereich bis  $t = 9,0$  m der Bohrung B2Bg4, darunter wurde die BGG B und D mit jeweils ca. 2,0 m Dicke angetroffen.

Die BGG B verursacht die Reibungsverhältnisse  $R_f = (1,0 \dots 1,5)$  %. Die BGG D in B2BG8  $t = (11,6 \dots 13,6)$  m deutet auf andere Materialien hin. Die großen  $R_f$ -Werte der BGG C in B2Bg8 bei  $t = (13,6 \dots 15,0)$  m zwischen 6 % und 10 % sind auf den hohen Kohleanteil dieser Schicht zurückzuführen. Die Bereiche zwischen  $t = (7,6 \dots 9,4)$  m bzw.  $t = (3,3 \dots 5,3)$  m sind in der  $R_f$ -Kurve eindeutig festzustellen (Bild 25).

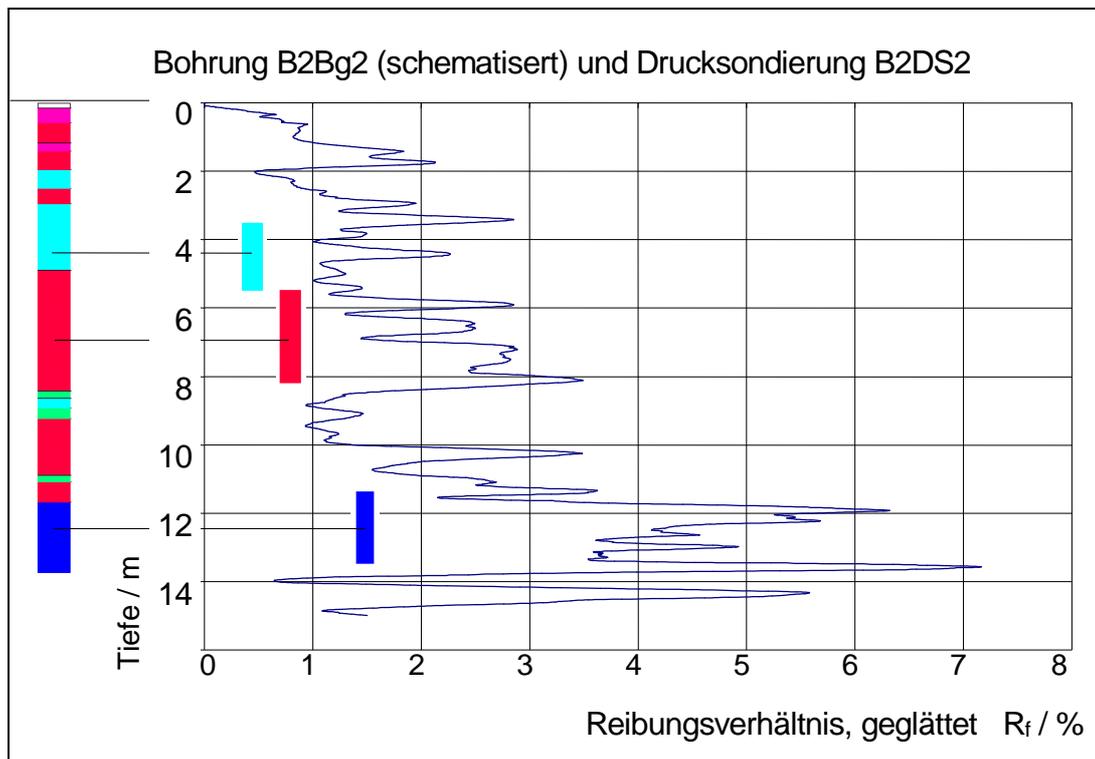
Tabelle 16 zeigt die Zuordnung der Farben zu den BGG, die in den Profilen von Bild 24 und Bild 25 verwendet wurden.

*Tabelle 16: Zuordnung der BGG zu Farben*

| BGG            | „Diverse“ | B |   |   | D |   | C |   | A |   |
|----------------|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Materialgruppe | -         | 2 | 5 | 6 | 3 | 4 | 7 | 9 | 1 | 8 |
| Farbe          |           |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

„Diverse“: keiner Materialgruppe bzw. BGG zugeordneten Materialien.

Die Lage der Ansatzpunkte der Sondierungen ist in Anhang 4.1 eingetragen. Die Sondierprotokolle zeigt Anhang 5.1 ... 5.9.



*Bild 24: Schematisiertes Bodenprofil Bohrung B2Bg2 und Drucksondierung B2DS2*

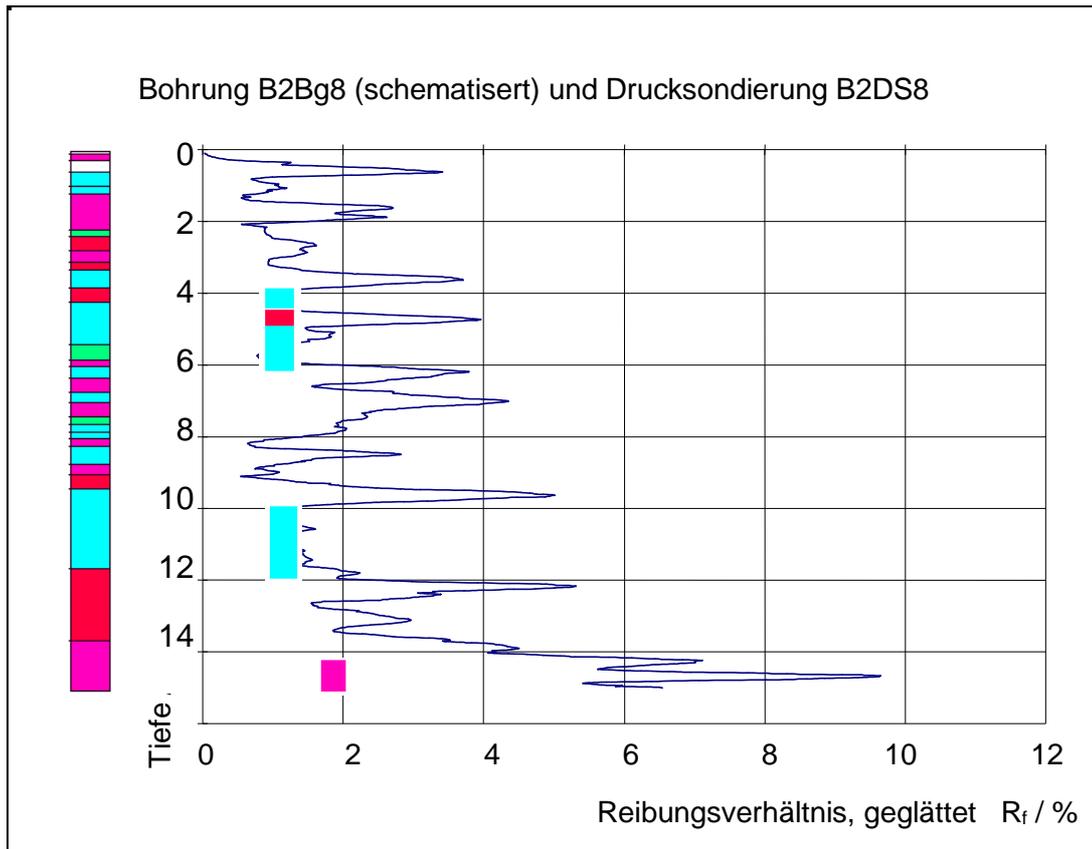


Bild 25: Schematisiertes Bodenprofil B2Bg8 und Drucksondierung B2DS8

### 6.5.3 Nachsondierungen

#### *Nachsondierungen*

Die Nachsondierungen weisen gegenüber den Vorsondierungen höhere Spitzendrücke durch die Zunahme der Lagerungsdichte auf. Das zeigt sich besonders in den Sondierungen B2DS6N, B2DS7N und B2DS8N. Nur die zwei letztgenannten dieser 3 Ansatzpunkte liegen im Mittelpunkt eines Fallplattentrichters. Die Lage der Aufschlusspunkte der Sondierungen zu den Schlagtrichtern sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

Ursache für die 3 auffälligen Drucksondierungen ist nicht nur der Abstand der Sondierung vom Zentrum des Fallplattentrichters, sondern auch die Inhomogenität der Kippe. Die B2DS1N und B2DS4N mit den niedrigsten Spitzendruckwerten liegen zwischen 2 bzw. 4 Schlagtrichtern.

Die Lage der Ansatzpunkte der Sondierungen ist in Anhang 4.1 eingetragen. Die Sondierprotokolle zeigen Anhänge 5.11 ... 5.18. Im nachfolgenden Bild 26 sind die Drucksondierungen der Teilfläche B2 jeweils vor der Vergütung und nach der Vergütung dargestellt. Als Darstellungsform wurde das Diagramm nach [108] gewählt. Deutlich zu erkennen sind Zunahme des Spitzendrucks und Veränderungen des Reibungsverhältnisses. Ursache des veränderten Reibungsverhältnisses ist die Materialzusammensetzung des nach dem Verdichten zum Auffüllen der Schlagtrichter verwendeten Materials.

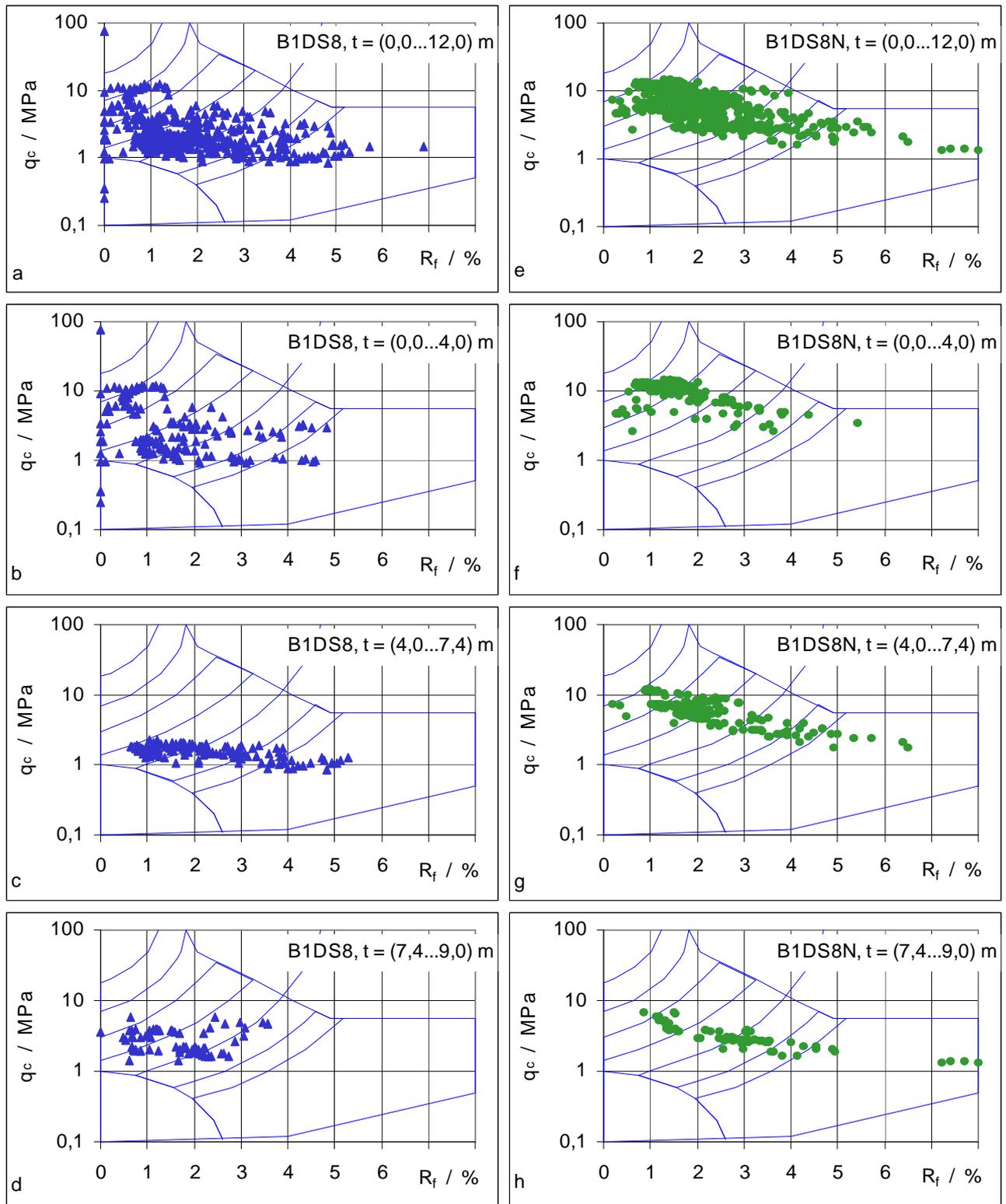


Bild 26: Bestimmung der Bodenart B2Bg8 [108], links vor der Vergütung, rechts nach der Vergütung

### 6.5.4 Bewertung und erste Schlussfolgerung

Der direkte Vergleich der Sondierkurven mit den LINER-Bohrungen war aufgrund der Lagerungsverhältnisse nur bedingt möglich. Die Teufenabhängigkeit der Messwerte kann in diesen relativ geringen Teufen nicht bewertet werden. Eine Normierung von Spitzendruck  $q_c$  und Reibungsverhältnis  $R_f$  nach den Gleichungen (3-11) (Seite 24) und (3-12) führt wegen der niedrigen Messwerte zu negativen Parametern.

Durch den Vergleich der Sondierkurven mit den Bodenprofilen kann den bodenmechanischen Grundgesamtheiten BGG B, BGG D und BGG C sowie den zu keiner BGG zugeordneten `Diversen` ein kennzeichnendes Reibungsverhältnis zugeordnet werden. Die BGG C und BGG D können wegen ihrer ähnlichen Korngrößenverteilungen in den Messwerten der Sondierungen nicht unterschieden werden. Die BGG A ist aufgrund der geringen Gesamtmächtigkeit dieser Schichten nicht feststellbar. In der Tabelle 17 sind die den Bodenmechanischen Grundgesamtheiten zugeordneten Reibungsverhältnisse dargestellt.

Tabelle 17: Zuordnung der Reibungsverhältnisse

| BGG      | $q_c$ / MPa | $R_f$ / %** |
|----------|-------------|-------------|
| BGG A    | 1,0 - 1,7   | 6 - 7       |
| BGG B    | 1,0 - 2     | 0,5 - 2,5   |
| BGG C, D | 1,5 - 3     | 1,5 - 3,5   |
| Diverse* | 1,5 - 2,5   | 4 - 7       |

\* sehr unregelmäßiger  $R_f$ -Kurvenverlauf (ungeglättete Kurve),

\*\*nach Bearbeitung (Glättung).

Die Auswertung der geologischen Profile der Teilfläche B1 zeigt in den Bohrungen B1Bg1 und B1Bg3 einen großen Anteil der Materialgruppe MG6. Diese Materialgruppe MG6 (BGG B) weist einen Kieskornanteil von durchschnittlich ca. 20 % auf; bei einer Probe der MG6 ist der Kieskornanteil  $> 30$  % mit ca. 15 % Grobkies. Ein hoher Kieskornanteil hat nach Korrelationsbeziehungen zwischen Reibungsbeiwert  $R_f$  und Bodengruppe ein geringes Reibungsverhältnis von  $< 1$  % zur Folge. Das gilt für die Sondierungen B1DS1 und B1DS3. Die in den entsprechenden Profilen ebenfalls vorhandene Materialgemische BGG A, BGG C und BGG D haben analog der BGG B in diesen Sondierungen geringe  $R_f$ -Werte von  $< 1$  %. Diese Tatsache lässt für diese Materialgruppen in diesen Bereichen höhere Kieskornanteile vermuten, die in den Proben aber nicht nachgewiesen werden konnten.

Ein widersprüchliches Ergebnis liefert die Sondierung B1DS9. Der  $R_f$ -Kurvenverlauf lässt auf ähnliche Verhältnisse schließen wie in den Sondierungen B1DS1 und B1DS3 (MG mit hohem Kieskornanteil). Das geologische Profil hingegen weist überwiegend die Materialgemische BGG C und BGG D auf. Die Materialgruppe MG6 nimmt nur ca. 4 % des Probenanteils dieses Profils ein. Dieser Gegensatz lässt sich durch einen wechselhaften Baugrundaufbau erklären. Die Profile der Bohrungen B1Bg5 und B1Bg7 entsprechen im Wesentlichen den Verhältnissen der Teilfläche B2. Für die Auswertung der  $R_f$ -Kurvenverläufe der Sondierungen B1DS5 und B1DS7 konnten somit die Erkenntnisse bei Auswertung der B2-Fläche genutzt und bestätigt werden.

### *Spitzendruckwerte*

Die Spitzendruckwerte liefern die für Kippenböden typischen Verläufe:

- oberflächennaher (2 ... 3) m mächtiger Bereich mit Spitzendruckwerten von  $q_c = (3 \dots 10)$  MPa infolge Verdichtung durch ehemaliger Arbeitsebenen, Oberflächenwasser und Fahrverkehr,
- Abfall des Sondierwiderstands auf  $q_c = (1 \dots 2)$  MPa und geringer Anstieg auf  $q_c = (2 \dots 4)$  MPa in Tiefen von (10 ... 20) m je nach Kippenaufbau und Grundwasserstand,
- Der Übergangsbereich Absetzerkippe zur AFB – Kippe weist wieder höhere Spitzendrucke auf. Ursache ist die Verdichtung und Verkittung des ehemaligen oberflächennahen Bereichs der AFB-Kippe sowie ehemaliger Arbeitsebenen. In Tiefen von (20 ... 30) m werden die Spitzendrucke wieder sehr klein ( $\approx 1$  MPa) und steigen darunter wieder an.
- Schwankungen im Bereich des Grundwasserspiegels.

### *Reibungsverhältnis / Bodenarten*

- Mit steigendem Feinkornanteil steigt das Reibungsverhältnis  $R_f$ .
- Ein erhöhter Kieskornanteil (B1Bg1 und B1Bg3) hat geringere Reibungsverhältnisse  $R_f < 1$  % zur Folge.
- Die Materialien der Mischbodenkippe liegen in dünnen Schichten mit Dicken von wenigen Zentimetern vor. Die Eigenschaften dieser dünnen Schichten werden durch die Sondierung nicht vollständig erfasst.
- Die in den Bohrungen angetroffenen Materialien zeigen ihre unterschiedlichen Eigenschaften nicht immer im Sondierdiagramm an. Insbesondere fehlen bei organischen bzw. kohligen Anteilen die hohen Reibungsverhältnisse, wie sie z. B. nach den Korrelationsbeziehungen von BEGEMANN [9] und ROBERTSON [108] zu erwarten gewesen wären.
- Zwischen den Bohrungen und den dazugehörigen Drucksondierungen kann im Abstand von ca. 2 m bereits mit einem Materialwechsel in der Kippe gerechnet werden. Die Sondierung erfasst somit einen Bereich, der durch die Materialien in den Kernrohren nicht charakterisiert wird.
- In welchem Maße sich die Schrägschichtung und die Veränderung der Hauptspannungsgrößen und -richtungen auf die horizontale Spannung  $\sigma_h$  und somit auf den Spitzendruck und insbesondere auf die Mantelreibung auswirken, ist unbekannt.

### *Porenwasserdruck*

- Durch Stoppen des Sondiervorgangs zur Aufnahme der Zeitfunktion von  $u$  und  $q_c$  (Dissipationstest) lassen sich die angetroffenen Lockergesteine und lokale Wasserstände

besser charakterisieren. Gleichzeitig kann die Zuverlässigkeit der Porenwasserdruckmessung besser beurteilt werden.

#### *kohlige Bestandteile*

- Die Bewertung der Lagerungsdichten lieferte für alle BGG eine durchschnittliche Dichte von  $\rho_{1m} = 1,59 \text{ gcm}^{-3}$ . Im Bereich der kohligen Schichten fällt diese Dichte auf Werte  $\leq 1,2 \text{ gcm}^{-3}$  bis ca.  $1,0 \text{ gcm}^{-3}$  ab. Diese Bereiche sind im Dichteprofil deutlich erkennbar. Die Spitzendrücke dieser Schichten bewegen sich zwischen (1 ... 2) MPa, die Mantelreibung zwischen (10 ... 80) MPa und für das Reibungsverhältnis  $R_f$  wurden Werte zwischen (1 ... 4) % ermittelt. Aufgrund der großen Streuung dieser Werte können kohlige Schichten in der locker gelagerten Mischbodenkippe nur über die Dichteunterschiede der Kernrohrinhalte bei einer direkten Beprobung sicher erkannt werden.

Drucksondierungen sind zur Erkundung von Mischbodenkippen grundsätzlich geeignet. Die Ableitung des Baugrundaufbaus aus den Sondierdaten muss die Besonderheiten der Kippe berücksichtigen. Das Reibungsverhältnis kann wegen der lockeren bis sehr lockeren Lagerung zu niedrig sein, um aus bekannten Korrelationsbeziehungen auf bindige und organische Böden zu schließen. Die häufig wechselnden Materialien in der Zugabsetzerkippe Zwenkau verhinderten es jedoch, zuverlässige Beziehungen zwischen den Messwerten der Drucksondierungen und den angetroffenen Bodenprofilen herzustellen.

Eine Kalibrierung zwischen den Messwerten der Drucksondierungen und den in den Bohrungen angetroffenen Böden ist wegen der Inhomogenität des untersuchten Standortes nicht möglich.

### **6.5.5 Anforderungen an das Messprotokoll**

Die statistische Bewertung der Sondierdaten erfordert Angaben über die Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Korrekturen der Messwerte.

Das Messprotokoll der Drucksondierungen sollte folgende Angaben enthalten:

- Nummer und Typ der Sonde, Meßsystem (elektrisch, mechanisch, hydraulisch), Hersteller, Abweichungen der Sonde von standardisierten Formen,
- Messgenauigkeit,
- Abweichungen der Sonde vom Standard,
- Lage des Porenwasserdruck - Gebers (PWD),
- Art der Flüssigkeit im Porenwasserdruck - Geber,
- Abnutzungsgrad der Sonde, Beschädigungen, Verschleiß der Sonde während des Sondierens, verbal und gemessen,

- Angabe aller Korrekturen, die an den Messwerten bereits vorgenommen wurden, z. B. Temperaturkorrektur, Porenwasserdruckkompensation,
- Kalibrierungen aller Messeinrichtungen und deren Messgenauigkeiten,
- Messwerte und kontinuierlich durchgeführte Korrekturen der Messwerte sollten in digitaler Form zur Auswertung übergeben werden:
  - Spitzendruck  $q_c$ ,
  - Mantelreibungskraft  $f_s$ ,
  - Reibungsverhältnis  $R_f$ ,
  - Porenwasserdruck  $u$ ,
  - Ablenkung der Sonde aus der ursprünglichen Senkrechten,
  - Eindrückgeschwindigkeit,
- Messwerte, die durch die Verzögerung des Sondiervorganges beim Verlängern des Gestänges entstehen, sollen nicht entfernt werden, sondern gesondert gekennzeichnet und zur Auswertung bereitgestellt werden,
- Angaben zum Dissipationstest: Tiefe, Zeitfunktion der Messgrößen  $q_c$ ,  $u$ ,  $f_s$ .

## 6.6 Bewertung mittels statistischer Methoden

### 6.6.1 Vorbemerkungen

Aus der Vielzahl der statistischen Methoden werden in der vorliegenden Arbeit einige Verfahren ausgewählt und Beispiele für deren Anwendung genannt. Zwei Methoden - die Geostatistik und die Hauptkomponentenanalyse - werden besonders betrachtet.

Die Ergebnisse natürlicher Vorgänge sind zeit- und räumlich variabel. Die durch Beobachtung gewonnenen Datenmengen sind zeitlich und räumlich geordnet und können miteinander korrelieren. Jeder Messwert ist charakterisierbar in der Form: [1][3]

$$C(r) = C(s) + C(n) + C(s,n) + C(e), \quad (6-1)$$

- $C(r)$  ... Charakteristik des verrauschten Messergebnisses  $r$ ,
- $C(s)$  ... Charakteristik des Signals  $s$ ,
- $C(n)$  ... Charakteristik des Rauschens  $n$ , auch als Messfehler aufgefasst,
- $C(s,n)$  ... Charakteristik der Beziehung zwischen  $s$  und  $n$ ,
- $C(e)$  ... Charakterisierung eines zufälligen Fehlers  $e$ .

Infolge variierender Einflussgrößen auf geologische und technologische Prozesse variieren auch die Lagerungsbedingungen geologischer und technogener Ablagerungen. Diese Lagerungsbedingungen können sich zeitlich und räumlich nicht beliebig ändern. Aus dieser

Erwartung heraus kann mit gewissen Wahrscheinlichkeiten auf Charakteristika in der Nähe liegender Punkte geschlossen werden. Mit zunehmendem Abstand von Punkten mit bekannten Eigenschaften wird die Wahrscheinlichkeit, eine richtige Aussage zu treffen, geringer. Von einer anisotropen räumlichen Korrelation muss ausgegangen werden. Die Anwendungsgrenzen statistischer und geostatistischer Methoden ergeben sich aus dem erforderlichen Datenumfang und der Anordnung der Daten. Der deshalb notwendige größere Erkundungsaufwand ist meist nur bei größeren Bauvorhaben gerechtfertigt. Der Erkundungsaufwand kann vermindert und die Aussagesicherheit erhöht werden, wenn *in den Daten räumliche Zusammenhänge existieren*, z. B. [4][84].

Der Nachteil klassischer Methoden der Statistik ist, dass korrelationsfreie Messergebnisse erwartet werden. Je nach angewandten Verfahren muss geprüft werden, ob korrelierte Daten verwendet werden dürfen.

Die nachfolgenden beiden Beispiele demonstrieren differierende Entstehungsgeschichten natürlicher und technogener Standorte, die sich in charakteristischen Merkmalen niederschlagen und bei der Auswahl der Bewertungsmethoden zu berücksichtigen sind:

#### *Beispiel 1: Sedimentation in einem Flusslauf*

Die Korngrößen der abgelagerten Sedimente in einem Flusslauf sind abhängig von der Fließgeschwindigkeit. Die Fließgeschwindigkeit ändert sich meist allmählich. Die Entstehungsbedingungen benachbarter Punkte sind ähnlich, gleichfalls sind die abgelagerten Materialien in gewissen Maßen einander gleich oder sehr ähnlicher Herkunft. Somit kann in bestimmten horizontalen Entfernungen von Punkten mit bekannten Eigenschaften mit gewissen Wahrscheinlichkeiten auf die Eigenschaften eigentlich unbekannter Punkte im Sediment geschlossen werden. Es liegt Stationarität bzw. Homogenität vor. In diesem Fall wären bei einer Betrachtung in der Vertikalen unter Zuhilfenahme weiterer bekannter Sachverhalte ebenfalls Schlussfolgerungen möglich, z. B. auf eine Schichtung.

#### *Beispiel 2: Absetzerkippe*

Die Zusammensetzung der in der Kippe angetroffenen Materialien ist abhängig von den am Absetzer anfallenden Materialien. Diese können über größere Ausdehnungen gleich sein oder in sehr kleinen Ausdehnungen sehr häufig wechseln. Der Aufbau einer Tagebaukippe ist das Ergebnis von technologischen Entstehungsprozessen mit Erhaltungsneigung. Auch existieren konstante und variierende Einflussgrößen auf die Prozesse. Aus dieser Erwartung heraus kann auch in einer Tagebaukippe auf Eigenschaften von Materialien in der Nähe der Beobachtungspunkte liegenden Punkten geschlossen werden. Allerdings überwiegen in Mischbodenkippen Einflussgrößen, aus denen wechselnde Materialien und somit auch wechselnde Eigenschaften Materialien am Punkt der Mischbodenkippe folgen. Daraus resultiert, dass *die Wahrscheinlichkeit, mit der von den bekannten Eigenschaften der Materialien eines Punktes auf richtige Eigenschaften benachbarter Punkte geschlossen wird, streng genommen nur innerhalb eines Schüttbereichs zufriedenstellend sein könnte*.

Wird aus Aufschlüssen ein Schichtenaufbau rekonstruiert, so muss dieser Schichtenaufbau auch tatsächlich existieren. Im natürlichen Lockergebirge werden das Sedimentationsfolgen sein. In Tagebaukippen ist eher ein unregelmäßiger Schichtenaufbau zu erwarten. In

anderen Fällen, wenn Wasserstände oder Arbeitsebenen untersucht werden, sind auch horizontale Strukturen möglich.

## 6.6.2 Ziel der Untersuchungen

Mit Verfahren der statistischen Datenanalyse wird untersucht, ob Unterschiede zwischen einzelnen Drucksondierungen oder Gruppen von Drucksondierungen nachgewiesen werden können. Möglicherweise ist ein Hinweis auf unterschiedliche Lagerungsverhältnisse möglich, die in einem Bereich der Teilfläche B1 zu deutlich größeren als zu den erwarteten Setzungsbeträgen führten.

Die Gültigkeit und Glaubwürdigkeit des Analyseergebnisses ist streng mit der Qualität der Datenerhebung und -bearbeitung verbunden.

Allgemein formulierte Abhängigkeiten der statistischen Parameter sind von Boden zu Boden selbst innerhalb einer Bodenklasse verschieden und lassen sich nicht allgemeingültig und zuverlässig festlegen. Die Unschärfe solcher Aussagen wäre zu groß. Vielmehr müssen Erfahrungen zusätzlich zu den Ergebnissen der Stichprobe in die Parameter einfließen [2][3][61][91].

Wenn von einem Bodenkennwert gesprochen wird, so ist er immer auf einen klassifizierten Bereich oder eine klassifizierte Schicht bezogen und mehr oder weniger zufälligen Einflüssen unterlegen. Die Angaben zu den statistischen Größen wie Mittelwert und Streuung basieren oft auf sehr wenigen Informationen. Durch ALBER [3] wurde darauf hingewiesen, dass anhand von Regressionsbeziehungen Abhängigkeiten von Bodenparametern festgestellt werden konnten. Die Regressionsparameter allerdings sind von Boden zu Boden und auch innerhalb einer Bodenklasse verschieden. Daraus abgeleitete, allgemein formulierte Abhängigkeiten sind sehr unscharf. Für die Beschreibung eines aussagekräftigen Bodenmodells müssen weitere Kenntnisse, auch Erfahrungswerte, in das Modell einfließen.

## 6.6.3 Graphische Darstellung

### 6.6.3.1 Boxplot

Ein Boxplot (Box-and-Whisker-Plot, Pentagramm, Schachtelplot) ist ein graphisches Verfahren der explorativen Datenanalyse zur Charakterisierung einer skalierten Variablen. Dargestellt werden kleinster und größter Wert, unterstes und oberstes Quartil (das ist die Box), mittleres Quartil (Median, waagerechte Linie in der Box) sowie die Whisker-Enden [124]. Die Whisker-Enden bezeichnen den letzten größten und kleinsten Wert, der kein Ausreißer und kein Extremwert ist (in den nachfolgenden Bildern mit „X“ gekennzeichnet). Extremwerte sind mit „o“ gekennzeichnet. Außerdem lässt der Plot bereits symmetrische und schiefe Verteilungen erkennen. Die nachfolgenden Bilder zeigen die Boxplots der Spitzendruckwerte und der Reibungsverhältnisse.

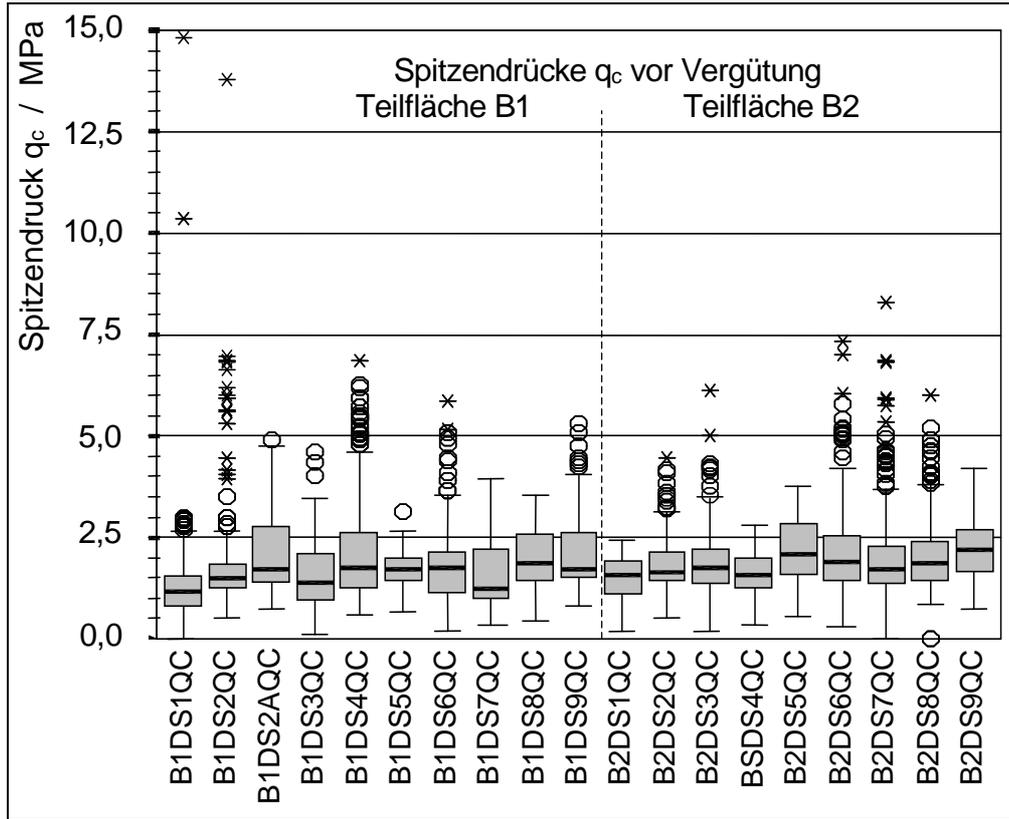


Bild 27: Boxplot der Spitzendrucke, B1 und B2

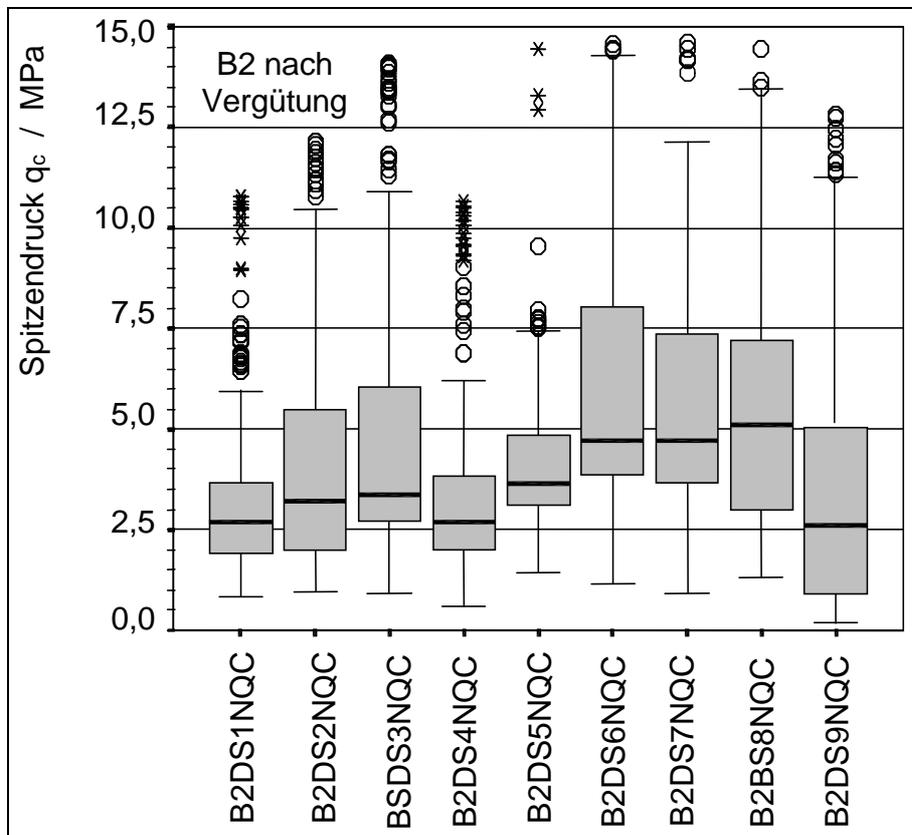


Bild 28: Boxplot der Spitzendrucke, B2 nach Vergütung

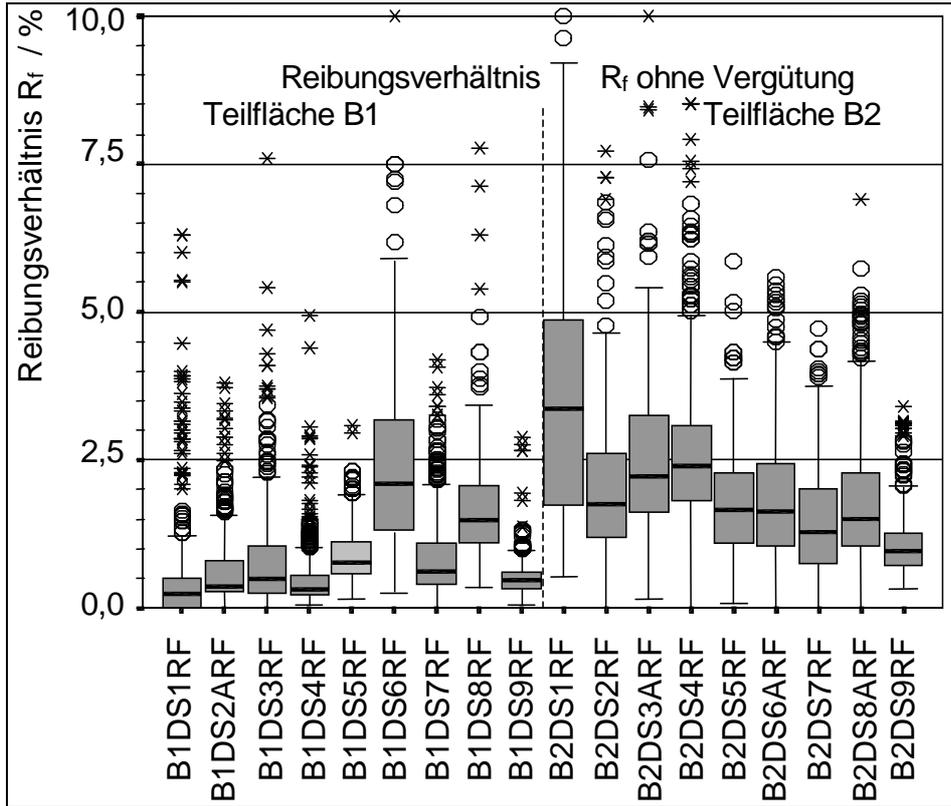


Bild 29: Boxplot Reibungsverhältnisse B1 und B2

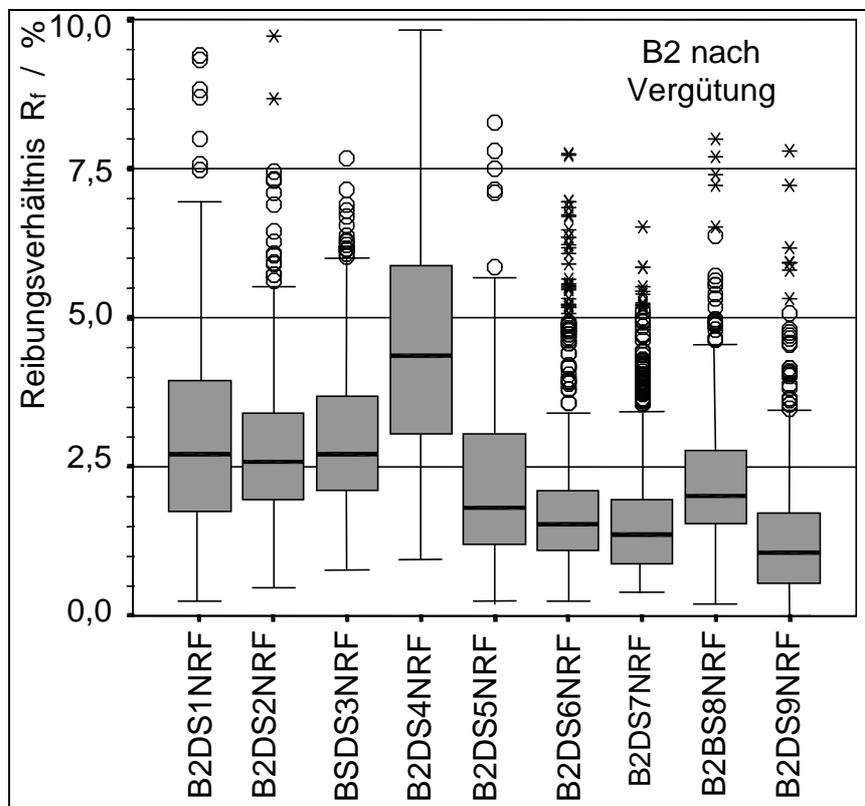


Bild 30: Boxplot Reibungsverhältnisse B2 nach Vergütung

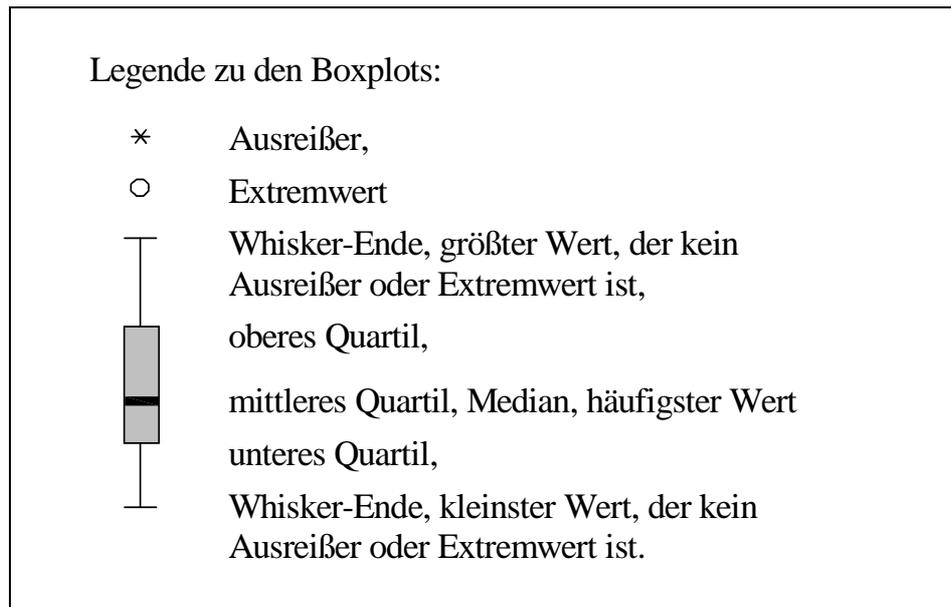


Bild 31: Legende der Boxplots

Unschwer ist zu festzustellen, dass

- die Spitzendruckwerte der Flächen B1 und B2 überwiegend im Bereich von (1,0 ... 2,5) MPa schwanken und innerhalb der Sondierungen verschieden verteilt sind,
- die Spitzendruckwerte der vergüteten Fläche B2 deutlich größere Beträge gegenüber denen auf der Fläche B1 aufweisen,
- die Nachsondierungen B2DS4N, B2DS5N und B2DS1N geringere Spitzendruckwerte gegenüber den anderen Sondierungen nach der Vergütung zeigen,
- die Nachsondierung B2DS9N geringe Spitzendruckwerte ausweist, die z. T. geringer als die Messwerte der Vorsondierung BSDS9 sind (Bild 28). Im Tiefenbereich von 4,0 ... 10,0 m wurden sehr geringe Spitzendrücke bis  $q_c = 0,1$  MPa und sehr geringe Reibungsverhältnisse  $R_f < 0,1$  % gemessen (Anhang 5.18). Ursache dieser Messwerte ist die Abweichung des Sondiergestänges aus der Senkrechten und zu Nahe Anordnung der Drucksondierung an der Bohrung B2Bg10. Dadurch gelangte die Messspitze in unmittelbare Nähe des bereits abgeteuften Bohrlochs, so dass die Messwerte für Spitzendruck und Reibungsverhältnis verfälscht wurden.
- die Reibungsverhältnisse beider Teilflächen unterschiedlich sind,
- die Sondierung B1DS6 sich in den Reibungsverhältnissen und somit auch in den vorhandenen Materialien deutlich von den anderen Aufschlüssen der Fläche B1 unterscheidet. Gleiches gilt auf der Fläche B2 für B2DS1.
- auf der Fläche B2 nach der Vergütung größere Reibungsverhältnisse, insbesondere bei Sondierung B2DS4N nachgewiesen wurden. Die Nachsondierung konnte nicht exakt am gleichen Aufschlusspunkt wie die Vorsondierung abgeteuft werden und traf in benachbarten Bereichen andere Materialien an.

### 6.6.3.2 Histogramm

Unabhängig von der Faustregel (Formel 3-8) sollte die Klassenzahl so gewählt werden, dass die Klassenbreite noch sinnvoll ist. Zur Bewertung der Messergebnisse der Drucksondierungen werden folgende Klassenbreiten gewählt:

|                    |                                 |
|--------------------|---------------------------------|
| Spitzendruck       | $K_{qc} = 0,5 \text{ MPa,}$     |
| Mantelreibung      | $K_{fs} = 10,0 \text{ kPa und}$ |
| Reibungsverhältnis | $K_{Rf} = 0,5 \text{ \%}.$      |

Die nachfolgenden Bilder 32 bis 35 zeigen die Häufigkeitsverteilungen der Spitzendruckwerte und Reibungsverhältnisse im Tiefenbereich von 0,0 m bis 12,0 m.

Die häufigsten Werte der Sondierungen ohne Vergütung liegen im Bereich von  $q_c = (1,0 \dots 2,0) \text{ MPa}$ . Nur bei den Drucksondierungen B1DS7 und B1DS3 liegt der häufigste Wert in der Klasse  $q_c = (1,0 \dots 1,5) \text{ MPa}$ .

Der Anstieg der Spitzendruckwerte durch die Vergütung wird in der Häufigkeitsverteilung deutlich (Bild 33, Seite 77). Die häufigsten Werte stiegen auf  $q_c = (2,0 \dots 5,5) \text{ MPa}$ . Die Verteilung der Spitzendruckwerte ist nach der Vergütung meist zweigipflig. Auffällig ist die Verteilung der Spitzendruckwerte der Drucksondierungen B2DS9 und B2DS9N mit einer in der Nachsondierung gestiegenen Anzahl für Spitzendruckwerte mit  $q_c = (0,5 \dots 1,0) \text{ MPa}$ . Im Sondierdiagramm weist der Tiefenbereich von  $t = (6,5 \dots 9,5) \text{ m}$  Spitzendruckwerte von  $q_c \approx 0,5 \text{ MPa}$  auf. Die Sonde ist in den Einflussbereich der Bohrung B2Bg10 gelangt. Diese Messwerte sind somit verfälscht.

Auffällig ist die flachere Verteilung der Reibungsverhältnisse der Sondierung B1DS6 gegenüber den anderen Sondierungen der Teilfläche B1 (Bild 34) und der Teilfläche B2 insgesamt gegenüber der Teilfläche B1. Während der Verdichtungsarbeiten auf der Teilfläche B2 wurden die Schlagtrichter mit weitgestuftem, kiesigem Material aufgefüllt. Es wäre ein Anstieg der Häufigkeiten der Reibungsverhältnisse im Bereich von  $R_f \leq 1 \text{ \%}$  wegen der kiesigen Anteile zu erwarten gewesen.

Für weitere Bewertungen musste ein Entscheidungskriterium entwickelt werden, um den Tiefenbereich auszuwählen, über den Sondierwerte betrachtet wurde. Die untere Grenze des Tiefenbereichs von  $t_u = 12,0 \text{ m}$  resultiert aus der Oberfläche der unter der Absetzerkippe liegenden AFB-Kippe und des Grundwasserstands. Die obere Grenze soll den oberflächennahen Bereich mit höheren Spitzendruckwerten ausschließen. Die Obergrenze  $t_o$  entspricht dem Wert, mit dem beginnend der Spitzendruck mit der Tiefe wieder zunimmt. Der Tiefenbereich von  $t_o = 2,5 \text{ m}$  bis  $t_u = 12,0 \text{ m}$  wurde für weitere Untersuchungen ausgewählt.

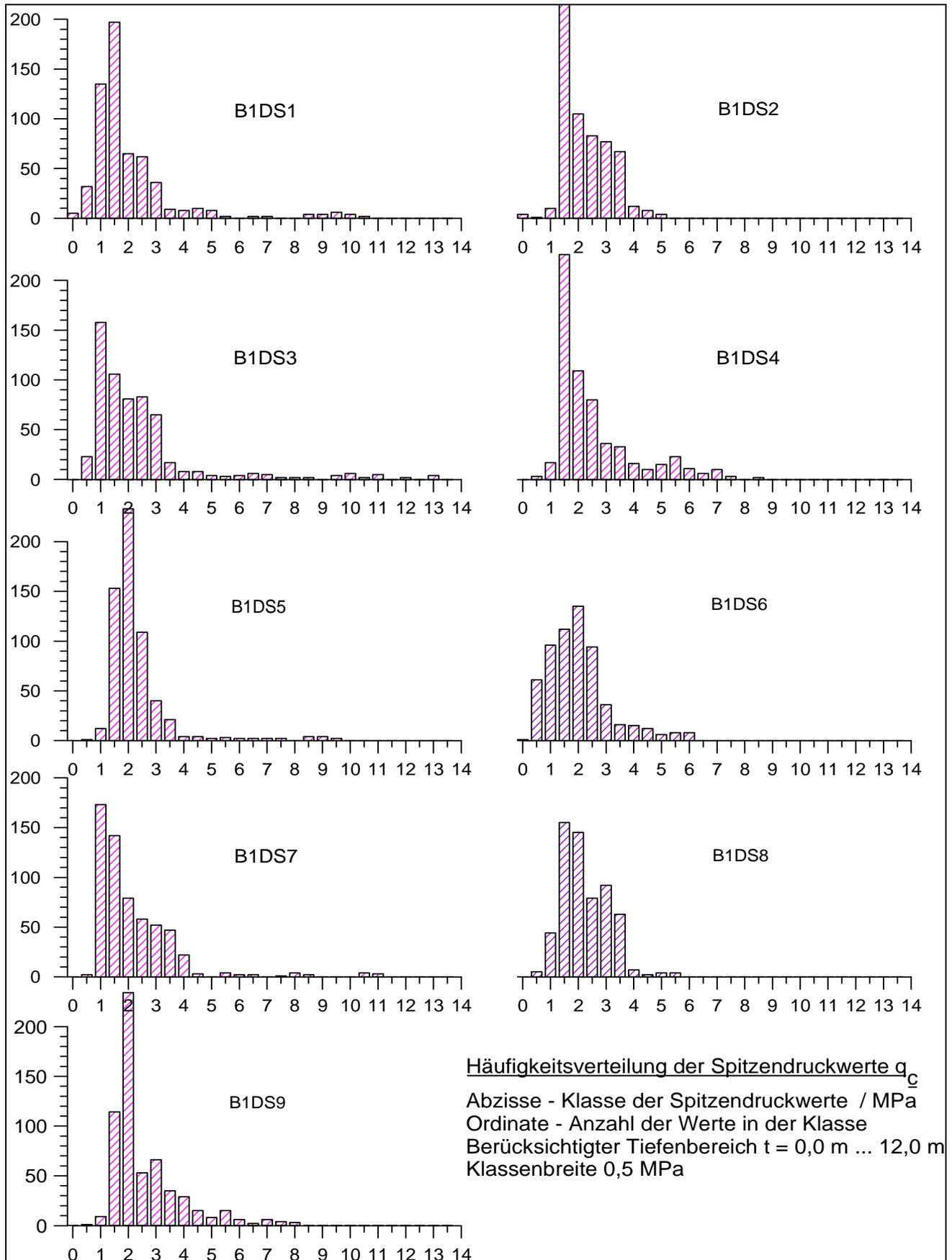


Bild 32: Häufigkeitsverteilungen der Spitzendrucke, Teilfläche B1

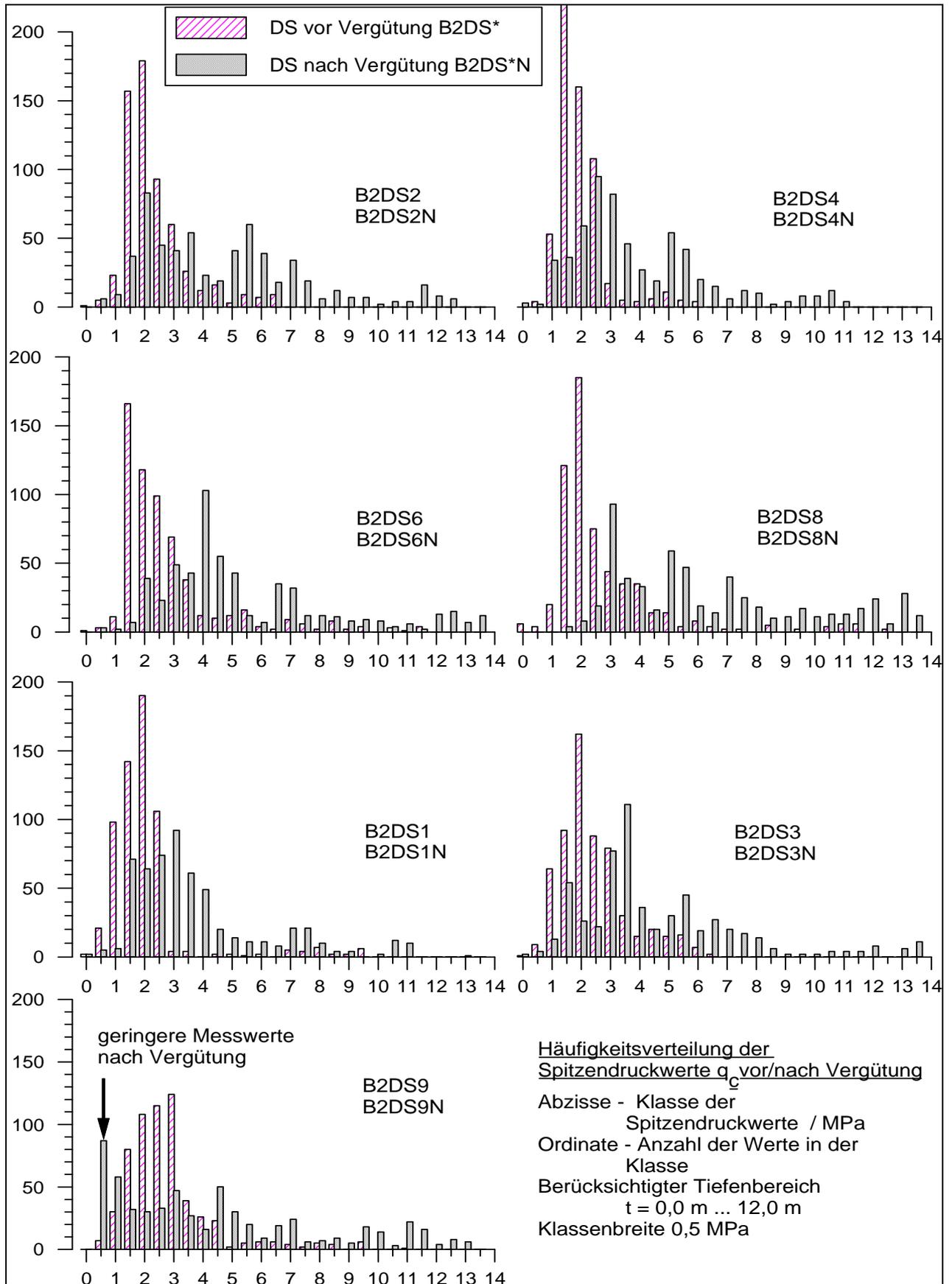


Bild 33: Häufigkeitsverteilungen der Spitzendrucke, Teilfläche B2

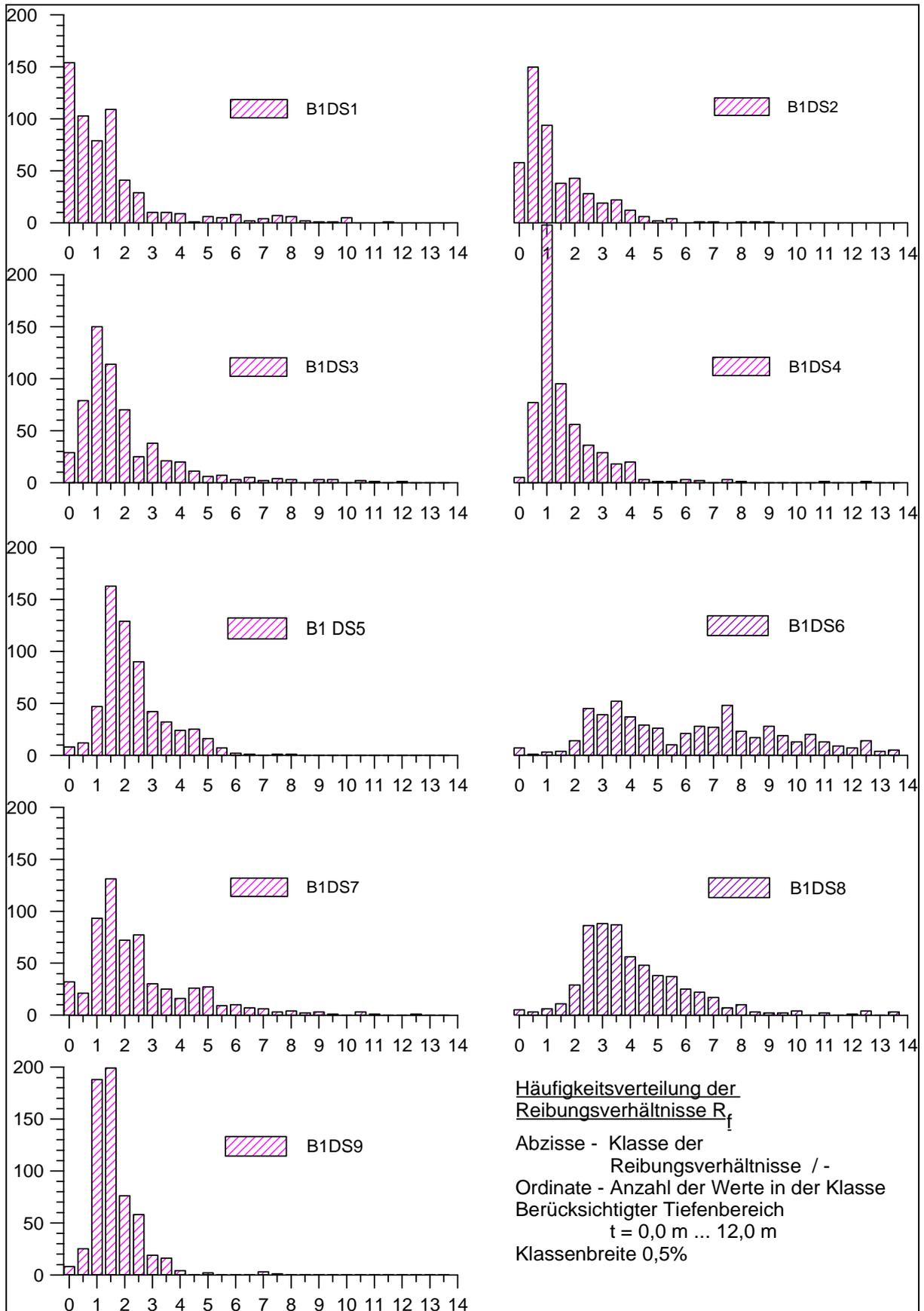


Bild 34: Häufigkeitsverteilungen der Reibungsverhältnisse, Teilfläche B1

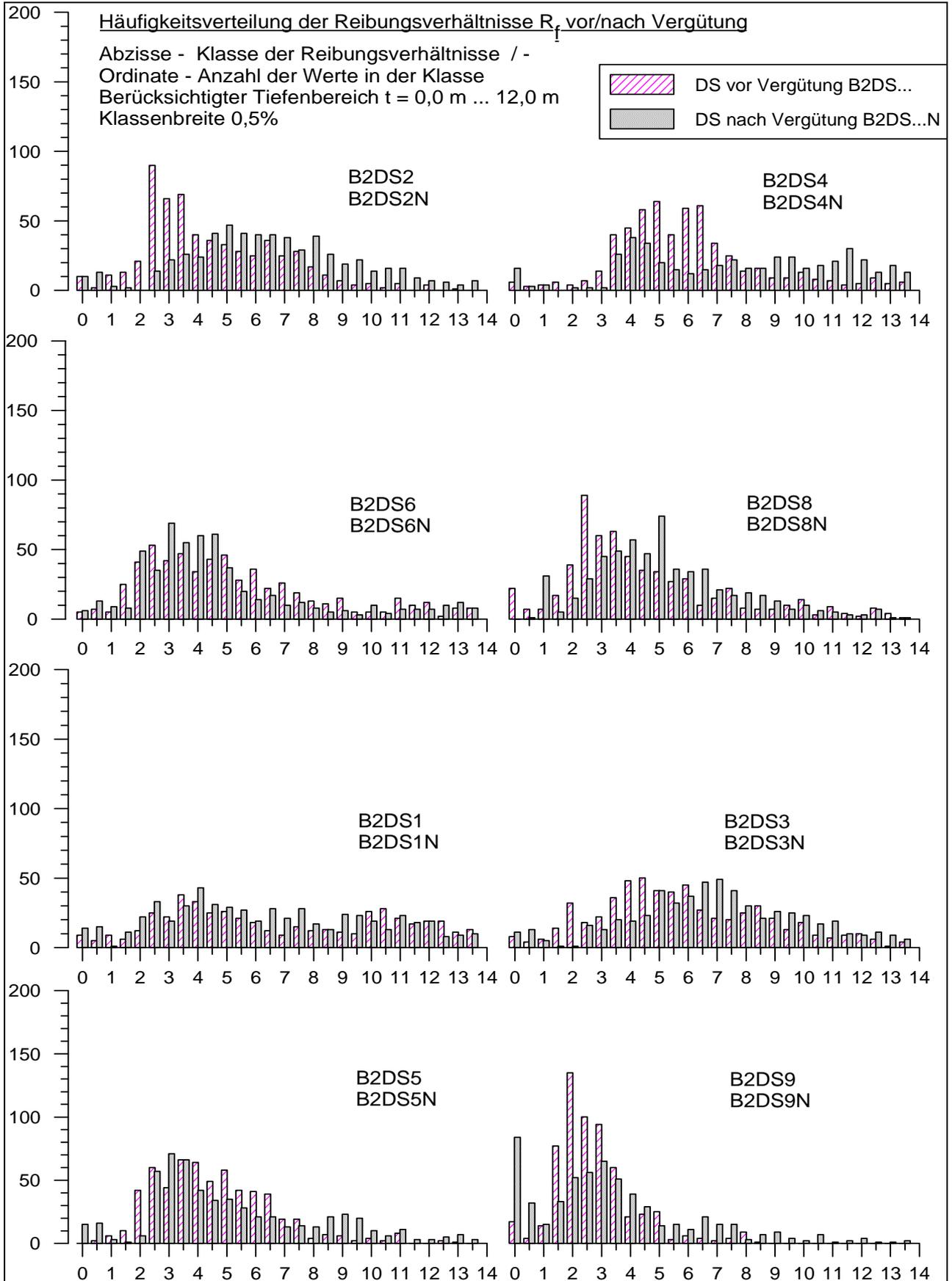


Bild 35: Häufigkeitsverteilungen der Reibungsverhältnisse, Teilfläche B2

### 6.6.3.3 Andere Darstellungen

Beschreibende (diskriptive) statistische Werte wie Mittelwerte, Medianwerte, häufigster Wert, Schiefe und Kurtosis der Verteilungen auf den Teilflächen B1, B2 für Vor- und Nachsondierungen sind in tabellarischer Form zusammengestellt. Die Parameter wurden über den Tiefenbereich von  $t = (2,5 \dots 12,0)$  m berechnet und in der Reihenfolge mit zunehmendem Mittelwert angeordnet.

Zur Bezeichnung der Variablen ist der Bezeichnung der Sondierung (z. B. B1DS1) die Bezeichnung der Messgröße (z. B. QC für Spitzendruck und RF für Reibungsverhältnis) angefügt worden. Die Werte sind nach der Größe des Mittelwertes der Messwerte, mit dem kleinsten Mittelwert beginnend, geordnet.

Die Mittelwerte der Reibungsverhältnisse unterscheiden sich auch in dieser Darstellungsform in den unvergüteten Teilflächen. Auffällig ist die Sondierung B1DS6 mit einem Mittelwert der Reibungsverhältnisse von  $R_{f,6m} = 2,45$  gegenüber den anderen Sondierungen auf der Teilfläche B1 mit  $R_f < 1,0$ . Der höhere Reibungswert deutet auf mehr bindige oder organische Anteile hin.

Tabellarische Übersichten der beschreibenden Kennwerte zeigen Anhang 10.1 und Anhang 10.2.

### 6.6.4 Geostatistik

#### *Vorbemerkung*

Mit Hilfe geostatistischer Verfahren können räumliche Abhängigkeiten von Eigenschaften beschrieben werden. Diese Eigenschaften werden in Variablen erfasst. Sind die Eigenschaften dieser Variablen bekannt, so können die Eigenschaften und deren Streubereich an nicht erkundeten Punkten geschätzt werden.

#### *Variogramme*

Die Geostatistik betrachtet die einzelnen in Punkten erfassten Daten  $X_i(r)$  als stochastische Realisierung einer räumlichen Zufallsvariablen  $Z(r)$ , wobei  $r$  der Ortsvektor ist. Da in jedem Erkundungspunkt nur ein Messwert zur Verfügung steht, müssen weitere Annahmen getroffen werden. Eine mindestens schwache Stationarität wird gefordert, die vorliegt, wenn [1][85][96]:

- der Erwartungswert  $E[Z(r)] = m$  existiert, der nicht vom Ort abhängt;
- für jedes Paar von Zufallsvariablen  $Z(r)$  und  $Z(r+h)$  eine Kovarianz  $C(h)$  existiert, die nur vom Abstand  $h$  abhängt:

$$C(h) = E[(Z(r) - m) \cdot (Z(r+h) - m)] = E[Z(r) \cdot Z(r+h) - m^2]. \quad (6-2)$$

Die Funktion des Variogramms oder auch „Semi-Variogramms“ lautet [1]

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E [Z(r) - Z(r+h)]^2. \quad (6-3)$$

Aus der Definition der Varianz einer Zufallsgröße X als

$$\text{var}(X) = E [X - E(X)]^2 \quad (6-4)$$

folgt

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var}(Z(r) - Z(r+h)). \quad (6-5)$$

Die statistische Schätzung der Variogramm-Funktion erfolgt durch

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} (Z_i - Z_{i+h})^2 \quad (6-6)$$

mit

$n(h)$ ... Anzahl der Wertepaare mit dem Abstand  $h$ .

Aus dem Bild eines Variogramms ist ersichtlich, dass der Unterschied zwischen zwei benachbarten Proben zunächst gering ist, mit zunehmender Entfernung größer wird und sich einem Schwellwert  $\gamma_s$  nähert (Beispiel im Bild 36).

Der Nuggeteffekt  $c$  oder auch die Nuggetvarianz vereinigt meist nicht auflösbare, strukturbedingte Varianzen. Dazu gehören die Varianzen der Probenahme und Probeanalyse. Messfehler usw. sind also auch darin enthalten. Die Herkunft der Nuggetvarianz sollte für jedes Variogramm erklärt werden. Variogramme, die bis zu einem Schwellwert mit der Reichweite  $a$  ansteigen und dann waagrecht verlaufen, sind vom transitivem Typ. Die Probenwerte für Abstände  $h > a$  sind dann nicht mehr korreliert [1].

Das Variogramm enthält keine Aussagen über absolute Größen. Es beschreibt eine strukturelle Veränderung der Differenzen einer Eigenschaft. Um die Reichweite  $a$  innerhalb eines Erkundungsgebietes erfassen zu können, muss der Abstand der Erkundungspunkte klein im Verhältnis zu  $a$  sein. Anderenfalls werden die Eigenschaften der räumlichen Korrelation nicht erkannt.

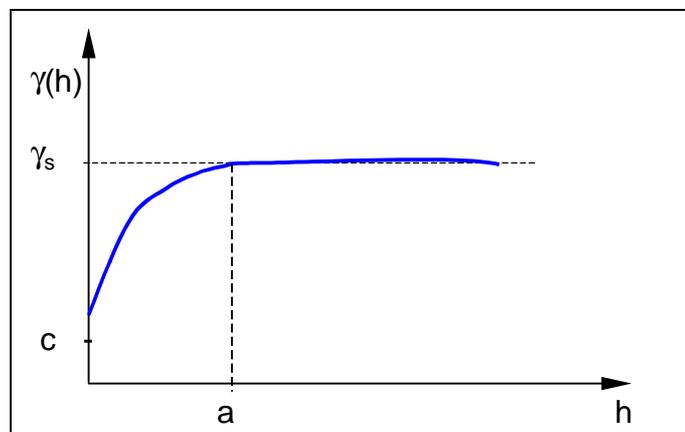


Bild 36: Variogramm

Mit zunehmendem Abstand  $h$  nimmt auch die Anzahl der Punktepaare  $n(h)$  ab. Daher ist es zweckmäßig, nur Punktepaare mit einem Abstand von  $1/3 \dots 1/2$  der maximalen möglichen Punkteabstände zur Bewertung zu benutzen. Die Anzahl der Punktepaare  $n(h)$  sollte nicht zu klein und den jeweiligen Gegebenheiten und Fragestellungen angepasst werden. In der geostatistischen Literatur werden meist 30 bis 70 Datenpunkte empfohlen. Für die Berechnung des Schwellwertes  $\gamma_s$  werden 90 ... 120 Paare für notwendig erachtet [74]. Auf der Basis eigener Untersuchungen empfiehlt KREUTER [84] zur Berechnung von  $\gamma$  mindestens 70 Datenpaare.

Um einen strukturellen Aufschluss zu erhalten, ist es empfehlenswert, Variogramme für verschiedene Richtungen zu bestimmen. Bei z. B. in der Fläche unregelmäßig angeordneten Punkten müssen Abstandsklassen ( $h \pm \Delta h$ ) und Winkelklassen ( $\alpha \pm \Delta \alpha$ ) gebildet werden. Die Klassenbildung sollte möglichen Unterschieden in den Richtungen Rechnung tragen. Variogramme sind vielfältig zu bewerten und auszuwerten. Auf mögliche Varianten, Verfahren und Bewertungen sei auf Literatur verwiesen, z. B. [1][74][84][96].

### **Anwendung auf Sondierungen**

Die 18 Drucksondierungen auf beiden Teilflächen B1 und B2 sind nicht ausreichend, um Variogramme in horizontalen Ebenen zu berechnen. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass wegen den speziellen technogenen Verhältnissen unregelmäßig wechselnde und schräg lagernde Schichtungen vorhanden sein müssen. Eine durchgehende Schrägschichtung wurde in den Bohrungen (B2Bg2 und B2Bg8) höchstens einmal angetroffen. Um ein Variogramm für die Struktur dieser durchgehenden Schichtung berechnen zu können, müsste eine durchgehende schräge Lamelle vorhanden und ausreichend oft erkundet worden sein. Auch für Variogramme in schräger Richtung reicht die Anzahl zur Verfügung stehender Werte nicht aus, wenn den Empfehlungen der Literatur Rechnung getragen werden soll. Unter Berücksichtigung der Größe einer solchen Struktur (10 ... 30 m in Schüttrichtung) ist es nicht sinnvoll, auf diesem begrenzten Raum eine große Anzahl von Aufschlüssen niederzubringen. Diese Aufschlüsse wären so dicht anzuordnen, dass sich die Messungen gegenseitig beeinflussen.

Werden die Messdaten einer Drucksondierung, z. B. die Spitzendruckwerte  $q_c$  je 2 cm Tiefe, als eine Messreihe entlang eines „Profils“ aufgefasst und mit diesen Werten Variogramme erstellt, so zeigen diese Variogramme insgesamt einen sehr unruhigen Kurvenverlauf mit vielen Maxima, die schwer zu interpretieren sind. Ursache sind Unregelmäßigkeiten im Verlauf der Messwerte, die kaum einen horizontalen Verlauf des Variogrammwertes  $\gamma$  ermöglichen.

Die Reichweite  $a$  der Variogramme liegt in der Größenordnung von  $a = (0,2 \dots 1,5)$  m, wobei die größeren Reichweiten in den Sondierungen der vergüteten Fläche B2 nachgewiesen wurden [48]. Die Sondierwerte entlang eines Profils mit Reichweiten der Variogramme  $h > a$  sind nicht mehr miteinander korreliert.

Wegen der Ablagerung in schrägen Schichten sind Zusammenhänge in vertikaler Richtung und in horizontaler Richtung zu erwarten. Die horizontale Reichweite einer Sondierung wird ebenfalls in der Größenordnung einer Schichtstärke liegen. Eine Sondierung be-

schreibt auf der Zugabsetzerkippe des Tagebaus Zwenkau einen Baugrundbereich mit einem Zylinderradius von maximal dieser Größenordnung.

Die geringfügige Zunahme des Variogrammwertes  $a$  der Nachsondierungen gegenüber den jeweiligen Vorsondierungen kann auf eine Vergleichmäßigung des Untergrundes zurückgeführt werden [48].

### ***Räumliche Interpolation und Kriging***

Mit Hilfe der räumlichen Interpolation wird die Größe einer Variablen an einem Ort geschätzt, an dem sie nicht gemessen wurde. Ein derartiges Verfahren ist Voraussetzung z. B. für das Zeichnen von Isolinienkarten.

Eines der bekanntesten Verfahren ist das nach D. G. KRIGE benannte Kriging [1][84]. Im Kriging wird durch die Wichtung der Daten die Schätzvarianz minimiert. Für jeden Datenpunkt werden Wichtungsfaktoren berechnet. Diese sind vom Variogramm abhängig.

Die räumliche Interpolation liefert einen gewogenen Mittelwert aus gewählten benachbarten Punkten mit Messwerten. Voraussetzung für eine sinnvolle und fachlich korrekte Anwendung ist immer, dass in der betrachteten Ebene oder im betrachteten Raum die sachlogischen Zusammenhänge sich in messbaren und somit auch statistisch bearbeitbaren Daten widerspiegeln. Kann kein sinnvolles Variogramm berechnet werden, ist demzufolge auch keine exakte Anwendung des Krigings möglich.

### ***Schlussfolgerungen für die Anwendung der Geostatistik auf Mischbodenkippen***

Die Anwendung geostatistischer Verfahren ist nur bedingt möglich. Zur Bewertung räumlich verteilter Parameter auf Mischbodenkippen, insbesondere auf der Mischbodenkippe des Tagebaus Zwenkau, versagen sie, weil

- die Schrägschichtung nicht durch eine genügende Anzahl von Punkten erfassbar ist,
- die Eigenschaften der Mischbodenkippe auf kurzen Entfernungen stark schwanken. Aus dieser Inhomogenität der Kippe resultiert, dass der Wert einer Variablen ebenfalls in kurzen Distanzen stark schwankt und somit vom Ort abhängt.

Zur Simulation eines Kippenmodells können geostatistische Verfahren geeignet sein, wenn die Aufgabenstellung und der Standort geeignet sind, z. B. [23], [84]. Erfolgreiche Anwendung praktizierte AL HAMDAN [4] auf anderen Kippentypen, z. B. auf Kippen, die durch Bandabsetzer und Abraumförderbrücken gekippt wurden. Die Lagerungsverhältnisse dieser Kippen unterscheiden sich wesentlich von der untersuchten Zugabsetzerkippe.

### 6.6.5 Eine Alternative

#### *Grundgedanken*

Die Hauptkomponentenanalyse untersucht die Varianz-Kovarianz-Struktur der Zufallsvariablen  $X_1, X_2, \dots, X_p$  mit dem ursprünglichen Ziel der Datenreduktion und Interpretation. Aus den Eingangsvariablen  $X_1, X_2, \dots, X_p$  werden  $n$  unkorrelierte Linearkombinationen gebildet, die den gleichen Mittelwertsvektor, die gleiche Kovarianzmatrix und die gleiche Korrelationsmatrix besitzen [72].

Diese neuen Variablen werden als Hauptkomponenten bezeichnet. Bei  $p = n$  neuen Komponenten beschreiben die  $n$  neuen Komponenten die gesamte Variabilität der  $p$  Eingangsvariablen.

Die mit  $n < p$  reduzierte Anzahl an Komponenten vereinfacht weitere Betrachtungen. Voraussetzung ist, dass der mit  $n$  Komponenten abgebildete Anteil an Variabilität einen wesentlichen Anteil der Variabilität der Ausgangsvariablen darstellt.

Einen Überblick über die Arbeitsschritte des Nutzers bei der Verwendung eines Rechenprogramms zeigt das Flussbild in Bild 37.

Die Hauptkomponentenanalyse lässt sich geometrisch deuten: Die Merkmalsausprägungen (Variablen) spannen einen orthogonalen Koordinatenraum auf. Durch Rotation wird ein neues, ebenfalls orthogonales Koordinatensystem gefunden. Die neue erste Achse zeigt in die Richtung der größten Variabilität. Die anderen neuen Achsen stehen senkrecht auf der ersten Achse. Die neuen Achsen (Variablen) sind eine einfache und knappe Beschreibung der Varianz-/Kovarianzstruktur. Die neuen Achsen (Variablen) sind eine Linearkombination der ursprünglichen Achsen [132].

Algebraisch stellen die Hauptkomponenten eine Linearkombination der Ausgangsvariablen dar [72].

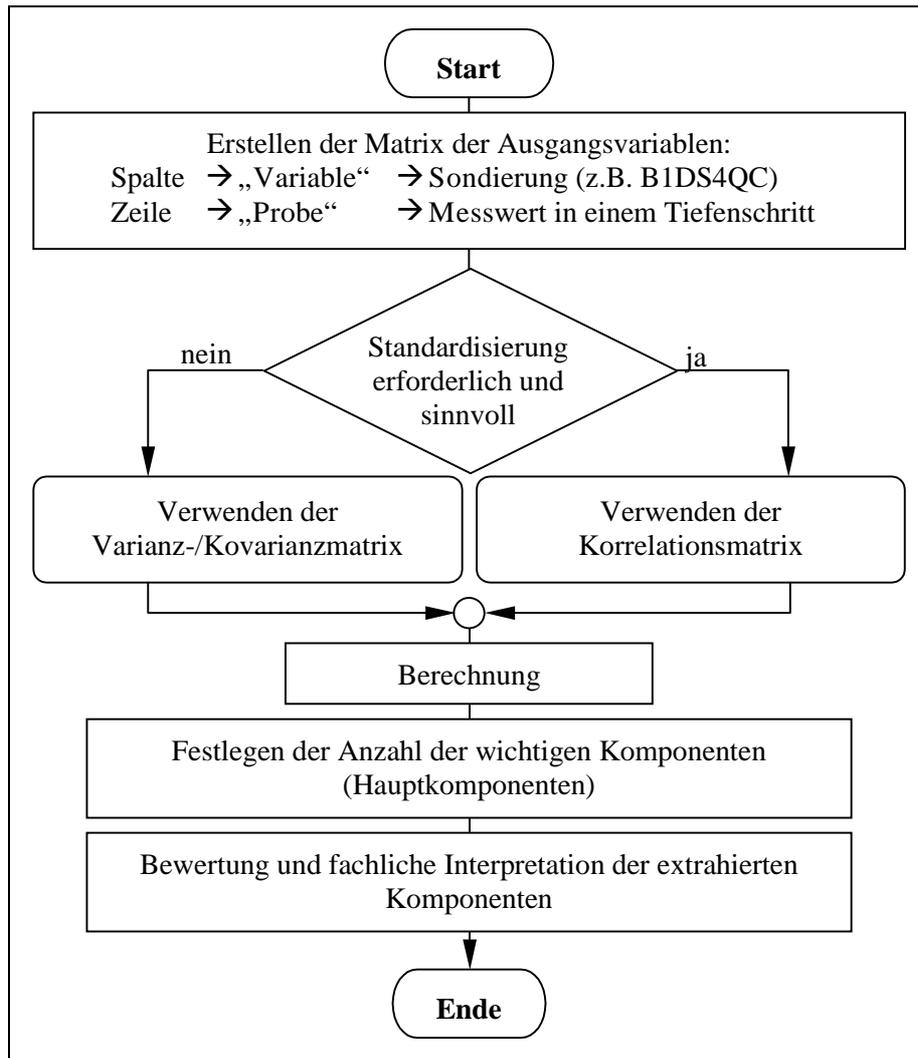


Bild 37: Vereinfachtes Flussbild der Hauptkomponentenanalyse

Es wird versucht, Eingangsvariablen mit ähnlichen Eigenschaften zu neuen Variablen zusammenzufassen. Die neuen Variablen heißen Hauptkomponenten (principal components [72]). Die Analyse ist ein lineares Verfahren und versagt bei starken Nichtlinearitäten [6].

Werden sämtliche  $m$  Komponenten extrahiert und die Gesamtvarianz aller  $n$  Variablen erklärt, erhält man die vollständige Lösung. Die lineare Beziehung zwischen den beobachteten Merkmalen  $X_k$  und den  $m$  Hauptkomponenten lautet [72]:

$$Y_k = l'_{ik} \mathbf{X} = l_{1k} X_1 + l_{2k} X_2 + \dots + l_{nk} X_n, \tag{6-7}$$

$$\mathbf{X}' = [X_1, X_2, \dots, X_n],$$

$$i, k = 1, \dots, n,$$

$n$  Anzahl der Variablen,  
 $X_1, X_2, \dots, X_n$  beobachtete Variablen,  
 $l_{ik}$  Koeffizient, Ladung.

Werden nicht mehr alle Hauptkomponenten zur Beschreibung des Modells herangezogen, wird  $k < m$  und man erhält die reduzierte Lösung. Die Komponenten sind von unterschiedlicher Bedeutung für die Ausgangsmatrix  $\mathbf{X}$ , und zwar in Abhängigkeit vom Eigenwert  $\lambda_i$ . Das Analyseergebnis erfüllt ein mathematisches Optimalitätskriterium: Die Summe der Eigenwerte, die der Summe der Varianzen der neuen Variablen entspricht, ist gleich der Summe der Varianzen der Eingangsvariablen [72]:

$$\sum_{i=1}^n \sigma_{ii} = \sum_{i=1}^n \lambda_i . \quad (6-8)$$

Ist  $e_i$  der Eigenvektor und  $\Sigma$  die Kovarianzmatrix von  $\mathbf{X}$ , so gilt

$$\lambda_i = \text{Var}(Y_i) = e_i' \Sigma e_i \quad \text{und} \quad (6-9)$$

$$\text{Cov}(Y_i, Y_k) = e_i' \Sigma e_k = 0 . \quad (6-10)$$

Die Hauptkomponenten werden in der Reihenfolge ihrer Varianz extrahiert, beginnend mit der Hauptkomponente mit der größten Varianz.

### ***Unabhängige Ereignisse***

Die Hauptkomponentenanalyse setzt voraus, dass die Messwerte (Realisierungen) unabhängig sind.

Unterschieden werden

- die unbedingte Wahrscheinlichkeit  $P(A)$  des Eintretens des Ereignisses  $A$  von der
- bedingten Wahrscheinlichkeit  $P(A/B)$  des Eintretens des Ereignisses  $A$  unter den Bedingungen des Ereignisses  $B$ .

Beeinflusst das Ereignis  $B$  das Ereignis  $A$ , so sind beide Wahrscheinlichkeiten verschieden, dass Ereignis  $A$  ist abhängig vom Ereignis  $B$ .

Ändert sich die Wahrscheinlichkeit des Eintretens des Ereignisses  $A$  nicht unter den Bedingungen des Ereignisses  $B$ , so ist das Ereignis  $A$  unabhängig vom Eintreten des Ereignisses  $B$ . Die Wahrscheinlichkeit, das Ereignis  $A$  nach dem Ereignis  $B$  eintritt, ist gleich der Wahrscheinlichkeit des Eintretens des Ereignisses  $A$  [15]:

$$P(A/B) = P(A). \quad (6-11)$$

Ist Ereignis  $B$  vom Ereignis  $A$  unabhängig, so ist ebenfalls folgende Definition gültig:

$$P(B/A) = P(B). \quad (6-12)$$

Die Wahrscheinlichkeit des Produktes zweier unabhängiger Ereignisse ist gleich dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten der Ereignisse:

$$P(A \cap B) = P(A) P(B) \quad (6-13)$$

Die Ereignisse A, B und C sind voneinander unabhängig, wenn sie paarweise voneinander unabhängig sind [15]:

$$P(A \cap B) = P(A) P(B), \quad (6-14)$$

$$P(A \cap C) = P(A) P(C),$$

$$P(B \cap C) = P(B) P(C) \quad (6-15)$$

und weiterhin folgende Bedingungen erfüllt sind:

$$P(A \cap B \cap C) = P(A) P(B) P(C). \quad (6-16)$$

Eine beliebige Anzahl an Ereignissen heißt unabhängig, wenn die Ereignisse paarweise unabhängig sind und die Wahrscheinlichkeit des Produktes der Ereignisse gleich dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten der Ereignisse ist [15]:

$$P\left(\prod_{s=1}^k A_{i_s}\right) = \prod_{s=1}^k P(A_{i_s}) \quad (6-17)$$

mit Ereignissen  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ),  
 $n \dots$  Anzahl der Ereignisse,  $k \in \{2, 3, \dots, m\}$ .

### ***Unabhängigkeit der Messwerte einer Sondierung***

Sind Messergebnisse der Drucksondierungen unabhängig voneinander, so muss der Messwert in der Tiefe  $t_1$  (Ereignis  $A_1$ ) unabhängig vom Messwert in der Tiefe  $t_2 = t_1 + \Delta t$  (Ereignis  $A_2$ ) und von allen anderen Messwerten  $t_i$  (Ereignisse  $A_i$ ) sein. Für  $i$  gilt

$$i > 0, i \in \mathbb{N}.$$

Zunächst ist festzustellen, dass die Ereignisse  $A_i$  einander nicht ausschließen, z. B.:

$$A_1 \cap A_2 = \emptyset.$$

Die Ereignisse  $A_i$  sind voneinander unabhängig, da bei der Realisierung des Ereignisses  $A_i$  z. B. ein Spitzendruckwert  $q_{c1}$  im Wertebereich von z. B. 0,0 MPa bis 10,0 MPa gewonnen wird. Für die Realisierung des nächsten Messwertes  $q_{c2}$  steht wieder der gesamte Wertebereich von 0,1 MPa bis 10,0 MPa zur Verfügung.

Die Messungen wären voneinander abhängig, sofern für die zweite Messung der bei der ersten Messung gewonnene Wert nicht mehr zur Verfügung stünde. Das ist nicht zutreffend.

Für beispielsweise drei Messwerte wird angenommen, dass der Wertebereich von

$$0,0 \text{ MPa bis } 10,0 \text{ MPa}$$

zur Verfügung steht, wobei

$\Delta q_c = 0,1 \text{ MPa}$  beträgt.

Die Wahrscheinlichkeit  $P(A_1)$  für das Ereignis  $A_1$ , d.h. dass die erste Messung einen bestimmten Wert, z. B.  $q_{c1} = 4,7 \text{ MPa}$  liefert, beträgt

$$P(A_1) = P(q_{c1} = 4,7 \text{ MPa}) = \frac{1}{101}. \quad (6-18)$$

Die Wahrscheinlichkeit  $P(A_2)$  für das Ereignis  $A_2$ , dass die Messung z. B.  $q_{c2} = 5,0 \text{ MPa}$  ergibt, ist

$$P(A_2) = P(q_{c2} = 5,0 \text{ MPa}) = \frac{1}{101}. \quad (6-19)$$

Die Wahrscheinlichkeit  $P(A_3)$  für ein drittes Ereignis  $A_3$ , d.h. die Messung liefert den Wert z. B.

$q_{c3} = 4,7 \text{ MPa}$ ,

beträgt

$$P(A_3) = P(q_{c3} = 4,7 \text{ MPa}) = \frac{1}{101}. \quad (6-20)$$

Sind die Ereignisse unabhängig, so gilt:

$$P(A_1 \cap A_2 \cap A_3) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot P(A_3) = \frac{1}{101} \cdot \frac{1}{101} \cdot \frac{1}{101} = \frac{1}{101^3}, \quad (6-21)$$

$$P(A_1 \cap A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2) = \frac{1}{101} \cdot \frac{1}{101} = \frac{1}{101^2}, \quad (6-22)$$

$$P(A_1 \cap A_3) = P(A_1) \cdot P(A_3) = \frac{1}{101} \cdot \frac{1}{101} = \frac{1}{101^2}, \quad (6-23)$$

$$P(A_2 \cap A_3) = P(A_2) \cdot P(A_3) = \frac{1}{101} \cdot \frac{1}{101} = \frac{1}{101^2}. \quad (6-24)$$

Somit ist die Forderung nach vollständiger Unabhängigkeit der Messungen voneinander im Sinne der zitierten Definitionen erfüllt.

### ***Unabhängigkeit der Messwerte mehrerer Sondierungen***

Die vorhergehenden Darlegungen zeigen, dass die Messwerte einer Sondierung vollständig voneinander unabhängig sind. Die Messungen  $q_{c1}$ ,  $q_{c2}$ ,  $q_{c3}$  können genau genommen sowohl benachbarte Messwerte einer Sondierung als auch Messwerte verschiedener Sondierungen sein, so dass auch die Messungen verschiedener Sondierungen vollständig unabhängig voneinander sind.

### ***Korrelationen zwischen den Eingangsvariablen***

Eine Anwendung der Hauptkomponentenanalyse ist sinnvoll, sofern zwischen den Eingangsvariablen oder zwischen einzelnen Eingangsvariablen Korrelationen bestehen.

Dass zwischen allen oder einzelnen Eingangsvariablen Korrelationen bestehen können, kann auf Grundlage der im Grundsatz gleichartigen Entstehung der jeweiligen untersuchten Bodenschichten vorausgesetzt werden.

Sind zwischen den  $n$  Eingangsvariablen keine Korrelationen vorhanden, werden durch die Analyse  $n$  Komponenten ermittelt, die jeweils eine Eingangsvariable repräsentieren. Der Zweck der Analyse nach Datenreduktion – der Reduzierung der zu betrachtenden Variablen – ist in diesem Fall nicht erfüllt.

Ein räumlicher Zusammenhang der Eingangsdaten, wie er zur Anwendung geostatistischer Methoden erforderlich ist, wird bei der Anwendung der Hauptkomponentenanalyse nicht untersucht und ist hinsichtlich der Anwendbarkeit und Interpretation der Hauptkomponentenanalyse nicht notwendig.

### ***Analyse standardisierter Variablen***

Das Ergebnis der Analyse ist von der Skalierung der Ausgangsvariablen abhängig. Die Ursprungsvariablen werden im Allgemeinen standardisiert, wenn die Messwerte verschiedener Variablen in unterschiedlichen Größenordnungen vorliegen. Für standardisierte Variable gilt [72]

$$E(\mathbf{Z}) = 0 \text{ und } \text{Cov}(\mathbf{Z}) = \boldsymbol{\rho}. \quad (6-25)$$

Die Korrelationsmatrix  $\boldsymbol{\rho}$  der ursprünglichen Variable  $\mathbf{X}$  wird analysiert.

Die Ergebnisse der Analyse, d. h. die Eigenwerte und Eigenvektoren, sind unterschiedlich, wenn sie auf der Korrelationsmatrix  $\boldsymbol{\rho}$  und nicht auf der Varianz-/Kovarianzmatrix  $\boldsymbol{\Sigma}$  basiert [72].

### ***Bestimmen der Anzahl der wichtigsten Hauptkomponenten***

Es gibt kein eindeutiges Entscheidungskriterium über die Anzahl der zu berücksichtigenden Hauptkomponenten und über den Einfluss der nicht berücksichtigten Komponenten. Die Anzahl der zu extrahierenden und als wichtig erachteten Hauptkomponenten legt letztendlich der Anwender unter Beachtung der Eigenwerte fest. Der Eigenwert beschreibt den Erklärungsanteil einer Komponente im Hinblick auf die Varianz aller Variablen. Eine Hauptkomponente, deren Erklärungsanteil über alle Variable klein ist, erklärt weniger Varianz als eine ursprüngliche Variable und wird im Hinblick auf die Reduktion der Komponenten nicht mehr betrachtet.

Als Hilfe bei der Entscheidung können folgende Kriterien dienen:

- **Kaiser – Kriterium:**  
Das Kaiser-Kriterium wählt alle Hauptkomponenten, deren Eigenwert größer ist als der Mittelwert aller Eigenwerte [75].
- **das Scree – Diagramm, Eigenwertdiagramm:**  
Die Anzahl der wichtigen Hauptkomponenten wird graphisch bestimmt. Beim Scree-Test wird ein Eigenwertdiagramm gezeichnet [24][132]. Die Eigenwerte der Hauptkomponenten werden als Funktion der Komponentenummer aufgetragen. Die Punkte, die sich asymptotisch der Abszisse nähern, werden durch eine Gerade ersetzt. Der am weitesten links liegende Punkt auf dieser Geraden entspricht der Anzahl der zu extrahierenden Komponenten (Bild 38). Dieses Kriterium liefert eher zu viele Hauptkomponenten.
- **nach der Varianz:**  
Es werden so viele Hauptkomponenten ausgewählt, die mindestens einen bestimmten Anteil der Varianz erklären.

### ***Darstellung der Ergebnisse***

Eigenwerte und Varianzanteile werden in tabellarischer Form dargestellt, die Ladungen der Komponenten bei Bedarf zusätzlich auch in graphischer Form (Diagramme). Für die Komponentenwerte eignet sich meist die graphische Darstellung als Liniendiagramm.

Die von KLUGE [81] vorgestellte Methode der Faktorprädominanzdarstellung ist sinngemäß auch auf die Hauptkomponentenmethode anwendbar, in dem in eine Karte die Bereiche der Hauptkomponenten mit den größten Ladungen eingetragen werden. Der besseren Übersichtlichkeit steht eine weitere Datenreduktion gegenüber.

### ***Bewertung der extrahierten Komponenten***

Nachdem die Anzahl der wichtigen Hauptkomponenten bestimmt ist, sind diese unter Beachtung ihrer Eigenwerte  $\lambda_i$  und Ladungen  $e_{il}$  inhaltlich zu interpretieren. Der einfache Fall ist eine „Einfachstruktur“, wenn eine Ausgangsvariable nur durch eine Komponente be-

geschrieben wird. Dem gegenüber ist es schwierig, eine sinnvolle Interpretation abzugeben, wenn mehrere Variablen für mehrere Komponenten hohe Ladungen aufweisen.

Die Bewertung der Hauptkomponenten kann auch graphisch erfolgen [6][124].

### ***Geotechnische Bedeutung der Komponenten***

Die Komponenten beschreiben die Variabilität der nachfolgend betrachteten Variablen

- Spitzendrücke und
- Reibungsverhältnisse.

### ***Analyse der Spitzendrücke***

Bei der Bezeichnung der Variablen wurden die ursprünglichen Bezeichnungen der Aufschlusspunkte, wie sie in [88] verwendet wurden, beibehalten und ergänzt:

- Bezeichnung der Teilfläche    B1 und B2,
- Nummer der Sondierung        DS1 bis DS9,
- Sondierung auf der Teilfläche   B2 nach der Vergütung zusätzlich N,
- Spitzendruckwerte in MPa      qc und
- Reibungsverhältnisse            Rf.

Das gemessene Merkmal ist der Spitzendruck  $q_c$ . Er wurde in 28 Sondierungen in Tiefenschritten  $\Delta t = 2,0$  cm gemessen. Untersucht werden die Unterschiede zwischen den Sondierungen sowie Gemeinsamkeiten der Sondierungen. Die Spitzendruckmessungen einer Sondierung werden als eine Variable verstanden, z. B. Eingangsvariable Nr. 1 enthält die Messwerte  $q_c$  der Sondierung DS1 auf der Teilfläche B1:

$$X_1 = B1DS1q_c.$$

Es wird davon ausgegangen, dass die Messwerte der Sondierungen Eigenschaften der Tagebaukippe beschreiben, die sich durch neue Variablen, den Hauptkomponenten, beschreiben lassen. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse werden die Baugrundverhältnisse charakterisiert und eine einfachere Grundlage für weitere Berechnungen - z. B. Setzungsberechnungen - gebildet. Messwerte im Tiefenbereich von 2,5 m bis 12,0 m werden betrachtet. Analysiert wurden

- 1) die Spitzendruckwerte der Teilflächen B1 und B2 vor und B2 nach Vergütung,
- 2) die Spitzendruckwerte der Teilfläche B2 vor und nach Vergütung untereinander,

3) die Spitzendruckwerte der Teilfläche B1 und B2 ohne Vergütung und

4) die Spitzendruckwerte nur der Teilfläche B1,

wobei im Fall 4) eine ausführlichere Bewertung vorgenommen wurde.

1) alle Spitzendruckwerte der Sondierungen auf den Teilflächen B1 und B2

Nach der Berechnung durch ein Computerprogramm (STATGRAPHICS) stehen folgende Werte zur Verfügung:

- Eigenwerte,
- Werte der Eigenvektoren (Ladungen),
- Komponentenwerte.

Die Eigenwerte und Werte der Eigenvektoren aller 28 Sondierungen im Tiefenbereich von  $t = (2,5 \dots 12,0)$  m für die ersten 8 Komponenten zeigt Anhang 10.3. Die 1. Komponente reproduziert mit dem Eigenwert von  $\lambda_1 = 73,4$  den bedeutendsten Anteil der Varianz. Die Gleichung für den ersten Wert  $Y_{1,1}$  der ersten Komponente lautet:

$$Y_{1,1} = 0,12 \cdot B1DS1qc_1 - 0,04 \cdot B1DS2aqc_1 - 0,08 \cdot B1DS2qc_1 \dots \\ \dots - 0,04 \cdot B1DS3qc_1 - 0,04 \cdot B1DS4qc_1 - 0,02 \cdot B1DS5qc_1 \dots \\ \dots - 0,05 \cdot B1DS6qc_1 - \dots \dots - 0,04 \cdot B2DS9qc_1$$

$B1DS1qc_1 \dots$  erster Messwert der Variablen, Spitzendruckwert bei  $t = 2,50$  m.

Komponentenwerte mit einem Betrag von  $|e_{ij}| \geq 0,2$  sind kursiv dargestellt. Bei  $|e| \geq 0,4$  wurde das Tabellenfeld fett dargestellt. Die Variablen der Teilfläche B2 nach Vergütung mit hohen Komponentenwerten dominieren das Analyseergebnis. Ein Vergleich mit den ursprünglichen Werten zeigt für die Spitzendruckwerte die höheren Werte, wie sie nach einer Verdichtung des Untergrundes zu erwarten sind. Die Skalierung der Eingangsvariablen beeinflusst also das Analyseergebnis. Durch Standardisierung der Eingangsvariablen könnte dieser Einfluss ausgeschaltet werden. Im vorliegenden Fall wird aber kein besser interpretierbares Ergebnis erzielt.

Im nächsten Schritt werden

- die Sondierungen B1DS2 wegen ihrer geringeren Sondiertiefe und
- die Sondierung B2DS9N wegen der extrem niedrigen Messwerte im Tiefenbereich  $t = (7 \dots 9)$  m, deren Ursache nicht geklärt werden kann (vgl. Abschnitt 6.6.2),

von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen. Besser interpretierbare Analyseergebnisse gegenüber den im Anhang 10.3 dargestellten konnten jedoch nicht erzielt werden. Aus den Analyseergebnissen kann geschlossen werden, dass die vergütete Teilfläche B2 sich von den nicht vergüteten Teilflächen B1 und B2 unterscheidet.

## 2) nur Teilfläche B2

Die Sondierergebnisse der unvergüteten Teilfläche B2 und die vergütete Teilfläche B2 werden analysiert. Die Eigenwerte und die Komponentengewichte sind in Anhang 10.6 zusammengefasst.

Das Ergebnis ähnelt dem vorhergehenden. Die Messergebnisse der vergüteten und der unvergüteten Teilfläche unterscheiden sich. Die vergütete Teilfläche mit den im Durchschnitt größeren Messergebnissen dominiert die Analyse. Weitere sinnvolle Aussagen sind nicht möglich. Eine genaue und sichere Interpretation ist durch die hohen Werte mehrerer Komponenten auf mehrere Variablen erschwert.

## 3) Teilfläche B1 / Teilfläche B2 vor Vergütung

Die unvergüteten Flächen werden im nächsten Schritt beurteilt. Die Tabelle in Anhang 10.5 zeigt die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse der Spitzendruckwerte der Sondierungen auf den unvergüteten Teilflächen B1 und B2. Die erste Hauptkomponente mit einem Varianzanteil von 33,0 % und einem Eigenwert von  $\lambda_1 = 7,3$  beschreibt mit einem Komponentenwert der Komponente (Sondierung)  $B1DS1qc = 0,97$  die Messwerte der Sondierung B1DS1 sehr gut. Die übrigen Sondierungen werden durch diese Komponente nicht oder nur geringfügig beschrieben. Die zweite extrahierte Komponente weist hohe Komponentenwerte mit den Sondierungen der Teilfläche B1 auf. Diese Komponente beschreibt mit Ausnahme der Sondierung B1DS5 den größten Varianzanteil der Sondierungen auf der Teilfläche B1 und von 3 Sondierungen der Teilfläche B2. Auffällig sind die Sondierungen B1DS3 und B1DS6, die durch zwei Komponenten mit hohen Varianzanteilen beschrieben werden.

Das Analyseergebnis beschreibt beide Teilflächen mit unterschiedlichen Variablen. Es existiert keine Komponente, die für Sondierungen auf beiden Flächen hohe Ladungen aufweist. Das zeigt, dass sich beide Teilflächen unterscheiden. Die Bedeutung der Komponenten wird am Beispiel der Teilfläche B1 gezeigt.

## 4) Teilfläche B1

Die vollständige Lösung der Hauptkomponentenanalyse für die Spitzendruckwerte zeigt Anhang 10.4. Die Gleichung für den ersten Wert  $Y_1$  der ersten Komponente lautet

$$Y_1 = 0,99 \cdot B1DS1qc_1 + 0,00 \cdot B1DS2aqc_1 - 0,05 \cdot B1DS2q_1 + 0,04 \cdot B1DS3qc_1 - \dots \\ \dots - 0,01 \cdot B1DS4qc_1 - 0,05 \cdot B1DS5qc_1 + \dots - 0,03 \cdot B1DS9qc_1 \quad (6-26)$$

$B1DS1qc_1$  ... erster Messwert der Variablen, Spitzendruckwert bei  $t = 2,50$  m

Die Anzahl der wichtigsten Hauptkomponenten  $m_{\text{Kaiser}}$  unter Anwendung des KAISER-Kriteriums beträgt

$$m_{\text{Kaiser}} (\lambda_i > (\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i)) = m_{\text{Kaiser}} (\lambda_i > 1.78) = 3. \quad (6-27)$$

Der Scree-Plot für die Teilfläche B1 (Bild 38) zeigt  $m_{\text{Scree}} = 4$  wichtige Komponenten an.

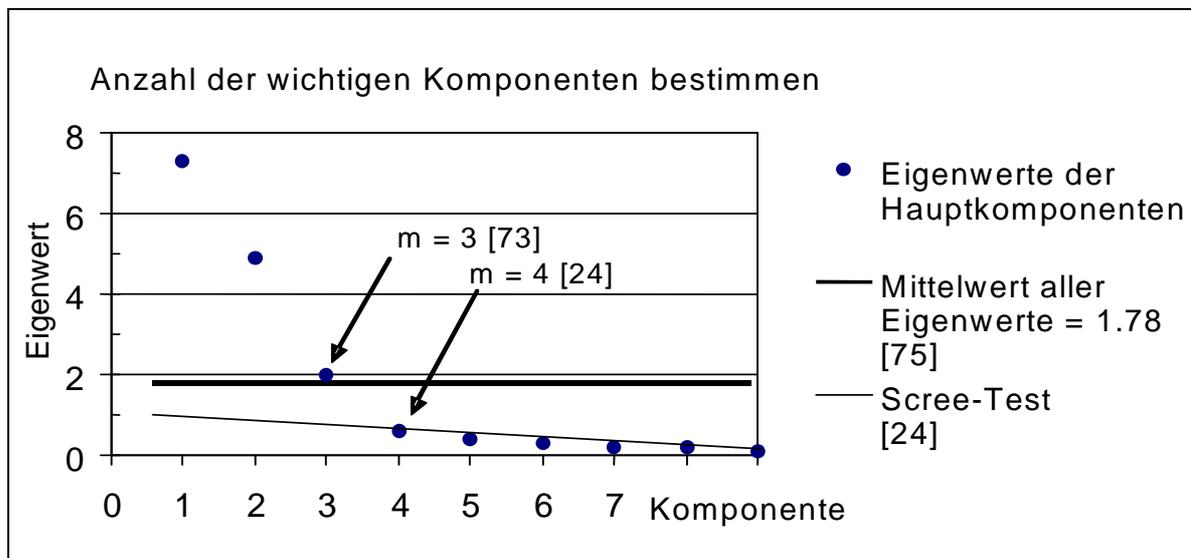


Bild 38 Scree-Plot Teilfläche B1

Die ersten 3 Hauptkomponenten erklären einen gemeinsamen Varianzanteil von 89,0 %. Mit der 4. Komponente steigt der Anteil an erklärter Varianz geringfügig um 3,6 % auf 92,6 %. Die 4. Komponente erklärt also nur einen relativ geringen Anteil von 3,6 % der Gesamtvarianz aller Variablen. Mit Hilfe des durch eine Variable erklärten Varianzanteils ist die Anzahl der wichtigen Hauptkomponenten mit  $m_{\text{Varianz}} = 3$  festzulegen.

Die Ladungen der Hauptkomponenten lassen sich in Ladungsdiagrammen übersichtlicher darstellen. Im Diagramm in Anhang 10.4 sind die Ladungsdiagramme mit der 2. bis 5. Hauptkomponente dargestellt. Deutlich ist, dass

- die Variable B1DS4qc für die 2. Komponente eine große positive Ladung und für die 3., 4. und 6. Hauptkomponente große negative Ladungen besitzt,
- die Variable B1DS3qc auf die 3. Hauptkomponente und die Variable B1DS6qc auf die 5. Hauptkomponente hoch laden und
- dass viele Variablen für verschiedene Hauptkomponenten noch deutliche Ladungen aufweisen, was eine Interpretation erschwert.

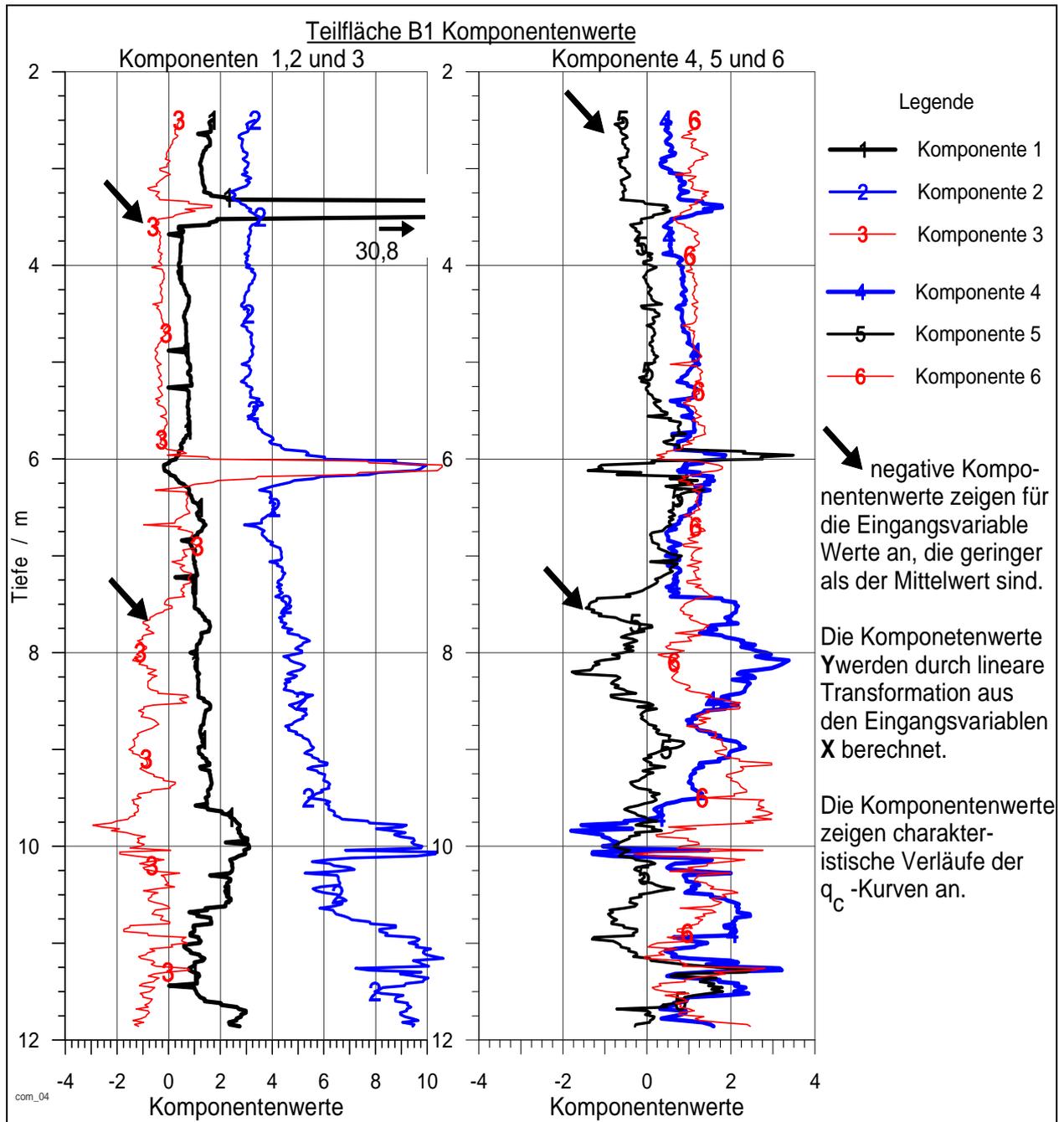


Bild 39: Komponentenwerte 1 bis 6, Teilfläche B1 ( $q_c$ )

In Bild 39 und Bild 40 sind die Komponentenwerte graphisch dargestellt und lassen sich als Funktion der Tiefe betrachten. Diese Komponentenwerte sind die Lösung des in Gleichung (6-7) dargestellten Gleichungssystems.

Die folgende geotechnisch sinnvolle Interpretation der Komponenten ist unabdingbar, um den Voraussetzungen für eine Hauptkomponentenanalyse zu entsprechen. Die extrahierten Komponenten spiegeln in Ihrem Werteverlauf charakteristische Eigenschaften der Sondierkurven wieder:

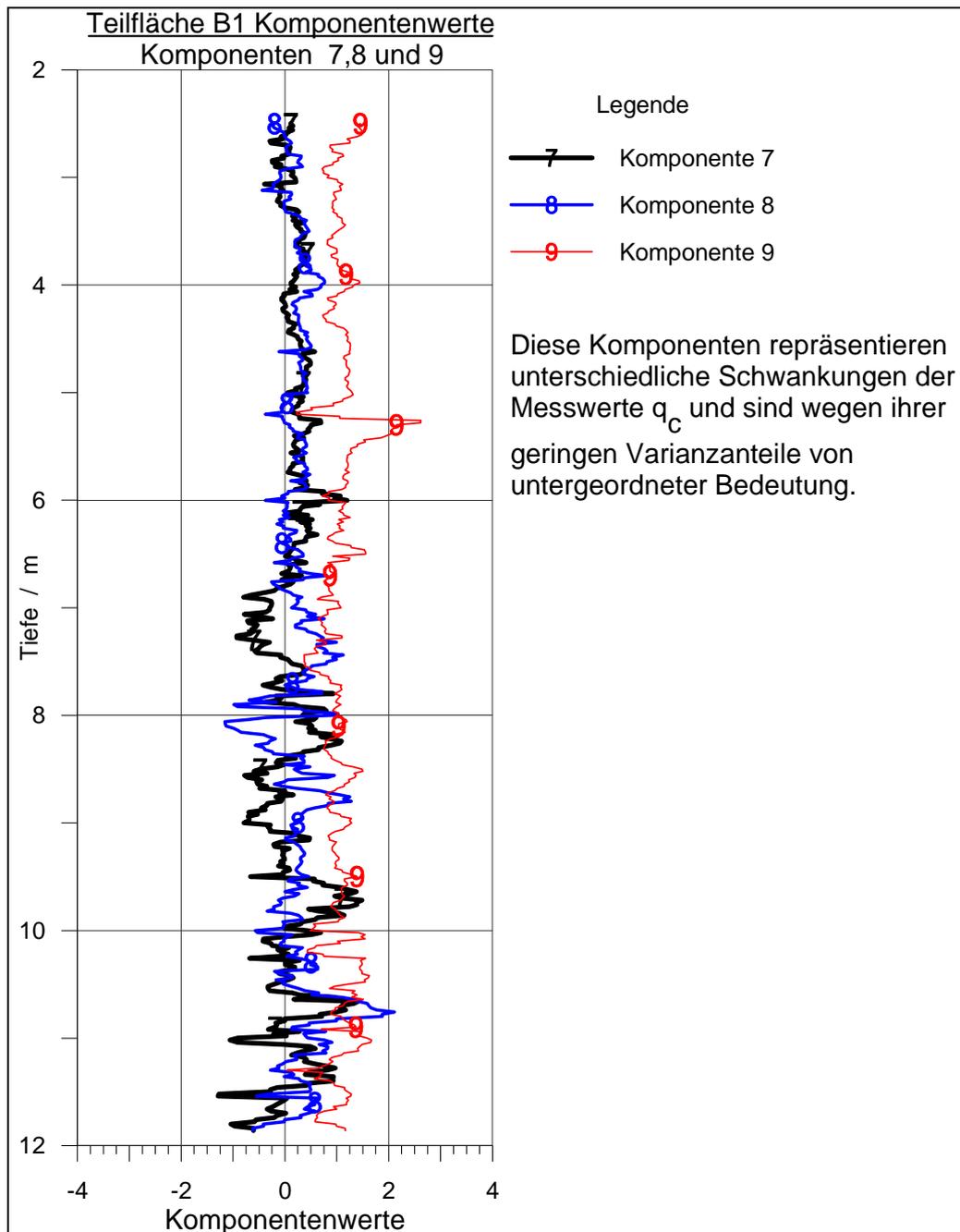


Bild 40: Komponentenwerte 7 bis 9, Teilfläche B1 ( $q_c$ )

- Die 1. Komponente besitzt mit der Variable B1DS1qc eine hohe Ladung. Sie „lädt“ hoch auf die Spitzendruckwerte der Sondierung B1DS1. Die Komponentenwerte sind nahezu immer positiv. Charakteristisch sind die hohen Messwerte  $q_c > 12,0$  MPa im Tiefenbereich von  $t = (3,2 \dots 3,6)$  m und der geringfügige Anstieg der Werte mit der Tiefe, insbesondere im Bereich von  $t = (9,7 \dots 10,5)$  m. Einen Anstieg der Werte im Tiefenbereich  $t = (3,2 \dots 3,6)$  m zeigen auch andere Komponenten, aber nicht so deutlich.

- Die 2. Komponente lädt mit Ausnahme der Sondierungen B1DS1 und B1DS5 auf alle anderen 7 Sondierungen der Teilfläche B1 hoch. Diese Komponente charakterisiert den allgemeinen Trend der Zunahme des Spitzendrucks mit der Tiefe und zusätzlich positive Abweichungen von diesem Trend bei  $t = 6,0$  m und  $t = 10,0$  m.
- Die Werte der 3. Komponente sind meist negativ. Diese Komponente kennzeichnet Messwerte, die kleiner sind als der Mittelwert aller Messungen.
- Die 4. Komponente charakterisiert in etwa gleichbleibende Werte und ab einer Tiefe von  $t = 7,40$  m größere Schwankungen der Werte. Besonders die Sondierung B1DS7 zeigt diesen Kurvenverlauf.
- Die 5. bis 9. Komponente repräsentieren unterschiedliche Eigenschaften der Messwerte. Diese Komponenten sind für die Beschreibung der Gesamtvarianz der ursprünglichen Variablen von untergeordneter Bedeutung, da sie nur einen geringen Anteil der Gesamtvarianz erklären. Ob ein geotechnisch relevanter Sachverhalt diesen Komponenten zugeordnet werden kann, muss im Einzelfall geprüft werden.

Von den Komponenten 5 bis 9 zeigt die 5. Komponente im oberen Bereich von  $t = (2,5 \dots 4,0)$  m und in Tiefen ab  $t = 7,0$  m deutlich negative Komponentenwerte. Eingangsvariablen, die sowohl für die 3. und die 5. Komponente hohe Ladungen aufweisen, werden auch geringere Messwerte gegenüber den anderen Eingangsvariablen (Sondierungen) besitzen. Auf der Teilfläche B1 trifft das für die Sondierung B1DS6 zu. Im Sondierprotokoll werden tatsächlich im Bereich von  $t = (2,5 \dots 3,5)$  m Spitzendrucke von  $q_c < 1,0$  MPa nachgewiesen. Für geotechnische Berechnungen beeinflusst dieser Bereich eine oberflächennahe Baumaßnahme stärker als tiefere Bereiche. Die 5. Hauptkomponente beschreibt aus der Sicht des Ingenieurs trotz ihres geringen Varianzanteils eine wichtige Eigenschaft.

Die Sondierung B1DS6 war bereits in der Darstellung der Häufigkeitsverteilungen der Spitzendruckwerte (Bild 32, S. 76) durch größere Häufigkeiten an Spitzendruckwerten von  $q_c < 1,0$  MPa auffällig. Mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse konnte diese Abweichung genauer erkannt und beschrieben werden.

Außer der Sondierung B1DS6 befinden sich noch die Sondierungen B1DS2a, B1DS4, B1DS8 und B1DS9 innerhalb der Lastfläche B1. Aus diesen 4 Sondierungen soll eine ermittelt werden, die sich im Gegensatz zur Sondierung B1DS6 von den übrigen Sondierungen durch größere Messwerte auszeichnet. Die subjektive Betrachtung der Häufigkeitsverteilung der Spitzendruckwerte (Bild 32, S. 76) erlaubt keine sichere Aussage und soll bestätigt werden. Für diese Variable ist zu erwarten, dass sie mit den Komponenten 3 und 5 sehr kleine oder negative Werte der Eigenvektoren aufweist. Negative Ladungen stehen für einen entgegengesetzten Zusammenhang, d.h. kleine Messwerte bei großem Komponentenwert und umgekehrt. Die Sondierung B1DS4 weist mit der Komponente 3 eine deutlich negative Ladung auf. Auf große Messwerte deutet ebenfalls der starke Zusammenhang mit der 2. Hauptkomponente hin. Der Mittelwert der Spitzendrucke der Sondierung B1DS4 mit  $\bar{q}_c = 2,4$  MPa liegt über den Mittelwerten der anderen Sondierungen (vgl. Anhang 10.1).

Die Aussage zur Sondierung B1DS4 als Interpretation der Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse wird bestätigt.

### *Analyse der Reibungsverhältnisse*

Die Analyse der Reibungsverhältnisse  $R_f$  aller Sondierungen untereinander und der Sondierungen der unvergüteten Teilflächen liefert keine schlüssig interpretierbaren Werte der Eigenvektoren. Der Anteil der erklärten Varianz ist selbst bei Verwendung von 8 Hauptkomponenten mit 68,9 % nicht zufriedenstellend. Der Anteil erklärter Varianz bei einer Verwendung von wünschenswerten 3 oder 4 wichtigen Hauptkomponenten ist mit 42,9 % relativ gering (Anhang 10.7). Ein völlig verändertes Bild zeigen die Ladungen, wenn nur die Teilfläche B1 analysiert wird (Anhang 10.8). Jeweils eine Komponente weist für eine Eingangsvariable eine hohe Ladung auf. Die 1. Hauptkomponente erklärt mit 42,3 % den größten Varianzanteil der Eingangsvariablen B1DS6Rf.

Die Komponentenwerte repräsentieren charakteristische Verläufe der Messkurven. Im Bild 41 (S. 99) zeigt die erste Hauptkomponente deutlich größere positive Komponentenwerte gegenüber den anderen Komponenten, besonders im oberen Bereich von  $t = (2,5 \dots 3,5)$  m und  $t = (6,5 \dots 10,0)$  m.

Die Sondierung B1DS6 war bereits bei der Analyse der Spitzendrücke mit kleinen Spitzendruckwerten auffällig. Die großen Reibungswerte, die auch im Sondierprotokoll der Sondierung B1DS6 ausgewiesen sind, zeigen höhere organische bzw. kohlige, aber auch einen möglicherweise höheren Anteil an Feinkorn mit einem Korndurchmesser von  $d \leq 0,06$  mm an. Diese Materialien erklären auch den geringeren Spitzendruck der Sondierung B1DS6.

Die Hauptkomponentenanalyse der Reibungsverhältnisse bestätigt im vorliegenden Fall die Hinweise, die durch die Hauptkomponentenanalyse der Spitzendrücke gewonnen wurden.

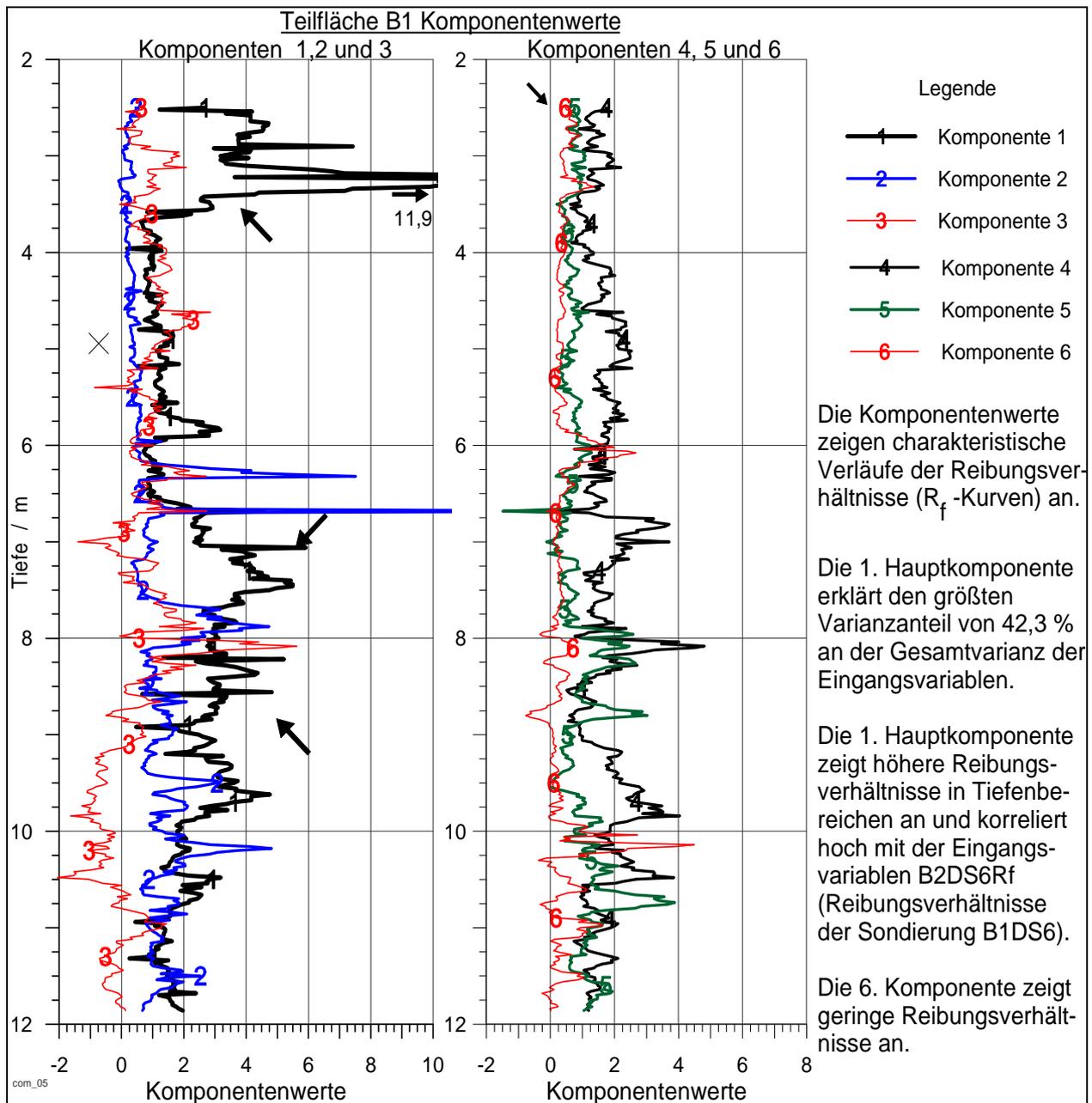
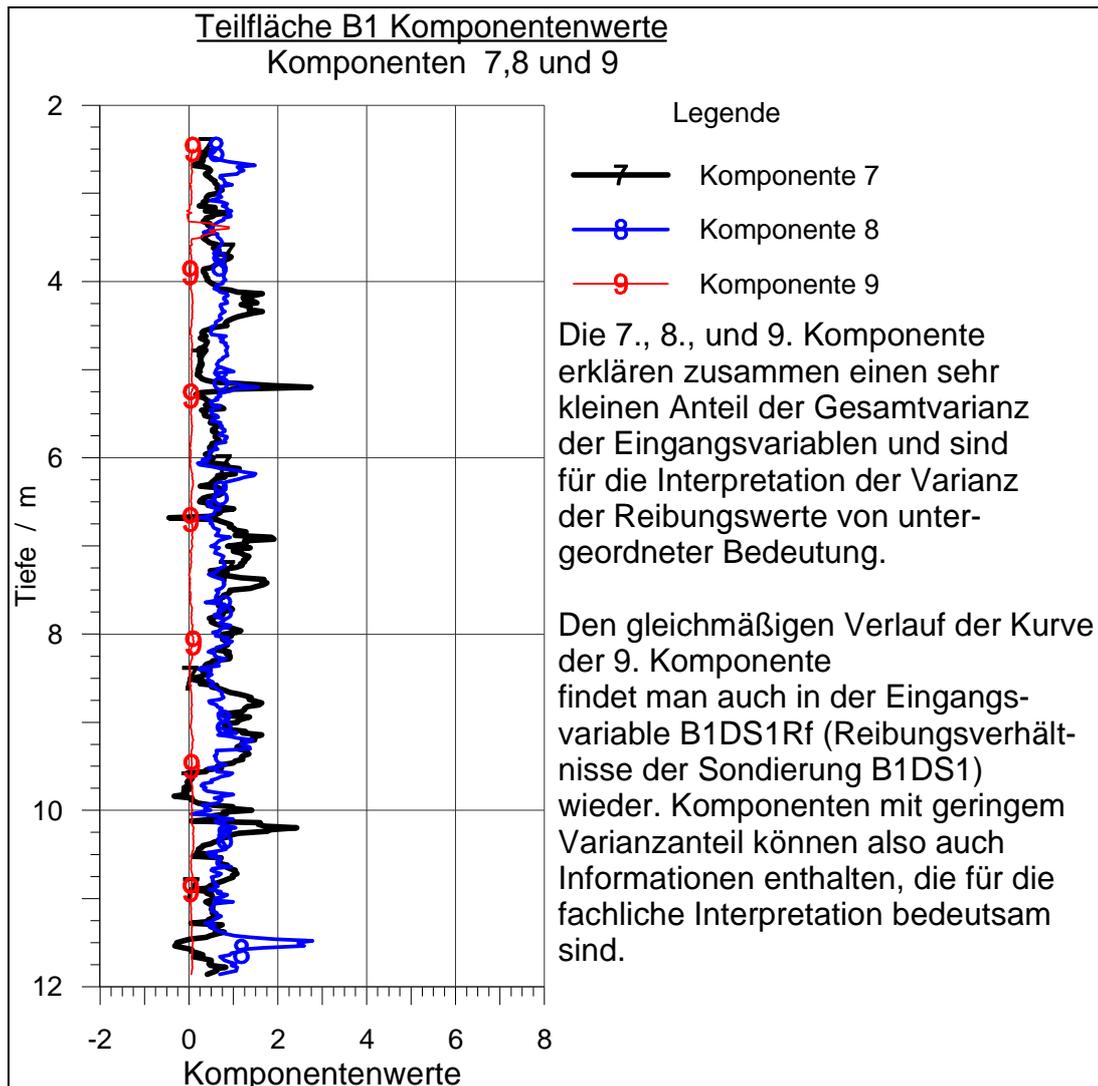


Bild 41: Komponentenwerte  $R_f$  Teilfläche B1

Für die Sondierung B1DS4, die bei der Analyse der Spitzendruckwerte neben der Sondierung B1DS6 selektiert wurde, wird ein Wert des Eigenvektors von  $e = 0,94$  für die 6. Komponente errechnet. Diese 6. Komponente zeigt im Diagramm der Komponentenwerte (Bild 41) relativ kleine Komponentenwerte. Von diesen kleinen Komponentenwerten kann auf kleine Reibungsverhältnisse geschlossen werden. Diese sind sowohl durch fehlende organische Bestandteile als auch durch fehlende Feinkornanteile im untersuchten Bereich zu erklären, also durch sandige und kiesige Böden.

In Bild 42 sind die Komponentenwerte der 7. bis 9. Hauptkomponente graphisch dargestellt. Sie beschreiben einen geringen Anteil der Variabilität der Eingangsvariablen.



*Bild 42: Komponentenwerte  $R_f$  Teilfläche B1*

### *Schlussfolgerung*

Im Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse wurden zwei Sondierungen nach kritischen Kriterien separiert, die sich innerhalb der durch den Schüttkörper belasteten Fläche befinden:

- Sondierung B1DS6: Wegen der kleineren Spitzendrücke und der höheren Reibungsverhältnisse ist aus geotechnischer Sicht ein ungünstiger Baugrundaufbau vorhanden.
- Sondierung B1DS4: Wegen der größeren Spitzendrücke in Verbindung mit kleinen Reibungswerten ist ein gegenüber der Sondierung B1DS6 verformungsarmerer Baugrund zu erwarten.

Mit Hilfe der extrahierten Komponenten wurden die Eingangsvariablen (Sondierungen) charakterisiert. Für die weiteren Betrachtungen werden die ursprünglichen Variablen herangezogen.

## **7 Probelastung**

### **7.1 Großversuche**

Die Probelastung ist das sicherste Verfahren, um eine integrale Information über die Verformungseigenschaften des Baugrundes zu gewinnen.

Bei Anwendung geeigneter Auswerteverfahren wird eine spannungsabhängige Funktion des Steifemoduls bestimmt. Erfahrung besteht mit statischen Belastungen (z. B. [47]). Bei dynamischen Belastungen sind ergänzende Untersuchungen erforderlich. Erste Untersuchungen sind für die Überfahrt schwerer Fahrzeuge vorhanden [40].

Im Folgenden wird die Konzeption einer Probelastung auf einer Tagebaukippe und darauf begründet eine Mindestkonfiguration einer statischen Probelastung dargestellt.

### **7.2 Standort und Bauwerk**

Bei der Wahl des Standortes der Probelastung sind die Art des vorgesehenen Bauwerkes und dessen Lage zu berücksichtigen. Durch die Probelastung findet eine Vorbelastung und somit eine Baugrundverdichtung statt. Ein Teil der Setzungen wird durch die Probelastung vorweggenommen. Es muss geprüft werden, ob die durch die Probelastung belastete Fläche zur Bauwerksgründung genutzt werden kann. Anderenfalls muss auf eine benachbarte Fläche mit ähnlichen Baugrundeigenschaften ausgewichen werden. Folgende Angaben des vorgesehenen Bauwerkes sind zu beachten:

- bebaute Fläche,
- Angaben über Gründungsmöglichkeiten, die sich aus der Bauwerksspezifik ergeben, Gründungstiefe, Belastungsgrößen und Arten (statisch, dynamisch),
- Besonderheiten der Nutzung des Bauwerkes.

### **7.3 Rahmenbedingungen und Dimensionierung**

Im ersten Schritt ist zu beurteilen, ob die zur Verfügung stehenden geotechnischen Informationen bereits eine Gründung mit dem üblichen Risiko ermöglichen oder weitere Untersuchungen erfordern. Der Belastungskörper ist mit Hilfe von Modellrechnungen so zu dimensionieren, dass die gewonnenen Messwerte der später zu lösenden Aufgabe entsprechen. Dazu gehören:

- zu erwartende Sohlpressung  $\sigma_v$  (Dimension: Kraft/Fläche),
- Lasteinflusstiefe  $t$  (Dimension: Länge),
- Zeitsetzungsverhalten  $s(t)$  (Dimension: Länge je Zeiteinheit),
- Abmessungen im Grundriss des Bauwerks und des Schüttkörpers (Dimension: Länge),
- räumliche Orientierung der Belastungsfläche, die aus technologischen Angaben der Tagebauführung folgt (z. B. Strossenrichtung und andere Angaben),
- Art des Belastungsmaterials,
- Beschaffbarkeit der benötigten Materialien, Zufahrtsmöglichkeiten.

Es wird empfohlen, vor dem Versuch eine Setzungsprognose zur Optimierung des Meßsystems und anderer Parameter zu erstellen. Modellrechnungen sind durchzuführen, wenn die Beanspruchungen des Bodens durch höhere Belastungen oder auf größeren Belastungsflächen erfolgt als durch die Probelastung gegeben ist. Das theoretische Modell und dessen Parameter sind zu prüfen und zu präzisieren.

Die Größe einer Belastung wird durch die geotechnischen Erfordernisse, aber auch die technischen Möglichkeiten am Standort begrenzt. Die Belastungsfläche sollte eben sein oder den speziellen Gegebenheiten entsprechen. Die Maximalsetzung unter einer Schüttung mit einer Sohlpressung von ca. (140 ... 160) kN/m<sup>2</sup> und einer Belastungsfläche von  $\geq 60 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  betrug auf einer Mischbodenkippe ca. 0,5 m [46][47][49].

Bisherige Probelastungen wurden im Rahmen der Eignungsprüfung oder geotechnischen Bewertung von Tagebaukippen für großflächige Bauwerke (Ablagerungsflächen) mit großer setzungsgebender Tiefe durchgeführt.

## 7.4 Mess- und Untersuchungsprogramm

Als Mindestkonfiguration des Meßsystems wird empfohlen:

- Setzungsmessungen durch *Horizontalinklinometer*, jeweils mindestens eins in Längs- und in Querrichtung der Belastungsfläche; Messungen erfolgen in Messprofilen quer und parallel zu den Schüttrippen.
- Setzungsmessung in Tiefenabschnitten von  $\Delta h \leq 2,0 \text{ m}$  durch *Setzungspegel*, wobei die Anordnung der Setzungspegel von der jeweiligen Aufgabe abhängig ist, z. B. zur Bestimmung der Parameter einer Steifigkeitsfunktion oder von tiefenabhängigen Steifemoduln,
- *Vertikalinklinometer*, wenn horizontale Verformungen von Bedeutung sind,
- mindestens eine Spannungsmessung in der Belastungssohle,

- frostsicher gegründete Oberflächen-Messpunkte zur Setzungsmessung *außerhalb* der Belastungsfläche in Verlängerung der Horizontalinklinometer im Abstand von 0,5 m, 1,0 m, 2,0 m, 3,5 m, 5,0 m, 10 m, 20 m von der Grenze der Belastungsfläche.
- *Grundwasser*-Messstelle in der Nähe der Belastungsfläche,
- zusätzliche Instrumentierung nach speziellen Erfordernissen.

Weiterhin ist die Kippenoberfläche einzumessen (Höhe, Lage), auch Bereiche außerhalb der Belastungsfläche. Es erfolgen

- Nullmessung aller Meßsysteme,
- Messung in zeitlichen Abständen während der Belastungsphase,
- Messungen  
 am Schüttende,  
 am 4. Tag nach Schüttende,  
 am 9. Tag, 16. Tag, 25. Tag, 36. Tag, 49. Tag, 81. Tag, 121. Tag, 169. Tag,  
 ein Jahr nach Schüttende und weitere Messungen zur Erfassung von  
 Langzeitdeformationen.

Auszuwerten sind:

- lastabhängige Setzungen,
- beeinflusster Bereich,
- Zeit – Setzungs – Verlauf,
- Schiefstellungen  $s'(x) = \frac{ds}{dx}$  (7-28)
- Krümmungen  $k(x) = \frac{s(x)'''}{(1 + s(x)'^2)^{\frac{3}{2}}}$  . (7-29)

In erster Näherung gilt für kleine Setzungen und kleine Winkel  $\alpha$

$$k(x) = s''(x). \tag{7-30}$$

Die Krümmung  $k$  lässt sich aus den Setzungsmessungen ausreichend genau schätzen zu

$$k = \frac{s_{P1} - 2 \cdot s_{P2} + s_{P3}}{(dx_p)^2} \tag{7-31}$$

- mit  $dx_p \dots$  konstanter Abstand zwischen den Punkten  $P_1$  und  $P_2$  bzw.  $P_2$  und  $P_3$ ,  
 $s_{P1,2,3}$  Setzungen an den Punkten  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$ , wobei  $P_2$  der mittlere Punkt  
 ist.  
 $\alpha \dots$  Winkel zwischen den Punkten  $P_1$ ,  $P_2$  und dem Mittelpunkt des  
 Krümmungskreises.

Für den Krümmungsradius gilt  $R = k^{-1}$ .

Wird bei Setzungsberechnungen das Steifemodulverfahren angewandt, sollte der spannungsabhängige Steifemodul berechnet werden, um eine Nutzung für das tatsächlich vorgesehene Bauwerk zu ermöglichen:

$$E_s(\sigma_z) = \nu \cdot p_a \left( \frac{\sigma_z}{p_a} \right)^\omega \quad (7-32)$$

mit  $\sigma_z$  ... Vertikalspannung in Abhängigkeit von der Tiefe  $z$ ,  
 $\nu$  ... Steifebeiwert,  
 $\omega$  ... Steifeexponent,  
 $p_a$  ... atmosphärischer Druck,  $p_a = 1$  bar.

Wird die Belastungsfläche nach der Probelastung Teil des Baustandortes, sind während der Entlastung ebenfalls Setzungen bzw. Hebungen zu messen.

## 7.5 Messergebnisse

Die wichtigsten Parameter der Probeschüttung wurden bereits im Abschnitt 6.2 „Erkundungs- und Versuchsprogramm“ dargestellt.

Die wichtigsten Ergebnisse der Setzungsmessungen [39] werden in den nachfolgenden Bildern gezeigt und erlauben folgende Schlussfolgerungen:

- Die Baugrundvergütung reduzierte die Setzungsbeträge erheblich. Im Beispiel (Bild 43) wurde der Setzungsbetrag etwa halbiert. Dieses Bild zeigt die Setzungskurven, die jeweils in einem Inklinometerrohr gemessen wurden, das in der Mitte und längs der Belastungsfläche eingebaut wurde. Die Lage der Querinklinometer ist in Bild 43a skizziert.
- Mit der Vergütung werden nicht nur die Setzungsbeträge vermindert, sondern auch der Baugrund vergleichmäßigt. Auf der vergüteten Fläche verläuft die Setzungskurve gleichmäßiger gegenüber der auf der nicht vergüteten Fläche. Schiefstellungen und Krümmungen werden erheblich gemindert (Bild 45).
- Die Setzungen zeigen im westlichen Bereich der Belastungsfläche B1 ihr Maximum, und nicht, wie bei einem gleichmäßigen Baugrund zu erwarten gewesen wäre, in der Mitte der Belastungsfläche. Die Messergebnisse der Querinklinometer (Bild 44) bestätigen diesen Sachverhalt. Der Bereich der größten Setzungen ist in Anhang 2.1 eingezeichnet.

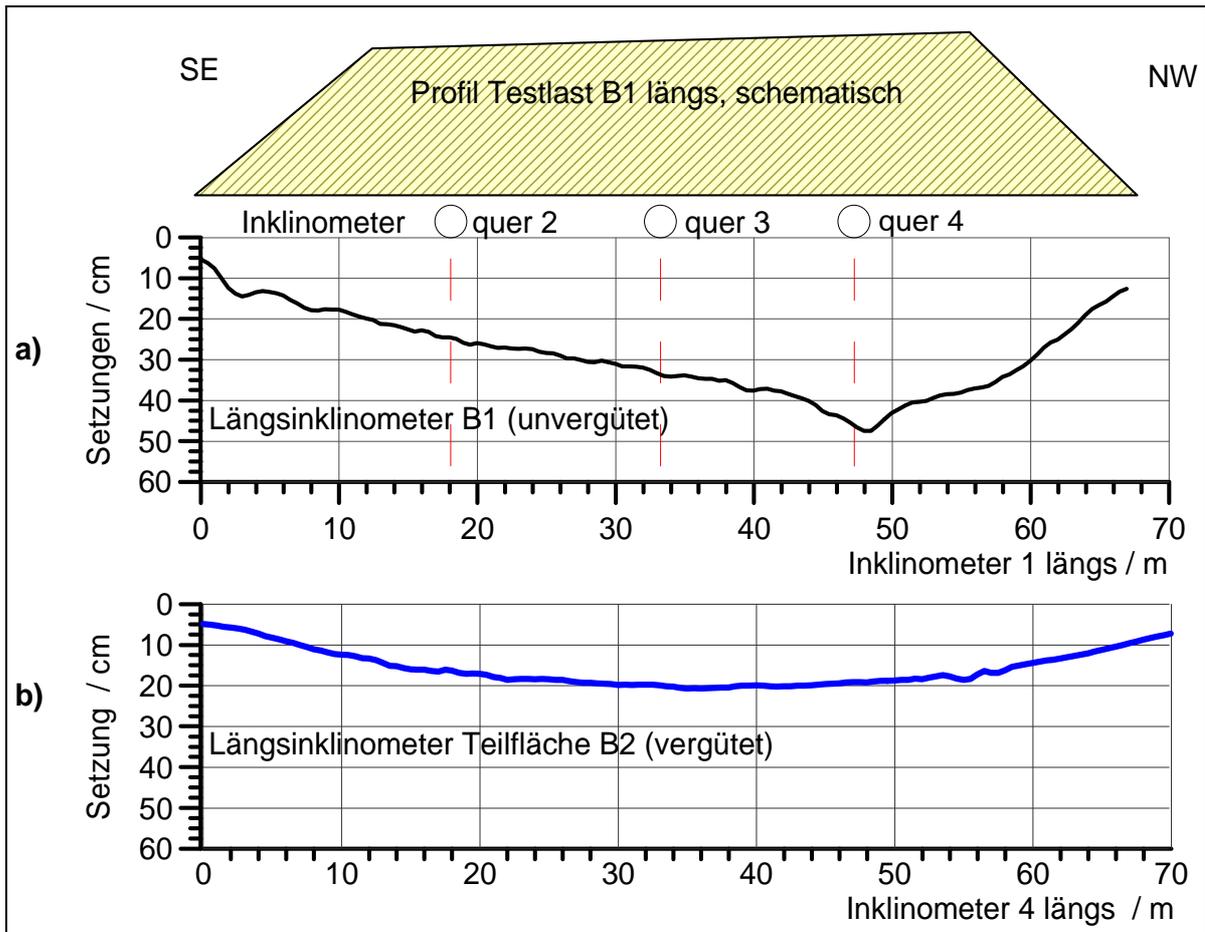


Bild 43: Setzungen im Längsprofil, a) B1 ohne Vergütung, b) B2 mit Vergütung,

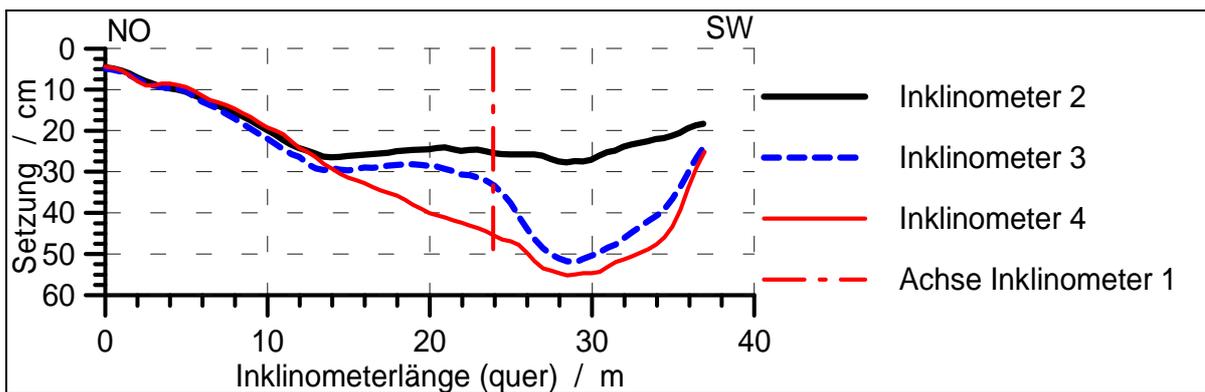


Bild 44: Setzungen im Querprofil Teilfläche B1

Die größeren Setzungen im Bereich der Sondierungen B1DS6 und B1DS7 können auf bindige bzw. kohlige Materialien zurückgeführt werden.

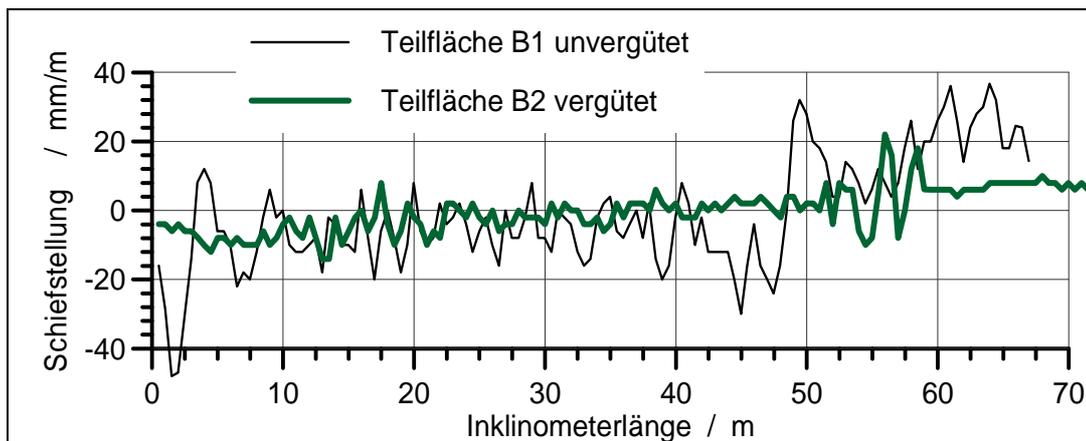


Bild 45: Schiefstellungen im Längsprofil mit und ohne Vergütung

## 7.6 Setzungsberechnung

Nachfolgend werden Ergebnisse von Setzungsberechnungen dargestellt. Eingang fanden Verformungsparameter, die u. a. auf Grundlage der separierten Drucksondierungen B1DS4 und B1DS6 abgeleitet wurden. Ein Flussbild der Setzungsberechnung zeigt nachfolgendes Bild 46.

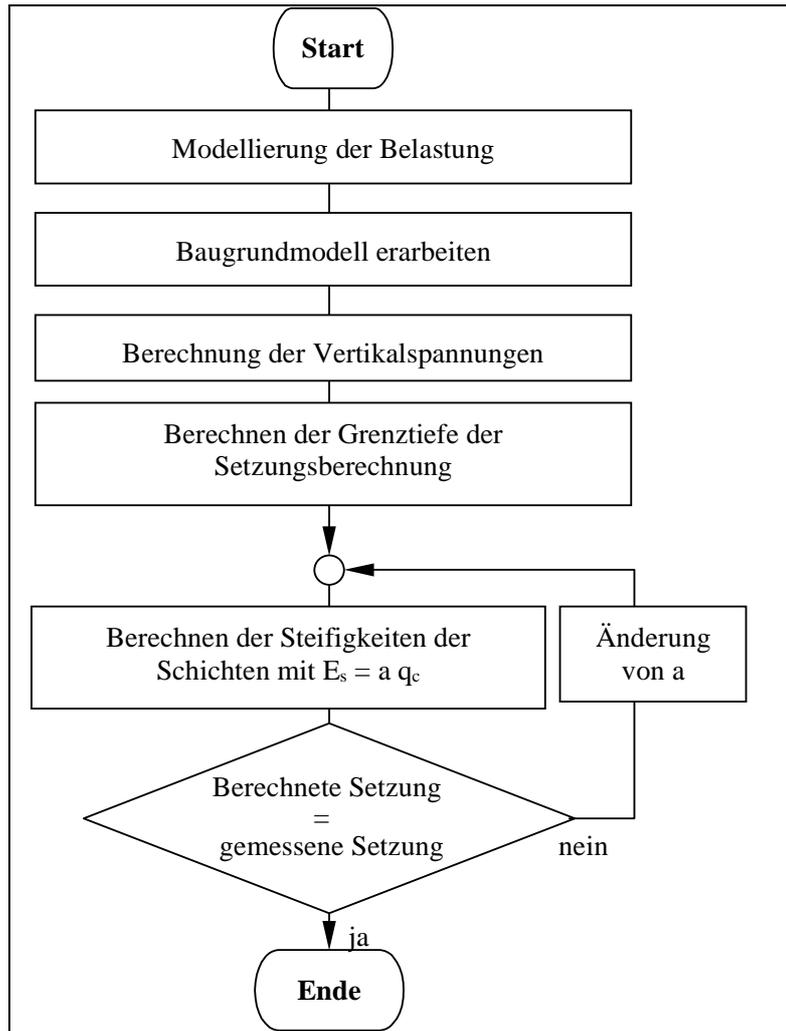


Bild 46: Flussbild der Setzungsberechnung

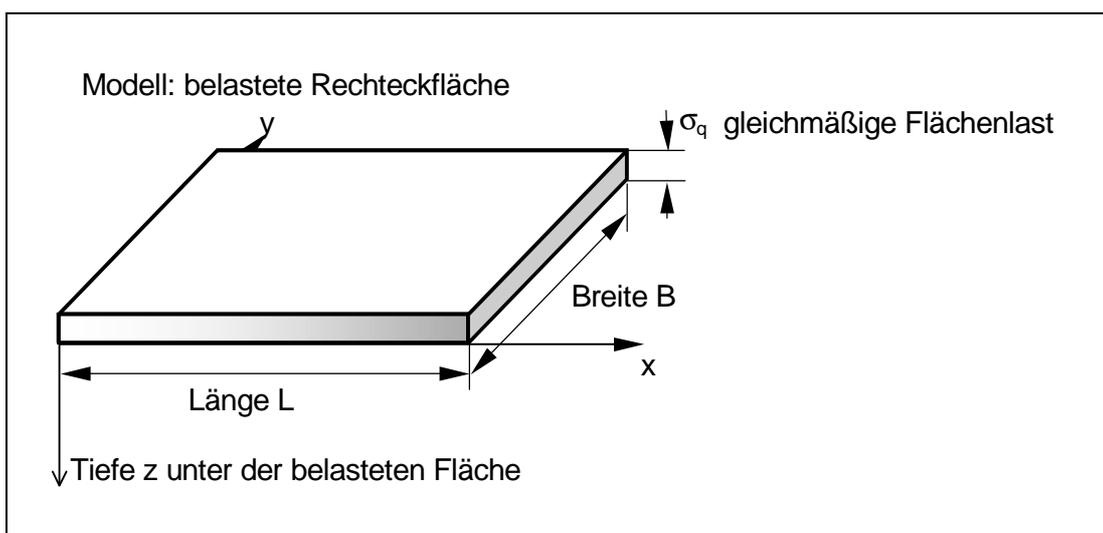


Bild 47: Gleichmäßig belastete Rechteckfläche [44]

Werden die Spannungen unterhalb eines Punktes in der Rechteckfläche gesucht, kann diese Rechteckfläche in 4 Teilflächen aufgeteilt werden, so dass die Eckpunkte der 4 Teilflächen im gewünschten Punkt aneinander stoßen (Bild 48).

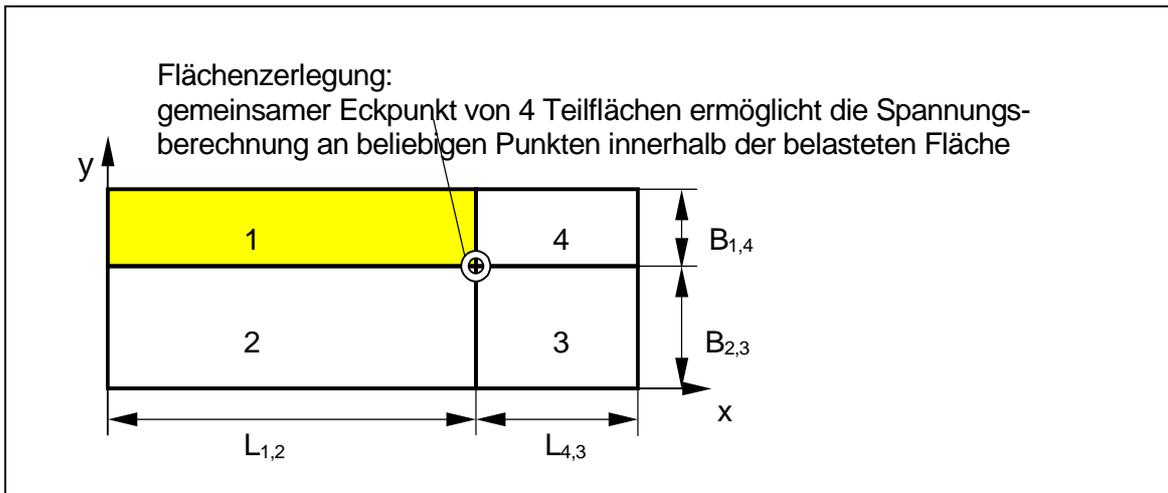


Bild 48: Zerlegung in 4 Teilflächen

Die Superposition der Spannungen unter den Eckpunkten der Teilflächen liefert die Spannung unterhalb des gemeinsamen Eckpunktes [44]:

$$\sigma_{zz,q} = \sigma_{zz,q1} + \sigma_{zz,q2} + \sigma_{zz,q3} + \sigma_{zz,q4} \quad (7-33)$$

Ist die Rechteckfläche ungleichmäßig belastet, so können die Lösungen von GIROUD für linear veränderliche Vertikallasten verwendet werden. Daneben können zusätzliche Teilflächen berücksichtigt werden, deren Spannungseinfluss unterhalb der belasteten Fläche durch Superposition berechnet wird. Dadurch lassen sich Dammschüttungen nachbilden (Bild 49) [144].

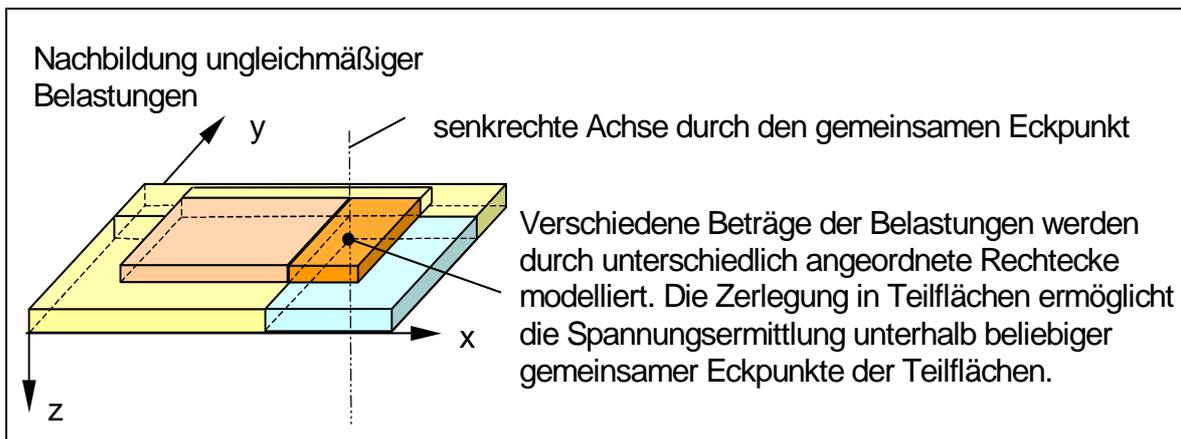


Bild 49: Ungleichmäßige Belastung, Beispiel einer Dammschüttung

Der Spannungsmittelwert in einer Schicht wird durch die Fassregel berechnet [44]:

$$\bar{\sigma}'_{zz,i} = \frac{1}{6} \cdot (\bar{\sigma}'_{zz,o} + 4 \cdot \bar{\sigma}'_{zz,m} + \bar{\sigma}'_{zz,u}), \quad (7-34)$$

$\bar{\sigma}'_{zz,o/m/u}$  Spannungswert in der Schicht oben, in der Mitte und unten

Für die Abschätzung der Setzung  $w$  sind folgende Vereinfachungen erlaubt [44]:

$$w_i = \frac{h_i}{E_{s,i}} \cdot \bar{\sigma}'_{zz,qi}, \quad (7-35)$$

$h_i$  Höhe der i-ten Schicht,

$E_{s,i}$  Steifemodul der i-ten Schicht,

$\bar{\sigma}'_{zz,qi}$  Spannungsmittelwert in der i-ten Schicht.

Die Gesamtsetzung ergibt sich aus der Summe der Setzungen aller  $n$  Schichten:

$$w = \sum_{i=1}^n w_i \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (7-36)$$

Für den Standort Zwenkau (Teilfläche B1) wurde das in Bild 50 gezeigte Baugrundmodell erarbeitet.

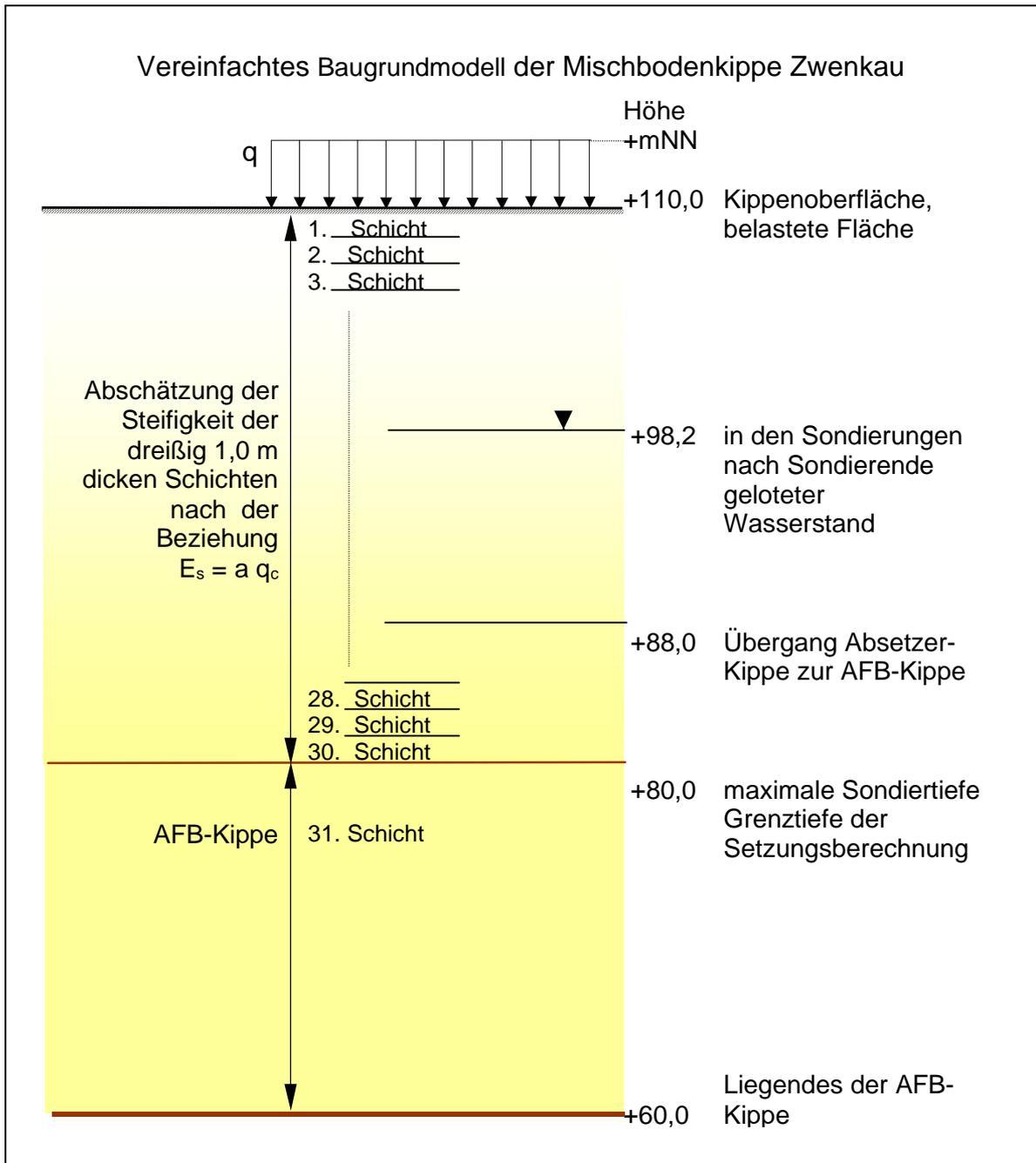


Bild 50: Baugrundmodell der Mischbodenkippe, nach [39]

Die Wichten der Teilschichten sind in Tabelle 18 eingetragen. Die Wichten der Schicht 1 bis Schicht 12 wurden aus dem schichtweisen Mittelwert der Kernrohre aller Aufschlusb Bohrungen der Teilfläche B1 berechnet. Die Wichten der darunter liegenden Schichten wurden geschätzt, da keine Zahlenwerte zur Verfügung standen.

Mittlere Spitzendruckwerte je Schicht und daraus berechnete Steifemoduln zeigt die Tabelle im Anhang 10.9.

Tabelle 18: Baugrundmodell - Wichten der Teilschichten

| Nr. der Schicht | Tiefe der unteren Schichtgrenze / m | Wichte der Teilschicht / kN/m <sup>3</sup> | Hinweis  |
|-----------------|-------------------------------------|--|--|
| 1               | 1,0                                 | 15,2                                       | berechnet aus dem schichtweisen Mittelwert der Dichten der Kernrohre aus Aufschlussbohrungen |
| 2               | 2,0                                 | 16,0                                       |  |
| 3               | 3,0                                 | 14,4                                       |  |
| 4               | 4,0                                 | 14,5                                       |  |
| 5               | 5,0                                 | 14,3                                       |  |
| 6               | 6,0                                 | 15,3                                       |  |
| 7               | 7,0                                 | 15,7                                       |  |
| 8               | 8,0                                 | 15,8                                       |  |
| 9               | 9,0                                 | 15,4                                       |  |
| 10              | 10,0                                | 15,0                                       |  |
| 11              | 11,0                                | 15,9                                       |  |
| 12              | 12,0                                | 16,4                                       |  |
| 13              | 13,0                                | 19,5                                       |  |
| 14-36           | 14 ... 36                           | 19,5                                       | Wert geschätzt für wassergesättigten, locker-mitteldicht gelagerten schluffigen Sand [129]   |

Die maximale mittlere Sohlpressung unter der Dammschüttung auf der Teilfläche B1 beträgt

$$\sigma_{q,max} = \sigma_{zzq,max} = h_{max} \cdot \bar{\gamma} = 7,0 \text{ m} \cdot 15,76 \text{ kN/m}^3 = 110,3 \text{ kN/m}^2,$$

$h_{max}$  maximale Schütthöhe des Dammes zur Belastung der Teilfläche B1,

$\bar{\gamma}$  mittlere Wichte des Schüttmaterials aus 18 Dichtebestimmungen.

Ab der Grenztiefe rufen die rechnerischen vertikalen Spannungen aus der Bauwerksbelastung nur noch vernachlässigbar kleine Setzungen des Untergrundes hervor [37]. Die Setzungsberechnung wird in der Grenztiefe beendet, wenn gilt:

$$\frac{\sigma_{zz,q}}{\sigma_{zz,\gamma}} \leq G, \tag{7-37}$$

- $\sigma_{zz,q}$  Vertikalspannung in der Tiefe infolge der Auflast,
- $\sigma_{zz,\gamma}$  Änderung der Vertikalspannung in der Tiefe infolge des Eigengewichts des Baugrundes.

Auf natürlich entstandenen Böden ist für  $G = 0,2$  zu setzen [37]. Die Beziehung (7-37) ist auch auf Mischbodenkippen anwendbar, jedoch sollte wegen der zu erwartenden lockeren Lagerung über die gesamte Kippendicke der Wert  $G = 0,1$  gesetzt werden [40]. Bild 51 zeigt in der linken Bildhälfte den tiefenabhängigen Verlauf der Vertikalspannungen  $\sigma_{zz,q}$  und  $\sigma_{zz,\gamma}$ . In der rechten Bildhälfte ist  $\frac{\sigma_{zz,q}}{\sigma_{zz,\gamma}}$  in Abhängigkeit von der Tiefe aufgetragen.

Für das vorliegende Baugrundmodell und den Belastungsfall kann in der Grenztiefe von 34,0 m unter der Geländeoberfläche bzw. bei +76,0 mNN die Setzungsberechnung beendet werden.

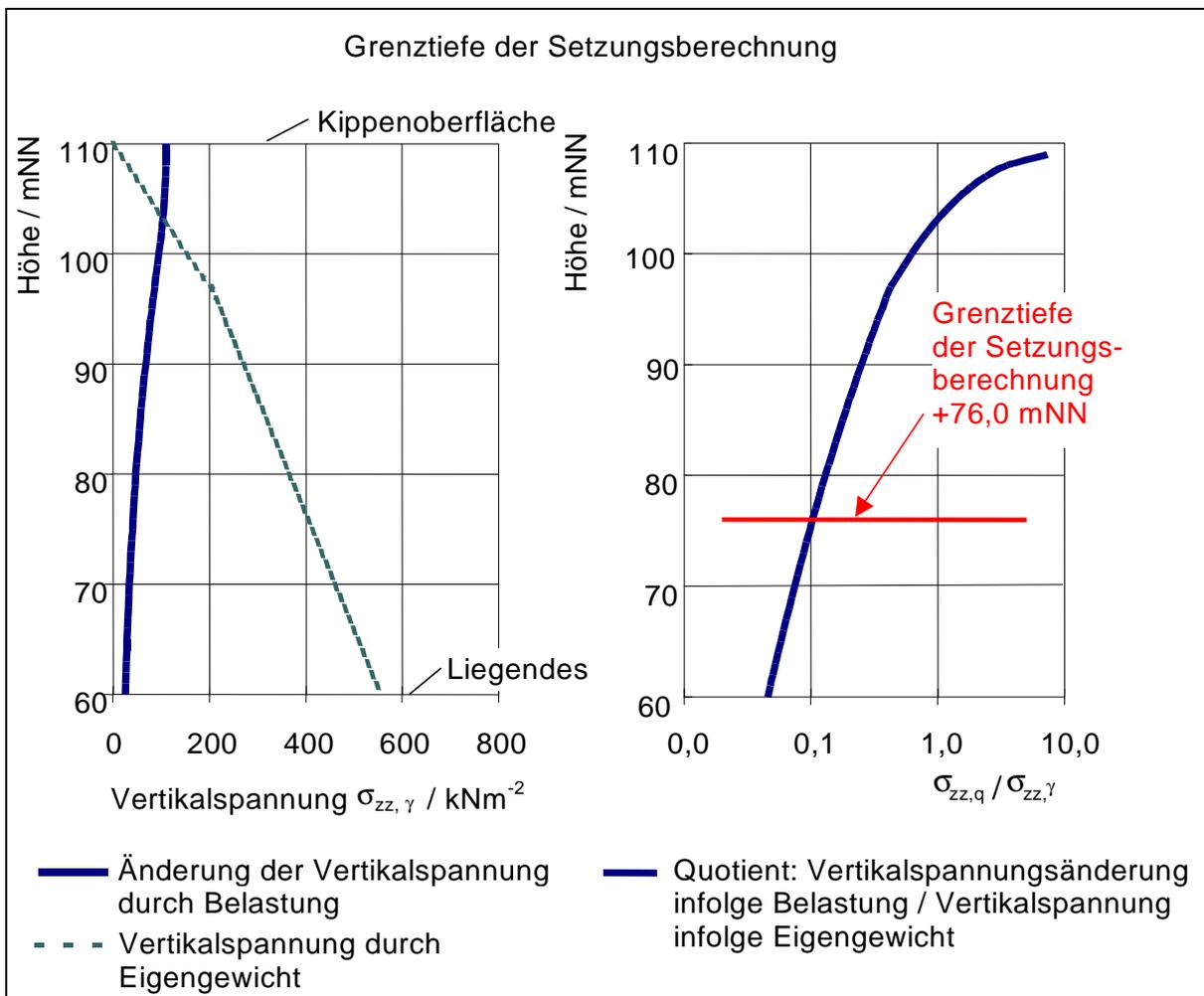


Bild 51: Grenztiefe der Setzungsberechnung

Zur Setzungsberechnung nach der Beziehung (7-35) wird der Steifemodul  $E_s$  benötigt. Die Ergebnisse von Drucksondierungen können als Abschätzung für die Größe der Steifigkeit des Baugrundes unter Verwendung entsprechender Vorinformationen dienen, wie z. B. aus Setzungsbeobachtungen in ähnlichen Situationen. Die Beziehung

$$E_s = a \cdot q_c, \quad (7-38)$$

$E_s$  ...       Zusammendrückungsmodul, Steifemodul,  
 $a$  ...        empirischer Funktionsparameter

ist sehr einfach und stellt nur eine grobe Näherung dar, liefert aber für viele Einsatzfälle ausreichend genaue Schätzungen [102][133].

Für Mischbodenkippen gilt für den Funktionsparameter  $a$  ein Wert in der Größenordnung von

$$a = (2,5 \dots 4) [40]. \quad (7-39)$$

Die Setzungsberechnung erfolgte an den beiden Aufschlusspunkten der Sondierungen B1DS4 und B1DS6 auf der belasteten Fläche. Für jeden dieser Punkte wird ein Funktionsparameter  $a$  iterativ berechnet, für den gilt:

$$a_{\text{berechnet}} = a_{\text{gemessen}} \cdot \quad (7-40)$$

Die Werte für  $a_{\text{gemessen}}$  wurden aus den unmittelbar benachbarten Setzungsmessungen der im Inklinometer (Bild 44 auf Seite 105) entnommen. Sie betragen:

$$w_{\text{B1DS4}} = 0,21 \text{ m und } a_{\text{B1DS6}} = 0,51 \text{ m.}$$

Für den Wert  $q_c$  aus der Beziehung (7-38) wurde in Tiefenschritten von  $\Delta t = 1,0 \text{ m}$  der Mittelwert  $\bar{q}_c$  für jede einzelne Sondierung berechnet. Der gesamte, durch die Drucksondierungen erfassten Tiefenbereichen von  $t = +110,0 \text{ mNN}$  bis  $t = +80,0 \text{ mNN}$  wurde berücksichtigt.

Die Beziehung (7-40) erfüllen den Wert

- $a = 4,00$  für die Sondierung B1DS4 und
- $a = 2,42$  für die Sondierung B1DS6.

Die mittleren Spitzendruckwerte und der jeweilige daraus abgeleitete Steifemodul sind in Anhang 10.9 für jede Schicht dargestellt.

Der berechnete Funktionsparameter  $a$  für die Sondierung B1DS4 liegt mit  $a = 4,0$  an der oberen Grenze des in der Beziehung (7-39) angegebenen Wertebereichs. Aus den Sondierdaten der Sondierung B1DS6 wurde ein Parameter  $a = 2,4$  errechnet, der den unteren Wertebereich geringfügig unterschreitet.

### *Bewertung*

Mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse (PCA) wurden aus den 9 Drucksondierungen der Teilfläche B1 zwei Sondierungen extrahiert, die sich hinsichtlich der Spitzendrücke und Reibungsverhältnisse einander am deutlichsten unterscheiden.

Setzungsberechnungen an den beiden Aufschlusspunkten dieser beiden Sondierungen im Vergleich mit den dazugehörigen Messwerten der Setzungsmessung in unmittelbar benachbarten Messprofilen ergeben, dass der in der Literatur angegebene Wertebereich des Funktionsparameter  $a$  der Beziehung (7-39) auch in etwa für die Mischbodenkippe Zwenkau zutreffend ist. In einem horizontalem Abstand von 14 m wurde sowohl der Maximalwert ( $a = 4,0$  bei B1DS4) als zutreffend nachgewiesen und auch der Minimalwert mit  $a = 2,4$  (Sondierung B1DS6) geringfügig unterschritten.

Sofern in den Sondierdaten bestimmte Zusammenhänge vorhanden sind, können mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse solche Zusammenhänge erkannt und geotechnische Informationen abgeleitet werden.

In den Aufschlussdaten können Effekte auftreten, die den Maßstabeffekten zuzuordnen sind. Sind diese Effekte auf geotechnische Sachverhalte zurückzuführen, so dürfen sie nicht eliminiert werden. Wichtige, in den Daten enthaltene Eigenschaften wären verloren.

Die Untersuchung zeigt, dass die Verformungseigenschaften der Mischbodenkippe Zwenkau in relativ geringen horizontalen Abständen (14 m) beide entgegengesetzte Extremwerte erreichen könnten. Der Wertebereich für den Parameter  $a$  muss zumindest für den Standort Zwenkau auf  $a = (2,4 \dots 4,0)$  geringfügig korrigiert werden. Eine Vorschrift, welcher Wert für den Funktionsparameter  $a$  zur Ableitung eines Steifemoduls aus den Spitzendruckwerten gewählt werden soll, kann nicht angegeben werden. Die Wahl obliegt letztendlich dem erfahrenen Geotechniker. Die in dieser Arbeit verwendeten Messwerte der Sondierungen B1DS4 und B1DS6 können dabei als Entscheidungshilfe dienen.

## 8 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die vorliegende Arbeit stellt Besonderheiten der Tagebaukippen – insbesondere der Mischbodenkippe – dar, die insbesondere hinsichtlich der Exploration als Baugrund, bei der Wahl von Untersuchungsmethoden und –umfang relevant sind.

Tagebaukippen entstehen durch technologische Prozesse. Gewinnung, Transport und Ablagerung der Lockergesteine führen zu Lagerungsverhältnissen, die sich von den Lagerungsverhältnissen natürlicher Sedimente unterscheiden. In Mischbodenkippen existieren Material- und Dichteinhomogenitäten.

Die Materialinhomogenitäten der Mischbodenkippe haben ihre Ursachen

- im Aufbau des früheren Deckgebirges,
- in technologischen Prozessen der Gewinnung, des Transportes und der Verkippung, die zu keiner gleichmäßigen Durchmischung, sondern zu wechselnden Ablagerungen führen. Während des Versturzes kann sich das Lockergestein entmischen. In Mischbodenkippen können die abgelagerten Materialien bereits in Abständen von  $< (1 \dots 2)$  m wesentlich verschieden sein.
- im Feinkornanteil, der nicht gleichmäßig verteilt, sondern in Form von Klumpen auftritt. Diese Klumpen werden auch als Pseudokorn bezeichnet.

Die Dichteinhomogenitäten resultieren

- aus Materialinhomogenitäten einschließlich der Pseudokornstruktur,
- aus Schütt- und Fließvorgängen. Große Verformungen und Entmischungsvorgänge treten während des Schüttvorganges auf. Das Lockergestein fließt, kann verdichtet oder wieder aufgelockert werden.
- aus Verdichtung durch Prozesse, die nach dem Schütten auftreten. Dazu gehören z. B. Materialumlagerungen an der Kippenoberfläche, Eigensetzungen, lokal begrenzte Sackungen durch eindringendes Niederschlagswasser oder weitere technologische Sachverhalte, wie z. B. Arbeitsebenen.

Aus den Material- und Dichteinhomogenitäten folgen

- Unterschiede im Scher- und Verformungsverhalten,
- Durchlässigkeitsunterschiede, die zu lokal veränderlichen Wassergehalten führen können und verhindern, dass sich ein gleichmäßiger Grundwasserstand in der Mischbodenkippe ausbildet.

Der Umfang von Aufschlussarbeiten muss für jede Baumaßnahme wegen der Vielzahl der Ablagerungsmöglichkeiten einer Mischbodenkippe den differenzierten Anforderungen der unterschiedlichsten Bauwerke bzw. dem Erkundungsziel angepasst werden.

Bohrungen mit durchgehender Kerngewinnung (LINER) und Drucksondierungen sind zur Erkundung von Mischbodenkippen geeignet. Bei der Bewertung des Reibungsbeiwertes  $R_f$  der Drucksondierungen soll immer die Größe des Spitzendrucks  $q_c$  berücksichtigt werden.

Die Anwendung geostatistischer Verfahren am Beispiel der Mischbodenkippe Zwenkau scheiterte wegen der Inhomogenität der Eigenschaften des Untersuchungsgebietes im Zusammenhang mit der begrenzten Anzahl der Messdaten.

Statistische Verteilungsparameter (Lokalisationsmaße, Streuungsmaße, Formparameter) und graphische Darstellungen (Boxplot, Histogramm) liefern aus den Messdaten der Drucksondierungen Informationen über unterschiedliche Baugrundverhältnisse der Mischbodenkippe.

Die Hauptkomponentenanalyse ist verteilungsunabhängig anwendbar und liefert auf Basis einer Eingangsdatenmatrix durch Transformation eine neue Matrix der Hauptkomponenten. Diese neue Matrix der Hauptkomponenten enthält die gesamte ursprüngliche Variabilität der Eingangsdaten, einschließlich der Messfehler. Es müssen keine statistischen Parameter geschätzt werden. Die erforderliche Unabhängigkeit der Messwerte von Sondierungen wurde dargelegt. Die Hauptkomponentenanalyse ist vom Grundsatz her auf Messdaten von Drucksondierungen anwendbar.

Erkundungsprogramme sind bereits in der Planungsphase auf die Erfordernisse statistischer Verfahren abzustimmen, um eine sinnvolle und aussagekräftige Interpretation zu ermöglichen.

In den Aufschlussdaten können Effekte auftreten, die den Maßstabeffekten zuordenbar sind. Sind diese Effekte auf geotechnische Sachverhalte zurückzuführen, so dürfen sie nicht eliminiert werden. Wichtige in den Daten enthaltene Eigenschaften wären verloren.

Zuverlässigste Methode zur Bestimmung der tatsächlichen Deformationseigenschaften der Tagebaukippe sind Probelastungen. In Abhängigkeit der Instrumentierung sind belastungsabhängige, ortsabhängige und zeitabhängige Deformationsanteile bestimmbar.

Aus 9 Drucksondierungen der Teilfläche B1 wurden zwei Sondierungen extrahiert, die sich hinsichtlich der Spitzendrücke und Reibungsverhältnisse einander am deutlichsten unterscheiden. Gemessene Setzungen im Bereich dieser zwei Sondierungen bestätigen, dass diese unterschiedlichen Eigenschaften das Verformungsverhalten prägen.

Setzungsberechnungen im Vergleich mit den dazugehörigen Messwerten der Setzungsmessung ergeben, dass der in der Literatur angegebene Wertebereich des Funktionsparameters  $a$  der Beziehung (7-39) für die Mischbodenkippe Zwenkau zutreffend ist. Im horizontalen Abstand von 14 m wurde sowohl der Maximalwert als zutreffend nachgewiesen als auch der Minimalwert nur geringfügig unterschritten.

Die Beziehung  $E_s = a \cdot q_c$  zur Ableitung eines Steifemoduls  $E_s$  aus dem Spitzendruckwert  $q_c$  ist auf Mischbodenkippen anwendbar, muss jedoch Kippenbezogen kalibriert werden.

Auf der Mischbodenkippe Zwenkau gilt  $a = (2,4 \dots 4,0)$ . Eine allgemeingültige Definition, welcher Wert für  $a$  gewählt werden muss, kann jedoch nicht angegeben werden.

Der Inhomogenität geschuldet ist eine Einzelfallbetrachtung  
eines jeden Kippenstandortes zwingend erforderlich.

Jede Untersuchung des Baugrundes Tagebaukippe, insbesondere jedoch der Mischbodenkippen der untersuchten Ablagerungsart, und daraus abgeleitete Entscheidungen sind Einzelfallentscheidungen. Eine generelle Lösung oder ein generelles Vorgehen zu empfehlen, ist nicht möglich.

Im Hinblick auf die Interaktion zwischen Baugrund und Bauwerk ist die begründete effektive Definition von Art und Umfang einzusetzender Erkundungsmaßnahmen und laborativen Analysen sowie der speziellen korrekten Anwendung statistischer Verfahren auf die gewonnenen Daten nur unter Berücksichtigung der Anforderungen und Möglichkeiten der vorgesehenen Nutzung des Standortes zulässig.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] AKIN, H., SIEMES, H. (1988): Praktische Geostatistik. Springer Verlag Berlin.
- [2] ALBER, D. (1987): Ein stochastisches Bodenmodell für geotechnische Aufgaben. TU München, Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik. H. 8.
- [3] ALBER, D. (1991): Überlegungen zur stochastischen Formulierung von Bodenkennwerten. Bauingenieur 66(1991) S. 239-242.
- [4] AL HAMDAN, W. (2004): Drucksondierungen auf Kippen als Basis zur Bewertung des Kippenaufbaus. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation.
- [5] AREIAS, L.; IMPE, W. V. (2004): Interpretation of SCPT data using cross-over and cross-correlation methods. Engineering geology for infrastructure planning in Europe (a European perspective). Herausg. Robert Hack. Berlin (u. a.). Springer. S. 110 –116.
- [6] BACKHAUS, K., ERICKSON, B., PLINKRE, W., WEIBER, R. (1994): Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer. Berlin Heidelberg.
- [7] BASILEVSKY, A. (1994): Statistical Factor Analysis and Related Methods. Theory and Applications. John Wiley & Sons New York.
- [8] BECHLER, A., GEHRISCH, M., VOIGT, P. (1972): Beitrag zur Standsicherheit von Kippen aus nichtbindigem Lockergestein in Restlöchern. Neue Bergbautechnik 2(1972) H.2 S.104-111
- [9] BEGEMANN, H. K. S. (1965): The friction jacket cone as an aid in determining the soft profile. In: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Convergence on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Vol. 1, S.17-20.
- [10] BEHRINGER, R., VANEL, L., CLEMENT, E. (1999): Physikal Review „E“, 1.11.1999.
- [11] BELLMANN, H.-J., RÖSLER, H.-J., STARKE, R. (1984): Faziesdifferenzierung und Tonmineralbestand der oligozänen Schichten in der Leipziger Bucht. Zeitschrift f. geolog. Wiss. Vol. 4 (1984) Nr. 12, S. 409-418.
- [12] BERGMANN, W. (1991): Tiefenverdichtung eines Müllkörpers als Voraussetzung für eine dauerhaft wirksame Zwischenabdichtung. Wasserwirtschaft 1991, H.5, S.3-10.
- [13] BERKNER, A., WOLF, P. u.a. (2004): Der Braunkohlenbergbau im Südraum Leipzig, Bergbau in Sachsen, Band 11. Regionale Planungsstelle Leipzig, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie Dresden und Sächsisches Oberbergamt Freiberg.
- [14] BEUTEL, P., KÜFFNER, H. (1980) Statistik – Programm – System für die Sozialwissenschaften. SPSS 8. Stuttgart, New York. Fischer Verlag.

- [15] BEYER, O., HACKEL, H., PIEPER, V., TIEDGE, J.: Mathematik für Ingenieure, Naturwissenschaftler, Ökonomen, Landwirte, Band 17 Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik, 6. Auflage B. G. Teubner Verlagsgesellschaft K.-G., Leipzig, 1991
- [16] BILZ, P. (1971): Kennzeichnung der Heterogenität Poc. Budapest 3 Donau europ. Konf. für Bodenmechanik und Grundbau 1971.
- [17] BÖKER, F. (1997): S-Plus. Learning by doing. Eine Anleitung zum Arbeiten mit S-Plus. LUCIUS Stuttgart.
- [18] BOURDEAU, P. L.; AMUNDARAY, J. I. (2005): Non-parametric simulation of geotechnical variability. *Geotechnique* 55(2005)2, S. 95-108.
- [19] BRACKLEIN, M., HAUSNER, H., STIEHLER, R. (1985): Baugrundverbesserung durch dynamische Intensivverdichtung. *Bauplanung-Bautechnik*. 39 Jg., H. 6, S. 268-271.
- [20] BROSIUS, G., BROSIUS, F. (1996): SPSS BASE System and Professional Statistics. International Thomson Publishing. Bonn, Albany.
- [21] BRUNNER, A. (1988): Geotechnische Aspekte bei der Errichtung von Brücken auf Tagebaukippen. *Bauplanung / Bautechnik* 42(1988) H. 11 S. 493-497.
- [22] BRUZZI, D., BATTAGLIO, M. (1987): Pore pressure measurements during cone penetration test. ISMEST Research Report No. 229.
- [23] BUCZKO, U. (1999): Modellierung des Wasserflusses und Stofftransports in der wasserungesättigten Zone heterogener Braunkohletagebau-Abraumkippen der Lausitz. Brandenburgische Technische Universität Cottbus.
- [24] CATTELL, R. B. (1966): The Scree Test for the Number of Factors. *Mult. Behav. Res.*, 1, S. 245-276.
- [25] CHARLES, J. A., BURFORD, D. (1987): Settlement and groundwater in opencast mining backfills. *Proceedings der 9. Europäischen Konferenz über Bodenmechanik und Grundbau, Dublin 1987 T.1 S. 289-292.*
- [26] DERMIETZEL, E. (1970): Zur Frage der Anfangsstandfestigkeit von Absetzerschüttungen im tiefen Tagebau. *Braunkohle* 1970 H. 11, S. 406-412.
- [27] DERMIETZEL, E. (1986): Über den Zusammenhang zwischen Abbau- und Kippenführung und der Standfestigkeit von Tagebauböschungen. *Braunkohle* 38(1986) H. 12 S. 354-360.
- [28] DERMIETZEL, E. (1989): Behandlung bodenmechanischer Probleme auf der Grundlage neuer Forschungsergebnisse. *Braunkohle* 1989 H.9 S.314-317.
- [29] DIENER, U. (1999): Sackungen von Kippen – Modellversuche und statistisch gestützte Betrachtungen. TU Bergakademie Freiberg, Dissertation.
- [30] DMITRUK, S., LYSIK, B. (1978): Über die Anwendung mathematischer Modelle in der Geotechnik. *Freiberger Forschungshefte FFH A 334.*
- [31] DORSCHNER, E. (1965): Der Setzungsverlauf auf Tagebaukippen des Braunkohlenbergbaus und dessen Einflußfaktoren. *Bergakademie Freiberg, Dissertation.*
- [32] DROSDOWSKI, G., MÜLLER, W., SCHOLZE-STUBENRECHT, W., WERMKE, M. (1996): *Duden Deutsches Universallexikon*. Mannheim.

- [33] ECKSTEIN, P. P. (1997): Angewandte Statistik mit SPSS. Wiesbaden. Gabler Verlag.
- [34] ENGLERT, K., FUCHS, B. (2003): VOB/C-Reglungen zum Baugrund- und Systemrisiko. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt. Heft 64, S. 241-253.
- [35] ERLNBACH, L. (1933): Über das Verhalten des Sandes bei Belastungsänderungen und Grundwasserbewegung. TH Berlin, Dissertation.
- [36] ERLER, R. (1997): Untersuchungen im Ödometer und Schergerät unter Berücksichtigung der Besonderheiten der Mischbodenkippen. TU Bergakademie Freiberg, Diplomarbeit.
- [37] EVB (1993): Empfehlungen „Verformungen des Baugrundes bei baulichen Anlagen“ Deutsche Gesellschaft für Geotechnik. Ernst & Sohn Essen.
- [38] FAUST, J. (2001): Drucksondierung. Erkundung und Untersuchung des Baugrunds: Kommentar zu DIN V ENV 1997-2 und DIN V ENV 1997-3. Beuth (u. a.) S. 59 – 71.
- [39] FCB (1998): Messergebnisse der Verformungsmessungen Testlasten B1 und B2. FCB Fachcenter Bodenmechanik Espenhain. unveröffentlicht.
- [40] FCB (1999): Leitfaden "Bauen auf Kippen" - 2. Überarbeitung vom 17.06.1999. unveröffentlicht. FCB Fachcenter Bodenmechanik Espenhain. unveröffentlicht.
- [41] FCB (1999a): Forschungsthema: Bauen auf Mischbodenkippen. Laborergebnisse vom 10.02.1999. FCB Fachcenter Bodenmechanik Espenhain. unveröffentlicht.
- [42] FIEDLER, J. (1984): Berechnungen zur Gründung einer Industriehalle auf einer heterogenen Kippe. Bauplanung / Bautechnik 38(1984) 1 S. 22-23.
- [43] FORMAZIN, J. (1988): Bebauung von Kippen des Braunkohlentagebaus. Bauplanung / Bautechnik 42(1988) H.11 S.483-486.
- [44] FÖRSTER, W. (1987): Bodenmechanik. Lehrmaterial der Sektion Geotechnik und Bergbau, Wissenschaftsbereich Bodenmechanik an der Bergakademie Freiberg.
- [45] FÖRSTER, W., GUDEHUS, G., et al. (1998): Setzungsfließen und seine Folgen. LMBV mbH Berlin, TU Bergakademie Freiberg, Universität Karlsruhe.
- [46] FÖRSTER, W., KNOBLOCH, U. (1994): Probeschüttung auf dem Kippenstandort Wolfsberge für die geplante Sonderabfalldeponie Südbrandenburg. In: 4. Geotechnisches Seminar des Landesumweltamtes Brandenburg. Cottbus. 20.10.1994.
- [47] FÖRSTER, W., KNOBLOCH, U. (1995): Zur Problematik der Errichtung von Deponien auf Tagebaukippen. In: Nutzung bergbaulicher Hohlräume als Speicher und Deponien. CUTEC-Institut Clausthal. 26./27.10.1995.
- [48] FÖRSTER, W., KNOBLOCH, U. (1999): Bauen auf Mischbodenkippen des Braunkohlenbergbaus im Mitteldeutschen Revier. Teilprojekt: Erarbeitung von Erkundungsmethoden, Abschlussbericht. LMBV mbH Berlin, TU Bergakademie Freiberg.
- [49] FÖRSTER, W., WALDE, M. (1992): Tagebaukippen als Baugrund. Literaturrecherche im Auftrag der LAUBAG, unveröffentl. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik.

- [50] FRANK, A. (1977): Die Verdichtung bindiger Böden durch dynamische Einwirkung mit schweren Fallgewichten. In: Straße und Untergrund - Neue Bauverfahren und Erdbaubetrieb. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen. H. 2/1977. Köln.
- [51] FRIEDRICH, St. (2005): Flächendeckende Ermittlung bodenphysikalischer Parameter aus Drucksondiererergebnissen mittels Korrelationen zu Ergebnissen radiometrischer Sondierungen. TU Bergakademie Freiberg. Dissertation.
- [52] GAU, CH., TIEDEMANN, J. (2004): Mathematisch begründete Homogenbereiche als Voraussetzung zur verbesserten Anwendung geostatistischer Verfahren in der Ingenieurgeologie. Spezielle Beiträge aus der Ingenieurgeologie und Hydrogeologie. Festschrift. Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie 89. Hrsg.: R. Azam. Aachen/Mainz. S. 23 – 33.
- [53] GIROUD, J. P. (1972). Tables pour le calcul des foundations. Dunoud editeur. Paris.
- [54] GRABE, J.; KOENIG, F. (2004): Zur aushubbedingten Reduktion des Drucksondierwiderstandes. Die Bautechnik 81(2004) 7, S. 569 – 577.
- [55] GRUSCHKA, G. (1988): ABC Tagebau. Dt. Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig.
- [56] GUDEHUS, G. (1980): Materialverhalten von Sand: Neue Erkenntnisse. Bauingenieur 55(1980) S. 57-67.
- [57] GUDEHUS, G. (1999): Hinweise zum Leitfaden „Bauen auf Kippen“. unveröffentlicht.
- [58] GUTTMANN, L. (1953): Image Theory for the Structure of Quantitative Variates. In: Psychometrika. 18. S. 277 ff.
- [59] HALLBAUER, G. (1981): Geotechnische Grundlagen für die Errichtung von Eisenbahnstrecken auf Tagebaukippen des Braunkohlenbergbaus unter besonderer Berücksichtigung des Eigensetzungsverhaltens. HfV Dresden. Dissertation.
- [60] HAMDAN, AL, V. (2004): Drucksondierungen auf Kippen als Basis zur Bewertung des Kippenaufbaus. RWTH Aachen. Dissertation.
- [61] HANISCH, J., STRUCK, W. (1985): Charakteristischer Wert einer Bodeneigenschaft aus Stichprobenergebnissen und zusätzlicher Information. Bautechnik 10(1985), S. 338-348.
- [62] HANSPACH, P. (1982): Dynamische Intensivverdichtung - Verfahren zur Verbesserung der Tragfähigkeit des Baugrundes und zur Reduzierung seiner Setzungen. Bauplanung-Bautechnik. 36. Jg. H. 10, S. 440-442.
- [63] HANSPACH, P. (1987): Zur Anwendung der dynamischen Intensivverdichtung im Verkehrsbauwesen. Bauplanung- Bautechnik. 41. Jg. H. 1, S. 21-23.
- [64] HEILER, S., MICHELS, P. (1994): Deskriptive und explorative Datenanalyse. Oldenburg Verlag München und Wien.
- [65] HELLWEG, V., RIZKALLAH, V. (1980): Ein Verfahren zur Abschätzung des Sackungsverhaltens bei gleichförmigen Feinsanden und Maßnahmen zur Verdichtung nichtbindiger Böden durch Sackungen infolge Bewässerung. Deutsche Baugrundtagung in Mainz 1980, S. 239-261.
- [66] HICKS, M. A.; ONISIPHOROU, C. (2005): Stochastic evaluation of static liquefaction in a predominantly dilative sand fill. Geotechnique 55(2005)2 S. 123-133.

- [67] HIRD, C. C., SPRINGMAN, S. M. (2006): Comparative performance of 5 cm<sup>2</sup> and 10 cm<sup>2</sup> piezocones in a lacustine clay. *Geotechnique* 56(2006)6. S. 427-430.
- [68] HOLL, D. L. (1940): Stress transmission to earth. *Proceedings High. Res. Board*, Vol. 20, p. 709.
- [69] HRYCIW, R. D. (1992): Flat dilatometer (DMT), cone penetrometer (CPT) and seismic cone (SCPT) evaluation of select New Madrid liquefaction sites. *Seismological research letters (USA)*, Band 63 Heft 3, S. 357-366.
- [70] HWANG, H. (1994): Ein neues kinetisches Modell für rasche Granulatströmung. TH Darmstadt, Fachbereich Technische Mechanik. Dissertation.
- [71] JAKI, J. (1948): Influence of Ground Water Level Oscillation on Subsidence of Structures. In: *Proceedings of European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol. 1. Wiesbaden. S 131-135.
- [72] JOHNSON, R. A., WICHERN, D. W. (1992): *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice Hall. New Jersey. 1992.
- [73] JOLAS, P., PFEIFFER, H., SCHEFFLER, H. (1995): Lastsetzungen von Haldendeponien auf unverdichteten Kippenflächen. Vortragsmanuskript.
- [74] JOURNAL, A. G., HUIJBREGTS, Ch. J. (1978): *Mining Geostatistics*. Academic Press, London 1978.
- [75] KAISER, H. K., RICE, J. (1974): LITTLE JIFFY, MARK IV, IN: *Educational and Psychological Measurement*. 34, S. 111 ff.
- [76] KAMEL, A. (1988): Festigkeitsuntersuchungen an einem verspülten Sand. Bergakademie Freiberg. Dissertation.
- [77] KATZENBACH, R. (1995): Baugrundrisiko; wer ist in welchen Fällen verantwortlich? *Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt*. Heft 34, S. 147.
- [78] KAUBISCH, M. (1986): Zur individuellen Ermittlung hydrogeologischer Kennwerte von Kippenkomplexen, dargestellt am Beispiel des Braunkohlenbergbaus. Bergakademie Freiberg. Dissertation.
- [79] KÉZDI, A. (1964): *Bodenmechanik Band 1*. Verlag für das Bauwesen Berlin.
- [80] KÉZDI, Á., EGRI, G. (1963): Setzungen im Lös infolge der Erhöhung des Grundwasserabstandes. *Proceedings European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol. 1, Wiesbaden. S. 131-135.
- [81] KLUGE, A. (1997): Anwendung multivariater statistischer Verfahren auf geochemische Fließgewässerdaten des Muldensystems (Sachsen, BRD). *Wissenschaftliche Mitteilungen* 3/1997. Institut für Geologie der TU Bergakademie Freiberg.
- [82] KÖHLER, W.-M. (1996): *SPSS für Windows*. Vieweg. Braunschweig.
- [83] KRAUSE, B., METZLER, P. (1988): *Angewandte Statistik*. VEB Verlag der Wissenschaften Berlin.
- [84] KREUTER, H. (1996): *Ingenieurgeologische Aspekte geostatistischer Methoden*. Universität Karlsruhe, Dissertation.

- [85] KRIGE, D. G. (1951): A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *J. of the Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa*. 52 (6). S. 119–139.
- [86] KRUMBEIN, W. C., GRAYBILL, F. A. (1965): *An Introduction to Statistical Models in Geology*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- [87] LEIBIGER, H., (1964): Über Gesetzmäßigkeiten der Bodenentmischung beim Verkippen von Mischböden in Braunkohletagebauen. *Freiberger Forschungsheft FFH A* 309.
- [88] LMBV (1997): *Erkundungsergebnisse der Testflächen B1 und B2*. LMBV Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbauverwaltungsgesellschaft mbH Fachcenter Bodenmechanik Espenhain. unveröffentlicht.
- [89] LMBV (1998): *Bauen auf Kippen*. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau Verwaltungsgesellschaft mbH. Berlin.
- [90] LUCKE, B., KEßLER, J. (2004): Geotechnische Gestaltung und Sicherung des Speichersystems Lohsa II. *Zeitschrift für angewandte Umweltforschung*. Sonderheft 2004 Heft 14. S. 41-49.
- [91] LUMB, P. (1966): The variability of natural soils. *Can. Geot. Journal* Nr. 2 (1966) S.74-97.
- [92] LUNNE, T., ROBERTSON, P. K., POWELL, J. J. M. (1997): *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Blacky Academic and Professional. London.
- [93] MAHMOUD, M.; WOELLER, D. J.; ROBERTSON, P. K. (2000): Detection of shear zones in a natural clay slope using the cone penetration test and continuous dynamic sampling. *Canadian geotechnical journal*. 37(2000)3, S. 652-661
- [94] MARINELL, G. (1986): *Statistische Auswertung*. Oldenburg Verlag München. 3. Aufl.
- [95] MASARSCH, K. R.; FELLENIUS, B. H.: Vibratory compaction of coarse-grained soils. *Canadian geotechnical journal*. 39(2002)3, S. 695-709.
- [96] MATHERON, G. (1963): Principles of geostatistics. *Econ. Geol., Landcaster/Pa.* 58 (1963), pp. 1246-1266.
- [97] MATSCHAK, H. (1969): Beiträge zur Strukturforchung an Tagebaukippen. *Bergbautechnik* 1969. H6 S. 289-290.
- [98] MATSCHAK, H. (1969a): Beiträge zur Strukturforchung an Tagebaukippen. *Bergbautechnik*. 1969. H10 S. 510.
- [99] MAUGERI, M; PUGLISI, A. (1986): CPT Data for geotechnical zoning of large ares. IN: *Proceedings of the international symposium on engineering geology problems in seismic areas*. 3(1986) S. 373-386.
- [100] MENGES, G. (1968): *Grundriss der Statistik. Teil 1 Theorie*. Westdeutscher Verlag Köln.
- [101] MORTENSEN, J. K., Hansen, G., Sørensen, B. (1991): Correlation of CPT and field vane Test for clay tills. *Danish Geotechnical Society Bulletin* 7. 62. S.

- [102] MUHS, H., WEIß, K. (1971): Untersuchung von Grenztragfähigkeit und Setzungsverhalten flach gegründeter Einzelfundamente in ungleichförmigen nicht-bindigen Boden. Mitteilungen der Degebo Heft 26.
- [103] NEHRING, H. (1971): Auswertung von Kippensetzungsbeobachtungen. Mitteilungen aus dem Markscheidewesen. 78(1971) S. 273-287.
- [104] OMER, J. R., DELPAK, R., ROBINSON, R. B. (2006): A new computer program for pile capacity prediction using CPT data. Geotechnical Engineering (2006)24. S. 399-426.
- [105] PHOON, K. K.; QUEK, S. T.; AN, P. (2004): Geostatistical analysis of cone penetration test (CPT) sounding using the modified Bartlett test. Canadian geotechnical journal 41(2004)2, S. 356-365.
- [106] REINHÄCKEL, G., SCHRADER, D., KRÜGER, G., STROBL, P., MÜLLER, A., VOLK, P., WIEGAND, U., GLÄßER, W., KAUFMANN, H. (2000): Analyse des Thermalverhaltens und der stofflichen Zusammensetzung der Förderbrückenkippe Zwenkau mit Fernerkundungsdaten. Braunkohle Surface Mining 52(2000) Nr. 1, S. 63-70.
- [107] RETHADI, L. (1963): Die Sackungen von rolligen Böden infolge der Aufnahme von Kapillarwasser. Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. 1, Wiesbaden 1963. S. 295-300.
- [108] ROBERTSON, P. K. (1986): In situ testing and application to foundation engineering. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 23. S. 573-594.
- [109] ROBERTSON, P. K. (1990): Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 27. S. 151-158.
- [110] ROBERTSON, P. K., CAMPANELLA, R. G.(1983a): Interpretation of cone penetration tests. Part I: Sand. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 20. S. 718-733.
- [111] ROBERTSON, P. K., CAMPANELLA, R. G.(1983b): Interpretation of cone penetration tests. Part II: Clay. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 20. S. 734-745.
- [112] RWE (1999): Bagger mit GPS. Agenda - Das Magazin von RWE. Nr. 2, S. 21
- [113] SCHEFFLER, H., MOSLER, J. (1990): Nutzung von Restlöchern von Kippenflächen von Braunkohletagebauen für Deponieflächen. In Neuzeitliche Deponietechnik. Balkema 1990.
- [114] SCHMERTMANN, J. H. (1978): Guidelines for cone penetration test, performance and design. US Federal Highway Administration, Washington DC, Report FHWA-TS-78-209, 145 S.
- [115] SCHMIDT, R.. (2005): Braunkohle in Deutschland. Tagebautechnische Fachtagung anlässlich der Verleihung der Ehrensatorwürde der TU BA Freiberg an Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. K.-D. Bilkenroth am 20.04.2005. TU BA Freiberg.
- [116] SCHMIDTALBERS, K. (1969): Meßtechnische Untersuchung des Betriebsablaufes während der Schüttungsperiode von Halden über deren inneren Aufbau. TU Clausthal, Dissertation.
- [117] SCHOLZ, R.-P., KAUBISCH, M. (1986): Zur wasserhaushaltlichen Charakterisierung von Kippenkomplexen im Braunkohlenbergbau. Neue Bergbautechnik 16(1986)H. 12. S. 460-463.

- [118] SCHULTZE, U. (1979): Die Ausbildung der Mischbodenkippen in Abhängigkeit vom Verstoß verschiedener Grundbodenarten in den Bandtagebauen Berzdorf, Greifenhain und Profen - Süd. TU Bergakademie Freiberg.
- [119] SCHULZE, P. M. (1994): Beschreibende Statistik. Oldenburg.
- [120] SIMMER, K. (1994): Grundbau Teil 1. Teubner Stuttgart.
- [121] SKEMTON, A., MAC DONALD, D. H. (1956): The allowable settlement of buildings. Proc. Inst. of Civil Engineering London 5, Vol. III, p. 727-768.
- [122] SPARMANN, H. (1988): Bauwerke auf Kippen des Braunkohlentagebaus. Bauplanung / Bautechnik. 42. 1988. 11. 491-493
- [123] SPERLING, G., VOGEL, W. (1985): Zur Bebauung von Tagebaukippen. Bauplanung / Bautechnik. 39. 1985. 10. 437-441
- [124] STOYAN, D., STOYAN, H., JANSEN, U. (1997) Umweltstatistik. Statistische Verarbeitung und Analyse von Umweltdaten. Teubner Leipzig.
- [125] STOYAN, D. (1993): Stochastik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Akademie Verlag. Berlin.
- [126] STRODZKA, K. (1988): Tagebautechnologie. Dt. Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig. 1988.
- [127] STURMANN, D. (1985): Umweltschutz in der Montanindustrie. Freiburger Forschungsheft A 712. S. 55-58.
- [128] THIELE, R., BAMMANN, U. (2007): Verfahren der Drucksondierung an Land und im Wasser und die geotechnische Interpretation für bautechnische Zwecke. Vortrag zur 3. Erdbaufachtagung – Fachtagung der Bauakademie Sachsen in Dresden am 01. und 02.02.2007 in Dresden.
- [129] von SOOS, P.(1996): Eigenschaften von Boden und Fels; Ihre Ermittlung im Labor. Grundbautaschenbuch Teil 1. 5. Auflage Ernst & Sohn.
- [130] VRETTOS, Ch. (1997): Einflußfunktionen für inhomogene Böden und ihre Anwendung bei der Boden - Bauwerk Interaktion. TU Berlin, Grundbauinstitut Heft 25
- [131] VREUGDENHIL, R., DAVIS, R. and BERRILL, J. (1994): Interpretation of cone penetration results in multilayered soils. Int. journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 18(1994)9, pp. 585-599.
- [132] WEBER, E. (1974): Einführung in die Faktorenanalyse. Gustav Fischer Verlag Jena.
- [133] WEIß, K. (1996): Baugrunduntersuchungen im Feld. In: Grundbautaschenbuch Teil 1, 5. Auflage, Ernst & Sohn Berlin.
- [134] YOSHIMINE, M; ROBERTSON, P. K.; WRIDE, C. E. (1999): Undrained shear strength of clean sands to trigger flow liquefaction. Canadian geotechnical journal, 36(1999)5, S. 891-906.
- [135] YOUNG, R. N., WARKENTIN, B. P. (1975): Soil Properties and Behaviour. Elsevier. Amsterdam.
- [136] ZHANG, G.; ROBERTSON, P. K.; BRACHMAN, R. W.: Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground. Canadian geotechnical journal. 39(2002)5, S. 1168-1180.

## Verwendete Software

[137] STATGRAPHICS Plus for Windows 4.1, Statistical Graphic Corporation,

[138] SPSS 8.0 for Windows, SPSS Corporation,

[139] Grapher for Windows, Ver. 1.32, Golden Software Corporation,

[140] TECPLOT 7.0-4-0 for Windows, Amtec Engeneering Inc.,

[141] Microsoft Excel 97, Microsoft Corporation,

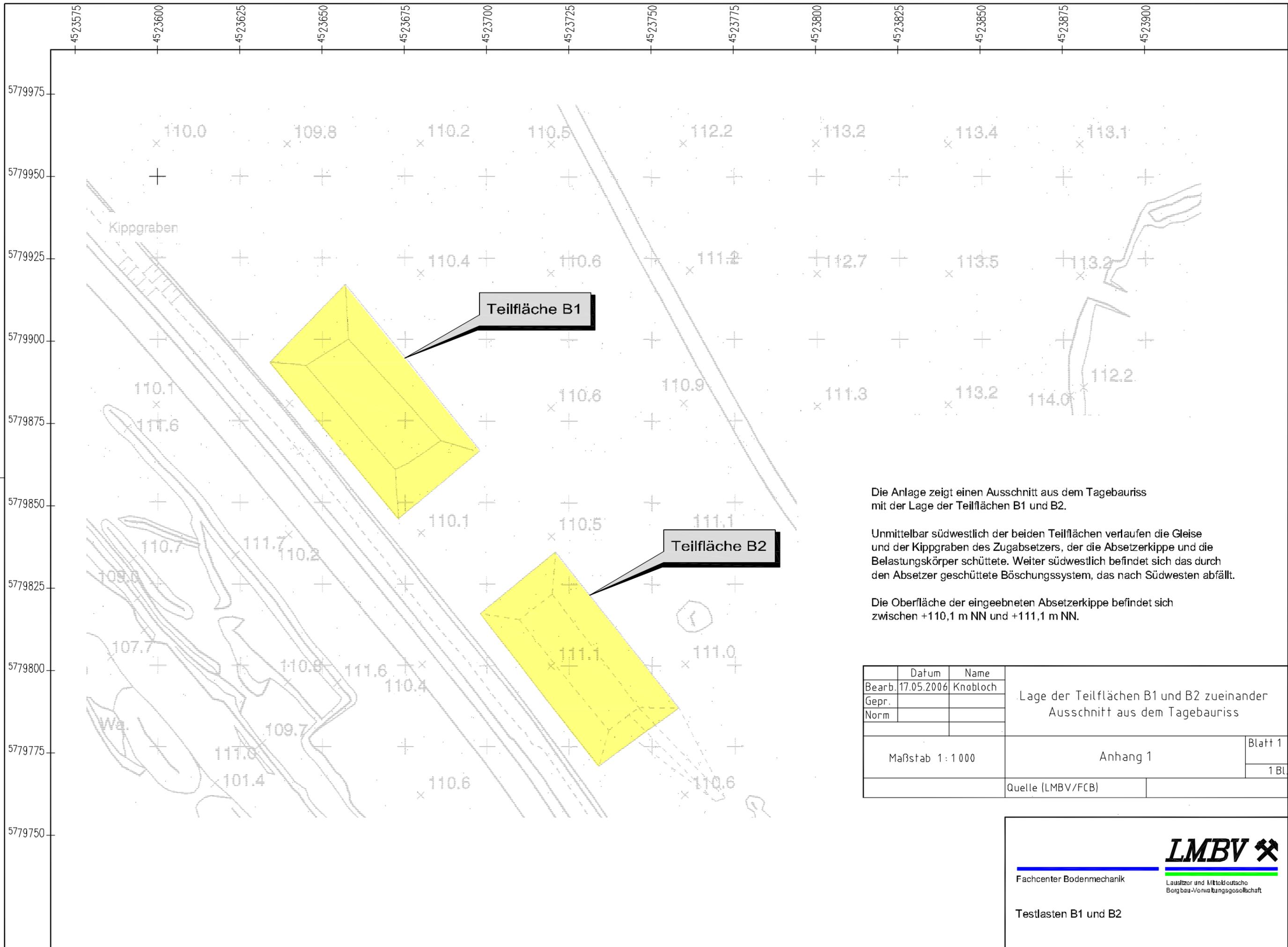
[142] Microsoft Word 97, Microsoft Corporation,

[143] Mathcad 5.0, Mathsoft Incorporation,

[144] Setzungsberechnungsprogramm STM\_CLC,  
TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik.

## 10 Anhang

|                  |  |
|------------------|--|
| Anhang 1         | Lage der Teilflächen B1 und B2 zueinander                          |
| Anhang 2.1       | Lage der Aufschlüsse Teilfläche B1                                 |
| Anhang 2.2       | Bodenprofil Bohrung B1Bg1  |
| Anhang 2.3       | Bodenprofil Bohrung B1Bg7  |
| Anhang 3.1-3.9   | Sondierprofile der Drucksondierungen Teilfläche B1                 |
| Anhang 4.1       | Lage der Aufschlüsse Teilfläche B2                                 |
| Anhang 4.2       | Bodenprofil Bohrung B2Bg8  |
| Anhang 5.1-5.9   | Messprofile der Drucksondierungen Teilfläche B2 ohne Vergütung     |
| Anhang 5.10-5.18 | Messprofile der Drucksondierungen Teilfläche B2 nach Vergütung     |
| Anhang 6.1       | Räumliche Anordnung der Materialgruppen Teilfläche B1              |
| Anhang 6.2       | Räumliche Anordnung der Materialgruppen Teilfläche B2              |
| Anhang 7         | Räumliche Anordnung der Materialgruppen Teilfläche B2Bg2,<br>B2BG8 |
| Anhang 8.1       | Korngrößenverteilungen BGG B                                       |
| Anhang 8.2       | Korngrößenverteilungen BGG C                                       |
| Anhang 8.3       | Korngrößenverteilungen BGG D                                       |
| Anhang 9         | Dichten an Einzelproben  |
| Anhang 10        | Tabellen   |
| Anhang 11        | Begriffe   |
| Anhang 12        | Symbole, Abkürzungen,  |
| Anhang 13        | Tabellenverzeichnis und Bildverzeichnis                            |



Die Anlage zeigt einen Ausschnitt aus dem Tagebauriss mit der Lage der Teilflächen B1 und B2.

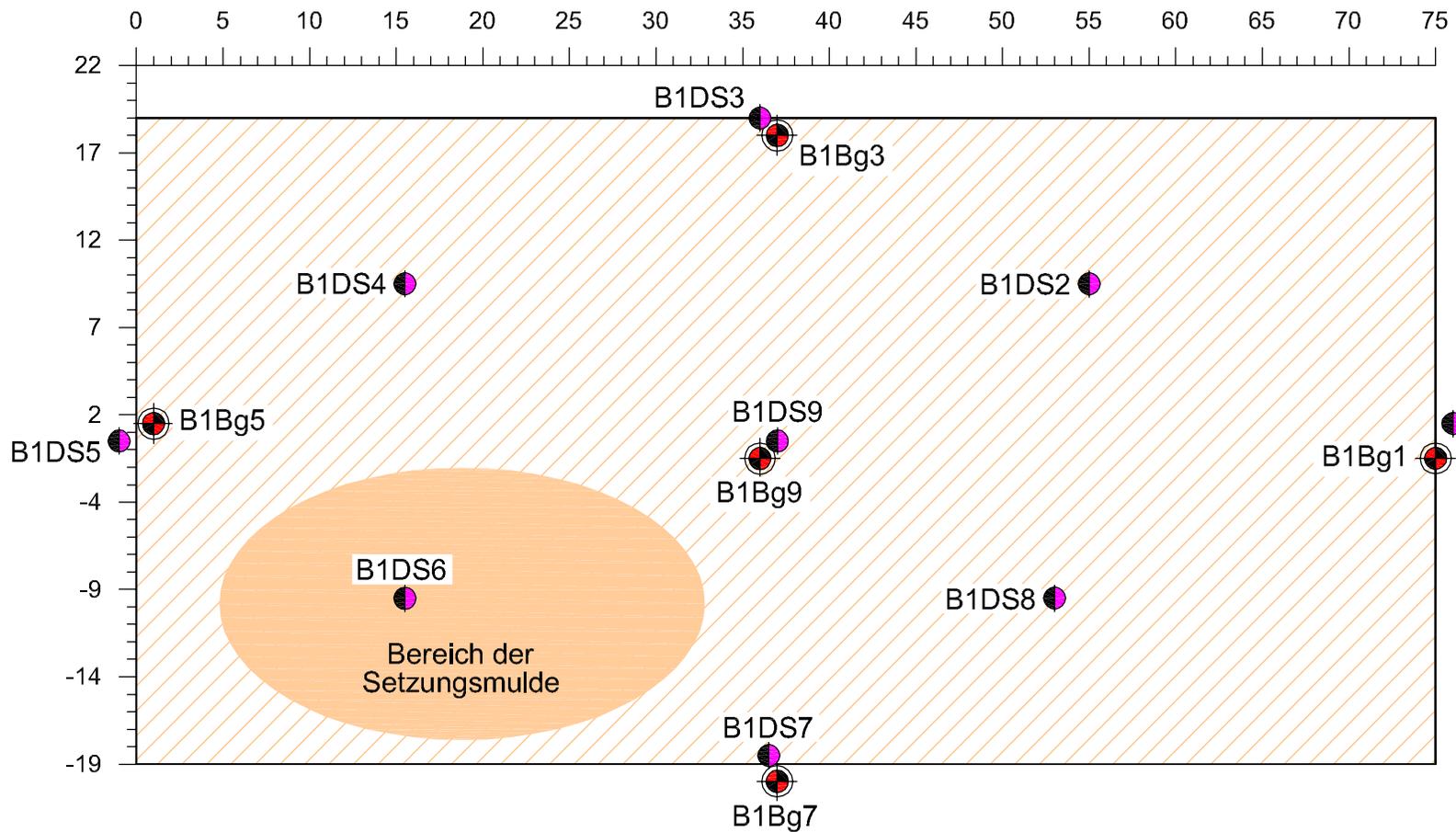
Unmittelbar südwestlich der beiden Teilflächen verlaufen die Gleise und der Kippgraben des Zugabsetzers, der die Absetzerkippe und die Belastungskörper schüttete. Weiter südwestlich befindet sich das durch den Absetzer geschüttete Böschungssystem, das nach Südwesten abfällt.

Die Oberfläche der eingebneten Absetzerkippe befindet sich zwischen +110,1 m NN und +111,1 m NN.

|                   |            |          |   |
|-------------------|------------|----------|---|
|                   | Datum      | Name     | Lage der Teilflächen B1 und B2 zueinander<br>Ausschnitt aus dem Tagebauriss |
| Bearb.            | 17.05.2006 | Knobloch |   |
| Gepr.             |            |          |   |
| Norm              |            |          |   |
| Maßstab 1:1000    |            |          | Blatt 1   |
| Anhang 1          |            |          | 1 Bl.   |
| Quelle (LMBV/FCB) |            |          |   |

  
**LMBV**  
 Fachcenter Bodenmechanik  
 Lausitzer und Mitteldeutsche  
 Bergbau-Verwaltungsgesellschaft

Testlasten B1 und B2



Im Lageplan sind die Bohrungen (B1Bg...) und die Drucksondierungen (B1DS...) eingetragen.

Die unterlegte Fläche im Westen der Teilfläche B1 skizziert den Bereich, in dem nach der Belastung durch einen Schüttkörper (Damm) die größten Setzungen gemessen wurden. Bei gleichmäßigen Baugrundverhältnissen werden die größten Setzungen (Setzungsmulde) in der Mitte der belasteten Fläche erwartet.

Legende:

-  B1Bg7 - Bohrung
-  B1DS7 - Drucksondierung
-  - Grundfläche des Schüttkörpers

|        | Datum      | Name     |
|--------|------------|----------|
| Bearb. | 15.02.2007 | Knobloch |
| Gepr.  |            |          |
| Norm   |            |          |

### Lage der Aufschlüsse Teilfläche B1

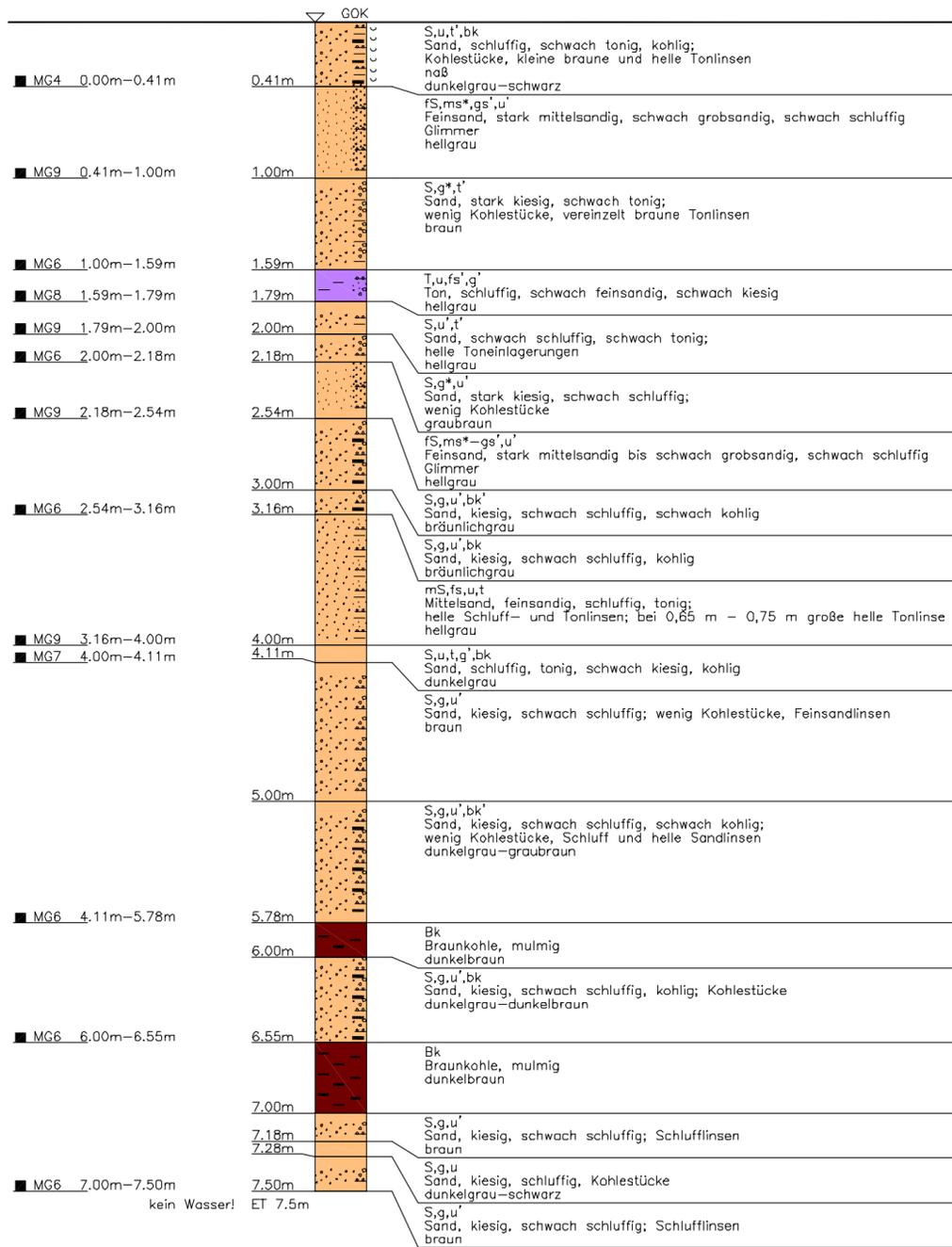
Maßstab 1 : 400

Anhang 2.1

Blatt 1

1 Bl.

## Bohrung B1Bg1



Die Anlage zeigt ein typisches Bodenprofil einer Mischbodenkippe.

| Datum             | Name     |
|-------------------|----------|
| Bearb. 17.05.2006 | Knobloch |
| Gepr.             |          |
| Norm              |          |

Bodenprofil der Bohrung B1Bg1

|              |            |         |
|--------------|------------|---------|
| Maßstab 1:33 | Anhang 2.2 | Blatt 1 |
|              |            | 1 Bl.   |

Quelle (LMBV 1997)

**LMBV**  
Lausitzer und Mitteldutsche  
Bergbau-Verwaltungsgesellschaft

**FCB**  
Fachcenter Bodenmechanik

**Bauvorhaben:**  
Tagebau Zwenkau, Kippe As 993,  
Testfläche B1

**Planbezeichnung:**  
Geologische Ansprache der  
Linerbohrung Bg1

**Bauvorhaben:**

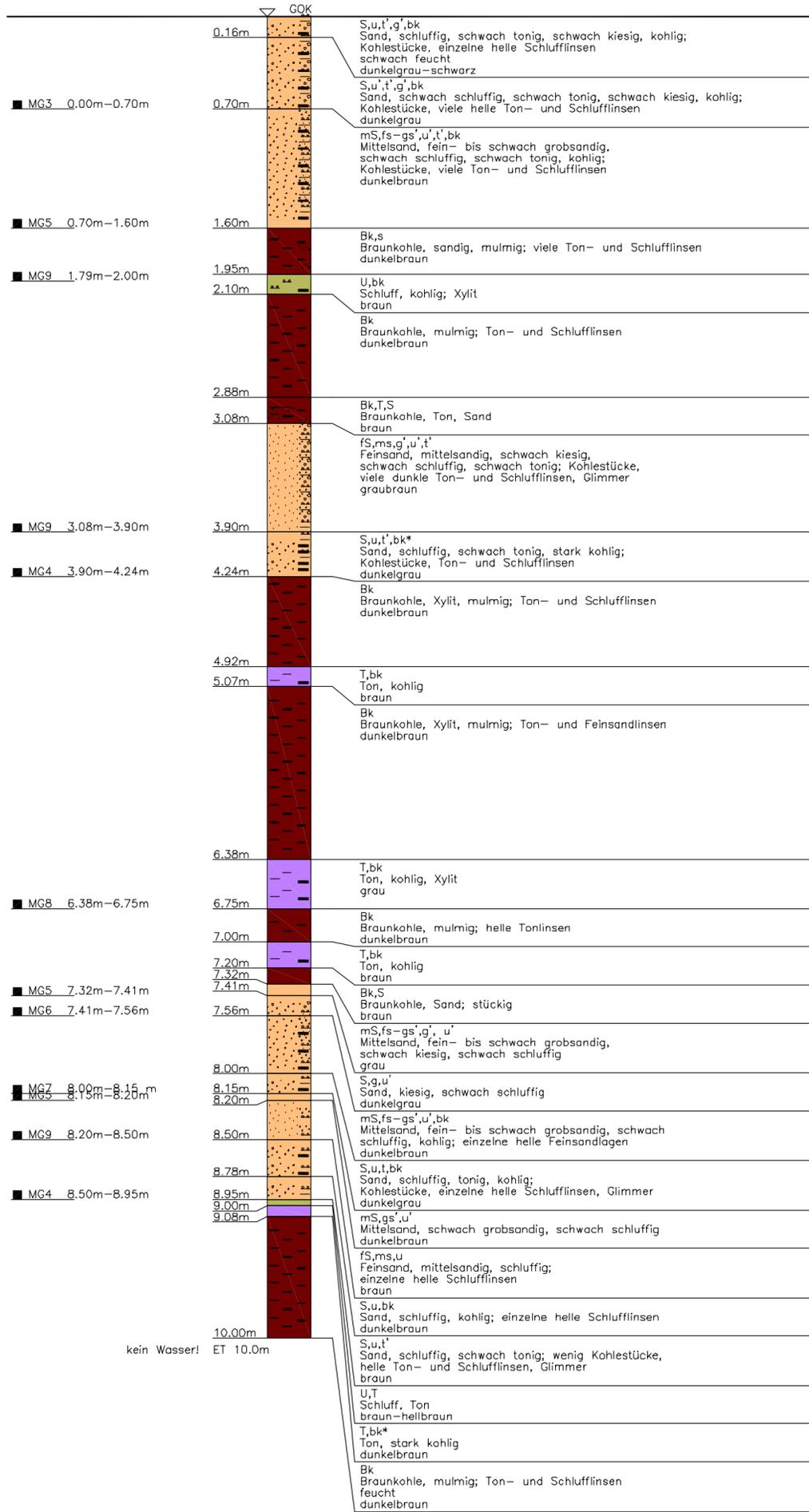
**Projekt-Nr.:**

**Datum:** 16.01.1997

**Maßstab:** 1:50

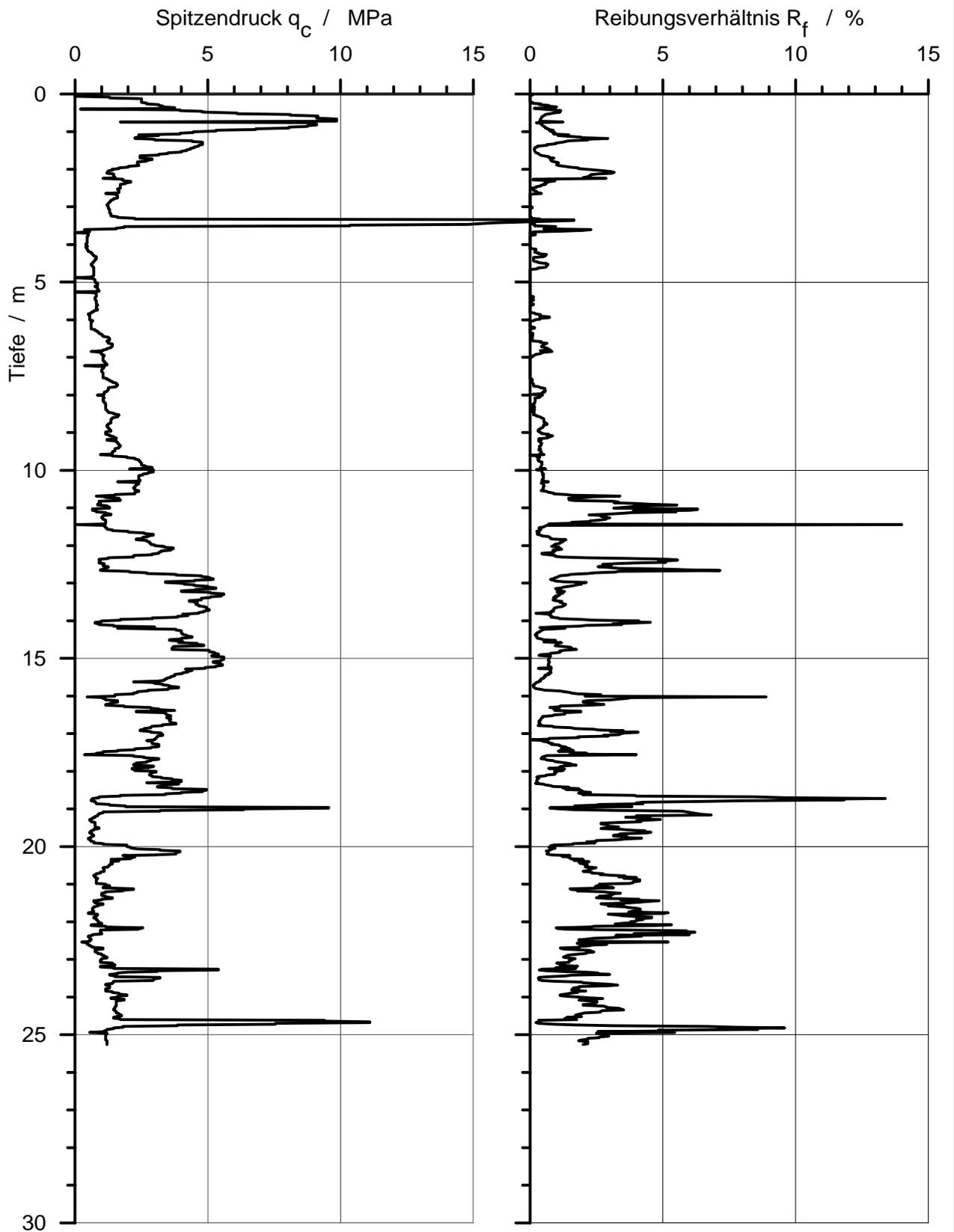
**Bearbeiter:** Scheffler

# Bohrung B1Bg7

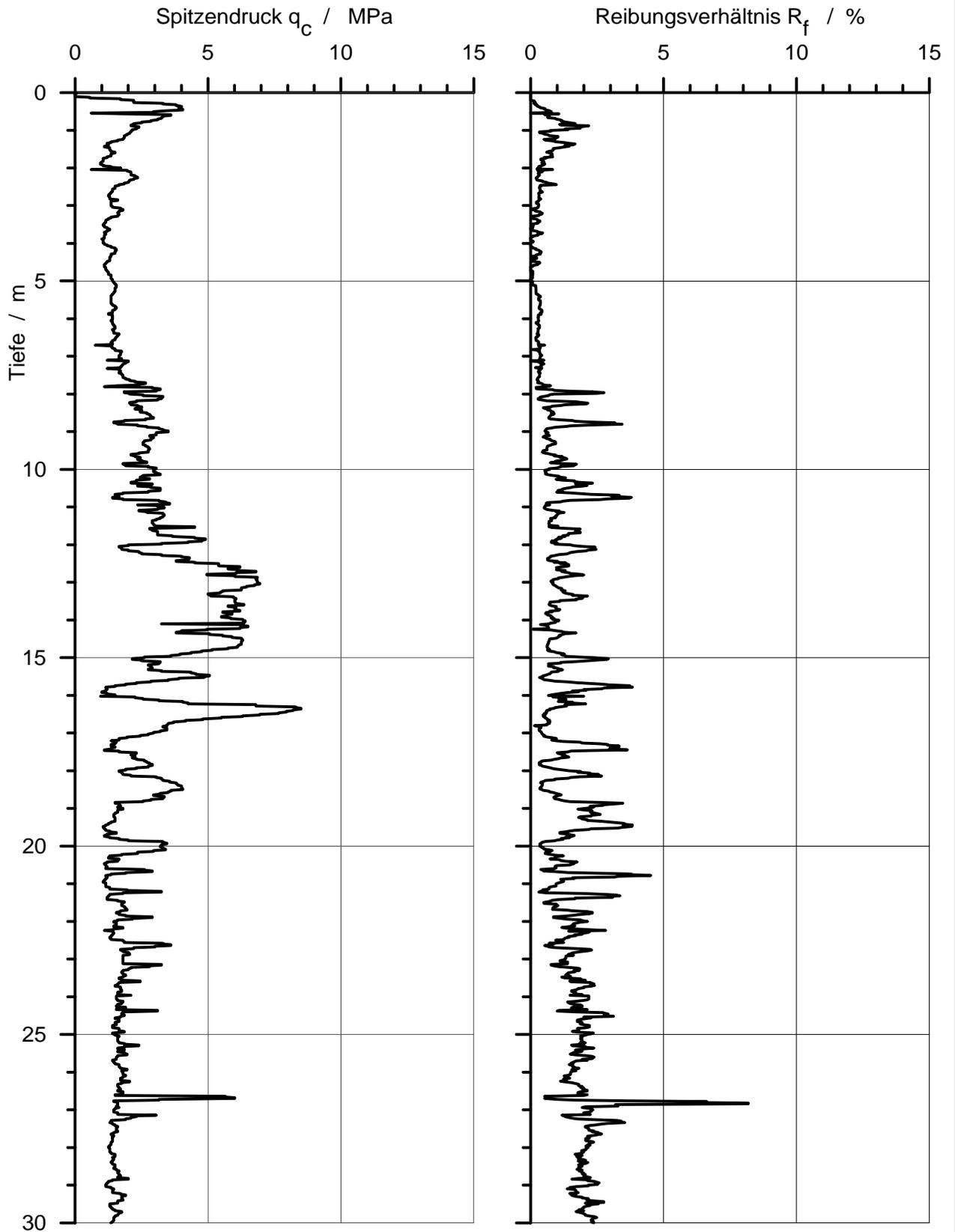


Die Anlage zeigt ein weiteres typisches Bodenprofil einer Mischbodenkippe. Im Unterschied zur Bohrung B1Bg1 (Anlage 2.2) weist dieses Bodenprofil deutlich höhere kohlige Anteile auf.

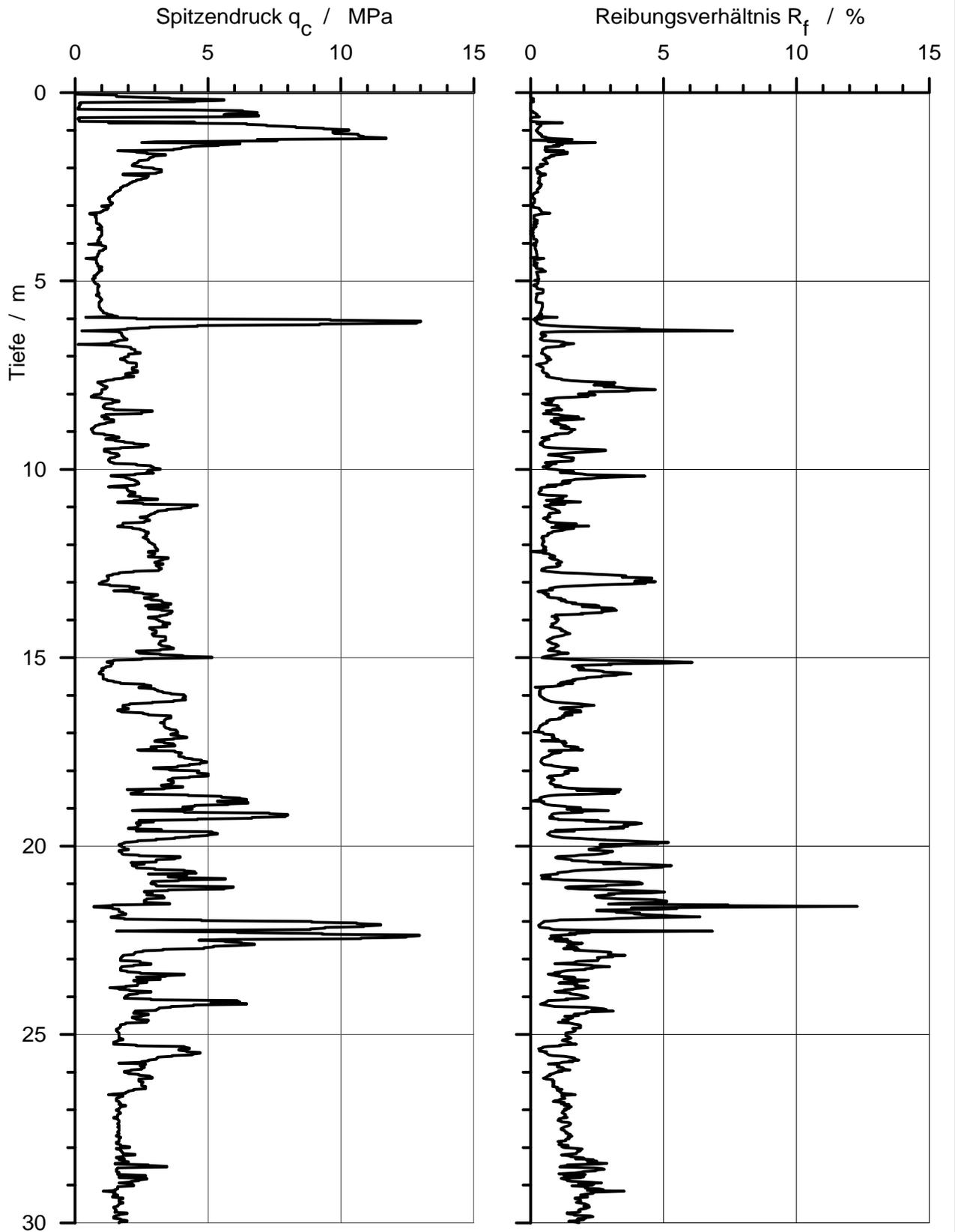
|                |                   |          |                               |         |  |                  |   |
|----------------|-------------------|----------|-------------------------------|---------|--|------------------|---|
|                | Datum             | Name     | Bodenprofil der Bohrung B1Bg7 |         | <br>Lausitzer und Mitteldutsche<br>Bergbau-Vorwaltungsgesellschaft<br><br><b>FCB</b><br>Fachcenter Bodenmechanik | Bauvorhaben:     |   |
|                | Bearb. 17.05.2006 | Knobloch |                               |         |  | Projekt-Nr.:     |   |
|                | Gepr.:            |          |                               |         |  | Datum:           | 27.01.1997                                    |
|                | Norm:             |          |                               |         |  | Maßstab:         | 1 : 50  |
| Maßstab 1 : 33 |                   |          | Anhang 2.3                    | Blatt 1 |  | Planbezeichnung: | Geologische Ansprache der<br>Linerbohrung Bg7 |
|                |                   |          | Quelle (LMBV 1997)            | 1 Bl.   |  | Bearbeiter:      | Scheffler                                     |



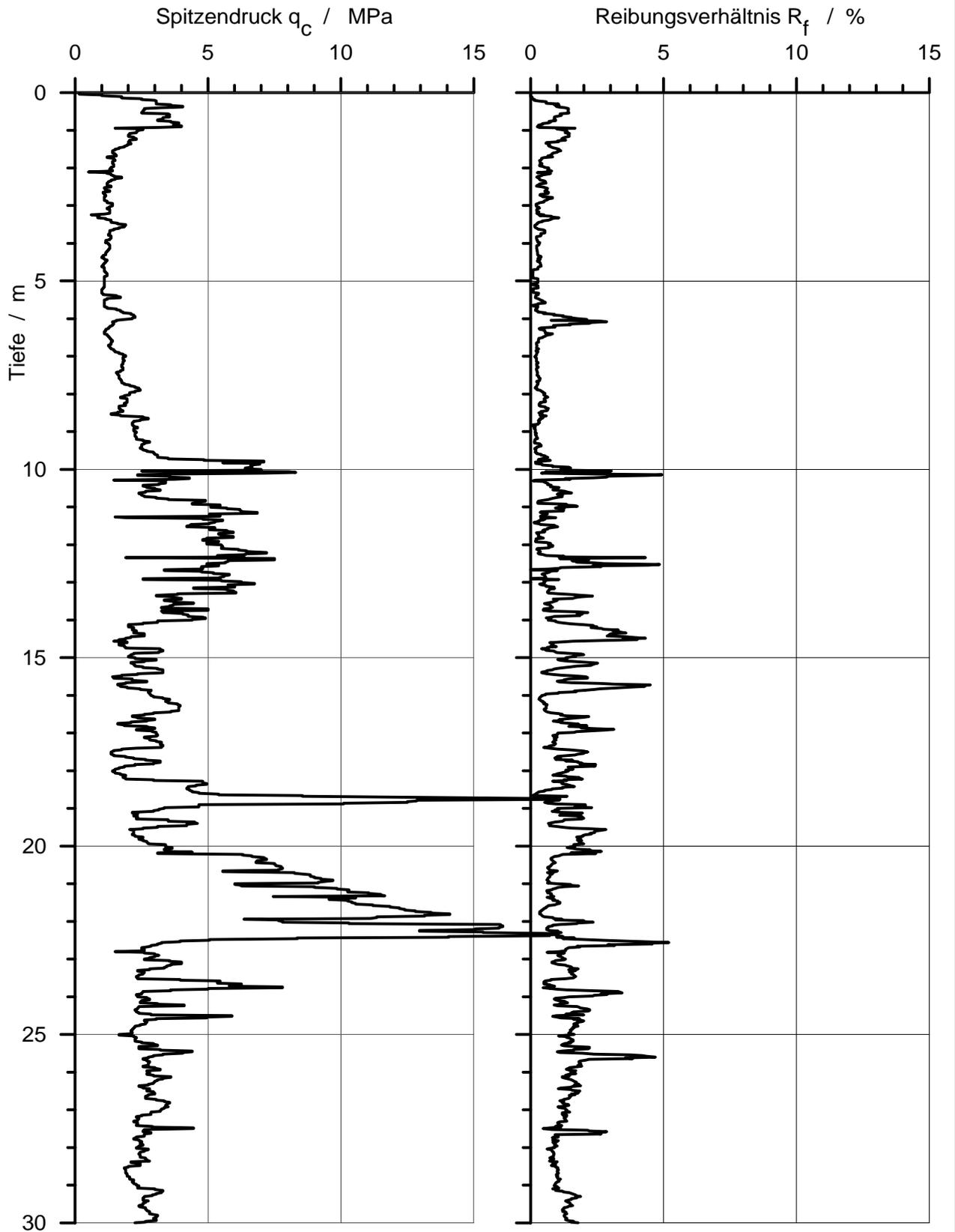
|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil<br>Drucksondierung B1DS1 |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 3.1</b>                      |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997            |  |



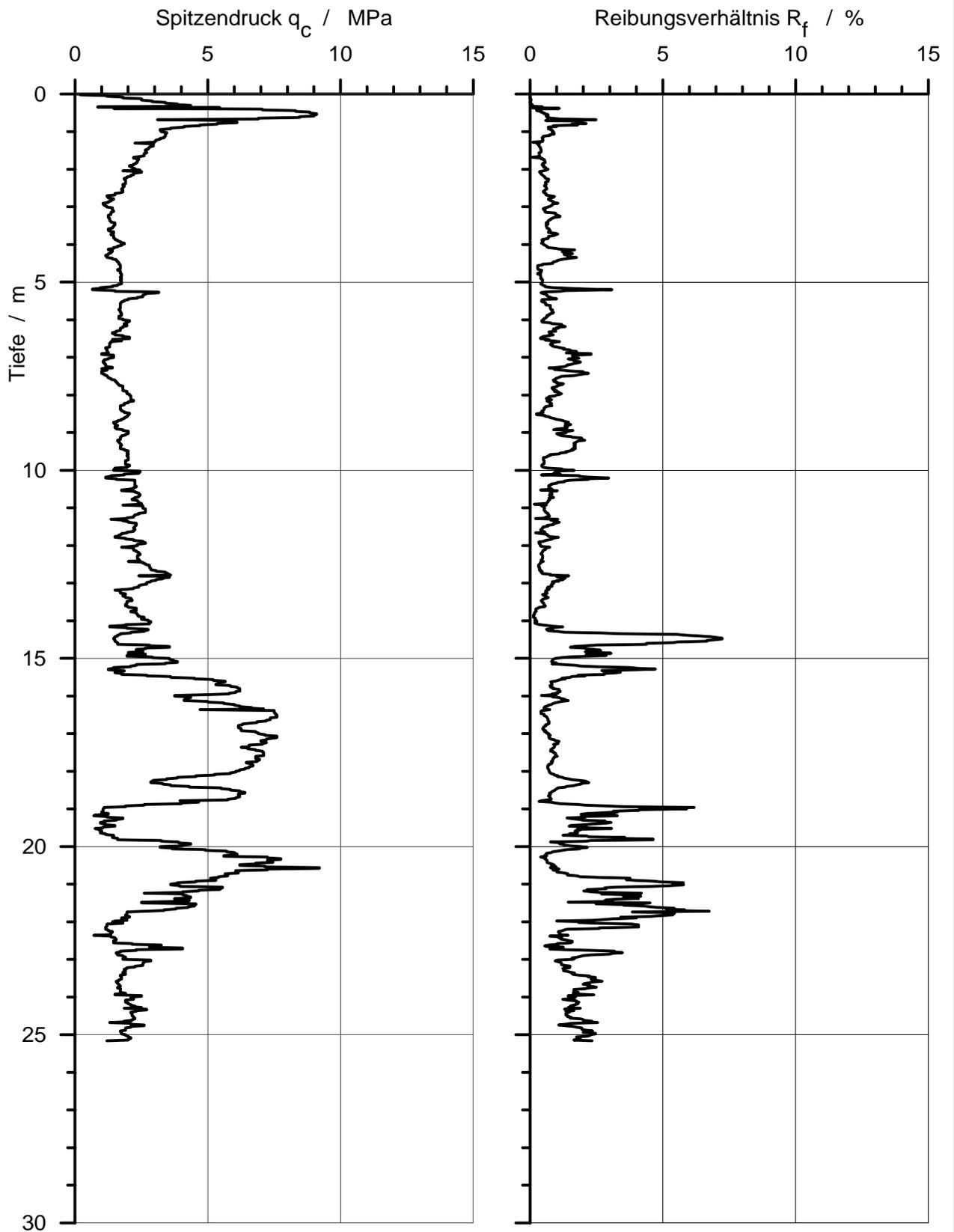
|        | Datum    | Name     |   |  |
|--------|----------|----------|---|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil<br>Drucksondierung B1DS2a |  |
| Gepr.  |          |          |   |  |
| Norm   |          |          |   |  |
|        |          |          | <b>Anhang 3.2</b>                       |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997             |  |



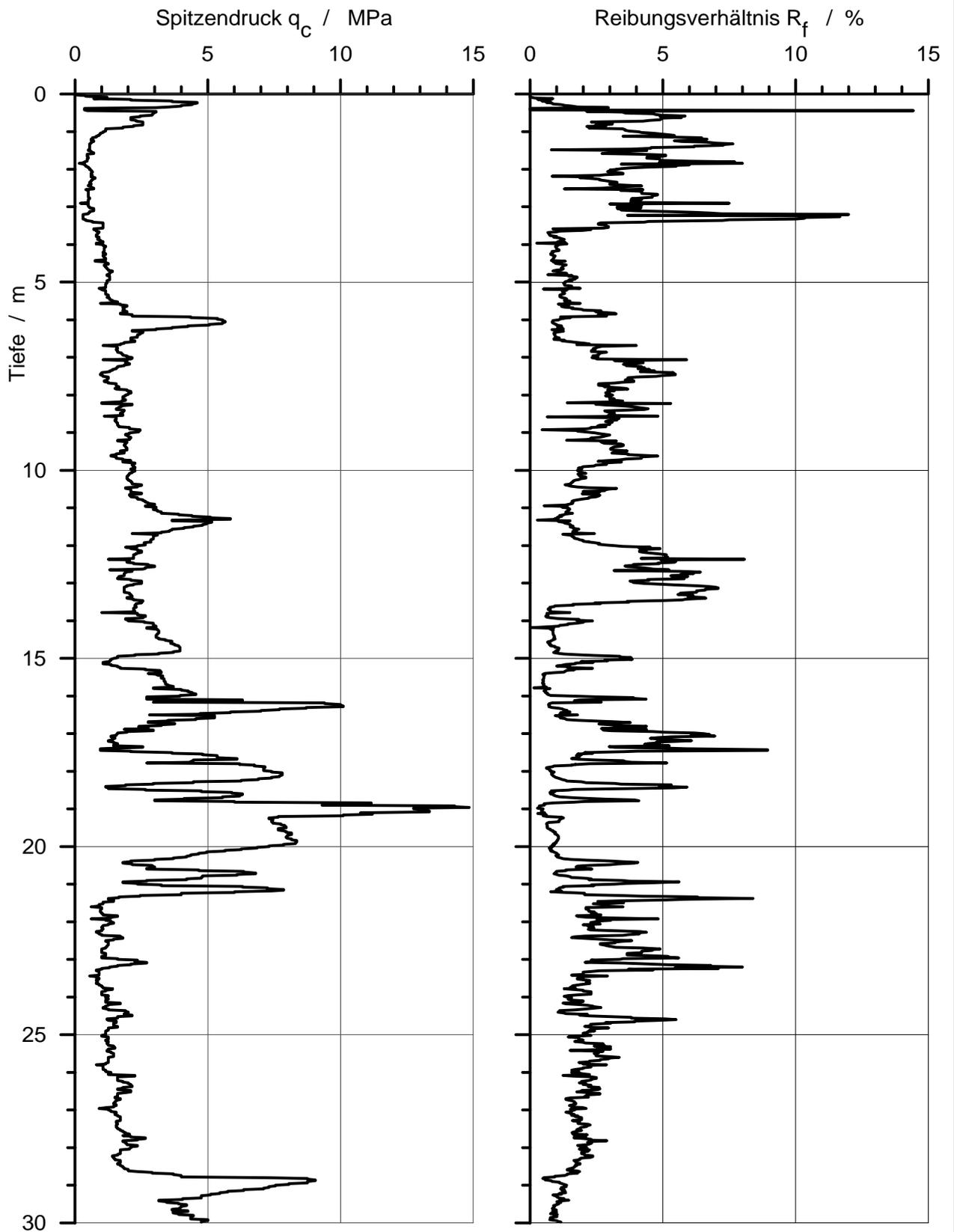
|        | <i>Datum</i> | <i>Name</i> |  |  |
|--------|--------------|-------------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00     | Knobloch    | Sondierprofil<br>Drucksondierung B1DS3 |  |
| Gepr.  |              |             |  |  |
| Norm   |              |             |  |  |
|        |              |             | <b>Anhang 3.3</b>                      |  |
|        |              |             | Quelle der Daten: LMBV 1997            |  |



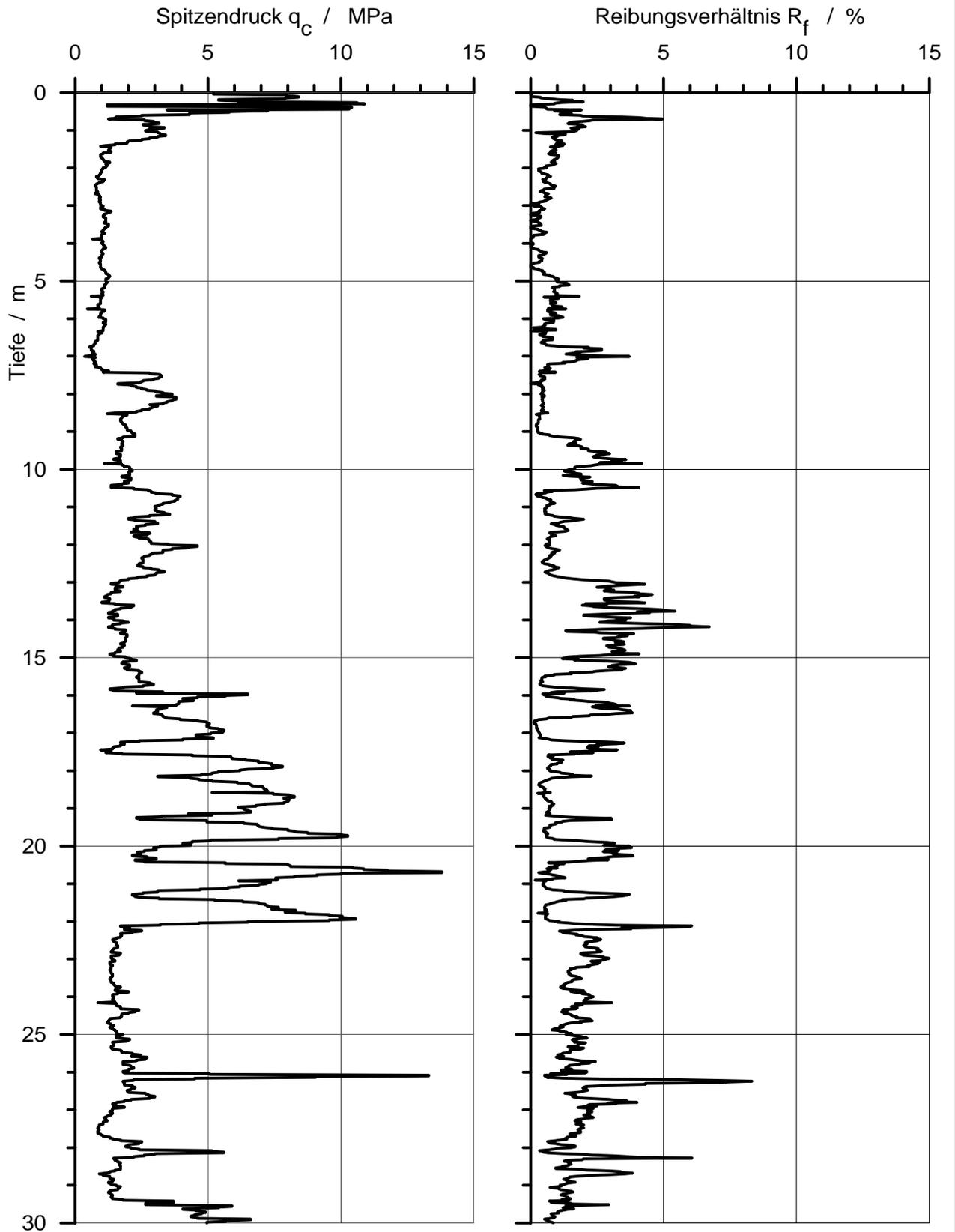
|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil<br>Drucksondierung B1DS4 |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 3.4</b>                      |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997            |  |



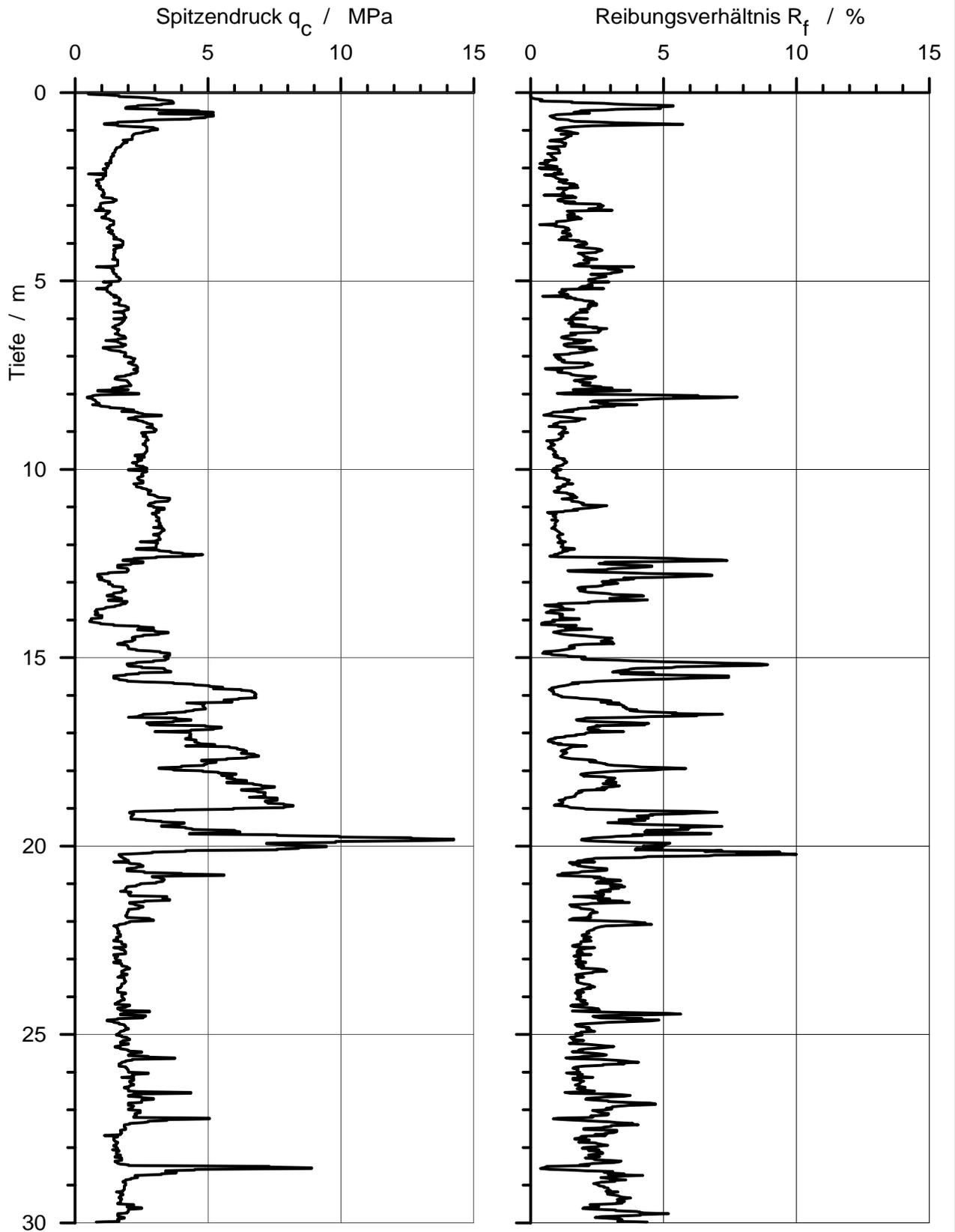
|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil<br>Drucksondierung B1DS5 |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 3.5</b>                      |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997            |  |



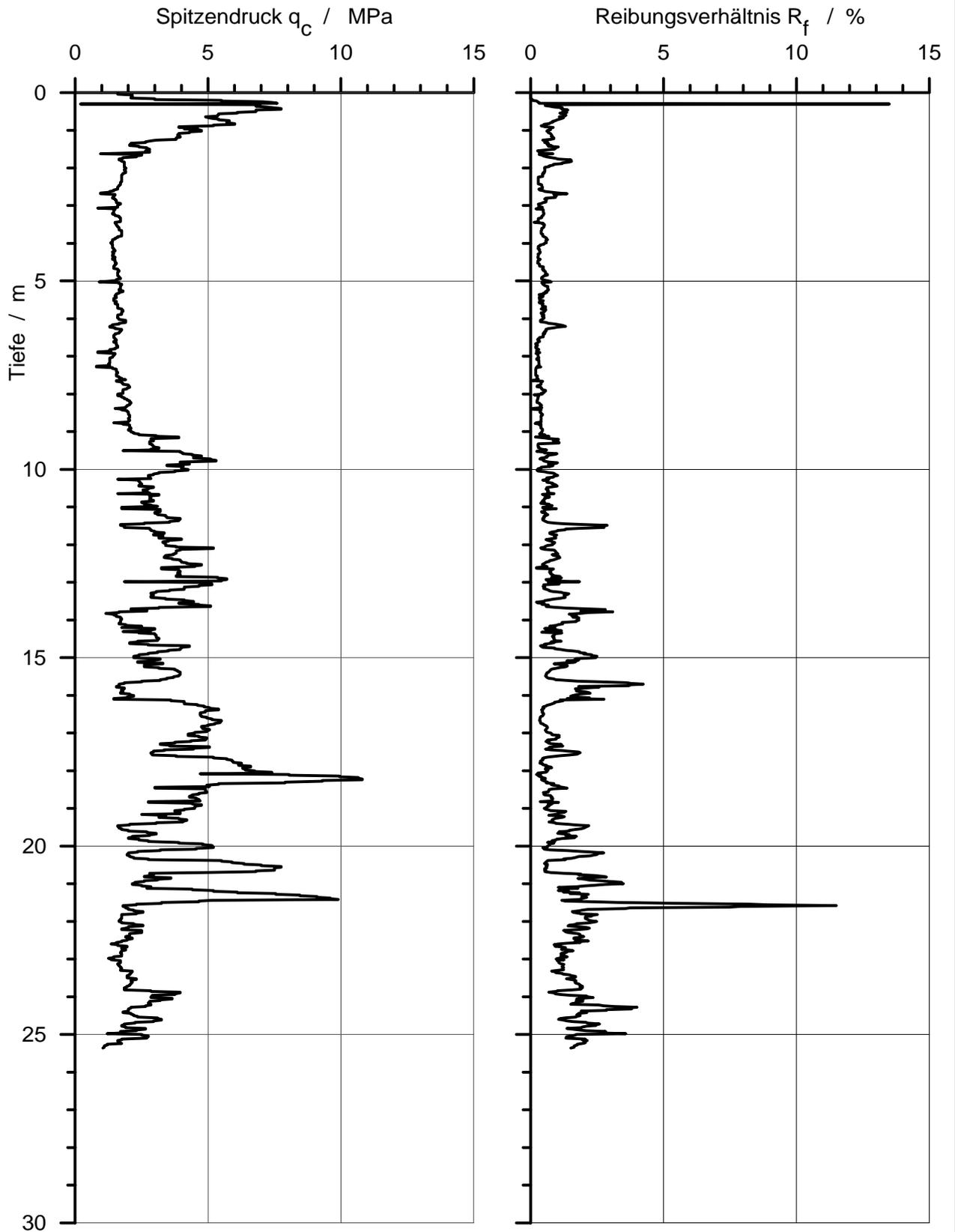
|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil<br>Drucksondierung B1DS6 |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 3.6</b>                      |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997            |  |



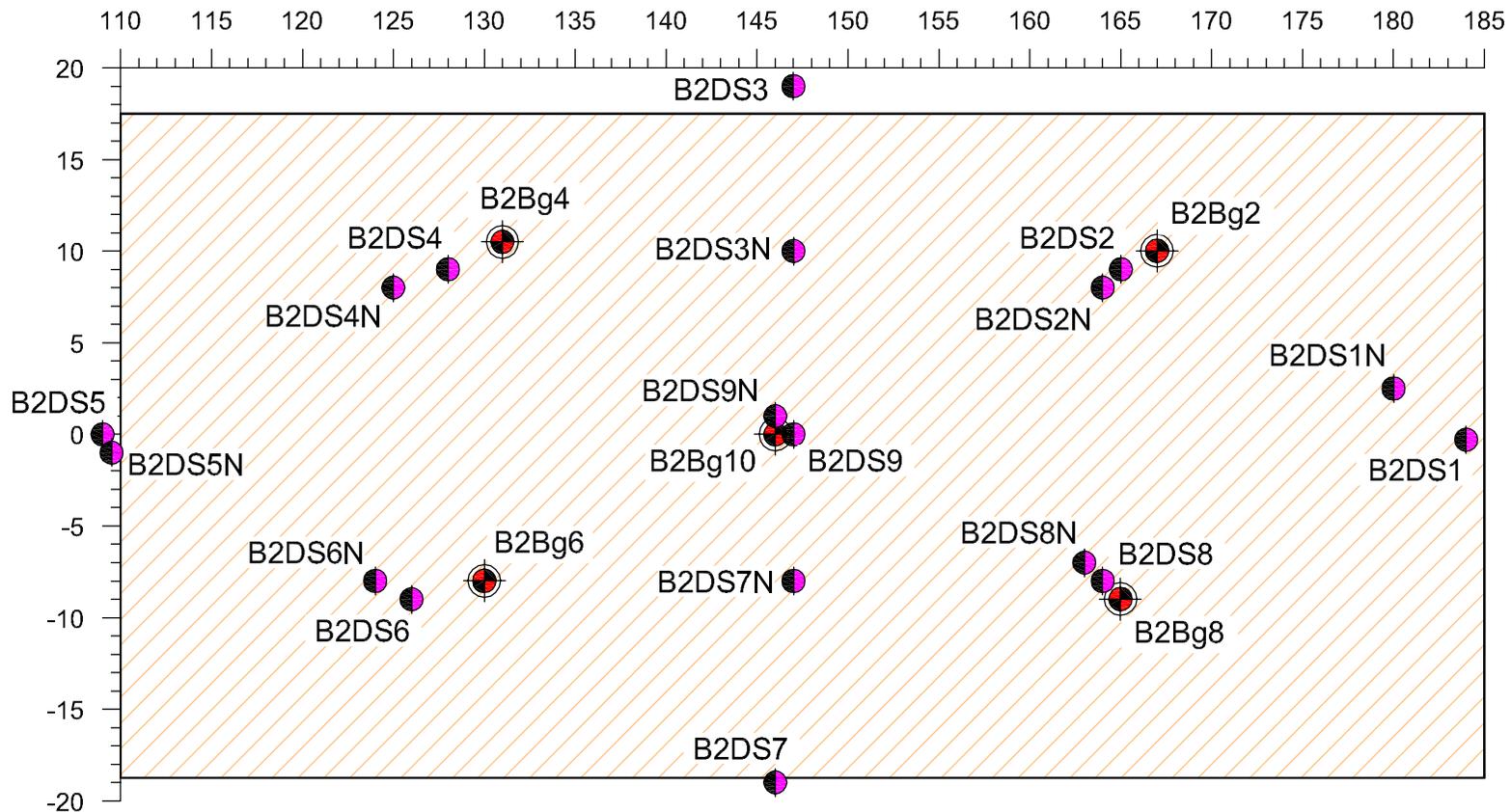
|        | Datum    | Name     | Sondierprofil<br>Drucksondierung B1DS7 |  |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch |  |  |  |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 3.7</b>                      |  |  |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997            |  |  |  |



|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil<br>Drucksondierung B1DS8 |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 3.8</b>                      |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997            |  |



|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil<br>Drucksondierung B1DS9 |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 3.9</b>                      |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997            |  |



Teilfläche B2

Im Lageplan sind die Bohrungen (B1Bg...) und die Drucksondierungen (B1DS...) eingetragen.

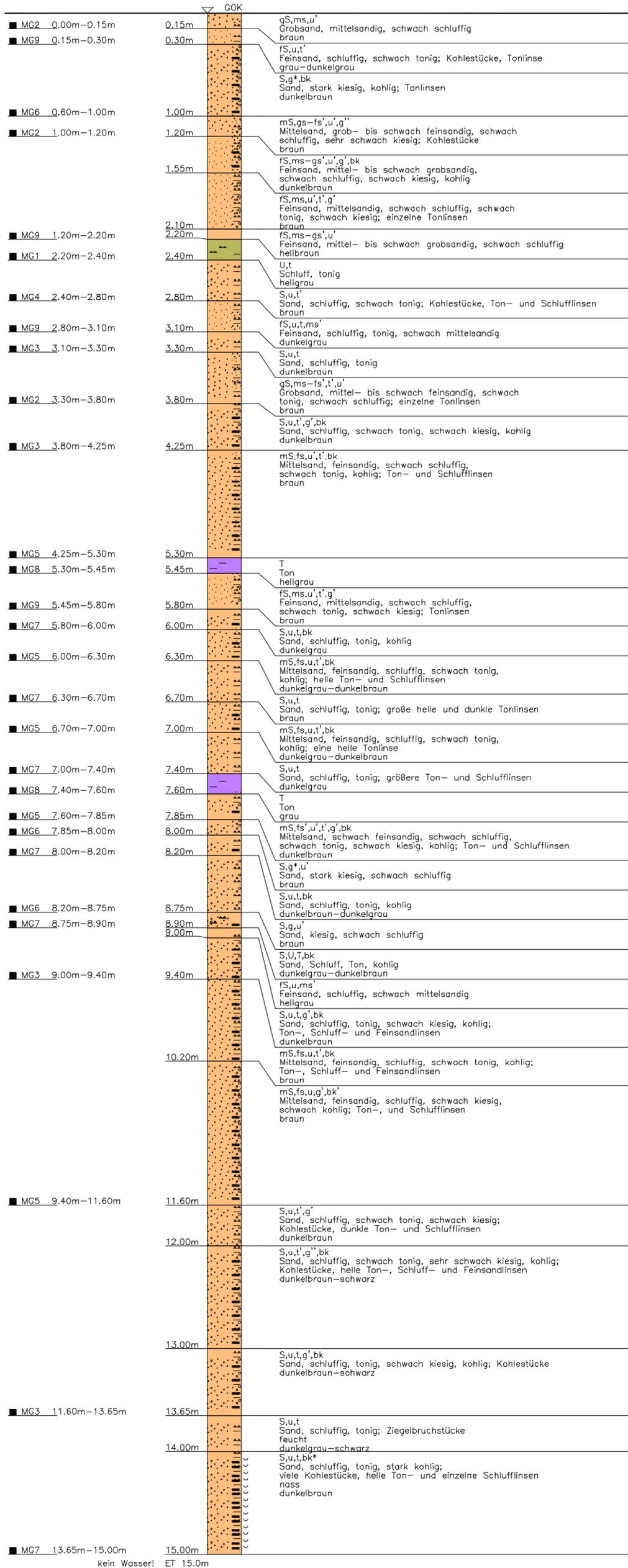
Die Sondierungen nach der Vergütung durch ein Fallgewicht sind durch den nachgestellten Buchstaben N gekennzeichnet.

Legende:

-  B1Bg7 - Bohrung
-  B1DS7 - Drucksondierung
-  - Grundfläche des Schüttkörpers

|                 | Datum      | Name     | Lage der Aufschlüsse<br>Teilfläche B2 |       |  |         |
|-----------------|------------|----------|---------------------------------------|-------|--|---------|
| Bearb.          | 15.02.2007 | Knobloch |                                       |       |  | Blatt 1 |
| Gepr.           |            |          |                                       |       |  |         |
| Norm            |            |          |                                       |       |  |         |
| Maßstab 1 : 400 |            |          | Anhang 4.1                            | 1 Bl. |  |         |

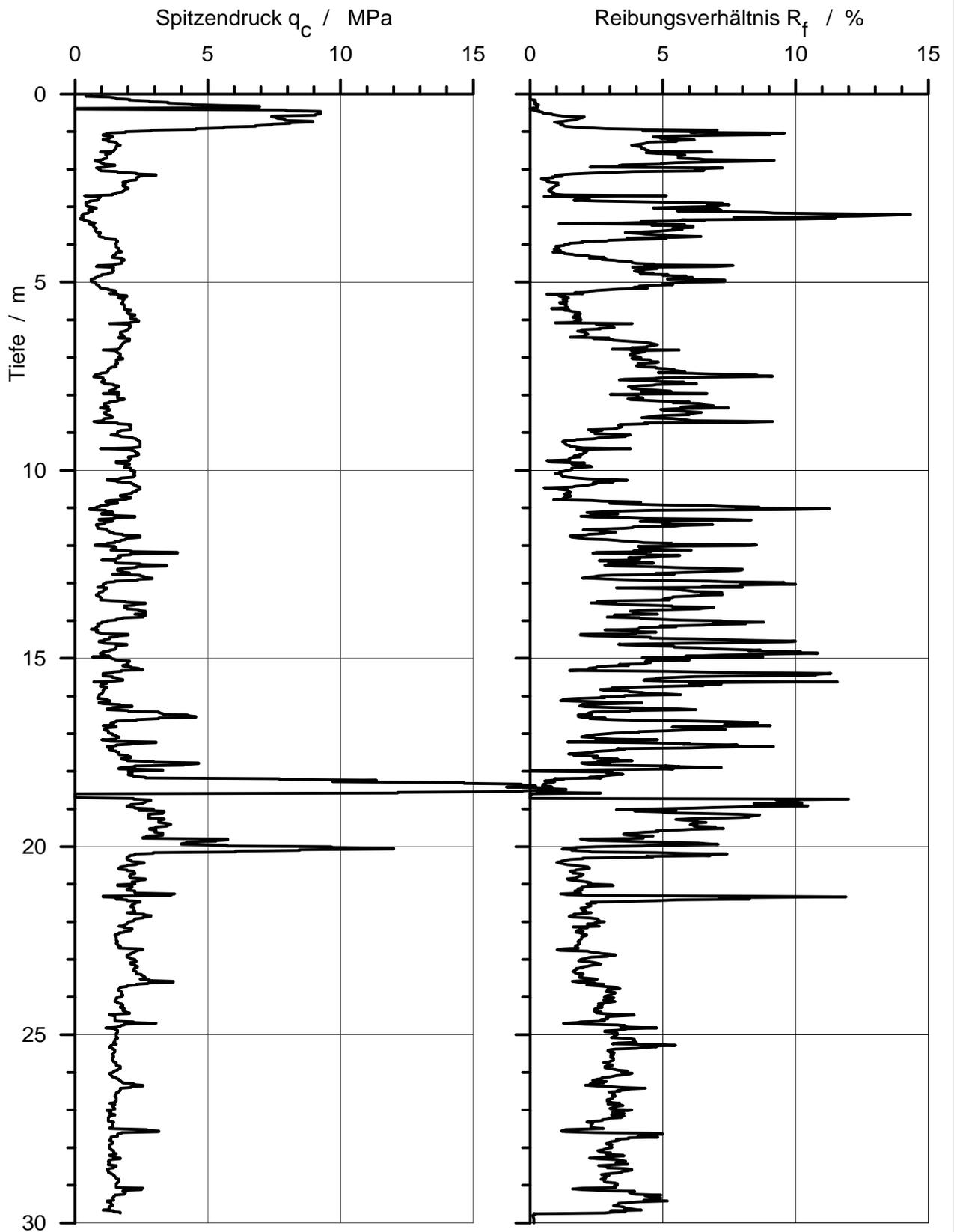
# Bohrung B2Bg8



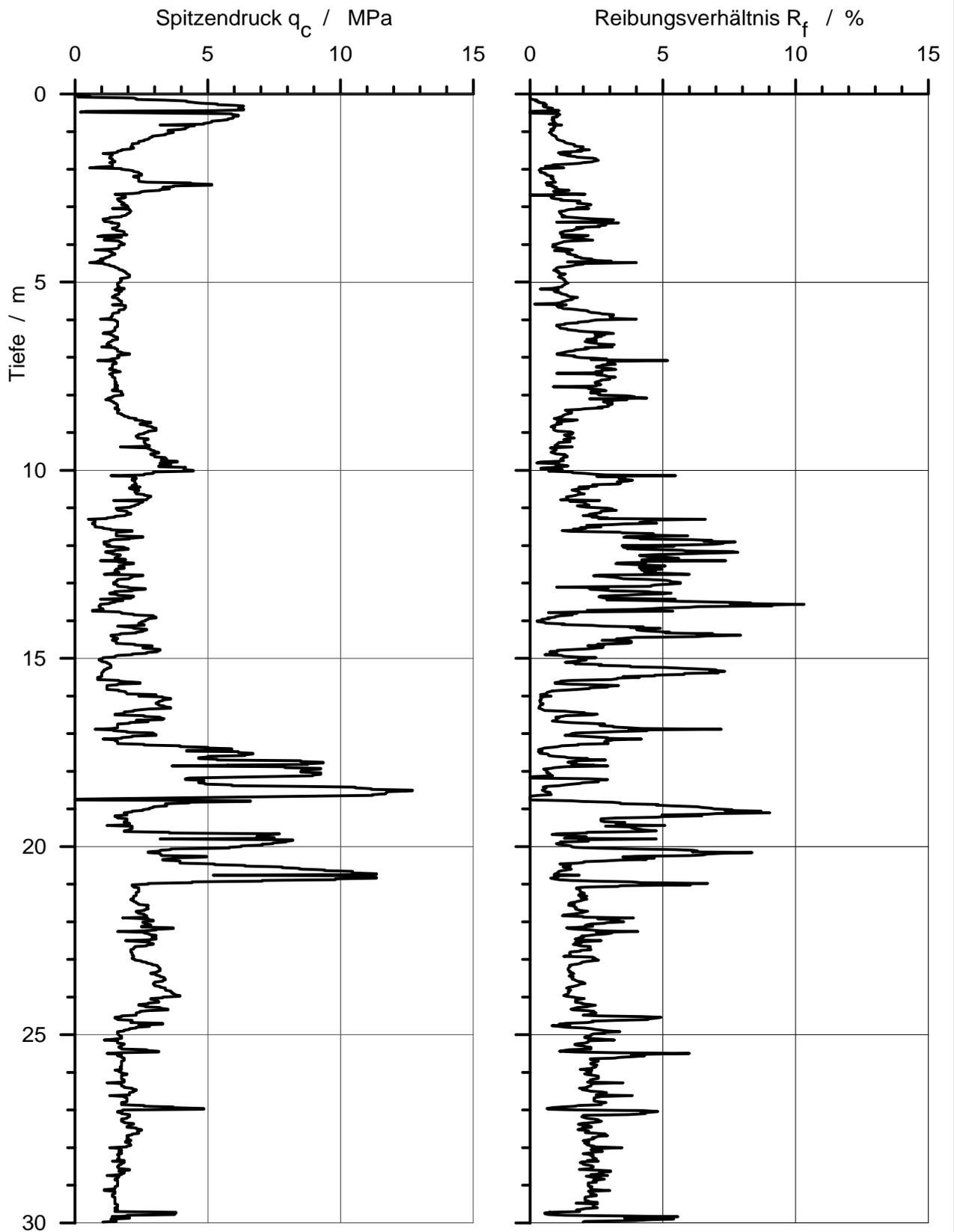
Die Anlage zeigt ein weiteres typisches Bodenprofil einer Mischbodenkippe der Teilfläche B2 (vor der Vergütung).

|                    |            |          |                               |
|--------------------|------------|----------|-------------------------------|
|                    | Datum      | Name     | Bodenprofil der Bohrung B2Bg8 |
| Bearb.             | 17.05.2006 | Knoblach |                               |
| Gepr.              |            |          |                               |
| Norm               |            |          |                               |
| Maßstab 1:33       |            |          | Anhang 4.2                    |
|                    |            |          | Blatt 1                       |
|                    |            |          | 1 Bl.                         |
| Quelle (LMBV 1997) |            |          |                               |

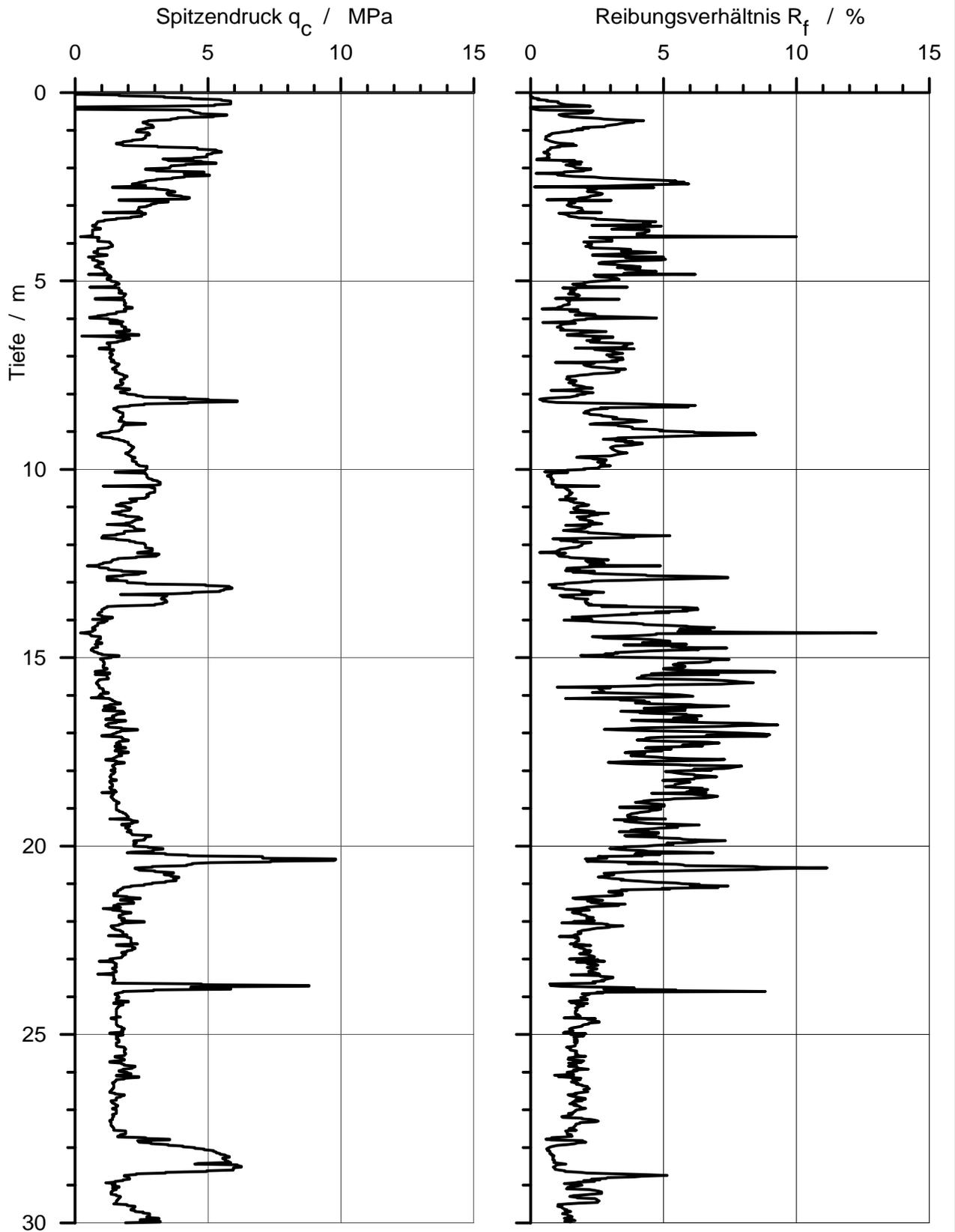
|   |  |   |
|---|--|---|
| <br>Lausitzer und Mitteldeutsche<br>Bergbau-Verwaltungsgesellschaft<br><b>FCB</b><br>Fachcenter Bodenmechanik | <b>Bauvorhaben:</b><br>Tagebau Zwenkau, Kippe As 993,<br>Testfläche B2   | Bauvorhaben:  |
|   | <b>Planbezeichnung:</b><br>Geologische Ansprache der<br>Linerbohrung Bg8 | Projekt-Nr.:<br>Datum: 16.01.1997<br>Maßstab: 1:50<br>Bearbeiter: Scheffler |



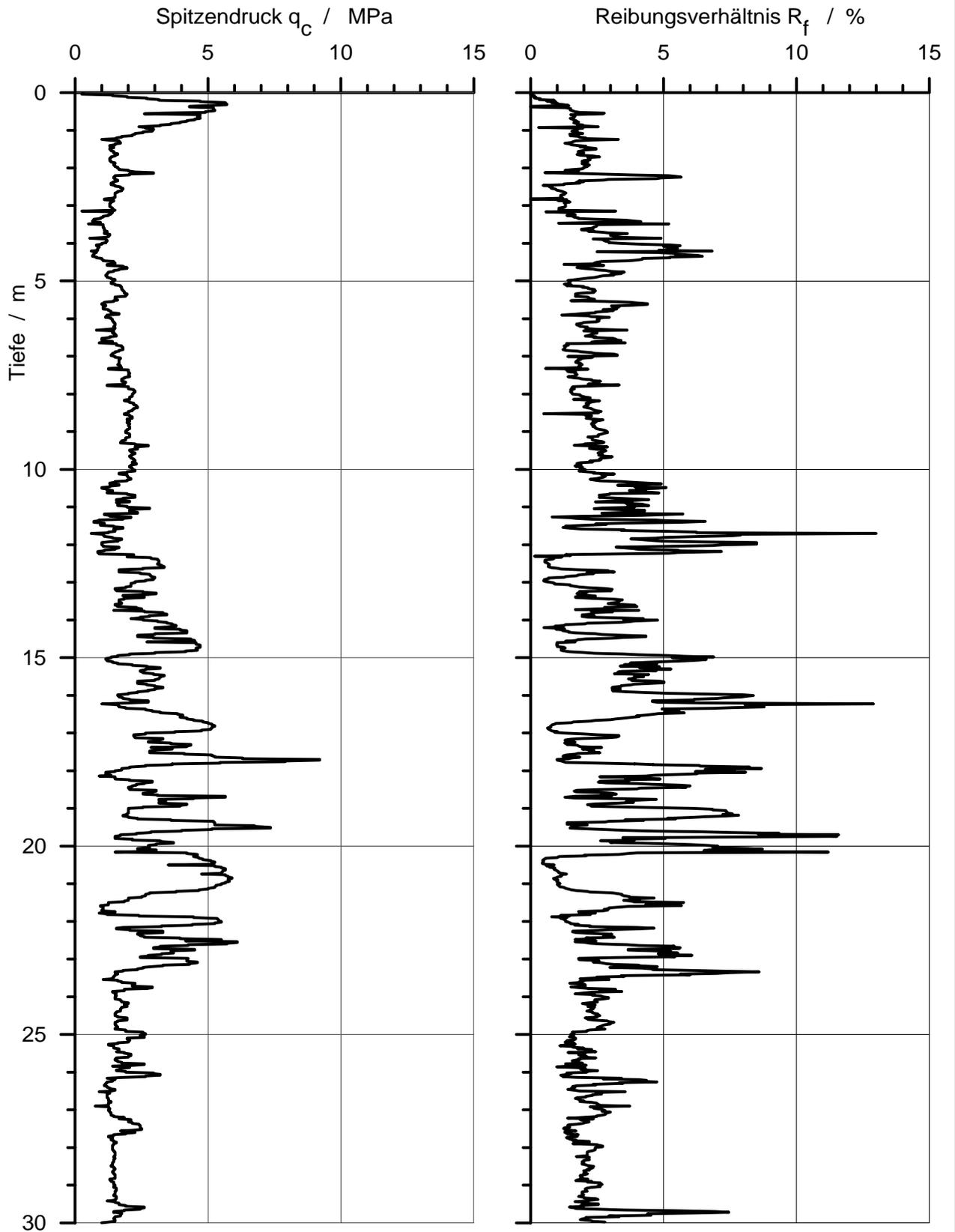
|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil<br>Drucksondierung B2DS1 |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 5.1</b>                      |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997            |  |



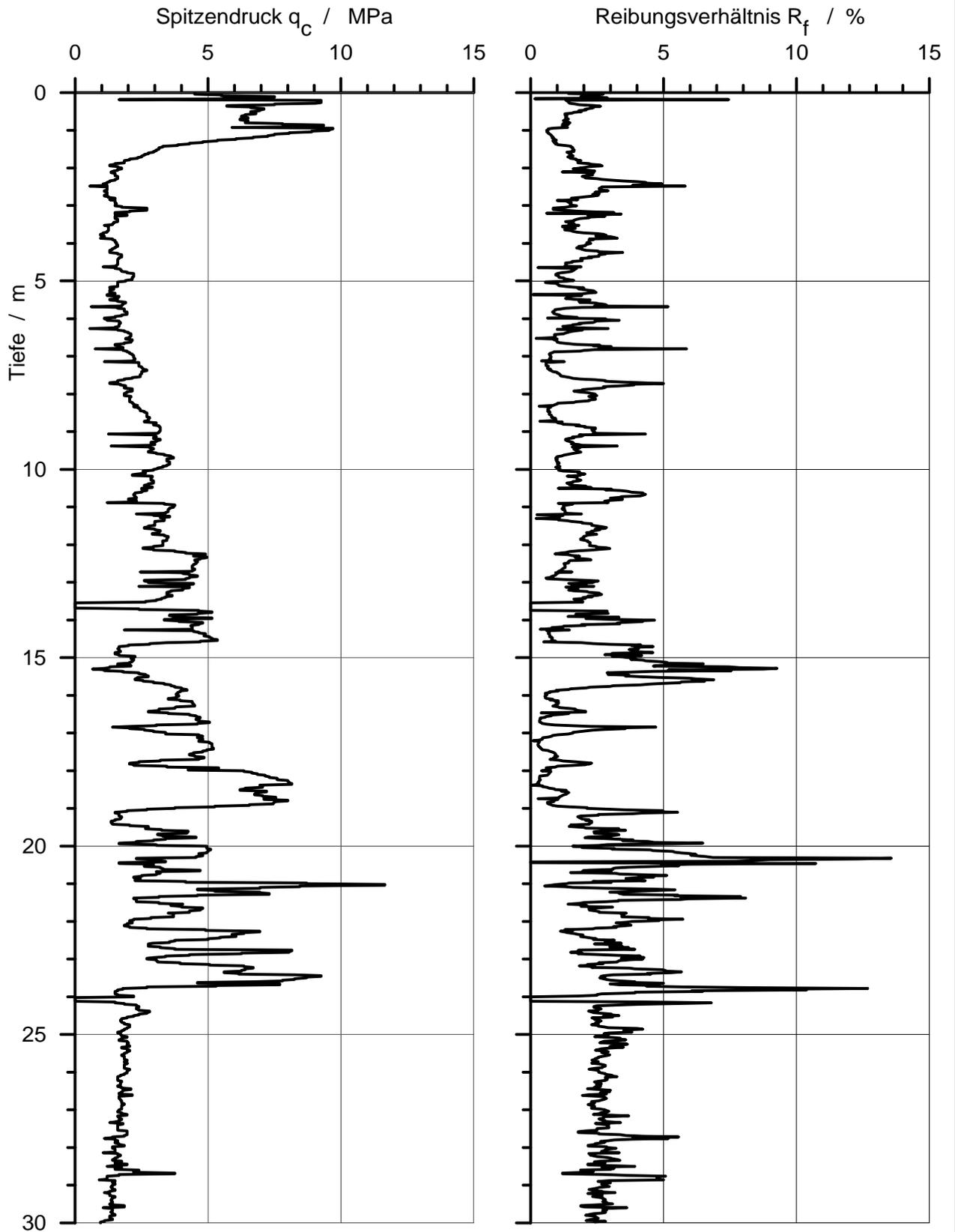
|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil<br>Drucksondierung B2DS2 |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 5.2</b>                      |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997            |  |



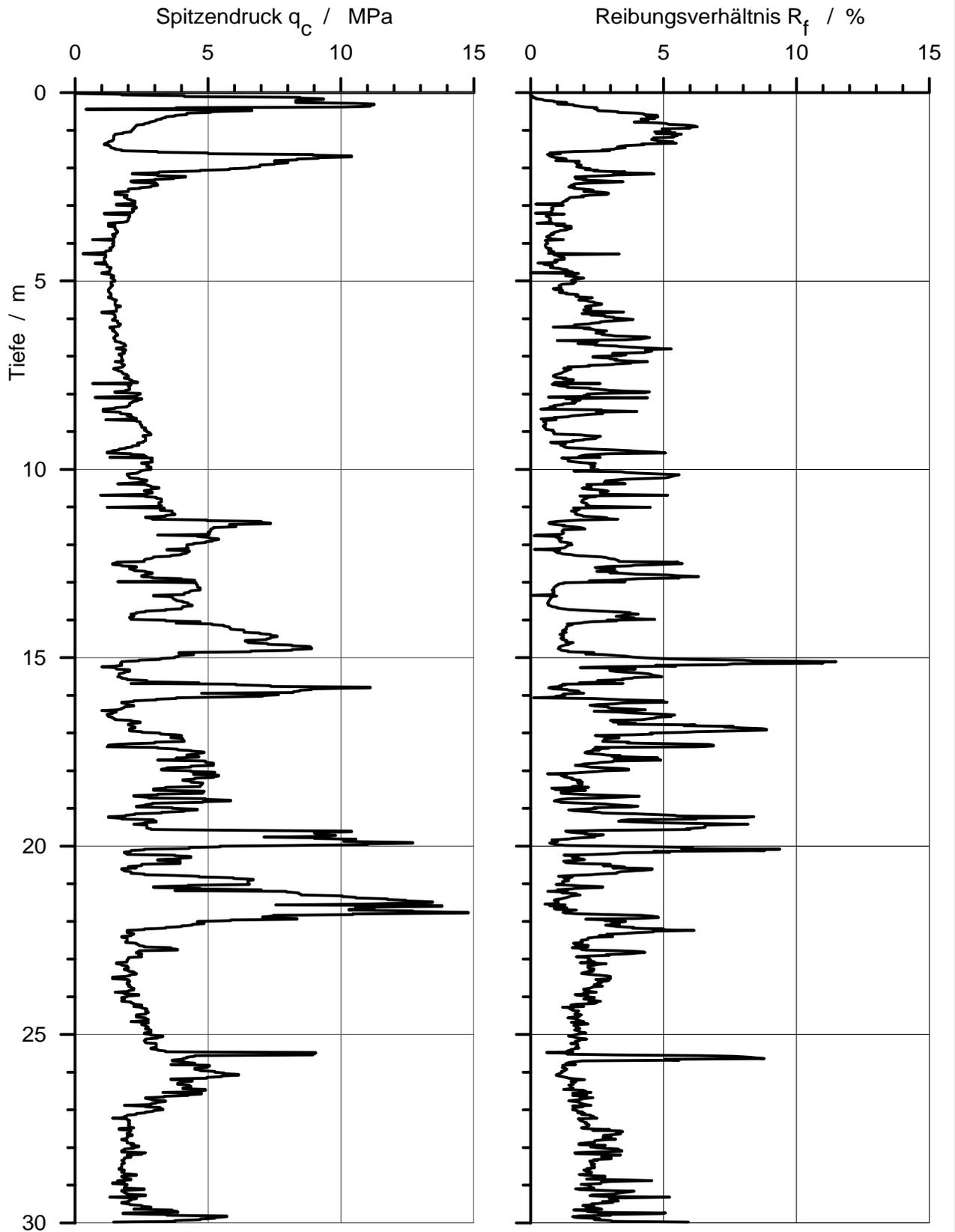
|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil<br>Drucksondierung B2DS3 |  |
| Gepf.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 5.3</b>                      |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997            |  |



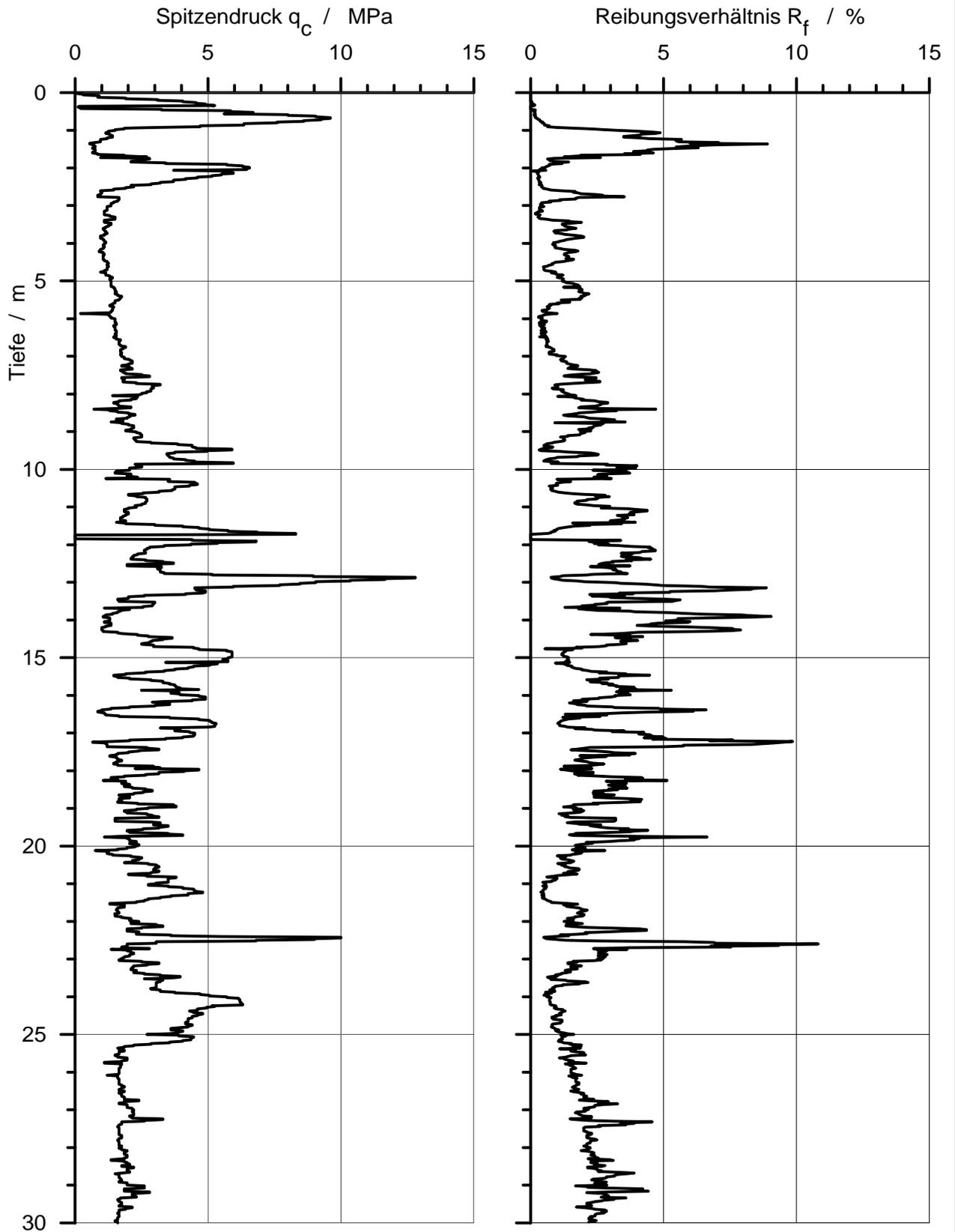
|        | <i>Datum</i> | <i>Name</i> |  |  |
|--------|--------------|-------------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00     | Knobloch    | Sondierprofil<br>Drucksondierung B2DS4 |  |
| Gepr.  |              |             |  |  |
| Norm   |              |             |  |  |
|        |              |             | <b>Anhang 5.4</b>                      |  |
|        |              |             | Quelle der Daten: LMBV 1997            |  |



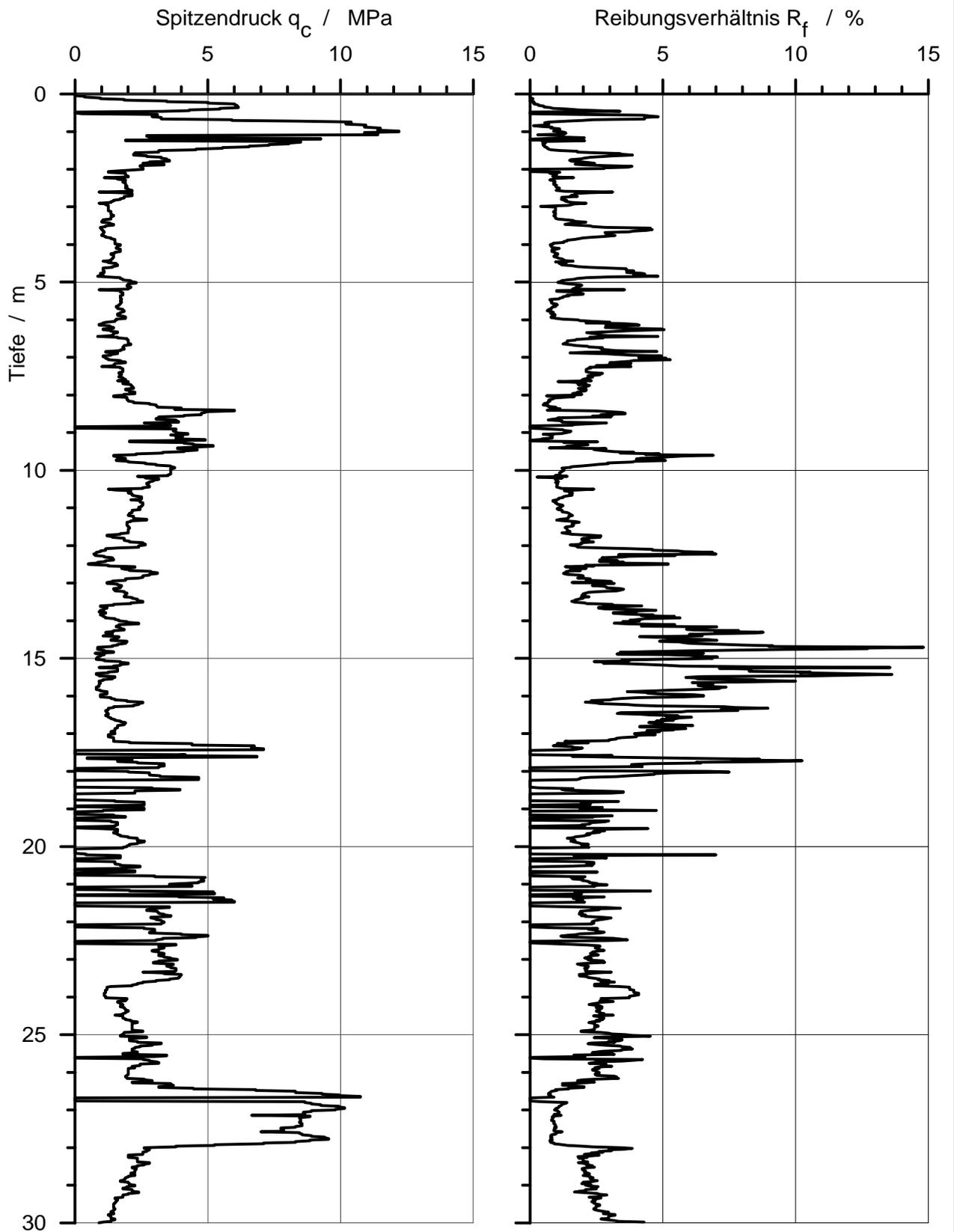
|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil<br>Drucksondierung B2DS5 |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 5.5</b>                      |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997            |  |



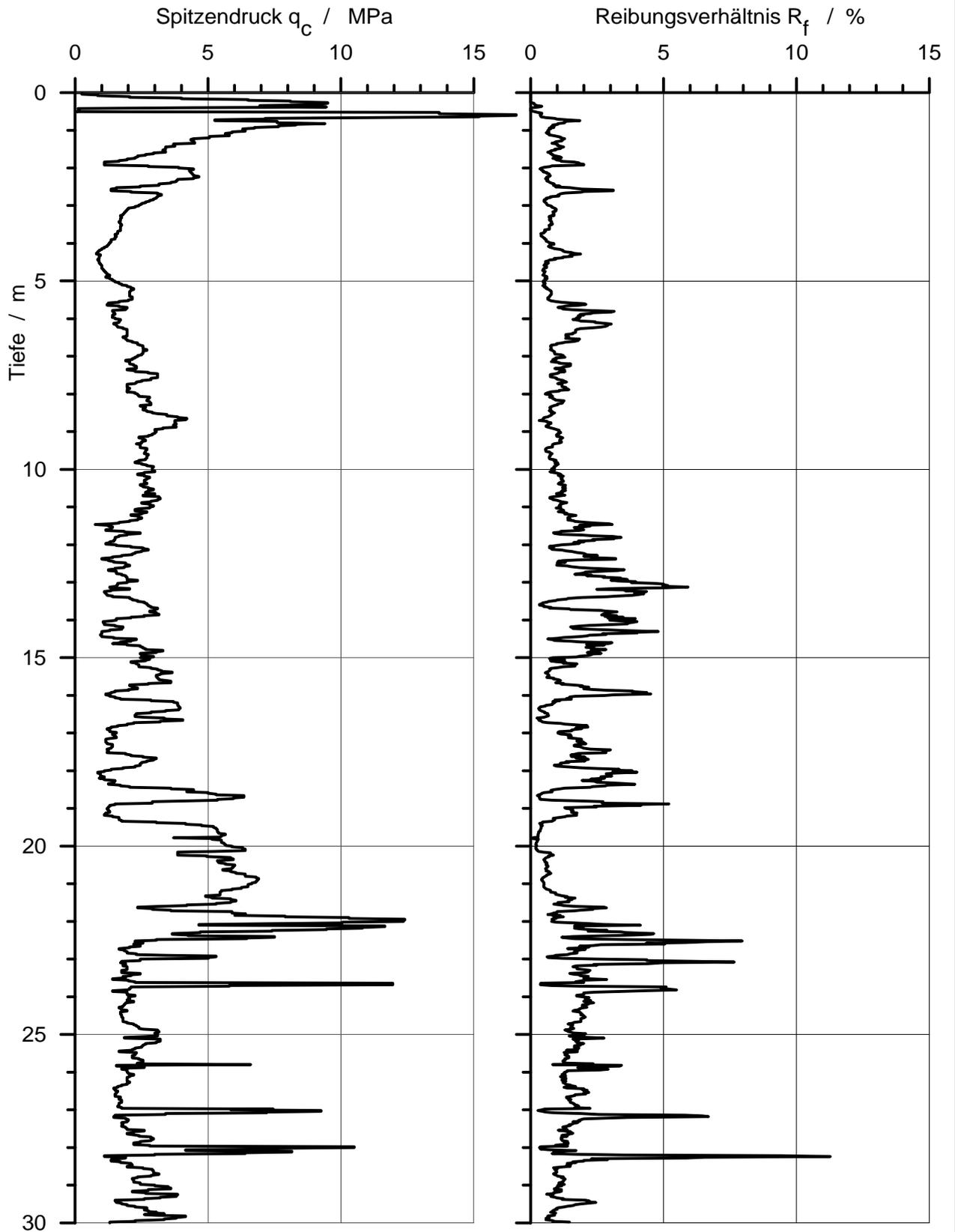
|        | Datum    | Name     | Sondierprofil<br>Drucksondierung B2DS6 |  |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch |  |  |  |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 5.6</b>                      |  |  |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997            |  |  |  |



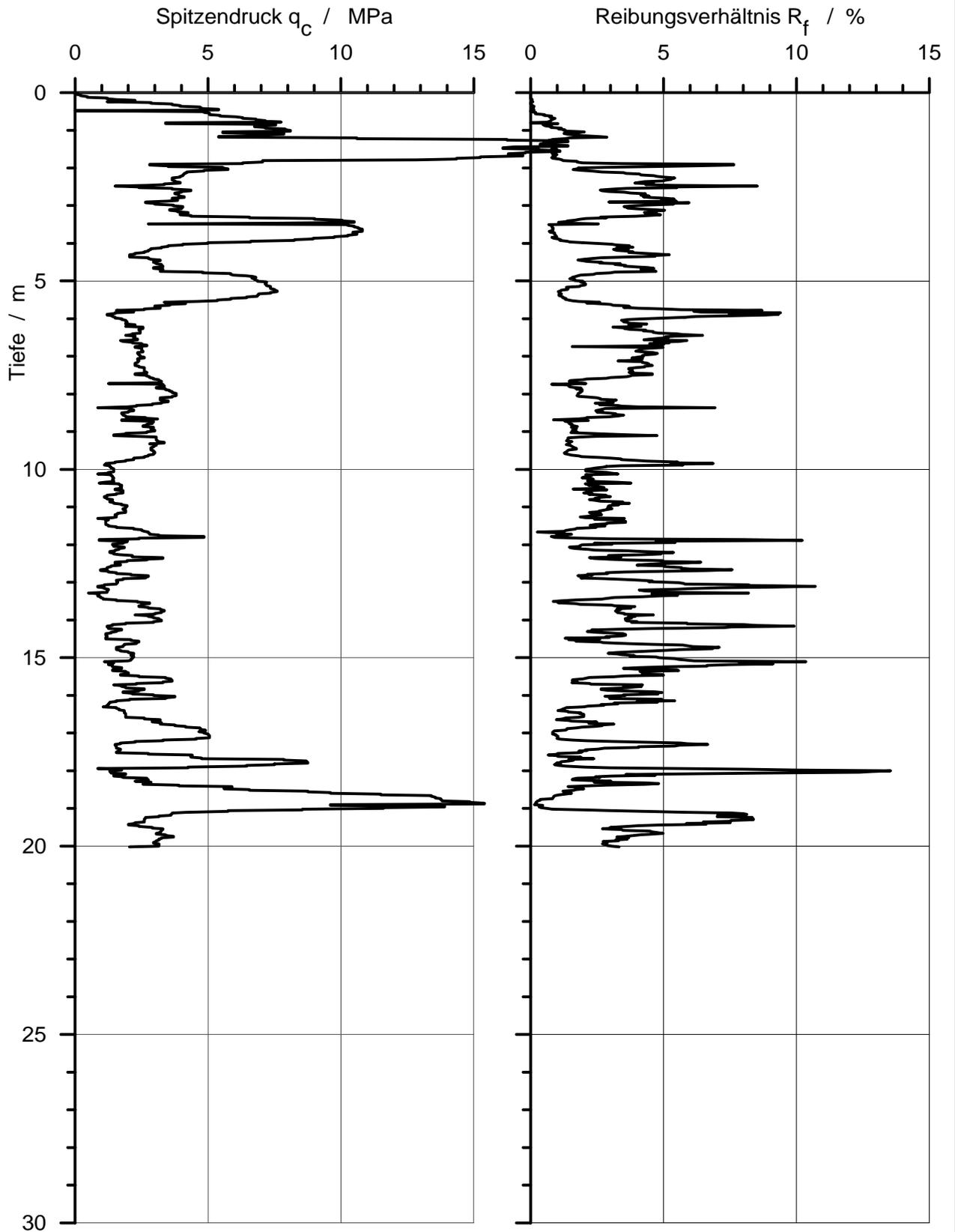
|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil<br>Drucksondierung B2DS7 |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 5.7</b>                      |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997            |  |



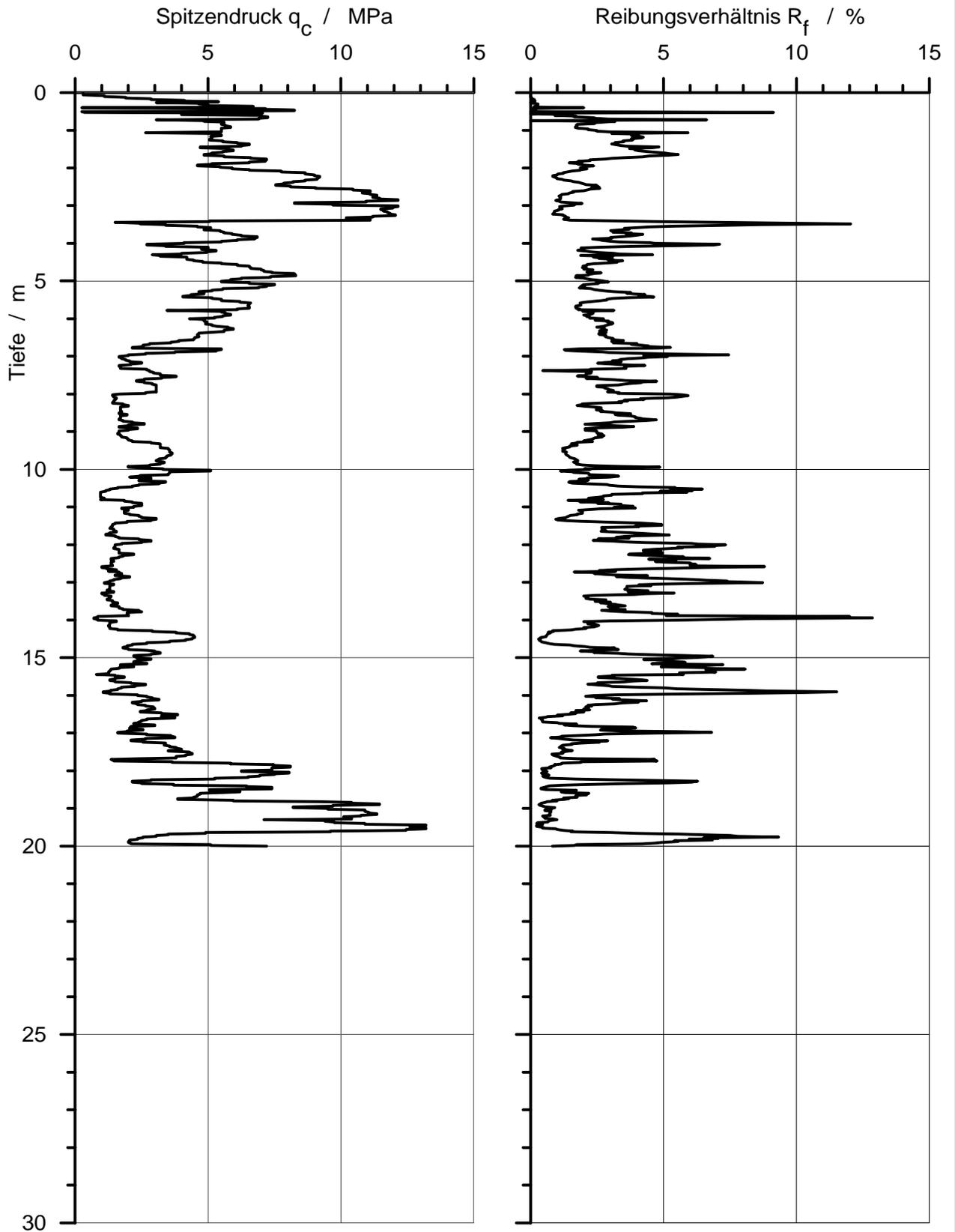
|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil<br>Drucksondierung B2DS8 |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 5.8</b>                      |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997            |  |



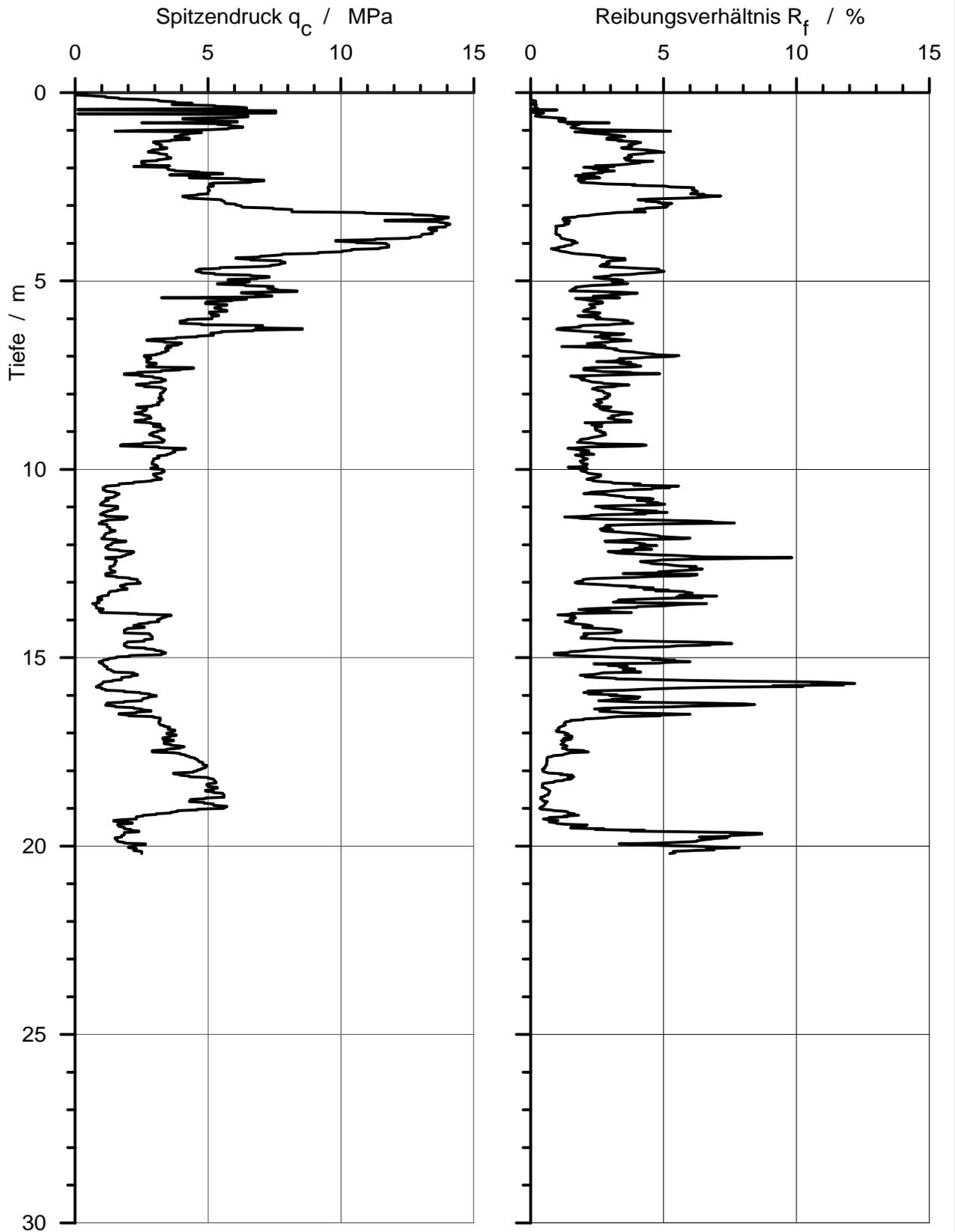
|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil<br>Drucksondierung B2DS9 |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 5.9</b>                      |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997            |  |



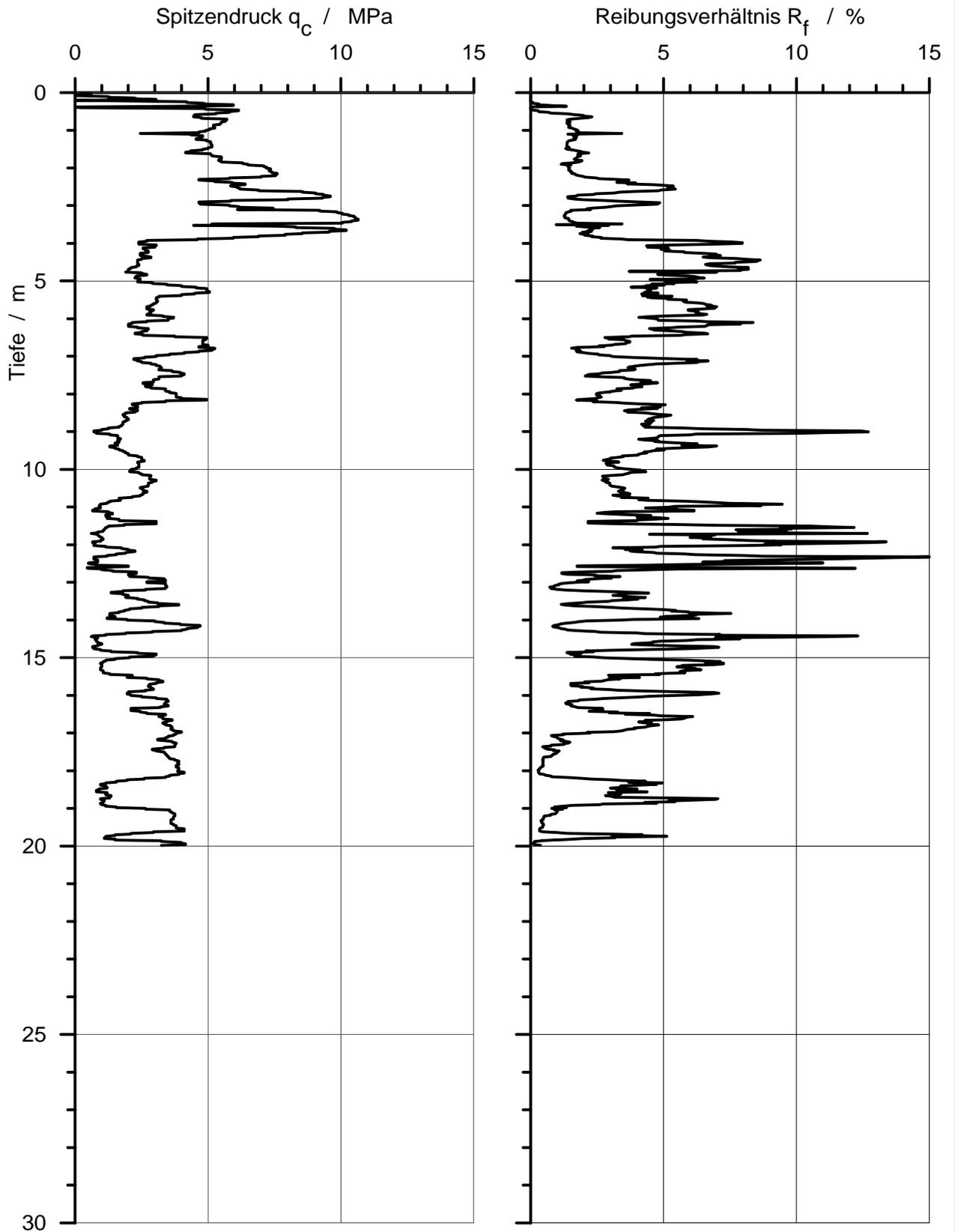
|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil nach Vergütung<br>Drucksondierung B2DS1N |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 5.10</b>                                     |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997                            |  |



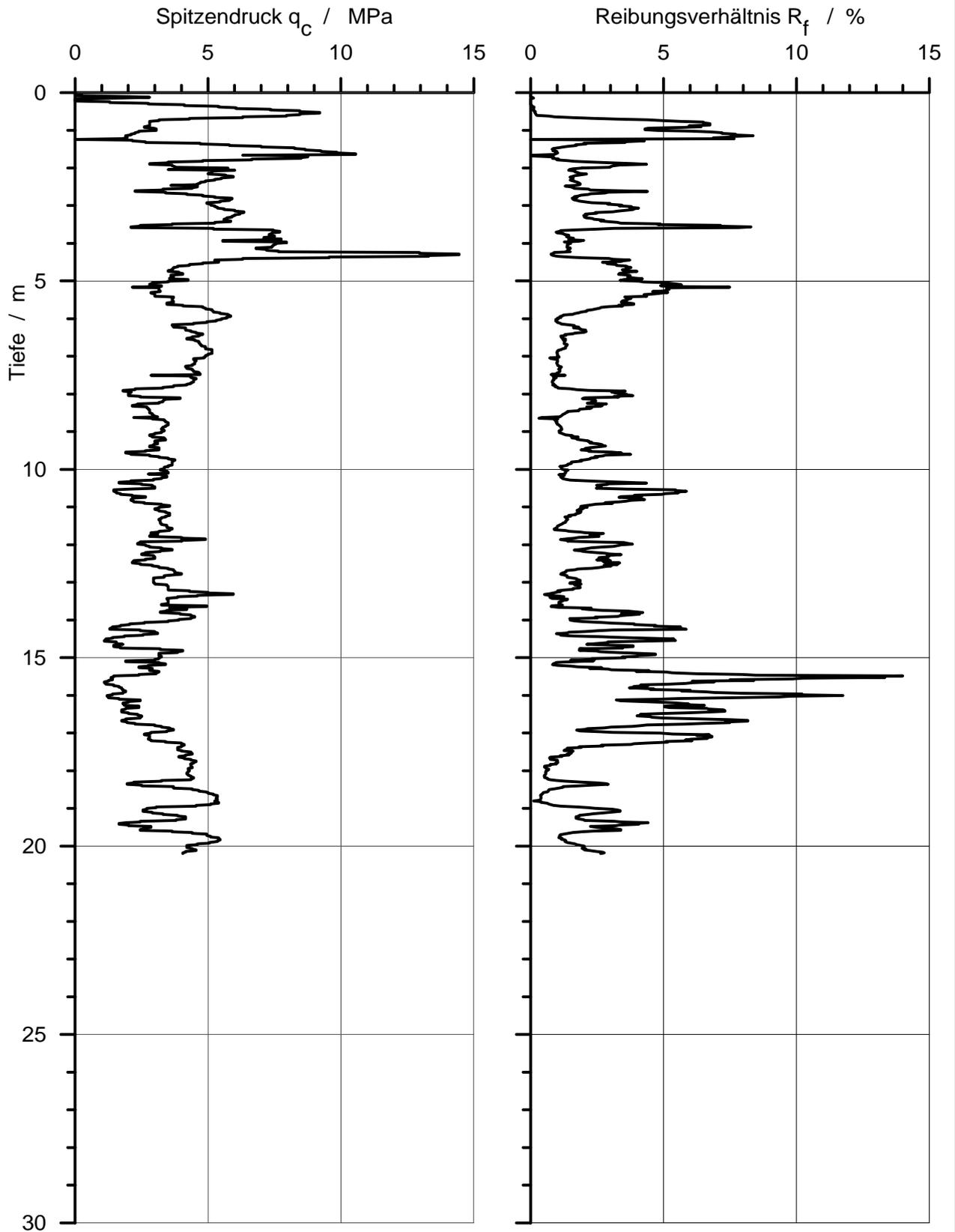
|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil nach Vergütung<br>Drucksondierung B2DS2N |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 5.11</b>                                     |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997                            |  |



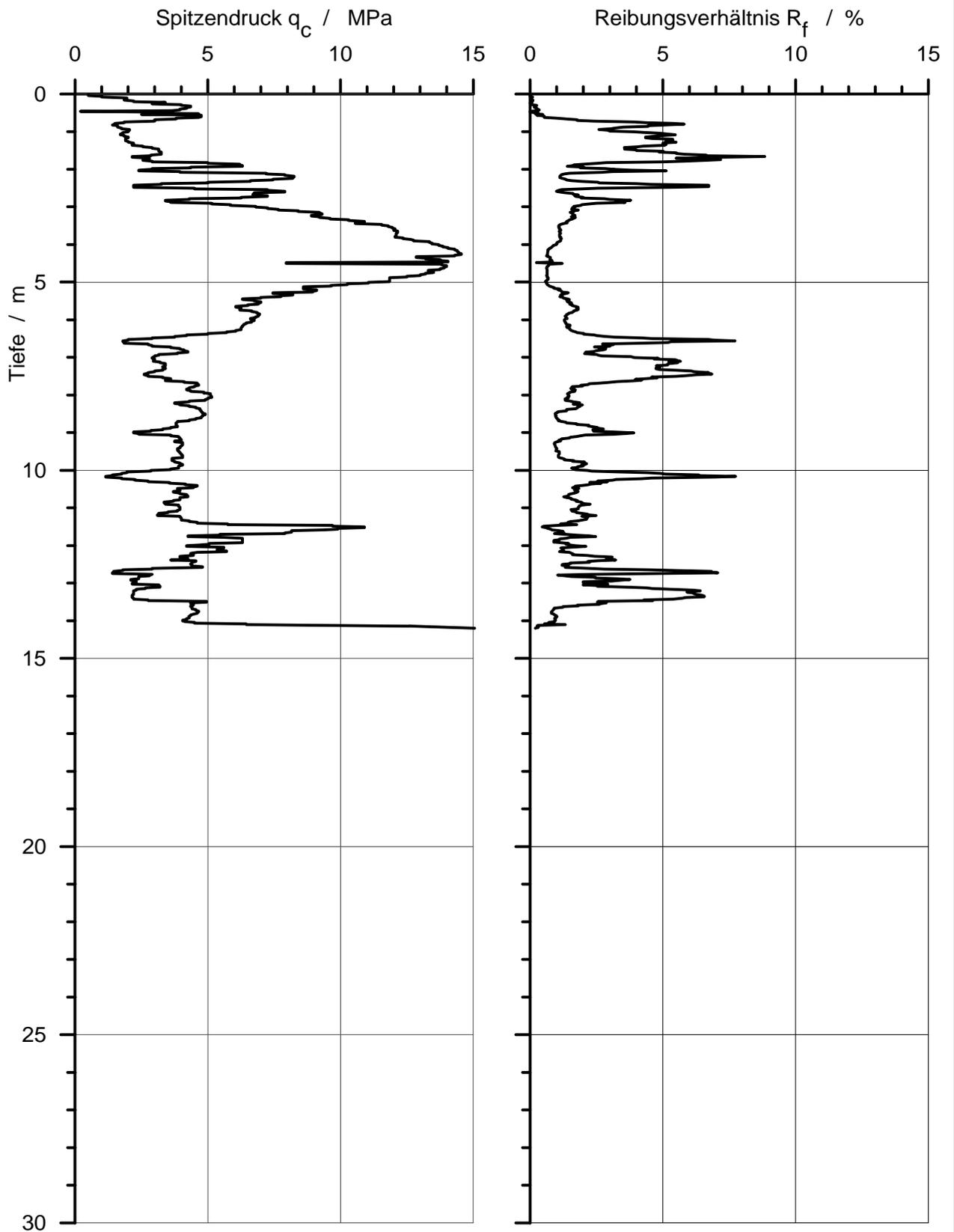
|        | <i>Datum</i> | <i>Name</i> |  |  |
|--------|--------------|-------------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00     | Knobloch    | Sondierprofil nach Vergütung<br>Drucksondierung B2DS3N |  |
| Gepr.  |              |             |  |  |
| Norm   |              |             |  |  |
|        |              |             | <b>Anhang 5.12</b>                                     |  |
|        |              |             | Quelle der Daten: LMBV 1997                            |  |



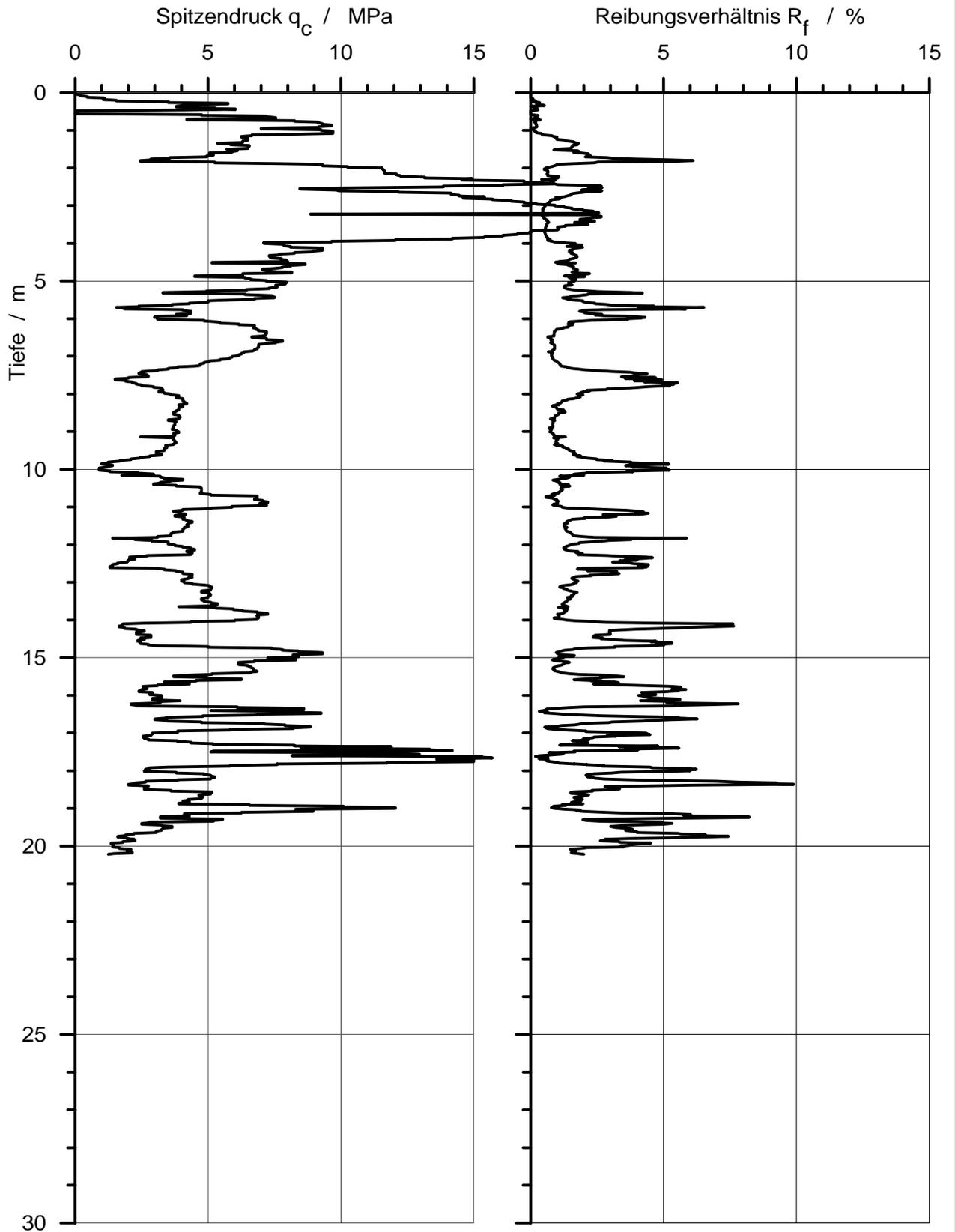
|        | <i>Datum</i> | <i>Name</i> |  |  |
|--------|--------------|-------------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00     | Knobloch    | Sondierprofil nach Vergütung<br>Drucksondierung B2DS4N |  |
| Gepr.  |              |             |  |  |
| Norm   |              |             |  |  |
|        |              |             | <b>Anhang 5.13</b>                                     |  |
|        |              |             | Quelle der Daten: LMBV 1997                            |  |



|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil nach Vergütung<br>Drucksondierung B2DS5N |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 5.14</b>                                     |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997                            |  |



|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil nach Vergütung<br>Drucksondierung B2DS6N |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 5.15</b>                                     |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997                            |  |

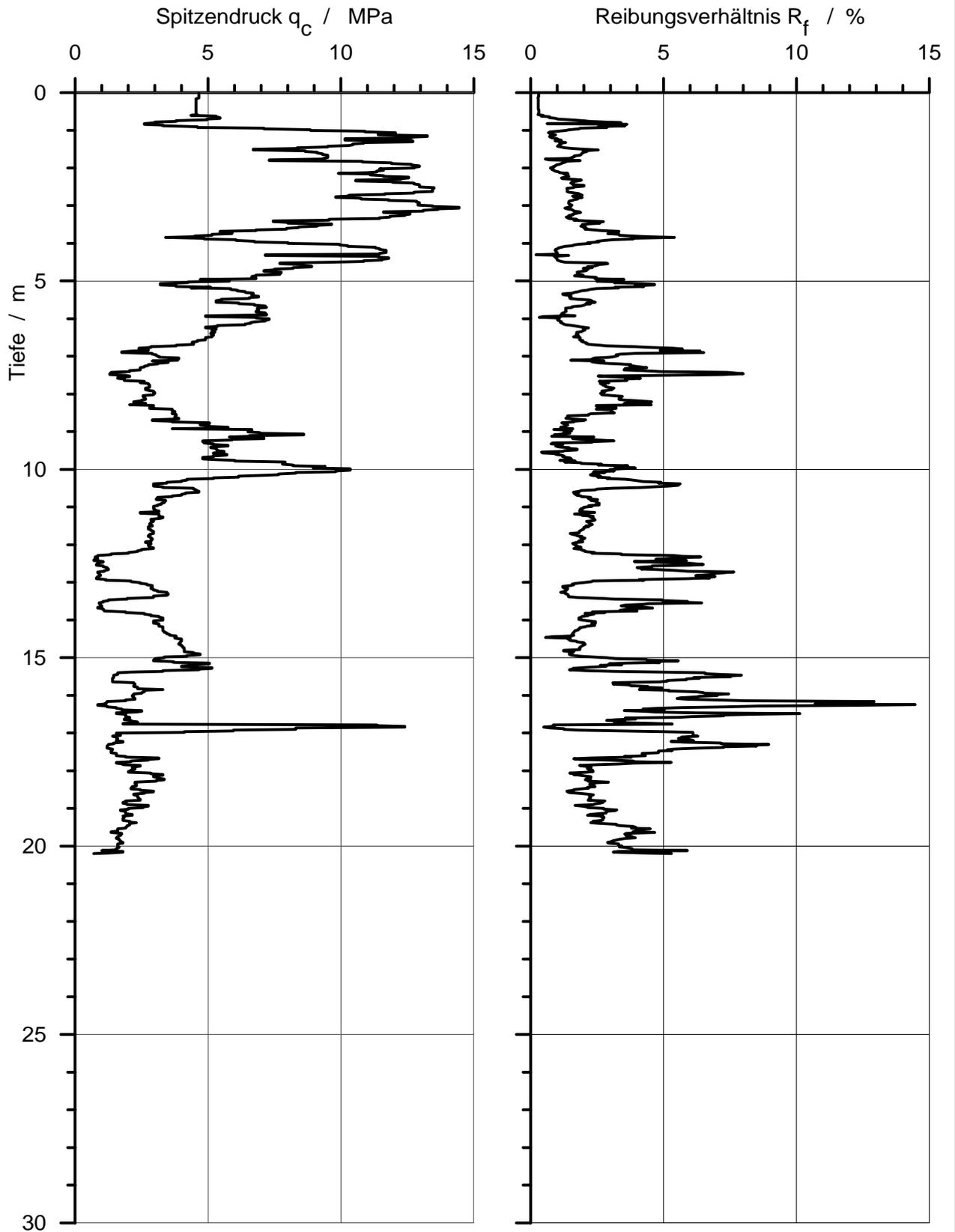


|        | Datum    | Name     |
|--------|----------|----------|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch |
| Gepr.  |          |          |
| Norm   |          |          |

Sondierprofil nach Vergütung  
Drucksondierung B2DS7N

**Anhang 5.16**

Quelle der Daten: LMBV 1997

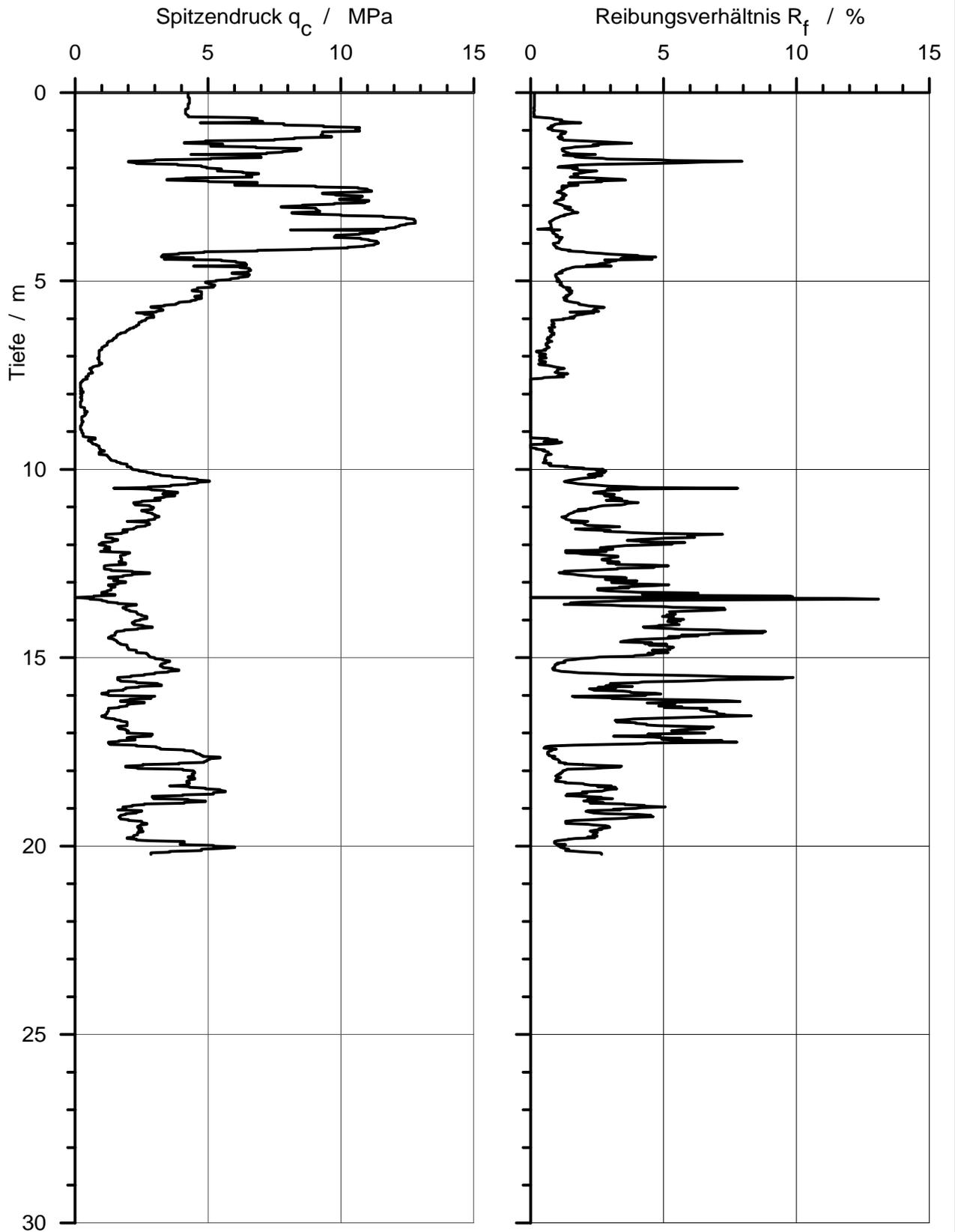


|        | Datum    | Name     |
|--------|----------|----------|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch |
| Gepr.  |          |          |
| Norm   |          |          |

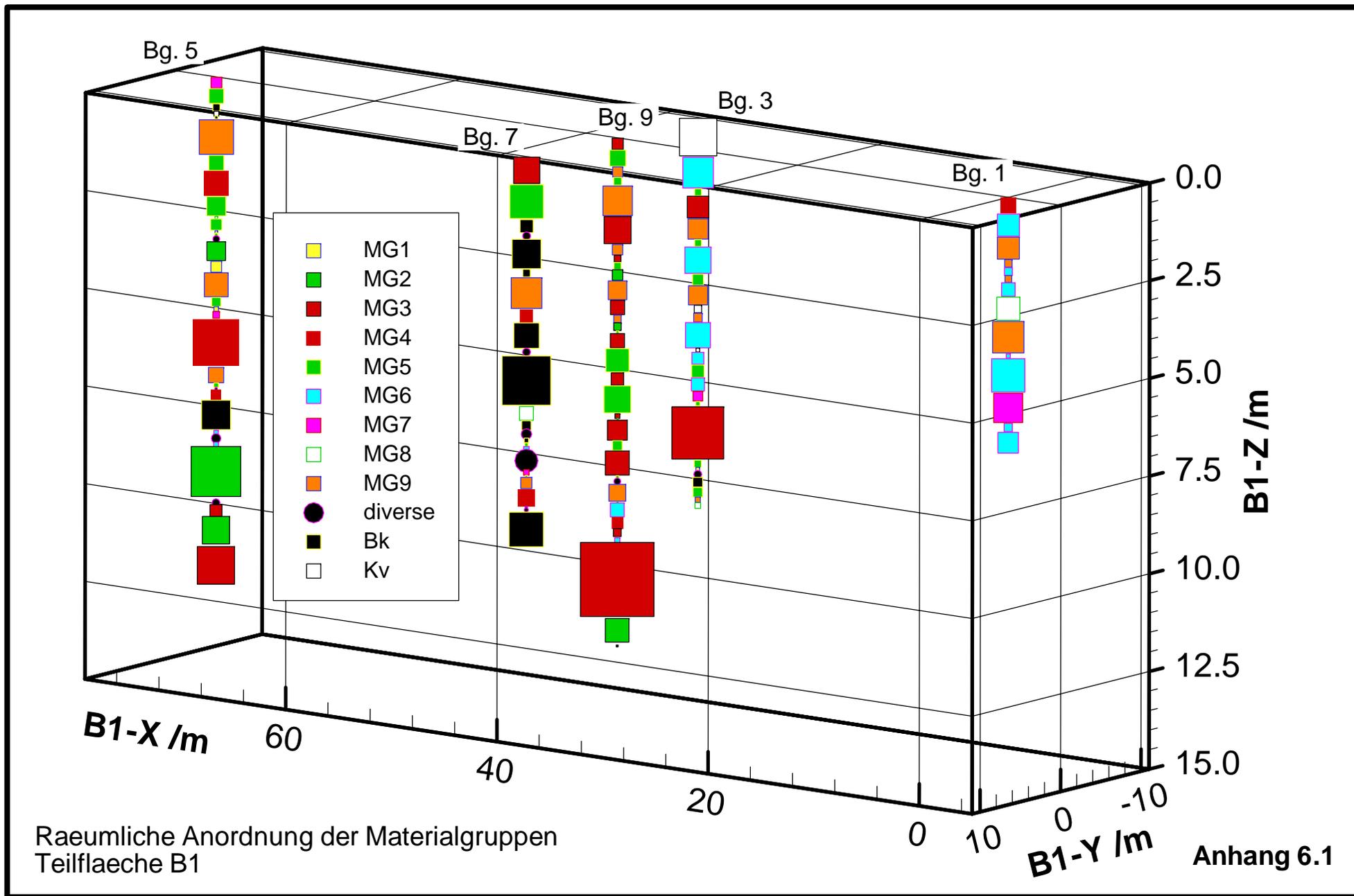
Sondierprofil nach Vergütung  
Drucksondierung B2DS8N

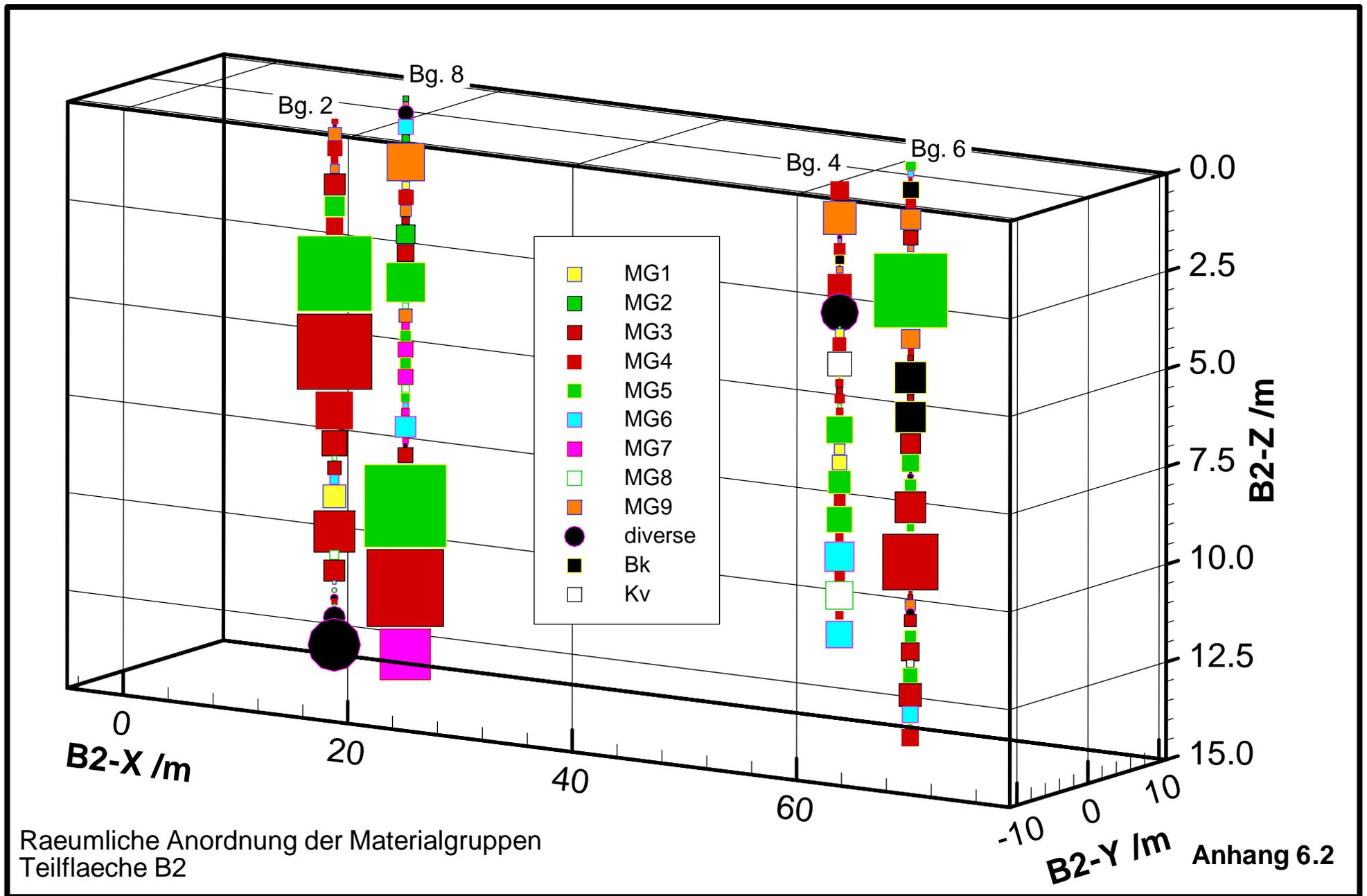
**Anhang 5.17**

Quelle der Daten: LMBV 1997

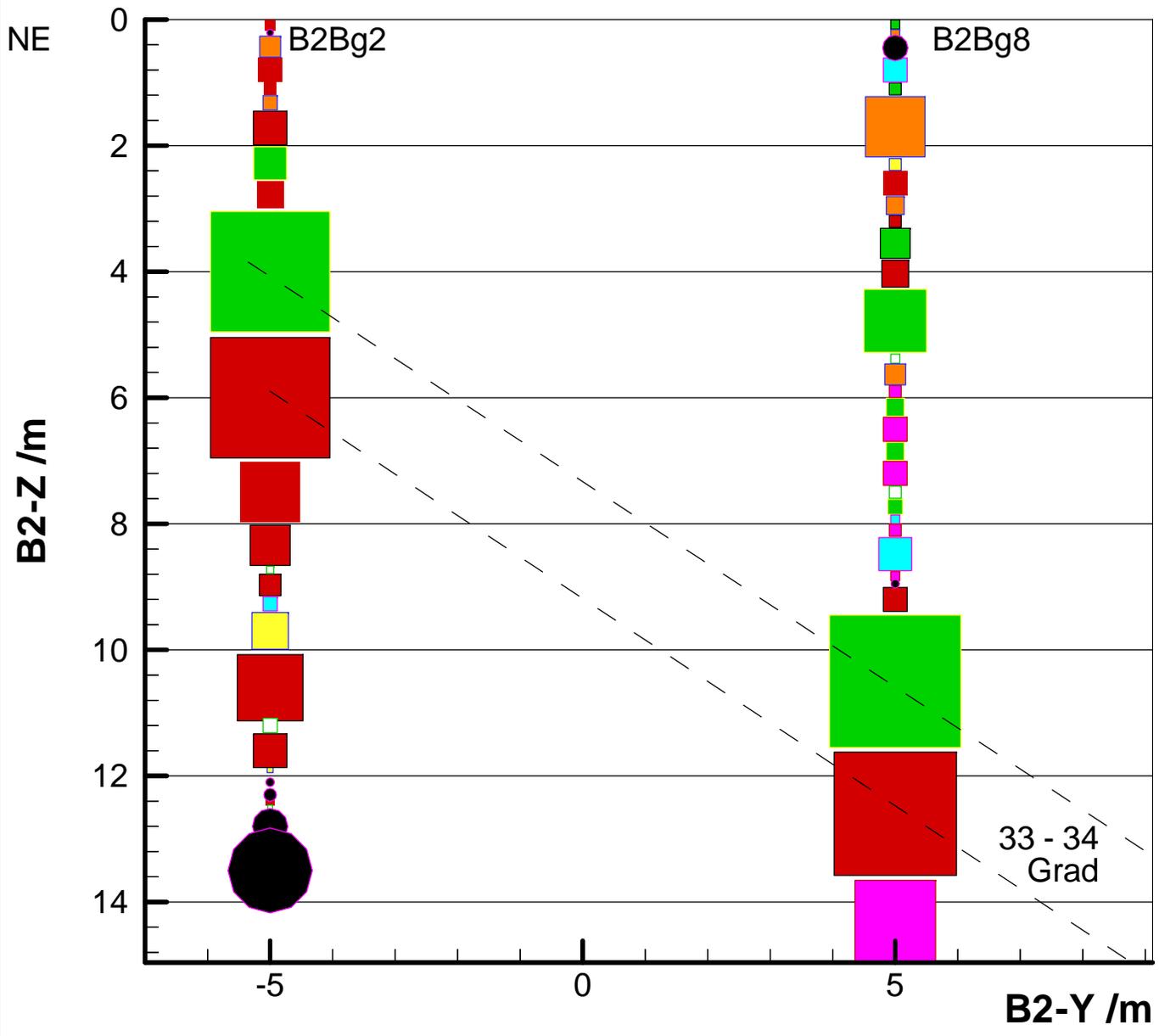


|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Sondierprofil nach Vergütung<br>Drucksondierung B2DS9N |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 5.18</b>                                     |  |
|        |          |          | Quelle der Daten: LMBV 1997                            |  |





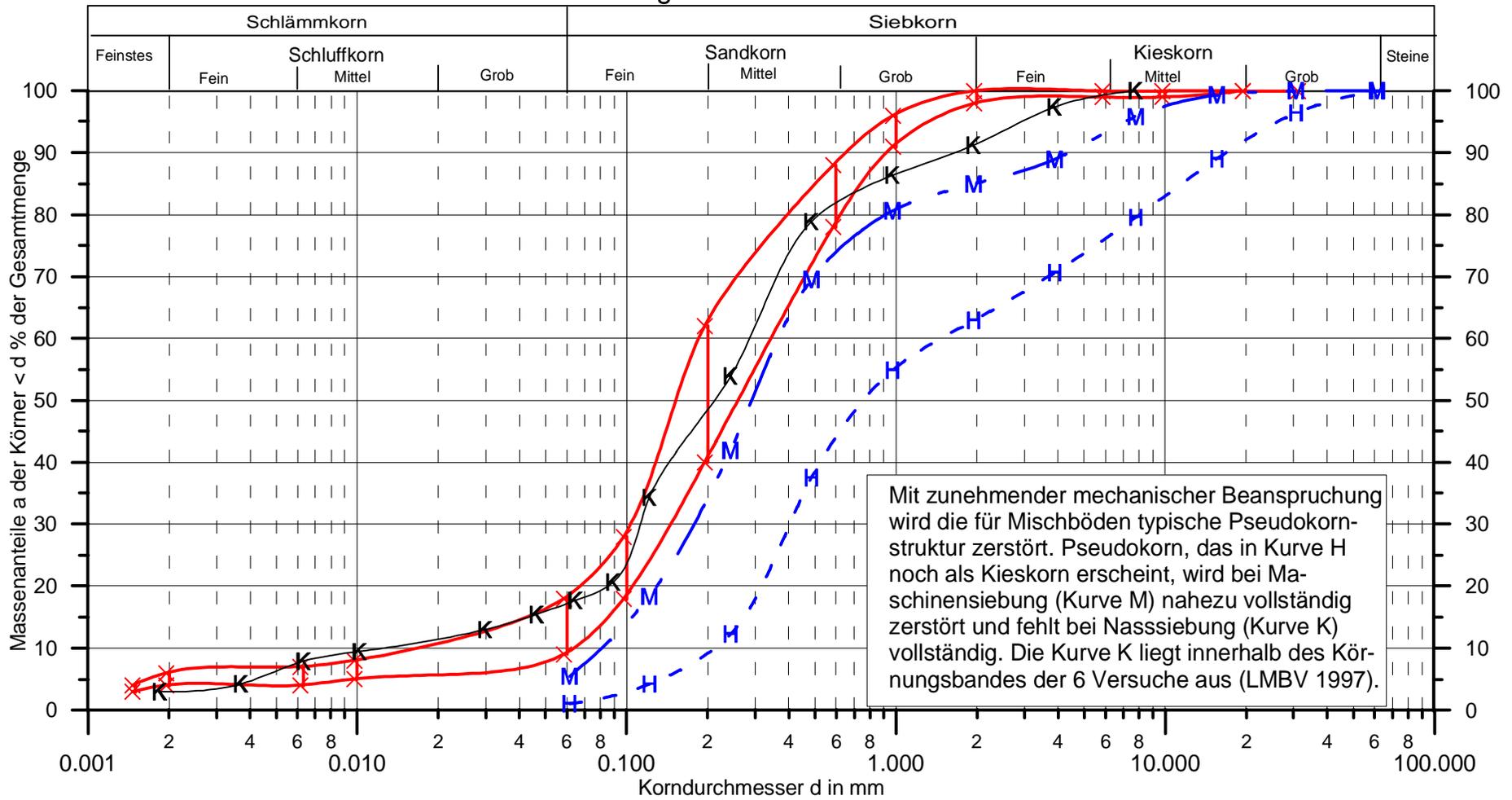
Raemliche Anordnung der Materialgruppen  
Teilflaeche B2



Räumliche Anordnung  
 der Materialgruppen  
 Teilfläche B2  
 Schnitt durch Bohrung  
 B2Bg2 und B2Bg8

- MG1
- MG2
- MG3
- MG4
- MG5
- MG6
- MG7
- MG8
- MG9
- diverse
- Bk
- Kv

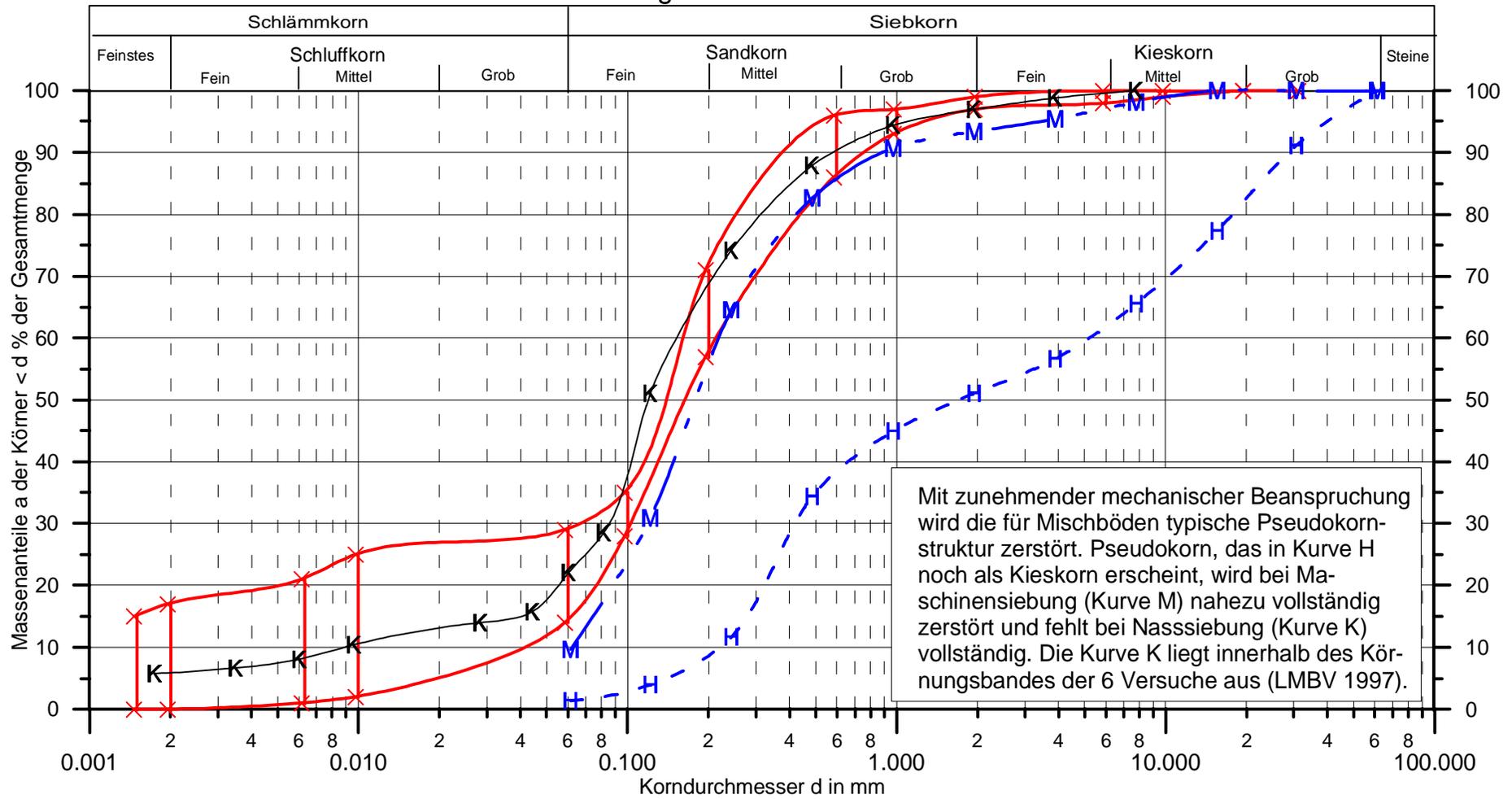
# Körnungslinie nach DIN 18123



- Körnungsband von 6 Versuchen (LMBV 1997)
- H trockene vorsichtige Handsiebung
- M trockene Maschinensiebung
- K Kombinierte Sieb-Schlammanalyse

|                   | Datum    | Name     | Korngrößenverteilung<br>Bodenmechanische Grundgesamtheit BGG B |
|-------------------|----------|----------|--|
| Bearb.            | 17.05.00 | Knobloch |  |
| Gepr.             |          |          |  |
| Norm              |          |          |  |
| <b>Anlage 8.1</b> |          |          |  |

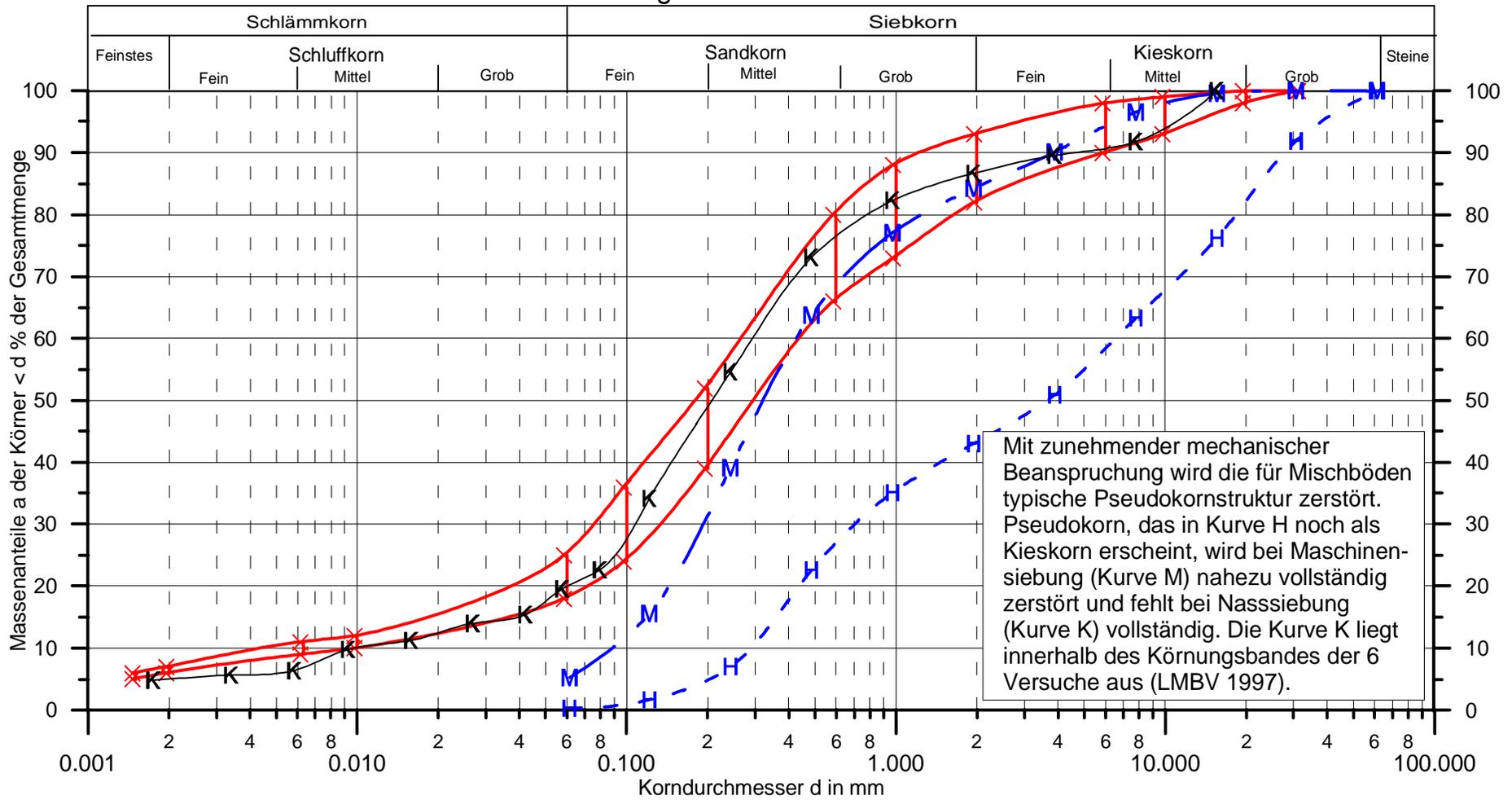
### Körnungslinie nach DIN 18123



Mit zunehmender mechanischer Beanspruchung wird die für Mischböden typische Pseudokornstruktur zerstört. Pseudokorn, das in Kurve H noch als Kieskorn erscheint, wird bei Maschinensiebung (Kurve M) nahezu vollständig zerstört und fehlt bei Nasssiebung (Kurve K) vollständig. Die Kurve K liegt innerhalb des Körnungsbandes der 6 Versuche aus (LMBV 1997).

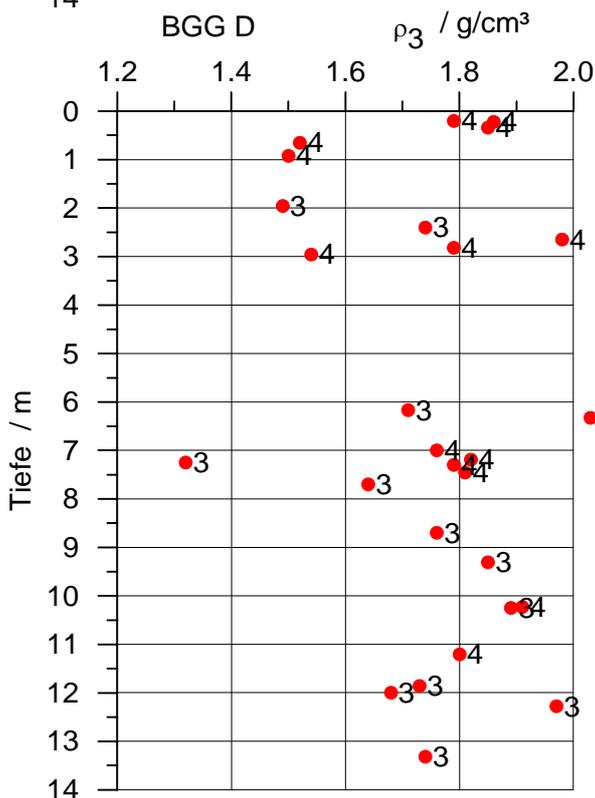
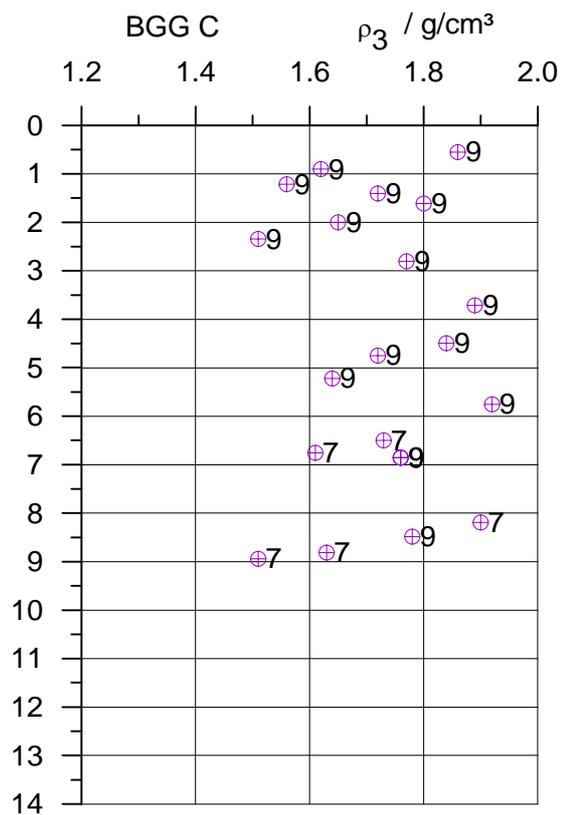
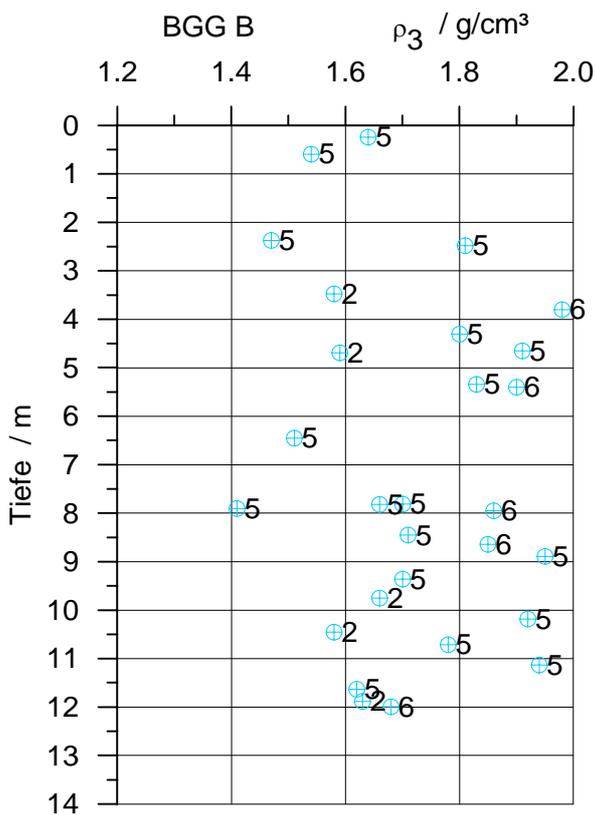
|        | Datum    | Name     | Korngrößenverteilung<br>Bodenmechanische Grundgesamtheit BGG C |
|--------|----------|----------|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch |  |
| Gepr.  |          |          |  |
| Norm   |          |          |  |
|        |          |          | <b>Anlage 8.2</b>  |

### Körnungslinie nach DIN 18123



- Kornungsband aus 6 Korngrößenverteilungen (LMBV 1997)
- H — trockene vorsichtige Handsiebung
- M — trockene Maschinensiebung
- K — Kombinierte Sieb-Schlämmanalyse

| Datum           | Name     | Korngrößenverteilung<br>Bodenmechanische Grundgesamtheit BGG D |
|-----------------|----------|--|
| Bearb. 17.05.00 | Knobloch |  |
| Gepr.           |          |  |
| Norm            |          |  |
|                 |          | <b>Anlage 8.3</b>  |



Die Dichten wurden an Einzelproben bestimmt. Die Datenpunkte sind mit der Nummer der Materialgruppe bezeichnet:

- 2,5, 6      MG2, MG5, MG6 : BGG B
- 9,7        MG9, MG7        : BGG C
- 3,4        MG3, MG4        : BGG D

Die Dichten schwanken im Wertebereich von 1,3 g/cm<sup>3</sup> bis 2,0 g/cm<sup>3</sup>.

|        | Datum    | Name     |  |  |
|--------|----------|----------|--|--|
| Bearb. | 17.05.00 | Knobloch | Dichten an Einzelproben<br>aus den Kernrohren (LINERN) |  |
| Gepr.  |          |          |  |  |
| Norm   |          |          |  |  |
|        |          |          | <b>Anhang 9</b>  |  |
|        |          |          | Datenquelle: (LMBV 1997)                               |  |

Anhang 10.1 : Beschreibende Kennwerte – Spitzendruckwerte

| <b>Sondierung / Variable</b> | <b>Anzahl</b> | <b>Summe</b> | <b>Mittelwert</b> | <b>Standardfehler</b> | <b>Standardabweichung</b> | <b>Varianz</b> | <b>Schiefe</b> | <b>Kurtosis</b> |
|------------------------------|---------------|--------------|-------------------|-----------------------|---------------------------|----------------|----------------|-----------------|
| B2DS1QC                      | 475           | 711          | 1,5               | 0,02                  | 0,544                     | 0,296          | -0,3           | -0,7            |
| B2DS4QC                      | 475           | 754          | 1,6               | 0,02                  | 0,452                     | 0,204          | -0,1           | -0,6            |
| B1DS1QC                      | 475           | 758          | 1,6               | 0,12                  | 2,688                     | 7,226          | 8,0            | 72,9            |
| B1DS7QC                      | 475           | 796          | 1,7               | 0,04                  | 0,886                     | 0,786          | 0,9            | -0,4            |
| B1DS5QC                      | 475           | 822          | 1,7               | 0,02                  | 0,408                     | 0,166          | 0,4            | 0,0             |
| B1DS3QC                      | 475           | 828          | 1,7               | 0,07                  | 1,483                     | 2,199          | 4,9            | 31,0            |
| B2DS3QC                      | 475           | 879          | 1,9               | 0,04                  | 0,814                     | 0,663          | 1,3            | 3,6             |
| B2DS2QC                      | 475           | 879          | 1,9               | 0,03                  | 0,654                     | 0,427          | 1,1            | 1,7             |
| B1DS6QC                      | 475           | 889          | 1,9               | 0,05                  | 1,082                     | 1,171          | 1,5            | 2,7             |
| B1DS8QC                      | 475           | 946          | 2,0               | 0,03                  | 0,717                     | 0,514          | 0,2            | -0,9            |
| B1DS2AQC                     | 475           | 966          | 2,0               | 0,04                  | 0,814                     | 0,662          | 0,9            | 0,2             |
| B2DS7QC                      | 475           | 977          | 2,1               | 0,06                  | 1,205                     | 1,452          | 2,0            | 5,1             |
| B2DS8QC                      | 475           | 990          | 2,1               | 0,04                  | 0,954                     | 0,909          | 1,3            | 1,8             |
| B1DS2QC                      | 356           | 743          | 2,1               | 0,13                  | 2,486                     | 6,178          | 6,6            | 52,2            |
| B1DS9QC                      | 475           | 993          | 2,1               | 0,04                  | 0,850                     | 0,722          | 1,4            | 1,4             |
| B2DS9QC                      | 475           | 1027         | 2,2               | 0,03                  | 0,700                     | 0,489          | 0,1            | -0,4            |
| B2DS6QC                      | 475           | 1027         | 2,2               | 0,05                  | 1,087                     | 1,181          | 2,0            | 4,9             |
| B2DS5QC                      | 475           | 1044         | 2,2               | 0,03                  | 0,737                     | 0,543          | 0,3            | -1,0            |
| B1DS4QC                      | 475           | 1117         | 2,4               | 0,07                  | 1,592                     | 2,535          | 1,6            | 1,5             |
| B2DS1NQC                     | 475           | 1582         | 3,3               | 0,10                  | 2,248                     | 5,055          | 1,8            | 2,9             |
| B2DS4NQC                     | 475           | 1596         | 3,4               | 0,11                  | 2,319                     | 5,376          | 1,7            | 2,3             |
| B2DS9NQC                     | 475           | 1759         | 3,7               | 0,17                  | 3,624                     | 13,136         | 1,1            | 0,0             |
| B2DS5NQC                     | 475           | 1956         | 4,1               | 0,08                  | 1,772                     | 3,140          | 2,3            | 9,2             |
| B2DS2NQC                     | 475           | 1985         | 4,2               | 0,13                  | 2,795                     | 7,814          | 1,3            | 1,1             |
| B2DS3NQC                     | 475           | 2235         | 4,7               | 0,15                  | 3,344                     | 11,180         | 1,3            | 1,1             |
| B2DS8NQC                     | 475           | 2743         | 5,8               | 0,14                  | 3,151                     | 9,929          | 0,9            | -0,1            |
| B2DS6NQC                     | 475           | 2986         | 6,3               | 0,16                  | 3,542                     | 12,545         | 1,0            | -0,3            |
| B2DS7NQC                     | 475           | 3092         | 6,5               | 0,22                  | 4,727                     | 22,347         | 1,6            | 1,6             |

Anhang 10.2: Beschreibende Kennwerte – Reibungsverhältnisse

| <b>Sondierung / Variable</b> | <b>Anzahl</b> | <b>Summe</b> | <b>Mittelwert</b> | <b>Standardfehler</b> | <b>Standardabweichung</b> | <b>Varianz</b> | <b>Schiefe</b> | <b>Kurtosis</b> |
|------------------------------|---------------|--------------|-------------------|-----------------------|---------------------------|----------------|----------------|-----------------|
| B1DS2RF                      | 357           | 113          | 0,32              | 0,02                  | 0,348                     | 0,121          | 2,1            | 5,0             |
| B1DS4RF                      | 476           | 236          | 0,50              | 0,02                  | 0,518                     | 0,269          | 3,9            | 22,1            |
| B1DS9RF                      | 476           | 246          | 0,52              | 0,01                  | 0,316                     | 0,100          | 3,6            | 20,4            |
| B1DS1RF                      | 476           | 253          | 0,53              | 0,05                  | 1,114                     | 1,240          | 5,8            | 50,9            |
| B1DS2ARF                     | 476           | 299          | 0,63              | 0,03                  | 0,628                     | 0,395          | 2,1            | 5,6             |
| B1DS3RF                      | 476           | 391          | 0,82              | 0,05                  | 1,128                     | 1,273          | 7,4            | 92,2            |
| B1DS7RF                      | 476           | 413          | 0,87              | 0,03                  | 0,757                     | 0,572          | 1,6            | 2,5             |
| B1DS5RF                      | 476           | 428          | 0,90              | 0,02                  | 0,454                     | 0,206          | 1,3            | 1,8             |
| B2DS9RF                      | 476           | 522          | 1,10              | 0,03                  | 0,555                     | 0,309          | 1,7            | 3,2             |
| B2DS9NRF                     | 476           | 637          | 1,34              | 0,06                  | 1,248                     | 1,556          | 1,7            | 3,7             |
| B2DS7RF                      | 476           | 706          | 1,48              | 0,04                  | 0,943                     | 0,890          | 0,9            | 0,2             |
| B1DS8RF                      | 476           | 789          | 1,66              | 0,04                  | 0,828                     | 0,685          | 2,6            | 12,5            |
| B2DS7NRF                     | 476           | 798          | 1,68              | 0,05                  | 1,165                     | 1,357          | 1,7            | 2,4             |
| B2DS5RF                      | 476           | 838          | 1,76              | 0,04                  | 0,840                     | 0,705          | 1,0            | 1,9             |
| B2DS8ARF                     | 476           | 879          | 1,85              | 0,05                  | 1,117                     | 1,247          | 1,3            | 1,5             |
| B2DS6ARF                     | 476           | 886          | 1,86              | 0,05                  | 1,084                     | 1,175          | 1,0            | 0,8             |
| B2DS6NRF                     | 476           | 915          | 1,92              | 0,06                  | 1,353                     | 1,830          | 2,0            | 3,9             |
| B2DS2RF                      | 476           | 966          | 2,03              | 0,05                  | 1,141                     | 1,302          | 1,8            | 4,9             |
| B2DS5NRF                     | 476           | 1055         | 2,22              | 0,06                  | 1,304                     | 1,699          | 1,4            | 2,2             |
| B2BS8NRF                     | 476           | 1094         | 2,30              | 0,05                  | 1,141                     | 1,302          | 1,6            | 4,0             |
| B1DS6RF                      | 476           | 1166         | 2,45              | 0,07                  | 1,594                     | 2,542          | 2,4            | 9,7             |
| B2DS3ARF                     | 476           | 1212         | 2,55              | 0,07                  | 1,482                     | 2,195          | 3,8            | 34,9            |
| BSDS4RF                      | 476           | 1280         | 2,69              | 0,06                  | 1,406                     | 1,977          | 2,1            | 8,1             |
| B2DS2NRF                     | 476           | 1350         | 2,84              | 0,07                  | 1,464                     | 2,143          | 2,8            | 17,2            |
| BSDS3NRF                     | 476           | 1408         | 2,96              | 0,06                  | 1,270                     | 1,613          | 0,9            | 0,7             |
| B2DS1NRF                     | 476           | 1415         | 2,97              | 0,07                  | 1,545                     | 2,387          | 1,1            | 2,1             |
| B2DS1RF                      | 476           | 1735         | 3,65              | 0,11                  | 2,317                     | 5,370          | 1,5            | 4,4             |
| B2DS4NRF                     | 476           | 2198         | 4,62              | 0,10                  | 2,151                     | 4,628          | 1,1            | 1,7             |

Anhang 10.3: Hauptkomponentenanalyse - alle Spitzendruckwerte

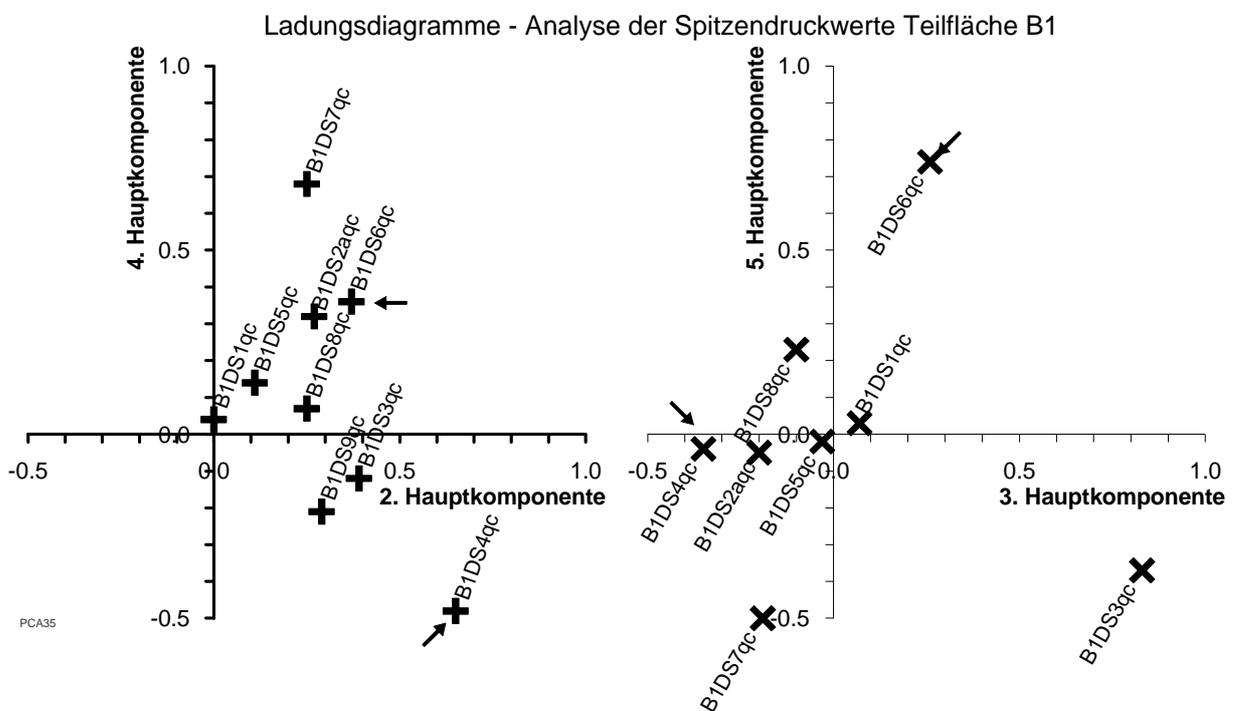
| Komponente                  | 1  | 2     | 3            | 4           | 5            | 6     | 7            | 8     |
|-----------------------------|--|-------|--------------|-------------|--------------|-------|--------------|-------|
| Eigenwert                   | 73,4   | 13,1  | 10,8         | 6,7         | 5,8          | 3,9   | 2,8          | 2,3   |
| Varianzanteil %             | 58,0   | 10,4  | 8,6          | 5,3         | 4,6          | 3,1   | 2,2          | 1,8   |
| Varianzanteil kumuliert / % | 58,0   | 68,4  | 77,0         | 82,3        | 86,9         | 90,0  | 92,2         | 94,0  |
| Variable                    | Werte der Eigenvektoren e (Ladungen) Teilfläche B1 |       |              |             |              |       |              |       |
| B1DS1qc                     | 0,12   | -0,39 | <b>-0,56</b> | 0,30        | <b>-0,63</b> | -0,11 | -0,05        | 0,11  |
| B1DS2aqc                    | -0,04  | -0,04 | -0,01        | 0,07        | 0,04         | 0,01  | 0,10         | -0,07 |
| B1DS2qc                     | -0,08  | -0,09 | -0,07        | <b>0,75</b> | 0,49         | 0,16  | -0,21        | 0,22  |
| B1DS3qc                     | -0,04  | -0,03 | 0,08         | -0,04       | -0,12        | 0,22  | <b>-0,78</b> | -0,36 |
| B1DS4qc                     | -0,04  | -0,03 | -0,03        | 0,06        | 0,03         | 0,03  | 0,04         | -0,08 |
| B1DS5qc                     | -0,01  | 0,02  | -0,01        | 0,03        | 0,01         | -0,06 | -0,02        | -0,06 |
| B1DS6qc                     | -0,05  | 0,02  | 0,01         | -0,02       | -0,08        | 0,10  | -0,30        | -0,17 |
| B1DS7qc                     | -0,04  | -0,02 | -0,05        | 0,04        | 0,05         | -0,04 | 0,07         | -0,01 |
| B1DS8qc                     | -0,04  | 0,00  | -0,02        | 0,05        | -0,01        | 0,04  | 0,04         | -0,08 |
| B1DS9qc                     | -0,02  | -0,02 | -0,02        | 0,11        | 0,05         | -0,01 | 0,01         | -0,07 |
|                             | Teilfläche B2 ohne Vergütung                       |       |              |             |              |       |              |       |
| B2DS1qc                     | -0,03  | 0,03  | 0,02         | 0,05        | -0,02        | 0,03  | -0,04        | -0,05 |
| B2DS2qc                     | -0,01  | -0,03 | 0,03         | 0,08        | 0,03         | -0,05 | 0,05         | -0,10 |
| B2DS3qc                     | -0,01  | -0,11 | 0,09         | 0,03        | 0,05         | -0,09 | 0,00         | 0,06  |
| B2DS4qc                     | -0,04  | -0,03 | 0,00         | 0,02        | 0,05         | -0,05 | 0,02         | -0,04 |
| B2DS5qc                     | -0,04  | -0,03 | -0,01        | 0,06        | 0,01         | 0,02  | 0,09         | -0,06 |
| B2DS6qc                     | -0,01  | -0,07 | 0,01         | 0,02        | 0,01         | 0,00  | 0,05         | -0,07 |
| B2DS7qc                     | -0,05  | -0,06 | -0,02        | 0,13        | 0,08         | 0,00  | 0,00         | -0,03 |
| B2DS9qc                     | -0,04  | -0,12 | 0,00         | -0,01       | 0,06         | -0,01 | 0,10         | -0,06 |
| B2DS8qc                     | -0,06  | -0,04 | -0,01        | 0,13        | 0,05         | -0,03 | 0,16         | -0,17 |

| <b>Komponente</b>                              | <b>1</b>    | <b>2</b>    | <b>3</b>    | <b>4</b>    | <b>5</b> | <b>6</b>     | <b>7</b> | <b>8</b>    |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|--------------|----------|-------------|
| Eigenwert                                      | 73,4        | 13,1        | 10,8        | 6,7         | 5,8      | 3,9          | 2,8      | 2,3         |
| Varianzanteil<br>%                             | 58,0        | 10,4        | 8,6         | 5,3         | 4,6      | 3,1          | 2,2      | 1,8         |
| Varianzanteil<br>kumuliert / %                 | 58,0        | 68,4        | 77,0        | 82,3        | 86,9     | 90,0         | 92,2     | 94,0        |
| Teilfläche B2 nach Vergütung                   |             |             |             |             |          |              |          |             |
| B2DS1Nqc                                       | 0,18        | 0,04        | -0,36       | -0,12       | 0,33     | -0,33        | -0,07    | -0,11       |
| B2DS2Nqc                                       | 0,25        | -0,13       | <b>0,42</b> | 0,01        | -0,03    | <b>-0,44</b> | -0,31    | <b>0,43</b> |
| B2DS3Nqc                                       | 0,34        | 0,22        | -0,29       | -0,03       | 0,12     | 0,21         | -0,02    | -0,11       |
| B2DS4Nqc                                       | 0,22        | -0,31       | -0,04       | -0,19       | 0,12     | 0,01         | -0,09    | 0,30        |
| B2DS5Nqc                                       | 0,10        | 0,17        | 0,04        | -0,05       | -0,17    | 0,57         | 0,02     | <b>0,50</b> |
| B2DS6Nqc                                       | 0,31        | <b>0,67</b> | -0,16       | 0,16        | -0,09    | -0,10        | -0,06    | 0,11        |
| B2DS7Nqc                                       | <b>0,55</b> | -0,39       | 0,03        | -0,13       | 0,21     | 0,38         | 0,12     | -0,17       |
| B2DS8Nqc                                       | 0,29        | 0,03        | 0,48        | <b>0,41</b> | -0,31    | 0,04         | 0,22     | -0,28       |
| B2DS9Nqc                                       | <b>0,46</b> | 0,04        | 0,03        | 0,07        | 0,04     | -0,25        | -0,05    | -0,17       |
| $ e_{ij}  > 0,2$ kursiv; $ e_{ij}  > 0,4$ fett |             |             |             |             |          |              |          |             |

Anhang 10.4: Hauptkomponentenanalyse - Teilfläche B1, Spitzendruckwerte

| Komponente                  | 1  | 2           | 3            | 4            | 5            | 6            | 7            | 8            | 9           |
|-----------------------------|--|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| Eigenwert                   | 7,3                                      | 4,9         | 2,0          | 0,6          | 0,4          | 0,3          | 0,2          | 0,2          | 0,1         |
| Varianzanteil %             | 45,5                                     | 30,9        | 12,6         | 3,6          | 2,8          | 1,7          | 1,3          | 1,1          | 0,5         |
| Varianzanteil kumuliert / % | 45,5                                     | 76,4        | 89,0         | 92,6         | 95,4         | 97,1         | 98,3         | 99,4         | 100,0       |
| Variable                    | Werte der Eigenvektoren e, Teilfläche B1 |             |              |              |              |              |              |              |             |
| B1DS1qc                     | <b>0,99</b>                              | 0,00        | 0,07         | 0,04         | 0,03         | 0,00         | 0,00         | 0,00         | 0,01        |
| B1DS2aqc *                  | 0,00                                     | 0,27        | -0,20        | 0,32         | -0,05        | 0,32         | <b>-0,59</b> | <b>-0,57</b> | 0,06        |
| B1DS3qc                     | -0,05                                    | 0,39        | <b>0,83</b>  | -0,12        | -0,37        | 0,09         | -0,10        | 0,01         | 0,02        |
| B1DS4qc *                   | 0,04                                     | <b>0,65</b> | <b>-0,35</b> | <b>-0,48</b> | -0,04        | <b>-0,46</b> | -0,09        | -0,01        | -0,01       |
| B1DS5qc                     | -0,01                                    | 0,11        | -0,03        | 0,14         | -0,02        | -0,02        | 0,19         | 0,03         | <b>0,96</b> |
| B1DS6qc *                   | -0,05                                    | 0,37        | 0,26         | 0,36         | <b>0,74</b>  | -0,15        | 0,25         | -0,14        | -0,12       |
| B1DS7qc                     | 0,00                                     | 0,25        | -0,19        | <b>0,68</b>  | <b>-0,50</b> | -0,21        | 0,25         | 0,21         | -0,21       |
| B1DS8qc *                   | 0,00                                     | 0,25        | -0,10        | 0,07         | 0,23         | 0,39         | -0,36        | <b>0,77</b>  | 0,02        |
| B1DS9qc                     | 0,03                                     | 0,29        | -0,20        | -0,21        | -0,08        | <b>0,68</b>  | <b>0,58</b>  | -0,14        | -0,10       |

\* Diese Sondierungen liegen innerhalb der belasteten Fläche.



Ladungsdiagramme, Teilfläche B1 - Spitzendruck

Anhang 10.5: Hauptkomponentenanalyse - unvergütete Teilflächen, Spitzendruckwerte

| Komponente                  | 1                                    | 2           | 3           | 4           | 5            | 6           | 7            | 8           |
|-----------------------------|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| Eigenwert                   | 7,3                                  | 6,8         | 2,3         | 1,2         | 0,9          | 0,8         | 0,7          | 0,4         |
| Varianzanteil / %           | 33,0                                 | 30,7        | 10,6        | 5,6         | 4,0          | 3,6         | 3,1          | 1,7         |
| Varianzanteil kumuliert / % | 33,0                                 | 63,7        | 74,3        | 79,9        | 83,9         | 87,5        | 90,6         | 92,3        |
| Variable                    | Werte der Eigenvektoren e (Ladungen) |             |             |             |              |             |              |             |
|                             | Teilfläche B1                        |             |             |             |              |             |              |             |
| B1DS1qc                     | <b>0,97</b>                          | -0,20       | 0,07        | 0,05        | 0,01         | 0,01        | -0,04        | 0,04        |
| B1DS2aqc                    | 0,05                                 | 0,25        | -0,12       | -0,01       | 0,03         | 0,14        | -0,22        | 0,00        |
| B1DS3qc                     | 0,00                                 | 0,25        | <b>0,81</b> | 0,36        | -0,05        | 0,02        | 0,16         | -0,27       |
| B1DS4qc                     | 0,15                                 | <b>0,54</b> | -0,08       | -0,28       | 0,33         | -0,20       | 0,39         | -0,18       |
| B1DS5qc                     | 0,01                                 | 0,09        | 0,00        | 0,00        | -0,01        | 0,05        | -0,05        | 0,08        |
| B1DS6qc                     | 0,00                                 | 0,28        | 0,37        | -0,15       | 0,01         | 0,02        | <b>-0,42</b> | <b>0,51</b> |
| B1DS7qc                     | 0,04                                 | 0,22        | -0,11       | 0,03        | 0,09         | <b>0,50</b> | -0,16        | -0,25       |
| B1DS8qc                     | 0,04                                 | 0,22        | -0,03       | -0,04       | 0,04         | -0,14       | -0,21        | 0,00        |
| B1DS9qc                     | 0,08                                 | 0,25        | -0,11       | 0,04        | 0,07         | -0,22       | 0,18         | 0,22        |
|                             | Teilfläche B2 unvergütet             |             |             |             |              |             |              |             |
| B2DS1qc                     | -0,02                                | 0,07        | 0,02        | 0,13        | -0,03        | -0,26       | -0,06        | <b>0,50</b> |
| B2DS2qc                     | 0,02                                 | 0,09        | -0,14       | 0,28        | 0,13         | -0,26       | 0,28         | 0,13        |
| B2DS3qc                     | 0,01                                 | 0,09        | -0,10       | 0,27        | -0,12        | <b>0,55</b> | <b>0,41</b>  | <b>0,46</b> |
| B2DS4qc                     | -0,02                                | 0,07        | -0,08       | 0,22        | 0,07         | 0,03        | -0,02        | -0,06       |
| B2DS5qc                     | 0,05                                 | 0,23        | -0,10       | 0,04        | 0,08         | -0,08       | -0,06        | -0,01       |
| B2DS6qc                     | 0,09                                 | 0,32        | -0,04       | -0,39       | -0,10        | 0,30        | -0,04        | 0,01        |
| B2DS7qc                     | 0,08                                 | 0,29        | -0,20       | 0,11        | <b>-0,87</b> | -0,19       | 0,00         | -0,15       |
| B2DS8qc                     | 0,02                                 | 0,16        | -0,22       | <b>0,48</b> | 0,21         | -0,10       | <b>-0,48</b> | -0,13       |
| B2DS9qc                     | 0,02                                 | 0,09        | -0,14       | 0,38        | 0,13         | 0,19        | 0,04         | -0,02       |

Anhang 10.6: Hauptkomponentenanalyse - Teilfläche B2, Spitzendruckwerte

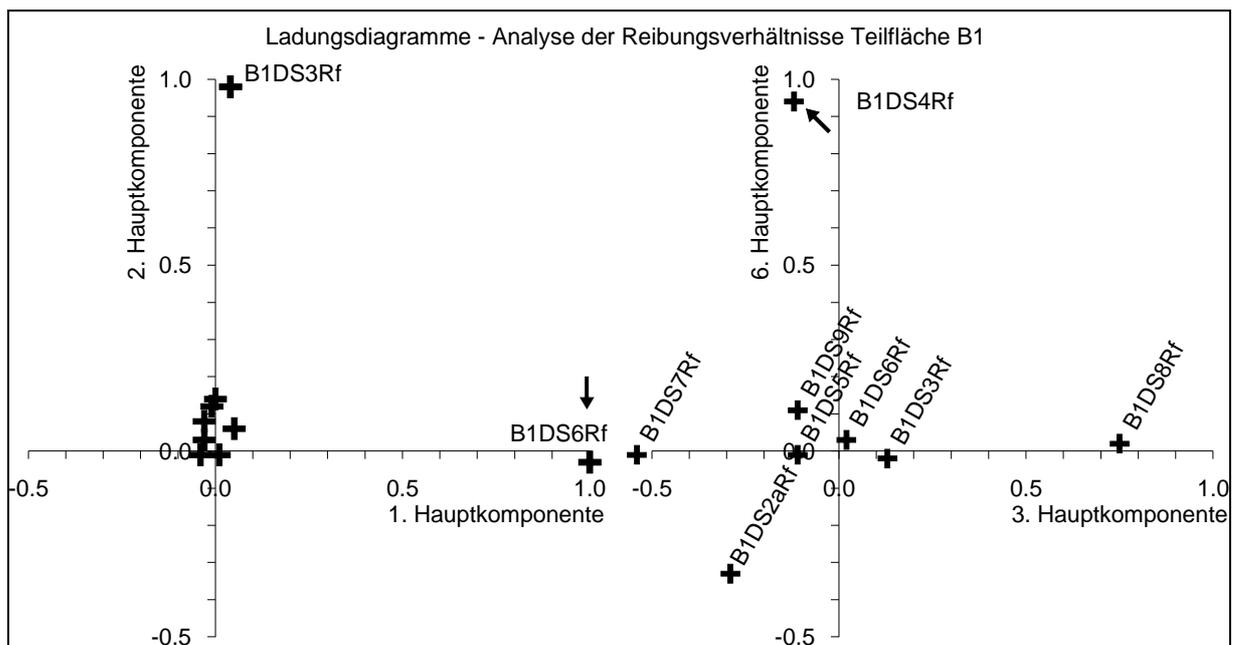
| Komponente                                     | 1                                    | 2           | 3           | 4           | 5            | 6            | 7           | 8            |
|--|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| Eigenwert                                      | 52,8                                 | 10,2        | 7,3         | 3,2         | 2,8          | 2,4          | 1,2         | 0,9          |
| Varianzanteil %                                | 63,1                                 | 12,2        | 8,7         | 3,8         | 3,3          | 2,8          | 1,4         | 1,0          |
| Varianzanteil kumuliert / %                    | 63,1                                 | 75,3        | 84,0        | 87,8        | 91,1         | 93,9         | 95,3        | 96,3         |
| Variable                                       | Werte der Eigenvektoren e (Ladungen) |             |             |             |              |              |             |              |
|  | Teilfläche B2 unvergütet             |             |             |             |              |              |             |              |
| B2DS1qc  | -0,04                                | 0,02        | 0,06        | -0,06       | -0,06        | -0,05        | 0,01        | 0,03         |
| B2DS2qc  | -0,02                                | -0,06       | 0,07        | -0,08       | 0,00         | -0,22        | 0,05        | 0,05         |
| B2DS3qc  | -0,02                                | -0,14       | 0,03        | 0,01        | 0,10         | -0,03        | 0,18        | -0,15        |
| B2DS4qc  | -0,04                                | -0,03       | 0,00        | -0,07       | 0,03         | -0,07        | -0,04       | -0,02        |
| B2DS5qc  | -0,07                                | -0,03       | 0,01        | 0,11        | 0,01         | -0,13        | 0,09        | 0,12         |
| B2DS6qc  | -0,06                                | -0,04       | -0,04       | 0,33        | 0,13         | -0,10        | 0,37        | -0,02        |
| B2DS7qc  | -0,08                                | -0,02       | -0,02       | 0,16        | 0,13         | -0,23        | <b>0,65</b> | <b>0,49</b>  |
| B2DS8qc  | -0,07                                | -0,04       | 0,03        | -0,05       | -0,04        | -0,27        | -0,04       | 0,01         |
| B2DS9qc  | -0,04                                | -0,12       | -0,05       | -0,05       | -0,05        | -0,10        | -0,06       | -0,05        |
|  | Teilfläche B2 nach Vergütung         |             |             |             |              |              |             |              |
| B2DS1Nqc                                       | 0,22                                 | 0,17        | -0,39       | -0,38       | 0,28         | -0,24        | 0,01        | -0,04        |
| B2DS2Nqc                                       | 0,30                                 | -0,27       | 0,31        | -0,27       | <b>0,54</b>  | <b>0,45</b>  | -0,02       | 0,36         |
| B2DS3Nqc                                       | <b>0,41</b>                          | 0,28        | -0,13       | -0,41       | -0,36        | -0,20        | 0,07        | 0,36         |
| B2DS4Nqc                                       | 0,25                                 | -0,28       | -0,22       | -0,26       | -0,04        | 0,16         | <b>0,52</b> | <b>-0,57</b> |
| B2DS5Nqc                                       | 0,14                                 | 0,15        | 0,13        | 0,10        | <b>-0,56</b> | <b>0,51</b>  | 0,24        | 0,12         |
| B2DS6Nqc                                       | 0,35                                 | <b>0,71</b> | 0,16        | 0,31        | 0,33         | 0,03         | 0,07        | -0,25        |
| B2DS7Nqc                                       | <b>0,60</b>                          | -0,38       | -0,34       | <b>0,52</b> | -0,07        | -0,09        | -0,24       | 0,12         |
| B2DS8Nqc                                       | 0,32                                 | -0,18       | <b>0,72</b> | -0,04       | -0,15        | <b>-0,43</b> | 0,04        | -0,19        |
| $ e_{ij}  > 0,2$ kursiv; $ e_{ij}  > 0,4$ fett |                                      |             |             |             |              |              |             |              |

Anhang 10.7: Hauptkomponentenanalyse - Teilfläche B1 und B2, Reibungsverhältnisse

| Komponente                | 1  | 2           | 3           | 4            | 5           | 6            | 7           | 8           |
|---------------------------|--|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| Eigenwert                 | 2,7  | 2,0         | 1,6         | 1,4          | 1,3         | 1,2          | 1,1         | 1,0         |
| Varianzanteil %           | 15,1   | 10,9        | 8,9         | 8,0          | 7,3         | 6,7          | 6,3         | 5,7         |
| Varianzanteil kumuliert % | 15,1   | 26,0        | 34,9        | 42,9         | 50,2        | 56,9         | 63,2        | 68,9        |
| Variable                  | Werte der Eigenvektoren e (Ladungen)<br>Teilfläche B1 und B2 |             |             |              |             |              |             |             |
| B1DS1Rf                   | 0,15   | -0,06       | 0,10        | 0,15         | 0,35        | 0,30         | 0,19        | <b>0,52</b> |
| B1DS2aRf                  | -0,31  | -0,04       | 0,22        | 0,37         | -0,15       | 0,05         | 0,05        | -0,25       |
| B1DS3Rf                   | -0,16  | 0,12        | 0,23        | -0,20        | -0,16       | -0,10        | 0,33        | -0,38       |
| B1DS4Rf                   | -0,34  | 0,01        | 0,25        | -0,12        | -0,03       | 0,10         | -0,15       | <b>0,43</b> |
| B1DS5Rf                   | -0,05  | 0,33        | 0,08        | 0,13         | -0,11       | -0,11        | <b>0,55</b> | 0,07        |
| B1DS6Rf                   | 0,23   | 0,20        | <b>0,46</b> | 0,04         | 0,24        | 0,29         | 0,17        | -0,12       |
| B1DS7Rf                   | -0,30  | <b>0,42</b> | -0,11       | 0,09         | 0,11        | -0,01        | -0,07       | -0,04       |
| B1DS8Rf                   | 0,21   | -0,17       | 0,06        | <b>-0,50</b> | -0,28       | -0,24        | -0,05       | 0,02        |
| B1DS9Rf                   | -0,31  | -0,13       | -0,04       | 0,02         | 0,21        | 0,37         | -0,28       | -0,35       |
| B2DS1Rf                   | 0,34   | -0,03       | <b>0,43</b> | 0,00         | 0,22        | -0,11        | -0,10       | -0,25       |
| B2DS2Rf                   | -0,17  | -0,25       | 0,27        | -0,05        | <b>0,41</b> | <b>-0,46</b> | 0,16        | 0,02        |
| B2DS3Rf                   | 0,21   | 0,05        | -0,35       | 0,31         | 0,05        | -0,12        | 0,24        | -0,03       |
| B2DS4Rf                   | -0,19  | -0,39       | -0,21       | 0,21         | 0,15        | -0,27        | 0,24        | 0,02        |
| B2DS5Rf                   | -0,13  | -0,28       | -0,01       | -0,11        | -0,28       | <b>0,41</b>  | <b>0,41</b> | -0,10       |
| B2DS6Rf                   | -0,33  | 0,35        | 0,08        | -0,25        | -0,05       | -0,14        | 0,03        | 0,26        |
| B2DS7Rf                   | -0,12  | -0,04       | 0,29        | <b>0,46</b>  | -0,25       | -0,27        | -0,29       | 0,05        |
| B2DS8Rf                   | 0,02   | 0,36        | -0,26       | -0,12        | 0,34        | -0,12        | -0,05       | -0,23       |
| B2DS9Rf                   | -0,32  | -0,20       | -0,04       | -0,26        | 0,36        | 0,03         | 0,10        | -0,07       |

Anhang 10.8: Hauptkomponentenanalyse - Teilfläche B1, Reibungsverhältnisse

| Komponente                                      | 1           | 2           | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|---|-------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Eigenwert                                       | 2,6         | 1,3         | 0,9   | 0,4   | 0,3   | 0,2   | 0,2   | 0,1   | 0,0   |
| Varianzanteil %                                 | <b>42,3</b> | 21,6        | 14,8  | 7,2   | 5,6   | 4,1   | 3,1   | 1,3   | 0,1   |
| Varianzanteil kumuliert / %                     | 42,3        | 63,8        | 78,6  | 85,8  | 91,4  | 95,5  | 98,6  | 99,9  | 100   |
| Werte der Eigenvektoren e, Teilfläche B1 und B2 |             |             |       |       |       |       |       |       |       |
| B1DS1Rf   | 0,01        | -0,01       | 0,00  | -0,02 | -0,01 | 0,01  | -0,02 | -0,03 | 1,00  |
| B1DS2aRf  | 0,00        | 0,14        | -0,29 | -0,05 | 0,87  | -0,33 | 0,13  | -0,04 | 0,01  |
| B1DS3Rf   | 0,04        | <b>0,98</b> | 0,13  | -0,09 | -0,12 | -0,02 | -0,06 | -0,02 | 0,00  |
| B1DS4Rf   | -0,03       | 0,08        | -0,12 | -0,02 | 0,28  | 0,94  | 0,09  | -0,13 | -0,01 |
| B1DS5Rf   | 0,05        | 0,06        | -0,11 | 0,08  | -0,18 | -0,01 | 0,94  | 0,25  | 0,02  |
| B1DS6Rf   | <b>1,00</b> | -0,03       | 0,02  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | -0,04 | 0,02  | -0,01 |
| B1DS7Rf   | -0,01       | 0,12        | -0,54 | 0,80  | -0,14 | -0,01 | -0,15 | -0,07 | 0,01  |
| B1DS8Rf   | -0,04       | -0,01       | 0,75  | 0,58  | 0,28  | 0,02  | 0,07  | 0,08  | 0,01  |
| B1DS9Rf   | -0,03       | 0,03        | -0,11 | -0,02 | 0,09  | 0,11  | -0,25 | 0,95  | 0,02  |



Ladungsdiagramme, Teilfläche B1 - Reibungsverhältnisse

Anhang 10.9: Mittlerer Spitzendruckwert je Schicht und daraus abgeleiteter Steifemodul

| Nr. der<br>i-ten<br>Schicht | untere Schichtfläche                         |                     | Sondierung B1DS4                                     |  | Sondierung B1DS6                                     |   |
|-----------------------------|--|---------------------|--|--|--|---|
|                             | Tiefe unter<br>Gelände-<br>oberfläche<br>/ m | Höhenlage<br>/ m NN | mittlerer<br>Spitzen-<br>druckwert<br>$q_{cm}$ / MPa | mittlerer<br>Steifemodul<br><br>$E_i$ / MPa<br>für $a = 4,0$ | mittlerer<br>Spitzen-<br>druckwert<br>$q_{cm}$ / MPa | mittlerer<br>Steifemodul<br><br>$E_i$ / MPa<br>für $a = 2,42$ |
| 1                           | 1,0  | 109,0               | 2,87   | 11,46  | 2,23   | 5,40  |
| 2                           | 2,0  | 108,0               | 1,73   | 6,91   | 0,57   | 1,38  |
| 3                           | 3,0  | 107,0               | 1,25   | 5,01   | 0,56   | 1,35  |
| 4                           | 4,0  | 106,0               | 1,31   | 5,24   | 0,74   | 1,80  |
| 5                           | 5,0  | 105,0               | 1,15   | 4,58   | 1,17   | 2,82  |
| 6                           | 6,0  | 104,0               | 1,38   | 5,50   | 1,81   | 4,39  |
| 7                           | 7,0  | 103,0               | 1,38   | 5,54   | 2,64   | 6,39  |
| 8                           | 8,0  | 102,0               | 1,87   | 7,46   | 1,56   | 3,78  |
| 9                           | 9,0  | 101,0               | 2,00   | 8,00   | 1,76   | 4,25  |
| 10                          | 10,0   | 100,0               | 3,70   | 14,80  | 1,91   | 4,61  |
| 11                          | 11,0   | 99,0                | 3,75   | 14,99  | 2,30   | 5,55  |
| 12                          | 12,0   | 98,0                | 5,22   | 20,88  | 3,66   | 8,85  |
| 13                          | 13,0   | 97,0                | 5,46   | 21,84  | 2,18   | 5,27  |
| 14                          | 14,0   | 96,0                | 4,47   | 17,89  | 2,15   | 5,20  |
| 15                          | 15,0   | 95,0                | 2,28   | 9,10   | 3,14   | 7,59  |
| 16                          | 16,0   | 94,0                | 2,41   | 9,64   | 2,95   | 7,14  |
| 17                          | 17,0   | 93,0                | 3,00   | 12,01  | 4,84   | 11,71   |
| 18                          | 18,0   | 92,0                | 2,40   | 9,59   | 3,67   | 8,89  |
| 19                          | 19,0   | 91,0                | 6,11   | 24,45  | 6,37   | 15,43   |
| 20                          | 20,0   | 90,0                | 2,82   | 11,27  | 8,55   | 20,69   |
| 21                          | 21,0   | 89,0                | 6,91   | 27,65  | 4,11   | 9,95  |
| 22                          | 22,0   | 88,0                | 10,59  | 42,36  | 2,49   | 6,03  |
| 23                          | 23,0   | 87,0                | 8,20   | 32,80  | 1,18   | 2,85  |
| 24                          | 24,0   | 86,0                | 3,66   | 14,64  | 1,20   | 2,90  |
| 25                          | 25,0   | 85,0                | 2,77   | 11,08  | 1,42   | 3,43  |

| Nr. der<br>i-ten<br>Schicht | untere Schichtfläche                         |                     | Sondierung B1DS4                                     |  | Sondierung B1DS6                                     |   |
|-----------------------------|--|---------------------|--|--|--|---|
|                             | Tiefe unter<br>Gelände-<br>oberfläche<br>/ m | Höhenlage<br>/ m NN | mittlerer<br>Spitzen-<br>druckwert<br>$q_{cm}$ / MPa | mittlerer<br>Steifemodul<br>$E_i$ / MPa<br>für $a = 4,0$ | mittlerer<br>Spitzen-<br>druckwert<br>$q_{cm}$ / MPa | mittlerer<br>Steifemodul<br>$E_i$ / MPa<br>für $a = 2,42$ |
| 26                          | 26,0   | 84,0                | 2,81   | 11,24  | 1,23   | 2,98  |
| 27                          | 27,0   | 83,0                | 3,01   | 12,06  | 1,66   | 4,02  |
| 28                          | 28,0   | 82,0                | 2,60   | 10,40  | 1,81   | 4,38  |
| 29                          | 29,0   | 81,0                | 2,26   | 9,02   | 3,46   | 8,38  |
| 30                          | 30,0   | 80,0                | 2,76   | 11,06  | 4,71   | 11,40   |
| 31-36                       | 31,0...36,0                                  | 79,0...76,0         | -  | *)30,00  | -  | *)30,00   |

\*) geschätzt.

## Begriffe

| Begriff                        | Erläuterung  |
|--------------------------------|--|
| Abraum                         | Über dem Rohstoff (hier Braunkohle) lagernde oder zwischengelagerte Gesteine (Zwischenmittel), die bewegt werden müssen oder bewegt wurden, um den Rohstoff gewinnen zu können. Zum Abraum gehören weiterhin abgetragene Liegendschichten und die Teile des Rohstoffs, die aus technologischen oder anderen Gründen mit dem Abraum verstürzt werden. |
| Anschüttung                    | Anschüttung von Erdstoffen an Bauwerke, führen zu zusätzlichen Setzungen.  |
| Arbeitsebene                   | Trennebene, auf der Gewinnungs-, Verkipps- oder Fördermittel betrieben werden. Im Festgesteinestagebau auch als Sohle bezeichnet.  |
| Auffüllung                     | Begriff nach DIN 18196, Schüttungen aus Fremdstoffen. Hierunter sind Ablagerungen u. a. aus Lockergesteinen zu verstehen, die in ihren Eigenschaften verändert worden sind.  |
| Böschungsentfernungsverhältnis | BEV = Böschungshöhe der Kippe / senkrechter Abstand von der Böschungsoberkante. Ohne störende Einflüsse, wie z. B. einfallendes Liegendes, Spülkippen, Tiefbau beträgt das BEV $\approx 1 : 15 \pm 20 \%$ .  |
| Deckgebirge                    | über dem Rohstoff (hier Braunkohle) lagernde Gesteine.   |
| DIN                            | Deutsches Institut für Normung; mit nachfolgender Nummer wird die deutsche Norm bezeichnet.  |
| direkter Aufschluss            | Baugrunduntersuchung bzw. Untersuchung des anstehenden Gesteins mit Probenahme, z. B. Bohrung.   |
| Drucksonde                     | Gerät mit Messaufnehmern, dass durch ein Gestänge in den Untergrund eingedrückt wird.  |
| gemischtkörniger Boden         | Begriff nach DIN 18196, Lockergestein, das mehrere Korngrößenfraktionen mit bestimmten Massenanteilen in einem Probevolumen enthält, z. B. schluffiger Sand. Die Verteilung der einzelnen Korngrößenfraktionen (klumpig oder nicht klumpig) wird nicht berücksichtigt.   |
| Halde                          | eine auf unverritztem Gelände oder auf einer Kippe oberhalb des ursprünglichen Geländeniveaus angelegte Kippe.   |

| <b>Begriff</b>                                   | <b>Erläuterung</b>  |
|--|---|
| Homogenität, stochastische                       | statistische Merkmale (z. B. Mittelwert oder Varianz), die innerhalb eines betrachteten Bereichs als konstant anzusehen sind.   |
| indirekter Aufschluss                            | Untersuchung des anstehenden Gesteins ohne Probeentnahme, z. B. Sondierung.   |
| Inhomogenität, Material- und Dichteinhomogenität | Inhomogenitäten bedeuten Eigenschaftsveränderungen mit dem Ort.   |
| Kippe, Mischbodenkippe                           | Kippe mit einem mittleren Feinkornanteil $d \leq 0,06$ mm von ca. 15 % bis ca. 40 %. Der Feinkornanteil muss nicht gleichmäßig verteilt sein, sondern kann auch als Pseudokorn vorliegen.   |
| Kippe, Außenkippe                                | Wird Abraum eines Tagebaus außerhalb des jeweiligen Tagebaubereichs abgelagert, wird diese Kippe als Außenkippe bezeichnet. Sie kann wieder innerhalb eines anderen Tagebaus liegen. Mit anderen Lockergesteinen als den ursprünglich anstehenden ist zu rechnen. |
| Kippe, bindige                                   | Kippen mit einem mittleren Feinkornanteil $d \leq 0,06$ mm von $\geq 40$ %, der die Eigenschaften der Kippe prägt.  |
| Kippe, Hochkippe, Hochschüttung                  | Von der Arbeitsebene in Hochschüttung hergestellte Kippe. Der verkippte Abraum liegt oberhalb der Arbeitsebene.   |
| Kippe, Innenkippe                                | Kippe liegt innerhalb des Tagebaubereichs.  |
| Kippe, nichtbindige Kippe, rollige Kippe         | Kippen mit einem mittleren Feinkornanteil $d \leq 0,06$ mm von $\leq 15$ % ( $\leq 30$ %), der bindige Anteil prägt die Eigenschaften der Kippen nur sehr gering.   |
| Kippe, Tiefkippe, Tiefschüttung                  | Von der Arbeitsebene in Tiefschüttung hergestellte Kippe. Der verkippte Abraum liegt unterhalb der Arbeitsebene.  |
| Kippengebiet, Baugrundstandort                   | Fläche, die durch ein Bauwerk einschließlich der zugehörigen Versorgungseinrichtungen, z. B. Straßen und Wege, beansprucht wird. Die Flächengröße beträgt bis einige Hektar.  |
| Kippengebiete, globale                           | Großräumiges Gebiet, umfasst den Bereich eines oder mehrerer Abbaufelder eines oder mehrerer ehemaliger Tagebaue einschließlich der Kippenrandbereiche. Die Flächengröße liegt bei mehreren Hektar bis Quadratkilometern.   |
| Kippengebiete, lokale                            | Abgegrenztes Gebiet eines ehemaligen Tagebaus oder eines Teils davon, das aus planerischen, geotechnischen oder technologischen Gründen abgegrenzt wird. Die Flächengröße liegt bei einigen Hektar.   |
| Kippscheibe                                      | (horizontale) Schicht in der Kippe, die durch den technologischen Prozess während des Schüttvorgangs entsteht. Die Höhe von Kippscheiben ist durch technologische Parametern, wie z. B. den Möglichkeiten der Geräte, begrenzt.                                   |

| <b>Begriff</b>                                 | <b>Erläuterung</b>  |
|--|---|
| Kritische Porenzahl, kritische Lagerungsdichte | Die Lagerungsdichte bzw. Porenzahl beim Gleiten wird kritische Lagerungsdichte bzw. kritische Porenzahl genannt [120].  |
| Liegendes                                      | Unter dem Punkt der Betrachtung anstehendes Gestein. Unter einer Liegendschicht wird die direkt unter der betrachteten Schicht (meist der Rohstoff) lagernde Schicht verstanden.  |
| Lockere Lagerung                               | Lagerungsdichte $D \leq 0,30$ ;<br>bezogene Lagerungsdichte $I_D \leq 0,33$ [120].  |
| Lockergesteine 1. und 2. Art nach DMITRUK      | · Lockergestein 1. Art: Lockergestein mit einer Verteilung der Korngrößenfraktionen, wie sie durch natürliche Prozesse entstehen,<br>· Lockergestein 2. Art: Lockergestein mit einer Pseudokornstruktur. Das Pseudokorn (Klumpen) besteht aus Lockergesteinskörnern [97].               |
| Makroporen                                     | „große“ Poren, Poren zwischen Pseudokörnern oder Körnern.   |
| Mischen  | verschiedene Substanzen zusammenbringen und durcheinander schütteln, so dass eine Masse, ein Gemisch entsteht [32].   |
| Mischung                                       | „Etwas, was noch deutlich erkennbare Bestandteile Elemente, Eigenschaften von Verschiedenem, Gegensätzlichem, normalerweise nicht zusammen Vorkommendem enthält“ [32].  |
| Mischboden                                     | Boden aus verschiedenen Lockergesteinen, die nicht gleichmäßig durchmischt, sondern nur vermengt sind. Die ursprünglichen Lockergesteine sind noch in Klumpen erhalten geblieben. Der Begriff „Mischboden“ ist nicht identisch mit dem Begriff „gemischtkörniger Boden“ nach DIN 18196. |
| Mitteldeutsches Revier                         | außer dem Lausitzer Revier (im Osten der Bundesländer Sachsen und Brandenburg) ein weiteres Revier des Braunkohlenbergbaus der neuen Bundesländer im Bereich der Städte Bitterfeld - Halle - Leipzig – Altenburg.   |
| Netz   | Systematisch über einen Raum verteilte Dinge. System von (netzartig) verzweigten Linien oder Anlagen. Die Linien schneiden sich in den Netzknoten. Zwischen den Netzknoten bestehen entlang der Netzlinien definierbare Beziehungen (vgl. Raster).                                      |
| normalkonsolidiertes Lockergestein             | Lockergestein, das sich in einem Spannungszustand befindet, der von keinem vorangehenden überschritten wurde und der ohne zusätzliche Einflüsse keine Veränderung mehr erfährt.   |
| Pseudokorn                                     | Klumpen aus verschiedenen Lockergesteinen.  |
| Randböschungssystem                            | Böschungen im natürlich anstehenden Gebirge, die im Ergebnis des technologischen Prozesses entstanden sind oder den Rand von Kippen bilden.   |

| <b>Begriff</b>                   | <b>Erläuterung</b>  |
|----------------------------------|---|
| Raster                           | (beliebiges) System aus sich (meist rechtwinklig) schneidenden Linien im Grund- oder Aufriss. Die Linien schneiden sich in den Rasterpunkten. Das Raster ist (meist) willkürlich gewählt. Die Rasterlinien sind bloße Verbindungslinien zwischen den Rasterpunkten (vgl. Netz). |
| Reichweite                       | Entfernung, bis zu der eine ortsabhängige Variable korreliert ist.  |
| Risiko                           | - Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit des Versagensfalles und Schadenssumme,<br>- Maß für die Größe einer Gefahr,<br>- Wahrscheinlichkeit des Eintreffens eines Ereignisses.  |
| Sackung, Sackungssetzung         | Setzungen durch Neuordnung des Gefüges der Lockergesteinspartikel infolge des Abbaus der kapillaren Kräfte im Korngerüst, meist bei Grundwasseranstieg.   |
| schiefe Ebene                    | in Böschungen angelegte Auffahrten für Fahrzeuge und Geräte.  |
| Setzung, Eigensetzung            | Setzung der Kippe unter Eigengewicht bis zum Abschluss des Konsolidierungsvorganges.  |
| Setzung, Endsetzung, Vollsetzung | Setzungsgröße am Ende des Eigensetzungsvorganges. Der Endbetrag der Eigensetzung von Tagebaukippen ist im Allgemeinen erreicht, wenn die Setzungszunahme pro Jahr unter 1,0 cm liegt.   |
| Sicherheitspfeiler               | Im Tagebau verbliebener Block gewachsenen Gebirges zur langfristigen Sicherung von Betriebsbereichen.   |
| Spülkippe                        | Eine Kippe, auf der Abraum abgekippt und verspült wurde. Hier sind spezielle Inhomogenitäten zu erwarten.   |
| Stationarität                    | Zeitliche oder räumliche Invarianz bestimmter statistischer Merkmale.   |
| Streckenentwässerung             | Meist in der Kohle aufgefahrene Strecken, in denen durch Steck- und Fallfilter das Wasser gesammelt, zu einem Schacht abgeleitet und gehoben wird.  |
| Kippe, Tagebaukippe              | Ablagerung des Abraums und anderer Lockergesteine.  |
| technogene Entstehung            | durch technische Prozesse, nicht durch natürliche Prozesse, gebildete Lockergesteinskörper.   |

---

| <b>Begriff</b>                   | <b>Erläuterung</b>   |
|----------------------------------|--|
| Trend                            | - ortsabhängige Veränderung statistischer Merkmale innerhalb einer Grundgesamtheit,<br>- systematische Änderung einer Variablen entlang einer Koordinate, im Variogramm bezeichnet der Trend das systematische Ansteigen des Variogrammwertes über den Schwellwert bei größeren Entfernungen zwischen den Datenpaaren. |
| überkonsolidiertes Lockergestein | Die Vertikalspannung in der Geschichte des Lockergesteins war größer als die gegenwärtig vorherrschende Vertikalspannung.  |
| Versturz                         | Schüttung eines Lockergesteins oder Haufwerks.   |
| Zugförderung                     | Diskontinuierliche Förderart, bei der das zu befördernde Gut (Abraum) in Zügen vom Gewinnungsgerät (Bagger) zum Abnehmer (Absetzer) transportiert wird.  |

---

## Symbole und Abkürzungen

|               |   |
|---------------|---|
| $v$           | Funktionsparameter, Querdehnungszahl  |
| $\omega$      | Funktionsparameter  |
| $\rho$        | Dichte (des feuchten Bodens); Korrelationskoeffizient   |
| $\rho_d$      | Trockendichte   |
| $\rho_s$      | Korndichte  |
| $\rho_1$      | mittlere Dichte des feuchten Bodens im Kernrohr (LINER) unter Berücksichtigung des Innendurchmessers            |
| $\rho_{1,m}$  | Mittelwert der Dichten $\rho_1$   |
| $\rho_2$      | mittlere Dichte des feuchten Bodens im Kernrohr (LINER) unter Berücksichtigung des Durchmessers der Vorschneide |
| $\rho_{2,m}$  | Mittelwert der Dichten $\rho_2$   |
| $\rho_3$      | mittlere Dichte einer Einzelprobe aus dem Kernrohr  |
| $\sigma$      | Spannung  |
| $\sigma_v$    | Vertikalspannung  |
| $\sigma_{v0}$ | Vertikalspannung (Gebirgsspannung)  |
| $\pi$         | Konstante   |
| <br>          |   |
| $a$           | Reichweite (Variogramm), Funktionsparameter   |
| $d$           | Durchmesser, Korndurchmesser  |
| $d_{10}$      | Korndurchmesser bei 10 % Siebdurchgang  |
| $d_{30}$      | Korndurchmesser bei 30 % Siebdurchgang  |
| $d_{60}$      | Korndurchmesser bei 60 % Siebdurchgang  |
| $e$           | Porenzahl   |
| $f_s$         | Mantelreibung   |
| $k$           | Krümmung  |
| $m$           | Anzahl  |
| $n$           | Anzahl, Porenanteil   |
| $q$           | Flächenlast, Spannung   |
| $q_c$         | Spitzendruck  |
| $q_t$         | korrigierter Spitzendruck   |
| $s$           | Setzung   |
| $u$           | Porenwasserdruck  |
| $u_0$         | statischer Porenwasserdruck   |
| $u_1$         | Porenwasserdruck, Messgeber in der Sondenspitze   |
| $u_2$         | Porenwasserdruck, Messgeber zwischen Sondenspitze und Reibungshülse   |

---

|                          |   |
|--------------------------|---|
| $u_3$                    | Porenwasserdruck, Messgeber über der Reibungshülse  |
| $u_i$                    | gemessener Porenwasserdruck zur Zeit $t = 0$  |
| $u_t$                    | gemessener Porenwasserdruck zur Zeit $t$  |
| $w$                      | Wassergehalt  |
| $w_i$                    | Setzung der $i$ -ten Schicht  |
| $x_i$                    | Messwert an der Stelle $i$  |
| $x, y, \bar{x}, \bar{y}$ | Punktkoordinaten  |
|                          |   |
| $z$                      | Abstand, Tiefe  |
| $z_a$                    | Aufschlusstiefe   |
| $z_i$                    | transformierter Messwert an der Stelle $i$  |
|                          |   |
| $A$                      | Querschnittsfläche  |
| $B$                      | Breite  |
| $B_q$                    | Porendruckverhältnis  |
| $C_c$                    | Kornstufung   |
| $E_s$                    | Steifemodul   |
| $E$                      | Elastizitätsmodul   |
| $F$                      | Kraft   |
| $G$                      | Grenztiefe  |
| $H$                      | Schichtdicke  |
| $K$                      | Klasse  |
| $L$                      | Länge   |
| $Q_t$                    | normierter Spitzendruck   |
| $R$                      | Radius  |
| $R_f$                    | Reibungsverhältnis  |
| $ST^*, SU^*$             | Sand-Ton -Gemisch sowie Sand-Schluff-Gemisch mit über 15 % bis 40 % Feinkornanteil $d \leq 0,06$ mm |
| $SU$                     | Sand-Schluff-Gemisch mit 5 % bis 15 % FKA $d \leq 0,06$ mm  |
| $U$                      | Ungleichförmigkeit  |
| $V$                      | Volumen   |
| $V_{Gl}$                 | Glühverlust   |

---

|        |   |
|--------|---|
| AFB    | Abraumförderbrücke  |
| ASTM   | American Society for Testing and Materials                          |
| BGG    | Bodenmechanische Grundgesamtheit                                    |
| CPT    | Cone Penetration Test (Drucksondierung)                             |
| DIN    | Deutsches Institut für Normung                                      |
| fG     | Feinkies  |
| fS     | Feinsand  |
| FKA    | Feinkornanteil, Anteil der Körner, deren Durchmesser $\leq 0,06$ mm |
| gG     | Grobkies  |
| gS     | Grobsand  |
| GGG    | Geologische Grundgesamtheit   |
| ISSMFE | International Society for Soil Mechanics und Foundation Engineering |
| MG     | Materialgruppe  |
| mG     | Mittelkies  |
| mNN    | Meter über Normalnull   |
| mS     | Mittelsand  |
| NEN    | Niederländisches Institut für Normung                               |
| OCR    | Over Consolidation Ratio, Überkonsolidierungsverhältnis             |
| TU     | Ton und Schluff = Feinkornanteil $d \leq 0,06$ mm                   |

**Tabellenverzeichnis**

|   | Seite |
|---|-------|
| Tabelle 1: Einfluss technologischer auf geotechnische Parameter                           | 11    |
| Tabelle 2: Rohwichte verschiedener Kippenmaterialien                                      | 12    |
| Tabelle 3: Änderung des Spitzendrucks $\Delta q = u(1-a)$                                 | 25    |
| Tabelle 4: Ableitung der Bodenart aus $R_f$ nach Bild 6 [9]                               | 27    |
| Tabelle 5: Übersicht ausgewählter direkter Aufschlussverfahren (nach DIN 4021, ergänzt)   | 39    |
| Tabelle 6: Übersicht ausgewählter indirekter Aufschlussverfahren (nach DIN 4021, ergänzt) | 40    |
| Tabelle 7: Erkundungen Teilfläche B1 [88]   | 43    |
| Tabelle 8: Erkundungen vor der Vergütung, Teilfläche B2 [88]                              | 43    |
| Tabelle 9: Erkundungen nach der Vergütung, Teilfläche B2 [88]                             | 44    |
| Tabelle 10: Korndichte und Glühverlust der Materialgruppen [88]                           | 48    |
| Tabelle 11: Aus der Korngrößenverteilung abgeleitete Parameter [88]                       | 48    |
| Tabelle 12: Übersicht der Materialgruppen   | 49    |
| Tabelle 13: Übersicht der Versuchsergebnisse ([41], ergänzt)                              | 50    |
| Tabelle 14: Kennwerte von 4 Proben, nach [36]   | 57    |
| Tabelle 15: Vergleich manuell aufbereiteter Materialien                                   | 58    |
| Tabelle 16: Zuordnung der BGG zu Farben   | 63    |
| Tabelle 17: Zuordnung der Reibungsverhältnisse  | 66    |
| Tabelle 18: Baugrundmodell - Wichten der Teilschichten                                    | 111   |

**Bildverzeichnis**

|  | Seite |
|--|-------|
| Bild 1: Zugabsetzer links der Bildmitte  | 9     |
| Bild 2: Zugabsetzer neben den Flächen der vorgesehenen Probelastungen                            | 10    |
| Bild 3: Massenstrom im Schüttkegel nach [116]  | 12    |
| Bild 4: Idealisierter Aufbau einer Kippscheibe einer Tagebaukippe [73]                           | 13    |
| Bild 5: Geometrie der Sonde, nach DIN 4094 (Stand: Dezember 1990)                                | 22    |
| Bild 6: Bodenansprache auf Basis von Spitzendruck und Mantelreibung [9]                          | 27    |
| Bild 7: Einfaches Schema zur Bestimmung der Bodenart [108]                                       | 28    |
| Bild 8: Vollständiger Bohrkern, aus Tiefe $t = (9,0 \dots 10,0)$ m, 1,0 m lang                   | 45    |
| Bild 9: Vollständiger Bohrkern, $t = (8,0 \dots 9,0)$ m  | 45    |
| Bild 10: Einzelstück eines Bohrkerns, $t = (1,0 \dots 2,0)$ m                                    | 46    |
| Bild 11: Kohlestück im Kernrohr zwischen Ton (links) und Schluff (rechts)                        | 46    |
| Bild 12: Absolute Häufigkeiten der Materialgruppen   | 47    |
| Bild 13: Absolute Häufigkeiten der Bodenmechanischen Grundgesamtheiten BGG                       | 49    |
| Bild 14: Schematischer Schnitt, Vorschneide und Kernrohr (nach [88])                             | 51    |
| Bild 15: Dichte $\rho_1$ aller Kernrohrinhalte als Funktion der Tiefe                            | 52    |
| Bild 16: Schlagzahlen zum Einschlagen der Kernrohre  | 54    |
| Bild 17: Klumpen, schluffiger Kern   | 56    |
| Bild 18: Klumpen, toniger Kern   | 56    |
| Bild 19: Klumpen, ohne besonderen Kern   | 56    |
| Bild 20: Bestimmung der Bodenart B1DS4 (nach [108])  | 60    |
| Bild 21: Bestimmung der Bodenart B1DS6 [108]   | 60    |
| Bild 22: Bestimmung der Bodenart B1DS7 [108]   | 61    |
| Bild 23: Original- (links) und geglättete Kurve (rechts) B2DS2                                   | 62    |
| Bild 24: Schematisiertes Bodenprofil Bohrung B2Bg2 und Drucksondierung B2DS2                     | 63    |
| Bild 25: Schematisiertes Bodenprofil B2Bg8 und Drucksondierung B2DS8                             | 64    |
| Bild 26: Bestimmung der Bodenart B2Bg8 [108], links vor der Vergütung, rechts nach der Vergütung | 65    |
| Bild 27: Boxplot der Spitzendrücke, B1 und B2  | 72    |
| Bild 28: Boxplot der Spitzendrücke, B2 nach Vergütung  | 72    |
| Bild 29: Boxplot Reibungsverhältnisse B1 und B2  | 73    |
| Bild 30: Boxplot Reibungsverhältnisse B2 nach Vergütung  | 73    |
| Bild 31: Legende der Boxplots  | 74    |
| Bild 32: Häufigkeitsverteilungen der Spitzendrücke, Teilfläche B1                                | 76    |
| Bild 33: Häufigkeitsverteilungen der Spitzendrücke, Teilfläche B2                                | 77    |
| Bild 34: Häufigkeitsverteilungen der Reibungsverhältnisse, Teilfläche B1                         | 78    |
| Bild 35: Häufigkeitsverteilungen der Reibungsverhältnisse, Teilfläche B2                         | 79    |

---

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| Bild 36: | Variogramm   | 81  |
| Bild 37: | Vereinfachtes Flussbild der Hauptkomponentenanalyse                  | 85  |
| Bild 38  | Scree-Plot Teilfläche B1   | 94  |
| Bild 39: | Komponentenwerte 1 bis 6, Teilfläche B1 ( $q_c$ )                    | 95  |
| Bild 40: | Komponentenwerte 7 bis 9, Teilfläche B1 ( $q_c$ )                    | 96  |
| Bild 41: | Komponentenwerte $R_f$ Teilfläche B1                                 | 99  |
| Bild 42: | Komponentenwerte $R_f$ Teilfläche B1                                 | 100 |
| Bild 43: | Setzungen im Längsprofil, a) B1 ohne Vergütung, b) B2 mit Vergütung, | 105 |
| Bild 44: | Setzungen im Querprofil Teilfläche B1                                | 105 |
| Bild 45: | Schiefstellungen im Längsprofil mit und ohne Vergütung               | 106 |
| Bild 46: | Flussbild der Setzungsberechnung                                     | 107 |
| Bild 47: | Gleichmäßig belastete Rechteckfläche [44]                            | 107 |
| Bild 48: | Zerlegung in 4 Teilflächen   | 108 |
| Bild 49: | Ungleichmäßige Belastung, Beispiel einer Dammschüttung               | 108 |
| Bild 50: | Baugrundmodell der Mischbodenkippe, nach [39]                        | 110 |
| Bild 51: | Grenztiefe der Setzungsberechnung                                    | 112 |

---