

# **Flächendeckende Ermittlung bodenphysikalischer Parameter aus Drucksondierergebnissen mittels Korrelationen zu Ergebnissen radiometrischer Sondierungen**

Von der Fakultät für **Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau**

der **Technischen Universität Freiberg**

genehmigte

## **DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

Dr.-Ing.

vorgelegt

von **Dipl.-Ing. Steffen Friedrich**

geboren am 10. April 1968 in Cottbus

Gutachter: Prof. Dr. Dr. h.c. Wolfgang Förster, Niederschöna  
Prof. Dr.-Ing. Herbert Klapperich, Freiberg  
Dr.-Ing. Alfred Vogt, Brieske

Tag der Verleihung: 03. Februar 2005



## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit ist durch Herrn Prof. Dr. rer. nat habil. Dr. h.c. W. Förster angeregt worden. Ihm möchte ich an dieser Stelle besonders für die Ermöglichung und Förderung der Arbeit, für die zahlreichen Anregungen und stete Diskussionsbereitschaft sowie für die Übernahme des Hauptreferates danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Klapperich danke ich sehr herzlich für die freundliche Unterstützung der Arbeit und die Übernahme des Koreferates.

Für die Übernahme des zweiten Koreferates sowie für die vielfältige Unterstützung danke ich Herrn Dr.-Ing. A Vogt von der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbauverwaltungsgesellschaft mbH.

Für die Berechnungen wurden Daten aus Forschungsergebnissen der LMBV mbH verwendet. Für die maßgebliche Unterstützung sowie die Freistellung einiger wichtiger Ergebnisse, die Bestandteil dieser Arbeit sind, sei der LMBV mbH und allen beteiligten Mitarbeitern an dieser Stelle gedankt.

Mein Dank gilt weiterhin Frau Dipl.-Geophys. A. Schreyer (GMB mbH), Herrn Dipl.-Ing. U. Stein (BUL Brandenburg) und Herrn Dipl.-Geophys. K. Lorenz für die fruchtbaren Diskussionen und zahlreichen Anregungen und Ratschläge.

Ferner danke ich allen Mitarbeitern des Institutes für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, insbesondere Frau Heidrich und Frau Griebisch, die durch ihre Unterstützung zum Entstehen der Arbeit beigetragen haben.

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1. Einleitung</b>	1
<b>2. Aufgabenstellung</b>	3
<b>3. Sondiertechnologie</b>	5
3.1. Allgemeines	5
3.2. Übersicht Sondierverfahren	5
3.2.1. Rammsondierung	6
3.2.2. Standard Penetration Test	6
3.2.3. Vibrosondierung	6
3.3. Physikalische und technologische Grundlagen der Sondierverfahren	7
3.3.1. Drucksondierung (Cone Penetration Test)	7
3.3.1.1. Messgrößen	7
3.3.1.2. Sondenaufbau und Messtechnologie	8
3.3.2. Radiometrische Kombinationsdrucksondierung	10
3.3.2.1. Messgrößen	10
3.3.2.2. Sondenaufbau	11
3.3.2.3. Petrophysikalische Grundlagen / Messtechnologie	11
3.3.2.3.1. Gamma-Messung ( $\gamma$ -Messung)	11
3.3.2.3.2. Gamma-Gamma-Messung ( $\gamma$ - $\gamma$ -Messung)	13
3.3.2.3.3. Neutron-Neutron-Messung (n-n-Messung)	15
3.4. Qualitätssicherung bei der Vorbereitung und Durchführung von radiometrischen Kombinationsdrucksondierungen	19
3.4.1. Genauigkeitsforderungen	19
3.4.2. Anforderungen an die Sondiertechnologie	19
3.4.3. Kalibrierung	20
3.4.3.1. Grundkalibrierung	21
3.4.3.2. Feldkalibrierung	21
3.4.3.3. Kontrollkalibrierung	22
3.4.4. Auswertung	22
3.4.5. Darstellung der Ergebnisse	22
3.5. Hinweise zur Durchführung und Auswertung von Sondierungen	23
3.5.1. Auswahl der Sondieransatzpunkte	23
3.5.2. Interpretation der Ergebnisse	25
3.5.2.1. Drucksondierung	25
3.5.2.2. Radiometrische Kombinationsdrucksondierung	26

3.5.3. Statistik	26
3.5.4. Verifizierung der Ergebnisse	26
<b>4. Gegenwärtiger Erkenntnisstand / Literatur</b>	<b>29</b>
4.1. Dichte / Porenanteil / Lagerungsdichte	30
4.2. Überlagerungsdruck / Spannungszustand	32
4.3. Feinkornanteil / Materialklassifizierung	34
4.4. Korrelationen zu anderen Größen	36
4.5. Messdatenaufbereitung und -verarbeitung	38
<b>5. Korrelationsbeziehungen zwischen Messwerten aus Druck- und radiometrischen Kombinationsdrucksondierungen</b>	<b>42</b>
5.1. Einleitung	42
5.2. Parameterauswahl	42
5.3. Dimensionsanalyse	45
5.3.1. Feinkornanteil	45
5.3.2. Porenanteil	47
5.3.3. Dichte	47
5.4. Messdatenaufbereitung	48
5.4.1. Teufenkorrektur der DS-Messdaten	49
5.4.2. Messwertedatei	53
5.4.3. Teufenkorrektur zwischen DS- und KDS-Messdaten	54
5.4.4. „Bereinigung“ der Messdaten	55
5.5. Regressionsanalyse	56
5.6. Qualitätskontrolle	63
5.6.1. Statistische Kontrolle	63
5.6.1.1. Statistische Kennzahlen zur Bewertung der Korrelationsgüte	63
5.6.1.2. Fehlerverteilungen	65
5.6.1.3. Residuenanalyse	66
5.6.2. Fehlerfortpflanzung	69
5.7. Ableitung von Zielvorgaben	71
<b>6. Statistische Untersuchungen zum räumlichen Zusammenhang zwischen Sondierungen</b>	<b>78</b>
6.1. Theoretische Grundlagen des Variogramms	78
6.1.1. Definition	78
6.1.2. Empirisches Variogramm	80
6.1.3. Variogrammansätze /Theoretisches Variogramm	81
6.2. Berechnung eines Variogramms für Drucksondierergebnisse	82
6.2.1. Bestimmung der Beobachtungsvariable	82

6.2.2. Untersuchungsobjekt / Datenbasis	85
6.2.3. Berechnung des Variogramms	86
6.3. Praktische Schlussfolgerungen	88
6.4. Gültigkeitsbereich der Korrelationen	89
6.4.1. Bewertung auf der Grundlage von Messwertverteilungen	90
6.4.1.1. Art der Verteilung	90
6.4.1.2. Maßzahlen der Verteilungen	92
6.4.2. Boxplots und Q-Q-Plots	93
6.4.3. Kumulative Kurven	95
<b>7. Darstellung der Verteilungen der Lockergesteinsparameter</b>	<b>97</b>
7.1. Einleitung	97
7.2. Flächendeckende (zweidimensionale) Verteilungen	97
7.3. Ersatzprofile	105
7.4. Räumliche (dreidimensionale) Darstellungen	106
<b>8. Anwendungsbeispiel - Flächendeckender Verdichtungsnachweis für die Kippenböschungen des Tagebaurestloches 4 / Seese-West</b>	<b>110</b>
8.1. Prinzip des flächendeckenden Nachweises / Grundlagen	110
8.2. Bestimmen der Materialklassen	112
8.3. Auswertung der Sondierungen	115
8.3.1. Sondierungen im Rahmen des flächenhaften Verdichtungsnachweises	115
8.3.2. Korrelationsbeziehungen	116
8.3.3. Abbildung der Parameterverteilungen	121
8.3.4. Auswertung der Tiefenschnitte	123
8.3.5. Räumliche Parameterverteilungen	126
8.4. Standsicherheitsuntersuchungen für die Kippenböschungen	128
8.4.1. Berechnungsparameter	128
8.4.2. Standsicherheitsberechnungen	132
8.5. Zusammenfassung der Ergebnisse der Standsicherheitsuntersuchungen	135
<b>9. Zusammenfassung / Ausblick</b>	<b>137</b>

Quellenverzeichnis  
 Symbolverzeichnis  
 Anlagenverzeichnis  
 Anlagen



## 1 Einleitung

Das exakte Bestimmen von Lockergesteinsparametern ist eine wesentliche Voraussetzung für die sichere Planung und Ausführung von Baumaßnahmen und bergbaulichen Tätigkeiten. Insbesondere im Bergbau, aber auch bei großen Baumaßnahmen besitzen die Bereiche, in welchen die tragfähigkeitsbestimmenden Lockergesteinsparameter (Festigkeit und Steifigkeit) zuverlässig bestimmt werden müssen, eine sehr große horizontale und vor allem auch vertikale Ausdehnung. Je größer die Untersuchungsfläche und –tiefe sind, desto kostenaufwendiger und komplizierter gestaltet sich die genaue Ermittlung der genannten Parameter. Art und Zusammensetzung des anstehenden Lockergesteins können bei größeren Untersuchungsteufen meist nur durch direkte Aufschlüsse (Bohrungen) und anschließende Laboruntersuchungen bestimmt werden. Das Ermitteln zustandsbeschreibender Lockergesteinsparameter, wie Dichte, Porenanteil oder Sättigungsgrad in ungestörtem Zustand gelingt in der Regel nur durch indirekte Messungen an wenigen Punkten oder vereinzelt mittels sehr kostenintensiver Gefrierbohrungen.

In den vergangenen Jahren hat daher das Bestimmen von Lockergesteinsparametern mit Hilfe von Sondierungen zunehmend an Bedeutung gewonnen. Insbesondere das Drucksondierverfahren ist heute ein unverzichtbarer Bestandteil bei der Ermittlung von Parametern in großen Teufen, so z. B. bei der Tagebauvorfelderkundung, der Vorbereitung und Überprüfung von Ramm- oder Bohrfahlgründungen oder ähnlichen Aufgaben.

Neben der Drucksondierung stellen radiometrische und kerngeophysikalische Messverfahren leistungsfähige Alternativen zur Bestimmung der Lithologie, der im Lockergestein enthaltenen Elemente, der Dichte, der Porosität oder des Wassergehaltes dar. Weit verbreitet sind solche Messungen in einem Bohrloch (Bohrlochgeophysik). Zum Reduzieren des Untersuchungsaufwandes werden radiometrische bzw. kerngeophysikalische Messungen auch in Verbindung mit Drucksondierungen eingesetzt. Allerdings ist die erreichbare Teufe verfahrensbedingt insbesondere im verdichteten bzw. gewachsenen Lockergestein sehr begrenzt. Darüber hinaus sind diese sogenannten Kombinationsdrucksondierungen aufgrund des zwingend notwendigen hohen Eich- und Kalibrieraufwandes sehr kostenaufwendig.

Eine bezüglich des flächenmäßigen Umfangs und der erforderlichen Tiefe völlig neuartige Aufgabe stellt die Sanierung der durch den Braunkohlenbergbau insbesondere im Lausitzer und Mitteldeutschen Revier hinterlassenen Kippenflächen einschließlich der Tagebaurestlöcher mit ihren im höchsten Maße setzungsfließgefährdeten Kippenböschungen dar. Das Bewältigen dieser Aufgabe erforderte die Neu- und Weiterentwicklung von Technologien zum Verdichten des anstehenden

Lockergesteins sowie insbesondere für den anschließend notwendigen Nachweis erreichter Dichte. Letzteres schließt eine großflächige Parameterbestimmung in horizontaler wie in vertikaler Richtung ein. Das Ermitteln der Dichte über große Flächen bereits sanierter Kippen und Kippenböschungen wird ein zukünftiger Schwerpunkt der Tätigkeiten im Bereich der Sanierung der Bergbaufolgelandschaften sein.

Zur Bewältigung dieser Aufgabe wurde im Auftrag der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbauverwaltungsgesellschaft mbH (LMBV mbH) im Zeitraum von 1999 bis 2002 am Institut für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg eine wissenschaftlich – technische Untersuchung zu diesem Thema durchgeführt. Die in der vorliegenden Arbeit dargestellten Ergebnisse zum Nutzen von Sondierungen zur flächendeckenden Ermittlung material- und zustandsbeschreibender Kennzahlen von Lockergesteinen sind Bestandteil des im Rahmen der wissenschaftlich-technischen Untersuchung erarbeiteten Algorithmus für die flächendeckende Ermittlung der Verdichtung stabilisierter Kippen und Kippenböschungen [Leitfaden 2002]. Die entwickelte Methodik ist jedoch nicht auf die Sanierung von Kippen und Kippenböschungen des Braunkohletagebaus beschränkt. Sie kann überall dort eingesetzt werden, wo entsprechende Kennwerte flächendeckend und bis in große Teufen ermittelt werden müssen.

## 2 Aufgabenstellung

Die erfolgreiche Bearbeitung geotechnischer Aufgaben erfordert die Kenntnis einer Vielzahl von bodenphysikalischen Parametern des im betreffenden Objekt anstehenden Lockergesteins. Die Qualität der Planungen, Berechnungen oder Gutachten und damit die Sicherheit und Stabilität der Bauwerke, die im Untergrund bzw. auf der Geländeoberfläche errichtet werden sollen, und von Erdbauwerken (Dämmen, Sicherungen an Böschungen) hängt wesentlich von der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der für die Bearbeitung benötigten Lockergesteinsparameter ab. Dabei steigen der Erkundungsaufwand und damit die Kosten naturgemäß mit der Größe des Untersuchungsgebietes, der zu untersuchenden Fläche und vor allem der Untersuchungstiefe.

Ein geeignetes Verfahren zum Erlangen von Informationen aus großen Teufen ist die Drucksondierung. Drucksondiererergebnisse geben dem erfahrenen Geotechniker Anhaltspunkte über Art und Zustand (Dichte, Festigkeit) des anstehenden Materials. Wesentliche Vorteile des Drucksondierens sind die Möglichkeit des Erfassens von Profilen über große Teufen sowie die vergleichsweise geringen Kosten. Der entscheidende Nachteil des Verfahrens besteht darin, dass bei der Drucksondierung keine bodenphysikalischen Material- bzw. Zustandsparameter unmittelbar gemessen werden, sondern nur ein indirekter Aufschluss über diese ermöglicht wird. Der Zusammenhang zwischen den bei Drucksondierungen gemessenen Größen und bodenphysikalischen Parametern ist bewiesen (siehe Kapitel 4), kann jedoch gegenwärtig nur qualitativ bzw. nur unter sehr großen Kosten auch quantitativ genutzt werden.

Im Gegensatz zur Drucksondierung liefern radiometrische und kerngeophysikalische Messungen, wie sie bei der radiometrischen Kombinationsdrucksondierung (KDS) zum Einsatz kommen, über die gemessenen Impulsraten die Parameter Dichte, Porenanteil, Feinkornanteil, Wassergehalt und Sättigungsgrad mit hoher Genauigkeit. Voraussetzung dafür sind eine exakte Eichung und Kalibrierung der Messsonde. Aufgrund der technologisch bedingt geringen erreichbaren Teufen und den im Vergleich zur Drucksondierung sehr hohen Kosten ist ein großflächiger Einsatz in der Regel nicht realisierbar.

Für die Lösung vieler geotechnischer Aufgaben, wie z. B. der Kontrolle der erreichten Dichte durch Verdichtungsmaßnahmen stabilisierter Tagebaukippen, ist jedoch eine exakte Parameterbestimmung gerade über große Flächen und bis in große Teufen erforderlich.

Daraus resultiert die Aufgabe, einen Algorithmus zum Ermitteln von Korrelationsbeziehungen zwischen den Ergebnissen der Drucksondierung und bodenphysikalischen Parametern zu schaffen. Basis dafür sind die mit Hilfe der radiometrischen

Kombinationsdrucksondierung ermittelten bodenphysikalischen Parameter. Dadurch wird die Möglichkeit geschaffen, den Messwerten der Drucksondierung die bodenphysikalischen Parameter Dichte, Porenanteil und Feinkornanteil zuzuordnen, welche zum anschließenden Bestimmen von Festigkeitseigenschaften, Berechnen der Tragfähigkeit und der Standsicherheit bzw. zum Erfassen der Lithologie benötigt werden. Durch das Verknüpfen der Vorteile beider Verfahren können sowohl die Qualität der Informationen als auch die Informationsdichte und -tiefe im Untersuchungsgebiet wesentlich vergrößert werden. Die Untersuchungskosten werden durch die preiswertere Drucksondierung zur Parameterbestimmung im Vergleich zum bisherigen Vorgehen niedrig gehalten.

Um flächenhafte Aussagen auf der Grundlage von Drucksondierungen zu ermöglichen, ist die Frage der Reichweite der Aussagen von Sondierungen zu beantworten. Zur Bestimmung der durchschnittlichen Aussagenreichweite wird der räumliche Zusammenhang zwischen benachbarten Drucksondierungen auf Basis geostatistischer Berechnungen am Beispiel eines Messobjektes ermittelt.

Schließlich ist nach Wegen zu suchen, um die letztlich nur längs vertikaler Linien ermittelten Größen durch geeignete Interpolationsverfahren auf den Raum zu erweitern und das Ergebnis darzustellen.

Das entwickelte Verfahren soll überall dort anwendbar sein, wo die genannten bodenphysikalischen Parameter über große Flächen und bis in große Teufen mit hoher Genauigkeit bestimmt werden müssen. Es muss trotz der hohen Anforderungen an Genauigkeit und Zuverlässigkeit der zu ermittelnden Parameter praktikabel, wirtschaftlich machbar und transparent sein.

## 3 Sondiertechnologie

### 3.1 Allgemeines

Definitionsgemäß ist eine Sondierung ein indirektes Aufschlussverfahren in Lockergestein durch ein in der Regel lotrechtes Eindrücken einer Sonde zum Bestimmen bodenphysikalischer Parameter [DIN 4094-1].

Das Sondieren (Drucksondierung DS; radiometrische Kombinationsdrucksondierung KDS) hat sich in den vergangenen Jahren zum vielleicht wichtigsten Instrument zur Kennwertermittlung und Materialklassifizierung in situ entwickelt.

Der Einsatz radiometrischer Sondierungen zur Bestimmung von Lockergesteinsparametern wie Dichte oder Porenanteil innerhalb geotechnischer Projekte erfordert Messgenauigkeiten, die über die üblichen Genauigkeiten radiometrischer bzw. kerngeophysikalischer Messverfahren in der Bohrlochgeophysik deutlich hinausgehen. Die Gründe für die hohen Genauigkeitsanforderungen an die Messergebnisse sind:

- hohe Anforderungen an Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Berechnungsparametern zum Gewährleisten der geforderten Bauwerkssicherheit,
- Notwendigkeit des Nutzens aller verfügbarer Festigkeitsreserven, z. B. im Bergbau im Hinblick auf die Böschungsstandsicherheit o. ä.,
- der spezifische Zusammenhang zwischen der Art und der Dichte des anstehenden Lockergesteins und der Festigkeit (Der Dichteunterschied zwischen Material geringer und hoher Festigkeit beträgt oft nur wenige Hundertstel.),
- die große Variationsbreite der Lockergesteine bzgl. Art und bodenphysikalischer Eigenschaften,
- das Gewährleisten der Sicherheit für Menschen und Technik während der Bauphase

In den folgenden Kapiteln werden die physikalischen und technologischen Grundlagen sowie die wesentlichen Anforderungen an die Vorbereitung und Durchführung der verschiedenen Sondier- und Messmethoden zum Erreichen entsprechender Messgenauigkeiten beschrieben. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der radiometrischen Kombinationsdrucksondierung. Dem Beachten der verfahrensspezifischen Besonderheiten kommt auch beim Bestimmen von Korrelationsbeziehungen zwischen DS- und KDS-Messergebnissen eine große Bedeutung zu.

### 3.2 Übersicht über die Sondierverfahren

Neben den bereits genannten Sondierverfahren Drucksondierung und radiometrische Kombinationsdrucksondierung existieren einige weitere Sondierverfahren,

deren Wirkungsweise und Anwendungsgebiete im Folgenden kurz beschrieben werden.

### **3.2.1 Rammsondierung**

Die Rammsondierung ist das Rammen einer Sonde in den Untergrund durch ein Fallgewicht (Rammbar) definierter Masse bei gleichbleibender Fallhöhe, wobei die Schlagzahl pro definierte Eindringtiefe festgehalten wird [DIN 4094-2].

Man unterscheidet leichte, mittelschwere und schwere Rammsonden. Die Sonden unterscheiden sich durch die Masse des Rammbaren (5 kg – 50 kg), ihren Spitzenquerschnitt (5 cm<sup>2</sup> - 15 cm<sup>2</sup>) und in Sonderfällen durch die Fallhöhe (0,2 m – 0,5 m). Die Auswahl des einzusetzenden Gerätes hängt von der Lagerungsdichte des zu untersuchenden Bodens sowie der zu erreichenden Untersuchungstiefe ab.

Gemessen wird zumeist die Schlagzahl  $N_k$ , d. h. die Anzahl der erforderlichen Schläge für die definierte Eindringtiefe, in der Regel 10 cm ( $N_{10}$ ). Als Sondierdiagramm wird die Schlagzahl über die Tiefe aufgetragen. Das so ermittelte Sondierdiagramm liefert in Verbindungen mit direkten Aufschlüssen Informationen über den Schichtenaufbau und in grober Näherung über geotechnische Kenngrößen wie Lagerungsdichte  $D$  bzw. bezogene Lagerungsdichte  $I_D$  oder den Reibungswinkel  $\varphi$  [siehe DIN 4094]. Der entscheidende Nachteil dieses Verfahrens ist neben anderem, dass der Einfluss der Gestängereibung (Mantelreibung) zumeist nicht eliminiert werden kann, so dass der Messwert mit zunehmender Sondier-teufe durch die Zunahme der Reibung am Gestänge (verursacht durch zunehmende Länge des Gestänges) immer stärker verfälscht wird.

### **3.2.2 Standard Penetration Test**

Der Standard Penetration Test ist eine Rammsondierung im Bohrloch, die von der Bohrlochsohle über eine definierte Eindringtiefe durchgeführt wird [DIN 4094].

Die Besonderheit dieses Verfahrens besteht in der Eliminierung des Gestängeeinflusses dadurch, dass sich der Rammbar im Bohrloch befindet und einen konstanten Abstand zur Sondenspitze hat. Die Untersuchungstiefe ab der Bohrlochsohle beträgt 0,45 m, wobei in einer Tiefe von 0,15 m bis 0,45 m unter der Bohrlochsohle die Schlagzahl  $N_{30}$  (Schlagzahl für Eindringen von 30 cm) gemessen wird. Im Anschluss an die Rammung wird bis zur nächsten gewünschten Teufe gebohrt und dann der nächste Messwert ermittelt.

Bei einer Sonderform dieses Sondierverfahrens wird die Rammung mit einem Kernrohr zur gleichzeitigen Gewinnung von Probematerial durchgeführt.

### **3.2.3 Vibrosondierung**

Die Vibrosondierung ist ein mechanisches Sondierverfahren, dem das Prinzip des Vibrationsrammens zu Grunde liegt. Dabei wird ein Gestänge mit einer instrumentierten Spitze mittels einer harmonischen Erregerkraft und einer statischen Kraft in den Boden eingebracht. Die Erregerkraft wird von einem Vibrator erzeugt, der ü-

ber ein Gestänge angekoppelt ist, die statische Kraft ergibt sich aus dem Eigengewicht des Vibrator-Gestänge-Systems. Die Sondierung erfolgt unter kontinuierlicher Messung von Spitzen- und Mantelreibungswiderstand sowie Beschleunigung und Eindringtiefe. Die Auswertung dieser Messgrößen liefert für jeden Eindringzyklus charakteristische Kenngrößen des Eindringwiderstandes, die von Bodenart und Bodenzustand abhängen [IBF 1996]. Die Vibrosondierung ist demnach eine spezielle Form der Drucksondierung. Der bedeutendste Vorteil liegt in der deutlich geringeren Eigenmasse des Sondiergerätes, wodurch auch Sondierungen auf empfindlichem Untergrund, welcher durch schwere Sondierfahrzeuge nicht befahren werden kann, möglich sind.

Neben den beschriebenen Sondierverfahren gibt es eine Reihe weiterer Spezialverfahren, welche die Sondiertechnik mit verschiedenen Messverfahren kombinieren. Als Beispiele können in diesem Zusammenhang geoelektrische Sonden oder optische Sonden genannt werden.

Die Flügelsondierung nach DIN 4096 unterscheidet sich von den beschriebenen Verfahren dadurch, dass dabei nicht der Eindringwiderstand gemessen wird sondern der Widerstand gegen Abscheren beim Drehen eines Stabes, an dessen Ende vier Flügel im Winkel von jeweils  $90^\circ$  zueinander angeordnet sind. Aus dem Messergebnis kann die Gesamtscherfestigkeit des undränierten Bodens bestimmt werden. Eine Aufteilung der Festigkeit in die Scherparameter  $\varphi$  und  $c$  ist nicht möglich [DIN 4096].

### **3.3 Physikalische und technologische Grundlagen der Sondierverfahren**

#### **3.3.1 Drucksondierung (Cone Penetration Test)**

##### **3.3.1.1 Messgrößen**

Drucksondierungen werden gemäß DIN 4094 [DIN 4094-1] durchgeführt. Gerätetechnik, Durchführungsparameter und Auswertung bzw. Dokumentation der Drucksondierungen und ihrer Ergebnisse sind darin ausführlich beschrieben. Es werden folgende Messgrößen erfasst bzw. bestimmt:

- Spitzenwiderstand  $q_c$ 
  - Die an der Sondenspitze gemessene Axialkraft  $Q_c$  bezogen auf die Grundfläche des Kegels  $A_c$
- Lokale Mantelreibung  $f_s$ 
  - Die auf die Reibungshülse übertragene Kraft  $Q_s$ , bezogen auf die Oberfläche der Reibungshülse  $A_s$

- Reibungsverhältnis  $R_f$ 
  - Quotient aus  $f_s$  und  $q_c$ , wobei beide Größen in der selben Tiefe bestimmt werden ( $R_f$  wird in Prozent angegeben)
- Porenwasserdruck  $u$ 
  - der während des Eindringens der Sonde gemessene Porenwasserdruck auf dem zylindrischen Teil der Spitze unmittelbar oberhalb des Kegels
- Neigung
  - Abweichung der Sondenspitze von der Lotrechten zum Zweck der Korrektur der Sondertiefe

Die physikalischen Zusammenhänge zwischen den Messgrößen der Drucksondierung und bodenphysikalischen Parametern bilden die Grundlage für die zu erarbeitenden Korrelationen und werden in Kapitel 4 ausführlich diskutiert.

### **3.3.1.2 Sondenaufbau und Messtechnologie**

Abbildung 3.1 zeigt die schematische Darstellung einer Drucksondierspitze. Hinter der Druckspitze (1) mit einem Öffnungswinkel von  $60^\circ$  befindet sich der Messkörper (2) mit daran befestigten Dehnmessstreifen. In einem Abstand von der Spitze von ca. 11 cm (Abstand zwischen Spitze und Mitte Reibungshülse) ist die Reibungshülse (4) im zylindrischen Teil der Sondenspitze angeordnet. Sie ist mit dem inliegenden oberen Dehnmessstreifen (3) verbunden. Zwischen der Druckspitze und der Reibungshülse besteht keine kraftschlüssige Verbindung, so dass sichergestellt ist, dass sich die Messungen von Spitzendruck und Mantelreibung nicht gegenseitig beeinflussen. Darüber, ebenfalls im zylindrischen Teil der Spitze, befindet sich ein Justiering (5) und der Gestängeadapter (8). Mit (6) ist die waserdichte Kabelführung des Signalkabels (7) bezeichnet.

Die Abbildung ist der DIN 4094 (1990) [DIN 4094] entnommen. Moderne Sondenspitzen sind zusätzlich mit einem Inklinometer sowie einer Porenwasserdruckmesseinrichtung ausgestattet. Bei diesen Ausführungen befindet sich direkt oberhalb des konischen Teiles der Spitze ein Filterring, durch den das Porenfluid zum unmittelbar hinter der Spitze angeordneten Drucksensor gelangt.

In modernen Sondiergeräten sind die Sondenspitzen nicht mehr mit Dehnmessstreifen ausgerüstet. Spitzendruck und Mantelreibung werden über piezoresistive Druckmessgeber erfasst.

Die vorzugsweise zu verwendende Drucksondierspitze hat die in Tab. 3.1 genannten Abmessungen.

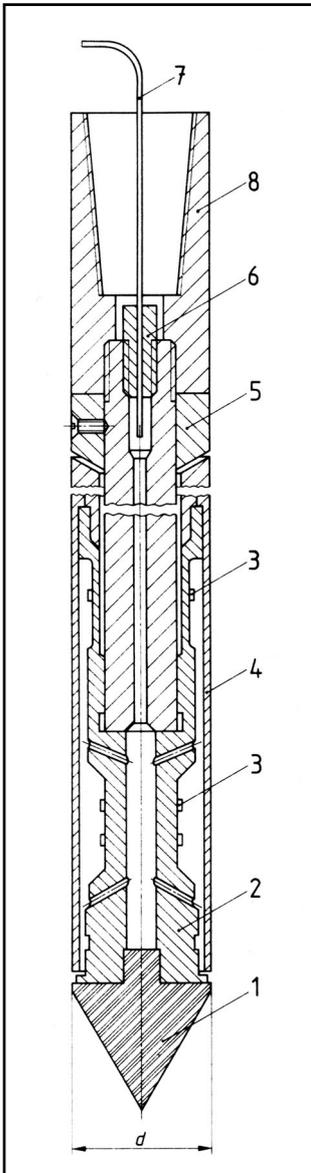


Abb. 3.1:  
CPT-Sondenspitze

#### Sondierspitze

Durchmesser $d_c$	35,7 mm
Querschnitt $A_c$	10 cm <sup>2</sup>
Spitzenöffnungswinkel	60°

#### Reibungshülse

Durchmesser $d_s$	35,9 mm
Länge $l_s$	133,7 mm
Mantelfläche $A_s$	150 cm <sup>2</sup>
Gestängedurchmesser $d_p$	35,8 mm

Tab. 3.1: Abmessungen der CPT-Spitze

Die Neufassung der DIN 4094 (Teil 1) [DIN 4094-1] führt neben der oben beschriebenen Sondierspitze außerdem Spitzen mit einem Durchmesser  $d_c$  von 43,8 mm (Querschnitt 15 cm<sup>2</sup>) auf. Sondierungen mit diesen Spitzen sind demnach DIN-gerecht. Bei ihrer Anwendung muss jedoch bezüglich der Bewertung der Ergebnisse Folgendes beachtet werden.

Vergleichsuntersuchungen haben gezeigt, dass die Messwerte Mantelreibung  $f_s$  und Spitzendruck  $q_c$  auch von der Sondengeometrie beeinflusst werden. Das bedeutet, dass andere Spitzenquerschnitte zu anderen Ergebnissen führen. Damit wäre die Vergleichbarkeit mit den bisherigen Sondierergebnissen (mit 10 cm<sup>2</sup>-Spitze) nicht gegeben. Die Ursache für diese Unterschiede dürfte das nichtlineare Spannungs-Deformations-Verhalten der Lockergesteine (plastische Verformung) sein. Bei Verwendung der 15 cm<sup>2</sup>-

Spitze wären somit zum richtigen Bewerten der Ergebnisse nach vorliegenden Erfahrungen zusätzliche Betrachtungen und Korrelationen zu den Ergebnissen der 10 cm<sup>2</sup>-Spitze erforderlich.

Die Messwerterfassung erfolgt alle 2 cm, die Sondiergeschwindigkeit beträgt maximal 2 cm/s bzw. 1,20 m/min. Das Eindrücken des Sondiergestänges erfolgt in der Regel mit Hilfe einer hydraulischen Eindrückvorrichtung. Die Achse des Gestänges darf an der Geländeoberfläche nicht mehr als 2° von der Lotrechten abweichen. Die Messdaten werden sowohl analog erfasst und als Messkurve in ei-

nem Messschrieb dargestellt als auch digital auf einer Speicherkarte, die anschließend am PC ausgelesen werden kann, gespeichert.

Die Messgeber sind regelmäßig (mind. alle 6 Monate) zu kalibrieren. Der Abrieb der Spitze und der Reibungshülse sind zu kontrollieren.

Wenn gerätetechnisch möglich, empfiehlt sich die zusätzliche Messung des Porenwasserdruckes (CPT-U), da dies zusätzliche Informationen über Porenwasserüberdrücke, Grundwasserstand oder auch Lithologie liefert.

### 3.3.2 Radiometrische Kombinationsdrucksondierungen (KDS)

#### 3.3.2.1 Messgrößen

Die radiometrische Kombinationsdrucksondierung verbindet die standardisierte Drucksondierung (Cone Penetration Test; siehe DIN 4094 [DIN 4094] und vorheriger Abschnitt) mit den radiometrischen Messverfahren

- Gamma-Messung ( $\gamma$ -Messung) – Messung der natürlichen Gamma-Strahlung des durchteuften Lockergesteins,
- Gamma-Gamma-Messung ( $\gamma$ - $\gamma$ -Messung) – Messung der rückgestreuten Gamma-Strahlung einer  $\gamma$ -Strahlenquelle (z. B. Cs 137),
- Neutron-Neutron-Messung (n-n-Messung) – Messung der thermischen Neutronen einer n-Strahlenquelle (z.B. Cf 252).

Die mit der radiometrischen Kombinationsdrucksondierung ermittelten Messwerte und die daraus ermittelten Kennwerte sind in der folgenden Tabelle 3.2 aufgeführt:

	<b>Drucksondierung</b>	<b>Radiometrische Kombinationssondierung</b>
Mess- und Ergebnisgrößen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spitzenwiderstand <math>q_c</math> [MN/m<sup>2</sup>]</li> <li>• Mantelreibung <math>f_s</math> [MN/m<sup>2</sup>]</li> <li>• Reibungsverhältnis <math>R_f</math> [%] <math>R_f = f_s / q_c * 100</math></li> <li>• Porenwasserdruck <math>u</math> [kN/m<sup>2</sup>]</li> <li>• Erkundungstiefe <math>T</math> [m]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feinkornanteil: FKA [%] = <math>f(\gamma)</math></li> <li>• Dichte: <math>\rho, \rho_r</math> [g/cm<sup>3</sup>] = <math>f(\gamma, \gamma\text{-}\gamma)</math></li> <li>• Porenanteil, Wassergehalt, Sättigungszahl: <math>n, w, S_r</math> [1] = <math>f(n\text{-}n, \gamma, \gamma\text{-}\gamma)</math></li> </ul>

Tab. 3.2: Mess- und Ergebnisgrößen der KDS

## 3.3.2.2 Sondenaufbau

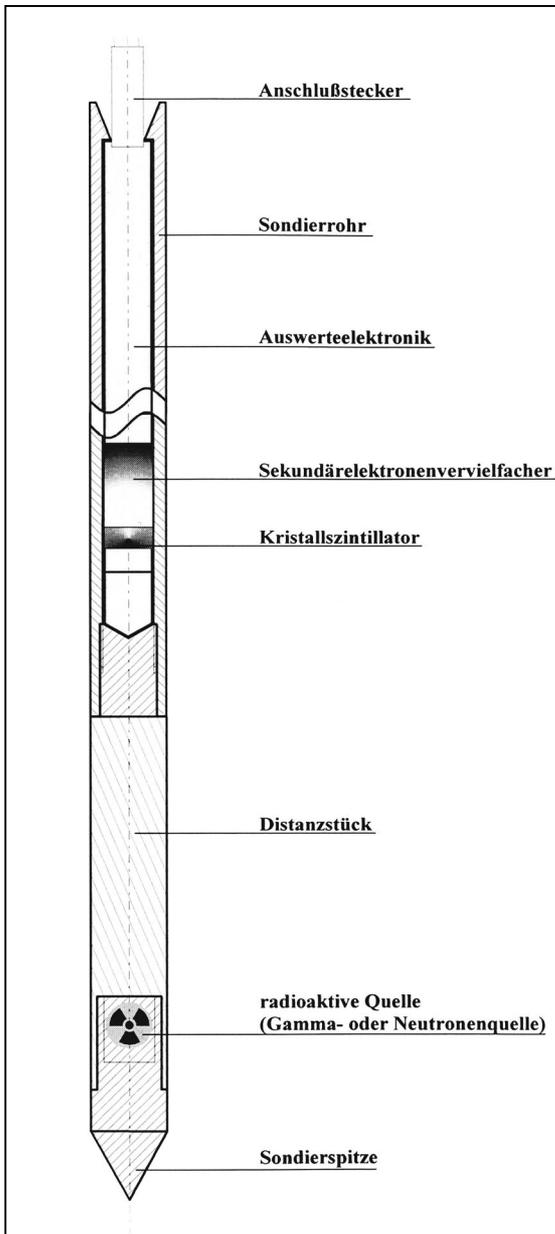


Abb. 3.2: Radiometrische Sonde (schematisch, Quelle: BUL Brandenburg GmbH)

Abbildung 3.2 zeigt den schematischen Aufbau einer radiometrischen Sonde. Die heute im Bereich des Lausitzer Braunkohlebergbaus eingesetzte Sonde basiert auf Entwicklungen seit 1985 [BuS Welzow 1985].

Die wesentlichen Bestandteile der Sonde sind die radioaktive Strahlenquelle und der Kristallszintillator (Detektor). Die auftreffenden Nuklearteilchen rufen in dem Kristall kleine Lichtblitze hervor. Diese treffen auf die Katode des Sekundärelektronenvervielfachers (SEV), wodurch Elektronen freigesetzt werden. Diese Sekundärelektronen werden beschleunigt und um den Faktor  $10^6 \dots 10^8$  verstärkt. Die auf die Anode des SEV auftreffende Elektronenlawine erzeugt so im elektrischen Zähler einen Impuls. Das Distanzstück bestimmt den Abstand zwischen Quelle und Detektor (Spacing). Die Messprinzipien der radiometrischen bzw. kerngeophysikalischen Verfahren, die u. a. in [VE BKK 1987], [Fricke 1999] und [Keys 1997] detailliert beschrieben sind, werden im Folgenden kurz erläutert.

### **3.3.2.3 Petrophysikalische Grundlagen / Messtechnologie**

#### **3.3.2.3.1 Gamma-Messung ( $\gamma$ -Messung)**

Bei der  $\gamma$ -Messung wird die natürliche Gammastrahlung der Gesteine gemessen. Diese natürliche Radioaktivität ist eine Eigenschaft der meisten Gesteine, die im Wesentlichen den Elementen Uran, Thorium und Kalium sowie deren Zerfallsprodukten entstammt.

Das Merkmal Radioaktivität kann aufgrund genetisch begründeter, unterschiedlicher Gehalte an radioaktiven Elementen in den einzelnen Gesteinstypen sehr gut zur lithologischen Gliederung von Lockergesteinen und zur Ermittlung des Tongehaltes (Kornfraktion  $d < 0,002$  mm) verwendet werden. Hauptträger der Radioaktivität sind die feinkörnigen (pelitischen) Bestandteile. Die Hauptursachen sind die erhöhte Adsorption des Urans und Thoriums durch die Tonpartikel und ihr Gehalt an kaliumreichen Mineralien. Daher nimmt die Radioaktivität mit dem Tongehalt zu.

Sandminerale (z. B. Quarz) haben meist keine oder nur eine geringe natürliche Gammestrahlung. Ausnahmen bilden Sande mit starken radioaktiven Beimengungen wie Monazitsand und Glaukonitsand [Schön 1983].

Wegen der verschiedenen Varianten typischer Messwerte der Gamma-Strahlung in Abhängigkeit von der Lithologie ist es unbedingt erforderlich, zusätzliche Informationen über das Messgebiet zu besitzen und zu nutzen (Geologie, DS etc.). Nur so lässt sich die Gefahr von Interpretationsfehlern minimieren. Von besonderer Bedeutung ist dies für Messungen auf Tagebaukippen, wo das Material sehr inhomogen gelagert ist und sehr kleine Bereiche mit relativ hoher Genauigkeit aufgelöst werden sollen.

Die Messung der natürlichen Gammastrahlung ist mit modernen Szintillationsmesssonden vergleichsweise einfach. Die vom Gebirge ausgesandten Gammaquanten werden von einem Detektor aufgenommen und in messbare elektrische Impulse umgewandelt. Verschiedene Korrekturen (z. B. für Verrohrung, Zement etc.), wie sie bei der Bohrlochmessung erforderlich sind, können bei der Messung mit der radiometrischen Kombinationssonde entfallen.

Aufgrund des verfälschenden Einflusses von Nachbarschichten auf die gemessene Radioaktivität geringmächtiger Schichten infolge eines Mittelungseffektes ist

eine Schichtmächtigkeitskorrektur erforderlich. Neben der Mächtigkeit der Schicht hängt das Schichtauflösungsvermögen auch von der Sondiergeschwindigkeit und der Samplingrate ab, da die Trefferrate auf den Szintillationszähler statistisch zeitabhängig ist. Angaben zur optimalen Sondiergeschwindigkeit bei der KDS werden in Kapitel 3.4.2 gemacht.

Die natürliche Gammastrahlung in Lockersedimenten ist außer vom Ton- auch vom Schluffgehalt abhängig, da die oberflächenaktive Wirkung der feinen Bestandteile nicht auf die Tone ( $d < 0,002$  mm) beschränkt ist [Schön 1983]. Bei einer Auswertung der  $\gamma$ -Impulsraten der KDS auf der Basis von Kalibrierungen ist daher eine Aussage über den Feinkornanteil ( $d < 0,063$  mm), zumeist angegeben in Prozent (%), in hoher Qualität möglich [Förster 2002].

### 3.3.2.3.2 Gamma-Gamma-Messung ( $\gamma$ - $\gamma$ -Messung)

Die Gamma-Gamma-Messung ist ein radiometrisches oder - exakter ausgedrückt - ein kerngeophysikalisches Rückstreuverfahren. Die von einer Gammaquelle ausgesandten Gammaquanten werden im Gebirge unter anderem zurückgestreut und als GG-Impulsrate registriert. Die Wechselwirkung der  $\gamma$ -Strahlung mit der Materie ist dabei die Grundlage der  $\gamma\gamma$ -Messung zur Bestimmung von Dichte und Porosität.

Wenn Materie von  $\gamma$ -Quanten durchdrungen wird, vermindert sich deren Intensität durch verschiedene Wechselwirkungsprozesse (Fotoeffekt, Compton-Effekt, Paarbildung). Das Vorherrschen einzelner Prozesse ist abhängig von der Energie der  $\gamma$ -Quanten und der Ordnungszahl  $Z$  des Absorbermaterials. Unter Einhaltung bestimmter Bedingungen reduziert sich die Wechselwirkung von  $\gamma$ -Quanten mit dem Medium nahezu vollständig auf den Compton-Effekt, die Streuung von Gammaquanten an Elektronen. In diesem Fall gilt:

$$I = I_0 e^{-\mu_c x} \quad (\text{Gl. 3-1})$$

$I$ : Intensität der  $\gamma$ -Strahlung nach Passieren des Absorbers

$I_0$ : Intensität der  $\gamma$ -Strahlung vor Passieren des Absorbers

$x$ : Absorberdicke

$\mu_c$ : Compton-Absorptionskoeffizient des Absorbermaterials.

Für die Wahrscheinlichkeit eines derartigen Streuprozesses ist die Elektronendichte  $\rho_{GG}$  maßgebend. Der Compton-Absorptionskoeffizient  $\mu_c$  ist proportional der Elektronendichte und damit der Größe  $(Z/A) \cdot \rho$  ( $Z$  – Kernladungszahl,  $A$  – Atommassenzahl des Absorbermaterials).

Damit gilt:

$$\mu_c \sim \rho \cdot \left( \frac{Z}{A} \right)$$

(Gl. 3-2)

Für die meisten in Böden und Gesteinen auftretenden Elemente gilt (außer Wasserstoff):

$$\frac{Z}{A} \approx 0,5$$

Die Intensitätsminderung ist folglich eine Funktion der Dichte und unter einigen vereinfachenden Annahmen ist die Impulsrate der gestreuten Gammaquanten der Bodendichte umgekehrt proportional. Da zwischen Impulsrate und Bodendichte ein exponentieller Zusammenhang besteht, werden niedrige Dichten gut aufgelöst, hohe Dichten sind dagegen schwerer zu trennen, da ab einer bestimmten Dichte die Impulsratendifferenz pro Dichteschnitt in die Größenordnung des statistischen Fehlers sinkt. Die  $\gamma\gamma$ -Methode liefert vorzugsweise im Dichteintervall ( $1 < \rho < 2,5$ ) g/cm<sup>3</sup> zuverlässige Werte. Damit eignet sich das Messverfahren insbesondere zur Erkundung leichter Gesteine, z. B. der Braunkohle.

Die Gamma-Gamma-Sonden bestehen aus einer Strahlungsquelle (meist <sup>127</sup>Cf, früher auch <sup>60</sup>Co) und einem Szintillationsmessgerät. Bei einem kurzen Spacing (Abstand Quelle-Detektor) von ca. (15 ... 25) cm beträgt die maximale Eindringtiefe 15 cm, die meisten Signale kommen aus einer Tiefe von 8 cm [Hallenburg 1997], [Telford 1990].

Die Kalibrierung der Sonden erfolgt in Kalibrierzylindern, in die Materialien bekannter Dichte und bekannter (Z/A)-Werte (Z/A = 0,5) eingebaut sind. Gemäss den Gleichungen (Gl. 3-1) und (Gl. 3-2) folgt die Kalibrierkurve der Funktion:

$$\rho_{GG} = a - b \cdot \log I_{GG} \quad (\text{Gl. 3-3})$$

mit:

$\rho_{GG}$ : gemessener Dichtewert (Gamma-Gamma- oder Elektronendichte)

$I_{GG}$ : Intensität der Gamma-Strahlung

a, b: empirisch zu bestimmende Koeffizienten.

Dem verfälschenden Effekt, dass vom Detektor auch die natürliche  $\gamma$ -Strahlung erfasst wird, kann durch eine geeignete Sondenkonstruktion (im Allgemeinen durch eine starke Quelle und eine geringe Detektorempfindlichkeit realisiert) entgegen gewirkt werden. Verschiedene Korrekturen, die den Einfluss des „Filterkuchens“ um ein Bohrloch, der Verrohrung oder der Spülung berücksichtigen, sind wiederum nur bei Bohrlochmessungen notwendig. Die Lithologie- bzw. Z/A-Korrektur dagegen ist auch für die KDS von Bedeutung. Weicht Z/A für das untersuchte Material vom Mittelwert 0,5 ab, entspricht die Elektronendichte  $\rho_{GG}$  nicht der Massendichte  $\rho$  (z. B. Wasser:  $\rho_{GG} = 1,11$  g/cm<sup>3</sup>,  $\rho = 1,00$  g/cm<sup>3</sup>). Zur exakten

Dichtebestimmung ist in solchen Fällen ebenfalls eine Korrektur nach Gleichung (Gl. 3-4) erforderlich:

$$\rho = \rho_{GG} \cdot \left[ \frac{0,5}{(Z/A)} \right] \quad \text{bzw.} \quad \rho = \rho_{GG} \cdot \left[ \frac{0,5}{(Z_{\text{eff}}/M_r)} \right] \quad (\text{Gl. 3-4})$$

mit:

$Z_{\text{eff}}$ : effektive Ordnungszahl

$M_r$ : relative Molekülmasse des Gesteins.

In der Praxis werden häufig mittlere Korrekturfaktoren bzw. Gleichungen analog der Beziehung

$$\rho = \rho_{GG} + \Delta\rho(Z/A)_{\text{eff}} \quad (\text{Gl. 3-5})$$

genutzt und Korrekturwerte für bekannte Materialien eingesetzt. Diese Lithologiekorrekturwerte können aus verschiedenen Tabellen [Fricke 1999], [Hallenburg 1997], [Schön 1996] entnommen bzw. berechnet werden. Z. B. betragen die Korrekturfaktoren  $\Delta\rho(Z/A)_{\text{eff}}$  für sauberes Wasser  $-0,11 \text{ g/cm}^3$  und für Braunkohle  $(-0,06 \dots -0,07) \text{ g/cm}^3$ .

Starke Dichtekontraste können zu Fehlern in der Bestimmung der Schichtmächtigkeit führen. Bei einer Schicht mit deutlich geringerer Dichte als in denen, welche darüber und darunter liegen (z. B. Braunkohle), verschieben sich die Wendepunkte der Messkurve, in die normalerweise die Schichtgrenzen gelegt werden, bis zu einem Betrag von  $0,3 \cdot L$  ( $L$  = Sonden-Spacing) in die Schicht höherer Dichte. Der umgekehrte Effekt ist bei einer Schicht mit deutlich erhöhter Dichte festzustellen. Somit erfährt die Schicht geringer Dichte eine scheinbare Vergrößerung der Mächtigkeit, die Schicht erhöhter Dichte wird scheinbar in ihrer Mächtigkeit verringert. Diese Effekte müssen ebenfalls berücksichtigt und korrigiert werden [Fricke 1999].

Neben der Dichte  $\rho$  kann aus der Gamma-Gamma-Messung bei Kenntnis der Korndichte  $\rho_s$  und der Dichte der Porenfüllung  $\rho_p$  der Porenanteil  $n$  (in der Geophysik meist als Porosität bezeichnet) aus Gleichung Gl. 4-6 berechnet werden:

$$n = \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s - \rho_p} \quad (\text{Gl. 3-6})$$

$\rho$ : Dichte, bulk density, „gemessene Größe“

$n$ : Porenanteil

$\rho_p$ : Dichte des Porenhaltes

Die Porenfüllung  $n$  in Kippen besteht aus Wasser und Luft. Damit kann Gleichung 3-6 unter Einbeziehung des Sättigungsgrades  $S_r$  und der Dichte von Wasser  $\rho_w$  folgendermaßen geschrieben [Förster 2002]:

$$n = \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s - S_r \cdot \rho_w} \quad (\text{Gl. 3-7})$$

### 3.3.2.3.3 Neutron-Neutron-Messung (n-n-Messung)

Die Neutron-Neutron-Messung ist ebenfalls ein kerngeophysikalisches Rückstreuverfahren. Die von einer Neutronenquelle emittierten Neutronen werden beim Zusammenstoß mit leichten Kernen auf thermische Energie abgebremst. Dabei findet überwiegend ein Bremseffekt beim Zusammenstoß mit Wasserstoffkernen statt. Die Intensität der thermischen Neutronen wird am Detektor registriert. Durch die enorm große Bremswirkung der Wasserstoffkerne ist die durch Abbremsen entstandene thermische Neutronenwolke ein Maß für den Wasserstoffgehalt im Boden. Somit können mit diesem Verfahren der Wassergehalt bzw. die Sättigung bestimmt werden [Fricke 1999], [Militzer 1985].

Der überwiegende Teil des Wasserstoffs liegt als Wasser im Boden vor, so dass bei vollständiger Sättigung der Neutronenmesswert auch ein Maß für die Porosität ist.

Die Neutronen, die man in schnelle ( $E > 100 \text{ keV}$ ), epithermische ( $100 \text{ keV} > E > 0,025 \text{ eV}$ ) und thermische Neutronen ( $E < 0,025 \text{ eV}$ ) einteilt, können aufgrund ihrer neutralen Ladung mit den Atomkernen in Wechselwirkung treten. Dabei sind für die Neutron-Neutron-Messung die elastische Streuung und der Strahlungseinfang von Bedeutung. Bei der elastischen Streuung von Neutronen an Atomkernen verliert das Neutron bei jedem Zusammenstoß mit dem Kern kinetische Energie und wird somit abgebremst. Der Kern selbst bleibt in seinen Eigenschaften unverändert. Die elastische Streuung findet in allen Energiebereichen der Neutronen statt. Der Energieverlust bei der Kollision schneller Neutronen mit Kernen der durchstrahlten Materie ist bei Wasserstoffkernen infolge der Massegleichheit besonders groß [Fricke 1999]. Es sind im Mittel 18 Zusammenstöße mit Wasserstoff nötig, um ein hochenergetisches Neutron auf thermische Energie abzubremsen, vergleichsweise dazu sind 50 Zusammenstöße mit einem Kohlenstoffatom erforderlich [Hallenburg 1997]. Folglich führt die Anwesenheit von Wasserstoff zu einem schnellen Abbremsen der Neutronen auf thermische Energie. Mit abnehmender Geschwindigkeit der Neutronen nimmt die Wahrscheinlichkeit des Neutroneneinfangs zu. Beim Strahlungseinfang werden die auf thermische Energie abgebremsten Neutronen beim Auftreffen auf einen Kern in diesen eingebaut. Dabei wird Gammastrahlung emittiert. Nach dem Einfangvorgang existiert das Neutron

nicht mehr. Die Verminderung der Dichte thermischer Neutronen im Detektorbereich wird zur Ermittlung der Porosität genutzt.

Die Neutronenwirksamkeit der in den Gesteinen enthaltenen Elemente wird durch den Einfangquerschnitt und den Bremsquerschnitt beschrieben. Hohe Salzgehalte können aufgrund der hohen Wirkungsquerschnitte einiger Elemente (Chlor, Bor etc.) zu Verfälschungen der Messung führen. Ebenso kann das an Feinkornpartikeln gebundene Haftwasser aufgrund der durch die höhere Salinität im Vergleich zum normalen Wasser größeren Dichte eine größere als die tatsächliche Porosität vortäuschen.

Die Sonde besteht analog zur  $\gamma$ - $\gamma$ -Sonde aus einer Strahlungsquelle und einem oder mehreren Detektoren. Als Quellen werden verschiedene Isotopen- oder Neutronenquellen (in KDS  $^{252}\text{Cf}$ -Quelle) oder Neutronengeneratoren benutzt [Fricke 1999], [Hallenburg 1997]. Die Messsysteme unterscheiden sich dadurch, dass sie entweder thermische oder epithermische Neutronen messen. Letztere haben den Vorteil, dass vorwiegend die durch die Wasserstoffkonzentration bedingten Bremsvorgänge erfasst werden und die Messung so von Schwankungen der Schichtwassersalinität nahezu unbeeinflusst bleibt.

Die für die gemessene Impulsrate maßgebende Dichte thermischer Neutronen ist eine Funktion des Spacings und der im Gestein erfolgten Brems- und Einfangreaktionen. In der unmittelbaren Nähe der Quelle dominieren die Bremsvorgänge. Es erfolgt eine Zunahme der Dichte der thermischen Neutronen mit zunehmender Porosität eines wassergesättigten Gesteins (Bereich „kleiner“ Sondenlängen). Im größeren Abstand führen die Einfangreaktionen zu einer Abnahme der Dichte der thermischen Neutronen mit Zunahme der Porosität (Bereich „großer“ Sondenlängen).

Am gebräuchlichsten ist die „große Sondenlänge“. Für diese ergibt sich eine Abnahme der gemessenen Impulsrate  $I_{NN}$  mit zunehmender Neutronporosität  $\Phi_{NN}$ . Diese Abhängigkeit wird durch eine Kalibrierbeziehung beschrieben:

$$I_{NN} = -a \cdot \lg \Phi_{NN} + b \quad (\text{Gl. 3-8})$$

mit:

a, b: empirisch zu bestimmende Koeffizienten.

Wasserstoff weist infolge seines hohen Bremsquerschnittes die dominierende Neutronenwirksamkeit auf. Deshalb wird für praktische Belange die Neutronenwirksamkeit auf den Wasserstoff bezogen und als „Wasserstoffindex“ HI (hydrogen index) beschrieben [Fricke 1999].

In einem beliebigen porösen Gestein gilt nach [Fricke 1999]:

$$\Phi_{NN} = (1 - \Phi)HI_{matrix} + \Phi HI_{poreninhalt} \quad (\text{Gl. 3-9})$$

mit:

$\Phi_{NN}$ : Neutronenporosität

$\Phi$ : Porosität

$HI_{matrix}$ : Wasserstoffindex der Gesteinsmatrix

$HI_{poreninhalt}$ : Wasserstoffindex des Poreninhaltes.

Bei Teilsättigung ist der Wasserstoffindex des Poreninhaltes von den Sättigungsanteilen abhängig:

$$\Phi_{NN} = (1 - \Phi)HI_{matrix} + \Phi(S_w HI_w + S_{öl} HI_{öl} + S_{Gas} HI_{Gas}) \quad (\text{Gl. 3-10})$$

Für die Untersuchungen auf Kippen sind als Poreninhalte nur Wasser und Luft interessant.

Für die in der Bohrlochgeophysik übliche Kalibrierung mit Kalkstein wurde der Wert  $HI_{matrix} = 0$  festgelegt. Wenn eine andere Matrix vorliegt, ist eine „Lithologiekorrektur“ erforderlich. Dafür existieren wiederum Korrekturtafeln [Fricke 1999], [Hallenburg 1997]. Der Wasserstoffindex HI liegt für verschiedene Gesteinsbestandteile tabelliert vor, z. B. in [Fricke 1999], [Schön 1983], [Hallenburg 1997], [Schön 1996].

Für ein einfaches Gemisch aus  $SiO_2$  und  $H_2O$  ergibt sich die Neutronenporosität nach (Gl. 3-9):

$$\Phi_{NN} = (1 - n) \cdot HI_{SiO_2} + n \cdot HI_{H_2O} \quad (\text{Gl. 3-11})$$

$$HI_{H_2O} = S_r \quad (\text{Gl. 3-12})$$

wobei hier für den bodenmechanischen Porenanteil die übliche Bezeichnung  $n$  gewählt wurde.

Löst man (Gl. 3-11) mit (Gl. 3-12) nach  $S_r$  auf, hat man eine Möglichkeit, den Sättigungsgrad zu ermitteln. Verfährt man ebenso mit (Gl. 3-7) und setzt diese gleich, erhält man durch Umstellen nach  $n$  die Möglichkeit zum Berechnen des Porenanteils  $n$  aus der Neutronenporosität [Förster 2002].

### 3.4 Qualitätssicherung bei der Vorbereitung und Durchführung von radiometrischen Kombinationsdrucksondierungen

#### 3.4.1 Genauigkeitsforderungen

Die Nutzung von Drucksondierungen zur Ermittlung bodenphysikalischer Lockerungsparameter über Korrelationen zu KDS-Messwerten kann nur gelingen, wenn die radiometrischen Messungen selbst mit hoher Genauigkeit durchgeführt werden. Deshalb und aus bereits zuvor erläuterten Gründen ist die Einhaltung der in der folgenden Tabelle 3.3 genannten Messgenauigkeiten zu gewährleisten:

	$0 \leq \text{FKA} \leq 15\%$	$15\% < \text{FKA} \leq 30\%$
<b>Feinkornanteil (Ton und Schluff)</b>	$\Delta \text{FKA} \leq \pm 5\%$	$\Delta \text{FKA} \leq \pm 5\%$
<b>Dichte <math>\rho</math></b>	$\Delta \rho \leq \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$	$\Delta \rho \leq \pm 0,06 \text{ g/cm}^3$
<b>Porenanteil <math>n</math></b>	$\Delta n \leq \pm 0,02 (-)$	$\Delta n \leq \pm 0,04 (-)$
<b>Wassergehalt <math>w</math></b>	$\Delta w \leq \pm 0,02 (-)$	$\Delta w \leq \pm 0,04 (-)$

Tabelle 3.3: Erforderliche Messgenauigkeiten bei KDS

Die kombinierte Durchführung der Drucksondierung und der radiometrischen Messungen ist technologisch nicht zwingend erforderlich. Zur Erleichterung der Auswertung der gemessenen Impulsraten und damit zur Verbesserung der Aussagegenauigkeit der radiometrischen Messungen ist die Ausführung der Messungen als **Kombinationsdrucksondierung** jedoch **dringend zu empfehlen**, da eine sichere Zuordnung der Messergebnisse zu einzelnen Bodenklassen ohne Zuhilfenahme der Drucksondierergebnisse trotz erfolgter Kalibrierungen oft nicht möglich ist.

#### 3.4.2 Anforderungen an die Sondiertechnologie

Die 3 Teilmessungen der KDS (1. Drucksondierung +  $\gamma$ -Messung, 2.  $\gamma$ - $\gamma$ -Messung, 3. n-n-Messung) sind in **einem** Sondierloch durchzuführen. Der Fehler durch wiederholtes Sondieren in einem Loch ist vernachlässigbar. Ein Versatz der Sondieransatzpunkte jedoch kann schon bei geringen Entfernungen zwischen den Ansatzpunkten bei hoher Inhomogenität des Untergrundes Abweichungen in der Materialzusammensetzung und in der Dichte / im Porenanteil liefern. Während der radiometrischen Messungen muss die radiometrische Sonde mit dem Sondiergestänge fest verbunden sein. Die Sondierungen sollten unbedingt **ohne** Reibungsminderer durchgeführt werden, auch wenn dadurch die erreichbare Teufe begrenzt ist. Reibungsminderer gleich welcher Art verursachen eine Störung bzw. Aufweitung des Sondierloches, was zu erheblichen Fehlern bei der Kennwertermittlung führen kann. Der entstehende „Luftspalt“ bzw. die aufgelockerte Zone um

das Sondenrohr beeinflussen die Impulsraten so stark, dass Messfehler in der Größenordnung bis 10 % verursacht werden können. Versuche an homogenen Lausitzer Materialien haben dies belegt (Bsp. Testmessungen in Jänschwalde:  $\Delta\rho \approx [0,04 \dots 0,15] \text{ g/cm}^3$ )

Ähnliche Fehler können bei der Messung in verrohrten Bohrlöchern auftreten. Durch eine Abweichung der Messsonde aus der vertikalen Achse des Rohres werden die Messwerte ebenso verfälscht ( $\Delta\rho \approx [0,01 \text{ bis } 0,02] \text{ g/cm}^3$ ) wie durch den nicht zu vermeidenden Abrieb der Bohrlochverrohrung. Im Fall von Bohrlochmessungen müsste die Kalibrierung mit den Rohren durchgeführt werden. Die Kalibrierbeziehungen müssten zusätzlich eine Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser und Wandstärke enthalten, da unterschiedliche Wandstärken zu unterschiedlichen Messergebnissen führen. Bereits wenige Zehntel Millimeter Differenz im Durchmesser oder der Wanddicke der Rohre können erhebliche Messfehler hervorrufen. Daraus folgt weiterhin, dass der Durchmesser der Rohre häufig überprüft und die Kalibrierung wiederholt werden muss.

Die Neukalibrierung (bzw. Kontrollkalibrierung) infolge des Abriebes und der damit verbundenen Durchmessererringerung muss ebenso bei Verwendung der kombinierten Drucksonde erfolgen. Bei Vergleichsmessungen ergaben sich Messwertdifferenzen von  $\Delta\rho = 0,05 \text{ g/cm}^3$  bei Verringerung des SONDENDURCHMESSERS von  $d = 35,7 \text{ mm}$  auf  $d = 35,1 \text{ mm}$ .

Neben dem Sondenspacing (Abstand zwischen Quelle und Detektor) beeinflusst die Sondiergeschwindigkeit maßgeblich das Schichtauflösungsvermögen und die Genauigkeit. Erfahrungsgemäß ist eine Sondiergeschwindigkeit von 1,2 m/min ausreichend. Dies entspricht bei einem Messpunktabstand von 5 cm einer Messzeit von 2,5 s (bei 10 cm entsprechend 5 s). Geringere Sondiergeschwindigkeiten bringen nur unwesentliche Verbesserungen, größere Geschwindigkeiten und damit kürzere Messzeiten verschlechtern hingegen aufgrund statistischer Zeitabhängigkeit der Trefferanzahl der Teilchen auf den Zähler die Messgenauigkeit und das Auflösungsvermögen geringmächtiger Schichten.

### **3.4.3 Kalibrierung**

Sowohl die Kalibrierungen der radiometrischen Sonde als auch die Auswertung der Messung muss mit bezogenen Impulsraten erfolgen, da die reinen Zählimpulse von der momentanen Strahlungsintensität der Strahlenquelle abhängig sind. Bezugswerte sind die Impulsraten in einem Standard-Wassermodell. Die Gamma- bzw. Neutronenmesswerte werden auf die „Wasserwerte“ bezogen und sind somit unabhängig von Änderungen der Quellenstärke oder anderen technischen Veränderungen innerhalb der Sonde.

### **3.4.3.1 Grundkalibrierung**

Grundlage einer exakten und genauen radiometrischen Messung ist das Durchführen von Grundkalibrierungen sowohl für die Gamma-Gamma- als auch für die Neutron-Neutron-Messung. Diese Grundkalibrierung muss vor Einsatz der Sonde im Labor und in typischen Lockergesteinen des Einsatzgebietes auch in situ durchgeführt werden. Versuchsmaterialien im Labor müssen die Materialien sein, in denen das Messverfahren später angewandt werden soll. Im Bereich des Lausitzer Braunkohlenreviers sind z. B. die „Lausitzer Sande“ vorherrschend, demzufolge müssen diese für die Kalibrierversuche verwendet werden. In Ursprung, Zusammensetzung und bodenmechanischen Eigenschaften der Sande existieren jedoch auch regional einige Unterschiede, so dass mindestens 3-4 verschiedene Materialien betrachtet werden sollten. Diese müssen in ca. 5 verschiedenen Dichten/Porenanteilen und gesondert als erdfeuchtes und wassergesättigtes Material untersucht werden.

Der für die Kalibriermessungen verwendete Behälter sollte zum Vermeiden von zu großen Randeffekten Mindestabmessungen im Durchmesser von  $D = 1 \text{ m}$  und in der Höhe von  $H = 1,5 \text{ m}$  aufweisen.

Eine Grundkalibrierung unter Verwendung verschiedener Materialien (z. B. Wasser, Sand, Ton, Beton, ...) innerhalb einer Kalibrierung, wie sie in der Bohrlochgeophysik oft durchgeführt wird, ist für die KDS nicht sinnvoll. Ursache sind unterschiedliche natürliche Radioaktivität und Impulsraten der verschiedenen Materialien, die bei der Auswertung eine Kennwertermittlung unmöglich machen, da verschiedene Materialien bei unterschiedlichen Dichten die gleichen Impulsraten aufweisen können.

### **3.4.3.2 Feldkalibrierung**

Die Feldkalibrierung dient der Präzisierung der vorhandenen Kalibrierbeziehungen oder zum Erstellen weiterer von den Grundkalibrierungen abweichenden Beziehungen. Für jedes bei der Grundkalibrierung verwendete Material sollten in der erdfeuchten Kippe Schürfe bis zu einer Teufe  $T = 5 \text{ m}$  angelegt werden. Dabei muss beachtet werden, dass in situ z. T. erhebliche Abweichungen in Kornverteilung und in der Korndichte von den Werten der in der Grundkalibrierung untersuchten Lockergesteine möglich sind. Die an der Stelle der Schürfe zuvor durch radiometrische Messungen gewonnenen Kennwerte (Dichte, FKA, Porenanteil, Wassergehalt, Sättigungszahl) werden mit den im Labor bestimmten Kennwerten aus der Beprobung der Schürfe verglichen.

Für größere Tiefen können zum Zweck des Kennwertevergleiches an Stelle der Schürfe Linerbohrungen bzw. Rammkernsondierungen niedergebracht werden. Letztere sind jedoch nur oberhalb des Grundwasserspiegels möglich und lassen

auf Grund der erheblichen Störungen des Probenmaterials nur Vergleiche des Feinkornanteiles und des Wassergehaltes sowie der Korndichte zu.

Für die Kalibrierung der Gamma-Messung zum Bestimmen des Feinkornanteiles dient die Feldkalibrierung gleichzeitig als Grundkalibrierung, sofern nicht bereits im Labor Materialien mit verschiedenen Feinkornanteilen untersucht wurden.

#### **3.4.3.3 Kontrollkalibrierung**

Als Kontrollkalibrierung bezeichnet man die regelmäßige Überprüfung der Sonden im bereits erwähnten Wassermodell und zusätzlich in einem weiteren Festmodell (Beton, Splitt). Sie dient der Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der Sonden und der Korrektur der Bezugsimpulsraten, da die Strahlungsintensität abhängig von der Halbwertszeit der Strahlenquelle kontinuierlich abnimmt. Die Häufigkeit der Kontrollkalibrierungen ist abhängig von der Häufigkeit der durchgeführten Sondierungen, sollte jedoch mindestens monatlich mit einer Kalibrierzeit von ca. 30 Minuten je Modell durchgeführt werden.

Alle Kalibrierungen, insbesondere aber die Kontrollkalibrierungen sind zu dokumentieren, so dass die Durchführung und die Ergebnisse gegenüber dem Auftraggeber nachvollziehbar belegbar sind.

#### **3.4.4 Auswertung**

Der erste Schritt der Auswertung sollte eine Modellrechnung mit den Kalibrierbeziehungen der Grundkalibrierung und der Korndichte des vermutlich am Sondierpunkt vorherrschenden Materiales sein. Dieser erste Rechenschritt ermöglicht einen groben Überblick über die Kennwert- und Materialverteilung in der Kippe am betreffenden Sondieransatzpunkt.

Im zweiten Schritt der Auswertung werden unter Zuhilfenahme der Ergebnisse der Drucksondierung einzelne Schichten ab einer Mächtigkeit von ca. 0,4 m detailliert betrachtet. Dabei werden verschiedene Kalibrierbeziehungen (aus Feldkalibrierungen) und Korndichten verwendet, um die Kennwerte für die verschiedenen, im Objekt anstehenden Bodenarten mit den für diese Bodenarten am besten zutreffenden Kalibrierbeziehungen ermitteln zu können. Insbesondere die gleichzeitige Betrachtung der Spitzenwiderstandswerte und Reibungsverhältnisse aus der Drucksondierung ermöglichen eine Korrektur der Lithologie und des Tongehaltes der Kippe und somit den Ansatz der geeigneten Kalibrierbeziehung.

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

Die Sondierergebnisse (KDS und DS) sind übersichtlich, detailliert und hochauflösend darzustellen. Bei Darstellung mehrerer Messkurven in einem Diagramm sind gegebenenfalls unterschiedliche Skalierungen der Abszisse zu verwenden. Maßstab, Skalierung und Skalenunterteilung sind so zu wählen, dass die z. T. geringen

Differenzen innerhalb der Messwerte, die bezüglich der Festigkeitsbewertung jedoch bereits von großer Bedeutung sein können, deutlich erkennbar sind. Tabelle 3.4 nennt empfohlene Skalenbereiche und Maßstäbe:

Messgröße	Skalenbereich	Maßstab
Spitzenwiderstand $q_c$	(0 – 20) MN/m <sup>2</sup> (bzw. bis $q_{c,max}$ )	1 cm = 1 MN/m <sup>2</sup>
Porenwasserdruck $u$	(0 – 200) kN/m <sup>2</sup> (bzw. bis $q_{p,max}$ )	1 cm = 10 kN/m <sup>2</sup>
Natürliche Dichte $\rho$	(1,5 – 2,2) g/cm <sup>3</sup>	1 cm = 0,1 g/cm <sup>3</sup>
Porenanteil $n$	0,2 – 0,6	1 cm = 0,05
Feinkornanteil FKA	(0 – 30) % (bzw. bis $FKA_{max}$ )	1 cm = 5 %
Wassergehalt $w$	0-0,5	1 cm = 0,05
Sättigungszahl $S_r$	0-1	1 cm = 0,1
Erkundungstiefe $T$	(0 – $T_{max}$ ) m	1 cm = 1 m

Tab. 3.4: Skalenbereiche und Maßstäbe für die Ergebnisdarstellung

Übliche DS-Erkundungstiefen betragen  $T_{end} \leq 60$  m (z. B. auf Tagebaukippen bis in das gewachsene Liegende, um die Mächtigkeit der Kippe zu erkunden). Bei Erkundungstiefen  $T > 20$  m sind die Drucksondierungen mit Neigungsmessung und entsprechender Tiefenkorrektur der DS-Messwerte durchzuführen.

### 3.5 Hinweise zur Durchführung und Auswertung von Sondierungen

Während im vorherigen Abschnitt die physikalischen und technologischen Grundlagen der Sondierverfahren und Qualitätsanforderungen beschrieben wurden, sollen an dieser Stelle Hinweise zur Wahl der Sondieransatzpunkte, zur Auswertung von Sondierergebnissen und zur Aussagereichweite sowie davon abgeleitet zur Sondierungsdichte gegeben werden.

#### 3.5.1 Auswahl der Sondieransatzpunkte

Sondierungen können zu unterschiedlichen Zwecken durchgeführt werden, welche auch die Wahl der Sondieransatzpunkte maßgeblich bestimmen:

- 1) Ermitteln der vertikalen Verteilung der Messgrößen ( $q_c$ ,  $q_s$ ,  $R_f$  –  $\rho$ ,  $n$ , FKA,  $w$ ,  $S_r$ ) an *einem* Sondieransatzpunkt, Ermittlung von Materialverteilungen und –klassen

- 2) Sondierungen als Stützstellen für flächenhafte geophysikalische Messungen,
- 3) Flächenhafte Ermittlung der Verteilung bodenphysikalischer Parameter (mbKZ, zbKZ) in ausgewählten repräsentativen Tiefschnitten auf der Basis von Sondierergebnissen, Korrelationsbeziehungen zu den bodenphysikalischen Parametern und geostatistischen Verfahren.

Zu 1)

Bei der Bewertung eines Objektes auf Basis von beliebig verteilten Sondierungen muss beachtet werden, dass:

- die Sondierungen so verteilt sind, dass die Ergebnisse repräsentativ für das zu untersuchende Objekt sind
- die Verteilung der Sondieransatzpunkte zufällig ist (z. B. durch Einteilung des Objektes in Planquadrate und Nutzung von Zufallszahlentabellen –vgl. Prüfvorschriften im Straßenbau [TP BF-StB]) und
- die Aussagen durch eine hinreichende Anzahl an Sondierungen abgesichert sind (die Angabe einer erforderlichen Mindestanzahl an Sondierungen für die Materialklassifizierung ist nicht sinnvoll, da sich die Untersuchungsobjekte hinsichtlich ihrer flächenhaften Ausdehnung, der Materialzusammensetzung und insbesondere des Inhomogenitätsgrades erheblich unterscheiden können).

Zu 2)

Lage und Ansatzpunkte von Stützstellen für geophysikalische Messungen richten sich im Wesentlichen nach dem angewandten geophysikalischen Verfahren. So ist für den Einsatz von Sondierungen im Zusammenhang mit der seismischen Tauchwellentomographie z. B. Folgendes zu beachten:

- Es sollten sowohl radiometrische Kombinationsdrucksondierungen als auch Drucksondierungen eingesetzt werden, um die Ankopplung der seismischen Ergebnisse an Dichte-, Porenanteil- und Spitzendruckwerte unter Beachtung des durch Feinkornanteil und Reibungsverhältnis charakterisierten Materials zu ermöglichen.
- Die Mehrzahl der auf einem Messprofil angeordneten Sondierungen sollte nach den seismischen Messungen festgelegt und durchgeführt werden, um Bereiche mit geringen seismischen Geschwindigkeiten oder mit nicht eindeutigen Ergebnissen genauer untersuchen zu können.
- Um die Ergebnisse über die gesamte Sondierteufe nutzen zu können, sollten die Sondieransatzpunkte möglichst nicht an den Profilenden liegen. Dort rei-

chen die Aussagen der Tomographie aufgrund der Tauchwellencharakteristik meist nicht bis zum Kippenliegenden.

Zu 3)

- Entscheidend für eine richtige Einschätzung des Zustandes eines Kippenabschnittes an Hand von Tiefenschnitten auf der Basis von Sondierungen ist die Wahl geeigneter Sondierabstände. Diese müssen sich an der Aussagereichweite von Sondierergebnissen orientieren und bestimmen somit auch die erforderliche Anzahl von Sondierungen auf einem Profil. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Sondierungen muss so bemessen sein, dass mit der Anwendung geostatistischer Interpolationsverfahren die Informationslücke zwischen den Sondierungen mit ausreichender statistischer Güte geschlossen werden kann. Ist der Abstand zwischen benachbarten Sondierungen zu groß, besteht die Gefahr, dass signifikante Änderungen nicht erkannt werden.
- Als Anhaltspunkt für die Aussagereichweite kann das Ergebnis der Variogrammberechnung aus Kapitel 6 genommen werden. Wenn genügend Sondierungen vorliegen, kann ein objektspezifisches Variogramm analog Kapitel 6 berechnet werden.

### **3.5.2 Interpretation der Ergebnisse**

Die in Kapitel 3.1 beschriebene Charakteristik der Messmethoden und die messtechnischen Besonderheiten von Drucksondierung und radiometrischer Kombinationsdrucksondierung müssen bei der Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse beachtet werden.

#### **3.5.2.1 Drucksondierung**

- Dünne Schichten (Schichtdicke  $< 20$  cm) werden oft nicht erkannt bzw. die Messwerte sind verfälscht.
- Schichtgrenzen „kündigen“ sich bereits vor Erreichen einer Schicht an, d. h. der Spitzendruck  $q_c$  steigt bzw. fällt bereits, bevor die entsprechende Schicht erreicht wird. Ursache für die beiden o. g. Effekte ist die Tatsache, dass der Spitzendruck maßgeblich vom dem sich vor der Spitze aufbauenden Spannungsfeld (sog. „Druckzwiebel“,  $\varnothing$  ca. 30 – 50 cm ) bestimmt wird.
- Werden bei gleichen Materialien und gleicher Lagerungsdichte (z.B. wenn Material und Dichte aus KDS bekannt sind) deutlich verschiedene Spitzendrücke gemessen, kann die Ursache hierfür in unterschiedlichen Spannungsbedingungen liegen.  $q_c$  wird u. a. sehr stark vom Seitendruckbeiwert  $K_0$  beeinflusst.
- Die Ergebnisse der Porenwasserdruckmessungen erlauben teilweise Rückschlüsse auf die Lithologie und auf Strömungsverhältnisse. Bei der Bewertung der PWD-Ergebnisse sollte jedoch beachtet werden, dass beim Eindringen in

bindigen Schichten ein erhöhter Porenwasserdruck durch Scherverformungen induziert werden kann. Andererseits kann die Messung gerade in bindigen oder tonigen Schichten völlig versagen, da der Filterring, durch den das Porenwasser zum Drucksensor gelangt, durch das feinkörnige Material undurchlässig geworden ist.

### **3.5.2.2 Radiometrische Kombinationsdrucksondierung**

- Analog zur Drucksondierung treten auch bei der KDS Verfälschungen der Messwerte an Schichtgrenzen auf. Ursache ist hier das integrierende Messprinzip der radiometrischen Verfahren, da die Detektoren Gamma- oder Neutronenquanten aus einem Umkreis von ca. 30 cm registrieren.
- Die von der Sondierfirma angegebenen Fehlerbereiche sind bei entsprechender Kalibrierung (siehe Kapitel 3.4) in der Regel zuverlässig. In einzelnen Bereichen können jedoch die Ergebnisse fehlerhaft sein, wenn Materialien durchteuft wurden, für die keine geeignete Kalibrierbeziehung vorliegt. Oft sind solche Bereiche aufgrund nicht plausibler Werte (z. B.  $S_r > 1$ ) lokalisierbar.
- Abhängig von der Sondiergeschwindigkeit und dem Sondenspacing (Abstand zwischen Quelle und Detektor) können Verschiebungen in der Zuordnung der Messwerte zur jeweiligen Teufe auftreten.

### **3.5.3 Statistik**

Bei der Nutzung statistischer Kennzahlen müssen die Voraussetzungen zu deren Anwendung vorher geprüft werden!

Die Verwendung von Mittelwert, Streuung und Standardabweichung ist an das Vorhandensein normalverteilter Daten gebunden. In vielen Fällen sind die Ergebnisse sowohl innerhalb einer Sondierung als auch mehrerer Sondierungen zueinander jedoch oft nicht normalverteilt. Die Anwendung statistischer Parameter, die Normalverteilung voraussetzen, kann zu erheblichen Fehlinterpretationen führen, da z. B. wenige Extremwerte den Mittelwert des Spitzendruckes erheblich verschieben können und so im Mittel zu günstige oder zu ungünstige Verhältnisse vortäuschen.

Besser geeignet für die Beschreibung größerer Bereiche mit statistischen Maßzahlen sind Kennwerte nichtparametrischer Verteilungen (Median, Quartile, Quantile), da diese unempfindlich gegenüber Ausreißern sind. Ausführlich wird das Thema Statistik bei Sondierungen in den folgenden Kapiteln diskutiert.

### **3.5.4 Verifizierung der KDS-Ergebnisse**

Aufgrund der zuvor genannten zufälligen und systematischen Fehlereinflüsse auf die Ergebnisse der radiometrischen Messungen ist eine Überprüfung und ggf. Verifizierung der KDS-Ergebnisse erforderlich. Das beinhaltet einerseits eine Über-

prüfung von Messwerten auf ihre Richtigkeit durch stichprobenartige Zusatzerkundungen in Schürfen oder durch Rammkernsondierungen. Andererseits muss sichergestellt werden, dass im Labor ermittelte Abhängigkeiten zwischen Zustandsparametern (Porenanteil, Dichte) und Festigkeiten auf die in der KDS gemessenen Zustandsparameter auch anwendbar sind. Beide Aspekte werden nachfolgend betrachtet.

#### a) Überprüfung in situ

Es wird empfohlen, direkt neben dem Sondieransatzpunkt einiger KDS im Untersuchungsgebiet Rammkernsondierungen in der erdfeuchten Kippe durchzuführen. Die Untersuchung des gewonnenen Materials im Labor liefert den tatsächlichen Feinkornanteil und den Wassergehalt im nicht wassergesättigten Bereich. Die Kennwerte sollten möglichst alle 50 cm Teufe bestimmt und anschließend, wie in Abbildung 3.3 gemeinsam mit den KDS-Messwerten aufgetragen werden. Anhand des Ergebnisses kann die Richtigkeit der radiometrischen Messung bewertet werden. Bei großen Differenzen zwischen den Messwerten

sollte zusammen mit der Sondierfirma die Möglichkeit der Korrektur (z. B. Lithologiekorrektur) überprüft werden. Es ist jedoch zu beachten, dass gewisse Schwankungen normal sind, da in manchen Fällen schon im Abstand von weniger als einem Meter die Eigenschaften stark schwanken können. Im abgebildeten Beispiel ist abgesehen von der Abweichung im ersten Meter eine sehr gute Übereinstimmung zu erkennen – es ist keine Korrektur notwendig.

Analog zu diesem Vorgehen können Porenanteil und Dichte an in Schürfen gewonnenen Frostproben überprüft werden.

Auf die Richtigkeit der Werte im wassergesättigten Bereich muss zumeist anhand der Ergebnisse im erdfeuchten Material geschlossen werden. Eine tatsächliche Überprüfung ist nur mit kostenintensiven Gefrierbohrungen möglich.

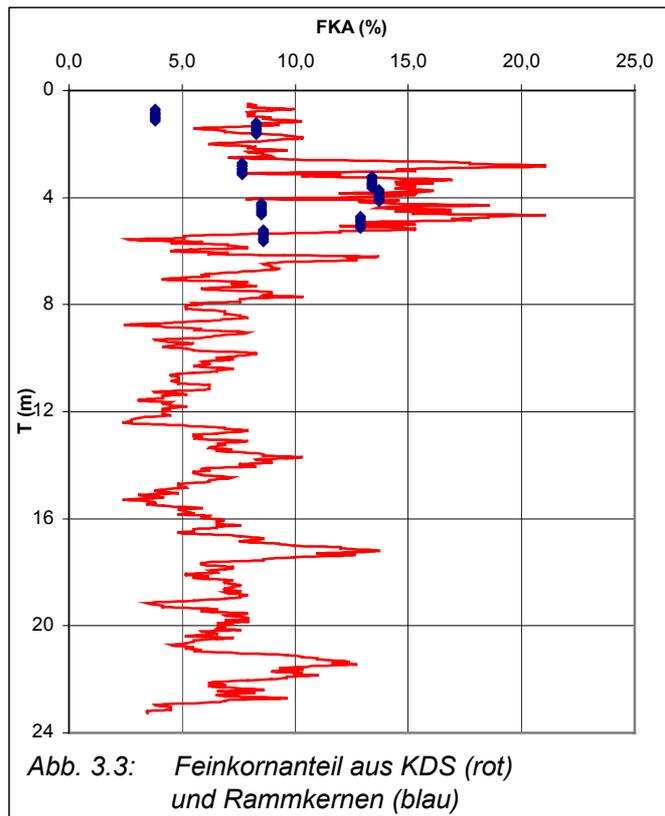


Abb. 3.3: Feinkornanteil aus KDS (rot) und Rammkernen (blau)

**b) Verifizierung im Labor**

In einigen Anwendungsfällen, z. B. dem Verdichtungsnachweis von Tagebaukippen, bilden die bei radiometrischen Sondierungen ermittelten material- und zustandsbeschreibenden Kennzahlen die Grundlage zur Festlegung von repräsentativen Materialklassen. Diese werden aus den stetigen Häufigkeitsverteilungen des auf die Spannung  $\sigma_v = 0$  kPa bezogenen Porenanteils  $n_0$  bestimmt. Aus Aufwands- und Kostengründen wird die Zahl der zu untersuchenden Materialklassen möglichst gering gehalten. Mittels mathematisch-physikalischer Modelle [LMBV 2000], [LMBV 2001], welche die Abhängigkeiten zwischen material- und zustandsbeschreibenden Kennzahlen und Festigkeiten beschreiben, werden Berechnungskennzahlen für die Materialklassen bestimmt. Ergeben sich aus dem Modell für die in situ in einer bestimmten Teufe gemessenen Porenanteile keine plausiblen Berechnungskennzahlen, weist dies auf fehlerhafte KDS-Messergebnisse oder eine für diese Bereiche nicht repräsentative Materialklasse hin. Die Laborergebnisse treffen somit für diese Bereiche nicht zu.

Mit Hilfe der Grenzporositäten  $n_{Gr}$  (spannungsabhängige lockerste Lagerung des Materials [Reichel 1997] [LMBV 1999]) können systematische Fehler bei der Messung der Porenanteile in situ bzw. Gültigkeitsbereiche der ermittelten Abhängigkeiten für die jeweiligen Materialklassen bestimmt werden. Die Grenzporositäten werden aus dem im Labor bestimmten Setzungsverhalten abgeleitet. Ist der in situ gemessene Porenanteil größer als der Grenzporosität, ist dies entweder auf Fehler in der radiometrischen Messung zurückzuführen oder es liegt in der betreffenden Teufe ein anderes Material vor. In diesem Fall sollte anhand des Feinkornanteiles die Lithologie nochmals überprüft werden. Ist durch eine Lithologiekorrektur oder die Zuordnung zu einer anderen Materialklasse der Fehler nicht zu beseitigen, müssen die entsprechenden KDS-Messwerte verworfen werden.

Das Vorgehen zur Bestimmung der Grenzporositäten und zur Überprüfung der KDS-Messwerte ist in [Reichel 1997] und [LMBV 1999] ausführlich dargestellt.

## 4 Gegenwärtiger Erkenntnisstand / Literatur

Die Drucksondierung ist in den letzten 3 Jahrzehnten zu einem der bedeutendsten in situ Messverfahren der Geotechnik geworden. Den zahlreichen, vor allem technologischen Vorteilen dieses Verfahrens, welche im vorangegangenen Kapitel bereits ausführlich diskutiert wurden, steht der entscheidende Nachteil gegenüber, dass die Messwerte der Drucksondierung keine direkten bodenphysikalischen Parameter sind. Vielmehr werden zahlreiche Lockergesteinseigenschaften nur indirekt durch die Messgrößen Spitzenwiderstand  $q_c$ , Mantelreibung  $f_s$  und das Reibungsverhältnis  $R_f$  abgebildet.

Radiometrische bzw. kerngeophysikalische Messverfahren wurden in den vergangenen Jahren vermehrt zur Lösung geotechnischer Probleme eingesetzt, da sie eine Alternative zur direkten geotechnischen Ermittlung von Lockergesteinsparametern darstellen. Die physikalischen Grundlagen der radiometrischen und kerngeophysikalischen Messungen und der Zusammenhang zwischen den gemessenen Impulsraten und Lockergesteinsparametern sind bewiesen und können an dieser Stelle als gesichert vorausgesetzt werden. Die Genauigkeit der Messungen hängt jedoch stark von der eingesetzten Gerätetechnik, der Güte der durchgeführten Kalibrierungen und einigen weiteren Bedingungen ab. Jedoch stellten Homilius u. a. bereits 1964 fest, dass in Bezug auf Schnelligkeit, Kostenersparnis und Exaktheit die mit der Gamma-Gamma-Sonde ausgeführten „Feuchtraumgewichtsmessungen“ (Messungen der natürlichen Dichte) die bisher bekannten und aufwendigen Methoden der ungestörten Probenahme vor allem in größeren Tiefen übertreffen [Homilius 1964].

Die Technologien beider Sondierverfahren sind in Kapitel 3 ausführlich beschrieben, die Messgrößen sind in Tabelle 3.2 aufgeführt.

In der Fachliteratur sind verschiedene Ansätze zu finden, wie man den physikalischen Zusammenhang zwischen den Ergebnisgrößen der Drucksondierung und bodenphysikalischen Parametern, welche bei radiometrischen Messungen bestimmt werden, beschreiben und somit die Drucksondiererergebnisse zur Ermittlung dieser Lockergesteinsparameter nutzen kann.

Bereits in den 60-er Jahren wurden Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Lockergesteinsparameter auf den Spitzenwiderstand durchgeführt. Muhs und Weiß untersuchten den Einfluss der Lagerungsdichte, des Überlagerungsdruckes, des Grundwasserstandes bzw. des Wassergehaltes sowie von Kornverteilungsparametern wie z. B. dem Ungleichförmigkeitsgrad [Muhs 1967]. Nach J. De Ruyter sind entsprechende Korrelationen zwischen Sondiererergebnissen und den bodenphysikalischen Parametern des anstehenden Lockergesteins dadurch gekennzeichnet, dass sie empirische Beziehungen sind und es demnach unmöglich

ist, alle Faktoren, welche die Größe der Messwerte beeinflussen, in den Korrelationsbeziehungen zu berücksichtigen [De Ruiter 1982].

Die Mehrzahl der bisherigen Untersuchungen sind dadurch charakterisiert, dass sie das Verhalten von Spitzenwiderstand  $q_c$  und Mantelreibung  $f_s$  in Abhängigkeit verschiedener bodenphysikalischer Parameter für ein bestimmtes Material untersuchten. Das Problem ständig wechselnder Materialverhältnisse, wie es z. B. durch die Inhomogenität von Kippen gegeben ist, findet nirgends Erwähnung, da sich die meisten Betrachtungen auf Modellversuche, Messungen in gewachsenen Böden oder Untersuchungen im Zusammenhang mit Pfählen und Gründungen beziehen.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der wichtigsten Arbeiten zum Zusammenhang zwischen Drucksondiererergebnissen und bodenphysikalischen Parametern zusammengefasst dargestellt.

#### 4.1 Dichte / Porenanteil / Lagerungsdichte

Von den meisten Autoren wurde insbesondere für Sande der Einfluss der bezogenen Lagerungsdichte  $I_d$  bzw. der Lagerungsdichte  $D$  auf den Spitzenwiderstand

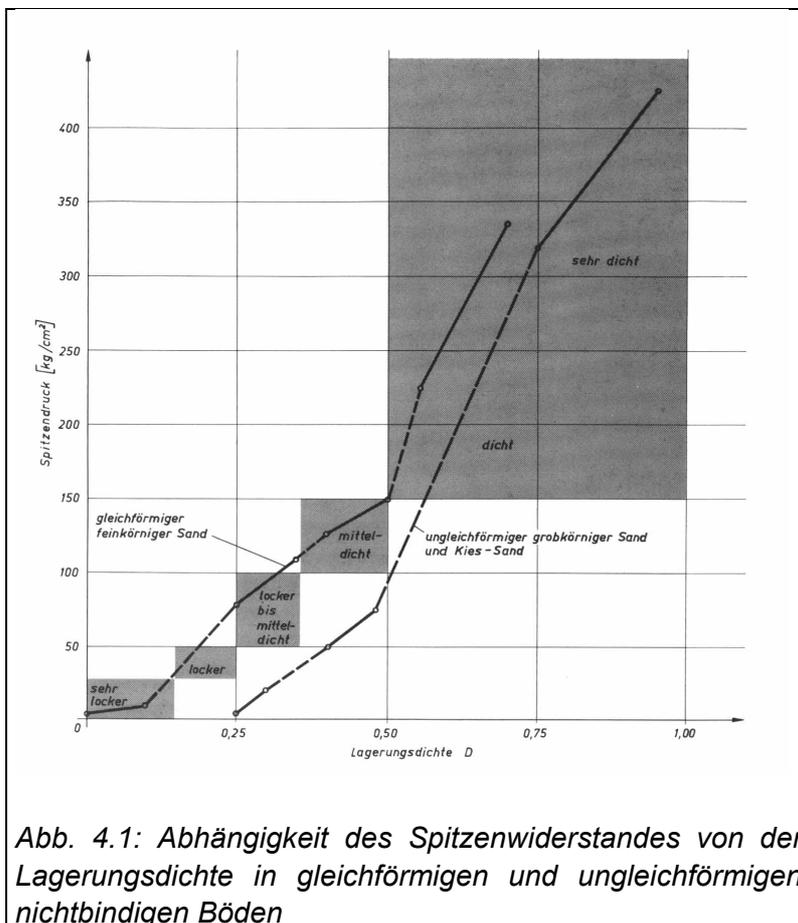


Abb. 4.1: Abhängigkeit des Spitzenwiderstandes von der Lagerungsdichte in gleichförmigen und ungleichförmigen nichtbindigen Böden

untersucht. Laut Kahl u. a. belegen Sondierversuche in Großbehältern, in welche Sand-Kies-Gemische in unterschiedlichen Lagerungsdichten eingebaut wurden, die ausgezeichnete Eignung der Spitzenwiderstandsmessung zur Beurteilung der Lagerungsdichte [Kahl 1968]. Auch Muhs und Weiß [Muhs 1967] bestätigen den dominierenden Einfluss der Lagerungsdichte auf den Spitzenwiderstand, verweisen aber darauf, dass abhängig von Tiefe und Spannungsverhältnissen auch andere Faktoren einen

unterschiedlich großen Einfluss auf den Messwert haben können. Abbildung 4.1 verdeutlicht dies. Neben der Lagerungsdichte sind auch Lockergesteinsart sowie Ungleichförmigkeitsgrad von Einfluss auf den Spitzenwiderstand.

Die Abbildung 4.2 zeigt für verschiedene Sande den von Schmertmann [Schmertmann 1976], Baldi et al. [Baldi 1982] oder Villet und Mitchell [Villet 1981] untersuchten Zusammenhang von Spitzenwiderstand  $q_c$ , Lagerungsdichte  $D$  und Kompressibilität in Abhängigkeit von der vertikalen effektiven Überlagerungsspannung  $\sigma'_{v,0}$ . (In den Abbildungen entspricht  $D = D_r$  – relativ density)

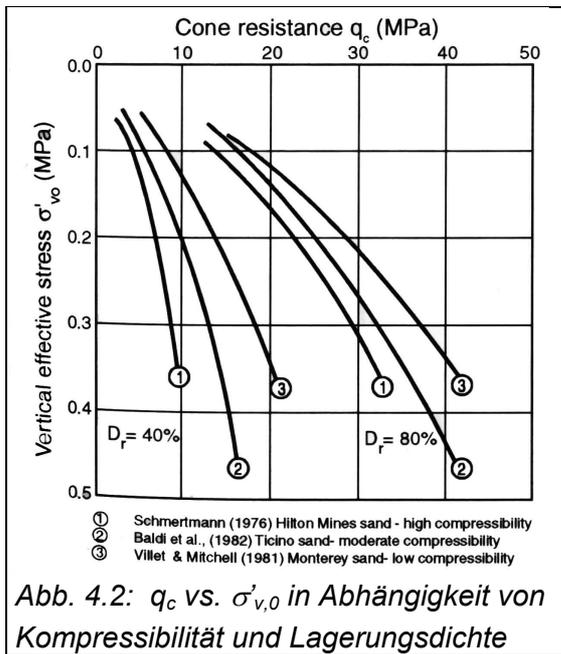


Abb. 4.2:  $q_c$  vs.  $\sigma'_{v,0}$  in Abhängigkeit von Kompressibilität und Lagerungsdichte

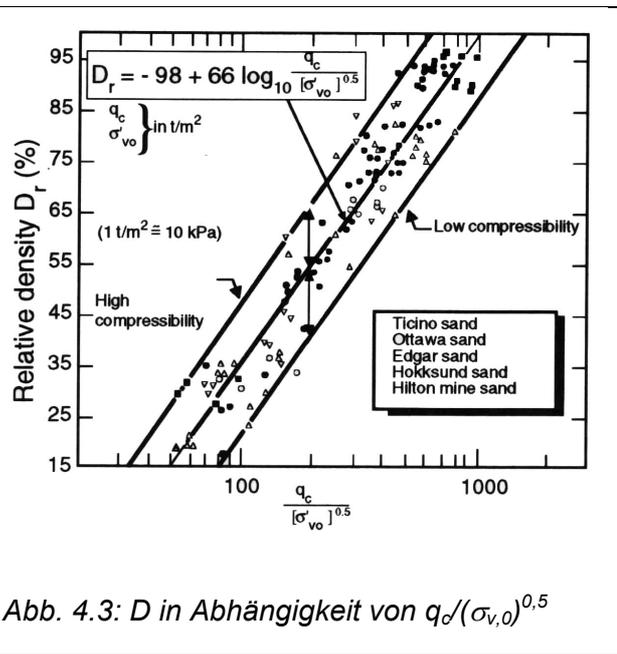


Abb. 4.3:  $D$  in Abhängigkeit von  $q_c/(\sigma'_{v,0})^{0,5}$

Es ist zu erkennen, dass der Spitzenwiderstand erwartungsgemäß mit zunehmender Lagerungsdichte sowie mit zunehmender effektiver Überlagerungsspannung ansteigt. Die verschiedenen Materialien repräsentieren den unterschiedlichen Grad der Kompressibilität. Diese steigt mit dem Feldspat-/Glimmeranteil des Sandes und zunehmender Kantigkeit der Körner. Ähnliche Ergebnisse liegen von Jamiolkowski et al. [Jamiolkowski 1988] (siehe Abb. 4.3) vor. Für einige Materialien sind auch in der DIN 4094-1 [DIN 4094-1] einfache lineare Zusammenhänge der Form  $I_D$  (bzw.  $D$ ) =  $f(q_c)$  enthalten.

Alle Untersuchungen belegen die starke Abhängigkeit des Parameters Spitzenwiderstand von der Lagerungsdichte, repräsentiert durch den Parameter  $D$ , die bezogene Lagerungsdichte  $I_D$ , natürliche Dichte  $\rho$ , Trockendichte  $\rho_d$  oder Porenanteil  $n$  ( $q_c = f(I_D$  bzw.  $D$ )). Aufgrund der zusätzlichen Fehlerquelle bei der laborativen Bestimmung von  $e_{max}$  und  $e_{min}$  bzw.  $n_{max}$  und  $n_{min}$  ist die Verwendung der Lagerungsdichte  $D$  als Zielgröße jedoch ungünstiger als die der natürlichen Dichte, der Trockendichte  $\rho_d$  oder des Porenanteiles. Zusätzlich wird die Lagerungsdichte ü-

ber  $n_{\min}$  und  $n_{\max}$  durch die Kornverteilung beeinflusst. Nach Kahl und Muhs können Materialien gleicher Dichte  $\rho$  aufgrund unterschiedlicher Kornverteilungsparameter und daraus resultierender verschiedener Werte für  $n_{\min}$  und  $n_{\max}$  voneinander differierende Lagerungsdichten  $D$  aufweisen [Kahl 1968] [Muhs 1967].

Bisherige Untersuchungen des Zusammenhanges zwischen Spitzenwiderstand  $q_c$  und der Dichte  $\rho$  erfolgten meist unter Laborbedingungen an homogenen trockenen Materialien. Baghdadi oder Been & Crooks ermittelten zumeist einfache lineare Zusammenhänge der Form  $y = a + b \cdot x$  ( $q_c = a + b \cdot \rho_d$ ) zwischen  $q_c$  und  $\rho_d$  für verschiedene trockene Sande [Baghdadi 1988] [Been 1988].

Homilius u. a. verglichen die Messergebnisse der Isotopsonde mit denen der Drucksonde und stellten im Ergebnis von 6 Vergleichsuntersuchungen ein wenig einheitliches Bild fest. Verglichen wurden die Parameter Spitzenwiderstand und Dichte. Während in dichten sandigen Böden befriedigende Übereinstimmungen (in Größenordnung und Trend) festgestellt wurden, ergaben die Vergleiche in lockeren Sandböden oder im Schluff z. T. sehr widersprüchliche Ergebnisse. Korrelationen zwischen den Parametern wurden nicht aufgestellt. Die verwendete Isotopsonde kann als Vorläufer der heute z. B. bei der BUL Brandenburg GmbH verwendeten radiometrischen Sonde angesehen werden. Es wurden Gamma-Gamma-Messungen und teilweise auch Messungen mit einer Neutronensonde durchgeführt. Die Sonde wurde eingerammt. Die Autoren schlussfolgern, dass die Anwendung der Isotopsonde hauptsächlich in Schüttungen aus bekanntem Material geeignet ist, da hier aufgrund der genaueren Kalibrierung der Isotopsonde bessere Ergebnisse erreicht werden. Bei der Untersuchung nichtbindiger Böden in größerer Tiefe sei dagegen der Einsatz der Drucksonde zweckmäßiger [Homilius 1964].

Insgesamt lässt sich aus den vorliegenden Erkenntnissen schlussfolgern, dass die Beschreibung von Dichteparametern (Dichte, Porenanteil, Lagerungsdichte) durch den Spitzenwiderstand prinzipiell möglich ist. Die vorgestellten Ergebnisse besitzen jedoch keine Allgemeingültigkeit, da - wie bereits erwähnt - oft nur ein Material untersucht wurde und ansonsten unterschiedliche Bedingungen vorliegen.

## 4.2 Überlagerungsdruck / Spannungszustand

Neben der Lagerungsdichte hat der Spannungszustand einen erheblichen Einfluss auf den Spitzenwiderstand. Insbesondere der effektive Überlagerungsdruck  $\sigma'_{v,0}$ , dessen Größe wiederum im Wesentlichen von der Tiefe abhängig ist, beeinflusst die Größe des Messwertes. Nach Kerisel [Kerisel 1962] und De Beer [De Beer 1963] wird das Eindringen der Sonde durch zwei Grenzzustände bestimmt, zwischen denen sich der Eindrückvorgang abspielt.

Im Grenzfall eines völlig inkompressiblen Materials wird das Eindringen der Sonde durch reines Verdrängen des Lockergesteins (Gestaltsänderung, nicht Volumenänderung) unter Auftreten von Scherbrüchen, z. T. verbunden mit Kornzertrümmerung, ermöglicht. Im anderen Grenzfall eines sehr kompressiblen Materials tritt reine Volumenverringerng, also Verdichtung ein. Der im Bereich der Sondenspitze herrschende Korn-zu-Korn-Druck ist von der Überlagerungsspannung abhängig und bestimmt den Ablauf der Verdrängungs-, Fließ- und Bruchvorgänge. Daher kommt es bei gleicher Dichte mit zunehmender Tiefe zu einer Erhöhung des Spitzenwiderstandes.

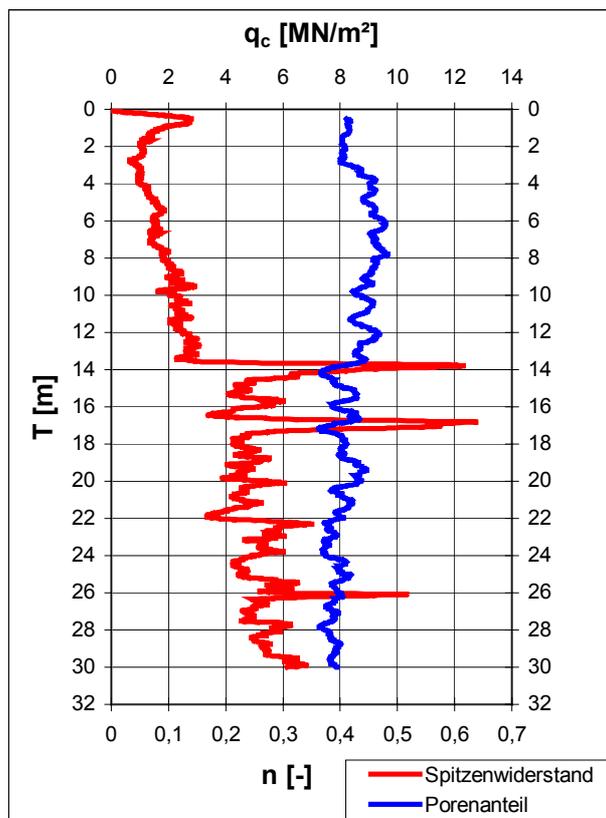


Abb. 4.4: Einfluss der vertikalen Überlagerungsspannung auf den Spitzenwiderstand

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Spitzenwiderstand besonders oberflächennah und bei geringer Lagerungsdichte des Lockergesteins von der Überlagerungsspannung beeinflusst wird, dieser Einfluss jedoch mit zunehmender Tiefe und Lagerungsdichte abnimmt bzw. völlig verschwindet.

U. a. Holden [Holden 1971] und Baldi [Baldi 1986] haben in Laborversuchen belegt, dass insbesondere in normalkonsolidierten Sanden die Größe des Spitzenwiderstandes hauptsächlich von der Lagerungsdichte (bzw. Dichte oder Porenanteil) und den Spannungsverhältnissen bestimmt wird. Neben dem offensichtlichen Einfluss der Überlagerungsspannung weisen sie auch der horizontalen Spannung einen Einfluss auf den Wert des Spitzenwiderstandes zu.

Abbildung 4.4 zeigt als Beispiel eine Sondierung in einer unverdichteten Tagebaukippe. Obwohl der Porenanteil (blaue Kurve - aus radiometrischer Sondierung am gleichen Ansatzpunkt gewonnen) nahezu konstant bleibt, steigt der Spitzenwiderstand mit der Tiefe aufgrund des zunehmenden Überlagerungsdruckes stetig an.

Nach Muhs und Weiß verringert sich der Einfluss der Überlagerungsspannung mit zunehmender Tiefe bis bei Erreichen einer material- und dichteabhängigen Grenztiefe der Einfluss praktisch verschwindet [Muhs 1967]. Unterhalb der Grenztiefe verläuft die Sondierkurve - gleiche Lagerungsdichte vorausgesetzt - senkrecht.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Spitzenwiderstand besonders oberflächennah und bei geringer Lagerungsdichte des Lockergesteins von der Überlagerungsspannung beeinflusst wird, dieser Einfluss jedoch mit zunehmender Tiefe und Lagerungsdichte abnimmt bzw. völlig verschwindet.

### 4.3 Feinkornanteil, Materialklassifizierung

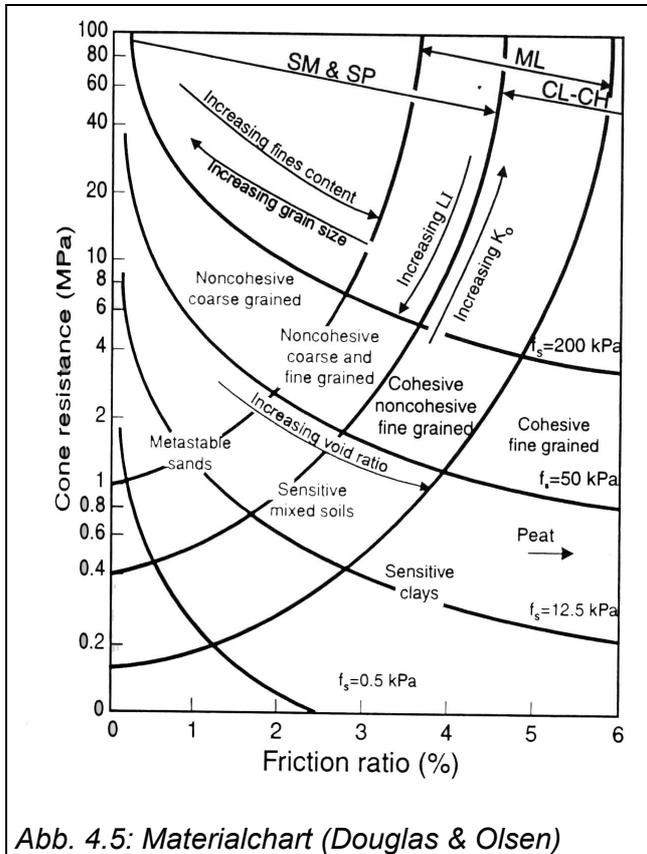


Abb. 4.5: Materialchart (Douglas & Olsen)

Ein wesentliches Aufgabengebiet der Drucksondierung bei der Erkundung von Lockergesteinen ist das Klassifizieren von Materialarten. Dafür sind in der Literatur eine Reihe von Diagrammen zu finden, die eine mehr oder weniger genaue Materialklassifizierung in Abhängigkeit von Spitzenwiderstand und Mantelreibung bzw. Reibungsverhältnis ermöglichen. Beispielhaft seien hier ein Chart nach Douglas und Olsen (Abb. 4.5) [Douglas 1981] und eine Abbildung aus der DIN 4094-1 (Abb. 4.6) [DIN 4094-1] dargestellt. Aus dem ersten Bild sind neben dem Bestimmen des anstehenden Lockergesteins zusätzlich qualitative Aussagen zu verschiedenen bodenphysikalischen Parametern ( $e$ ,  $K_0$ ) ableitbar.

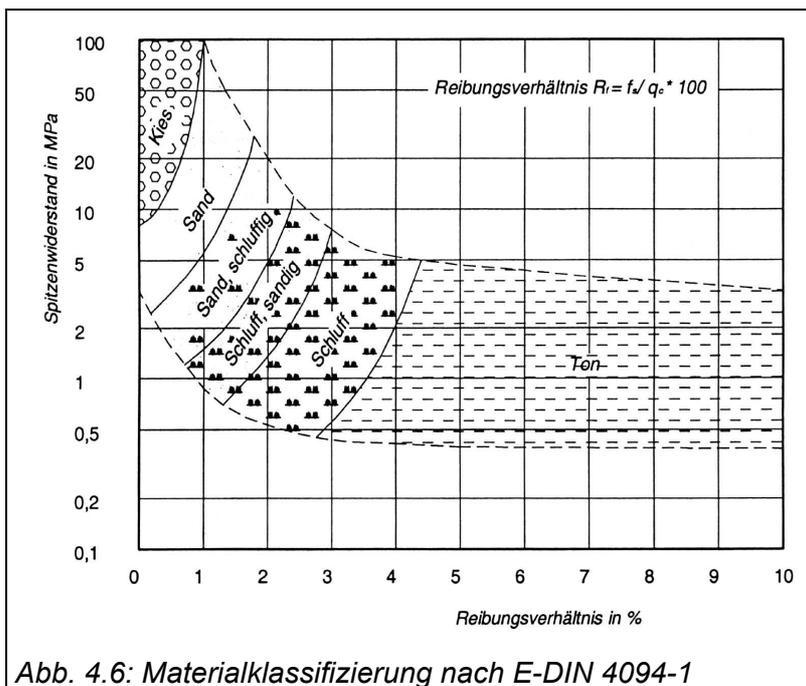


Abb. 4.6: Materialklassifizierung nach E-DIN 4094-1

Die wichtigste Schlussfolgerung aus den abgebildeten Diagrammen ist, dass beide Messwerte der Drucksondierung, nämlich  $q_c$  und  $f_s$  und ebenso das aus ihnen berechenbare Reibungsverhältnis  $R_f$ , auf Änderungen der Zusammensetzung des Materials reagieren. Sie spiegeln Eigenschaften des Materials wieder und lassen somit umgekehrt Rückschlüsse auf das anstehende Material

ZU.

Weitere Autoren, wie Robertson [Robertson 1990] oder Jefferies & Davies [Jefferies 1991] haben ähnliche Charts veröffentlicht, in denen z. T. weitere Einflüsse, wie Konsolidierungsgrad oder Zementierung infolge „Alterung“, berücksichtigt wurden.

Der prinzipielle Zusammenhang zwischen Spitzenwiderstand und Feinkornanteil ist aus Abbildung 4.7 [Kulhawy 1990] ersichtlich. Mit steigendem Feinkornanteil verringert sich der Quotient aus dem auf den Luftdruck bezogenen Spitzenwiderstand  $q_c$  und Schlagzahl.

Eine weitere Methode zur Bestimmung des Feinkornanteiles stammt von Jefferies & Davies [Jefferies 1991]. Sie bestimmen den Feinkornanteil mit Hilfe des Soil Behaviour Type Index  $I_{SBT}$  (siehe Gl. 4-1 bis Gl. 4-3) und haben dafür ein Diagramm (Abbildung 4.8) geschaffen.

$$I_{SBT} = \left[ (3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1.22)^2 \right]^{0.5} \quad (\text{Gl. 4-1})$$

mit normiertem Spitzenwiderstand

$$Q_t = \frac{q_c - \sigma_{v,0}}{\sigma'_{v,0}} \quad (\text{Gl. 4-2})$$

und normierter Mantelreibung

$$F_r = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{v,0}} \cdot 100\% \quad (\text{Gl. 4-3})$$

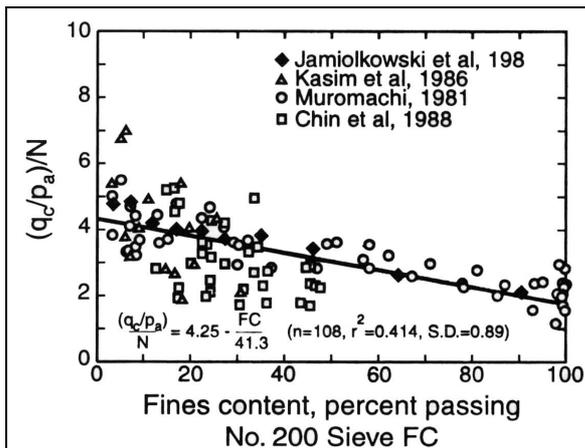


Abb. 4.7: Abhängigkeit zwischen FKA (hier  $d < 0,075$  mm) und bezogenem Spitzenwiderstand

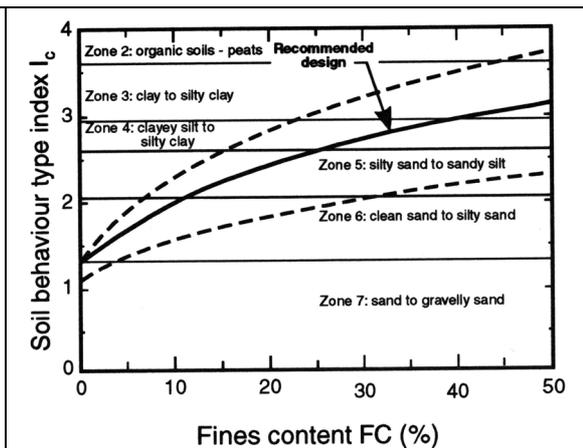


Abb. 4.8: Zusammenhang zwischen Feinkornanteil und Soil Behaviour Type Index  $I_{SBT}$  ( $=I_c$ )

Prashar et al. [Prashar 1998] beschrieben die Bestimmung des Feinkornanteiles mit Hilfe von Drucksondierungen und des von Robertson [Robertson 1990] entwickelten Materialcharts für einen Damm in Californien (USA) und stellten dabei sehr gute Übereinstimmungen mit laborativ ermittelten Feinkornanteilen fest.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Messgrößen der Drucksondierung Spitzenwiderstand, Mantelreibung und vor allem das Reibungsverhältnis auch zum Bestimmen von Materialparametern, insbesondere des Feinkornanteiles, herangezogen werden können. Das Reibungsverhältnis als in Prozent ausgedrücktes Verhältnis zwischen Mantelreibung und Spitzenwiderstand (siehe Tabelle 3.2) wird neben den schon die Größe des Spitzenwiderstandes bestimmenden Parametern wesentlich durch die Materialzusammensetzung geprägt. Eine Zunahme des bindigen Anteiles (Feinkornanteiles) führt zu einer Zunahme der Mantelreibung, meist zu einer Abnahme des Spitzenwiderstandes und somit zu einer Erhöhung des Reibungsverhältnisses. Umgekehrt ausgedrückt: das anstehende Lockergestein kann durch das Reibungsverhältnis in guter Näherung charakterisiert werden. Die hohen Genauigkeitsanforderungen beim flächenhaften Verdichtungsnachweis sind jedoch nur mit Hilfe objektspezifischer Korrelationen zu garantieren.

#### 4.4 Korrelationen zu anderen Größen

Neben den in den beiden vorigen Abschnitten beschriebenen Korrelationen zu Dichte- bzw. Materialparametern existieren eine Reihe weiterer Untersuchungen zu Abhängigkeiten der DS-Messgrößen von verschiedenen bodenphysikalischen Größen. Interessant sind noch die Beziehungen zum Ruhedruckbeiwert  $K_0$  und zum Reibungswinkel  $\varphi$ .

In [Shihata 1998] sind Messungen beschrieben, die einen linearen Zusammenhang zwischen  $K_0$  und dem Produkt  $q_c \cdot (DC/DS)^2$  belegen, wobei DC den Verdichtungsgrad (degree of compaction – entspricht der Lagerungsdichte) und DS den Sättigungsgrad (degree of saturation – entspricht der Sättigungszahl) darstellen.

Eine einfache Möglichkeit zur Abschätzung von  $K_0$  liefern Kulhawy und Mayne [Kulhawy 1990] mit der Gleichung:

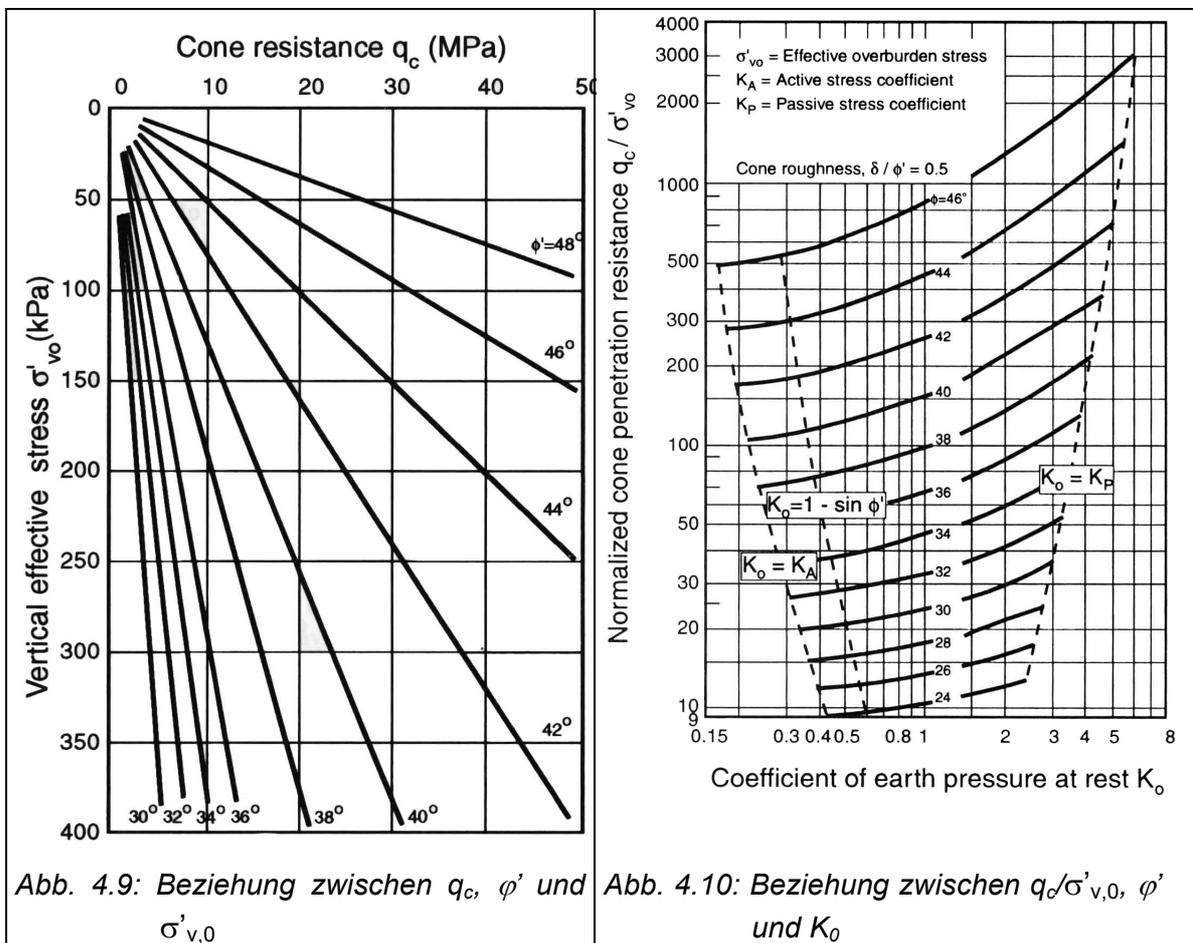
$$K_0 = 0.1 \left( \frac{q_c - \sigma_{v,0}}{\sigma'_{v,0}} \right) \quad (\text{Gl. 4-4})$$

$q_c$  ... Spitzenwiderstand

$\sigma_{v,0}$  ... totale Überlagerungsspannung

$\sigma'_{v,0}$  ... effektive Überlagerungsspannung

Robertson und Campanella [Robertson 1983] ermittelten den in Abbildung 4.9 dargestellten Zusammenhang zwischen Spitzenwiderstand  $q_c$ , vertikaler effektiver Spannung  $\sigma'_{v,0}$  und dem wirksamen Reibungswinkel  $\varphi'$  für toniges Material. Ähnliche Beziehungen sind für verschiedene, auch sandige Materialien ebenso in der DIN 4094-1 zu finden [DIN 4094-1]. Eine weitere interessante Arbeit zu diesem Thema stammt von Marchetti [Marchetti 1988]. Das Diagramm in Abbildung 4.10 gilt für unzementierte normalkonsolidierte Quartz-Sande. In Abhängigkeit vom auf die effektive Überlagerungsspannung bezogenen Spitzenwiderstand  $q_c/\sigma'_{v,0}$  und dem Ruhedruckbeiwert  $K_0$  kann der wirksame Reibungswinkel  $\varphi'$  abgelesen werden. Diese Methode ist für eine erste Abschätzung des Reibungswinkels geeignet.



Neben den bereits diskutierten Lockergesteinsparametern hat auch die Lage des Grundwasserspiegels einen Einfluss auf den Spitzenwiderstand. Messungen in situ und Laborversuche u. a. von Muhs [Muhs 1967] zeigen, dass mit Erreichen des Grundwasserspiegels oft eine Verringerung bzw. ein geringerer Anstieg des Spitzenwiderstandes verbunden ist. Dies ist einerseits auf die geringere Zunahme der effektiven vertikalen Spannung infolge des wirkenden Auftriebs zurückzuführen.

ren, andererseits erleichtert das Porenwasser die Verdrängungs- und Schervorgänge um die Sondenspitze, so dass der Spitzendruck reduziert wird.

Weitere Korrelationen bestehen zu Festigkeitsparametern, dem Konsolidierungsgrad, dem E-Modul oder zur Tragfähigkeit von Pfählen o.ä.

Von anderen Autoren wurden Abhängigkeiten des Spitzenwiderstandes vom Konsolidierungsgrad und der Liegezeit, die z. T. durch den  $K_0$ -Wert erfasst werden, festgestellt. Diese Zusammenhänge werden jedoch an dieser Stelle nicht näher betrachtet, da sie für die vorliegende Aufgabenstellung nicht wesentlich sind.

#### **4.5 Messdatenaufbereitung und –verarbeitung**

Die Auswertung von bei Sondierungen gewonnenen Messdaten erfolgt meist mit einer bestimmten Zielrichtung. Die Sondierergebnisse werden genutzt:

- für die Bestimmung der Lithologie des Untersuchungsobjektes,
- für die Bestimmung des Schichtenaufbaus (Stratigraphie),
- für die Ermittlung von schichtspezifischen bodenphysikalischen Parametern (Dichte, Lagerungsdichte, Scherfestigkeit, Steifezahl) und
- als Datenbasis für statistische bzw. geostatistische Untersuchungen.

Abhängig von der jeweiligen Zielstellung ist es oft sinnvoll, die gemessenen Rohdaten vor der weiteren Verwendung einer Messdatenaufbereitung zu unterziehen, um die Datenstruktur dem geplanten Verwendungszweck anzupassen. In der Literatur sind verschiedene Verfahren zu finden, von denen einige hier kurz vorgestellt werden.

Harder und von Bloh [Harder 1988] gingen davon aus, dass die Bestimmung repräsentativer Werte durch ingenieurmäßige Festlegung erfahrungsgemäß zu signifikant unterschiedlichen Ergebnissen führt, so dass ein subjektiv unabhängiges Verfahren zur Aufbereitung der Messdaten erforderlich ist. Mit dem vorrangigen Ziel der Feststellung der Bodenschichtung mit entsprechend zuverlässiger Identifikation der Bodenarten haben sie den nachfolgend beschriebenen Algorithmus zur Datenaufbereitung bestehend aus 8 Stufen vorgestellt.

##### **Stufe 1: Verifizierung und Darstellung der Rohdaten**

Die gemessenen Werte für Spitzenwiderstand  $q_c$  und Mantelreibung  $f_s$  werden mit den sondenspezifischen Kalibrierfunktionen korrigiert. Zusätzlich wird das Reibungsverhältnis  $R_f = f_s/q_c \cdot 100$  ( $R_f$  in %) berechnet. Üblicherweise werden  $q_c$  und  $R_f$  im Diagramm dargestellt.

## Stufe 2: Summenkurven

Zur Festlegung der Hauptschichtgrenzen werden die Summenkurven von Spitzenwiderstand und Reibungsverhältnis berechnet.

$$I_{R_f}(z) = \sum_{z=0}^z (R_f \Delta z) \quad \text{und} \quad I_{q_c}(z) = \sum_{z=0}^z (q_c \Delta z) \quad (\text{Gl. 4-5, Gl. 4-6})$$

Unter der Voraussetzung, dass  $R_f$  für eine bestimmte Lockergesteinsart einen konstanten Wert annimmt, besteht die  $R_f$ -Summenkurve näherungsweise aus einer Reihe von Geraden unterschiedlicher Neigungen. Der Einfluss der Streuung wird reduziert. Die Linienabschnitte der  $q_c$ -Summenkurve sind im Allgemeinen nicht linear, charakteristische Änderungen der Kurve, die auf signifikante Spitzenwiderstandsänderungen schließen lassen, sind jedoch feststellbar.

## Stufe 3: Bestimmen der Hauptschichten

Die Knickpunkte der  $R_f$ -Summenkurve entsprechen den Grenzen zwischen den Hauptschichten. Unterschiedliche Lagerungszustände innerhalb der gleichen Lockergesteinsart können mit Hilfe der  $q_c$ -Summenkurve erkannt werden. Abbildung 4.11 zeigt an einem aus [Harder 1988] entnommenen Beispiel die ersten 3 Stufen der Datenaufbereitung. Die Bilder (a) und (b) zeigen die Kurven der Rohdaten für  $q_c$  und  $R_f$ , in Diagramm (c) sind beide Summenkurven einschließlich der mit Punkten markierten Knickpunkte abgebildet und (d) zeigt das daraus bestimmte Schichtenprofil.

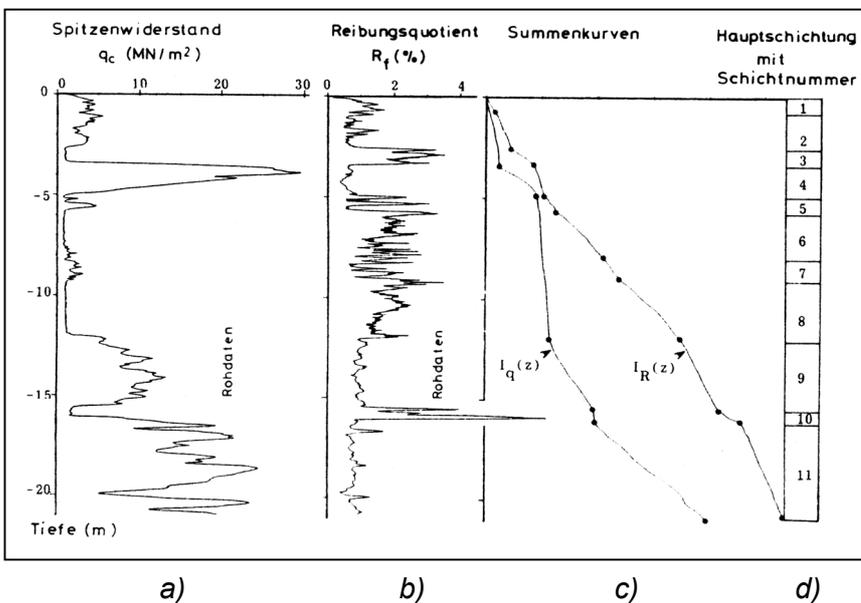


Abb. 4.11: Rohdaten und Summenkurven (Quelle: [Harder 1988])

## Stufe 4: Filtern

Nicht charakteristische Werte der Rohdaten werden durch eine geeignete Filterprozedur eliminiert. Harder und von Bloh benutzten hierfür eine Filterprozedur

nach Vivatrat [Vivatrat 1978]. Dabei wird von 3 aufeinander folgenden Unterschichten der Dicke  $\Delta h$  die Standardabweichung  $s$  und der Median  $M$  aller Daten der Schicht berechnet. Anschließend wird eine „maßgebende Standardabweichung“  $S$  nach

$$S = 0,5 \cdot \text{Min}[(\sigma_i + \sigma_k), (\sigma_i + \sigma_l), (\sigma_l + \sigma_k)] \quad (\text{Gl. 4-7})$$

bestimmt.

Alle Daten, die in den 3 Unterschichten außerhalb des Intervalls  $(M \pm a \cdot M)$  liegen werden auf den jeweiligen Grenzwert gesetzt. Harder und Bloh haben mit  $a = 1$  und  $\Delta h = 0,3$  m gute Ergebnisse erzielt. Untypische Informationen werden so abgeschnitten.

#### **Stufe 5: Kürzen der Datenreihen**

Um die nachfolgenden Prozeduren zu beschleunigen, haben Harder und von Bloh die Datenreihen gekürzt, indem sie eine Anzahl von  $m$  Daten durch deren Mittelwert ersetzt haben. Angesichts heutiger Rechenleistungen der PC's erscheint eine Bearbeitung aus dem oben genannten Grund jedoch nicht mehr erforderlich.

#### **Stufe 6: Glätten der Datenreihen**

Eine Glättung der Datenreihen erfolgt nach der Methode des gleitenden Durchschnitts („Moving Average“), wobei bei der einfachsten Methode mit 3 Werten z. B. ein Spitzenwiderstandswert  $q_{c,m}$  ersetzt wird durch:

$$q_{c,m} = \frac{1}{3} \cdot (q_{c,m-1} + q_{c,m} + q_{c,m+1}) \quad (\text{Gl. 4-8}).$$

Die Prozedur kann mehrmals wiederholt werden. Davis [Davis 1986] beschreibt verschiedene weitere Verfahren zum Glätten („Smoothing“) der Daten und weist darauf, dass „Moving Average Functions“ gleichzeitig als Filter wirken.

Abbildung 4.12 zeigt ein Beispiel einer geglätteten  $R_f$ -Kurve einer Sondierung auf einer Tagebaukippe.

#### **Stufe 7: Abschließende Bestimmung der Schichten**

Im Folgenden wird mit Hilfe der geglätteten  $R_f$ -Kurve eine abschließende Schichtbestimmung durchgeführt, wobei auch Unterschichten anhand der Wendepunkte an deutlichen Änderungen der Kurve bestimmt werden. Gegebenenfalls sollte erneut eine Summenkurve dargestellt werden. Die Zuordnung der Schichten zu verschiedenen Lockergesteinsarten erfolgt mit Hilfe von Materialcharts, wie sie in diesem Kapitel bereits vorgestellt wurden (siehe Abb. 4.5 und 4.6).

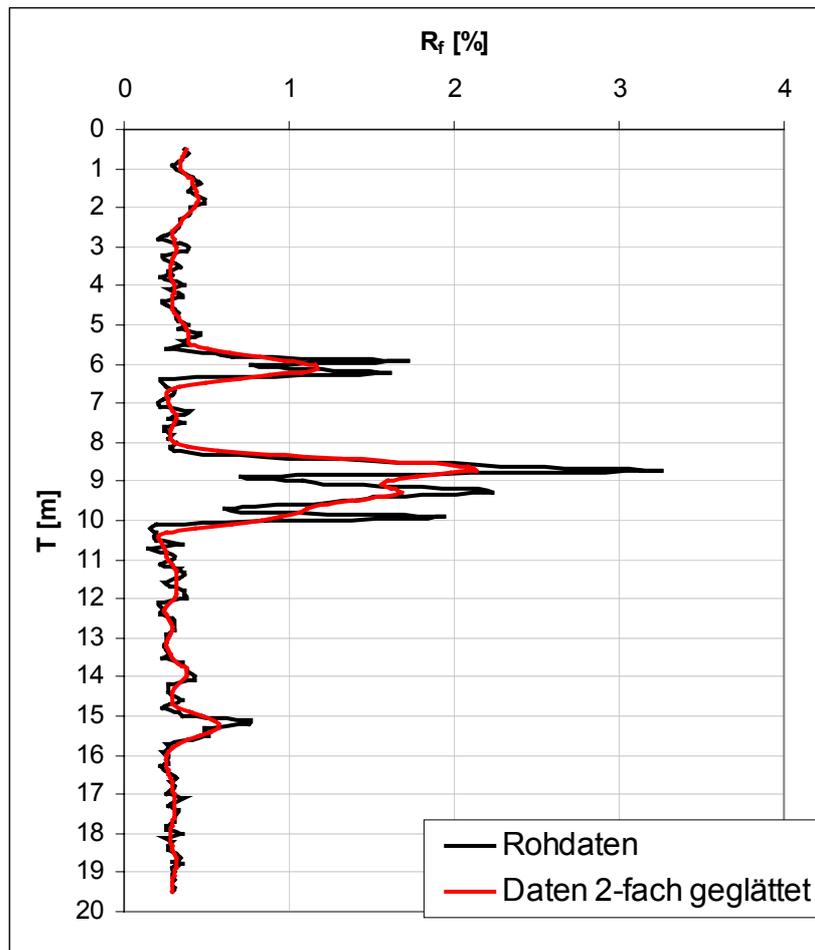


Abb. 4.12: Vergleich Rohdaten und geglättete Daten

### Stufe 8: Bestimmung repräsentativer Parameter

Für die abschließend bestimmten Schichten werden die repräsentativen Drucksondierparameter durch einfache Mittelwertbildung berechnet. Das Ergebnis kann als Stufendiagramm dargestellt werden.

Einige der beschriebenen Datenbearbeitungsprozeduren werden im Folgenden bei der Bestimmung der Korrelationen zwischen Drucksondiererergebnissen und Messergebnissen von radiometrischen Kombinationsdrucksondierungen angewandt.

## 5 Korrelationsbeziehungen zwischen Messwerten aus Druck- und radiometrischen Kombinationsdrucksondierungen

### 5.1 Einleitung

Ziel des im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten Berechnungsalgorithmus ist es, den zwischen den Messgrößen der Drucksondierung  $q_c$  und  $R_f$  und den bei der KDS ermittelten bodenphysikalischen Parametern  $\rho$ ,  $n$  und FKA zweifelsfrei bestehenden physikalischen Zusammenhang in einfachen empirischen Korrelationsbeziehungen der Form

Bodenphysikalischer Parameter =  $f$  (Drucksondierergebnis)

zu erfassen, so dass die Berechnung dieser Parameter aus den Drucksondierergebnissen mit der für die jeweilige Baumaßnahme erforderlichen Genauigkeit möglich ist. Eine wesentliche Anforderung an die Korrelationsbeziehungen ist es, neben den Veränderungen der Dichte gleichzeitig Materialunterschiede berücksichtigen zu können.

Die Korrelationen bieten folgende Vorteile:

- Deutliche Steigerung der Informationsdichte durch Berechnung von  $\rho$ ,  $n$  und FKA aus den kostengünstigeren Drucksondierergebnissen
- Möglichkeit des Bestimmens von  $\rho$ ,  $n$  und FKA in größeren als durch die KDS erreichbaren Teufen (Voraussetzung: ähnliche Materialverhältnisse)
- Möglichkeit, flächenhafte bzw. räumliche Verteilungen von  $\rho$ ,  $n$  und FKA auf der Basis von Drucksondierungen zu berechnen
- Kostengünstige Erhöhung der Anzahl der Stützstellen für geophysikalische Messungen

### 5.2 Parameterauswahl

Theoretische Überlegungen und Erkenntnisse aus der Literatur zeigen, dass die Messwerte der Drucksondierung von einer Vielzahl von Material- und Zustandsparmetern des Lockergesteins beeinflusst werden. Unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflussparameter ergeben sich folgende Abhängigkeiten für den Spitzenwiderstand

$$q_c = f \left( \rho, \gamma, z, n, w, S_r, u, K_0, KGV \{ FKA, S, \delta, d_{50} \dots \}, \text{Kornform}, \text{Kornrauigkeit}, \text{Mineralart}, \text{Verkippungsart}, \text{Liegezeit}, \dots \right) \quad (\text{Gl. 5-1})$$

und für die Mantelreibung

$$q_s = f(\text{Kornform, Kornoberfläche, KGV}\{FKA, S, \delta, d_{50}\dots\} \text{Mineralart, } n, \rho, w, K_0\dots) \quad (\text{Gl. 5-2}).$$

Der größte Teil der Parameter beeinflusst sowohl die Größe des Spitzenwiderstandes als auch die der Mantelreibung, wobei der Grad des Einflusses auf den jeweiligen Messwert sehr unterschiedlich sein kann.

Die Verteilung der meisten Einflussparameter entlang eines Sondierprofils ist jedoch in der Regel nicht bekannt bzw. nicht mit vertretbarem Aufwand zu ermitteln. Das heißt, Korrelationen zwischen Druck- und Kombinationsdruck-Sondierergebnissen können nur empirische Beziehungen sein, welche ausschließlich Parameter enthalten, die als Sondierergebnisse vorliegen oder deren Werte mit ausreichender Genauigkeit ermittelbar sind. Demzufolge muss geklärt werden, ob eine Reduzierung der Parameter, welche  $q_c$  und  $R_f$  beeinflussen, auf die aus der KDS ( $\rho$ ,  $n$ , FKA) oder anderen Untersuchungen bekannten Größen zulässig ist und noch zu ausreichend guten Korrelationen führt.

Eine Eliminierung folgender Parameter und/oder Einflussfaktoren ist aus nachfolgend dargestellten Gründen zulässig:

- Wassergehalt / Sättigungsgrad:

Die Eliminierung ist zulässig, wenn die Korrelationen getrennt für den wassergesättigten und den erdfeuchten Bereich aufgestellt werden. Für den wassergesättigten Bereich wird dann  $S_r = 1$  vorausgesetzt, so dass der Wassergehalt durch den Porenanteil bestimmt ist. Im erdfeuchten Bereich gilt die Annahme, dass der Einfluss von Wassergehalt bzw. Sättigungsgrad auf die DS-Messgrößen eher gering ist.

- Korngrößenverteilung / Kornform / Kornrauigkeit:

Der Feinkornanteil ( $d < 0.063$  mm) ist der einzige Parameter der Korngrößenverteilung, der aus der KDS über die untersuchte Teufe bekannt ist. Dieser stellt jedoch eine Zielgröße der Korrelationen dar und soll aus den Messergebnissen der DS bestimmt werden. Weitere Parameter der Korngrößenverteilung sowie der Kornform und Kornrauigkeit können nicht einzeln berücksichtigt werden: Sie werden jedoch in integraler Form durch das Reibungsverhältnis  $R_f$  wiedergespiegelt.

- Ruhedruckbeiwert:

U. a. Holden [Holden 1971] und Baldi [Baldi 1986] belegen, dass insbesondere in normalkonsolidierten Sanden die Größe des Spitzenwiderstandes hauptsächlich von der Lagerungsdichte (bzw. der natürlichen Dichte oder dem Porenanteil) und den Spannungsverhältnissen bestimmt wird. Neben dem offensichtlichen Einfluss der vertikalen Überlagerungsspannung weisen sie auch der

horizontalen Spannung einen Einfluss auf den Spitzenwiderstand zu. Das Ruhedruckverhältnis  $K_0$  muss dennoch in den Korrelationsbeziehungen unberücksichtigt bleiben, da eine Bestimmung von  $K_0$  in situ sehr problematisch und eine exakte Messung entlang jeder Sondierung praktisch unmöglich sind. Der durch die Nichtberücksichtigung entstehende Fehler muss in Kauf genommen werden. Als den Fehler mindernd erweist sich, dass auch die KDS, auf die sich die Korrelationen stützen unter gleichen Spannungsverhältnissen durchgeführt werden.

- Verkippungsart / Liegezeit:

Der Einfluss von Kippenentstehung und –geschichte kann unberücksichtigt bleiben, da die Korrelationsbeziehungen in jedem Fall objektbezogen erstellt werden müssen, so dass diese Einflüsse als den Korrelationsbeziehungen immanent vorausgesetzt werden können. Sollten unterschiedliche Verkippungstechnologien (z. B. durch Absetzer, durch Spülen etc.) zu erheblichen Unterschieden im Materialverhalten führen, sind die Korrelationsbeziehungen für die betreffenden Kippscheiben getrennt zu ermitteln.

- Geräteparameter:

Unter der Annahme, dass bei allen Sondierungen die Geräte- und Sondierparameter konstant sind, wurde der Einfluss von Sondiergerät und –technologie bereits in den Beziehungen Gl. 5-1 und Gl. 5-2 nicht berücksichtigt.

Werden die o. g. genannten Einflussparameter aus den Beziehungen eliminiert, erhält man durch Umstellung nach den gesuchten Größen folgende Abhängigkeiten:

Feinkornanteil:  $FKA = f(q_s, q_c, \gamma, z)$  (Gl. 5-3)

Dichte:  $\rho = f(q_c, q_s, \gamma, z, \rho_s)$  (Gl. 5-4)

Porenanteil:  $n = f(q_c, q_s, \gamma, z)$  (Gl. 5-5)

Die Zulässigkeit des Reduzierens der Parameter auf die o. g. wird durch verschiedene Untersuchungen in situ und im Labor belegt [Holden 1971] [Houlsby 1988] [Baldi 1986]. Der Spitzenwiderstand in einem Material wird überwiegend durch die Dichte der Lagerung ( $\rho$ ,  $n$ ) und den Spannungszustand bestimmt. Die Mantelreibung oder das Reibungsverhältnis als in Prozent angegebener Quotient aus Mantelreibung und Spitzenwiderstand charakterisieren die Materialeigenschaften des anstehenden Lockergesteins.

### 5.3 Dimensionsanalyse

Mit den Zielgrößen  $\rho$ ,  $n$ , FKA und den verbleibenden Variablen gemäß Gleichungen Gl. 5-3 bis Gl. 5-5 kann nun eine Dimensionsanalyse zum Ermitteln dimensionsbereinigter Beziehungen durchgeführt werden.

Ziel der Dimensionsanalyse ist es, die Zahl der Einflussgrößen – unter Beachtung physikalischer Zusammenhänge - auf die aus physikalischer Sicht wesentlichen zu reduzieren. Diese Reduktion ermöglicht unter Umständen erst eine – im mathematisch-physikalischen Sinne – exakte Lösung des Problems [Spurk 1992]. Die Beziehungen zwischen vielen dimensionsbehafteten physikalischen Größen werden dabei auf Beziehungen zwischen einigen (wenigen) dimensionslosen Größen zurückgeführt. Allerdings finden sich in der Praxis viele, für praktische Zwecke nützliche Beziehungen, die keine dimensionshomogenen Gleichungen sind und durch Angabe der Einheiten ergänzt werden müssen. Diese Gleichungen sind ebenfalls richtig, da sie Ergebnisse von Messungen wiedergeben und somit Erfahrungen, d.h. universelle Naturgesetze in Gleichungen zusammenfassen [Spurk 1992]. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass dann, wenn die Dimensionsanalyse im Einzelfall keine befriedigende Lösung bietet, auch nicht dimensionshomogene Gleichungen zur Beschreibung des Zusammenhanges möglich sind.

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die Reduktion der Größen auf die physikalisch wesentlichen bereits durchgeführt. Mit der Dimensionsanalyse werden die Beziehungen zwischen den verbleibenden dimensionsbehafteten Größen in Beziehungen zwischen wenigen dimensionslosen Größen umgewandelt.

Für das zu beschreibende Problem wird ein [LMT]-Grundgrößensystem gewählt. Vor dem Aufstellen einer Dimensionsmatrix wird aus praktischen Gründen noch eine Veränderung innerhalb der Einflussgrößen vorgenommen. An die Stelle der Mantelreibung  $f_s$  wird das Reibungsverhältnis  $R_f$  als materialcharakterisierende Größe gesetzt. Das ist zur Bestimmung des anstehenden Materiales gebräuchlicher und auch besser geeignet. Darüber hinaus vereinfacht sich die Prozedur der Bildung dimensionsloser Größen ( $\Pi$ -Größen), da  $R_f$  bereits dimensionslos ist.

Somit sind alle Ziel- und Einflussgrößen gewählt, und es können für alle Zielgrößen Dimensionsmatrizen mit  $m$  Zeilen und  $n$  Spalten aufgestellt werden. Dabei empfiehlt es sich, die Zielgröße in die erste Spalte zu schreiben [Spurk 1992]. In der Regel ist der Rang der Dimensionsmatrix gleich der Zeilenzahl und somit gleich der Anzahl der Basisgrößen ( $r = m$ ) im gewählten Grundgrößensystem.

## 5.3.1 Feinkornanteil

	FKA	$q_c$	$\gamma$	$z$	$R_f$
L	0	-1	-2	1	0
M	0	1	1	0	0
T	0	-2	-2	0	0

Wählt man als unabhängige Größen  $q_c$ ,  $\gamma$ , und  $z$ , wird deutlich, dass diese Größen in Bezug auf ihre Dimensionen nicht voneinander unabhängig sind. Ihre Determinante (Unterdeterminante der gesamten Matrix) verschwindet. Die Forderung

$$D = \det(a_{ij}) \neq 0 \quad (\text{Gl. 5-6})$$

ist nicht erfüllt.

$$D = \det \begin{vmatrix} -1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ -2 & -2 & 0 \end{vmatrix} = -1 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -2 & 0 \end{vmatrix} + 2 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -2 & 0 \end{vmatrix} + 1 \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ -2 & -2 \end{vmatrix} = 0 \quad (\text{Gl. 5-7})$$

Die Zahl der unabhängigen Größen  $r$  kann jedoch auch kleiner als  $m$  sein. Dazu kommt es genau dann, wenn Basisgrößen immer nur in einer bestimmten Kombination in die abgeleiteten Größen eingehen. Dies ist häufig bei statischen Problemen im [LMT]-System und so auch hier der Fall. M und T treten mehrfach in der Kombination  $MT^{-2}$  auf. Die Masse spielt bei diesen Problemen keine Rolle und gelangt nur durch die Größen Kraft bzw. Spannung in die Dimensionsformeln. Man könnte in diesem Fall auch  $MT^{-2}$  als Basisgröße wählen und erhält dementsprechend für dieses System nur  $r = 2$  Basisgrößen [Spurk 1992].

Für die unabhängigen Größen  $q_c$  und  $z$  in diesem System verschwindet die Determinante nicht, sie sind voneinander unabhängig.

$$D = \det \begin{vmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} = 0 - 1 = -1 \neq 0 \quad (\text{Gl. 5-8})$$

Laut [Spurk 1992] kann bei Problemen mit einer geringen Anzahl von Einflussgrößen an Stelle einer systematischen Berechnung der dimensionslosen Größen eine schnellere Methode angewandt werden, indem die Zeilen der Matrix in einer Art Eliminationsverfahren durch Multiplikation und Division der physikalischen Größen der Reihe nach zu Null gemacht werden. Damit erhält man bereits ohne weitere Rechenoperationen neben der dimensionslosen Zielgröße FKA eine dimensionslose Größe mit dem Reibungsverhältnis  $R_f$ . Übrig bleibt eine Matrix

	$q_c$	$\gamma$	$z$
<b>L</b>	-1	-2	1
<b>M</b>	1	1	0
<b>T</b>	-2	-2	0

Durch Division der Wichte durch die Teufe  $z$  entsteht

	$q_c$	$\gamma/z$
<b>L</b>	-1	-1
<b>M</b>	1	1
<b>T</b>	-2	-2

An Stelle von  $\gamma/z$  kann nun die wirksame vertikale Überlagerungsspannung  $\sigma'_{v,0}$  geschrieben werden. Unterhalb des Grundwasserspiegels ist demzufolge für  $\gamma$  die Wichte unter Auftrieb zu verwenden. Dividiert man nun die beiden verbliebenen Größen durcheinander, erhält man eine zweite dimensionslose Größe. Die Abhängigkeit des Feinkornanteiles kann nun gemäß Gleichung (Gl. 5-9) formuliert werden.

$$FKA = f(\Pi_1, \Pi_2) = f\left[\left(\frac{q_c}{\sigma'_{v,0}}\right), R_f\right] \quad (\text{Gl. 5-9})$$

mit  $\Pi_1 = \frac{q_c}{\sigma'_{v,0}}$  und  $\Pi_2 = R_f$

### 5.3.2 Porenanteil

Da der Porenanteil wie der Feinkornanteil eine dimensionslose Größe ist, entspricht die Bestimmung der Abhängigkeit der oben dargestellten Vorgehensweise und es ergeben sich für den Porenanteil  $n$  die selben dimensionslosen  $\Pi$ -Faktoren (Gl. 5-10).

$$n = f(\Pi_1, \Pi_2) = f\left[\left(\frac{q_c}{\sigma'_{v,0}}\right), R_f\right] \quad (\text{Gl. 5-10})$$

### 5.3.3 Dichte

Für die Bestimmung der  $\Pi$ -Faktoren und der Abhängigkeit der Dichte von den Einflussgrößen wird die Korndichte als zusätzliche, die Dichte wesentlich beeinflussenden Parameter hinzugenommen. Damit ist auch die Masse in Form der Dich-

tegrößen eine für das Problem relevante Größe und es können 3 dimensional unabhängige Größen mit  $q_c$ ,  $z$  und  $\rho_s$  festgelegt werden. Die Dimensionsmatrix ergibt sich dann wie folgt:

	$\rho$	$q_c$	$\gamma$	$z$	$\rho_s$	$R_f$
<b>L</b>	-3	-1	-2	1	-3	0
<b>M</b>	1	1	1	0	1	0
<b>T</b>	0	-2	-2	0	0	0

Diese Größen sind dimensional voneinander unabhängig, da ihre Determinante nicht verschwindet.

$$D = \det \begin{vmatrix} -3 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \end{vmatrix} = -3 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -2 & 0 \end{vmatrix} + 1 \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + 1 \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & -2 \end{vmatrix} = -2 \neq 0 \quad (\text{Gl. 5-11})$$

Wendet man die bereits oben dargestellte Methode zur Ermittlung der dimensionslosen Größen an, ergibt sich neben den auch für Poren- und Feinkornanteil bestimmten Größen  $\Pi_1$  und  $\Pi_2$  eine weitere dimensionslose Größe mit  $\rho/\rho_s$ , die gleichzeitig Zielgröße ist. Die Abhängigkeit für die Dichte wird dann nach folgender Gleichung formuliert:

$$\frac{\rho}{\rho_s} = f(\Pi_1, \Pi_2) = f\left[\left(\frac{q_c}{\sigma'_{v,0}}\right), R_f\right] \quad (\text{Gl. 5-12})$$

An dieser Stelle sei nochmals betont, dass die entwickelten Beziehungen nur dann sinnvoll sind, wenn die in den  $\Pi$ -Faktoren enthaltenen Größen, insbesondere die DS-Messgrößen, die Zielgrößen ausreichend gut beschreiben. Die dimensionshomogenen Beziehungen allein sind keine Garantie dafür, dass das physikalische Problem auch richtig beschrieben wird.

#### 5.4 Messdatenaufbereitung

In den Kapiteln 3.3.1 und 3.3.2 sind die mess- und verfahrenstechnischen Unterschiede und Besonderheiten der Messverfahren Drucksondierung und radiometrische Kombinationsdrucksondierung detailliert beschrieben. Diese machen eine Aufbereitung der Messdaten und verschiedene Korrekturen erforderlich, um ausreichend gute Korrelationen zu erhalten. Darüber hinaus sind in Kapitel 4 einige statistische Datenaufbereitungsverfahren beschrieben, deren Anwendung teilweise auch bei der Ermittlung der Korrelationsbeziehungen hilfreich ist. Die wesentlichen Schritte zur Aufbereitung der Messdaten sind:

- Korrektur der Teufenzuordnung der Drucksondiermesswerte durch „Verschiebung“ der  $f_s$ -Werte um einen Betrag  $\Delta z_1$  „nach oben“.
- Angleichung der Messwertabstände von Druck- und Kombinationsdrucksondierung auf einheitliche Schrittweite und Erstellen einer Datei, welche die Daten aller Messgrößen aus beiden Sondierverfahren enthält ( $z$ ,  $q_c$ ,  $f_s$ ,  $R_f$ ,  $\rho$ ,  $\rho_s$ ,  $n$ , FKA,  $\sigma'_{v,0}$ ). Dies entspricht einer Reduzierung der Datenmenge der  $q_c$ - und  $R_f$ -Messdaten, wie sie in Kapitel 4.5 beschrieben wurde. Allerdings ist hier nicht die Verringerung des Rechenaufwandes, sondern die notwendige Anpassung der Messpunktabstände der Grund für die Reduzierung der Datenmenge.
- Vergleich der Teufenzugehörigkeit zwischen den Messdaten von Druck- und Kombinationsdrucksondierung und ggf. Korrektur um  $\Delta z_2$
- Abgrenzung der Übergangszonen an Schichtgrenzen und Eliminierung der Datensätze aus den Übergangsbereichen
- Eliminierung von offensichtlichen Ausreißern „per Hand“. Insbesondere in stark inhomogenem Untergrund (z. B. Schüttungen, Tagebaukippen etc.) ist eine „automatische“ Eliminierung von Ausreißern mit Hilfe einer Filterprozedur, wie in Kapitel 4.5 beschrieben, ungünstig, da so auch reelle Informationen verloren gehen können. Eine Anhäufung kurzzeitiger Spitzenwiderstandsmaxima kann beispielsweise auf das vermehrte Vorhandensein von Steineinlagerungen hindeuten. Eine Eliminierung dieser vermeintlichen Ausreißer mit einem Filter liefert somit ein nicht mehr der Realität entsprechendes Bild. Statt dessen sollten offensichtliche Ausreißer, wie sie z. B. durch das Anfahren von einzelnen Sondierhindernissen oder Störungen des Datenerfassungssystems entstehen, manuell aus dem Datensatz entfernt werden. Zumindest sollte, wenn dennoch automatische Filter eingesetzt werden, das Ergebnis mit den Rohdaten verglichen und kritisch beurteilt werden.
- Ein Glätten der Messdaten, insbesondere der Drucksondiererergebnisse ist nicht grundsätzlich erforderlich, kann sich jedoch bei der Bestimmung einer passenden Regressionsfunktion positiv auf den Korrelationskoeffizienten und damit auf die Güte der Korrelationen auswirken. Es sollte am konkreten Messobjekt überprüft werden, ob sich für die betreffenden Daten eine Glättung, wie in Kapitel 4.5 beschrieben, positiv auf die Bearbeitungsergebnisse auswirkt.
- Die wesentlichen Datenbearbeitungsschritte werden nachfolgend ausführlich beschrieben.

### 5.4.1 Teufenkorrektur der DS-Messdaten

Ohne Korrektur wird dem Spitzenwiderstandswert jeweils ein Mantelreibungswert einer im Abstand  $\Delta z_1$  darüber liegenden Teufe zugeordnet. Das Reibungsverhältnis wird somit insbesondere an Schichtgrenzen falsch berechnet. Die Teufendifferenz resultiert aus folgenden Tatsachen:

- a. Sondenspitze ( $q_c$ ) und Reibungshülse ( $f_s$ ) sind räumlich voneinander getrennt. Bei den üblichen Sondenspitzen beträgt der Abstand ca. 10 cm. Die vergrößerten Abschnitte des in Abbildung 5.3 dargestellten Sondierdiagramms verdeutlichen diese Tatsache. Der Ausschnitt aus einer Messwerttabelle in Abb. 5.2 zeigt, dass die ersten (5 ...10)  $f_s$ - und  $R_f$ -Werte Null sind, da die Reibungshülse noch nicht im Boden ist. Insbesondere bei häufig wechselnden und in dünnen Schichten anstehenden Materialien wird dadurch teilweise die Materialzusammensetzung verfälscht wiedergegeben.

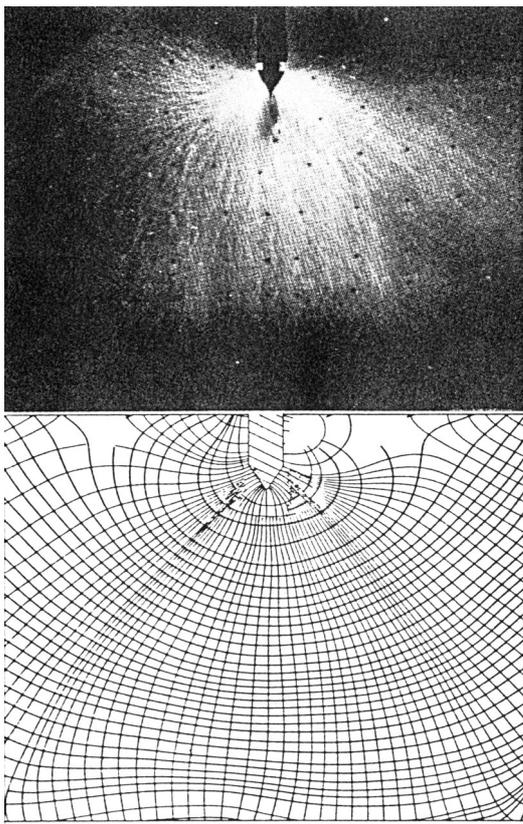


Abb. 5.1:  
Spannungsfeld um eine Sondenspitze  
(oben Foto in polarisiertem Licht, unten  
FEM-Berechnung) [Allersma 1982]

T	$q_c$	$f_s$	$R_f$
[m]	[Mpa]	[Mpa]	[-]
0,02	0,2	0	0
0,04	0,4	0	0
0,06	0,7	0	0
0,08	0,9	0	0
0,1	1,05	0	0
0,12	1,2	0,0006	0,05
0,14	1,35	0,0038	0,281
0,16	1,45	0,0056	0,386
0,18	1,45	0,0069	0,476
0,2	1,5	0,0094	0,627
0,22	1,55	0,0106	0,684
0,24	1,6	0,0119	0,744
0,26	1,6	0,0125	0,781
0,28	1,55	0,0131	0,845
		Schrittweise nach oben verschieben	$R_f$ neu berechnen

Abb. 5.2: Ausschnitt Messwerttabelle

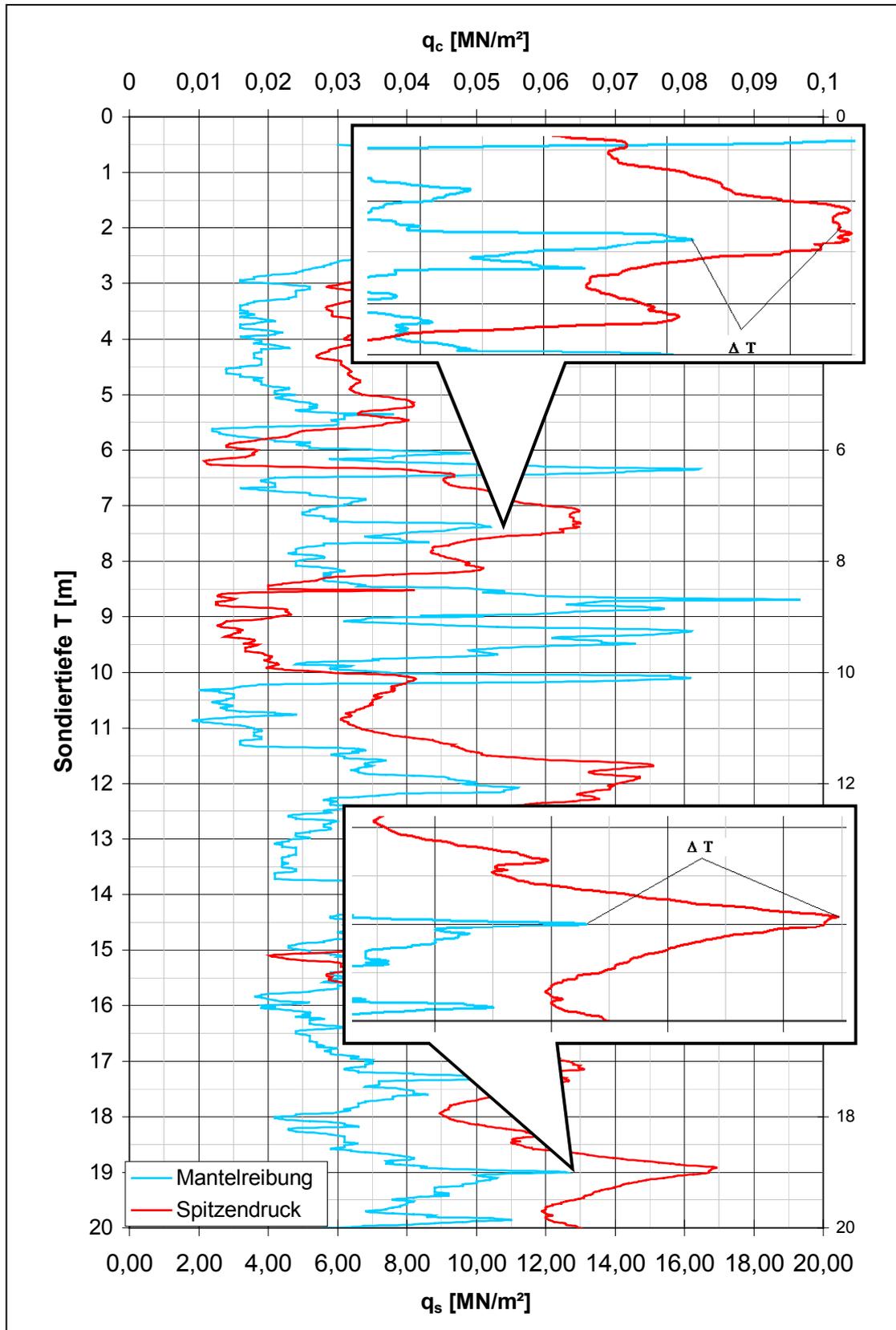


Abb. 5.3: Tiefendifferenz zwischen  $q_s$ - und  $q_c$ -Messwerten

- b. Der gemessene  $q_c$ -Wert ist außerdem nicht exakt der Teufe der Sondenspitze, sondern einer etwas größeren Teufe zuzuordnen, da der Spitzenwiderstand ein integraler Wert aus dem Eindringwiderstand eines Bereiches unterhalb der Spitze ist, in dem sich ein durch Verdrängen des Materials hervorgerufenen Spannungsfeld, die sogenannte „Druckzwiebel“, aufbaut (Abb. 5.1).

Der optimale Wert für  $\Delta z_1$  kann durch Berechnung des linearen Korrelationskoeffizienten zwischen den  $q_c$ - und  $f_s$ -Werten ermittelt werden, wobei die Datenreihen schrittweise gegeneinander verschoben werden und der Korrelationskoeffizient neu berechnet wird. Das  $\Delta z_1$  mit dem besten Korrelationskoeffizient entspricht ca. dem optimalen Verschiebungsbetrag. Erfahrungsgemäß beträgt der Korrekturwert  $\Delta z_1 = (10 \dots 20)$  cm, also 5 - 10 Datensätze. Die Diagramme in Abb. 5.4 zeigen an einem Beispiel, wie sich die Punktmenge durch das schrittweise Verschieben der Datenreihen relativ zueinander zusammenschiebt und gleichzeitig die Korrelation zwischen  $q_c$  und  $f_s$  besser wird.

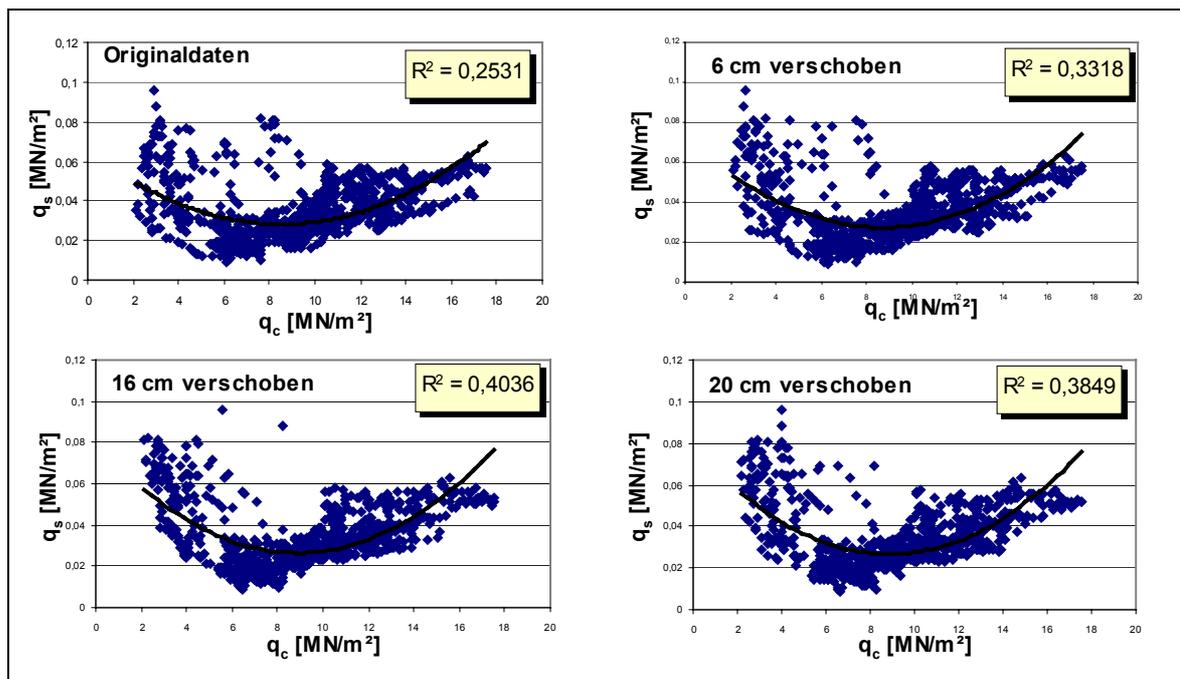


Abb. 5.4: Bestimmen von  $\Delta z_1$

Nach Überschreiten des optimalen Verschiebungsbetrages verschlechtert sich der Korrelationskoeffizient wieder (bei Datenverschiebung um 20 cm  $\equiv$  10 Datensätze, Diagramm rechts unten).

Im Beispiel ergibt sich die beste Korrelation für einen Verschiebungsbetrag von  $\Delta z_1 = 16$  cm.

Nach der Korrektur muss das Reibungsverhältnis  $R_f$  für jede Teufe neu bestimmt werden (siehe Abb. 5.2). Die Teufenkorrektur ist auch dann erforderlich, wenn durch die ausführende Sondierfirma ein Angleichen der Teufenzuordnung für Spitzenwiderstand und Mantelreibung um das Maß des Abstandes zwischen Sondenspitze und Reibungshülse erfolgt ist. In diesem Fall verbleibt noch die Differenz der Teufen durch die Tatsache, dass der Spitzenwiderstandswert dem Zentrum der „Druckzwibel“ und nicht exakt der Teufe der Spitze zuzuordnen ist. Der Korrekturbetrag ist dann entsprechend kleiner.

#### 5.4.2 Messwertdatei

Anschließend erfolgt eine Angleichung der Schrittweiten der Sondierergebnisse auf eine gemeinsame Schrittweite (meist auf Schrittweite der KDS – 5 cm bzw. 10 cm) durch einfache Mittelwertbildung. Da stets nur höchstens 5 Datensätze der

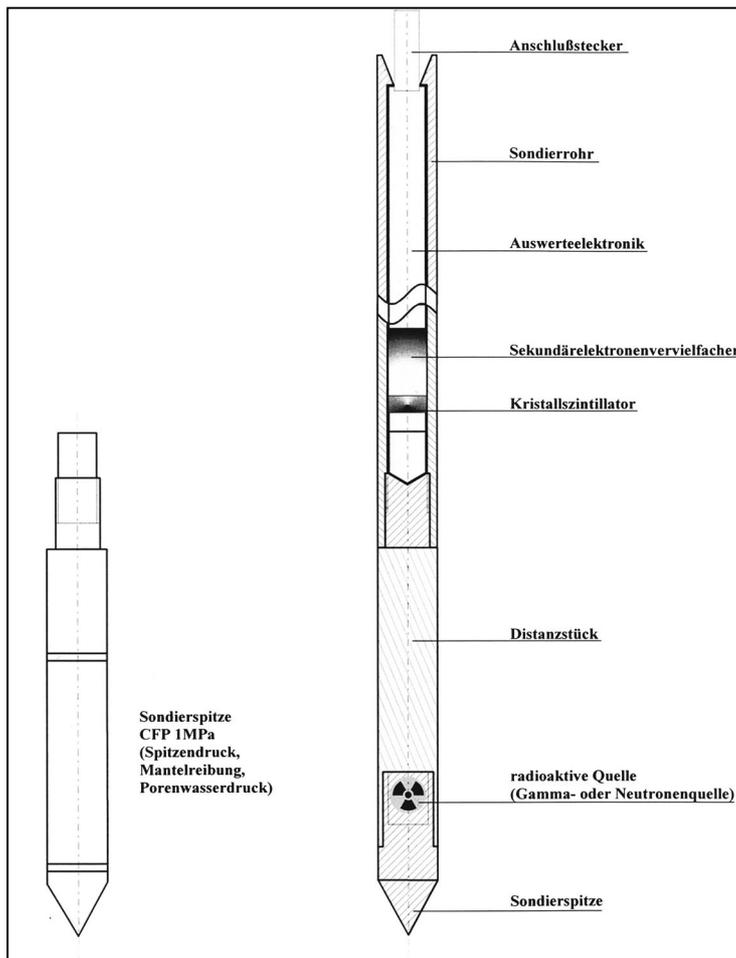


Abb. 5.5: Sondierspitzen für CPT und Radiometrie

DS-Messdaten zusammengefasst werden, ist eine zusätzliche Glättung durch gleitende Mittelwertbildung an dieser Stelle der Datenbearbeitung nicht erforderlich. Der Einflussbereich um die Sonde bei den radiometrischen Messungen ist in Abhängigkeit vom Sondenspacing in der Regel wesentlich größer als 10 cm, so dass Änderungen innerhalb der zu mittelnden 5 Datensätze durch die KDS ohnehin nicht auflösen sind und nur integral erfasst werden. Ein weiteres Reduzieren der Datenmenge aus rechentechnischen Gründen ist ebenfalls nicht notwendig.

### 5.4.3 Teufenkorrektur zwischen DS- und KDS-Messdaten

Analog Punkt 5.4.1 besteht auch zwischen den einer Tiefe zugeordneten Messwerten der Drucksondierung und der radiometrischen Messungen einer KDS eine Teufendifferenz  $\Delta z_2$  aufgrund der in Kapitel 3.3 dargestellten Besonderheiten wie Sondenspacing oder integrierendem Messprinzip. Die Abbildungen 5.5 und 5.6 sollen dies verdeutlichen. Beide Sonden in Abbildung 5.5 (links DS [CPT], rechts radiometrische Sonde) befinden sich in der gleichen Tiefe. Der Spitzenwiderstandsmesswert resultiert, wie in Punkt 5.4.1) erläutert, aus dem Bereich unterhalb der Sondenspitze. Aus der Lage von radioaktiver Quelle und

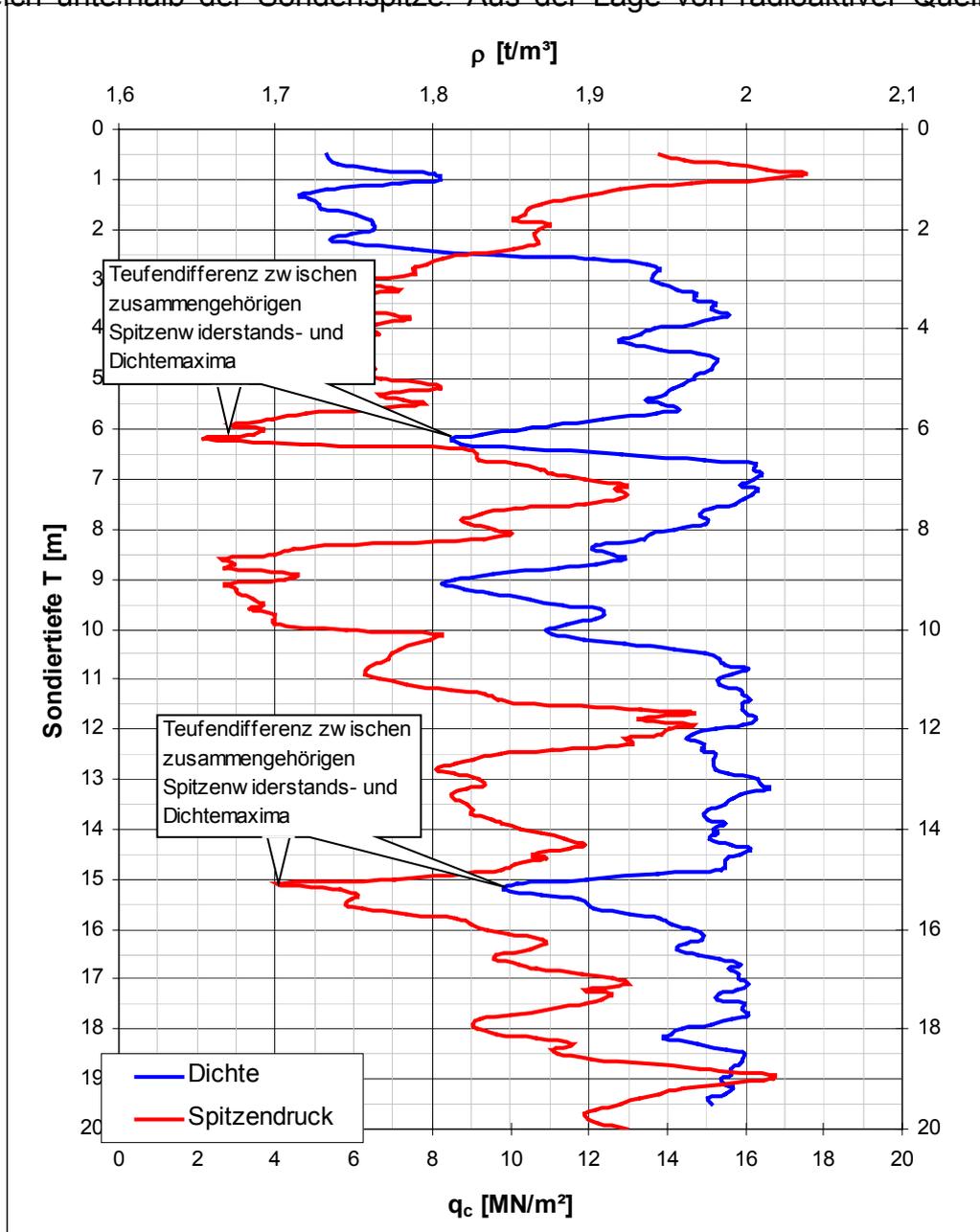


Abb. 5.6: Teufendifferenz zwischen DS- und KDS-Messwerten

der Sondenspitze. Aus der Lage von radioaktiver Quelle und Detektor (Kristallszintillator) ist ersichtlich, dass die aus der Radiometrie gewonnenen Kennwerte Teufen oberhalb der Sondenspitze zuzuordnen sind. Sinnvollerweise kann hier die Teufe in der Mitte zwischen Quelle und Detektor als maßgebend angesehen werden. Die Korrektur kann, wie in Punkt 5.4.1) beschrieben, erfolgen, indem die Korrelationen z.B. zwischen Spitzenwiderstands- und Dichtemesswerten oder  $R_f$ - und FKA-Daten ermittelt und die Datenreihen bis zum Erreichen der besten Korrelation relativ zueinander verschoben werden.

#### **5.4.4 „Bereinigen“ der Messdaten**

Ebenfalls als Folge des integrierenden Messprinzips der radiometrischen Sonde sind die Messwerte an Schichtgrenzen fehlerbehaftet. Daraus resultiert, dass beim Ermitteln der Korrelationsbeziehungen den DS-Messwerten verfälschte Dichte-, Porenanteil- oder Feinkornanteilwerte gegenüber gestellt werden. Zum Vermeiden dieses Fehlers sollten Daten aus den Übergangsbereichen, wie in Abb. 5.7 gekennzeichnet, verworfen werden. Bei stark geschichteten Kippen mit dünnen, häufig wechselnden Schichten ist diese Korrektur jedoch unpraktikabel, da zu viele Daten entfernt werden müssten. Darüber hinaus ist dieser Schritt sehr zeitintensiv, so dass ggf. die Verschlechterung der Korrelationen in Kauf genommen werden sollte.

Ein ähnlicher Effekt wurde auch bei der Drucksondierung festgestellt. Der Spitzenwiderstandssensor „erkennt“ eine Änderung des Materiales und der Dichte bereits vor Erreichen der neuen Schicht. Das bedeutet, dass gerade bei dünnen eingelagerten Schichten nicht der korrekte  $q_c$ -Messwert erfasst wird. Der Bereich, in dem der Spitzenwiderstand bereits von Änderungen noch nicht angefahrener Schichten beeinflusst wird, variiert mit der Steifigkeit des Bodens. Er misst in weichen Böden 2 – 3 Spitzendurchmesser, in sehr festen jedoch bis zum 20-fachen des Spitzendurchmessers (ca. 70 cm bei den üblichen Spitzen !!!) [Robertson 1998]. Vreugdenhil u. a. [Vreugdenhil 1994] haben aufgezeigt, wie dieser Fehler über Korrekturfaktoren, die eine Funktion der Schichtdicke und -steifigkeit sind, korrigiert werden kann.

Zusätzlich zu den Schichtgrenzeneinflüssen haben Gui und Bolton [Gui 1998] einen Einfluss der Korngröße des Materiales bzw. des Verhältnisses Korngröße zu Spitzendurchmesser festgestellt. Der Einfluss der Schichtgrenzen kann ebenso wie bei den radiometrischen Messungen korrigiert werden. Der Einfluss des Korngrößen- / Spitzendurchmesserverhältnisses wird jedoch zumindest für Kippenmaterialien als eher gering bewertet, so dass eine Korrektur dieses Fehlereinflusses nicht erforderlich scheint.

Alle Messdaten aus einer Teufe kleiner 1 m sind zu verwerfen, da oberflächennahe Messwerte der Mantelreibung (und damit des Reibungsverhältnisses) aufgrund

der geringen Spannungen die Korrelationen verfälschen und sich die „Druckzwiebel“ unter der Sondenspitze erst in dieser Tiefe komplett ausgebildet hat.

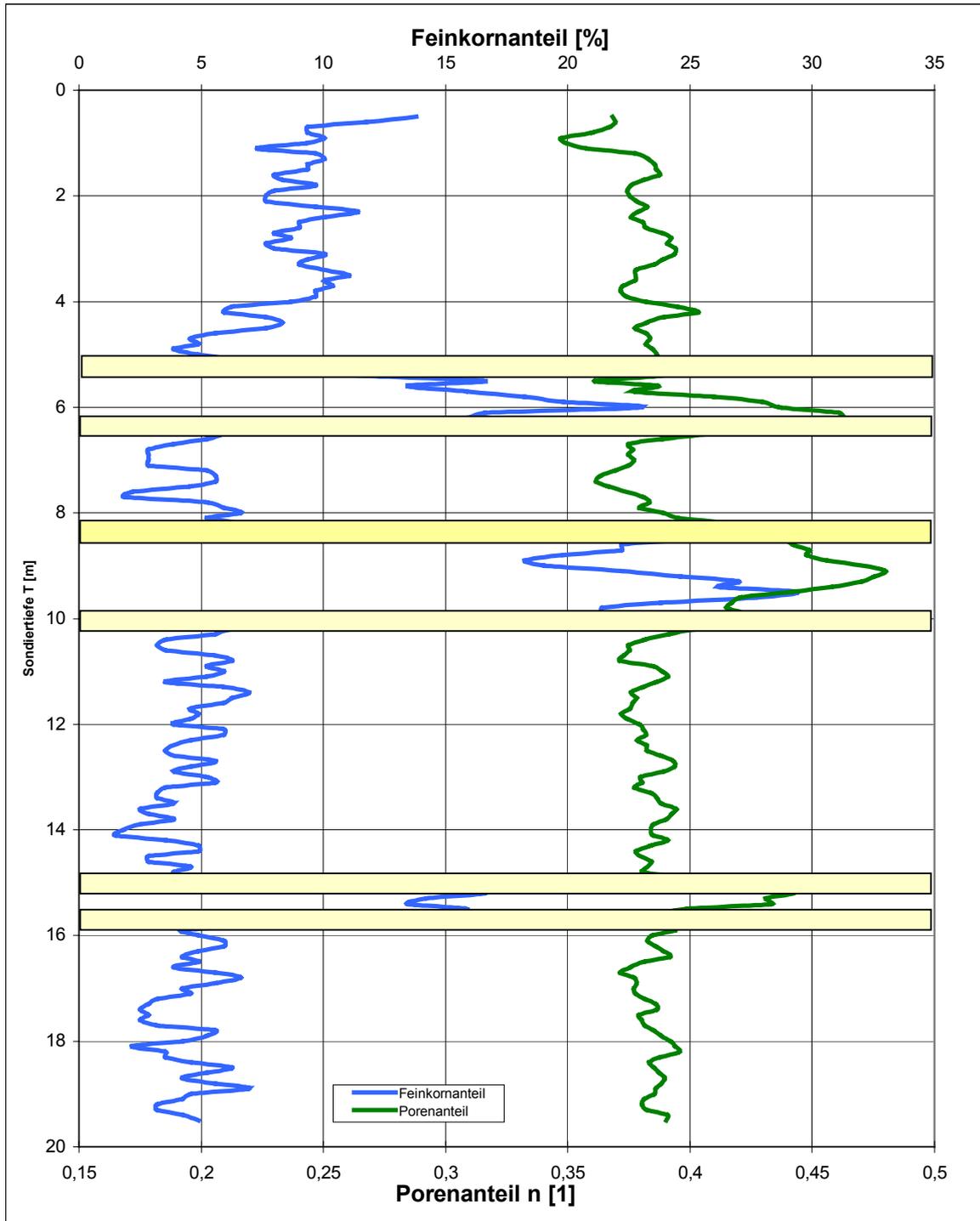


Abb. 5.7: Zu entfernende Messdaten an Schichtgrenzen

## 5.5 Regressionsanalyse

Das Aufstellen einer Korrelationsmatrix mit allen Ergebnisgrößen der Druck- und Kombisondierungen erleichtert den Überblick und stellt eine effektive Möglichkeit dar, vor Beginn der Berechnungen Aufschluss über den Grad des Zusammenhanges zwischen den Eingangs- und Zielgrößen zu erhalten. In Tabelle 5.1 ist eine Korrelationsmatrix für die im Rahmen eines Feldversuches auf dem Koschendam durchgeführten Kombinationsdrucksondierungen, die gleichzeitig die Datenbasis für die Korrelationsbestimmung waren, dargestellt. Die Korrelationskoeffizienten zwischen den Eingangs- und Zielgrößen sind rot unterlegt. Der Vergleich der Werte zeigt, dass mit dem Einführen des Parameters  $\Pi_1$  gegenüber dem Parameter  $q_c$  ein deutlich besserer Zusammenhang zu den Zielgrößen gefunden wurde. Weiterhin wird ersichtlich, dass eine bessere Korrelation der Zielgrößen zum Parameter  $\Pi_2$ , dem Reibungsverhältnis, als zum Parameter  $\Pi_1$  besteht. Das heißt, dass die Zielgrößen in diesem Objekt stärker von der Materialzusammensetzung als vom Lagerungszustand abhängen.

	$q_c$	$q_s$	$\Pi_2 = R_f$	$\rho$	$\rho/\rho_s$	FKA	$S_r$	w	n	$\Pi_1$
$q_c$	x	0,417	-0,470	0,329	0,277	-0,363	-0,126	-0,318	-0,333	0,870
$q_s$	0,417	x	0,509	-0,336	-0,287	0,205	0,165	0,344	0,344	0,159
$\Pi_2 = R_f$	-0,470	0,509	x	-0,671	-0,556	0,616	0,274	0,677	0,682	-0,620
$\rho$	0,329	-0,336	-0,671	x	0,985	-0,440	-0,223	-0,958	-0,989	0,549
$\rho/\rho_s$	0,277	-0,287	-0,556	0,985	x	-0,361	-0,194	-0,935	-0,970	0,495
FKA	-0,363	0,205	0,616	-0,440	-0,361	x	0,261	0,489	0,463	-0,380
$S_r$	-0,126	0,165	0,274	-0,223	-0,194	0,261	x	0,471	0,362	-0,209
w	-0,318	0,344	0,677	-0,958	-0,935	0,489	0,471	x	0,987	-0,528
n	-0,333	0,344	0,682	-0,989	-0,970	0,463	0,362	0,987	x	-0,556
$\Pi_1 = q_c/\sigma_{v,0}$	0,870	0,159	-0,620	0,549	0,495	-0,380	-0,209	-0,528	-0,556	x

Tabelle 5.1: Korrelationsmatrix (Beispiel Versuchsfeld Koschendam)

In einigen Fällen kann die Berechnung bestimmter Kennwerte über direkte Korrelation zueinander erfolgen, wodurch der Rechenaufwand reduzierbar ist. Das verdeutlichen die gelb unterlegten Felder. Sie zeigen einen fast eindeutigen Zusammenhang zwischen der Dichte und den Größen Porenanteil und Wassergehalt. Die Ursache dafür ist einerseits der klare physikalische Zusammenhang zwischen diesen Größen sowie andererseits das Bestimmen dieser Parameter über Kalibrierbeziehungen beim Auswerten der Messergebnisse der Kombinationsdruckson-

dierung. Das bedeutet, dass beim Bestimmen einer dieser drei Größen mit hoher Genauigkeit die anderen beiden mit annähernd der gleichen Qualität über diese linearen Zusammenhänge ermittelt werden können.

Die Bestimmung der Korrelationsbeziehungen für die Zielgrößen Feinkornanteil FKA, natürliche Dichte  $\rho$  und Porenanteil  $n$  erfolgt durch Anpassen einer Regressionsfunktion zwischen den Zielgrößen und den in Kapitel 5.3 abgeleiteten dimensionslosen  $\Pi$ -Größen

$$\Pi_1 = \frac{q_c}{\sigma'_{v,0}} \quad \text{und} \quad \Pi_2 = R_f$$

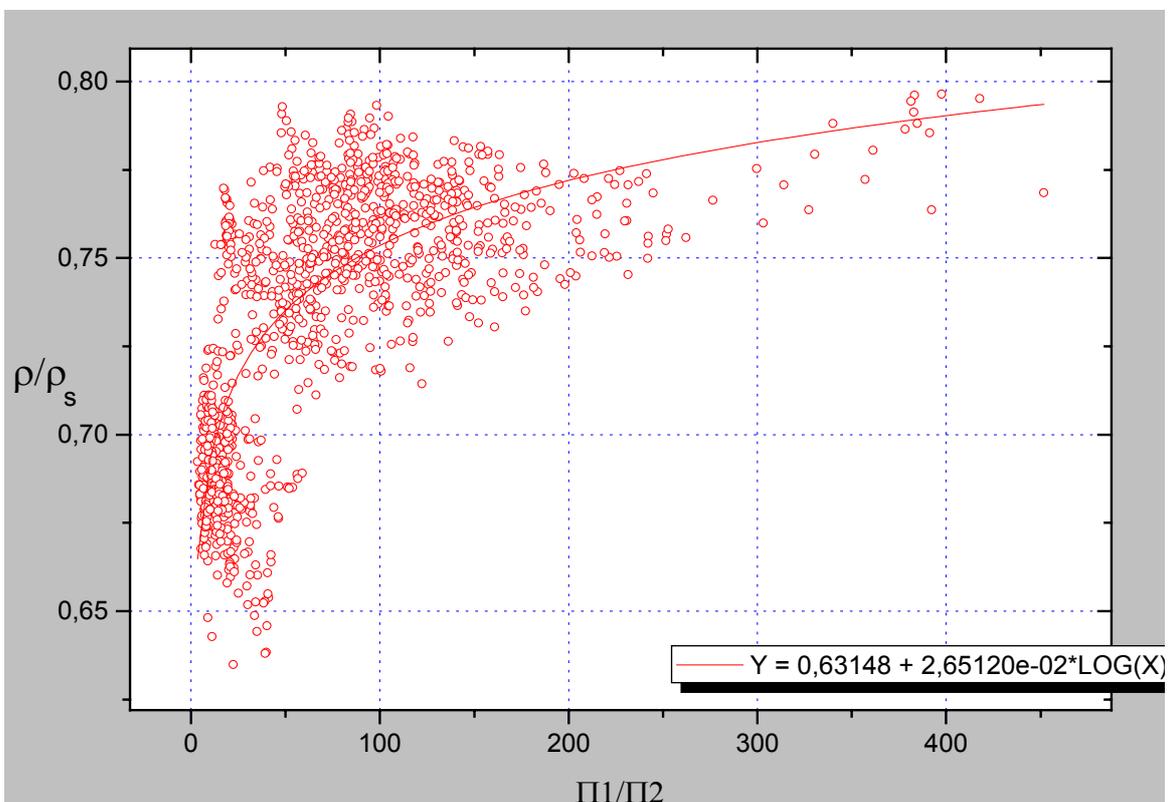


Abb. 5.8: Zusammenhang zwischen  $\Pi$ -Größen und bezogener Dichte

Abbildung 5.8 zeigt an einem Beispiel einen möglichen prinzipiellen Zusammenhang zwischen der auf die Korndichte bezogenen natürlichen Dichte  $\rho$  und den  $\Pi$ -Größen. Die objektspezifischen Parameter der Regressionsfunktion analog Tabelle 5.1 werden durch iterative Berechnungsverfahren, z. B. nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate, ermittelt.

Aufgrund der komplexen Abhängigkeiten der Vielzahl an Einflussfaktoren (siehe Gleichungen 5-1 und 5-2), von denen nur einige in die Korrelationsbeziehungen

einfließen, ist es praktisch unmöglich, allgemeingültige Korrelationen aufzustellen. Art und Größe des Einflusses der nicht berücksichtigten Einflussparameter sind objektabhängig zu unterschiedlich. Außerdem wird in den verschiedenen Objekten von den untersuchten Parametern ein sehr unterschiedlicher Wertebereich abgedeckt. Das erschwert die Schaffung allgemeingültiger Beziehungen zusätzlich. Die Beziehungen müssen hingegen objektspezifisch berechnet werden, wobei die vorhandenen geologischen und bodenmechanischen Grundgesamtheiten zu beachten sind. Existieren mehreren Schichten mit sehr unterschiedlichen Materialeigenschaften, die durch die genannten  $\Pi$ -Größen nicht in ausreichender Güte gemeinsam beschrieben werden können, müssen die Daten schichtweise angepasst werden. Die Güte der Korrelationen wird abhängig vom anstehenden Material und dem zur Verfügung stehenden Datenmaterial sehr verschieden sein. Es hat sich gezeigt, dass ein Glätten der Messreihen der Drucksondiererergebnisse bzw. der daraus abgeleiteten  $\Pi$ -Größen mit der „Moving-Average-Methode“ bei unbefriedigenden Ergebnissen eine geringfügige Verbesserung der Funktionsanpassung ergeben kann.

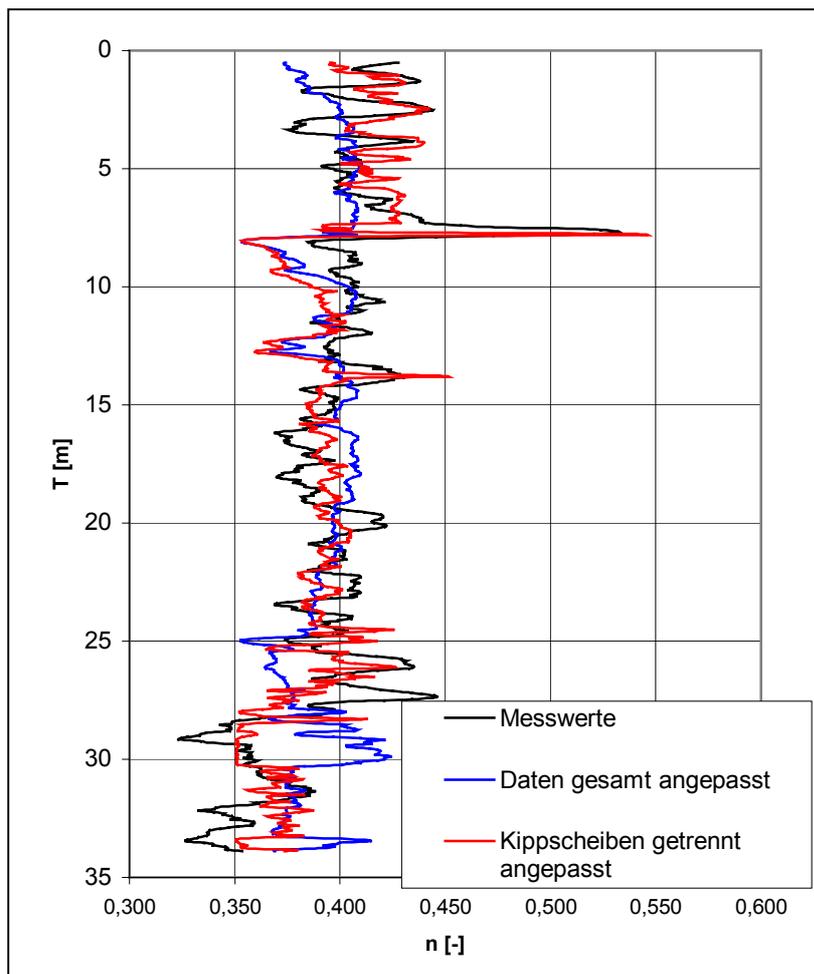


Abb. 5.9: Vergleich verschiedener Anpassungen

Ein Beispiel dafür, dass ein getrenntes Anpassen der Funktionen für mehrere Schichten u. U. bessere Ergebnisse liefert, ist in Abbildung 5.9 zu sehen. Das Diagramm zeigt eine gemessene sowie zwei berechnete Porenanteilkurven in einer Tagebaukippe mit zwei übereinanderliegenden Kippscheiben mit unterschiedlichen Materialien. Die rote Kurve für die getrennte Anpassung folgt der Kurve der Messwerte wesentlich besser als die blaue Kurve, die zur Berechnung die Daten aller Kippscheiben gemeinsam benutzt.

Allgemeingültige Korrelationsbeziehungen lassen sich demnach aufgrund der Vielzahl material- und objektspezifischer Einflussfaktoren nicht aufstellen. In der folgenden Tabelle 5.2 sind als Beispiel für objektbezogene Korrelationsbeziehungen Gleichungen für typische Lausitzer Kippenmaterialien aufgeführt (Gleichungen 5-13 bis 5-15). Diese sind auf der Grundlage mehrerer Messungen / Untersuchungen an verschiedenen Sanierungsobjekten aufgestellt worden und haben sich in verschiedenen Fällen als passend erwiesen. Die Gleichungskoeffizienten müssen anhand der Ergebnisse von Kombinationsdrucksondierungen des jeweiligen Objektes berechnet werden. In einigen Fällen können Gleichungen dieser Form jedoch auch unpassend sein. Dann muss nach geeigneteren Regressionsfunktionen gesucht werden. In Ausnahmefällen ist es denkbar, von der dimensionsfreien Form der Korrelationen abzuweichen, wenn dimensionsbehaftete empirische Beziehungen bessere Korrelationen ergeben.

	<b>Empfohlene Gleichung</b>	<b>Startwerte</b>
<b>Feinkornanteil</b> Gl. 5-13	$FKA = a \cdot \ln \left( \frac{R_f^b}{\left( \frac{q_c}{\sigma'_{v,0}} \right)^c} \right) + d$	a ≈ 2,2 b ≈ 1,9 c ≈ 0,3 d ≈ 15
<b>Natürliche Dichte</b> Gl. 5-14	$\rho = \left( a \cdot \ln \left( \frac{q_c / \sigma'_{v0}}{R_f} \right) + b \right) \cdot \rho_s$	a ≈ 0,026 b ≈ 0,6
<b>Porenanteil</b> Gl. 5-15	$n = a \cdot \left( \frac{\left( \frac{q_c}{\sigma'_{v0}} \right)^b}{R_f^c} \right)^d$	a ≈ 0,5 b ≈ 0,3 c ≈ 0,2 d ≈ -0,1

Tabelle 5.2: Empfohlene Regressionsfunktionen

Abbildung 5.10 zeigt die ermittelte Abhängigkeit  $n = f(q_c/\sigma', R_f)$  anhand eines Beispiels von der Innenkippe des Tagebaurestsees Koschen für verschiedene Materialien, die durch den Parameter  $R_f$  charakterisiert sind. Zu beachten ist, dass die zur Berechnung der Korrelation genutzten Daten nur aus dem markierten Bereich stammen. Die Kurven sind für den Bereich  $q_c > 12 \text{ MN/m}^2$  extrapoliert worden.

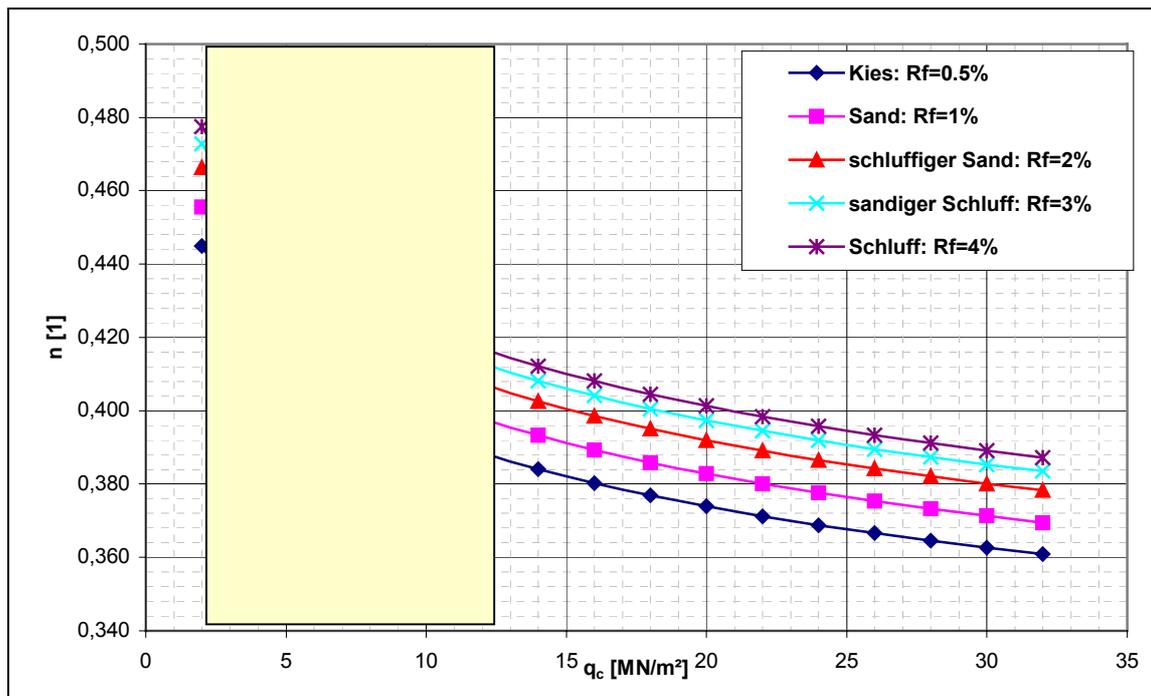


Abb. 5.10: Abhängigkeit des Porenanteiles  $n$  von  $q_c$  und  $R_f$  (Innenkippe Koschen)

Die Datenbasis für das Berechnen der Korrelationsbeziehungen sollte auf Ergebnissen von mindestens 3 - 5 Kombinationsdrucksondierungen fußen, die hinsichtlich Materialverteilung, Sondiertiefe und -ansatzpunkte das zu untersuchende Objekt repräsentieren. Die Sondierungen sollten möglichst gleichmäßig über den zu betrachtenden Kippenabschnitt verteilt sein. Werden weniger als 3 Sondierungen verwendet, besteht die Gefahr, dass die ermittelten Korrelationsbeziehungen für das zu untersuchende Objekt nicht repräsentativ sind. Prinzipiell gilt, je größer die Zahl der verwendeten Sondierungen, desto repräsentativer sind die Korrelationsbeziehungen.

Zur Berechnung der dimensionslosen Zielgröße  $\rho/\rho_s$  ist es erforderlich, die Korndichte möglichst genau zu bestimmen. Wenn keine Informationen zur Korndichte vorliegen, kann diese aus der Auswertung von Linerproben, die neben einem Sondieransatzpunkt gewonnen wurden, ermittelt werden. Dazu stellt man Beziehungen zwischen dem Reibungsverhältnis  $R_f$  und der Korndichte  $\rho_s$  auf. Sind keine Linerproben untersucht worden, können bei der Anwendung des Verfahrens in Lausitzer Kippen die in Abbildung 5.11 dargestellte Beziehung bzw. die zu den

$R_f$ -Klassen gehörenden Werte, die an typischen Lausitzer Material (Koschen) bestimmt wurden, als Näherungswerte verwendet werden. Zum Reduzieren der Fehlereinflüsse wird jedoch empfohlen, diesen Zusammenhang für jedes Objekt gesondert zu ermitteln.

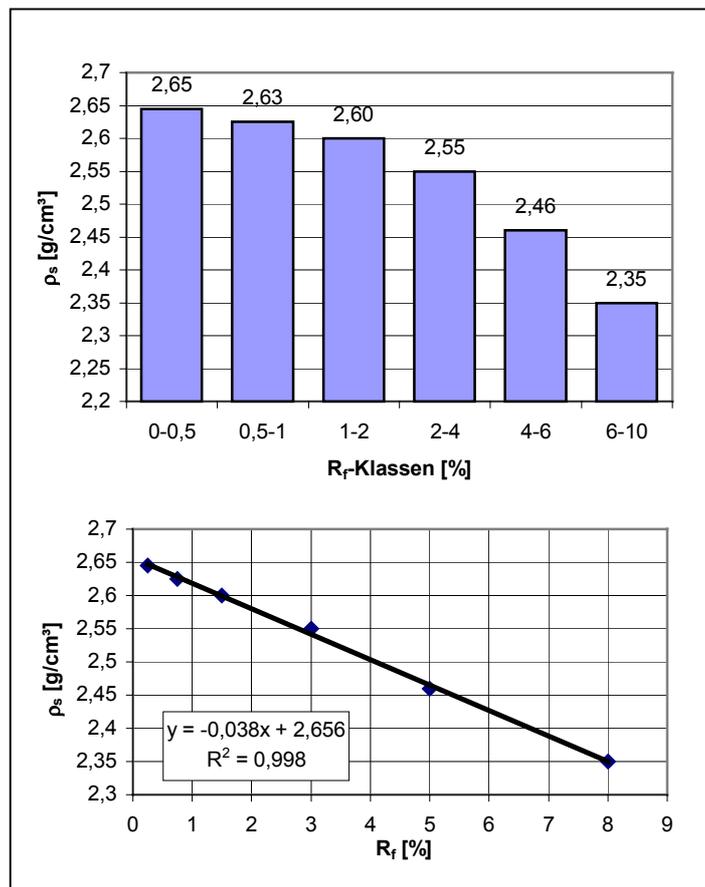


Abb. 5.11: Korndichte in Abhängigkeit vom Reibungsverhältnis

## 5.6 Qualitätskontrolle

### 5.6.1 Statistische Kontrolle

Die Güte der Korrelationen wird durch verschiedene Faktoren sehr beeinflusst. So kann z. B. für den Feinkornanteil durch einen hohen kohligen Anteil im Kippenmaterial (erkennbar durch hohen Glühverlust) die Anpassung z. T. erheblich verschlechtert werden. Kohlige Bestandteile verfälschen insbesondere die Dichte- und Feinkornmessung bei der KDS und erschweren bereits die Wahl der Kalibrierbeziehung bei der Auswertung der Impulsraten. Das wirkt sich entsprechend negativ auf die Korrelationsbeziehungen aus.

Die in diesem Abschnitt diskutierten statistischen Methoden, um die Korrelationsgüte zu überprüfen, werden am Beispiel des gemessenen und aus Korrelationen zu Drucksondierergebnissen berechneten Porenanteils einer KDS vom Restloch Koschen beschrieben. Die Anlagen 5.1 bis 5.3 zeigen die Messdiagramme der Parameter Porenanteil, Spitzenwiderstand und Reibungsverhältnis, die Tabelle in Anlage 5.4 die entsprechenden Messwerte der Beispielsondierung.

#### 5.6.1.1 Statistische Kennzahlen zur Bewertung der Korrelationsgüte

Eine erste qualitative und anschauliche Möglichkeit der Bewertung der Korrelationsgüte besteht, wie in Abb. 5.12 dargestellt, im Auftragen gemessener und berechneter Werte für einzelne Sondierungen bei gleichzeitigem Auftragen der Fehlergrenzen der KDS (für Porenanteil  $\Delta n = \pm 0,025$  bei weniger als 15 % Feinkornanteil). Der Bearbeiter erhält dadurch eine erste Information über die Güte der gefundenen Korrelationen. Liegen die berechneten Werte größtenteils innerhalb der Fehlergrenzen, wird der Kennwert für das Objekt offensichtlich gut durch die Korrelationsbeziehung beschrieben. Der Fehler ist dann nicht wesentlich größer als der für die radiometrischen Messungen angegebene.

Die qualitative Einschätzung der Korrelationsgüte ersetzt jedoch nicht das Bestimmen der Stärke des gefundenen Zusammenhanges mittels statistischer Kennzahlen.

Die prinzipielle Frage nach einem Zusammenhang zwischen zwei Merkmalen X und Y und, wenn vorhanden, nach dem Grad des Zusammenhanges kann eine Korrelationsanalyse beantworten [Wernecke 1995]. Die Stärke des stochastischen Zusammenhanges - in Bezug auf die vorliegende Thematik z. B. zwischen gemessenen und berechneten bodenphysikalischen Kennwerten oder zwischen benachbarten Drucksondierungen - wird dabei durch eine repräsentative Maßzahl, den Korrelationskoeffizienten, ausgedrückt.

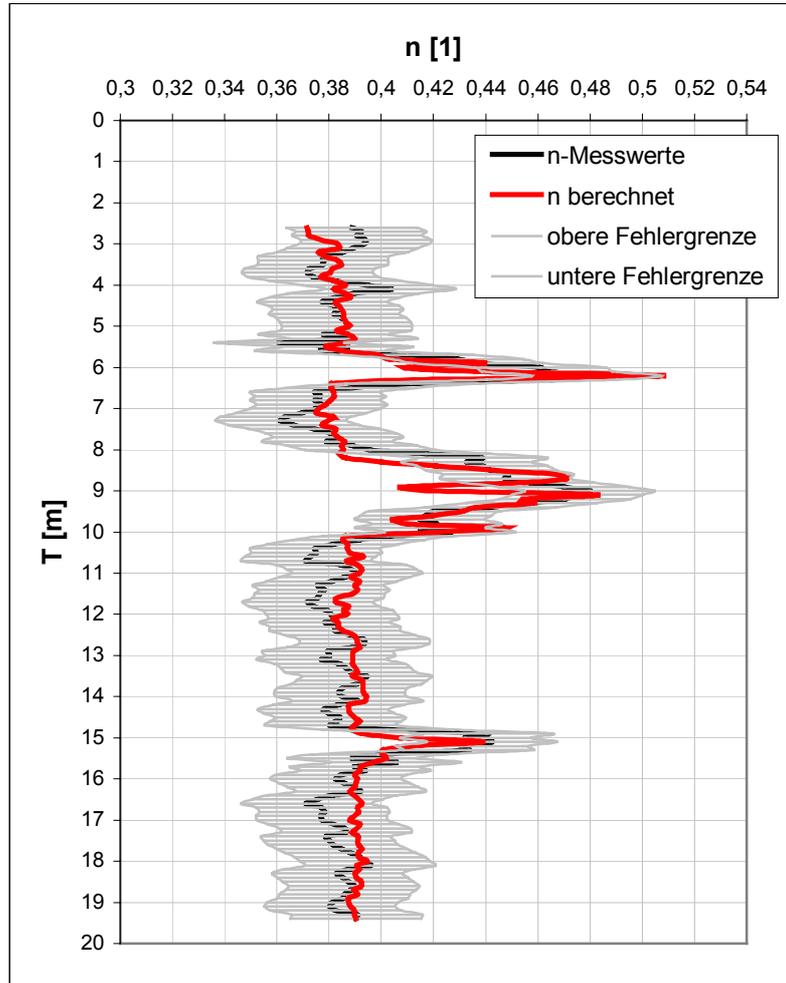


Abb. 5.12: Vergleich Mess- und Rechenergebnisse

Für annähernd normalverteilte Merkmale kann der *Pearson'sche* oder *Bravais'sche Korrelationskoeffizient*  $r$  verwendet werden:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{(n-1) \cdot s_x \cdot s_y} \quad (\text{Gl. 5-16})$$

mit  $\bar{x}, \bar{y}, s_x, s_y$  als arithmetische Mittelwerte bzw. Standardabweichungen der Stichproben.

Für nicht normalverteilte Merkmale oder nichtlineare Zusammenhänge empfiehlt sich auch die Verwendung des *Spearman'schen Korrelationskoeffizienten* (*Rangkorrelationskoeffizient*):

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n D(r_i)^2}{n^3 - n} \quad (\text{Gl. 5-17})$$

mit der Differenz der Ränge  $D(r_i) = R(x_i) - R(y_i)$  (Gl. 5-18)

Beide Korrelationskoeffizienten bewegen sich in den Grenzen [-1, 1]. Aus  $r = 0$  folgt stochastische Unabhängigkeit,  $|r| = 1$  bedeutet einen funktionalen Zusammenhang. Ein formal festgestellter Zusammenhang mit  $r \neq 0$  sagt jedoch noch nichts über einen möglichen kausalen Zusammenhang, der nur sachlogisch erbracht werden kann [Sachs 1988]. Die Existenz eines sachlichen Zusammenhangs zwischen den Kennwerten Porenanteil, Dichte und Feinkornanteil einerseits sowie Spitzenwiderstand, Reibungsverhältnis und Spannung wurde bereits in Kapitel 4 ausführlich diskutiert und kann als gesichert betrachtet werden.

Der Pearson'sche Korrelationskoeffizient zwischen den gemessenen und berechneten Porenanteilen der Beispielsondierung beträgt  $r = 0,833$ .

Im gleichen Maß, wie der Korrelationskoeffizient als lineares Abhängigkeitsmaß gilt, stellt er ebenso ein Vorhersagemaß dar. Das heißt, man kann aus ihm ableiten, mit welcher Genauigkeit eine Variable (im beschriebenen Beispiel der gemessene Porenanteil) aus einer anderen Variable (berechneter Porenanteil) vorhergesagt werden kann.

Die formale Gültigkeit der Korrelationen ist durch einen Vergleich mit Tafelwerten für die Zufallshöchstwerte des Korrelationskoeffizienten in Abhängigkeit von Freiheitsgrad und vorgegebener Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  (z. B.  $\alpha = 5\%$ ) zu überprüfen. Die entsprechenden Tafeln sind in allen statistischen Standardwerken zu finden [Wernecke 1995], [Göhler 1985], [Sachs 1988].

Die Korrelation zwischen den berechneten und gemessenen Porenanteilen des Beispiels ist gültig, da mit  $r = 0,833 > 0,15 = r_{0,05}$  bei  $n = 169$  Datensätzen der ermittelte Korrelationskoeffizient größer ist als der Zufallshöchstwert.

### 5.6.1.2 Fehlerverteilungen

Eine weitere Möglichkeit der Fehlereinschätzung ist, die Verteilung der Differenzen zwischen Messwerten und aus Korrelationen gewonnen Kennwerten zu berechnen. Durch Vergleich mit der theoretischen Fehlerverteilung der radiometrischen Messung und Bestimmen der Parameter der Verteilung (Erwartungswert  $\mu$ , Standardabweichung  $\sigma$ ) ist eine quantitative Bewertung des Fehlers der Berechnungen möglich. Wenn eine geeignete Regressionsfunktion zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen den Kennwerten gefunden wurde, muss der Erwartungswert des Fehlers ungefähr null sein (im Beispiel  $\mu_{\Delta n} \approx 0$ ). Die Standardabweichung der Fehlerverteilung der berechneten Kennwerte wird auch bei einer geeigneten Regressionsfunktion geringfügig größer als die Standardabweichung der KDS-Messfehler sein. Abbildung 5.13 zeigt ein Beispiel für einen solchen Vergleich der Fehlerverteilungen. Die Standardabweichung der Verteilung, also die Abweichung der berechneten Werte von den Messwerten beträgt hier  $\Delta n \approx 0,014$ . Der Erwartungswert der Fehlerverteilung der berechneten Porenanteile liegt mit

$\Delta n \approx 2,43 \cdot 10^{-4}$  nahe dem Wert null. Aus der Abbildung kann geschlussfolgert werden, dass die berechneten Kennwerte für diese Sondierung überwiegend (87 %) innerhalb der für diese KDS relevanten Fehlergrenzen für FKA < 15 % liegen. Der Verlauf der Kurven lässt weiterhin den Schluss zu, dass die Genauigkeit der radiometrischen Messungen in diesem Fall deutlich höher ist als durch die blaue Kurve dargestellt. Mit der ermittelten Regressionsgleichung ist die Berechnung des Porenanteils aus den Parametern Spitzenwiderstand, Reibungsverhältnis und wirksamer Vertikalspannung mit hoher Genauigkeit möglich.

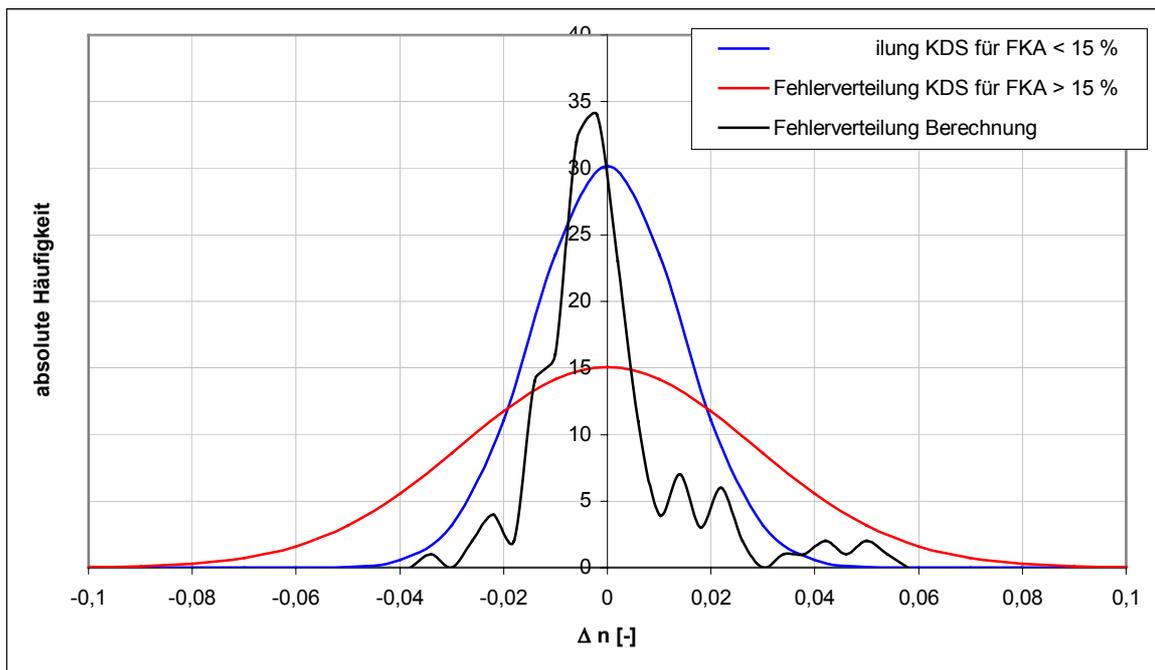


Abb. 5.13: Fehlerverteilung Rechnung-Messung

### 5.6.1.3 Residuenanalyse

Die Residuenanalyse hat sich zu einem unentbehrlichen Bestandteil der Regressionsanalyse entwickelt und kann somit auch im vorliegenden Problem zum Überprüfen des zu Grunde gelegten Modells dienen. Wenn das Modell geeignet ist, sollten Modellabweichungen (Residuen) weitgehend zufällig verteilt sein. Haben die Residuen eine Struktur, ist das Modell ungeeignet [Sachs 1988].

Rechnerisch erfolgt die Residuenanalyse durch die Berechnung der Abweichungen der Stichprobenwerte  $y_i$  (KDS-Messwerte) von den Schätzwerten  $\hat{y}_i$  des Modells (aus Korrelationsbeziehungen berechnete Kennwerte)

$$\hat{y}_i - y_i = v_i \quad (\text{Gl. 5-19}).$$

Die Quadratsumme der Abweichungen vom Modell muss für die günstigste Regressionsfunktion zum Minimum werden

$$\sum_i (\hat{y}_i - y_i)^2 = \sum v_i^2 = \text{Min} \quad (\text{Gl.5-20}).$$

Eine anschaulichere Form der Residuenanalyse sind Residuenplots. Damit ist zum einen die Beurteilung der Verteilung der Residuen (zum Beispiel unter Benutzung von Q-Q-Plots, auf die später noch eingegangen wird) möglich. Andererseits kann man mit Residuenplots sehr gut die Adäquatheit des Modells oder systematische Änderungen der Variabilität von  $y$  prüfen. Das heißt, man kann erkennen, ob die Abweichungen vom Modell eine Struktur aufweisen, ob sie z. B. in einem bestimmten Datenbereich größer sind als in den anderen Bereichen. Zu den Voraussetzungen eines Modells gehört es, dass die Schwankungsbreite (Varianz) der Zufallsfehler nicht davon abhängen darf, an welcher Stelle man  $\hat{y}_i$  berechnet. Abbildung 5.14 zeigt an einem Beispiel aus [Wernecke 1995] einen Residuenplot  $r_i = y_i - \hat{y}_i$  mit einem unpassenden linearen Modell.

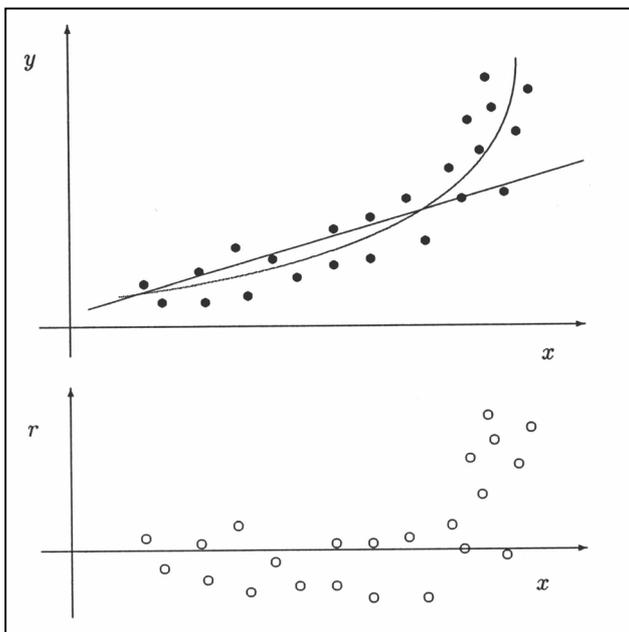


Abb. 5.14: Residuenplot  $r_i = y_i - \hat{y}_i$   
[Wernecke 1995]

Es ist zu erkennen, dass für große  $x$ -Werte die gewählte Regression nicht mehr passt. In diesem Fall muss versucht werden, durch Modellmodifikationen (nichtlineare oder multiple Modelle) die Anpassung Schritt für Schritt zu verbessern.

Die Residuenanalyse soll nun auf das zuvor verwendete Beispiel der Berechnung des Porenanteils aus Drucksondierergebnissen anhand einer KDS vom Tagebaurestloch Koschen angewandt werden. Es können die gemessenen gegen die berechneten Porenanteile aufgetragen werden. Bei einer passenden Regressionsfunktion müssten

die Wertepaare annähernd auf der Gerade  $y = x$  liegen. Darüber hinaus können die Residuen  $r_i$  (Abweichungen der berechneten Porenanteile von den KDS-Messwerten) gegen die Messwerte aufgetragen werden.

Die Abbildungen 5.15 und 5.16 zeigen beide Plots für das genannte Beispiel. In beiden Abbildungen sind zusätzlich die Fehlergrenzen der KDS-Messung, in Abb. 5.15 außerdem die Gerade  $y = x$  eingezeichnet. Es ist zu erkennen, dass die meisten Datenpunkte innerhalb der Fehlergrenzen liegen. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass die gewählte Regressionsfunktion ausreichend genau ist, obwohl, wie in Abb. 5.16 zu sehen, die berechneten Werte bei großen Porenanteilen tendenziell höhere Fehler aufweisen. Dies ist in erster Linie dadurch bedingt, dass im Bereich kleinerer Porenanteile deutlich mehr Daten vorhanden sind, wodurch die Regression nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate eine Funkti-

on liefert, die vorrangig in diesem Bereich optimal passt. Da der Anteil der berechneten Porenanteile außerhalb der Fehlergrenzen jedoch sehr gering ist, kann die gewählte Regressionsfunktion beibehalten werden.

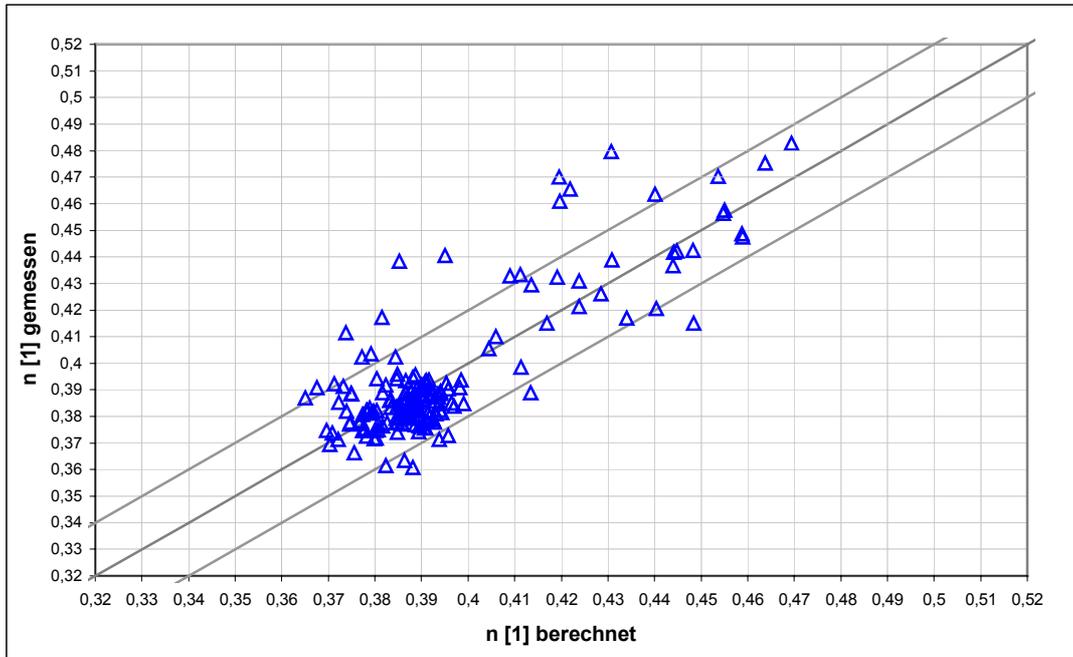


Abb. 5.15: Residuenplot  $y_i - \hat{y}_i$

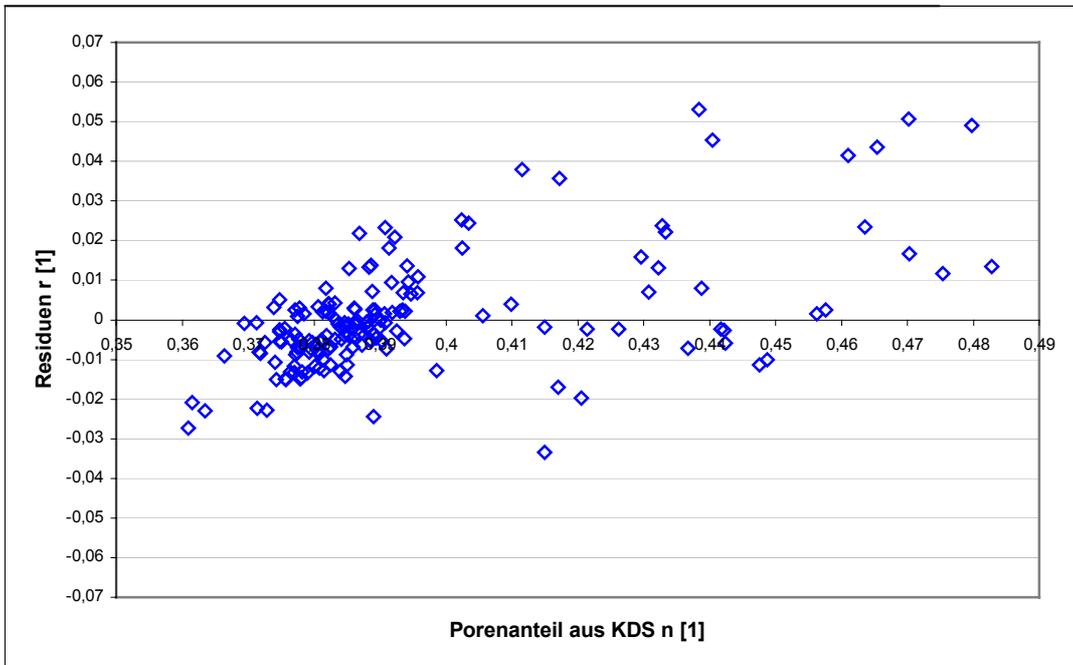


Abb. 5.16: Residuenplot  $r_i - y_i$

### 5.6.2 Untersuchungen zur Fehlerfortpflanzung

Eine Einschätzung des Fehlers bei der Bestimmung von bodenphysikalischen Kennwerten aus den Messwerten der Drucksondierung ist theoretisch auch durch Anwendung der Fehlerfortpflanzungsgesetze denkbar. Mit Hilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes kann der Fehler eines aus fehlerbehafteten Messgrößen errechneten Funktionswertes bestimmt werden. Die allgemeine Gleichung für den mittleren Fehler lautet:

$$\Delta\bar{F} = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \Delta\bar{x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \Delta\bar{y}\right)^2 + \dots} \quad (\text{Gl. 5-21})$$

mit  $\Delta\bar{F}$  mittlerer Fehler des Funktionswertes

$\Delta\bar{x}, \Delta\bar{y}$  Vertrauensbereich des Mittelwertes der einzelnen Messgrößen

$\frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y}$  partielle Ableitungen der Funktion  $F = F(x, y, \dots)$ .

Der maximale Fehler berechnet sich nach:

$$\Delta F = \pm \left( \left| \frac{\partial F}{\partial x} \Delta\bar{x} \right| + \left| \frac{\partial F}{\partial y} \Delta\bar{y} \right| + \dots \right) \quad (\text{Gl. 5-22})$$

Für bestimmte Funktionsarten lassen sich die Gleichungen 5-21 und 5-22 vereinfachen (siehe z. B. [Kuchling 1991] u. a.). Für algebraische Summen kann so recht einfach der mittlere und maximale Absolutfehler bzw. für Potenzprodukte der mittlere und maximale relative Fehler berechnet werden.

Aus verschiedenen nachfolgend erläuterten Gründen ist die Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes auf die Kennwertberechnung aus Drucksondierungsergebnissen nicht vorteilhaft bzw. unmöglich.

1. Die Regressionsfunktionen zur Berechnung der bodenphysikalischen Kennwerte aus Drucksondierungsergebnissen sind in der Regel keine einfachen Summen oder Potenzprodukte, so dass die Berechnung der partiellen Ableitungen dieser Funktionen sehr kompliziert und unpraktikabel wäre. Es müssten hierfür Ableitungen höherer Ordnung bestimmt werden.
2. Im vorliegenden Fall beruht die Bestimmung des gesuchten Funktionswertes ( $n$ ,  $\rho$ , FKA) nicht ausschließlich auf der Berechnung aus fehlerbehafteten Messgrößen. Vielmehr wird das Modell selbst unter Verwendung von bekannten Funktionswerten (aus KDS), die ebenfalls mit einem Fehler behaftet sind, erstellt. Dieser Fehler (z. B.  $\Delta n$  aus der KDS) würde bei der formalen Berechnung des Gesamtfehlers nach Gleichung 5-21 bzw. 5-22 unberücksichtigt blei-

ben, da  $n$  der Funktionswert ist und dessen Fehler  $\Delta n$  aus den Messfehlern der Größen  $q_c$ ,  $R_f$  und  $\sigma'_{v,0}$  berechnet werden soll.

3. Das gewählte Modell (Regressionsfunktion) ist eine empirische objektbezogene Funktion, welche sicher die wesentlichen, jedoch nicht alle, den Funktionswert tatsächlich beeinflussenden Größen, beinhaltet (vgl. Gl. 5-1 und 5-2). Demzufolge ist auch die Fehlerberechnung unvollständig.
4. Aufgrund der Tatsache, dass der gesuchte Funktionswert ( $n$ ,  $\rho$ , FKA) an den KDS-Ansatzpunkten exakt bekannt ist, ist ein Vergleich der mit dem Modell berechneten Funktionswerte mit dem exakten Funktionswert möglich. Eine statistische Auswertung der Residuen, wie in den vorangehenden Kapiteln beschrieben, liefert somit ebenfalls genaue Aussagen über den mittleren und maximalen zu erwartenden Fehler. Lassen sich die Funktionswerte mit dem Modell an den KDS-Messpunkten ausreichend genau vorhersagen, darf innerhalb einer Grundgesamtheit mit gleicher Materialzusammensetzung davon ausgegangen werden, dass auch an allen anderen Punkten (DS-Ansatzpunkten) der Grundgesamtheit das Modell zutreffende und ausreichend genaue Berechnungen des Funktionswertes ermöglicht.

## 5.7 Ableitung von Zielvorgaben

Nachdem nachgewiesen wurde, dass über objektbezogene Korrelationsbeziehungen die bodenphysikalischen Parameter Porenanteil, Dichte und Feinkornanteil aus Drucksondierergebnissen berechnet werden können, liegt es nahe, diese Beziehungen umgekehrt auch zur Berechnung von Vorgaben für den erforderlichen Spitzenwiderstand bei Drucksondierungen zu verwenden. Ein Vergleich des tatsächlich gemessenen Spitzenwiderstandes mit den Vorgabewerten ermöglicht im routinemäßigen Baustellenbetrieb (z. B. bei Verdichtungsarbeiten) das Lokalisieren von Schwachstellen sowie rasches Einleiten von Gegenmaßnahmen.

Grundlage solcher Vorgaben sind die aus Tragfähigkeits-, Festigkeits- oder Standsicherheitsproblemen abgeleiteten erforderlichen Dichten oder Porenanteile  $(\rho/\rho_s)_{\text{erf}}$  bzw.  $n_{\text{erf}}$ . Die allgemeinen Gleichungen 5-10 und 5-12 werden dazu wie folgt umgestellt:

$$\left( \frac{q_c}{\sigma'_{v,0}} \right)_{\text{erf}} = f \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)_{\text{erf}}, R_f \right] \quad (\text{Gl. 5-23})$$

$$\left( \frac{q_c}{\sigma'_{v,0}} \right)_{\text{erf}} = f [n_{\text{erf}}, R_f] \quad (\text{Gl. 5-24}).$$

An Stelle der gemessenen spannungsbezogenen Spitzenwiderstände bzw. zu berechnenden bodenphysikalischen Parameter werden die erforderlichen Werte eingesetzt. Da das Reibungsverhältnis  $R_f$  bei der Drucksondierung bestimmt wird, muss dessen Verteilung zur Ermittlung des erforderlichen Spitzenwiderstandes  $q_{c,\text{erf}}$  aus bereits erfolgten Sondierungen (z. B. Vorsondierungen) bekannt sein.

Da das Reibungsverhältnis die Messgröße aus der Drucksondierung darstellt, welche das in der jeweiligen Teufe anstehende Material charakterisiert, muss es in der Gleichung berücksichtigt werden. Gleichzeitig sind die zu erreichenden erforderlichen Bodenparameter Dichte oder Porenanteil  $(\rho/\rho_s)_{\text{erf}}$  oder  $n_{\text{erf}}$  keine Konstanten, sondern in starkem Maß vom anstehenden Material abhängig. Das bedeutet, dass aus verschiedenen  $R_f$ -Werten (verschiedenen Materialien entsprechend) unterschiedliche Vorgabewerte für die Bodenparameter und somit für den zu erreichenden Spitzenwiderstand abgeleitet werden müssen.

Ausschließlich dann, wenn im betreffenden Objekt mit nur einem anstehenden Material gerechnet werden kann, ist daher der Ansatz eines globalen Vorgabewertes für Dichte oder Porenanteil zulässig, aus welchem teufen- bzw. spannungsabhängig die Spitzenwiderstandsvorgaben berechnet werden können. Das Rei-

bungsverhältnis  $R_f$  geht in diesem Fall als Konstante in die Gleichungen 5-23 und 5-24 ein.

Ist dies nicht der Fall, müssen  $(\rho/\rho_s)_{\text{erf}}$  oder  $n_{\text{erf}}$  als Funktion des Materials, also in Abhängigkeit vom Reibungsverhältnis ermittelt und in entsprechender Form in die Gleichungen 5-23 und 5-24 eingefügt werden.

$$\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)_{\text{erf}}, n_{\text{erf}} = g(R_f) \quad (\text{Gl. 5-25})$$

Dabei muss gelten, dass der geforderte Wert  $(\rho/\rho_s)_{\text{erf}}$  oder  $n_{\text{erf}}$  kleiner (Dichte) bzw. größer (Porenanteil) als der materialabhängig maximal bzw. minimal mögliche sein muss.

$$\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)_{\text{erf}} \leq \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)_{\text{max}} = g(R_f) \quad (\text{Gl. 5-26})$$

bzw.

$$n_{\text{erf}} \geq n_{\text{min}} = g(R_f) \quad (\text{Gl. 5-27})$$

Ersetzt man  $(\rho/\rho_s)_{\text{erf}}$  oder  $n_{\text{erf}}$  in Gleichung 5-23 und 5-24 durch Gleichung 5-25, verbleibt als alleinige Variable das Reibungsverhältnis  $R_f$ , wobei allerdings der Term  $g(R_f)$  durch die Vorgabewerte  $(\rho/\rho_s)_{\text{erf}}$  oder  $n_{\text{erf}}$  bestimmt wird. Aus Gleichung 5-23 bzw. 5-24 und Gleichung 5-25 ergibt sich somit:

$$\left(\frac{q_c}{\sigma'_{v,0}}\right)_{\text{erf}} = f[g(R_f), R_f] = f(R_f) \quad (\text{Gl. 5-28}).$$

Zusammenfassung: Zur Bestimmung von Zielvorgaben für den von der zu realisierenden Aufgabe abhängigen erforderlichen Spitzenwiderstand sind folgende Schritte notwendig:

1. Das im Objekt anstehende Lockergestein ist in Materialklassen  $MK_i$  ( $i = 1 \dots k$ ) zu unterteilen. Diese verschiedenen Materialklassen sind – abhängig von der Aufgabenstellung – zu untersuchen (Festigkeitsverhalten, Proctordichte o. ä.) und in Verbindung mit erdstatischen Untersuchungen daraus die in situ erforderlichen Parameter Dichte bzw. Porenanteil  $(\rho/\rho_s)_{\text{erf},i}$  oder  $n_{\text{erf},i}$  abzuleiten.
2. Aus den Ergebnissen der Untersuchung der Materialklassen ist eine Funktion nach Gleichung 5-25 zu berechnen.
3. Die objektabhängig ermittelte Korrelation nach Gleichung 5-10 bzw. 5-12 sind nach dem Spitzenwiderstand  $q_c$  bzw. dem bezogenen Spitzenwiderstand  $q_c/\sigma'_{v,0}$  umzustellen. Die in Punkt 2 aufgestellte Gleichung 5-25 für die Abhän-

gigkeit von  $(\rho/\rho_s)_{\text{eff}}$  oder  $n_{\text{eff}}$  vom Reibungsverhältnis  $R_f$  wird für  $(\rho/\rho_s)$  oder  $n$  in Gleichung 5-10 bzw. 5-12 eingesetzt.

4. Der zu erreichende Spitzenwiderstand kann nun in Abhängigkeit des am Sondieransatzpunkt in der jeweiligen Teufe vorhandenen Reibungsverhältnisses berechnet und mit dem tatsächlich vorhandenen Spitzenwiderstand verglichen werden.

Die beschriebene Vorgehensweise soll im Folgenden am Beispiel einer als Vordondierung ausgeführten radiometrischen Kombinationsdrucksondierung KDSv1 gezeigt werden. Die Sondierung ist im Rahmen der Vorerkundung und Planung der Tiefenverdichtung setzungsfließgefährdeter Restlochböschungen mittels Sprengverdichtung oder Rütteldruckverdichtung auf dem Koschendam (Trenndamm zwischen den Tagebaurestseen Koschen und Skado) ausgeführt worden.

Zu 1.) Der für die Böschungsstandsicherheit ausschlaggebende zustandsbeschreibende Lockergesteinsparameter ist der Porenanteil, da dessen Größe entscheidenden Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften besitzt. Die für das anstehende Kippenmaterial zu erreichenden erforderlichen Werte des Porenanteiles  $n_{\text{eff}}$  resultieren aus systematischen Festigkeitsuntersuchungen der anstehenden Materialklassen. Da für das Beispielobjekt keine Ergebnisse von Festigkeitsuntersuchungen vorliegen und entsprechende Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich waren, sind die bei optimaler Verdichtung erreichbaren Porenanteile aus Erfahrungswerten abgeschätzt worden. Die anderen Materialparameter ergeben sich aus den Ergebnissen der radiometrischen Sondierung.

Das Lockergestein wird in 3 Materialklassen  $MK_1$  ...  $MK_3$  mit den in Tabelle 5.3 aufgeführten Parametern unterteilt.

	<b>MK<sub>1</sub></b>	<b>MK<sub>2</sub></b>	<b>MK<sub>3</sub></b>
Feinkornanteil FKA [%]	3 ... 8	15 ... 20	25 ... 30
Reibungsverhältnis $R_f$ [%]	0,15 ... 0,3	0,9 ... 1,3	2,3 ... 2,7
Erforderlicher Porenanteil (geschätzt) $n_{\text{eff}}$ [1]	0,37	0,43	0,46

*Tabelle 5.3: Materialparameter und Porenanteil*

Zu 2.) Aus den Werten in Tabelle 5.3 kann die Beziehung zwischen  $n_{\text{erf}}$  und  $R_f$  berechnet werden. Abbildung 5.17 zeigt die Abhängigkeit, die mit Gleichung 5-29 beschrieben werden kann:

$$n_{\text{erf}} = 0.037 \cdot \ln(R_f) + 0.4262 \quad (\text{Gl. 5-29})$$

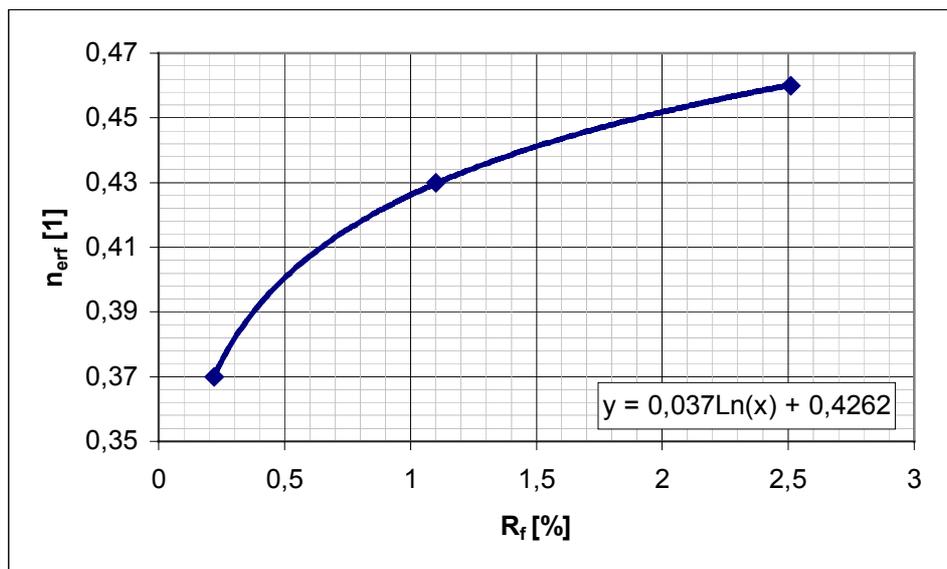


Abb. 5.17: Zusammenhang zwischen  $n_{\text{erf}}$  und  $R_f$  für Beispielsondierung

Zu 3.) Die Korrelationsbeziehung zur Berechnung des Porenanteiles aus Drucksondierergebnissen für das Objekt Koschendammlautet:

$$n = n_{\text{erf}} = 0,471 \cdot \left( \frac{\left( \frac{q_c}{\sigma'_{v0}} \right)^{0,3}}{R_f^{0,8}} \right)^{-0,0867} \quad (\text{Gl. 5-30})$$

Umgestellt nach dem bezogenen Spitzenwiderstand ergibt sich:

$$\left( \frac{q_c}{\sigma'_{v0}} \right) = \left( 1,684 \cdot 10^{-4} \cdot n_{\text{erf}}^{-11,53} \cdot R_f^{0,8} \right)^{3,33} \quad (\text{Gl. 5-31})$$

Durch Einsetzen von Gleichung 5-29 in Gleichung 5-30 erhält man schließlich:

$$\left( \frac{q_c}{\sigma'_{v,0}} \right) = \left( 1,684 \cdot 10^{-4} \cdot [0,4262 + 0,037 \cdot \ln(R_f)]^{-11,53} \cdot R_f^{0,8} \right)^{3,33}$$

(Gl. 5-32).

Zu 4.) Mit Gleichung 5-32 kann nun die Zielvorgabe für den spannungsbezogenen Spitzenwiderstand bzw. nach Multiplikation beider Seiten der Gleichung mit  $\sigma'_{v,0}$  der absolute Spitzenwiderstand in der jeweiligen Teufe berechnet werden. Abbildung 5.18 zeigt im linken Diagramm den bei der Vorsondierung KDSv1 gemessenen Spitzenwiderstand (rote Kurve) sowie die mit Hilfe der Gleichung 5-32 berechnete Zielvorgabe für den zu erreichenden Spitzenwiderstand (blaue Kurve) nach der durchzuführenden Verdichtung. Im rechten Diagramm ist der Verlauf des Reibungsverhältnisses dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass in den Teufen, in welchen, gekennzeichnet durch hohe Reibungsverhältnisse, Lockergesteine mit erhöhten bindigen Anteilen anstehen (z. B. bei  $T \approx 6$  m,  $T \approx 8 \dots 10$  m), auch ein entsprechend geringerer Wert für den vorzugebenden Spitzenwiderstand berechnet wird.

Im oberflächennahen Bereich bis zu einer Teufe von ca. 2 m sind die berechneten Werte aufgrund der geringen Vertikalspannung sehr niedrig. In diesem Bereich sind die berechneten Werte nicht als Zielvorgabe zu verwenden. Im dargestellten Beispiel ist außerdem eine verdichtete Oberflächenschicht mit hohem Spitzenwiderstand, vermutlich durch das Befahren mit schweren Fahrzeugen o. ä. erzeugt, zu erkennen. Daher ist auch unterhalb der zu verwerfenden Schicht von (0...2) m der bereits vor der Verdichtung vorhandene Spitzenwiderstand größer als die berechnete Zielvorgabe.

Unterhalb von  $T = 10$  m steht überwiegend rolliges Lockergestein an. In einigen Bereichen sind bereits vor der Verdichtung Spitzenwiderstandsmaxima zu erkennen, die im Bereich der Vorgabewerte liegen. In den übrigen Bereichen sollte gemäß der Zielvorgabe durch die geplante Verdichtung ein Spitzenwiderstandszuwachs von  $\Delta q_c \approx (3 \dots 6)$  MN/m<sup>2</sup> erreicht werden.

Es wird an dieser Stelle nochmals darauf verwiesen, dass die Berechnung von Spitzenwiderstandsvorgaben in der dargestellten Form nur näherungsweise Anhaltswerte erbringen kann. Die Verwendung des Reibungsverhältnisses als alleinigen Parameter zur Berechnung des zu erreichenden Verdichtungsgrades, charakterisiert durch Porenanteil oder Dichte, ermöglicht keine exakten Angaben, da der erreichbare Verdichtungsgrad von einer Vielzahl von materialspezifischen und technologischen Faktoren abhängt, welche in der Berechnung nicht berücksichtigt

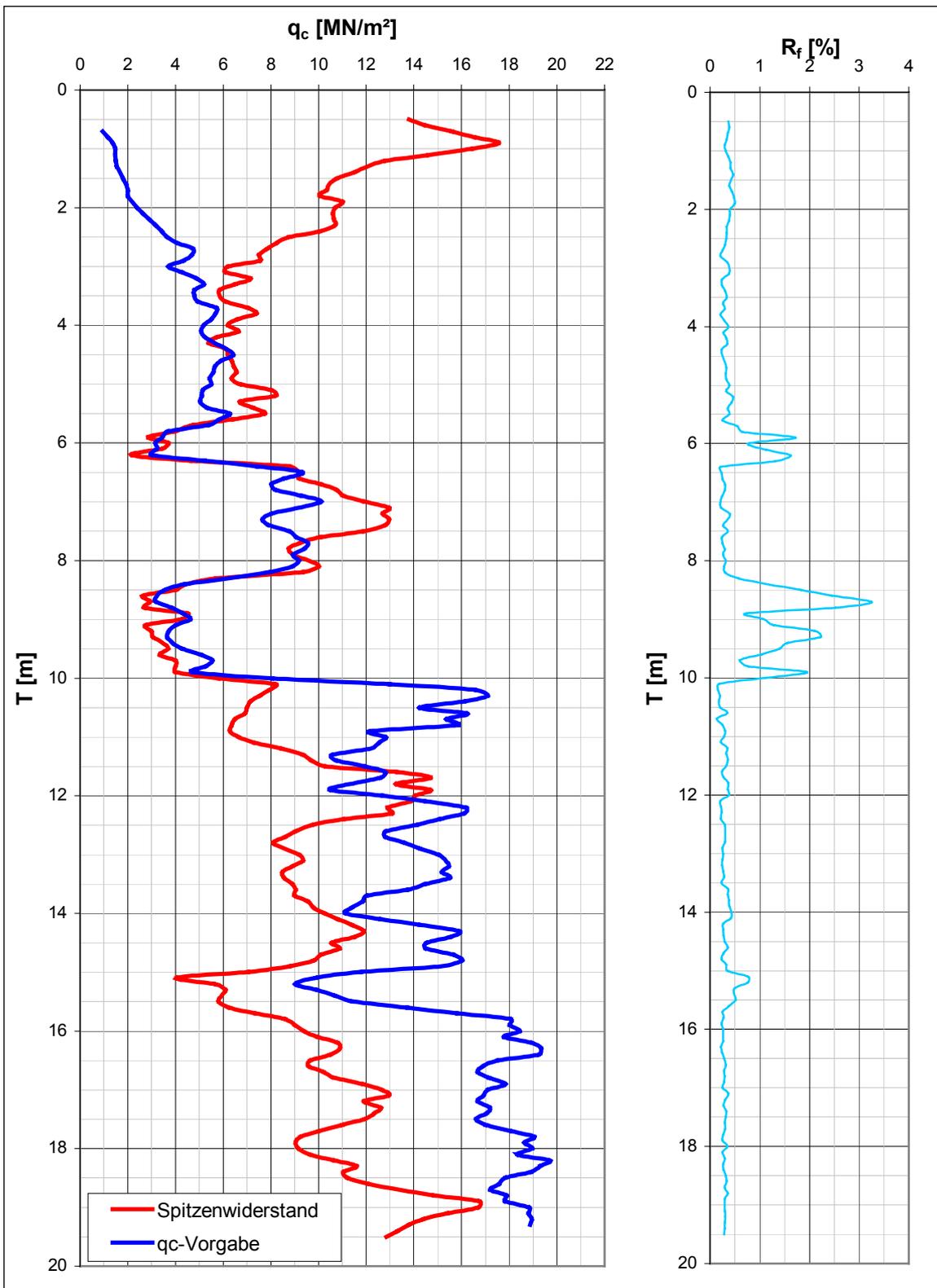


Abb. 5-18: Beispielsondierung KDSv1 -  $q_c$  vor der Verdichtung und  $q_c$ -Vorgabe (links) und  $R_f$ -Kurve (rechts)

werden. Da jedoch in den vorherigen Kapiteln nachgewiesen wurde, dass Dichte bzw. Porenanteil einerseits und Reibungsverhältnis sowie Spitzenwiderstand andererseits in einem engen Zusammenhang stehen, können die so berechneten Zielvorgaben zur routinemäßigen Überprüfung des erreichten Verdichtungsgrades im Baubetrieb genutzt werden. Sie ersetzen aber in keinem Fall eine nachträgliche genaue Untersuchung des Verdichtungsergebnisses anhand von Sondierungen, Bohrungen und der Untersuchung von gestörten und ungestörten Lockergesteinsproben.

## 6 Statistische Untersuchungen zum räumlichen Zusammenhang von Sondierungen

Die inhomogene Verteilung von Materialparametern im Untergrund stellt häufig ein Problem bei der flächendeckenden Bewertung der Eigenschaften des Untersuchungsobjektes dar. Dabei variieren bodenphysikalische Parameter, wie Feinkornanteil, Dichte, Korndichte, Porenanteil oder Wassergehalt sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung oft in sehr rascher Folge und innerhalb kleiner Abstände ( $\Delta x, \Delta y, \Delta z < 1\text{m}$ ). Sie sind somit in starkem Maß ortsabhängig. Das heißt, dass alle Erkundungsergebnisse lediglich als Stichproben (punkt- oder linienförmig) anzusehen sind, welche die realen Bodeneigenschaften nur am Ort der Prüfung beschreiben. Die Qualität und die Genauigkeit bzw. die Wahrscheinlichkeit des Zutreffens der Aussagen über die genannten Materialeigenschaften für einen darüber hinausgehenden Bereich, die aus den Erkundungsergebnissen abgeleitet werden, steigt mit dem Stichprobenumfang.

Daher bekommt die Frage nach dem Erkundungsabstand von Drucksondierungen (aber auch jeder anderen Erkundungsmaßnahme) eine zentrale Bedeutung. Im Interesse der Güte des Ergebnisses müsste der Abstand so klein wie möglich, also im Bereich weniger Meter liegen. Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist der Abstand möglichst groß zu wählen. Der optimale Sondierabstand muss eine ausreichend zuverlässige Aussage auch für den Bereich zwischen den Aufschlusspunkten bei möglichst vertretbaren Kosten gewährleisten. Das bedeutet, die durch die Erkundung ermittelten Eigenschaften müssen mit ausreichender statistischer Sicherheit auf diese Zwischenräume übertragbar sein.

Ein Verfahren der Geostatistik zur Bestimmung der Ortsabhängigkeit von Merkmalen ist das Variogramm.

Die relativ große Anzahl der zur Verfügung stehenden Drucksondierungsergebnisse auf einem mit Sprengverdichtung hergestellten Stützkörper auf der Innenkippe Koschen (Phase IV, Bauabschnitt 1 + 2) ermöglichte entsprechende geostatistische Untersuchungen, um Informationen zur Aussagereichweite von gemessenen Spitzenwiderstandswerten zu erhalten.

### 6.1 Theoretische Grundlagen des Variogramms

#### 6.1.1 Definition

Um punktförmig gemessene Daten räumlich zu interpolieren, muss eine Annahme über ihren räumlichen Zusammenhang getroffen werden. Das Variogramm ist ein Verfahren, mit dessen Hilfe Annahmen über den räumlichen Zusammenhang aus den vorliegenden Daten getroffen werden können. In der Geostatistik werden

raumbezogene Daten als Realisationen von Zufallsvariablen modelliert. Dazu wird folgendes statistische Modell gewählt:

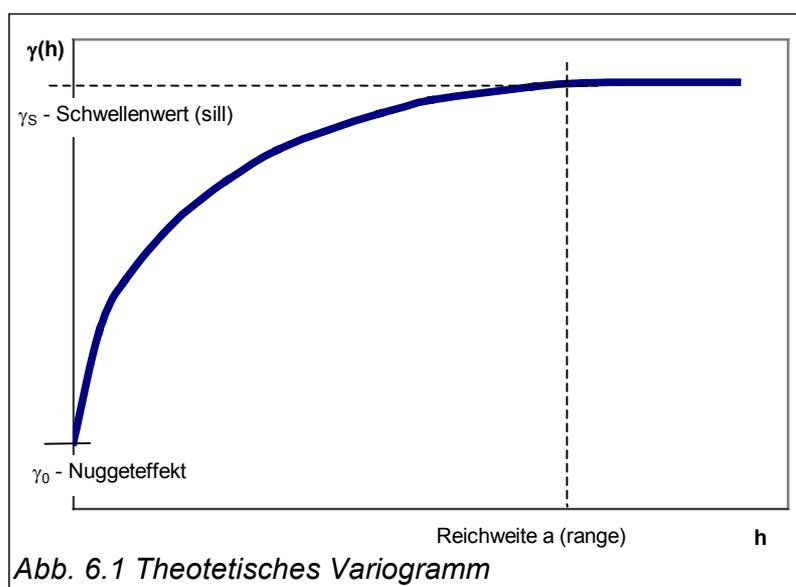
Es seien  $z(u_1), \dots, z(u_n)$  Werte der Beobachtungsvariablen an den beprobten Orten  $u_1, \dots, u_n$ . Diese werden als Realisationen der Zufallsvariablen  $Z(u_1), \dots, Z(u_n)$  angesehen. Auch für die unbeprobten Orte werden Zufallsvariablen angenommen. In einer räumlichen Interpolation werden Realisationen dieser Zufallsvariablen aus den bekannten Realisationen geschätzt. Die Menge aller dieser Zufallsvariablen  $Z = \{Z(u), u \text{ in Untersuchungsgebiet}\}$  wird stochastischer Prozess oder Zufallsfunktion genannt.

Die Beschreibung räumlicher Zusammenhänge innerhalb eines geostatistischen Modells beruht auf der Annahme, dass der räumliche Zusammenhang der Daten nicht von der absoluten (geometrischen) Lage des Ortes abhängt, sondern nur von der relativen räumlichen Lage der betrachteten Orte zueinander (Distanz, Richtung). Diese Annahme wird als Eigenschaft des stochastischen Prozesses bezeichnet.

Das im Variogramm verwendete Maß für den räumlichen Zusammenhang zwischen ortsbezogenen Zufallsvariablen des stochastischen Prozesses ist die **Varianz der Differenz der beiden Zufallsvariablen**, die sich hinsichtlich ihrer räumlichen Lage um den Abstandsvektor  $h=u-v$  unterscheiden und daher unterschiedliche Werte annehmen können:

$$\gamma(h) = \text{Var}[Z(u) - Z(v)] = \text{Var}[Z(u) - Z(u+h)] \quad (\text{Gl. 6-1})$$

mit  $h$ : Abstandsvektor



Die Varianz ist das Maß für die mittlere Streuung der Werte einer Zufallsvariablen. Streuen die Werte der Differenz der beiden Zufallsvariablen  $Z(u)-Z(v)$  stark, ist also die Varianz groß, bedeutet das, dass die beiden Zufallsvariablen im Mittel sehr verschiedene Werte annehmen, ihr räumlicher Zusammenhang ist also klein. Umgekehrt bedeutet eine geringe Varianz einen großen räumlichen Zusammenhang. Das Variogramm  $\gamma(h)$  ist somit ein Kennwert des stochastischen Prozesses [Münster 2000]. Abbildung 6.1 zeigt ein theoretisches Variogramm.

Das Variogramm ist eine Funktion des Abstandsvektors  $h$  und in der Regel eine monoton wachsende Funktion. So, wie der Zusammenhang zwischen zwei Zufallsvariablen des stochastischen Prozesses mit ihrem Abstand abnimmt, nimmt ihre Varianz der Differenz (also der Variogrammwert) zu. Der Abstand, bei dem das Variogramm asymptotisch einen Schwellenwert  $\gamma_S$  (sill) erreicht, wird Reichweite (range) genannt. Dieser Wert ist üblicherweise als der Wert definiert, bei dem 95% des Schwellenwertes erreicht sind [Kreuter 1996]. Zufallsvariablen in größerem Abstand zueinander werden praktisch als unabhängig voneinander betrachtet. Verläuft das Variogramm nicht durch den Ursprung, so wird der Schnittpunkt mit der  $y$ -Achse  $\gamma_0$  als Nuggeteffekt bezeichnet. Ist das Variogramm unabhängig von der Richtung, d.h.  $\gamma(h) = \gamma(|h|)$ , so wird es isotrop genannt.

### 6.1.2 Empirisches Variogramm

Das Variogramm wird aus den vorhandenen, räumlich verteilten Daten geschätzt, indem man für jeden anhand der Lage der Aufschlusspunkte möglichen Abstand  $h$  einen Wert des Variogramms  $\gamma(h)$  bestimmt. Der klassische Variogrammschätzer ist definiert durch

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{|N(h)|} \sum_{N(h)} (z(u_i) - z(u_j))^2 \quad (\text{Gl. 6-2})$$

mit  $N(h) = \{(u_i, u_j); u_i - u_j = h; i, j = 1, \dots, n\}$

Der Variogrammschätzer berechnet das Variogramm für die Abstandsvektoren, zu denen es Wertepaare (Tupel) gibt. Die Menge der geschätzten Variogrammwerte wird empirisches oder experimentelles Variogramm genannt. Das empirische Variogramm charakterisiert den räumlichen Zusammenhang der Stichprobe.

In der Praxis muss der klassische Variogrammschätzer oft in abgewandelter Form angewandt werden, da selten ausreichend Tupel von beobachteten Werten mit dem gleichen Abstand vorhanden sind. Nach einer allgemein geltenden Regel sollten mindestens 30 Wertepaare in jeder Klasse des Variogramms enthalten sein. Ist diese Forderung mit den vorhandenen Daten nicht realisierbar, nimmt man die Tupel in eine Klasse  $N(h)$ , die ungefähr den gleichen Abstand aufweisen:

$$N(h) = \{(u_i, u_j), |h| - \varepsilon < |u_i - u_j| < |h| + \varepsilon$$

und

$$wi|h| - \delta < wi|u_i - u_j| < wi|h| + \delta \quad i, j = 1, \dots, n\}.$$

Dabei bezeichnet  $wi[h]$  den Winkel zwischen  $h$  und der Nordrichtung und  $wi(u_i, u_j)$  den Winkel zwischen  $u_i$  und  $u_j$ . Man wählt  $\varepsilon$  und  $\delta$  so groß, dass die Regel eingehalten wird [Kreuter 1996].

### 6.1.3 Variogrammansätze / Theoretisches Variogramm

Ist das empirische Variogramm erstellt worden, folgt die Bestimmung des theoretischen Variogramms, das die Grundgesamtheit charakterisiert. Man nimmt dazu an, dass das empirische Variogramm den groben Verlauf des räumlichen Zusammenhangs im gesamten Untersuchungsgebiet widerspiegelt. Das theoretische Variogramm erhält man durch Anpassung einer geeigneten Funktion an das empirische Variogramm. In der Geostatistik werden hierfür ausgewählte Kurvenansätze, sog. „Variogramm-Modelle“ verwendet. Neben einfachen linearen Ansätzen existieren Potenz-Modelle, Sphärische, Exponentielle oder Gauß'sche Modelle (siehe Tabelle 6.1 [Kreuter 1996]).

Lineares Modell	$\gamma(h) = \omega \cdot h$	(Gl. 6-3)
Potenz-Modell	$\gamma(h) = \left(\frac{h}{h_0}\right)^\theta$ mit $0 < \theta < 2$	(Gl. 6-4)
Sphärisches Modell	$\gamma(h) = \gamma_s \left(\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3}\right)$ für $h < a$  $\gamma(h) = \gamma_s$ für $h > a$	(Gl. 6-5)
Exponentielles Modell	$\gamma(h) = \gamma_s \left(1 - \exp\left[-\frac{h}{a}\right]\right)$	(Gl. 6-6)
Gauß'sches Modell	$\gamma(h) = \gamma_s \left(1 - \exp\left[-\frac{h^2}{a^2}\right]\right)$	(Gl. 6-7)

Tab. 6.1: Variogramm-Modelle

## 6.2 Berechnung eines Variogramms für Drucksondierergebnisse

### 6.2.1 Bestimmung der Beobachtungsvariable

Vor der Berechnung des Variogramms war zu untersuchen, welcher Parameter den Spitzenwiderstandsverlauf an einem Drucksondieransatzpunkt am besten charakterisiert. Die Verwendung einzelner  $q_c$ -Werte in bestimmten Teufen macht wenig Sinn, da die so zu gewinnende Aussage auch nur für die entsprechende Teufe gilt, also nicht den Spitzenwiderstand über die gesamte durchteufte Schicht widerspiegelt. Aus statistischen Untersuchungen zur Struktur von Drucksondierergebnissen, auf die in diesem Bericht nicht näher eingegangen wird, war weiterhin bekannt, dass der mittlere Spitzenwiderstand kein geeigneter Parameter ist. Wie in Abbildung 6.2 an einem typischen Beispiel zu erkennen ist, sind die Spitzenwiderstandswerte in der Regel nicht normalverteilt, so dass der Mittelwert, welcher ein Parameter der Normalverteilung ist und daher empfindlich auf Extremwerte innerhalb der Verteilung reagiert, als Variogrammparameter nicht in Frage kommt.

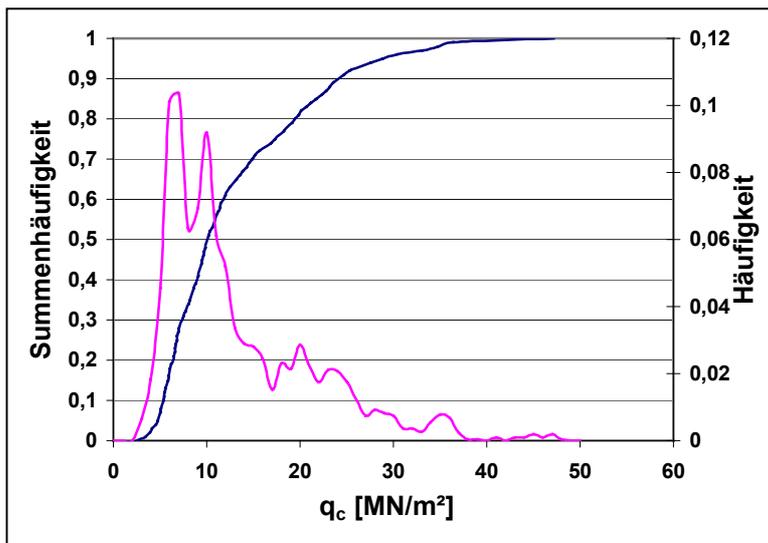


Abb. 6.2: Beispiel für  $q_c$ -Verteilung

Ein weiteres Problem stellt die starke Spannungs- und damit Teufenabhängigkeit der  $q_c$ -Daten dar. Betrachtet man die Daten einer Sondierung als Verteilung, kann z. B. ein  $q_c$ -Wert von 4 MN/m<sup>2</sup> in 5 m Tiefe, der eine ausreichende Lagerungsdichte für diese Teufe darstellt, nicht von einem  $q_c$ -Wert von 4 MN/m<sup>2</sup> aus 50 m

Tiefe unterschieden werden. In einer Teufe von 50 m repräsentiert dieser Wert jedoch eine sehr geringe Lagerungsdichte. Daraus resultiert die Notwendigkeit der Normierung des Spitzenwiderstandes. Der normierte Spitzenwiderstandswert muss entweder einen von der Teufe und der zugehörigen Spannung unabhängigen Wert darstellen oder ein auf die jeweilige Spannung bezogener Wert sein.

In der Fachliteratur werden verschiedene Möglichkeiten der Normierung vorgeschlagen. Abbildung 6.3 zeigt die am häufigsten genannten Formen im Vergleich mit den  $q_c$ -Originaldaten (rote Kurve) am Beispiel einer Drucksondierung von der Innenkippe Koschen. Zu beachten ist, dass die Originaldaten der oberen Abszisse, alle anderen Kurven der unteren Abszisse zugeordnet sind.

Die dargestellten normierten Spitzenwiderstandsverläufe entsprechen folgenden Beziehungen:

Variante (1) nach Olsen und Malone [Olsen 1988] mit n-Werten zwischen 0.6 (grobe Sande) bis 1 (Ton)

$$\bar{q}_c = \frac{q_c}{(\sigma'_{v,0})^n} \quad (\text{Gl. 6-8})$$

Variante (2) nach Robertson, Wride und Campanella [Robertson 1985] mit typischerweise  $n = 0.5$

$$\bar{q}_c = \left( \frac{q_c}{p_a} \right) \cdot \left( \frac{p_a}{\sigma'_{v,0}} \right)^n \quad (\text{Gl. 6-9})$$

Variante (3) nach Baldi et.al. [Baldi 1989]

$$\bar{q}_c = \frac{q_c}{\sigma'_{v,0}} \quad (\text{Gl. 6-10})$$

Variante (4) nach Wroth [Wroth 1988] mit

$$\bar{q}_c = \frac{q_c - \sigma_{v,0}}{\sigma'_{v,0}} \quad (\text{Gl. 6-11})$$

Von den genannten Varianten zur  $q_c$ -Normierung muss Variante (4) als die aus praktischer und wissenschaftlicher Sicht geeignetste Normierung angesehen werden. Einerseits ist kein Exponent enthalten, welcher entweder nur geschätzt werden kann oder durch zusätzliche Kalibrierversuche bestimmt werden muss. Andererseits beinhaltet diese Variante neben der Normierung auf die wirksame Überlagerungsspannung  $\sigma'_{v,0}$  eine Korrektur des  $q_c$ -Wertes um den Betrag der totalen Spannung  $\sigma_{v,0}$ . Diese ist sinnvoll und erforderlich, da  $\sigma_{v,0}$  zusätzlich zum eigentlichen Eindringwiderstand in den Messwert eingeht. Die totale Spannung wirkt als Widerstand auf die Sondierspitze, repräsentiert jedoch keine reine Materialeigenschaft sondern beschreibt einen Zustand in der aktuellen Teufe.

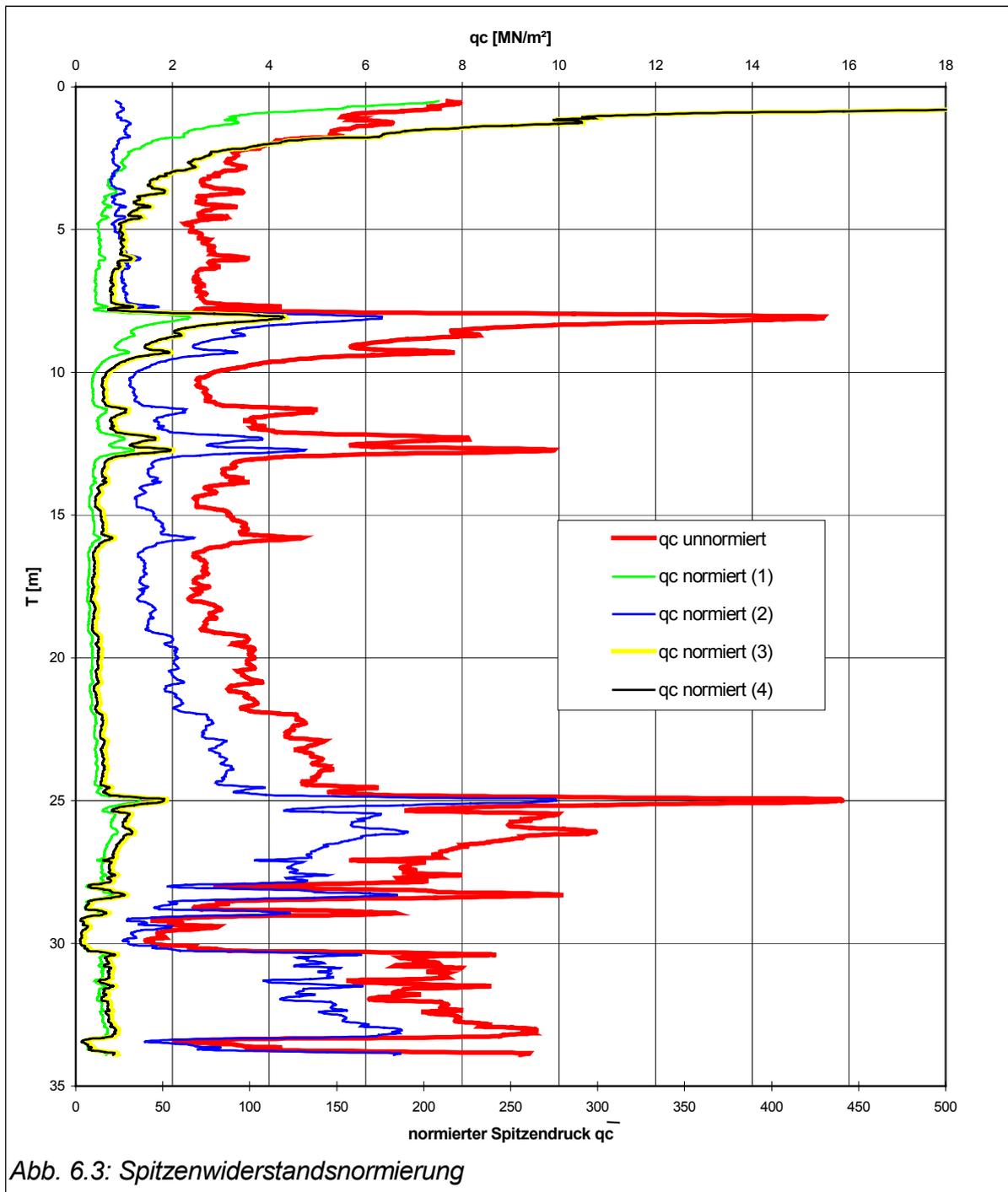


Abb. 6.3: Spitzenwiderstandsnormierung

Für die Berechnung des Variogrammes wird deshalb eine Normierung nach Variante (4) (siehe Gleichung 6-11) durchgeführt. Als Parameter  $Z$  für die Variogrammberechnung wird der Median der Verteilung des normierten Spitzenwiderstandes gewählt.

$$Z = Me\left(q_c - \sigma_{v,0} / \sigma'_{v,0}\right) \quad (\text{Gl. 6-12})$$

Der Median  $Me$  ist der Wert der Verteilung, für den 50 % der Werte kleiner und 50 % größer sind.

Alle Normierungsvarianten besitzen den Nachteil, nur die Vertikalspannung zu berücksichtigen. Wie bereits in Kapitel 4 erwähnt, ergaben Untersuchungen in Kalibrierbehältern von Houlsby und Hitchmann [Houlsby 1988] u.a., dass neben der Dichte bzw. Lagerungsdichte die Horizontalspannung Einfluss auf den Spitzenwiderstand hat. Die von ihnen ermittelten Beziehungen sind jedoch für die praktische Anwendung noch zu ungenau. Die Berücksichtigung der Horizontalspannung für diese Untersuchung ist zudem praktisch nicht möglich, da der Verlauf der tatsächlich wirkenden Horizontalspannung über die gesamte Kippenmächtigkeit mit vertretbarem Aufwand nicht zu ermitteln ist.

### 6.2.2 Untersuchungsobjekt / Datenbasis

Für die Berechnung des Variogramms für den normierten Spitzenwiderstand  $\bar{q}_c$  standen Daten aus insgesamt 32 Drucksondierungen und 3 Kombinationsdrucksondierungen vom SPV-Stützkörper der Innenkippe Koschen, Phase IV, Bauabschnitte 1 und 2 zur Verfügung. Die Lage der Sondierungen zueinander ist in der Skizze in Abbildung 6.4 dargestellt.

Die zwei Sondierungen auf dem RDV-Stützkörper wurden nicht berücksichtigt, da die Änderungen im Spitzenwiderstand infolge Rütteldruckverdichtung anders als die bei Sprengverdichtung sind.

Die Lage der Sondieransatzpunkte entlang des versteckten Dammes verdeutlicht, dass eine richtungsabhängige Variogrammberechnung aufgrund der zu geringen Anzahl an Sondierungen nicht möglich war. Daher wurde die vereinfachende Annahme getroffen, dass der zu untersuchende räumliche Zusammenhang isotrop ist. Das bedeutet, dieser Zusammenhang ist nicht von der Richtung sondern nur von der Distanz der Sondierungen zueinander abhängig.

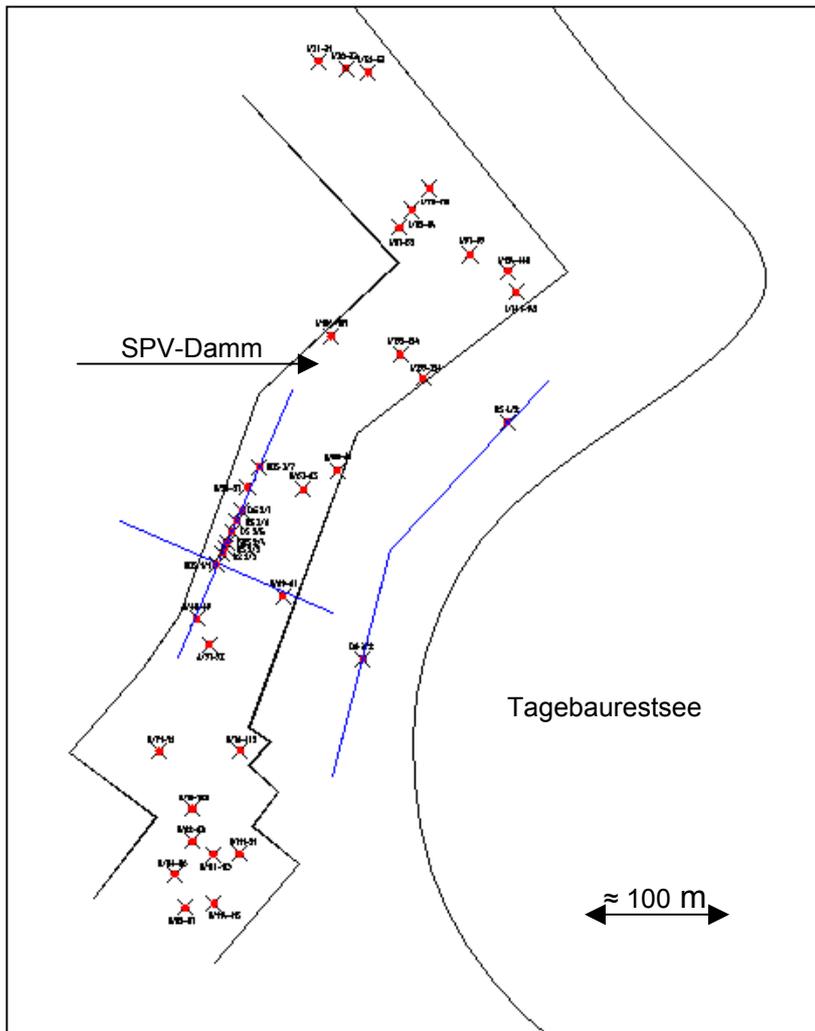


Abb.6.4: Lage der verwendeten Sondierungen

Tatsächlich wird der Zusammenhang nicht isotrop sein. Unabhängig von materialbedingten Differenzen werden vor allem Unterschiede infolge der in Richtung Ufer hin abnehmenden eingesetzten Sprengladungsmengen zu erwarten sein. Der Spitzenwiderstand wird sich senkrecht zum Ufer stärker verändern als parallel dazu. Diese Tatsache ist bei der Bewertung des Ergebnisses zu berücksichtigen.

### 6.2.3 Berechnung des Variogramms

Um möglichst gleiche Bedingungen zu schaffen, wurde bei allen Sondierungen die gleiche Datenmenge aus einem Teufenbereich verwendet, den alle Sondierungen durchteuft hatten. Das heißt, es wurden alle Daten zwischen 74.66 m ü. NN und 99 m ü. NN verwendet.

Für die Spitzenwiderstandswerte dieses Bereichs wurde für jede Sondierung nach Berechnung der Spannungen der normierte Spitzenwiderstand nach Gleichung Gl. 6-11 bestimmt und der Median der Verteilung des normierten Spitzenwiderstandes berechnet. Die Verteilungen wurden bei allen Sondierungen für die gleichen Teufenbereiche berechnet.

Daran anschließend wurden die Entfernungen zwischen den Sondierungen ermittelt, wobei nur Sondierungspaare mit Entfernungen  $h < 350$  m berücksichtigt wurden. Die so bestimmten 365 Wertepaare (Tupel) wurden unter Berücksichtigung

der geforderten Mindestanzahl an Wertepaaren je Klasse in geeignete Entfernungsklassen unterteilt.

Die Entfernungsklassen, die dazugehörige Anzahl an Wertepaaren und die dafür berechneten Variogrammwerte sind in der nachfolgenden Tabelle 6.2 aufgeführt.

Entfernungsklasse	Mittelwert	Anzahl Wertepaare	Variogrammwert $\gamma(h)$
0 – 50 m	25 m	52	32,07
50 – 100 m	75 m	62	38,61
100 – 160 m	130 m	55	40,01
160 – 250 m	205 m	80	50,28
250 – 350 m	300 m	116	47,16

Tabelle 6.2: Variogrammwerte

Das daraus erstellte empirische Variogramm ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Das am besten passende theoretische Variogramm-Modell ist das Potenz-Modell nach Gleichung Gl. 6-4. Die Gleichung und das Bestimmtheitsmaß sind im Diagramm aufgeführt.

Prinzipiell gilt: Je größer der Variogrammwert  $\gamma(h)$ , desto geringer ist der Zusammenhang zwischen zwei im Abstand  $h$  voneinander entfernt liegenden Sondierungen.

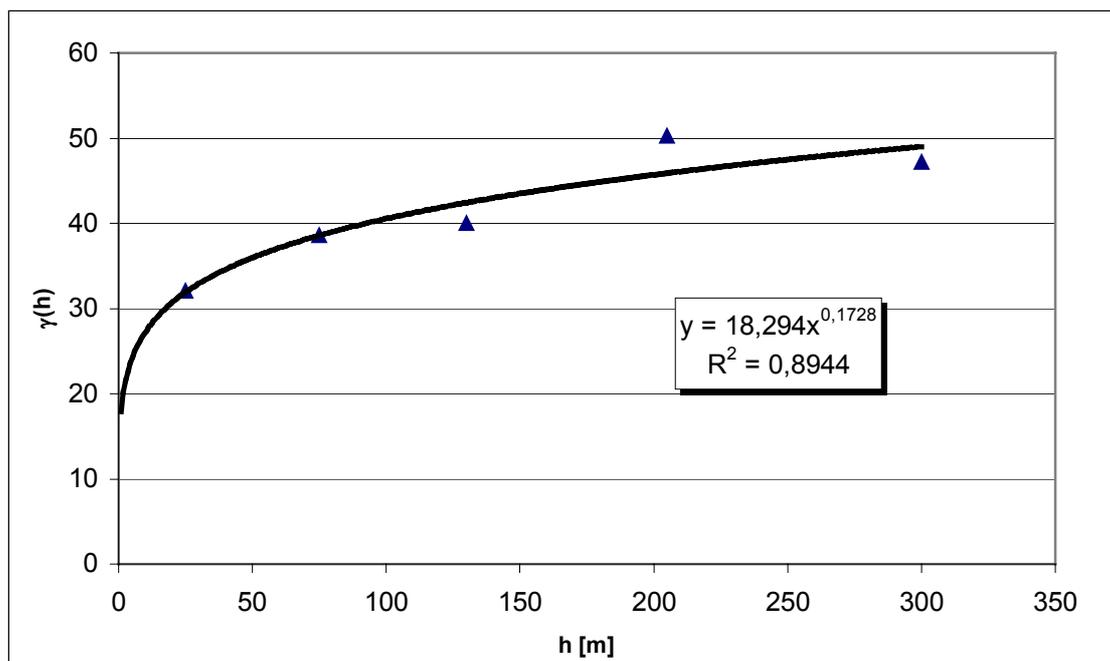


Abb. 6.5: Empirisches Variogramm für Median des normierten Spitzenwiderstandes

### 6.3 Praktische Schlussfolgerungen

Das Ergebnis der Variogrammberechnung lässt die folgenden Schlussfolgerungen zu:

- Drucksondierungen repräsentieren die Untergrundverhältnisse innerhalb eines Radius von ca. (20-25) m um den Sondieransatzpunkt. Nur bis zu dieser Entfernung ist (statistisch) ein signifikanter räumlicher Zusammenhang erkennbar.
- Der relativ große „Nuggetwert“ ( $\gamma(h)$  bei  $h = 0$ ) verdeutlicht, dass unabhängig von der statistisch ermittelten Aussagereichweite mit erheblichen Veränderungen des Spitzenwiderstandes innerhalb sehr kleiner Entfernungen vom Sondieransatzpunkt gerechnet werden muss. Diese Tatsache resultiert aus der Inhomogenität der Materialeigenschaften in den Kippen.
- Das Variogramm erreicht innerhalb des untersuchten Entfernungsbereiches nicht den Schwellenwert ( $\gamma(h)$ -Wert, ab dem die Kurve waagrecht verläuft). Das bedeutet, dass auch in großen Entfernungen noch Übereinstimmungen zwischen den Messwerten von Sondierungen bestehen können. Diese Tatsache ist - wie bereits oben erwähnt - durch die, großflächig betrachtet, ähnlichen Materialverhältnisse innerhalb der Innenkippe Koschen zu erklären. Eine weitere Ursache ist das über den gesamten Bereich mit annähernd einheitlichen Parametern angewandte gleiche Verdichtungsverfahren.

Das Ergebnis der Variogrammberechnung kann trotz des objektspezifischen Charakters allgemein als Richtwert für die Festlegung von Sondieransatzpunkten zumindest für Kippen in der Niederlausitz verwendet werden.

Es wird an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass die vereinfachende Annahme eines richtungsunabhängigen Zusammenhanges getroffen wurde. Da bei der SPV die Sprengladungsmengen mit kleiner werdender Entfernung zum Ufer des Restloches reduziert wurden, sind senkrecht zum Damm sogar noch geringere Sondierabstände empfehlenswert, dammparallel können auch größere Sondierabstände für eine flächenhafte Bewertung ausreichen.

Beim Erstellen von flächendeckenden Abbildungen (Tiefenschnitten) der Parameter Spitzenwiderstand, Reibungsverhältnis sowie Dichte, Porenanteil etc. sollte sich der Abstand zwischen den Sondierungen an der ermittelten Aussagereichweite orientieren. Anderenfalls können standsicherheitsrelevante Veränderungen der festigkeitsbestimmenden bodenphysikalischen Parameter zwischen Sondierungen nicht erkannt werden.

## 6.4 Gültigkeitsbereich der Korrelationsbeziehungen

In den vorherigen Kapiteln ist ein Weg aufgezeigt worden, wie bodenphysikalische Kennwerte wie Dichte, Porenanteil oder Feinkornanteil aus den Messergebnissen von Drucksondierungen unter Verwendung von objektbezogenen Korrelationsbeziehungen mit hoher Genauigkeit berechnet werden können. Der Gültigkeitsbereich für die Anwendung der Korrelationsbeziehungen innerhalb eines Objektes kann nur über einen Vergleich der anstehenden Materialien bestimmt werden. Ebenso ist die Zulässigkeit der Verwendung der Korrelationen in anderen, möglicherweise benachbarten Bereichen nur über entsprechende Analogieschlüsse möglich.

Eine einfache Methode zur Überprüfung der Gültigkeit der Korrelationen ist der direkte Vergleich gemessener und berechneter Parameter anhand einer radiometrischen Sondierung einschließlich einer statistischen Auswertung des dabei festgestellten Fehlers.

Oft liegen radiometrische Sondierungen jedoch nicht in ausreichender Anzahl vor oder können aus Kostengründen nicht im erforderlichen Umfang durchgeführt werden. Will man dennoch subjektive Fehler durch bloße „ingenieurmäßige Festlegung“ der Gültigkeitsgrenzen vermeiden, ist die Beantwortung dieser Fragen auch mit Hilfe statistischer Kennzahlen und durch einfache statistische Tests möglich. Es sei jedoch auch darauf verwiesen, dass statistische Tests niemals beweisend sein, sondern nur aufgestellte Hypothesen stützen oder verwerfen können. Ein Irrtum ist prinzipiell nie ausgeschlossen. Exakte Kenntnis des Sachverhaltes ist nur durch die Untersuchung der gesamten Population [Wernecke 1995], in diesem Fall durch exakten Aufschluss des gesamten Objektes möglich.

Bei der Problematik des Gültigkeitsbereiches der Korrelationsbeziehungen lautet die zu untersuchende Hypothese, dass innerhalb des Untersuchungsobjektes an jeder Stelle eine ähnliche Materialzusammensetzung existiert. Die Materialzusammensetzung wird durch den Parameter Reibungsverhältnis  $R_f$  repräsentiert. Die Bestätigung der Hypothese erlaubt die Anwendung der Korrelationen zur Berechnung von Dichte, Porenanteil oder Feinkornanteil aus den Messergebnissen der Drucksondierungen auf den untersuchten Bereich, bei Ablehnung der Hypothese wäre die Verwendung der Korrelationen unzulässig.

Im Folgenden werden Möglichkeiten beschrieben, den Gültigkeitsbereich der ermittelten Korrelationen durch einen Vergleich von Verteilungsmaßzahlen von bei Drucksondierungen gewonnenen  $R_f$ -Daten zu bestimmen. Die angewandten Verfahren werden anhand von 8 Sondierungen aus unterschiedlichen Bereichen eines Sanierungsabschnittes am Tagebaurestsee Koschen (Koschendam) demonstriert.

## 6.4.1 Verteilungen

### 6.4.1.1 Art der Verteilung

Allgemein beinhalten statistische Untersuchungen sowohl Elemente der exploratorischen Datenanalyse (Ermittlung von Wertebereichen, Verteilungen, Abhängigkeiten zwischen Merkmalen, Transformationen u.ä.) als auch der konfirmatorischen Datenanalyse (Sichern / Erkennen von reproduzierbaren Mustern; Trennung von systematischen und Zufallseffekten u.ä.) [Wernecke 1995].

Um Drucksondierergebnisse mit statistischen Methoden untersuchen und bewerten zu können, ist es zunächst erforderlich, sich Klarheit über Struktur und Art der Verteilungen der Daten zu verschaffen. Die anwendbaren statistischen Verfahren hängen in hohem Maß von der Verteilungsart ab. Eine Nichtbeachtung dieser Tatsache kann zu Fehleinschätzungen führen.

Der erste Schritt der Untersuchung sollte daher stets in einer Darstellung der interessierenden Verteilungen bestehen. Dass heißt, man berechnet die Verteilungen für das Reibungsverhältnis  $R_f$  und stellt diese graphisch dar. In der Regel lassen sich aus den Graphiken bereits Schlussfolgerungen über die Art der vorliegenden Verteilung ziehen. Bestehen Zweifel, ob eine Normalverteilung vorliegt, kann, um eine sichere Aussage zu erhalten, ein Test auf Normalverteilung der Daten, wie u. a. in [Sachs 1988] oder [Davis 1986] beschrieben, durchgeführt werden.

Abbildung 6.6 zeigt die Häufigkeitsverteilungen sowie die Summenhäufigkeitskurven der  $R_f$ -Daten der 8 Drucksondierungen vom Koschendamms. Ohne einen weiteren Test durchführen zu müssen, wird deutlich, dass die  $R_f$ -Daten in allen Fällen nicht normalverteilt sind. Alle Sondierungen zeigen eine linkssteile (rechtsschiefe) Verteilung. Laut [Wernecke 1995] ist diese Verteilungsform typisch für in der Natur auftretende Merkmale, da diese oft in einer „Richtung“ eine natürliche Grenze haben, wogegen sie in der anderen „Richtung“ offen sind. Die Untere Grenze bei den Daten des Reibungsverhältnisses ist  $R_f = 0 \%$ , wodurch eine Streuung der Werte nach „links“ nicht im gleichen Maß möglich ist wie nach „rechts“. Durch Logarithmieren erhält man oft eine Normalverteilung, es handelt sich also meist um eine logarithmische Normalverteilung. Aufgrund der nur geringen Datenmenge, die eine größere Streuung in Richtung höherer  $R_f$ -Werte verursachen, ist jedoch im oben aufgeführten Beispiel auch die näherungsweise Annahme normalverteilter Daten denkbar.

Der rein optische Vergleich der  $R_f$ -Verteilungen lässt bereits vermuten, dass die Verteilungen einander sehr ähnlich sind.

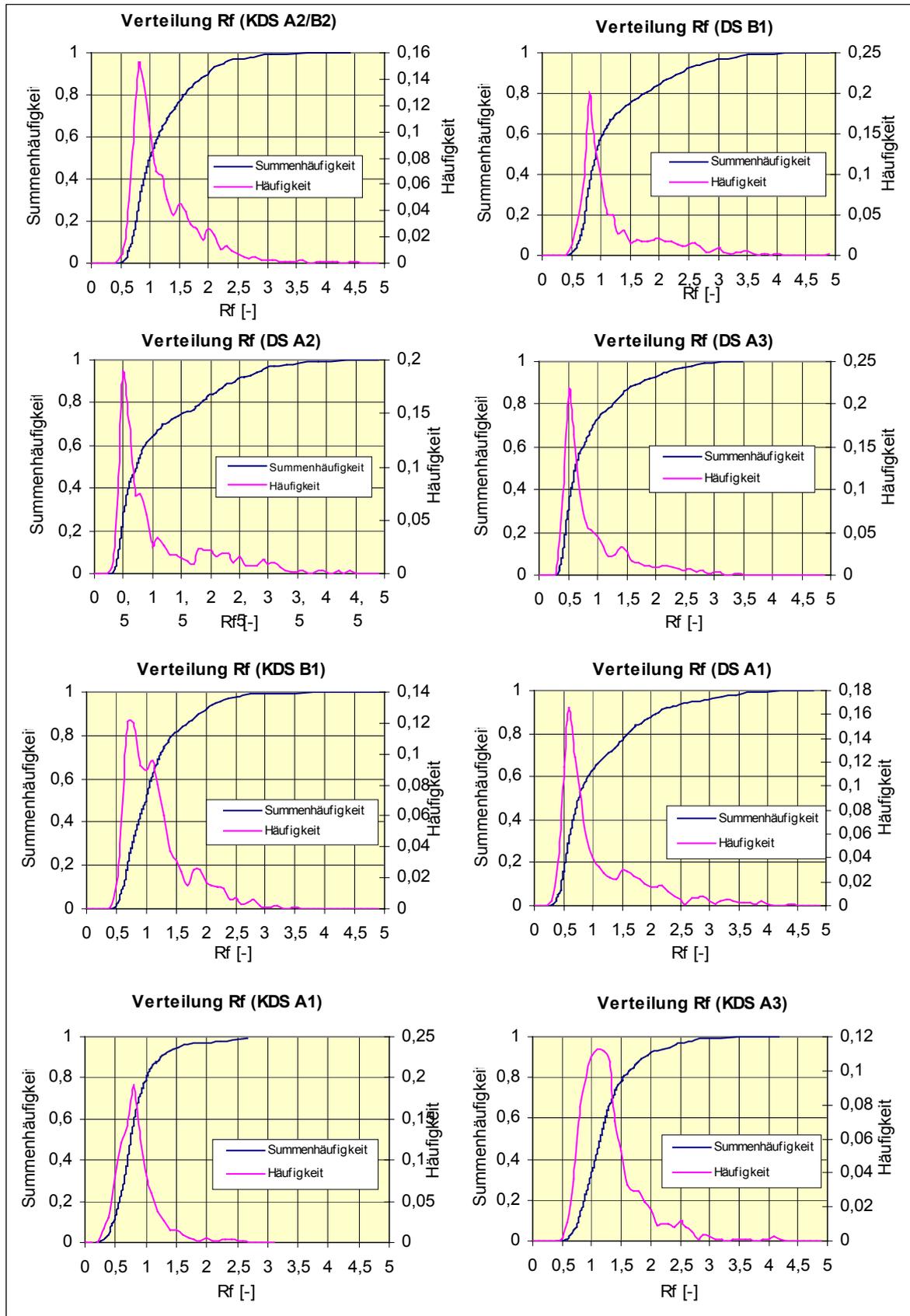


Abb. 6.6: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen von 8 DS vom Koschendam

### 6.4.1.2 Maßzahlen der Verteilungen

Die verschiedenen Verteilungen haben statistische Maßzahlen, welche es ermöglichen, die Datenmenge durch wenige Parameter global zu beschreiben. Hierzu zählen vor allem die Lagemaßzahlen und die Streuungsmaßzahlen [Wernecke 1995].

Lagemaßzahlen charakterisieren das Zentrum der Häufigkeitsverteilung, also den Ort der größten Wahrscheinlichkeit des Auftretens. Die gebräuchlichsten Lagemaßzahlen sind der Mittelwert (arithmetisches Mittel) für metrisch skalierte, der Median für kategorial skalierte und der Modalwert (häufigster Wert der Datenmenge) für nominal skalierte Merkmale. Weiterhin gibt es Positionsmerkmale (Quantile), die angeben, wie viel Werte der geordneten Datenmenge unter- oder oberhalb der gewählten Position vorhanden sind. Spezielle Quantile sind der Median (50% der Werte liegen ober- bzw. unterhalb) und die Quartile  $Q_{1/4}$  (25% unterhalb, 75% oberhalb) und  $Q_{3/4}$  (75% unterhalb und 25 % oberhalb).

Streuungsmaßzahlen geben an, wie sich die Werte um das Häufigkeitszentrum anordnen. Mit ihnen kann man die Zuverlässigkeit oder Präzision des Messvorgangs beurteilen, das heißt, der wahre Wert der Population wird um so genauer geschätzt, je größer die Präzision der Messung ist. Übliche Streuungsmaßzahlen sind die Spannweite  $R$ , die Stichprobenvarianz  $s^2$  (für metrisch skalierte Merkmale), die Interquartilsdifferenz  $s_F$  oder der Variationskoeffizient  $V$ .

Im Unterschied zum Mittelwert, der Stichprobenvarianz und der Spannweite sind der Median und die Interquartilsdifferenz Maßzahlen, die unempfindlich gegenüber Ausreißern sind.

Die Gleichungen 6-13 bis 6-17 zeigen die Berechnungsvorschriften für die genannten Maßzahlen:

- Normalverteilte Merkmale:

- Arithmetisches Mittel  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = (x_1 + x_2 + \dots + x_n) / n$  (Gl. 6-13)

- Varianz  $s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$  (Gl. 6-14)

- Spannweite  $R = \max_{i=1}^n x_i - \min_{i=1}^n x_i = Q_1 - Q_0$  (Gl. 6-15)

- Nichtnormalverteilte Merkmale:

- Median (50%-Quantil)  $Me = Q_{1/2}$  (Gl. 6-16)

- Interquartilsdifferenz  $s_F = Q_{3/4} - Q_{1/4} = F_o - F_u$  (Gl. 6-17)

Die wichtigsten statistischen Parameter der Verteilungen der Reibungsverhältnisse der 8 Beispielsondierungen sind in Anlage 6.1 aufgeführt. Es wurden bei allen Sondierungen die gleiche Anzahl Daten aus dem gleichen Teufenbereich verwendet. Es sind sowohl die Parameter für normalverteilte als auch für nichtnormalverteilte Daten aufgelistet. Erwartungsgemäß unterscheiden diese sich nicht wesentlich voneinander.

Der Vergleich der Sondierungen untereinander zeigt, dass die Parameter alle dicht beieinander liegen, was auf annähernd gleiche Materialeigenschaften in den untersuchten Kippenbereichen hindeutet. Der Median aller Verteilungen liegt zwischen  $Me_{\min} = 0,63$  und  $Me_{\max} = 1,15$  und die Interquartilsdifferenzen sind relativ klein, so dass für alle Sondierungen eine Einordnung des Materials zwischen schwach kiesigen Sand bis schwach schluffigen Sand erfolgt. Die nachfolgend angewandten statistischen Tests zum Vergleich der Daten sollen die Ähnlichkeit der Materialverhältnisse belegen.

#### 6.4.2 Boxplots

Zum Vergleich mehrerer Datenmengen sowie zur Abgrenzung von Ausreißern können sogenannte Boxplots erstellt werden. Mit ihrer Hilfe kann man erkennen, ob sich zwei Datenreihen „signifikant unterscheiden“. Somit können auf diese Weise auch die Verteilungen des Reibungsverhältnisses benachbarter Drucksondierungen miteinander verglichen werden.

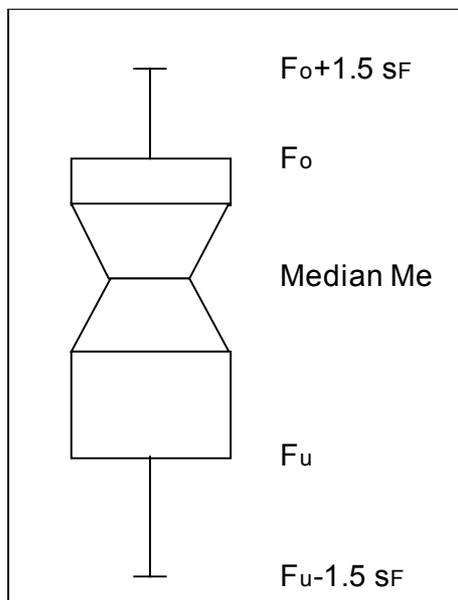


Abb. 6.7: Boxplot

Auf einer Messskala werden zunächst das obere und das untere Quartil  $Q_{1/4}$  und  $Q_{3/4}$  (bzw.  $F_u$  und  $F_o$ ) sowie der Median gekennzeichnet. Danach konstruiert man einen Kasten, der durch die oberen und unteren Viertel  $F_u$  und  $F_o$  begrenzt ist. Ein Querstrich in dem Kästchen zeigt die Lage des Median an. Vom  $[F_u - F_o]$ -Kästchen gehen Linien zu den extremen Werten innerhalb der inneren Eingrenzung  $F_u - 1,5 s_F$  und  $F_o + 1,5 s_F$  aus. Daten außerhalb der inneren Eingrenzung, aber noch kleiner als  $F_u - 3 s_F$  bzw. größer als  $F_o + 3 s_F$  gelten als „außerhalb-Werte“. Daten, die diese Grenzen übersteigen gelten als weit außerhalb [Vellemann 1981].

Eine Ergänzung des Boxplots wurde durch Mc Gill et. Al. [Mc Gill 1978] oder Chambers et. Al. [Chambers 1983] vorgenommen, wobei das Kästchen ausgehend vom Median beidseitig eingekerbt wird. Die Lage der Kerben ist bestimmt durch

$$Me \pm 1,57 \frac{s_F}{\sqrt{n}}$$

Bei einem Vergleich zweier oder mehrerer Verteilungen gilt, dass sich die Verteilungen signifikant voneinander unterscheiden, wenn sich die Kerben ihrer Boxplots nicht überschneiden. Abbildung 6.7 zeigt eine prinzipielle Darstellung eines Boxplots. Abbildung 6.8 zeigt den Vergleich der Boxplots der 8 Beispielsondierungen. Die Kerben überschneiden sich bei allen Sondierungen, so dass geschlussfolgert werden kann, dass sich die Verteilungen nicht signifikant unterscheiden. Daraus folgt, dass im untersuchten Gebiet ähnliche Materialverhältnisse anzutreffen sind.

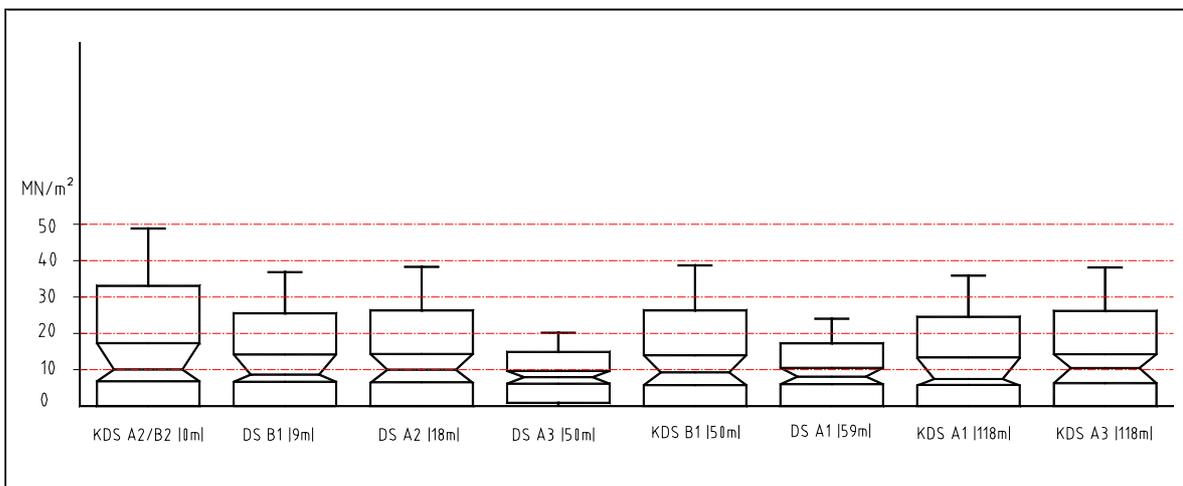


Abb. 6.8: Vergleich der Boxplots

Analog dem Vergleich von Boxplots können Q-Q-Plots dargestellt oder Vergleiche der Konfidenzintervalle (nur für normalverteilte Daten) durchgeführt werden. Für Letztere gilt analog, wenn sich die Intervalle überlappen, besitzen die Verteilungen ähnliche Populationsparameter. Ein Q-Q-Plot ist die Darstellung aller Quantile  $Q_x$  einer Verteilung gegen die Quantile  $Q_y$  einer anderen Verteilung in einem Diagramm ( $x, y = [0...100] \%$ ). Je enger die Punkte der gegeneinander aufgetragenen Werte um die Gerade  $x=y$  angeordnet sind, um so ähnlicher sind sich die Verteilungen. Abbildung 6.9 zeigt die Q-Q-Plots für den Parameter  $R_f$  von 7 Sondierungen vom Koschendam aufgetragen gegen die Sondierung KDS A2/B2 als eine der radiometrischen Kombinationsdrucksondierungen, welche die Datenbasis für die Korrelationsbeziehungen dargestellt haben. Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen von der Geraden  $x=y$  in den meisten Fällen im Bereich  $\Delta R_f = (0 \dots 0,3) \%$ , also eher gering sind. Nur die Sondierung KDS A1, welche am weitesten von der Bezugs Sondierung entfernt liegt, weicht etwas stärker ab. Im Bereich  $R_f > 2$  treten zum Teil größere Abweichungen auf. Da in diesem Bereich jedoch nur ein geringer Teil der Daten liegt (siehe auch Abb. 6.6), kann dennoch von signifikant

ähnlichen Verteilungen und somit von annähernd gleichen Materialeigenschaften ausgegangen werden. Eine Anwendung der Korrelationsbeziehungen auf Sondierungen aus dem untersuchten Bereich ist demnach zulässig.

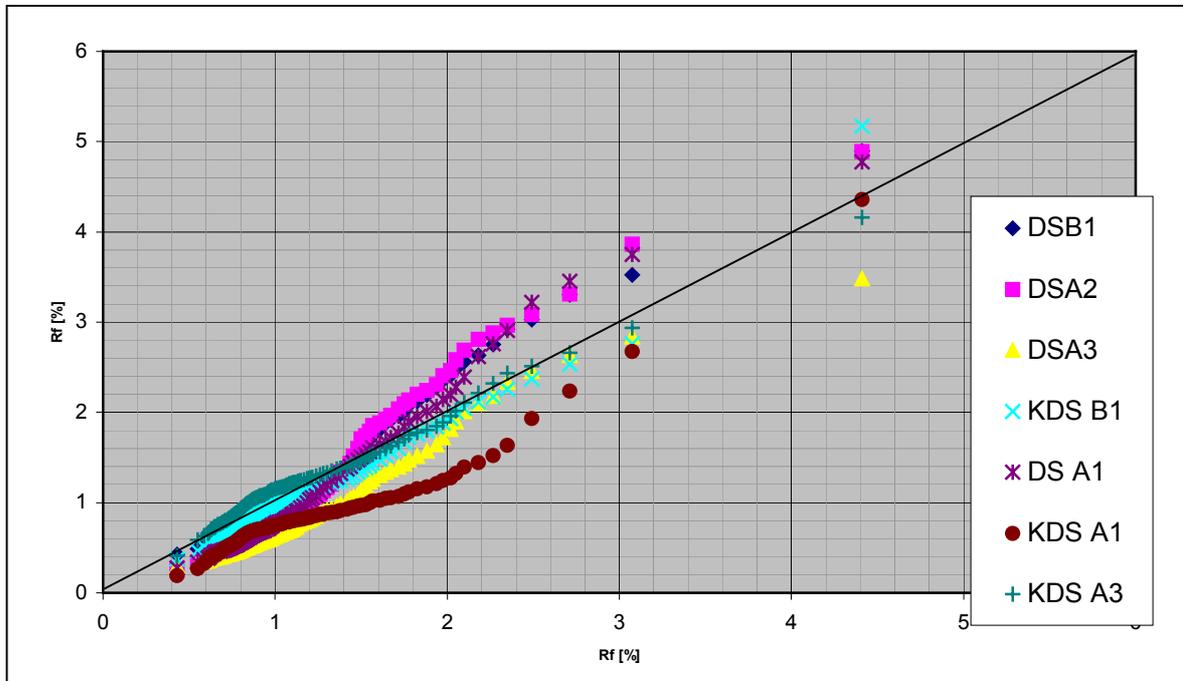


Abb. 6.9: Q-Q-Plots

### 6.4.3 Kumulative $R_f$ -Kurven

Eine weitere Möglichkeit, den Schichtenaufbau und die anstehenden Materialien zu bestimmen, stellen auch die bereits zuvor erwähnten kumulativen Kurven des Reibungsverhältnisses dar. Durch Vergleich dieser Kurven sowie der originalen  $R_f$ -Kurven können ebenfalls Rückschlüsse gewonnen werden, ob sich in einem Untersuchungsgebiet die Materialeigenschaften der anstehenden Lockergesteine ändern. Abbildung 6.10 zeigt die kumulierten  $R_f$ -Kurven der Beispielsondierungen im Vergleich. Signifikante Unterschiede in der Schichtung und auch im Anstieg sind nicht festzustellen. Einige Kurven weisen vereinzelte Knickpunkte auf (z. B. ca. bei  $T = 15$  m). Das lässt auf lokale Inhomogenitäten schließen, welche für Tagebaukippen, die mit Absetzern geschüttet wurden, typisch sind. Ansonsten bestätigt das Bild die bereits zuvor gemachte Feststellung, dass in dem durch die Beispielsondierungen repräsentierten Bereich annähernd gleiche Lockergesteine anstehen.

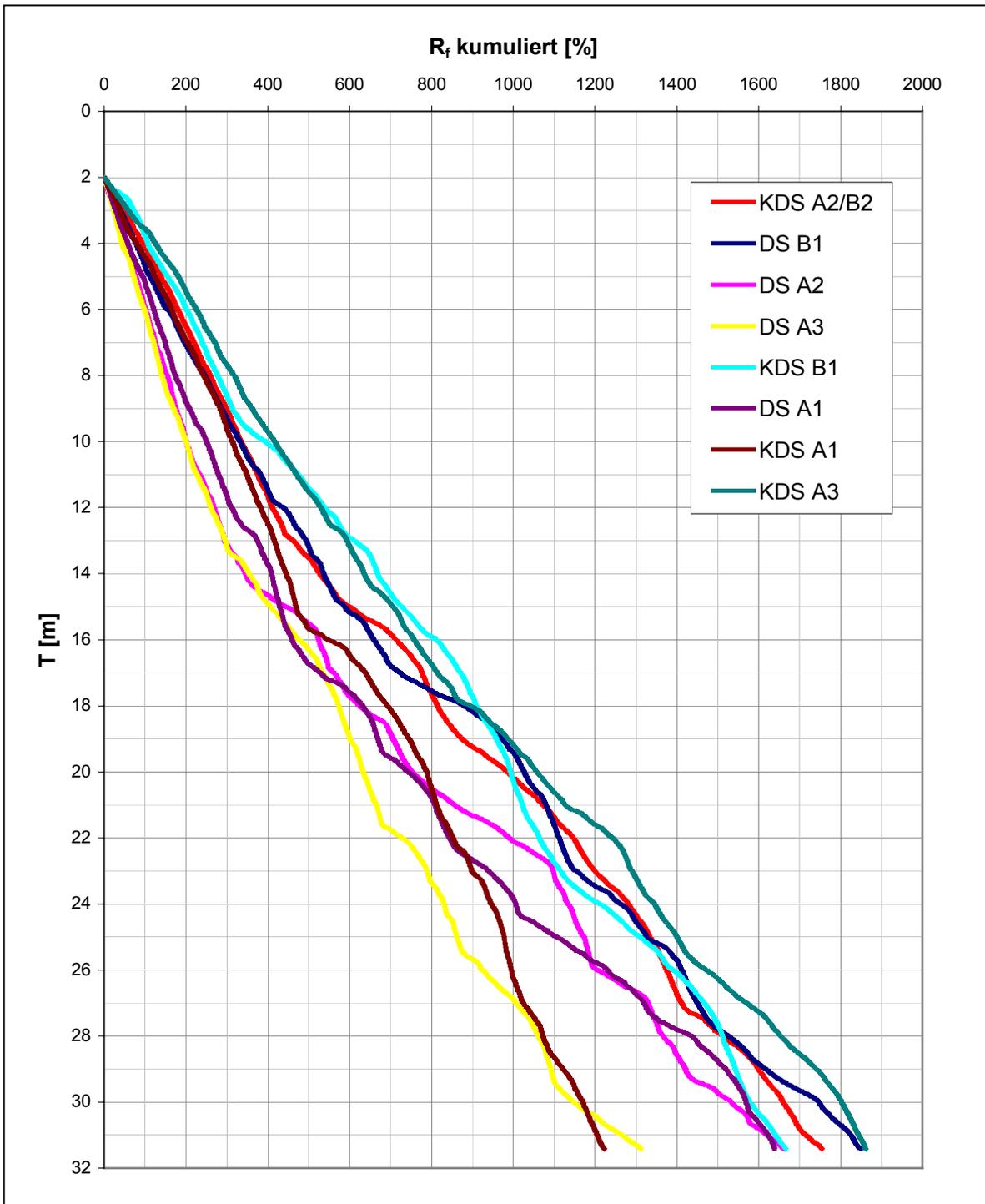


Abb. 6.10: Kumulierte R<sub>f</sub>-Kurven

## 7 Darstellung der Verteilungen der Lockergesteinsparameter

### 7.1 Einleitung

In vielen praktischen Anwendungsfällen genügt es nicht, nur Informationen über die gesuchten und durch Sondierungen gewonnenen Lockergesteinsparameter an den Sondieransatzpunkten zu erhalten. Oft werden auch Kenntnisse über die räumliche Verteilung der Lockergesteinsparameter oder zumindest über die Parameterverteilung in ausgewählten Schnitten gewünscht bzw. gefordert, da z. B. die weitere Verwendung der Daten in Standsicherheitsprogrammen oder Finite-Elemente-Programmen dies verlangt.

Für die Berechnung flächendeckender bzw. räumlicher Verteilungen von Lockergesteinsparametern müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Die Schätzung der Parameter zwischen den Sondieransatzpunkten mit geostatistischen Verfahren erfordert eine ausreichende Informationsdichte, das heißt, ausreichend kleine Sondierabstände. In Kapitel 6 wurden die Ergebnisse von Untersuchungen zur Aussagenreichweite von Sondierungen am Beispiel einer sanierten Tagebaukippe gezeigt. Die vorgestellte Vorgehensweise kann für die Bestimmung der im betreffenden Objekt anzustrebenden maximalen Sondierabstände herangezogen werden.
- Die Berechnung der Verteilungen erfordert ein geeignetes statistisches Interpolationsverfahren. Entsprechende Berechnungsalgorithmen wie Kriging oder Inverse Distance Weighting sind in den gebräuchlichen Softwarepaketen implementiert.
- Die Darstellung der Kennwerte FKA,  $\rho$ ,  $\rho_d$  und  $n$  auf der Basis von Drucksondierergebnissen erfordert Korrelationsbeziehungen, die eine ausreichend genaue Beschreibung dieser Parameter ermöglichen.
- Schließlich ist die Kenntnis über die Lage in einem lokalen oder globalen Koordinatensystem sowie über die Höhe (ü. NN) der Sondieransatzpunkte erforderlich. Empfehlenswert ist die Kennzeichnung der Lage der Sondierungen, von Schichtgrenzen, Liegendem und Grundwasserspiegel sowie anderer markanter Punkte.

In den nachfolgenden Abschnitten wird anhand von Beispielen beschrieben, wie die auf der Basis der Sondierergebnisse und der Korrelationsbeziehungen zwischen DS- und KDS-Ergebnissen gewonnenen Informationen flächendeckend erweitert und auf verschiedene Art anschaulich dargestellt werden können.

## 7.2 Zweidimensionale (flächendeckende ) Darstellungen

Flächendeckende Abbildungen (2 D-Abbildungen) der Sondierergebnisse ( $q_c$ ,  $R_f$ ) bzw. der berechneten Kennwerte (FKA,  $\rho$ ,  $\rho_d$ ,  $n$ ) ermöglichen eine Abschätzung der Verteilung dieser Kennzahlen im Untersuchungsgebiet anhand repräsentativer Schnitte. Die flächendeckende Darstellung der Kennwertverteilungen in Schnitten ist u. a. deshalb sehr hilfreich, weil die meisten Standsicherheits-Berechnungsprogramme mit zweidimensionalen Böschungsschnitten arbeiten. Aus den Parameterverteilungen kann die hierfür erforderliche Verteilung der Festigkeitsparameter abgeleitet werden

Die im Rahmen dieser Arbeit berechneten Verteilungen und dargestellten flächendeckenden Abbildungen sind mit dem Programm SURFER<sup>®</sup> Version 7 von Golden Software, Inc. auf der Basis des geostatistischen Interpolationsverfahrens Kriging ermittelt worden.

Das Erstellen flächendeckender Abbildungen der Verteilung verschiedener Lockergesteinsparameter soll analog der Variogrammberechnung in Kapitel 6 am Beispiel eines Abschnittes (Profil 2) des durch Sprengverdichtung hergestellten „versteckten Dammes“ zur Sicherung der setzungsfließgefährdeten Böschung am Tagebaurestsee Koschen beschrieben werden.

Die auf dem Messprofil niedergebrachten Sondierungen sind in Tabelle 7.1 aufgeführt. Anhand der Profilmeterangaben zur Lage der Sondierungen innerhalb des Profils ist ersichtlich, dass mit 12 Sondierungen innerhalb von 100 Profilmeter eine sehr hohe Datendichte vorhanden ist.

Sondierung	Profilmeter	Hochwert	Rechtswert	Höhe NN [m]
DS 2/1	109	<sup>57</sup> 07863,2	<sup>54</sup> 36720,5	101,89
DS 2/2	149	<sup>57</sup> 07826,7	<sup>54</sup> 36702,7	102,22
DS 2/3	144	<sup>57</sup> 07831,2	<sup>54</sup> 36704,8	102,21
KDS 2/4	139	<sup>57</sup> 07835,7	<sup>54</sup> 36707,0	102,3
DS 2/5	129	<sup>57</sup> 07844,7	<sup>54</sup> 36711,4	102,25
DS 2/6	119	<sup>57</sup> 07853,7	<sup>54</sup> 36715,8	102,36
KDS 2/7	69	<sup>57</sup> 07898,6	<sup>54</sup> 36737,7	101,87
DS 2/8	100	<sup>57</sup> 07870,7	<sup>54</sup> 36724,1	101,8
DS 2/9	75	<sup>57</sup> 07893,2	<sup>54</sup> 36735,0	102,0
DS 2/10	50	<sup>57</sup> 07915,7	<sup>54</sup> 36746,0	102,08
KDS 1/1	159	<sup>57</sup> 07817,7	<sup>54</sup> 36698,3	103,0
DS N II/36-37	88	<sup>57</sup> 07883,2	<sup>54</sup> 36725,4	102,45

Tabelle 7.1: Sondierungen auf Profil 2

Die Sondierdiagramme und –daten liegen beim Autor vor. Repräsentativ für alle aufgelisteten Sondierungen sind in den Anlagen 7.1 und 7.2 die Sondierdiagramme von DS 2/1 und KDS 2/4 dargestellt.

Die Korrelationsbeziehungen entsprechen folgender Form:

- $FKA = f(R_f)$  bzw.  $FKA = f(R_f, q_c/\sigma_{v,R})$
- $\rho = f(q_c/\sigma_{v,R}, R_f, \rho_s)$
- $n = f(q_c/\sigma_{v,R}, R_f)$

mit FKA ... Feinkornanteil in [%]

$\rho, \rho_s$  ... natürliche Dichte, Korndichte in [g/cm<sup>3</sup>]

$n$  ... Porenanteil in [-]

$q_c$  ... Spitzenwiderstand in MN/m<sup>2</sup>

$R_f$  ... Reibungsverhältnis in [%]

$\sigma_{v,R}$  ... vertikale Referenzspannung in 1 m Tiefe:  $\sigma_{v,R} = 0,017 \text{ MN/m}^2$

Im Unterschied zu der in Kapitel 5 genannten allgemeinen Form der Korrelationsbeziehungen ist bei den Korrelationen für die Innenkippe Koschen an Stelle der vertikalen wirksamen Überlagerungsspannung eine konstante Referenzspannung verwendet worden. Angestrebt werden prinzipiell Beziehungen zwischen den bodenphysikalischen Parametern FKA,  $\rho$  und  $n$  sowie den aus der Dimensionsanalyse abgeleiteten nicht dimensionsbehafteten  $\Pi$ -Faktoren  $\Pi_1 = q_c/\sigma'_{v,0}$  und  $\Pi_2 = R_f$  mit der wirksamen vertikalen Spannung  $\sigma'_{v,0}$ . Im Verlauf der Untersuchungen zeigte sich jedoch, dass die Qualität der Korrelationsbeziehungen ohne Berücksichtigung der Vertikalspannung, also mit dimensionsbehafteten Parametern deutlich besser war als mit den dimensionslosen  $\Pi$ -Faktoren. Die Ursache hierfür liegt in dem bereits besprochenen Nichtberücksichtigen verschiedener Einflussparameter. Da die Qualität der berechneten Kennwerte Vorrang vor der aus physikalischer Sicht berechtigten Forderung nach Dimensionsreinheit haben sollte, wurden die Korrelationsbeziehungen modifiziert. Um allerdings rein empirische nicht dimensionsreine Beziehungen zu vermeiden, wurde der Spitzenwiderstand  $q_c$  nicht auf die vertikale wirksame Überlagerungsspannung, sondern auf die oben genannte Referenzspannung  $\sigma_{v,R} = 0.017 \text{ MN/m}^2$  bezogen, welche der Spannung in 1 m Tiefe entspricht.

Weiterhin erwies sich eine getrennte Betrachtung der einzelnen Kippscheiben als vorteilhaft für die Qualität der Korrelationsbeziehungen. Die Tabellen 7.2 bis 7.4 zeigen die berechneten Korrelationsbeziehungen:

	<b>Feinkornanteil FKA</b>
<b>Erdfeuchte Hochschüttung</b>	$FKA = 5.96 \cdot \ln(R_f) + 13.98$

<b>Wassergesättigte Hochschüttung</b>	$FKA = 3.037 \cdot \ln \left( \frac{R_f^{0.915}}{\left( \frac{q_c}{\sigma_{v,R}} \right)^{1.306}} \right) + 33.646$
<b>Wassergesättigte Tiefschüttung</b>	$FKA = 3.224 \cdot \ln \left( \frac{R_f^{0.862}}{\left( \frac{q_c}{\sigma_{v,R}} \right)^{1.232}} \right) + 33.684$
<b>Korrelationskoeffizient (gesamt)</b>	<b>K = 0.66</b>

Tab. 7.2: Korrelationen für den Feinkornanteil

	<b>Natürliche Dichte <math>\rho</math></b>
<b>Erdfeuchte Hochschüttung</b>	$\rho = \left( 0.031 \cdot \ln \left( \frac{\left( \frac{q_c}{\sigma_{v,R}} \right)^{0.9}}{R_f^{1.1}} \right) + 0.518 \right) \cdot \rho_s$
<b>Wassergesättigte Hochschüttung + Tiefschüttung</b>	$\rho = 0.634 \cdot \left( \frac{q_c}{\sigma_{v,R}} \right)^{0.028} \cdot \rho_s$
<b>Korrelationskoeffizient (gesamt)</b>	<b>K = 0.86</b>

Tabelle 7.3: Korrelationsbeziehungen für natürliche Dichte

	<b>Porenanteil n</b>
<b>Erdfeuchte Hochschüttung</b>	$n = 0.89 \cdot \left( \frac{\left( \frac{q_c}{\sigma_{v,R}} \right)^{0.284}}{R_f^{0.244}} \right)^{-0.498}$
<b>Wassergesättigte Hochschüttung</b>	$n = 0.653 \cdot \left( \frac{\left( \frac{q_c}{\sigma_{v,R}} \right)^{0.472}}{R_f^{0.212}} \right)^{-0.16}$

<b>Wassergesättigte Tiefschüttung</b>	$n = 0.528 \cdot \left( \frac{\left( \frac{q_c}{\sigma_{v,R}} \right)^{0.327}}{R_f^{0.216}} \right)^{-0.143}$
<b>Korrelationskoeffizient (gesamt)</b>	<b>K = 0.69</b>

Tabelle 7.4: Korrelationsbeziehungen für Porenanteil

Unter Verwendung der in Tabelle 7.1 aufgeführten Sondierungen, sowie den in den Tabellen 7.2 bis 7.4 beschriebenen Korrelationsbeziehungen wurden für einen 130 m langen Abschnitt des Dammes Tiefschnitte für  $q_c$ ,  $R_f$ , FKA,  $\rho$  und  $n$  erstellt.

Aufgrund der hohen Informationsdichte liefern die Tiefschnitte ein realitätsnahes Abbild des Untergrundes. Sie ermöglichen eine detaillierte Bewertung der erreichten Verdichtung anhand der genannten Parameter. Die Ansatzpunkte der Sondierungen sind in den Abbildungen gekennzeichnet.

Abbildung 7.1 zeigt die Spitzenwiderstandsverteilung für den genannten Bereich des Profils 2. Die Arbeitsebene, welche die Grenze zwischen Hoch- und Tiefschüttung darstellt und die Lage des Liegenden sind deutlich erkennbar. Die roten Buchstaben Q kennzeichnen die annähernde Lage der Sprengladungen, die weißen senkrechten Linien markieren die zum Berechnen der Verteilung verwendeten Sondierungen.

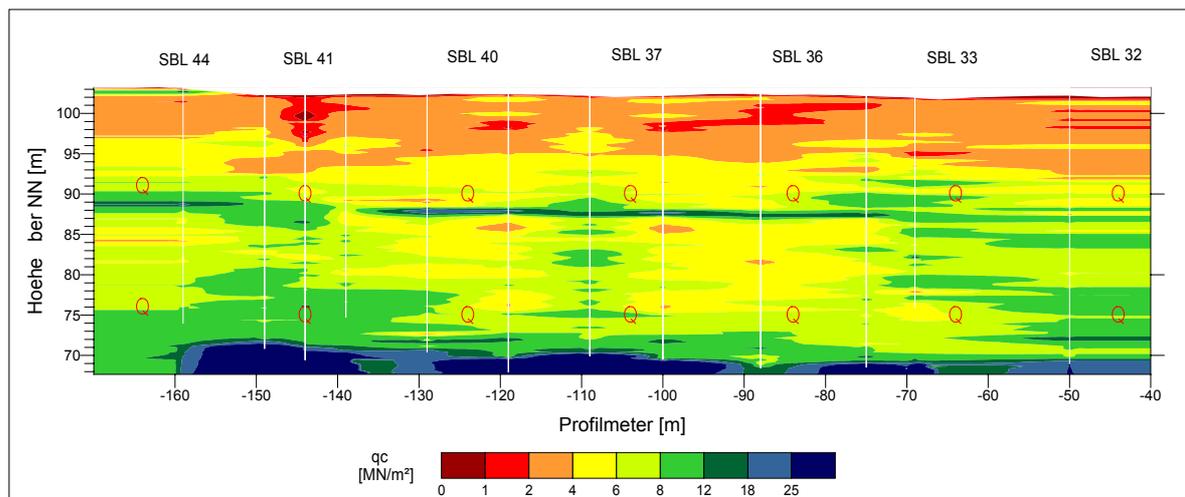


Abb. 7.1: Spitzenwiderstandsverteilung auf Messprofil 2; SPV-Damm

In Abbildung 7.2 ist das Höhenprofil mit den Sondieransatzpunkten nach dem Sprengen abgebildet.

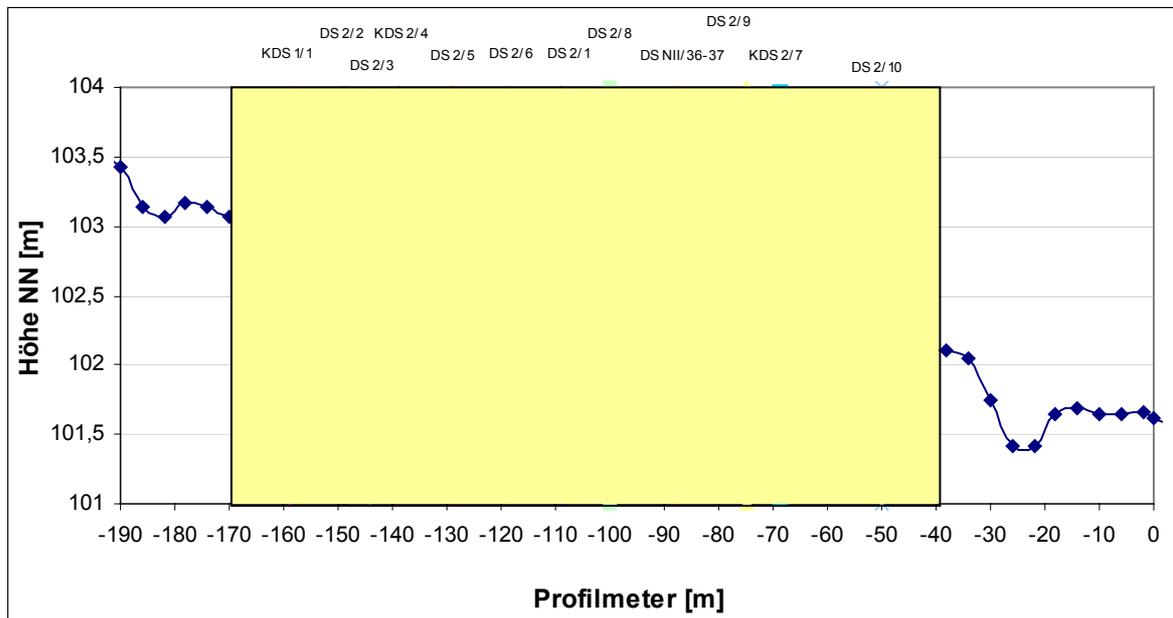


Abb. 7.2: Höhenprofil Messprofil 2

Es ist deutlich zu erkennen, dass eine signifikante Erhöhung des Spitzenwiderstandes im Bereich der Sprengladungen, jedoch nur alle 40 m, also bei jedem zweiten Bohrloch (ca. bei Profilmeter 65, 105 und 145), auftritt. Dagegen ist insbesondere bei den Sprengpunkten SBL 36, 40 und 44 (bei ca. 85 und 125 m) die Wirkung der Sprengung nicht durch eine deutliche Spitzenwiderstandssteigerung erkennbar. Diese Tatsache wird zusätzlich durch das Höhenprofil bestätigt. Es weist ebenfalls an den Bohrlöchern 33, 37 und 41 stärkere Oberflächenabsenkungen infolge der Sprengungen auf, bei den Bohrlöchern 36 und 40 jedoch geringere Setzungsbeträge.

Diese scheinbar regelmäßige Struktur hat ihre Ursache nicht in verschiedenen Sprengparametern bzw. der Reihenfolge der Sprengungen. Alle Sprengungen wurden als Gruppensprengungen durchgeführt, wobei die SBL 36 und 37 sowie 40 und 41 jeweils zu einer 3-er Gruppe gehörten. Die Ladungsmengen waren ebenfalls gleich (10 kg obere Teilladung; 20 kg untere Teilladung), mit Ausnahme des SBL 33, wo die untere Teilladung 25 kg betrug. Der Fortschritt der Sprengtrasse erfolgte mit aufsteigender Bohrlochnummer. Das heißt, die geringere Verdichtungswirkung der genannten Sprengungen könnte dadurch begründet sein, dass diese SBL bei der Sprengung bereits einen benachbarten verdichteten Bereich hatten. Die dadurch vorhandene Teilstabilisierung führte möglicherweise dazu, dass das Korngefüge in der Umgebung der betreffenden SBL mit den verwendeten Ladungsmengen nicht in gleicher Weise aufgebrochen wurde, wie es in unbeeinflusster Kippe der Fall gewesen wäre. Eine weitere mögliche Ursache könnten Materialunterschiede sein. Wie in den Abbildungen 7.3 und 7.4 erkennbar ist,

weisen die geringer verdichteten Bereiche teilweise ein größeres Reibungsverhältnis bzw. einen höheren Feinkornanteil auf.

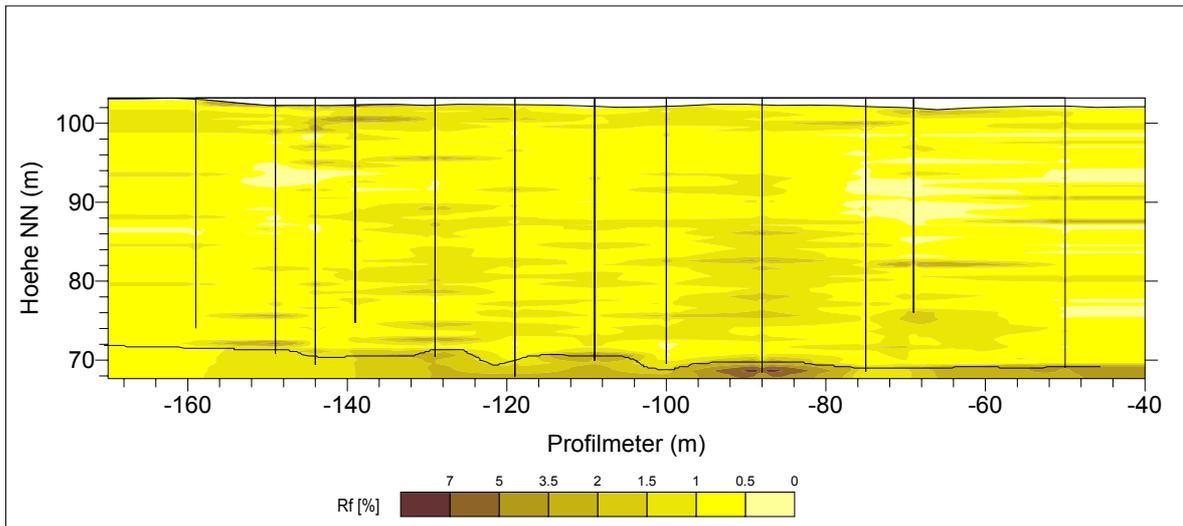


Abb. 7.3: Verteilung des Reibungsverhältnisses auf Messprofil 2

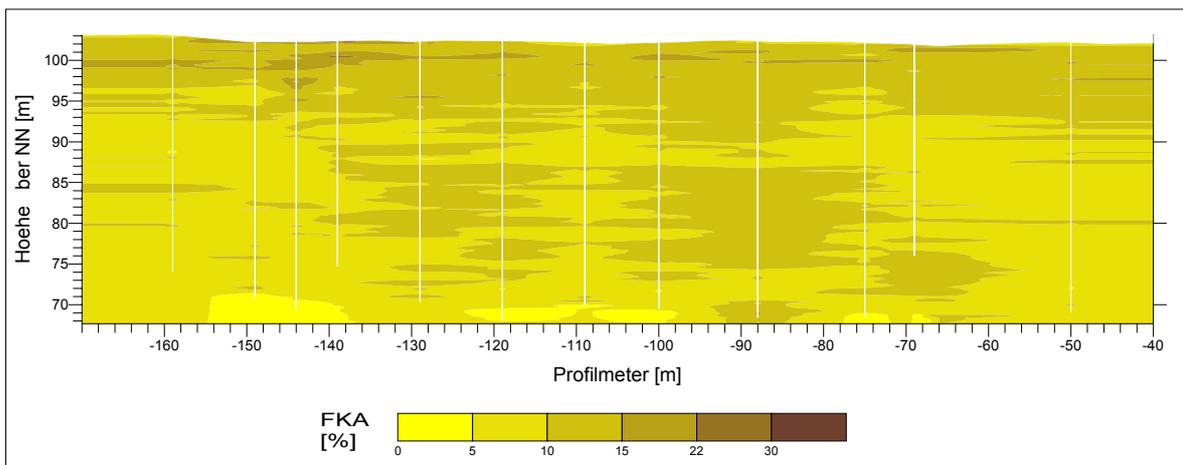


Abb. 7.4: Feinkornanteilverteilung Messprofil 2

Die Bewertung der Festigkeit des Materials im versteckten Damm erfolgt letztlich über Beziehungen der Festigkeitsparameter zu den bodenphysikalischen Parametern Dichte, Porenanteil bzw. Trockendichte. Da die Berechnung von  $\rho$  und  $n$  aus den Drucksondierergebnissen mit Hilfe der ermittelten Korrelationen mit guter Qualität möglich ist, können für diese Parameter ebenfalls flächendeckende Abbildungen gezeichnet werden (Abb. 7.5: Dichte; Abb. 7.6 bzw. 7.7: Porenanteil), auf deren Grundlage schließlich über im Labor zu ermittelnde Abhängigkeiten die zur Berechnung von Standsicherheiten erforderlichen Festigkeiten bestimmt werden können.

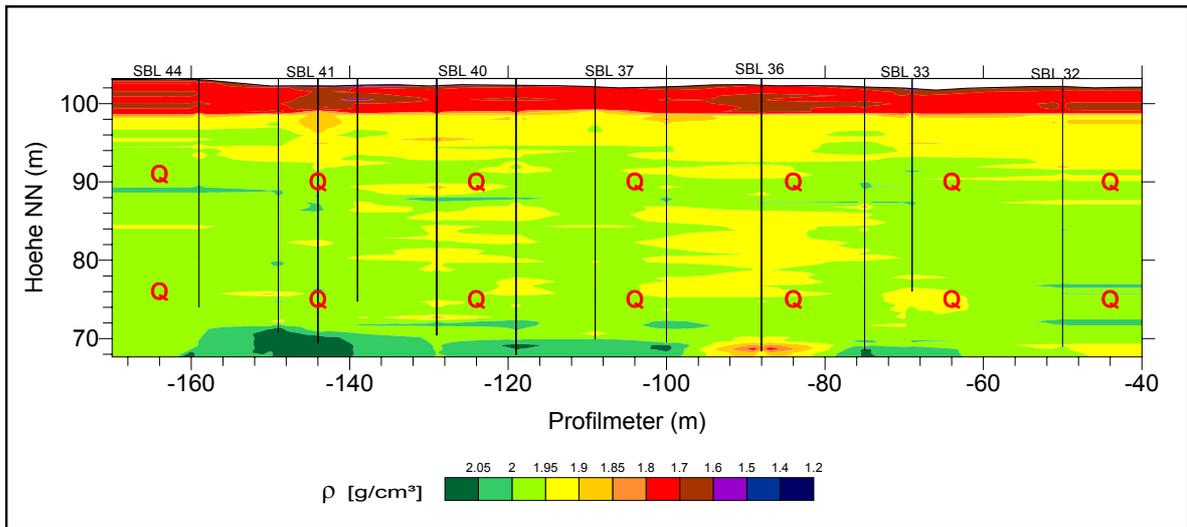


Abb. 7.5: Dichteverteilung Messprofil 2

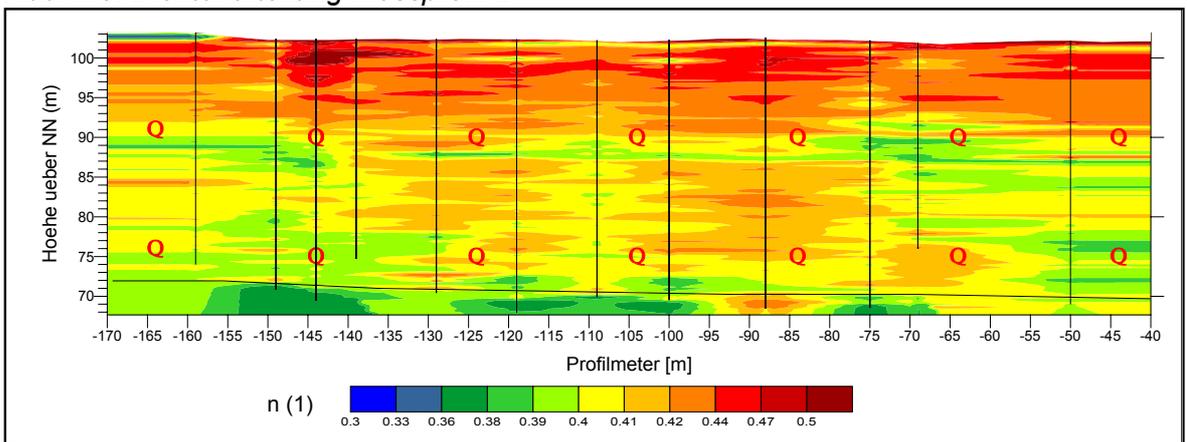


Abb. 7.6: Beispiel für flächendeckendes Bild der Porenanteilverteilung mit feiner Skalierung

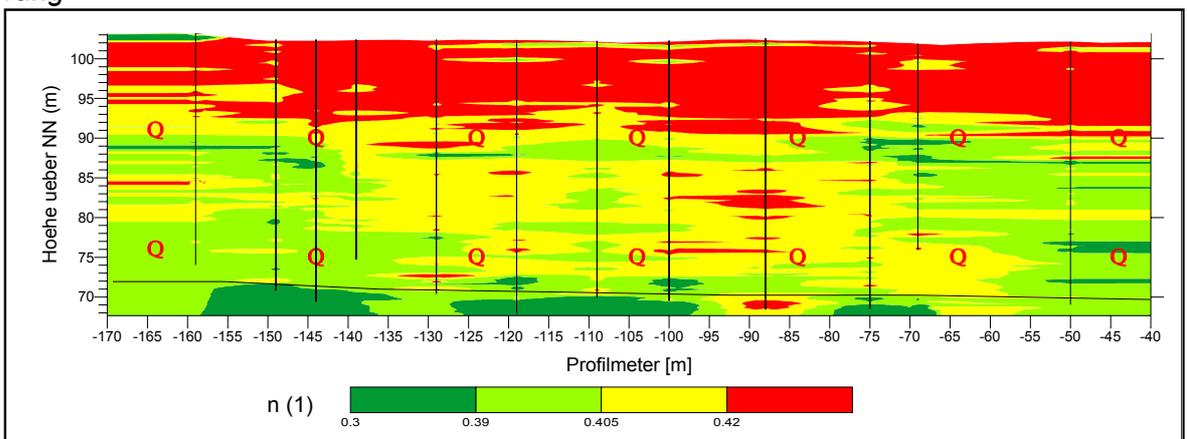


Abb. 7.7: Porenanteilverteilung mit grober Skalierung

Qualitativ zeigt sich in den 3 oben abgebildeten Verteilungen ein ähnliches Bild wie in der  $q_c$ -Verteilung.

Die Farbskalierung sollte dem Ziel der Darstellung angepasst sein. Eine zu feine farbliche Abstufung ist in vielen Fällen nicht günstig, da so ein sehr fein gegliedertes Bild entsteht, wodurch die weitere Verwendung (z. B. zur Wahl der Parameter in Standsicherheitsberechnungen) erschwert wird. Oft ist nur von Interesse, ob ein Parameter ober- oder unterhalb bestimmter Grenzwerte liegt. Es reicht demnach oft eine farbliche Skalierung in 4 – 6 Abstufungen. Abbildung 7.7 zeigt das gleiche Profil auf einem Sprengdamm wie in Abbildung 7.6. nur mit einer auf 4 Porenanteilklassen reduzierten Farbskalierung. Dies erleichtert die Abgrenzung von Homogenbereichen, denen gleiche Festigkeitseigenschaften zugeordnet werden können.

### 7.3 Ersatzprofile

Existieren längs der Profile, für welche Tiefenschnitte gezeichnet werden sollen, keine ausreichende Zahl von Sondierungen, so dass der Abstand zwischen benachbarten Sondierungen größer als der aus statistischer Sicht maximal zulässige ist, müssten weitere Sondierungen durchgeführt werden. Ist das nicht möglich, kann die Informationsdichte innerhalb der Profile durch die Bildung von Ersatzprofilen gesteigert werden.

Unter der Annahme, dass ein Profilschnitt in der Regel repräsentativ für einen bestimmten Untersuchungsbereich sein soll, werden alle Sondierungen, die innerhalb dieses Bereiches existieren auf das Profil, für welches die Tiefenschnitte erstellt werden sollen, projiziert. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass mehr Sondierungen in die Darstellungen einbezogen werden können. Außerdem entsteht nahezu kein Informationsverlust innerhalb des zu repräsentierenden Abschnittes. Auf diese Weise fließen alle verfügbaren Informationen in die nachfolgenden Betrachtungen und Berechnungen ein. Das Ersatzprofil repräsentiert die Verhältnisse innerhalb des Bereiches umfassender als ein exaktes Profil, da auf diesem die Sondierungen des gesamten zu betrachtenden Untersuchungsabschnittes vereint sind. Nachteil der Ersatzprofile ist dagegen, dass das Profil in der dargestellten Form nicht real existiert. Es ist vielmehr die auf eine Fläche projizierte vereinfachte Darstellung der räumlichen Verteilung des jeweiligen Lockergesteinsparameters. Abbildung 7.8 verdeutlicht die Vorgehensweise anhand eines Kartenausschnittes eines Dammabschnittes. Die über die Sektoren C und C1 verteilten Sondierungen werden auf das Ersatzprofil C/C1 im rechten Winkel projiziert (violette Linien).

Die Verwendung von Ersatzprofilen ist jedoch nur als ein Hilfsmittel bei unzureichender Datendichte innerhalb des interessierenden Profilschnittes zu betrachten. Sollte die Möglichkeit bestehen, durch zusätzliche Sondierungen in einem realen

Profil die erforderliche Informationsdichte zu erreichen, so ist dies Ersatzprofilen vorzuziehen.

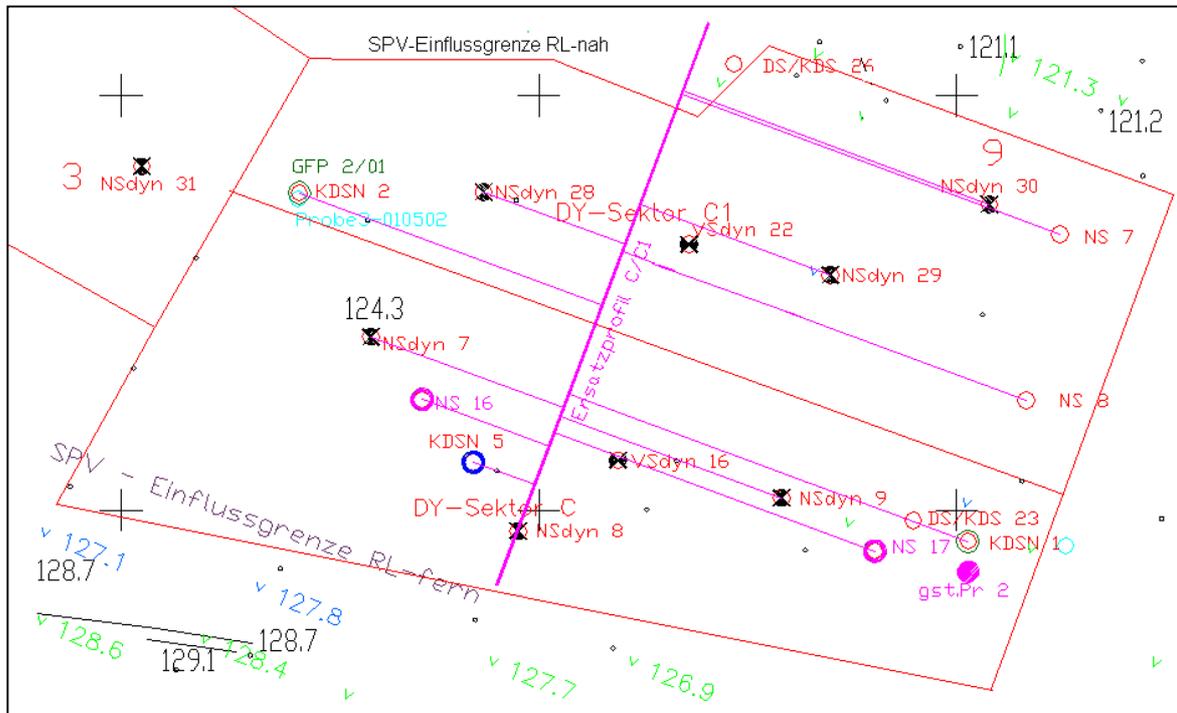


Abb. 7.8: Erstellen eines Ersatzprofils

## 7.4 Räumliche (dreidimensionale) Darstellungen

Bei der Berechnung und Darstellung von räumlichen Parameterverteilungen ist zu beachten, dass der Zusammenhang zwischen benachbarten Messpunkten in den verschiedenen Richtungen unterschiedlich stark ausgeprägt sein kann. Das heißt, der zulässige Maximalabstand zwischen Datenpunkten, um mit statistischen Verfahren zwischen diesen zu interpolieren, kann abhängig von der Richtung variieren. Dies könnte z. B., wie bereits in Kapitel 6 diskutiert, bei einem im Rahmen der Sanierung von setzungsfließgefährdeten Tagebaukippen mit Sprengverdichtung hergestellten versteckten Damm der Fall sein. Während man in uferparalleler Richtung innerhalb einer Sprengreihe oft gleiche Ladungsmengen einsetzte, wurden diese in Richtung Ufer in der Regel deutlich reduziert, um ungewollte Setzungsfließrutschungen zu vermeiden. Das hat zur Folge, dass sich die Untergrundeigenschaften (Dichte, Porenanteil, Spitzenwiderstand) uferparallel weniger stark ändern als senkrecht zum Ufer. Somit sind in letzterem Fall geringere Abstände zwischen den Aufschlusspunkten erforderlich, zwischen denen mit geostatistischen Verfahren interpoliert wird, als uferparallel. Ebenso sind in gewachsenen Böden richtungsabhängig unterschiedliche Gradienten der Parametervarianz möglich.

Sind die Voraussetzungen erfüllt, kann die Berechnung der räumlichen Verteilung mit entsprechender Software analog der zweidimensionalen Berechnung erfolgen. Bei Beachtung der statistisch zulässigen Höchstabstände zwischen Datenpunkten ist die Aussagegenauigkeit der räumlichen Verteilungen gleich der von flächenhaften Verteilungen.

Der wesentliche Vorteil einer räumlichen Bestimmung der Parameterverteilung besteht darin, mit entsprechenden 3D-Interpolations- und Visualisierungsprogrammen (z. B. ROCKWORKS 2002 oder SLICER DICER) praktisch jeden beliebigen Schnitt durch das Untersuchungsgebiet betrachten zu können und somit eine detailliertere Aussage zu erhalten.

Das in Abbildung 7.9 dargestellte Beispiel zeigt die räumliche Verteilung des Spitzenwiderstandes eines größeren Abschnittes des bereits in den Beispielen der beiden vorangegangenen Kapiteln beschriebenen, durch Sprengverdichtung hergestellten versteckten Dammes auf der Innenkippe Koschen.

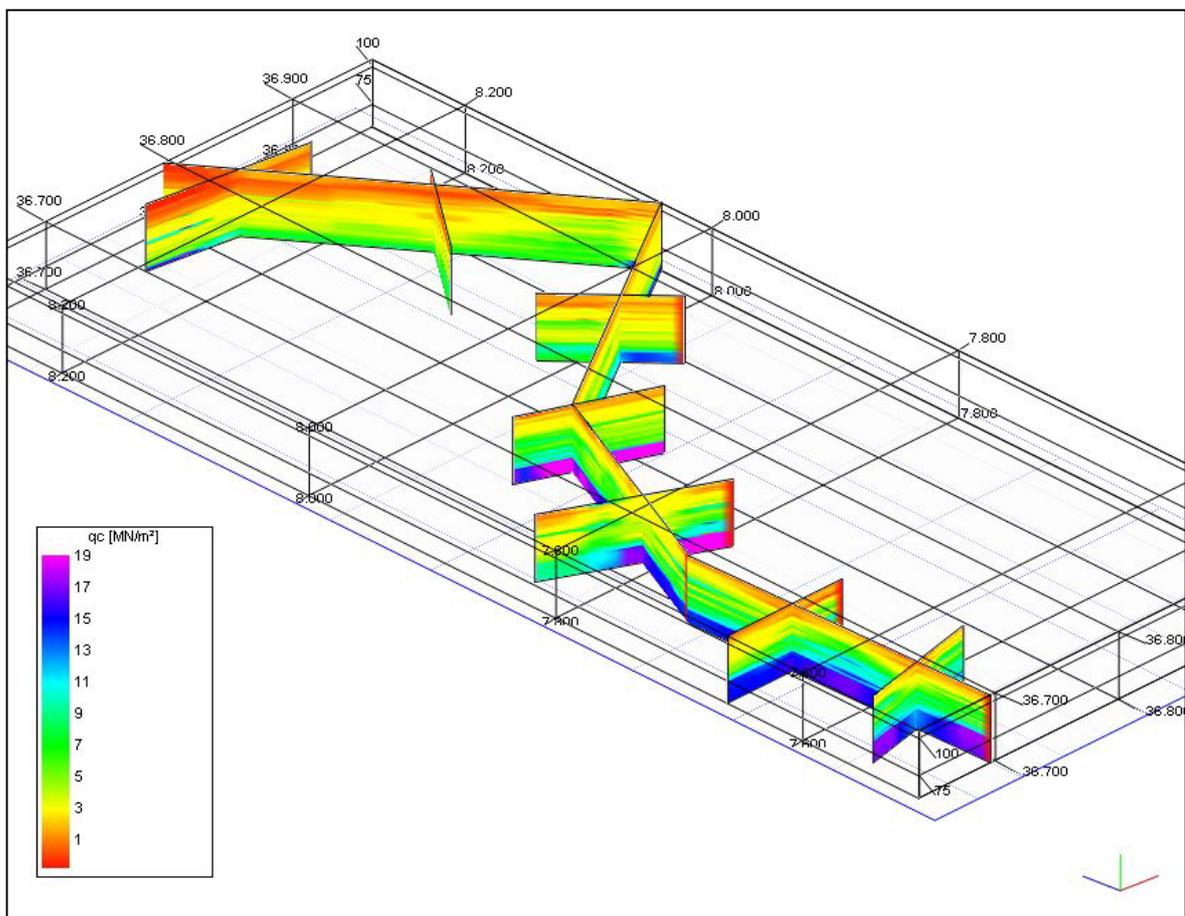


Abb. 7.9: Beispiel für räumliche Darstellung von Parametern (hier Spitzenwiderstand)

Die zum Darstellen des 3-D-Modells verwendeten Sondierungen entsprechen somit den in Anlage 6.2 aufgeführten und in Abbildung 6.4 dargestellten Druck- und radiometrischen Kombinationsdrucksondierungen.

Der Längsschnitt der 3-D-Abbildung verläuft etwa in der Mitte der Verdichtungs-trasse, die 7 Querschnitte zeigen die Verteilung des Spitzenwiderstands annähernd senkrecht zum versteckten Damm in zuvor ausgewählten Profilen. Innerhalb der Modellgrenzen kann jeder beliebige Schnitt dargestellt werden.

Man erkennt in den 4 Schnitten im Vordergrund deutlich die Liegendgrenze sowie Differenzierungen im Spitzenwiderstand innerhalb der gekippten Schicht, welche durch die Wirkung des Sprengens zu erklären sind. In einigen Schnitten ist am rechten Rand der Übergang zum unverdichteten Bereich erkennbar. Die hinteren Schnitte sind durch allgemein geringere Spitzenwiderstände und eine größere Kippenmächtigkeit gekennzeichnet.

Mit Hilfe der Korrelationsbeziehungen zur Berechnung der Parameter Dichte, Porosität und Feinkornanteil aus Drucksondierergebnissen können entsprechende Modelle ebenfalls für diese Parameter dargestellt werden.

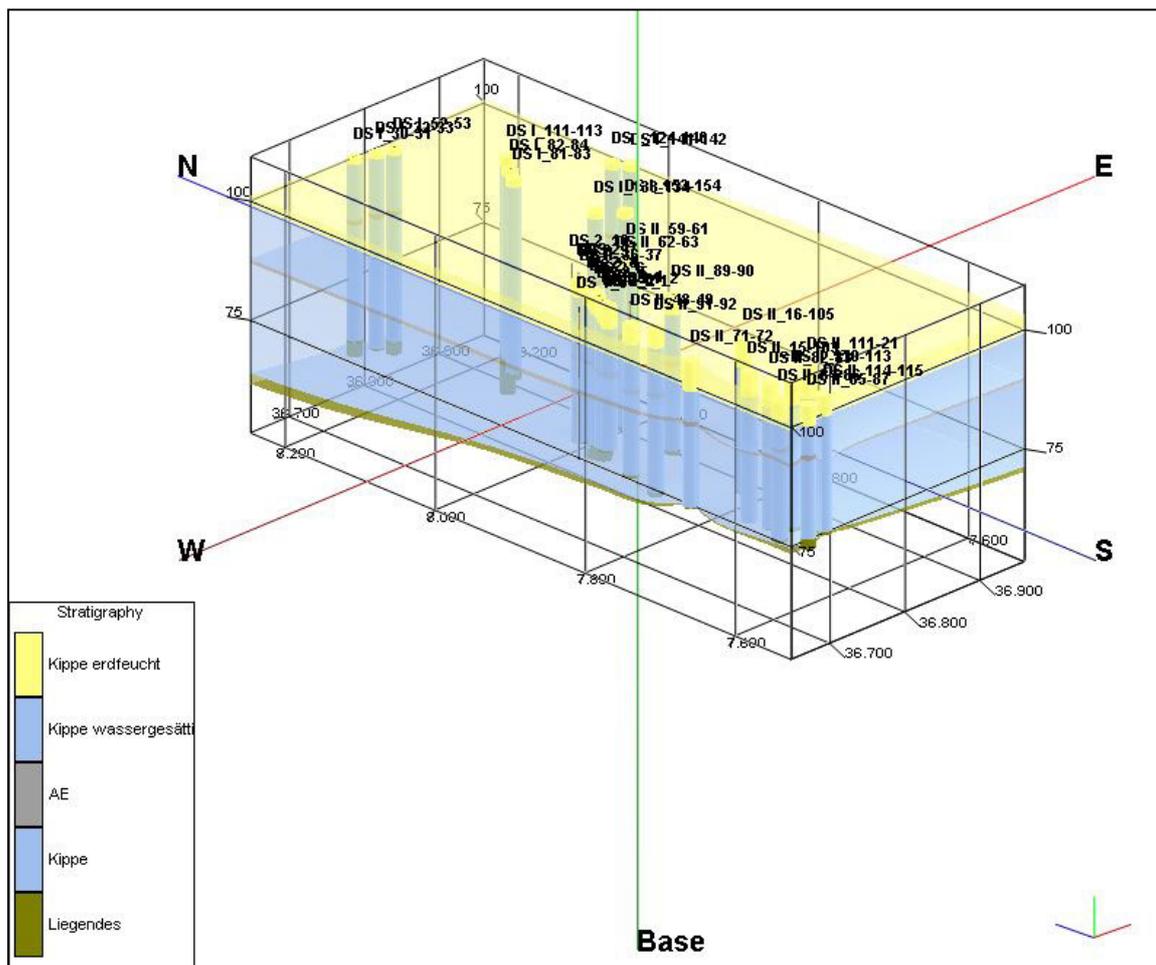


Abb. 7.10: Stratigrafisches Modell des Dammschnittes auf der Innenkippe Koschen

Abbildung 7.10 zeigt ein einfaches stratigrafisches Modell des Dammabschnittes. Mit Hilfe solcher Modelle lassen sich Kippenaufbau oder die Verteilung der Sondierungen besser wiedergeben. Die Säulen stellen die Sondierungen dar. Neben der erdfeuchten und der wassergesättigten Kippe sind außerdem die Lage einer Arbeitsebene und des Liegenden erkennbar. Das Bild ist in z-Richtung (vertikal) 10-fach überhöht gezeichnet. Im Modell wird deutlich die Zunahme der Kippmächtigkeit in Richtung Norden (N) sichtbar.

Die Darstellung von Lockergesteinsparametern bzw. geotechnischen Messwerten in dreidimensionalen Untergrundmodellen verlangt natürlich im Vergleich zu zweidimensionalen Verteilungen einen deutlich größeren Mess- und Erkundungsaufwand, um die erforderliche Datendichte in alle Raumrichtungen zu gewährleisten. So ist auch in Abbildung 7.9 zu erkennen, dass die äußeren Schnitte aufgrund geringerer Datendichte (vgl. Abb. 7.10) ein weniger differenziertes Bild zeigen als einige Schnitte in der Mitte des Dammabschnittes.

## **8 Anwendungsbeispiel - Flächenhafter Verdichtungsnachweis für die Kippenböschungen des Tagebaurestloches 4 / Seese-West**

In diesem Kapitel soll die Anwendung des Vorgehens zum flächendeckenden Verdichtungsnachweis im Rahmen des Abschlussgutachtens für das Tagebaurestloch 4 in Brandenburg vorgestellt werden.

Das Untersuchungsobjekt Restloch 4 (Schönfelder See) ist in Anlage 8.1 dargestellt. Der Lageplan zeigt die Begrenzung des versteckten Dammes, die Profillinien für die Standsicherheitsberechnungen der Kippenböschungen sowie alle Sondieransatzpunkte auf dem versteckten Damm.

Das als Schönfelder See bezeichnete Restloch 4 des ehemaligen Tagebaues Seese-West befindet sich unmittelbar neben der Bundesautobahn BAB 13 in der Nähe der Ortschaften Schönfeld, Bathow und Kittlitz. Das Restloch 4 wird im Westen durch gewachsene Böschungen und im Norden durch die ehemalige Kohlebahnausfahrt begrenzt. Die östliche und südliche Restlochbegrenzung sind Kippenböschungen. Die geotechnische Sanierung des Restloches ist abgeschlossen. Entlang der Kippenböschung des Restsees wurde mittels Verdichtung durch Sprengungen und den Einsatz eines Tiefenrüttlers ein (80 ... 100) m breiter und (30 ... 50) m tiefer, nicht verflüssigungsfähiger Stützkörper (versteckter Damm) geschaffen. Der Endwasserstand von +53 m ü. NN ist erreicht. Der Abschlussbetriebsplan sieht als Folgenutzung eine Kombination von Erholungssee mit Landschafts- und Naturschutz vor. Eine Voraussetzung für die Beendigung der Bergaufsicht ist das im Auftrag der LMBV mbH angefertigte Abschlussgutachten, in welchem der o. g. Algorithmus für den flächendeckenden Verdichtungsnachweis erstmals angewandt wurde. Die in diesem Beispiel dargestellten Ergebnisse beziehen sich nur auf die Kippenböschungen des Restloches.

Neben der intensiven Auswertung der durchgeführten Sondierungen sind auch weitere Verfahren zum flächendeckenden Ermitteln der Lockergesteinsparameter genutzt worden. Diese Teiluntersuchungen, wie z. B. die seismischen Messungen, werden, da sie das Thema der vorliegenden Arbeit nicht berühren, im Folgenden unberücksichtigt gelassen.

### **8.1 Prinzip des flächendeckenden Nachweises / Grundlagen**

Der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Algorithmus, Korrelationsbeziehungen zum Berechnen der Lockergesteinsparameter Dichte, Porenanteil und Feinkornanteil aus Drucksondiererergebnissen aufzustellen, ist ein wesentlicher Bestandteil des flächendeckenden Verdichtungsnachweises zur Bewertung der erreichten Verdichtung im Rahmen der Sanierung von Abraumkippen ehemaliger Braunkohlentagebaue in der Lausitz und in Mitteldeutschland. Auf der Grundlage

der Ergebnisse des flächendeckenden Verdichtungsnachweises werden die erforderlichen Haupt- und Abschlussgutachten erarbeitet.

Die Qualität der Abschlussgutachten für sanierte Tagebaukippen hängt entscheidend von der Qualität der Eingangsparameter ab. Deshalb ist es erforderlich, die Verteilung der festigkeitsbestimmenden material- und zustandsbeschreibenden Kennzahlen (mbKZ, zbKZ) des Kippenmaterials mit der für den Nachweis der Stabilität notwendigen Genauigkeit zu ermitteln. Im Idealfall sind die Kennzahlen als Funktion des Ortes zu ermitteln:

$$mbKZ, zbKZ = f(x, y, z).$$

Allerdings ist es wirtschaftlich weder möglich noch erforderlich, die mbKZ und zbKZ für jeden beliebigen Punkt innerhalb der zu untersuchenden Kippe zu bestimmen. Meist ist es ausreichend, die gesuchten Parameter in repräsentativen Tiefenschnitten (senkrecht im Raum stehenden *Flächen*, von der Geländeoberfläche bis zum Liegenden reichend) zu bestimmen. Die gefundenen Ergebnisse können dann innerhalb einer Grundgesamtheit durch Analogieschlüsse auf die übrige Kippe übertragen werden.

Der „flächendeckende Verdichtungsnachweis“ liefert die Basis für nachfolgende Analysen und Bewertungen, indem durch Verbinden von bodenphysikalischen Labor- und geotechnischen Felduntersuchungen mit großflächig einsetzbaren geophysikalischen Messmethoden ein geschlossenes *flächenhaftes* Abbild der Eigenschaften der Kippe in ausgewählten Schnitten des Kippenabschnittes geschaffen wird.

Der in [LMBV 2002] vorgestellte Algorithmus des flächenhaften Verdichtungsnachweises gliedert sich in 3 Schritte (siehe Nachweisschema in Anlage 8.2):

1. Ermittlung der Materialverteilung und der die Standsicherheit gewährleistenden Werte für die Dichte bzw. den Porenanteil ( $\rho_{\text{erf}}$ ,  $\rho_{\text{d,erf}}$  oder  $n_{\text{erf}}$ )
2. Ermitteln der Verteilung der die Festigkeit charakterisierenden zustandsbeschreibenden Kennzahlen nach Abschluss der Verdichtungsmaßnahmen in ausgewählten repräsentativen Schnitten und Zuordnen von Festigkeitswerten. Anschließend Übertragen der Ergebnisse auf der Grundlage begründeter Annahmen (basierend auf der Kenntnis der geologischen Verhältnisse, der Verdichtungstechnologie, von Setzungsmessungen etc.) auf Bereiche der Kippe, die nicht detailliert untersucht wurden und Vergleich mit den in Punkt 1 bestimmten erforderlichen Werten
3. Standsicherheitsuntersuchung

Das Schema in Anlage 8.2 zeigt die wesentlichen Schritte des Nachweisalgorithmus. Die Reihenfolge der Arbeitsschritte ist nicht zwingend, das Schema verdeut-

licht vielmehr den logischen Zusammenhang zwischen den einzelnen Teilschritten des Verfahrens.

## 8.2 Bestimmen der Materialklassen

In einem ersten Untersuchungsschritt wird die Kippe bezüglich der anstehenden Lockergesteinsmaterialien untersucht.

Ausgehend von den Informationen zur Kippenentstehung und –sanierung ist eine horizontale Unterteilung der Kippe in Bereiche mit unterschiedlichen Materialien im dargestellten Beispiel nicht erforderlich. Gemäß [LMBV 2002] wird der Feinkornanteil als Kriterium für die Zuordnung zu Materialklassen verwendet. Während der Sanierung wurden 7 radiometrische Kombinationsdrucksondierungen niedergebracht. Die dabei ermittelten Feinkornanteilverteilungen standen zur Verfügung und wurden weiter untersucht.

Abbildung 8.1 zeigt die Häufigkeitsverteilungen des Feinkornanteiles der einzelnen radiometrischen Sondierungen. Obwohl weitestgehend von homogenen Materialverhältnissen (überwiegend Seeser Sande) ausgegangen werden kann, unterscheiden sich die FKA-Häufigkeitsverteilungen der 7 KDS zum Teil sehr. Die Tatsache, dass die mit Hilfe der KDS ermittelten Feinkornanteile teilweise deutlich über den laborativ ermittelten Werten liegen, hat seine Ursache offensichtlich im sehr hohen Feinsandanteil ( $0,063 \text{ mm} < d < 0,2 \text{ mm}$ ).

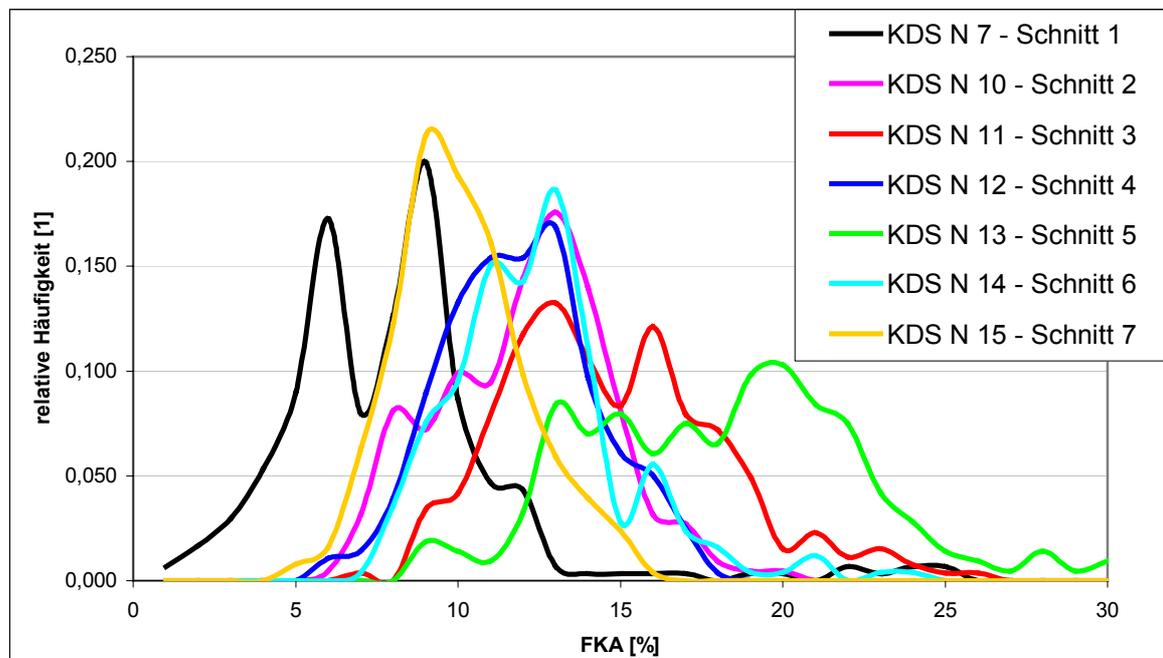


Abb. 8.1: Häufigkeitsverteilungen des Feinkornanteils der KDS

Die oberflächenaktive Wirkung (Gammastrahlung) der feinen Bestandteile des Lockergesteins ist nicht ausschließlich auf die Tone beschränkt. Es sind auch „gröbere“ Fraktionen wirksam [Förster 2002]. Der sehr hohe Feinsandanteil (40 – 50 %) kann daher zu einer Erhöhung der Gammastrahlung, die zum Bestimmen des Feinkornanteils genutzt wird, führen. Außerdem können auch Sande bei bestimmten mineralischen Beimengungen (Monazit, Glaukonit) erhöhte Aktivitäten aufweisen.

Die in Abbildung 8.2 dargestellten Verteilungen der Reibungsverhältnisse der gleichen Sondierungen belegen, dass nahezu ausschließlich Fein- und Mittelsande anstehen.

Die auszuwählenden Materialklassen sollten das Lockergestein des gesamten Untersuchungsgebietes, welches durch die 7 KDS repräsentiert wird, charakterisieren können, um später die Ergebnisse von Festigkeitsuntersuchungen übertragen zu können. Zu diesem Zweck wurden die Ergebnisse der 7 KDS zusammengefasst.

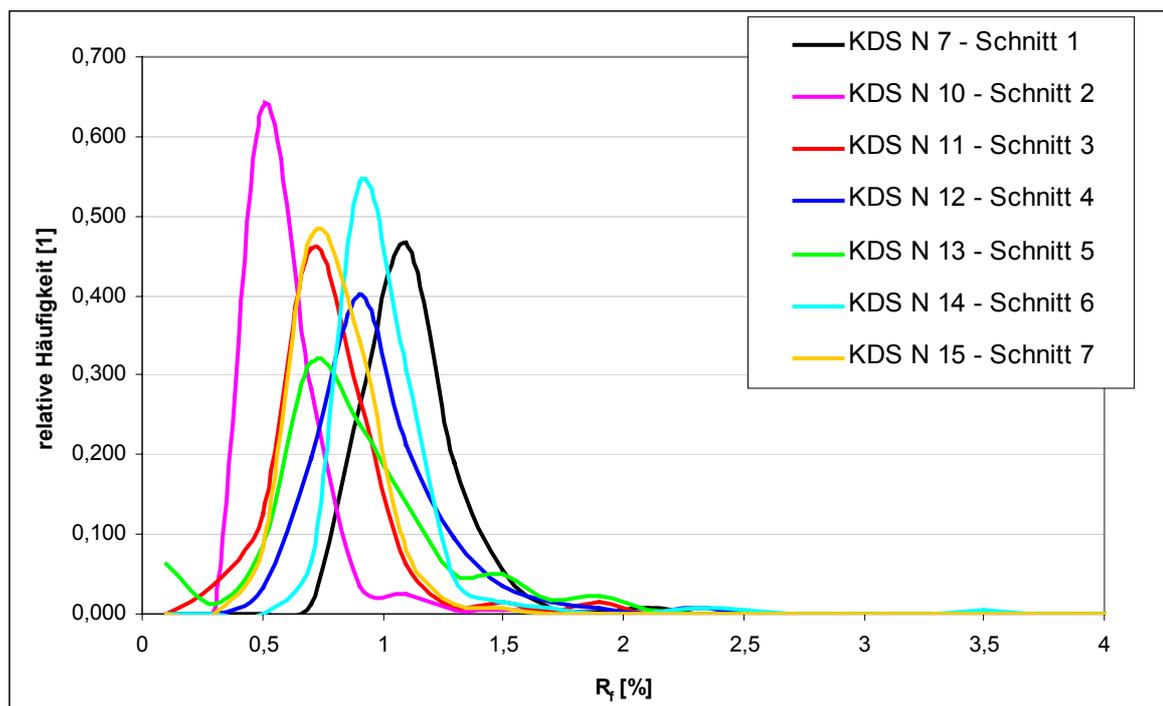


Abb. 8.2:  $R_f$ -Häufigkeitsverteilungen

Abbildung 8.3 zeigt die aus den 7 KDS gemittelte relative Häufigkeitsverteilung des Feinkornanteiles. Der Mittelwert der Verteilung liegt ca. bei 11 % FKA. Das würde einer zentralen Materialklasse (MK) mit einem Feinkornanteil  $7\% < \text{FKA} <$

14 % entsprechen. Die laborativ bestimmten Feinkornanteile (durch die Firmen FCB, GMB bzw. die TU BA Freiberg) liegen zumeist im Bereich FKA = (3 ... 7)%.

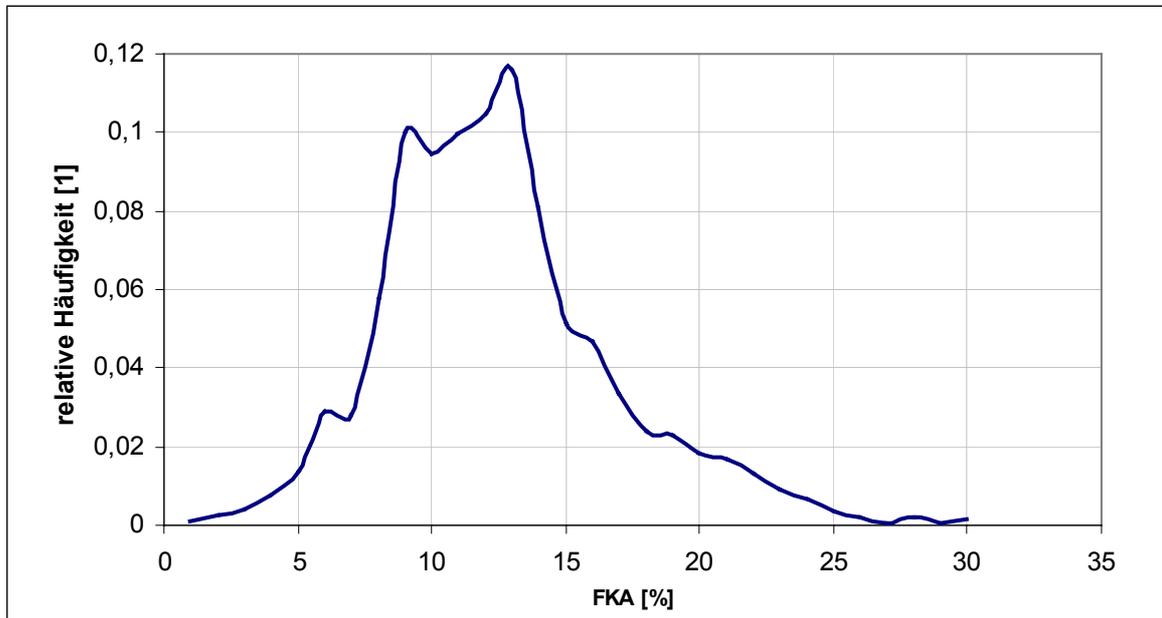


Abb. 8.3: FKA-Verteilung aus allen KDS

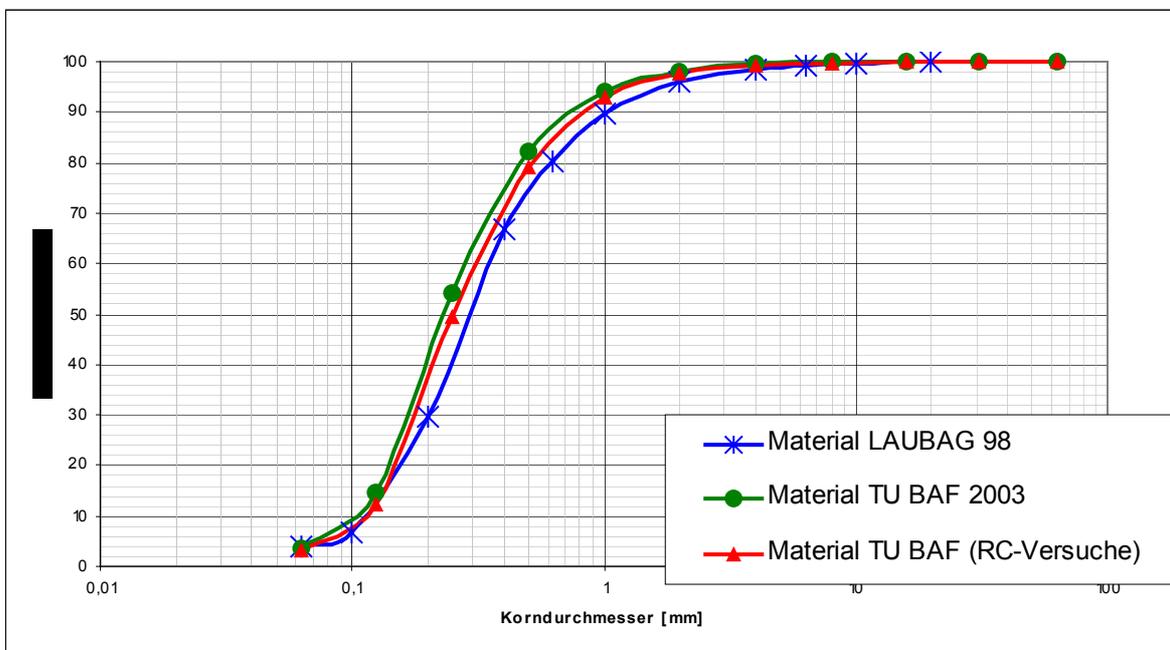


Abb. 8.4: Kornverteilungskurven für Probenmaterial RL 4

Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse wird als relevante Materialklasse insbesondere für die Festigkeitsuntersuchungen das Material MK 1 mit einem Feinkornanteil FKA = (4 – 12) % festgelegt.

Für diese MK existieren Ergebnisse von bodenphysikalischen und Festigkeitsuntersuchungen. Die Kornverteilungskurven aus verschiedenen Probenahmen in Abbildung 8.4 belegen, dass die ausgewählte Materialklasse das anstehende Material charakterisiert.

### 8.3 Auswertung der Sondierungen

#### 8.3.1 Sondierungen im Rahmen des flächenhaften Verdichtungsnachweises

Neben den während und nach den verschiedenen Phasen der Sanierung durchgeführten Sondierungen sind im Rahmen der vorliegenden Untersuchung weitere Druck- und radiometrische Kombinationsdrucksondierungen niedergebracht worden. Diese dienen

- dem abschließenden Bewerten des Sanierungserfolges
- dem Überprüfen der seismischen Messergebnisse und
- dem Schließen von Lücken im Datenbestand zum Erstellen von Tiefenschnitten aus Sondierungen.

Tabelle 8.1 zeigt die Sondierungen und ihre Ansatzpunkte:

Nr.	Bereich / Schnitt	Hochwert	Rechtswert	≈ Teufe [m]
DS N 141	HQ 1	<sup>57</sup> 41 015	<sup>54</sup> 23 791	53
DS N 142	HQ 2	<sup>57</sup> 41 406	<sup>54</sup> 23 927	44
DS N 143	HQ 3	<sup>57</sup> 41 793	<sup>54</sup> 24 173	38
DS N 144	HQ 4	<sup>57</sup> 42 162	<sup>54</sup> 24 270	31
DS N 145	HQ 5	<sup>57</sup> 42 296	<sup>54</sup> 24 468	33
DS N 146	HQ 6	<sup>57</sup> 42 473	<sup>54</sup> 24 796	27
DS N 147	HQ 7	<sup>57</sup> 42 818	<sup>54</sup> 25 094	28
DS N 149	Seismikprofil P1	<sup>57</sup> 41 251.5	<sup>54</sup> 23 833.3	47,1
DS N 150	Seismikprofil P1	<sup>57</sup> 41 298.9	<sup>54</sup> 23 848	45

DS N 151	As-Kopfböschung	<sup>57</sup> 40 870	<sup>54</sup> 23 567	45,6
DS N 152	As-Kopfböschung	<sup>57</sup> 40 890	<sup>54</sup> 23 567	46,3
KDS N 148	Seismikprofil 1	<sup>57</sup> 41 084.6	<sup>54</sup> 23 798.6	19,7

Tabelle 8.1: DS und KDS 2003

Beispielhaft sind die Sondierdiagramme der DS N 143 und KDS N 148 in den Anlagen 8.3 und 8.4 dargestellt.

Die aus den Sondierergebnissen berechneten Mittelwerte der Mess- und Kennwerte können, wie in Tabelle 8.2 dargestellt, zusammengefasst werden. Die Zahlen in Klammern sind lokal auftretende Maximalwerte.

	<b>Spitzenwiderstand</b> <b>q<sub>c</sub> [MN/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Porenanteil</b> <b>n [-]</b>	<b>Dichte</b> <b>ρ [g/cm<sup>3</sup>]</b>
DS N 141- DS N 143	RDV-Bereich: 3 – 5 SPV-Bereich: 8 – 20 (30)	-	-
DS N 144- DS N 147	RDV-Bereich: 5 SPV-Bereich: 8 – 15 (25)	-	-
As-Kopfböschung DS N 151, DS N 152	RDV-Bereich: 2 – 15 (30) SPV-Bereich: 2 – 15	-	-
KDS N 148	RDV-Bereich: 2 – 6 (8) SPV-Bereich: 6 – 11 (17)	0,42 ... 0,46 0,38 ... 0,42	1,9 ... 1,93 1,93 ... 2,01

Tabelle 8.2: Mittlere Ergebnisse der Sondierungen aus Tabelle 8.1

### 8.3.2 Korrelationsbeziehungen

Gemäß der in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten Vorgehensweise sind Korrelationsbeziehungen für den Feinkornanteil und den Porenanteil als die maßgebenden Kennzahlen für den Ansatz von Festigkeitsparametern bestimmt worden. Basis der Berechnungen sind die Ergebnisse der 7 KDS. Nicht alle verfügbaren Kombinationsdrucksondierungen wurden verwendet, da einige KDS teilweise unplausible Ergebnisse (z. T. sehr große gemessene FKA bei Reibungsverhältnissen um 0,5) lieferten. Der Vergleich der Verteilungen des Feinkornanteils und des Reibungsverhältnisses, welche in den Abbildungen 8.1 und 8.2 dargestellt sind, verdeutlicht das.

Für Porenanteil und Feinkornanteil konnten Korrelationen für den gesamten Teufbereich (erdfeuchter und wassergesättigter Bereich) aufgestellt werden. Die Korrelationen für die Dichte wurden getrennt berechnet.

Folgende Beziehungen wurden ermittelt:

#### **Porenanteil (unter GWS)**

$$n = 0,4907 - 9,63 \cdot 10^{-2} \cdot \ln \left( \frac{\left( \frac{q_c}{\sigma'_R} \right)^{0,3}}{R_f^{0,9}} \right)$$

mit  $q_c$  ..... Spitzenwiderstand in MN/m<sup>2</sup>  
 $R_f$  ..... Reibungsverhältnis [%]  
 $\sigma'_R$  ... 1 MN/m<sup>2</sup> - Referenzspannung

#### **Feinkornanteil (über und unter GWS)**

$$FKA = 18,74 - 3,2815 \cdot \ln \left( \frac{\left( \frac{q_c}{\sigma'_R} \right)^{1,1}}{R_f} \right)$$

mit  $q_c$  ... Spitzenwiderstand in MN/m<sup>2</sup>  
 $R_f$  ..... Reibungsverhältnis [%]  
 $\sigma'_R$  ... 1 MN/m<sup>2</sup> - Referenzspannung

#### **Dichte (unter GWS)**

$$\frac{\rho}{\rho_s} = 0,5904 \cdot \left( \frac{\left( \frac{q_c}{\sigma'_R} \right)^{1,469}}{R_f^{0,529}} \right)^{6,055 \cdot 10^{-2}}$$

**Dichte (über GWS)**

$$\frac{\rho}{\rho_s} = 0,6814 \cdot \left( \frac{\left( \frac{q_c}{\sigma'_R} \right)}{R_f} \right)^{5,166 \cdot 10^{-2}}$$

mit  $q_c$  ... Spitzenwiderstand in MN/m<sup>2</sup>

$R_f$  ..... Reibungsverhältnis [%]

$\sigma'_R$  ... 1 MN/m<sup>2</sup> - Referenzspannung

$\rho_s$  ... Korndichte ( $\rho_s = \text{konst.} = 2,65 \text{ g/cm}^3$ ).

Berechnungen unter Berücksichtigung der realen Vertikalspannung ergaben schlechtere Korrelationen. Das wird in verdichteten Bereichen oft beobachtet und ist vermutlich die Folge der Spannungumlagerungen durch die Verdichtungsmaßnahmen. Daher wurde, um die Dimensionsreinheit weiterhin zu gewährleisten, statt der Vertikalspannung  $\sigma'_{v,0}$  eine Referenzspannung  $\sigma'_R$  eingeführt.

Trotz der komplizierten Datenstruktur konnten folgende Korrelationskoeffizienten zwischen KDS-Messwerten und den mit Korrelationsbeziehungen berechneten Kennwerten erreicht werden:

- Porenanteil  $n$  gesamt:  $K \approx 0,72$
- Feinkornanteil FKA:  $K \approx 0,66$
- Dichte  $\rho$  unter GWS:  $K \approx 0,56$
- Dichte  $\rho$  über GWS:  $K \approx 0,69$
- Dichte  $\rho$  gesamt:  $K \approx 0,91$

Die Abbildungen 8.5 a und 8.5 b zeigen Vergleiche zwischen gemessenen und berechneten Kennwerten für Dichte, Porenanteil und Feinkornanteil innerhalb der Messfehlergrenzen für 2 Beispielsondierungen. Dabei wurden die kleineren Messfehlerangaben der KDS für Lockergestein mit weniger als 15 % Feinkornanteil verwendet. Wie bereits zuvor erwähnt, existieren allerdings insbesondere im nördlichen Teil der Kippenböschung (HQ 6 & 7) größere Bereiche mit FKA > 15 %.

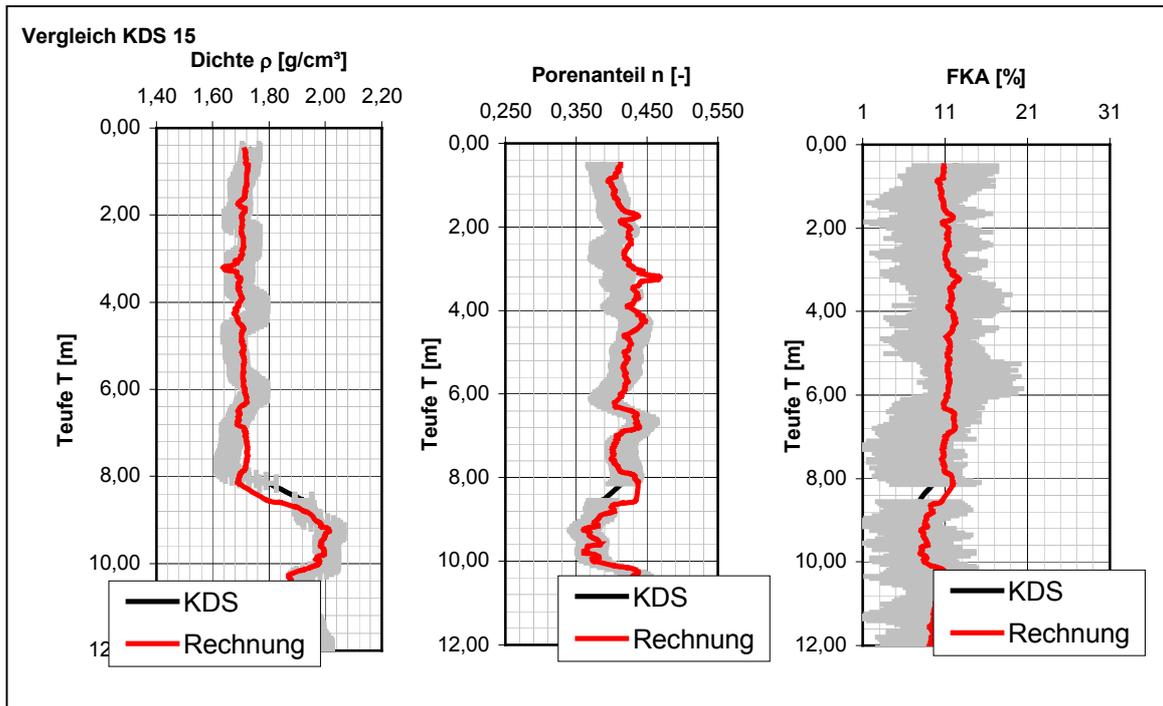


Abb. 8.5 a: Vergleich der KDS-Messwerte mit den berechneten Kennwerten (KDS 14)

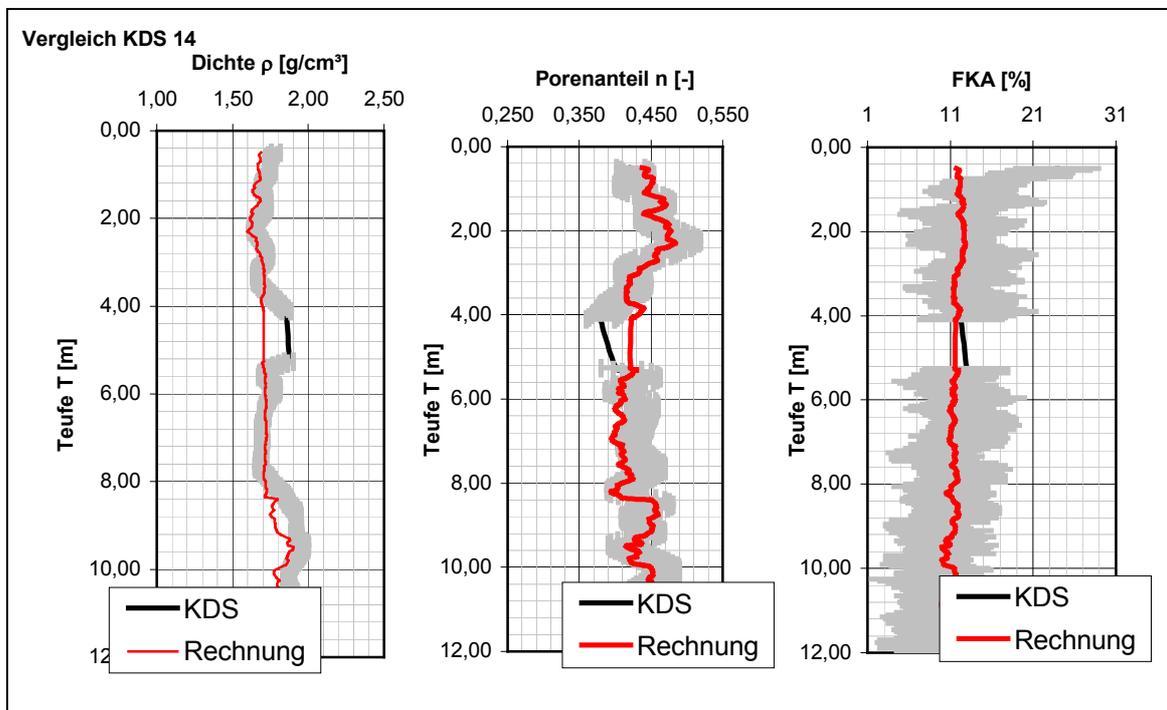


Abb. 8.5 b: Vergleich der KDS-Messwerte mit den berechneten Kennwerten (KDS 15)

Die Korrelationen für den Feinkornanteil ermöglichen es trotz des relativ ungünstigen Korrelationskoeffizienten - die Ursache liegt in der bereits angesprochenen Problematik der  $\gamma$ -Messung - Bereiche mit geringem, mittlerem und hohem Feinkornanteil abzugrenzen, so dass eine Zuordnung der Ergebnisse von Laboruntersuchungen zu entsprechenden Materialien in diesen Bereichen möglich ist. 98 % der berechneten FKA-Werte liegen innerhalb der KDS-Fehlergrenzen von  $FKA \pm 5\%$ .

Da der Bestimmung des Porenanteils hinsichtlich des Bewertens der Festigkeitseigenschaften die größte Bedeutung zukommt, sind die aus den Korrelationsbeziehungen berechneten Porenanteile statistisch ausgewertet worden, um die Güte der Korrelationen besser bewerten zu können. Abbildung 8.6 zeigt die Verteilung der Porenanteildifferenzen zwischen KDS-Messwerten und berechneten Porenanteilen.

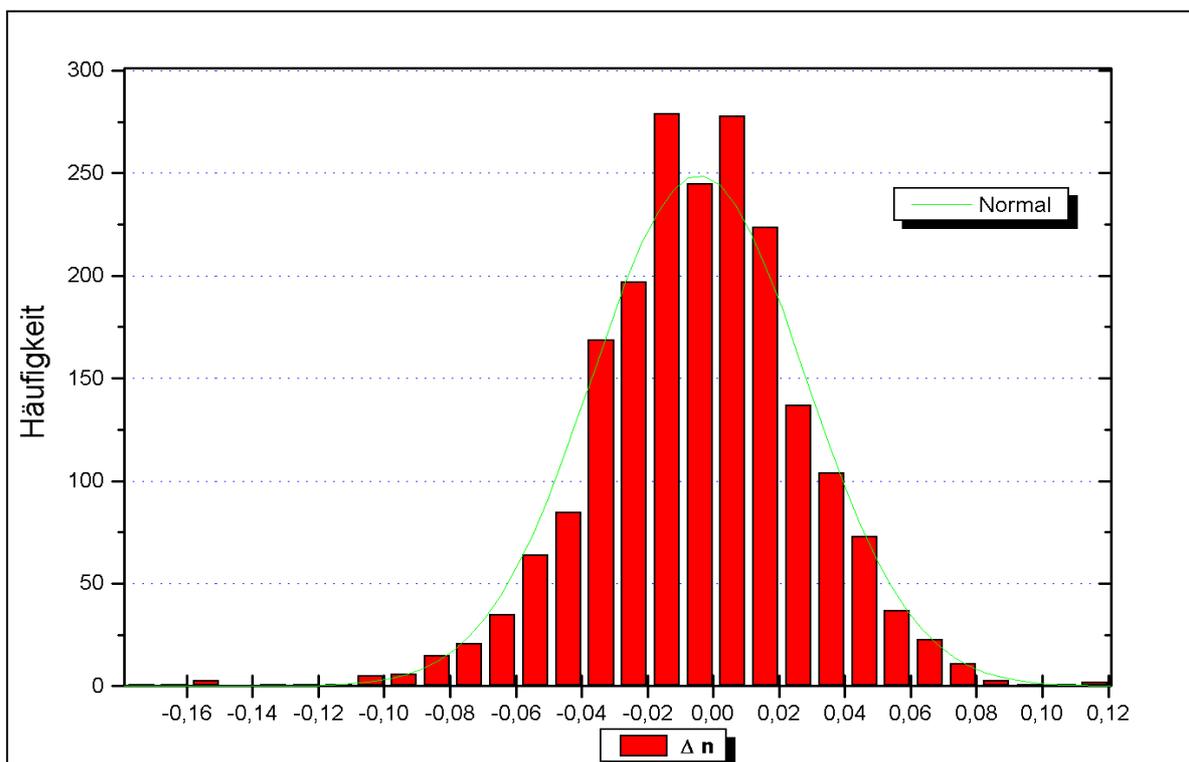


Abb. 8.6: Fehlerverteilung des berechneten Porenanteils

Die zugehörigen statistischen Maßzahlen der Verteilung sind in Tabelle 8.3 aufgeführt:

<b>Mittelwert</b>	0
<b>Standardabweichung</b>	0,03
<b>Median</b>	0

<b>Werte innerhalb KDS-Fehlergrenzen für FKA &lt; 15 % (<math>\Delta n \pm 0,02</math>)</b>	60 %
<b>Werte innerhalb KDS-Fehlergrenzen für FKA &gt; 15 % (<math>\Delta n \pm 0,04</math>)</b>	84 %

Tabelle 8.3: Statistische Kennwerte der Fehlerverteilung

Sowohl Bild 8.6 als auch die Kennwerte in Tabelle 8.3 belegen, dass mit der Korrelationsbeziehung zur Berechnung des Porenanteils der tatsächliche Porenanteil, gemessen an der erreichbaren Genauigkeit der KDS, mit akzeptabler Güte bestimmt werden kann. Die KDS-Messfehlergrenzen für weniger als 15 % Feinkornanteil betragen  $\Delta n = \pm 0,02$ . Es ist zu erkennen, dass ca. 60 % der Daten innerhalb dieser Grenzen liegen. Ca. 84 % der Daten befinden sich zwischen  $\Delta n = \pm 0,04$ , den Fehlergrenzen bei FKA > 15 %.

### 8.3.3 Abbildung der Parameterverteilungen (Tiefenschnitte)

Mit Hilfe der Korrelationsbeziehungen für Poren- und Feinkornanteil wurden zwei-dimensionale Abbildungen der Verteilung dieser Parameter innerhalb der Kippe konstruiert, indem für jede Drucksondierung aus den Spitzenwiderstandswerten und Reibungsverhältnissen die genannten Parameter bestimmt und danach in Form eines Tiefenschnittes dargestellt werden. Dabei ist die in Kapitel 6 ermittelte Aussagereichweite von Sondierungen mit einem Radius von ca. (20 ... 25) m zu berücksichtigen. Bereiche, in denen die Sondierungen zu weit voneinander entfernt liegen, liefern unsichere Informationen.

Idealerweise müssten zum Erstellen von Tiefenschnitten alle vorhandenen Sondierungen entlang einer Profillinie liegen. Dies traf jedoch nur für die Sondierungen auf den Hauptquerschnitten HQ 1 bis HQ 7 zu, welche mit Ausnahme von HQ 5 mit den Berechnungsschnitten 1 bis 7 für die Standsicherheitsberechnungen identisch sind. Die Zahl der Sondierungen auf den Hauptprofilen ist jedoch zu gering, der Abstand zwischen den Sondierungen ist oft zu groß. Deshalb werden die Sondierungen der beidseitig angrenzenden Nebenquerschnitte NQ in die Auswertung einbezogen. Diese Sondierungen werden, wie in Kapitel 7 beschrieben, im rechten Winkel auf die Hauptquerschnitte projiziert und können in die Ersatzprofile einbezogen werden. Die Ersatzprofile beginnen mit Profilmeter 0 an der restlochseitigen Dammgrenze und enden hinter dem versteckten Damm.

Um den durch die Sanierung erreichten Verdichtungseffekte zu verdeutlichen, sind in den Tiefenschnitten unmittelbar vor und hinter dem Damm  $q_c$ - und  $R_f$ -Mittelwerte aus Vorsondierungen eingefügt worden, welche die Verhältnisse in der unverdichteten Kippe widerspiegeln. Abbildung 8.7 zeigt die Vorgehensweise zur Konstruktion der Ersatzprofile am Beispiel des Hauptquerschnittes 3. Die grünen Linien veranschaulichen die Projektion der nicht auf HQ 3 befindlichen Sondierungen auf das Profil 3.

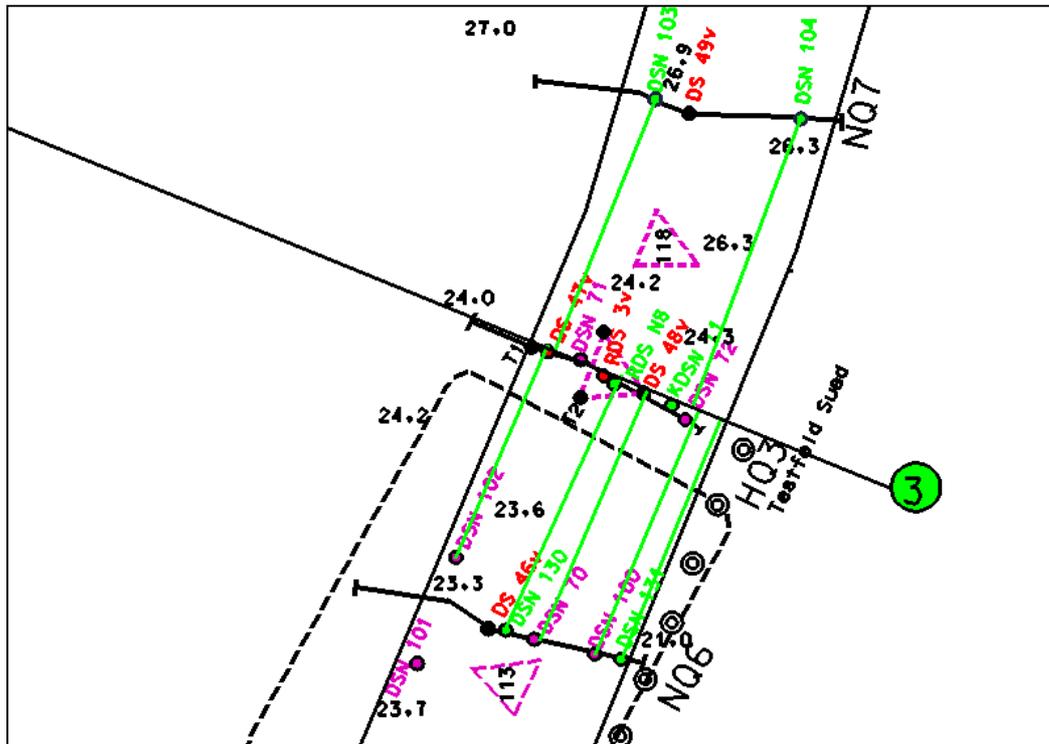


Abb. 8.7: Ersatzprofil im Bereich HQ 3

In Anlage 8.5 sind alle verwendeten Sondierungen und ihre Lage (r ... Entfernung von der restlochseitigen Dammgrenze) auf dem jeweiligen Ersatzprofil aufgelistet.

Ein zusätzliches Problem bestand darin, dass die vorhandenen Nachsondierungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten (nach SPV und nach RDV) niedergebracht wurden. Um alle Nachsondierungen zu nutzen, wurden von den nach der SPV durchgeführten Sondierungen der von der Sprengverdichtung unbeeinflusste obere Bereich nicht berücksichtigt, da diese Bereiche den Einfluss der später durchgeführten dynamischen Intensivverdichtung nicht widerspiegeln können. Außerdem entspricht die Höhe über NN der Sondieransatzpunkte zum Zeitpunkt der Sondierungen nach der SPV nicht mehr der heutigen Geländehöhe, was geringfügige Fehler in der vertikalen Zuordnung der Messwerte zur Folge haben kann.

Die Anlagen 8.6 bis 8.13 enthalten die in der beschriebenen Weise erstellten Tiefenschnitte für die Bereiche HQ 1, HQ 2, HQ 3, HQ 4, NQ 11 (entspricht Schnitt 5), HQ 6 und HQ 7 sowie der As-Kopfböschung. Für jeden Schnitt sind folgende Verteilungen dargestellt:

- a) Porenanteilverteilung
- b) Feinkornanteilverteilung
- c) Spitzenwiderstandsverteilung
- d) Verteilung des Reibungsverhältnisses.

Der Maßstab der Tiefenschnitte ist M 1:1000. Die NN-Höhen entsprechen den gegenwärtigen Geländehöhen. Die Lage und berücksichtigte Teufe der Sondierungen auf den Ersatzprofilen sind durch die senkrechten Striche markiert.

### 8.3.4 Auswertung der Tiefenschnitte

#### Schnitt 1 (HQ 1)

Materialzusammensetzung:

Im Bereich des Schnittes 1 steht ausschließlich Material der Materialklasse 1 mit FKA = (4 ... 12) % an. Das anstehende Material ist ein Fein- bis Mittelsand ( $R_f = (0,5 \dots 1,5) \%$ ). Das Liegende befindet sich ca. bei (5 ... 7) m ü. NN.

Spitzenwiderstand:

Der Spitzenwiderstand  $q_c$  weist im gesamten Schnitt 1 innerhalb des Dammbereiches (Profilmeter 0 bis 90) durchgehend hohe Werte auf. Im ufernahen Bereich bis Profilmeter 60 sind oberflächennah geringere Spitzenwiderstände ( $q_c = (2 \dots 6) \text{ MN/m}^2$ ) zu verzeichnen. Uferfern sind auch oberflächennah sehr hohe  $q_c$ -Werte zu erkennen. Unterhalb des Horizontes 45 m ü. NN wurden durchgehend Spitzenwiderstände zwischen  $8 \text{ MN/m}^2$  und  $18 \text{ MN/m}^2$ , örtlich noch höher, erreicht.

Porenanteil:

Die Porenanteilverteilung zeigt ein stark differenziertes Bild. Im Bereich des mit SPV stabilisierten versteckten Dammes (Profilmeter 0 bis 80, ca. unterhalb 40 m ü. NN) weist der Porenanteil Werte um  $n = 0,4$  auf, welche schichtweise zwischen  $n = (0,36 \dots 0,42)$  schwanken. Im RDV-Bereich (über 40 m ü. NN) sind überwiegend Werte  $n = (0,36 \dots 0,4)$  zu erkennen. Über 45 m ü. NN beträgt der Porenanteil  $n = (0,41 \dots 0,44)$ . Letzteres belegt die geringere Verdichtungswirkung der RDV im erdfeuchten oberflächennahen Bereich. Deutliche Porenanteilreduzierungen auf Werte zwischen  $n = (0,3 \dots 0,38)$  sind insbesondere im nachträglich angesetzten RDV-Streifen (Profilmeter 80 bis 90) zu erkennen.

#### Schnitt 2 (HQ 2)

Materialzusammensetzung:

Das anstehende Material entspricht dem im Bereich des Schnittes 1. Das Liegende befindet sich bei ca. (17 ... 20) m ü. NN.

Spitzenwiderstand:

Das Profil weist durchgehend hohe bis sehr hohe Spitzenwiderstände auf. Oberflächennah (über 48 m ü. NN) beträgt  $q_c = (4 \dots 8) \text{ MN/m}^2$ , unterhalb dessen wurden durch die Stabilisierungsmaßnahmen Spitzenwiderstände zwischen  $q_c = (6 \dots 12) \text{ MN/m}^2$ , örtlich bis  $25 \text{ MN/m}^2$ , erreicht.

Porenanteil:

Anhand der Porenanteilverteilung ist der Bereich des versteckten Dammes deutlich abgrenzbar (Profilmeter 0 bis 85). Insbesondere uferfern und an der restlochseitigen Dammbegrenzung erkennt man niedrige Porenanteile ( $n = 0,36 \dots 0,39$ ). Zwischen Profilmeter 25 und 55 zeigt sich ein differenziertes Bild. Oberhalb 30 m ü. NN beträgt der Porenanteil  $n = (0,38 \dots 0,41)$ , darunter befindet sich ein Bereich mit größeren Porenanteilen ( $n = 0,4 \dots 0,44$ ).

### **Schnitt 3 (HQ 3)**

Materialzusammensetzung:

Das anstehende Material entspricht im Wesentlichen Materialklasse 1. Nur in den oberen 10 m sind vereinzelte Bereiche mit FKA > 12 % zu erkennen. Außerdem weist die Sondierung bei Profilmeter 67  $R_f$ -Werte über 1,5 % auf. Das Liegende befindet sich bei ca. (22 ... 23) m ü. NN.

Spitzenwiderstand:

Der Spitzenwiderstand weist im Dammbereich (Profilmeter 0 bis 90) unterhalb 45 m ü. NN fast durchgehend Werte zwischen  $q_c = (8 \dots 18)$  MN/m<sup>2</sup> auf. Oberhalb dieser Grenze (im RDV-Bereich) liegen die Werte zwischen  $q_c = (2 \dots 6)$  MN/m<sup>2</sup>.

Porenanteil:

Mit Ausnahme zweier Bereiche um Profilmeter 40 und 67 wurden durch die Stabilisierungsmaßnahmen im Dammbereich Porenanteilreduzierungen auf  $n = (0,33 \dots 0,39)$  erreicht. Bereiche mit größeren Porenanteilen können wegen ihrer geringen Ausdehnung als unbedenklich angesehen werden.

### **Schnitt 4 (HQ 4)**

Materialzusammensetzung:

Insbesondere die Verteilung des Feinkornanteils lässt darauf schließen, dass oberflächennah (45 m ü. NN bis GOK) Material mit einem geringfügig höheren Feinkorngehalt ansteht. Unterhalb dieser Grenze steht Material MK 1 an. Das Liegende befindet sich bei ca. (25 ... 27) m ü. NN.

Spitzenwiderstand:

Der Spitzenwiderstand weist im Dammbereich (Profilmeter 0 bis 90) unterhalb 45 m ü. NN fast durchgehend Werte zwischen  $q_c = (6 \dots 12)$  MN/m<sup>2</sup>, örtlich bis  $q_c = 25$  MN/m<sup>2</sup>, auf. Oberhalb dieser Grenze (im RDV-Bereich) liegen die Werte zwischen  $q_c = (2 \dots 4)$  MN/m<sup>2</sup>. Die Ursachen hierfür sind – wie zuvor schon erwähnt - die geringere verdichtende Wirkung der RDV im erdfeuchten Material sowie der erhöhte FKA.

Porenanteil:

Aus den gleichen Gründen beträgt in diesem Bereich (45 m ü. NN bis GOK) der Porenanteil  $n = (0,42 \dots 0,44)$ . Darunter sind Bereiche mit deutlich geringeren Porenanteilen ( $n = (0,33 \dots 0,4)$ ) vorhanden, aber auch größere Abschnitte mit  $n > 0,4$ . Zwischen Profilmeter 25 und 40 ist jedoch eine geringe Aussagesicherheit aufgrund der geringen Sondierdichte zu berücksichtigen. Die erhöhten Porenanteile zwischen Profilmeter 40 und 70 im Bereich (30 ... 35) m ü. NN korrespondieren mit Bereichen erhöhten Feinkornanteiles bzw. Reibungsverhältnisses.

### **Schnitt 5 (NQ 11)**

Materialzusammensetzung:

Die Verteilung des Feinkornanteils weist oberflächennah (45 m ü. NN bis GOK) Material mit einem erhöhten Feinkorngehalt auf. Unterhalb dieser Grenze steht Material MK 1 an. Das Liegende befindet sich bei ca. (27 ... 28) m ü. NN.

Spitzenwiderstand:

Das Bild der Spitzenwiderstandsverteilung entspricht im Wesentlichen dem von Schnitt 4. Im ufernahen Bereich mit geringeren Spitzenwiderständen sind die Informationsdichte und damit die Aussagesicherheit gering. Die niedrigen  $q_c$ -Werte bei Profilmeter 70 bis 90 im Bereich 35 m ü. NN sind durch erhöhtem Feinkorngehalt erklärbar.

Porenanteil:

Die Porenanteilverteilung entspricht ebenfalls weitestgehend der von Schnitt 4. Zwischen der GOK und 45 m ü. NN betragen die Porenanteile  $n \gg 0,4$ . Der größere Bereich großer Porenanteile in der mit SPV verdichteten Kippe ist auf eine geringere Verdichtungswirkung aufgrund höheren Feinkorngehaltes (siehe  $R_f$ -Verteilung) zurückzuführen. Insbesondere uferfern ist eine deutliche Porenanteilreduzierung auf Werte  $n = (0,33 \dots 0,39)$  zu erkennen.

### **Schnitt 6 (HQ 6)**

Materialzusammensetzung:

Der Trend einer Zunahme des Anteiles an bindigem Material setzt sich in nördlicher Richtung fort. Oberhalb 45 m ü. NN und zwischen Profilmeter -10 und 35 sind ausgedehnte Bereiche mit größerem als durch MK 1 definierten Feinkornanteil anzutreffen. Im übrigen Gebiet steht MK 1 an. Das Liegende befindet sich ca. bei (30 ... 32) m ü. NN.

Spitzenwiderstand:

Oberflächennah oberhalb 50 m ü. NN sowie ufernah (Profilmeter 0 bis 25) bis 42 m ü. NN erreicht der Spitzenwiderstand nur Werte von  $q_c = (1 \dots 4)$  MN/m<sup>2</sup>. Ufer-

nah sind unterhalb dieser Grenze Spitzenwiderstände zwischen  $q_c = (4 \dots 12)$  MN/m<sup>2</sup>, uferfern großflächig  $q_c = (6 \dots 25)$  MN/m<sup>2</sup> vorhanden.

Porenanteil:

Entsprechend der Material- und der Spitzenwiderstandsverteilung sind Porenanteile  $n < 0,4$  nur uferfern unterhalb ca. 45 m ü. NN zu verzeichnen. Oberflächen- und ufernah liegen die Porenanteile zum Teil deutlich über  $n = 0,4$ , was Folge des deutlich erhöhten Feinkorngehaltes ist.

### **Schnitt 7 (HQ 7)**

Materialzusammensetzung:

Entgegen Feststellungen in den Schnitten 5 und 6 sind im Schnitt 7 nur noch geringmächtige Schichten, deren Feinkorngehalt größer als der der Materialklasse 1 ist, anzutreffen. Überwiegend steht MK 1 an. Das Liegende befindet sich bei ca. (30 ... 32) m ü. NN.

Spitzenwiderstand:

Mittlere ( $q_c = (4 \dots 8)$  MN/m<sup>2</sup>) bis hohe ( $q_c = (8 \dots 25)$  MN/m<sup>2</sup>) Spitzenwiderstände sind im Dammbereich unterhalb 45 m ü. NN durchgängig zu verzeichnen, wobei besonders uferfern sehr hohe Werte erreicht werden. Oberhalb 45 m ü. NN sind überwiegend Werte zwischen  $q_c = (4 \dots 6)$  MN/m<sup>2</sup> vorhanden.

Porenanteil:

Zwischen Profilmeter 15 und 75 befindet sich ein großer Bereich mit reduzierten Porenanteilen (bei örtlichen Schwankungen) um  $n = (0,36 \dots 0,4)$ . Im ufernahen Bereich ist die Informationsdichte sehr gering, die dort zu verzeichnenden großen Porenanteile sind unsicher.

### **Zusammenfassung:**

Mit Ausnahme einiger meist oberflächennaher Bereiche (insbesondere Schnitte 5 und 6) steht im gesamten Kippenböschungsbereich die Materialklasse MK 1 an.

Die Verteilungen des Spitzenwiderstandes zeigen innerhalb des versteckten Dammes überwiegend sehr hohe  $q_c$ -Werte. Die Stabilisierungsmaßnahmen haben im Vergleich zur unverdichteten Kippe eine deutliche Steigerung des Spitzenwiderstands bewirkt. Bereiche mit niedrigeren Spitzenwiderständen treten lediglich oberflächennah (geringe RDV-Wirkung, da erdfeucht und geringe Spannungen) bzw. in Zonen mit erhöhtem Feinkorngehalt auf.

Analog dem Spitzenwiderstand ist auch anhand der Porenanteilverteilung die Verdichtung infolge SPV und RDV deutlich nachweisbar. Insbesondere uferfern (hö-

here Sprengladungsmengen) sind deutliche Reduzierungen auf Werte um  $n = (0,36 \dots 0,38)$  zu verzeichnen. Bereiche mit höherem Porenanteil sind meist mit geringerer Verdichtbarkeit aufgrund der Materialzusammensetzung bzw. der eingeschränkten Wirkung der RDV erklärbar.

Ergänzend zu den zweidimensionalen Schnittdarstellungen, welche für die Stand-sicherheitsberechnungen erforderlich sind, können von den Dammabschnitten dreidimensionale Abbildungen erzeugt werden. Diese ermöglichen dem Betrachter/Gutachter eine zusätzliche qualitative Bewertung der Verteilung der entsprechenden Parameter.

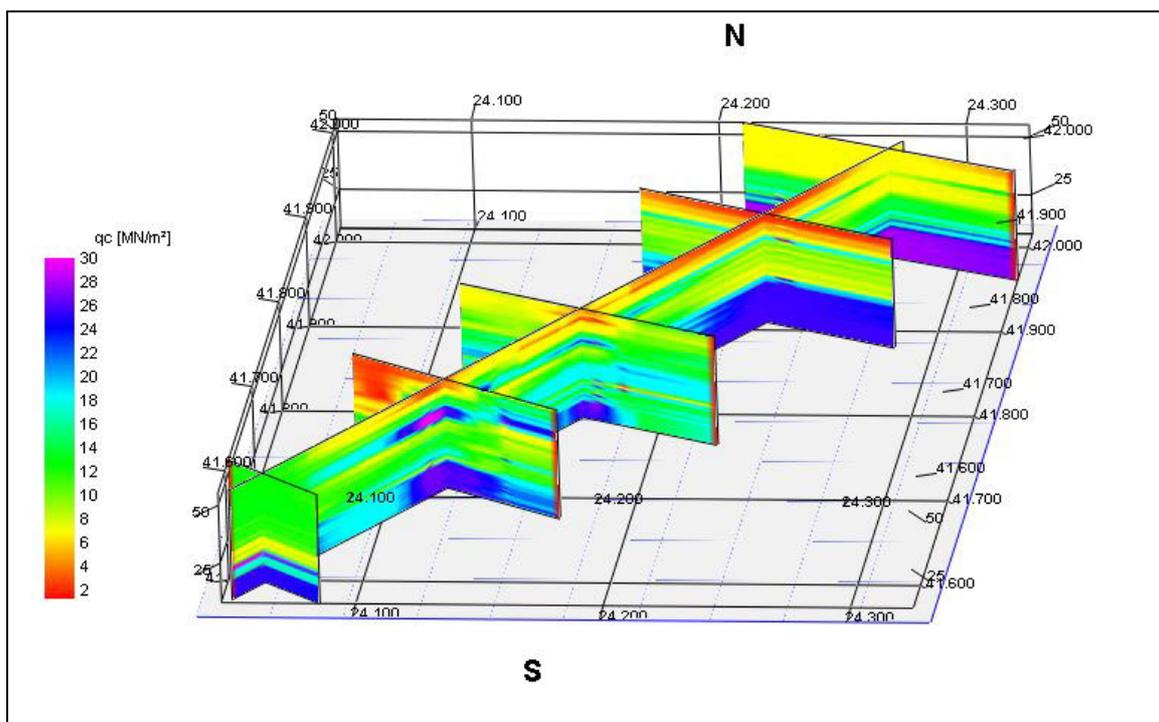


Abb. 8.7: Räumliche Spitzenwiderstandsverteilung HQ 3

Die Abbildungen 8.7 und 8.8 zeigen am Beispiel des Dammabschnittes um das Hauptquerprofil 3 die räumliche Spitzenwiderstands- und Reibungsverhältnisverteilung. Das mittlere Querprofil entspricht dem Hauptquerprofil 3. In den angrenzenden Profilen ist die Datendichte teilweise geringer als auf dem Hauptquerprofil, was sich in der geringeren Differenzierung innerhalb der Profile widerspiegelt.

Aus Abbildung 8.7 ist ersichtlich, dass mit Ausnahme einiger oberflächennaher Bereiche durchgängig ein hohes Spitzenwiderstandsniveau erreicht wurde. Abbildung 8.8 belegt, dass im gesamten Abschnitt fast ausschließlich Mittel- bis Grobsande, vereinzelt Feinsande anstehen ( $R_f = 0,5 \% \dots 1,5 \%$ ).

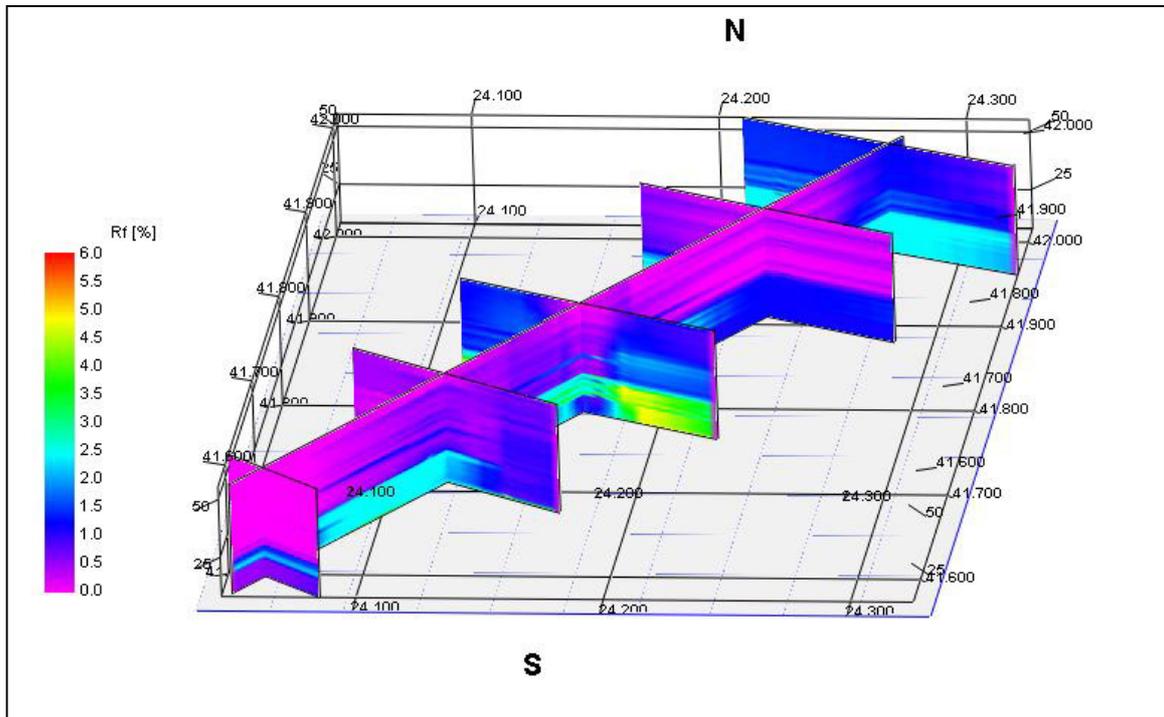


Abb. 8.8: Räumliche Reibungsverhältnisverteilung HQ 3

## 8.4 Standsicherheitsuntersuchungen für die Kippenböschungen

### 8.4.1 Berechnungsparameter

Die Berechnungskennwerte für den Liegendschluff, die erdfeuchte Überdeckung und den unverdichteten F34-Kippenmischboden wurden den vorhandenen Unterlagen entnommen.

F34-Kippenmischboden (unverdichtet):

- Wichte des feuchten Bodens  $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$
- Wichte des wassergesättigten Bodens  $\gamma_r = 19 \text{ kN/m}^3$
- Wichte des Bodens unter Auftrieb  $\gamma' = 9 \text{ kN/m}^3$

Liegendschluff:

- Wichte des feuchten Bodens  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
- Wichte des wassergesättigten Bodens  $\gamma_r = 22 \text{ kN/m}^3$
- Wichte des Bodens unter Auftrieb  $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$
- Wirksamer Reibungswinkel  $\varphi' = 17,5^\circ$
- Wirksame Kohäsion  $c' = 5 \text{ kN/m}^2$

## Erdfeuchte Überdeckung

- Wichte des feuchten Bodens  $\gamma = 16,5 \text{ kN/m}^3$
- Wirksamer Reibungswinkel  $\varphi' = 35^\circ$
- Wirksame Kohäsion  $c' = 0 \text{ kN/m}^2$

Die Festigkeitskennwerte für das verdichtete Kippenmaterial werden in Abhängigkeit vom Porenanteil aus den Ergebnissen der Festigkeitsuntersuchungen abgeleitet.

Zur Ermittlung der Abhängigkeit der Festigkeitsparameter des verdichteten Lockergesteins im Bereich des versteckten Dammes wurden am Institut für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg 20 Triaxialversuche an der Materialklasse MK 1 durchgeführt. Die Versuche wurden als CAU-Versuche (konsolidiert, anisotrop, undränniert) mit einem Hauptspannungsverhältnis  $\sigma_1/\sigma_3 = 2$  gefahren. Die Konsolidierungsspannungen wurden für jeden Porenanteilbereich im Bereich  $\sigma_1 = (100 \dots 400) \text{ kN/m}^2$  variiert. Die Versuchsergebnisse können Tabelle 8.4 entnommen werden.

	Porenanteil	Bruchparameter				Restfestigkeitsparameter			
		$t_f = c_{u,f}$	$s'_f$	$u_f$	$s_{u,f}$	$t_r = c_{u,r}$	$s'_r$	$u_R$	$s_{u,R}$
Probe	[-]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]				
V51	0,38	200,3	369,8	-117,4	252,4	365,5	349,3	-114,1	235,2
V103	0,371	385,9	645,1	-157,6	487,5	337,5	605,3	-164,4	440,9
V101	0,381	279,5	501,7	-120,8	380,9	280,6	517,5	-134,5	383,0
V105	0,388	259,0	472,3	-111,0	361,3	226,1	434,1	-105,2	328,9
V53	0,389	210,1	381,9	-119,1	262,8	185,9	354,4	-115,3	239,1
V108	0,39	138,8	254,0	-13,1	240,9	106,4	200,1	8,4	208,5
V54	0,393	129,9	235,7	-54,6	181,1	135,1	250,7	63,6	314,3
V152	0,394	181,9	332,8	0,4	333,2	151,5	285,2	19,0	304,2
V202	0,394	146,2	273,2	75,4	348,6	98,1	181,3	120,2	301,5
V204	0,395	159,5	299,6	61,9	361,5	132,3	250,3	85,1	335,4
V153	0,397	190,1	347,0	-4,1	342,9	165,3	311,7	7,4	319,1
V107	0,398	73,5	134,6	40,3	174,9	21,4	39,3	83,9	123,2
V55	0,401	78,2	139,7	-9,2	130,5	72,6	133,5	-8	125,5
V151	0,406	114,8	221,0	44,8	265,8	18,8	32,4	137,3	169,7
V56	0,407	40,6	76,6	17,4	94,0	2,6	1,7	55,2	56,9

V201	0,407	116,6	307,7	10,1	317,8	3,4	3,0	203,7	206,7
V203	0,407	121,6	301,5	22,6	324,1	21,2	37,6	189	226,6
V52	0,408	34,9	72,1	14,7	86,8	1,0	0,1	52,9	53,0
V106	0,416	57,9	154,1	3,1	157,2	0,0	Probe verflüssigt		
V104	0,426	57,2	153,6	3,3	156,9	0,0	Probe verflüssigt		

Tabelle 8.4: Ergebnisse der Triaxialversuche

Die farblich gleich markierten Versuche fassen die bei verschiedenen Konsolidierungsspannungen untersuchten Porenanteilbereiche nach Konsolidierung zusammen, für welche durch die Lage der Schergeraden im  $s,t$ -Diagramm die Parameter der undrained Bruch- und Restfestigkeit ermittelt wurden.

In Tabelle 8.5 sind die Festigkeitsparameter angegeben. Abbildung 8.7 zeigt die Abhängigkeit des Bruch- und Restreibungswinkels vom Porenanteil. Da die aus den Schergeraden ermittelten Werte für Kohäsionen  $c_u$  überwiegend negativ sind, werden diese gemäß [LMBV 2002] zu null gesetzt.

n-Klasse	n (Mittelwert)	Bruchfestigkeitsparameter			Restfestigkeitsparameter		
		für $c_{u,f} = 0$	für $c_{u,f} \neq 0$		für $c_{u,R} = 0$	für $c_{u,R} \neq 0$	
		$\varphi_{u,f} [^\circ]$	$\varphi_{u,f} [^\circ]$	$c_{u,f} [kN/m^2]$	$\varphi_{u,R} [^\circ]$	$\varphi_{u,R} [^\circ]$	$c_{u,R} [kN/m^2]$
0,371 - 0,381	0,376	50,6 (32)	51,6 (32)	-4,2	48,6 (32)	79,3 (32)	-95,8
0,388 - 0,39	0,389	45,1 (32)	49,4 (32)	-14,2	42,5 (32)	60,5 (32)	-52,5
0,393 - 0,401	0,397	29,2	27,3	8,8	25,5	28,1	-11,9
0,406 - 0,408	0,407	22,9	21,5	6	4	4,6	-2,1
> 0,416	0,416	22	21,5	0	0	0	0

Tabelle 8.5: Festigkeitsparameter

Da die Reibungswinkel für die ersten beiden Porenanteilklassen aufgrund dilatantem Verhaltens des Materials während des Abscherens und daraus resultierendem Porenwasserunterdruck unrealistisch groß werden, wird für Berechnungen der wirksame Reibungswinkel (Zahlen in Klammern) angesetzt.

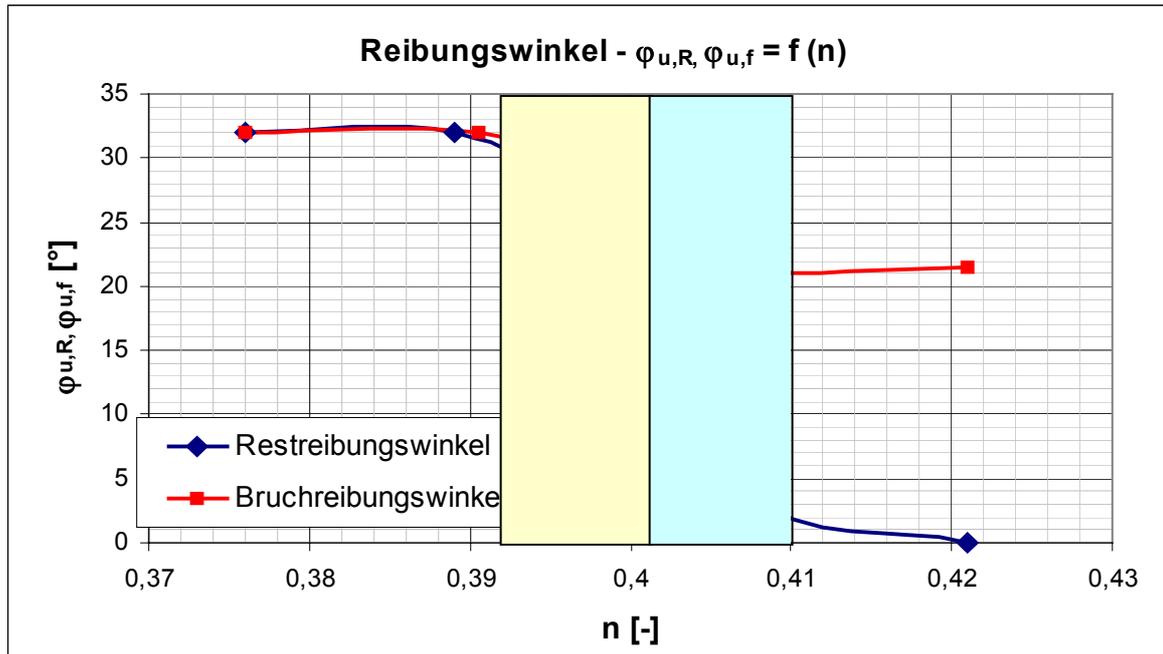


Abb. 8.7: Reibungswinkel in Abhängigkeit vom Porenanteil

Anhand der in Abbildung 8.7 dargestellten Abhängigkeit können zur Bildung von Homogenbereichen innerhalb der Berechnungsschnitte die in Tabelle 8.6 aufgeführten Porenanteilbereiche 1 bis 4 (dicht, Übergangsbereich, locker) und Reibungswinkel festgelegt werden, wobei der Übergangsbereich in zweifach unterteilt wird. Zusätzlich sind die Kennwerte für die erdfeuchte Kippe und das Liegende eingefügt worden. Die Kohäsion für M1 bis M4 wurde auf  $c = 0 \text{ kN/m}^2$  festgelegt. Die Homogenbereiche sind farblich analog den in den Berechnungsschnitten verwendeten Farben hinterlegt worden.

	Porenanteil n	Bruch		Wichte		
		φ <sub>u,f</sub> [°]	φ <sub>u,R</sub> [°]	γ [kN/m <sup>2</sup> ]	γ <sub>r</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	γ' [kN/m <sup>2</sup> ]
Kippe erdfeucht		35		16,5		
Material 1:	n < 0,393	32	32	19	21	11
Material 2:	0,393 ≤ n < 0,401	27,5	25,5	18	20	10
Material 3:	0,401 ≤ n ≤ 0,41	22	7	17	20	10
Material 4:	n > 0,41	21,5	0	16	19	9
Liegendes		17,5 (c = 5 kN/m <sup>2</sup> )		20	22	10

Tabelle 8.6: Homogenbereiche

Material 4 entspricht dem o. g. unverdichteten F34-Kippenmischboden.

### 8.4.2 Standsicherheitsberechnungen

Die Berechnungen für die Kippenseite wurden mit dem Programm GEOSLOPE durchgeführt. Als maßgebend wurde die nach der Definition und dem Verfahren von Bishop berechnete Standsicherheit angesehen. Die Berechnungsschnitte sind in den Anlagen 8.14 bis 8.24 enthalten. Die Oberflächenprofile sind aus den Höhenangaben des zur Verfügung stehenden Kartenmaterials (Stand 2000 (Lotung) bzw. 2001 (Flug und Vermessung der Uferlinie)) konstruiert worden.

Die Verteilung der Materialien M1 bis M4 (siehe Tabelle 8.6) innerhalb des versteckten Dammes wurde aus den flächenhaften Abbildungen (siehe Anlagen 8.6 bis 8.13) abgeleitet. Vor und hinter dem versteckten Damm wurde unverdichtetes Material M4 bzw. in größeren Teufen M3 angenommen.

Für jeden Schnitt sind die Standsicherheiten für das Abgleiten auf kreisförmigen Gleitflächen jeweils mit Ansatz der Bruchfestigkeiten und der Restfestigkeiten ermittelt worden, wobei der Restreibungswinkel des Material 4 zwischen  $\varphi_{u,R} = (0 \dots 3)^\circ$  variiert wurde. Zusätzlich wurde unter Ansatz der Restfestigkeit noch die Sicherheit längs einer vorgegebenen Gleitfläche entlang der Kippenbasis berechnet.

#### Schnitt A (As-Kopfböschung):

Die Profillinie des Schnittes A verläuft durchgängig oberhalb des Grundwasserspiegels und endet am Restlochufer. Die Böschungsneigung beträgt ca. 1:20. Bei Ansatz der Bruchfestigkeitswerte ergibt sich eine Sicherheit von  $S_{\min} = 9,07$ . Bei Ansatz der Restfestigkeit mit  $\varphi_{u,R} = 0^\circ$  für Material 4 (bedeutet vollständige Verflüssigung vor und hinter dem versteckten Damm) sind die Sicherheiten für Gleitkreise vor und hinter (Verflüssigungsgrundbruch) dem Damm  $S \ll 1$  ( $S_{\min} = 0,108$ ). Alle Gleitkreise, die durch den versteckten Damm verlaufen, weisen  $S > 2$  auf. Die Stabilität des versteckten Dammes ist gegeben. Erhöht man für Material 4 den Restreibungswinkel auf nur  $\varphi_{u,R} = 2^\circ$ , beträgt  $S_{\min} = 1,16$ . In Hinblick auf den großen Wert der Sicherheit unter Ansatz der Bruchfestigkeit und den geringen Festigkeitsbedarf, um ein Abgleiten zu verhindern, darf davon ausgegangen werden, dass das Eintreten einer Verflüssigung vor und hinter dem Damm unwahrscheinlich ist, wenn nicht ungewöhnlich große Anregungen wirken. Sie sind bei der zurzeit vorgesehenen Art der Nutzung als ausgeschlossen zu betrachten.

Bei einer vorgegebenen Gleitfläche entlang des Liegenden beträgt die Sicherheit  $S = 11,5$ .

#### Schnitt B und C (As-Kopfböschung):

Die Böschungsneigung unter Wasser beträgt ca. 1:30 bis 1:37, oberhalb des Seewasserspiegels ca. 1:17 bis 1:18.

Für Bruchparameter beträgt  $S_{\min} = 6,5$ . Wie bei Schnitt A betragen die Sicherheiten bei Ansatz der Restfestigkeitswerte für Gleitkreise vor und hinter dem Damm

$S_{\min} \ll 1$ . Mit  $\varphi_{u,R} = 2^\circ$  für Material 4 erhöht sich die minimale Sicherheit auf  $S_{\min} = 1,35$ . Gleitkreise durch den versteckten Damm weisen Sicherheiten  $S > 1,6$  auf.

Längs einer vorgegebenen Gleitfläche entlang des Liegenden beträgt die Sicherheit  $S = 7,0$ .

**Schnitt F (As-Kopfböschung – neben Kleptna-Zufluss):**

Die Böschungsneigung unter Wasser beträgt ca. 1:37, oberhalb des Seewasserspiegels ca. 1:13 bis 1:23.

Für Bruchparameter beträgt  $S_{\min} = 7,5$ . Wie bei Schnitt A, B und C betragen die Sicherheiten bei Ansatz der Restfestigkeitswerte für Gleitkreise vor und hinter dem Damm  $S_{\min} \ll 1$ . Mit  $\varphi_{u,R} = 2^\circ$  für Material 4 erhöht sich die minimale Sicherheit auf  $S_{\min} = 1,01$ . Gleitkreise durch den versteckten Damm weisen Sicherheiten  $S > 4$  auf.

Längs einer vorgegebenen Gleitfläche entlang des Liegenden beträgt die Sicherheit  $S = 14$ .

**Schnitt 1 (AFB-Kippe):**

Die Böschungsneigung unter Wasser beträgt ca. 1:37, oberhalb des Seewasserspiegels ca. 1:11 bis 1:21.

Für Bruchparameter beträgt  $S_{\min} = 6,03$ . Die minimalen Sicherheiten bei Ansatz der Restfestigkeitswerte für Gleitkreise vor und hinter dem Damm betragen  $S_{\min} \ll 1$ . Mit  $\varphi_{u,R} = 2^\circ$  für Material 4 erhöht sich die minimale Sicherheit auf  $S_{\min} = 1,15$ . Gleitkreise durch den versteckten Damm weisen Sicherheiten  $S > 6$  auf.

Längs einer vorgegebenen Gleitfläche entlang des Liegenden beträgt die Sicherheit  $S = 14,7$ .

**Schnitt 2 (AFB-Kippe):**

Die Böschungsneigung unter Wasser beträgt ca. 1:22,5, oberhalb des Seewasserspiegels ca. 1:16 bis 1:18.

Für Bruchparameter beträgt  $S_{\min} = 5,2$ . Die minimalen Sicherheiten bei Ansatz der Restfestigkeitswerte für Gleitkreise vor und hinter dem Damm sind analog allen bisherigen Schnitten  $S_{\min} \ll 1$ . Mit  $\varphi_{u,R} = 3^\circ$  für Material 4 erhöht sich die minimale Sicherheit auf  $S_{\min} = 1,04$ . Gleitkreise durch den versteckten Damm weisen Sicherheiten  $S > 3$  auf.

Längs einer vorgegebenen Gleitfläche entlang des Liegenden beträgt die Sicherheit  $S = 4,4$ .

**Schnitt 3 (AFB-Kippe):**

Die Böschungsneigung unter Wasser beträgt ca. 1:14 bis 1:31, oberhalb des Seewasserspiegels ca. 1:5,7 bis 1:42.

Für Bruchparameter beträgt  $S_{\min} = 2,8$ . Die minimalen Sicherheiten bei Ansatz der Restfestigkeitswerte für Gleitkreise vor und hinter dem Damm betragen auch hier  $S_{\min} \ll 1$ . Mit  $\varphi_{u,R} = 2^\circ$  für Material 4 erhöht sich die minimale Sicherheit auf  $S_{\min} = 1,14$ . Gleitkreise durch den versteckten Damm weisen Sicherheiten  $S > 5$  auf.

Längs einer vorgegebenen Gleitfläche entlang des Liegenden beträgt die Sicherheit  $S = 5,01$ .

**Schnitt 4 (AFB-Kippe):**

Die Böschungsneigung unter Wasser beträgt ca. 1:27 bis 1:32, oberhalb des Seewasserspiegels ca. 1:35.

Für Bruchparameter beträgt  $S_{\min} = 8,6$ . Die minimalen Sicherheiten bei Ansatz der Restfestigkeitswerte für Gleitkreise vor und hinter dem Damm betragen ebenfalls  $S_{\min} \ll 1$ . Mit  $\varphi_{u,R} = 2^\circ$  für Material 4 erhöht sich die minimale Sicherheit auf  $S_{\min} = 1,48$ . Gleitkreise durch den versteckten Damm weisen bei sehr oberflächennahen Gleitkreisen aufgrund des oberflächig anstehenden Materials 4 Sicherheiten  $S > 1,7$ , sonst  $S > 4$  aus. Das Material in diesem Bereich hat neben einem großem Porenanteil auch einen erhöhten Feinkornanteil, so dass die Festigkeitskennzahlen offenbar für dieses Material nicht zutreffen. Der höhere Feinkornanteil verringert die Verflüssigungsneigung, womit auch die Annahme größerer Restfestigkeiten gerechtfertigt ist.

Längs einer vorgegebenen Gleitfläche entlang des Liegenden beträgt  $S = 19,5$ .

**Schnitt 5 (AFB-Kippe):**

Die Böschungsneigung unter Wasser beträgt ca. 1:23, oberhalb des Seewasserspiegels ca. 1:9,3 bis 1:30. Innerhalb der Böschung befindet sich außerdem eine ca. 4 m breite Steilkante mit einer Neigung von 1:2,6.

Für Bruchparameter beträgt  $S_{\min} = 4,34$  (an Steilkante kleiner Gleitkreis mit  $S = 1,9$ ). Die minimalen Sicherheiten bei Ansatz der Restfestigkeitswerte für Gleitkreise vor und hinter dem Damm betragen wie zuvor  $S_{\min} \ll 1$ . Mit  $\varphi_{u,R} = 3^\circ$  für Material 4 ergibt sich eine minimale Sicherheit auf  $S_{\min} \approx 1$ , wobei diese nur im steileren Bereich der Böschung hinter dem versteckten Damm auftreten. Sonst liegt  $S_{\min}$  deutlich über 1. Gleitkreise durch den versteckten Damm weisen Sicherheiten  $S > 6$  auf. Für oberflächennahe Gleitkreise sinkt die Sicherheit auf  $S_{\min} < 1$ . Bezüglich der Ursache dafür gilt die gleiche Aussage wie bei Schnitt 4.

Längs einer vorgegebenen Gleitfläche entlang des Liegenden beträgt  $S = 9,5$ .

**Schnitt 6 (AFB-Kippe):**

Die Böschungsneigung unter Wasser beträgt ca. 1:23, oberhalb des Seewasserspiegels ca. 1:14.

Für Bruchparameter beträgt  $S_{\min} = 6,46$ . Die minimalen Sicherheiten bei Ansatz der Restfestigkeitswerte für Gleitkreise vor und hinter dem Damm betragen  $S_{\min} \ll 1$ . Mit  $\varphi_{u,R} = 2^\circ$  für Material 4 erhöht sich die minimale Sicherheit auf  $S_{\min} = 1,22$ . Gleitkreise durch den versteckten Damm weisen Sicherheiten  $S > 2,36$  auf.

Längs einer vorgegebenen Gleitfläche entlang des Liegenden beträgt  $S = 3,54$ .

**Schnitt 7 (AFB-Kippe):**

Die Böschungsneigung unter Wasser beträgt ca. 1:26, oberhalb des Seewasserspiegels ca. 1:15 bis 1:27.

Für Bruchparameter beträgt  $S_{\min} = 5,78$ . Die minimalen Sicherheiten bei Ansatz der Restfestigkeitswerte für Gleitkreise vor und hinter dem Damm betragen  $S_{\min} \ll 1$ . Mit  $\varphi_{u,R} = 2^\circ$  für Material 4 erhöht sich die minimale Sicherheit auf  $S_{\min} = 0,9$ , bei  $\varphi_{u,R} = 3^\circ$  auf  $S_{\min} = 1,22$ . Gleitkreise durch den versteckten Damm weisen Sicherheiten  $S > 6$  auf.

Längs einer vorgegebenen Gleitfläche entlang des Liegenden beträgt  $S = 7,06$ .

**8.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Standsicherheitsuntersuchungen**

In Tabelle 8.7 sind die Ergebnisse der Standsicherheitsberechnungen zusammengestellt.

Schnitt	Böschungsneigung		Minimale Sicherheitsbeiwerte $S_{\min}$				
	unter Wasser	über Wasser	Bruch	Rest $\varphi_{u,R}=0^\circ$ für M4	Rest $\varphi_{u,R}=(2...3)^\circ$ für M4	GK durch verst. Damm	GF entlang Liegendem
<b>A</b>	-	1:20	9,07	$\ll 1$	1,16	$> 2$	11,5
<b>B+C</b>	1:30...37	1:17...18	6,5	$\ll 1$	1,35	$> 1,6$	7,02
<b>F</b>	1:37	1:13...23	7,5	$\ll 1$	1,01	$> 4$	14
<b>1</b>	1:37	1:11...21	6,03	$\ll 1$	1,15	$> 6$	14,7
<b>2</b>	1:22,5	1:16...18	5,2	$\ll 1$	1,04	$> 3$	4,4
<b>3</b>	1:14...31	1:5,7...42	2,8	$\ll 1$	1,14	$> 5$	5,01
<b>4</b>	1:27...32	1:35	8,6	$\ll 1$	1,48	$> 1,7$	19,5
<b>5</b>	1:23	1:9,3...30	4,34	$\ll 1$	1	$> 6$	9,5
<b>6</b>	1:23	1:14	6,46	$\ll 1$	1,22	$> 2,3$	3,54
<b>7</b>	1:26	1:15...27	5,78	$\ll 1$	1,22	$> 6$	7,06

Tabelle 8.7: Ergebnisse der Standsicherheitsberechnungen

Die Ergebnisse zeigen, dass in allen Schnitten der Kippenböschungen, sowohl der As-Kopfböschung als auch der AFB-Kippenböschung, ähnliche Verhältnisse herrschen. Bei Ansatz der Bruchfestigkeiten werden durchgehend hohe Sicherheitsbeiwerte erreicht. Der kleinste Wert für  $S_{\min}$  ist in Schnitt 3 vorhanden, der überwiegend durch die steilere Böschung im Hinterland des versteckten Dammes verursacht wird. Die Verwendung von Bruchparametern ist sicher dann gerechtfertigt, wenn hohe Sicherheiten berechnet werden und keine starken Initiale zu erwarten sind [LMBV 2002]. Beide Kriterien treffen bei der gegenwärtigen Böschungsgeometrie, den Lagerungsverhältnissen und der vorgesehenen Folgenutzung durch Land- und Forstwirtschaft sowie Naherholung zu.

Bei Ansatz der im Labor ermittelten Restfestigkeiten mit  $\varphi_{u,R} = 0^\circ$  für Material 4 tritt in allen Schnitten Böschungsversagen vor und hinter dem versteckten Damm auf. *Alle Gleitkreise, die durch den versteckten Damm verlaufen, weisen Sicherheiten  $S > 1,6$  auf.* Der Bereich vor dem Damm befindet sich unter Wasser, so dass ein Initial, das ein Absinken der Restfestigkeit auf  $\varphi_{u,R} = 0^\circ$  bewirkt, nicht zu erwarten ist. Ebenso ist bei der vorgesehenen Nutzung kein Initial zu erwarten, welches im Bereich hinter dem Damm eine vollständige Verflüssigung verursacht.

Nimmt man unter o. g. Voraussetzung für Material 4 eine nur geringfügig höhere Restfestigkeit von  $\varphi_{u,R} = (2...3)^\circ$  an, erhöhen sich die Sicherheitsbeiwerte in allen Schnitten auf Werte  $S_{\min} \geq 1$ .

Für vorgegebene Gleitflächen entlang des Liegenden ergeben sich sehr hohe Sicherheitsbeiwerte in allen untersuchten Schnitten.

Anhand der vorliegenden Ergebnisse darf die Standsicherheit der Kippenböschung unter Berücksichtigung der Folgenutzung (Land- und Forstwirtschaft, Naherholung) als gewährleistet betrachtet werden.

## 9 Zusammenfassung / Ausblick

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur effektiveren Nutzung von Drucksondierungen. Es wird ein Weg beschrieben, wie aus den Messgrößen der Drucksondierungen verschiedene bodenphysikalische Parameter berechnet werden können.

Die Drucksondierung gehört – wenn es gelingt, die von ihr gelieferten Parameter zu in der Bodenphysik üblichen Klassifikations- und Berechnungsparametern zu korrelieren - zu den effektivsten Feldversuchsverfahren in der Geotechnik. In den meisten praktischen Anwendungen ist es unabdingbar, aus den Messwerten der Drucksondierung, nämlich Spitzenwiderstand  $q_c$  und Mantelreibung  $q_s$  bzw. Reibungsverhältnis  $R_f$ , bodenphysikalische Parameter der Lockergesteine abzuleiten. Bei radiometrischen Messungen, speziell bei der radiometrischen Kombinationsdrucksondierung werden aus den Ergebnissen von Gamma-, Gamma-Gamma- und Neutron-Neutron-Messungen aus den natürlichen und rückgestreuten Impulsraten wichtige bodenphysikalische Parameter ( $n$ ,  $\rho$ , FKA,  $w$ , Sr) indirekt mit Hilfe von Kalibrierbeziehungen bestimmt.

Der physikalische Zusammenhang zwischen den Messgrößen beider Sondierverfahren ist hinreichend bewiesen. Die vorliegende Arbeit stellt einen Algorithmus vor, mit dessen Hilfe aus den Messwerten von Drucksondierungen durch Korrelationen zu den Messergebnissen radiometrischer Messungen die Lockergesteinsparameter Porenanteil  $n$ , natürliche Dichte  $\rho$  und Feinkornanteil FKA berechnet werden können. Dadurch wird es möglich, diese zur Lösung verschiedener geotechnischer Aufgaben erforderlichen bodenphysikalischen Parameter kostengünstig, großflächig und auch in sehr großen Teufen, welche, technologisch begründet, mit der radiometrischen Kombinationsdrucksondierung nicht erreicht werden können, zu erfassen.

Im Ergebnis einer Dimensionsanalyse sind die wesentlichen Parameter für die Korrelations- und Regressionsanalyse, als dimensionslose Größen formuliert, bestimmt worden.

Basierend auf einer intensiven Analyse der Funktionsweise der Messverfahren wird ein Datenbearbeitungsalgorithmus vorgeschlagen, durch dessen Anwendung die Güte der zu berechnenden Korrelationsbeziehungen zwischen den Mess- und Ergebnisgrößen von Drucksondierungen und radiometrischen Messungen deutlich verbessert werden kann. Erst die beschriebenen Datenbearbeitungsschritte, wie Teufenkorrekturen, „Bereinigen“ und Glätten der Messdaten gewährleisten, dass tatsächlich zusammengehörige Daten miteinander korreliert werden.

Es werden in der Arbeit statistische Methoden für eine einfache Überprüfung der Gültigkeit und Genauigkeit der Korrelationen diskutiert und es wird gezeigt, dass bei der Anwendung des Verfahrens auf Tagebaukippen die aus Drucksondierer-

gebnissen berechneten Lockergesteinsparameter nur wenig ungenauer sind als die mit radiometrischen Sondierungen bestimmten.

Darüber hinaus wird dargelegt, wie umgekehrt die berechneten Korrelationen zum Festlegen von Vorgabewerten z. B. für Verdichtungsmaßnahmen genutzt werden können.

Insbesondere bei Untersuchungsobjekten mit großen räumlichen Ausdehnungen ist in vielen Fällen die Darstellung der gesuchten bodenphysikalischen Parameter in zwei- oder dreidimensionaler Form gefordert. Es werden Möglichkeiten der Darstellung sowie deren Rahmenbedingungen erläutert. Anhand eines Beispiels aus dem Sanierungsgeschehen setzungsfließgefährdeter Kippen wurde dargestellt, wie der räumliche Zusammenhang zwischen Sondierungen berechnet werden kann. Für die Anwendung auf Lausitzer Tagebaukippen konnte aus der Berechnung ein Wert für die Aussagereichweite der Sondierungen abgeleitet werden. Der Grad des räumlichen Zusammenhanges ist insbesondere dann zu beachten, wenn bei einer zwei- oder dreidimensionalen Darstellung der Parameterverteilungen die Zwischenräume zwischen den Sondierungen mittels geostatistischer Verfahren geschlossen werden sollen.

Abschließend wurde die praktische Anwendbarkeit des Verfahrens anhand eines Beispiels der Sanierung einer setzungsfließgefährdeten Tagebaukippe gezeigt. Im Rahmen des bodenmechanischen Abschlussgutachtens des Tagebaurestloches 4 / Seese-West wurden für das anstehende Lockergestein die Korrelationen zur Berechnung von Porenanteil, Dichte und Feinkornanteil aus Drucksondierungsergebnissen bestimmt. Für die Kippenseite des Restloches sind die Verteilungen der Parameter Porenanteil, Feinkornanteil, Spitzenwiderstand und Reibungsverhältnis in 8 Tiefenschnitten berechnet und in zweidimensionaler Form dargestellt worden. Zusammen mit den im Labor in Abhängigkeit von Porenanteil, Spannung und Material ermittelten Festigkeitsparametern konnten innerhalb der Berechnungsschnitte Homogenbereiche gleicher Festigkeit voneinander abgegrenzt werden. Durch Anwenden des vorgestellten Verfahrens konnte die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Standsicherheitsberechnungen erhöht werden, was zu einer größeren Sicherheit bei der Folgenutzung des Restsees beiträgt.

Bedingt durch das Ziel des Forschungsprojekts, aus welchem die Aufgabenstellung zu dieser Arbeit abgeleitet wurde, ist die erfolgreiche Anwendung des Verfahrens zurzeit nur auf Lausitzer Tagebaukippen sicher möglich. Vor einer Anwendung des Verfahrens auf andere Objekte, z. B. im Mitteldeutschen Braunkohlerevier müssen als weitere Voraussetzung zunächst gültige Kalibrierbeziehungen der radiometrischen Messungen für das dort anstehende Material geschaffen werden. Bei Großprojekten, in denen die genannten Parameter flächendeckend und bis in große Teufen zu ermitteln sind, wird der erforderliche Aufwand zur Bestimmung

der Kalibrierbeziehungen durch die dadurch möglichen Einsparungen in jedem Fall kompensiert.

Da die Korrelationsbeziehungen objektbezogen sind, ist es bei großen Einsatzgebieten, wie den Bergbausanierungsgebieten in der Lausitz oder in Mitteldeutschland sinnvoll, den zukünftigen Bearbeitungsaufwand durch das Anlegen einer Datenbank für die Korrelationen zu verringern. Durch Vergleich der Materialeigenschaften oder anhand ausgewählter Kombinationsdrucksondierungen könnten dann bereits vorhandene Beziehungen gegebenenfalls für Objekte mit gleichen bzw. ähnlichen Materialeigenschaften verwendet werden.

Eine weitere Aufgabe besteht in Zukunft in der Weiterentwicklung des Verfahrens der radiometrischen Messungen sowie der Auswertung dabei gewonnener Messdaten, um Fehler insbesondere bei der Interpretation der Messergebnisse weiter zu minimieren und so die Genauigkeit der Messungen zu erhöhen.

## Quellenverzeichnis

- Allersma 1982 Allersma, H.G.B.: Photoelastic investigation of the stress distribution during penetration; Proceedings of European Symposium on Penetration Testing II Amsterdam; Balkema, Rotterdam; 1982
- Baghdadi 1988 Baghdadi, Z.A., Ghazali, F.M. & Khan, A.M.: Density prediction using a static cone penetrometer; Penetration Testing, ISOPT-1, Balkema, Rotterdam; 1988
- Baldi 1982 Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M. Pasqualini, E.: Design Parameters for sands from CPT; Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing Amsterdam, Balkema, Rotterdam; 1982
- Baldi 1986 Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M. Pasqualini, E.: Interpretation of CPT's and CPTU's; Fourth Geotechnical Seminar, Singapore, pp. 143-156; 1986
- Baldi 1989 Baldi et.al.; Modulus of Sands from CPT's and SPT's; Paper to 12th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering; 1989; Rio de Janeiro
- Been 1988 Been, K. & Crooks, J.: A critical appraisal of CPT calibration chamber tests; Penetration Testing, ISOPT-1, Balkema, Rotterdam; 1988
- BuS Welzow 1985 Abschlussbericht: Kombination der Drucksondierung mit geophysikalischen Verfahren, Kerngeophysikalische Kombinationsdrucksonde; VEB BuS Welzow, Großräschen, 22.11.1985
- Chambers 1983 J.M. Chambers, W.S. Cleveland: B. Kleiner; P.A. Tukey; Graphical Methods for Data Analysis; Wadsworth, Belmont, Cal. 1983
- Davis 1986 Davis, J.C.: Statistics and Data Analysis in Geology; Verlag John Wiley & Sons; 1986
- De Ruiter 1982 De Ruiter, J.: The static cone penetration test- State of the art – Report ; Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, 1982
- DIN 4094 DIN 4094: Erkundung durch Sondierungen; 12/1990 (nicht mehr gültig)
- DIN 4094-1 DIN 4094: Felduntersuchungen Teil 1: Drucksondierungen; 6/2002
- DIN 4094-2 DIN 4094: Felduntersuchungen Teil 2: Rammsondierungen; 6/2002

- Douglas 1981 Douglas, B.J., Olsen, R.S.:; Cone Penetration Testing and Experience, Session at the ASCE National Convention, St. Louis, 1981
- E-DIN 4094-1 E-DIN 4094-1: Felduntersuchungen Teil 1 Cone Penetration Test; Febr. 2001
- Förster 2002 Förster, W.; Schreyer, A.: Zur Aussagefähigkeit radiometrischer Sondierungen. Anforderungen an die radiometrische Kombinationsdrucksondierung (KDS); Gutachten, 2002
- Fricke 1999 Fricke, S.; Schön, J.: Praktische Bohrlochgeophysik. 1. Aufl. Stuttgart: Enke im Georg Thieme Verlag, 1999
- Göhler 1985 Göhler, W.: Höhere Mathematik – Formeln und Hinweise; 1985
- Gui 199 Gui, M.W., Bolton, M.D.: Geometry and scale effects in CPT and pile design; Geotechnical Site Characterization Vol. 2; Edited by Robertson & Mayne; Balkema, Rotterdam; 1998
- Hallenburg 1997 Hallenburg, J. K.: Standard methods of geophysical formation evaluation. 1. Aufl. Boca Raton u. a. : CRC Lewis Publishers, 1997
- Harder 1988 Harder, H., von Bloh, G.: Bodenansprache anhand von CPT-Ergebnissen; Zeitschr: Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau, Heft 1 2/88, S. 671 – 674
- Holden 1971 Holden, J.C.: Laboratory research on static cone penetrometers; University of Florida; Dep. Of Civil Engineering; Internal Report CE-SM-71-1; 1971
- Homilius 1964 Homilius, J; Lorch, S. ; Muhs, H : Vergleich von Ergebnissen der Isotopsonde und der Drucksonde; Mitteilungen der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik, Heft 19, Berlin, 1964
- Houlsby 1988 Houlsby, G.T.; Hitchman, R.: Calibration chamber tests of a cone penetrometer in sand; Geotechnique, Vol. 38, No.1, pp. 39-44; 1988
- IBF 1996 In-Situ-Untersuchungen an Verdichtungssprengungen in locker gelagerten rolligen Böden zur Verifizierung theoretischer Modelle und zur Übertragung der Ergebnisse von Modelluntersuchungen; Jahresbericht 1996; IBF, Universität Fridericiana Karlsruhe
- Jamiolkowski 1988 Jamiolkowski, M., Ghionna, V., Lancellotta, R. : New correlations of penetration tests for design practice; Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando; 1988

- Jefferies 1991      Jefferies, M.G., Davies, M.P.: Soil classification by cone penetration test; Canadian Geotechnical Journal 28(1); 1991
- Kahl 1968          Kahl, H.; Muhs, H.; Meyer, W.: Ermittlung der Größe und des Verlaufs des Spitzendrucks bei Drucksondierungen in ungleichförmigem Sand, in Sand-Kies-Gemischen und in Kies; Mitteilungen der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik, Heft 21, Berlin, 1968
- Kerisel 1962      Kerisel, Adam: Fondations Profondes; Ann. Inst. Techn. Du Bat. Et Trav., Publ. 15, Nr. 179
- Keys 1997         Keys, S. W.: A practical guide to borehole geophysics in environmental investigation. 1. Aufl. Boca Raton u. a.: CRC Lewish Publishers, 1997
- Kreuter 1996      Kreuter, H.: Ingenieurgeologische Aspekte geostatistischer Methoden; Veröffentlichung des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana Karlsruhe; Herausgeber: G. Gudehus, O. Natau; Karlsruhe; 1996
- Kuchling 1991     Kuchling, Horst: Taschenbuch der Physik; Fachbuchverlag Leipzig 1991; 13. Auflage; S. 577 f.
- Kulhawy 1990     Kulhawy, F.H., Mayne, P.H.: Manual on estimating soil properties for foundation design; Electric Power Research Institute; 1990
- Leitfaden 2002    Leitfaden: „Flächenhafte Ermittlung der Verdichtung stabilisierter Kippen und Kippenböschungen“, LMBV mbH, 2002
- LMBV 1999        Raumdeckender Nachweis des Sanierungserfolges an Kippen und Kippenböschungen; Zwischenbericht der Forschung im Auftrag der LMBV mbH; (1999)
- LMBV 2000        Raumdeckender Nachweis des Sanierungserfolges an Kippen und Kippenböschungen; Zwischenbericht der Forschung im Auftrag der LMBV mbH; (2000)
- LMBV 2001        Raumdeckender Nachweis des Sanierungserfolges an Kippen und Kippenböschungen; Zwischenbericht der Forschung im Auftrag der LMBV mbH; (2001)
- Marchetti 1988    Marchetti, S.: On the field determination of  $k_0$  in sand; Panel discussion at the 11<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco 1985; Pub. Balkema Rotterdam; 1988
- Mc Gill 1978      R. Mc Gill, J.W. Tukey, W.A. Larsen: Variations of Boxplots; American Statistician, 32: S.12-18; 1978

- Militzer 1985 Militzer, H.; Weber, F. (Hrsg.): Angewandte Geophysik. Bd. 2: Geoelektrik Geothermik Radiometrie Aero-geophysik. Wien u. a.: Springer Verlag, 1985
- Muhs 1967 Muhs, H; Weiß, K.: Über den Sondierwiderstand und die Tragfähigkeit nichtbindiger Böden; Mitteilungen der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik, Heft 20, Berlin, 1967
- Münster 2000 Vorlesungsmanuskript Universität Münster; Kriging; <http://www.geostatistik.de/tutorialfr.html>; 2000
- Olsen 1988 Olsen, R.S., Malone, P.G.: Soil classification and site characterisation using the cone penetrometer test; Proceedings of the International Symposium of Penetration Testing, ISOPT-1; Orlando 1988; S.887-893; Balkema Pub., Rotterdam; 1988
- Prashar 1998 Prashar, Y., Tokashiki, R.S., Brodt, G.W.: Field and laboratory testing program for the seismic evaluation of Tinemaha Dam, California; Geotechnical Site Characterization Vol. 1; Edited by Robertson & Mayne; Balkema, Rotterdam; 1998
- Reichel 1997 Reichel, G.: Verfahren zur Bestimmung des spannungsabhängigen Grenzlagerungszustandes eines vorzugsweise kohäsionslosen Lockergesteins; Deutsches Patent DE 195 35 210
- Robertson 1983 Robertson, P.K., Campanella, R.G.: Interpretation of cone penetration tests: Part II: Clay; Canadian Geotechnical Journal, 20(4); 1983
- Robertson 1985 Robertson, P.K, Campanella, R.G.; Liquefaction potential of sands using the cone penetration test; Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 22(3): S. 298-307
- Robertson 1990 Robertson, P.K.: Soil classification using electric cone penetrometer; Canadian Geotechnical Journal 27(1); 1990
- Robertson 1998 Robertson, P.K., Wride, C.E.: Evaluation cyclic liquefaction potential using the cone penetration test; Canadian Geotechnical Journal, Nr. 35: S. 442-459; 1998
- Schmertmann 1976 Schmertmann, J.: An updated correlation between Relative Density  $D_r$  and Fugro-type Electric Cone Bearing  $q_c$ ; Contract Report DACW 39-76 M 6646, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.; 1976
- Schön 1983 Schön, J.: Petrophysik. Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen. 1. Aufl. Stuttgart, 1983
- Schön 1996 Schön, J.: Physical properties of rocks. Fundamentals and principles of petrophysics. Handbook of geophysical exploration. Seismic exploration. Vol 18, 1. Aufl. Oxford u. a. , Else-

- vier, 1996
- Shihata 1998 Shihata, A.S., Azhar, K.J.: Correlation of CPT and modulus of subgrade reaction in silty sand; Geotechnical Site Characterization Vol. 2; Edited by Robertson & Mayne; Balkema, Rotterdam; 1998
- Spurk 1992 Spurk, J.H.: Dimensionsanalyse in der Strömungsmechanik; Springer Verlag; 1992
- Telford 1990 Telford, W.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E.: Applied geophysics. 2. Aufl. Cambridge: Cambridge University Press, 1990
- TP BF-StB Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Teil E 1, Prüfung auf statistischer Grundlage - Stichprobenprüfpläne
- VE BKK 1987 Erarbeitung einer Messmethodik für die radiometrische Kombinationsdrucksonde; Abschlussbericht vom 09.01.1987; VE BKK Senftenberg, Bergakademie Freiberg
- Velleman 1981 P.F. Velleman, D.C. Hoaglin: Applications, Basics and Computing of Exploratory Data Analysis; Duxbury Press; Boston; 1981
- Villet 1981 Villet, W.C.B., Mitchell, J.K.: Cone resistance, relative density and friction angle; Cone Penetration Testing and Experience, Session at the ASCE National Convention, St. Louis, 1981
- Vivatrat 1978 Vivatrat, V.: Cone Penetration in Clays; PhD-Thesis, MIT Boston, 1978
- Vreugdenhil 1994 Vreugdenhil, R., Davis, R., Berrill, J.: Interpretation of cone penetration results in multilayered soils, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 18(9), S. 585-599; 1994
- Wernecke 1995 Wernecke, K.-D.: Angewandte Statistik für die Praxis; ADDISON-WESLEY Publishing Company; 1995
- Wroth 1988 Wroth, C.P.: Penetration Testing – a more rigorous approach to interpretation; Proceedings of the International Symposium of Penetration Testing, ISOPT-1; Orlando 1988; S.303-11; Balkema Pub., Rotterdam; 1988

## Symbolverzeichnis

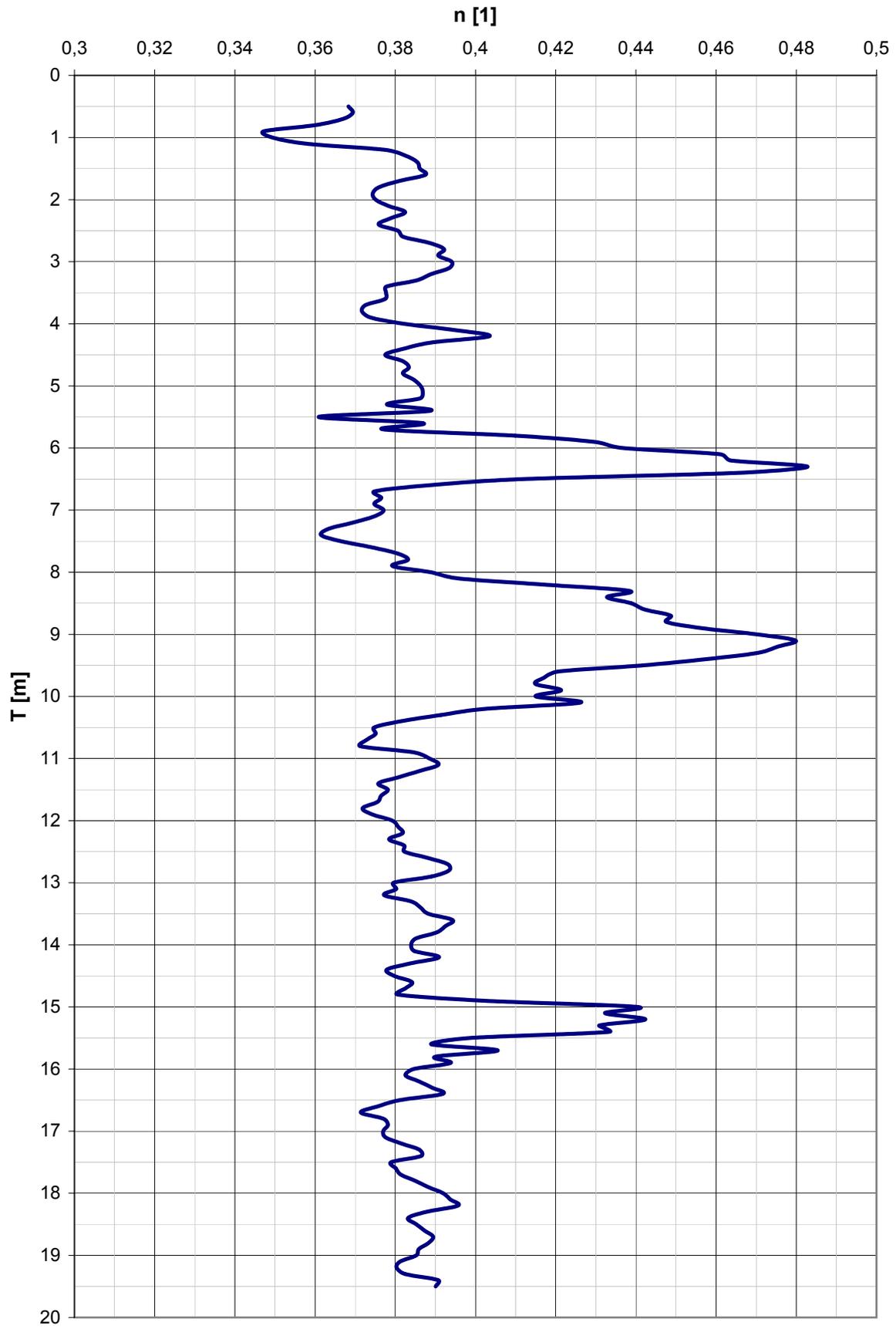
A	Atommasse
a, b, c, d	empirische Gleichungskoeffizienten
$A_c$	Sondenquerschnittsfläche
$A_s$	Fläche der Reibungshülse
$c'$	wirksame Kohäsion
$c_{u,f}$	Kohäsion im Bruchzustand, undränert
$c_{u,R}$	Kohäsion bei großen Verformungen, undränert
d	Korndurchmesser
D	Lagerungsdichte
D	Determinante
$d_c$	Durchmesser der Sondenspitze
$d_p$	Gestängedurchmesser
$d_s$	Durchmesser der Reibungshülse
$e_{max}$	Porenzahl bei lockerster Lagerung
$e_{min}$	Porenzahl bei dichtester Lagerung
FKA	Feinkornanteil
$F_r$	normalisierte Mantelreibung
$f_s$	Mantelreibung
h	Abstandsvektor
$HI_{matrix}$	Wasserstoffindex der Gesteinsmatrix
$HI_{poreinhalt}$	Wasserstoffindex des Porenhaltes
I	Intensität der $\gamma$ -Strahlung nach Passieren des Absorbers
$I_0$	Intensität der $\gamma$ -Strahlung vor Passieren des Absorbers
$I_D$	bezogene Lagerungsdichte
$I_{GG}$	Intensität der Gamma-Strahlung
$I_{NN}$	Neutronen-Impulsrate
$I_{STB}$	Soil Behaviour Type Index
$K_0$	Ruhedruckbeiwert
$l_s$	Länge der Reibungshülse

Me	Median
$M_r$	relative Molekülmasse des Gesteins
n	Porenanteil
N	Schlagzahl
N	Anzahl der Wertepaare
$n_0$	Einbauporenanteil; auf Spannung 0 kPa bezogener Porenanteil
$n_{Gr}$	Grenzporenanteil
$n_{max}$	Porenanteil bei lockerster Lagerung
$n_{min}$	Porenanteil bei dichtester Lagerung
$p_a$	Luftdruck
$q_c$	Spitzenwiderstand
$Q_c$	Axialkraft
$q_c^*$	bezogener Spitzenwiderstand
$Q_s$	Reibungskraft
$Q_t$	normalisierter Spitzenwiderstand
R	Rang, Spannweite
$r, r_s$	Korrelationskoeffizienten
$R_f$	Reibungsverhältnis
$r_i$	Residuum
S	Standardabweichung
$s^2$	Varianz
$s_F$	Interquartilsdifferenz
$S_r$	Sättigungszahl
T	Sondiertiefe
$t_f$	Bruchfestigkeit
$t_R$	Restfestigkeit
u	Porenwasserdruck
w	Wassergehalt
x	Absorberdicke
$x^*$	Arithmetisches Mittel

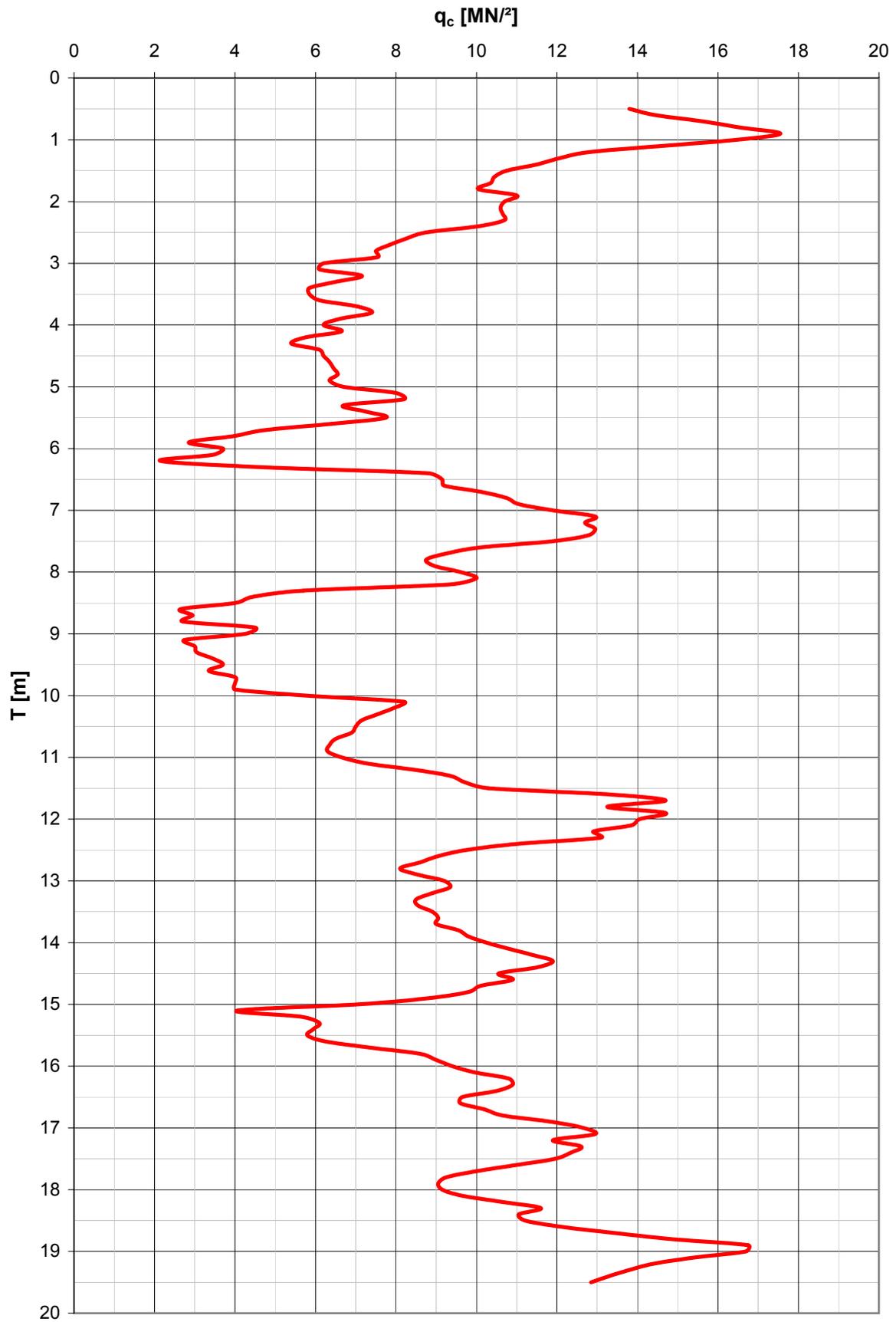
$y_i$	Stichprobenwert
$\hat{y}_i$	Schätzwert
$Z$	Kernladungszahl; Variogrammparameter
$z$	Teufe; Beobachtungsvariable
$Z_{\text{eff}}$	effektive Ordnungszahl
$\Delta z$	Teufendifferenz
$\Phi$	Porosität
$\Phi_{\text{NN}}$	Neutronenporosität
$\Pi_1, \Pi_2$	dimensionslose Parameter
$\gamma$	Wichte des feuchten Bodens
$\gamma'$	Wichte unter Auftrieb
$\gamma(h)$	Variogrammschätzer
$\gamma_0(h)$	Nuggeteffekt
$\gamma_r$	Wichte des wassergesättigten Bodens
$\gamma_s(h)$	Schwellenwert
$\varphi'$	wirksamer Reibungswinkel
$\varphi_{u,f}$	undrännierter Bruchreibungswinkel
$\varphi_{u,R}$	undrännierter Restreibungswinkel
$\mu_c$	Compton-Absorptionskoeffizient des Absorbermaterials
$\rho$	Natürliche Dichte
$\rho_d$	Trockendichte
$\rho_{\text{GG}}$	gemessener Dichtewert (Gamma-Gamma- oder Elektronendichte)
$\rho_p$	Dichte des Porenhaltes
$\rho_w$	Dichte des Wassers
$\rho_s$	Korndichte
$\sigma_R$	Referenzspannung
$\sigma_{v,0}$	totale vertikale Überlagerungsspannung
$\sigma'_{v,0}$	effektive vertikale Überlagerungsspannung

## Anlagenverzeichnis

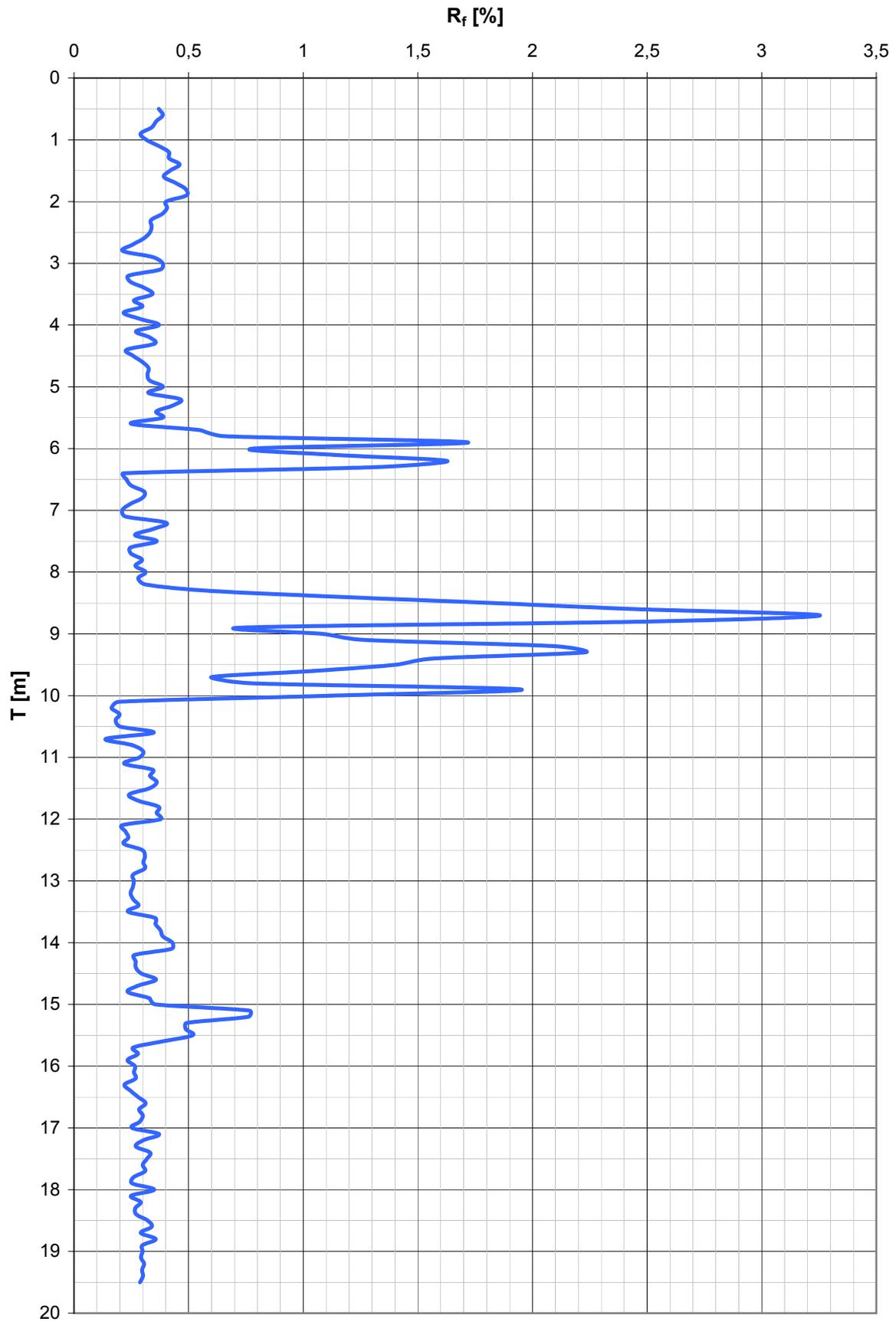
Anlage 5.1	Porenanteil KDS 1v, RL Koschen
Anlage 5.2	Spitzenwiderstand KDS 1v, RL Koschen
Anlage 5.3	Reibungsverhältnis KDS 1v, RL Koschen
Anlage 5.4	Messwerttabelle KDS 1v, RL Koschen
Anlage 6.1	Statistische Verteilungsparameter der Sondierungen auf dem Koschendammm
Anlage 7.1	Sondierdiagramm DS 2/1
Anlage 7.2	Sondierdiagramm KDS 2/4
Anlage 8.1	Übersichtskarte Restloch 4 (Quelle: LMBV mbH, Länderbereich Brandenburg)
Anlage 8.2	Prinzipschema des flächendeckenden Verdichtungsnachweis
Anlage 8.3	Sondierdiagramm DS N 143
Anlage 8.4	Sondierdiagramm KDS N 148
Anlage 8.5	Sondierungen auf den Ersatzprofilen
Anlage 8.6	Tiefenschnitte HQ 1 für n, FKA, $q_c$ und $R_f$
Anlage 8.7	Tiefenschnitte HQ 2 für n, FKA, $q_c$ und $R_f$
Anlage 8.8	Tiefenschnitte HQ 3 für n, FKA, $q_c$ und $R_f$
Anlage 8.9	Tiefenschnitte HQ 4 für n, FKA, $q_c$ und $R_f$
Anlage 8.10	Tiefenschnitte NQ 11 für n, FKA, $q_c$ und $R_f$
Anlage 8.11	Tiefenschnitte HQ 6 für n, FKA, $q_c$ und $R_f$
Anlage 8.12	Tiefenschnitte HQ 7 für n, FKA, $q_c$ und $R_f$
Anlage 8.13	Tiefenschnitte As-Kopfböschung für n, FKA, $q_c$ und $R_f$
Anlagen 8.14 bis 8.24	Berechnungsschnitte A, B+C, F, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7



Anlage 5.1: Porenanteil KDS 1v



Anlage 5.2: Spitzenwiderstand KDS 1v



Anlage 5.3: Reibungsverhältnis KDS 1v

Rohdaten				KDS 1v vom 26.05.1997			RDV Koschendam		
Teufe	Feinkornanteil	Dichte	Porenanteil	Spitzenwiderst.	Mantelreibung	Reibungsverh.			
T	FKA	$\rho$	n	$q_c$	$q_s$	$R_f$			
[m]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[1]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[-]			
0,5	13,793	1,732	0,368	13,8	0,051	0,370			
0,6	11,741	1,735	0,369	14,45	0,056	0,388			
0,7	9,347	1,740	0,367	15,6	0,056	0,359			
0,8	9,347	1,764	0,360	16,55	0,056	0,338			
0,9	10,031	1,801	0,347	17,55	0,051	0,291			
1	9,347	1,805	0,349	16,45	0,052	0,316			
1,1	7,296	1,779	0,358	14,6	0,054	0,370			
1,2	9,689	1,732	0,378	12,8	0,053	0,414			
1,3	10,031	1,716	0,383	12,05	0,05	0,415			
1,4	9,347	1,721	0,386	11,5	0,053	0,461			
1,5	9,347	1,728	0,386	10,75	0,045	0,419			
1,6	7,979	1,729	0,388	10,45	0,041	0,392			
1,7	8,321	1,751	0,381	10,35	0,046	0,444			
1,8	9,689	1,761	0,376	10,05	0,049	0,488			
1,9	7,979	1,763	0,374	11	0,054	0,491			
2	7,638	1,762	0,375	10,7	0,043	0,402			
2,1	7,638	1,749	0,378	10,6	0,043	0,406			
2,2	9,689	1,736	0,382	10,65	0,041	0,385			
2,3	11,399	1,750	0,379	10,7	0,036	0,336			
2,4	10,031	1,788	0,376	10,05	0,034	0,338			
2,5	9,005	1,842	0,381	8,75	0,029	0,331			
2,6	9,005	1,904	0,382	8,25	0,025	0,303			
2,7	7,979	1,938	0,389	7,85	0,02	0,255			
2,8	8,663	1,946	0,392	7,5	0,016	0,213			
2,9	7,638	1,942	0,391	7,55	0,026	0,344			
3	7,979	1,940	0,394	6,2	0,024	0,387			
3,1	10,031	1,947	0,394	6,1	0,023	0,377			
3,2	9,347	1,956	0,389	7,15	0,017	0,238			
3,3	9,005	1,968	0,385	6,5	0,016	0,246			
3,4	10,031	1,968	0,378	5,85	0,018	0,308			
3,5	11,057	1,980	0,378	5,85	0,02	0,342			
3,6	10,031	1,978	0,377	6,1	0,016	0,262			
3,7	10,373	1,989	0,373	7,05	0,021	0,298			
3,8	9,689	1,980	0,372	7,4	0,016	0,216			
3,9	9,689	1,966	0,374	6,6	0,019	0,288			
4	8,663	1,942	0,382	6,2	0,023	0,371			
4,1	6,270	1,933	0,395	6,65	0,018	0,271			
4,2	5,928	1,919	0,403	5,75	0,019	0,330			
4,3	7,638	1,927	0,389	5,4	0,019	0,352			
4,4	8,321	1,945	0,382	6,1	0,014	0,230			
4,5	7,638	1,970	0,377	6,2	0,016	0,258			
4,6	5,586	1,982	0,382	6,35	0,019	0,299			
4,7	4,560	1,981	0,383	6,45	0,021	0,326			
4,8	4,902	1,978	0,382	6,55	0,021	0,321			
4,9	3,876	1,969	0,385	6,35	0,021	0,331			
5	4,902	1,968	0,386	6,7	0,026	0,388			
5,1	6,270	1,960	0,387	8	0,026	0,325			
5,2	6,954	1,953	0,386	8,2	0,038	0,463			
5,3	9,005	1,949	0,378	6,7	0,029	0,433			
5,4	11,399	1,936	0,389	7,25	0,026	0,359			
5,5	16,624	1,947	0,361	7,75	0,03	0,387			

5,6	13,435	1,957	0,387	6,4	0,016	0,250
5,7	15,827	1,943	0,377	4,75	0,026	0,547
5,8	18,219	1,908	0,410	3,95	0,026	0,658
5,9	19,814	1,878	0,430	2,85	0,049	1,719
6	23,003	1,860	0,437	3,7	0,029	0,784
6,1	16,624	1,831	0,461	3,45	0,039	1,130
6,2	15,827	1,813	0,464	2,15	0,035	1,628
6,3	10,040	1,819	0,483	4,65	0,061	1,312
6,4	6,612	1,857	0,465	8,8	0,019	0,216
6,5	5,928	1,920	0,412	9,15	0,021	0,230
6,6	5,244	1,974	0,388	9,2	0,023	0,250
6,7	3,876	2,006	0,375	10,1	0,031	0,307
6,8	2,850	2,005	0,377	10,75	0,032	0,298
6,9	2,850	2,010	0,375	11,05	0,027	0,244
7	2,850	2,005	0,377	11,9	0,025	0,210
7,1	2,850	1,997	0,375	12,95	0,029	0,224
7,2	5,244	2,008	0,369	12,7	0,051	0,402
7,3	5,586	2,005	0,363	12,95	0,045	0,347
7,4	5,586	2,000	0,361	12,8	0,034	0,266
7,5	4,560	1,993	0,366	11,9	0,043	0,361
7,6	2,166	1,978	0,374	10,1	0,025	0,248
7,7	1,824	1,970	0,381	9,25	0,023	0,249
7,8	5,244	1,976	0,383	8,75	0,026	0,297
7,9	5,928	1,975	0,379	8,95	0,024	0,268
8	6,612	1,955	0,389	9,6	0,03	0,313
8,1	5,244	1,940	0,396	10	0,028	0,280
8,2	6,954	1,935	0,417	9,35	0,029	0,310
8,3	9,005	1,904	0,438	5,7	0,033	0,579
8,4	22,206	1,903	0,433	4,45	0,051	1,146
8,5	24,598	1,915	0,439	4	0,073	1,825
8,6	22,206	1,923	0,442	2,65	0,065	2,453
8,7	22,206	1,905	0,449	2,95	0,096	3,254
8,8	19,814	1,880	0,448	2,7	0,068	2,519
8,9	18,219	1,838	0,456	4,5	0,033	0,733
9	19,016	1,814	0,470	4,25	0,046	1,082
9,1	22,206	1,807	0,480	2,75	0,035	1,273
9,2	24,598	1,821	0,475	3	0,063	2,100
9,3	26,990	1,837	0,470	3,05	0,068	2,230
9,4	26,192	1,862	0,458	3,45	0,054	1,565
9,5	29,382	1,883	0,442	3,7	0,052	1,405
9,6	27,787	1,908	0,421	3,35	0,035	1,045
9,7	23,800	1,909	0,417	4	0,024	0,600
9,8	21,408	1,904	0,415	4	0,031	0,775
9,9	21,408	1,886	0,421	4	0,078	1,950
10	22,206	1,873	0,415	5,8	0,065	1,121
10,1	11,430	1,876	0,426	8,2	0,016	0,195
10,2	6,240	1,898	0,402	7,95	0,013	0,164
10,3	5,586	1,924	0,391	7,55	0,015	0,199
10,4	3,534	1,955	0,381	7,15	0,013	0,182
10,5	3,192	1,974	0,375	7	0,014	0,200
10,6	3,534	1,983	0,375	6,9	0,024	0,348
10,7	5,586	1,987	0,373	6,5	0,009	0,138
10,8	6,270	2,002	0,371	6,35	0,016	0,252
10,9	5,244	1,991	0,385	6,3	0,019	0,302
11	5,928	1,983	0,389	6,65	0,019	0,286
11,1	5,244	1,983	0,391	7,3	0,016	0,219

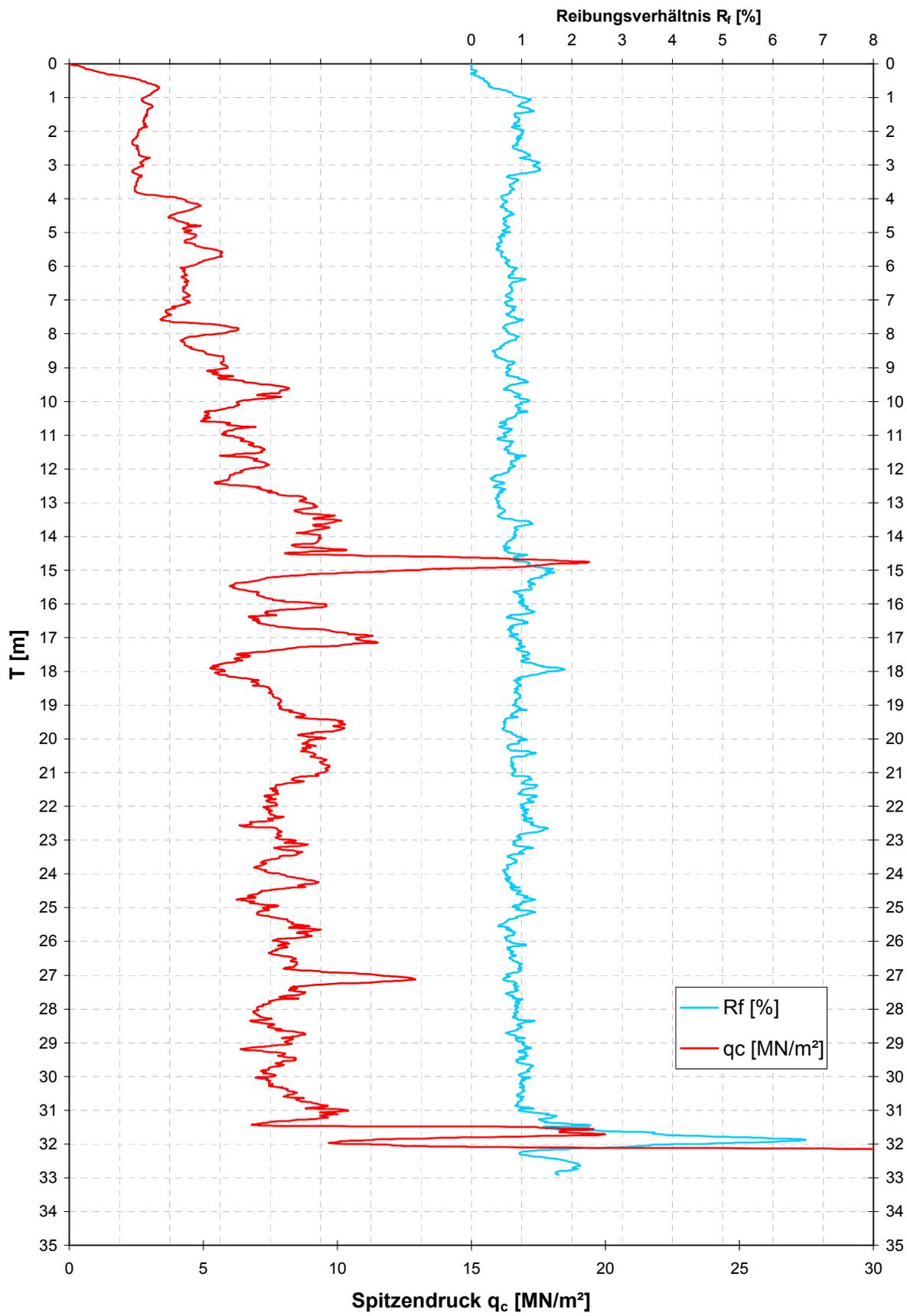
11,2	3,534	1,997	0,386	8,45	0,029	0,343
11,3	5,928	1,998	0,381	9,35	0,031	0,332
11,4	6,954	2,003	0,376	9,7	0,035	0,361
11,5	6,270	1,998	0,378	10,3	0,034	0,330
11,6	5,928	1,998	0,376	13,3	0,032	0,241
11,7	4,560	2,000	0,376	14,7	0,041	0,279
11,8	4,902	2,007	0,372	13,25	0,049	0,370
11,9	4,560	1,997	0,374	14,7	0,053	0,361
12	3,876	1,980	0,379	14,05	0,053	0,377
12,1	5,928	1,966	0,381	13,85	0,029	0,209
12,2	5,928	1,962	0,382	12,9	0,029	0,225
12,3	4,560	1,974	0,378	13,1	0,031	0,237
12,4	3,876	1,973	0,382	11,05	0,024	0,217
12,5	3,534	1,981	0,382	9,75	0,029	0,297
12,6	3,876	1,980	0,388	9,05	0,028	0,309
12,7	5,586	1,979	0,393	8,6	0,026	0,302
12,8	4,560	1,981	0,393	8,1	0,025	0,309
12,9	3,876	1,988	0,389	8,55	0,022	0,257
13	5,244	2,008	0,380	9,2	0,024	0,261
13,1	5,586	2,010	0,380	9,35	0,024	0,257
13,2	3,534	2,015	0,377	8,9	0,022	0,247
13,3	3,192	1,997	0,384	8,5	0,022	0,259
13,4	3,192	1,992	0,386	8,55	0,024	0,281
13,5	3,876	1,987	0,388	8,9	0,021	0,236
13,6	2,508	1,976	0,394	9,05	0,032	0,354
13,7	2,850	1,974	0,392	9	0,032	0,356
13,8	3,876	1,975	0,390	9,55	0,036	0,377
13,9	2,508	1,987	0,385	9,8	0,038	0,388
14	1,824	1,980	0,384	10,25	0,044	0,429
14,1	1,482	1,982	0,385	10,8	0,046	0,426
14,2	3,534	1,977	0,391	11,4	0,03	0,263
14,3	4,902	1,991	0,384	11,9	0,032	0,269
14,4	4,902	2,002	0,378	11,5	0,031	0,270
14,5	2,850	1,997	0,380	10,55	0,031	0,294
14,6	2,850	1,988	0,384	10,9	0,039	0,358
14,7	4,560	1,987	0,383	10,1	0,028	0,277
14,8	3,876	1,984	0,381	9,8	0,023	0,235
14,9	3,876	1,944	0,402	8,8	0,029	0,330
15	4,902	1,899	0,440	7,05	0,025	0,355
15,1	14,232	1,855	0,432	4,05	0,031	0,765
15,2	16,624	1,846	0,442	5,65	0,043	0,761
15,3	14,232	1,870	0,431	6,1	0,03	0,492
15,4	13,435	1,893	0,433	5,95	0,029	0,487
15,5	15,827	1,899	0,399	5,8	0,03	0,517
15,6	15,029	1,903	0,389	6,25	0,024	0,384
15,7	13,435	1,927	0,406	7,35	0,019	0,259
15,8	7,853	1,945	0,390	8,6	0,024	0,279
15,9	4,218	1,953	0,394	9	0,021	0,233
16	4,902	1,967	0,385	9,4	0,025	0,266
16,1	5,928	1,972	0,383	9,95	0,026	0,261
16,2	5,928	1,972	0,386	10,8	0,029	0,269
16,3	4,902	1,963	0,389	10,9	0,024	0,220
16,4	4,218	1,956	0,392	10,5	0,026	0,248
16,5	4,902	1,970	0,381	9,65	0,027	0,280
16,6	3,876	1,983	0,376	9,6	0,03	0,313
16,7	5,586	1,997	0,371	10,2	0,029	0,284

16,8	6,612	1,989	0,377	10,65	0,032	0,300
16,9	5,586	1,995	0,378	11,85	0,034	0,287
17	4,218	1,995	0,377	12,65	0,032	0,253
17,1	4,560	2,002	0,378	12,95	0,048	0,371
17,2	3,192	1,994	0,382	11,9	0,036	0,303
17,3	2,850	1,983	0,386	12,6	0,034	0,270
17,4	2,508	1,982	0,386	12,35	0,041	0,332
17,5	2,850	1,999	0,379	11,95	0,038	0,318
17,6	2,508	1,999	0,380	11	0,033	0,300
17,7	3,192	2,001	0,381	10	0,031	0,310
17,8	5,586	1,992	0,385	9,25	0,024	0,259
17,9	5,244	1,978	0,388	9,05	0,023	0,254
18	4,218	1,960	0,392	9,15	0,032	0,350
18,1	2,166	1,953	0,394	9,65	0,024	0,249
18,2	3,534	1,948	0,396	10,65	0,031	0,291
18,3	3,534	1,970	0,388	11,6	0,031	0,267
18,4	4,560	1,988	0,383	11,05	0,03	0,271
18,5	6,270	1,999	0,385	11,2	0,036	0,321
18,6	5,244	1,998	0,387	12,1	0,041	0,339
18,7	4,218	1,997	0,389	13,4	0,039	0,291
18,8	5,586	1,991	0,388	14,85	0,053	0,357
18,9	6,954	1,991	0,386	16,75	0,05	0,299
19	4,560	1,985	0,385	16,7	0,05	0,299
19,1	4,218	1,987	0,381	15,4	0,045	0,292
19,2	3,192	1,992	0,380	14,4	0,044	0,306
19,3	3,192	1,987	0,382	13,8	0,041	0,297
19,4	4,218	1,976	0,391	13,3	0,04	0,301
19,5	4,902	1,978	0,390	12,85	0,037	0,288

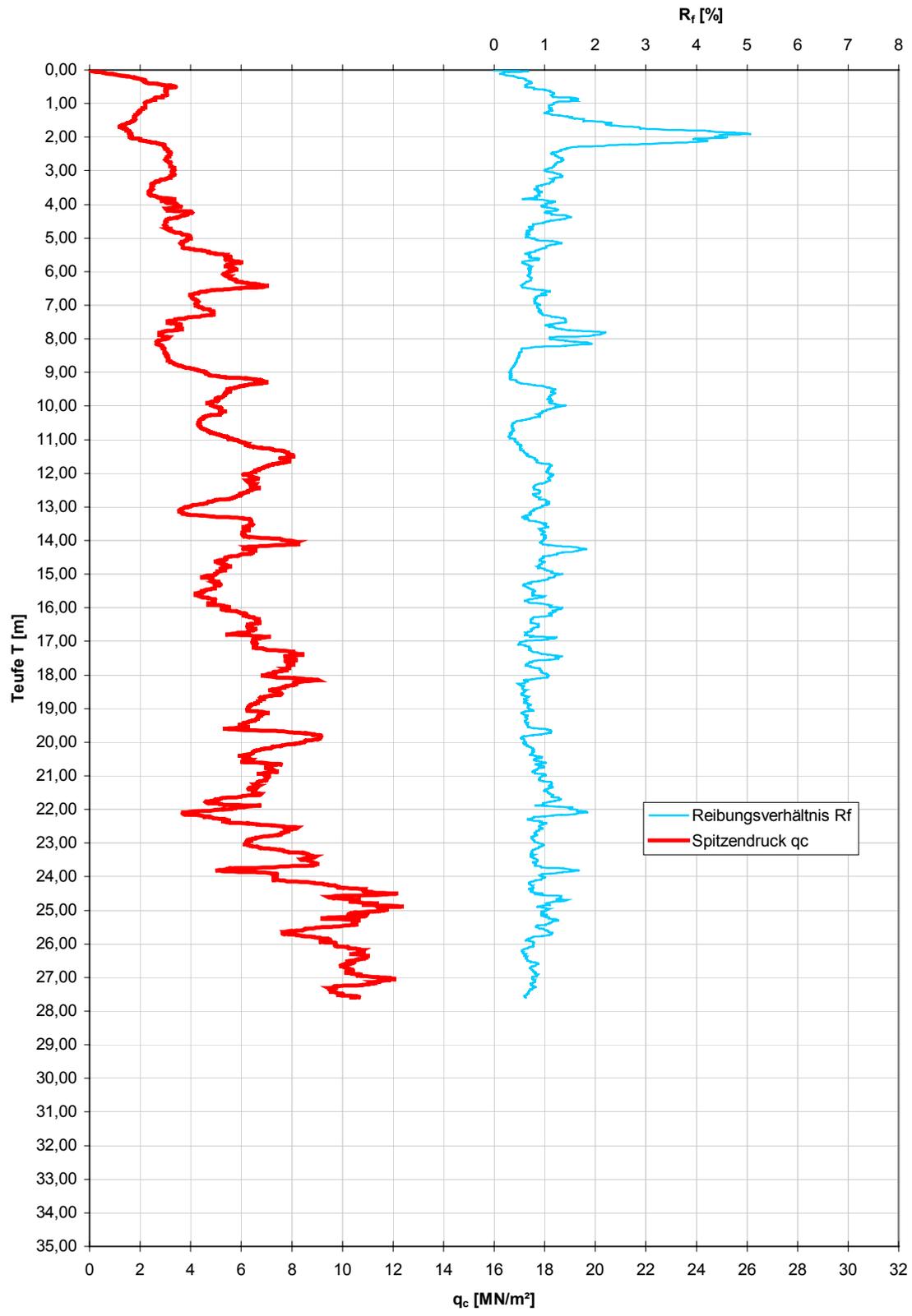
Anlage 5.4: Messwerttabelle KDS 1v, RL Koschen

Sondierung	Messwerte $n$	arithm. Mittel $\bar{x}$	Standardabw. $\sigma$	Konfidenzint. 5%	Median Me	1/4-Quartil $Q_{1/4}$	3/4-Quartil $Q_{3/4}$	Interquartilsdiff. s <sub>F</sub>	Größtwert max R <sub>f</sub>	Kleinstwert min R <sub>f</sub>
KDS A2/B2	1547	1,19	0,56	0,028	1,00	0,8	1,46	0,66	4,41	0,43
DS B1	1547	1,23	0,72	0,036	0,92	0,75	1,48	0,73	4,90	0,42
DS A2	1547	1,10	0,85	0,042	0,73	0,49	1,51	1,02	4,89	0,25
DS A3	1547	0,87	0,58	0,029	0,63	0,47	1,06	0,59	3,48	0,30
KDS B1	1547	1,12	0,53	0,026	0,99	0,73	1,31	0,58	5,17	0,38
DS A1	1547	1,08	0,77	0,038	0,76	0,56	1,44	0,89	4,78	0,28
KDS A1	1547	0,84	0,44	0,022	0,75	0,60	0,95	0,34	4,36	0,19
KDS A3	1547	1,26	0,51	0,025	1,15	0,92	1,42	0,50	4,16	0,41

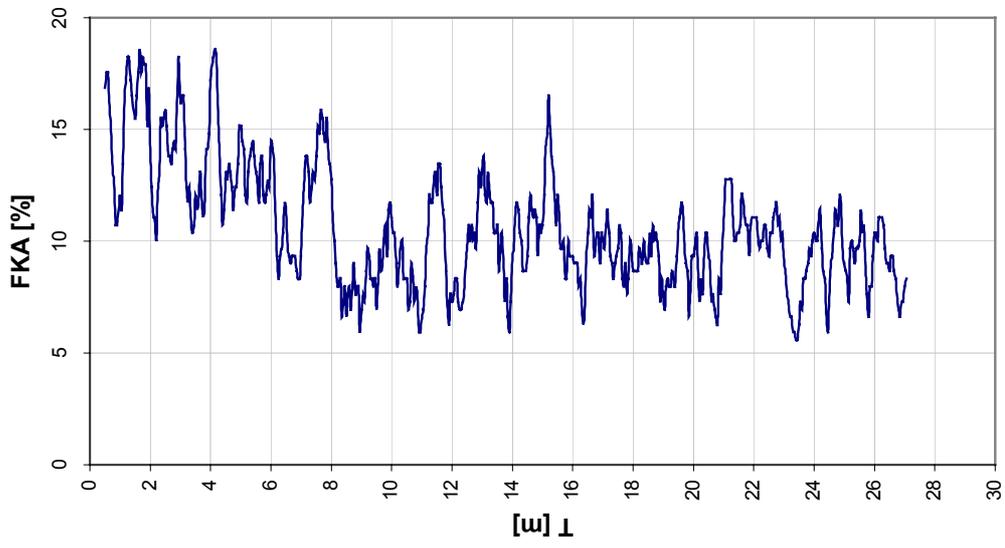
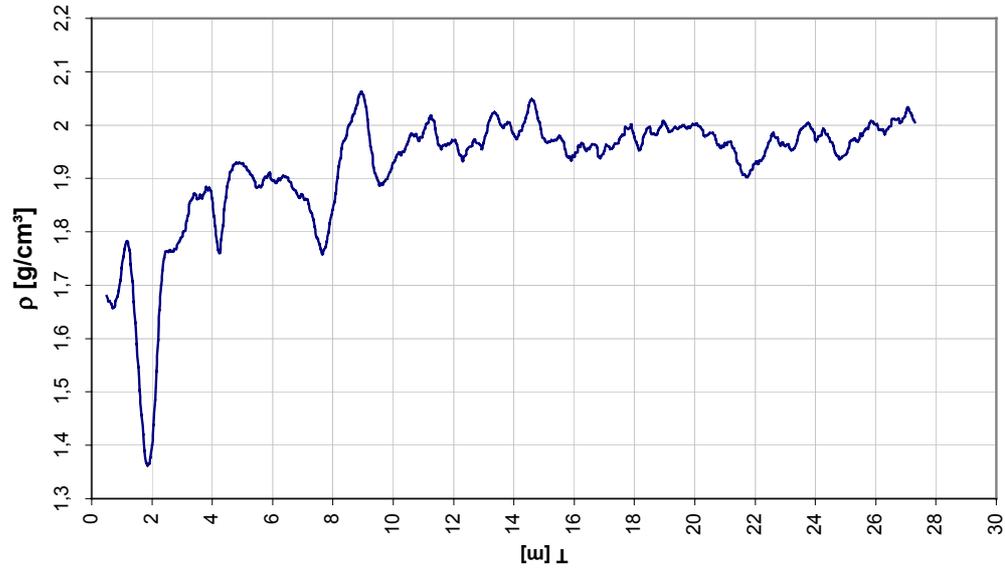
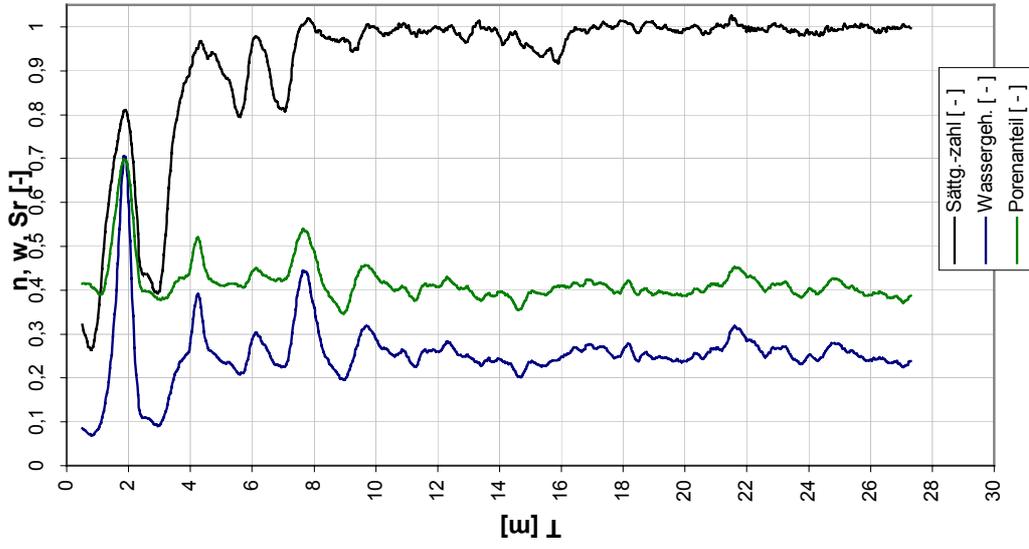
Anlage 6.1: Statistische Verteilungsparameter der Sondierungen auf dem Koschendammm



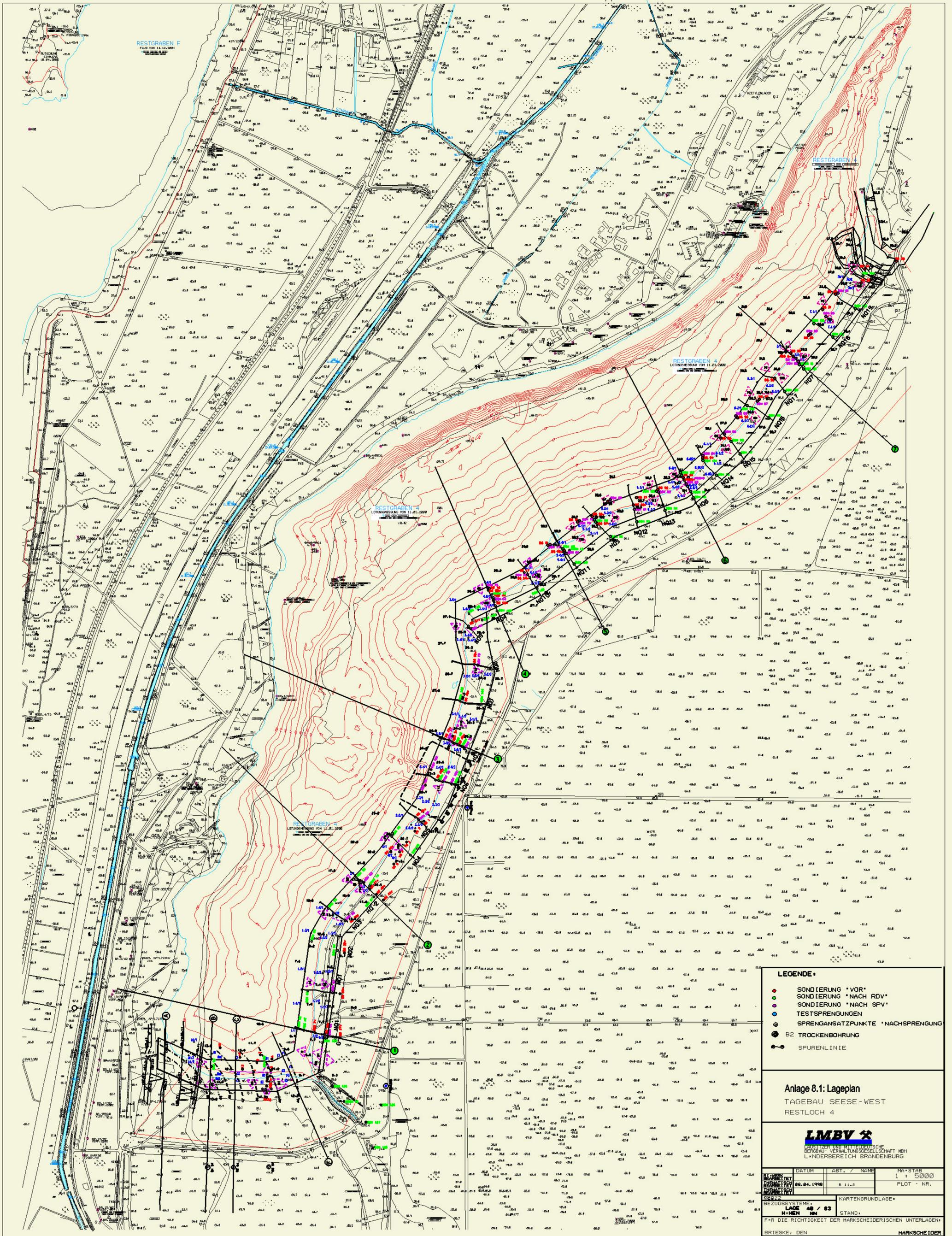
Anlage 7.1: DS 2/1 (Innenkippe Koschen)



Anlage 7.2 a: KDS 2/4 - DS Messwerte (Innenkippe Koschen)



Anlage 7.2 b: Kennwerte KDS 2/4 (Innenkippe)



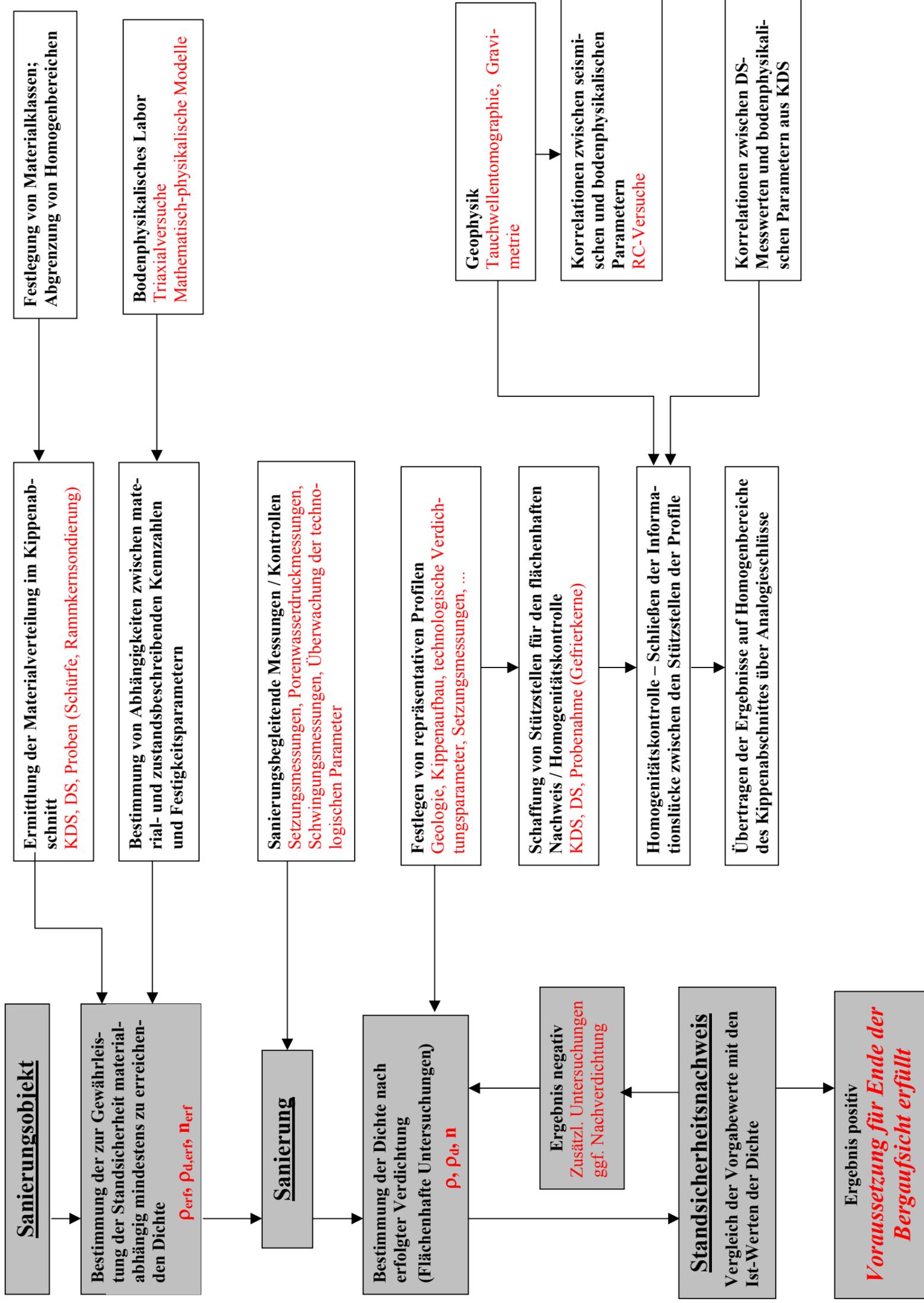
- LEGENDE:**
- SONDIERUNG "VOR"
  - SONDIERUNG "NACH RDV"
  - SONDIERUNG "NACH SPV"
  - TESTSPRENGUNGEN
  - SPRENGANSATZPUNKTE "NACHSPRENGUNG"
  - B2 TROCKENBOHRUNG
  - SPURENLINIE

**Anlage 8.1: Lageplan**  
 TAUBEBAU SEESE-WEST  
 RESTLOCH 4

**LMBV**  
 CONSULTING UND MITTELDEUTSCHE  
 BERGBAU-VERWALTUNGSGESELLSCHAFT MBH  
 LÄNDERBEREICH BRANDENBURG

BLATTNR.	DATUM	ABT. / NAME	MAßSTAB
08.04.1998	06.04.1998	B 11.2	1 : 5000
BEZUGSSYSTEME:	KARTENGRUNDLAGE:		
LAOS 48 / 83	STAND:		

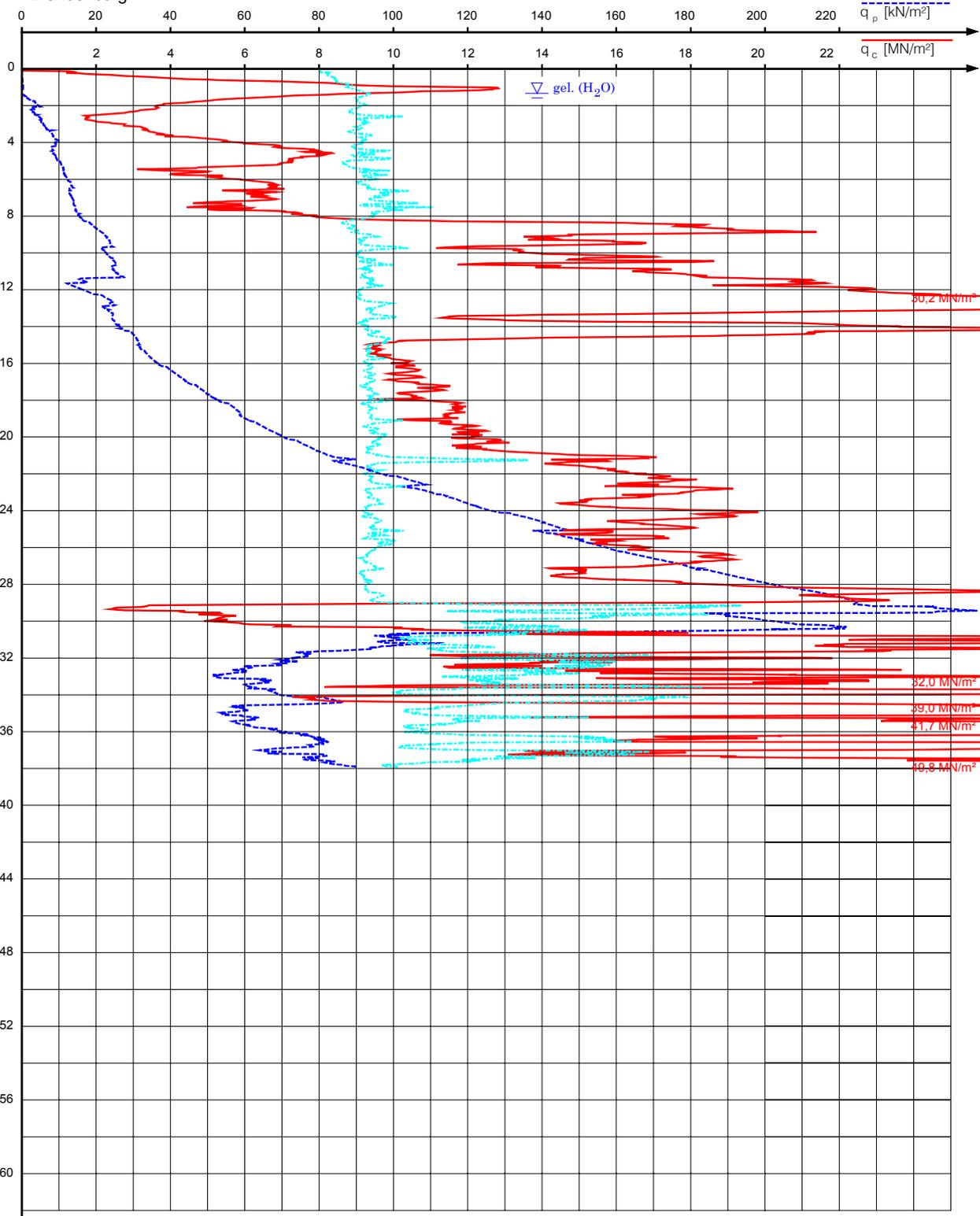
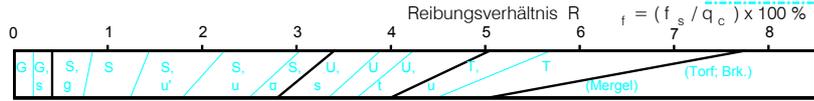
FÜR DIE RICHTIGKEIT DER MARKSCHIEDERISCHEN UNTERLAGEN:  
 BRIESKE, DEN MARKSCHIEDER



Anlage 8.2: Schema für die Durchführung des Verdichtungsnachweises



Brandenburg



T [m]      Rechtswert: 29.927,05      Hochwert: 41.792,94      Höhe: 53,45 mNN      Anlage

DRUCKSONDIERUNG			
Objekt :	Restloch 4	Ans.-punkt :	DS N 143
		Datum :	06.03.2003

Anlage 8.3: DS N 143

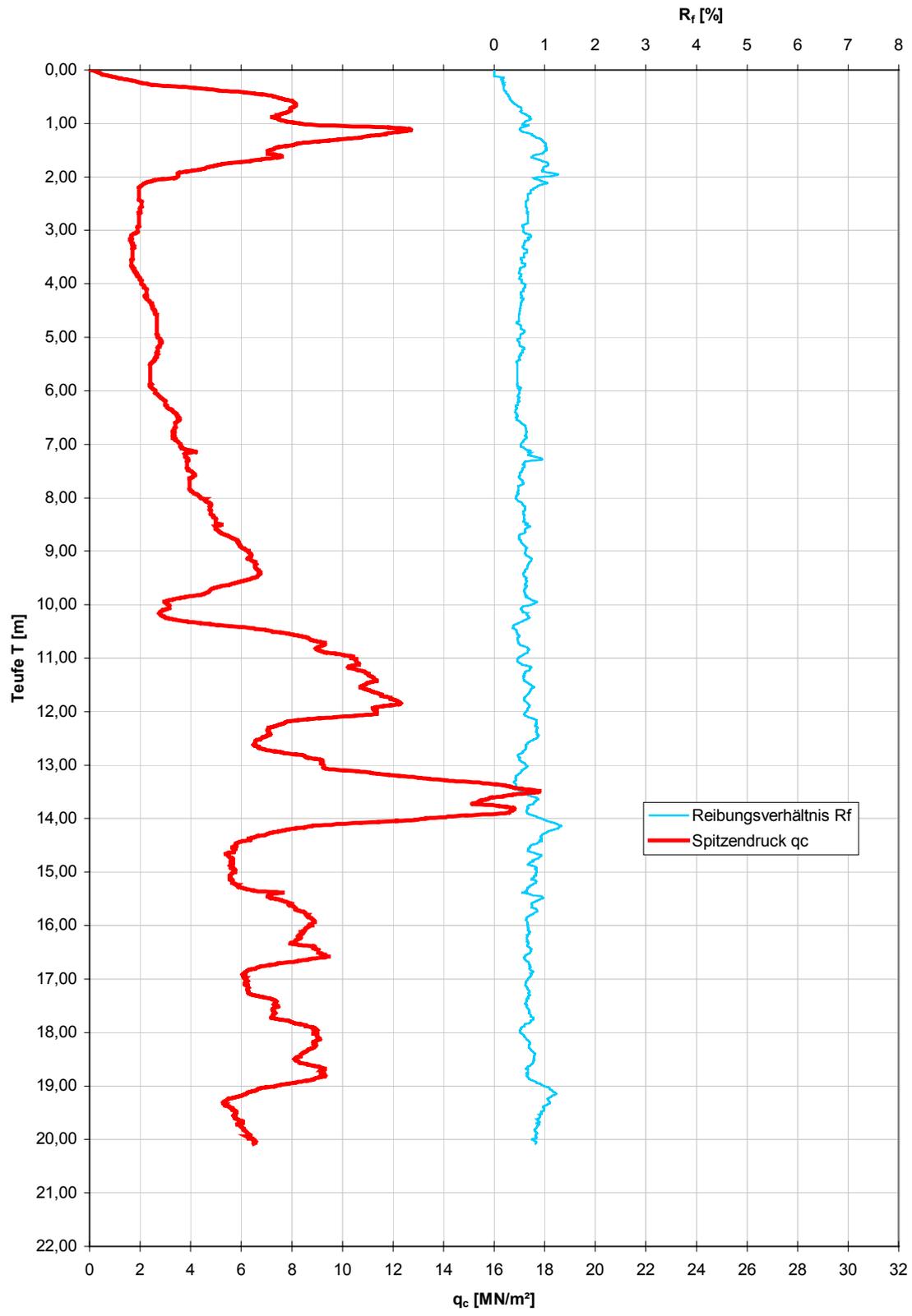
30,2 MN/m²

32,0 MN/m²

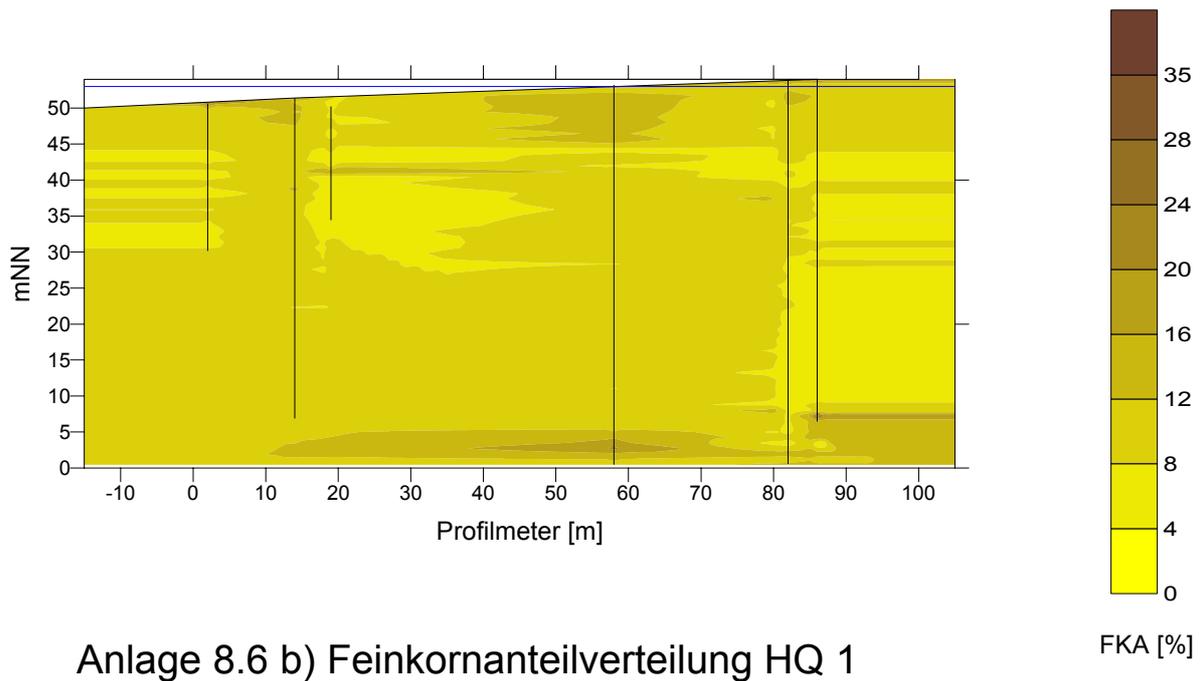
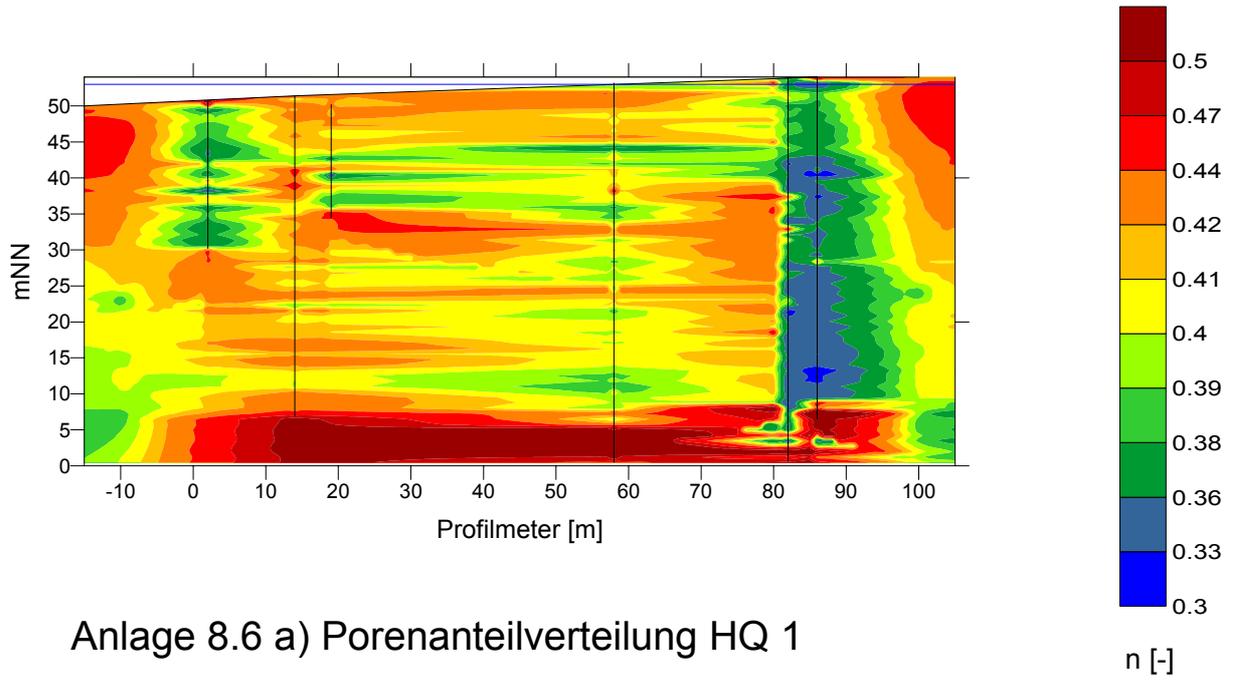
39,0 MN/m²

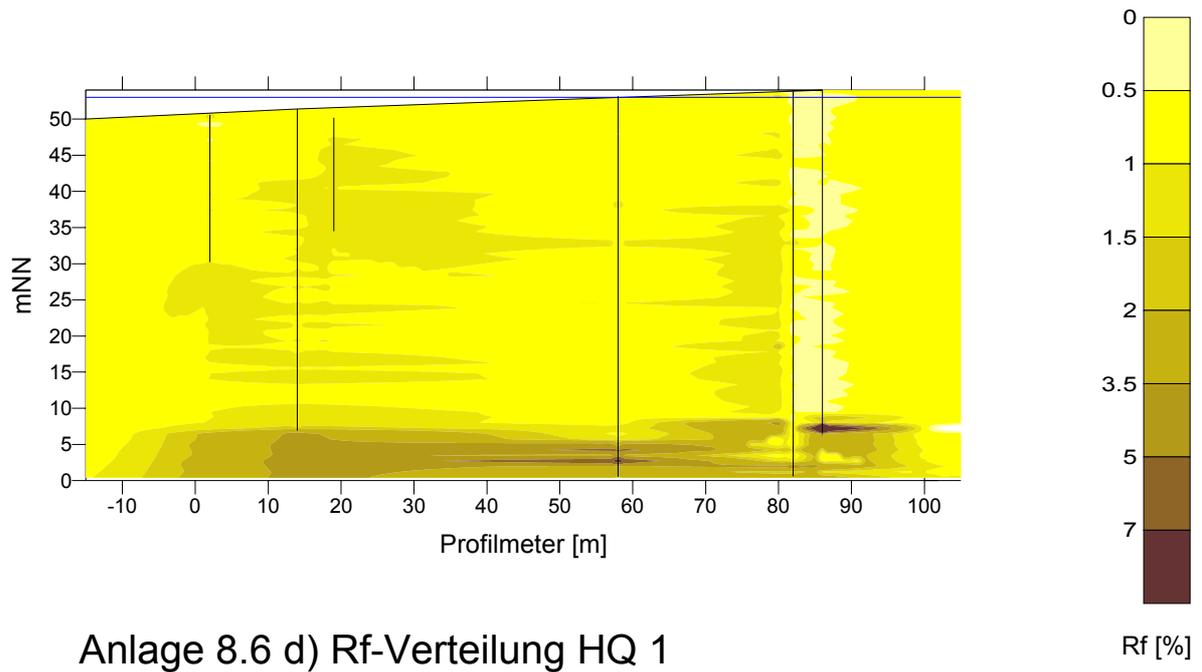
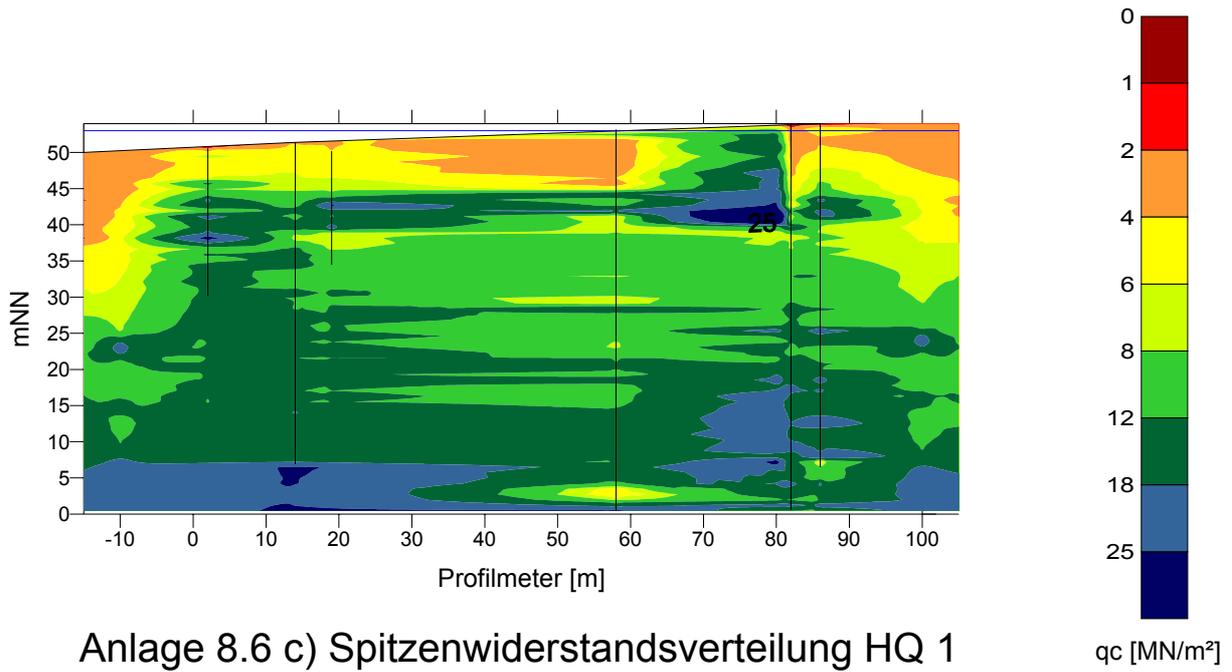
41,7 MN/m²

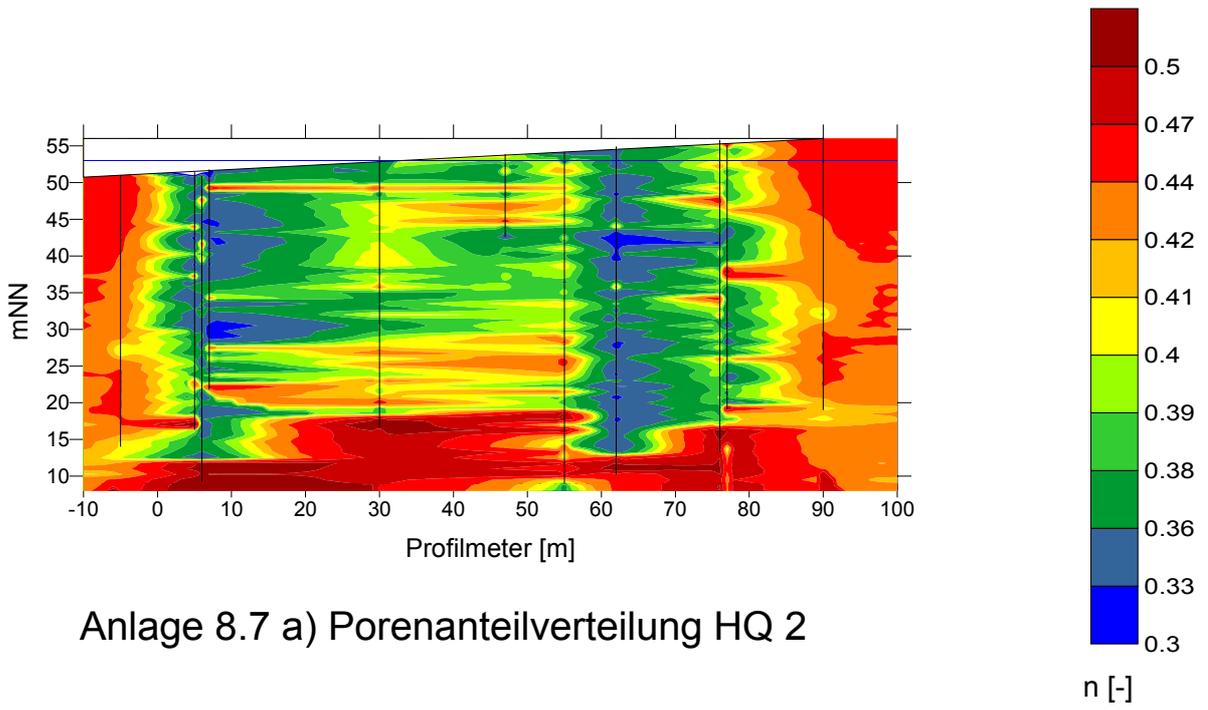
40,8 MN/m²



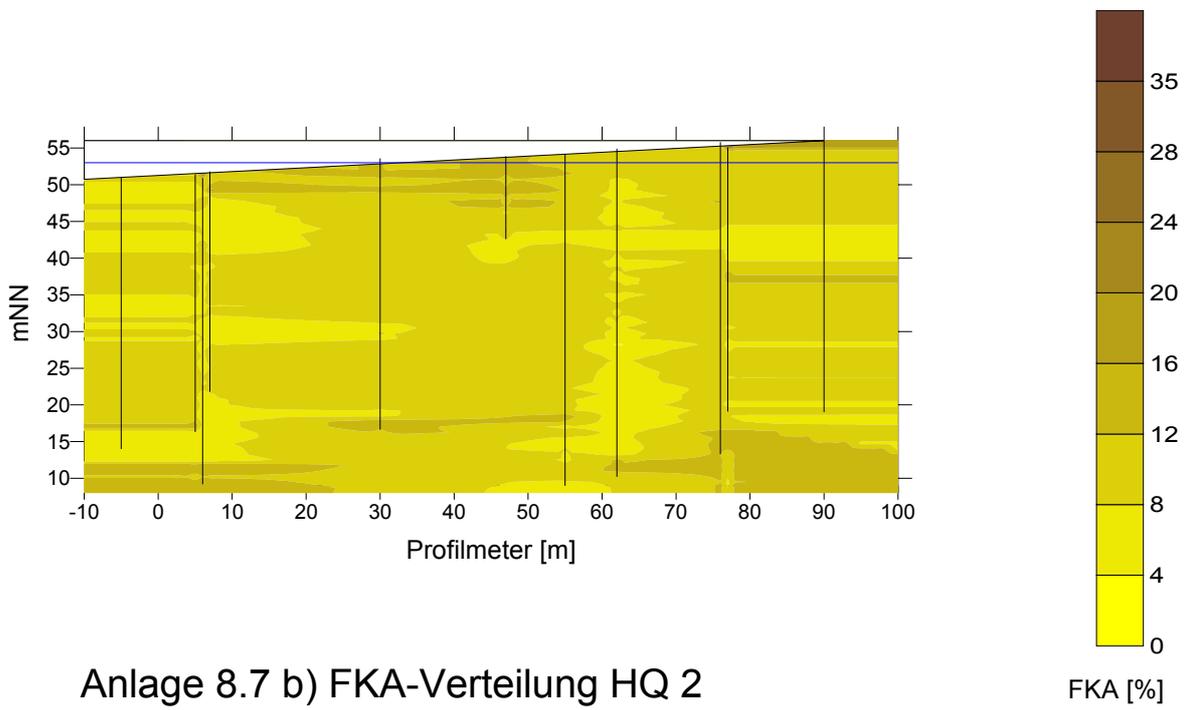
Anlage 8.4 a: KDS N 148 - DS Messwerte



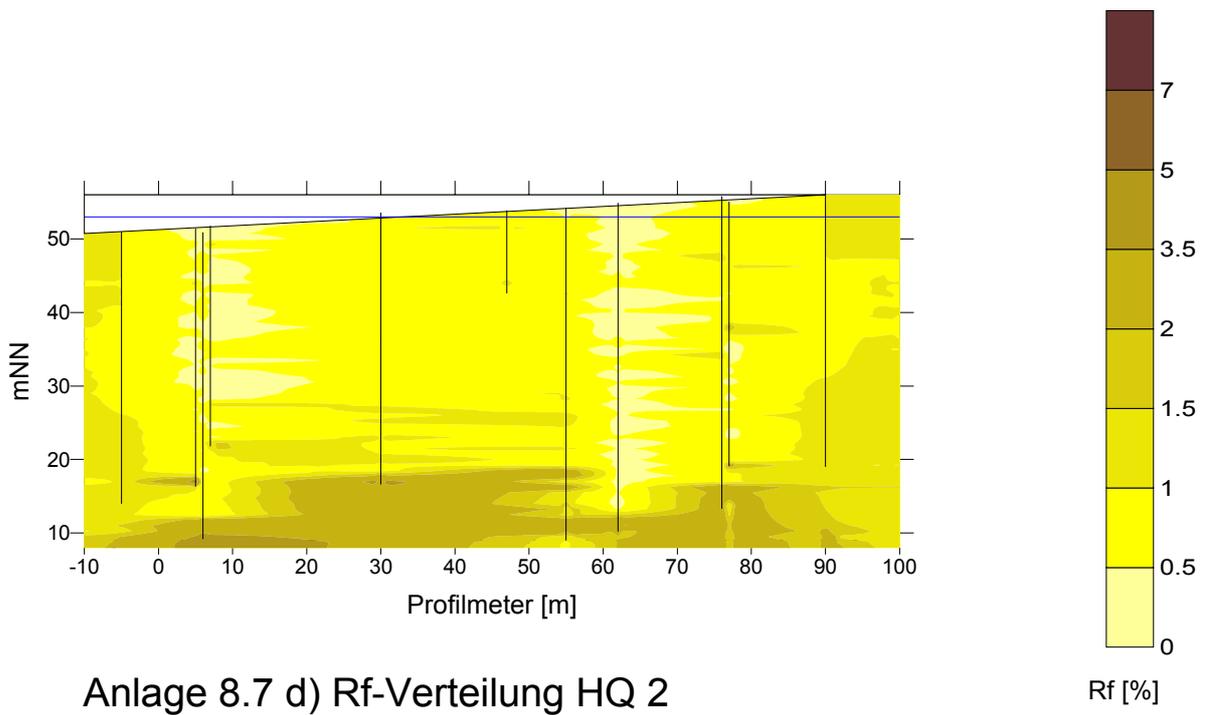
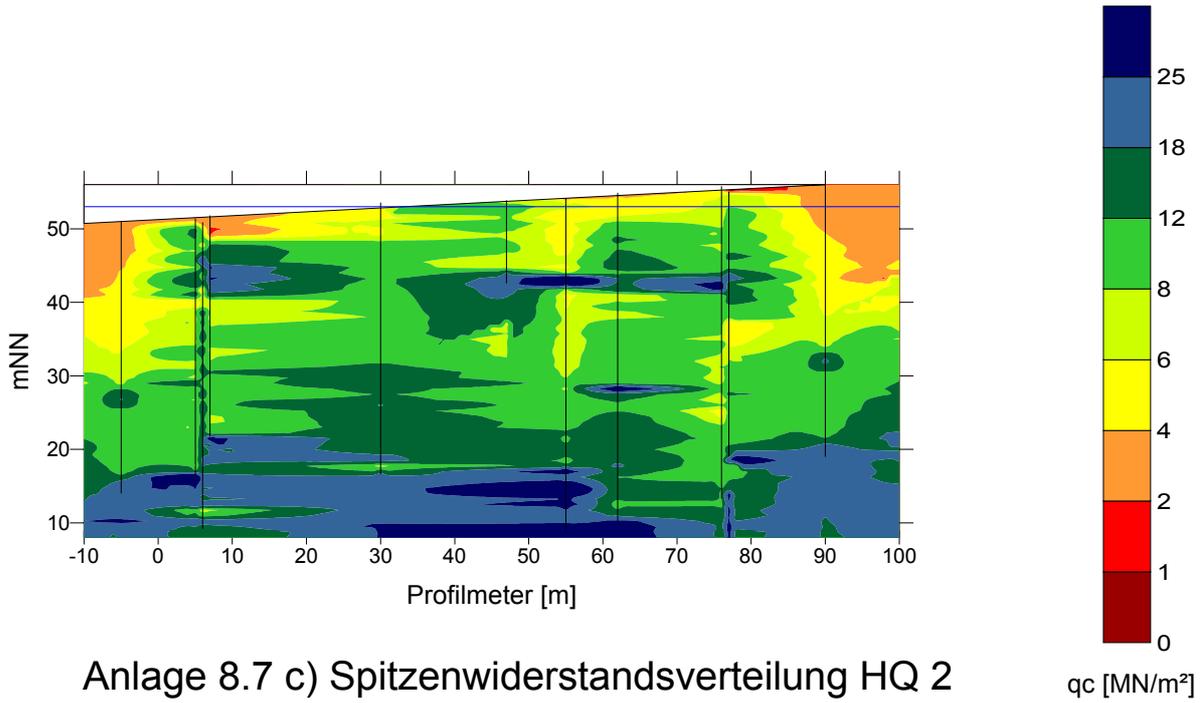


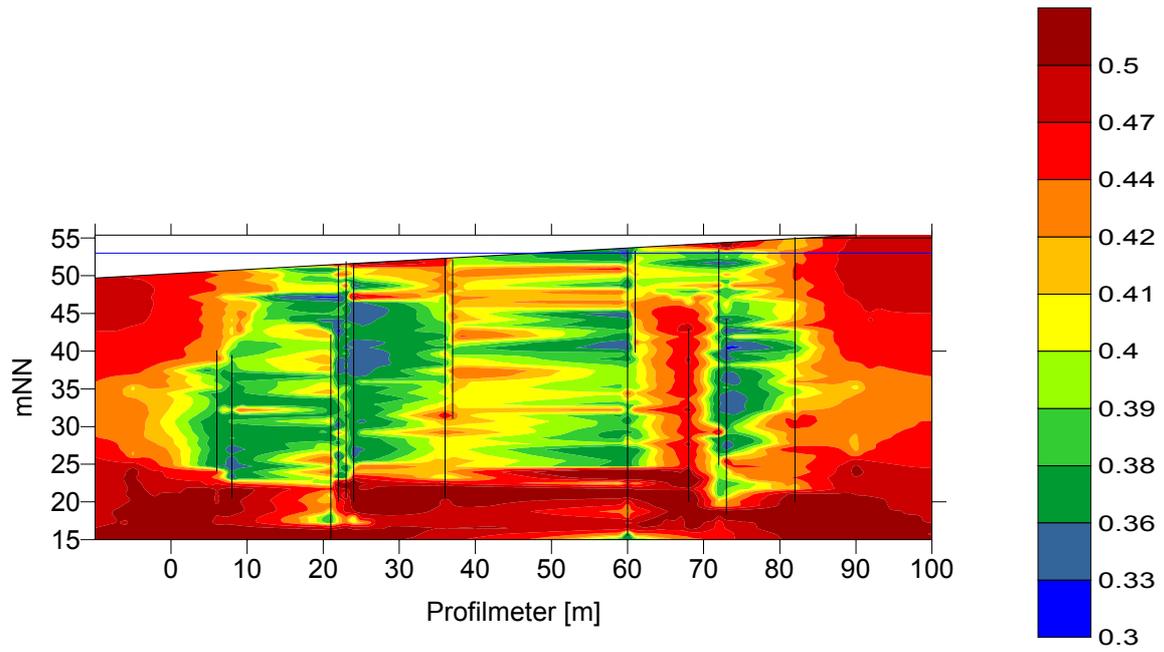


Anlage 8.7 a) Porenanteilverteilung HQ 2



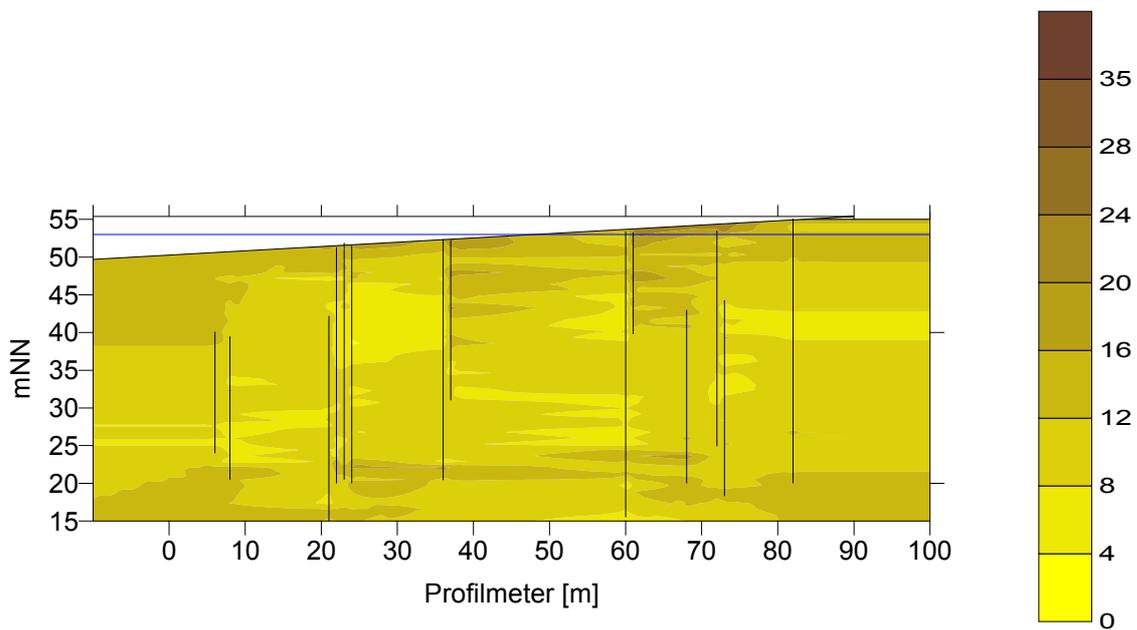
Anlage 8.7 b) FKA-Verteilung HQ 2





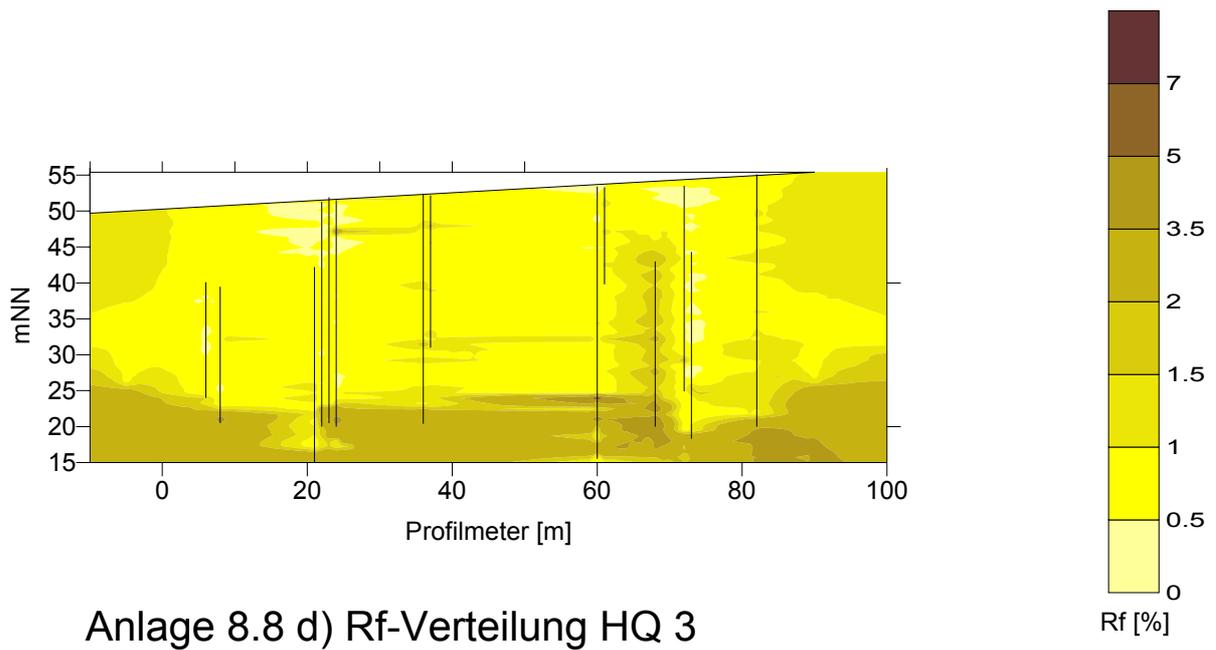
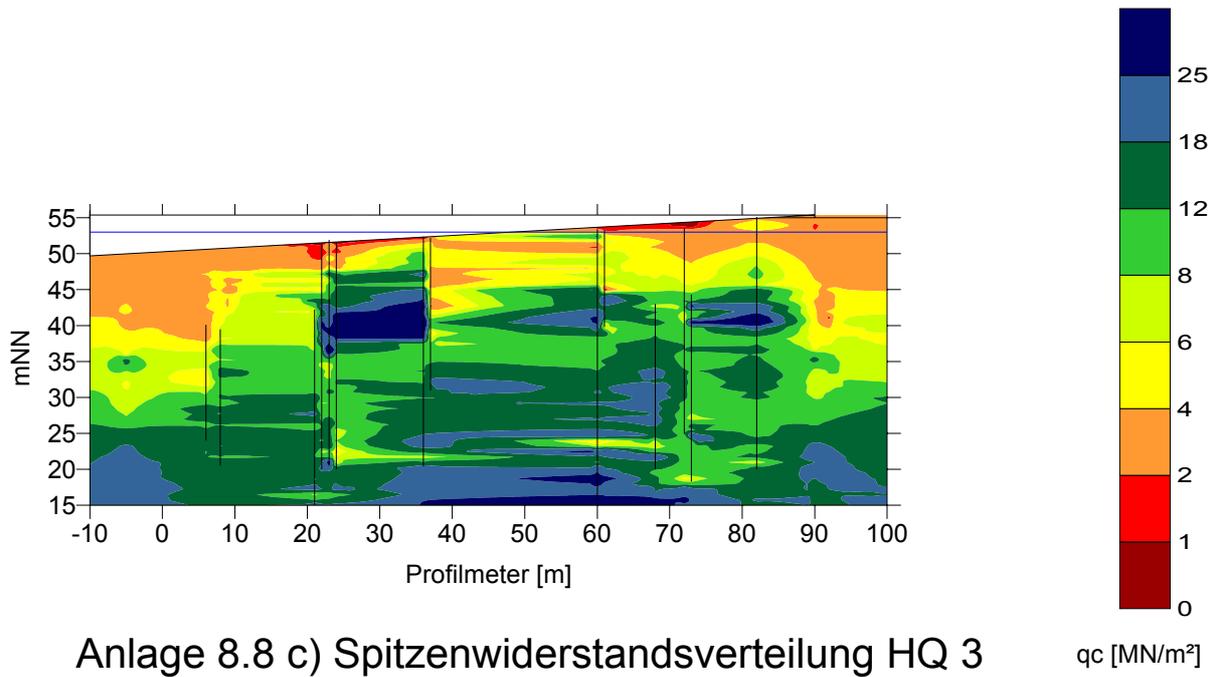
Anlage 8.8 a) Porenanteilverteilung HQ 3

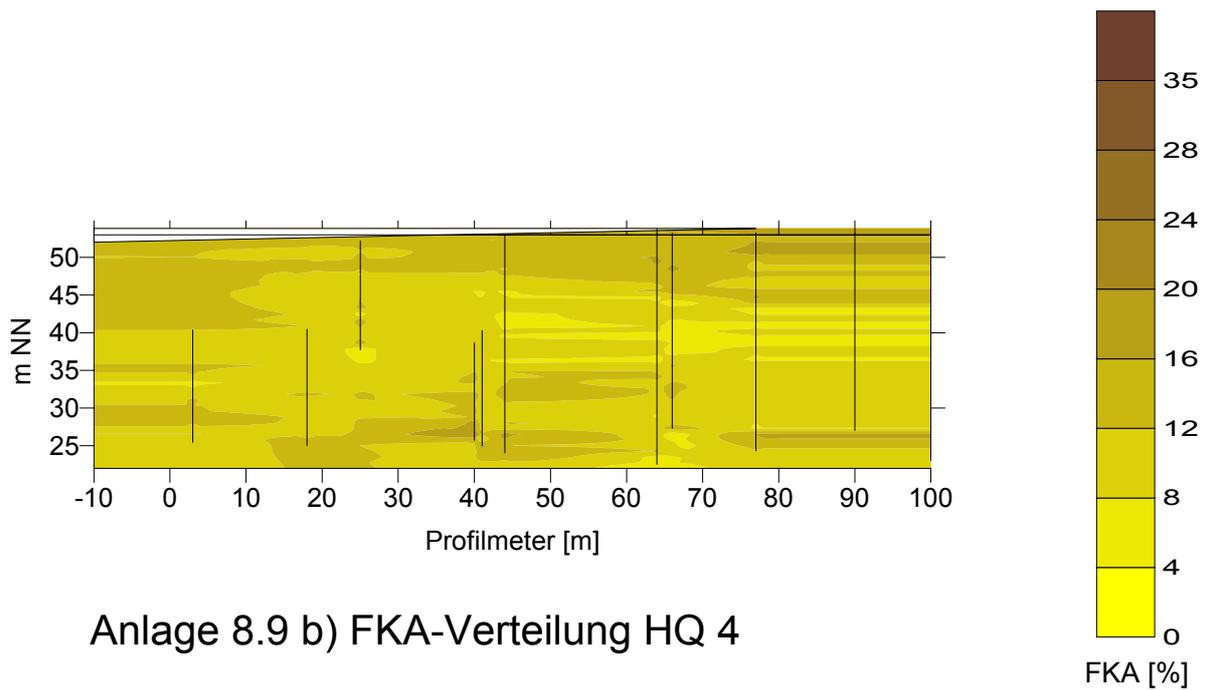
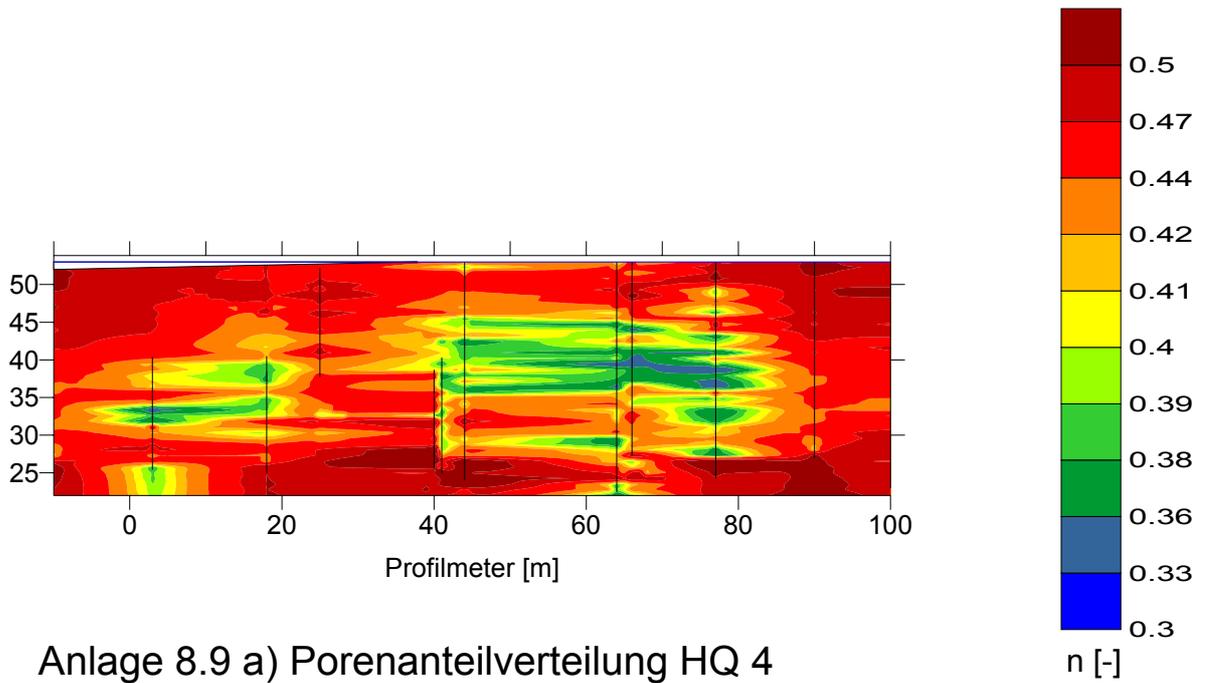
n [-]

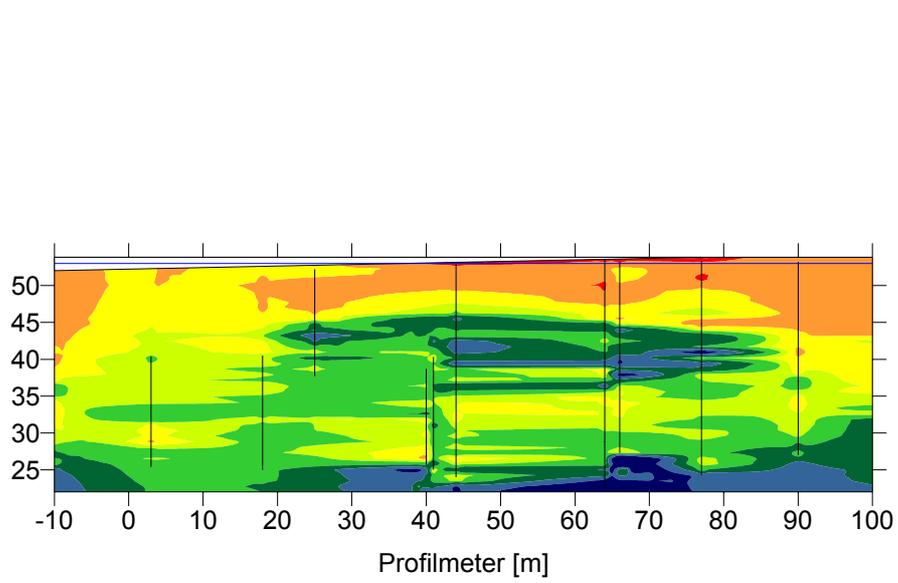


Anlage 8.8 b) FKA-Verteilung HQ 3

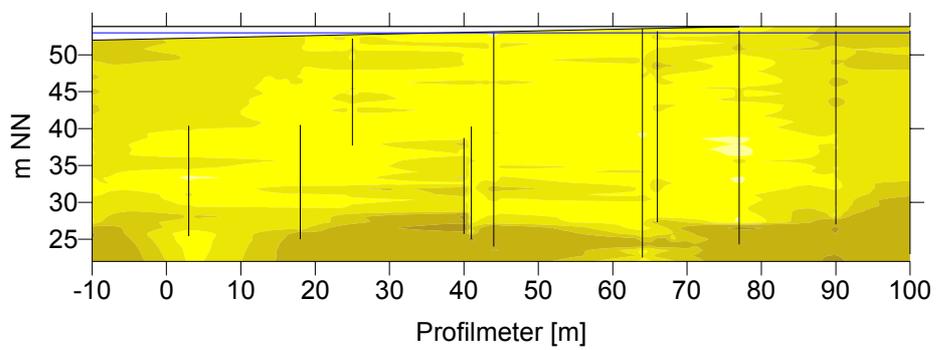
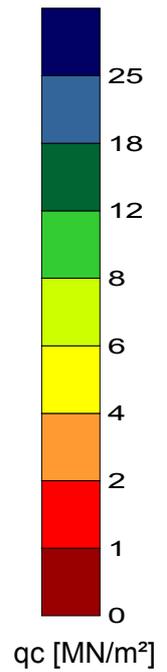
FKA [%]



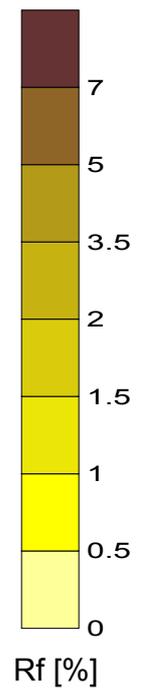


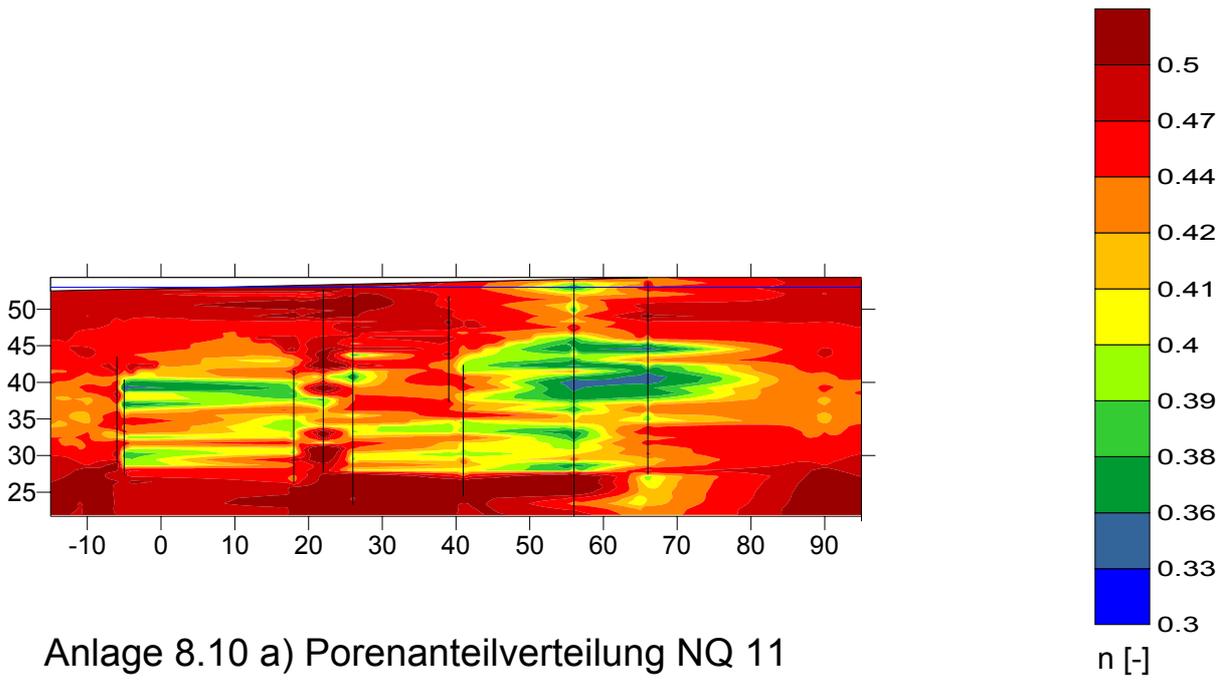


Anlage 8.9 c) Spitzenwiderstandsverteilung HQ 4

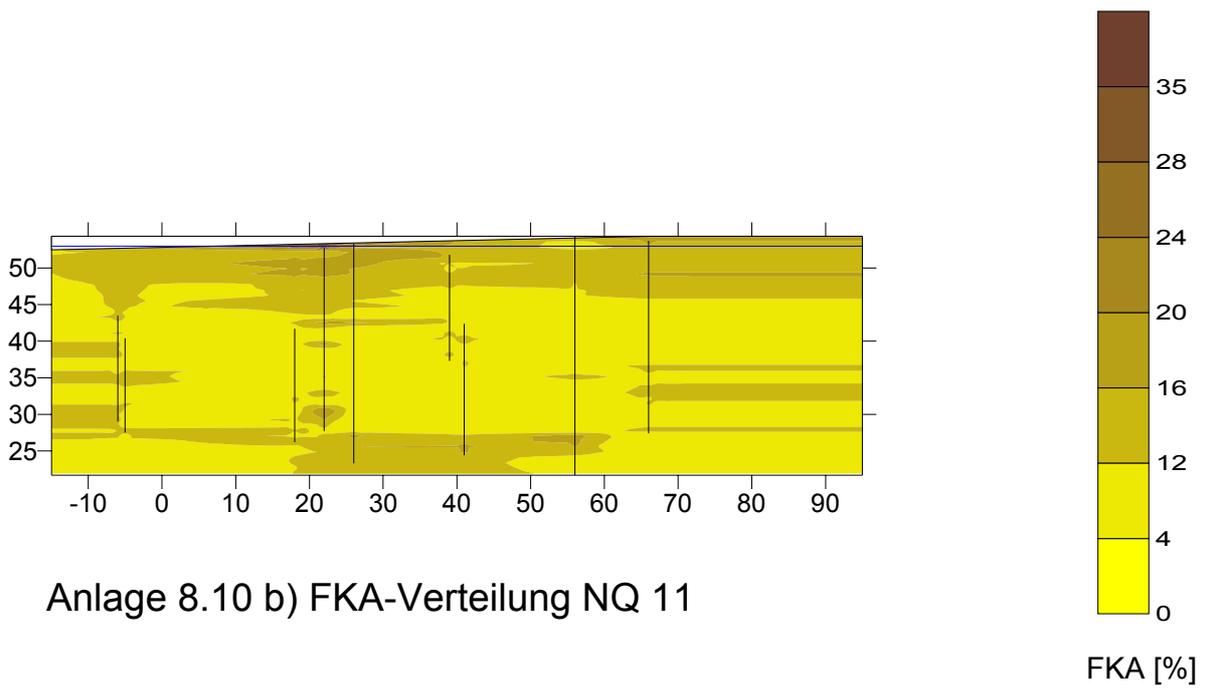


Anlage 8.9 d) Rf-Verteilung HQ 4

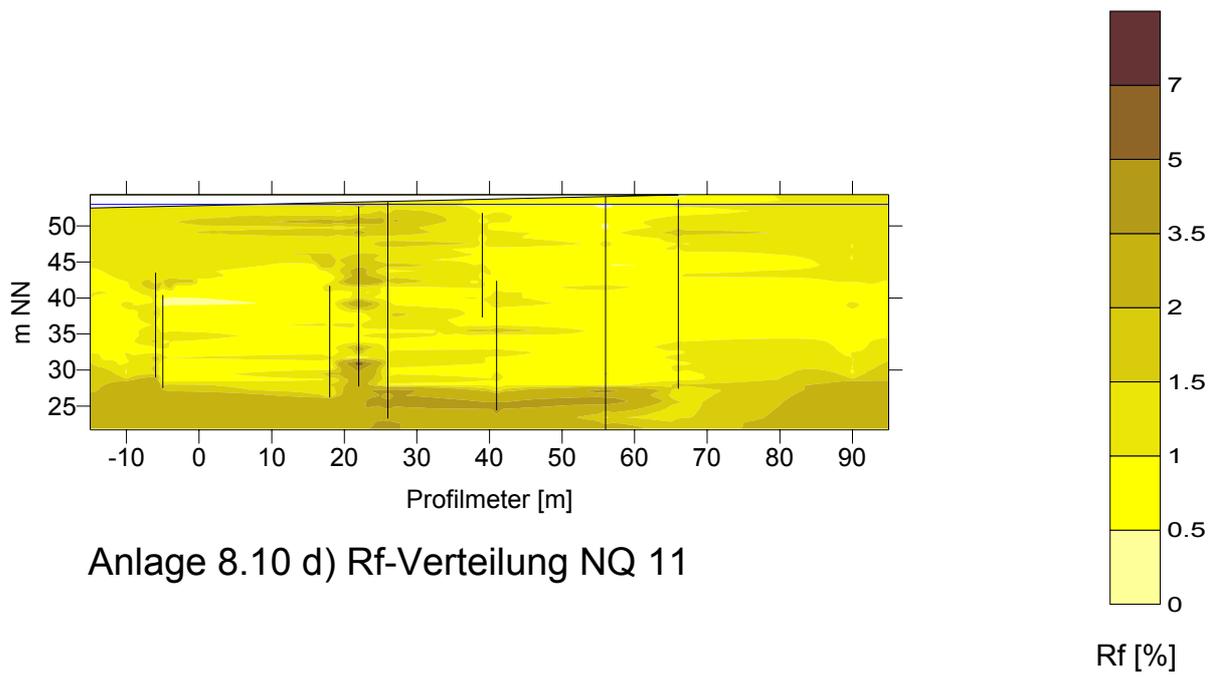
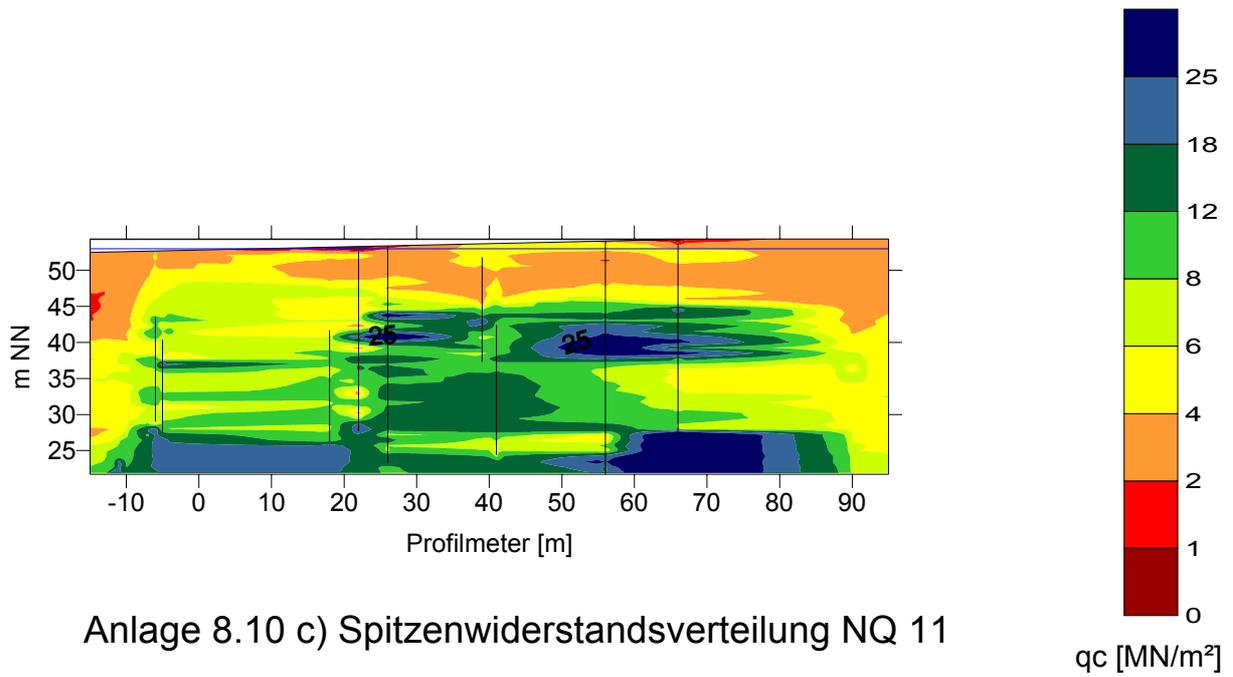


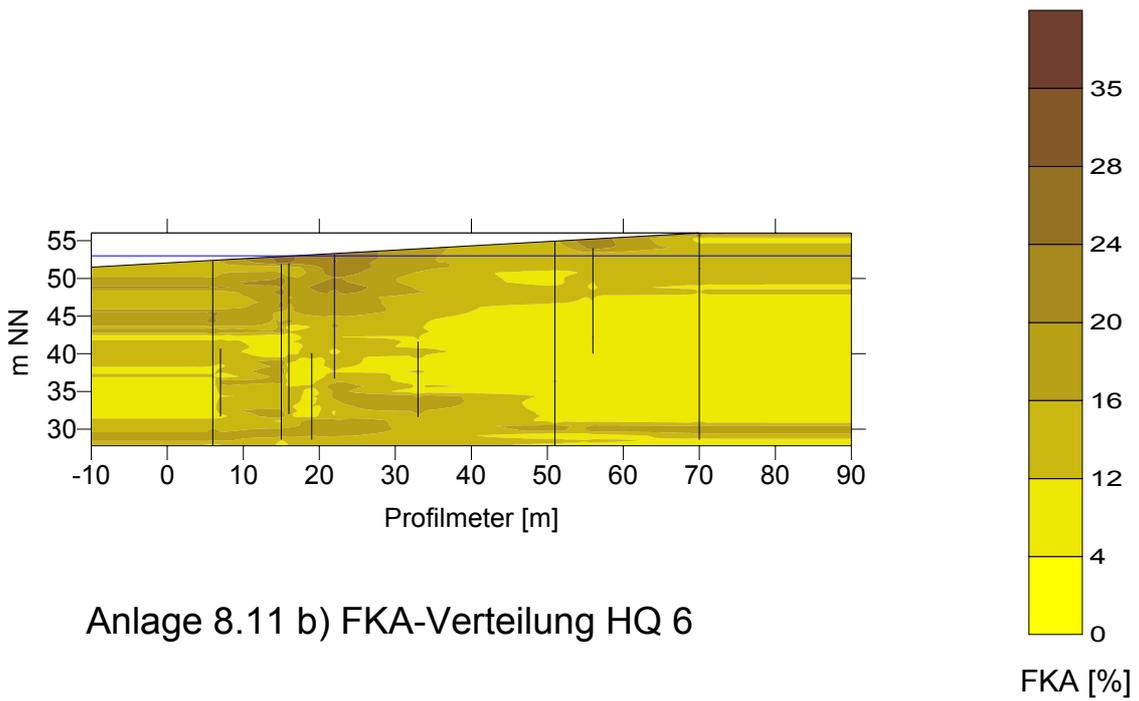
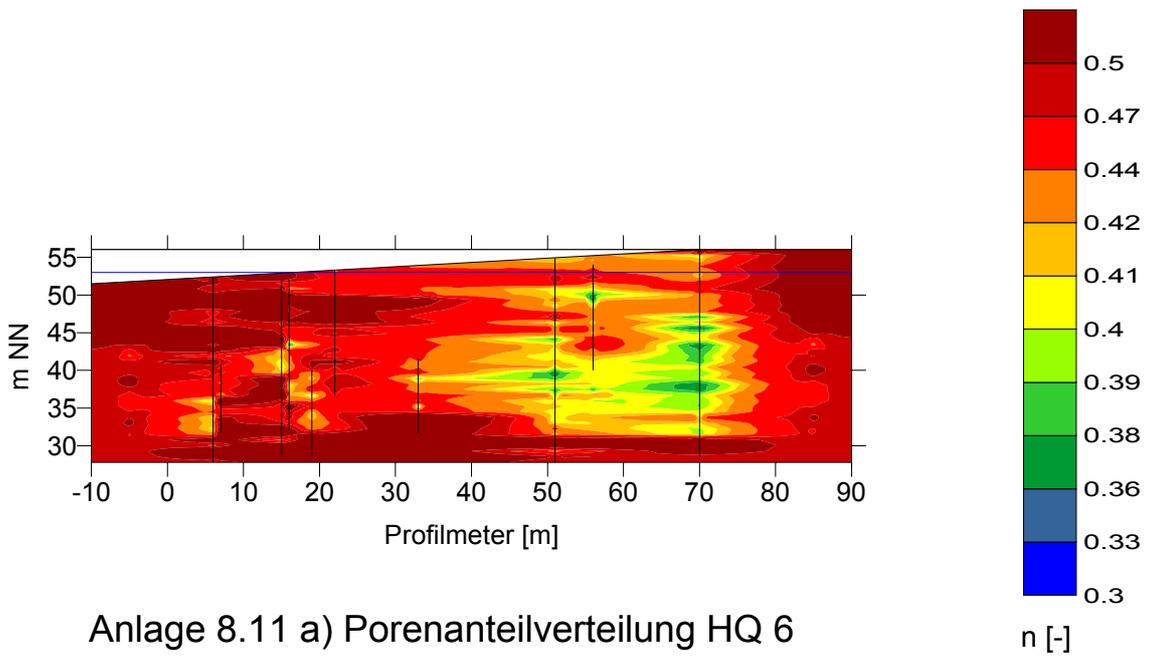


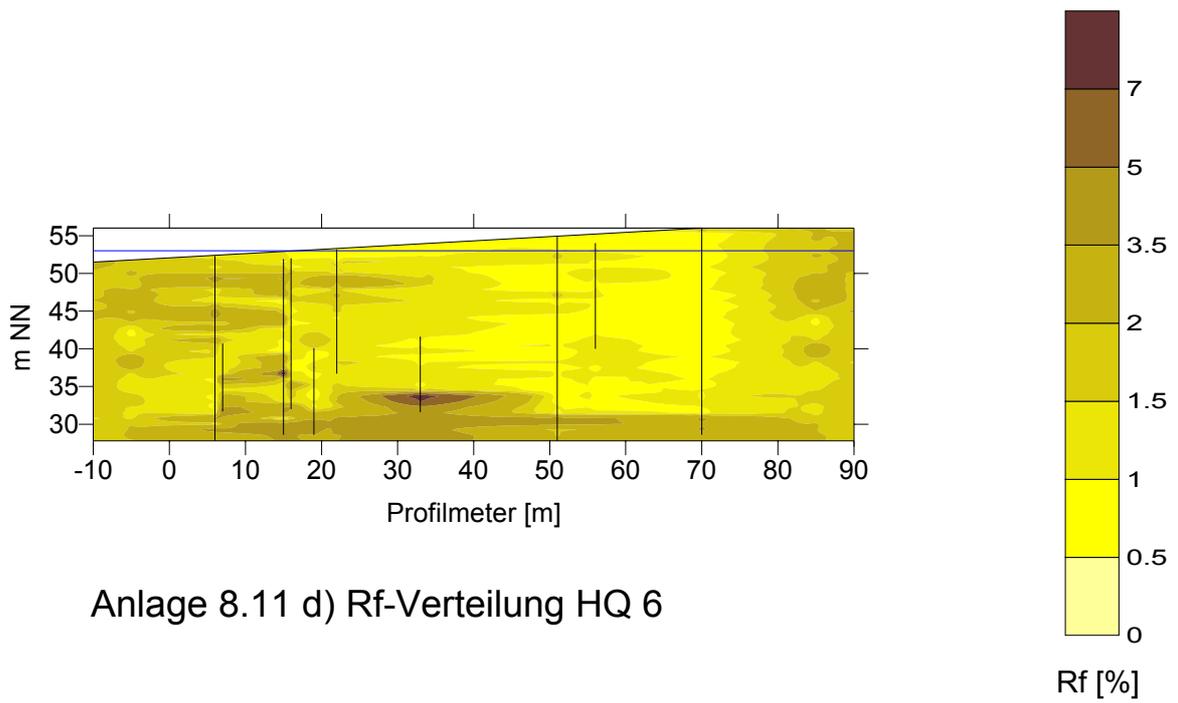
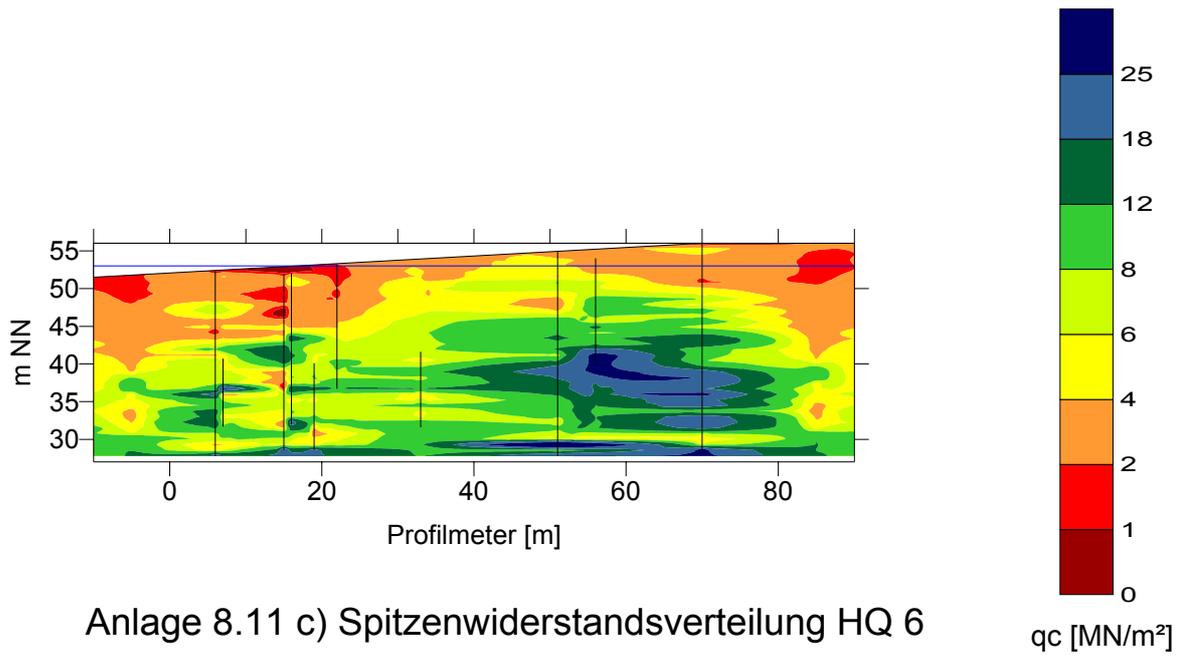
Anlage 8.10 a) Porenanteilverteilung NQ 11

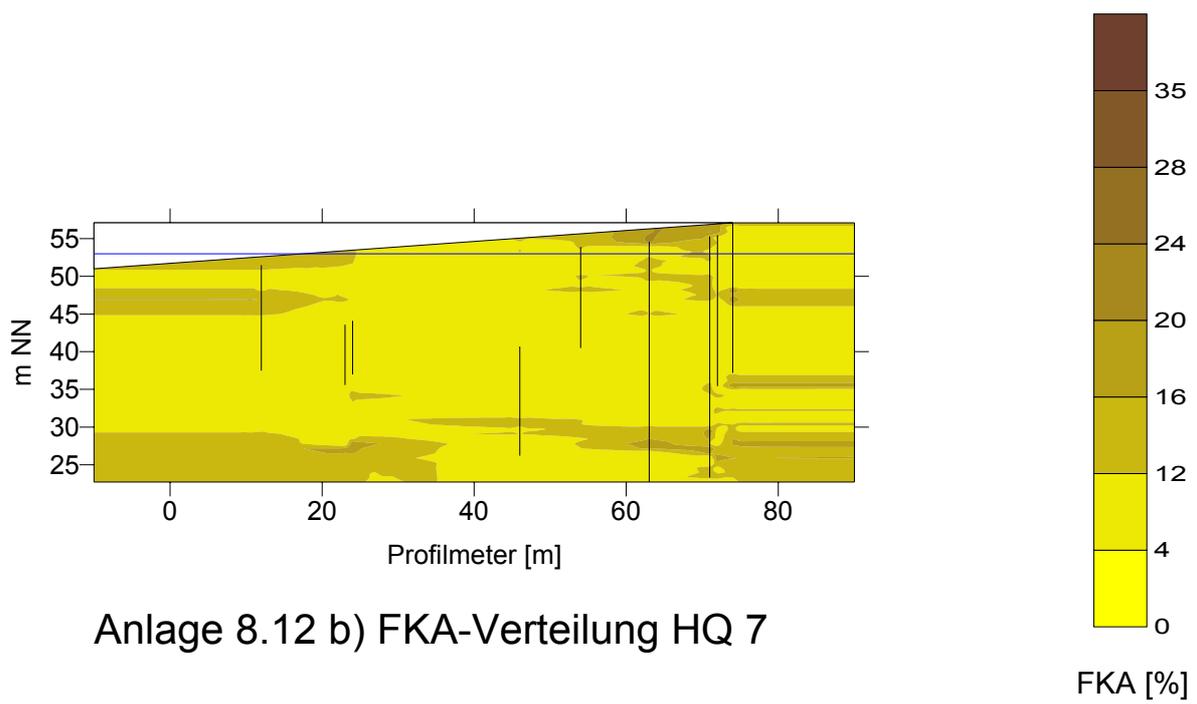
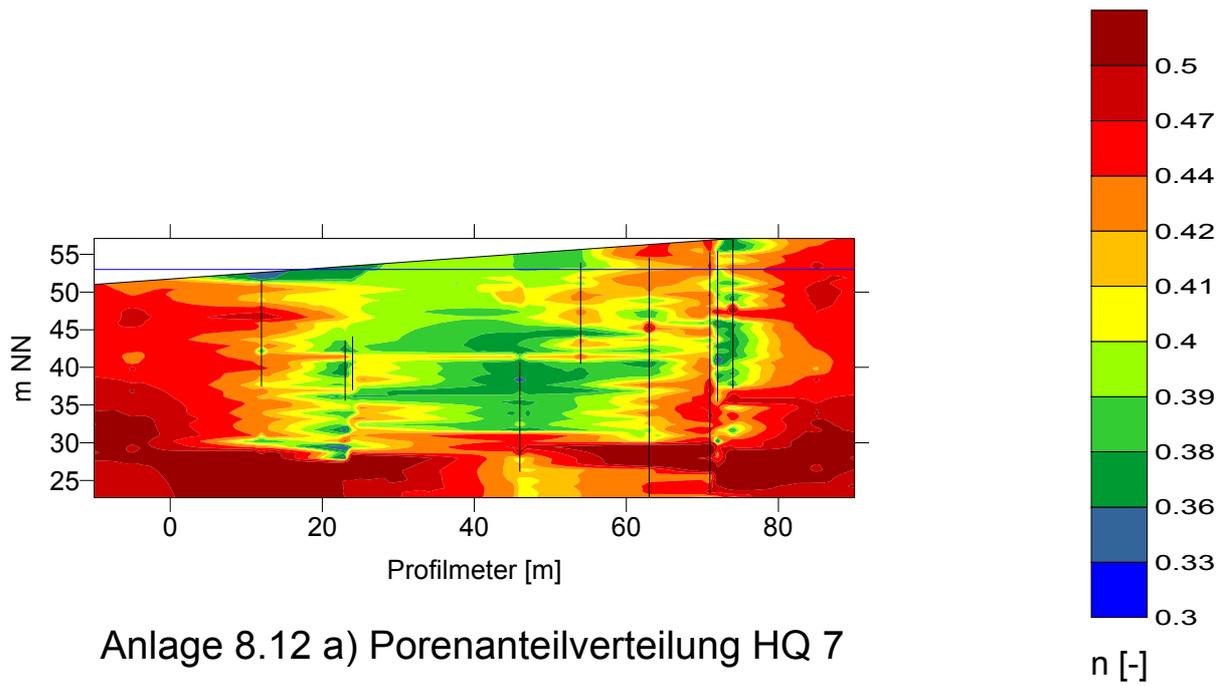


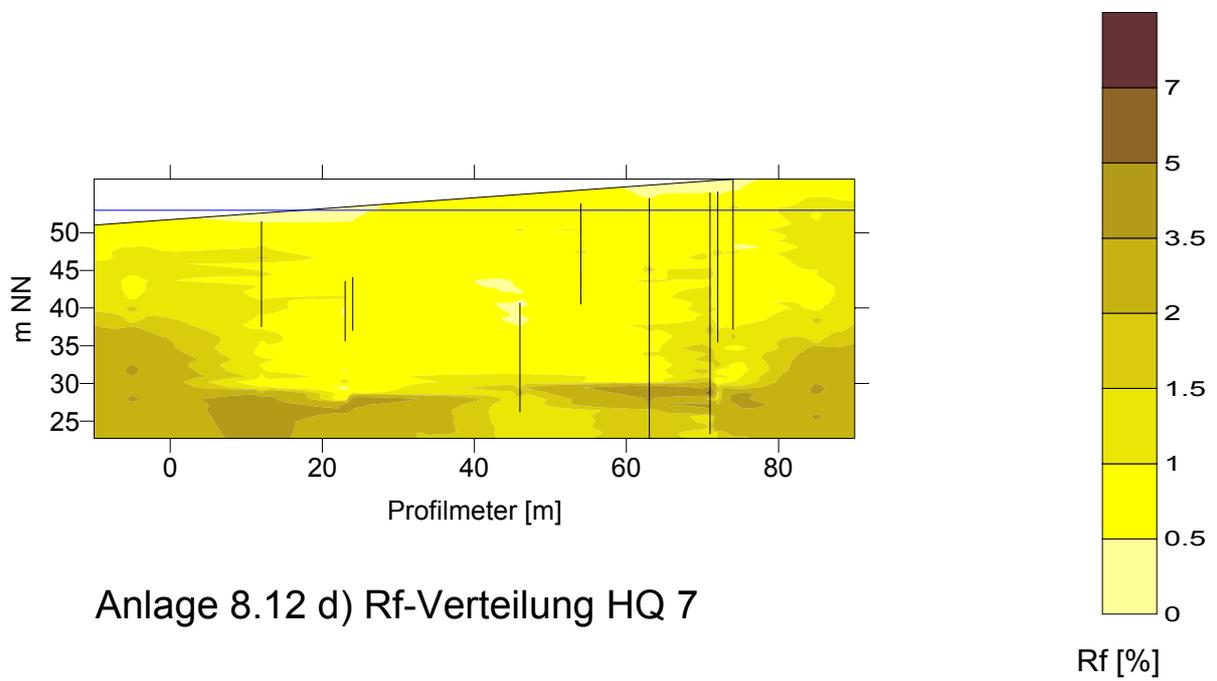
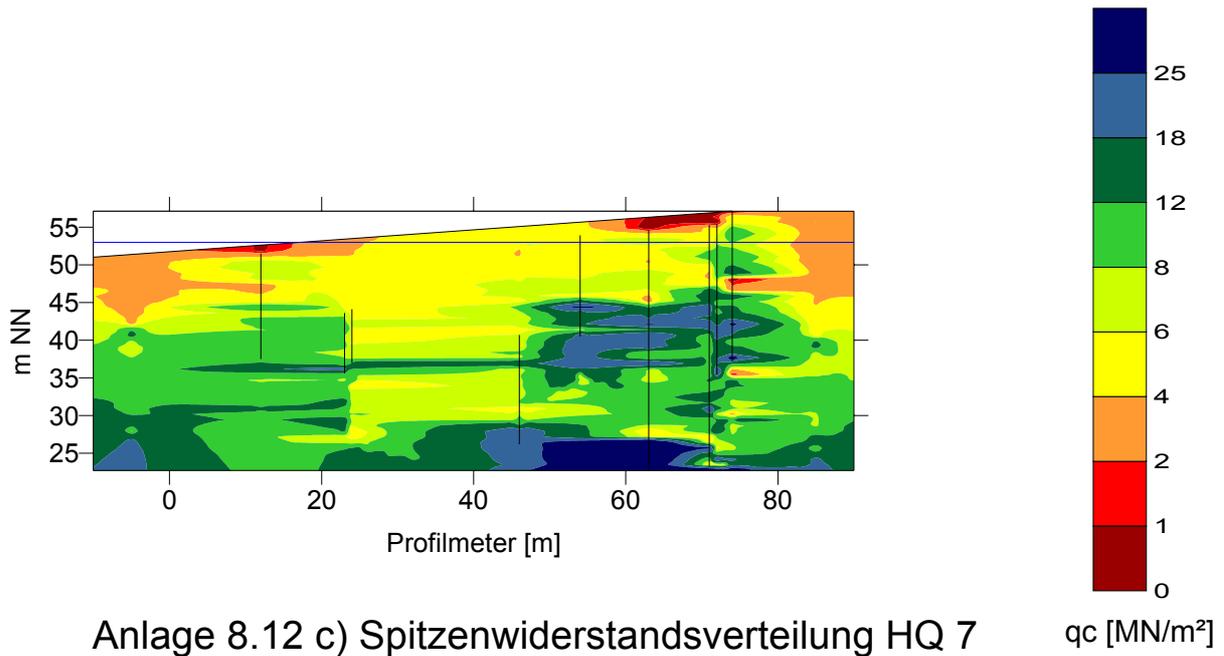
Anlage 8.10 b) FKA-Verteilung NQ 11

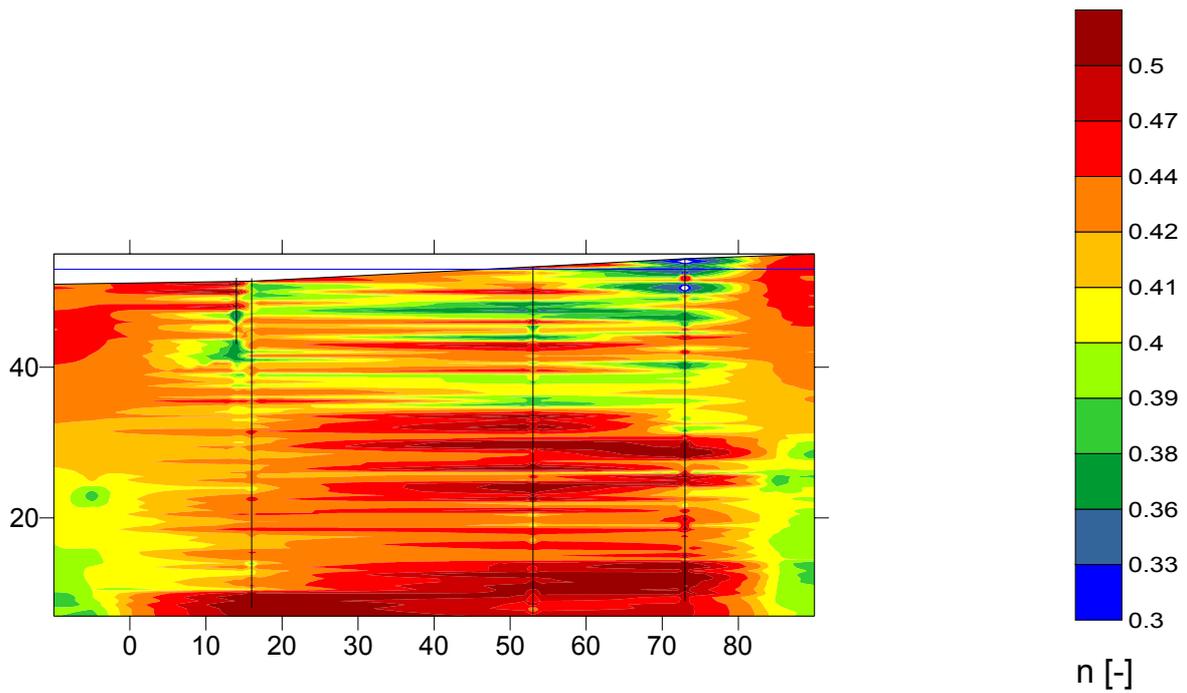




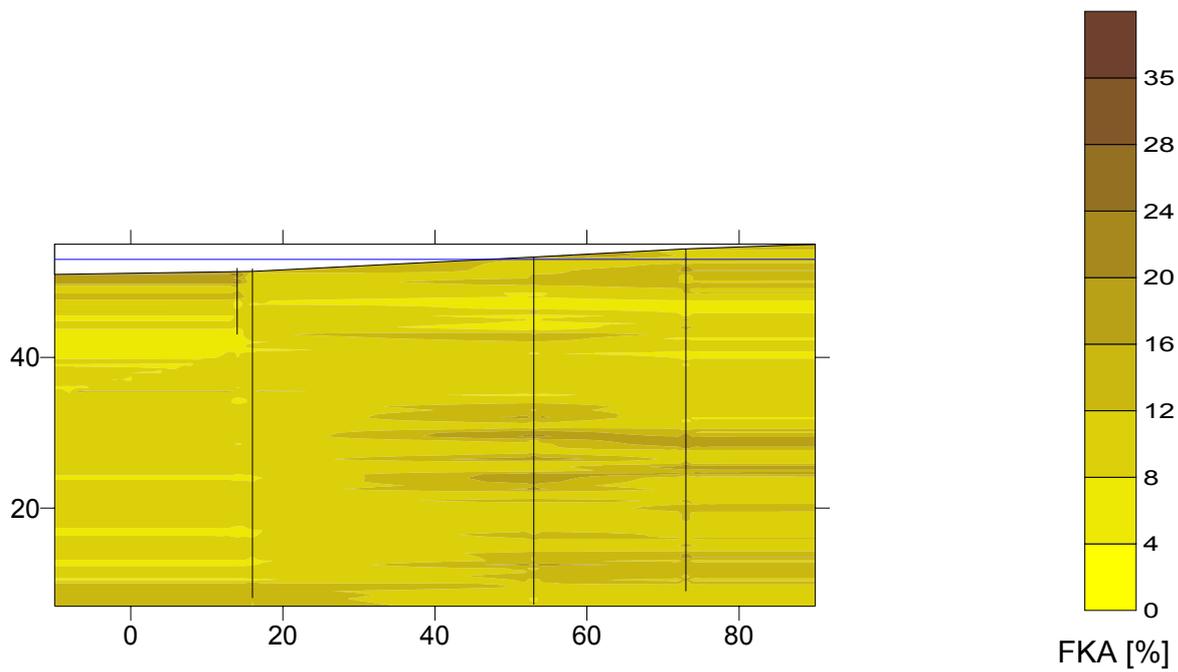




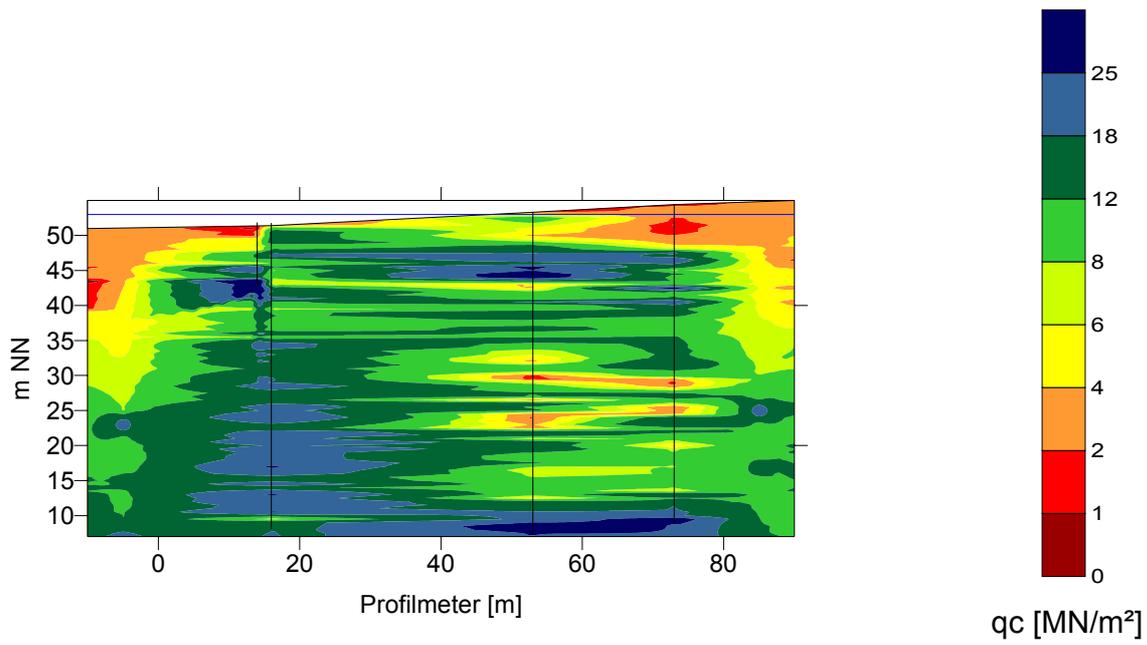




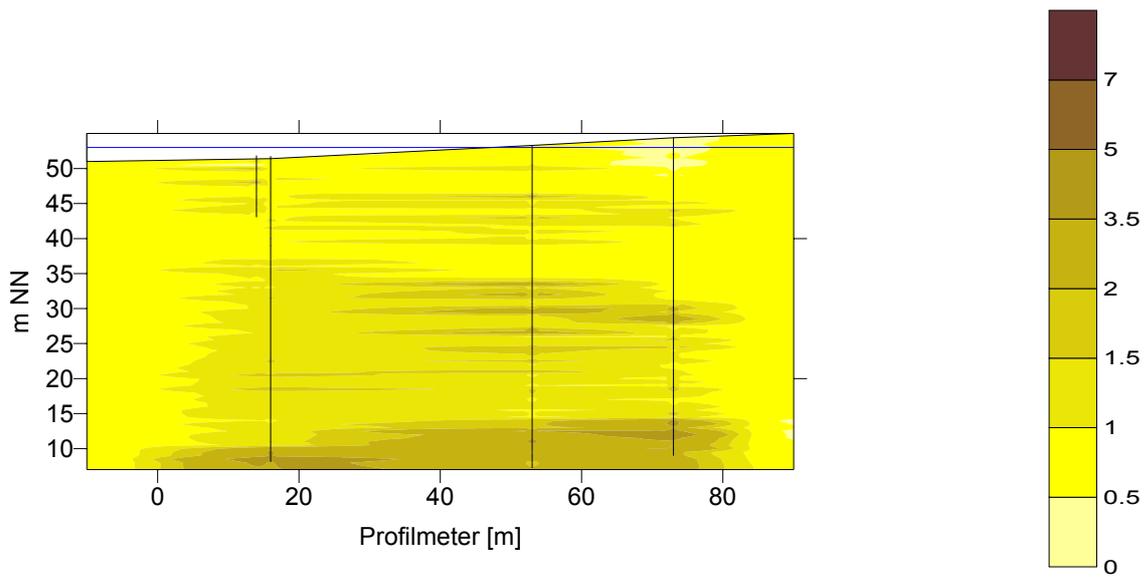
Anlage 8.13 a) Porenanteilverteilung Schnitt AS-Kopfböschung



Anlage 8.13 b) FKA-Verteilung Schnitt AS-Kopfböschung

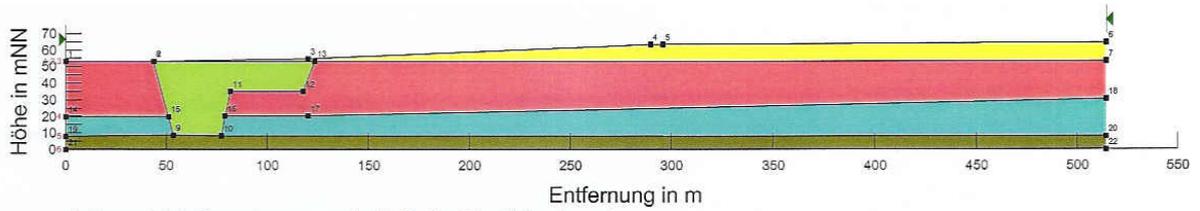


Anlage 8.13 c) Spitzenwiderstandsverteilung Schnitt AS-Kopfböschung

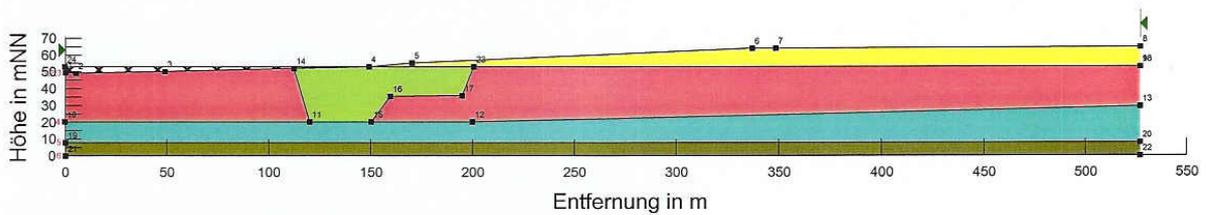


Anlage 8.13 d)  $R_f$ -Verteilung Schnitt AS-Kopfböschung

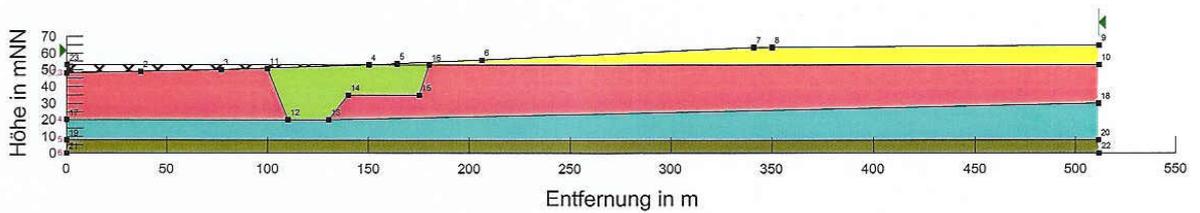
$R_f$  [%]



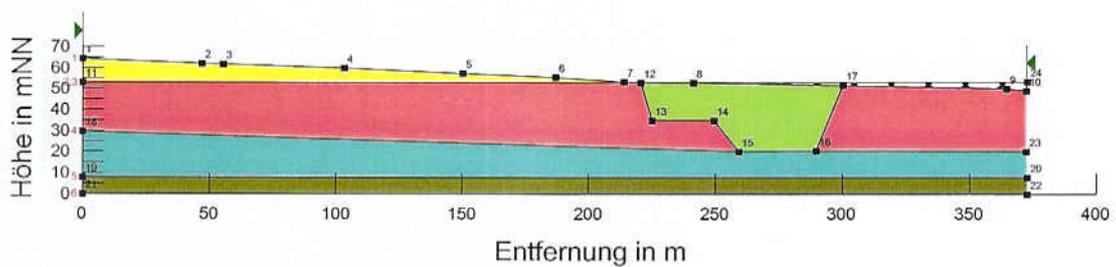
Anlage 8.14: Berechnungsschnitt A (As-Kopfböschung)



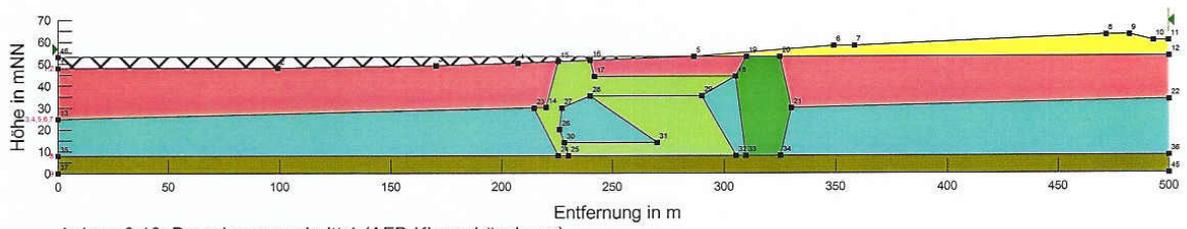
Anlage 8.15: Berechnungsschnitt B + C (As-Kopfböschung)



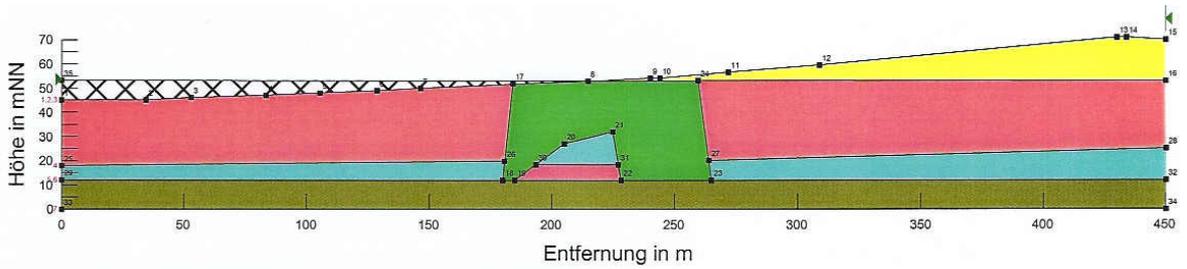
Anlage 8.16: Berechnungsschnitt C (As-Kopfböschung)



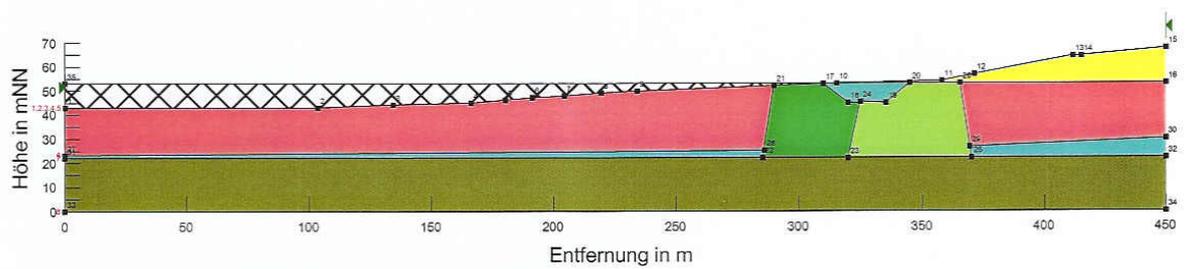
Anlage 8.17: Berechnungsschnitt F (As-Kopfböschung)



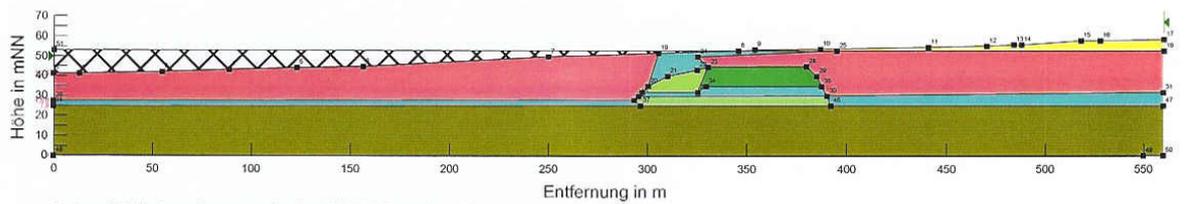
Anlage 8.18: Berechnungsschnitt 1 (AFB-Kippenböschung)



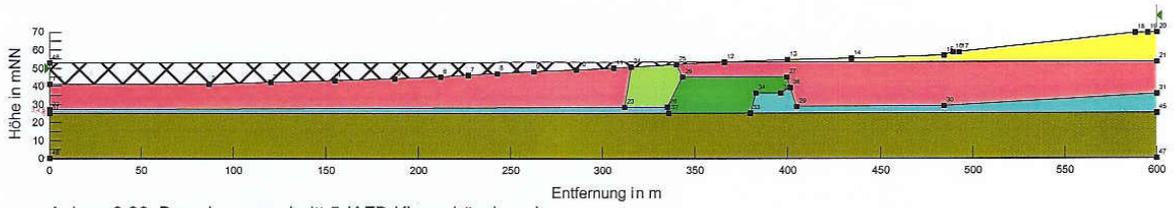
Anlage 8.19: Berechnungsschnitt 2 (AFB-Kippenböschung)



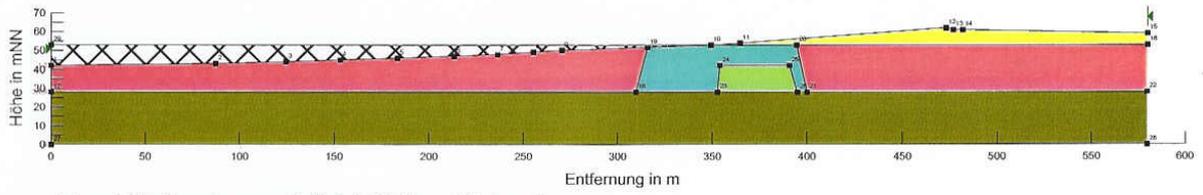
Anlage 8.20: Berechnungsschnitt 3 (AFB-Kippenböschung)



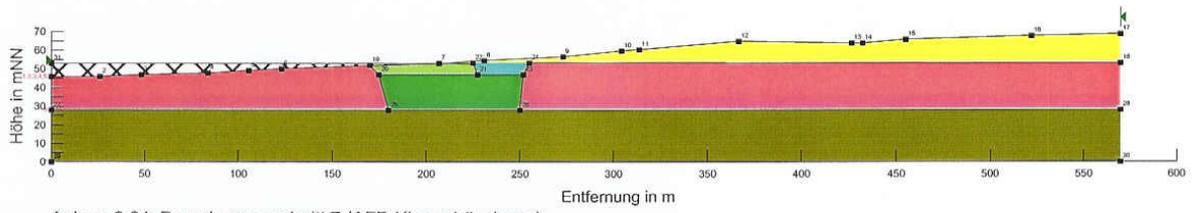
Anlage 8.21: Berechnungsschnitt 4 (AFB-Kippenböschung)



Anlage 8.22: Berechnungsschnitt 5 (AFB-Kippenböschung)



Anlage 8.23: Berechnungsschnitt 6 (AFB-Kippenböschung)



Anlage 8.24: Berechnungsschnitt 7 (AFB-Kippenböschung)