

Kennnisstandanalyse bodenphysikalischer Eigenschaften Lausitzer Kippen - Stand der Erfassung und erste Ergebnisse der Datenauswertung

Dr.-Ing. Michael Dennhardt

(CDM Smith Consult GmbH)

Dipl.-Ing. Beate Lucke

(LMBV mbH)

Dipl.-Ing. Silvio Engelmann

(CDM Smith Consult GmbH)

1 Einleitung

In den vergangenen beiden Jahrzehnten der Braunkohlesanierung wurden in verschiedenen Labors eine Vielzahl von bodenphysikalischen Untersuchungen an den Kippenböden Lausitzer Braunkohlentagebaue vorgenommen. Diese Untersuchungen waren in der Regel objekt- und aufgabenbezogen, d.h. sie wurden in Zusammenhang mit einer konkreten geotechnischen Aufgabe (Stand sicherheitsnachweis, Sanierungsplanung, Verdichtungsnachweis, ...) ausgeführt.

Mit den analytischen Untersuchungen waren und sind schwerpunktmäßig lokal ansässige bodenphysikalische Labors der GMB GmbH, der G.U.B. Ingenieur AG und der FCB GmbH beauftragt. Die Untersuchungsergebnisse wurden laborspezifisch auf unterschiedliche Art und Weise als Hardcopy, digital in verschiedenen Datenformaten oder in Datenbanken archiviert.

Im Rahmen der Ursachenforschung zur eigeninduzierten Kippenverflüssigung, zur aktuellen geotechnischen Kippenbewertung durch die Sachverständigen für Geotechnik und für die Parametrisierung des in Entwicklung befindlichen dualen rechnerischen Nachweisverfahrens zur Kippenstabilität ist die umfassende Verfügbarkeit und komplexe Bewertung der bisher ermittelten bodenphysikalischen Daten erforderlich. Der Geotechnische Beirat der LMBV hat daher empfohlen, den umfangreichen Datenbestand zu erfassen, in einheitliche Formate zu überführen und in das Kippenkataster der LMBV zu integrieren.

Auf Basis geostatistischer Auswertungen verschiedener bodenphysikalischer Parameter soll damit vor allem das Erkennen von Gemeinsamkeiten, Unterschieden und Besonderheiten der in den einzelnen Revieren mit z.T. unterschiedlichen Technologien verstärzten Kippenböden ermöglicht werden. Es wird davon ausgegangen, dass insbesondere geotechnische Analysen und Bewertungen geotechnischer Risiken in Bezug auf Kippenböden von dieser Datengrundlage

profitieren werden. Gleichzeitig soll eine komplexe Informationsquelle für die Arbeit in der LMBV, der beteiligten Wissenschaftler und der extern tätigen Sachverständigen für Geotechnik geschaffen werden.

2 Bearbeitungskonzept

Die im Kippenkataster bereits enthalten Bestände an Gutachten mit Ergebnisberichten der bodenphysikalischen Labors werden im Zuge der Bearbeitung vervollständigt und dienen als Informationsquelle für die Arbeit in der LMBV und der extern tätigen Sachverständigen für Geotechnik (SfG).

Der gesamte Datenbestand an Ergebnissen bodenphysikalischer Laboruntersuchungen wird in Form einer Datenbank nutzbar gemacht. Die in Absprache mit der LMBV entwickelte spezifische Datenbankstruktur unterliegt dabei entsprechend der vorliegenden Daten und Anforderungen einem permanenten Anpassungsprozess. Gleichzeitig besitzt die Datenbank eine Schnittstelle zu dem von der LMBV aufgebauten Kippenkataster bzw. kann direkt in dieses integriert werden.

Für komplexe geostatistische/wahrscheinlichkeitsmathematische Auswertungen und den Vergleich zwischen den Sanierungsgebieten werden alle maßgebenden bodenphysikalische Parameter nach fachkundiger Auswahl und numerischer Umsetzung in die Datenbank aufgenommen.

Die Bearbeitung gliedert sich in folgende Arbeitsschritte:

1. Datenrecherche und -erfassung durch Scannen der relevanten Ergebnisberichte in den Archiven aller drei genannten Labors,
2. Vervollständigung des Kippenkatasters mit den fehlenden Ergebnisberichten,
3. Entwicklung eines spezifischen Datenbanksystems für ausgewählte repräsentative bodenphysikalische Kennwerte der Kippen in Abstimmung mit der LMBV,
4. Systematische Auswertung, Datenselektion, numerische Umsetzung und Integration der Werte der bodenphysikalischen Parameter in die kippenspezifische Datenbank,
5. Übertragung/Einbindung der Datenbanktabellen an das Kippenkataster,
6. Bereitstellung der Datenbank für die LMBV, Sachverständige für Geotechnik und weitere Nutzer,
7. regelmäßige Aktualisierung/Laufendhaltung der Datenbank.

3 Zielstellung

Mit Fertigstellung der Datenbank soll die Möglichkeit von filtergestützten statistischen Auswertungen einzelner oder mehrerer Bodenkenngrößen für ausgewählte Kippenbereiche bestehen. Gleichzeitig muss der sachkundige Anwender Zugriff auf die Grundlage der Daten, d.h. die Laborberichte haben, um jederzeit relevante jedoch nicht in der Datenbank erfassbare Informationen auswerten zu können. Insbesondere ergeben sich Möglichkeiten der Datenanalyse, des Vergleichs und der statistischen Auswertung hinsichtlich:

- beschreibender Kenngrößen,
- Zustandskenngrößen,
- Festigkeitskenngrößen,
- Verflüssigungsverhalten.

4 Entwicklung eines spezifischen Datenbanksystems für repräsentative bodenphysikalische Kennwerte der Kippen

Aus den digital als PDF-Datei vorliegenden Ergebnisberichten werden die für die geotechnische Kippenbewertung maßgebenden Messwerte der einzelnen Parameter/Kennwerte selektiert, erforderlichenfalls in numerische Werte umgesetzt und in eine spezifische Parameterdatenbank geschrieben.

Dabei werden einheitliche normgerechte Einheiten verwendet. Diese wurden im Einzelnen bei der fachlichen Detailabstimmung zu Datenbankinhalten und -struktur festgelegt. Zu den eigentlichen Messwerten gehören als Stammdaten die jeweiligen Versuchsbedingungen, welche mit einer beschreibenden Norm, einem Hausverfahren der Labors oder im Einzelnen angegeben werden müssen.

Für die vorgesehene numerische Umsetzung und Archivierung in einer Datenbank wurde zunächst eine an den Daten und Nutzungsanforderungen orientierte Datenbankstruktur entwickelt. Diese muss darüber hinaus die Anforderungen einer An-/Einbindung in das Kippenkataster der LMBV erfüllen.

Voraussetzung für die Erstellung der Datenbank ist die Vergabe von abgestimmten Objekt- und Proben-Identifikationsnummern und Verlinkung zu den Scans der Ergebnisberichte:

The image shows a data management interface. On the left, a list of Excel files is displayed, including 'Bome_KW_Baw.xlsx', 'Bome_KW_Bgh.xlsx', 'Bome_KW_Grd.xlsx', 'Bome_KW_Grh.xlsx', 'Bome_KW_Hei.xlsx', 'Bome_KW_Jaw.xlsx', 'Bome_KW_Lau.xlsx', 'Bome_KW_Lhh1.xlsx', 'Bome_KW_Loh.xlsx', 'Bome_KW_Rlk.xlsx', 'Bome_KW_SdN.xlsx', 'Bome_KW_SdS.xlsx', 'Bome_KW_SeW.xlsx', and 'Bome_KW_Spt.xlsx'. In the center, a table titled 'Tgb. Schlabendorf-Süd - SdS Stammdaten' is shown. The table has columns for 'Problem ID (Objekt-ID, IridNr)', 'Objekt-ID Kippen-kataster', and 'Ergebnisbericht (verlinkt)'. The table contains 18 rows of data, each with a unique problem ID and a linked report title. On the right, a preview of a report titled 'Ergebnisbericht EB 03/120 bodenphysikalischer Untersuchungen' is shown. The report includes the name of the engineering firm 'Ingenieurbüro Böhm & Partner GmbH' and the date 'Schwarze Pumpe, dem 10.11.2003'. Red arrows indicate the flow of data from the files to the table and then to the report.

Problem ID (Objekt-ID, IridNr)	Objekt-ID Kippen-kataster	Ergebnisbericht (verlinkt)
126	10023_115	10023_20090203_SdS_GMB_BA.pdf
127	10023_116	10023_20090203_SdS_GMB_BA.pdf
128	10023_117	10023_20090203_SdS_GMB_BA.pdf
129	10023_118	10023_20090203_SdS_GMB_BA.pdf
130	10021_001	10021_20031110_SdS_GMB_BA.pdf
131	10021_002	10021_20031110_SdS_GMB_BA.pdf
132	10021_003	10021_20031110_SdS_GMB_BA.pdf
133	10021_004	10021_20031110_SdS_GMB_BA.pdf
134	10021_005	10021_20031110_SdS_GMB_BA.pdf
135	10021_006	10021_20031110_SdS_GMB_BA.pdf
136	10021_007	10021_20031110_SdS_GMB_BA.pdf
137	10021_008	10021_20031110_SdS_GMB_BA.pdf
138	10021_009	10021_20031110_SdS_GMB_BA.pdf
139	10021_010	10021_20031110_SdS_GMB_BA.pdf

Abbildung 1: Datenbanktabellen, Proben-ID's und Verlinkung

Jeder bodenphysikalische Laborversuch wird mit einer Bodenprobe oder einem Teil davon durchgeführt.

Durch Erfassung der Zuordnung der ermittelten Kennzahlen zur jeweils verwendeten Bodenprobe muss abgesichert werden, dass die Herkunft des untersuchten Materials soweit wie möglich nachvollzogen werden kann.

Hierzu werden für die in den Versuchen verwendeten Proben, wenn möglich, folgende Daten aus den Laborberichten ermittelt:

- Bezeichnung der Probe,
- Probenahmedatum,
- Probenehmer,
- Art der Probenahme (Verfahren),
- Störungsgrad,
- Koordinaten (Lage und Teufe),
- Tagebau, Tagebauteilfeld,
- Besonderheiten (u.a. Lage in verdichtetem oder durch Erdbau verändertem Bereich u. dgl.),
- Mischprobe oder Einzelprobe,
- Verfahren der Probenherstellung (bei Triaxialversuchen).

Ausführendes Labor, Auftraggeber bzw. beteiligtes Ingenieurbüro sowie ggf. Projekt werden ebenfalls erfasst.

Auf diesen Basisdaten bauen die Parametertabellen auf. Die Datenbankparameter werden dabei untergliedert in:

- Beschreibende Kenngrößen (einschließlich Klassifikationskennzahlen der Einzelkörner und des Korngemisches),
- Zustandskenngrößen und
- Festigkeitskenngrößen.

Nicht für jeden Kippenboden und jede Untersuchung sind alle Parameter zutreffend. Die kippenspezifische Datenbank umfasst den maximalen Rahmen und bildet diesen in der Grundstruktur permanent ab. Der Werteeintrag erfolgt anschließend nach Verfügbarkeit.

Es wurde folgender Parameterumfang festgelegt, wobei die Aufstellung auch abgeleitete Größen enthält:

Die Erfassung der beschreibenden Kenngrößen wird unterteilt in Daten zur

- Klassifikation, Wichten, Kennzahlen zur Korngrößenverteilung, u.a. (als beschreibende Kenngrößen benannt),
- Korngrößenverteilung,
- Kornform und
- Korntextur.

Als Beispiel in Abb. 2 eine Tabelle zu den "Beschreibenden Kenngrößen":

[SdS_Stammdaten](#) / [SdS_BeschrKG](#) / [SdS_KGV](#) / [SdS_Kornform](#) / [SdS_Korntextur](#) / [SdS_Zustand](#) / [SdS_Festigk](#) / [SdS_Versuchsverlauf](#)

Tgb. Schlabendorf-Süd - SdS		Beschreibende Kenngrößen																				
Proben ID (Object_ID_(f&N))	Proben- bezeichnung	Bodenart nach DIN 4022/23	Bodenart nach DIN 14688-1	Bodenartgruppe nach DIN 18156	Bodenartgruppe GUB	Mineralbestand	Reinwichte			Organischer Anteil	Glühverlust	Kornichte	lockerste Lagerung		dichteste Lagerung		Verdichtungs- fähigkeit	Proctordichte			Chemismus	Kalkgehalt nach Schellier
							γ_s [kN/m ³]	C_u [1]	C_c [1]				V_{60} [1]	p_s [g/cm ³]	max n [1]	max e [1]		min n [1]	min e [1]	I_p [1]		
10027_001	Pr1	S _u '	csi'csafsaMSa	SU			5,56	1,17														
10027_002	Pr2	mS, fs*, gs, u'	csi'csa'fsa*MSa	SU			4,27	1,03														
10027_003	Pr3	S _u '	csi'Sa	SU			3,74	0,86			2,620	0,487	0,948	0,351	0,540	0,756	1,793	0,106				
10024_001	SLS-TK1	S _u '	csi'Sa	SU			3,53	0,86			2,668	0,475	0,905									
10024_002	SLS-TK2										2,650											
10024_003	SLS-TK	S _u '	csi'csafsaMSa	SU			4,59	0,98		0,009	2,645	0,466	0,872	0,343	0,522	0,670						
10023_001	LB1/08-0-1A										2,651											
10023_002	LB1/08-0-1B	mS, fs*, gs'	csa'fsa*MSa	SE			2,87	0,95			2,651											
10023_003	LB1/08-1-2A										2,658											
10023_004	LB1/08-1-2B										2,658											
10023_005	LB1/08-2-3A										2,529											
10023_006	LB1/08-2-3B										2,529											
10023_007	LB1/08-3-4A										2,529											
10023_008	LB1/08-3-4B										2,529											
10023_009	LB1/08-4-5A										2,654											
10023_010	LB1/08-4-5B										2,654											
10023_011	LB1/08-5-6A										2,610											
10023_012	LB1/08-5-6B										2,610											
10023_013	LB1/08-6-7A										2,645											
10023_014	LB1/08-6-7B										2,645											
10023_015	LB1/08-7-8A										2,659											
10023_016	LB1/08-7-8B										2,659											
10023_017	LB1/08-8-9A	mS, fs*, gs'	csa'fsa*MSa	SE			2,86	1,01			2,659											
10023_018	LB1/08-8-9B										2,659											

Abbildung 2: Erfassung beschreibender Kenngrößen

Als wichtige Festigkeitskennzahlen werden erfasst:

- wirksame Reibungswinkel,
- undrännierter Bruchreibungswinkel,
- undrännierter Restreibungswinkel,
- modifizierter Reibungswinkel und
- Kohäsion oder undrännierte Scherfestigkeit mit Randbedingungen.

Zu erhebende Versuchsparameter sind für die Wertung der v.g. Festigkeitskenngrößen äußerst wichtig:

Insbesondere bei den Triaxialversuchen zur Ermittlung der Verflüssigungseigenschaften der Kippenböden werden bzw. wurden neben generellem Versuchsablauf und Randbedingungen (z.B. CAUps) in Abhängigkeit vom jeweiligen Stand der Technik eine Vielzahl von Parameter ermittelt, aufgezeichnet oder berechnet, die für die Beurteilung der Versuchsergebnisse von entscheidender Bedeutung sind.

- Zum Teil entsprechen diese Parameter den v.g. Zustandsgrößen (z.B. Einbauporosität, Porosität nach Sättigung) und verändern sich im Versuchsverlauf.
- Versuchsergebnisse wie Sackungsmaße und Verformungsmoduli werden an dieser Stelle mit erfasst.
- Weitere Größen sind z.B. die Konsolidationsstufen, Porenwasserdruckentwicklungen und Verformungen.
- Zur kompletten Beschreibung eines Versuches oder einer Versuchsgruppe ("Mehrstufenversuche") sind alle Parameter einschließlich Gerätetyp, ggf. -nummer zu erfassen.
- Für alle Laborversuche ist soweit möglich das Datum der Untersuchung zu erfassen.

Ein entsprechend weitgefasstes Schema zur Datenerfassung wurde entwickelt und wird erforderlichenfalls weiter angepasst.

5 Bearbeitungsgebiet der Recherche und Stand der Datenerfassung

Das Bearbeitungsgebiet umfasst nahezu alle Tagebaubereiche der Lausitz:

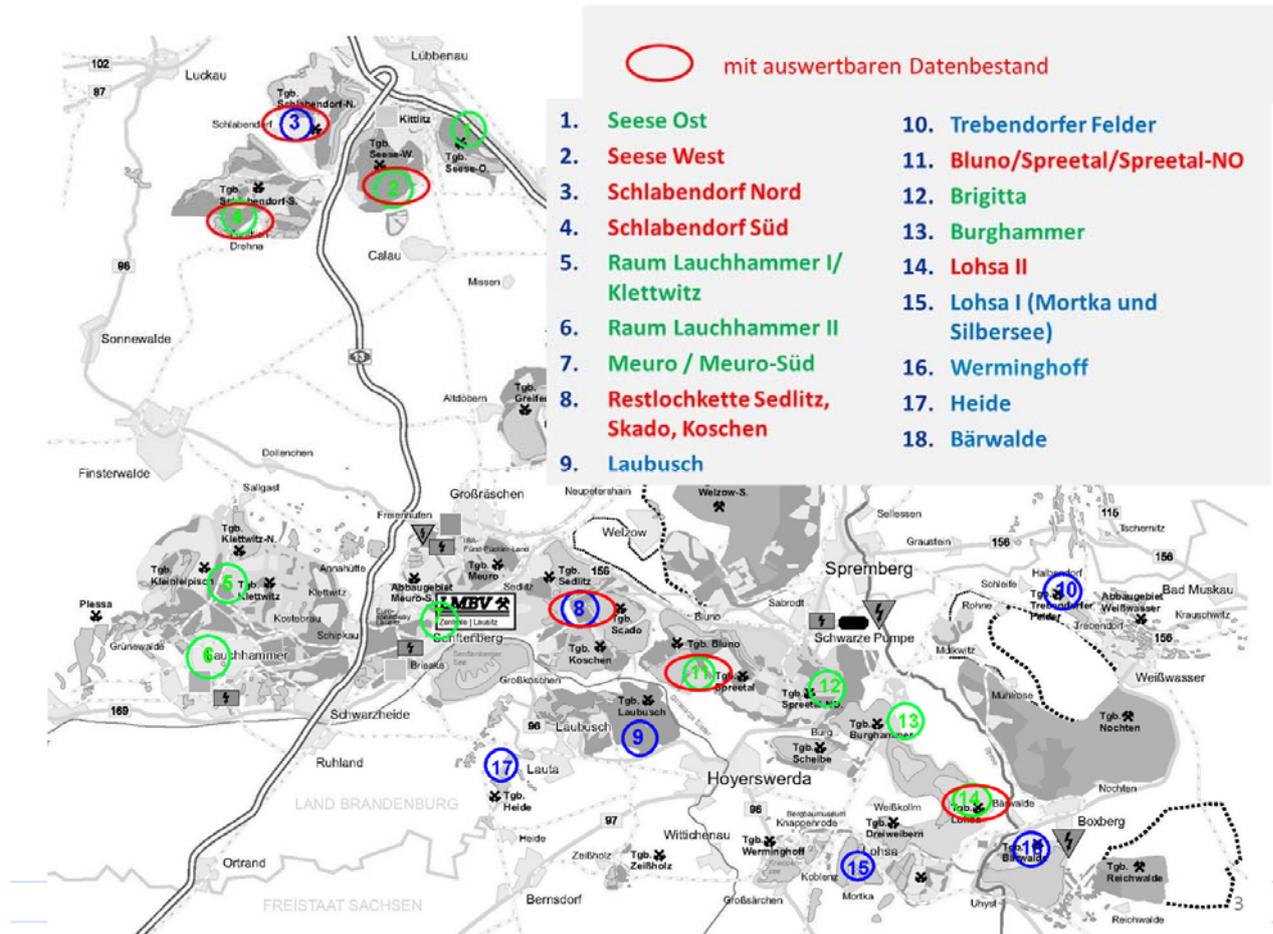


Abbildung 5: Bearbeitungsgebiet

Bisher wurde folgender Stand der Datenerfassung erreicht:

- Übernahme von bisher insgesamt 421 Laborberichten
- Aus 126 Berichten Datenextraktion von 2900 Proben
- Berichte GMB für Schlabendorf und Spreetal komplett
- In den übrigen ca. 300 Berichten noch ca. 6.000 Proben
- Berichtserfassung bei GMB bis einschl. 2014, nur z.T. bei G.U.B.

Ohne die intensive Unterstützung insbesondere durch die Mitarbeiter des Labors der GMB mbH wäre die Realisierung dieses Vorhabens der LMBV mbH nicht möglich.

Die Datenerfassung wird sukzessive fortgeführt. Es kann davon ausgegangen werden, dass bis zum III. Quartal nahezu alle verfügbaren Berichte erfasst sein werden. Die Implementierung in die Datenbank wird allerdings noch längere Zeit beanspruchen.

6 Unsicherheiten bei der Zuordnung der Daten

Bei der Übernahme der bodenphysikalischen Daten aus den Ergebnisberichten bestehen - insbesondere bei älteren Berichten - erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Zuordnung zu konkreten Örtlichkeiten auf der Kippe. Die Beschreibung der Herkunft des Probenmaterials erfolgte entsprechend den Angaben, die der jeweilige Auftraggeber gemacht hat. Dementsprechend liegen häufig nur Angaben zu Bohrungs- oder Schurfbezeichnungen, ggf. mit einer verbalen Angabe zum Tagebaubereich vor.

Ziel ist es aber, den Proben auch Koordinaten zuzuordnen. Dadurch wird in der Folge eine Recherche hinsichtlich der Gutachten, für die die Laboruntersuchungen gemacht wurden, erforderlich.

Trotzdem aus den Zustandsgrößen der Proben meist ableitbar ist, ob es sich um Proben aus verdichteten Bereichen handelt, ist die Zuordnung häufig unsicher. In den später vorgestellten ersten Ergebnissen wurde dementsprechend keine Trennung vorgenommen.

7 Grundsätzliche Bemerkungen zum Datenbestand

Die Gesamtheit der Laborergebnisse stellt einen durch eine Reihe von subjektiven Entscheidungen des jeweiligen Auftraggebers beeinflussten Ausschnitt aus der Vielfalt der Kippenböden dar. Die Probenauswahl erfolgte durch den geotechnischen Bearbeiter / Sachverständigen für Böschungen/Geotechnik auf Grundlage

- der jeweiligen Aufgabenstellung (Stand sicherheitsuntersuchungen, Sanierungsplanung, Verdichtungsnachweis u.a.),
- des zum Untersuchungszeitpunkt beim Bearbeiter vorhandenen aktuellen Kenntnisstands zu den bodenphysikalischen Eigenschaften der Kippenböden des Tagebaubereiches und
- der mehr oder weniger zufällig in Bohrung oder Schurf aufgeschlossenen Kippenböden.

Beispielsweise tendiert der Bearbeiter dahin, von offensichtlich eher verflüssigungsempfindlichen Bodenarten mehr Untersuchungen zu beauftragen, als von Proben mit deutlich höherem Feinkornanteil.

Andererseits existieren auch Untersuchungen an Proben aus Linerbohrungen und Gefrierkernen, bei denen die Anzahl von Proben mit hohem Feinkornanteil sehr groß ist.

Zusätzlich bedingen objektive Randbedingungen von bodenphysikalischen Versuchen z.B. eine Ausdünnung der Anzahl der Ergebnisse von Triaxialversuchen bei hohen Porenanteilen.

Ausgehend von den beschriebenen subjektiven und objektiven Faktoren, die auf die Probenauswahl wirken, muss festgestellt werden, dass statistische Auswertungen mit

dem Ziel, den Kippenzustand als Ganzes zu erfassen, grundsätzlich zum Scheitern verurteilt sind.

Wenn die verwendete Datenauswahl entsprechend begrenzender beschreibender Kenngrößen, z.B. Korngrößenverteilung, eingeschränkt wird, ist es jedoch erfolgversprechend, aus dem Datenbestand Tendenzen für Kippenböden verschiedener Herkunft abzuleiten.

8 Bitte an die geotechnischen Bearbeiter

Ausgehend von den gemachten Erfahrungen hinsichtlich der Schwierigkeit der konkreten Zuordnung der Laborergebnisse zu Örtlichkeiten und Objekten wird vorgeschlagen, dass konsequent für jede Laboruntersuchung dem bodenphysikalischen Labor eine Reihe von "Kopfdaten" für die Untersuchungen mitgeteilt werden, die zumindest

- Tagebau-/Kippenbereich
- Name der Probenahmestelle
- Kurzbeschreibung Probenahme einschl. Datum
- Koordinaten der Probenahmestelle
- Besonderheiten (Gewachsenes, Kippe, unverdichtet oder verdichtet (Verfahren))

umfassen.

In den jüngeren Laborberichten sind solche Angaben häufig schon enthalten.

Vorteilhaft wäre eine Abstimmung der bodenphysikalischen Labors untereinander hinsichtlich einer entsprechenden einheitlichen Datenerfassungsnorm zur Aufnahme der Proben.

9 Erste Ergebnisse der Datenrecherche

9.1 Blickrichtung der Auswertung

Ausgehend von den schon umfangreichen Daten für Kippenböden der wichtigsten Tagebaubereiche wurden einige, noch sehr grobe Auswertungen vorgenommen.

Insbesondere ist interessant, ob ähnlich wie bei der vergleichenden Auswertung der Drucksondierungen (vgl. TU Bergakademie Freiberg, 2012) signifikante Unterschiede zwischen den Kippenböden im Nordraum der Lausitz und denen im Süden gefunden werden können.

Ausgehend von der Tatsache, dass die allermeisten geotechnischen Ereignisse auf den Innenkippen in den zum Nordraum gehörenden Kippen von Schlabendorf Süd und Seese West festgestellt wurden, könnten wertvolle Hinweise für die

Ursachenforschung und u.U. hinsichtlich der Sanierungserfordernis von Innenkippenbereichen gefunden werden.

Während durch die Sachverständigen in der Regel objektbezogenen Daten zur Bewertung der Eigenschaften und zum Festlegen von Berechnungskennwerten betrachtet werden, kann mit der Datenbank ein "Blick von außen" auf die Gesamtheit der überwiegend mit dem Erfassen von Verflüssigungseigenschaften gewonnenen Parameter der Kippenböden erfolgen.

Auch die im Labor der GMB vorgenommene Einteilung der Kippenböden und Berechnung von Kennwerten aufgrund versuchsgestützter bodenphysikalisch-mathematischer Zusammenhänge ist eher in Hinblick auf die objektbezogene Arbeit zu werten.

"Blick von außen" heißt, dass bewusst vermutliche oder bekannte Zusammenhänge zwischen bodenmechanischen Parametern nicht einbezogen werden, sondern Abhängigkeiten wesentlicher Kenngrößen dargestellt werden.

Im Wesentlichen konzentriert sich die erste Auswertung auf rollige Böden mit geringem Feinkornanteil aus Proben eingangs genannter Schwerpunktgebiete im Nord- und Südraum der Lausitz.

Bei den Auswertungen wurde bewusst vorerst auf die Bildung von statistischen Kenngrößen (Standardabweichung, Regressionsgeraden, ...) verzichtet, um vorerst lediglich die grobe Zielrichtung möglicher Feinuntersuchungen aufzuzeigen.

9.2 Korngrößenverteilungen

Es wurden von den in der Datenbank enthaltenen Untersuchungen zur Korngrößenverteilung die zu den Tagebaubereichen Spreetal (Spt), Schlabendorf Süd (SdS), Schlabendorf Nord (SdN), Lohsa II (Loh) und zur Restlochreihe Sedlitz, Skado, Koschen (RLK) gehörigen Daten gewählt und Mittelwerte in Abhängigkeit einer oberen Grenze für den Feinkornanteil FKA (Feinkorn $D < 0,063$ mm) gebildet.

Beginnend mit einer Grenze bei FKA = 15 % wurde die Grenze auf FKA = 10 % und FKA = 5 % gelegt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass von den die Proben auswählenden Bearbeitern Boden mit einem Feinkornanteil von 15 % wahrscheinlich noch als verflüssigungsempfindlich angesehen wurde.

Es wurden die nachfolgenden Verteilungskurven gefunden:

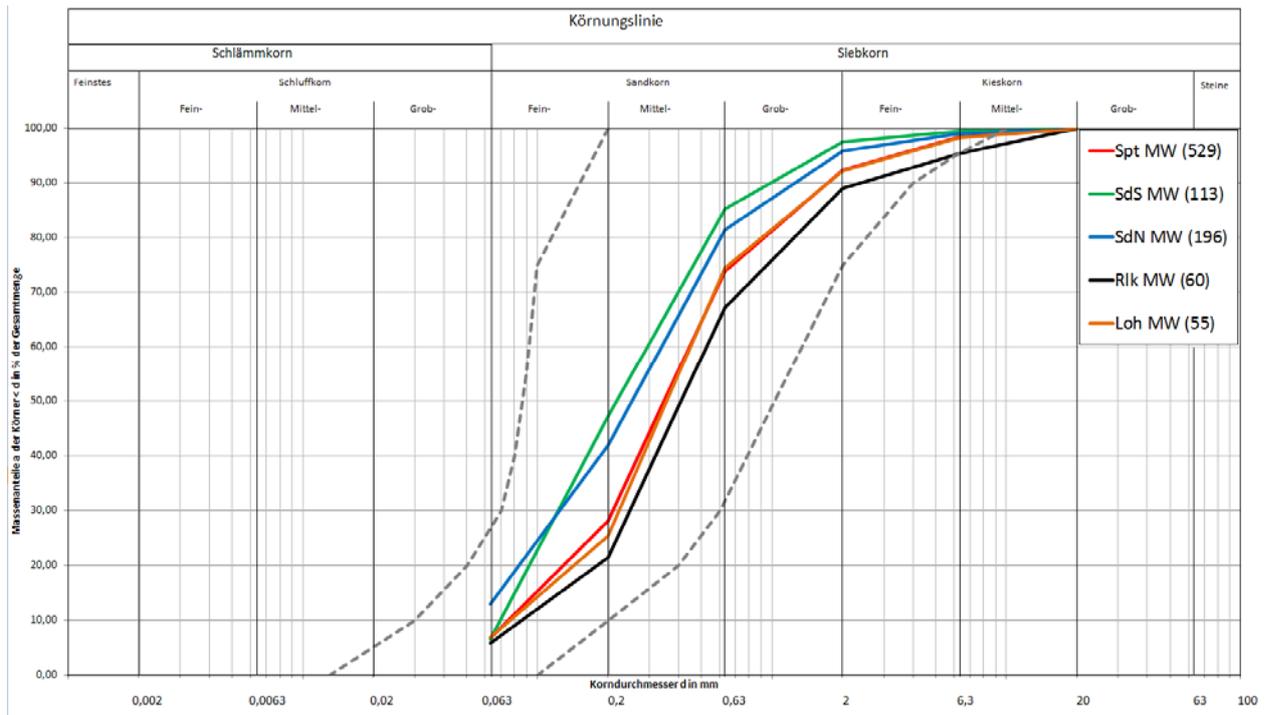


Abbildung 6: Korngrößenverteilungen (Mittelwerte für FKA < 15 %)

In der Legende ist die jeweilige Zahl der ausgewerteten Korngrößenverteilungen angegeben.

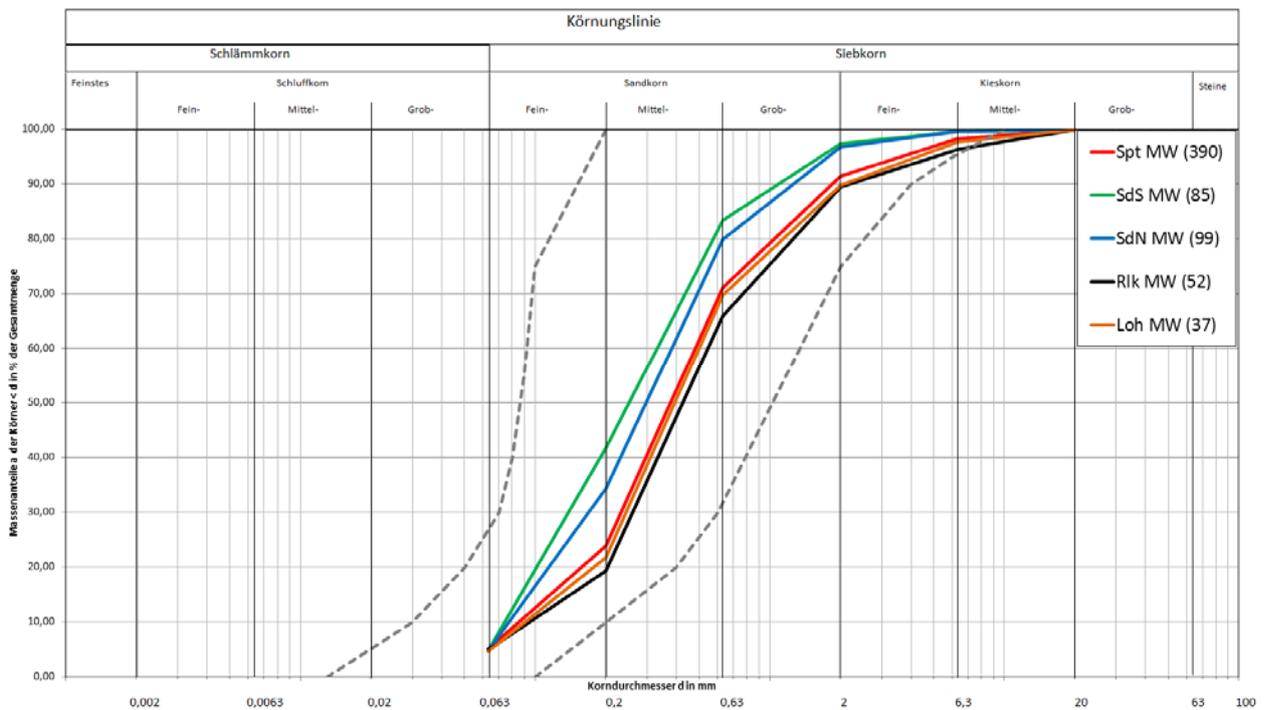


Abbildung 7: Korngrößenverteilungen (Mittelwerte für FKA < 10 %)

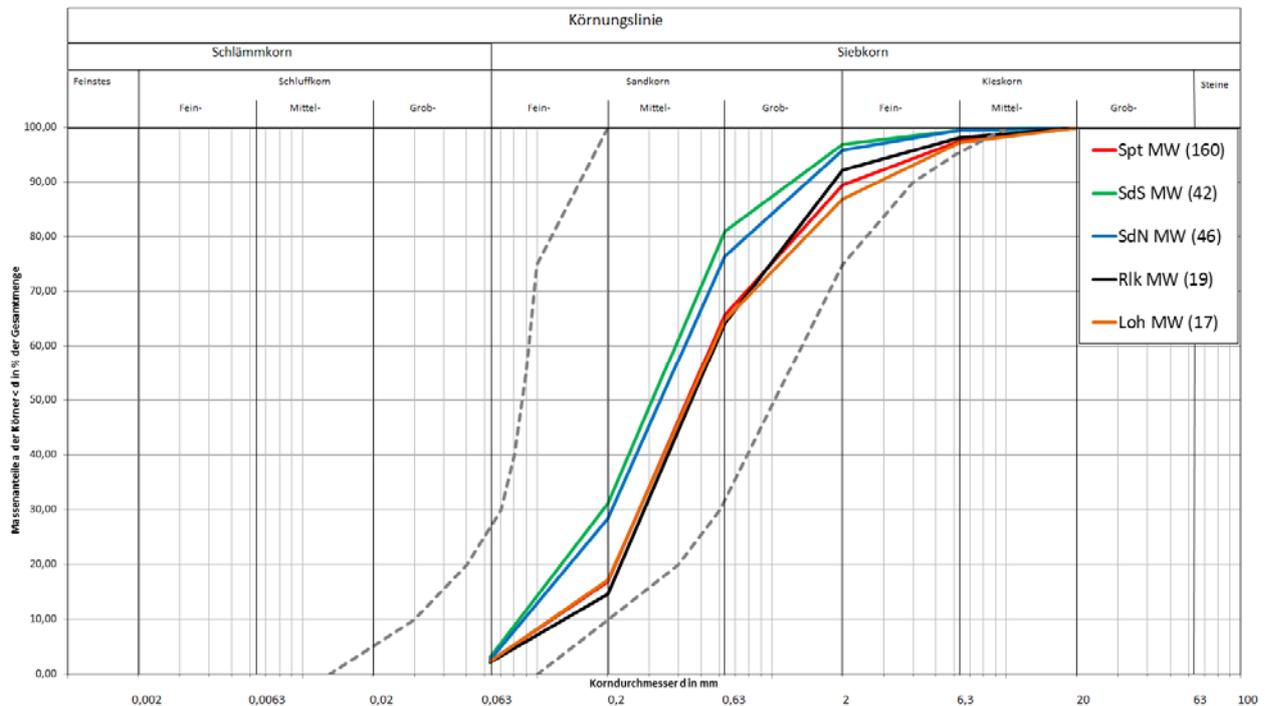


Abbildung 8: Korngrößenverteilungen (Mittelwerte für FKA < 5 %)

Bei der Analyse des Verlaufes der mittleren Kornverteilungen fällt auf, dass mit zunehmender Begrenzung des Feinkornanteils der Kippenböden die bei FKA < 15 % noch deutliche Differenzierung zwischen allen Tagebaufeldern wesentlich geringer wird. Bei den nach bisheriger Kenntnis hochverflüssigungsempfindlichen Böden mit geringem Feinkornanteil FKA < 5% nähern sich die Kurven für den Südraum (Spreetal, Restlochkeite und Lohsa) weitgehend an. Gleiches gilt auch für den Nordraum, wo Schlabendorf Nord und Süd sehr ähnlich Kornverteilungen zeigen.

Deutlich wird auch, dass bei etwa gleichem Mittelsandanteil (ca. 50 %) die Kippenböden im Nordraum einen wesentlich höheren Feinsandanteil (25 % ggü. 13 %) und geringeren Grobsand- und Kiesanteil (20 % ggü. ca. 33 %) als die im Südraum besitzen.

9.3 Lockerste und dichteste Lagerung

Diese beiden beschreibenden Kenngrößen lassen sich für die v.g. Tagebaubereiche und unterhalb einer Feinkorngrenze FKA =15 % als Mittelwerte des jeweiligen Porenanteils darstellen:

Tabelle 1 Porenanteil für lockerste (nmax) und dichteste Lagerung (nmin)

Tagebaufeld	nmax	nmin	Probenanzahl
Schlabendorf Süd	0,497	0,346	77/38
Spreetal / Bluno	0,481	0,325	234
Schlabendorf Nord	0,482	0,317	28/24
Restlochkette	0,546	0,355	4/2
Lohsa (II)	0,476	0,287	31/25

Aufgrund der stark unterschiedlichen Probenanzahl lassen sich nur bedingt Rückschlüsse auf Gesetzmäßigkeiten bzw. Tendenzen ziehen. Möglicherweise tendiert Schlabendorf Süd zu einem um $\Delta n = 0,015$ bis $\Delta n = 0,02$ höheren Porenanteil in beiden Grenzen.

Es wurde auch der Mittelwert aller Porenanteiluntersuchungen mit einem Ergebnis $n \geq 0,4$ gebildet. Der Mittelwert für Schlabendorf Süd beträgt $n = 0,429$ (bei $n \geq 0,4$). Damit und mit den Mittelwerten der lockersten und dichtesten Lagerung könnte eine "mittlere" Lagerungsdichte bestimmt werden. Es würde $D = 0,45$ berechnet! Damit wäre der Kippenboden im Mittel mitteldicht ($D = 0,3 \dots 0,5$). Dieses offenbar zweifelhafte Ergebnis entsteht zum Beispiel, wenn zwar die vereinbarten Grenzen für die Kornverteilung eingehalten wurden, jedoch lockerste und dichteste Lagerung nicht oder nur zum Teil für die Böden, für die der Porenanteil vorliegt wurde, bestimmt wurden.

Bevor Ergebnisse im Sinne von Trends aus der Datenbank abgeleitet werden, muss deren Sinnhaftigkeit und die Zulässigkeit der Verknüpfung der Daten geprüft werden.

9.4 Kornform

Als eine der Einflussgrößen für die Bestimmung der Verflüssigungsempfindlichkeit wurde in LMBV, 1998 die Kornform angegeben. Mit zunehmender Kugelförmigkeit und abnehmender Rauigkeit steigt die Verflüssigungsneigung. Als die Kornform beschreibende Parameter werden Sphärizität und Rundheit genannt.

Sphärizität/Rundungskoeffizient

Über die Sphärizität können Aussagen getroffen werden, wie sehr die Kornform einer Kugel bzw. der zweidimensionale Querschnitt einem Kreis ähnelt. Die Sphärizität entspricht dem im Zuge von Kornformuntersuchungen bestimmten Rundungskoeffizienten RK und liegt im Wertebereich zwischen 0 und 1 (1 entspricht

Kugel bzw. Kreis). Nach Ansicht der Autoren können aber über diesen Parameter Aussagen über die Rundheit, d. h. die Abrundung der Kornkanten nur bedingt getroffen werden. Zwar können Körner mit ähnlichem Rundungsgrad, d. h. ähnlichem Radius der Kornkanten ähnliche Rundungskoeffizienten aufweisen, der Rückschluss, d.h. Körner mit ähnlichem Rundungskoeffizienten haben einen ähnlichen Rundungsgrad der Kornkanten ist nicht in jedem Fall gegeben. Beispielsweise kann ein gestrecktes Achteck denselben Rundungskoeffizienten aufweisen wie eine Ellipse. Dementsprechend und da Quarzkörner als Hauptanteil tertiärer und pleistozäner Sande generell eine ähnliche Form (aber nicht Rundheit) aufweisen, können mit den vorliegenden Rundungskoeffizient-Daten keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Tagebaugebieten nachgewiesen werden.

Die nachfolgende Tabelle beinhaltet die nach Kornanteil gewichteten gemittelten Rundungskoeffizienten verschiedener Tagebaufelder:

Tabelle 2 Mittelwerte des Rundungskoeffizienten

Tagebaufeld	Rundungskoeffizient RK	Anzahl der Proben
Schlabendorf Süd	0,849	75
Spreetal / Bluno	0,860	340
Schlabendorf Nord	0,857	103
Restlochkette	0,870	33
Lohsa (II)	0,861	46

Rundheit

Als Rundheit von Körnern wird im Allgemeinen der Rundungsgrad, d.h. der Radius von Kornkanten bezeichnet. Die Bestimmung erfolgt manuell durch Vergleich mit einer Vorlage für verschiedene Kornfraktionen. Der Rundungsgrad wird unterschieden in:

- gut gerundet
- abgerundet
- gebrochene Kanten
- eckig
- eckig, stengelig

Eine Auswertung und Vergleich von Rundungsgraden verschiedener Tagebaufelder ist bisher noch nicht erfolgt.

Rauigkeit/Texturkoeffizient

Der bei Kornformuntersuchungen angegebene Texturkoeffizient TK ermöglicht Aussagen über die Rauigkeit und damit über die Beschaffenheit der Kornoberfläche. Die Kornstruktur wird ebenfalls fraktionsweise mikroskopisch ermittelt und dabei in folgende Kategorien unterteilt:

- poliert
- glatt
- stumpf
- angeraut
- rau
- zerklüftet

Zur Bestimmung des Texturkoeffizienten werden die einzelnen Texturkategorien unterschiedlich gewichtet. Die Bewertungen erfolgen in der Regel in Anlehnung an den US-Standard ASTM D-2488 Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure).

Abgesehen davon, dass bei der Bestimmung nach Ansicht der Autoren Maßstabeffekte (unterschiedliche Bewertung bei unterschiedlichen Korndurchmessern) nicht ganz ausgeschlossen werden können, sind signifikante Unterschiede in der Bewertung für Kippenböden aus den verschiedenen Tagebaugebieten erkennbar:

Tabelle 3 Mittelwerte des Texturkoeffizienten

Tagebaufeld	Texturkoeffizient TK	Anzahl der Proben
Schlabendorf Süd	0,271	42
Spreetal / Bluno	0,310	199
Schlabendorf Nord	0,324	12
Restlochkette	0,372	4
Lohsa (II)	0,529	28

Schon bei den Mittelwerten fallen die kleinen Texturkoeffizienten von Schlabendorf Süd gegenüber denen der Kippenböden in Spreetal/Bluno auf. Eine deutliche Differenzierung in Nordraum und Südraum der Lausitz ist jedoch nicht erkennbar, wobei jedoch der teils geringe Stichprobenumfang zu berücksichtigen ist.

Werden die prozentualen Anteile an Körnern einer Kornfraktion, die mindestens als "glatt" bewertet wurden, über einer Korngrößenskala aufgetragen, zeichnen sich deutliche Unterschiede zwischen den Tagebaubereichen ab (siehe Abb. 9, dicke Linien). Zum Beispiel sagt die Darstellung aus, dass in Schlabendorf Süd etwa gleich viele Körner in jeder Kornfraktion als "glatt" angesehen, in Spreetal jedoch die großen Körner tendenziell rauer eingeschätzt werden.

Da hierbei die Unterschiede der Korngrößenverteilungen bedeutsam sind, wurden die v.g. prozentualen Anteile mit dem jeweiligen Massenanteil multipliziert (siehe Abb. 9, dünne Linien). Abgesehen davon, dass die zum Teil geringen Stichprobenumfänge von Schlabendorf Nord und der Restlochkeite keine statistisch sicheren Ergebnisse für alle untersuchten Tagebaubereiche zulassen, ist der sehr ähnliche Verlauf bei Schlabendorf Süd und Spreetal für größere Kornfraktionen auffallend.

Dadurch schärft sich die voranstehend gemachte Feststellung: Der Massenanteil glatter Körner ist im Bereich 0,1 mm bis 0,2 mm mit ca. 20 % der Gesamtmasse in Schlabendorf Süd doppelt so groß als in Spreetal (ca. 10 %).

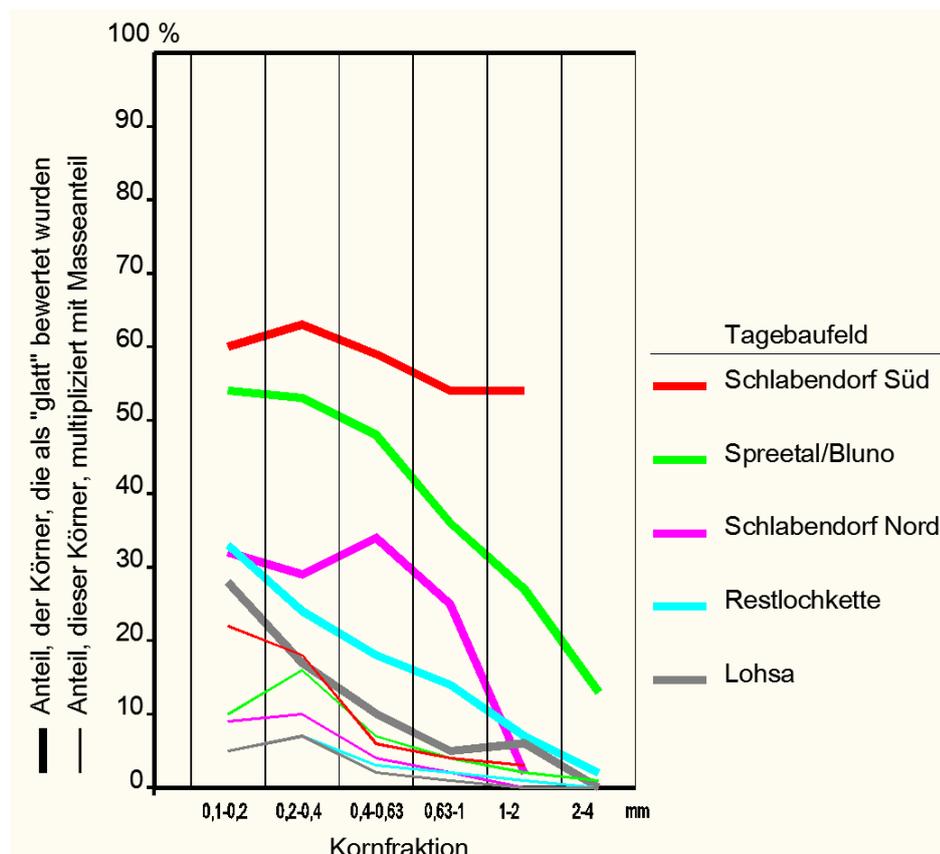


Abbildung 9: Anteil von "glatten" Körnern für Kornfraktionen

Die Ursachen für die Unterschiede liegen in der überwiegenden geologischen Herkunft der Abraumschichten der ehemaligen Tagebaue: Während es sich bei den Böden im Nordraum um marine Bildungen (z.B. Seeser Sande als hochenergetische Randbildungen) handelt, sind im Südraum eher pleistozäne Sande des Lausitzer Urstromtals in den Kippen enthalten. Die Oberflächenstruktur der Körner ist hierbei abhängig von der Transportentfernung und einer bei den marinen Sanden häufigen Wiederaufnahme des Transportes.

Inwieweit sich die Glattheit der Oberfläche quantitativ auf die Verflüssigungsneigung oder sogar auf Festigkeitsparameter auswirkt, ist derzeit noch nicht klärbar.

Schlussfolgerungen

Die o.g. Kornformparameter haben erwiesenermaßen Einfluss auf die Verflüssigungsempfindlichkeit von Kippenböden. Separat betrachtet sind die einzelnen Parameter jedoch nur bedingt aussagekräftig. Aus Sicht der Autoren sind für den zukünftigen Vergleich von Kornformparametern einzelner Tagebaufelder stets alle Parameter einzubeziehen. Des Weiteren ist zu klären, ob bei der Bestimmung der Koeffizienten die Wichtung der verschiedenen Anteile den tatsächlichen, sich auf die Verflüssigungsempfindlichkeit auswirkenden Bedingungen entspricht.

9.5 Zusammenhang Porenanteil und undrainede Festigkeiten

Ausgehend von der Vielzahl erfasster Triaxialversuche (CAU-ps - undrainede passive Stauchung, anisotrop konsolidiert) wurden in den folgenden Diagrammen für die Böden mit geringem Feinkornanteil die undrainede Bruch- und Restreibungswinkel gegenüber dem Porenanteil bei Versuchsbeginn (Beginn der Stauchung) für die Böden der Kippen der Tagebaufelder Schlabendorf Süd (SdS), Schlabendorf Nord (SdN), Seese West (SeW), Spreetal (Spt), Lohsa II (Loh) und Restlochkeite Sedlitz, Scado, Koschen (RLK) aufgetragen. Die undrainede Reibungswinkel sind die aus den Einzelversuchen abgeleiteten Werte bei Festlegung von $c_u = 0$. In den nachstehenden Darstellungen wurden nur Proben mit einem Feinkornanteil $FKA \leq 10\%$ verwendet. In den Diagrammen bezeichnen magentafarbene Punkte die Restfestigkeit, grüne Punkte die Bruchfestigkeiten.

Die Auswertung erfolgte unabhängig davon, ob es sich bei den untersuchten Proben um gestörte oder ungestörte / strukturgestörte Proben und unabhängig davon, ob das Material aus verdichteten oder unverdichteten Bereichen stammt.

Als Referenz wurden die Untersuchungsergebnisse von Schlabendorf Süd verwendet. Zur Orientierung wurden die von Ausreißern bereinigten unteren Grenzen für die v.g. Festigkeiten in Abhängigkeit von der Porenzahl als Linien dargestellt (magenta: Restfestigkeit, grün: Bruchfestigkeit). Im Bereich zwischen $n = 0,40$ und $n = 0,38$ erfolgt hier der Übergang von geringsten Restfestigkeiten zu den hohen Bruchfestigkeiten ohne Bodenverflüssigung.

Die Bruchfestigkeiten, die der Kippenboden vor der Verflüssigung in der Regel bei äußerst geringen Verformungen besitzt, werden häufig als "mobilisierbare" Scherfestigkeiten angesehen und könnten als Maß für die Empfindlichkeit des Bodens hinsichtlich Verflüssigung dienen.

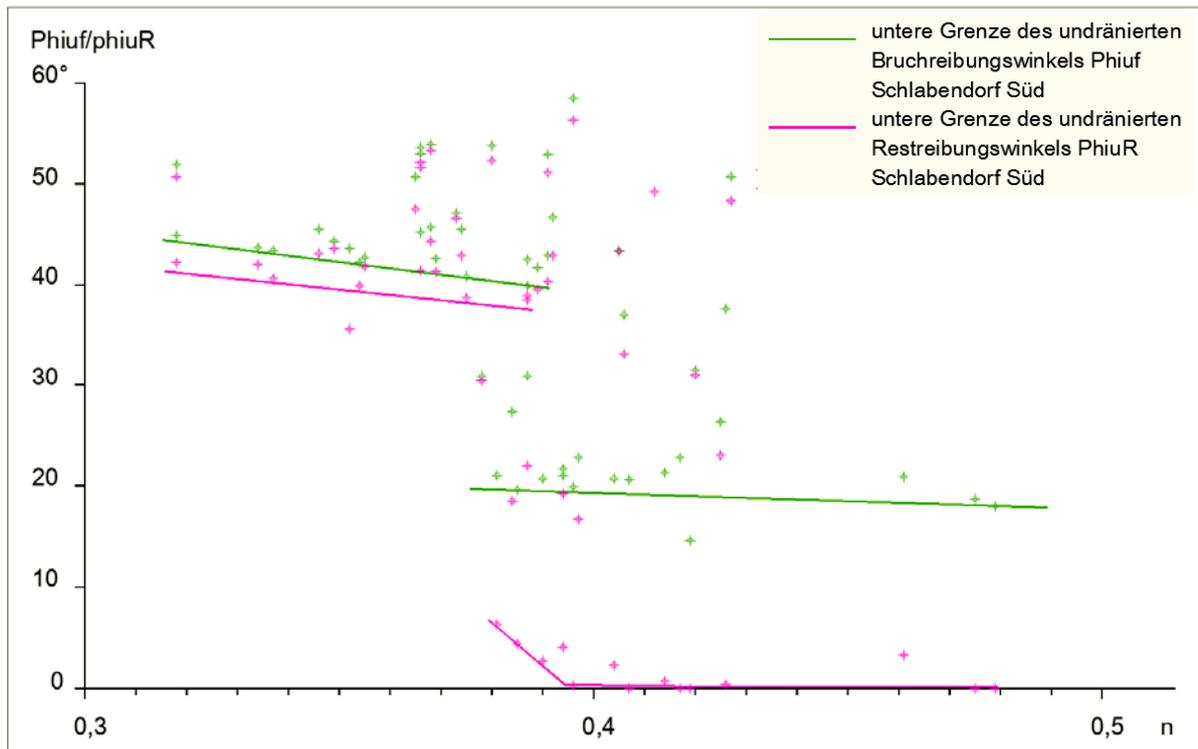


Abbildung 10: Schlabendorf Süd (Nordraum): Diagramm n - Φ_{iuf}/Φ_{iur} (FKA < 10 %)

Werden die Ergebnisse entsprechend der Herkunft aus dem Nordraum oder Südraum der Lausitz geordnet und zusammengefasst dargestellt, ergeben sich folgende Diagramme:

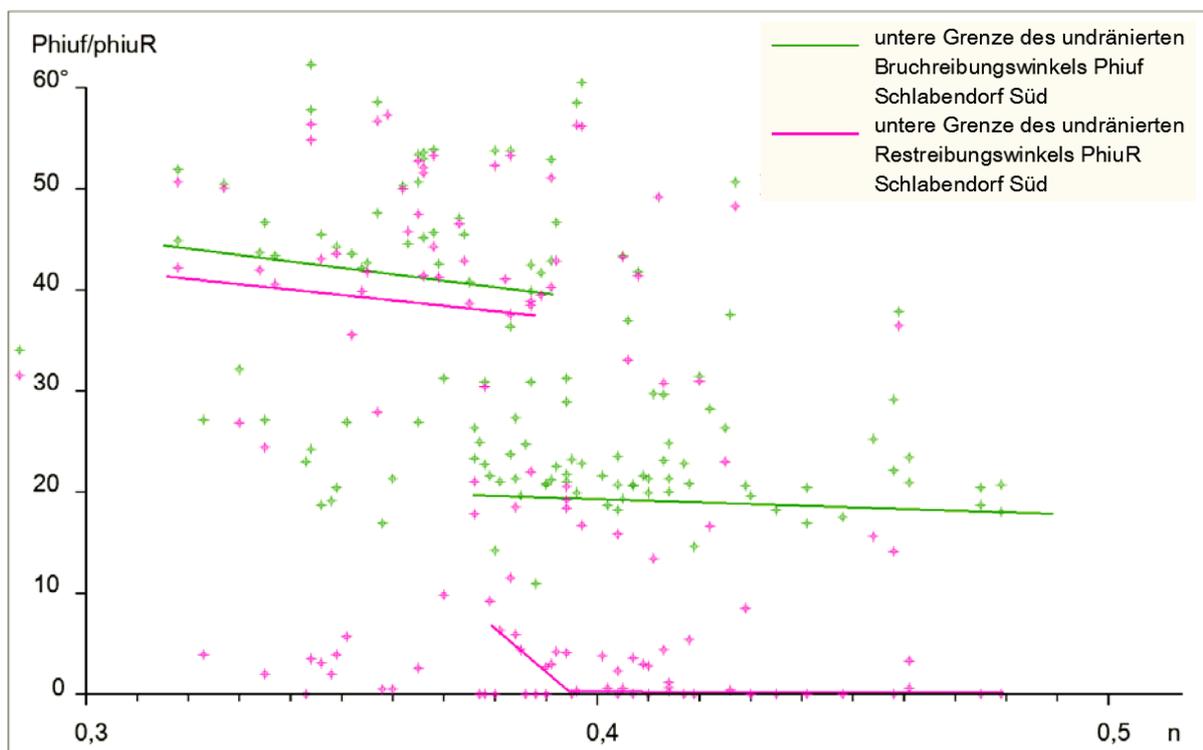


Abbildung 11: Nordraum der Lausitz: Diagramm n - Φ_{iuf}/Φ_{iur} (FKA < 10 %)

Während die aus dem Diagramm für Schlabendorf Süd entwickelten unteren Grenzen der Reibungswinkel für die durch Schlabendorf Nord und Seese West vergrößerte Versuchsanzahl weitgehend Bestand haben, fallen eine Reihe von Werten mit geringen Bruch- und Restfestigkeiten weit unterhalb $n = 0,38$ auf. Diese Werte stammen überwiegend aus Untersuchungen an Kippenmaterial aus Schlabendorf Nord.

Insgesamt wurden im Diagramm 310 Werte verarbeitet.

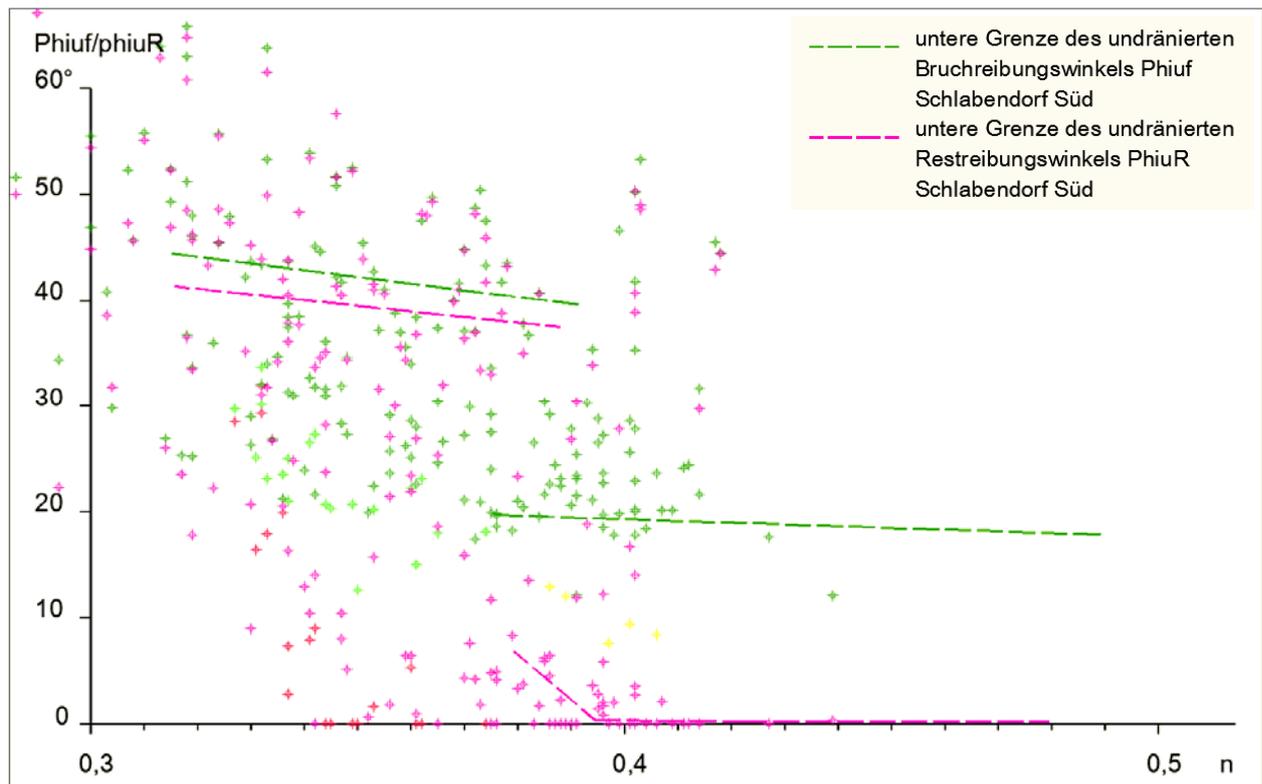


Abbildung 12: Südraum der Lausitz: Diagramm $n - \text{Phiuf}/\text{Phiur}$ (FKA < 10 %)

Im Diagramm Südraum wurden 430 Werte verarbeitet. Einander entgegenlaufende Tendenzen lassen sich bei Trennung der Südraum-Werte beobachten: Rote und hellgrüne Werte stammen aus Untersuchungen für Kippensande in Lohsa, bei denen offenbar geringe Porenanteile um $n = 0,34 \dots 0,36$ noch eine vollständige Verflüssigung der Probe mit geringsten Restfestigkeiten erlauben. In Spreetal und in der Restlochkette häufen sich diese Werte erst bei Porenanteilen $n > 0,38$.

Unterschiede zum Nordraum bestehen in der trotz der unterschiedlichen Werteanzahl auffälligen größeren Streuung der Bruch- und Restfestigkeiten, vor Allem bei $n \geq 0,38$ in Richtung höherer Bruchfestigkeiten vor einer Bodenverflüssigung.

Auffällig ist auch, dass es für den Nordraum eine größere Anzahl von Versuchen gibt, bei denen der Porenanteil bei Beginn der Stauchung bei $n > 0,41$ lag und deren

Auswertung eindeutig Bruch- und Restfestigkeiten nachweist. Im Südraum fehlen solche Versuche nahezu vollständig.

Die Interpretation dieser Feststellungen ist ohne Einbeziehung der praktischen Erfahrungen der bodenphysikalischen Labore beim Probenhandling nicht sinnvoll.

10 Zusammenfassung

Für die Kippenböden der Lausitz wird eine Datenbank mit allen verfügbaren Ergebnissen von bodenphysikalischen Laboruntersuchungen der wichtigsten bodenphysikalischen Labore geschaffen, die in das Kippenkataster der LMBV mbH integriert werden wird.

Es soll ermöglicht werden, im Gesamtbestand an bodenphysikalischen Daten nach unterschiedlichen Kriterien über entsprechende Filter zu recherchieren und u.a. quasi-statistische Auswertungen vorzunehmen.

Die Datenerfassung und -implementierung erfolgt seit einigen Monaten und wird voraussichtlich bis Ende 2014 einen Abschluss finden.

Erste ausgewählte Auswertungen der bisher ca. 30.000 Einzeldaten lassen die Schlussfolgerung zu, dass bei gründlicher Recherche und kritischer Auswahl relevanter Daten quantitative Erkenntnisse hinsichtlich typischer Eigenschaften der Kippenböden unterschiedlicher Tagebaufelder bzw. des Nord- und Südraumes der Lausitz gewonnen werden können.

Beispielhaft wurden für einzelne Tagebaufelder die mittleren Korngrößenverteilungen, Rundungskoeffizienten und Texturkoeffizienten dargestellt und auf mögliche Ursachen für erkannte Unterschiede hingewiesen.

Bei der Auswertung von Zusammenhängen zwischen Porenanteilen und Festigkeitskennzahlen der in Triaxialversuchen untersuchten Kippenböden wurden ebenfalls auffällige Unterschiede zwischen Nordraum und Südraum deutlich.

Die Feststellungen können zumindest als Hinweis auf das Vorhandensein von quantifizierbaren bodenphysikalischen Unterschieden zwischen den Kippenböden des Nordraumes und Südraumes der Lausitz gewertet werden. Solche Erkenntnisse können dazu beitragen, die unterschiedliche Dichte und den verschiedenen Charakter der geotechnischen Ereignisse auf den Innenkippen zu erklären und gegebenenfalls Schlussfolgerungen hinsichtlich erforderlicher Sanierungen auf den Innenkippen zu ziehen.

11 Literatur

LMBV (Hrsg.): Beurteilung der Setzungsfließgefahr und Schutz von Kippen gegen Setzungsfließen. ("Grünes Heft"). Senftenberg, Dezember 1998

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, Prof. Wolfram Kudla (Hrsg.): Beiträge zum Fachkolloquium 4: Bodenverflüssigung bei Kippen des Lausitzer Braunkohlebergbaues, im Rahmen des Freiburger Forschungsforums - 63-. Berg- und Hüttenmännischer Tag, 14./15.06.2012: Beitrag "Drucksondierungen bei technologisch unterschiedlich hergestellten Kippen des Braunkohlebergbaues, Dr.-Ing. M. Dennhardt, Dipl.-Ing. S. Bischof, CDM Smith Consult GmbH