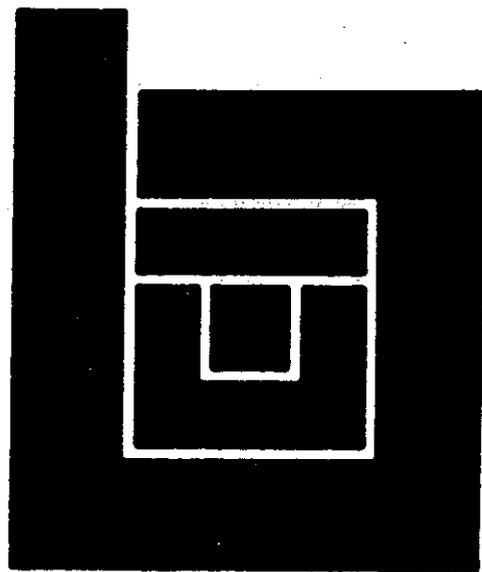


**SCHRIFTENREIHE DES INSTITUTS FÜR  
BAUWIRTSCHAFT UND BAUBETRIEB**

**HERAUSGEGEBEN VON  
PROF. DIPL.-ING. KLAUS SIMONS  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG**

**ZUR BEFAHRBARKEIT BINDIGER BÖDEN  
MIT RAUPENFAHRZEUGEN**

**DR.-ING. JÖRG BARTELS-LANGWEIGE**



**Zur Befahrbarkeit bindiger Böden  
mit Raupenfahrzeugen**

	Seite
<b>0. Veranlassung</b>	1
<b>1. Aufgabenstellung</b>	3
<b>2. Übliche Bodenbeschreibungen für baubetriebliche Zwecke</b>	5
2.1 Bodengruppen für bautechnische Zwecke entsprechend DIN 18 196	5
2.2 Bodenklassifikation entsprechend DIN 18 300, Erdarbeiten	10
2.3 Weitere Bodenbeschreibungsmöglichkeiten	15
2.3.1 Baugrundbeschreibung entsprechend DIN 4022	15
2.3.2 Boden- und Felssklassifikation entsprechend DIN 18 331, Naßbaggerarbeiten	15
2.3.3 Bodenbeschreibungen in den Zusätzlichen Technischen Vorschriften und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTVE-StB 76)	15
2.3.4 Bodenbeschreibungen in Niederländischen Normen	16
<b>3. Verwendbarkeit der Bodeneingruppierung entsprechend DIN 18 196 und 18 300 für die Beurteilung der Anwendbarkeit von Bauverfahren und Bauprozessen für Erd-, Bohr- und Gründungsarbeiten</b>	17
3.1 Vorgehensweise	17
3.2 Einordnung der Bodenhauptgruppen entsprechend DIN 18 196 in die Bodenklassen entsprechend DIN 18 300	18
3.3 Verwendbarkeit der Bodenbeschreibungen in DIN 18 196 und 18 300 für Bauverfahren und Bauprozesse	19
3.3.1 Lösen, Laden und Transportieren von Böden mit Baugeräten	19
3.3.2 Befahren von Böden mit Baugeräten	20
3.3.3 Abkippen und Verteilen von Böden mit Baugeräten	21
3.3.4 Rammen und Bohren	22
3.3.5 Schlitzwandherstellung	22
3.3.6 Injektionen	22
3.3.7 Wasserhaltung	23
3.3.8 Erstellen von baubetrieblich erforderlichen Böschungen in Böden	23
3.4 Ermittlung derjenigen Bauverfahren und Bauprozesse, bei denen für bestimmte Bodenhauptgruppen zusätzliche Angaben zur Beurteilung der Anwendbarkeit dieser Verfahren erforderlich werden	24

<b>4.</b>	<b>Ermittlung von Parametern und Bodenbeschreibungen für die Beurteilung der Befahrbarkeit von wasserhaltigen, feinkörnigen Böden mit Baugeräten</b>	<b>26</b>
4.1	Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Böden im Erdbau	26
4.1.1	Der Plattendruckversuch	26
4.1.2	Der Benkelmann-Balken	27
4.1.3	Der CBR-Versuch	27
4.1.4	Der Gruppenindex	28
4.1.5	Beurteilung der traditionellen Untersuchungsmethoden	28
4.2	Bodenmechanischer Ansatz für die Beschreibung der Vorgänge beim Befahren der wasserhaltigen, feinkörnigen Böden mit organischen Beimengungen	29
4.2.1	Physikalische Zusammensetzung des Bodens	30
4.2.2	Das Setzungsverhalten von wasserhaltigen, feinkörnigen Böden mit organischen Beimengungen	31
4.2.3	Die Tragfähigkeit des Bodens	34
4.2.3.1	Die Scherparameter	34
4.2.3.2	Bodenparameter, die die Anfangsscherfestigkeit beeinflussen	38
4.2.4	Der Einfluß dynamischer Belastungen auf die Tragfähigkeit des Bodens	43
4.2.5	Die Wechselwirkung zwischen Boden und Baugerät	44
4.3	Meßgeräte und Meßmethoden zur Bestimmung der undränierten und unkonsolidierten Scherfestigkeit	45
4.3.1	Beschreibung der Meßmethodik und der Versuchsauswertung bei Messung mit der Dreiaxialzelle	45
4.3.2	Beschreibung der Meßmethodik und der Versuchsauswertung bei Messung mit Flügelsonden	48
4.3.2.1	Messung mit der Laborflügelsonde	49
4.3.2.2	Messung mit der Taschenfeldflügelsonde GEONOR H60	50
4.3.2.3	Messung mit der Feldflügelsonde nach DIN 4096	51
4.3.3	Eignung der Meßmethoden für kurzfristige Kontrollen	53
<b>5.</b>	<b>Für die Beurteilung der Befahrbarkeit wasserhaltiger, feinkörniger Böden relevante maschinentechnische Daten von Baugeräten</b>	<b>56</b>
5.1	Planiertrauben	58
5.1.1	Maschinentechnische Daten von Planiertrauben	59
5.1.2	Einteilung der Planiertrauben in Bodenbelastungsklassen	65

	Seite	
5.2	Raupenlader	67
5.2.1	Maschinentechnische Daten von Raupenladern	67
5.2.2	Einteilung der Raupenlader in Bodenbelastungsklassen	73
5.3	Schürfkübelraupen	73
5.3.1	Maschinentechnische Daten von Schürfkübelraupen	75
5.3.2	Einteilung der Schürfkübelraupen in Bodenbelastungsklassen	77
5.4	Raupenbagger	77
5.4.1	Maschinentechnische Daten von Raupenbaggern	78
5.4.2	Einteilung der Raupenbagger in Bodenbelastungsklassen	82
5.5	Sondergeräte	82
5.5.1	Maschinentechnische Daten von Sondergeräten	82
5.5.2	Einteilung der Sondergeräte in Bodenbelastungsklassen	84
5.6	Einteilung der untersuchten Baugeräte in Bodenbelastungsklassen	84
6.	<b>Durchführung und Auswertung von Geräteversuchen zur Prüfung der Eignung der in Kap. 4.2 vorgeschlagenen Parameter hinsichtlich der Beurteilung der Befahrbarkeit von teilentwässertem Hafenschlick</b>	86
6.1	Einsatzgrenzen für Erdbaugeräte, beispielhaft ermittelt durch Versuche beim Einbau von teilentwässertem Hafenschlick	88
6.1.1	Schlickeinbauversuche mit einem Erdbaugerät mit hohem Bodendruck und Einsatzgewicht (Geräteklasse IV)	88
6.1.2	Schlickeinbauversuche mit Erdbaugeräten mit geringem Bodendruck und Einsatzgewicht (Geräteklasse II)	89
6.1.3	Schlickeinbauversuche mit Erdbaugeräten mit sehr geringem Bodendruck und Einsatzgewicht (Geräteklasse I)	95
6.2	Zusammenfassung der Ergebnisse der Geräteversuche und Festlegung von Einsatzgrenzen mit Hilfe des Bodenparameters Anfangsscherfestigkeit $C_u$	96
6.3	Versuche zur Veränderung der Scherfestigkeit durch dynamische Beanspruchung	99
6.3.1	Scherfestigkeitsveränderung durch den Ausbau und den Transport	99
6.3.2	Scherfestigkeitsveränderung durch den Einbau und zusätzliche Lastwechsel	101
6.3.3	Scherfestigkeitsveränderung durch die Konsolidation	103
6.3.4	Konsequenzen für die Baupraxis	103

	Seite	
6.4	Möglichkeiten der Bestimmung der Einsatzgrenzen mit dem bodenmechanischen Parameter Wassergehalt und Korngrößenverteilung	105
6.4.1	Mögliche Einsatzgrenzen für Moorraupen mit geringem Bodendruck in Abhängigkeit vom Wassergehalt	105
6.4.2	Mögliche Einsatzgrenzen für Moorraupen mit geringem Bodendruck in Abhängigkeit von Wassergehalt und Korngrößenverteilung	106
7.	<b>Korrelationsanalysen von Bodenparametern für Hafenschlick</b>	108
7.1	Korrelationsanalysen zwischen den mit verschiedenen Meßmethoden ermittelten Scherfestigkeiten	108
7.1.1	Ergebnisse der Korrelationsanalysen von mit dem Dreiaxialgerät ( $Cu_3$ ) und der Laborflügelsonde ( $Cu_2$ ) gemessenen Scherfestigkeiten	109
7.1.2	Ergebnisse der Korrelationsanalysen von mit der Laborflügelsonde ( $Cu_2$ ) und der Taschenfeldflügelsonde GEONOR H60 ( $Cu_1$ ) gemessenen Scherfestigkeiten	114
7.1.3	Ergebnisse der Korrelationsanalysen von mit der Taschenfeldflügelsonde GEONOR H60 ( $Cu_1$ ) und einer Feldflügelsonde mit Flügelabmessungen entsprechend DIN 4036 ( $Cu_4$ ) gemessenen Scherfestigkeiten	119
7.1.4	Zusammenhänge zwischen den Scherfestigkeiten aller vier Meßmethoden	123
7.2	Zusammenhänge zwischen der mit der Laborflügelsonde gemessenen Anfangsscherfestigkeit und den sie beeinflussenden Parametern	123
7.3	Zusammenfassung der Regressionsanalysen	130
8.	<b>Auswertung der Ergebnisse unter bodenmechanischen, baubetrieblichen und vertragsrechtlichen Aspekten</b>	132
8.1	Überprüfung des im Kap. 4.2 formulierten theoretischen Ansatzes nach Auswertung der Versuchsergebnisse und Durchführung der Regressionsanalysen, Auswahl der Meßmethode	132
8.2	Vorschlag für eine Bodenklassifizierung in Bodenscherfestigkeitsklassen mit Festlegung von damit korrespondierenden Geräteklassen beim Befahren von teilentwässertem Hafenschlick	134
8.3	Technische Hinweise für das Befahren und Bearbeiten von teilentwässertem Hafenschlick	136
8.4	Vertragsrechtliche Kriterien bei der Formulierung von Bauverträgen über entsprechende Bauleistungen	137
9.	<b>Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung des gewählten Bodenparameters</b>	140
10.	<b>Zusammenfassung</b>	142
11.	<b>Literaturverzeichnis</b>	144
12.	<b>Anhang I, Tabellen der maschinentechnischen Daten</b>	147
13.	<b>Anhang II, Bodenmechanische Kennwerte</b>	174

## Verzeichnis der Abbildungen

	Seite	
Bild 2.1:	Weitgestufte Korngrößenverteilung	6
Bild 2.2:	Enggestufte Korngrößenverteilung	6
Bild 2.3:	Intermittierend gestufte Korngrößenverteilung	7
Bild 4.1.1	Allgemeine Beurteilung des Untergrundes nach CBR-Werten	27
Bild 4.2.1:	Kräfteverteilung im Boden durch Gerätelast	29
Bild 4.2.2:	Volumenverhältnisse	30
Bild 4.2.3:	Setzungsanteile und wirksame Spannungen	33
Bild 4.2.4:	Grundbruch	34
Bild 4.2.5:	Äußere Hauptnormalspannungen	36
Bild 4.2.6:	Mohrsche Spannungskreise	37
Bild 4.2.7a:	Wassergehalt und Scherlinie eines bindigen dränierten Bodens	40
Bild 4.2.7b:	Wassergehalt und Scherlinie eines bindigen undrännierten Bodens	40
Bild 4.2.8	Beziehung zwischen der nicht entwässerten Scherfestigkeit $C_u$ und dem Wassergehalt $W$ beim CU-Versuch /4/	41
Bild 4.3.1:	Schema der Druckzelle zur Durchführung dreiaxialer Druckversuche	46
Bild 4.3.2:	Ermittlung der Scherfestigkeit durch UU-Versuch	47
Bild 4.3.3:	Schema der Laborflügelsonde	49
Bild 4.3.4:	Schema der Taschenfeldflügelsonde	50
Bild 4.3.5:	Schema des Flügels der Feldflügelsonde nach DIN 4096	52
Bild 5.1.1:	Hanomag-Planiertraupen, aufgetragen nach Einsatzgewicht und Bodendruck	60
Bild 5.1.2:	Liebherr-Planiertraupen, aufgetragen nach Einsatzgewicht und Bodendruck	61
Bild 5.1.3:	Caterpillar-Planiertraupen, aufgetragen nach Einsatzgewicht und Bodendruck	62
Bild 5.1.4:	Komatsu-Planiertraupen, aufgetragen nach Einsatzgewicht und Bodendruck	63
Bild 5.1.5:	Fiatallis-Planiertraupen, aufgetragen nach Einsatzgewicht und Bodendruck	64
Bild 5.1.6:	Planiertraupen aller Hersteller, aufgetragen nach Einsatzgewicht und Bodendruck, aufgeteilt in 4 Geräteklassen	66
Bild 5.2.1:	Hanomag-Raupenlader, aufgetragen nach Einsatzgewicht und Bodendruck	68
Bild 5.2.2:	Liebherr-Raupenlader, aufgetragen nach Einsatzgewicht und Bodendruck	69
Bild 5.2.3:	Caterpillar-Raupenlader, aufgetragen nach Einsatzgewicht und Bodendruck	70

Bild 5.2.4:	Komatsu-Raupenlader, aufgetragen nach Einsatzgewicht und Bodendruck	71
Bild 5.2.5:	Fiatallis-Raupenlader, aufgetragen nach Einsatzgewicht und Bodendruck	72
Bild 5.2.6:	Raupenlader aller Hersteller, aufgetragen nach Einsatzgewicht und Bodendruck, aufgeteilt in 4 Geräteklassen	74
Bild 5.3.1:	Schürfkübelraupen, aufgetragen nach Einsatzgewicht und Bodendruck	76
Bild 5.4.1:	Komatsu-Raupenbagger mit Bodendrücken kleiner $58 \text{ kN/m}^2$ , aufgetragen nach Einsatzgewicht und Bodendruck, aufgeteilt in Geräteklassen	79
Bild 5.4.2:	Caterpillar-Raupenbagger mit Bodendrücken kleiner $58 \text{ kN/m}^2$ , aufgeteilt in Geräteklassen	80
Bild 5.4.3:	O & K-Raupenbagger mit Bodendrücken kleiner $58 \text{ kN/m}^2$ , aufgeteilt in Geräteklassen	81
Bild 5.5.1:	Sondergeräte der Hersteller Kässbohrer und Konatec, aufgetragen nach Einsatzgewicht und Bodendruck mit eingetragenen Geräteklassengrenzen	83
Bild 5.6.1:	Darstellung der Geräteklassen nach Einsatzgewicht und Bodendruck	85
Bild 6.1.1:	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der ersten bis dritten Versuchsserie	93
Bild 6.1.2:	Scherfestigkeiten und Einsatzgrenzen der Geräte mit geringen Bodendrücken der vierten Versuchsserie	94
Bild 6.2.1:	Bestimmung der Einsatzgrenzen	98
Bild 6.3.1:	Veränderung der Scherfestigkeit durch den Ausbau und den Transport	100
Bild 6.3.2:	Veränderung der Scherfestigkeit durch den Einbau und durch zusätzliche Lastwechsel	101
Bild 6.3.3:	Normierte Darstellung der Scherfestigkeitsentwicklung nach dem Transportiertwerden und dem Überfahren in bezug auf die Ausbauscherfestigkeit	104
Bild 6.4.1:	Einsatzgrenzen von Baugeräten in Abhängigkeit vom Wassergehalt	106
Bild 6.4.2:	Einsatzgrenzen in Abhängigkeit von Wassergehalt und Korngrößenverteilung (Tongehalt)	107
Bild 7.1.1:	Zusammenhang der Scherfestigkeiten, gemessen mit Laborflügelsonde ( $Cu_2$ ) und Dreiaxialzelle ( $Cu_3$ )	110
Bild 7.1.2:	Zusammenhang der Scherfestigkeiten $Cu < 30 \text{ kN/m}^2$ , gemessen mit der Laborflügelsonde ( $Cu_2$ ) und mit der Dreiaxialzelle ( $Cu_3$ )	113
Bild 7.1.3:	Zusammenhang der Scherfestigkeiten, gemessen mit Taschenflügelsonde ( $Cu_1$ ) und Laborflügelsonde ( $Cu_2$ )	116

	Seite	
Bild 7.1.4:	Zusammenhang der Scherfestigkeiten ( $Cu_1$ ) $< 55 \text{ kN/m}^2$ , gemessen mit der Taschenfeldflügel-, zu der Scherfestigkeit $Cu < 30 \text{ kN/m}^2$ , gemessen mit der Laborflügelsonde ( $Cu_2$ )	117
Bild 7.1.5:	Zusammenhang der Scherfestigkeiten, gemessen mit Taschenfeldflügel- ( $Cu_1$ ), und DIN-Feldflügelsonde ( $Cu_4$ )	120
Bild 7.1.6:	Zusammenhang der Scherfestigkeiten, gemessen mit der Taschenfeldflügelsonde ( $Cu_1$ ) $< 55 \text{ kN/m}^2$ und der DIN-Feldflügelsonde ( $Cu_4$ ) $< 30 \text{ kN/m}^2$	121
Bild 7.2.1:	Zusammenhang des Wassergehaltes $W$ mit der Scherfestigkeit $Cu$ , gemessen mit der Laborflügelsonde ( $Cu_2$ )	125
Bild 7.2.2:	Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit (im logarithmischen Maßstab) und Wassergehalt bei Tonanteilen $\geq 20 \%$	128
Bild 7.2.3:	Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit (im logarithmischen Maßstab) und Wassergehalt bei Tonanteilen $< 20 \%$	129
Bild 8.1:	Einsatzgrenzen für die Geräteklassen O bis IV	135

## Verzeichnis der Tabellen

	Seite
Tabelle 2.1: Bodenklassifizierung; Gruppeneinteilung der Böden für bautechnische Zwecke, DIN 18 196	8
Tabelle 2.2: Zustandsformen des plastischen Bereiches in Abhängigkeit von der Konsistenzzahl	13
Tabelle 2.3: Scherfestigkeiten in unterschiedlichen Konsistenzbereichen nach Terzaghi	14
Tabelle 3.4.1 Zusätzliche Bodenparameter, differenziert nach Bauverfahren und Bauprozessen	25
Tabelle 4.3.1: Flügelsondenabmessungen	52
Tabellen 5.1: Übersichten über Leistung, Einsatzgewicht, Kettenaufstand, Aufstandsfläche, Bodendruck und Leistungsgewicht von Planirraupen der fünf ausgesuchten Hersteller	148
Tabellen 5.2: Übersicht über Leistung, Einsatzgewicht (Kübel gefüllt) Kettenaufstand, Aufstandsfläche, Bodendruck und Leistungsgewicht von Raupenladern der fünf ausgesuchten Hersteller	158
Tabelle 5.3: Übersicht über Leistung, Einsatzgewicht (Kübel gefüllt) Kettenaufstand, Aufstandsfläche, Bodendruck und Leistungsgewicht von Schürfkübelraupen	163
Tabellen 5.4: Übersicht über Leistung, Einsatzgewicht (Kübel gefüllt) Kettenaufstand, Aufstandsfläche, Bodendruck und Leistungsgewicht von Raupenbaggern ausgesuchter Hersteller	164
Tabellen 5.5: Übersicht über Leistung, Einsatzgewicht, Kettenaufstand Aufstandsfläche, Bodendruck und Leistungsgewicht von Pistenbulldozern und dem Sondergerät	173
Tabelle 6.3.1: Veränderung der mittleren Scherfestigkeiten durch die Bauprozesse	103
Tabelle 6.3.2: Umrechnungsfaktoren zur Ermittlung der Scherfestigkeit nach dem Transportiertwerden und Überfahren in bezug auf die Ausbauscherfestigkeit	104