

Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik

Heft

897

2004

Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm
des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen und
der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.

Flächendeckende Prüfung der Verdichtung (FDVK) – baupraktische Umsetzung und verfahrens- bezogene Verdichtungsanforderungen

Teil A: Anpassung der flächendeckenden Prüfung der Verdichtung
an die bauspezifischen Anforderungen
Dipl.-Ing. Gerhard Bräu
Dipl.-Ing. Klaus Hartmann

Teil B: Konzeption einer Anforderung an die Verdichtung von Böden
auf der Basis der Messergebnisse der FDVK
Dipl.-Ing. Gerhard Bräu
Dipl.-Ing. Gerrit Pelz

Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik
der Technischen Universität München

November 2004

Herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und
Wohnungswesen

ULB Darmstadt



16015997

Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn

Inhalt

Teil A: Anpassung der flächendeckenden Prüfung der Verdichtung an die bauspezifischen Anforderungen

Einleitung 21

Teil I – Grenzwertfindung für Regelanwendungen der flächendeckenden dynamischen Prüfung der Verdichtung (FDVK) 24

1	Einführung und Überblick über das Messsystem und die Versuchsdurchführung der „Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle“ (FDVK)	24
1.1	Allgemeines	24
1.2	Versuchsdurchführung nach TP BF – StB Teil E 2	24
1.2.1	Anforderungen an Messausrüstung, Personal und Durchführung der Prüfung ..	24
1.2.2	Kalibrierung	25
1.2.3	Anwendung der flächendeckenden dynamischen Prüfung der Verdichtung ..	25
1.2.4	Prüfprotokoll	26
1.3	Messsysteme	26
1.3.1	Allgemeines	26
1.3.2	Terrameter	26
1.3.3	Compactometer	27
1.4	Zusammenfassung	28
2	Einflussgrößen auf den dynamischen Messwert und auf die Korrelation zu Vergleichswerten	29
2.1	Allgemeines	29
2.2	Messfläche, Messvolumen	29
2.3	Bodenart, Wassergehalt	29
2.4	Schichtdicke, Untergrundeinfluss, Tiefenwirkung	30
2.5	Maschinenparameter	30
2.6	Zusammenfassung	31
3	Bestehende Anforderungswerte an das Verdichten	31
3.1	Allgemeines	31
3.2	Anforderungswerte gemäß ZTVE – StB	31

3.3	Anforderungswerte gemäß ZTVT – StB	32
3.4	Zusammenfassung	33
4	Kalibrierdatensammlung	33
4.1	Allgemeines	33
4.2	Datenbank	34
4.2.1	Allgemeines zur Datenbank	34
4.2.2	Datenbankmodell	34
4.2.3	Haupttabelle: Projekt.db	34
4.2.4	Untertabelle: Werte.db	35
4.2.5	Untertabelle: Walze.db	35
4.2.6	Untertabelle: Tech.db	35
4.2.7	Untertabelle: Boden.db	36
4.2.8	Untertabelle: Kaldat.db	37
4.2.9	Untertabelle: System.db	37
4.3	Zusammenfassung	38
5	Statistik	38
5.1	Allgemeines	38
5.2	Verteilungsfunktion	38
5.3	Regressions- und Korrelationsanalyse	38
5.3.1	Regressionsanalyse	38
5.3.2	Korrelationsanalyse	40
5.4	„Ausreißertests“	41
5.5	Zusammenfassung	42
6	Auswertung der Versuchsdaten	42
6.1	Allgemeines	42
6.1.1	Versuchsrandbedingungen	42
6.1.2	Messverfahren	42
6.1.3	Messobjekte	43
6.1.4	Zusammenfassung	43
6.2	Allgemeines zur Versuchsdatenauswertung	44
6.3	Omega-Werte	45
6.3.1	Omega-Werte: grobkörnige Böden (A)	46
6.3.2	Omega-Werte: gemischtkörnige Böden (B)	53
6.4	CMV-Werte	59

6.4.1	CMV-Werte: grobkörnige Böden (A)	60	4	GPS – Verfolgungstachymeter	81
6.4.2	CMV-Werte: gemischtkörnige Böden (B)	62	4.1	Geodätisches GPS Vermessungssystem	81
6.5	Zusammenfassung	64	4.2	Verfolgungstachymeter	81
7	Resümee und Folgerungen für die Praxis	64	4.3	Vergleich	81
8	Anhang	65	4.4	Zusammenfassung	82
8.1	Regressions- und Korrelationsanalyse: Omega-Werte	65	5	Positionierungskonzepte mittels GPS	82
8.1.1	Daten: grobkörnige Böden (A)	65	5.1	Allgemeines	82
8.1.2	Daten: gemischtkörnige Böden (B) ...	67	5.2	GPS und Korrekturdatendienst: EPS, ALF	82
8.2	Regressions- und Korrelationsanalyse: CMV-Werte	70	5.3	DGPS mit eigener Referenzstation ...	83
8.2.1	Daten: grobkörnige Böden (A)	70	5.4	GPS und HEPS Korrekturdatendienst	83
8.2.2	Daten: gemischtkörnige Böden (B) ...	71	6	Praktische Versuche	83
8.3	Walzengewichte	73	6.1	Allgemeines	83
8.4	Walzenachslast / Unwuchtkraft	73	6.2	Versuche durch das Prüfamf für Grundbau Boden- und Felsmechanik der Technischen Universität München	83
8.5	Kalibrierdatenübersicht	74	7	Zusammenfassung	85
8.5.1	Untergrund (U)	74	8	Schlussbemerkung	86
8.5.2	Unterbau (DA)	74	9	Anhang: Eine Darstellung des Navigations- bzw. Positionierungs- systems GPS	86
8.5.3	Planum (PL)	74	9.1	Allgemeines	86
8.5.4	Frostschuttschicht (FSS)	74	9.2	Positionsbestimmung	87
8.5.5	Tragschichten (TS, KTS, STS, HGT, PSS)	74	9.2.1	Entfernungsermittlung aus Signallaufzeitmessung	88
8.6	Walzenmodelle	75	9.2.2	Codephasenmessung	89
9	Literatur	75	9.2.3	Trägerphasenmessung	89
Teil II – Positionierung	76	9.3	Systemüberblick	89	
1	Allgemeines	76	9.3.1	Das Raumsegment	90
1.1	Navigation	76	9.3.2	Das Kontrollsegment	91
1.2	Geodäsie	78	9.3.3	Das Nutzersegment: GPS Empfänger	91
2	Auswahl der Verfahren	79	9.4	Erweiterter Systemüberblick und genauigkeitsbeeinflussende Effekte ..	92
3	Global Positioning System (GPS) ...	79	9.4.1	Bezugssysteme, Umlaufbahnen	94
3.1	GPS Empfänger	79	9.4.2	Zeit, Zeitmessung und Zeitabweichung	97
3.1.1	Empfängermodule	79	9.4.3	Atmosphäre	98
3.1.2	Geodätische GPS Empfänger	79			
3.1.3	GPS Handempfänger	80			
3.2	GLONASS	80			
3.2.1	Vergleich GPS – GLONASS	81			

9.4.4	Mehrwegempfang und andere Fehler . . .	99
9.4.5	Geometrisch bedingte Fehler	99
9.4.6	Fehler im Empfängersystem	100
9.4.7	Zusammenfassung	100
9.5	Verfahren zur Erhöhung der Genauigkeit	101
9.5.1	Trägerphasenauswertung	101
9.5.2	Differential-GPS	102
9.5.3	DGPS Korrekturdatendienste	103
10	Literatur	105

Teil B: Konzeption einer Anforderung an die Verdichtung von Böden auf der Basis der Messergebnisse der FDVK 107

1	Einleitung, Aufgabenstellung und Zielsetzung	109
2	Prüfmethode	109
2.1	Allgemeines	109
2.2	Methode M 3: Vorgehensweise zur Überwachung des Arbeitsverfahrens	109
2.3	Methode M 1: Vorgehensweise gemäß statistischem Prüfplan	110
2.3.1	Allgemeines	110
2.3.2	Prüfmerkmal	110
2.3.3	Prüflos und Stichprobenauswahlverfahren	110
2.3.4	Prüfplanarten	111
2.3.5	Auftragnehmer- und Auftraggeberrisiko	111
2.4	Methode M 2 und andere Anwendungen der FDVK: Vorgehensweise bei Anwendung flächendeckender dynamischer Messverfahren	112
2.4.1	Allgemeines	112
2.4.2	Anforderungen an Personal, Messsystem und Verdichtungsgerät	114
2.4.3	Kalibrierung allgemein	115
2.4.4	Güte und Gültigkeit einer Kalibrierung	116
2.4.5	Anwendung der FDVK im Rahmen der Methode M 2	116
2.4.6	Anwendung der FDVK für das Proof-Rolling	118
2.4.7	Anwendung der FDVK zum Nachweis der Einhaltung der Arbeitsanweisung	119
2.4.8	Anwendung der FDVK zur Lokalisation von Schwachstellen	122
2.4.9	Anwendung der FDVK zur Steuerung der Verdichtung	122
2.4.10	Anwendung der FDVK zum Nachweis der maximal möglichen Verdichtung	123
2.4.11	Anwendung der FDVK zur Beurteilung des Untergrundes	127
2.5	Zusammenfassung	127

3	Zuordnung zwischen Verdichtungsgrad D_{Pr}, Verformungsmodul E_{V2} und FDVK-Messwert	128	5.3	Überprüfung auf log-Normalverteilung	142
3.1	Allgemeines	128	5.4	Überprüfung der Kalibrierungen	144
3.2	Bodengruppen SE, SW, GW und GI ..	128	5.4.1	Autobahnbaustelle A-1	144
3.2.1	Verdichtungsgrad D_{Pr} und FDVK-Messwert	128	5.4.2	Autobahnbaustelle A-2	145
3.2.2	Verformungsmodul E_{V2} und FDVK-Messwert	128	5.4.3	Autobahnbaustelle A-3	145
3.3	Bodengruppen SU und GU	129	5.4.4	Autobahnbaustelle A-4	146
3.3.1	Verdichtungsgrad D_{Pr} und FDVK-Messwert	129	5.4.5	Autobahnbaustelle A-5	146
3.3.2	Verformungsmodul E_{V2} und FDVK-Messwert	129	5.4.6	Industriebau I-1	147
4	Entwicklung von Prüfkriterien auf der Basis der Messergebnisse der FDVK	130	5.4.7	Flughafenbau F-1	147
4.1	Allgemeines	130	5.4.8	Flughafenbau F-2	148
4.2	Gesamtschlechtflächenanteil (KG1) ..	131	5.4.9	Flughafenbau F-3	149
4.3	Prozentualer Schlechtflächenanteil mit Abstufungen (KG2)	131	5.5	Zusammenfassung	150
4.4	Zusammenhängende Schlechtfläche mit Abstufungen (KG3)	132	6	Auswertung	150
4.5	Statistische Kriterien (KG4)	133	6.1	Allgemeines	150
4.5.1	Allgemeines	133	6.2	Auswertung nach Methode M 1	151
4.5.2	Ableitung der Annahmezahl k_s für Methode M 2 unter Berücksichtigung der Grundlagen der Methode M 1 ..	133	6.2.1	Feldversuche (Kontrollprüfung für Simulation)	151
4.6	Gewichtete Schlechtflächen (KG5) ..	136	6.2.2	Simulierte Prüfungen	151
4.7	Kombination der Kriterien	137	6.2.3	Auswirkung der Anzahl der Durchläufe auf das Ergebnis der Methode M 1 ..	152
4.8	Zusammenfassung	138	6.2.4	Vergleich Feldversuch – Simulation ..	152
5	Versuchsdaten	138	6.3	Auswertung aller Böden	153
5.1	Allgemeines	138	6.3.1	Referenzkriterium W_{22}	153
5.2	Überprüfung auf Normalverteilung ..	138	6.3.2	Referenzkriterium W_{M1}	155
5.2.1	Überprüfung auf Normalverteilung mittels der Schiefe und dem Exzess ..	138	6.4	Auswertung der grobkörnigen Böden	156
5.2.2	Überprüfung auf Normalverteilung mit dem Chi-Quadrat-Test	139	6.4.1	Referenzkriterium W_{22}	156
5.2.3	Überprüfung auf Normalverteilung mittels graphischer Auswertung	139	6.4.2	Referenzkriterium W_{M1}	157
5.2.4	Überprüfung der Normalverteilung bei den Versuchsdaten	140	6.5	Auswertung der gemischtkörnigen Böden	157
5.2.5	Auswirkung von nicht normalverteilten Prüflosen bei der Anwendung von statistischen Kriterien	141	6.5.1	Referenzkriterium W_{22}	157
			6.5.2	Referenzkriterium W_{M1}	159
			6.6	Auswertung unter Berücksichtigung der Normalverteilung	159
			6.6.1	Allgemeines	159
			6.6.2	Referenzkriterium W_{22}	163
			6.6.3	Referenzkriterium W_{M1}	164
			6.7	Zusammenfassung der Ergebnisse ..	165
			6.7.1	Zusammenfassung und Bewertung der einzelnen Kriteriengruppen	165

6.7.2	Zusammenfassung und Bewertung einzelner Kriterien	165
7	Möglichkeiten für den Nachweis der gleichmäßigen Verteilung der Unterschreitungsstellen in der Fläche ..	167
7.1	Allgemeines	167
7.2	„Nearest-Neighbour“-Analyse	167
7.3	Variogramme	169
7.4	Beurteilung der Verteilung der Unterschreitungsstellen in der Fläche mit Hilfe von Flächenmomenten	170
7.5	Zusammenfassung	171
8	Zusammenfassung	171
9	Folgerungen für die Praxis	174
10	Literaturverzeichnis	175
11	Prüfvorschriften-, Merkblätter- und Richtlinienverzeichnis	176
12	Normenverzeichnis	176