

Korrelationen zwischen Korngrößenverteilung und Proctordichte

T 2987

T 2987

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2002, ISBN 3-8167-6490-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail info@irb.fhg.de

URL <http://www.IRBbuch.de>

Schlußbericht zum Forschungsvorhaben

Korrelationen zwischen Korngrößenverteilung und Proctordichte

Werkvertrag P-32-5-11.58-977/01

zwischen dem

Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt)

und der

Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (Degebo)

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. Michael Ulrich

Berlin den 14.6.2002

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Einleitung..... | 1 |
| 2 | Stand der Forschung - Literaturlauswertung..... | 3 |
| 3 | Grundlage und Voraussetzungen für die Forschungsarbeit:..... | 6 |
| | 3.1 Die Datenbank der Degebo..... | 6 |
| | 3.2 Auswertung der Datenbank..... | 7 |
| | 3.3. Häufigkeitsverteilungen..... | 8 |
| 4 | Statistische Auswertung..... | 9 |
| | 4.1 Proctordichte..... | 9 |
| | 4.1.1 Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung | |
| | 4.1.2 Ungleichförmigkeitsparameter U und U_{90} | |
| | 4.1.3 Krümmungszahl C_c | |
| | 4.1.4 Verhältnis $U_{90}/U = d_{90}/d_{60}$ | |
| | 4.2 Optimaler Wassergehalt..... | 12 |
| | 4.2.1 Proctordichte | |
| | 4.2.2 Korngrößenverteilung | |
| | 4.2.3 Ungleichförmigkeitsparameter U und U_{90} | |
| | 4.2.4 Krümmung C_c | |
| | 4.2.5 Verhältnis $U_{90}/U = d_{90}/d_{60}$ | |
| | 4.3 Bewertung der untersuchten Abhängigkeiten..... | 14 |
| | 4.3.1 Proctordichte | |
| | 4.3.2 Optimaler Wassergehalt | |
| 5 | Ergebnisse..... | 16 |
| | 5.1 Rechenansatz für die praktische Anwendung..... | 16 |
| | 5.1.1 Proctordichte | |
| | 5.2 Vergleich mit vorhandenen Erfahrungswerten..... | 18 |
| | 5.3 Grenzen und Einschränkungen für die praktische Anwendung..... | 21 |
| | 5.4 Ausblick: Vorschläge für weitere Forschungsarbeiten..... | 21 |
| 6 | Zusammenfassung..... | 23 |
| 7 | Literaturverzeichnis..... | 24 |
| | Verzeichnis der Bilder..... | 25 |

1 Einleitung

Die Bestimmung der Lagerungsdichte D bzw. des Verdichtungsgrades D_{Pr} ist für den Nachweis der bei Standsicherheitsberechnungen (z.B. Grundbruch- oder Böschungsbruchberechnungen) angesetzten Scherparameter oder der Steifemoduli für Setzungsberechnungen erforderlich. Bei größeren Untersuchungstiefen werden üblicherweise Ramm- und Drucksondierungen durchgeführt. Bei geringen Schütthöhen oder im unmittelbaren Gründungsbereich werden ungestörte Proben entnommen und die Lagerungsdichte D bzw. I_D oder der Verdichtungsgrad D_{Pr} bestimmt.

In der DIN 1054 sind Verdichtungsgrade als Voraussetzung für die Anwendung der Tabellen zur Ermittlung der zulässigen Bodenpressungen angegeben.

Die Bestimmung des Verdichtungsgrades ist vor allem im Verkehrswegebau zur Qualitätssicherung von großer Bedeutung. In der ZTVE - StB94 sowie in den Richtlinien RiL 836 der DB AG sind in Abhängigkeit von den Bodengruppen nach DIN 18196 und von der Verkehrsbelastung Mindestanforderungen an den Verdichtungsgrad angegeben. Auch die Mindestanzahl von Prüfungen ist hier festgelegt.

Die Proben müssen nach der Entnahme im Labor untersucht werden. Der Proctor-Versuch ist aufgrund der mehrfachen Versuchsdurchführung mit unterschiedlichen Wassergehalten verhältnismäßig zeitaufwendig. Eine Aussage unmittelbar nach der Probenentnahme über den erreichten Verdichtungsgrad, wie sie für den schnellen Bauablauf häufig gefordert wird, ist daher nicht möglich.

Ersatzweise kommen daher häufig indirekte Versuche zur Bestimmung des Verdichtungsgrades, wie z.B. der statische oder der dynamische Plattendruckversuch zur Anwendung. Für beide Versuche werden Mindestwerte angegeben, die zum Nachweis einer bestimmten Proctordichte erforderlich sind (z.B. ZTVE-StB94 für statische und RiL 836 für dynamische Plattendruckversuche). Diese Festlegungen stellen jedoch für den statischen Versuch nur näherungsweise Zuordnungen, aber keine Korrelationen dar.

Für den dynamischen Plattendruckversuch sind in der RiL 836 der DB AG auf die Ausbauart (Streckenerhaltung, Neubau) sowie die zulässige Geschwindigkeit bezogene Anforderungen angegeben. Die ZTVE schreibt für den dynamischen Plattendruckversuch Vergleichsversuche zur Kalibrierung vor. Beiden Regelwerken gemeinsam ist die Berücksichtigung der eingebauten Bodenart bei der Zuordnung. Aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Prinzipien werden bei diesen

Versuchsarten wesentlich größere Bodenbereiche erfaßt, d.h. daß z.B. bei der Untersuchung einer Tragschicht die Eigenschaften der darunter liegenden Bodenschichten in die Messung eingehen.

Wie bei jedem anderen bodenmechanischen Versuch treten auch beim Proctorversuch Streuungen aufgrund der Versuchsdurchführung auf. Um die ermittelten Proctordichten bewerten und einordnen zu können, bietet sich der Vergleich mit an gleichartigen Böden gewonnenen Erfahrungswerten an.

Es ist seit langem bekannt, daß es eine Abhängigkeit zwischen der mit einer bestimmten Verdichtungsarbeit erreichbaren Dichte (Proctordichte, dichteste Lagerung) und der Korngrößenverteilung gibt. Beim Proctorversuch weist zusätzlich der für die optimale Verdichtung erforderliche Wassergehalt w_{Pr} eine Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung auf. Proctorversuche an enggestuftem Sand (SE) oder Kies (GE) ergeben erfahrungsgemäß eine geringere Proctordichte ρ_{Pr} als weitgestufte Böden (SW, GW). Die Ursache für die größere Dichte gut abgestufter Böden ist die Füllung der Porenräume zwischen großen Körnern durch solche mit kleinem Durchmesser .

Bei der Degebo wurden über etwa vier Jahrzehnte die Ergebnisse von Proctor-Versuchen an Proben aus natürlichen sowie aus gemischten Böden gesammelt und nach der Beziehung zwischen Proctordichte und Korngrößenverteilung geordnet. Diese Sammlung diente als Grundlage für die interne Prüfung und Beurteilung von Proctorversuchen.

Die Ergebnisse sämtlicher in der Degebo in diesem Zeitraum durchgeführten Versuche wurden in einer Datenbank zusammengefaßt, die mittlerweile ca. 5000 Datensätze enthält.

Auf der Grundlage dieser relativ großen Stichprobenzahlen soll versucht werden, statistische Auswertungen von Abhängigkeiten zwischen Parametern der Korngrößenverteilung (U , C_c) und der Proctordichte ρ_{Pr} sowie dem Wassergehalt w_{Pr} vorzunehmen.

Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Ermittlung charakteristischer Beziehungen zwischen diesen Kenngrößen für grobkörnige und gemischtkörnige Böden als Grundlage für eine zuverlässigere Beurteilung der Ergebnisse von Proctorversuchen. Darüber hinaus ist es auf dieser Grundlage möglich, die Qualitätssicherung zu vereinfachen bzw. bei gleichem Aufwand zu verbessern.

2 Stand der Forschung - Literaturlauswertung

In der Vergangenheit wurde die Abhängigkeit der Proctordichte von der Korngrößenverteilung wiederholt dargestellt. Versuche, diese Abhängigkeit durch statistische Methoden in eine allgemeingültige Form zu bringen, sind jedoch nur selten unternommen worden. Beziehungen zwischen der dichtesten Lagerung und der Korngrößenverteilung sind in der Literatur in größerer Zahl zu finden.

Voss (1961) stellt im Rahmen einer Untersuchung über Verdichtungsprufungen die Abhängigkeit sowohl des optimalen Wassergehalts w_{pr} als auch der Proctordichte ρ_{pr} von der Form der Korngrößenverteilung dar. Eine Abhängigkeit der Proctordichte von der Ungleichförmigkeitszahl $U = d_{60}/d_{10}$ auf der Grundlage von ca. 100 Proctor-Versuchen wird in Form einer Kurve dargestellt, ohne jedoch weitergehende Schlußfolgerungen zu ziehen.

Floss/Siedek/Voß (1968) haben die Eigenschaften von Mischböden aus Kies bzw. Kiessand und Ton bzw. Schluff, d.h. zum Teil von Böden mit Ausfallkornungen untersucht. Dabei wird neben der Scherfestigkeit und der Verformbarkeit auch die Veränderung der Proctordichte bei unterschiedlichen Mischungsverhältnissen dargestellt. Demnach steigt die Proctordichte bei Zumischung von feinkörnigen Böden bis zu einem Feinkornanteil von 30 % bis 40 % stark an und fällt bei weiterer Zugabe von Feinkornmaterial wieder ab. .

G. Wolf (1969) nähert den mittleren Teil der Kornverteilungskurve durch die exponentielle Funktion $D = (d/d_{max})^n$ an. D ist hierbei der Siebdurchgang, d_{max} der Endpunkt der Funktion bei $D = 100$ %. Die Proctordichte wird dann in Abhängigkeit von d_{max} und n in Nomogrammen dargestellt, wobei sich für verschiedene Exponenten n ($0,2 \leq n \leq 0,5$) im halblogarithmischen Maßstab parallele Geraden ergeben.

In der von VEB Baugrund (1979) herausgegebenen technischen Vorschrift TEV 112-01 wird für "nichtbindige quartäre Sande" eine Beziehung zwischen dem dimensionslosen Parameter d_{90}/d_{10} und der Standarddichte (Proctordichte) in Tabellenform angegeben. Es handelt sich hier um Mittelwerte aus einer nach Aussage der Autoren ausreichend statistisch gesicherten Untersuchung. Die zugrunde liegende Stichprobenzahl wird jedoch nicht genannt, Streubereiche werden nicht angegeben. Die Tabelle konnte zur Voraussage der Proctordichte, aber auch für die Verdichtungskontrolle angewandt werden.

Weiterhin wird in dieser Vorschrift für "sonstige nichtbindige Sande" eine Kurve mit sehr großen Streubereichen für die Abhängigkeit der Proctordichte von $U = d_{60}/d_{10}$ angegeben, die nur zur Voraussage der Proctordichte, nicht jedoch für die Verdichtungskontrolle angewandt werden darf. Weder zum untersuchten Stichprobenumfang noch zur Auswertungsmethode oder zur Art der Streubereiche (Standardabweichung, Vertrauensbereiche) dieser Beziehung gibt es Erläuterungen.

Neben der Abhängigkeit der Proctordichte wurde in mehreren Arbeiten auch die Abhängigkeit der dichtesten Lagerung von der Korngrößenverteilung untersucht.

Korfiatis/Manikopoulos (1981) geben eine empirische, stückweise lineare Funktion zur Beschreibung der Abhängigkeit an. Die Autoren gehen von stetigen Kornverteilungskurven aus, die im logarithmischen Maßstab durch eine Gerade angenähert werden können. Die theoretische Grundlage bildet eine Untersuchung der Autoren über die optimale Packung von Kugeln, bei der sich stückweise lineare Funktionen zur Beschreibung der Abhängigkeit der Wichte von der Kornverteilung ergaben. Anhand der Ergebnisse von 43 Proben wurde versucht, diese Funktion für natürliche Böden zu modifizieren. Es wurden Böden mit einem maximalen Feinkorngehalt von 40 % untersucht.

Die Funktion ist abhängig von der Neigung $s \approx 1/\ln(U)$ der Sieblinie beim Siebdurchgang von 50%. Weitere Parameter sind die spezifische Dichte des Bodens sowie der Feinkorngehalt (Siebdurchgang bei $d = 0,07$ mm). Vergleichsrechnungen ergaben für $\rho_{\max} = f(s)$ eine lineare Funktion zwischen $s = 0,2$ und $s = 0,5738$ ($150 > U \geq 5,7$), bis $s = 1,1346$ ($U \geq 2,4$) wird ein konstanter Wert angegeben.

R. Masih (2000) versucht, die Größe der maximalen Dichte eines gegebenen Bodens vorauszusagen, wenn Feinanteile zugegeben werden. Der Mittelwert und die Standardabweichung der als Lognormalverteilung angenommenen Kornverteilung werden dabei, zusammen mit einem aus der Zugabemenge zu berechnenden Neigungsfaktor, als Parameter zur Beschreibung der Sieblinie verwendet. Die Abhängigkeit der Dichte von den beiden Parametern (Mittelwert und Standardabweichung) wird in der Arbeit nicht untersucht.

Ein weiterer Parameter, von dem die maximal erreichbare Dichte bei gegebener Verdichtungsarbeit abhängt, ist die Kornform. In einer Untersuchung von T. Youd (1973) wird unter anderem festgestellt, daß die maximale Dichte eines grobkörnigen Bodens bei gleicher Korngrößenverteilung um so geringer ist, je scharfkantiger die Einzelkörner sind.

Gemeinsam ist den meisten Arbeiten, daß man versucht, die Kornverteilungskurve durch wenige Parameter zu beschreiben. Praxisnah und international gebräuchlich ist die Ungleichförmigkeitszahl $U = d_{60}/d_{10}$. Ein Nachteil ist hier, daß aus U nicht die Lage der Kurve innerhalb der Korngrößenskala hervorgeht. Ein enggestufter Sand und ein Kies können z.B. das gleiche U aufweisen, ergeben aber beim Proctorversuch u.U. unterschiedliche Dichten.

Andere Verfahren beinhalten auch diese Information, die Berechnung der Parameter hat jedoch wenig Praxisbezug (Wolf (1969)) bzw. erfordert einen hohen Rechenaufwand (Masih (2000)).

3 Grundlagen und Voraussetzungen für die Forschungsarbeit

3.1 Die Datenbank der Degebo

Die Ergebnisse von Proctor-Versuchen, die über einen Zeitraum von etwa vier Jahrzehnten, überwiegend für Bauvorhaben im Berliner Raum, durchgeführt wurden, sind in der Datenbank der Degebo gesammelt. Dokumentiert wurde jeweils die ermittelte Proctordichte ρ_{pr} mit dem dazugehörigen Wassergehalt w_{pr} sowie die Korngrößenverteilung in Form der Siebdurchgänge bei $d = 0,02 \text{ mm}$, $0,06 \text{ mm}$, $0,1 \text{ mm}$, $0,2 \text{ mm}$, $0,5 \text{ mm}$, 1 mm , 2 mm , 5 mm und 10 mm . Die ermittelten Proctordichten lagen zwischen ca. $1,6 \text{ g/cm}^3$ und $2,1 \text{ g/cm}^3$. Weitergehende Informationen, ob es sich z.B. um natürliche Böden oder künstliche Korngemische handelt, wurden nicht dokumentiert, da diese Angaben nicht durchgängig vorhanden sind.

Die Versuche wurden fast ausschließlich mit einem motorbetriebenen Verdichtungsgerät nach Abschnitt 5 der DIN 18127 vorgenommen. Zur Verwendung kamen je nach Größtkorn Versuchszylinder mit 100 mm und 150 mm Durchmesser nach DIN 18127, Tab. 1. Bei jedem in der Degebo durchgeführten Proctorversuch wird die Kornverteilung des Versuchsbodens vor dem Versuch ermittelt. Die Bestimmung des Wassergehalts erfolgte bis ca. 1984 ausschließlich mit dem Pyknometer, danach durch Ofentrocknung teils in einem Mikrowellenherd.

Die Versuche wurden überwiegend im Rahmen der Bearbeitung von konkreten Bauvorhaben durchgeführt. Systematische Untersuchungen weiterer Parameter der jeweiligen Böden wie z. B. lockerste/dichteste Lagerung, Korndichte, organische Beimengungen usw. liegen daher im allgemeinen nicht vor.

Da die Versuchsprotokolle in den meisten Fällen nicht mehr vorhanden sind, konnte die Herkunft der Bodenproben (gewachsen, aus Gruben angeliefert, gemischt, Recycling-Material) nicht in die Datenbank aufgenommen werden. Bei Bauvorhaben in Berlin wurden früher häufig "Siebböden", d.h. Mischböden aus mineralischen Böden und ausgesiebttem, teils gebrochenem Abbruchmaterial, zum Teil mit geringen organischen Bestandteilen, verwendet. Die Datenbank der Degebo enthält dementsprechend einen großen Anteil an solchen Proben ermittelter Versuchsdaten. Der Anteil am Gesamtumfang läßt sich leider nicht mehr feststellen.

3.2 Auswertung der Datenbank

Die Datenbank wurde ursprünglich ausschließlich zur Überprüfung der eigenen Versuchsergebnisse in Form einer Tabelle (Microsoft Excel) eingerichtet. Sie enthält einen Algorithmus, mit dem eine Sieblinie in Form der o.g. Siebdurchgänge eingegeben werden kann. Die Versuchsergebnisse mit entsprechender Kornverteilung können dann mit einstellbarer Bandbreite der Siebdurchgänge (z.B. $\pm 3\%$) aus der Datenbank herausgesucht und in Form der Häufigkeitsverteilung von ρ_{Pr} dargestellt werden. Zusätzlich werden der Mittelwert sowie die 5 %-Vertrauensgrenzen für den Mittelwert errechnet.

Aufgrund der großen Zahl von möglichen Verläufen der Sieblinie (unterschiedliche Kornverteilung) erbrachte diese Methode für eine vorgegebene Kornverteilung auch bei größeren Bandbreiten meist nur verhältnismäßig wenige Versuchswerte. Stetige Häufigkeitsverteilungen mit eindeutigem Maximum waren oft nicht zu erkennen. Die Abhängigkeit der Proctordichte von der Kornverteilung wurde dennoch durch den errechneten Mittelwert von ρ_{Pr} deutlich.

Um den Verlauf einer Korngrößenverteilung mit einfachen Mitteln zu beschreiben und sie mit der anderer Böden zu vergleichen, wurden im deutschen Raum die Ungleichförmigkeitszahl $U = d_{60}/d_{10}$ sowie die Krümmungszahl $C_c = d_{30}^2/(d_{60} \cdot d_{10})$ als dimensionslose Parameter eingeführt. Wie die Literaturrecherche gezeigt hat, können Vergleiche auch auf anderen Grundlagen durchgeführt werden, wie z.B. der Faktor d_{90}/d_{10} (VEB Baugrund 1979), bei dem der Einfluß der groben und der feinen Kornfraktionen berücksichtigt wird. Andere Verfahren (G. Wolf (1969), Korfiatis/Manikopoulos (1981)) erfassen u.E. charakteristische Teile der Kornverteilungskurve nicht oder sind in der Berechnung zu aufwendig (R. Masih (2000)). Die Voraussetzung für die Vergleichbarkeit der gewählten Parameter ist in jedem Fall ein stetiger Verlauf der Kurve, d.h. es dürfen keine Ausfallkörnungen vorhanden sein.

Da aus den vorhandenen Daten nicht erkennbar war, welcher der Parameter die Abhängigkeit zur Proctordichte am besten wiedergibt, wurden parallel die Einflüsse der allgemein gebräuchlichen Ungleichförmigkeitszahl U , der Krümmung C_c sowie des Verhältnisses d_{90}/d_{10} untersucht. Letztere Größe wird im Folgenden mit

$$U_{90} = d_{90}/d_{10}$$

bezeichnet. Als zusätzliche Vergleichsmöglichkeit wurde die Größe $U_{90}/U = d_{90}/d_{60}$ betrachtet. Zur Ergänzung wurde auch die Abhängigkeit der o.g. Parameter vom optimalen Wassergehalt untersucht.

Die zur Berechnung dieser Größen erforderlichen Siebdurchgänge d_{10} , d_{30} , d_{60} und d_{90} wurden aus den in der Datenbank gespeicherten Siebdurchgängen bei $d = 0,02$ mm, $0,06$ mm, $0,1$ mm, $0,2$ mm, $0,5$ mm, 1 mm, 2 mm, 5 mm und 10 mm im halblogarithmischen Maßstab linear interpoliert und daraus für alle Versuche die Größen U , C_c , U_{90} und d_{90}/d_{60} berechnet. Im nächsten Schritt wurden die Häufigkeitsverteilung sowie Mittelwerte, Standardabweichung und der zweiseitige Vertrauensbereich der Mittelwerte für eine Vertrauenswahrscheinlichkeit von ± 5 % ermittelt. Diese Auswertung erfolgte jeweils mit einer Klassenbreite für den Wassergehalt w_{Pr} von $0,3$ % bis $0,5$ % sowie für die Proctordichte ρ_{Pr} von $0,01$ g/cm³.

3.3 Häufigkeitsverteilungen

Für w_{Pr} lagen die Werte zwischen 7 % und 15 %, die für ρ_{Pr} zwischen $1,65$ g/cm³ und $2,05$ g/cm³. Die Stichprobenzahl betrug für w_{Pr} zwischen 55 und 555 , für ρ_{Pr} zwischen 42 und 253 Versuchswerte in jeder Klasse. Die Häufigkeitsverteilungen der Versuchswerte für die beiden untersuchten Parameter sind in Bild 1 aufgetragen. Für die Größen U und U_{90} sind in den Bildern 2 und 3 (ρ_{Pr}) sowie Bild 4 und 5 (w_{Pr}) einige charakteristische Häufigkeitsverteilungen aufgetragen.

Bei den von ρ_{Pr} abhängigen Häufigkeitsverteilungen von U und U_{90} (Bilder 2 und 3) ist die Streuung bei kleinen Proctordichten ($\rho_{Pr} \leq 1,8$) sowohl für U als auch für U_{90} sehr gering. Mit wachsendem ρ_{Pr} zeigt sich für beide Parameter eine zunehmende Streubreite, wobei diese bei U_{90} überwiegend größer ist als die für U .

Die Streuung ist sowohl bei U wie U_{90} für alle Wassergehalte gering, bei kleineren Wassergehalten ($w_{Pr} < 10$ %) etwas größer. Für kleine Wassergehalte sind die Verteilungen überwiegend asymmetrisch (s. Bild 4).

4. Statistische Auswertung

Zur statistischen Auswertung der Daten wurde zunächst versucht, die aus den Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Klassen berechneten Mittelwerte und deren Vertrauensbereiche (Vertrauenswahrscheinlichkeit $\pm 5\%$) von d_{10} , d_{30} , d_{60} , d_{90} , U , U_{90} und C_c über die Parameter ρ_{Pr} und w_{Pr} aufzutragen, um ein Bild von den Abhängigkeiten zu erhalten.

In der Folge wurden mit diesen klassenweise aufgestellten Mittelwerten und den zugehörigen Vertrauensbereichen in einem Tabellenkalkulationsprogramm (Microsoft Excel) Regressionsanalysen durchgeführt. Dieser Weg wurde gewählt, weil zu befürchten war, daß bei der sehr hohen Stichprobenzahl wegen numerischer Probleme (Summen höherer Potenzen) eine Regressionsanalyse aller Einzelwerte fehlschlagen könnte. Ein spezielles statistisches Programm, in dem dieses Problem berücksichtigt ist, stand uns nicht zur Verfügung.

4.1 Proctordichte

4.1.1 Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung

Die Grundlage für die dimensionslosen Größen U , U_{90} und C_c sind die charakteristischen Korndurchmesser d_{10} , d_{30} , d_{60} und d_{90} . Deren Mittelwerte wurden daher als erster Schritt in den Bildern 6 bis 9 über die Proctordichte aufgetragen. Für jede Klasse wurden der Mittelwert und die zugehörigen Vertrauensbereiche ($\pm 5\%$) als Balken dargestellt.

Allen untersuchten Korndurchmessern ist gemeinsam, daß die Streubreite, charakterisiert durch den Vertrauensbereich, für $1,65 \text{ g/cm}^3 \leq \rho_{Pr} \leq 1,9 \text{ g/cm}^3$ verhältnismäßig gering ist. Die kleinsten Streuungen, bezogen auf den Korndurchmesser, zeigen sich bei d_{60} und d_{90} (s. Bilder 8 und 9), die größten bei d_{10} (Bild 6). Für größere Proctordichten nimmt die Streuung stark zu, am stärksten bei d_{90} (s. Bild 9). Über ρ_{Pr} aufgetragen, sind d_{10} und d_{60} bis ca. $\rho_{Pr} = 1,8 \text{ g/cm}^3$ bzw. $\rho_{Pr} = 1,95 \text{ g/cm}^3$ nahezu konstant, darüber nimmt d_{10} mit zunehmendem ρ_{Pr} stark ab, d_{60} zeigt dagegen eine wachsende Tendenz. Der Korndurchmesser d_{30} ändert sich mit wachsendem ρ_{Pr} nur wenig (s. Bild 7), wogegen d_{90} bis $\rho_{Pr} = 1,95 \text{ g/cm}^3$ stetig zunimmt (s. Bild 9).

4.1.2 Abhängigkeit von den Ungleichförmigkeitsparametern U und U_{90}

Ungleichförmigkeitszahl U

Die Ungleichförmigkeitszahl, aufgetragen über ρ_{Pr} (Bild 10), zeigt bis ca. $\rho_{Pr} = 1,85 \text{ g/cm}^3$ sehr geringe Streuungen, mit wachsendem ρ_{Pr} nehmen auch die Streuungen zu. Die Auftragung der Mittelwerte zeigt eine stetige Kurve. Unterhalb von ca. $\rho_{Pr} = 1,9 \text{ g/cm}^3$ nimmt U überproportional zu, für größere Dichten erfolgt die Zunahme etwa linear. Aufgrund dieses Verlaufes erschien es sinnvoll, die Kurve bei $\rho_{Pr} = 1,9 \text{ g/cm}^3$ zu teilen und die statistische Untersuchung getrennt für beide Bereiche vorzunehmen, da eine den gesamten Bereich abdeckende Regressionsfunktion mit hohem Bestimmtheitsmaß kaum gefunden werden kann.

Die ermittelten Regressionskurven mit den zugehörigen Funktionen für die Mittelwerte sowie die Grenzen der Vertrauensbereiche sind den Bildern 11 und 12 zu entnehmen. Für den Bereich $\rho_{Pr} < 1,9 \text{ g/cm}^3$ wurden Polynome 3. Ordnung als Regressionsfunktionen gefunden, das Bestimmtheitsmaß beträgt nahezu $R^2 = 1$. (s. Bild 11). Für die lineare Regression im Bereich $1,9 \text{ g/cm}^3 \leq \rho_{Pr} < 2,05 \text{ g/cm}^3$ ist das Bestimmtheitsmaß mit ca. $R^2 = 0,95$ etwas geringer (s. Bild 12).

$$U_{90} = d_{90}/d_{10}$$

Der in Bild 13 aufgetragene Verlauf von U_{90} zeigt den gleichen Verlauf und die gleiche Zunahme der Streuungen für Dichten über $1,9 \text{ g/cm}^3$ wie die Ungleichförmigkeitszahl U. Die Streuungen unterhalb $\rho_{Pr} = 1,9 \text{ g/cm}^3$ weisen die gleiche Größenordnung auf, darüber sind sie jedoch größer. Wegen des gleichartigen Verlaufs der Kurve wurde auch hier eine Trennung bei $\rho_{Pr} = 1,9 \text{ g/cm}^3$ vorgenommen. Für kleine Werte wurde wiederum ein Polynom 3. Ordnung als am besten angepaßte Kurve gefunden, das Bestimmtheitsmaß liegt bei ca. $R^2 = 0,98$ (s. Bild 14). Für die lineare Regression im Bereich $1,9 \text{ g/cm}^3 \leq \rho_{Pr} < 2,05 \text{ g/cm}^3$ ist das Bestimmtheitsmaß mit ca. $R^2 = 0,9$ etwas geringer als für U (s. Bild 15).

4.1.3 Abhängigkeit von der Krümmungszahl C_c

Als weitere, aus den Korndurchmessern d_{10} , d_{30} und d_{60} zu ermittelnde dimensionslose Größe wurde die Krümmung

$$C_c = d_{30}^2 / (d_{10} \cdot d_{60})$$

untersucht (s. Bild 16). Bis ca. $\rho_{Pr} = 1,8 \text{ g/cm}^3$ bleibt der Wert konstant und die Streubreite sehr gering. Für größere Dichten erfolgt ein allmählicher Anstieg, der jedoch nur bis ca. $\rho_{Pr} = 1,95 \text{ g/cm}^3$ eine eindeutige Tendenz aufweist. Die Streubreiten in diesem Bereich weisen große Unterschiede auf.

4.1.4 Abhängigkeit von $U_{90}/U = d_{90}/d_{60}$

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Parametern wurde auch das Verhältnis d_{90}/d_{60} untersucht. Der in Bild 17 aufgetragene Verlauf zeigt eine annähernd stetige Zunahme bis $\rho_{Pr} = 1,85 \text{ g/cm}^3$ bei verhältnismäßig geringer Streuung. Für größere ρ_{Pr} bleibt der Mittelwert, abgesehen von einzelnen größeren Abweichungen, nahezu konstant. Die Mittelwerte weisen in diesem Bereich große Streuungen auf.

4.2 Optimaler Wassergehalt w_{Pr}

Zur Ergänzung der Untersuchung wurden die Datensätze nach dem Wassergehalt w_{Pr} in Klassen mit Breiten von 0,2 % bis 0,5 % geordnet und für diese die Häufigkeitsverteilungen und die Mittelwerte mit den zugehörigen Vertrauensbereichen ermittelt. Hier wurde nicht angestrebt, eine Beziehung zur Ermittlung von w_{Pr} aus Parametern der Kornverteilung zu finden. Dieser Teil des Berichts dient lediglich zur Vervollständigung der Untersuchung.

4.2.1 Abhängigkeit von der Proctordichte

In Bild 18 sind die Mittelwerte von w_{Pr} zusammen mit Ihren Vertrauensbereichen über der Proctordichte aufgetragen.

w_{Pr} nimmt mit wachsendem ρ_{Pr} stetig von ca. 13,5 % bei $\rho_{Pr} = 1,65 \text{ g/cm}^3$ auf ca. 9 % bei $\rho_{Pr} = 2,05 \text{ g/cm}^3$ ab.

Die Streubreiten sind über den gesamten betrachteten Bereich (ca. $1,65 \text{ g/cm}^3 \leq \rho_{Pr} < 2,05 \text{ g/cm}^3$) relativ gleichmäßig.

Eine Regressionsanalyse der Mittelwerte sowie der Ober- und Untergrenzen des Vertrauensbereiches ergab für den Ansatz eines Polynoms zweiter Ordnung die beste Übereinstimmung. Das Bestimmtheitsmaß beträgt ca. $R^2 = 0,98$. Die Regressionskurven wurden im Bild 18 zusätzlich eingetragen.

4.2.2 Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung

Wie für die Proctordichte wurde auch die Abhängigkeit der charakteristischen Korndurchmesser d_{10} , d_{30} , d_{60} und d_{90} von w_{Pr} aufgetragen (s. Bilder 19 bis 22).

Die auf die jeweiligen Maximalordinaten bezogenen Streubreiten sind im Vergleich zu den Abhängigkeiten von ρ_{Pr} größer. Die größten Streubreiten ergeben sich in allen Fällen für die geringen Wassergehalte ($w_{Pr} < 8 \%$). Für d_{10} ergibt sich bei ca. $w_{Pr} = 9 \%$ ein schwaches Minimum, ab ca.

$w_{Pr} = 12\%$ bleibt d_{10} nahezu konstant (s. Bild 19). Abhängig von w_{Pr} schwankt der Mittelwert von d_{30} über den gesamten Bereich geringfügig um ca. $d_{30} = 0,17\text{ mm}$ (s. Bild 20). Der Korndurchmesser d_{60} wird mit wachsendem w_{Pr} stetig kleiner, wogegen d_{90} zunächst bis ca. $w_{Pr} = 8\%$ anwächst und sich dann stetig verringert (Bilder 21 und 22).

4.2.3 Abhängigkeit von den Ungleichförmigkeitsparametern U und U_{90}

Ungleichförmigkeitszahl U

Die Mittelwerte der Ungleichförmigkeitszahl, aufgetragen über w_{Pr} , zeigen Streuungen, die mit wachsendem w_{Pr} abnehmen (s. Bild 23). Die Auftragung der Mittelwerte zeigt eine stetige Kurve mit einem Maximum ($U = 7$) bei ca. $w_{Pr} = 8,5\%$ sowie einem stetigen Abfall auf ca. $U = 2,5$ mit wachsendem w_{Pr} . Die Regressionsanalyse ergab ein Polynom vierter Ordnung als beste Anpassung ($R^2 = 0,98$).

$$U_{90} = d_{90}/d_{10}$$

Wie bei der Abhängigkeit von ρ_{Pr} entspricht der in Bild 24 aufgetragene Verlauf von U_{90} dem bei der Ungleichförmigkeitszahl U. Auch ist die gleiche Abnahme der Streuungen für größere Wassergehalte zu beobachten. Es wurde wiederum ein Polynom 4. Ordnung als am besten angepaßte Kurve gefunden, das Bestimmtheitsmaß liegt ebenfalls bei ca. $R^2 = 0,98$.

4.2.4 Abhängigkeit von der Krümmungszahl C_c

Als weitere, aus den Korndurchmessern d_{10} , d_{30} und d_{60} zu ermittelnde dimensionslose Größe wurde die Krümmung

$$C_c = d_{30}^2/(d_{10} \cdot d_{60})$$

untersucht (s. Bild 25). Der Wert schwankt zwischen ca. $1 \leq C_c \leq 1,4$, eine eindeutige Tendenz ist nicht zu erkennen. Die Streubreiten sind sehr unregelmäßig.

4.2.5 Abhängigkeit von $U_{90}/U = d_{90}/d_{60}$

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Parametern wurde auch das Verhältnis d_{90}/d_{60} untersucht. Der in Bild 26 aufgetragene Verlauf ist noch unregelmäßiger als der von C_c , die Streuungen sind dagegen durchgängig gering und nehmen mit zunehmendem Wassergehalt w_{Pr} ab.

4.3 Bewertung der untersuchten Abhängigkeiten

4.3.1 Proctordichte

Für die Verwendung der gefundenen Korrelationen zur einfachen Beschreibung der Abhängigkeit der Proctordichte von der Korngrößenverteilung müssen folgende Kriterien über den gesamten Bereich möglicher Proctordichten (ca. $\rho_{Pr} = 1,65 \text{ g/cm}^3$ bis $\rho_{Pr} = 2,05 \text{ g/cm}^3$) gelten:

Eindeutigkeit der Zuordnung (kein Maximum oder Minimum innerhalb des untersuchten Bereiches)

möglichst großes Bestimmtheitsmaß

geringe, gleichmäßige oder gleichmäßig zu- oder abnehmende Streuung

Die Parameter U und U_{90} zeigen ein sehr ähnliches Verhalten (s. Bilder 10 bis 13). In beiden Fällen ist unterhalb von ca. $\rho_{Pr} = 1,9 \text{ g/cm}^3$ eine stetige, überproportionale Zunahme der Dichte zu sehen, oberhalb dieses Wertes ist eine lineare Abhängigkeit zu erkennen, für die mit wachsender Dichte die Streuungen zunehmen.

Die Streubreiten sind für die Bereiche $U < 6$ bzw. $U_{90} < 20$ sehr gering und weisen, wie die Mittelwertkurven, einen stetigen Verlauf auf. Mit beiden Größen läßt sich die Abhängigkeit von der Proctorkurve eindeutig darstellen. In der weiteren Untersuchung wurden daher diese beiden Parameter ausgewertet.

Bei den zusätzlich untersuchten Parametern C_C und U_{90}/U sind die Verläufe der Abhängigkeiten nur bereichsweise stetig. Für $1,65 \text{ g/cm}^3 < \rho_{Pr} < 1,8 \text{ g/cm}^3$ bleibt C_C sogar konstant. Bei U_{90}/U ergibt sich für $\rho_{Pr} > 1,85 \text{ g/cm}^3$ eine sehr unklare Abhängigkeit (s. Bilder 16 und 17).

Als Parameter für die Beschreibung der Abhängigkeit der Proctordichte von der Korngrößenverteilung sind sowohl C_C als auch U_{90}/U offensichtlich ungeeignet.

4.3.2 Optimaler Wassergehalt

Wie bereits in Kapitel 1 dargestellt, nimmt der optimale Wassergehalt mit wachsendem ρ_{Pr} stetig ab (s. Bild 18). Betrachtet man die Abhängigkeit von den charakteristischen Korndurchmessern d_{10} bis d_{90} , zeigt sich für d_{10} und d_{30} ein sehr geringer Einfluß auf w_{Pr} (s. Bilder 19 und 20). Die in den Bildern 23 und 24 dargestellte Abhängigkeit des optimalen Wassergehalts von U bzw. U_{90} ist daher überwiegend auf den Einfluß der groben Fraktionen d_{60} und d_{90} zurückzuführen (s. Bilder 19 und 20).

Wie bereits erwähnt, wurde die Untersuchung der Abhängigkeiten zwischen Parametern der Kornverteilung und optimalem Wassergehalt w_{Pr} der Vollständigkeit halber durchgeführt und wird daher im Weiteren nicht mehr behandelt.

5 Ergebnisse

5.1 Rechenansatz für die praktische Anwendung

Ziel der Arbeit ist, dem Planer eine Methode an die Hand zu geben, mittels der einfach zu ermittelnden Korngrößenverteilung eine statistisch gesicherte Voraussage der zu erwartenden charakteristischen Werte der Proctordichte zu treffen. Im folgenden werden Rechenansätze vorgestellt, die aufgrund der im Abschnitt 4.2.3 erzielten Ergebnisse entwickelt wurden.

5.1.1 Proctordichte

Die in den Bildern und dargestellten Abhängigkeiten der Proctordichte von U bzw. U_{90} mit ihren Vertrauensbereichen können als die Bereiche für die Funktionen $U(\rho_{Pr})$ und $U_{90}(\rho_{Pr})$ angesehen werden. Sie sind jedoch für die unmittelbare praktische Anwendung nicht geeignet, da die gesuchte Größe (ρ_{Pr}) hier die unabhängige Variable darstellt. In den Bildern 27 bis 32 wurde die Proctordichte daher als Ordinate aufgetragen. Die Teilung der Anhängigkeit in einen nichtlinearen und einen linearen Teil bleibt erhalten, die Grenzen liegen bei ca. $U = 6$ bzw. $U_{90} = 20$. Auch bei dieser Auftragung ist eine Regressionsanalyse mit polynomischem Ansatz möglich. Die beste Anpassung, auch unter Berücksichtigung der Steigung des anschließenden linearen Teils, ergaben Polynome der Form

$$\rho_{Pr} = a + bx + c/x$$

sowohl für $U \leq 6$ als auch für $U_{90} \leq 20$ mit einem Bestimmtheitsmaß von ca. $R^2 = 0,99$. Folgende Koeffizienten der Polynome wurden ermittelt (s. Bilder 28 und 31):

$U \leq 6$

Mittelwert $\rho_{Pr} = 2,1488 - 0,0153 U - 0,967/U$

Vertrauensbereich - 5 % $\rho_{Pr} = 2,1569 - 0,0167 U - 1,003/U$

Vertrauensbereich + 5 % $\rho_{Pr} = 2,1594 - 0,0171 U - 1,031/U$

U₉₀ ≤ 20

| | |
|------------|---|
| Mittelwert | $\rho_{Pr} = 1,891 + 0,00226 U_{90} - 0,954/U_{90}$ |
|------------|---|

| | |
|-------------------------|---|
| Vertrauensbereich - 5 % | $\rho_{Pr} = 1,884 + 0,00313 U_{90} - 0,898/U_{90}$ |
|-------------------------|---|

| | |
|-------------------------|---|
| Vertrauensbereich + 5 % | $\rho_{Pr} = 1,894 + 0,00174 U_{90} - 0,999/U_{90}$ |
|-------------------------|---|

Die für $U > 6$ bzw. $U_{90} > 20$ ermittelten Regressionsgeraden haben folgende Koeffizienten (s. Bilder 29 und 32):

U > 6

| | |
|------------|---------------------------------|
| Mittelwert | $\rho_{Pr} = 1,8054 + 0,0142 U$ |
|------------|---------------------------------|

| | |
|-------------------------|---------------------------------|
| Vertrauensbereich - 5 % | $\rho_{Pr} = 1,8087 + 0,0153 U$ |
|-------------------------|---------------------------------|

| | |
|-------------------------|---------------------------------|
| Vertrauensbereich + 5 % | $\rho_{Pr} = 1,8034 + 0,0132 U$ |
|-------------------------|---------------------------------|

U₉₀ > 20

| | |
|------------|--------------------------------------|
| Mittelwert | $\rho_{Pr} = 1,7998 + 0,0047 U_{90}$ |
|------------|--------------------------------------|

| | |
|-------------------------|-------------------------------------|
| Vertrauensbereich - 5 % | $\rho_{Pr} = 1,8083 + 0,005 U_{90}$ |
|-------------------------|-------------------------------------|

| | |
|-------------------------|--------------------------------------|
| Vertrauensbereich + 5 % | $\rho_{Pr} = 1,7991 + 0,0043 U_{90}$ |
|-------------------------|--------------------------------------|

Vereinfacht lassen sich die gefundenen Gleichungen auch mittels Fehlergrenzen zu den Koeffizienten der Mittelwert-Funktionen wie folgt darstellen.

$U \leq 6$

$$\rho_{Pr} = (2,157 \pm 0,01) - (0,016 \pm 0,0018) U - (1,003 \pm 0,036) / U$$

$U > 6$

$$\rho_{Pr} = 1,8054 \pm 0,0033 + (0,0142 \pm 0,001) U$$

$U_{90} \leq 20$

$$\rho_{Pr} = (1,891 \pm 0,003) + (0,00226 \pm (-0,00087)) U_{90} - (0,954 \pm 0,056)/U_{90}$$

$U_{90} > 20$

$$\rho_{Pr} = 1,7998 \pm 0,007 + (0,0047 \pm 0,0004) U_{90}$$

5.2 Vergleich mit vorhandenen Erfahrungswerten

Die statistische Auswertung der Ergebnisse von ca. 5000 Proctorversuchen ergab eine verhältnismäßig geringe Streubreite (Vertrauensbereich des Mittelwerts mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = \pm 5\%$). Die anschließenden Regressionsanalysen wiesen Korrelationskoeffizienten $R \approx 0,9$ bis $R \approx 1$ auf. Mit den gewählten Rechenansätzen für $\rho_{Pr}(U)$ und $\rho_{Pr}(U_{90})$ ist es demnach möglich, bei bekannter Korngrößenverteilung den Mittelwert für die Proctordichte in verhältnismäßig engen Grenzen abzuschätzen.

Vergleicht man die so ermittelten Rechenwerte mit früheren Angaben von Erfahrungswerten in der Literatur, zeigt sich grundsätzlich eine gute Übereinstimmung des Verlaufes beider Kenngrößen. Auf Bild 33 wurden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit für die Beziehung zwischen U und ρ_{Pr}

mit den zugehörigen Vertrauensbereichen den Angaben von Voß (1961) sowie VEB Baugrund (1979) gegenübergestellt. Für letztere wurden auch die angegebenen Fehlergrenzen eingetragen. Der Verlauf der Kurven mit einem unterlinearen Anteil für enggestufte und einem linearen Verlauf für weitgestufte Böden stimmt überein. Bei VEB Baugrund liegt der Übergang zum linearen Verlauf bei ca. $U = 6$, bei Voß etwa bei $U = 5$. Die von VEB Baugrund angegebene Beziehung weist verhältnismäßig große Streubereiche von ca. $0,09 \text{ g/cm}^3$ auf.

In beiden Fällen ergeben die Beziehungen aus der Literatur bei gleichem U eine um ca. $0,03 \text{ g/cm}^3$ bis $0,05 \text{ g/cm}^3$ (ca. 2 % bis 3 %, maximal 10 % für $U = 2$) höhere Proctordichte. Die untere Fehlergrenze der von VEB Baugrund angegebenen Beziehung deckt sich für Werte von $U > 3$ etwa mit der oberen Grenze des Vertrauensbereichs der vorliegenden Untersuchung.

In der Vorschrift TEV 112-01 von VEB Baugrund ist außerdem tabellarisch eine Beziehung zwischen U_{90} und ρ_{Pr} für $1,5 \leq U_{90} \leq 16$ angegeben. Diese wurde zusätzlich zu den gefundenen Regressionskurven in den Bildern 13 und 27 eingetragen. Fehlergrenzen sind hier nicht angegeben. Die Kurve verläuft wesentlich steiler und weist eine kleinere Krümmung auf. Auch hier ist ρ_{Pr} bei gleichem U_{90} ca. $0,05 \text{ g/cm}^3$ größer.

Die von Voß angegebene Beziehung basiert auf der Auswertung von nur ca. 100 Versuchen mit $1,2 < U < 30$, also einer vergleichsweise sehr geringen Stichprobenzahl. Die Proben wurden im Rahmen von Autobahnprojekten im gesamten Bundesgebiet genommen, wodurch wahrscheinlich Bodenarten unterschiedlicher geologischer Herkunft untersucht wurden.

Bei den von VEB Baugrund angegebenen Beziehungen fehlen Aussagen über die Stichprobenanzahl, die Art der Auswertung sowie die Art der Fehlergrenzen (Standardabweichung, Vertrauensbereiche). Es wird nur angegeben, daß es sich um ausreichend statistisch gesicherte Beziehungen handelt. Da die Tabellen für die gesamte DDR gültig waren, sind wahrscheinlich auch hier Böden aus dem gesamten Gebiet einbezogen worden.

Leider liegen bei beiden Untersuchungen zur Herkunft und Beschaffenheit der Proben keine näheren Angaben vor.

Neben der Kornverteilung gibt es noch weitere Einflüsse auf die Proctordichte bzw. die maximale Lagerungsdichte. Youd (1973) gibt an, daß mit wachsender Abrundung des Korns bei gleicher Verdichtungsarbeit die Dichte größer wird. Die geringsten Dichten ergeben sich demnach bei gebrochenem Material. Aussagen über die Abrundung der Körner sind weder in den Literaturangaben vorhanden noch sind sie für die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Versuche möglich.

Wie bereits in der Einleitung dargestellt, wurde eine große Anzahl der in der vorliegenden Datenbank der Degebo dokumentierten Versuche an Recyclingböden (sog. Siebböden) vorgenommen. Diese Böden bestehen zum Teil aus gebrochenen Kornfraktionen, woraus sich bei sonst gleichen Voraussetzungen kleinere mittlere Proctordichten ergeben.

Die Bodenart (z.B. Sand oder Kies), die hier durch den Medianwert der Kornverteilung (d_{50}) charakterisiert wird, hat nach Youd ebenfalls einen Einfluß auf die maximale Dichte. Mit wachsendem d_{50} , also wachsender Grobkörnigkeit, wächst nach seinen Untersuchungen bei unveränderlichem U die maximale Dichte an. Die in der vorliegenden Untersuchung behandelten Böden weisen alle annähernd den gleichen, verhältnismäßig kleinen Medianwert von ca. 0,2 mm bis 0,3 mm auf (s. Bilder 6 und 7, $d_{30} - \rho_{Pr}$ und $d_{60} - \rho_{Pr}$), was nach Youd zu geringen Werten der maximalen Dichte und entsprechend der Proctordichte führt.

In den o.g. Untersuchungen sind mit großer Wahrscheinlichkeit Böden mit größeren Medianwerten berücksichtigt worden, wodurch sich die Mittelwertkurven zu höheren Werten der Proctordichte verschieben können.

Ein weiterer Faktor, der die Proctordichte beeinflussen kann, ist die Korndichte des Materials. Während die Variationsbreite der Korndichte für natürliche Böden erfahrungsgemäß sehr gering ist, kann die geringere Korndichte der Zuschlagstoffe bei den in der vorliegenden Datenbank häufig vertretenen Siebböden die Mittelwerte der Proctordichten verringert haben.

Einen weiteren Einfluß auf die Größe der Proctordichte könnten die unterschiedliche Ermittlung des Wassergehalts sowie die zulässigen Fehlergrenzen bei der Bestimmung darstellen. Nach DIN 18127 sind fünf verschiedene Verfahren zur Bestimmung des Wassergehalts zulässig, von denen jedes wahrscheinlich andere Streubereiche aufweist.

Die Genauigkeit der Wassergehaltsbestimmung innerhalb des Versuchs soll nach DIN 18127, Abschnitt 7.2.1 $\delta w = \pm 0,05 w$ betragen. Nach Abschnitt 9 der Norm darf die Standardabweichung für Versuche unter Vergleichsbedingungen (Versuchsdurchführung in verschiedenen Labors durch verschiedene Laboranten) für den Wassergehalt 0,7 % bis 1,7 %, für die Proctordichte $0,025 \text{ g/cm}^3$ betragen. Dies kann, abhängig von der Kornverteilung, zu Differenzen bei der Proctordichte von $0,02 \text{ g/cm}^3$ bis $0,05 \text{ g/cm}^3$ führen. .

Die vorliegende Untersuchung enthält ausschließlich die Ergebnisse von der Degebo durchgeführter Versuche, bei denen der Wassergehalt bis ca. 1985 durch das Pyknometer, danach durch Ofentrocknung, teils im Mikrowellenherd jeweils an Teilproben bestimmt wurde.

5.3 Grenzen und Einschränkungen für die praktische Anwendung

Aus den in Abschnitt 5.1.1 aufgestellten Beziehungen $U - \rho_{Pr}$ und $U_{90} - \rho_{Pr}$ geht nicht hervor, für welche Bodenarten die Beziehungen gelten. Bei einer Kornverteilung mit z.B. $U = 3$ könnte es sich um Feinsand, aber auch um Grobkies handeln, die wahrscheinlich unterschiedliche Proctordichten aufweisen würden. Zur Anwendung der o.g. Beziehungen ist also ein weiteres Kriterium z.B. in Form eines bestimmten Korndurchmessers erforderlich.

Wie aus den in den Bildern 7 und 8 dargestellten Beziehungen zwischen d_{60} und ρ_{Pr} sowie d_{30} und ρ_{Pr} hervorgeht, liegen die Mittelwerte für die untersuchten Proben zwischen $0,25 \text{ mm} \leq d_{60} \leq 0,45 \text{ mm}$ für $1,65 < \rho_{Pr} < 1,95 \text{ g/cm}^3$ (s. Bild 8) und $0,1 \text{ mm} \leq d_{30} < 0,2 \text{ mm}$ für den gesamten Bereich von ρ_{Pr} (s. Bild 7). Es ist zu erwarten, daß der mittlere Korndurchmesser d_{50} bei ca. $0,2 \text{ mm} \leq d_{60} \leq 0,3 \text{ mm}$ liegt und ebenfalls eine sehr geringe Schwankungsbreite aufweist.

Wie im Abschnitt 5.2 ausgeführt, hat der Medianwert der Kornverteilung (d_{50}) wahrscheinlich einen signifikanten Einfluß auf den zu erwartenden Wert der Proctordichte. In der vorliegenden Arbeit ist dieser Wert praktisch konstant und hat damit hier keinen Einfluß. Die in Abschnitt 5.1.1 angegebenen Kurvengleichungen sind demnach auch nur für die o.g. Wertebereiche von d_{30} bzw. d_{60} anwendbar.

5.4 Ausblick: Vorschläge für die weitere Forschung

Die vorliegende Untersuchung zeigt, daß die angestrebte Vorhersage von charakteristischen Proctordichten aus der Korngrößenverteilung mit verhältnismäßig geringen Fehlergrenzen möglich ist.

Wie die Literaturlauswertung zeigte, weichen die erarbeiteten Beziehungen zwischen Sieblinie und Proctordichte etwas von den Ergebnissen anderer Untersuchungen ab.

Die vorliegende Untersuchung beschränkt sich auf Böden aus dem Berliner Raum. Vergleiche mit Angaben aus der Literatur zeigen, daß die Anwendung auf Böden anderer Herkunft nur eingeschränkt möglich ist.

Ein gewisser Nachteil der vorliegenden Untersuchung ist, daß ausschließlich Versuchsergebnisse der Degebo, von denen ein signifikanter Teil aus der Untersuchung von Recycling-Böden stammen,

die Grundlage der Auswertung bilden. Aufgrund der Vielzahl von Versuchsparametern, die darüber hinaus die Ergebnisse des Proctorversuchs innerhalb der Fehlergrenzen der DIN 18127 schwanken lassen, wäre es sinnvoll, die Ergebnisse von möglichst vielen unterschiedlichen Labors bzw. Bearbeitern zusammenzufassen und auszuwerten. Um feststellen zu können, ob die vorliegenden Ergebnisse allgemein auf grob- und gemischtkörnige Böden auch aus anderen Regionen und anderer geologischer Entstehungsgeschichte angewandt werden können, sind daher weitergehende Untersuchungen erforderlich. Als Grundlage für weitere Untersuchungen wäre eine umfangreiche Datensammlung aufzustellen, die jedoch die Bestände von anderen Instituten, z.B. im gesamten Raum der norddeutschen Tiefebene einschließen sollte.

Ähnliche Untersuchungen an Böden anderer geologischer Herkunft aus dem übrigen Bundesgebiet könnten dazu führen, die für eine begrenzte Region aufgestellten Erfahrungswerte zu verallgemeinern. Hierbei ist wahrscheinlich neben der Untersuchung eines Ungleichförmigkeitsparameters (U oder U_{90}) die Einführung einer weiteren Kenngröße, z.B. des Medianwertes d_{50} der Kornverteilung zur Beschreibung der relativen Lage der Kornverteilungskurve im Bereich der möglichen Körnungen (Schluff, Sand, Kies) erforderlich.

6 Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens war, mittels statistischer Methoden aus einer vorliegenden Datensammlung Kriterien zu finden, die es gestatten, anhand der Korngrößenverteilung die Größe der zugehörigen Proctordichte vorauszusagen. Das Ziel wurde nur zum Teil erreicht.

Für die Größe der Proctordichte und des optimalen Wassergehalts von grobkörnigen Böden wurde eine etwa gleichwertige Abhängigkeit von den Ungleichförmigkeitsparametern $U = d_{60}/d_{10}$ und $U_{90} = d_{90}/d_{10}$ festgestellt. Durch bereichsweise Regressionsanalysen konnten Kurvengleichungen für die Mittelwerte sowie die Vertrauensgrenzen ermittelt werden. Für $1,65 \text{ g/cm}^3 < \rho_{Pr} < 1,9 \text{ g/cm}^3$ ergaben sich für beide Parameter eine stetige Kurve, für größere Werte eine lineare Abhängigkeit. Für kleine Werte von U bzw. U_{90} wurde eine sehr geringe Streuung des Mittelwerts (Vertrauenswahrscheinlichkeit $\pm 5\%$) festgestellt. Mit wachsender Ungleichförmigkeit wird der Streubereich größer. Die anderen, ebenfalls untersuchten Parameter $C_c = d_{30}^2/(d_{10} \cdot d_{60})$ und d_{90}/d_{60} ergaben keine eindeutigen Abhängigkeiten.

Die in der Literatur angegebenen, wahrscheinlich auf verhältnismäßig geringen Stichprobenzahlen basierenden Angaben weisen die gleichen Abhängigkeiten auf, die Werte der Proctordichten liegen jedoch um ca. 2 % bis 3 % höher.

Vermutlich ist diese Differenz darauf zurückzuführen, daß in der vorliegenden Untersuchung nur Böden aus dem Berliner Raum sowie zum großen Teil Recycling-Böden (Siebböden) untersucht wurden. Die Literaturangaben basieren dagegen auf landesweiten Untersuchungen auch an Böden anderer geologischer Herkunft, deren Eigenschaften (Kornabrundung, mittlere Korngröße d_{50}) von den hier untersuchten abweichen.

Um die dargestellten Beziehungen zwischen Parametern der Kornverteilung und der Proctordichte in eine allgemein gültige Form zu bringen, sind unseres Erachtens weitere Untersuchungen an möglichst umfangreichen Datenammlungen erforderlich. Die praktische Anwendung sollte unter kritischer Berücksichtigung der eigenen Erfahrungen erfolgen.

7 Literatur

R. Voß, Lagerungsdichte und Tragwerte von Böden bei Straßenbauten, Straße und Autobahn, Bad Godesberg 1961

W. Brand, R Floss, Der Proctorversuch als Eignungsprüfung und Maßstab für die Güteprüfung - Möglichkeiten und Grenzen, Straße und Autobahn, Bad Godesberg 1965

R. Floss, P. Siedek, R. Voß, Verdichtungs- und Verformungseigenschaften grobkörniger, bindiger Mischböden, Wissenschaftliche Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. W. Ernst & Sohn, Berlin/München 1968

G. Wolf, Näherungsverfahren zur Bestimmung der einfachen Proctordichte für bindige Erdstoffe mit Hilfe der Kornanalyse. Mitt. der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin 1969

T.L.Youd, Factors Controlling Maximum and Minimum Densities of Sands, in: Evaluation of Relative Density and its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils, ASTM STP 523 American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1973

Gesteinseigenschaften Kiese und Sande - Klassifikationskennwerte, Technische Vorschrift TEV 112-01, VEB Baugrund Berlin 1979

G.P. Korfiatis, C.N. Manikopoulos, Correlation of Maximum Dry Density and Grain Size, J. of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 108 No. GT9, ASCE, 1982

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau ZTVE-StB94, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe für Erd- und Grundbau, Köln 1997

R. Masih, Formula to Get Desired Soil Density, J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 126 No. 12, ASCE 2000

Schlußbericht zum Forschungsvorhaben
Korrelationen zwischen Korngrößenverteilung und Proctordichte
Verzeichnis der Bilder

1. Verteilung der Stichproben: a) Proctordichte b) optimaler Wassergehalt
2. Häufigkeitsverteilung von U und U_{90} für $\rho_{Pr} = 1,70 \text{ g/cm}^3$
3. Häufigkeitsverteilung von U und U_{90} für $\rho_{Pr} = 1,95 \text{ g/cm}^3$
4. Häufigkeitsverteilung von U und U_{90} für $8 \% \leq w_{Pr} \leq 8,5 \%$
5. Häufigkeitsverteilung von U und U_{90} für $14 \% \leq w_{Pr} \leq 15 \%$
6. Abhängigkeit $d_{10} - \rho_{Pr}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
7. Abhängigkeit $d_{30} - \rho_{Pr}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
8. Abhängigkeit $d_{60} - \rho_{Pr}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
9. Abhängigkeit $d_{90} - \rho_{Pr}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
10. $U = d_{60}/d_{10} - \rho_{Pr}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
11. $U = d_{60}/d_{10} - \rho_{Pr}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %) ($1,65 \text{ g/cm}^3 \leq \rho_{Pr} \leq 1,9 \text{ g/cm}^3$)
12. $U = d_{60}/d_{10} - \rho_{Pr}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %) ($1,9 \text{ g/cm}^3 < \rho_{Pr} < 2,05 \text{ g/cm}^3$)
13. $U_{90} = d_{90}/d_{10} - \rho_{Pr}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
14. $U_{90} = d_{90}/d_{10} - \rho_{Pr}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %) ($1,65 \text{ g/cm}^3 \leq \rho_{Pr} \leq 1,9 \text{ g/cm}^3$)
15. $U_{90} = d_{90}/d_{10} - \rho_{Pr}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %) ($1,9 \text{ g/cm}^3 < \rho_{Pr} < 2,05 \text{ g/cm}^3$)
16. $C_c = d_{30}^2/(d_{10} \times d_{60}) - \rho_{Pr}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
17. $U_{90}/U = d_{90}/d_{60} - \rho_{Pr}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %) ($1,9 \text{ g/cm}^3 < \rho_{Pr} < 2,05 \text{ g/cm}^3$)
18. Wassergehalte für Proctordichten $\rho_{Pr} = 1,9 \text{ g/cm}^3$ bis $\rho_{Pr} = 2,05 \text{ g/cm}^3$
19. $w_{Pr} - d_{10}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
20. $w_{Pr} - d_{30}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)

21. $w_{Pr} - d_{60}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
22. $w_{Pr} - d_{90}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
23. $w_{Pr} - U$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
24. $w_{Pr} - U_{90}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
25. $w_{Pr} - C_C$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
26. $w_{Pr} - U_{90}/U$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
27. $\rho_{Pr} - U = d_{60}/d_{10}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
28. $\rho_{Pr} - U = d_{60}/d_{10}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %) ($U \leq 6$)
29. $\rho_{Pr} - U = d_{60}/d_{10}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %) ($U > 6$)
30. $\rho_{Pr} - U_{90} = d_{90}/d_{10}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
31. $\rho_{Pr} - U_{90} = d_{90}/d_{10}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %) ($U_{90} \leq 20$)
32. $\rho_{Pr} - U_{90} = d_{90}/d_{10}$ - Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %) ($U_{90} > 20$)
33. Vergleich mit Literaturangaben

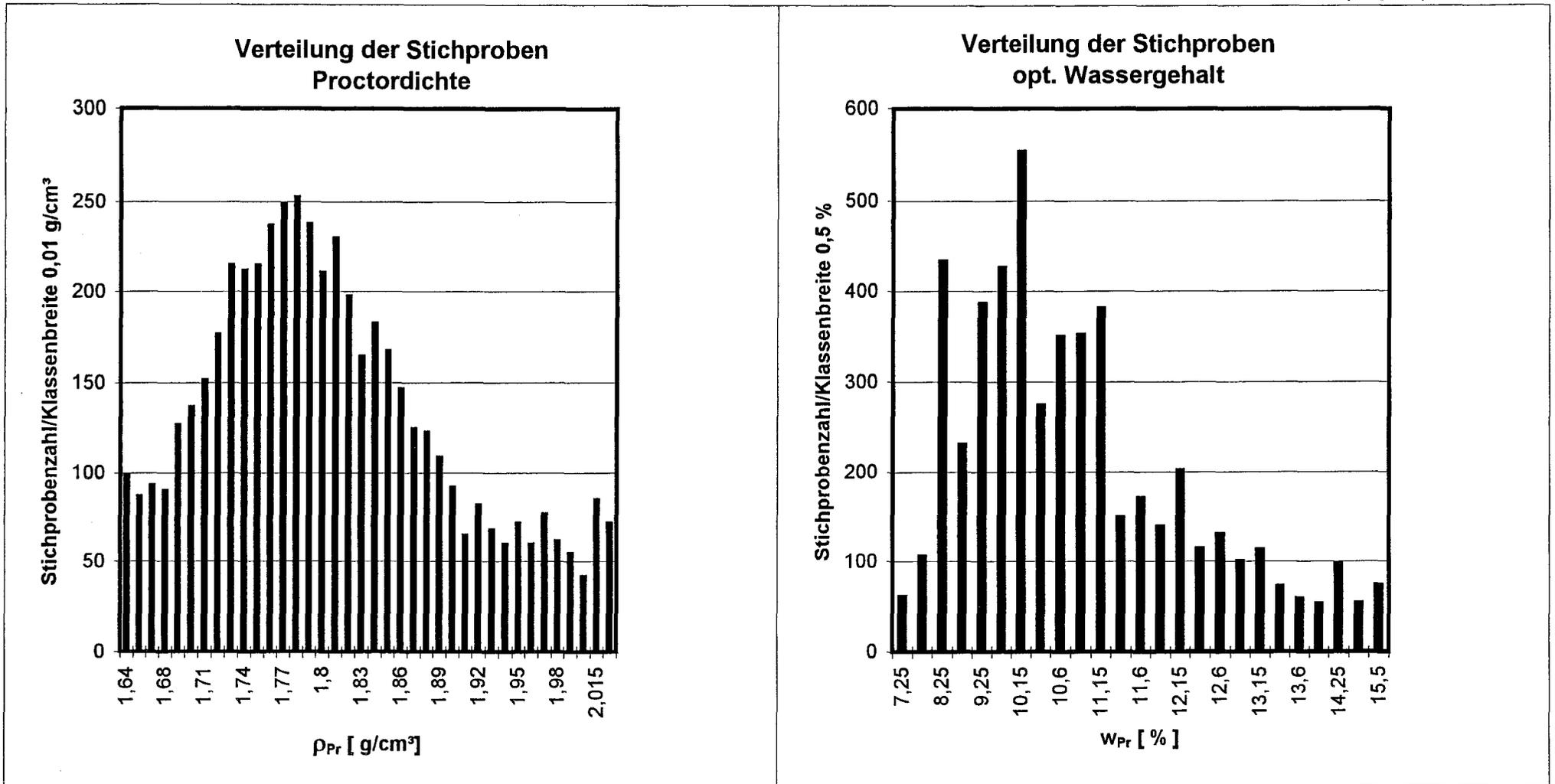


Bild 1

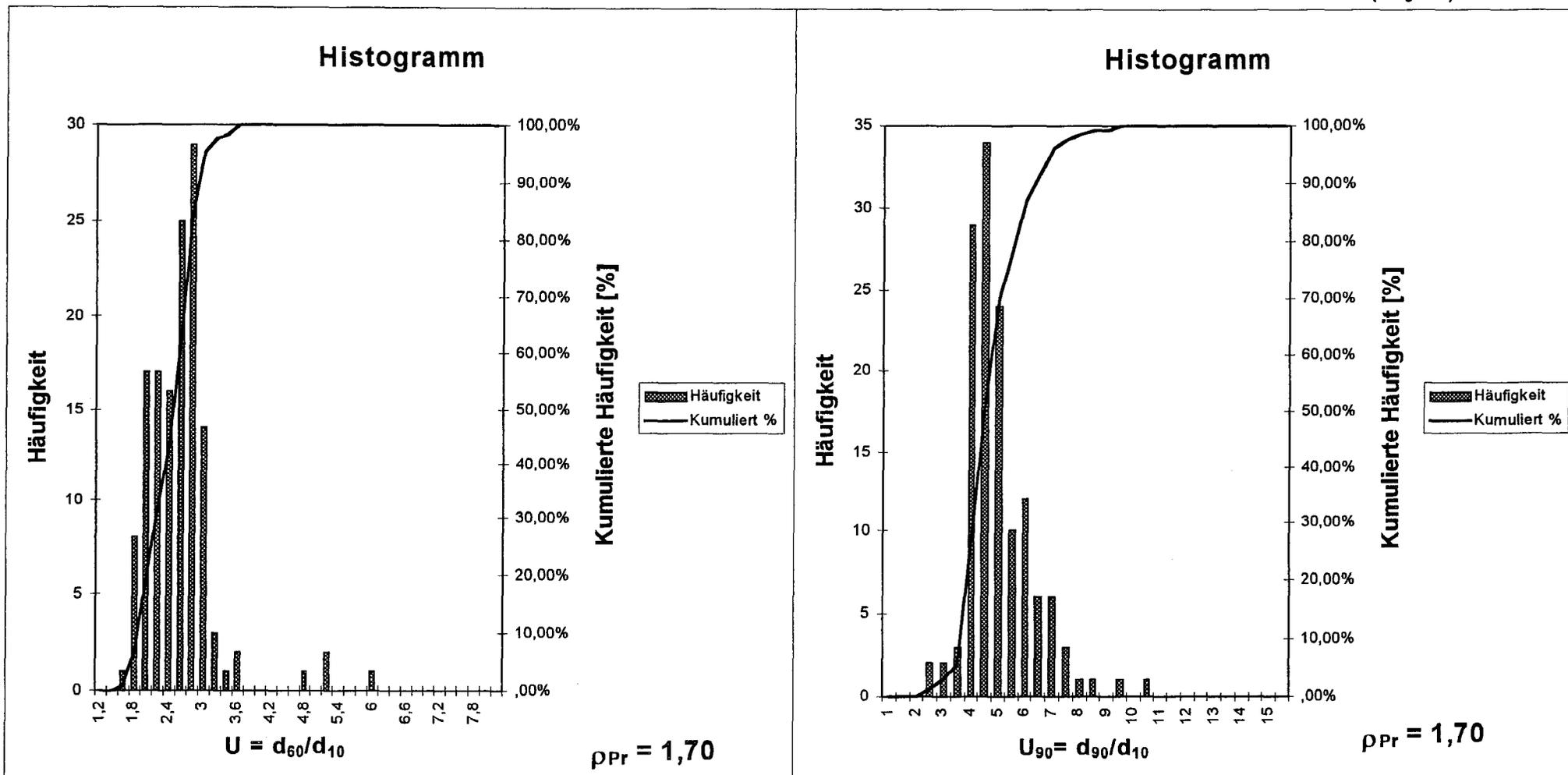


Bild 2

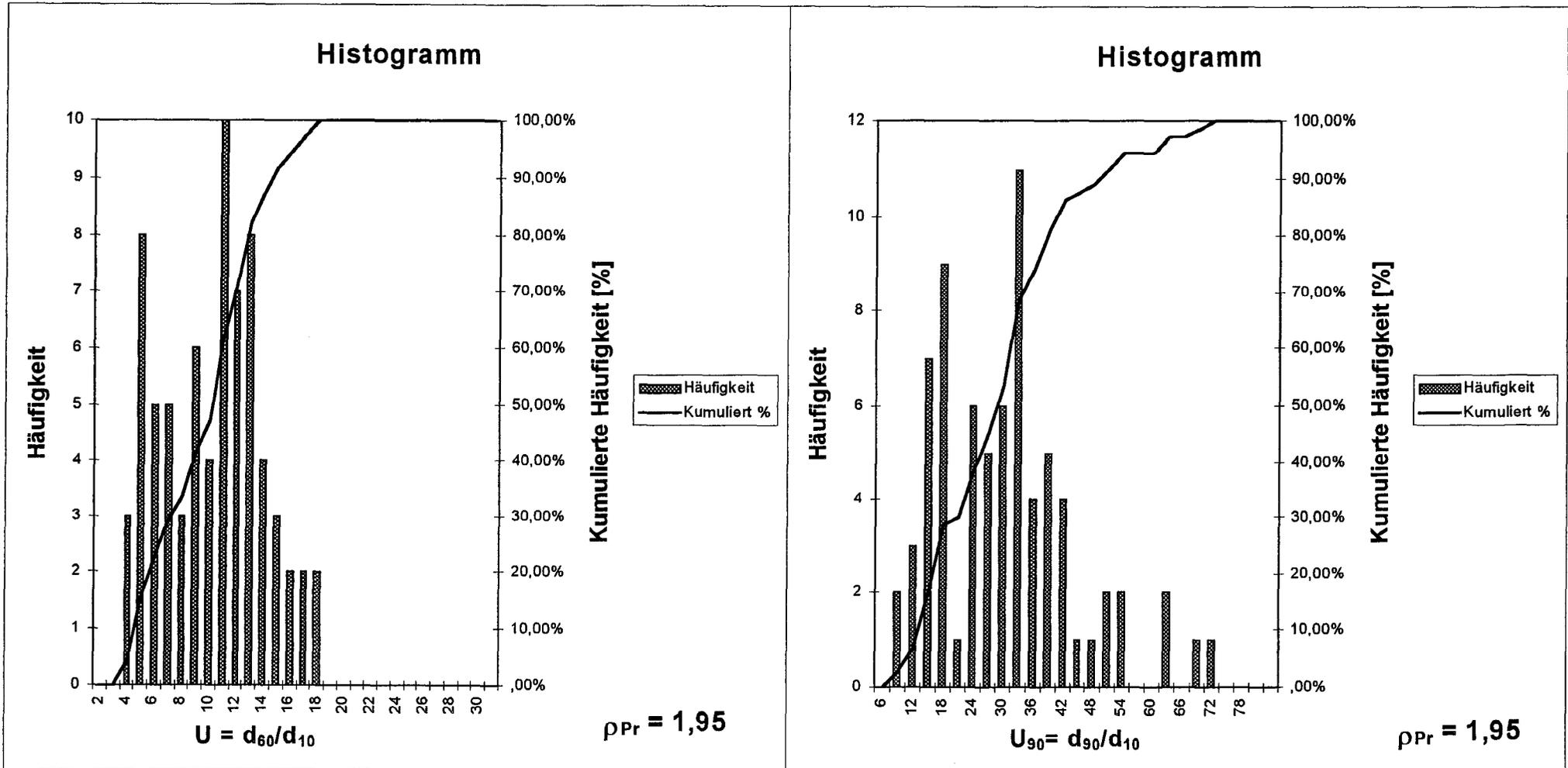


Bild 3

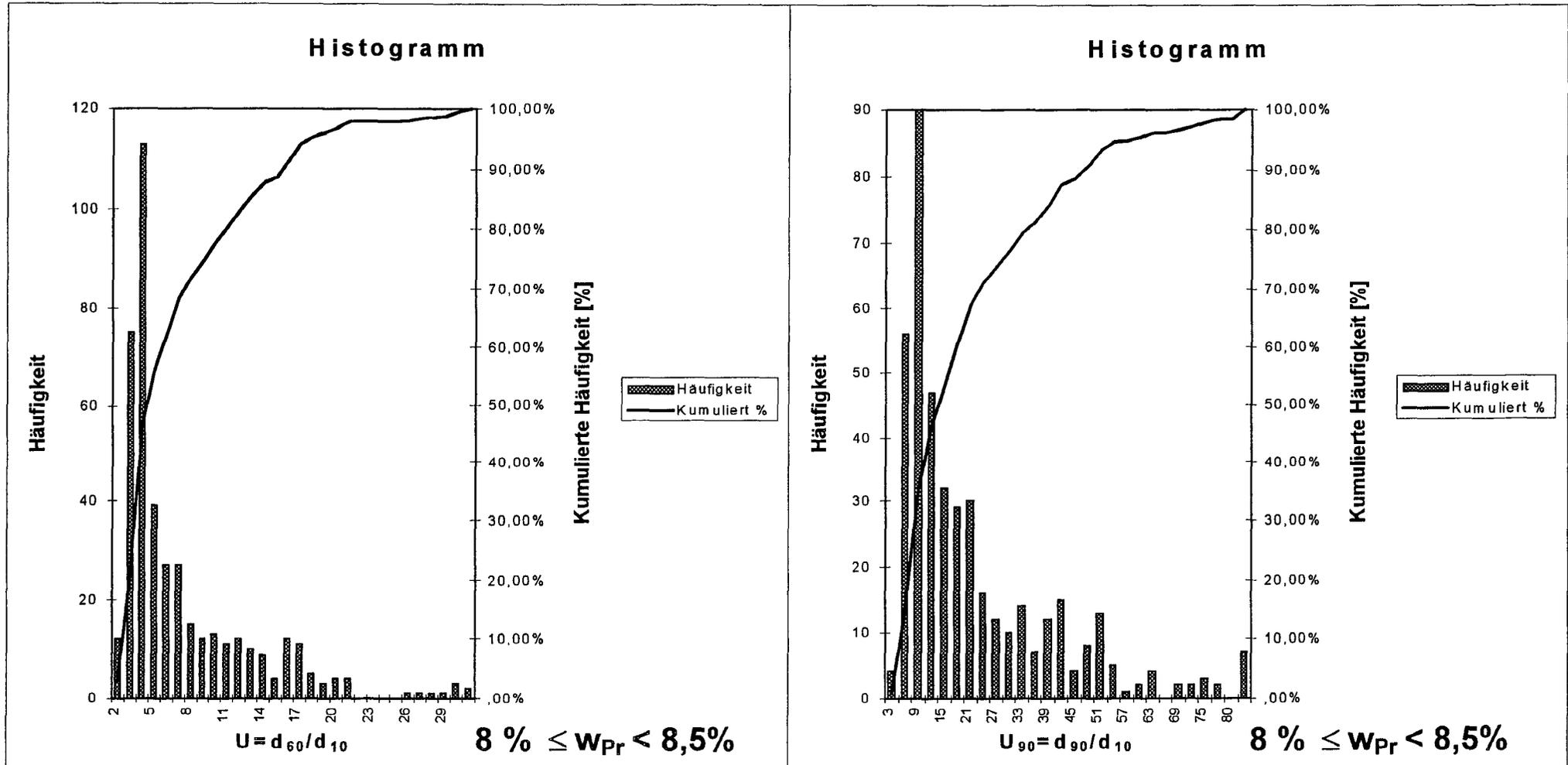


Bild 4

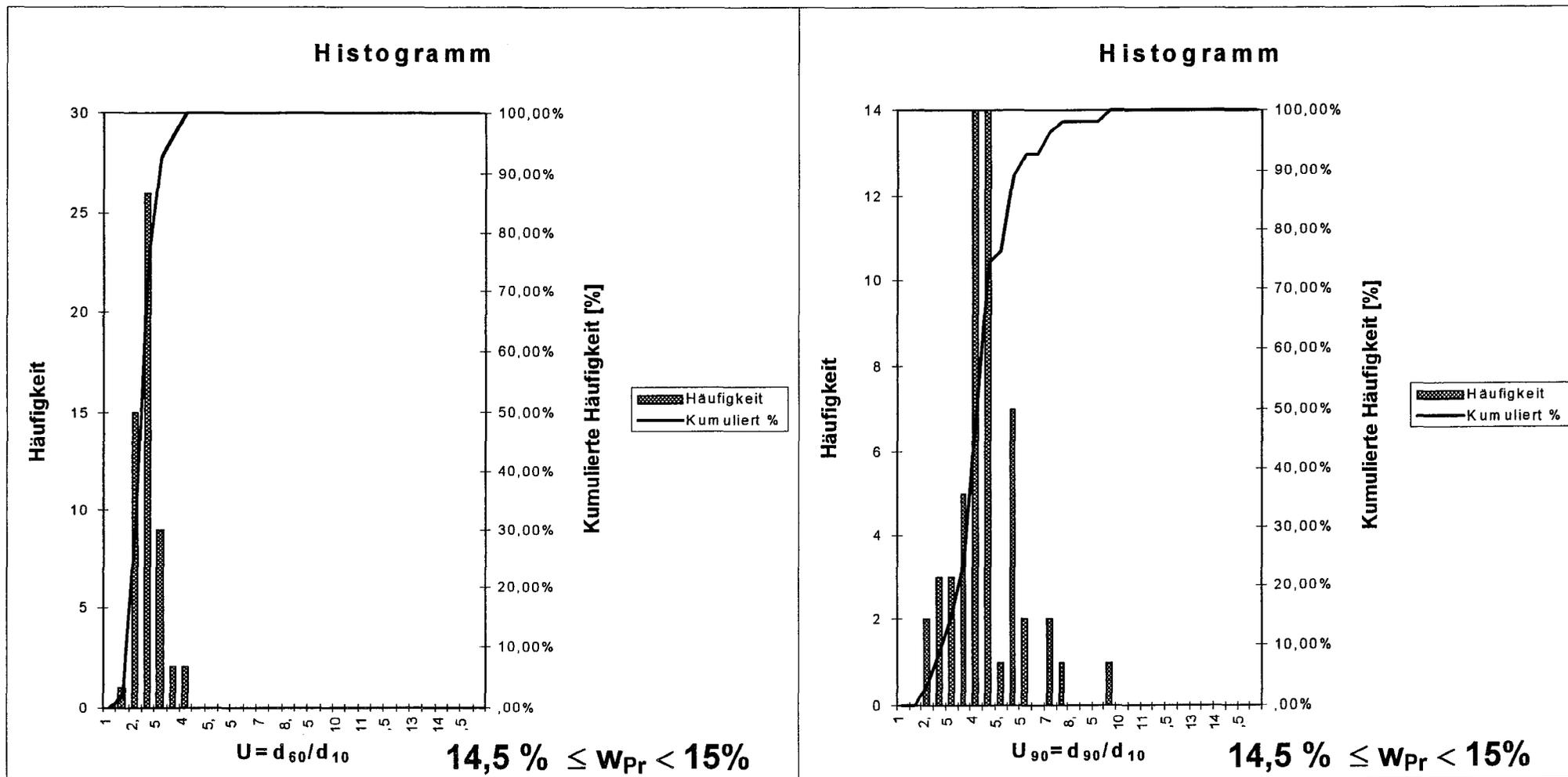


Bild 5

Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)

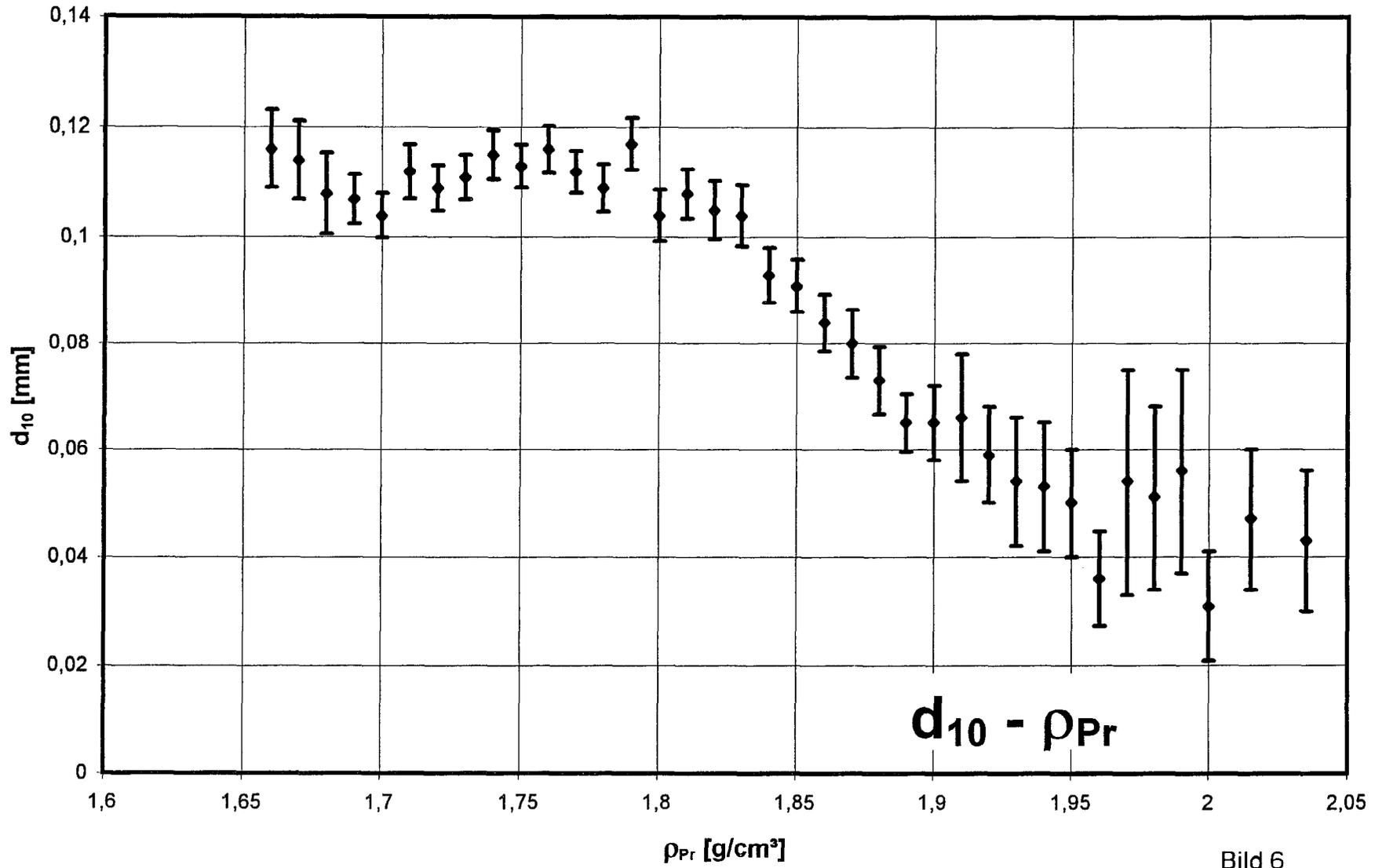
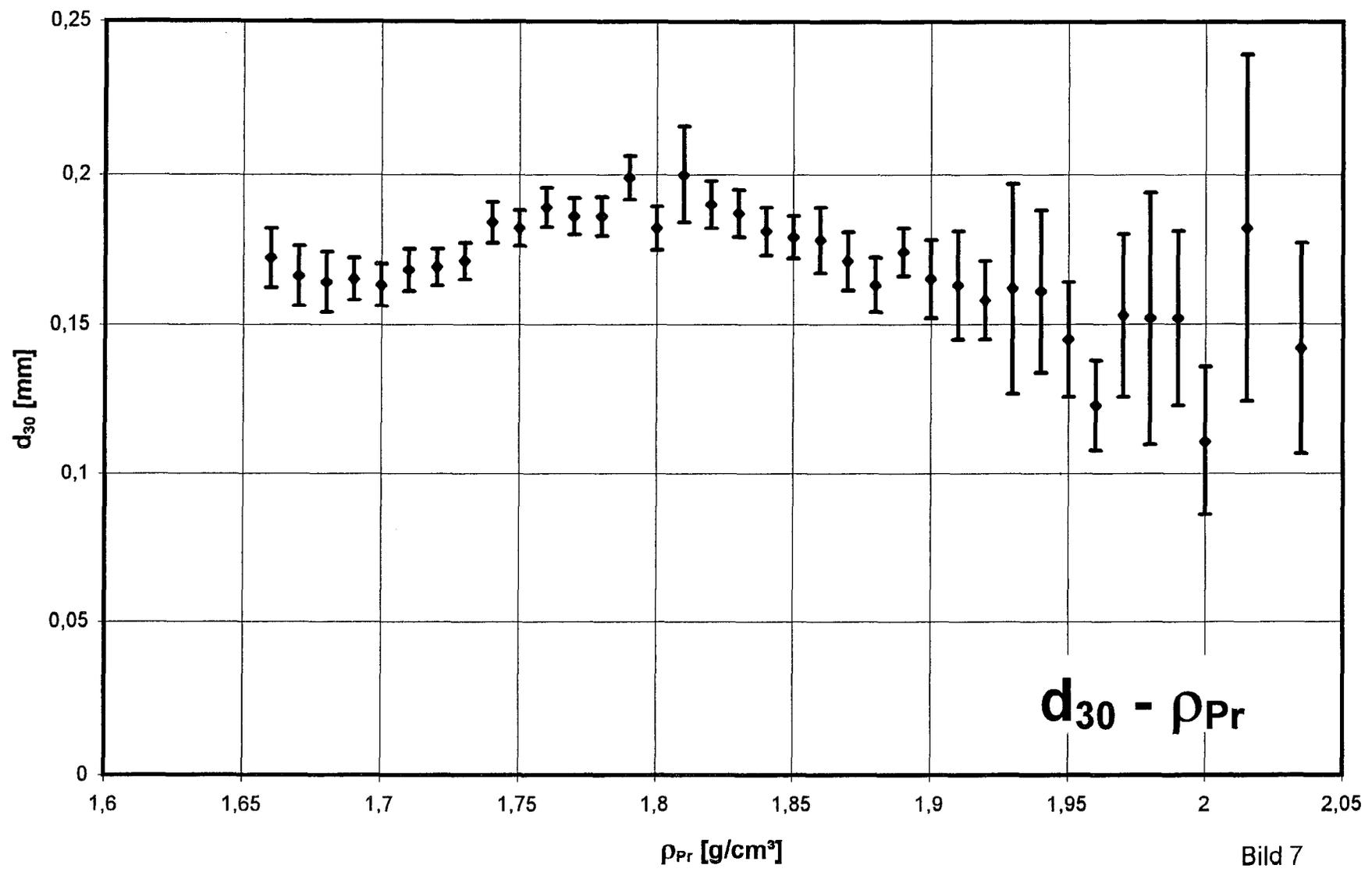


Bild 6

Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)



Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)

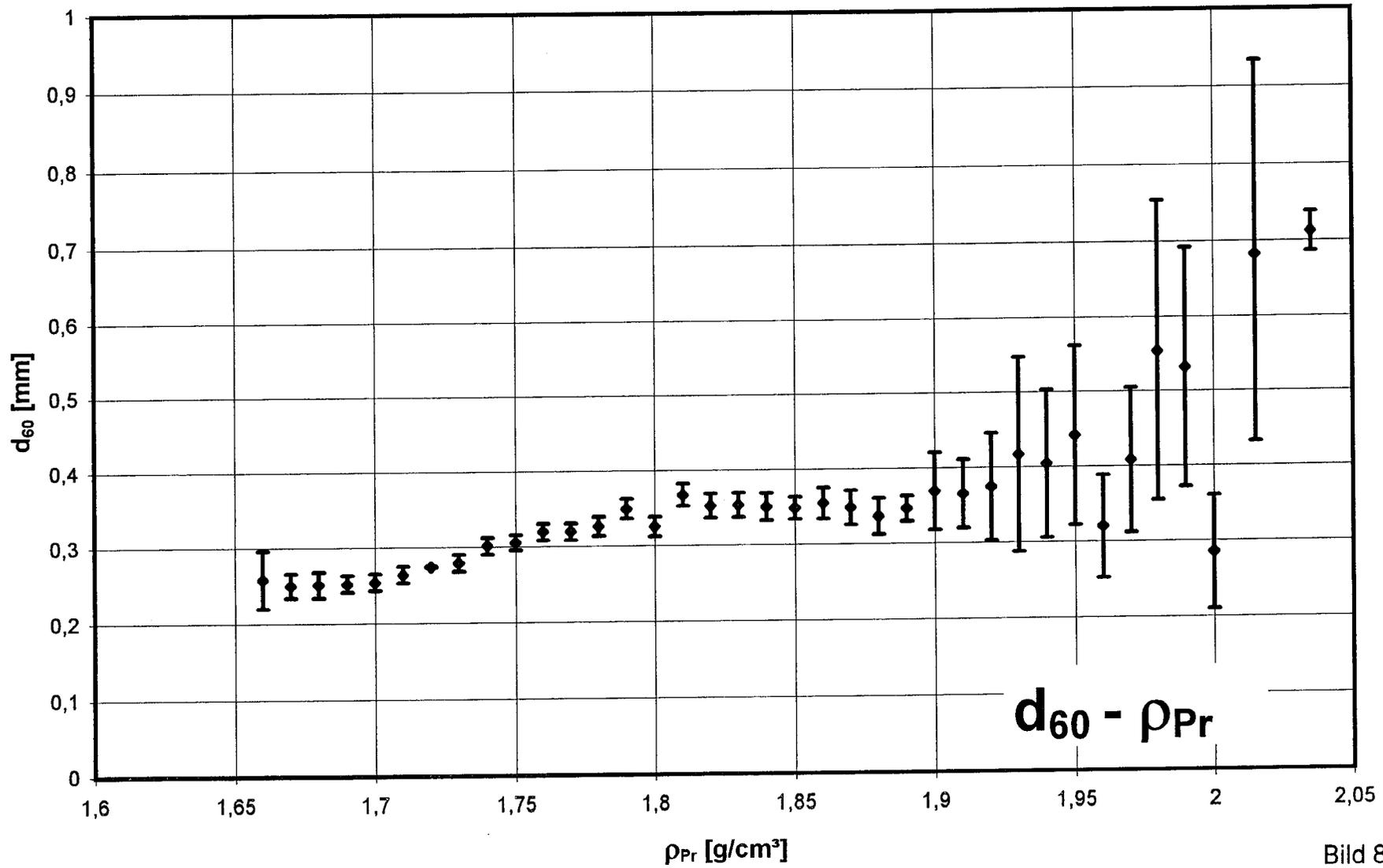


Bild 8

Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)

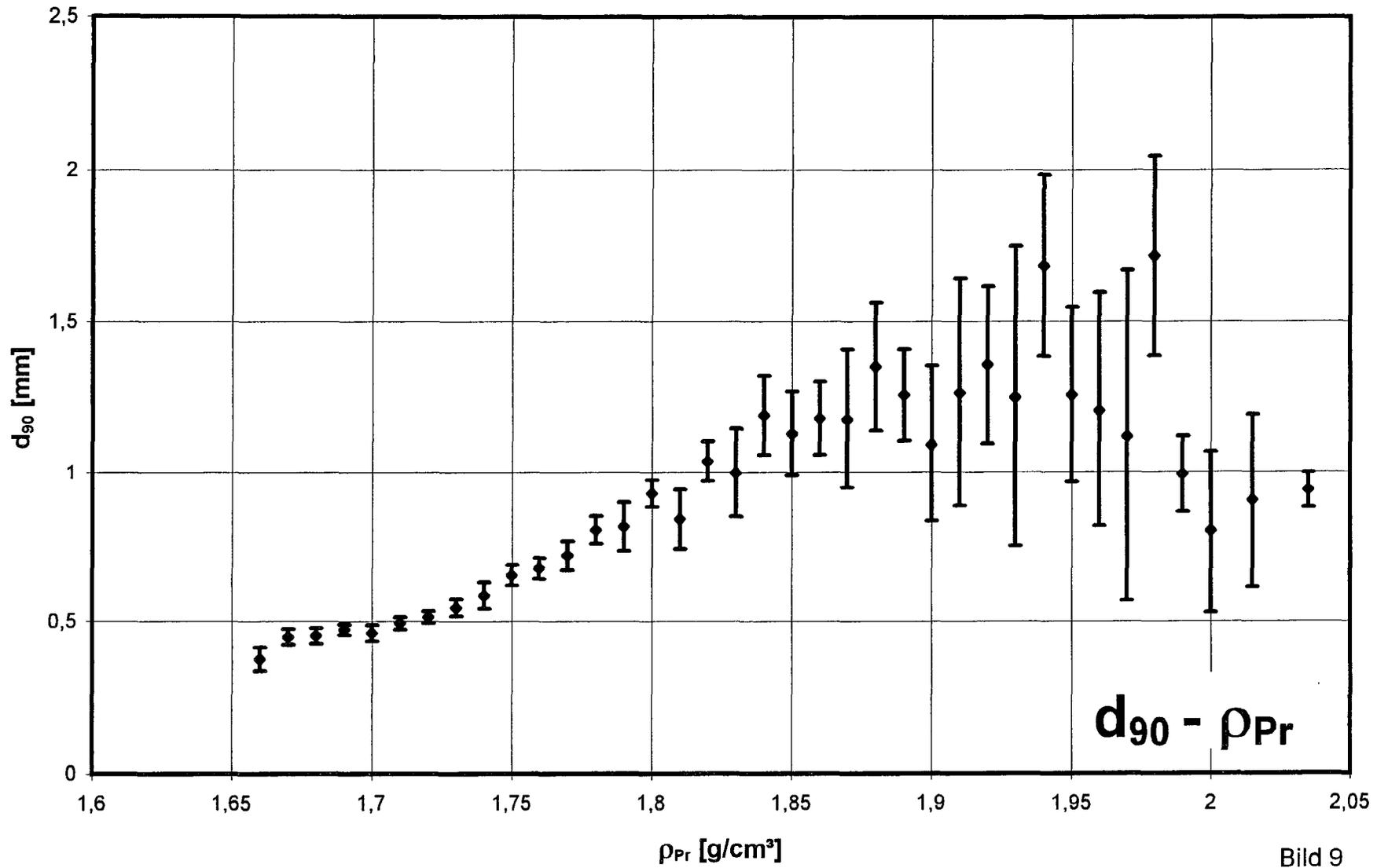


Bild 9

Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)

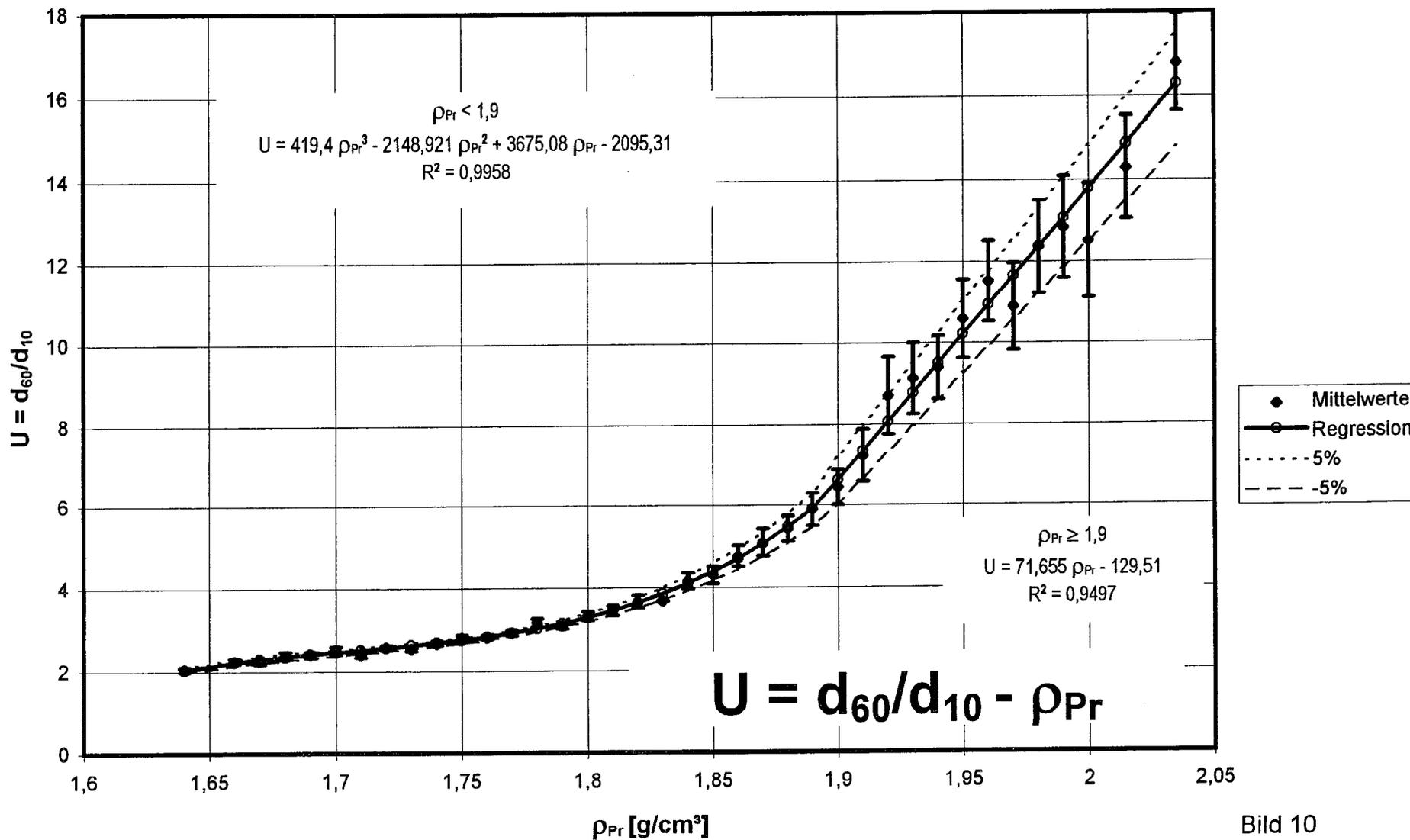


Bild 10

Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)

$1,65 < \rho_{Pr} \leq 1,9$

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)

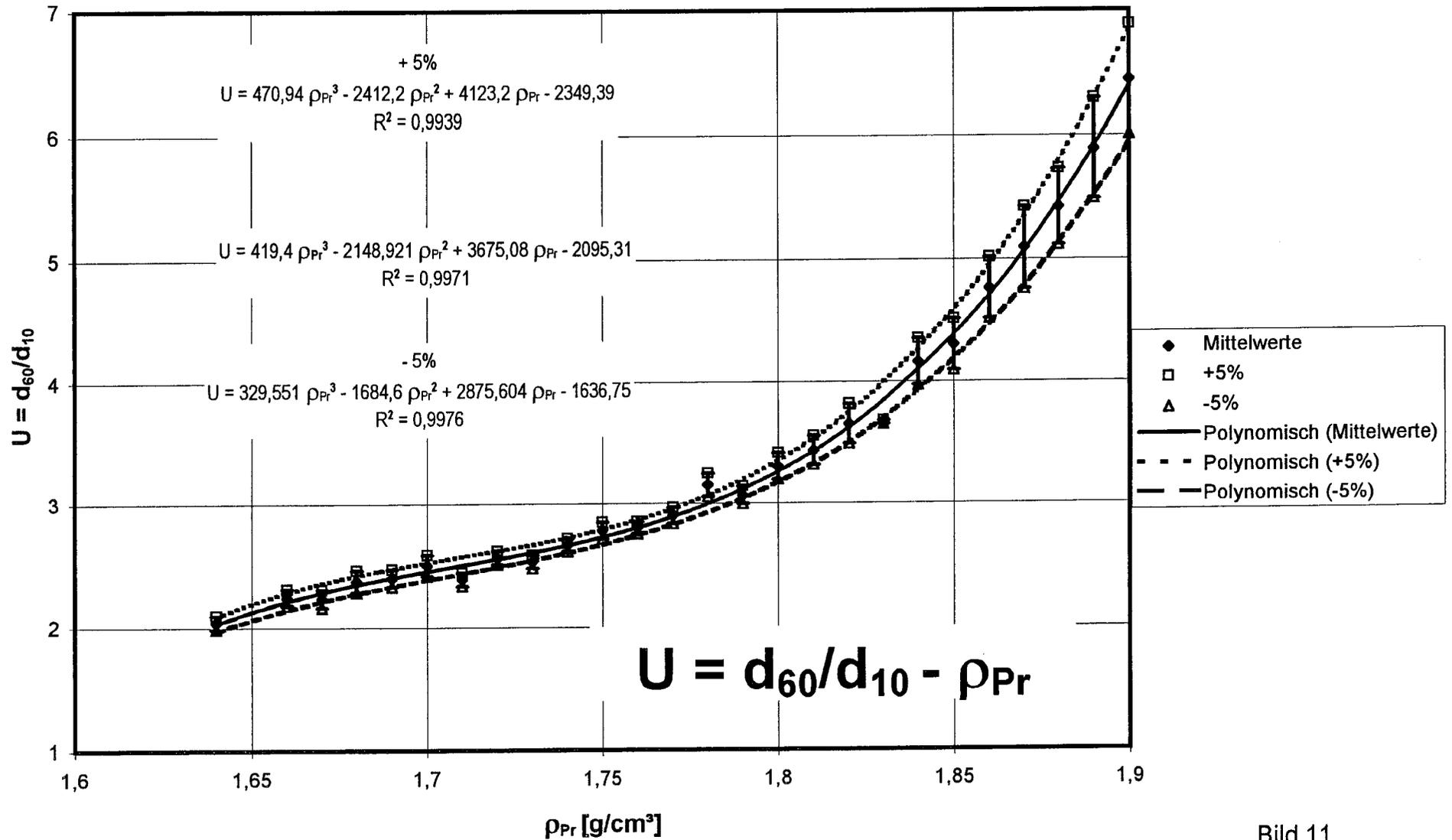


Bild 11

Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)

$$1,9 < \rho_{Pr} < 2,05$$

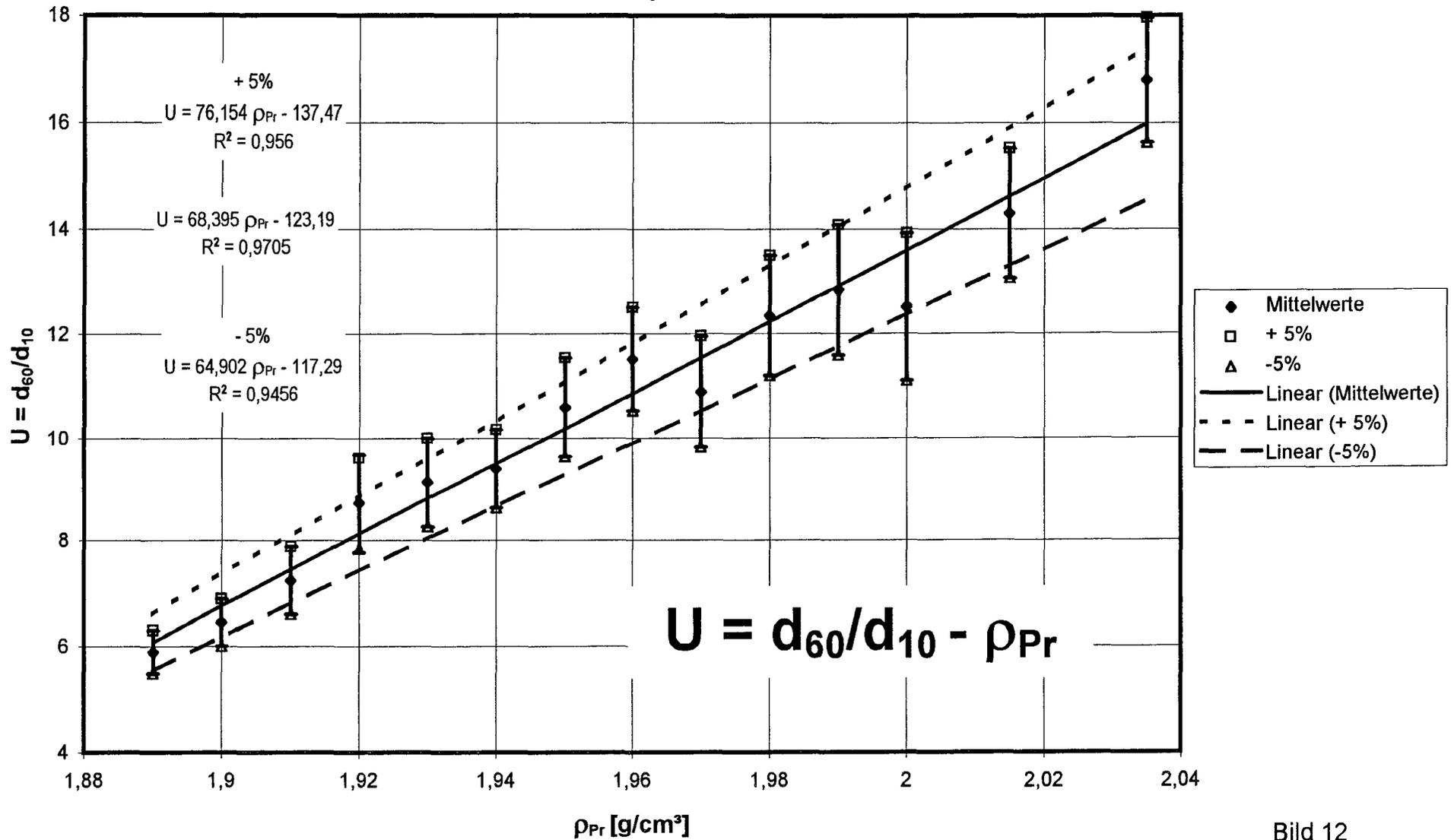


Bild 12

Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)

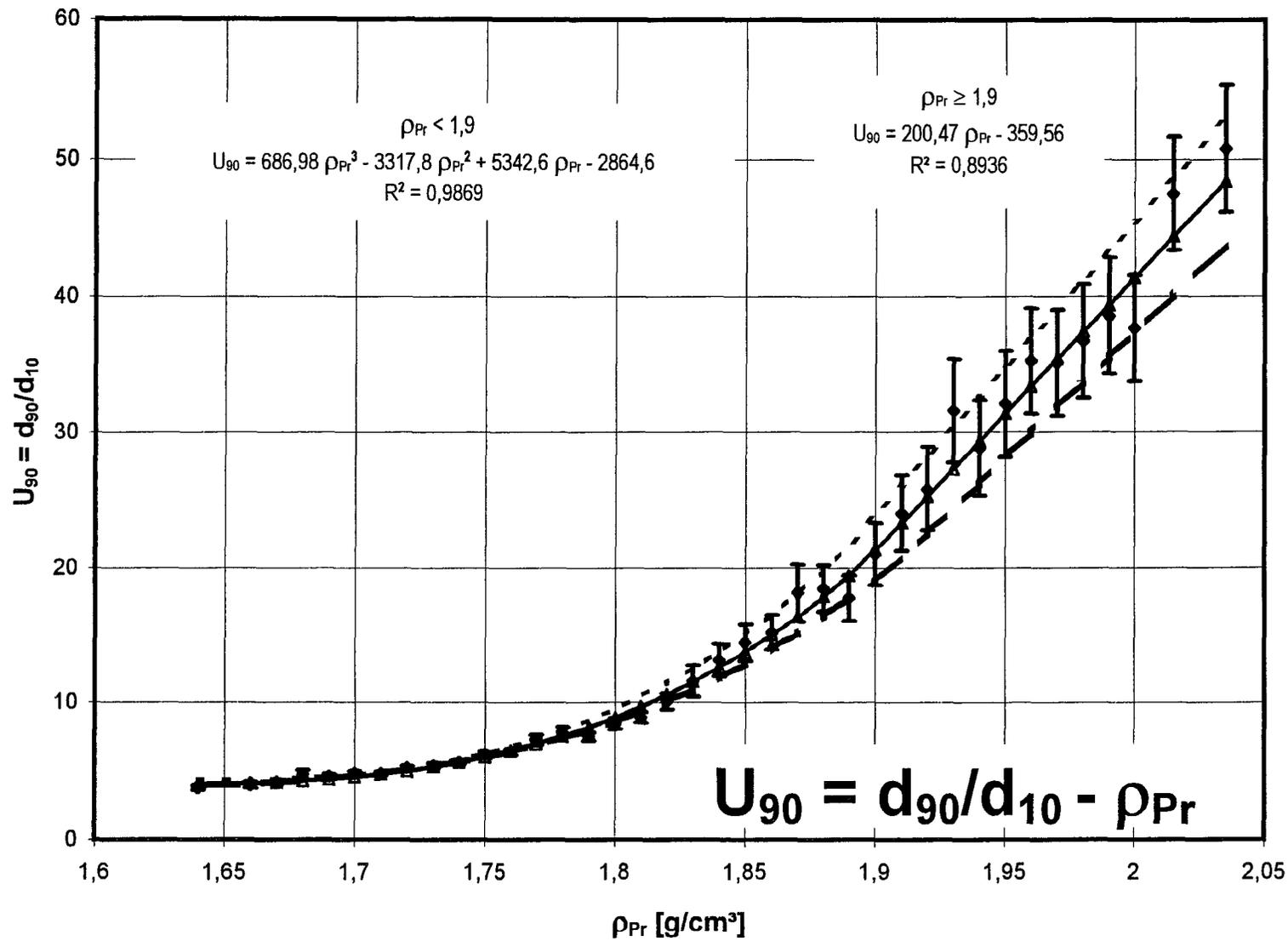


Bild 13

Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)

$$1,65 < \rho_{Pr} < 1,9$$

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)

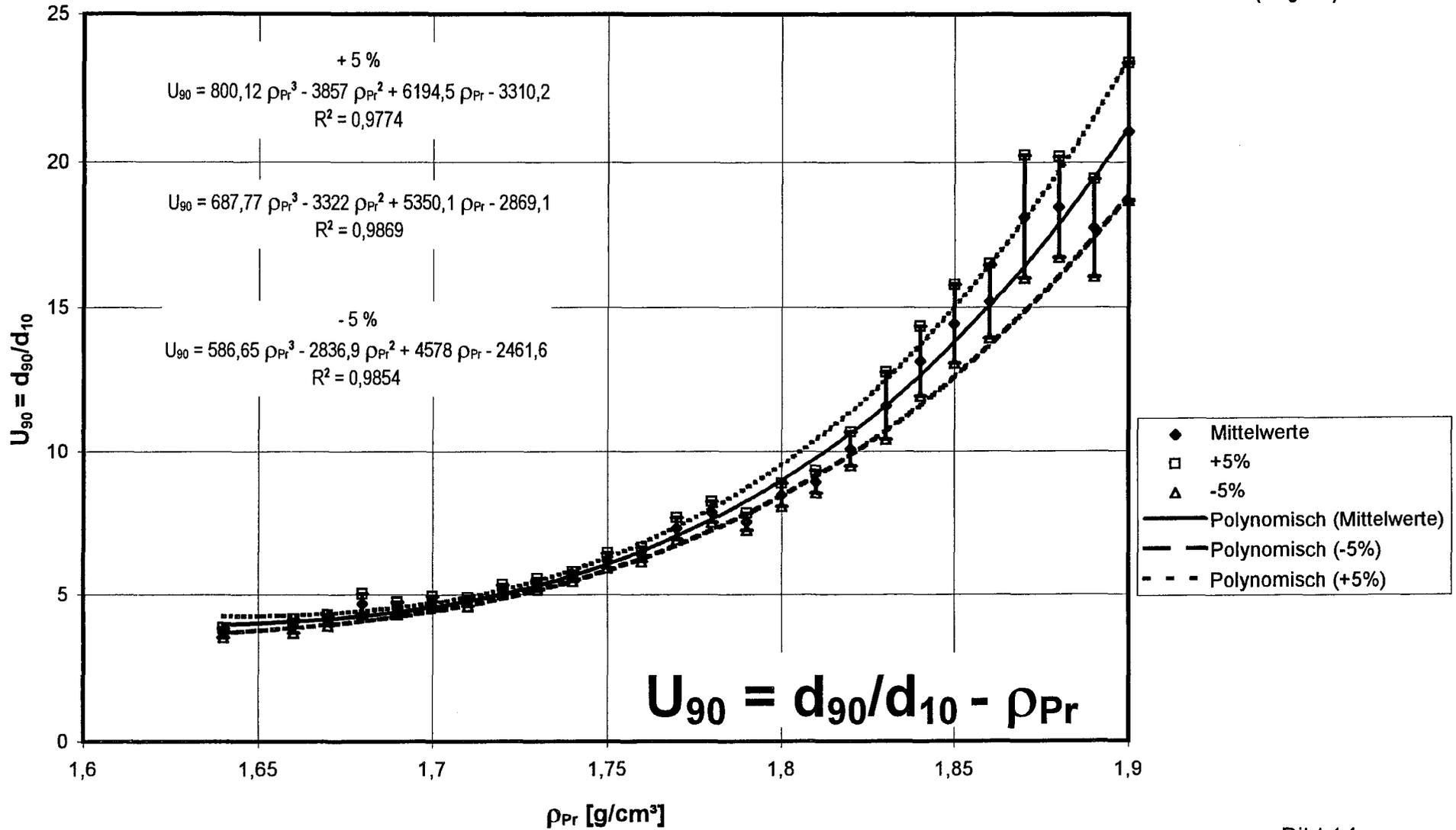


Bild 14

Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
 $1,9 < \rho_{Pr} < 2,05$

Deutsche Forschungsgesellschaft
 für Bodenmechanik
 (Degebo)

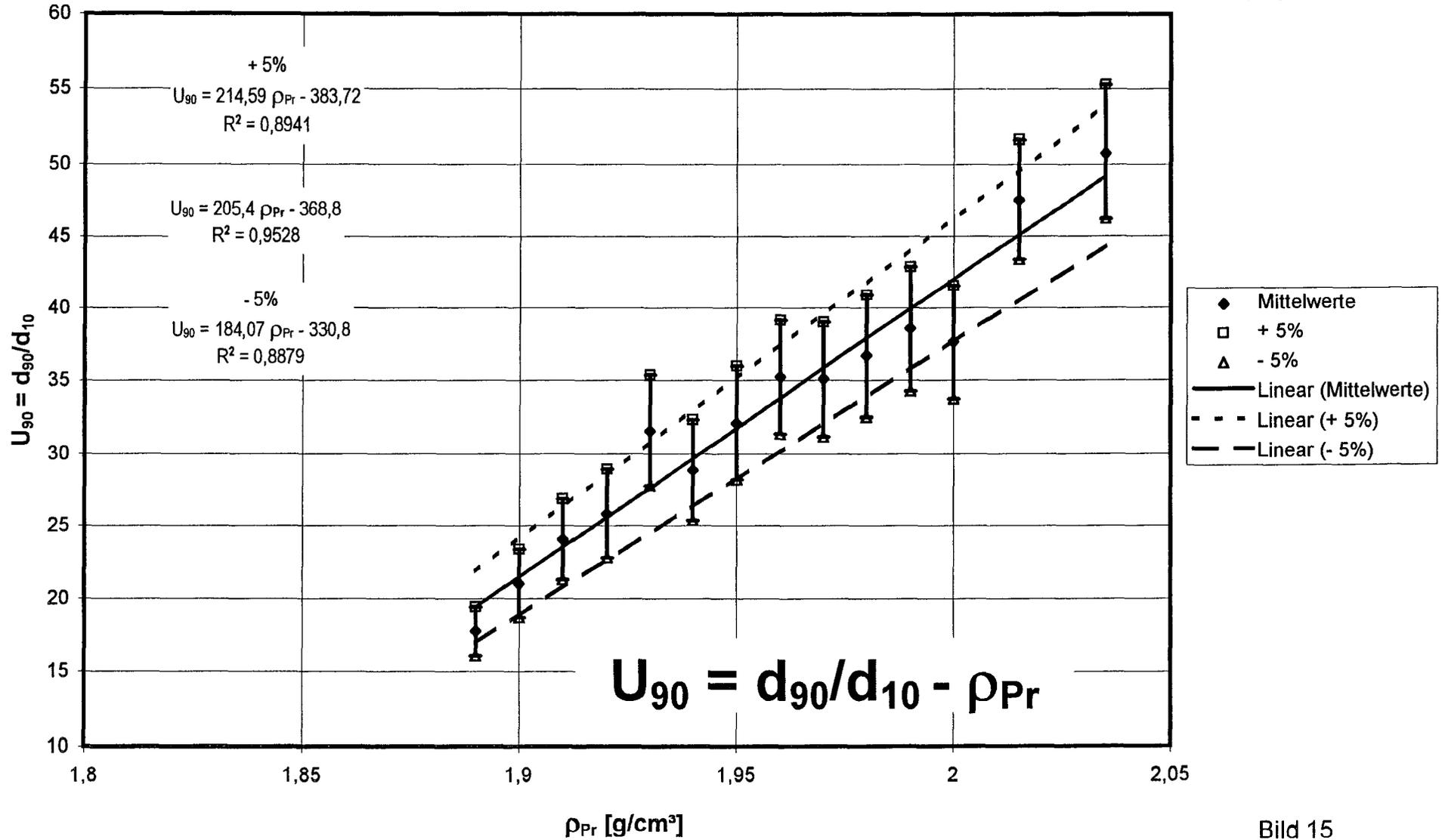


Bild 15

Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %) von $C_c = d_{30}^2/(d_6 \cdot d_{10})$ abhängig von ρ_{Pr}

Deutsche Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (Degebo)

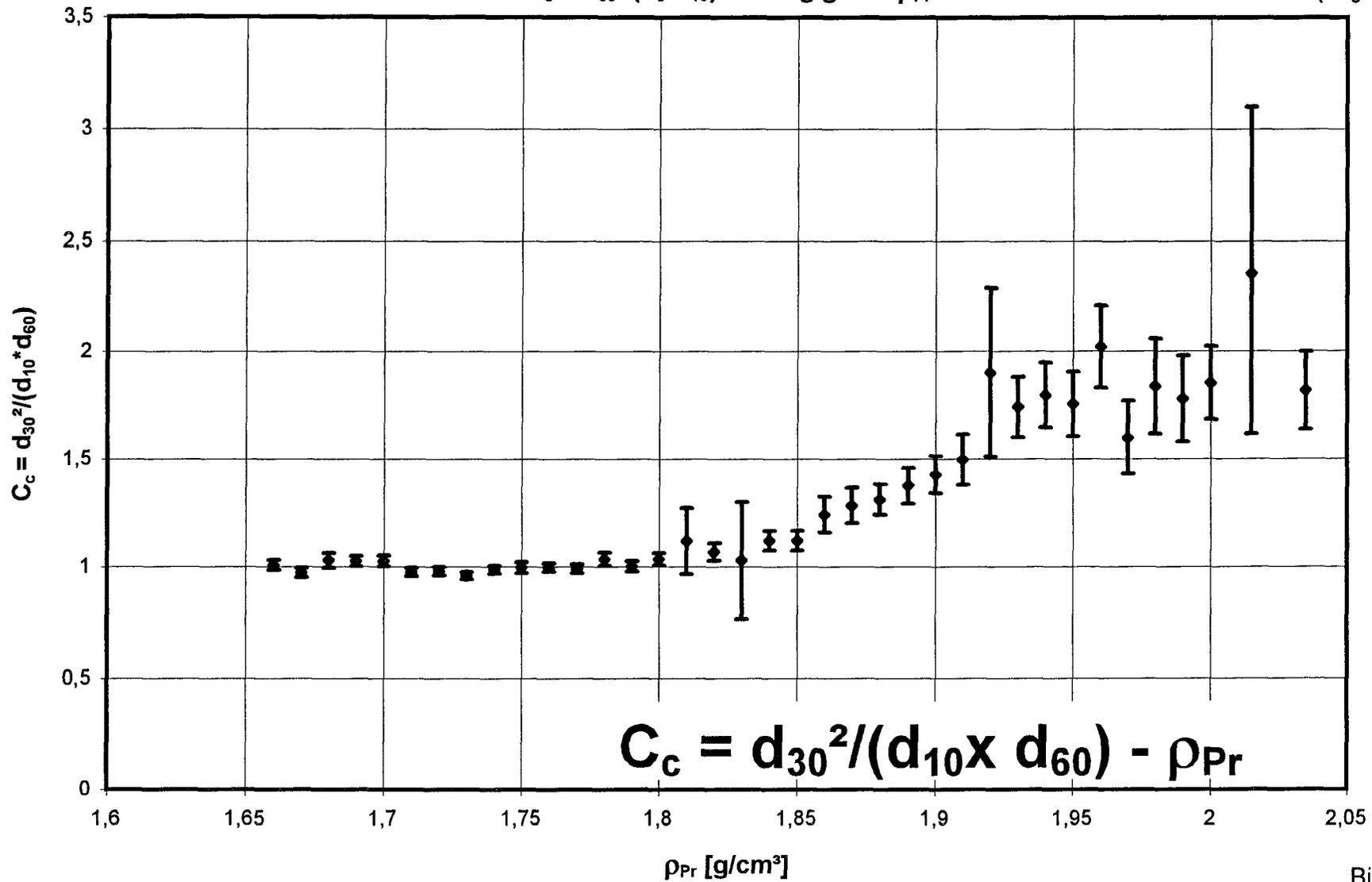


Bild 16

Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)

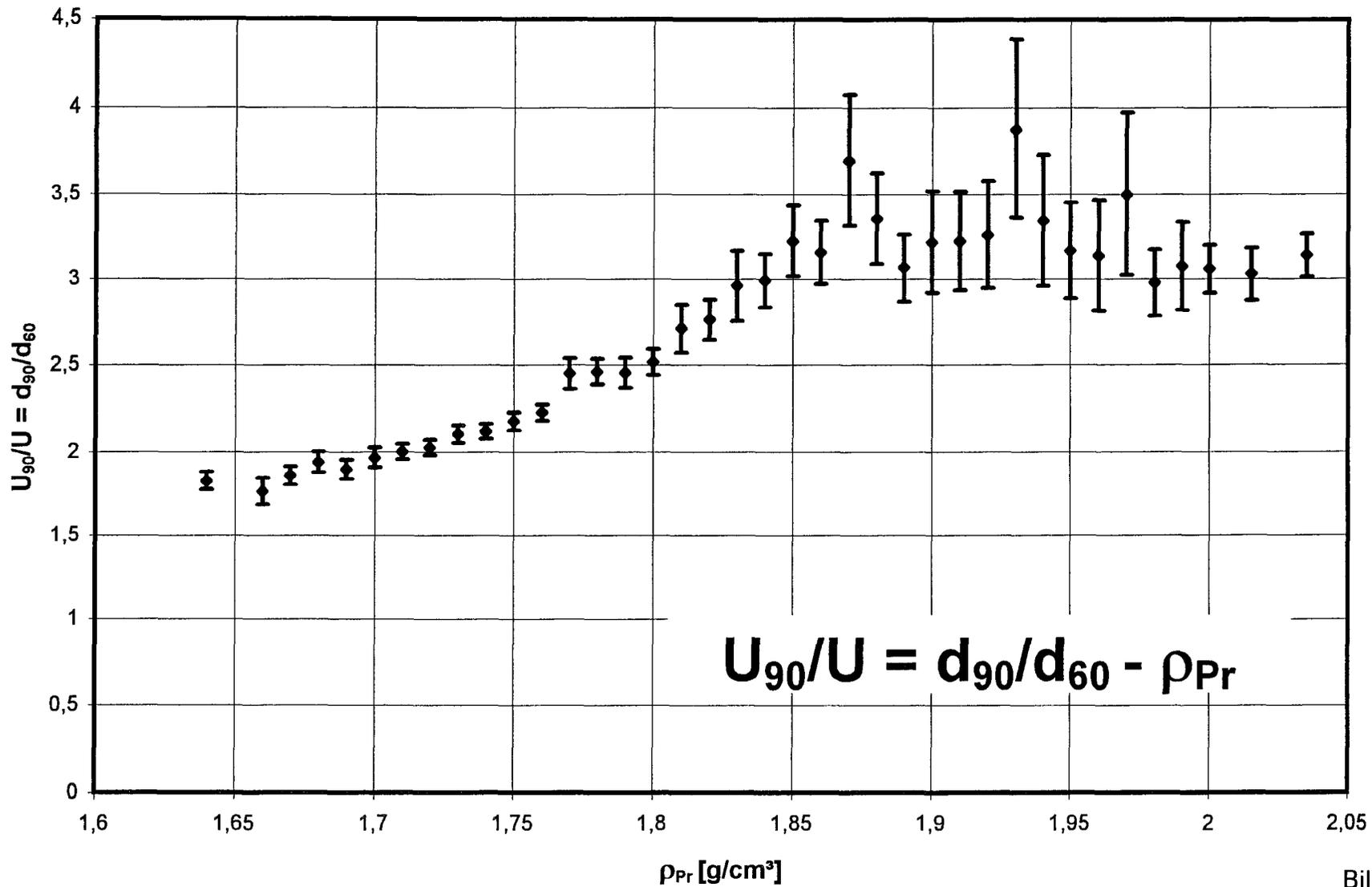


Bild 17

Wassergehalte (Mittelwerte) für Proctordichten $\rho_{Pr} = 1,65$ bis $2,05$

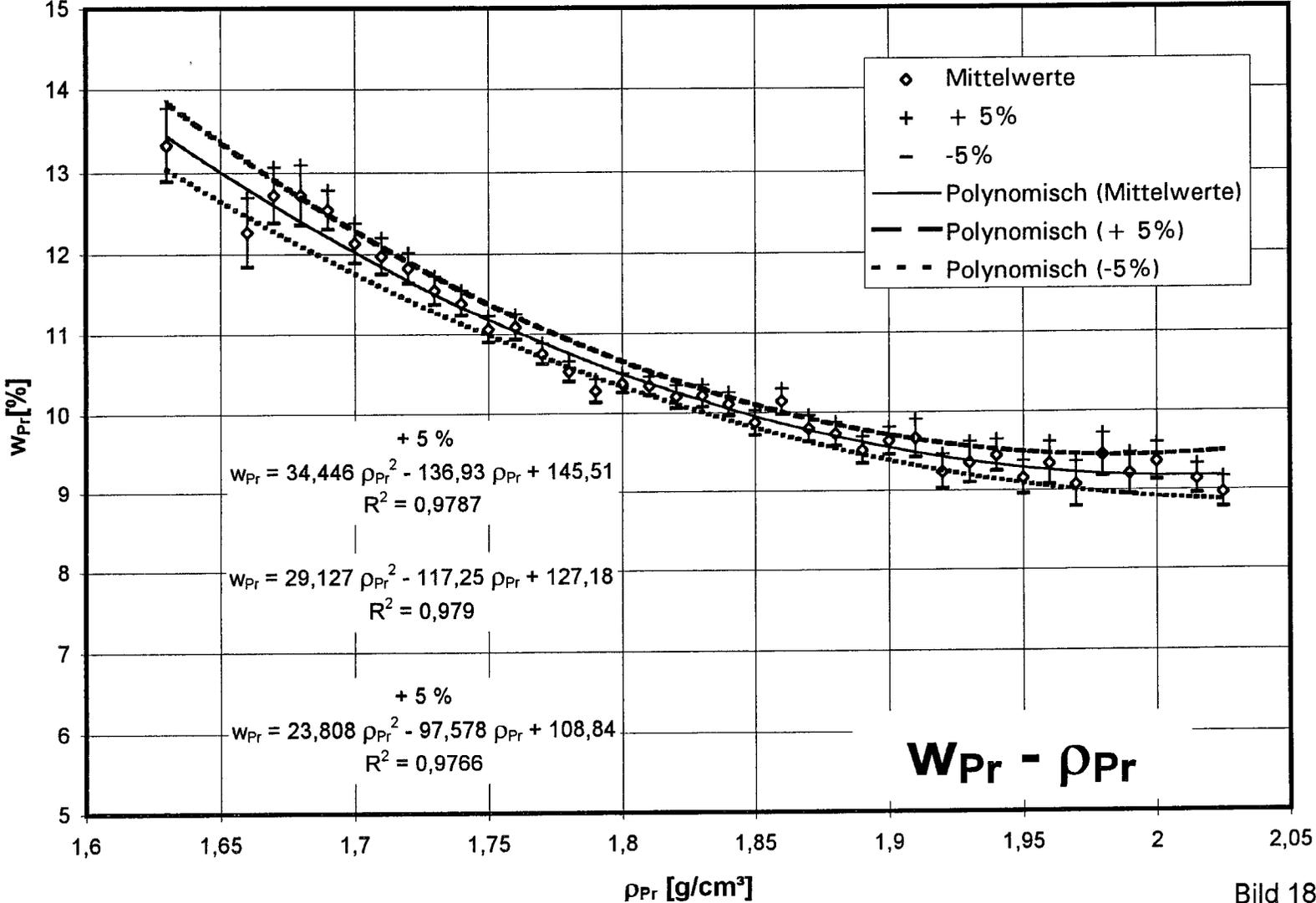


Bild 18

Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)

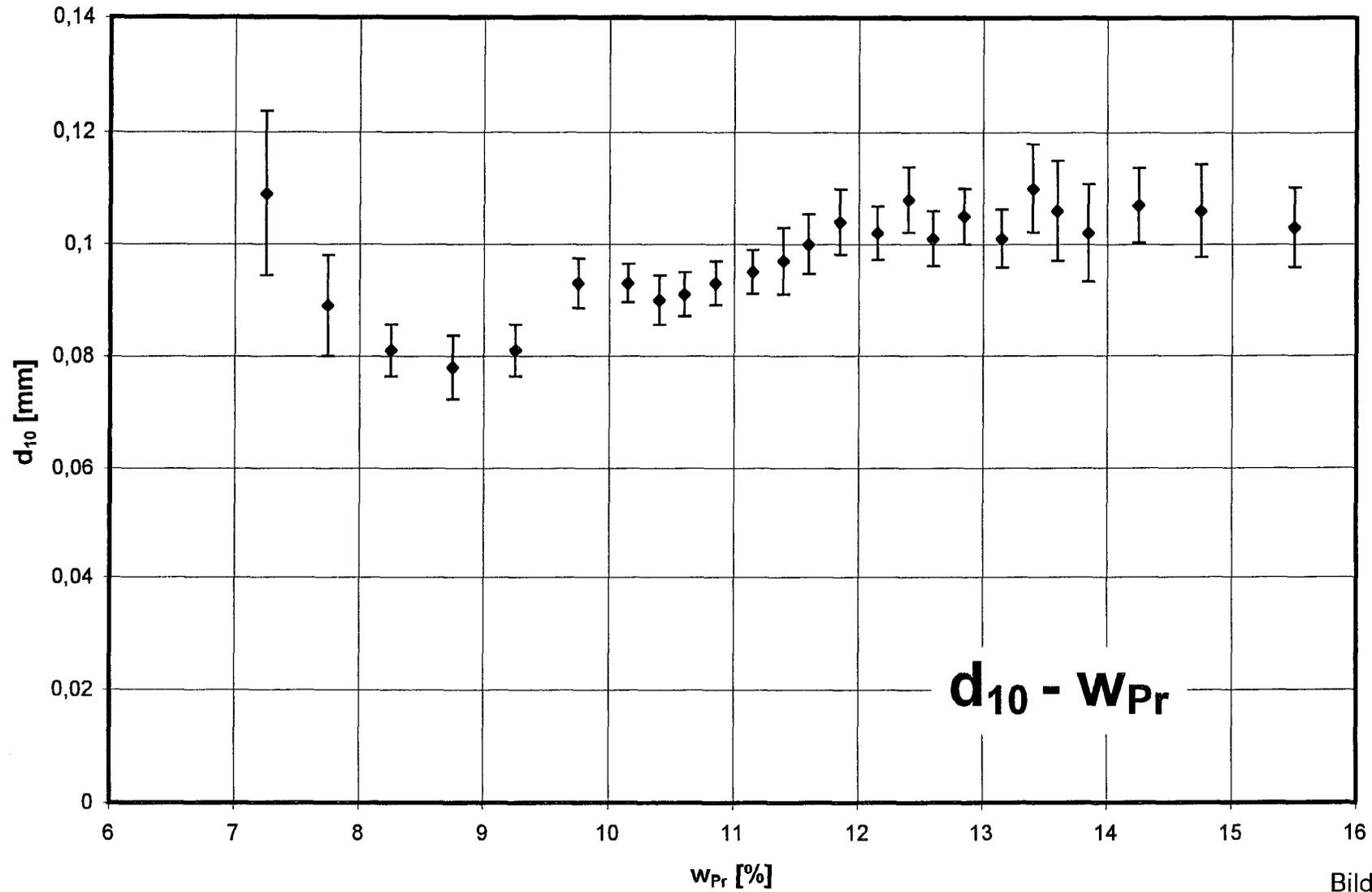
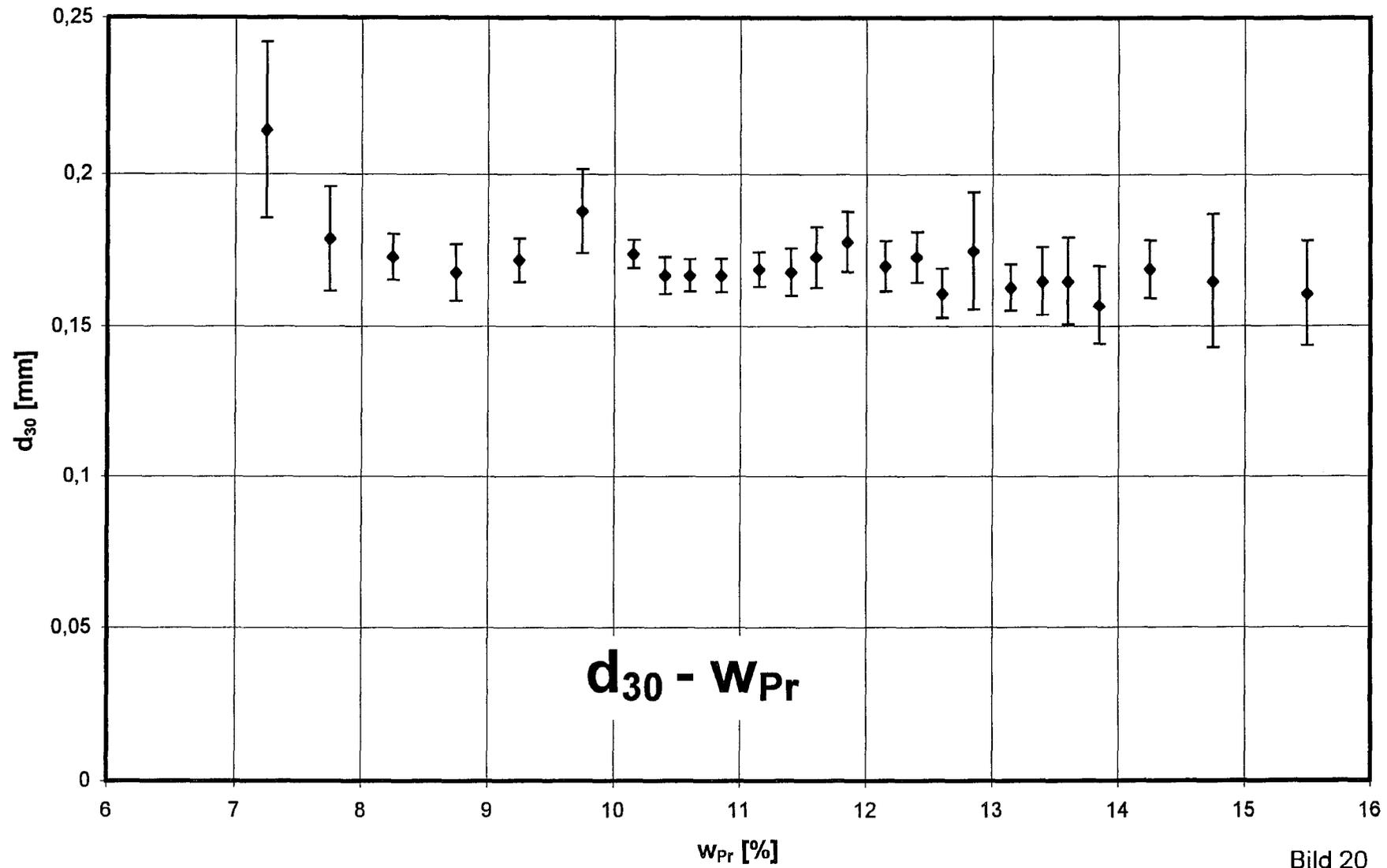


Bild 19

Abhängigkeit opt. Wassergehalt - d_{30}
(Mittelwerte mit 5%-Vertrauensbereichen)

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)



Abhängigkeit opt. Wassergehalt - d_{60}
(Mittelwerte mit 5%-Vertrauensbereichen)

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)

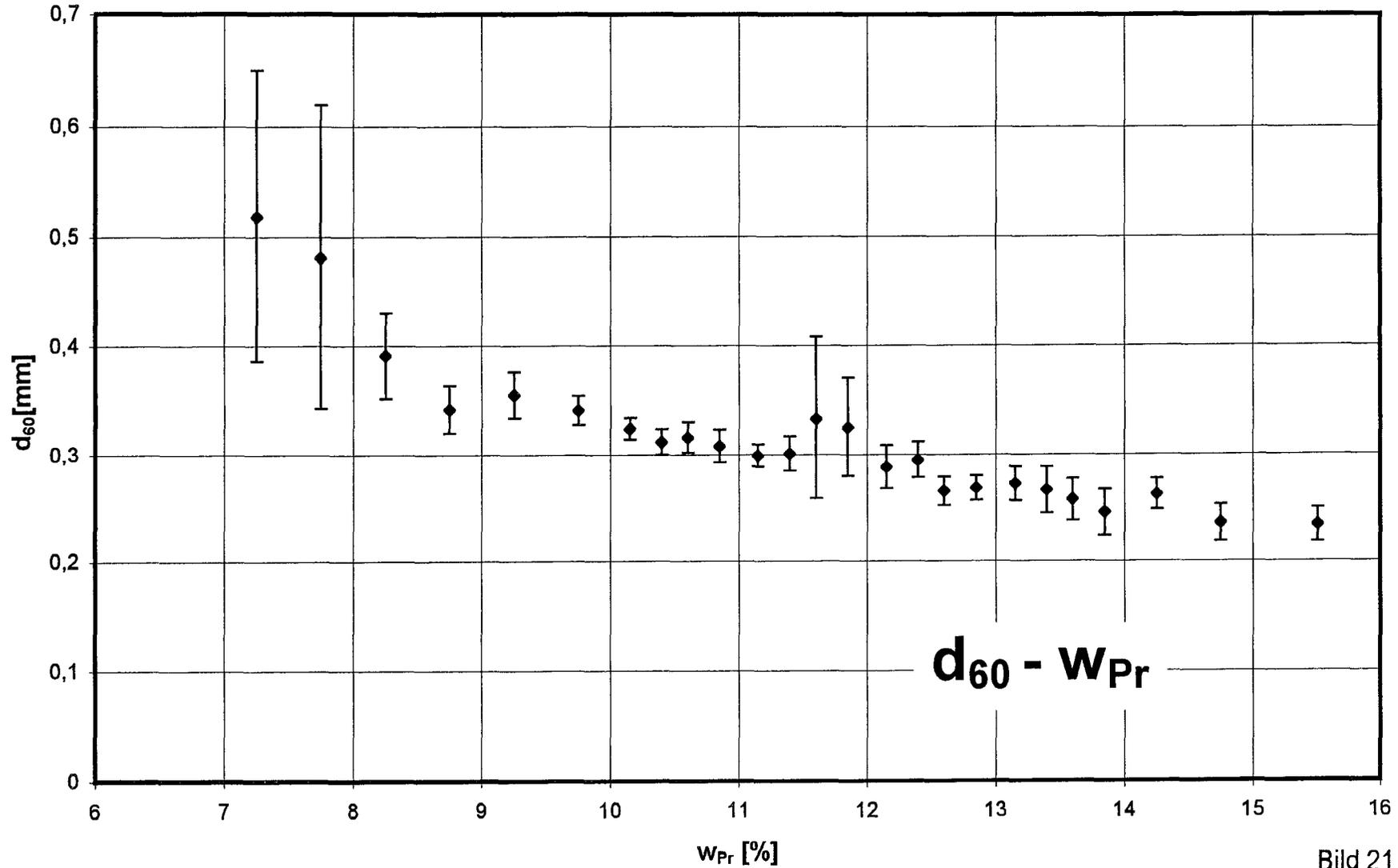


Bild 21

Abhängigkeit opt. Wassergehalt - d_{90}
(Mittelwerte mit 5%-Vertrauensbereichen)

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)

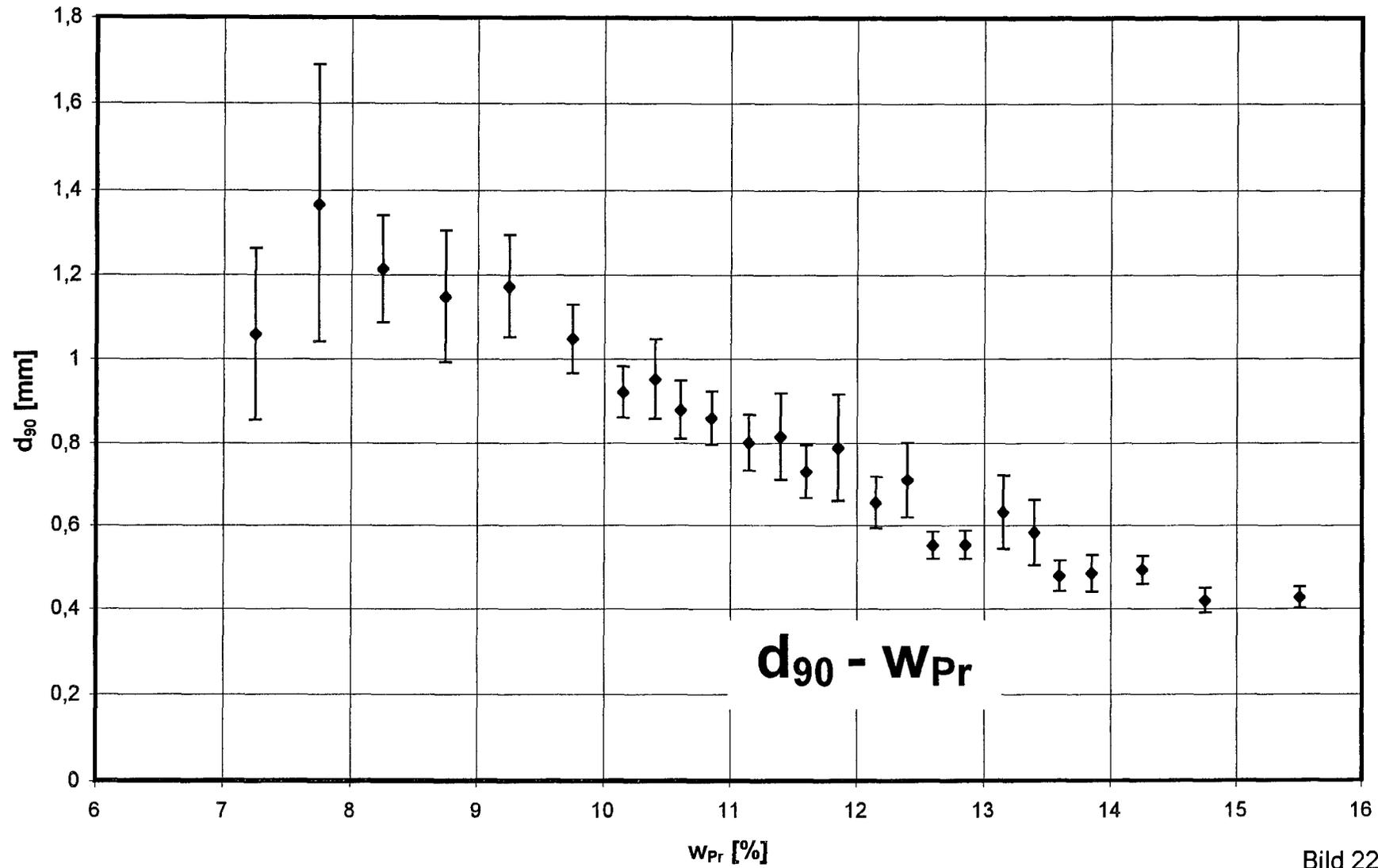


Bild 22

Abhängigkeit opt. Wassergehalt - U
(Mittelwerte mit 5%-Vertrauensbereichen)

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)

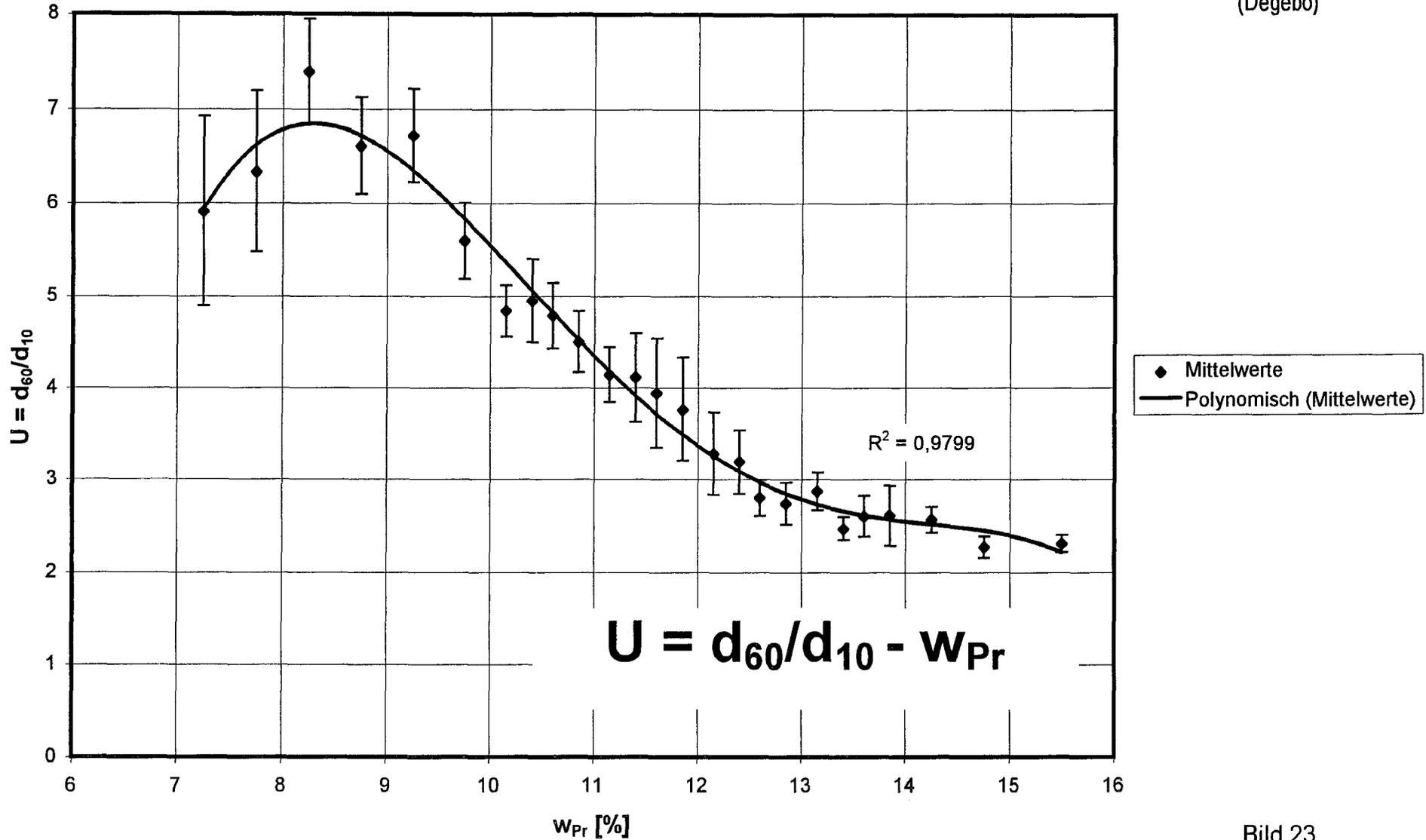


Bild 23

Abhängigkeit opt. Wassergehalt - U_{90}
(Mittelwerte mit 5%-Vertrauensbereichen)

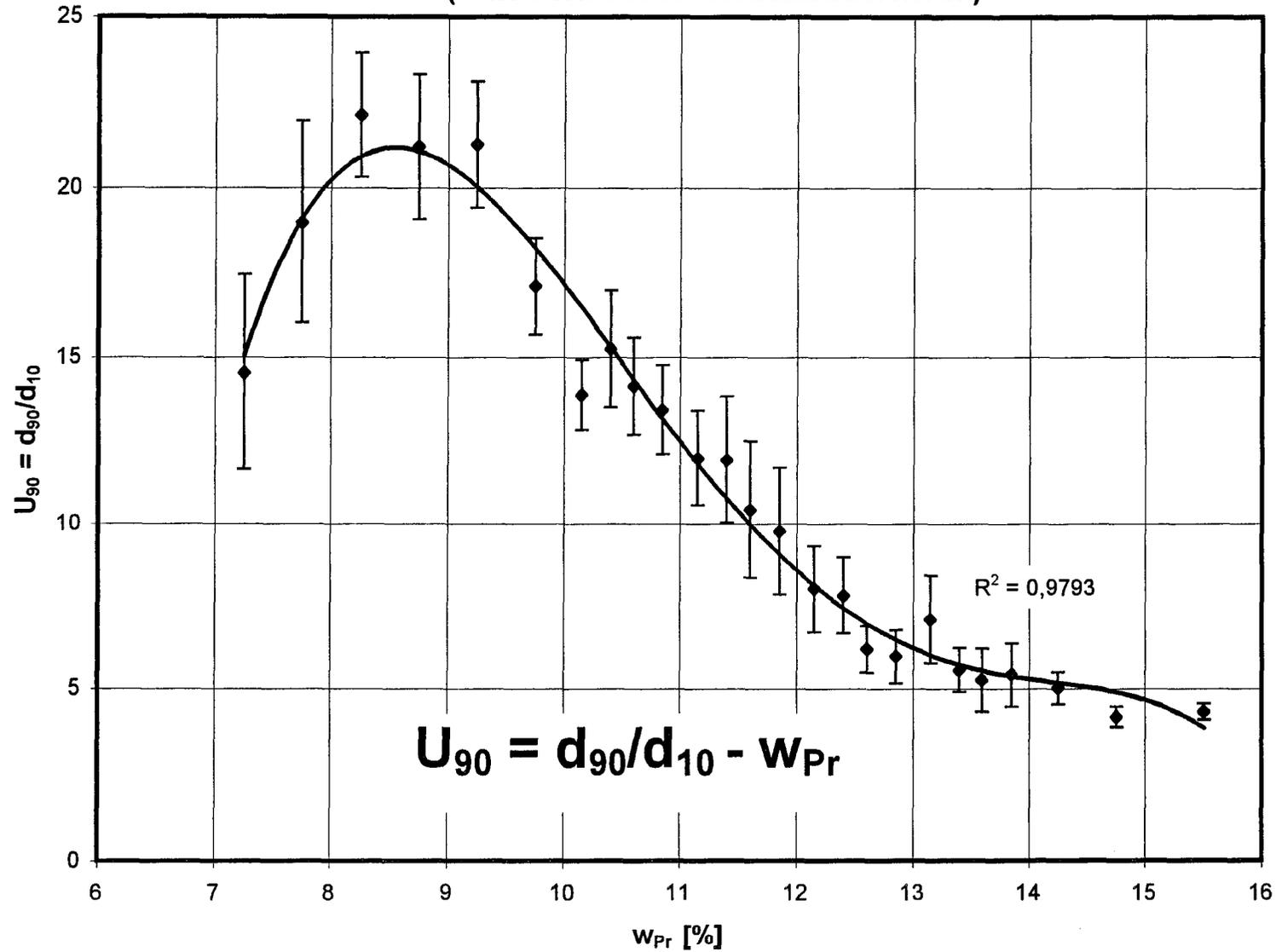


Bild 24

Abhängigkeit opt. Wassergehalt - C_c
(Mittelwerte mit 5%-Vertrauensbereichen)

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)

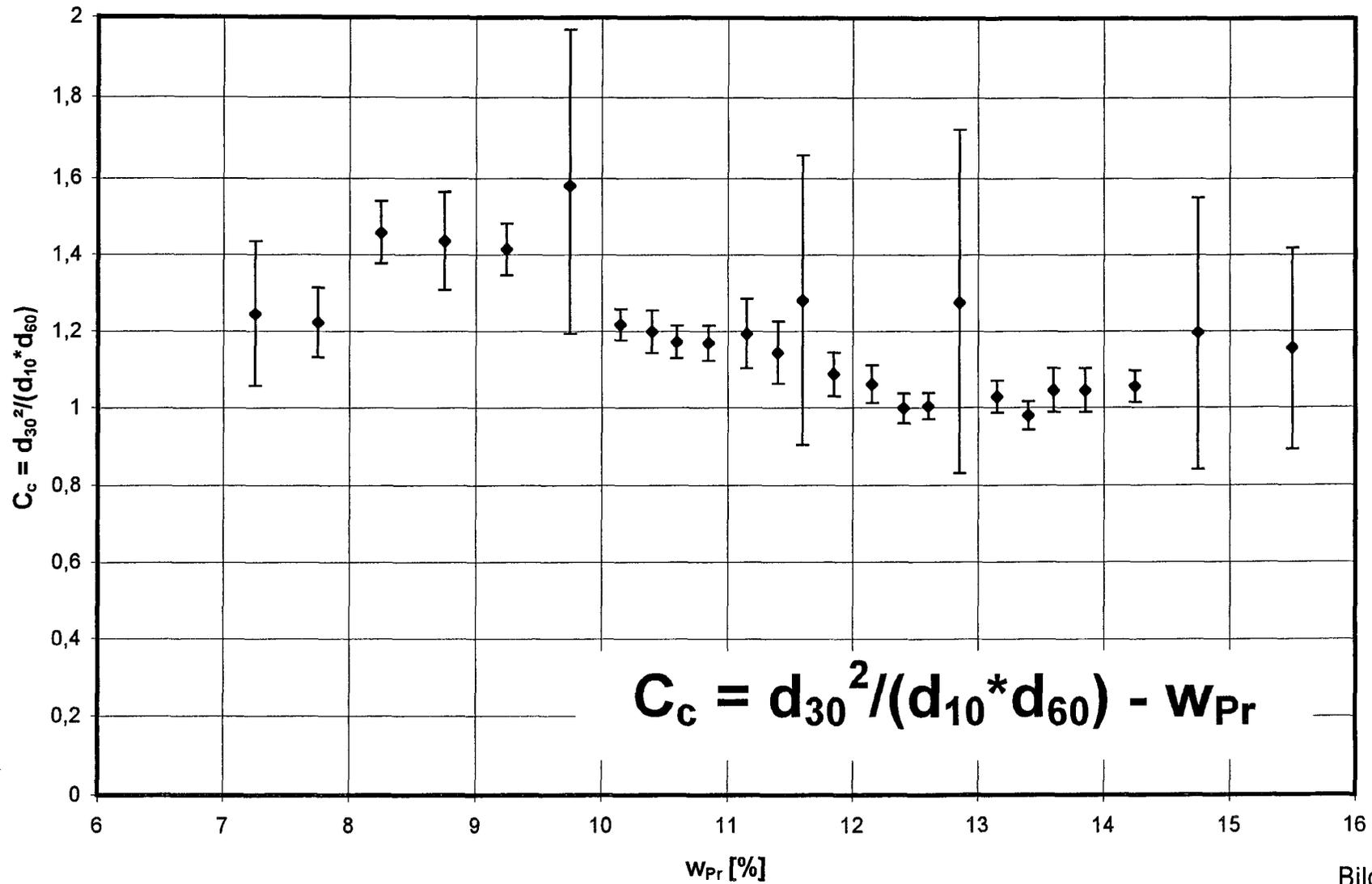


Bild 25

Abhängigkeit opt. Wassergehalt - U_{90}/U
(Mittelwerte mit 5%-Vertrauensbereichen)

Deutsche Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik
(Degebo)

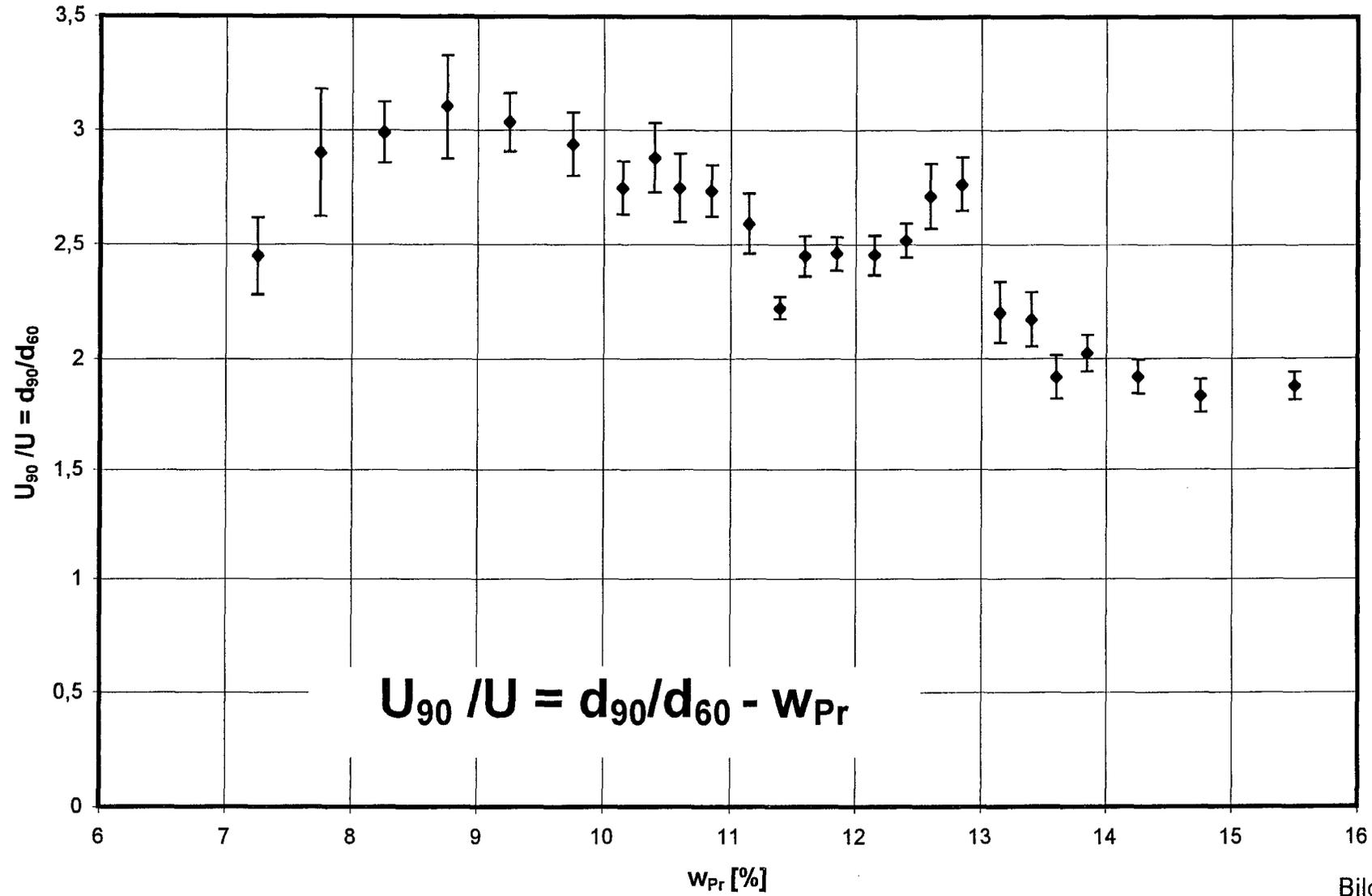


Bild 26

Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)

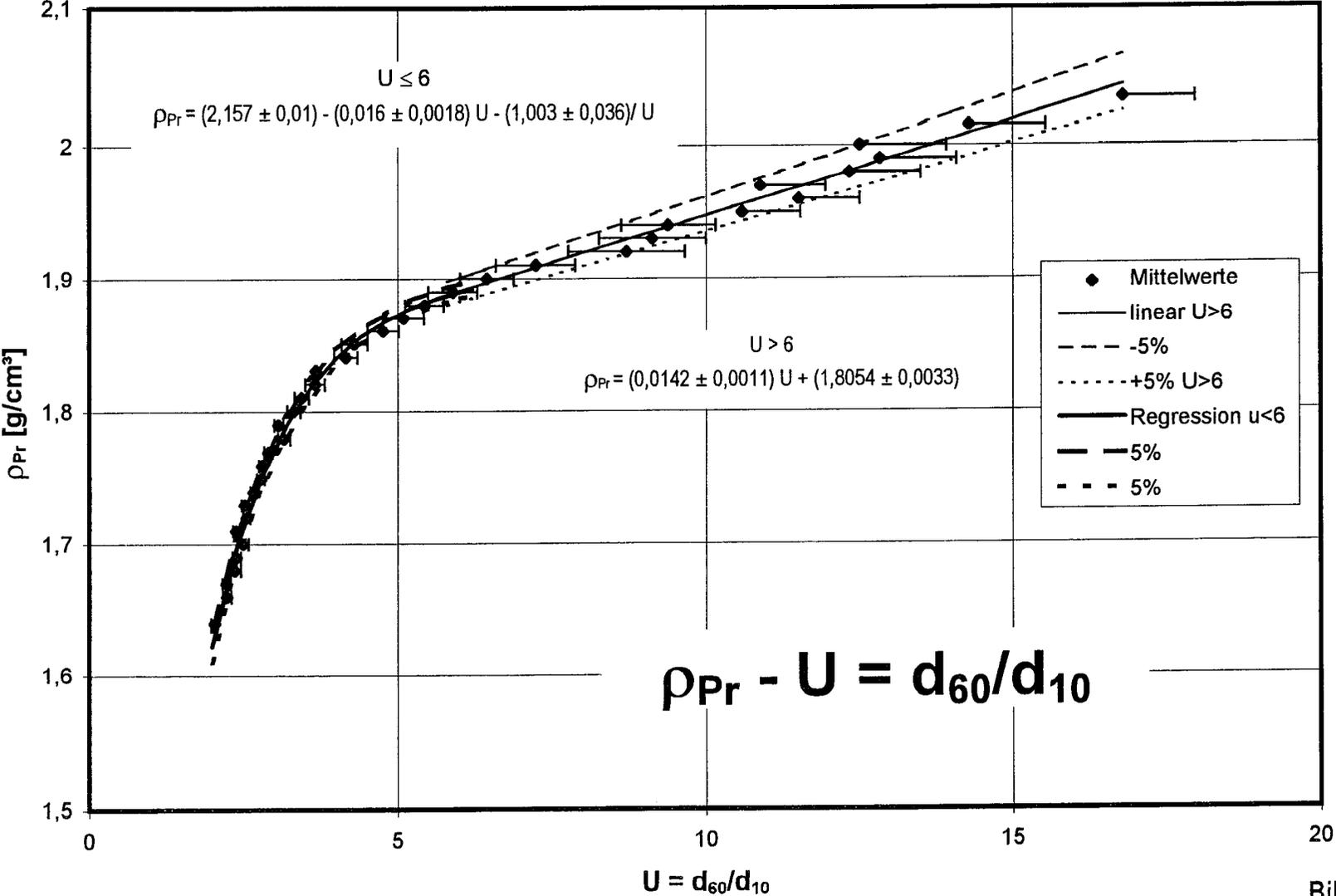


Bild 27

Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
 $U \leq 6$

Deutsche Forschungsgesellschaft
 für Bodenmechanik
 (Degebo)

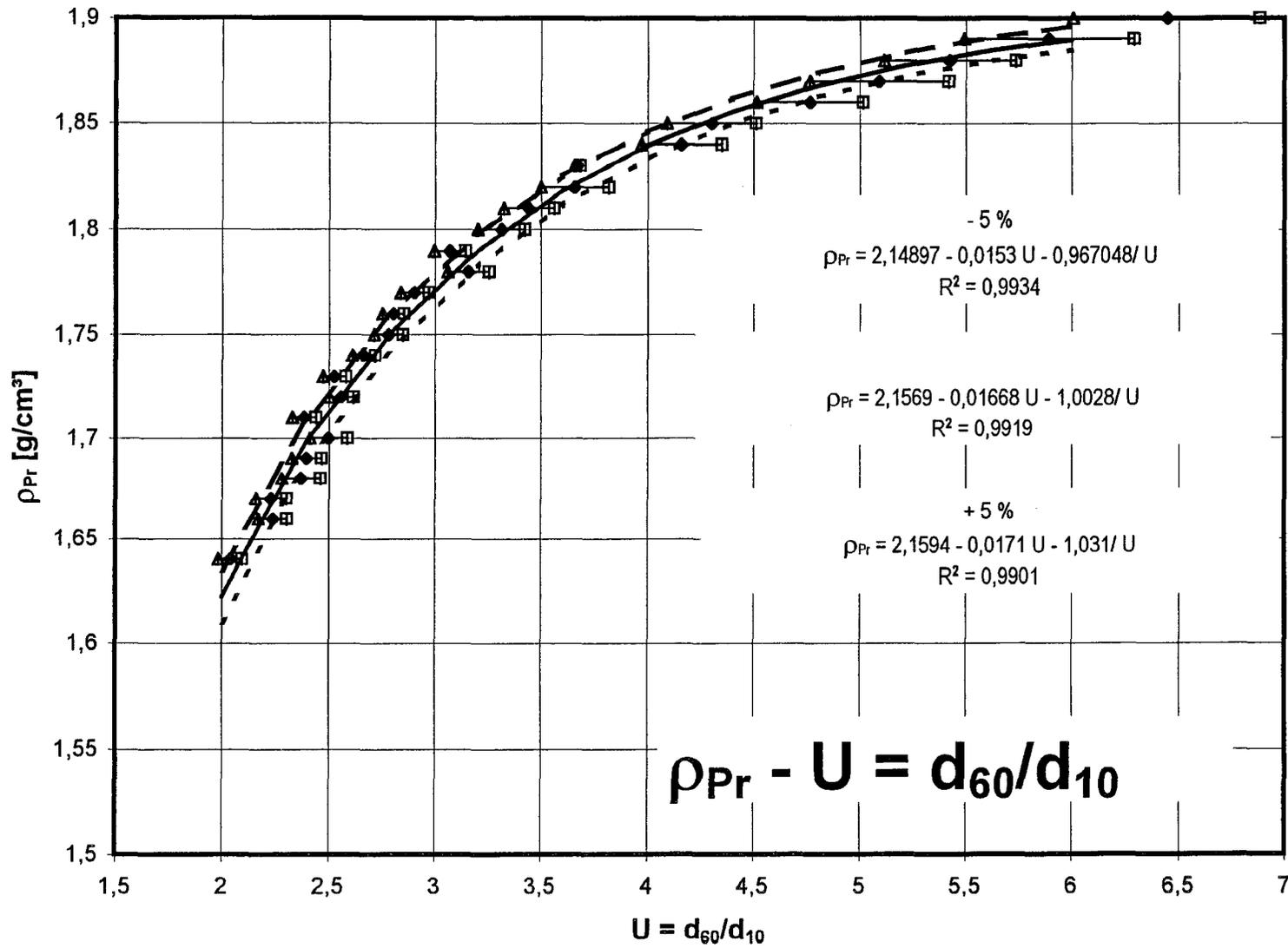


Bild 28

Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
 $U > 6$

Deutsche Forschungsgesellschaft
 für Bodenmechanik
 (Degebo)

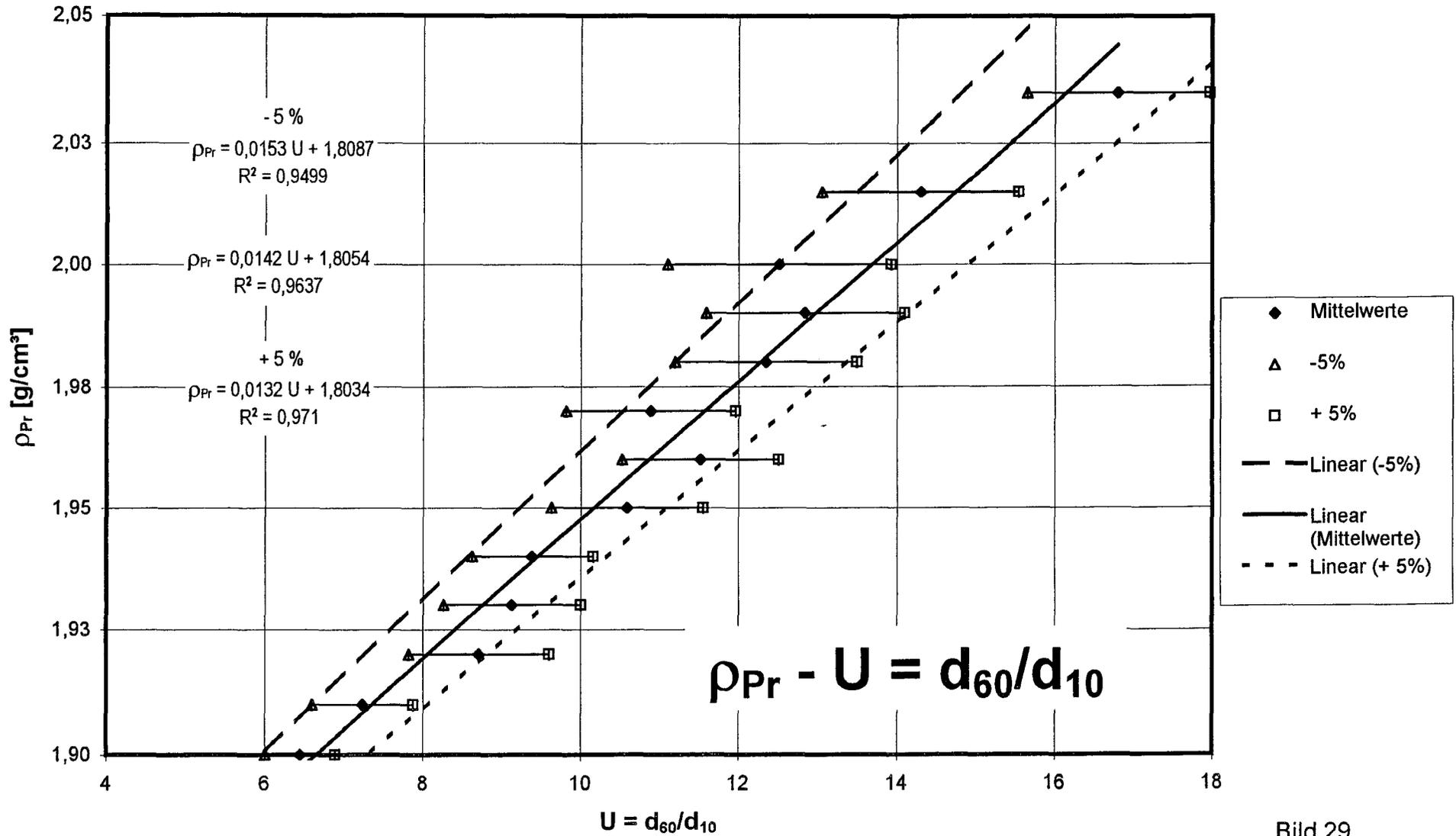


Bild 29

Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)

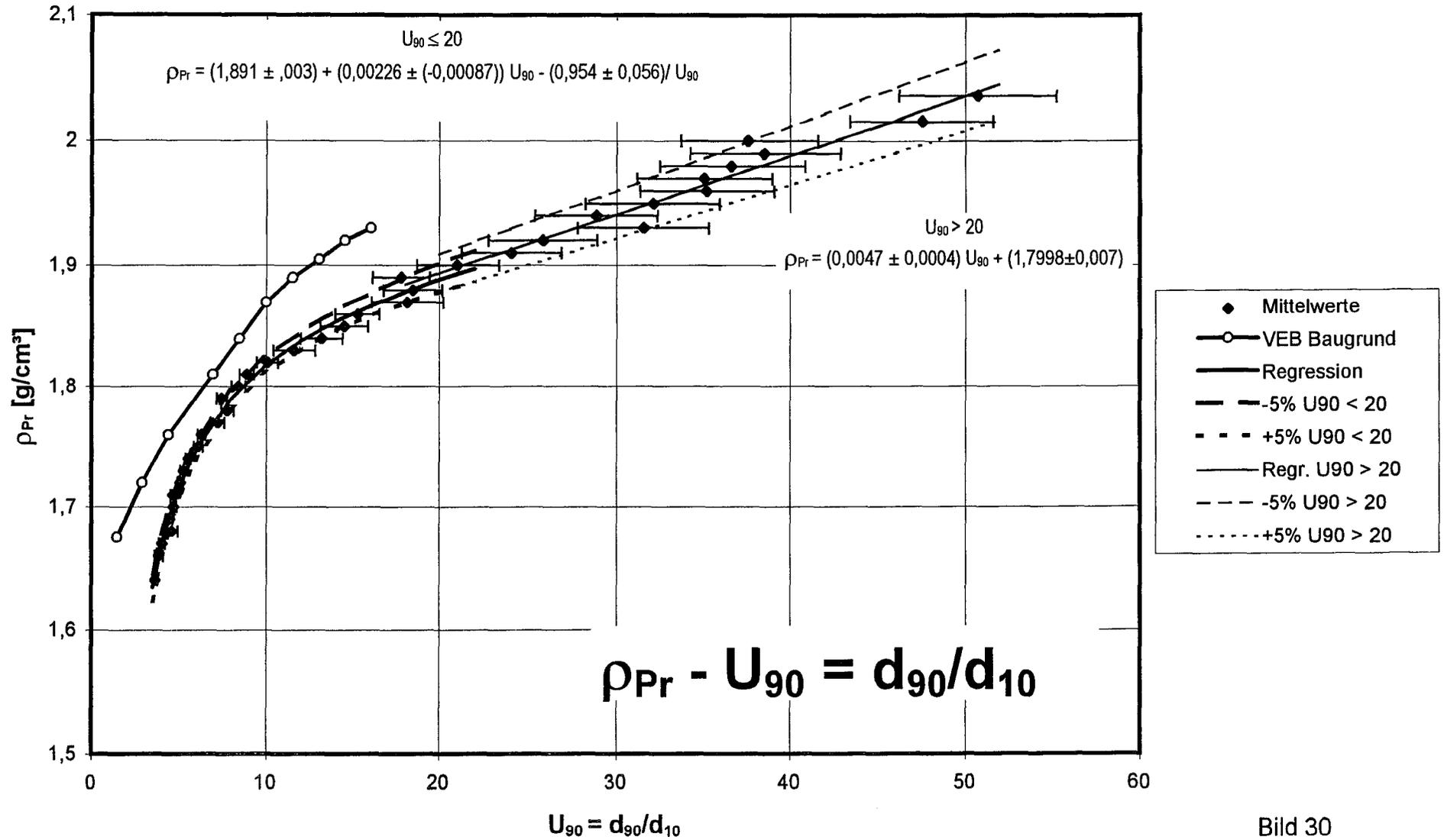


Bild 30

Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)

$U_{90} \leq 20$

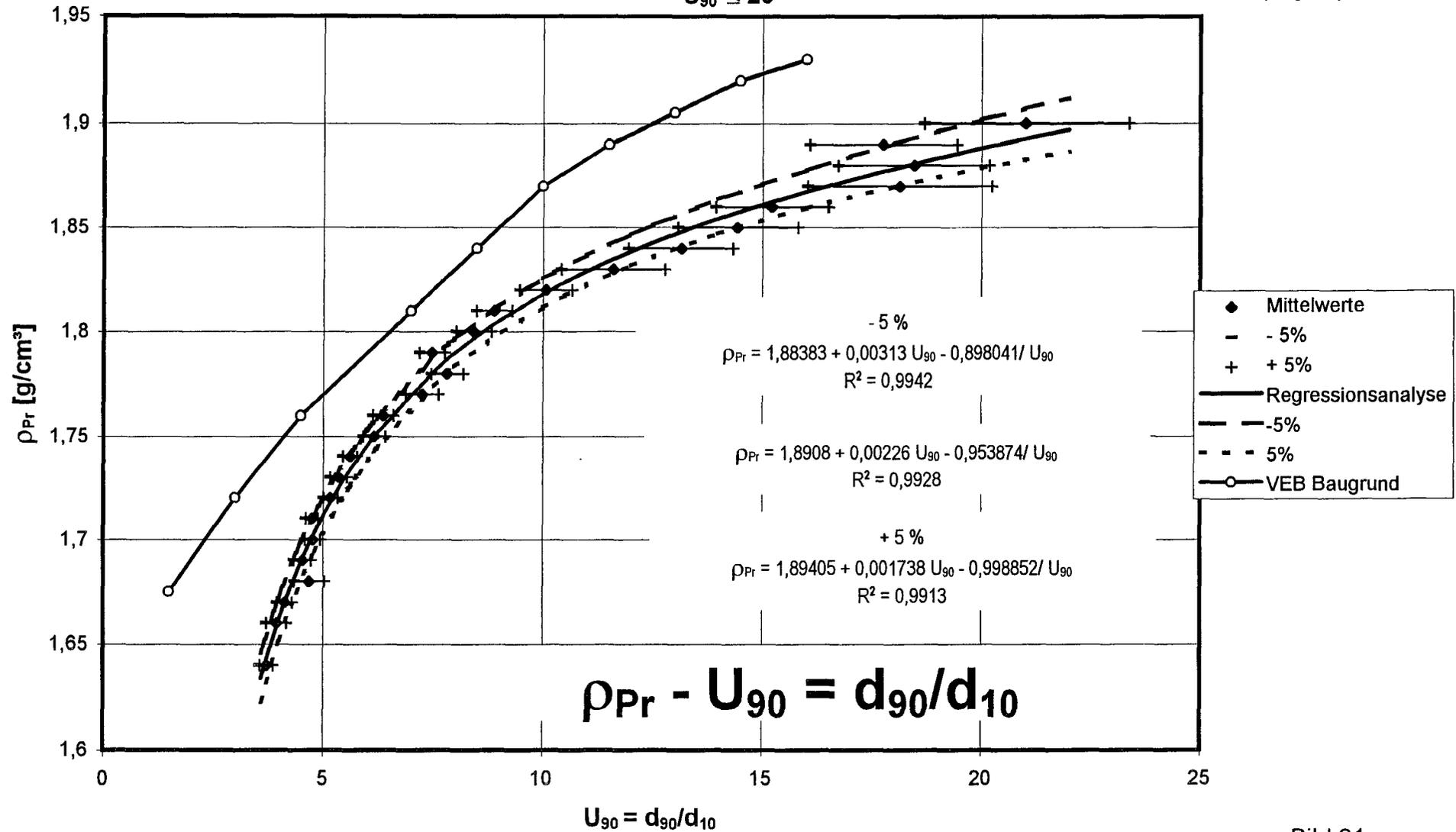


Bild 31

Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen mit Vertrauensbereichen (5 %)
 $U_{90} > 20$

Deutsche Forschungsgesellschaft
 für Bodenmechanik
 (Degebo)

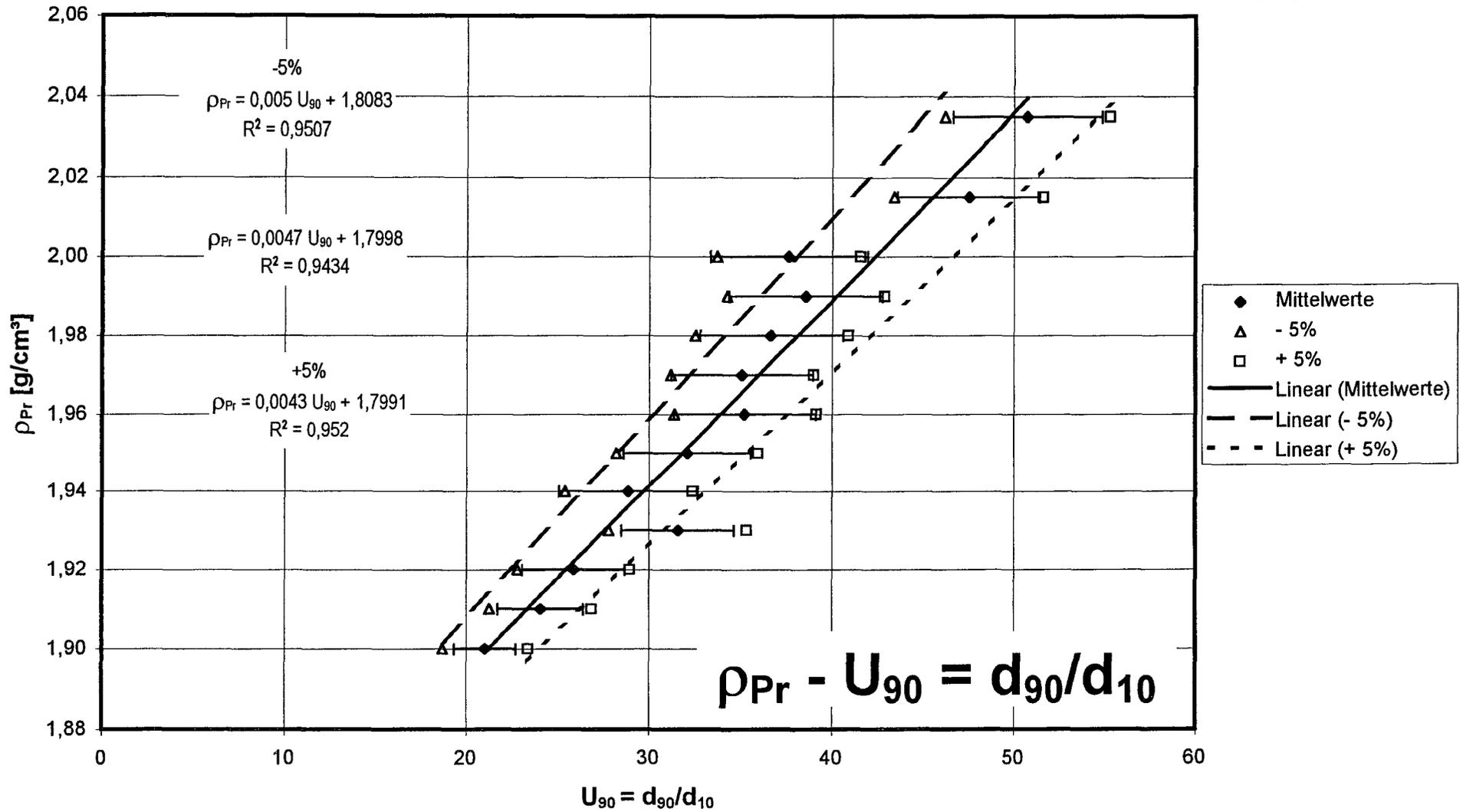


Bild 32

Vergleich mit Literaturangaben

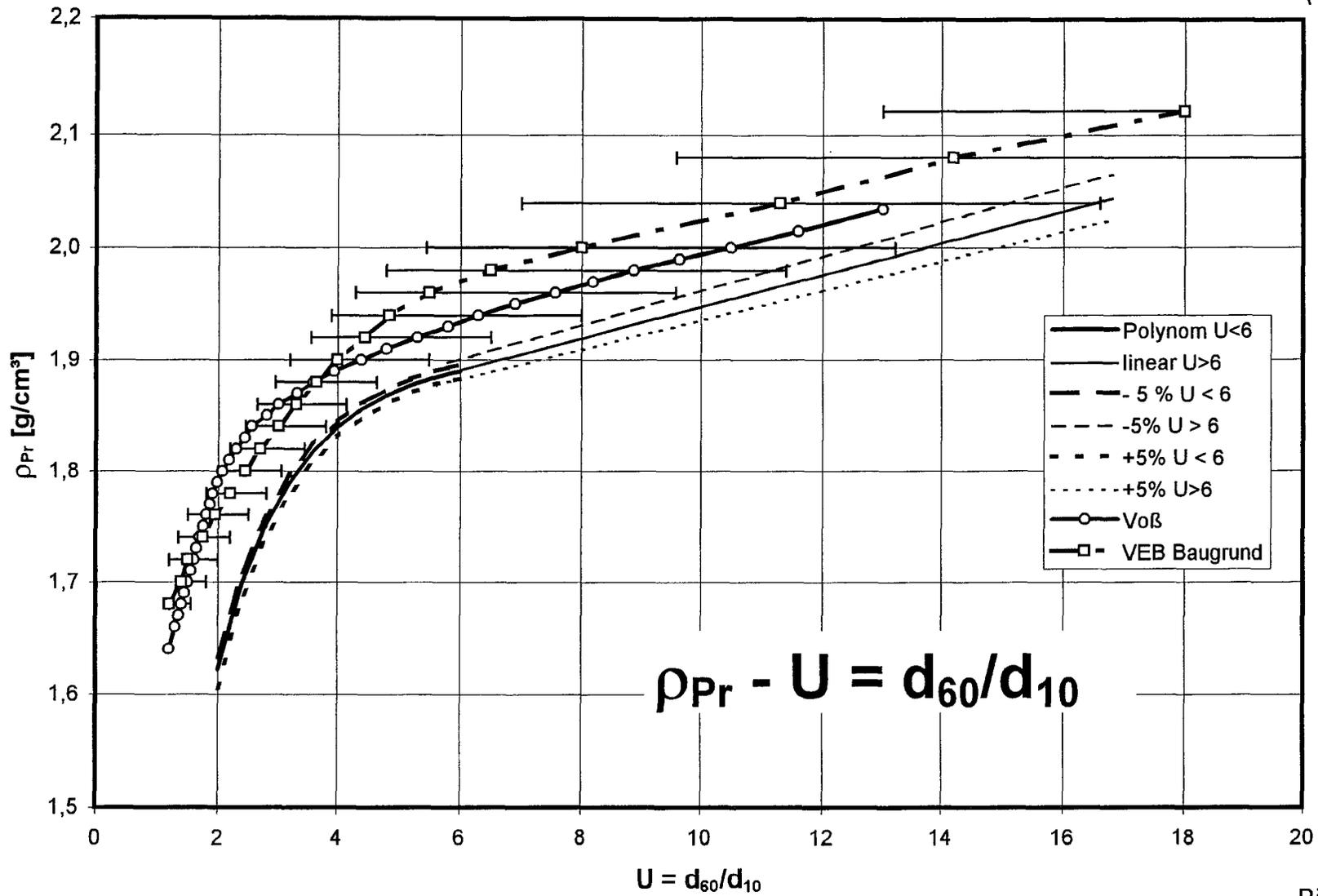


Bild 33