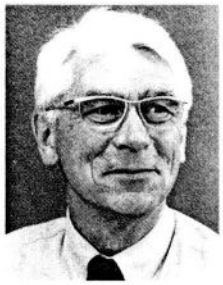
Der Dynamische CBR-Versuch – eine neue Qualitätskontrolle für den Erdbau

Prof. Dr.-Ing. Hans-Henning Schmidt und Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Volm, Fachhochschule Stuttgart – Hochschule für Technik, Stuttgart



Der Dynamische CBR-Versuch kann sowohl als schnell durchzuführender und damit sehr wirtschaftlicher Eignungsversuch im Labor als auch als Kontrollversuch auf der Baustelle zur Feststellung einer ausreichenden Verdichtung und Tragfähigkeit von Erdbaustoffen eingesetzt werden. Der im Labor ermittelte CBR_d-Wert wird Maßstab für die Qualitätskontrolle im Feld. Der Dynamische CBR-Versuch wird beschrieben. Für einen Lößlehm werden Versuchsergebnisse mitgeteilt. Die Ausführung des Versuchs in der Praxis wird für bindige und verbesserte bindige Böden empfohlen.

Beim Dynamischen CBR-Versuch handelt es sich um ein in Deutschland noch recht selten eingesetztes Prüfverfahren im Erdbau. Ähnlich wie der dynamische Plattendruckversuch wird er mit Hilfe des Leichten Fallgewichtsgeräts ausgeführt und ist daher sehr flexibel auch unter beengten Verhältnissen, zum Beispiel in schmalen Leitungsgräben, einsetzbar. Da es sich um ein indirektes Schnellprüfverfahren handelt, können in kurzer Zeit eine große Anzahl von Versuchen durchgeführt und diese statistisch ausgewertet werden. Der Dynamische CBR-Versuch wird zur Überprüfung der Tragfähigkeit, aber auch zum Nachweis einer ausreichenden Verdichtung eingesetzt. Einzigartig ist bei diesem Versuch, daß er sowohl im Labor als Eignungsversuch wie auch im Feld als Kontrollversuch unter nahezu gleichen Bedingungen durchgeführt werden kann.

Einleitung

Die standsichere und wirtschaftliche Dimensionierung moderner Erdbauwerke wie Verkehrsdämme, Start- und Landebahnen für den Luftverkehr oder auch Hochwasserrückhaltebecken und Dichtungsschichten im Deponiebau aus bindigen Erdmaterialien ist in hohem Maß vom Verdichtungsgrad D_{Pr} und der Tragfähigkeit (Verformungsmodul E_v) des verwendeten Erdbaustoffs abhängig.

Zur Überprüfung der Verdichtung stehen allgemein verschiedenste Verfahren zur Verfügung, zum Beispiel der Proctorversuch im Labor im Zusammenhang mit Dichtemessungen im Feld, die Bestimmung des Verformungsmoduls E_v oder die Prüfung durch Sondierungen. All diese Prüfverfahren haben den Nachteil, daß sie entweder nicht sofort einen Aufschluß über den Verdichtungsgrad liefern, da die Versuchsergebnisse erst im Labor ausgewertet werden müssen, oder aber daß keine direkte Beziehung zwischen den ermittelten Kennzahlen und dem Verdichtungsgrad D_{pr} besteht, was zusätzlich aufwendige Kalibrierungsversuche erforderlich macht. Unter dem ständig steigenden Zwang der Wirtschaftlichkeit im Bauwesen ist aber ein Prüfverfahren vonnöten, das sehr flexibel sowohl im Labor wie auch im Feld einsetzbar ist und dessen Ergebnisse in direkter Beziehung zum Verdichtungsgrad D_{pr} stehen, damit sofort auf der Baustelle Aussagen über die erreichte Verdichtung gemacht werden können. Der Dynamische CBR-Versuch ist der einzige Versuch, der diese Anforderungen erfüllt.

Versuchsbeschreibung

Der Dynamische CBR-Versuch (WEINGART, 1990) ist eine Modifizierung des in den USA entwickelten herkömmlichen CBR-Versuchs (sogenannter statischer CBR-Versuch). Dieser Versuch dient zur Qualitätskontrolle für den Unter- beziehungsweise Tragschichtbau von Straßen. Anders als in Deutschland verwendet man im angelsächsischen Ausland den CBR-Wert und nicht die E_v-Werte für die Dimensionierung von Straßenunterbauten und Tragschichten. Eine Beziehung zwischen E_{v1}- und CBR-Werten ist Bild 1 aus FLOSS (1997) zu entnehmen.

Der CBR-Versuch ist ein Tragfähigkeitsversuch, bei dem ein Stahlstempel mit konstanter

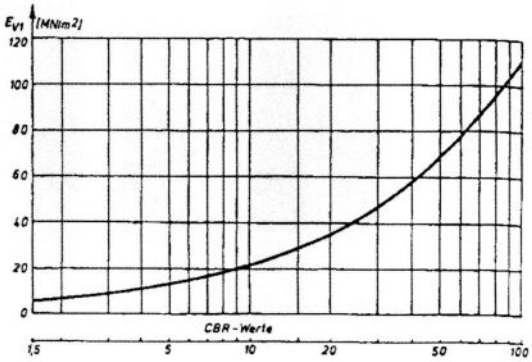


Bild 1. Beziehung zwischen CBR-Wert und E_{v1}.

Bild 2. Versuchsgeräte für den Dynamischen CBR-Versuch.

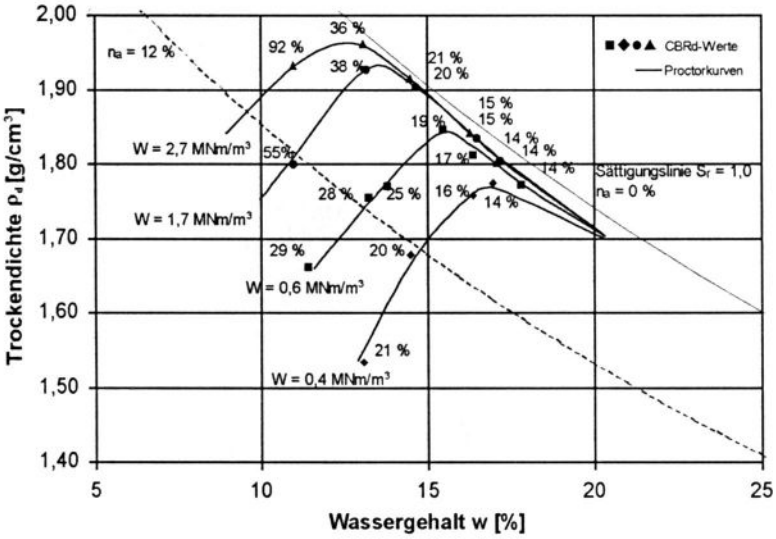


Bild 3. Proctorkurven bei unterschiedlicher Verdichtungsarbeit mit zugehörigen CBR_d-Werten.

Bild 4. Gegenüberstellung statischer und Dynamischer CBR-Werte.

Geschwindigkeit in den Boden eingedrückt wird. Die dafür erforderliche Kraft wird gemessen und zu der Kraft, die bei einem Standardmaterial (kalifornisches Schotter-Splitt-Gemisch) zur gleichen Eindringung führt, ins Verhältnis gesetzt. Der Verhältniswert wird CBR genannt (California Bearing Ratio) und in Prozent angegeben. Im Labor wird der Versuch im sogenannten CBR-Zylinder, im Feld direkt auf dem Planum durchgeführt. Nachteil des herkömmlichen CBR-Versuchs ist, daß der Feldversuch nur mit Hilfe eines Widerlagers, zum Beispiel eines beladenen LKWs durchgeführt werden kann. Dies erfordert einen ähnlich aufwendigen Versuchsaufbau wie beim Plattendruckversuch.

Der neue Dynamische CBR-Versuch unterscheidet sich vom herkömmlichen Versuch hauptsächlich durch die Art und die Geschwindigkeit der Lastaufbringung. Die Belastung, die für das Eindrücken des Stempels erforderlich ist, wird anstatt mit einer Belastungseinrichtung durch ein Fallgewicht aufgebracht (Bild 2). Dieses Fallgewicht wird aus einer definierten Höhe frei auf ein Federelement fallen gelassen. Der Versuch ist damit eine Weiterentwicklung des dynamischen Plattendruckversuchs. Durch die erzeugte Stoßlast wird der CBR-Stempel mit einem Durchmesser von 5 cm in den Boden eingedrückt. Die durch die impulsartige Belastung auftretende Beschleunigung des CBR-Stempels wird von einem Beschleunigungsaufnehmer gemessen, doppelt integriert und als dynamische Eindringung s_d [mm] angezeigt. Aus dieser wird dann der CBR_d-Wert nach der aus einer Potenzfunktion hergeleiteten, nicht dimensionsechten Formel errechnet:

$$CBR_d = \frac{87,3}{s_d^{0,59}} \quad [\%]$$

Stand der Technik

Von WEINGART et al. (1986) wurde die Eignung des Dynamischen CBR-Versuchs für Mineralstoffe im Straßenbau untersucht. Das Ergebnis dieser Untersuchungen war, daß zwischen statischem und Dynamischem CBR-Versuch eine gute Korrelation besteht. Über die Einsatzmöglichkeiten des Dynamischen CBR-Versuchs bei bindigen Böden liegen jedoch bislang wenig Erkenntnisse vor. Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden daher Dynamische CBR-Versuche an Lößlehm durchgeführt und untersucht, ob auch für bindige Böden eine Korrelation zum statischen CBR-Versuch besteht.

Damit der Versuch sowohl für Eignungs- wie auch für Kontrollversuche eingesetzt werden kann, ist der Einfluß des starren Rands des CBR-Zylinders auf die Meßergebnisse von entscheidender Bedeutung. Wie stark ein solcher Einfluß ist, wurde sowohl versuchsmäßig als auch rechnerisch mit dem FE-Programm Plaxis geklärt.

Versuchsergebnisse

Für den verwendeten Lößlehm wurden folgende mittlere Bodenkennwerte ermittelt:

- Natürlicher Wassergehalt w = 17,2 %,
- Fließgrenze w_L = 32,8 %,
- Ausrollgrenze w_P = 16,7 %,
- Plastizitätszahl I_p = 16,1 %,

- Klassifikation nach DIN 18196 TL,
- Proctordichte $\rho_{Pr} = 1{,}82$ t/m³,
- Optimaler Wassergehalt $w_{Pr} = 15{,}6$ %.

Im Labor wurden Dynamische CBR-Versuche an Böden durchgeführt, die mit unterschiedlicher Verdichtung und Wassergehalt eingebaut waren. Es zeigt sich, daß die CBR-Werte und damit die Tragfähigkeit in hohem Maß vom Wassergehalt abhängig sind. Die CBR-Werte sind dann am größten, wenn sich der Boden im festen, trockenen Zustand befindet; mit zunehmendem Wassergehalt nehmen sie ab. Bei Proben, deren Wassergehalte unter dem optimalen Wassergehalt liegen, bewirkt eine Erhöhung der Verdichtungsarbeit auch eine Erhöhung der CBR-Werte. Bei Wassergehalten auf der nassen Seite des Proctoroptimums führt hingegen eine Erhöhung der Verdichtungsarbeit zu einer Verringerung der CBR-Werte. Das bedeutet, daß nur durch eine Erhöhung der Verdichtungsarbeit auf der trockenen Seite eine Steigerung der Tragfähigkeit erreicht werden kann. Ähnliche Zusammenhänge für Trockendichte, Wassergehalt und Verformungsmodul E_{v2} wurden für einen schluffigen Kiessand von KRÖBER (1987) aufgezeigt. Im Erdbau mit bindigen Böden sind also der Verdichtungsgrad wie auch der Nachweis ausreichender Tragfähigkeit wichtig, was auch in der ZTVE-StB 94 hinsichtlich der Anforderung an das Planum von Straßen Niederschlag gefunden hat. Dieser Umstand macht den Einsatz des Dynamischen CBR-Versuchs interessant.

Durch ein Zusammenführen von CBR-Versuch (Tragfähigkeit) und Proctorversuch im Labor (Bild 3) und Festlegung von zu erreichenden CBR_d-Grenzwerten können mit CBR-Versuchen im Feld Rückschlüsse auf den Verdichtungsgrad gezogen werden. Der Dynamische CBR-Versuch genügt damit allein dem Anspruch eines Kontrollversuchs für bindige oder verbesserte bindige Böden: Er gibt Auskunft über Tragfähigkeit und Verdichtungsgrad.

Für einen Eignungsversuch sollten an den jeweiligen Proctorproben CBR_d-Werte bestimmt werden. Dies ist zum Beispiel für verschiedene Verdichtungsarbeiten W im Bild 3 erfolgt. Als Kontrollwerte auf der Baustelle kann, bei Annahme gleicher Verdichtungsarbeit, dann ein zulässiger Bereich von CBR_d-Werten festgelegt werden.

Können nun noch Korrelationen zum statischen CBR-Versuch (Bild 4) und damit zu den E_v-Werten des Plattendruckversuchs hergestellt werden (vgl. Bild 1), sind herkömmliche Bemessungsverfahren des Erd- und Straßenbaus verwendbar (BÖLLING, 1972).

Bild 4 zeigt die Ergebnisse von Versuchen, die unter denselben Bedingungen (Wassergehalt,

Verdichtungsarbeit) im Labor durchgeführt wurden. Es läßt sich zwischen dem statischen und dem Dynamischen CBR-Versuch für die Bodenart Lößlehm auf der trockenen Seite des Proctoroptimums eine für erdbautechnische Zwecke ausreichende Korrelation erkennen. Mit zunehmendem Wassergehalt wird die Abweichung zwischen statischem und dynamischem CBR-Wert größer. Dies hängt zum einen mit einem höheren Porenwasserüberdruck, zum anderen mit einer Dämpfung der Stoßbelastung durch Mantelreibung und Verdichtung beim Dynamischen CBR-Versuch zusammen. Diese zu feuchten Böden eignen sich allerdings ohne Verbesserung ohnehin nicht für den qualifizierten Erdbau.

Bei bindigen Böden ist der in der Arbeitsanleitung der Lieferfirma geforderte Vorbelastungsstoß zum Erzielen einer ebenen Prüfoberfläche kritisch zu bewerten. Ein solcher Vorbelastungsstoß verursacht schon vor der Messung des CBR_d-Werts so große Eindringungen, daß der Boden unter dem Stempel viel zu stark verdichtet wird und man zudem mit einer erheblichen Mantelreibung beim eigentlichen Belastungsstoß rechnen muß. Dies hat zur Folge, daß das Eindringen des Stempels stark abgemindert wird, woraus ein höherer CBR-Wert resultiert. Eine Korrelation zwischen dynamischem und statischem CBR-Wert ist dann nicht mehr erkennbar. Deshalb ist bei bindigen Materialien auf einen Vorbelastungsstoß zu verzichten.

Wichtig für die Übertragbarkeit der Laborergebnisse ins Feld ist die Frage, wie stark der Rand des CBR-Zylinders die Ergebnisse der Laborversuche beeinflußt. Dies wurde anhand von Vergleichsversuchen im Zylinder mit 15 und 25 cm Durchmesser untersucht. An Sonderproben, in die senkrechte und waagrechte Sandschichten eingebracht wurden, ließ sich zudem eine Aussage über die Ausbildung eines Bruchkörpers machen. Die Versuchsauswertung an den so vorbereiteten Proben ergab, daß es mit dem untersuchten Lößlehm im Dynamischen CBR-Versuch zur Ausbildung eines sogenannten Verformungsbruchs kommt. Der Boden wird nur seitlich verdrängt, Gleitfugen wie beim Grundbruch bilden sich nicht aus. Der Rand hat keinen Einfluß auf die Versuchsergebnisse.

Die Nachrechnung des herkömmlichen CBR-Versuchs und des dabei festgestellten Verformungsbruchs mit der Methode der Finiten Elemente mit dem Programm Plaxis unter Verwendung elasto-plastischer Stoffgesetze konnte weder mit dem Stoffgesetz nach Mohr-Coulomb noch mit dem Soft Soil Modell befriedigend vollzogen werden. Dies weist sowohl auf den notwendigen Forschungsbedarf über die Ausbildung von Brucherscheinungen bei bindigen Böden als auch auf die Erfordernis einer Weiterentwicklung der verschiedenen Stoffgesetze hin.

Schlußbemerkung

Der Dynamische CBR-Versuch ist vor allem für bindige beziehungsweise mit hydraulischen Bindemitteln verbesserte bindige Böden geeignet. Je grobkörniger das Prüfgut ist, desto fragwürdiger wird jedoch die Anwendbarkeit dieses Versuchs, da mit einer Beeinträchtigung der Ergebnisse aufgrund des kleinen Stempeldurchmessers sowie dem Auftreten eines Einspanneffekts im CBR-Zylinder im Labor zu rechnen ist. Für kiesige Böden sind daher der Plattendruckversuch beziehungsweise die Sondierung die geeignetsten Kontrollversuche für eine ausreichende Verdichtung. Es bestehen dafür gesicherte Korrelationen zwischen Verdichtungsgrad und E_v-Wert beziehungsweise Eindringwiderstand.

Abschließend kann festgestellt werden, daß sich der Dynamische CBR-Versuch ohne Zweifel vor allem zur Durchführung von Verdichtungskontrollen, aber auch für die Nachprüfung der Tragfähigkeit von Erdplanien eignet. Nur der Dynamische CBR-Versuch kann sowohl als schnell durchzuführender und damit sehr wirtschaftlicher Eignungsversuch im Labor als auch als Kontrollversuch im Feld zur Feststellung einer ausreichenden Verdichtung und Tragfähigkeit von Erdbaustoffen eingesetzt werden. Er stellt also den Ideal-Versuch dar. Der im Labor ermittelte CBR_d-Wert wird Maßstab für die Qualitätskontrolle im Feld. Die Autoren werden auf diesem Gebiet weitere Forschung zur Klärung einiger theoretischer Fragen betreiben und empfehlen den Versuch zur Anwendung in der Praxis.

Quellennachweis

BÖLLING, W.-H. (1972): Bodenmechanik der Stützbauwerke, Straßen und Flugpisten. Wien: Springer Verlag.

FLOSS, R. (1997): ZTVE-StB 94, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Fassung 1997. Kommentar mit Kompendium Erd- und Felsbau, Bonn: Kirschbaum Verlag.

KRÖBER, W. (1987): Dynamische Verdichtungsprüfung in schwach bindigen Böden. Tiefbau BG, München.

WEINGART, W. (1990): Schnellprüfung mit dem Leichten Fallgerät. In: Die Straße, Nr. 7.

WEINGART, W. et al. (1986): Dynamisches Labor- und Feldprüfgerät zur Bestimmung des CBR-Werts von Mineralbeton. In: Die Straße, Nr. 2.

***Schmidt and Volm*: The dynamic CBR-test** 271

The Dynamic CBR-Test can be used as an easily performed suitability test in the laboratory and as control test in the field to check the compaction density and bearing capacity of fills. The dynamic CBR_d-Value obtained in the laboratory will have to be attained in the field. The test is explained. For a Loess-loam test results are given. The test is recommended in praxis for natural and stabilized cohesive soils.