

Lastplattenversuche im Grossmassstab zur Dimensionierung von Flachfundationen auf einer Sondermülldeponie Mario Föhr¹, Benjamin Müller², Peter Müller³ & Thomas Villacorta⁴

Zusammenfassung

Im Zuge der Gesamtsanierung und des Rückbaus der Sondermülldeponie Kölliken ist eine Halle zum Emissionsschutz vorgesehen. Es ist geplant, diese Halle grösstenteils auf dem Deponiekörper zu fundieren. Nach Abwägung der Vor- und Nachteile beider Systeme wurde zur Gründung der Abbauhalle eine Flachfundation einer Pfahlgründung vorgezogen.

Übliche Bemessungsmethoden, basierend auf einer Baugrunderkundung oder Lastplattenversuche in kleinem Massstab, stossen aufgrund der Inhomogenität des Baugrunds und des spezifischen Aufbaus an ihre Grenzen. Zur Dimensionierung der Flachfundation der Abbauhalle wurden die erzielbaren Tragfähigkeiten und das Last-Setzungs-Verhalten anhand von Lastplattenversuchen im Massstab 1:1 ermittelt. Aus den Ergebnissen der Lastplattenversuche können zuverlässige Aussagen betreffend der Tragfähigkeit und Prognosen über die Endsetzung und die Setzungsdifferenzen des geplanten Bauwerks abgeleitet werden.

Lastplattenversuche in dieser Grössenordnung wurden damit zum ersten Mal in der Schweiz ausgeführt.

Abstract

In the course of the overall redevelopment and renaturation on the hazardous waste site in Kölliken (SMDK), the construction of an hermetically sealed building to prevent odor emissions is planned. The building will be located within the waste body perimeter. After considering the advantages and disadvantages between standard and pile foundations, the standard foundation was chosen.

Usual calculation methods based on standard plate loading tests are not adequate to estimate the soil bearing capacity due to the inhomogeneity within the waste body. The attainable soil bearing capacity and the Load-Settlement-Behaviour was determined on the basis of plate loading tests in a scale 1 to 1. A reliable prediction on the load bearing capacity, the final settlement and the settlement differences for the building can be derived from the test results.

It was the first time that plate loading tests in this scale were carried out in Switzerland.

1. Einleitung

Die Projektstudie zur Gesamtsanierung der Sondermülldeponie Kölliken sieht zur Verhinderung von Geruchsemissionen während des Rückbaus eine luftdichte Abbauhalle vor. Aus statischen Gründen müssen hierbei zahlreiche Stützen dieser Halle innerhalb des Einlagerungsperimeters der Deponie fundiert werden. Die Entscheidung, einer Flachfundation den Vorzug gegenüber einer

Pfahlfundation zu geben, wurde nach sorgfältiger Abwägung der Kosten sowie der Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme gefällt. Um für die Dimensionierung dieser Halle Angaben über die Tragfähigkeit und das Lastsetzungsverhalten zu erhalten, hat man beschlossen an ausgewählten Standorten insgesamt acht Lastplattenversuche im Massstab 1:1 durchzuführen. Lastplattenversuche in dieser Grössenordnung wurden bisher in der Schweiz noch nicht ausgeführt, deshalb musste zunächst ein Versuchskonzept entwickelt werden. Unter Anderem wurden hinsichtlich der Messungen folgende Aspekte berücksichtigt:

– die Sicherheit der Versuchsanordnung

CSD Ingenieure und Geologen AG,
Schachenallee 29, 5000 Aarau

¹ M. Sc. Geotechnical Eng., Dipl.-Ing. FH

² Dr. sc. nat. Geologe ETH, Filialleiter

³ Dipl. Kulturingenieur ETH

⁴ Dipl.-Ing. TH

- mögliche Unfallszenarien, deren Wahrscheinlichkeit und Gegenmassnahmen
- die Konstruktion der Versuchsplatten
- das Material und die Form der Gewichte
- die Vorgehensweise zur Aufbringung der Gewichte
- die Art der Setzungsüberwachung
- die Überwachung der Verkipnungen
- die Auswertung der Versuchsergebnisse

2. Versuchskonzeption

Die Versuchsanordnung ist in der nachstehenden Abbildung (Fig. 1) dargestellt. Die quadratischen, aus Stahlbeton gefertigten Lastplatten hatten die Masse der geplanten Stützenfundamente (Seitenlänge: 2 m, Höhe: 0,5 m). Die Fundationssohle der Lastplatten lag bei den einzelnen Versuchen auf -0,2 m bis -0,8 m unter Oberkante Terrain (OKT). Eine tiefere Einbindung war aufgrund der teilweise geringen Überdeckung des Deponiematerials

nicht möglich. Die Gefahr bei den Aushubarbeiten für das Fundamentplanum Deponiematerial freizulegen, wäre zu gross gewesen. Als Auflast wurden Stahlplatten verwendet, die mit einem Raupenbagger zentrisch auf die Lastplatten gestapelt wurden. Um ein Abgleiten der einzelnen Stahlplatten im Falle einer extremen Schiefstellung der Versuchsanordnung zu verhindern, wurden jeweils Latten aus Hartholz zwischen die einzelnen Stahlplatten gelegt. Die Überwachung der Setzungen während des Versuches erfolgte über drei Setzungsmesspegel P1 bis P3, die an die Lastplatte angeschweisst wurden und jeweils mit einem Metallmassstab mit mm-Skalierung ausgestattet waren. Es wurde ein Planum für die Lastplatten mit einem gut abgestuften Kies erstellt. In Absprache mit dem Gesamtplaner IG Rückbau wurde ein Belastungsprogramm ausgearbeitet, das mehrere Laststufen bis zu einer Maximallast von 800 kN vorsah.



Fig. 1: Versuch Nr. 1 bei einer Last von 200 kN.

Die Beobachtungszeit jeder einzelnen Laststufe wurde im Laufe der Versuchskampagne dem Setzungsverhalten des Untergrundes angepasst. Sie lag in allen Versuchen zwischen 0,5 h und 48 h. Die jeweils letzte Laststufe eines Versuches wurde über Nacht und bei einem Versuch sogar über das Wochenende beibehalten. Das Zeitsetzungsverhalten wurde bei jeder Belastungsstufe individuell erfasst und ausgewertet.

Die Setzungen wurden mit einem optischen Präzisionsnivelliergerät mit einer Ablesegenauigkeit von $\frac{1}{10}$ mm überwacht und die Messdaten vor Ort ausgewertet. Somit konnten die Setzungen der Eckpunkte sowie die Verkipfung der Versuchsanordnung unmittelbar bestimmt und graphisch aufgetragen werden. Eine Verkipfung, welche die Stabilität der Versuchsanordnung gefährdet hätte, oder auch ein sich anbahnender Grundbruch hätte so frühzeitig erkannt werden können.

3. Versuche

3.1 Allgemeines

Spannungsveränderungen im Baugrund führen dann zu Deformationen respektive Setzungen, wenn sie eine Veränderung des Korngefüges bewirken und/oder unter der aufgebrachtten Last Wasser drainiert wird. Kleine Spannungsveränderungen haben deshalb meist nur sehr geringe Deformationen zur Folge. DIN 4019 (1), EVB besagt in diesem Zusammenhang: «Bodenspannungen durch Bauwerkslasten σ_b haben im Allgemeinen keinen relevanten Einfluss auf die Verformungen des Bauwerks, wenn sie kleiner 20% der in der Tiefe vorherrschenden Eigenlastspannungen $\sigma_{\bar{u}}$ sind (Grenztiefe der Verformung)». Mit Zunahme der Lasten im Versuch nimmt auch die Grenztiefe zu. Dabei werden auch Setzungsanteile in tieferen Schichten hervorgerufen. Falls in der Tiefe stärker kompressible Schichten anstehen, kann dies dazu führen, dass die Setzungen

mit der Lasterhöhung überproportional zunehmen. In einem homogenen Baugrund, in dem ein Spannungszustand vorherrscht, der weit von einem Grundbruch entfernt liegt, ist dies nicht der Fall. Die Zusammendrückbarkeit nimmt dort mit der Erhöhung der Spannung ab.

Da es sich unterhalb der Deckschicht um einen sehr inhomogenen Deponiekörper handelt, sind keine genauen Angaben über die Lastausbreitung und den Spannungszustand innerhalb des Deponiekörpers möglich. Deshalb können die Setzungen im Gegensatz zu homogenen Fundamentalschichten nicht mit den üblichen Berechnungsmethoden ermittelt werden.

Die folgenden Angaben zur Grenztiefe (Bauwerkslast σ_b /Überlagerungslast infolge Eigenlast des Bodens $\sigma_{\bar{u}} = 0,2$) sind nur grobe Schätzwerte respektive Richtgrößen über den Tiefenbereich, in dem der Hauptteil der Setzungen stattfindet. Für die Ermittlung der vertikalen Spannung durch das Eigengewicht des Bodens $\sigma_{\bar{u}}$ wurde mit folgenden Annahmen gerechnet: Deckschicht $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ und Deponiematerial $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$. Die Fundamenttiefe wurde bei 0,7 m unter OKT angenommen. Ein typischer Aufbau des Deponiekörpers ist in Figur 2 dargestellt. Die Mächtigkeit der Überdeckung des Deponiematerials variiert um bis zu 1m. Zusammengefasst ergeben sich für die verschiedenen Laststufen folgende geschätzte Grenztiefen:

Laststufe	Last [kN]	geschätzte Grenztiefe unter OKT
1	0–100	ca. 2.0 m
2	100–200	ca. 3.0 m
3	200–400	ca. 4.0 m
4	400–600	ca. 4.5 m
5	600–800	ca. 5.0 m

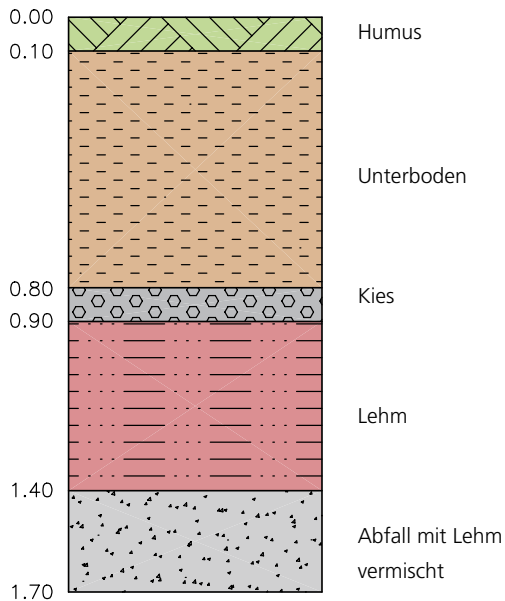


Fig. 2: Typischer Aufbau des Deponiekörpers. Rechts: Blick in einen Sondierschacht; links: Schematisches Profil aus dem selben Schacht.

3.2 Versuchsauswertung

Als repräsentatives Beispiel wird der Versuch Nr. 2 ausgewählt und im folgenden Abschnitt beschrieben. Über das Vorgehen zur Versuchsauswertung kann folgendes gesagt werden:

- Die Dauer eines Versuches war aus Kostengründen auf einen Tag beschränkt.
- Die Setzungen waren zum Zeitpunkt des Versuchsendes noch nicht abgeschlossen, so dass die gemessenen Gesamtsetzungen noch keinen Endzustand darstellen. Es wurde jedoch jede Laststufe so lange beibehalten, bis ein eindeutiges Abflachen der Setzungszunahme im logarithmischen Zeitmassstab beobachtet werden konnte.
- Das Zeit-Setzungs-Verhalten wurde im logarithmischen Zeitmassstab dargestellt und interpretiert.
- Der Deponiekörper kann als gut drainierter Untergrund eingestuft werden, bei dem sich erwartungsgemäss keine grossen Porenwasserdrücke aufbauen. Es wurde deshalb davon ausgegangen, dass

sich die Endsetzungen nach spätestens 10 Wochen grösstenteils eingestellt hätten.

- Für die Ermittlung der zu erwartenden Endsetzung bei jeder einzelnen Laststufe wurde die Gerade im Zeit-Setzungs-Diagramm im logarithmischen Zeitmassstab bis auf 10 Wochen extrapoliert und die zugehörige Setzung abgelesen (siehe Grafik in Fig. 4). Durch die Extrapolation der Messwerte wird die zu erwartende Endsetzung der einzelnen Laststufen ermittelt. Die Annahme der extrapolierten Endsetzungen liegt dabei auf der sicheren Seite, weil tatsächlich ein eher rascheres Abklingen der Setzungen zu erwarten ist. Es ist zu beachten, dass die Auswertungen nicht die wissenschaftlich exakte Interpretation des Einzelversuches zum Ziel hatte, sondern das generelle Verhalten der Stützenfundationen untersuchen sollte.

3.3 Ergebniss eines Einzelversuches: Versuch Nr. 2

Der Verlauf des Versuches Nr. 2 ist im Diagramm von Figur 3 dargestellt. Zusammenfassend lassen sich folgende Beobachtungen machen:

- Es zeigte sich zu keiner Zeit ein Anzeichen von Grundbruch.
- In Laststufe 1 (0–100 kN) wurden sehr geringe Setzungsbeträge beobachtet. Gründe hierfür sind zum einen die Entlastung der Fundamentsohle durch den Aushub und zum anderen die geringe Tiefenwirkung bei dieser Laststufe. Grössere Spannungszuwächse traten hauptsächlich in der gut verdichteten Deckschicht auf, in der nur geringe Deformationen auftraten. Die Deckschicht zeigte sich als sehr tragfähig.
- Ein stärkerer Abfall der Last-Setzungslinie wurde in Laststufe 4 (400–600 kN) beobachtet. Dies deutet darauf hin, dass in dieser Laststufe eine relevante Spannungserhöhung im stärker komprimierbaren Deponiekörper auftrat, die zu Setzun-

gen in diesem Bereich geführt hat. Diese Laststufe entspricht einer Sohlpressung von 100–150 kN/m².

- Bei Laststufe 5 (600–800kN) konnte ein noch stärkeres Ansprechen der Setzungszunahme der Last-Setzungslinie festgestellt werden. Die Spannungserhöhungen drangen hier noch tiefer in den setzungsempfindlichen Deponiekörper hinein und führten zu einer deutlichen Setzungszunahme.
- Die aufgetretenen Verkippungen waren in einem Grössenbereich von 1:250.

Die Grafik in der Figur 4 zeigt die Zeit-Setzungen der einzelnen Laststufen für den Versuch Nr. 2 im logarithmischen Zeitmassstab. Die einzelnen Messpunkte wurden mit einer Geraden verlängert. Der Wert dieser Geraden bei 10 Wochen wurde als voraussichtliche Endsetzung festgelegt.

Die prognostizierte Endsetzung in jeder Laststufe kann im folgenden Diagramm abgelesen werden:

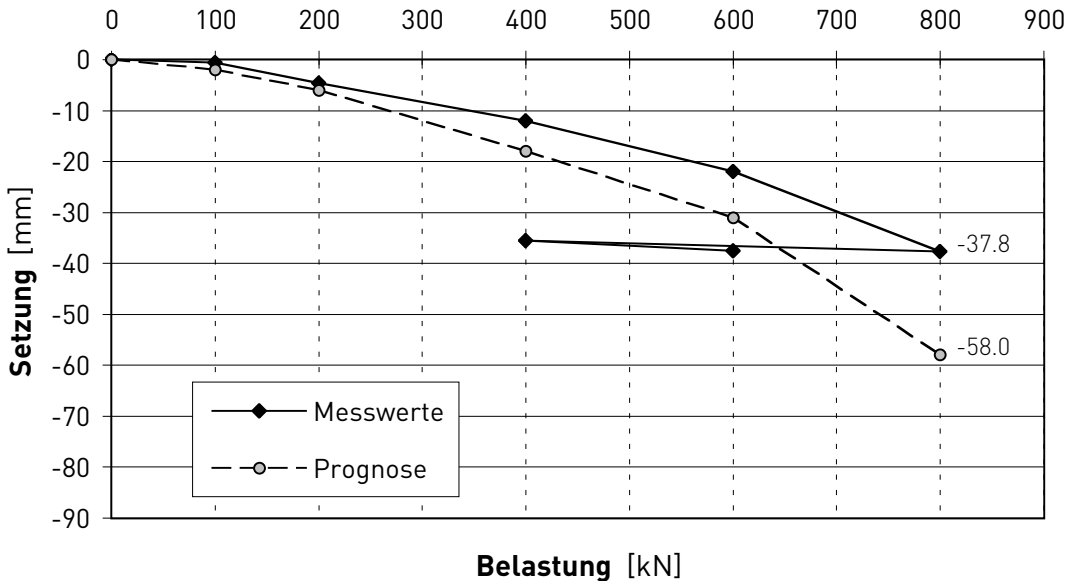


Fig. 3: Gemessene Gesamtsetzungen in Plattenmitte sowie prognostizierte Endsetzungen der einzelnen Laststufen beim Versuch Nr. 2.

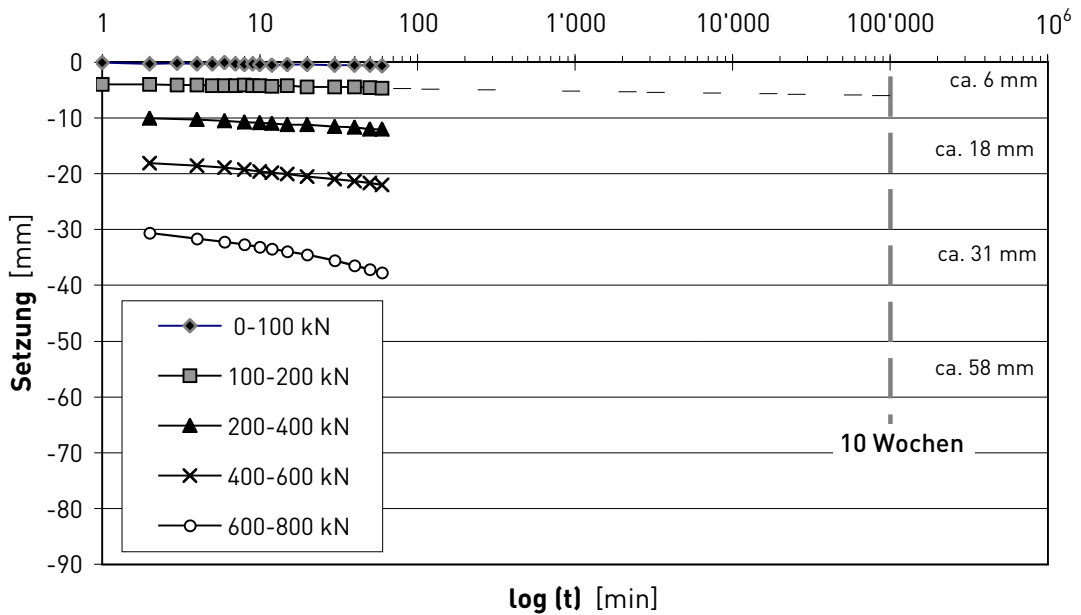


Fig. 4: Prognostizierte Endsetzungen der einzelnen Laststufen beim Versuch Nr. 2.

4. Zusammenfassung der Ergebnisse aller Versuche

Zusammenfassend kann für die vorliegende Aufgabenstellung folgendes abgeleitet werden:

- Es trat bei allen Versuchen und allen Laststufen kein Grundbruch auf.
- Die Wahrscheinlichkeit eines Versagens bei einer Sohlpressung von 100 kN/m² kann als sehr gering eingestuft werden.
- Der Unterschied der Kompressibilität von Deckschicht und Deponiekörper ist im Allgemeinen sehr gross. Es gibt aber auch Ausnahmen: Bei einem Versuch (Versuch 5R) wurden sehr geringe Setzungen selbst bei hohen Laststufen gemessen. Am Verlauf der unteren Grenzwertlinie (Fig. 5) wird ersichtlich, dass sich an den Lastpunkten bei 200 kN und 600 kN bei Lastzunahme eine deutliche Neigungszunahme im Verlauf einstellt. Der steilere Verlauf der Kurve deutet darauf hin, dass bei Lastzunahme der Deponiekörper zunehmend beansprucht wird (Zunahme der

Grenztiefe) und dies zu einem Zuwachs der Setzungen führt.

- Die Streuung der gemessenen und auch der erwarteten Endsetzungen nimmt bei einer Sohlpressung ab 100 kN/m² deutlich zu. Ab 150 kN/m² ist die Zunahme deutlich überproportional. Ein Grund hierfür ist die deutliche Spannungserhöhung im Deponiematerial, die sich bei höheren Lasten einstellt und zu grösseren Deformationen im Deponiekörper führt. Dies bedeutet, dass das Risiko von differentiellen Setzungen mit höheren Lasten überproportional zunimmt (Fig. 5).
- Ab einer Sohlpressung von 120 kN/m² muss vereinzelt mit einer spürbaren Verformung des Deponiekörpers gerechnet werden. Ab einer Sohlpressung über 150 kN/m² ist nahezu überall eine überproportionale Setzungszunahme zu erwarten.
- Einen grossen Einfluss – neben der Grösse der Belastung der Fundamente – hat

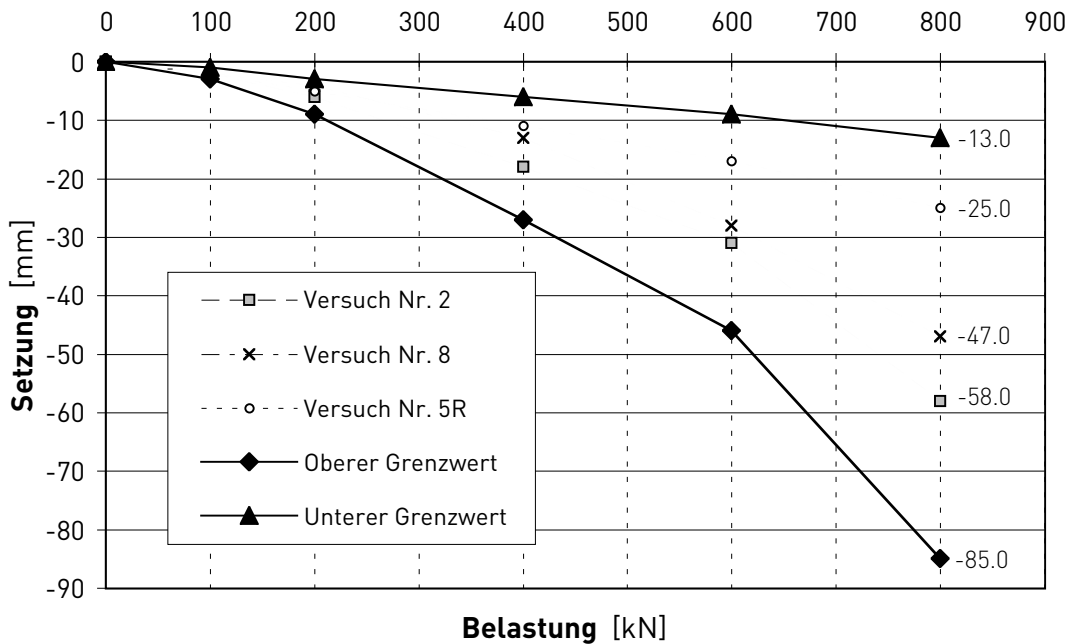


Fig. 5: Prognostiziertes Spektrum der Lastsetzungen für das gesamte Bauvorhaben bei verschiedenen Laststufen.

vor allem auch die Fundamenttiefe. Die Ergebnisse zeigen, dass die Deckschicht überall sehr tragfähig ist. Es sollte daher eine geringe Foundationstiefe angestrebt werden, um die Spannungszunahme im Deponiekörper möglichst gering zu halten.

- Neben den hier untersuchten Lastsetzungen ist auch der Anteil der Eigensetzung des Deponiematerials von Bedeutung. Diese tritt ohne Spannungszunahme ein und kann lokal sehr unterschiedlich sein. Aus den Lastplattenversuchen können hierzu keine Aussagen gemacht werden. Die Eigensetzungen können über Jahre hinweg andauern und sind nur sehr schwer zu quantifizieren, dürften aber im dm-Bereich liegen. Mit einer topografischen Geländeaufnahme können Bereiche mit verstärkten Eigensetzungen erkannt werden.
- Für das gesamte Bauvorhaben kann von dem, in der Figur 5 dargestellten Spek-

trum der zu erwartenden Lastsetzungen ausgegangen werden. Eigensetzungen des Deponiekörpers sind hierbei nicht berücksichtigt. Aufgrund der Inhomogenität des Deponiekörpers sind bei unmittelbar benachbarten Fundamenten differenzielle Setzungen nicht auszuschließen.

Literatur

CSD AG, November 2003: SMDK Gesamtanierung; Lastplattenversuche. Unveröffentlichter Bericht. DIN 4019, Teil 1, Ausgabe 1979-04: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 10772 Berlin.