

Zur Neuausgabe der Empfehlungen "Stoßprüfung von Pfählen" des Arbeitskreises 5 der DGGT

O. Klingmüller

1. Einleitung
2. Übersicht über die Neuausgabe
 - 2.1. Tragfähigkeitsermittlung
 - 2.2. Integritätsprüfung
3. Tragfähigkeitsprüfung
 - 3.1. Direktes Verfahren - CASE- und TNO-Methode
 - 3.2. Erweitertes Verfahren - CAPWAP und TNOWave
 - 3.3. Sicherheitskonzept
4. Integritätsprüfung

1. Einleitung

Eine erste Veröffentlichung der Empfehlungen erfolgte in der Geotechnik 9 (1986), S. 197 - 205, eine überarbeitete Fassung erschien in der Geotechnik 3 (1991), S. 139-153.

Diese erste Überarbeitung bezog sich im wesentlichen auf redaktionelle Veränderungen, die inhaltlichen Aussagen wurden beibehalten.

Aufgrund der nunmehr fast zehnjährigen Erfahrung zeigte sich die Notwendigkeit einer grundlegenden Überarbeitung mit dem Ziel, die Nutzung des Merkblattes durch Auftraggeber und Anwender der Methode zu verbessern.

Ein wesentlicher Schritt ist vor allem die Trennung der beiden Teile Tragfähigkeitsprüfung und Integritätsprüfung, die mit Blick auf die Anforderungen der Praxis vollzogen wurde.

Da zudem zwischenzeitlich der Begriff CAPWAP als Markenname geschützt wurde, ergab sich die Notwendigkeit, das Verfahren neutral als "Erweitertes Auswertungsverfahren mit Modellbildung" ("signal matching") zu beschreiben.

Die nunmehr veröffentlichte Fassung ist dabei lediglich als Zwischenschritt anzusehen, da die kurzfristige Ausgabe in Verbindung mit den Empfehlungen für statische Prüfungen Vorrang hatte. Der Unterausschuß "Stoßprüfung von Pfählen" des AK 5 ist allerdings zur Zeit mit einer vollständigen Überarbeitung befaßt.

2. Übersicht über die Neuausgabe

Beiden Teilen der Empfehlungen wurde jeweils ein Vorwort vorangestellt, in dem Ziel und Zweck des Merkblattes erläutert werden. Das Inhaltsverzeichnis enthält dann in der Einleitung eine Darstellung von Ziel und Zweck der zu beschreibenden Meßmethode. Durch diesen Aufbau soll dem Interessierten die Möglichkeit gegeben werden, schnell zu erkennen, ob sich das weitere Studium des Merkblattes mit seinen Interessen deckt.

2.1. Tragfähigkeitsermittlung

Die "dynamische Meßmethode" eignet sich zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Pfählen unter axialer statischer Belastung. Die Richtigkeit der Ergebnisse wurde durch eine über 30jährige Erfahrung an mehreren tausend Pfählen bestätigt. Durch Neuentwicklungen in der Meßtechnik und Auswertungssoftware wurde die Anwendung sehr erleichtert, so daß sich die Methode zunehmender Beliebtheit erfreut.

Im Vorwort heißt es :

"Die vorliegenden Empfehlungen wenden sich an Anwender, die den Einsatz der Tragfähigkeitsprüfung mit der dynamischen Meßmethode planen oder beauftragen. Sie sollen ihnen den derzeit gesicherten Stand der Technik darstellen.

Durch die Empfehlungen werden außerdem Vorgaben für die Durchführung der Prüfung aufgestellt, die für die Anbieter verbindlich sind und somit für Auftraggeber vergleichbare Leistungen garantieren. Weiterhin werden Hinweise über den zu erwartenden Aufwand und die möglichen Ergebnisse gegeben.

Der Anwender soll in die Lage versetzt werden, den Einsatzbereich der Tragfähigkeitsprüfung mit der dynamischen Meßmethode zu erkennen und sie vom Aufwand und Ergebnis auch im Vergleich zur statischen Pfahlprüfung beurteilen zu können."

In der Gliederung wurde die Beschreibung des CASE-Verfahrens erweitert und unter der Überschrift "direkte Verfahren", d.h. Verfahren, bei denen sich die Tragfähigkeit im wesentlichen aus Ablesungen der gemessenen Kurven ergibt, auch das von TNO vorgeschlagene Verfahren beschrieben.

Eine wesentliche Neuerung betrifft den Abschnitt 2.3, in welchem ein Vorschlag für die Verwendung der durch die dynamische Meßmethode bestimmten Tragfähigkeitswerte im Rahmen der neuen Sicherheitskonzepte gegeben wird.

Die Anforderungen an die Durchführung der Prüfungen (im Abschnitt 3) werden ergänzt durch Anforderungen an die Berichterstellung und ein Merkblatt im Anhang, in dem noch einmal alle Punkte zusammengefaßt sind, die bei der Durchführung der Prüfung auf der Baustelle zu berücksichtigen sind.

Inhaltsverzeichnis Teil 1 Tragfähigkeitsermittlung

Vorwort - Ziel und Zweck der Empfehlungen

Verwendete Abkürzungen

1. Einleitung - Ziel und Zweck der Meßverfahren
2. Auswertung der Messungen
 - 2.1 Direktes Verfahren
 - 2.2 Erweitertes Auswertungsverfahren mit Modellbildung
 - 2.3 Grenzlaster und Sicherheitskonzept
3. Anforderungen an die Prüfungen
 - 3.1 Prüfvorgang
 - 3.2 Meßgeräte
4. Prüfung der Rammgeräteeignung
5. Dokumentation und Berichterstattung

Literatur

Beispielrechnung für das direkte Verfahren

Anhang 1A : Formblatt für die Tragfähigkeitsbestimmung mit dem direkten Verfahren

Anhang 1B : Vorbereitung der Prüfung

2.2 Integritätsprüfung

Im Vorwort heißt es :

"Die Integritätsprüfung ist ein Verfahren zur Überprüfung von Pfählen im Boden. Es wird hierbei zwischen der "Low-Strain"-Integritätsprüfung (auch Hammerschlagmethode, impact echo testing oder TNO-Methode) und der "High-Strain"-Integritätsprüfung unterschieden. Bei der "Low-Strain"-Prüfung wird eine Stoßwelle durch einen Handhammer aufgebracht, bei der "High-Strain"-Prüfung durch ein geeignetes Rammgerät. Die "High-Strain"-Prüfung wird lediglich in Ausnahmefällen unabhängig von einer Tragfähigkeitsprüfung mit der dynamischen Meßmethode (siehe Teil 1) eingesetzt.

Die vorliegenden Empfehlungen wenden sich an Anwender, die den Einsatz der dynamischen Integritätsprüfung planen. Sie soll den derzeit gesicherten Stand der Technik darstellen. Weiterhin werden Hinweise über den zu erwartenden Aufwand und die möglichen Ergebnisse gegeben.

Der Anwender soll dadurch in die Lage versetzt werden, den Einsatzbereich der dynamischen Integritätsprüfung zu bestimmen und sie vom Aufwand und Ergebnis im Vergleich zu anderen Verfahren der Qualitätskontrolle von Pfählen (Kernbohrung, Ultraschallprüfung o.ä.) beurteilen zu können."

Da die Integritätsprüfung ein Verfahren ist, das zum größten Teil bei Ortbetonpfählen aller Art angewandt wird, die Tragfähigkeitsermittlung aber vor allem bei Rammpfählen, ergeben sich zwei stark voneinander getrennte Anwendungsbereiche. Um nunmehr einem Interessenten der Integritätsprüfung die Möglichkeit zu geben, sich über den Stand der Technik zu informieren, ohne sich mit der technisch anspruchsvolleren Tragfähigkeitsprüfung auseinandersetzen zu müssen, wurde im Unterausschuß die Trennung in zwei einzelne Teile beschlossen.

Da die Qualitätskontrolle durch die Integritätsprüfung eine Erhöhung der Zuverlässigkeit mit sich bringt, wurde im Unterausschuß auch diskutiert, ob Empfehlungen für eine Reduzierung von Sicherheitsfaktoren ähnlich wie bei der Tragfähigkeitsprüfung gegeben werden können. Es bestand aber allgemein die Ansicht, daß hierfür noch zu wenig Material vorliegt. Außerdem führt ein Konzept der Honorierung nicht gesetzlich vorgeschriebener Maßnahmen zur Qualitätssicherung aus dem Rahmen der hierzulande üblichen Normungsarbeit zu weit heraus, als daß eine Realisierung im Rahmen dieser Ausgabe der Empfehlungen möglich erschien.

Da es sich aber um einen wesentlichen Aspekt bei der Anwendung der Methode handelt, wurde im Abschnitt 4 auf diesen Zusammenhang hingewiesen.

Inhaltsverzeichnis Teil 2 Integritätsprüfung	
Vorwort - Ziel und Zweck der Empfehlungen	
Verwendete Abkürzungen	
1.	Einleitung - Ziel und Zweck des Meßverfahrens
2.	Die "low-strain"-Integritätsprüfung
2.1	Durchführung der Prüfung
2.2	Messungen und Meßgeräte
2.3	Auswertung
2.4	Meßprotokoll
3.	Rammbegleitende und/oder "High-Strain"-Integritätsprüfung
3.1	Ordnungsgemäß hergestellte Pfähle
3.2	Fehlerhaft hergestellte Pfähle
3.3	Pfähle mit schlecht auswertbarem Meßsignal
4.	Qualitätskontrolle durch Integritätsprüfung und Sicherheit
Literatur	
Anhang 2A	: Fallbeispiele Low-Strain-Integritätsprüfung
Anhang 2B	: Fallbeispiele High-Strain-Integritätsprüfung
Anhang 2C	: Vorbereitung der Prüfung

Wie der Teil 1 wird auch der Teil 2 durch ein Merkblatt für die Durchführung der Prüfung auf der Baustelle abgeschlossen.

3. Tragfähigkeitsprüfung

3.1. Direktes Verfahren - CASE- und TNO-Methode

Bei den direkten Verfahren wird die gesuchte Pfahltragfähigkeit für den statischen Widerstand R_{Stat} aus dem totalen Eindringwiderstand R_{Tot} berechnet. Dieser wiederum ergibt sich aus Ablesewerten der gemessenen Kurven der Kraft und Geschwindigkeit (siehe Bild 1) durch Anwendung der eindimensionalen Wellentheorie.

Das Verfahren beruht auf der Annahme, daß der dynamische Gesamtwiderstand R_{Tot} aus einem statischen Anteil R_{Stat} und einem dynamischer Anteil R_{Dyn} besteht. Der gesuchte statische Widerstand, bzw. die statische Tragfähigkeit, ist damit aus

$$R_{\text{Stat}} = R_{\text{Tot}} - R_{\text{Dyn}} \quad [\text{kN}] \quad (1)$$

zu bestimmen.

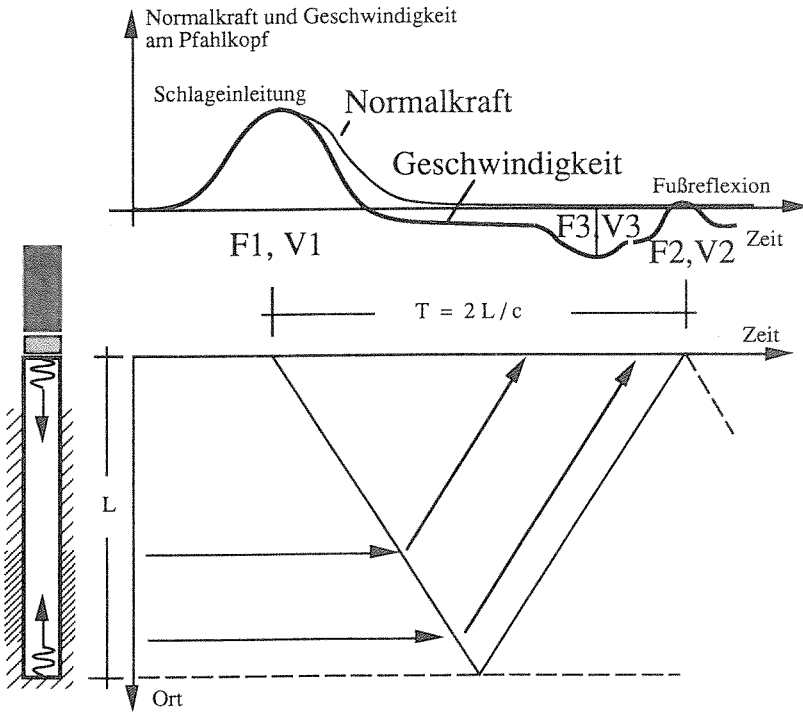


Bild 1 : Schematische Kraft- und Geschwindigkeitskurven und Eingangswerte für das direkte Verfahren

Bild 1 zeigt beispielhaft den Meßschrieb während eines Rammschlags. In diesem sind über der Zeit t die am Pfahlkopf gemessenen Werte Kraft $F(t)$ und Geschwindigkeit $v(t)$ aufgetragen. Die Kraft $F(t)$ wird aus der gemessenen Dehnung $\epsilon(t)$ errechnet

$$F(t) = E \cdot A \cdot \epsilon(t), \quad [\text{kN}]$$

mit E : Elastizitätsmodul des Pfahlmaterials $[\text{MN}/\text{m}^2]$
 A : Querschnittsfläche des Pfahls. $[\text{m}^2]$

Die Geschwindigkeit $v(t)$ ergibt sich aus dem Zeitintegral der gemessenen Beschleunigung $a(t)$.

$$v(t) = \int a(t) dt \quad [\text{m/s}]$$

Solange keine äußeren Widerstände (Mantelreibung) die Bewegung des Pfahles behindern oder Querschnittsänderungen zu Reflexionen führen, sind $F(t)$ und $v(t)$ proportional. Der Proportionalitätsfaktor ist $Z = EA/c$ und wird als Impedanz (mechanisch - dynamischer Widerstand, mit c als Wellengeschwindigkeit des Pfahlmaterials) bezeichnet. Je mehr die $F(t)$ - und $Zv(t)$ -Kurven voneinander abweichen, um so größer ist die Mantelreibung.

Der totale Eindringwiderstand ergibt sich aus:

$$R_{\text{tot}} = \frac{1}{2} (F_1 + Z \cdot v_1) + \frac{1}{2} (F_2 - Z \cdot v_2) \quad [\text{kN}]$$

CASE-Verfahren

Beim CASE-Verfahren wird der dynamische Widerstand R_{dyn} als proportional zur Eindringgeschwindigkeit des Pfahlfußes v_b angenommen :

$$R_{\text{dyn}} = j_c \cdot (Z \cdot v_b) \quad [\text{kN}] \quad (2)$$

j_c ist ein empirischer, aus statischen Probelastungen ermittelter Dämpfungsfaktor. Für Rammpfähle werden die in Tabelle 1 zusammengestellten Erfahrungswerte des Dämpfungsfaktors verwendet.

Boden	j_c [.]	C_s [MN/m/s/m ²]	C_b [MN/m/s/m ²]
Sand	0.05 - 0.20	0.02 - 0.10	0.4 - 2.0
Sandiger Schluff	0.15 - 0.30	0.05 - 0.15	1.0 - 3.0
Schluff	0.20 - 0.45	0.10 - 0.25	2.0 - 5.0
Schluffiger Ton	0.40 - 0.70	0.20 - 0.40	4.0 - 8.0
Ton	0.60 - 1.10	0.25 - 0.50	5.0 - 10.0

j_c - CASE-Verfahren
 C_s - TNO- Verfahren für die Mantelreibung
 C_b - TNO- Verfahren für Spitzenwiderstand

Tabelle 1: Empfohlene Dämpfungswerte

Da in diesem dynamischen Widerstand alle bei statischer Belastung nicht nutzbaren Effekte scheinbaren oder wirklichen Widerstands zusammengefaßt sind, ist der Wert abhängig von Pfahltyp, Pfahllänge, Bodenart und -aufbau. Die breiten Streubereiche in der Tabelle sind also mit Bezug auf die Vielzahl der abzudeckenden Einflüsse zu sehen.

Mit

$$v_b = v_1 + (F_1 - R_{\text{tot}}) / Z \quad [\text{m/s}] \quad (3)$$

und Formel (2) ergibt sich aus (1) der gesuchte Wert R_{stat} .

TNO-Verfahren

Beim TNO-Verfahren wird der dynamische Widerstand getrennt für den Pfahlmantel R_{sdyn} und die Spitze R_{bdyn} ermittelt.

$$R_{\text{dyn}} = R_{\text{sdyn}} + R_{\text{bdyn}} \quad [\text{kN}]$$

Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, für den Pfahlmantel in möglicherweise wenig tragfähigem Boden mit hoher Dämpfung und die Pfahlspitze im tragfähigen Boden mit geringer Dämpfung unterschiedliche Dämpfungswerte vorgeben zu können. Da die Ableitung der getrennten Anteile aus der eindimensionalen Wellentheorie aber erst mit weiteren Annahmen möglich ist, kann die mögliche höhere Genauigkeit nur bei gut bekannten Bodenverhältnissen und jeweils vergleichbaren Pfahlsystemen genutzt werden.

Die Dämpfungswerte werden auf den Pfahlmantel bzw. die Querschnittsfläche bezogen.

Für die Pfahlspitze gilt:

$$R_{\text{bdyn}} = v_b \cdot A \cdot C_b \quad [\text{kN}] \quad (4)$$

mit den in Tabelle 1 angegebenen Dämpfungswerten C_b und der Geschwindigkeit v_b der Pfahlspitze aus Gleichung (3). Für einen Pfahl ohne Mantelreibung sind die Dämpfungswerte j_c und C_b über die Pfahleigenschaften verknüpft :

$$j_c = \frac{c}{E} \cdot C_b$$

Der dynamische Widerstand am Pfahlmantel ergibt sich zu

$$R_{\text{sdyn}} = v_s \cdot O \cdot C_S \quad [\text{kN}] \quad (5)$$

mit

v_s : maßgebende Geschwindigkeit am Pfahlmantel,
 O : Mantelfläche.

Die maßgebende Geschwindigkeit am Pfahlmantel ist:

$$v_s = \frac{1}{2} (v_1 + \frac{F_1}{Z}) - \frac{1}{2} (\frac{F_3}{Z} - v_3) \quad [\text{m/s}] \quad (6)$$

Die Werte F_3 und v_3 sind zur Zeit t_3 der maximalen Differenz von Kraft und Geschwindigkeit zu nehmen (siehe Bild 1 und Beispielrechnung).

Die Dämpfungswerte C_S für den Pfahlmantel sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Die Dämpfungswerte des TNO-Verfahrens sind nicht vergleichbar mit denen des CASE-Verfahrens. Der Bezug auf die jeweiligen Querschnittsflächen bzw. Mantelflächen bedingt, daß Pfahl - Bodeneigenschaften in anderer Weise berücksichtigt werden.

3.2. Erweitertes Verfahren - CAPWAP und TNOWave

Bei dem erweiterten Verfahren wird nicht ein einzelner Tragfähigkeitswert berechnet, sondern durch eine iterative Berechnung das Pfahlverhalten, welches zu der gemessenen Kraft und Geschwindigkeit paßt, bestimmt. Das Ergebnis der Berechnung ist eine Lastsetzungskurve und die Aufteilung der Bodenwiderstände auf den Pfahlmantel und die Pfahlspitze.

Durch die Computerentwicklung im Lauf der letzten 20 Jahre war es möglich gegenüber dem früheren sehr zeitraubenden interaktiven Verfahren nunmehr auf eine Software zurückzugreifen, die durch halbautomatische Berechnungsverfahren die Bearbeitung wesentlich beschleunigt.

Besser als im Sinne eines "high-tech-for-low-brain"-Konzeptes den Spezialisten die Arbeit aus der Hand zunehmen, kann diese Beschleunigung dazu dienen, auch

kompliziertere Fälle, z.B. Großbohrpfähle, dadurch zu lösen, daß eine größere Anzahl von Varianten durchgerechnet werden kann oder angenommene Dämpfungswerte des direkten Verfahrens auf der Baustelle überprüft werden.

Neuere Entwicklungen der Einbettung der erweiterten Verfahren in Finite Elemente Gesamtmodelle zeigen auch verbesserte Lösungsmöglichkeiten auf, jedoch können diese noch nicht zum Stand der Technik gezählt werden und entziehen sich damit der Behandlung in allgemein anwendbaren "Empfehlungen".

3.3. Sicherheitskonzept

Durch die neueren Entwicklungen in der Normung (DIN V ENV 1997-1 und DIN V 1054-100) wird auch für die Bemessung von Pfählen ein Konzept der partiellen Sicherheitsfaktoren vorgeschlagen.

Als Grundlage der Bemessung dienen die "charakteristischen Werte" der Belastung und der Tragfähigkeit. Beide Normungsvorschläge erwähnen ausdrücklich, daß die Ergebnisse dynamischer Pfahlprüfungen als "charakteristische Werte" verwendet werden können. Der Unterschied des neuen Verfahrens gegenüber den früher verwendeten globalen Sicherheitsfaktoren soll kurz erläutert werden :

Früherer Nachweis:

$$S < \frac{R}{\eta}$$

S : Last

R : Widerstand

η : Sicherheitsbeiwert

(nach DIN 1054 (1976)

$$\eta = 2$$

$$\eta = 1,75$$

für eine Pfahlprüfung

für 2 und mehrere

Pfahlprüfungen)

Neuer Nachweis:

$$\sum \gamma_{Si} \cdot S_i < \frac{R_{1k}}{\xi_R}$$

S_j : charakteristische Werte der Last

γ_{Si} : Lastfaktoren, unterschiedlich für Eigengewicht, Verkehr etc.

R_{1k} : Charakteristischer Wert des Widerstandes (Tragfähigkeit)

ξ_R : Widerstandsbeiwert

Die Werte für ξ_R für Pfahltragfähigkeiten sind in Eurocode 7.6.3.2. festgelegt, bzw. in DIN 1054 - 100 in Abschnitt 5.4.2. Bei DIN 1054 ist zu beachten, daß der angegebene Wert ein Multiplikator für den Teilsicherheitsbeiwert ist, der entsprechend einem Lastfall zu wählen ist.

Beispiel:

Alter Nachweis:

Belastung	:	200 t	
Sicherheitsfaktor	:	2	$200 \leq \frac{400}{2}$
Pfahltragfähigkeit	:	400 t	

Neuer Nachweis:

Belastung	:	100 t + Eigengewicht
	:	100 t + Nutzlast
Belastung	:	$100 \cdot 1,1 + 100 \cdot 1,5 = 260$
Pfahltragfähigkeit	:	400 t = charakteristischer Wert R_{1k}

$$\text{für } \xi = 1,5 \quad 260 < \frac{400}{1,5}$$

Die in den "Empfehlungen" zu behandelnden Fragestellungen lauten :

1. Sind die Ergebnisse des direkten Verfahrens anders zu bewerten als die aus dem erweiterten Auswertungsverfahren, d.h. sollen für verschiedene Varianten der Auswertung unterschiedliche Sicherheiten verwendet werden?
2. Wie sollen aus der im erweiterten Verfahren bestimmten Lastsetzungskurve die Tragfähigkeitswerte ermittelt werden?
3. Kann die Anzahl der geprüften Pfähle angemessen berücksichtigt werden?

In den neuen Empfehlungen werden die Bedingungen dafür genannt, daß die durch die dynamische Meßmethode bestimmten Tragfähigkeitswerte als charakteristische Werte akzeptiert werden können. Beim direkten Verfahren müssen die Dämpfungswerte zuverlässig bestimmt worden sein.

Gemäß dem Satz von Bayes ergibt jeder zusätzliche Test eine Verringerung der Streubreite und damit die Möglichkeit zur Reduzierung des Sicherheitsfaktors. Da sich dynamischen Tests in der Regel mehrere Pfähle pro Tag geprüft werden können, kann sich dadurch ein sehr scharfes Bild der tatsächlichen Tragfähigkeiten ergeben. Die "Empfehlungen" schlagen nunmehr vor, die im Eurocode vorgeschlagene Regelung zu verwenden, bei der die Anzahl der geprüften Pfähle wie bei statischen Prüfungen zu berücksichtigen ist.

4. Integritätsprüfung

Im Teil 2 der "Empfehlungen" wurden nur geringe Änderungen vorgenommen. Hierbei kam es auch darauf an, die mit dieser Methode manchmal verbundenen überhöhten Erwartungen klarzustellen. Diese betrifft einerseits die mögliche Genauigkeit bei Angaben der Pfahllänge sowie der Größe von Querschnitts- bzw. Impedanzänderungen.

Bei der Beurteilung ist zwischen 4 Ergebnisklassen zu unterscheiden :

1. **Der Pfahl ist in Ordnung,**
2. **Der Pfahl ist nicht in Ordnung,
geringe Qualitätsminderung,**
3. **Der Pfahl ist nicht in Ordnung,
starke Qualitätsminderung,**
4. **Signal nicht auswertbar (z.B. Risse, Schlämpe im
Kopfbereich).**

Wie bei der Tragfähigkeitsermittlung hat auch für die Integritätsprüfung die Entwicklung der Software zu dem Ergebnis geführt, daß Pfahlprofile aufgrund einer gemessenen Kurve automatisch errechnet werden können. Da diese Berechnungen aber ähnlich komplex sind wie beim erweiterten Auswertungsverfahren, müssen viele Annahmen getroffen werden, die nicht leicht darzustellen und an die Beteiligten zu vermitteln sind. Die automatische Berechnung des Pfahlprofils kann somit eher als Hilfsmittel für den Experten angesehen werden. Die Empfehlungen können bei der Anwendung nicht auf einen gesicherten Stand der Technik zurückgreifen. Die direkte Interpretation auf der Grundlage des Zeitverlaufs der Pfahlkopfgeschwindigkeit hat Vorrang.

Aktuelle Entwicklungen wie die in anderen Ländern verarbeitete Frequenztransformation, die Verwendung eines instrumentierten Hammers und Angabe der Mobilität sowie die doppelte Frequenztransformation zur Bestimmung der Pfahllänge, sind in der Praxis im deutschsprachigen Raum so wenig verbreitet, daß es nicht sinnvoll oder notwendig erschien, in den Empfehlungen darauf einzugehen.

Diese Verfahren sowie neue Entwicklungen wie das Impact-Echo-Logging werden aber bei zukünftigen Beratungen des Unterausschusses berücksichtigt und gegebenenfalls in neue Teile eingearbeitet.