

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Garbrecht, D.**

## **Auswertung von Setzungsmessungen - zwei Beispiele -**

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102952>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Garbrecht, D. (1980): Auswertung von Setzungsmessungen - zwei Beispiele -. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 46. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 3-16.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Dipl.-Ing. D. G a r b r e c h t

## AUSWERTUNG VON SETZUNGMESSUNGEN

- ZWEI BEISPIELE -

Two Examples: Evaluating Settlement Measurements

### Zusammenfassung

Oft sind die Voraussetzungen und die Ergebnisse bei Setzungenmessungen nicht so ideal, daß gebräuchliche Verfahren zur Auswertung benutzt werden können. An zwei Beispielen - einer Zeit-Setzungsmessung von Klei unter einer Auffüllung und Messungen an einem elastisch gebetteten Balken - wird gezeigt, wie durch Anpassung der gebräuchlichen Verfahren an die speziellen Voraussetzungen oder durch Grenzbetrachtungen trotzdem befriedigende Ergebnisse erzielt werden können.

### Summary

In practice the conditions and the results of settlement measurements are often not sufficient enough to evaluate them by applying the usual methods. By two examples - a time-settlement observation of clay beneath a high fill and deformation measurements of an elastic beam - it is shown, how sufficient results can be achieved by adapting the usual methods to the special conditions or by considering limiting values.

I N H A L T

	Seite
1 Einleitung und Problemstellung	5
2 Auswertung von Zeitsetzungsmessungen	5
2.1 Übliche Auswertung	5
2.2 Beispiel	8
3 Bestimmung des Bettungsmoduls aus der Probelastung eines Balkens	11
3.1 Allgemeines	11
3.2 Beispiel	13
4 Zusammenfassung	15
5 Literatur	16

## 1 Einleitung und Problemstellung

Die beiden beschriebenen Setzungsmessungen hatten unterschiedliche Ziele:

Im ersten Fall sollte der zeitliche Verlauf der Setzungen in einer Weichschicht gemessen werden. Man wollte sicher sein, daß die Setzungen zwischen unterschiedlich gelagerten Gründungsteilen vor Fugenschluß abgeklungen sind, um Schäden durch diese Setzungsunterschiede zu vermeiden. Allerdings konnten die Setzungen nicht von Anfang an gemessen werden. Die Schwierigkeit der Auswertung bestand also darin, nur aus einem Teil des zeitlichen Setzungsverlaufs auf die zukünftigen Setzungen schließen zu können. Bei bekannter Dicke der setzungsempfindlichen Schicht wurde aus den Messungen auch ihre Durchlässigkeit und ihre Zusammendrückbarkeit bestimmt. Damit konnten vorher getroffene Annahmen über die Vorbelastung der Schicht nachgeprüft und die Ergebnisse auf Nachbarbereiche übertragen werden.

Im zweiten Fall wurden an einem Kranbahnbalke auf einer Sandauffüllung einer Hafenkaje während mehrjähriger Nutzung große Setzungen festgestellt. Diese Setzungen sind mit einer Verdichtung und damit mit einer Verfestigung des Sandes verbunden. Durch eine Probelastung, bei der die Setzung unter der Kranlast gemessen wurde, sollte geklärt werden, ob die eingetretene Steifigkeit des Baugrundes ausreicht, um die Überschreitung zulässiger Spannung im Balken in Zukunft zu vermeiden. Die Auswertung der Probelastungen sollte ohne Verwendung der Steifigkeit des Balkens  $E$  vorgenommen werden, da die Setzungen in der Vergangenheit wahrscheinlich Spannungsüberschreitungen im Zugbereich des Balkens mit Rissbildungen hervorgerufen hat und dementsprechend das Trägheitsmoment  $I$  in unbekannter Größe verändert worden war.

Im Bericht wird beschrieben, wie die Setzungsmessungen ausgewertet wurden. Der Bericht soll beispielhaft zeigen, wie übliche Auswertemethoden an den Einzelfall angepaßt werden müssen und können, wenn für deren direkte Anwendung keine ausreichenden Daten vorliegen.

## 2 Auswertung von Zeitsetzungsmessungen

### 2.1 Übliche Auswertung

Zeitsetzungsmessungen werden mit Hilfe der eindimensionalen Konsolidationstheorie (Terzaghi/Jelinek, 1954) ausgewertet. Im folgenden ist:

$s(t)$  Setzung zur Zeit  $t$  nach Beginn der Belastung  
zur Zeit  $t = 0$ ,

$s_{\infty}$	Setzung nach unendlich langer Zeit, Endsetzung
$t_{95}$	Zeit nach Beginn der Belastung, in der 95 % der Endsetzungen abgeklungen sind,
$E_s$	Steifemodul der setzungsempfindlichen Schicht,
$k_f$	Durchlässigkeit der setzungsempfindlichen Schicht,
$h$	Schichtdicke der setzungsempfindlichen Schicht,
$\gamma_w$	Raumgewicht des Wassers.

Das eindimensionale Konsolidationsgesetz lautet für einseitige Entwässerung einer Schicht

$$\eta = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ -(2n+1)^2 \pi^2 \tau / 4 \right] \right\} \quad (1)$$

wobei  $\eta = \frac{s(t)}{s_{\infty}}$  (2)

eine dimensionslose Setzungsvariable

und  $\tau = \frac{k_f \cdot E_s}{\gamma_w \cdot h^2} \cdot t$  (3)

eine dimensionslose Zeitvariable sind.

Für zweiseitige Entwässerung wird anstelle der Schichtdicke  $h$  nur die halbe Schichtdicke  $h/2$  eingesetzt. Die Werte von Gleichung (1) sind vertafelt oder können einem Diagramm entnommen werden. (Terzaghi/Jelinek, 1954, S. 288). Für 95 % der Endsetzungen ist  $\tau \approx 1$ . Mit diesem Wert kann der Zeitraum  $t_{95}$  aus (3) berechnet werden.

Für den zeitlichen Setzungsverlauf unter großflächigen Lasten treffen die Voraussetzungen der eindimensionalen Konsolidationstheorie am besten zu, weil nur am Rande eine räumliche Entwässerung stattfindet. Trotzdem haben auch in diesem Falle die Ergebnisse - wie alle Setzungsberechnungen - nur den Charakter von Schätzungen (DIN 4019, Blatt 1, Abs. 2), wenn der Steifemodul  $E_s$  und die Durchlässigkeit  $k_f$  für die Berechnung im Labor durch Ödometer- und Durchlässigkeitsversuche bestimmt wurden. Besonders die Durchlässigkeit wechselt wegen der Inhomogenität des Baugrundes stark, oft um eine Zehnerpotenz und mehr. Da sie in die Berechnung linear eingeht, ist eine genaue Vorhersage der Konsolidationszeit unmöglich. Ist die genaue Kenntnis des zeitlichen Verlaufs jedoch notwendig, z.B. weil große Setzungen und

Setzungsunterschiede vom Bauwerk nicht aufgenommen werden können, Fugen also erst nach Abklingen der Setzungen geschlossen werden dürfen, sind Setzungsmessungen unerlässlich.

Können die Setzungen von Anfang an gemessen werden, so ist eine Extrapolation mit Hilfe von (1) nach einiger Zeit auch ohne Kenntnis von Steifeziffer und Durchlässigkeit möglich, weil die gemessene Setzungskurve mit der theoretischen nach (1) nur für eine ganz bestimmte Kombination von  $E_s \cdot k_f$  übereinstimmt. Für diesen Wert kann dann z.B.  $t_{95}$  errechnet werden.

Eine andere Möglichkeit bietet die Auswertung mit Hilfe des Hyperbelverfahrens (s. z.B. Christow, 1968). Dabei wird näherungsweise von einem hyperbolischen zeitlichen Verlauf der Setzungen ausgegangen:

$$s = \frac{t}{a + b \cdot t} \quad (4)$$

Für  $t \rightarrow \infty$  ergibt (4) den unbestimmten Ausdruck  $\infty/\infty$ , aus dem nach der L'Hospitalschen Regel

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow a} \frac{f'(x)}{g'(x)}$$

für die Endsetzung

$$s_{\infty} = \frac{1}{b}$$

folgt.

Die Konstante  $b$  läßt sich aus dem gemessenen zeitlichen Setzungsverlauf durch Kurvenanpassung z.B. nach der Methode der kleinsten Summe der Fehlerquadrate errechnen. Es sei hier darauf hingewiesen, daß die Anpassung der Meßwerte an die zu einer Geraden transformierten Kurve (4) in der Form

$$y = \frac{t}{s} = a + b \cdot t \quad (5)$$

nicht zu den gleichen Ergebnissen führt, wie die Kurvenanpassung an die Hyperbel (4), weil durch die Transformation eine Gewichtung der Meßwerte vorgenommen wird (Cordes, 1977). Für (4) ergibt sich nämlich die Summe der Fehlerquadrate  $SQ$  für  $i$  Meßwerte zu:

$$SQ = \sum_i \left( s_i - \frac{t_i}{a + bt_i} \right)^2$$

während aus (5) folgt:

$$S_Q = \sum_i \left( \frac{t_i}{s_i} - a - bt_i \right)^2$$

Für Meßwerte, die in der transformierten Form einen guten geradlinigen Verlauf haben, d.h. bei denen der Korrelationskoeffizient nahe 1 ist, wirkt sich dieser Fehler wenig aus. Sonst sollte besser eine nichtlineare Kurvenanpassung an (4) durchgeführt werden, um ein zutreffendes  $b$  zu erhalten.

## 2.2 Beispiel

Bedingt durch den Bauablauf konnte mit den Setzungsmessungen erst zum Zeitpunkt  $T_1$  nach Beginn der Belastung begonnen werden. Dadurch war die Größe der anfänglichen Setzungen  $S_1$  nicht bekannt, so daß die üblichen Auswerteverfahren nicht angewandt werden konnten. Daß mit den Setzungsmessungen erst zu einem späteren Zeitpunkt begonnen wird, ist durchaus kein Einzelfall. Häufig wird erst während des Baus erkannt, daß die mit zeitlicher Verzögerung auftretenden Setzungen zu Problemen führen, weil der Zeitraum unterschätzt wird, in dem noch Setzungen auftreten. Insofern ist das hier vorgestellte Verfahren auch von allgemeinem Interesse.

Es waren also Setzungsmessungen auszuwerten, die erst zum Zeitpunkt  $T_1$  nach Belastung begonnen und zum Zeitpunkt  $T_2$  beendet wurden. Im Zeitintervall  $\Delta T = T_2 - T_1$  wurden die Setzungen mehrfach gemessen. Insgesamt traten im Zeitraum  $\Delta T$  Setzungen von  $\Delta S = S(T_1) - S(T_2)$  auf.  $S(T_1)$  ist - wie gesagt - unbekannt. Die Aufgabe war, neben der Endsetzung  $s_\infty$  und der Zeit  $t_{95}$  die Steifeziffer  $E_s$  und die Durchlässigkeit  $k_f$  der setzungsempfindlichen Schicht zu bestimmen, um das Ergebnis auf benachbarte Bereiche mit anderen Schichtdicken übertragen zu können.

Die Durchlässigkeit war wegen der schon erwähnten großen Abweichung zwischen den in der Natur auftretenden Werten und Laborergebnissen von Interesse. Es wurden Durchlässigkeiten  $k_f$  von  $10^{-6}$  m/s bis  $10^{-8}$  m/s vorhergesagt. Der Steifemodul sollte bestimmt werden, weil unsicher war, ob der Wert der Erst- oder der Zweitbelastung des Ödometerversuchs anzusetzen war. Der geologische Sachverständige hatte nämlich vermutet, daß es sich um ein Rückzugssediment ohne Vorbelastung handelte.

Zur Lösung der Aufgabe wurden die Gleichungen (1) bis (3) folgendermaßen umgewandelt: Für beliebige  $t_1, t_2, \Delta t$  und  $\Delta s$  innerhalb der gemessenen Intervalle  $\Delta S$  und  $\Delta T$  (d.h.  $T_1 \leq t_1 \leq t_2 \leq T_2$  und  $S(T_1) \leq s_1 \leq s_2 \leq S(T_2)$ ) ergibt sich aus (2) mit  $\Delta s = s_2 - s_1$

$$\Delta \eta = \eta_2 - \eta_1 = \frac{\Delta s}{s_\infty} \quad (6)$$

und aus (3) mit  $\Delta t = t_2 - t_1$

$$\Delta \tau = \tau_2 - \tau_1 = \frac{k_f \cdot E_s}{\gamma_w \cdot h^2} \cdot \Delta t \quad (7)$$

Die Endsetzung  $s_\infty$  ist nach der Elastizitätstheorie mit der mittleren Zusatzspannung  $\sigma$  in der setzungsempfindlichen Schicht

$$s_\infty = \frac{\sigma \cdot h}{E_s} \quad (8)$$

Setzt man (1) und (8) in (6) ein, benutzt das Potenzgesetz  $x^{a+b} = x^a \cdot x^b$ , beachtet (7) und löst nach dem Steifemodul  $E_s$  auf, so ergibt sich:

$$E_s = \frac{\sigma \cdot h}{\Delta s} \cdot \frac{8}{\pi^2} \sum_n \frac{1}{n (2n + 1)^2} \exp [-(2n + 1)^2 \cdot \pi^2 \tau_1 / 4] \cdot \{1 - \exp [-(2n + 1)^2 \cdot \pi^2 \cdot \Delta \tau / 4]\} \quad (9)$$

Darin ist nach (3)

$$\tau_1 = \frac{k_f \cdot E_s}{\gamma_w \cdot h^2} \cdot t_1$$

Bekannt sind die Zusatzspannungen in der setzungsempfindlichen Schicht  $\sigma$ , die Schichtdicke  $h$ , die Zeit  $t_1$  nach Beginn der Belastung und das Zeitintervall  $\Delta t$ , in dem das Setzungsintervall  $\Delta s$  gemessen wurde. Unbekannt bleiben also lediglich  $E_s \cdot k_f$  und  $E_s$ , die als Variable in Gleichung (9) aufgefaßt werden können. Wählt man aus dem Meßbereich  $\Delta T$  und  $\Delta S$  verschiedene Wertetripel  $\Delta t$ ,  $\Delta s$  und  $t_1$ , so kann man jeweils eine Kurve  $f(E_s, E_s \cdot k_f)$  berechnen. Aus der Lage des Schnittpunktes folgen  $E_s$  und  $E_s \cdot k_f$  der setzungsempfindlichen Schicht und damit auch  $k_f$ . Aus (8) kann dann  $s_\infty$  berechnet werden und mit  $t_{95} = 1$  folgt aus (3)

$$t_{95} = \frac{\gamma_w \cdot h^2}{k_f \cdot E_s} \quad (10)$$

Damit ist die Aufgabe gelöst.

Die Berechnung der Kurven  $f(E_s, E_s \cdot k_f)$  kann einfach auf einem programmierbaren Taschenrechner vorgenommen werden.

Ein Beispiel für die grafische Auswertung zeigt Bild 1. Die Schnittpunkte der Kurven liegen in einem engen Bereich, so daß  $k_f \cdot E_s$  und  $E_s$  ausreichend genau bestimmt werden können.

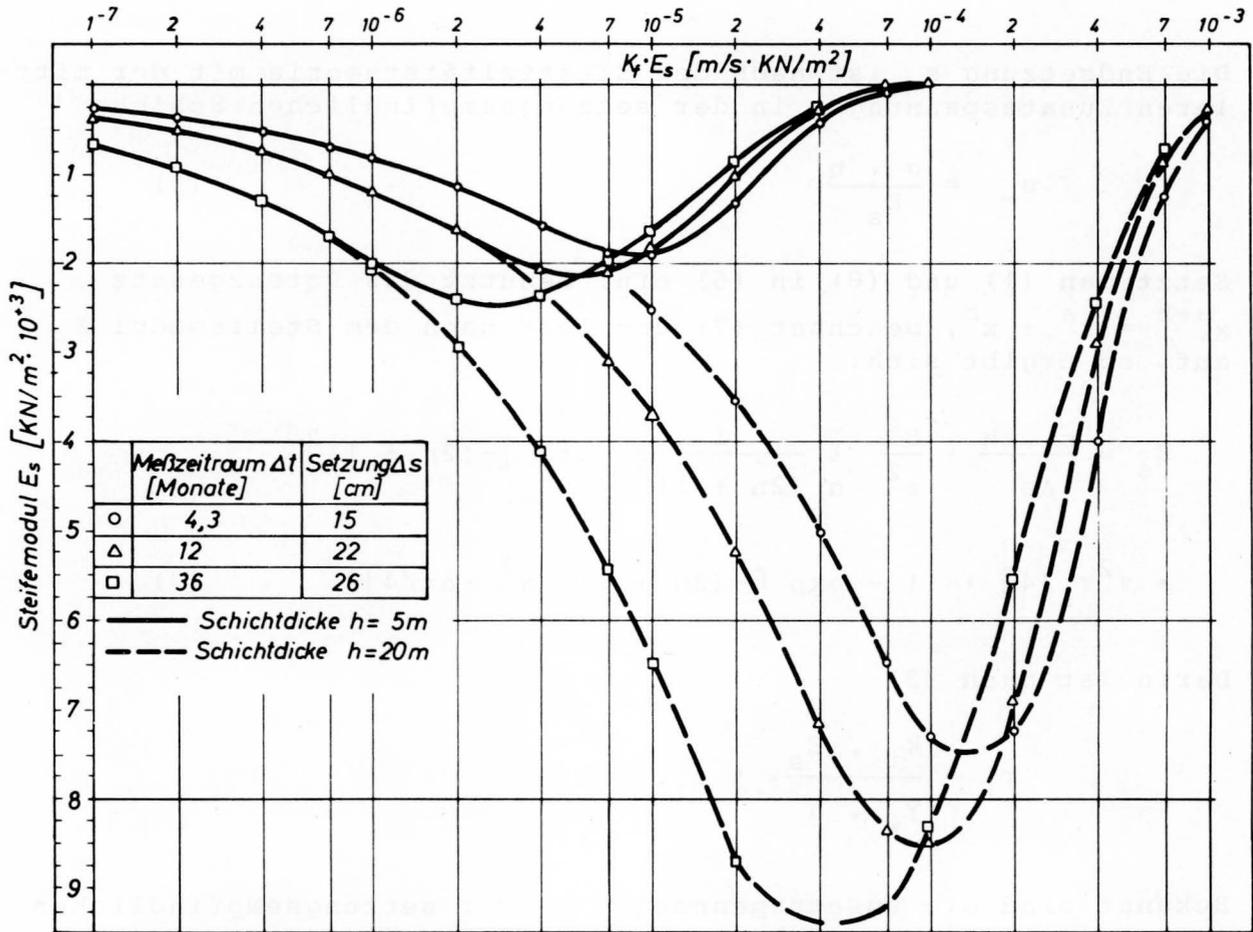


Bild 1 Grafische Ermittlung von  $E_s$  und  $k_f$

Es ist interessant, die Auswirkung fehlerhafter Annahmen der Schichtdicke  $h$ , der mittleren Zusatzspannung  $\sigma$  und der Entwässerungsbedingungen auf das Endergebnis zu untersuchen. Die Größe der Steifeziffer  $E_s$  wird bei vorgegebenen Meßwerten  $\Delta t$ ,  $\Delta s$  und  $t_1$  ausschließlich vom Faktor  $\sigma$ .  $h$  bestimmt, ist also nur linear von der Zusatzspannung und der Schichtdicke abhängig. Ändert sich  $\sigma$ , so ergibt sich nur eine veränderte Steifeziffer; ändert sich dagegen die Schichtdicke  $h$ , so verändert sich auch die Durchlässigkeit proportional mit  $h$ . Liegt zweiseitige anstelle von einseitiger Entwässerung vor, so ändert sich  $E_s$  nicht, weil  $h$  im ersten Faktor wegen seiner Herkunft aus (8) unverändert bleibt. Dagegen ist die Durchlässigkeit bei zweiseitiger Entwässerung nur  $1/4$  so groß wie bei einseitiger Entwässerung, weil unter den Summenzeichen  $h^2/4$  anstelle von  $h^2$  eingeht.

Unabhängig von den Veränderungen der Steifeziffer und der Durchlässigkeit ergeben sich  $s_{\infty}$  und  $t_{95}$  immer gleich, weil sie eindeutig durch den gemessenen Konsolidationsverlauf festgelegt werden. Die für die Meßstelle selbst interessierenden Setzungsgrößen können also immer mit der für Konsolidationsprozesse üblichen Genauigkeit errechnet werden. Dagegen hängt die Genauigkeit der Parameter  $E_s$  und  $k_f$ , die eine Übertragung der Meßergebnisse auf benachbarte Bereiche mit veränderter Schichtdicke, Zusatzspannung oder Entwässerungsmöglichkeit gestatten, von der genauen Kenntnis dieser Verhältnisse auch an der Meßstelle ab.

### 3 Bestimmung des Bettungsmoduls aus der Probelastung eines Balkens

#### 3.1 Allgemeines

Die in der DIN 4019 angegebenen Setzungsberechnungen, die auf Boussinesq und Fröhlich zurückgehen, gelten zunächst nur für Setzungen unter schlaffer Last, d.h. die Größe der Belastung ist von der Verformung des Baugrundes unabhängig. Unter der Last errechnet man eine Setzungsmulde, die am Rand einer gleichmäßigen Streifenlast halb so groß ist, wie unter dem Mittelpunkt. Diese Voraussetzung trifft näherungsweise nur für die Setzung unter Auffüllungen und unter Schüttgütern zu, deren Verformung durch ihre geringe Eigensteifigkeit  $E \cdot I$  zu keiner Lastumlagerung führt. Die Setzung eines Gründungskörpers, dessen Steifigkeit unendlich groß angenommen werden kann, ist dagegen konstant. Sie gleicht der Setzung, die sich für schlaffe Last im "charakteristischen Punkt" ergibt (DIN 4019, Blatt 1, Abs. 12). Ob ein Gründungskörper annähernd unendliche Steifigkeit besitzt, hängt neben der Eigensteifigkeit  $E \cdot I$  auch von der Steifigkeit des Baugrundes und von der Größe und Art der Lasten ab, die er in den Baugrund überträgt. Bei geringerer Steifigkeit des Gründungskörpers (z.B. bei elastischen Gründungsplatten, Fundamentstreifen oder Kranbahnbalcken) beeinflussen sich Setzung und Schnittkräfte im Gründungskörper gegenseitig.

Die Setzungen des Baugrundes unter elastischen Gründungskörpern werden entweder mit dem Steifemodul- oder dem Bettungsmodulverfahren berechnet. Das Bettungsmodulverfahren geht von unendlich vielen unabhängigen elastischen Federn unter dem Balken aus (Winkler-Medium). Eine seitliche Kraftübertragung über Querkräfte an den Balkenenden wird nicht berücksichtigt, ebenfalls nicht eine räumliche Spannungsverteilung bzw. Setzungen des seitlichen Baugrundes. Dagegen beruht das Steifemodulverfahren auf der Theorie des elastischen Halbraums, so daß die räumliche Spannungsverteilung berücksichtigt werden kann. De Beer (1972) hat eine

vergleichende Bewertung beider Verfahren vorgenommen. Für die praktische Berechnung liegen für beide Verfahren Tafeln vor (Wölfer 1971, König und Sherif 1975, Kany 1974).

Der Bettungsmodul wird häufig aus dem Steifemodul  $E_s$  des Baugrundes berechnet (Wölfer 1971). Mit der Vorbelastung  $\gamma \cdot t$ , der mittleren Bodenpressung  $q$ , der Balkenbreite  $b$  und dem Beiwert  $f$  ist:

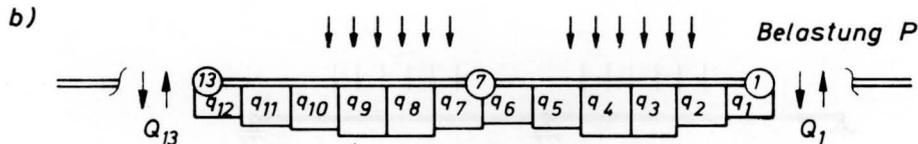
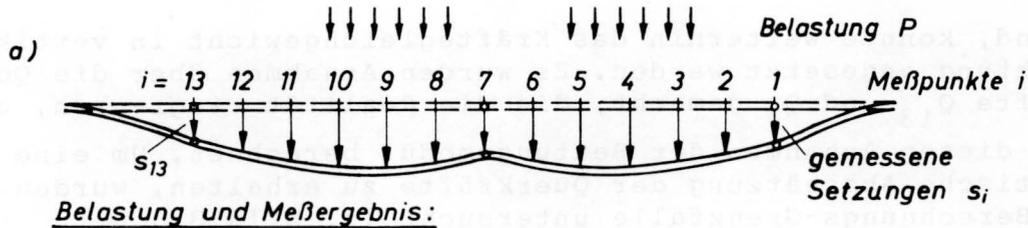
$$C = \frac{E_s \cdot q}{b \cdot f \cdot (q - \gamma \cdot t)}$$

$f$  ist ein Beiwert, der sowohl die Form des Gründungskörpers als auch die Dicke der setzungsverursachenden Schicht berücksichtigt.  $f$  wird bei sonst gleichen Verhältnissen für wachsendes  $b$  kleiner, weil ab einer bestimmten Breite des Gründungskörpers der Steifemodul praktisch gleich groß bleibt (Kezdi, 1970, S. 211, Bild 368).

Da der aus Setzungsmessungen zurückgerechnete Bettungsmodul  $C$  alle Einflüsse von Baugrund und Kranbahn enthält, wird im folgenden nur auf das Bettungsmodulverfahren eingegangen. Der Bettungsmodul  $C_i$  ist an einer Stelle  $i$  und mit der mittleren Bodenpressung  $q_i$  und der Setzung  $s_i$  definiert durch:

$$C_i = q_i / s_i \quad (11)$$

Hat man also an einem Balken - wie in Bild 2a - die Setzungen in  $i$ -Punkten gemessen, so lassen sich  $i$  Verformungsbedingungen am elastischen Balken für die Unbekannten  $C_i$  und Gleichungen für die Momenten - und Kräftegleichgewichte für die Kräfte an den Schnitten 1 und 13 (s. Bild 2b) aufstellen, aus denen  $C_i$  berechnet werden kann. Voraussetzung ist, daß die Balkensteifigkeit  $E \cdot I$  bekannt ist. Da Setzungsmessungen an Hochbauten gezeigt haben, daß die festgestellte Setzungsmulde oft mit einer viel schlafferen Konstruktion übereinstimmt, als aus den geometrischen Daten des Überbaus und den normalen Materialkonstanten erwartet werden kann (de Beer, 1972), enthält der Ansatz der Balkensteifigkeit  $E \cdot I$  Fehlermöglichkeiten.



$$q_i = \frac{s_i + s_{i+1}}{2} \cdot C$$

Legende:

- $q_i$  = Bodenpressung zwischen Meßpunkten  $i$  und  $i+1$
- $Q_i$  = Querkraft im Meßpunkt  $i$
- $s_i$  = gemessene Setzungen
- $C$  = Bettungsmodul

Bild 2 Belastung  $P$ , gemessene Setzungen  $s_i$  und Rechnungsschema für den elastisch gebetteten Balken

### 3.2 Beispiel

Der Balken hatte in der Vergangenheit große Verformungen erlitten, und es waren Schäden am Balken, zumindest Ribbildungen, zu vermuten. Eine genaue Kenntnis des Trägheitsmomentes  $I$  konnte daher nicht vorausgesetzt werden. Die Aufgabe war also, ohne Ansatz der Verformungsbedingungen zu Aussagen über die Bettungsziffer zu gelangen.

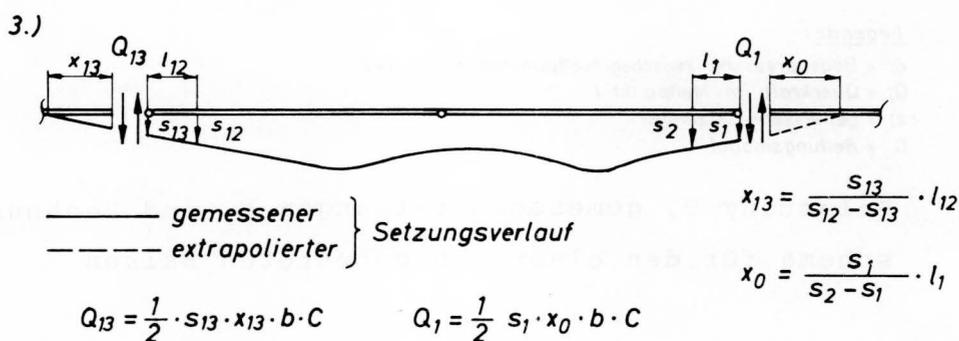
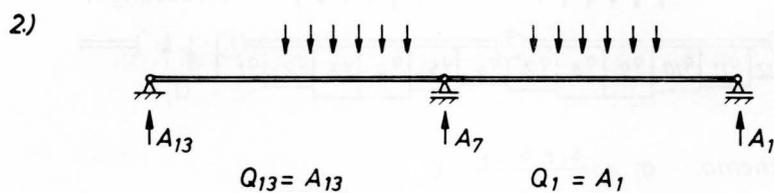
Vereinfachend wurde von einer konstanten Steifesziffer  $C$  über den gesamten Balken ausgegangen, so daß die drei Gleichgewichtsbedingungen  $\sum M_1 = 0$ ,  $\sum M_{13} = 0$  und  $\sum V = 0$  zur Berechnung von  $Q_1$ ,  $Q_{13}$  und  $C$  ausreichten (Bild 2b).

Bei der praktischen Berechnung stellte sich aber heraus, daß dieser Lösungsweg nicht zum Ziel führt. Der Schnittpunkt der drei Bestimmungsgleichungen lag in der Nähe von  $C = 0$ , das Ergebnis war sichtlich unzutreffend. Nachforschungen ergaben, daß die Vertikalkräfte auf den Balken auch an anderen als den geplanten Stellen übertragen worden waren, so daß die Momentenbedingungen zu Widersprüchen führen mußten.

In diesem Falle wurde daher ein anderer Weg beschritten, um zu einer Lösung zu gelangen. Da die Größe der Vertikallast fest-

stand, konnte weiterhin das Kräftegleichgewicht in vertikaler Richtung angesetzt werden. Es wurden Annahmen über die Querkräfte  $Q_{13}$  und  $Q_1$  gemacht, die die Realität eingrenzen, und mit diesen Annahmen der Bettungsmodul berechnet. Um eine realistische Abschätzung der Querkräfte zu erhalten, wurden folgende Berechnungs-Grenzfälle untersucht (s. Bild 3).

1.) 
$$\underline{Q_{13} = Q_1 = 0}$$



Legende:

- $q_i$  = Bodenpressung zwischen Meßpunkten  $i$  und  $i + 1$
- $Q_i$  = Querkraft im Meßpunkt  $i$
- $s_i$  = gemessene Setzungen
- $C$  = Bettungsmodul
- $b$  = Balkenbreite
- = Kranbalken
- o = Gelenk

Bild 3 Untersuchte Berechnungs-Grenzfälle zur Auswertung der Meßergebnisse am elastisch gebetteten Balken

1. Einmal wurde  $Q_1 = Q_{13} = 0$  gesetzt. Daraus ergeben sich obere Grenzen für den zutreffenden Bettungsmodul.

2. Zum anderen wurde eine Lagerung in den Gelenkpunkten 1, 7 und 13 ohne elastische Bettung vorausgesetzt. Die Querkräfte  $Q_1$  und  $Q_{13}$  wurden dann den sich rechnerisch ergebenden Auflagerkräften  $A_1$  und  $A_{13}$  gleichgesetzt. Der Baugrund muß also die Auflagerkräfte im Punkt 7 übernehmen. Die so errechneten Bettungsmoduln bilden eine untere Grenze der Realität.
3. Zwischen diesen beiden Fällen liegend, wurden die Werte  $Q_1$  und  $Q_{13}$  aus dem in Bild 4 unter 3. eingezeichneten linear extrapolierten Verlauf des gemessenen Setzungsverlaufs für die Bettungsspannungen rechts von Punkt 13 und links von Punkt 1 errechnet.

Aus den Ergebnissen von Berechnungsfall 3 wurde dann unter Berücksichtigung von Berechnungsfall 1 und 3 ein vorsichtiger Mittelwert entsprechend den Angaben der Empfehlung 92 der EAU (1976) gewählt.

#### 4 Zusammenfassung

Es wurde von der Auswertung zweier Setzungsmessungen berichtet. Wegen der speziellen Randbedingungen konnten die üblichen Verfahren zur Auswertung nicht angewandt werden. Die Verfahren mußten für den Einzelfall modifiziert werden. Im ersten Fall konnte mit der Messung des zeitlichen Setzungsverlaufs - bedingt durch den Bauablauf - erst einige Zeit nach dem Beginn der Belastung des Baugrundes begonnen werden. Aus den Meßergebnissen wurde die Endsetzung  $s_\infty$ , der Zeitraum  $t_{95}$  nach Beginn der Belastung, in dem 95 % der Endsetzung auftreten, sowie die Steifigkeit  $E_s$  und die Durchlässigkeit  $k_f$  der setzungsempfindlichen Schicht berechnet.

Im zweiten Fall sollte aus den Setzungen eines Kranbahnbalkens die während einer Probelastung unter der Kranlast gemessen wurden, der vorhandene Bettungsmodul  $C$  bestimmt werden. Da angenommen werden mußte, daß das Trägheitsmoment  $I$  des Balkens durch Risse infolge früherer Setzungen in unbekannter Größe verändert worden war, konnte die Steifigkeit  $E \cdot I$  des Balkens nicht bei der Auswertung benutzt werden. Dadurch und durch eine nichtplanmäßige Lasteintragung während der Probelastung konnte der Bettungsmodul nur durch Eingrenzung näherungsweise bestimmt werden.

5 Literatur

- /1/ De Beer, E. : Heutiger Stand der Berechnung der Sohl-  
druckverteilung unter Flächen-  
gründungen bei besonderer Berück-  
sichtigung der Bauwerkssteifigkeit.  
Schriftenreihe der Bauforschung  
(DDR) (1972) Heft 47, S. 23 - 39
- /2/ Christow, Ch.K. : Beitrag zur praktischen Setzungsbe-  
rechnung und Auswertungen von Zeit-  
Setzungsmessungen.  
Donau-Europäische Konferenz Wien  
1968 S. 16 - 19
- /3/ Cordes, R. : Statistische Untersuchungen von Meß-  
fehlern zur Beurteilung der Verfor-  
mungsansätze beim klassischen Stand-  
versuch.  
Der Bauingenieur 53 (1978) Heft 4,  
S. 139 - 146
- /4/ DIN 4019, Teil 1 : Baugrund; Setzungsberechnungen bei  
lotrechter, mittiger Belastung.  
Hrsg. v. DIN. Berlin, Köln:  
Beuth-Vertr. September 1974
- /5/ EAU : Empfehlungen des Arbeitsausschusses  
"Ufereinfassungen".  
5. Aufl. (EAU 1975). Berlin, München,  
Düsseldorf: Wilh. Ernst & Sohn 1976
- /6/ Kany, M. : Berechnung von Flächengründungen.  
2. Aufl. Berlin, München, Düsseldorf:  
Wilh. Ernst & Sohn 1974.
- /7/ Kézdi, A. : Handbuch der Bodenmechanik.  
Band II. Berlin: VEB-Verlag für  
Bauwesen 1970
- /8/ Sherif, G. und : Platten und Balken auf nachgiebi-  
König, G. : gem Baugrund.  
Berlin, Heidelberg und New York:  
Springer 1975
- /9/ Terzaghi, K. und : Theoretische Bodenmechanik.  
Jelinek, R. : Berlin, Göttingen und Heidelberg:  
Springer 1954
- /10/ Wölfer, K.-H. : Elastisch gebettete Balken. 3. Aufl.  
Wiesbaden und Berlin:  
Bauverlag GmbH 1971