

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 123/124 (1944)  
**Heft:** 23

**Artikel:** Setzungen infolge Senkung, Schwankung und Strömung des Grundwassers  
**Autor:** Haefeli, R. / Schaad, W.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-53963>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 15.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

INHALT: Setzungen infolge Senkung, Schwankung und Strömung des Grundwassers. — Entwicklungslinien im Dampfkesselbau. — Ideenwettbewerb für die Ueberbauung des Schiltwiesen-Areals in Oberwinterthur. — Die Sektor-Hakenschlütten des Kraftwerks Rapperswil-Auenstein. — In eigener Sache. — Mitteilungen: Klimaregelung in Druckereien. Hanfseelen der Förder- und Zugseile. Finanzielle Auswirkung der Klär-

gasverwertung. Physikalisch-Chemische Konstanten von kompressiblen Gasen. Die Ausstellung «Architektur». 25 Jahre Micafil, 1918 bis 1943. Das Kunstgewerbemuseum der Stadt Zürich. — Wettbewerbe: Sekundarschule und «Lindenschule» in Steckborn. Erweiterung des Kunsthause Zürich. — Nekrologe: Hans Kaeser. — Literatur. — Mitteilungen der Vereine. — Vortragskalender.

## Setzungen infolge Senkung, Schwankung und Strömung des Grundwassers

Von P.-D. Ing. Dr. R. HAEFELI und Ing. W. SCHAAD, Erdbauabteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, E. T. H. Zürich

### 1. Einleitung

Infolge der erhöhten Anforderungen, die die kriegsbedingte Versorgungslage unseres Landes an die landwirtschaftliche Produktion stellt, wurden zur Sicherstellung der Ernährung vermehrte Anbauflächen notwendig. In den verflossenen Jahren gelangten deshalb eine grosse Anzahl Meliorationsprojekte zur Durchführung und weitere sind noch vorgesehen. Darüber hat uns das ausführliche Sonderheft der SBZ schon Ende des Jahres 1942 Aufschluss gegeben [1]<sup>1)</sup>. Aus dessen Inhalt geht die Bedeutung der Meliorationen innerhalb unserer nationalen Aufbauarbeit klar hervor. Der Umfang der Arbeiten erfordert eine eingehende Auseinandersetzung mit den technischen und biologischen Problemen, die sich bei den Projektbehandlungen von Landverbesserungen ergeben. Auch die möglichen Rückwirkungen, die die Veränderung der Grundwasserstände auf die lokalen Klimaverhältnisse haben könnten, sollten dabei berücksichtigt werden. Im nachfolgenden werden nebst der Ableitung von Setzungsanalysen für wenig zusammendrückbare Materialien Methoden entwickelt, um die Grössenordnung der Setzungen von Torfschichten bei der Vornahme von Grundwasserabsenkungen voraussagen zu können. Es ist dabei immer im Auge zu behalten, dass Torf ein in seiner Zusammensetzung stark wechselndes, zeitlich veränderliches und wenig homogenes, organisches Material darstellt, das genaue Berechnungen zum vornherein verunmöglicht. Immerhin dürfte eine Abschätzung der voraussichtlichen Setzungen und die Angabe ihrer Streuungen bei eingehender Untersuchung einer genügenden Anzahl möglichst ungestörter Proben, die durch sorgfältige Sondierungen zu entnehmen sind, durchführbar sein. Auch die neuerprobte Möglichkeit, die Zusammendrückbarkeit des Untergrundes an Ort und Stelle durch Setzungsmessungen im Bohrloch zu bestimmen, sei in diesem Zusammenhang erwähnt.

Bei der Vornahme von Grundwasserabsenkungen zur Entwässerung von oberflächennahen Bodenschichten wird der Spannungszustand zwischen und in den festen Bodenteilen verändert. Diese Spannungsänderungen, die als Folge der Verminderung des Auftriebes in den entwässerten Bodenschichten eintreten, bewirken allgemein Formänderungen des Bodens, von denen uns die Setzung, d. h. die lotrechte Verschiebung der Bodenschichten, vor allem interessiert. Bei Böden mit relativ geringer Zusammendrückbarkeit, wie Sanden und gewissen Lehmen, sind die durch Grundwasserabsenkung hervorgerufenen Formänderungen normalerweise gering. Sie interessieren in der Regel nur, wenn setzungsempfindliche Kunstbauten im Bereiche der Setzungen liegen. Verlandungsgebiete mit Bodenarten von hoher Zusammendrückbarkeit, wie sie bei den fetten Tonen und namentlich bei Torfen vorkommen, erfordern dagegen vor der Inangriffnahme eines Bauvorhabens unter allen Umständen eine Abschätzung der zu erwartenden Setzungen, sowie deren Unregelmässigkeiten, um einerseits den Wirkungsgrad der Grundwasserabsenkung und andererseits die Beeinflussung neuer oder schon bestehender Kunstbauten beurteilen zu können (Entwässerungskanäle, Drainageleitungen, Dämme, Verkehrsadern). Diese Untersuchung bildet eine der wichtigsten Grundlagen für die konstruktiv richtige Gestaltung des Projektes und ermöglicht insbesondere die prophylaktische Bekämpfung unliebsamer Folgen der Grundwasserabsenkung.

Ausser dem Einfluss einer einmaligen Grundwasserabsenkung auf die Setzungserscheinungen werden im vorliegenden Aufsatz auch die Setzungen infolge periodisch schwankender Grundwasserstände kurz besprochen. Es handelt sich dabei um ein noch wenig erforschtes Gebiet, das sich rechnerisch nicht genügend erfassen lässt und daher zunächst rein phänomenologisch anhand einiger elementarer Laboratoriumsversuche betrachtet werden soll. Auch der mögliche Einfluss einer inneren Auslaugung des Bodens in der Form eines chemischen Abbaues der festen Phase durch deren Lösung in der zirkulierenden, flüs-

sigen Phase, darf hier nicht übersehen werden. Es sind dies Probleme, deren Lösung sowohl die Bau- und Kultur-Ingenieure wie die Architekten, die um die Lebensdauer ihrer Schöpfungen besorgt sind, in gleichem Masse interessieren.

Die durch Grundwasserabsenkungen bewirkten Setzungen spielen jedoch nicht nur bei Meliorationsarbeiten, sondern unter Umständen auch in Stadtgebieten eine wichtige Rolle. Nicht selten führt z. B. die Asphaltierung der Strassen neuer Siedlungsgebiete in Verbindung mit der Kanalisierung des Oberflächenwassers zu einer allgemeinen Absenkung des Grundwassers, die sich namentlich dort katastrophal auswirkt, wo die Häuser auf Holzpfehlen stehen, die bei der Absenkung aus dem Grundwasser auftauchen und verfaulen. Auch die lokalen Grundwasserabsenkungen für Fundationszwecke können bekanntlich für die Nachbargebäude unangenehme Folgen haben. Der ganze Fragenkomplex berührt daher auch die Landesplanung.

### 2. Berechnungsgrundlagen

Als Grundlage für die Entwicklung der nachstehend dargestellten Methoden zur Setzungsbestimmung diene die graphische Setzungsanalyse von R. Haefeli [2]. Darnach ergibt sich die Zusammendrückung  $\Delta d z_a$  eines Bodenelementes der zusammendrückbaren Schicht von der Höhe  $d_a$  bei der Erhöhung der Vertikalspannung von  $\sigma_a$  auf  $\sigma_b$ , kg/cm<sup>2</sup> und veränderter Seitenausdehnung zu:

$$\Delta d z_a = \left( \frac{\Delta b - \Delta a}{1 - \Delta a} \right) d z_a = y d z_a \quad \dots \quad (1)$$

$$y = \frac{\Delta b - \Delta a}{1 - \Delta a} \quad \dots \quad (2)$$

worin bedeuten:

- $\Delta d z_a$  = lotrechte Verkürzung eines Bodenelementes (Zusammendrückung) bei Aenderung der Vertikalspannung von  $\sigma_a$  auf  $\sigma_b$
- $\Delta a, \Delta b$  = prozentuale Zusammendrückungen bei der Veränderung der Vertikalspannung von  $\sigma_1 = 1,0$  kg/cm<sup>2</sup> auf  $\sigma_a$ , resp.  $\sigma_b$  (spez. Setzungen)
- $d z_a$  = ursprüngliche Höhe eines Bodenelementes vor der Belastungsänderung
- $y$  = prozentuale Zusammendrückung des Bodenelementes infolge Erhöhung der Vertikalspannung von  $\sigma_a$  auf  $\sigma_b$ .

Kennt man nun einerseits den Verlauf der Vertikalspannungen  $\sigma_i$  vor und nach der Vornahme einer Grundwasserabsenkung und andererseits aus dem Laboratoriumsversuch deren Zusammenhang mit den prozentualen Zusammendrückungen  $\Delta i$  (spez. Setzungen), so kann für jedes beanspruchte Element  $d z_a$  der Bodenschicht die entsprechende Zusammendrückung, bei gegebener Spannungsänderung, ermittelt und durch Integration über sämtliche Bodenelemente die totale Setzung  $\delta_T$  dieser Schicht berechnet werden.

Gegenüber den im Tiefbau üblichen Untergrundverhältnissen liegen bei Meliorationen ganz spezielle Bodenarten vor, die eine entsprechende Anpassung der üblichen Setzungsanalyse erfordern. So wird z. B. bei der Anwendung der Setzungsanalyse in normalem Baugrund der Wert  $1 - \Delta a \cong 1$ , da  $\Delta a$  meistens sehr klein ist. Für Meliorationsgebiete mit fast durchwegs stark zusammendrückbaren Böden ist jedoch obige Vereinfachung nicht mehr zulässig. Die in torffreiem Baugrund vorkommenden Setzungen sind ferner gegenüber den Schichtmächtigkeiten relativ klein, was jedoch bei Grundwasserabsenkungen in Moorböden nicht zutrifft. Hier ergeben sich vielmehr sehr grosse Setzungen im Vergleich zur Schichtmächtigkeit, sodass nach einer Absenkung des Grundwassers beträchtliche Teile des Bodens infolge langsamer Setzung der Schicht erneut unter den Grundwasserspiegel tauchen (Abb. 1). Damit wird aber die relative Grundwasserabsenkung gegenüber der gesetzten Terrainoberfläche im Endzustand der beruhigten Schicht kleiner als die absolute, woraus hervorgeht, dass der «Wirkungsgrad» der Absenkung, unter dem wir das Verhältnis der relativen zur absoluten Absenkung

<sup>1)</sup> Die in eckigen Klammern angegebenen Zahlen beziehen sich auf das am Ende dieses Aufsatzes angeführte Literaturverzeichnis.

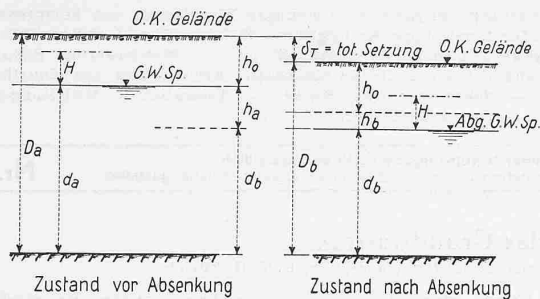


Abb. 1. Schichtverhältnisse vor und nach Absenkung

( $\eta = \frac{h_b}{h_a}$ ) verstehen, in hohem Masse von der Setzung selbst abhängt. Erreichen z. B. die Setzungen nahezu die Grösse der Absenkung, so kann der Wirkungsgrad der Grundwasserabsenkung so klein werden, dass der Zweck derselben in Frage gestellt wird. Bei schwimmenden Moorböden wird im Grenzfall  $\eta = 0$

Besitzt das über dem Grundwasser liegende Material eine relativ grosse kapillare Steighöhe  $H$  (Abb. 1), so ist schliesslich bei der Setzungsanalyse die Tatsache der Aufhängung des Kapillarwassers am oberen Rand der Kapillarzone zu berücksichtigen.

Bei nicht sehr stark zusammendrückbaren Materialien, zu denen wir im Gegensatz zum Torf hier ausnahmsweise auch die Lehme und Tone zählen, wird, wie schon erwähnt, der in Formel 2 enthaltene Ausdruck  $1 - \Delta_a \cong 1$ . Ferner kann die Höhe eines Bodenelementes allgemein mit  $dz$  statt  $dz_a$  bezeichnet werden, d. h. ohne Unterscheidung des Zustandes vor und nach der Deformation. Nach Gleichung (1) vereinfacht sich dann die Berechnung der Zusammendrückung eines Elementes  $dz$  zu (vgl. Abb. 9):

$$\Delta dz \sim (\Delta_b - \Delta_a) dz = y dz = df; y \sim \Delta_b - \Delta_a \dots (3)$$

Diese Beziehung lässt sich nun graphisch durch Planimetrieren der Fläche  $F$  sehr leicht auswerten auf Grund der Gleichung:

$$\delta_T = \int_0^d y dz = \int_0^d df = F \dots (4)$$

Andererseits folgen bei den hier in Betracht fallenden Bodenarten die spezifischen Setzungen  $\Delta_i$  annähernd dem Gesetz [3]:

$$\Delta_i = \Delta_e \ln \lambda_i; \lambda_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_1} \dots (5)$$

worin bedeuten:

$\Delta_i$  = spezifische Setzung = prozentuale Zusammendrückung bei der Lasterhöhung von  $\sigma_1 = 1 \text{ kg/cm}^2$  auf  $\sigma_i = i \text{ kg/cm}^2$ , bezogen auf die Höhe der Probe bei  $\sigma_1 = 1 \text{ kg/cm}^2$ .

$\Delta_e$  = Zusammendrückungszahl (Konstante) = spez. Setzung für  $\sigma_i = e = 2,718 \text{ kg/cm}^2$ .

Führt man Gleichung (5) in Gleichung (3) ein, so erhält man:

$$\Delta dz = \Delta_e (\ln \lambda_b - \ln \lambda_a) dz = \Delta_e \ln \frac{\sigma_b}{\sigma_a} dz \dots (6)$$

$$\delta_T = \int_0^d \Delta_e \ln \frac{\sigma_b}{\sigma_a} dz \dots (7)$$

Die Setzung  $\delta_T$  einer homogenen Schicht ist demnach proportional der Zusammendrückungszahl  $\Delta_e$ . Diese Verhältnisse bieten den grossen Vorteil, dass die auf graphischem oder analytischem Wege durchgeführte Setzungsanalyse zuerst für  $\Delta_{e1} = 1\%$  ausgeführt werden kann, indem gilt:

$$\delta_T = \frac{\Delta_e}{\Delta_{e1}} \delta^1 \quad \delta^1 = \text{Setzung für } \Delta_{e1} = 1\%$$

Die dadurch erzielte Vereinfachung und Uebersicht macht sich namentlich bei geschichteten, d. h. inhomogenen Böden geltend, wo die Zusammendrückungszahl von Schicht zu Schicht wechselt. Hier führt das graphische Verfahren am schnellsten zum Ziel, indem man für jede Schicht  $n$  von der Höhe  $d_n$ , die Teilfläche  $f_n^1$  ermittelt (vgl. Abb. 9), wobei gilt:

$$f_n^1 = \int_0^{d_n} df^1; df^1 = (\ln \lambda_b - \ln \lambda_a) dz = df \text{ für } \Delta_{e1} = 1\% \quad (8)$$

Die Setzung dieser Einzelschicht  $n$  mit der Zusammendrückungszahl  $\Delta_{en}$  berechnet sich dann zu

$$\delta_n = \frac{\Delta_{en}}{\Delta_{e1}} f_n^1$$

Aus der Gesamtheit dieser Teilsetzungen erhält man dann durch Summenbildung über  $n$ -Schichten die totale Setzung der zusammendrückbaren Schicht zu:

$$\delta_T = \sum_{n=1}^N \delta_n = \sum_{n=1}^N \frac{\Delta_{en}}{\Delta_{e1}} f_n^1 \dots (9)$$

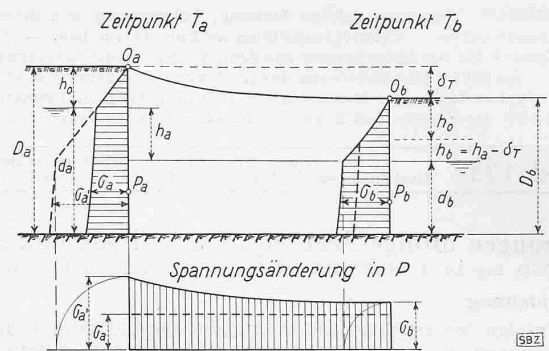
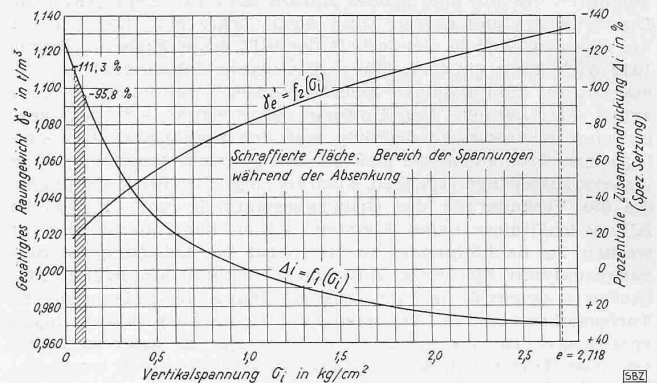


Abb. 2. Spannungsverlauf während der Absenkung

Abb. 3. Kurven der prozentualen Zusammendrückung  $\Delta_i$  und der gesättigten Raumgewichte  $\gamma'_e$  in Funktion der Vertikalbelastung  $\sigma_i$ 

Für sämtliche folgenden Entwicklungen wird vorausgesetzt, dass der Boden über dem Grundwasserspiegel nach der Absenkung gesättigt bleibe.

### 3. Graphische Setzungsanalyse

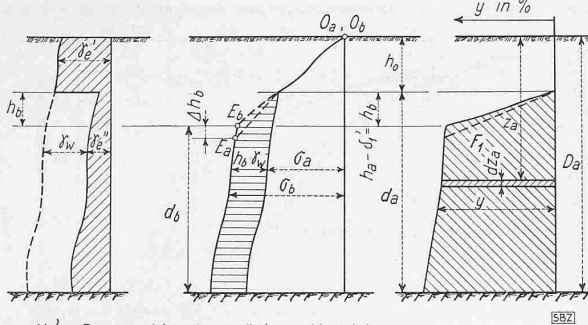
a) Die Setzung ist im Vergleich zur Wasserspiegelabsenkung relativ gross

Aus den bisherigen Ausführungen folgt, dass zur Vornahme einer Setzungsanalyse sowohl die Kenntnis des ursprünglichen Spannungszustandes und dessen Aenderungen, als auch des Zusammenhanges zwischen Spannungszustand und Zusammendrückung des Materials (spezifische Setzungen) erforderlich sind. Bei der graphischen Setzungsanalyse für sehr stark zusammendrückbare Materialien muss zunächst die voraussichtliche Setzung  $\delta_T$  geschätzt und der geschätzte Wert  $\delta^1$  dann nachgeprüft, bzw. korrigiert werden.

Die durch eine plötzliche Grundwasserabsenkung bedingten Spannungsänderungen im Untergrund sind zeitlich veränderlich, wie aus Abb. 2 ersichtlich ist. Im Zeitpunkt  $T_a$  werde das Grundwasser um die Höhe  $h_a$ , die wir als absolute Absenkung bezeichnet haben, abgesenkt. In einem Punkte  $P_a$  steigt dabei die Vertikalspannung plötzlich von  $\sigma_a$  auf  $\sigma'_a$ , weil auf die Bodenlamelle von der Höhe  $h_a$  der Auftrieb wegfällt. Diese Spannungsvermehrung hat eine Setzung zur Folge, die im Endzustand (Zeitpunkt  $T_b$ ) den Betrag  $\delta_T$  erreiche. Das mit dieser Setzung verbundene, erneute Eintauchen der oberen Bodenschichten unter das abgesenkte Grundwasser, bewirkt nun wieder eine allmähliche Abnahme der betrachteten Spannung von  $\sigma'_a$  auf  $\sigma_b$ .

Da uns zunächst der zeitliche Verlauf der Setzung nicht interessiert, sondern nur deren Endwert  $\delta_T$ , so ist allein der endgültige Belastungszustand massgebend, der durch die relative Grundwasserabsenkung  $h_b$  bedingt ist. Das Koordinatensystem denken wir uns dabei mit der Schichtoberfläche fest verbunden, sodass sich der Koordinatenanfangspunkt während der Setzung von  $0_a$  nach  $0_b$  verschiebt.

Zur Vorbereitung der Analyse ist es am zweckmässigsten, die sich aus der Zusammendrückung des Materials im Oedometer ergebenden spezifischen Setzungen  $\Delta_i = f_1(\sigma_i)$  aufzutragen (Abb. 3), wobei  $\Delta_i$  die prozentuale Zusammendrückung infolge Erhöhung der Vertikalspannung von  $\sigma_1 = 1,0 \text{ kg/cm}^2$  auf  $\sigma = \sigma_i \text{ kg/cm}^2$  bedeutet. Ausserdem wird die Funktion  $\gamma'_e = f_2(\sigma_i)$ , d. h. die Abhängigkeit des gesättigten Raumgewichtes  $\gamma'_e$  von der Vertikalspannung benötigt (Abb. 3), weil bei stark zusam-



$\gamma'_e$  = Raumgewicht des gesättigten Materials  
 $\gamma'_e = \gamma'_e - \gamma'_w$   
 $\gamma'_w$  = Raumgewicht des Wassers =  $1 \text{ t/m}^3$

Abb. 4. Allgemeine graphische Setzungsanalyse für stark zusammendrückbares Material

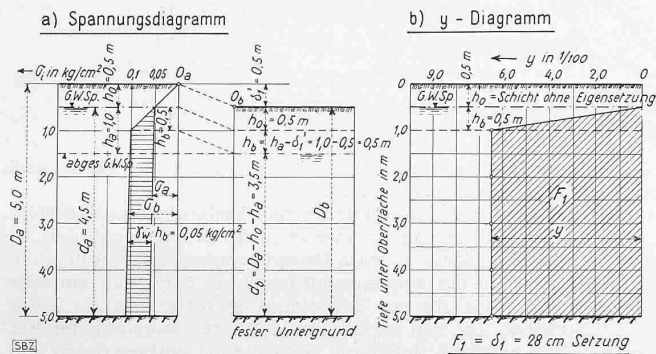


Abb. 7. Zahlenbeispiel für graphische Setzungsanalyse bei stark zusammendrückbarem Boden

mendrückbaren Materialien wie Torf das Raumgewicht mit dem Ueberlagerungsdruck ändert, sodass die Vertikalspannung nicht einfach linear mit der Tiefe zunimmt, wie dies bei weniger zusammendrückbaren, homogenen Böden annähernd der Fall ist.

Man hat nun zuerst die dem Zeitpunkt  $T_a$  entsprechende Verteilung der Vertikalspannungen  $\sigma_a$  aufzutragen, indem man z. B. nach Abb. 4 die an ungestörten Proben tatsächlich gemessenen Raumgewichte  $\gamma'_e$  bzw.  $\gamma''_e$  in Funktion der Tiefe aufzeichnet und daraus schrittweise den spez. Ueberlagerungsdruck  $\sigma_a$  in verschiedenen Tiefen berechnet. Steht dagegen nur eine ungestörte Probe aus geringer Tiefe zur Verfügung, so kann bei genügend homogenem Untergrund die bekannte Beziehung  $\gamma'_e = f_2(\sigma_i)$  (Abb. 3) dazu benützt werden, um durch lamellenweises Fortschreiten von oben nach unten die Verteilung der Spannungen  $\sigma_a$  angenähert zu ermitteln. Nach Bestimmung der  $\sigma_a$ -Kurve wird in dasselbe Diagramm die  $\sigma_b$ -Kurve eingetragen, die unterhalb des um die Höhe  $h_b$  (relative Absenkung) (Abb. 4) abgesenkten Wasserspiegels parallel zur  $\sigma_a$ -Linie im Abstand  $\sigma_b - \sigma_a = h_b \gamma'_w$  verläuft. Dadurch erhält man die in Abb. 4 horizontal schraffierte und trapezförmige Mehrbelastung. Da der bereits verkürzten Strecke  $h_b$  vor der Setzung eine etwas grössere Strecke bzw. Schichthöhe entspricht, müsste, streng genommen, die Ecke  $E_b$  des Belastungsdiagramms um die Eigensetzung der Schicht  $h_b$  tiefer gesetzt werden (nach  $E_a$ ), was aber praktisch belanglos ist. Im übrigen stelle man sich vor, dass die Zusammendrückung des Bodens infolge Mehrbelastung noch nicht stattgefunden habe, sodass einerseits die Höhe des sich setzenden Schichtteils  $d_a$ , andererseits auch das Raumgewicht  $\gamma''_e$  in jedem Punkte unverändert geblieben seien. Die durch die horizontal schraffierte Fläche dargestellte Spannungserhöhung bewirkt nun die gesuchte Setzung  $\delta_1$ . Um diese zu ermitteln, liest man aus Abb. 3 zu jedem  $\sigma_a$ - bzw.  $\sigma_b$ -Wert der Abb. 4 (Mitte) die entsprechenden spezifischen Zusammendrückungen  $\Delta_a$  bzw.  $\Delta_b$  ab, um hieraus die Werte  $y$  zu bilden:

$$y = \frac{\Delta_b - \Delta_a}{1 - \Delta_a} \quad (2)$$

Durch Auftragen der  $y$ -Werte in Funktion der Tiefe erhält man das in Abb. 4 rechts dargestellte Dia-

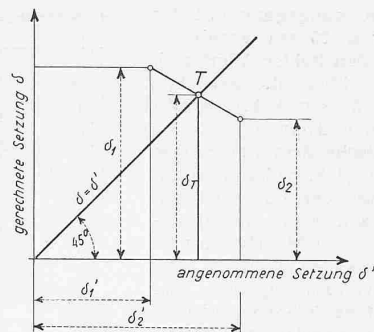


Abb. 5. Allgem. Konstruktion der totalen Setzung aus zwei Näherungswerten

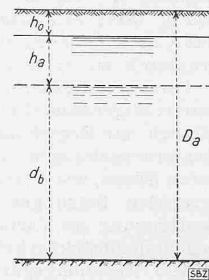


Abb. 6. Schichtverhältnis für das Zahlenbeispiel

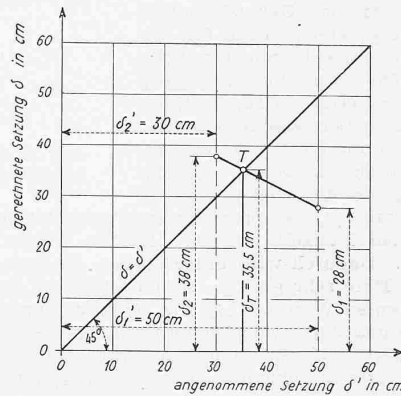


Abb. 8. Graph. Konstruktion der totalen Setzung für das Zahlenbeispiel in Abb. 7

gramm, aus dem sich die totale Setzung  $\delta_1$  gleich der schraffierten Fläche  $F_1$  ergibt:

$$\delta_1 = \int_0^{D_a} y \, dz_a = F_1 \quad (10)$$

Der so erhaltene Wert  $\delta_1$  wird aber im ersten Rechnungsgang nicht mit dem geschätzten Wert  $\delta'_1$  übereinstimmen. Die Berechnung muss deshalb mit einer zweiten, geschätzten Setzung  $\delta'_2$  wiederholt werden, um einen entsprechenden Kontrollwert  $\delta_2$  zu erhalten. Die gesuchte Totalsetzung

$\delta_T$  ergibt sich dann graphisch aus dem in Abb. 5 dargestellten Diagramm, wobei für den auf der 45°-Linie gelegenen Schnittpunkt  $T$  die Bedingung

$$\delta' = \delta = \delta_T$$

erfüllt ist.

**Zahlenbeispiel.** Zur Veranschaulichung der Methode sei der Rechnungsgang an folgendem, aus der Praxis entnommenen Zahlenbeispiel demonstriert (Abb. 6)

Totale Schichthöhe vor der Absenkung . . . . .  $D_a = 5,00 \text{ m}$   
 Schicht ohne Eigensetzung = Grundwasserspiegeltiefe . . . . .  $h_0 = 0,50 \text{ m}$   
 Absolute Absenkung . . . . .  $h_a = 1,00 \text{ m}$   
 Abstand des abgesenkten Spiegels von der festen Unterlage . . . . .  $d_b = 3,50 \text{ m}$

Für eine erste Vorberechnung wird die vermutliche Setzung auf  $\delta'_1 = 0,50 \text{ m}$  geschätzt. Mit Hilfe dieses Wertes lässt sich das Spannungsdiagramm von Abb. 4 auf Grund der Raumgewichtskurve  $\gamma'_e$  (Abb. 3) berechnen (vgl. Abb. 7). Die Raumgewichte  $\gamma''_e$  unter den Wasserspiegeln ergeben sich aus der Beziehung  $\gamma''_e = \gamma'_e - \gamma'_w$ ; ( $\gamma'_w = 1 \text{ t/m}^3$ ). Die zu den Spannungen  $\sigma_a$  und  $\sigma_b$  zugehörigen, prozentualen Zusammendrückungen  $\Delta_a$  und  $\Delta_b$  werden aus der Kurve der Abb. 3 abgelesen und hieraus die Werte  $y$  gerechnet. Der zahlenmässige Rechnungsgang ist in folgender Tabelle 1 zusammengestellt.

Die gemäss Abb. 4 aufgetragenen  $y$ -Werte ergeben die entsprechende  $y$ -Fläche  $F_1$ , deren Inhalt die Setzung  $\delta_1 = 28 \text{ cm}$  darstellt.

Tabelle 1. Berechnung der Werte  $y$

Tiefe unter Oberfläche	$\sigma_a$	$\sigma_b = \sigma_a + \gamma'_w h_b = \sigma_a + 0,05$	$\Delta_a$	$\Delta_b$	$1 - \Delta_a$	$\Delta_b - \Delta_a$	$y = \frac{\Delta_b - \Delta_a}{1 - \Delta_a}$
m	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	%	%	%	%	%
0,5	(0,05095)	(0,05095)	(-111,3 = -111,3)			0	0
1,0	0,05190	0,10190	-111,0	-97,3	211,0	13,7	6,49
2,0	0,05380	0,10380	-110,5	-96,8	210,5	13,7	6,50
3,0	0,05570	0,10570	-110,0	-96,4	210,0	13,6	6,48
4,0	0,05765	0,10765	-109,8	-96,2	209,8	13,6	6,48
5,0	0,05885	0,10885	-109,3	-95,8	209,3	13,5	6,46

Ein analoger zweiter Rechnungsgang mit der geschätzten Setzung  $\delta'_2$  von 30 cm ergab als Resultat  $\delta_2 = 38$  cm. Aus den beiden Werten  $\delta_1$  und  $\delta_2$  lässt sich nun angenähert die gesuchte, totale Setzung  $\delta_T$  nach Abb. 5, bzw. Abb. 8 (S. 269) graphisch zu  $\delta_T = 35,5$  cm bestimmen.

Die vorstehende, graphische Setzungsanalyse besitzt allgemeine Gültigkeit, d. h. sie kann grundsätzlich zur Berechnung jeglicher, durch Grundwasserabsenkungen in stark zusammendrückbaren Böden, wie Torflagern oder Moorböden verursachten Setzungen, verwendet werden. Zur Bestimmung der Variation von Raumgewicht und Zusammendrückbarkeit mit der Tiefe wurden bei diesem Rechnungsgang die experimentell ermittelten Kurven zu Grunde gelegt, so dass hierfür keine vereinfachenden Voraussetzungen notwendig waren.

Aus dem  $y$ -Diagramm des Zahlenbeispiels (Abb. 7), das den Setzungsberechnungen für ein grösseres Meliorationsprojekt entnommen wurde, sowie aus weiteren, ähnlichen Berechnungen, zeigte sich, dass für die Grösse der Grundwasserabsenkungen, wie sie normalerweise in Meliorationsgebieten vorkommen, die Werte  $y$  unter dem Grundwasserspiegel beinahe konstant werden. Der Grund hierfür liegt in der kleinen Abweichung des Raumgewichtes  $\gamma'_e$  des gesättigten Torfmaterials vom Wert  $1,0 \text{ t/m}^3$ , welche Tatsache aus dem grossen Wassergehalt des Torfes folgt. Dadurch wird unter Wasser die Spannungszunahme mit der Tiefe sehr gering. Dies bedingt in der Folge einen fast konstanten Wert von  $\Delta_a$  und  $\Delta_b$  in der unter Wasser gelegenen Zone und damit auch einen beinahe konstanten Wert  $y$ . Zudem nimmt die Spannung der unter dem ursprünglichen Spiegel gelegenen Schichten durch die Absenkung um einen relativ kleinen Betrag zu, sodass der Zusammenhang, der zwischen den prozentualen Zusammendrückungen  $\Delta_i$  und der Vertikalspannung  $\sigma_i$  besteht, im Bereich der Spannungsänderung durch ein lineares Gesetz ersetzt werden kann. Diese Tatsachen lassen eine einfache Berechnung für die Verhältnisse in Torfschichten entwickeln, die ein gesättigtes Raumgewicht von  $\gamma_e \sim 1,0 \text{ t/m}^3$  aufweisen. Die entsprechenden, im Abschnitt 4 behandelten, analytischen Berechnungsmethoden haben gegenüber der graphischen den Vorteil, dass die Setzung explizite ausgedrückt werden kann.

b) Die Setzung ist im Vergleich zur Wasserspiegelabsenkung relativ klein

Besteht der Untergrund aus Lehm, Ton, Sand oder Kies-sand, d. h. aus Lockergesteinen, bei denen die Setzung im Verhältnis zur Wasserspiegelabsenkung klein ist, so gestaltet sich die graphische Setzungsanalyse wesentlich einfacher als im Falle a), indem das Wiedereintauchen der im Absenkungsbereich liegenden Bodenschichten unter den abgesenkten Grundwasserspiegel praktisch keine Rolle spielt und daher vernachlässigt werden darf. Hier liefert die normale, bereits an anderer Stelle generell beschriebene Setzungsanalyse direkt die gesuchte totale Setzung  $\delta_T$  [2]. Die Anwendung dieses, bei einiger Übung sehr rasch durchführbaren Verfahrens, wird nachstehend durch ein Zahlenbeispiel erläutert, bei dem der Untergrund aus mehreren Schichten von ganz verschiedener Zusammendrückbarkeit besteht.

**Zahlenbeispiel.** Für das Zahlenbeispiel der Setzungsanalyse in schwach zusammendrückbaren, geschichteten Böden sollen die folgenden Schichtverhältnisse (vgl. Abb. 9) gelten.

Tabelle 2. Schichtverhältnisse für Berechnung der Setzung bei geschichtetem Boden

Schicht $n$	Mächtigkeit $d_n$	Raumgewicht $\gamma'_{en}$ (gesättigt)	Zusammendrückungszahl $\Delta_e$
1	3,0 m	1,9 t/m <sup>3</sup>	3 ‰
2	4,0 m	1,8 t/m <sup>3</sup>	10 ‰
3	5,0 m	2,0 t/m <sup>3</sup>	2 ‰

Der Grundwasserspiegel werde vom anfänglichen Niveau von 0,50 m unter der Bodenoberfläche um  $h_a = 4,0$  m, d. h. auf 4,5 m Tiefe abgesenkt.

In Abb. 9 links sind die Diagramme der Vertikalspannungen  $\sigma_a$  und  $\sigma_b$  in Funktion der Tiefe aufgetragen worden. Diese Spannungen  $\sigma_i$  entsprechen dem Ueberlagerungsdruck der betreffenden Tiefe unter Berücksichtigung der Raumgewichte  $\gamma'_e$  über Wasser und  $\gamma''_e = \gamma'_e - \gamma_w$ ; ( $\gamma_w = 1 \text{ t/m}^3$ ) unter Wasser. Das Spannungsdiagramm  $\sigma_a$  entspricht den Spannungen infolge des Eigengewichtes des Bodenmaterials vor der Vornahme der

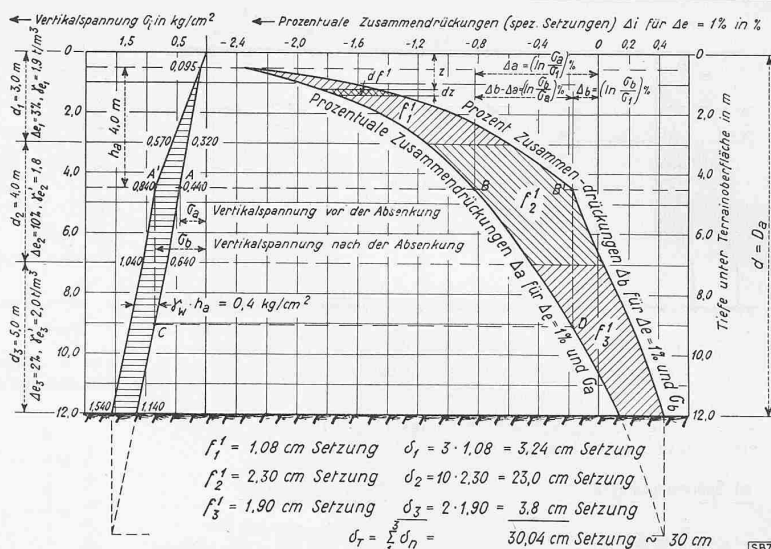


Abb. 9. Setzungsanalyse für verschieden zusammendrückbare Schichten bei Grundwasserabsenkung (Zahlenbeispiel)

Absenkung, während das Diagramm  $\sigma_b$  die Spannungen nach der Absenkung veranschaulicht.

In den Berechnungsgrundlagen im Abschnitt 2 wurde gezeigt, dass die totale Setzung  $\delta_T$  einer Schicht proportional der Zusammendrückungszahl  $\Delta_e$  wird. Diese Proportionalität ermöglicht nun bei verschieden zusammendrückbaren Schichten zunächst die Rechnung wie für ein homogenes Material mit  $\Delta_{e1} = 1 ‰$  durchzuführen. Die den wirklichen  $\Delta_e$ -Werten zugeordneten Setzungen der einzelnen Schichten können dann einfach durch Multiplikation der Setzungen  $\delta'_n$  mit dem zugehörigen Verhältnis  $\frac{\Delta_{en}}{\Delta_{e1}}$  gefunden werden ( $\Delta_{en}$  = Zusammendrückungszahl der Schicht  $n$ ).

Dieser Rechnungsgang wurde für die Spannungsdiagramme  $\sigma_a$  und  $\sigma_b$  der Abb. 9 ausgeführt. Berechnet man für beliebige Punkte A bzw. A' der beiden Spannungsdiagramme die prozentualen Zusammendrückungen  $\Delta_a$  bzw.  $\Delta_b$  in jeder Tiefe, so erhält man die in Abb. 9 rechts angegebenen Kurven für  $\Delta_{e1} = 1 ‰$ , die nach Formel (5) (Abschnitt 2) die einfache mathematische Form annehmen:

$$\Delta_a = \Delta_e \ln \lambda_a = \left( \ln \frac{\sigma_a}{\sigma_1} \right) \cdot \sigma_1 \quad \sigma_1 = 1 \text{ kg/cm}^2$$

$$\Delta_b = \Delta_e \ln \lambda_b = \left( \ln \frac{\sigma_b}{\sigma_1} \right) \cdot \sigma_1$$

Die prozentuale Höhenänderung  $y$  eines Elementes ergibt sich als Differenz der beiden Kurven:

$$y \sim \Delta_b - \Delta_a = \left( \ln \frac{\sigma_b}{\sigma_1} - \ln \frac{\sigma_a}{\sigma_1} \right) \cdot \sigma_1 = \left( \ln \frac{\sigma_b}{\sigma_a} \right) \cdot \sigma_1$$

Die Teilsetzung  $\delta'_n$  für  $\Delta_{e1} = 1 ‰$  einer Schicht mit der Dicke  $d_n$

wird identisch mit der Fläche  $f'_n = \delta'_n = \left( \int_0^{d_n} \ln \frac{\sigma_b}{\sigma_a} dz \right) \cdot \sigma_1$ . Die

tatsächliche Schichtsetzung  $\delta_n$  wird durch Multiplikation von  $\delta'_n$  mit dem Faktor  $\frac{\Delta_{en}}{\Delta_{e1}}$  gefunden.

$$\delta_n = \frac{\Delta_{en}}{\Delta_{e1}} \delta'_n$$

Die Rechnung sei beispielsweise für die in Abb. 9 angegebenen, zugehörigen Punkte A und A' in 4,50 m Tiefe auf der abgesenkten Spiegellinie durchgeführt.

Für die Vertikalspannung  $\sigma_a$  vor der Absenkung ergibt sich der Wert:

$$\sigma_a = \sum \gamma \Delta z = 1,9 \cdot 0,5 + (1,9 - 1) \cdot 2,5 + (1,8 - 1) \cdot 1,5 = 4,40 \text{ t/m}^2 = 0,44 \text{ kg/cm}^2$$

worin  $\Delta z$  die Höhe der einzelnen Schichtelemente bedeutet.

Entsprechend gilt für die Spannung  $\sigma_b$  nach der Absenkung:

$$\sigma_b = 1,9 \cdot 3,0 + 1,8 \cdot 1,5 = 8,40 \text{ t/m}^2 = 0,84 \text{ kg/cm}^2$$

Diese Spannungen erzeugen die folgenden, prozentualen Zusammendrückungen für  $\Delta_{e1} = 1 ‰$

$$\Delta_a = \left( \ln \frac{\sigma_a}{\sigma_1} \right) \cdot \sigma_1 = (\ln 0,44) \cdot \sigma_1 = -0,822 ‰ \text{ (Punkt B)}$$

$$\Delta_b = \left( \ln \frac{\sigma_b}{\sigma_1} \right) \cdot \sigma_1 = (\ln 0,84) \cdot \sigma_1 = -0,175 ‰ \text{ (Punkt B')}$$

Die Kurve der  $\Delta_b$  kann in einfacher Weise auch graphisch aus der Kurve der  $\Delta_a$  gefunden werden. Der erhöhten Spannung in A' entspricht die gleiche prozentuale Zusammen-drückung  $\Delta_a$ , die dem Punkt C auf der  $\sigma_a$ -Kurve mit derselben Spannung zugeordnet ist. Die prozentuale Zusammen-drückung  $\Delta_b$  für den Punkt A' konstruiert sich demnach folgendermassen:

Die Spannung  $\sigma_b$  in A' wird vertikal nach unten auf die  $\sigma_b$ -Kurve projiziert (Punkt C). Die horizontale Projektion von Punkt C auf die  $\Delta_a$ -Kurve (Punkt D) entspricht der Zusammen-drückung  $\Delta_b$  in A', die durch die Vertikalprojektion von D auf die Horizontale durch A' den zugehörigen Punkt B' des Zusammen-drückungsdiagramms  $\Delta_b$  ergibt.

Die Teilsetzungen  $\delta'_n$  der Schichten 1 bis 3 werden nach Ermittlung der Kurven  $\Delta_a$  und  $\Delta_b$  durch Planimetrieren der Flächen  $f'_n$  gefunden:

$$\delta'_1 = f'_1 = 1,08 \text{ cm Setzung}$$

$$\delta'_2 = f'_2 = 2,30 \text{ cm Setzung}$$

$$\delta'_3 = f'_3 = 1,90 \text{ cm Setzung}$$

Aus diesen ergibt sich die totale Setzung der Schichten durch

die Multiplikation mit den Verhältnissen  $\frac{\Delta_{en}}{\Delta_{ei}}$  zu:

$$\delta_T = 3 \cdot 1,08 + 10 \cdot 2,30 + 2 \cdot 1,90 = 30,04 \approx 30 \text{ cm}$$

welche Setzung im Vergleich zur Absenkung noch als klein angesehen werden darf. (Forts. folgt)

## Entwicklungslinien im Dampfkesselbau

Durch ein DIN-Normblatt sind Richtlinien für die Wahl der Drücke, Temperaturen und Leistungen in Dampfkraftwerken festgelegt, und später gewisse einheitliche Bauformen vereinbart worden. Weitere Normalisierungsabsichten betreffen die Rohre für Speisewasser und Luftvorwärmer, Kammern, Verschlüsse usw. Der Strahlungskessel mit nur noch oberer Teilkammer und Abscheidetrommel steht heute im Vordergrund. Die Speisewasservorwärmung wurde in die nachgeschaltete Berührungsheizfläche verlegt und bis zur Teilverdampfung gesteigert. Bei natürlichem Umlauf haben alle Rohrsysteme ihren getrennten Zulauf durch die Fallrohre aus der Obertrommel und münden getrennt wieder in diese oder in die Abscheidetrommel, was die richtige gleichmässige Beaufschlagung erleichtert. Unbeheizte Fallrohre und hocherhitzte Steigrohre ergeben intensiven Wasserumlauf, der am besten durch gute Abstimmung der Rohrweiten vergleichmässigt wird. Die Ueberhitzer liegen jetzt in Zonen hoher Gastemperatur, benötigen daher grosse Vorsicht, am besten vollständige Entwässerung, beim Anfahren. Kessel mit Leistungen von 200 t/h stehen im Bau.

Von den Zwangdurchlaufkesseln behandelt H. Paul in seinem Uebersichtsaufsatz in «Z.VDI» Bd. 88, 1944, Nr. 7/8 nur den Siemens- und den Sulzerkessel, die beide mit einer grösseren oder kleineren Zahl parallel geschalteter Rohre arbeiten, und wegen des geringen Speichervermögens höchste Anforderungen an die Regelung stellen, die nur durch Einspritzung genau genug erfüllt werden.

Nächst der Temperaturregelung forderte die Salzausscheidung grösste Entwicklungsarbeit. Die Ausscheidung muss in Gebieten niedrigerer Rauchgastemperatur verlegt, die Kessel müssen je nach Salzgehalt periodisch gespült werden, was durch die Trommeln erleichtert wird. Zur gleichmässigen Beaufschlagung ist Hintereinanderschaltung günstiger; auch Zwischensammler haben sich bewährt.

Weitgehende Uebereinstimmung in Aufbau, Abmessung und Heizflächenanordnung der verschiedenen Bauarten ist festzustellen und in der Hauptsache durch die Feuerung, aber auch durch die Tatsache gleicher fabrikatorischer Herkunft bestimmt. Um den Anforderungen der Frequenzhaltung nachzukommen, bedürfen reine Zwangdurchlaufkessel-Anlagen einer Speicherung, die am billigsten auf der Niederdruckseite liegt. Die hohe Betriebssicherheit heutiger Kesselanlagen, ausgedrückt durch Betriebszeitfaktoren bis 90%, erlaubt die sog. Blockschaltung, wobei die gemeinsame Heissdampfleitung wegfällt und ein oder zwei Kessel direkt auf eine Turbine arbeiten.

Störungen durch undichte Verschlüsse der Vorwärmer und daherige Korrosionen der Dichtleisten konnten durch Weicheisendichtungen, durch Walz- oder Gewindestutzen statt Verschlüssen, durch Erhöhung des  $p_H$ -Wertes des Speisewassers verringert werden. Gekühlte Aufhängung der Ueberhitzer beseitigt einen weitem schwachen Punkt. Schäumen und Spucken der Kessel können durch sorgfältigste Speisewasserpflge beseitigt werden,

wobei der Lösung der Salze im hochgespannten Sattedampf durch chemische Beeinflussung der Lösungsfähigkeit gesteuert werden soll. Diese geht mit sinkendem Dampfdruck rasch zurück, bei der Entspannung in der Turbine scheiden sich die Salze in der Reihenfolge ihrer Löslichkeit aus. Am wichtigsten ist die vollständige Entkieselung, wofür Verdampfung des Wassers für Zwanglaufkessel, die chemischen Verfahren für Kessel mit natürlichem Umlauf geeignet sind.

Aschenungünstige Brennstoffe erfordern Strahlungsheizflächen mit kleiner Teilung, um Asche und Rauchgastemperatur am Austritt aus der Brennkammer unter den Aschenschmelzpunkt abzukühlen und die Ansinterungen mässig zu halten. Bei Ueberhitzern, die als Prallfläche im Rauchgasstrom liegen, muss eine Nachverbrennungszone mit Aschenabscheidung vorgeschaltet, die Rohrteilung gross und die Anordnung fluchtend sein, um Brückenbildung zu verhüten. Geringere Verschmutzung erreicht der Strahlungsüberhitzer mit senkrechten Rohren. Ungleiche Beaufschlagung der Heizfläche wird durch Verbesserung der Wirbelung und Mischung der Rauchgase in der Brennkammer erzielt. Die kostspielige Entaschung und Flugaschenbeseitigung führte zu Schmelzkammerbauarten.

Weitere Entwicklungsaufgaben liegen in der Fortbildung reiner Gegenstromschaltungen zum Zwecke einer Werkstoffersparnis; in weiterer Erforschung des Wasserumlaufes, insbesondere der Stabilitätsbedingungen bei Zwanglauf; in der chemischen Speisewasserbehandlung und schliesslich in der Normung von Einzelteilen. Grosse Aufgaben bietet das feuerungstechnische Gebiet durch die Verlagerung der Kohlsorten: mehr aschenreiche Brennstoffe, Einführung von Steinkohlenschwelkoks, vermehrte Braunkohlenfeuerung. Rostfeuerungen bis 80 t/h Leistung sind gebaut, doch erfordern die grossen Energiemengen und die Kostenfrage eher Staubfeuerungen bis 200 t/h. Langjährige Betriebsergebnisse mit Drücken von 125 atü und Dampftemperaturen von 500° lassen den Versuch wagen, durch Erhöhung auf 530° die Endnässe von 13% auch ohne verteuerte Zwischenüberhitzung nicht zu überschreiten. Die Elastizität der Feuerungen ist durch zweckmässige Speicherung zu erhöhen. Fortschritte sind vor allem auch im Bereiche der warmfesten Kesselbaustoffe zu erwarten, wo die Molybdän- und Chrom-Molybdänstähle durch Austauschstähle auf der Grundlage Mn-Si und Cr-V ersetzt werden konnten, wo ferner der Stahlguss geschmiedete und gewalzte Teile zu ersetzen im Begriffe steht, in Deutschland jedoch, nach den Ausführungen des Verfassers, Ursache grösster Sorgen sei.

## Ideen-Wettbewerb für die Ueberbauung des Schiltwiesen-Areals in Oberwinterthur

### Aus dem Bericht des Preisgerichts

Das Preisgericht versammelt sich vollzählig Mittwoch den 19. April 1944, vormittags 10 Uhr, im Gewerbemuseum am Kirchplatz in Winterthur. Nach Bekanntgabe der Ergebnisse der durch den Stadtbaumeister vorgenommenen Vorprüfung unternimmt das Preisgericht eine erste orientierende Besichtigung der Pläne. Hierauf wird festgestellt, dass sämtliche Entwürfe rechtzeitig eingegangen sind und eine wesentliche Abweichung von den Programmbestimmungen bei keinem der Projekte vorliegt.

Nachher erfolgt eine gemeinsame Besichtigung und Begutachtung des Schiltwiesen-Areals.

In einem ersten Rundgang werden wegen offensichtlicher Mängel drei Entwürfe ausgeschieden, im zweiten Rundgang weitere neun. In der engern Wahl verbleiben die Entwürfe Nr. 2, 5, 9, 12, 13 und 14. Diese werden wie folgt beurteilt. [Wir beschränken uns hier wie gewohnt auf die Wiedergabe der vier prämierten Entwürfe. Red.]

Entwurf Nr. 12. «Am Kirchenhügel». Die Eigenart des Projektes liegt in dem besondern Strassensystem im Gebiete zwischen Frauenfelderstrasse und Schiltwiesen, das die bestehende Bebauung peinlich schont und sozusagen alle Bauten von der grossen durchlaufenden Hauptstrasse unabhängig macht. Es bietet dies den Vorteil, dass schon jetzt baureifes Land mit einem geringen Aufwand an Strassenbaukosten entsteht. Diese Unabhängigkeit der Bebauung von der Hauptstrasse ist überall angestrebt. Die Einführungen der Nebenstrassen in die Hauptstrasse sind systematisch unterdrückt. Besonders geschickt ist die Lösung des Zugangs zum Bahnhof durch die Riedbachstrasse. Die neue Bahnunterführung ist korrekt an die Hauptstrasse angeschlossen. Auch die Einführung der Römerstrasse und der Rychenbergstrasse ist in günstiger Weise bewerkstelligt.