

Ueber die Sedimentation von körnigem Schlamm

Autor(en): **Derron, E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **66 (1948)**

Heft 33

PDF erstellt am: **19.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-56777>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ueber die Sedimentation von körnigem Schlamm

Von Dipl. Ing. E. DERRON, Stadtingenieur, Zug DK 628.331

In der Abwasserreinigungstechnik, im Wasserbau und in der Industrie ist die Sedimentation eines der wichtigsten Verfahren, um ungelöste Stoffe wie Abwasserschlamm, Sand, Kohlschlamm usw. aus dem Wasser zu entfernen. Die quantitative Erfassung der dabei abgesetzten Stoffmengen auf empirischem Wege ist möglich und auch schon versucht worden. Es besteht aber — und das trifft besonders auf die Abwasserreinigungstechnik zu — ein Bedürfnis nach einer theoretischen Untermauerung der auf dem Versuchswege gewonnenen Formeln.

Die vorliegende Arbeit will zeigen, dass es für körnigen Schlamm, z. B. Sand, körnige Abwasserstoffe, Kohlschlamm usw. gelingt, aus der Kornverteilungskurve der im Abwasser schwebenden, ungelösten Stoffe, der Wassertiefe im Absetzbecken und der wirklichen Absetzdauer eine Beziehung zu finden zwischen dem Gewicht der aus einem Kubikmeter Wasser sedimentierten Substanz und dem Gewicht der in einem Kubikmeter Wasser ursprünglich enthaltenen, ungelösten Stoffe.

Für die nachstehenden Untersuchungen werden folgende Beziehungen verwendet:

- t = wirkliche Absetzdauer, in Stunden
- F_r = Gewicht der in einem m^3 Rohwasser enthaltenen ungelösten Stoffe, in Gramm
- F_a = Gewicht der aus einem m^3 Rohwasser in der Zeit t abgesetzten, ungelösten Stoffe, in Gramm
- $F_s = F_r - F_a$ = Gewicht der in einem m^3 geklärten Wassers noch enthaltenen ungelösten Stoffe, in Gramm
- H = Wassertiefe im Absetzbecken, in Meter
- v_n = Sinkgeschwindigkeit eines Kornteilchens vom Durchmesser d_n mm, in Meter pro Stunde.

Zum bessern Verständnis der Ableitungen sei vorausgesetzt, das in Bild 1 dargestellte Gefäss, welches bis zur Höhe H mit schlammhaltigem Wasser gefüllt sei, enthalte an ungelösten Stoffen drei Komponenten mit den Korngrössen d_1, d_2 und d_3 , wobei $d_3 > d_2 > d_1$. Die entsprechenden Sinkgeschwindigkeiten seien $v_3 > v_2 > v_1$.

Ueber den Anteil der drei Kornkomponenten an der gesamten ungelösten Substanz seien folgende Annahmen getroffen:

- p_3 % von F_r bestehe aus Körnern vom Durchmesser d_3
- p_2 % von F_r bestehe aus Körnern vom Durchmesser d_3 u. d_2
- p_1 % von F_r bestehe aus Körnern vom Durchmesser d_3, d_2 , u. d_1

Im vorliegenden Falle ist $p_1 = 100$ %. Das Rohwasser enthält demzufolge p_3 % ungelöste Substanz mit einem Korndurchmesser d_3 mm, $(p_2 - p_3)$ % mit einem solchen von d_2 mm und $(p_1 - p_2)$ % mit einem solchen von d_1 mm. In der Terminologie der Bodenmechanik kann man auch sagen, bei p_3 % der ungelösten Substanz sei der Durchmesser grösser als d_2 mm, bei p_2 % grösser als d_1 mm und bei $p_1 = 100$ % grösser als Null mm. Bild 2 zeigt die einer solchen Annahme zu Grunde liegende, unstetige Kornverteilungskurve.

Während der Absetzdauer t sinken die Teilchen vom Durchmesser d_3 um die Strecke $v_3 t$, diejenigen vom Durchmesser d_2 um $v_2 t$, und schliesslich die kleinsten, mit dem Durchmesser d_1 um $v_1 t$. Trägt man diese Strecken vom Boden des Absetzbeckens senkrecht nach oben auf (siehe Bild 1), so leuchtet ein, dass in der Zeit t nur bis zur Höhe $v_1 t$ Teilchen vom Korndurchmesser d_1 abgesetzt werden. Ähnliches trifft zu für Teilchen vom Durchmesser d_2 bzw. d_3 . Alle Teilchen, die grösser sind als d_H , und deren Sinkgeschwindigkeit

grösser ist als v_H , wobei $v_H t = H$, werden in der Zeit t vollständig aus dem Rohwasser abgesetzt.

Während der Zeit t werden demzufolge auf $1 m^2$ Bodenfläche des Absetzbeckens an ungelösten Stoffen mit einem Korndurchmesser $\leq d_H$ folgende Mengen sedimentiert:

- a) Teilchen von d_3 mm Durchmesser: $\frac{p_3}{100} F_r v_3 t$ g
- b) Teilchen von d_2 mm Durchmesser: $\frac{p_2 - p_3}{100} F_r v_2 t$ g
- c) Teilchen von d_1 mm Durchmesser: $\frac{p_1 - p_2}{100} F_r v_1 t$ g

oder im Ganzen:

$$S_1 = \frac{F_r t}{100} \sum (p_n - p_{n+1}) v_n \text{ g/m}^2 \text{ Bodenfläche}$$

Mit $p_{n+1} - p_n = \Delta p$ wird

$$(1) \quad S_1 = - \frac{F_r t}{100} \sum \Delta p v_n$$

Geht man über zu unendlich vielen Kornkomponenten, d. h. zu einer stetigen Kornverteilungskurve gemäss Bild 3, so nimmt der Ausdruck (1) die Form an:

$$(2) \quad S_1 = - \frac{F_r t}{100} \int_0^{d_H} v dp$$

In (2) bedeutet p den prozentualen Anteil an Körnern mit einem Durchmesser grösser als d mm.

In der Zeit t werden aber noch alle ungelösten Stoffe abgesetzt, deren Korndurchmesser grösser ist als d_H . Pro m^2 Bodenfläche sind dies:

$$S_2 = \frac{p_H}{100} F_r H$$

p_H ist der prozentuale Anteil der Körner mit einem Durchmesser $\geq d_H$. Die gesamte abgesetzte ungelöste Substanz beträgt demzufolge, in g/m^2 :

$$(3) \quad S = S_1 + S_2 = - \frac{F_r t}{100} \int_0^{d_H} v dp + \frac{p_H}{100} F_r H$$

Zur Auswertung von (3) müssen v und p als Funktionen von d bekannt sein.

Für körnige Stoffe ist nach Stokes [1]¹⁾ die Sinkgeschwindigkeit konstant, und durch den folgenden Ausdruck gegeben:

$$(4) \quad v = \frac{1}{18} d^2 \frac{(\gamma_F - \gamma_w)}{\gamma_w} \frac{g}{\nu} \text{ cm s}^{-1}$$

Hierin bedeuten:

- γ_F das spezifische Gewicht des Kornteilchens in g/cm^3
- γ_w das spezifische Gewicht des Wassers = $1 g/cm^3$
- g die Erdbeschleunigung (981 cm s^{-2})
- ν die kinematische Zähigkeit des Wassers, in $cm^2 s^{-1}$
- d der Durchmesser einer Kugel in cm, die mit der selben Geschwindigkeit zu Boden sinkt wie das schuppenförmige Korn vom Durchmesser d .

Wählt man als Einheit für die Sinkgeschwindigkeit v m/h und für den Korndurchmesser d den mm und setzt für schlammhaltiges Wasser oder Abwasser $\nu = 0,014 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, so geht (4) über in

$$v = 1400 \frac{\gamma_F - \gamma_w}{\gamma_w} d^2 \text{ (in m/h)}$$

¹⁾ Die Zahlen in eckigen Klammern beziehen sich auf das Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

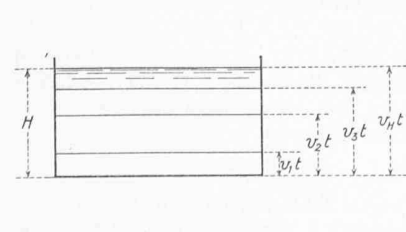


Bild 1

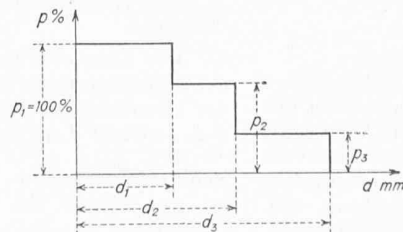


Bild 2

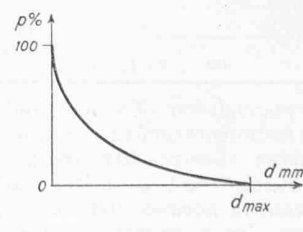


Bild 3

oder mit

$$(5) \quad C = 1400 \frac{\gamma_F - \gamma_w}{\gamma_w}$$

$$(6) \quad v = C d^2$$

Ueber die Kornverteilungskurve sind verschiedene Annahmen möglich. In Bild 4 zeigt z. B. die Kurve a den Fall der idealen Mischung, Kurve b eine Mischung mit viel feinem und wenig grobem, Kurve c eine solche mit wenig feinem aber viel grobem Korn.

In der Natur wird Kurve b am häufigsten auftreten. Man kann nun alle drei Kurventypen durch eine Potenzfunktion von der Form

$$(7) \quad p = 100 \left\{ 1 - \left(\frac{d}{d_{max}} \right)^n \right\}$$

darstellen. $n < 1$ gibt die Kurve b, $n > 1$ die Kurve c und $n = 1$ die Gerade a.

Durch Differenzieren von (7) nach d folgt:

$$(8) \quad dp = - \frac{100}{d_{max}} n d^{(n-1)} d(d)$$

Durch Einsetzen von (6) und (8) in (3) erhält man für das Gewicht der in der Zeit t pro m^2 Bodenfläche des Gefässes abgesetzten ungelösten Stoffe den Ausdruck:

$$(9) \quad S = \frac{F_r C n t}{d_{max}^n} \int_0^{d_H} d^{(n+1)} d(d) + \frac{p_H}{100} F_r H$$

Mit $\frac{p_H}{100} = 1 - \left(\frac{d_H}{d_{max}} \right)^n$ und nach Durchführung der Integration folgt:

$$(10) \quad S = \frac{F_r C n t}{(n+2) d_{max}^n} d_H^{(n+2)} + F_r H \left\{ 1 - \left(\frac{d_H}{d_{max}} \right)^n \right\}$$

Nun ist aber nach (6) $C d_H^2 = v_H$, und v_H ist nach Voraussetzung gleich $\frac{H}{t}$. Es gilt daher

$$C d_H^2 = v_H = \frac{H}{t}$$

woraus

$$(11) \quad d_H = \left(\frac{H}{C t} \right)^{1/2}$$

Setzt man den Wert für d_H aus (11) in (10) ein, so erhält man nach einigen Umformungen

$$(12) \quad S = F_r H \left[1 - \frac{2}{n+2} \frac{1}{d_{max}^n} \left(\frac{H}{t C} \right)^{n/2} \right]$$

Nach der eingangs festgesetzten Definition ist aber $F_a = \frac{S}{H}$ und es kommt:

$$(13) \quad F_a = F_r - \frac{2}{(n+2) d_{max}^n C^{n/2}} \left(\frac{H}{t} \right)^{n/2} F_r$$

Da $F_s = F_r - F_a$, so erhält man für das Gewicht der in einem m^3 geklärten Wasser noch enthaltenen ungelösten Stoffe:

$$(14) \quad F_s = \frac{2}{(n+2) d_{max}^n C^{n/2}} \left(\frac{H}{t} \right)^{n/2} F_r$$

Die abgeleiteten Formeln gelten streng genommen nur für eine Sedimentation in ruhigem Wasser. Die in der Praxis verwendeten Absetzbecken und Sandfänge werden aber vom Wasser durchströmt. Es treten darin kleine Geschwindigkeiten, sowohl in horizontaler als in vertikaler Richtung, auf. Wählt man im bewegten Wasser die Absetzdauer so gross, dass Kornteilchen vom Durchmesser d_H mm sicher noch auf

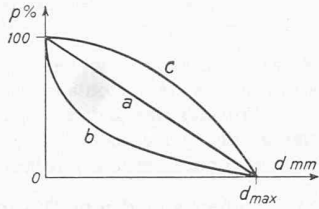


Bild 4

den Boden sinken, so sind die Beziehungen (13) und (14) auch für den ständig durchflossenen Absetzraum gültig.

Die Wirksamkeit des Absetzvorgangs beurteilt man nach dem Verhältnis $\frac{F_s}{F_r}$. Je kleiner $\frac{F_s}{F_r}$, desto mehr ungelöste Stoffe werden abgesetzt. Lange Absetzdauer t , günstige Kornverteilungskurve, d. h. grosses d_{max} und grosses n , sowie eine kleine Beckentiefe H befördern die Sedimentation.

In der Abwasserreinigungstechnik darf aber H nicht zu klein gemacht werden, weil man es dort mehr mit flockigem als körnigem Schlamm zu tun hat. Beim Flockenschlamm nimmt die Sinkgeschwindigkeit mit der Tiefe des Beckens zu, und diese Erfahrung verbietet die Erstellung von Absetzanlagen mit zu kleiner Wassertiefe. Die Formeln (13) und (14) sind unter der Voraussetzung konstanter Sinkgeschwindigkeit abgeleitet worden, ihre Anwendung auf reinen Flockenschlamm ist daher nicht zulässig. Bei den in der Abwassertechnik zumeist vorkommenden Gemischen aus körnigem und flockigem Schlamm sind sie aber mit gewissen Einschränkungen brauchbar.

Vergleich der Theorie mit Versuchen

Versuche zur Bestimmung von F_s sind von *Steuernagel* [2] und besonders von *Fair* [3] für Abwasser durchgeführt und von *Pöpl* [4] ausgewertet worden. Der letztgenannte Forscher hat aus den Versuchsreihen von *Steuernagel* und *Fair*, sowie aus eigenen Experimenten, folgende empirische Formel aufgestellt:

$$(15) \quad F_s = A t^{-\alpha} F_r^\beta$$

Der Faktor A schwankt bei ihm zwischen 0,25 für flockigen und 0,50 für körnigen Schlamm. Den Exponenten α bestimmt er zu 0,20 für die *Steuernagel*'schen und zu 0,25 für die *Fair*'schen Versuche. β soll zwischen 0,80 und 0,85 liegen.

Ein Vergleich dieser empirischen Formel mit der theoretisch abgeleiteten Beziehung (14) zeigt, dass der Exponent n in (14) für Abwasser zwischen 0,40 und 0,50 liegt. Diese Werte gelten nur für normales Abwasser.

Trägt man, wie üblich, das in Gewichtsprozenten ausgedrückte Verhältnis $\frac{\text{Absetzbare Abwasserstoffe}}{\text{Gesamte, ungelöste Abwassersubstanz}}$ als Ordinate, und die Absetzzeit als Abszisse graphisch auf, so bekommt man die sog. «Absetzkurve», wie sie bei Versuchen regelmässig verwendet wird. Nach (13) wird sie durch folgende Funktion dargestellt:

$$(16) \quad 100 \frac{F_a}{F_r} = 100 \left\{ 1 - \frac{2}{(n+2) d_{max}^n C^{n/2}} \left(\frac{H}{t} \right)^{n/2} \right\}$$

Die Materialkonstante C gehorcht der Formel (5), und beträgt für Abwasser mit leichten Schlammbestandteilen ($\gamma_F = 1,06 \text{ g/cm}^3$) 84, für normales Abwasser ($\gamma_F = 1,10 \text{ g/cm}^3$) 140 und für Abwasser mit spezifisch schwerem Schlamm ($\gamma_F = 1,14 \text{ g/cm}^3$) 196.

Der Verfasser hat eine grössere Zahl experimentell bestimmter Absetzkurven aus der einschlägigen Literatur mit Formel (16) verglichen. Das Ergebnis lautet:

- 1) Formel (16) gilt nur im Bereich $t > 0,25$ bis $t \leq 3,00$ h, umfasst also die technisch wichtigen Absetzzeiten.
- 2) Der Exponent n hängt von der Konzentration des Rohwassers an ungelösten Stoffen, d. h. von F_r ab. Für hohe Konzentration ($F_r = 300$ bis 500 g/m^3) liegt n bei 0,46, mittlere Konzentration ($F_r = 200 - 300 \text{ g/m}^3$) ergibt $n = 0,43$ und schwache Konzentration ($F_r = 100$ bis 200 g/m^3) $n = 0,40$.
- 3) Auch d_{max} wird durch die Konzentration des Rohwassers beeinflusst. Es schwankt zwischen 0,25 mm bei sehr niedriger Konzentration und 0,70 mm bei sehr hoher Konzentration.

Die Absetzkurve, die *Imhoff* [5] in seinem Taschenbuch der Städteentwässerung angibt, entspricht z. B. für $H = 2,50$ m der theoretischen Beziehung (16), wenn man darin $n = 0,50$, $C = 140$ und $d_{max} = 0,36$ mm einsetzt.

Schlussfolgerungen

Für Wasser, das körnigen Schlamm enthält, besteht eine theoretisch ableitbare Beziehung zwischen dem Gehalt des Rohwassers an ungelösten Stoffen (F_r) und dem Schweb-

stoffgehalt (F_s) des durch Sedimentation geklärten Wassers, in Form der Gleichung (14). Voraussetzung ist, dass die Kornverteilungskurve der ungelösten Stoffe im Rohwasser einer durch Gleichung (7) dargestellten Potenzfunktion gehorcht. Diese Beziehung zwischen F_s und F_r lautet:

$$(14) \quad F_s = \frac{2}{(n+2) d_{\max}^n C^{n/2}} \left(\frac{H}{t}\right)^{n/2} F_r$$

Bei Absetzbecken mit konstanter Wassertiefe H , insbesondere bei Flachbecken, entspricht der Quotient $\frac{H}{t}$ der Oberflächenbelastung des Beckens. Bezeichnet man diese mit O , so geht (14) über in

$$(17) \quad F_s = \frac{2}{(n+2) d_{\max}^n C^{n/2}} O^{n/2} F_r$$

Hierin ist die Oberflächenbelastung O in m/h und d_{\max} in mm einzusetzen.

Für Abwasser mit vorwiegend körnigem Schlamm und einem spez. Gewicht der ungelösten Feststoffe von 1,06 bis 1,14 g/cm³ können für die in (14) und (17) enthaltenen Größen ungefähr folgende Werte angenommen werden:

Gehalt des Rohwassers an ungelösten Stoffen

F_r in g/m ³	n	d_{\max} in mm
300 bis 500	0,46	0,60 bis 0,70
200 bis 300	0,43	0,50 bis 0,60
100 bis 200	0,40	0,35 bis 0,50
50 bis 100	0,38	0,25 bis 0,35

Spezifisches Gewicht der ungelösten Stoffe im Rohwasser

γ_F in g/cm³

1,14

1,10

1,06

Charakter des abgesetzten Schlammes

schwerer Schlamm

normaler Schlamm

leichter Schlamm

Materialkonstante

C

196

140

84

Bei Abwasser mit flockigem Schlamm gelten (14) und (17) nicht mehr. Wie (17) zeigt, wächst F_s mit der 5. bis 4. Wurzel aus der Oberflächenbelastung an. Bei Abwasser mit flockigem Schlamm nimmt aber F_s mit steigender Oberflächenbelastung viel stärker zu, wie Pöpl [6] gezeigt hat. Der Exponent n kann hier Werte bis 1,5 und noch mehr erreichen.

Für Wasser mit Sand und Kohlschlamm fehlen bis heute Versuche. Einzig der Wert C kann angegeben werden. Er beträgt für Sand ($\gamma_F = 2$ bis 2,4 g/cm³) 1400 bis 1960, für Kohlschlamm ($\gamma_F = 1,5$ g/cm³) rd. 700.

Literaturverzeichnis

- [1] Transactions of the Cambridge Philosophical Society 9 (1850: G. G. Stokes. Mathematical and Physical Papers 3).
- [2] Steuernagel: Die Sedimentierung der suspendierten Substanzen des Kanalwassers und ihr Einfluss auf die mechanische Klärung des Abwassers in Flachbecken. «Gesundheit» 1903, Sonderdruck.
- [3] Imhoff, K., und Fair, G. M.: Sewage Treatment. New York. 1940.
- [4] Pöpl, F.: Die Absetz- und Schwebestoffkurven gemeindlicher Abwässer. «Gesundheitsingenieur» 1942, Heft 39/40.
Pöpl, F.: Die Ausscheidung der Feststoffe städtischer Abwässer im ständig durchflossenen Absetzraum. «Gesundheitsingenieur» 1942, Heft 49/50.
- [5] Imhoff, K.: Taschenbuch der Städteentwässerung. 9. Auflage, 1941. Bild 20, S. 99.
- [6] Pöpl, F.: Die mechanische Ausflockung der Schwebestoffe gemeindlicher und industrieller Abwässer. «Gesundheitsingenieur» 1943, Heft 17, Bild 6, S. 217.

Aus der schweizerischen Zementindustrie

Nach einem Vortrag von Dr. H. GYGI, Wildegg, gehalten am 11. Febr. 1948, im Zürcher Ingenieur- und Architekten-Verein

DK 666.9(494)

1. Die hydraulischen Bindemittel im Wandel der Zeiten

Von den drei Bindemitteln, Zement, Kalk und Gips, sind Kalk und Gips seit dem Altertum verwendet worden. Damals wurde als Mörtel der Luftkalk allein benützt. Er wurde vorwiegend in der Grube gelöscht. Wasserkalk, d. h. wasserbeständiges Material, mag hin und wieder benützt worden sein, doch ohne dass man sich seiner besonderen Eigenschaften bewusst geworden wäre. Für wasserdichten Verputz verwendete man Luftkalkmörtel mit Zusatz von Ziegelmehl, Puzzolanerde oder Trass.

Mit dem Zerfall des weströmischen Reiches ging auch ein Teil der damaligen Baukunst verloren, doch sind die alten Bauverfahren zum Teil im Mittelalter übernommen worden. Im allgemeinen hat man bis zum Beginn des 18. Jahrhunderts Luftkalk neben Lehm verwendet. Bedurfte man wasserbeständigen Kalkes, so setzte man wie im Altertum Ziegelmehl

oder Trass und in Italien Puzzolanerde zu. In der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts setzte auf dem Kontinent die Forschung auf dem Gebiete der Mörtelkunde stärker ein. Man versuchte, Ersatzstoffe für Puzzolanerde und Trass zu finden. Man erkannte klar die hydraulischen Eigenschaften des Ziegelmehls, gewann in gebranntem Alaunschiefer ein neues, in Schweden viel benütztes Zuschlagmittel und fand infolge des Eindringens in das Wesen des Trasses neue Puzzolanerde in Frankreich und verwendbaren Basalt-Tuff in Deutschland.

Während man auf dem Kontinent nicht wesentlich weiter kam, nahm die Mörtelkunde in England eine viel raschere Entwicklung, zum Teil weil Puzzolanerde und Trass wegen ihren Transportkosten zu teuer waren. Der Ingenieur Smeaton hatte 1756 den Bau des Leuchtturmes von Eddystone bei Plymouth zu leiten; hierbei lag es ihm im höchsten Grade daran,

einen möglichst guten Wassermörtel zu verwenden. Nach einer Reihe von Versuchen erlangte er eine vorzügliche Mörtelmischung, stellte sich aber dann die Frage, warum die verschiedenen Kalke verschiedene feste Mörtel liefern und kam schliesslich mit Hilfe eines befreundeten Chemikers zum Schluss, der Tongehalt des Kalksteins und nicht seine Härte, wie man bisher geglaubt hatte, müsse eine der Hauptursachen dafür sein, dass der daraus gebrannte Kalk einen unter Wasser erhärtenden Mörtel liefere. Aber der ursächliche Zusammenhang zwischen der Wirkung des im Kalkstein enthaltenen und zugleich mit diesem gebrannten Tones und des als gebrannten Ton zuge-

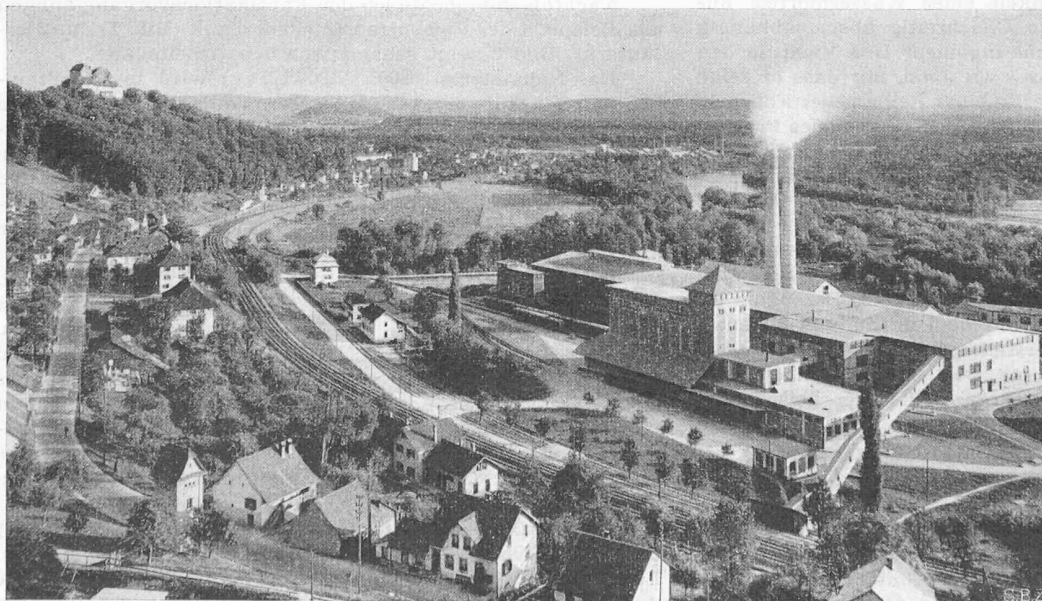


Bild 1. Zementfabrik Holderbank-Wildegg A.-G.