

Koagulation in feinstkornreichen Filtrationstrüben *)

Coagulation in slurries with a high fines content *)

Coagulation à l'intérieur de pulpes de filtration riches en grains fins

Coagulación en pulpas de filtración ricas en finos

Dr.-Ing. R. Bott, Karlsruhe

Zusammenfassung

In filtrationsschwierigen Suspensionen liegt der Feinstkornanteil häufig nicht als diskret disperses Einzelteilchen, sondern als Flocke auf Grund orthokinetischer Flockung vor. Ursache für diesen Agglomerationsmechanismus ist die Kompression der diffusen elektrischen Doppelschicht um ein als kolloidal einzustufendes Feinstteilchen. Die Verringerung der elektrostatischen Abstoßung und somit das Wirksamwerden von v.d.W.-Kräften wird durch eine hohe Ionenkonzentration bzw. durch einen geeigneten pH-Wert bewirkt. Insbesondere bei mineralischen Trüben sind solche kolloidale Effekte bis in den Kornbereich um 20 µm festzustellen. Die Bindung des Feinstkornes untereinander bzw. an der Oberfläche größerer Partikel hat entscheidende Auswirkungen bei der Fest-Flüssig-Trennung. Die Stabilität und die Größe der entstehenden Flocken beeinflussen die Kuchenstruktur und somit die Kuchenbildung und Entfeuchtung bei der Filtration. In diesem Zusammenhang wird über eine Sedimentationsanalyse zur umfassenden Charakterisierung der Filtrationseigenschaften feinstkornreicher Suspensionen berichtet. Der grundlegende theoretische Ansatz wird in wesentlichen Zügen dargestellt. Anhand von Sedimentationsergebnissen werden die Flockung quantifiziert (F.-größe, F.-stabilität) und Einflußgrößen diskutiert. Beispiele aus der Kuchenbildung mineralischer Suspensionen belegen die Analogie zwischen geflocktem Sedimentationssystem bzw. entstehendem Filterkuchen.

Résumé

A l'intérieur des suspensions difficiles, la portion de grains très fins est présente souvent sous forme de flocons et non pas sous forme de particules individuelles discrètement dispersées, ce qui est dû à la floculation orthocinétique. La cause de ce mécanisme d'agglomération réside dans la compression de la double couche électrique diffusée autour d'une particule très fine, qui doit être considérée comme colloïdale. La diminution de la répulsion électrostatique et, par conséquent, l'action des forces de Van der Waals, est due à une haute concentration de ions ou à un pH approprié. Ces effets colloïdaux peuvent être constatés, surtout, dans les pulpes minérales, jusqu'aux zones granulométriques d'environ 20 µm. La liaison des grains très fins entre eux ou à la surface de particules plus grosses a des répercussions décisives sur la séparation de solides-liquides. La stabilité ainsi que les dimensions des flocons influent sur la structure du tourteau et, en même temps, sur la formation du tourteau ainsi que sur la déshydratation au cours du processus de filtration. Dans ce contexte, l'auteur nous informe au sujet de l'analyse de sédimentation permettant de caractériser, dans une très large mesure, les propriétés de la filtration de suspensions

Summary

In suspensions problematical for filtration, the finest particles are often not present in the form of discrete grains, but, because of orthokinetic agglomeration, as flocs. The reason for this phenomenon is to be found in the compression of the diffuse electrical double layer around a "colloid" particle. The existence of a high ion concentration or a suitable pH-value causes a reduction of the electrostatic repulsion, and with it the effect of the v.d.W.-forces. Especially in the case of mineral slurries, such colloid effects are even observable with particles up to 20 µm in diameter. The binding of finest particles with each other or upon the surface of larger ones is of decisive importance for solid/liquid-separation. The stability and the size of the flocs thus formed influence the cake structure along with the cake formation and its dewatering during the filtration process. In this connection, a sedimentation analysis is presented, which is able to globally characterize the filtration behaviour of such slurries. This paper illustrates the fundamental theoretical concept. Arising from the results gained from sedimentation experiments, the flocculation is quantified (floc size, floc stability) and influencing parameters are discussed. The analogy between flocculated sedimentation systems and filter cakes comprised thereof, is verified by experiences from the cake formation of industrial mineral slurries.

Resumen

En las suspensiones difíciles de filtrar, la parte de granos finísimos está presente muchas veces no como partículas individuales discretamente dispersas, sino en forma de copos, debido a la floculación ortocinética. La causa de este mecanismo de aglomeración es la compresión de la doble capa eléctrica, difusa, en torno a una partícula finísima que se debe considerar como coloidal. La disminución del rechazo electrostático, y con ello la acción de las fuerzas de Van der Waals, es debido a una alta concentración de iones o un pH apropiado. Estos efectos coloidales se pueden comprobar sobre todo en las pulpas minerales, hasta la zona granulométrica de aprox. 20 µm. La combinación de los granos finísimos entre sí o en la superficie de partículas más gruesas tiene efectos decisivos en la separación de sólidos-liquidos. La estabilidad así como el tamaño de los copos que se forman influyen en la estructura de la torta y con ello en la formación de la misma así como en la deshidratación durante el proceso de filtración. A este respecto, se informa sobre un análisis de sedimentación que permite caracterizar, de forma extensa, las propiedades de la filtración de suspensiones ricas en granos finísimos. El informe prevé, en líneas generales, la

*) Vortrag bei der GVC-Fachausschußsitzung „Mechanische Flüssigkeitsabtrennung“ Münster, März 1986

*) Lecture at the GVC committee meeting "Mechanical fluid separation" in Münster, March '86

riches en grains très fins. Le présent rapport prévoit, essentiellement, la présentation d'une ébauche théorique fondamentale. C'est à l'aide des résultats de la sédimentation que l'on détermine la floculation (taille et stabilité des flocons) et qu'on discute des paramètres d'influence. Des exemples pris de la formation de tourteaux de suspensions minérales font preuve de l'analogie existante entre le système de sédimentation à l'aide de flocculants et la formation du tourteau.

presentación de un asiento teórico fundamental. Con la ayuda de los resultados de la sedimentación se determina la floculación (tamaño y estabilidad de los copos) y se discuten los parámetros de influjo. Ejemplos tomados de la formación de la torta de suspensiones minerales dan prueba de la analogía existente entre el sistema de sedimentación por floculación y la formación de la torta.

Einleitung: Feststoffabscheidung bei der Filtration

Bei der kuchenbildenden Filtration wird der Feststoffanteil aus einer vergleichsweise konzentrierten Suspension ($c_v = 15-30$ Vol.-%) unter Bildung einer Ablagerung auf einem Filtertuch abgeschieden (Bild 1).

Nach der Feststoffablagerung strömt das im Verlauf der Filtrationszeit abgetrennte Filtrat durch den sich bildenden Kuchen. Der Kuchenbildungsvorgang kann im allgemeinen mit Hilfe der auf Darcy¹⁾ zurückgehenden Durchströmungsgleichung rechnerisch erfaßt werden, wobei laminare Strömung und ein inkompressibles Haufwerk vorausgesetzt werden. Für die Kuchenhöhe h_K als Funktion der Kuchenbildungszeit t_1 resultiert daraus:

$$h_K = \sqrt{\left(\frac{R_M}{r_C}\right)^2 + \frac{2 \cdot \kappa \cdot \Delta p \cdot t_1}{\eta_L \cdot r_C} - \frac{R_M}{r_C}} \quad (\Delta p = \text{konst.})^*) \quad [1]$$

bzw. für genügend große Werte t_1 o. vernachlässigbaren Filtermediumwiderstand R_M :

$$h_K = \sqrt{\frac{2}{\eta_L \cdot r_C} \cdot \kappa \cdot \Delta p \cdot t_1} \quad [2]$$

Produkt-
Einstell-
Parameter

Aus diesen Gleichungen ist zu ersehen, daß die Wachstumsgeschwindigkeit des Kuchens produktseitig durch den spezifischen Kuchenwiderstand r_C bzw. die Kuchenpermeabilität P_C

$$P_C = \frac{1}{r_C} \quad [3]$$

bestimmt wird.

Für die rechnerische Bestimmung der Permeabilität existieren in der Literatur eine Vielzahl von empirischen bis halbempirischen Ansätzen. In diesen Permeabilitätsfunktionen wird der Produkteinfluß meist in der Form eines charakteristischen Partikeldurchmessers berücksichtigt, der aus einer Naßsiebanalyse entnommen wurde. Die experimentelle Bestätigung der jeweiligen Funktion erfolgt üblicherweise mit Modellpackungen im Grobkornbereich²⁾.

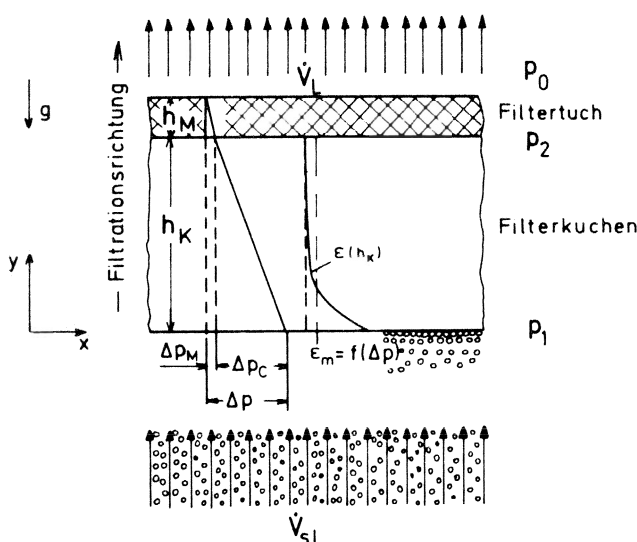


Bild 1: Schema der Kuchenbildung

Fig. 1: Cake formation scheme

Introduction: Particle collection during filtration

In the case of filtration involving the formation of cakes, the solid particles contained within a comparatively concentrated suspension ($c_v = 15-30$ vol.-%) are separated by a filter cloth upon which a deposition accumulates (Fig. 1).

During filtration, the particles are separated from the fluid, and the liquid flows through the cake thus being formed. The cake formation process can, in general, be mathematically simulated with the aid of Darcy's¹⁾ fundamental flow equation, whereby it is assumed that the flow is laminar, and the deposition incompressible. Considering the cake height h_K as a function of the cake formation time t_1 , the following equation results:

$$h_K = \sqrt{\left(\frac{R_M}{r_C}\right)^2 + \frac{2 \cdot \kappa \cdot \Delta p \cdot t_1}{\eta_L \cdot r_C} - \frac{R_M}{r_C}} \quad (\Delta p = \text{konst.})^*) \quad [1]$$

or, for an adequately large formation time t_1 , or if the filter medium resistance R_M is small enough to be disregarded

$$h_K = \sqrt{\frac{2}{\eta_L \cdot r_C} \cdot \kappa \cdot \Delta p \cdot t_1} \quad [2]$$

Product
Variable
parameter

From these equations, it is evident that the speed of cake formation is, besides other parameters, defined by product characteristics, namely by the specific cake resistance r_C (the cake permeability P_C)

$$P_C = \frac{1}{r_C} \quad [3]$$

In order to calculate the permeability, a number of empirical to semi-empirical concepts may be gained from suitable literature. In these permeability functions, the product influences are generally taken into account in the form of characteristic particle diameters, determined by wet sieving. The experimental verification of these functions usually results from coarse-particle model packings²⁾.

In the case of the filtration of real beneficiation slurries containing a high portion of fines however, observations have been made, giving rise to doubts concerning the accuracy of the model-like cake formation structures, based upon the deposition of single particles, or product characterization by means of a typical mean particle diameter. Moreover, it is to be assumed that the filtration is accomplished by solid agglomerations; i.e. the finest particles flocculate together or upon the surface of larger particles. In compliance with this, for example in the case of investigations regarding the local slurry compositions in a stirred filter trough (see Fig. 2), it has been established that although a concentration stratification existed, no particle size stratification could be observed.

In addition to this, during solid particle transition within the filtrate (which occurs at the beginning of the cake formation phase until the initial solids bridge layer is formed) an identical particle size distribution to that of the initial suspension was evident. From this, it may therefore be concluded, that the solids bridging across the filter cloth pores does not exist by means of sieving or classification, but is primarily derived from the mechanical obstruction of approximately identically large particles. In addition, an analysis of the cake structure has shown that for a filter cake, a product dependent porosity gradient exists.

Bei der Filtration realer, feinstkornreicher Aufbereitungs-trüben wurden nun Beobachtungen gemacht, die an dem modellhaften Kuchenbildungsbild auf der Grundlage der Anlagerung einzelner, diskreter Partikel bzw. der Produktcharakterisierung mittels eines typischen mittleren Korndurchmesser Zweifel aufkommen lassen. Vielmehr ist davon auszugehen, daß der Feststoff in agglomerierter Form zur Filtration ansteht; d.h., die Feinstteilchen werden untereinander bzw. an der Oberfläche größerer Partikel in Flocken eingebunden. So wurde z.B. bei der Untersuchung der lokalen Trübezusammensetzung in einem gerührten Filtertrog (Bild 2) zwar eine Konzentrations- aber keine Korngrößenschichtung festgestellt. Ergänzend dazu wurde beim Feststoffdurchschlag im Filtrat, der sich zu Beginn der Kuchenbildungsphase bis zur Ausbildung einer ersten Feststoffbrückenschicht einstellt, die gleiche Korngrößenverteilung wie in der Ausgangssuspension nachgewiesen. Daraus darf geschlossen werden, daß die Brückenbildung über den Poren des Filtertuches nicht auf einer Sieb- bzw. Klassierwirkung besteht, sondern primär durch die räumliche Behinderung näherungsweise gleichartiger Teilchen hervorgerufen wird³⁾.

Darüber hinaus zeigte es sich bei der Analyse der Kuchenstruktur, daß im Haufwerk ein produktabhängiger Porositätsgradient vorliegt.

Dieser Porositätsverlauf kann auf eine mehr oder weniger starke Kompression des anfiltrierten Feststoffes zurückgeführt werden. Während bei einigen Autoren jedoch von einer Kompressibilität des einzelnen Partikels ausgegangen wird, ist bei den hier untersuchten Systemen von einem Kollabieren der aus idealerweise inkompressiblen Feinstkornpartikeln gebildeten Flocken auszugehen.

In Tabelle 1 ist eine Reihe von Feststoffen bzgl. ihrer Partikelgrößenverteilung charakterisiert, die in den hier beschriebenen Untersuchungen verwendet wurden.

Aus diesen Zahlenangaben wird deutlich, daß der Feinkornanteil $Q_3(x < 10 \mu\text{m})$ 1/5 bis 1/3 der eingesetzten Feststoffmasse ausmachen kann.

Aus den geschilderten Phänomenen ist zu erkennen, daß es sowohl für die Kuchenbildungsgeschwindigkeit, d.h. den einphasigen Durchströmungsvorgang, als auch für die Kuchenstruktur und somit auch für den Entfeuchtungsvorgang und die Luftdurchströmung des Kuchens von entscheidender Bedeutung ist, in welcher Form der Feststoff auf der Kuchenoberfläche anfiltriert wird. Bei Anlagerung des Feststoffes in Form von Partikelkollektiven kann es, auch bei feinstkornreichen Feststoffsystemen, zur Ausbildung von Grobkapillaren kommen. Solche Grobkapillaren ermöglichen einen hohen Filtratdurchsatz bei geringem Durchströmungswiderstand (vgl. Gesetz von Hagen-Poiseuille⁴⁾: $V_L \sim d^4$) und einen kleinen Eintrittskapillardruck $p_{K,E}$ ⁵⁾.

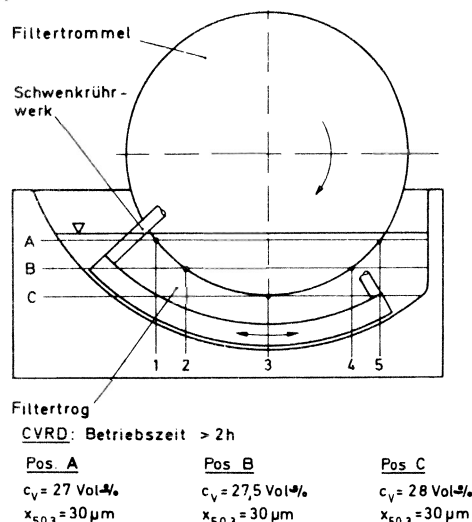


Bild 2: Modell des gerührten Filtertroges mit Konzentrations- und KGV-Verlauf

Fig. 2: Model of the stirred filter trough with the concentration — and PSD — trends

This porosity gradient can be related to a more or less extensive compression of the deposited solids. Although the investigations of a number of authors are based upon a compressibility of the single particles, the systems investigated here assume a collapse of the flocs, consisting of extremely fine incompressible solids.

A number of solids used for the above investigations are characterized regarding their particle size distributions in Table 1.

Tabelle 1: Charakterisierung der Versuchsfeststoffe

Table 1: Test material characterization

Produkt Product	Eisenerze Iron ores	Sulfidische Erze Sulfide ores	ZnS	PbS	Kohle Coal	
Charakteristischer Wert Characteristic value	CVRD Orinoco (Eisenerze) (iron ores)	ZnS	PbS	Flotationskohle Flotation coal		
$x_{90,3}$	μm	26	34	25,5	18	63
$Q_3(x < 10 \mu\text{m})$	%	21	23	30,5	28,5	15
S_v	$\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^3}$	11450	12784	11163	10174	4880

The numerical data clearly shows that the portion of fine particles $Q_3(x < 10 \mu\text{m})$ can even aggregate 1/5 to 1/3 of the solids mass.

It may be recognized from the outlined phenomena, that the manner in which the particles are deposited upon the cake surface is not only of decisive importance for the cake formation speed, i.e. the single phase flow process, but also for the cake's structure, it is accompanying dewatering process and it is permeability for air. When the solids are deposited in the form of particle agglomerates, the formation of coarse capillaries may arise even with extremely fine particles. Such coarse capillaries allow a high filtrate throughput with low flow resistance (see Hagen-Poiseuille's law⁴⁾: $V_L \sim d^4$) and low entry capillary pressure $p_{K,E}$ ⁵⁾.

Floc formation

The main causes of floc formation within the suspension are as follows:

- A high portion of extremely fine particles (e.g. $< 10 \mu\text{m}$).
- A high concentration of saline ions within the filtrate.
- A favourable pH-value.
- A high particle collision probability due to externally created currents.

In general, the portion of extremely fine particles contained in beneficiation slurries is becoming progressively higher. The reasons for this are:

- The increasing mining of finely distributed low-grade ores (especially in the non-ferrous region) require finer grinding in order to achieve a good selectivity during flotation.
- The advances made by automated mining, with its accompanying personal security, necessitating a wet separation of the dust produced.

In addition to this, a large number of suspensions exist, which are preferably processed on a continual basis, but because of their large very fine particle content and accompanying filtration problems can, at the present, only be separated from the liquids in discontinual filter presses.

The portion of very fine particles in a suspension present a colloid system. Although colloid effects are generally only observed in extremely fine particle size regions where $x < 1 \mu\text{m}$, Kitchener⁷⁾ established that under favourable conditions, (i.e. under adequate particle double layer compression) forces arise, by which electrolytic effects for particles of up to $30 \mu\text{m}$ diameter (in extreme cases up to $50 \mu\text{m}$) may be assumed. Most of the particles suspended in water or aqueous solutions carry a negative surface charge.

Minerals and ores containing clay receive, in particular, a large portion of their charge from the isomorphous substitution of Si^{4+} in the crystal structure for Al^{3+} or even Ca^{2+} . The

Flockenbildung

Ursachen für die Bildung von Partikelkollektiven in der Suspension sind:

- ein hoher Anteil an Feinstkorn (z. B. $< 10 \mu\text{m}$),
- eine hohe Salzkonzentration im Filtrat,
- ein geeigneter pH-Wert,
- eine hohe Partikelstoßwahrscheinlichkeit durch von außen erzeugte Strömungen.

Die in der Aufbereitungsindustrie zur Filtration anstehenden Trüben verzeichnen einen zunehmenden Feinstkornanteil. Ursache hierfür ist zum einen der gerade im NE-Bereich ansteigende Abbau von feinverwachsenen Armerzen, die zur Gewährleistung einer hohen Selektivität bei der Flotation eine weitgehende Aufmahlung erfordern, und zum anderen der fortschreitende automatisierte Abbau mit den damit verbundenen Arbeitsplatzschutzmaßnahmen durch eine Naßabscheidung des entstehenden Staubes. Darüber hinaus existiert eine Großzahl von vorzugsweise kontinuierlich zu verarbeitenden Suspensionen, die wegen ihres hohen Feinstkornanteils und den damit verbundenen Filtrationsschwierigkeiten derzeit nur in diskontinuierlichen Filterpressen fest/flüssig getrennt werden können.

Der Feinkornanteil der Suspensionen stellt ein kolloides System dar. Üblicherweise ergeben sich kolloidale Effekte zwar erst im Korngrößenbereich $x < 1 \mu\text{m}$ ⁶⁾. Nach *Kitchener*⁷⁾ treten jedoch in mineralischen Suspensionen unter geeigneten Bedingungen (z. B. bei genügender Kompression der elektrischen Doppelschicht) so große Kräfte auf, daß bis zu Korndurchmessern von $30 \mu\text{m}$ (im Extremfall bis zu $50 \mu\text{m}$) von Elektrolyteffekten ausgegangen werden darf. Die meisten in Wasser oder wässrigen Lösungen suspendierten Partikel sind an der Oberfläche negativ geladen. Gerade tonhaltige Minerale und Erze erhalten einen großen Teil ihrer Ladung durch die isomorphe Substitution von Si^{4+} im Kristallgitter gegen Al^{3+} oder sogar Ca^{2+} . Die daraus resultierende negative Ladung unterscheidet sich von anderen Ladungstypen dadurch (z. B. bei potentialbestimmenden Ionen, die zur spez. Koagulation führen⁸⁾), daß sie nicht ohne weiteres durch Ändern der Lösungsbedingungen beeinflusst werden kann. Diese Ladung stellt somit eine Schüttguteigenschaft dar⁹⁾.

Der Aufbau des elektrischen Potentials in der Nähe der Oberfläche eines geladenen kolloidalen Teilchens ist in **Bild 3** verdeutlicht.

Die maßgebenden physikalisch-chemischen Wechselwirkungen zwischen zwei sich gegenüberstehenden Partikeln sind, abgesehen von spezifischen Interaktionen, die van-der-Waals-Anziehung und die elektrostatische Abstoßung, wobei allerdings die elektrostatischen Kräfte bei Anwesenheit von Elektrolyten erheblich reduziert sind. V.d.W.-Kräfte hingegen haben ein weites Wirkgebiet, d. h. sie können über eine Strecke von einigen Nanometern wirksam sein. Der Potentialverlauf $Y(x)$ kann beschrieben werden durch¹⁰⁾:

$$Y(x) = Y_0 \cdot \exp(-\kappa \cdot x) \quad [4]$$

Hierbei steht Y_0 für das Oberflächenpotential an der „Stern“-Schicht, x ist der Abstand von der Festionenfläche, und κ ist der reziproke Debye-Hückel-Längenparameter, der in wässrigen Elektrolytlösungen beschrieben wird durch ($T = 25^\circ\text{C}$)

$$\kappa = 3.29 \cdot 10^9 (\sum c_i \cdot z_i^2)^{1/2} \quad [\text{m}^{-1}] \quad [5]$$

Hierbei sind c_i und z_i die molare Konzentration und die Wertigkeit des i ten Ions. Die Summe wird über alle in der Lösung vorhandenen Ionen gebildet. Daraus wird deutlich, daß κ die bestimmende Größe für die distanzmäßige Wirksamkeit von elektrischen Kräften zwischen geladenen Teilchen ist. κ nimmt mit steigender Konzentration und Wertigkeit der Ionen zu; folglich wird dabei die „Dicke“ $1/\kappa$ der elektrischen Doppelschicht komprimiert, die Abstoßung der Partikel untereinander vermindert, und die Wahrscheinlichkeit der Zusammenlagerung nimmt zu. Aufbauend auf einer Ionenanalyse errechnet sich so z. B. für das Karlsruher Leitungswasser eine ca. 10^4 mal kleinere Schichtdicke im Vergleich zu destilliertem Wasser, die bei ca. 900 nm liegt.

negative charge thus resulting differs from other charge types (e.g. in the case of potential determining ions, leading to specific coagulation⁸⁾) in that it is not necessarily influenced by a change of solution conditions. This charge therefore represents a bulk material feature⁹⁾.

The construction of the electrical potential in the surface regions of a charged colloid particle is illustrated in **Fig. 3**.

The relevant physical-chemical interactions between two opposing particles, without regarding the specific interactions, are the Van-der-Waals attraction and the electrostatic repulsion. The electrostatic forces are indeed reduced in the presence of electrolytes. In contrast, V.d.W.-forces possess a greater effective area, i.e. they can act over a distance of some nanometers.

The potential function $Y(x)$ may be described by¹⁰⁾:

$$Y(x) = Y_0 \cdot \exp(-\kappa \cdot x) \quad [4]$$

In this case, Y_0 is the surface potential upon the “Stern layer”, x represents the distance from the solid surface and κ is the reciprocal Debye-Hückel parameter, being described by

$$\kappa = 3.29 \cdot 10^9 (\sum c_i \cdot z_i^2)^{1/2} \quad [\text{m}^{-1}] \quad [5]$$

for an aqueous electrolyte ($T = 25^\circ\text{C}$).

Here, c_i and z_i are the molar concentration and the valence of the i th ion. The sum is established for all ions within the solution. From this, it becomes evident that κ is the determining distance-dependant value for the electrical forces between charged particles. κ increases with increasing concentration and ion valence. As a result, the thickness of the electrical double-layer is compressed, the inter-particle repulsion is reduced and the probability of coagulation increases. Based upon an ion analysis of Karlsruhe's tap water, the layer thickness has been calculated as being a factor of 10^4 smaller than that of distilled water, which is approximately 900 nm.

In addition, the dependency of the electrical repulsion upon the pH-value must be taken into account. When the pH-value corresponds to the point of zero charge (also known as isoelectrical point), the zeta-potential between charged particles and the electrolyte is at a minimum, so that the particles can progressively approach each other, and the largest flocs form. In the case of particles carrying groups on their surface, able to form low-soluble compounds with ions within the solution, the complete charge can be neutralized by a relatively small additive quantity. For colloid particles, carrying groups of low dissociation, this specific effect can be accomplished by a small pH-value change.

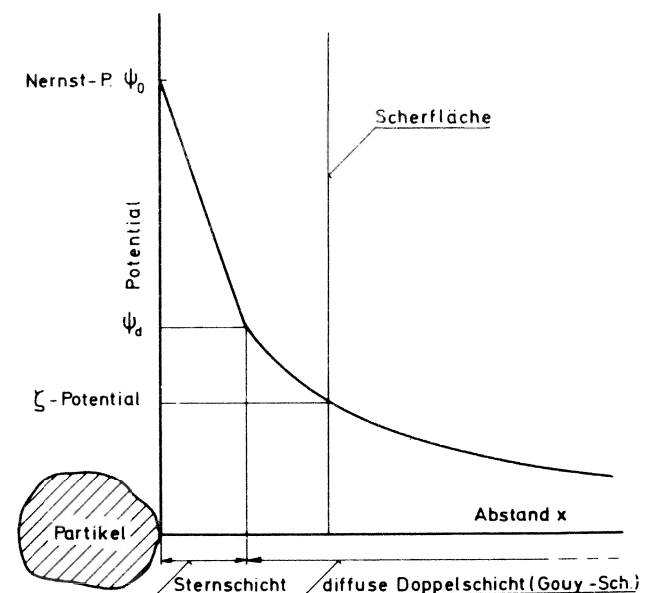


Bild 3: Verlauf des elektrischen Potentials in Oberflächennähe eines geladenen kolloidalen Feststoffteilchens

Fig. 3: Graph of electrical potential in the surface vicinity of a charged colloid particle

Ergänzend hierzu ist die Abhängigkeit der elektrischen Abstoßung vom pH-Wert der Lösung zu berücksichtigen. Beim pH-Wert, der dem Ladungsnullpunkt (auch isoelektrischer Punkt) entspricht, wird das Zeta-Potential zwischen geladenem Teilchen und Elektrolytlösung minimal, die Teilchen können sich mehr und mehr einander annähern, und es bilden sich die größten Flocken. Bei Teilchen, die an ihrer Oberfläche Gruppen tragen, die mit zugesetzten Ionen schwerlösliche Verbindungen bilden, kann bereits durch relativ kleine Zusätze die ganze Ladung zum Verschwinden gebracht werden. Bei kolloidalen Teilchen, die schwach dissoziierbare Gruppen tragen, kann durch eine geringe pH-Wertänderung diese spezifische Wirkung erzielt werden. Solche dissoziierbaren Gruppen findet man in mineralischen Trüben in Form von SiOH-Gruppen⁸⁾.

Die Vereinigung der kolloidalen Teilchen ist aufgrund des Wirkmechanismus einfacher Ionen als Koagulation zu betrachten⁹⁾. Die daraus entstehenden Körnerverbände werden als Flocke bezeichnet.

Neben der Voraussetzung von günstigen physikalisch-chemischen Bedingungen in der Suspension ist für die Agglomeration ein Transport der Partikel zueinander zu gewährleisten. Während bei der perikinetischen Koagulation durch die Brownsche Molekularbewegung nur kleine Agglomerate entstehen, wird bei der orthokinetischen Koagulation der Partikelstoß in makroskopisch ruhenden Suspensionen durch die Schwerkraft oder durch von außen induzierte Strömungen hervorgerufen. In gerührten Suspensionen erfolgt der Agglomerationsprozeß während einer Scherbeanspruchung, wodurch lockere Agglomerate ständig zerteilt und in eine kompaktere Form mit höherer Festigkeit gebracht werden¹¹⁾.

Quantifizierung der Flockenbildung

Zur quantitativen Erfassung der Koagulation empfiehlt sich die Sedimentationsmethode¹²⁾, wobei zunächst geklärt werden muß, ob das koagulierende System im verdünnten oder konzentrierten Zustand vorliegt. In verdünnten Lösungen ist die Vereinigung ein typisch bipartikulärer Vorgang, wogegen in konzentrierten Systemen alle Partikel gleichzeitig von mehreren Nachbarn beeinflusst werden¹³⁾; in diesem Bereich setzen sich die sedimentierenden Teilchen im Kollektiv mit der gleichen Geschwindigkeit, der Schwarmsinkgeschwindigkeit, ab. Bei einem sedimentierenden Teilchenschwarm bildet sich i.a. ein deutlicher Trennspegel zwischen geklärter Flüssigkeit und trüber Suspension aus.

Die Sedimentationsmethode beruht auf der Annahme des Zusammenhanges $u_{\text{Sed}} = f(c_{\text{sL}})$ bzw. des zeitlichen Sedimentationsverlaufes $h_{\text{Sed}} = f(t_{\text{Sed}})$.

Bild 4 zeigt zunächst qualitativ und auszugsweise die Sinkkurven zweier sedimentierender Systeme. Die Sedimentationsversuche wurden in 500 ml-Standzylindern mit einem Durchmesser von 50 mm durchgeführt, so daß Randeffecte vernachlässigbar waren. Zu Versuchsbeginn wurden die Meßzylinder zwecks der Suspensionsmischung nach einer gleichbleibenden Standardmethode einige Male behutsam hin und her geschwenkt. In Anlehnung an die Filtrationspraxis wurden bei den Absetzversuchen Konzentrationswerte von $c_v = 16/19/21/25/27,5/30$ Vol.-% eingestellt. Als Versuchsfeststoffe dienten die fünf in Tabelle 1 charakterisierten Konzentrate.

Die Klassifizierung von Suspensionen bzgl. ihrer Konzentration ist neben dem eigentlichen Feststoffanteil u.a. abhängig von der Partikelform und den zwischenpartikulären Kräften. Die in der Literatur nachweisbaren Kriterien zur Einteilung der Suspension in Konzentrationsklassen beruhen vielfach auf rein physikalischen bzw. empirischen Ansätzen und sind nur sehr eingeschränkt in der Lage, das Verhalten realer, feinstkornreicher Mischungen zu erfassen^{14, 15)}. Daher wurde die Zuordnung aufgrund geeigneter Experimente mit den Originalsuspensionen vorgenommen. Durch Verwenden der gleichen Suspension wie bei der Filtration werden bei den Absetzversuchen alle maßgeblichen Einflußgrößen berücksichtigt. In diesem Sinn stellt die Suspension ein zunächst nicht weiter aufzuglie-

Such clusters able to dissociate can be found in mineral slurries in the form of SiOH-groups⁹⁾.

The agglomeration of colloid particles is to be regarded as a coagulation, due to the effective mechanisms of simple ions⁹⁾. The resulting particle agglomerations are known as flocs.

In addition to the requirement of suitable physical-chemical conditions within the suspension, the transport of the particles to each other must be guaranteed in order to obtain agglomeration. The perikinetical coagulation, only giving rise to small agglomerates, results from Brown's molecular movement. The orthokinetical coagulation is caused by particle collisions which are induced in macroscopic static suspensions by gravitational force, or from externally induced currents. In stirred suspensions, the agglomeration process is conducted under shear stresses, so that loosely packed agglomerations are continually disintegrated and brought into more compact forms of a higher stability¹¹⁾.

Quantification of the floc formation

For the quantitative consideration of coagulation, the sedimentation method¹²⁾ is recommendable, whereby it is initially necessary to clarify whether the coagulating system in question is in a concentrated or diluted condition. In a diluted solution, the unison is a typically bi-particulate process. In contrary, in the concentrated system, all particles are simultaneously influenced by a number of adjoining particles¹³⁾; in this region the sedimenting particles sink with the same, so-called "swarm-velocity" together. Considering a particle swarm in the act of sedimentation, a distinct separation interface can be observed between the clear liquid and the suspension.

The sedimentation method is based upon the function $u_{\text{Sed}} = f(c_{\text{sL}})$, or the time-dependant sedimentation function $h_{\text{Sed}} = f(t_{\text{Sed}})$.

Fig. 4 mainly illustrates in extracts, the qualitative sinkage curves of two sedimenting systems. The sedimentation experiments were conducted in 500 ml stand cylinders of 50 mm diameter, so that peripheral effects could be disregarded. At the start of each experiment, each measuring cylinder was carefully shaken in a constant, standard manner, in order to mix the suspension. In accordance with practical filtration applications, fixed concentration values of $c_v = 16/19/21/25/27,5/30$ % -vol. were utilized for the experiments. The five concentrates characterized by Table 1 served as solids.

The classification of suspensions regarding their concentration is, besides their portion of solids, also dependant upon the particle form and inter-particle forces. The criteria published for the classification of suspensions in concentration classes are often either founded upon exclusively physical or upon completely empirical concepts; their applicability for the description of the behaviour of real mixtures with a high portion of fines therefore, is very restricted^{14) 15)}. Because of this, the classification based upon suitable

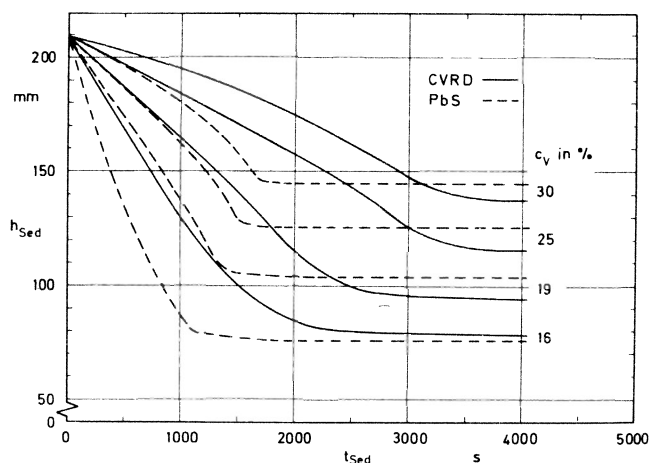


Bild 4: Verlauf des absinkenden Trennspiegels $h_{\text{Sed}} = f(t_{\text{Sed}})$

Fig. 4: Function of the sinking separation interface $h_{\text{Sed}} = f(t_{\text{Sed}})$

derndes System dar. Die Ergebnisse der Sedimentation erlauben daher eine weitgehende Interpretation von Filtrationsphänomenen¹⁶⁾.

In verdünnten Suspensionen verhalten sich die Flocken als individuelle Einheiten. Sie sinken mehr oder weniger frei in der zwischen ihnen nach oben verdrängten Flüssigkeit. In intermediären Suspensionen liegen die Flocken in losem, gegenseitigem Kontakt vor. Die durch die absinkenden Flocken verdrängte Flüssigkeit erzwingt sich durch Ausbilden von Strömungskanälen zwischen den Flocken ihren Weg nach oben, wobei die Kanäle von gleicher Größenordnung sind wie die Flockendurchmesser. In konzentrierten Suspensionen ist die Ausbildung von Kanälen, bedingt durch die relativ kleine verdrängte Flüssigkeitsmenge, nicht möglich. Der Flüssigkeitsstrom findet daher durch die sehr kleinen Hohlräume zwischen den Primärpartikeln statt, was zu einer geringen Sinkgeschwindigkeit führt.

Die daraus ableitbaren Einteilungskriterien besagen:

- verdünnte Suspensionen zeigen von Anfang an eine konstante Sinkgeschwindigkeit,
- intermediäre Suspensionen zeigen eine Startphase, gefolgt von einer Phase mit konstanter Sinkgeschwindigkeit,
- konzentrierte Suspensionen zeigen eine von Anfang an fallende Sinkgeschwindigkeit.

Die eingesetzten Feststoffsysteme bildeten während des Sedimentationsverlaufes überwiegend einen scharfen Trennspegel zwischen sedimentierender Trübe und überstehendem Klarfiltrat aus, was als eindeutiges Indiz für Schwarmsinkverhalten gilt. Im mittleren Konzentrationsbereich ist der Phase konstanter Sinkgeschwindigkeit eine Startphase vorgeschaltet (Bild 4). Sie dient hier nicht der Flockenbildung, sondern der Ausbildung von Kanälen, durch die die bei der Sedimentation verdrängte Flüssigkeit nach oben entweichen kann. Während der Schwarmsinkphase setzt sich der Feststoff unabhängig von der Größe der absinkenden Teilchen als ein einheitlicher Verband ab. Gleichzeitig bildet sich am Boden eine Zone eingedickten Schlammes, die als Kompressionszone bezeichnet wird. Treffen absinkender Trennspegel und aufsteigende Sedimentzone zusammen, ist der Kompressionspunkt erreicht, und die Sinkgeschwindigkeit u_{Sed} wird kleiner. Nach diesem Punkt verdichtet sich das Sediment weiter, die Flocken verdichten sich mehr und mehr bis zu ihrer von der gegebenen Belastung abhängigen Obergrenze der Deformierbarkeit und sind schließlich im Grenzfall so dicht gepackt, daß sie ihre Individualität verlieren.

In dieser Phase äußert sich in deutlicher Weise der unterschiedliche Flockungszustand der Suspensionen. Während bei Vorliegen einer kompakten, stabilen Flocke nach Erreichen des Kompressionspunktes nur noch eine sehr geringe Absenkung des Trennspiegels erfolgt, verdichtet sich bei Flocken mit kleinen Agglomerationskräften die Kompressionszone fortwährend bis zu einem Gleichgewichtswert. Dieses Ergebnis zeigt, wie bei der weiteren Behandlung der Filtration noch gezeigt werden wird, sein Analogon im Porositätsverlauf im Filterkuchen.

Grundlage für die quantitative Erfassung der Sedimentation und Flockung ist das von Richardson und Zaki auf dem Stokeschen Sinkgeschwindigkeitsansatz aufbauende Potenzgesetz¹⁶⁾:

$$\frac{u}{u_{\text{St}}} = (1 - c_{\text{SL}})^{4,65} \quad [6]$$

durch das die Konzentration c_{SL} der Suspension auf die Sedimentation berücksichtigt wird. Diese Gleichung wurde auf flockenbildende Stoffe mit der Absetzgeschwindigkeit u_{Sed} des Trennspiegels zwischen Klarwasser und Suspension übertragen¹⁷⁾:

$$u_{\text{Sed}} = u_0 \cdot (1 - k_{\text{F}} \cdot c_{\text{SL}})^{4,65} \quad [7]$$

u_0 ist die Sinkgeschwindigkeit einer einzelnen Flocke, berechnet nach dem Stokeschen Gesetz. Die Größe k_{F} ist der Flockungsfaktor und gibt das Flockenvolumen pro Trockenfeststoffmasse an. c_{SL} steht für die durch Einwaage

experimenten mit original suspensions were initiated. Due to the use of identical suspensions as those used in the filtration experiments, all of the decisive parameters were considered. In this manner, the suspension represents a system, which, for the present, does not necessitate comprehensive analysis. The sedimentation results therefore allow a further interpretation of filtration phenomena.

In diluted suspensions, the flocs behave as individual units. They sink more or less freely in the fluid upwardly displaced by them. In intermediate suspensions, the flocs exist in loose mutual contact. The fluid, displaced by the sinking flocs, forces its way upward between them. The channels thus formed are of approximately floc-sized diameter. In concentrated suspensions the formation of such channels is not possible, because of the relatively small quantity of displaced fluid. The fluid flow occurs through the extremely small hollow spaces between the primary particles, thus causing a slow sink velocity. The resulting classification allows the following observations:

- Diluted suspensions show from the start a constant sink velocity.
- Intermediate suspensions show an initial phase, followed by a constant sink velocity.
- Concentrated suspensions show from the beginning onward a decreasing sink velocity.

During the course of sedimentation, the employed solids systems generally formed a distinct separation interface between the sedimenting slurry and the clear filtrate above it, which can be interpreted as being an unmistakable indication for swarm sink behaviour.

In the middle particle concentration region, an initial phase precedes that of constant sink velocity (see Fig. 4). This phase does not serve the floc construction, but the formation of channels, up through which the liquid displaced during sedimentation can pass. During the swarm sink phase, the solids are deposited, independent of the particle size, as a uniform formation. Simultaneously, a zone of thickened sludge is built up at the bottom, known as the "compression zone".

When the sinking separation interface and the rising sediment zone meet, the compression point is attained and the sink velocity u_{Sed} decreases. From this point onward, the sediment is compressed further; the flocs are pressed more and more together, until their upper limit of deformation is reached (depending upon the given stresses). In the boundary condition, they are so closely packed, that they lose their individuality altogether.

In this phase, the differences of flocculation condition of the suspension become apparent. Whilst in the case of a compact stable floc, only a marginal shrinkage of the separation interface results upon reaching the compression point; as far as flocs with low agglomeration forces are concerned, however, the compression zone is progressively condensed up to an equilibrium value. This result, as will be shown by the further discussion of filtration, finds an analogy with the filter cake porosity trend.

In the concept from Richardson and Zaki, developed from the Stoke's sink velocity law¹⁶⁾, the basis for a quantitative evaluation of the sedimentation and flocculation can be found

$$\frac{u}{u_{\text{St}}} = (1 - c_{\text{SL}})^{4,65} \quad [6]$$

by which the concentration c_{SL} of the suspension above the sedimentation is considered. This equation can be applied to floc forming materials with a sink velocity u_{Sed} of the separation interface between the clear water and the suspension¹⁷⁾:

$$u_{\text{Sed}} = u_0 \cdot (1 - k_{\text{F}} \cdot c_{\text{SL}})^{4,65} \quad [7]$$

u_0 is the sink velocity of a single floc, calculated from Stoke's law. The parameter k_{F} is the flocculation factor which specifies the floc volume per dry solids mass. c_{SL} represents the suspension concentration specified by weighing. In this manner, the expression $k_{\text{F}} \cdot c_{\text{SL}}$ represents the effective floc volume concentration at hand.

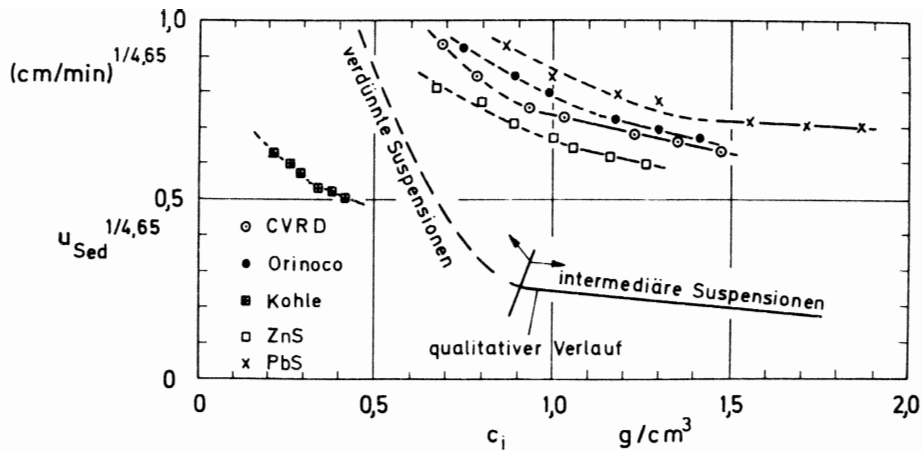


Bild 5: Sedimentationsauswertung: $u_{\text{Sed}}^{1/4.65} = f(c_{sL})$

Fig. 5: Sedimentation evaluation $u_{\text{Sed}}^{1/4.65} = f(c_{sL})$

festgelegte Suspensionskonzentration. Somit ergibt der Ausdruck $k_F \cdot c_{sL}$ die effektiv vorhandene Flockenvolumenkonzentration.

Trägt man in einem Diagramm $u_{\text{Sed}}^{1/4.65}$ über c_{sL} auf, wie in Bild 5 geschehen, so ist rein qualitativ ein linearer Zusammenhang zu erwarten. Aus dem Meßwertverlauf in Bild 5 kann jedoch entnommen werden, daß der lineare Funktionsverlauf zum einen im verdünnten und zum anderen im intermediären Konzentrationsbereich erfüllt wird. Daher erlaubt dieses Ergebnis in Ergänzung zu den bereits geschilderten Kriterien eine Klassifizierung der Suspensionen. Es zeigte sich, daß bei den untersuchten Suspensionen bei etwa 23 Vol.-% ein Schwellenwert vorliegt; darunter sind diese Stoffsysteme als verdünnt einzustufen, darüber liegen sie im intermediären Zustand vor. Im Bereich der Zonensedimentation intermediärer Suspensionen wird die Sinkgeschwindigkeit jedoch bestimmt durch die Flüssigkeitsströmung in den Kanälen, die sich zwischen den Flocken ausbilden. In diesem Fall wird das Modell der Carman-Kozeny-Gleichung für die Durchströmung eines porösen Systems mit einer angepaßten Permeabilitätsfunktion angesetzt¹⁸⁾, die Permeabilität des durchströmten Haufwerks wird dann ausschließlich durch die von der Durchströmung erfaßte Kanaloberfläche bestimmt.

Gewöhnlich wird in der zugrunde liegenden Hagen-Poiseuille-Gleichung für die Durchströmung eines runden Rohres

$$\frac{dp}{dy} = \frac{k \cdot \eta_L \cdot v}{d_h^2} \quad \text{mit} \quad v = \frac{u}{\epsilon} \quad [8]$$

der hydraulische Durchmesser d_h durch das Verhältnis

$$d_h = \frac{\text{Hohlraumvolumen}}{\text{Feststoffoberfläche}} = \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \cdot \frac{1}{S_v} \quad [9]$$

ersetzt. Bei der aufwärts gerichteten Durchströmung des absinkenden Schwarmes gilt nun jedoch

$$d_h = \frac{\text{Kanalvolumen}}{\text{Kanaloberfläche}} = \frac{\epsilon}{S_v} \quad [10]$$

Demnach ergibt sich die modifizierte Carman-Kozeny-Gleichung zu:

$$u = \frac{\epsilon^3}{K \cdot \eta_L \cdot S_v^2} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad [11]$$

u entspricht der Leerrohrgeschwindigkeit, d.h. hier der Trennspiegelgeschwindigkeit u_{Sed} ; ϵ steht für die wahre Porosität im absinkenden System, die durch das Kanalvolumen gebildet wird, und im betrachteten Fall durch $(1 - k_F \cdot c_{sL})$ ersetzt werden kann. S_v ist hier die durch das Kanalvolumen festgelegte Oberfläche pro Suspensionsvolumen

$$S_v = \frac{A_K}{V_{\text{ges}}} \approx \frac{4\epsilon}{d_K} \quad [12]$$

wobei im weiteren die Annahme getroffen wird, daß der Kanaldurchmesser d_K ungefähr dem Flockendurchmesser

ist, wenn man $u_{\text{Sed}}^{1/4.65}$ als Funktion von c_{sL} aufträgt, wie in Bild 5, dann wäre ein (rein qualitativ) linearer Verlauf zu erwarten. Aus Bild 5 ist jedoch ersichtlich, daß der lineare Verlauf auch in den verdünnten und intermediären Konzentrationsbereichen existiert.

Als Ergebnis dieser Evaluation kann zusätzlich zu den Kriterien oben für die Suspensionsklassifizierung verwendet werden. Für die untersuchten Suspensionen kann beobachtet werden, daß ein Schwellenwert bei approx. 23 Vol.-% vorliegt; unterhalb dieses Wertes können die Stoffsysteme als verdünnt betrachtet werden, oberhalb davon herrschen intermediäre Bedingungen. Im Bereich der Zonensedimentation von intermediären Suspensionen wird die Sinkgeschwindigkeit jedoch durch die Flüssigkeitsströmung in den Kanälen, die sich zwischen den Flocken ausbilden, bestimmt. In diesem Fall wird das Modell der Carman-Kozeny-Gleichung für die Durchströmung eines porösen Systems mit einer angepaßten Permeabilitätsfunktion angesetzt, die Permeabilität des durchströmten Haufwerks wird dann ausschließlich durch die von der Durchströmung erfaßte Kanaloberfläche bestimmt.

Usualy, in the basic Hagen-Poiseuille equation for the flow within a circular pipe

$$\frac{dp}{dy} = \frac{k \cdot \eta_L \cdot v}{d_h^2} \quad \text{with} \quad v = \frac{u}{\epsilon} \quad [8]$$

the hydraulic diameter d_h is substituted by the ratio

$$d_h = \frac{\text{hollows volume}}{\text{solids surface area}} = \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \cdot \frac{1}{S_v} \quad [9]$$

For the upward moving fluid flow, permeating the sinking swarm

$$d_h = \frac{\text{channel volume}}{\text{channel surface area}} = \frac{\epsilon}{S_v} \quad [10]$$

is now applicable. From this, the modified Carman-Kozeny equation

$$u = \frac{\epsilon^3}{K \cdot \eta_L \cdot S_v^2} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad [11]$$

results, where u represents the fluid surface velocity, i.e. in this case, the separation interface velocity u_{Sed} ; ϵ is the true porosity of the sinking system, given by the channel volume and in the considered case able to be substituted by $(1 - k_F \cdot c_{sL})$. Here, S_v is the surface area per suspension volume determined by the volume of the channels,

$$S_v = \frac{A_K}{V_{\text{ges}}} = \frac{4\epsilon}{d_K} \quad [12]$$

whereby in the following, the assumption is made, that the channel diameters are approximately of the same size as those of the flocs (d_F).

K is the so-called Kozeny factor, usually having the value 5¹⁹⁾. The upward-moving channel flow is caused by the gradient $\Delta p/L$, given by the unbuoyed weight of solids per suspension height.

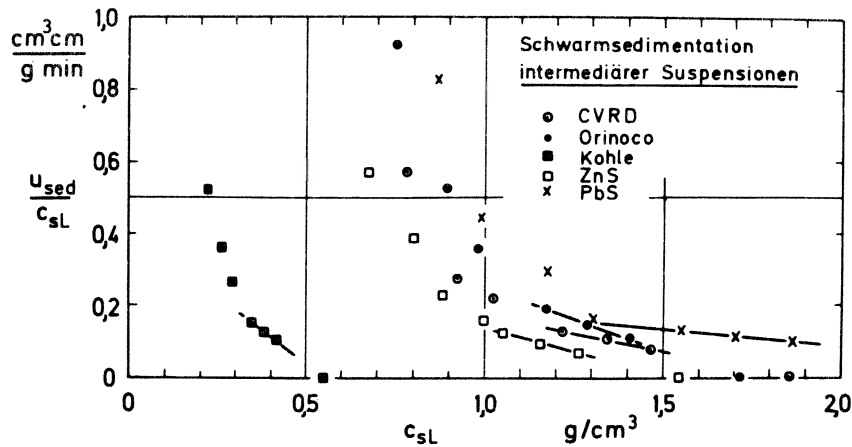


Bild 6: Sedimentationsauswertung: $u_{\text{Sed}}/c_{\text{sL}} = f(c_{\text{sL}})$ (vgl. Gl. [13])

Fig. 6: Sedimentation evaluation $u_{\text{Sed}}/c_{\text{sL}} = f(c_{\text{sL}})$ (see equation [13])

d_F entspricht. K ist der sog. Kozeny-Faktor, der üblicherweise zu 5 angenommen wird¹⁹⁾. Die aufwärtsgerichtete Kanalströmung wird durch den Gradienten $\Delta p/L$ verursacht, der sich durch das auftriebsbereinigte Feststoffgewicht pro Suspensionshöhe ergibt:

$$\frac{\Delta p}{L} = c_{\text{sL}} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_L)}{\rho_s}$$

Durch Einfügen dieser Ansätze in Gleichung [11] erhält man:

$$u_{\text{Sed}} = \frac{(\rho_s - \rho_L)}{80 \cdot \eta_L \cdot \rho_s} \cdot g \cdot d_F^2 \cdot (1 - k_F \cdot c_{\text{sL}}) \quad [13]$$

Ergebnisse der Flockenbildung

Bei Gültigkeit des Ansatzes gemäß Gl. [13] und der Randbedingungen folgt durch Auftragung des funktionalen Zusammenhangs $u_{\text{Sed}}(c_{\text{sL}}) = f(c_{\text{sL}})$ im intermediären Konzentrationsbereich ein Geradenverlauf. Bild 6 zeigt diese Abhängigkeit für die 5 untersuchten Ansätze. Zunächst bestätigt sich die bereits vorgenommene Einordnung der Suspensionen, wonach oberhalb einer Suspensionskonzentration von $c_v = 23-25$ Vol.-% intermediäre Bedingungen vorliegen. Unterhalb dieses Schwellenwertes, also im verdünnten Konzentrationsbereich, bricht das Modell zusammen, da die Flocken dann nicht mehr das gesamte Suspensionsvolumen ausfüllen; d. h. die effektive Porosität $\varepsilon = (1 - k_F \cdot c_{\text{sL}})$ ist größer als das Kanalvolumen, und es folgt ein überhöhtes Verhältnis $u_{\text{Sed}}/c_{\text{sL}}$.

Eine Grenzwertbetrachtung der Geradenverläufe in Bild 6 für $u_{\text{Sed}} \rightarrow 0$ führt auf der Abszisse zur Konzentration $c_{\text{sL},0}$ bzw. $c_{v,0}$ (vgl. Tabelle 2), bei der kein freies Absetzen der Teilchen als Schwarm mehr möglich ist. Hier versagt das Modell der intermediären Suspensionen wiederum, da sich aufgrund der sehr kleinen verdrängten Flüssigkeitsmenge keine Strömungskanäle mehr zwischen den Teilchen ausbilden können.

Tabelle 2: Flockengröße, Flockungsfaktor und Grenzkonzentration der intermediären Suspensionen

Table 2: Floc size, flocculation factor and limit concentration of the intermediate suspensions

Produkt Product		CVRD	Orinoco	Kohle Coal	ZnS	PbS
d_F	μm	25,4	32,0	45,2	26,1	23,0
k_F	cm^3/g	0,539	0,582	1,820	0,647	0,366
$k_{F,v}$	cm^3/cm^3	2,63	2,74	2,53	2,73	1,91
$c_{v,0}$	Vol.-%	38,1	36,6	39,5	36,7	52,5
$c_{v,eff}$	Vol.-%	65,8	68,4	63,3	68,3	47,7
		vgl. [14] see [14]				

Aus dem Achsenabschnitt der Ausgleichsgeraden kann der mittlere Kanaldurchmesser bzw. der mittlere Flockendurchmesser d_F berechnet und aus der Steigung der Flock-

$$\frac{\Delta p}{L} = c_{\text{sL}} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_L)}{\rho_s}$$

When these concepts are inserted in equation [11], the following results:

$$u_{\text{Sed}} = \frac{(\rho_s - \rho_L)}{80 \cdot \eta_L \cdot \rho_s} \cdot g \cdot d_F^2 \cdot (1 - k_F \cdot c_{\text{sL}}) \quad [13]$$

Results of the floc formation

If the concept given by equation [13] and the boundary conditions are valid, then the plotted function $u_{\text{Sed}}/c_{\text{sL}} = f(c_{\text{sL}})$ should be linear within the intermediate concentration range. Fig. 6 shows this dependence for the five investigated suspensions. Firstly, the classification of the suspension can be seen to comply, whereby above a suspension concentration of $c_v = 23-25$ Vol.-% intermediate conditions exist. Below this threshold value, i.e. in the region of diluted concentrations, the model breaks down, as the flocs can then no longer fill the whole suspension volume; this means that the effective porosity $\varepsilon = (1 - k_F \cdot c_{\text{sL}})$ is no longer that of the channel volume, and an excessive increase of the ratio $u_{\text{Sed}}/c_{\text{sL}}$ results.

A consideration of the limiting conditions of the linear trend in Fig. 6, for $u_{\text{Sed}} \rightarrow 0$ leads to an abscissa concentration value of $c_{\text{sL},0}$ or $c_{v,0}$ (see Table 2), by which no further deposition of the particles as a swarm is possible. In this instance, the model of the intermediate suspension breaks down, as no flow channels can be formed between the particles, due to the extremely low quantity of displaced fluid. The mean floc diameter d_F can be calculated from the point where the line of best fit cuts the coordinate axes, and from its slope the flocculation factor k_F may be determined for intermediate suspensions.

The values of floc diameter d_F thus evaluated, and the flocculation factor k_F are correlated for intermediate suspensions in Table 2.

It is apparent from the values of the mean floc diameter d_F from Table 1, that a good correspondence exists with the x_{50} -value of the particle size distributions, evaluated by wet sieving. It can be concluded from this, that the flocs, created by an agglomeration of solid particles are mainly within the particle size range $< x_{50,3}$, which leads to a particle size distribution curve with a steeper slope for the solids in the suspension. This phenomenon is illustrated in Fig. 7.

In this diagram the particle size distribution curve of the CVRD-iron ore, measured by a sedimentation in tap-water without dispersion, is compared with the same after wet sieving in ethanol with dispersion and dispersing agents. The sedimentation curve indicates, because of the formation of flocs, an unmistakably coarser material, whereas the flocs were destroyed by the wet-sieving and as a result, mainly primary particles were measured. This result corresponds quite well with Freidinger's results²⁰⁾, who proved the existence of an approximately monodisperse floc size distribution of Kaolin.

kungsfaktor k_F der intermediären Suspension gewonnen werden.

Die so ermittelten Werte für den Flockendurchmesser d_F und den Flockungsfaktor k_F sind in Tabelle 2 für die intermediären Suspensionen zusammengestellt.

Bezüglich des mittleren Flockendurchmessers d_F fällt unter Einbeziehung der Werte aus Tabelle 1 auf, daß eine gute Übereinstimmung mit dem x_{50} -Wert der Korngrößenverteilung vorliegt, die durch Naßsiegung ermittelt wurde. Daraus ist der Schluß zu ziehen, daß die durch Zusammenlagerung von Feinstpartikeln entstandenen Flocken hier vorwiegend im Teilchengrößenbereich $< x_{50,3}$ anzusiedeln sind und somit zu einer Aufsteilung der Verteilungsfunktion der in der Suspension vorzufindenden Feststoffteilchen führt. Dieser Sachverhalt wird in Bild 7 verdeutlicht.

In diesem Diagramm ist die mittels Sedimentationswaage in Leitungswasser ohne Dispergierung gemessene Korngrößenverteilung des CVRD-Eisenerzes dem durch Naßsiegung in Äthanol mit Dispergierung und Dispergiermittel erhaltenen Verlauf gegenübergestellt. Die Sedimentationskurve deutet auf ein deutlich gröberes, weil geflocktes Material hin, während bei der Naßsiegung die Flocken zerstört und im wesentlichen nur noch Primärpartikel gemessen wurden. Dieses Ergebnis steht in guter Übereinstimmung mit Messungen von Freidinger²⁰⁾, der mit technischem Kaolin eine annähernd monodisperse Flockengrößenverteilung nachweisen konnte.

Der volumenbezogene Flockungsfaktor $k_{F,V}$ (\triangleq Flockenvolumen pro Volumeneinheit Feststoff) zeigt einen weitgehend gleichbleibenden Wert. Demnach ergibt ein Feststoffvolumen von 1 cm^3 ein Flockenvolumen von im Mittel $2,66 \text{ cm}^3$, was einer Flockenporosität von $\epsilon_F = 0,62$ entspricht. Eine Ausnahme bildet das stofflich heterogene PbS-Konzentrat. Hier ergibt sich eine wesentlich kompaktere Flocke mit einer Innenporosität von $\epsilon_F = 0,48$.

Multipliziert man die durch Einwaage vorgegebene Suspensionskonzentration c_{sL} mit dem Flockungsfaktor k_F , so erhält man die in der Suspension effektiv vorhandene und bei der Filtration effektiv wirksame Feststoffvolumenkonzentration

$$c_{V,eff} = k_F \cdot c_{sL} \quad [14]$$

Für eine Ausgangskonzentration $c_v = 25 \text{ Vol.-%}$ ist dieser Wert ebenfalls in Tabelle 2 aufgeführt. Man erkennt, daß die Flockenvolumenkonzentration um den Faktor 2-3 höher liegt als die ursprünglich angesetzte Suspensionskonzentration.

Diskussion von Einflußgrößen

Bei näherer Betrachtung der Sedimentationssysteme kann eine Anzahl von Randbedingungen aufgedeckt werden, die die Flockenbildung und deren Stabilität positiv beeinflussen.

So sind in Tabelle 3 den pH-Werten, die ein minimales Zeta-Potential ergeben²¹⁾, die pH-Werte der Sedimentationsansätze, die gleichzeitig den pH-Werten der filtrierten Trüben entsprechen, gegenübergestellt.

Tabelle 3: pH-Werte der Suspensionen

Produkt Product	CVRD	Orinoco	Kohle Coal	ZnS	PbS
pH	5,9	—	4,6	5,3 - 6,5	5,5
pH (ζ_{min})	5,6	—	—	5,5 - 6,5	5,5 - 7,5

Bei minimalem Zeta-Potential ergibt sich beim Stoß zweier Partikel die geringste festkörperliche Distanz bzw. die größte Wirksamkeit der v.d.W.-Agglomerationskräfte. Für das hämatitische CVRD-Eisenerz findet sich in der Literatur eine Bestätigung der genannten Flockenbildung²²⁾. In Bild 8 sind daraus Resultate zitiert, die den Einfluß des pH-Wertes auf die Größe der Eisenerzflocken angeben. Hierbei fällt auf, daß zum einen die Größe der nachgewiesenen Flocken in guter Näherung mit den eigenen Meßwerten überein-

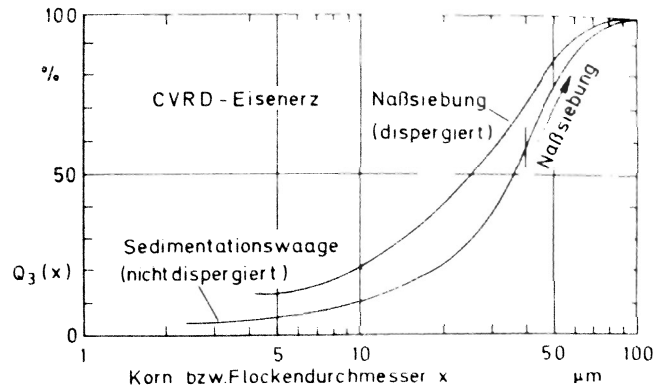


Bild 7: Korn- bzw. Flockengrößenverteilung des CVRD-Eisenerzes

Fig. 7: Particle or floc size distribution of the CVRD iron ore

The volume-related flocculation factor $k_{F,V}$ (\triangleq floc volume per solid volume) is of a generally constant value. From this, a solid volume of 1 cm^3 forms a mean floc volume of $2,66 \text{ cm}^3$, corresponding to a floc porosity of $\epsilon_F = 0,62$. One exception to this is given by the materially heterogeneous PbS-concentrate. In this case, a decisively more compact floc results with an internal porosity of $\epsilon_F = 0,48$.

If the suspension concentration c_{sL} , determined by weight is multiplied with the flocculation factor k_F , then the solids volume concentration, effectively present within the suspension and during filtration, results.

$$c_{V,eff} = k_F \cdot c_{sL} \quad [14]$$

This value is also listed in Table 2 for an initial concentration $c_v = 25 \text{ Vol.-%}$. It is apparent, that the floc volume concentration is a factor of 2 to 3 times higher than the originally prepared suspension concentration.

Discussion of influencing parameters

Upon closer scrutinization of the sedimentation systems, a number of boundary conditions can be revealed, which positively influence the floc formation and their stability.

In relation to this, the pH-values from which minimal Zeta potentials result²¹⁾, are listed in Table 3 against the pH-values of the sedimentation systems, which are simultaneously the pH-values of the slurry to be filtered.

Upon collision of two particles, the smallest solids distance or greatest effect of the v.d.W.-agglomeration forces result when the Zeta potential is at a minimum. For the hematitic CVRD-iron ore, a verification of the above floc formation can be found in publications²²⁾. In Fig. 8 results are quoted, which indicate a pH-value influence upon the size of the iron ore flocs.

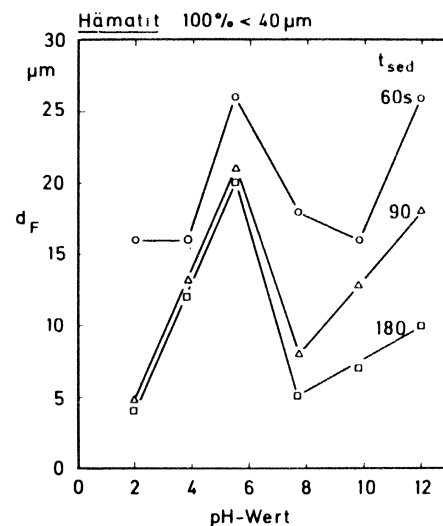


Bild 8: Einfluß des pH-Wertes auf die Größe der Eisenerz-Flocken (nach²²⁾)

Fig. 8: Influence of the pH value upon the size of iron ore flocs (as given by²²⁾)

stimmt; zum anderen sinkt der Flockendurchmesser um fast die Hälfte, wenn der pH-Wert nur um 1 zu- oder abnimmt. Daraus wird nun deutlich, welchen erheblichen Einfluß der pH-Wert der Suspension und somit auch die Wahl des Wassers zur Suspendierung einer Feststoffprobe auf das Filtrationsergebnis haben kann.

Die Betrachtung der Flockenstabilität bei der Filtration führt zu einer Analyse der orthokinetischen Transporteffekte bei den zu Grunde gelegten Filtrationsversuchen. Diese Versuche wurden auf der halbtechnischen Pilotanlage zur kontinuierlichen Druckfiltration durchgeführt, die an anderer Stelle beschrieben ist²³⁾. Für eine durchrührte und/oder strömende Suspension ist für den Transport und die Beanspruchung der Feststoffteilchen die mittlere Schergeschwindigkeit \bar{G} bestimmend. Für eine Newtonsche-Flüssigkeit ergibt sich \bar{G} aus der volumenbezogenen dissipierten Leistung P/V und der Viskosität η ¹¹⁾

$$\bar{G} = \frac{P/V}{\eta} \quad [15]$$

Die Suspensionsführung in der Druckfiltrationsanlage hat den Charakter einer mehrstufigen Agglomeration, in der in einer Beruhigungszone (Steigrohr) durch Vereinigung von zuvor im Rührbehälter entstandenen kompakten Primäragglomeraten neue, große Flocken entstehen können. Eine Abschätzung der mittleren Schergeschwindigkeit \bar{G} bzw. der Kennzahl $\bar{G} \cdot t_{\text{verw}} \cdot c_v$ führt zu den in **Tabelle 4** zusammengestellten Ergebnissen.

Tabelle 4: Abschätzung des orthokinetischen Transporteffektes im gerührten Filtertrog

Filtertrogvolumen	$V_{\text{st.}} = 230 \text{ l}$	mittl. Schergeschwindigkeit \bar{G}
dissipierte Energie	$P = 200 \text{ W}$	$\bar{G} = 295 \text{ s}^{-1}$
Suspensions-Viskosität	$\eta_{\text{st.}} = 1.10 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$	(vgl. Gl. [14])
Susp. Verweilzeit	$t_{\text{verw.,min}} = 17 \text{ min}$	Flockungskennzahl
Susp. Konzentration	$c_v = 25 \text{ Vol.-%}$	$\bar{G} \cdot t_{\text{verw.}} \cdot c_v > 70000$

Nach²⁴⁾ liegen optimale Werte für die Flockungskennzahl bei 100–500, so daß hier für eine genügende Flockung bereits eine Verweilzeit von $t_{\text{verw.}} > 7 \text{ s}$ ausreichen würde.

Bedeutung der Flockenbildung für die Filtration

Die Analyse der zu filtrierenden Suspension anhand des vorgestellten Sedimentationsverfahrens unter Berücksichtigung der behandelten Randbedingungen erlaubt neuartige Interpretationen der Kuchenbildung und der Kuchenstruktur. Während in der Filtrationsliteratur bei der Aufstellung von Kuchenmodellen üblicherweise von der Anlagerung von Einzelpartikeln ausgegangen wird, konnte für die untersuchten Suspensionen eine Flockenfiltration nachgewiesen werden. Die Haufwerksstruktur des Filterkuchens wird durch die Flocken und ihre Deformation geprägt. Das Kompressionsverhalten des Sediments ist auf den Filterkuchen und seine Entstehung übertragbar. In diesem Sinne stellt die zu filtrierende Suspension ein klassisches Sedimentationssystem dar, wie dies in **Bild 9** verdeutlicht wird.

Dabei wird der kuchenoberflächennahe Suspensionsbereich als Zone mit konstanter Schwarmsinkgeschwindigkeit betrachtet, die Kuchenablagerungs- und der obere Kuchenbereich repräsentieren die Kompressionszone, während der untere Kuchenbereich das verdichtete Sediment darstellt.

In der Grenzschicht „Kuchen — Tuch“ werden die relevanten Durchströmungsbedingungen des porösen Filterkuchens festgelegt. In einem Haufwerk kann der freie Durchströmungsquerschnitt durch die Porosität ausgedrückt werden: Je größer die Porosität, desto größer der freie Durchlaß. In den untersuchten Filterkuchen stellt sich nun, wie mit Hilfe von in Schichten zerteilten Filterkuchen nachgewiesen wurde, ein Porositätsgradient mit abnehmenden Porositätswerten von der Kuchenoberseite zum Tuch hin ein. **Bild 10** zeigt auszugsweise den Porositätsverlauf eines CVRD-, ZnS- und PbS-Filterkuchen. Der Kurvenverlauf

It is, on the one hand, noticeable that the size of the flocs, proven to exist, correspond quite well with own results; and on the other, that the floc diameter decreases by nearly a half, when the pH-value is altered by ± 1 . From this it becomes clear, which considerable influence the suspension's pH-value can have upon the filtration results, (i.e. the choice of water for the suspension of the solids sample).

The observations of the floc stability during the filtration investigations lead to an analysis of the orthokinetic transport phenomena. These investigations were conducted on a semi-scale continuous pressure filtration pilot plant, described in another publication²³⁾. The mean shear velocity \bar{G} is the determining factor for the transport and stress of the solid particles in static and/or flowing suspensions.

For a Newtonian fluid, \bar{G} results from the volume-related energy dissipation P/V and the viscosity η ¹¹⁾.

$$\bar{G} = \frac{P/V}{\eta} \quad [15]$$

The suspension's piping within the pressure filtration plant leads to a multi-stage agglomeration. In a calming zone new, large flocs can form due to the mixing with compact primary agglomerates. An estimation of the mean shear velocity \bar{G} or the parameter $\bar{G} \cdot t_{\text{res}} \cdot c_v$ lead to the results summarized in **Table 4**.

Table 4: Estimation of the orthokinetic transport effect in a static filter trough

Filter trough volume	$V_{\text{st.}} = 230 \text{ l}$	mean shear velocity \bar{G}
Dissipated energy	$P = 200 \text{ W}$	$\bar{G} = 295 \text{ s}^{-1}$
Suspension viscosity	$\eta_{\text{st.}} = 1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$	(see eq. [14])
Suspension residence time	$t_{\text{res.,min}} = 17 \text{ minutes}$	Flocculation parameter
Suspension concentration	$c_v = 25 \text{ \% - vol.}$	$\bar{G} \cdot t_{\text{res.}} \cdot c_v > 70000$

According to²⁴⁾, the optimal values for the flocculation parameter lie between 100 and 500, so that in this case, for the formation of the flocs, a generation time $t_{\text{res.}} > 7 \text{ sec.}$ is sufficient.

The significance of flocculation for filtration

The analysis of the suspension to be filtered as a result of the discussed sedimentation process and under consideration of the boundary conditions allows a new kind of interpretation of the cake formation and structure. Whilst the cake formation concepts from filtration literature usually commence from the deposition of single particles, the investigated suspensions showed a floc filtration. The flocs and their deformation characterize the bulk structure of the filter cake. The compression behaviour of the sediment is transferable to the filter cake and its generation. In this manner,

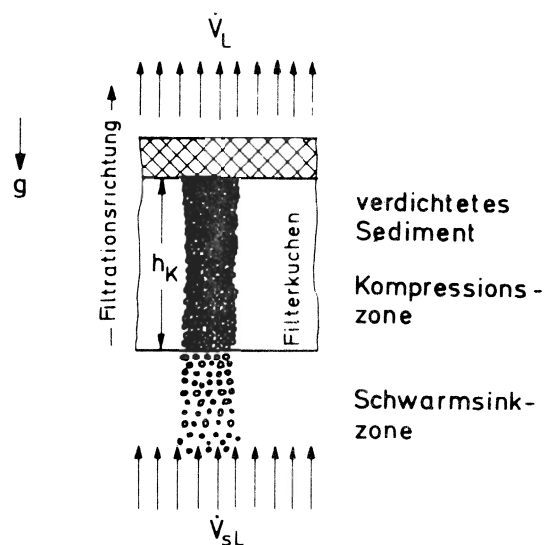


Bild 9: Schema der Kuchenbildung als sedimentierendes System

Fig. 9: Cake building scheme as a sedimenting system

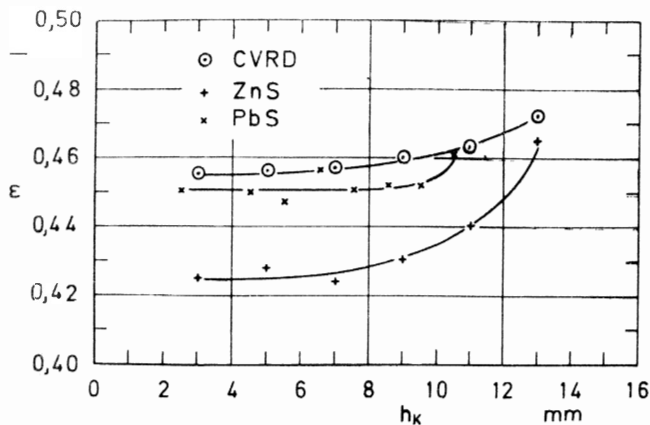


Bild 10: Porositätsverlauf im Filterkuchen $\epsilon = f(h_k)$

Fig. 10: Porosity trend in the filter cake $\epsilon = f(h_k)$

des CVRD- und des ZnS-Erzes zeigt an, daß im oberen Kuchenbereich, dort wo am Ende der Kuchenbildungsphase der letzte Feststoff anfiltriert wurde, die höchste Porosität vorliegt. Zur Kuchenmitte hin nimmt der Hohlraumanteil ab und bleibt im unteren Bereich bis zum Tuch hin nahezu konstant. Dieses Ergebnis findet sein Analogon im Sedimentationsexperiment: Beim CVRD- und beim ZnS-Erz wies der Trennspiegel auch nach Erreichen des Kompressionspunktes eine deutliche Sinkgeschwindigkeit auf (Bild 4), was auf eine Deformation der ursprünglich lockeren, großen Flocken schließen läßt. Bei der PbS-Suspension blieb das Trennspiegelniveau nach Erreichen des Kompressionspunktes nahezu konstant, was als Indiz für kompakte, stabile Flocken gewertet werden kann.

Als Konsequenz daraus zeigte die PbS-Suspension die mit Abstand beste Kuchenbildung der genannten Materialien; dabei weist das PbS den kleinsten mittleren Partikeldurchmesser auf. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus der Sedimentationsanalyse wird der Schluß gezogen, daß die Haufwerksstruktur und somit auch die Durchlässigkeit entscheidend vom Koagulations- und Sedimentationsverhalten der Suspension bestimmt werden. Die Koagulation bewirkt eine Anlagerung bzw. Bindung des Feinstkornes an der Oberfläche größerer Körner bzw. untereinander. Die so entstandene Flockenvolumenkonzentration führt zu intermediärem Sedimentationsverhalten mit Ausbildung bevorzugter, großer Strömungskanäle. Bei genügend großen Agglomerationskräften sind die während der Kuchenbildung angelagerten Flocken in der Lage, den durch den Filtrationsdruck hervorgerufenen Feststoffgerüstdruck ohne Kollabieren bzw. nennenswerte Volumenschrumpfung zu übertragen. In diesem Fall bleiben die Strömungskanäle aus der Schwarmsinkphase erhalten und ermöglichen bis zum Filtertuch hin einen guten Filtratabfluß. Im umgekehrten Fall verlieren die Flocken in der Grenzschicht „Kuchen — Tuch“ ihre Individualität, die Flocken komprimieren, und die Durchlässigkeit wird im wesentlichen durch den „inneren“ Durchströmungswiderstand der Flocken kontrolliert.

Die Diskussion der Porositätsschichtung im Filterkuchen zeigt, daß bei Vorliegen geeigneter Koagulationsbedingungen in der Suspension auch feinstkornreiche Trüben eine hervorragende Kuchenbildung und niedrige Durchströmungswiderstände aufweisen können. Grundlage hierfür ist die Bindung des Feinstkornes und somit die Eliminierung seiner schädlichen Eigenschaften auf die Haufwerksstruktur.

Die Berücksichtigung bzw. gezielte Beeinflussung der physikalisch-chemischen Suspensionsbedingungen kann in vielerlei Hinsicht den Fest/Flüssig-Trennerfolg ausmachen. So sind z. B. bei der Übertragung von labormäßig gewonnenen Filtrationsergebnissen auf Produktionsmaßstab gerade bei feinstkornreichen Suspensionen diese Bedingungen in engen Grenzen beizubehalten. Bei der filtrationsrelevanten Charakterisierung einer Suspension sind daher stets neben den üblichen Größen wie Konzentration, Korngrößenverteilung, Temperatur etc. der Salzgehalt und/oder der pH-Wert zu nennen.

the suspension to be filtered represents a classical sedimentation system, as illustrated by Fig 9.

Here, the suspension region in the vicinity of the cake surface is viewed as a zone of constant swarm sink velocity; the cake deposition region and the upper cake regions represent the compression zone, whilst the lower cake regions portray the compressed sediment. The relevant permeability conditions of the porous cake are established in the boundary layer "cake-cloth". The free area of permeation within a bulk may be expressed by the porosity: The higher the porosity, the less restricted the flow.

The subdivision of filter cakes into layers proved the existence of a porosity gradient, with a decreasing porosity value from the cake surface down towards the cloth. Fig. 10 Shows, in extracts, the porosity trend of a CVRD-iron ore, ZnS-ore and PbS-ore filter cakes. The curve trend of the CVRD-iron ore and of the ZnS-ores illustrates that in the upper cake regions (at the location where the last particles were deposited at the end of a filtration phase) the highest porosity exists.

The portion of hollow spaces decreased towards the centre of the cake and remained almost constant in its lower regions, down to the filter cloth. This result is analogous to that of the sedimentation experiment: In the case of CVRD-iron ore and ZnS-ore, the separation interface showed a substantial sink velocity, also upon reaching the compression point (see Fig. 4). This indicates a deformation of the originally loosely-packed large flocs. In the case of the PbS-suspension, the separation interface level remained practically unchanged upon reaching the compression point, which can be considered as an indication of compact, stable flocs. As a consequence, the PbS-suspension portrayed by far the best cake formation of the investigated slurries, despite the fact that the PbS consisted of particles of the smallest average size. The conclusion, drawn from the knowledge gained from the sedimentation analysis is, that the bulk structure and accompanying permeability is decisively determined by the coagulation and sedimentation behaviour. The coagulation causes a binding of extremely fine particles upon the surface of coarser grains, or upon each other. The floc volume concentration thus created leads to intermediate sedimentation behaviour with the generation of preferential and larger flow channels. When the existing agglomeration forces are large enough during the cake formation, the flocs are able to convey the solids construction pressure caused by the filtration pressure difference without collapsing, or without a significant volume shrinkage. In this case, the flow channels resulting from the swarm sink phase remain unchanged and allow a good filtrate drain down to the filter cloth. In the opposite case, the flocs lose their individuality in the boundary layer "cake-cloth", the flocs compress, and the permeability is mainly controlled by the "internal" floc permeability resistance.

The discussion of the porosity stratification within the filter cake illustrates that, in the case of suitable coagulation conditions within the suspension, extremely fine particle slurries can also show an excellent cake formation and lowest permeation resistance. The basic reason for this is the binding of the finest particles, and with it, the elimination of their detrimental influence upon the bulk structure.

The consideration, or the aimed influence of the physico-chemical suspension conditions can in many ways constitute to the success of solid/liquid separation. In this respect, e.g. when conveying the filtration results obtained from laboratory experiments to a production scale, the filtration conditions (especially when dealing with extremely fine particle suspensions) are to be stringently followed. Therefore, when characterizing a suspension for filtration purposes, the salt content and/or pH-value must always be taken into account along with the usual parameters such as concentration, particle size distribution, temperature etc.

In this manner, for a coal flotation concentrate with a high ash content, a cake formation time of $t_1 = 14.3$ min. resulted for a cake height $h_k = 11$ mm (pH = 8.3) filtered with a pres-

So ergab sich bei der labormäßigen Druckfiltration eines aschereichen, belgischen Kohleflotationskonzentrates im Anlieferungszustand ($\text{pH} = 8,3$) bei der Druckdifferenz $\Delta p = 2$ bar für die Kuchenhöhe $h_K = 11$ mm eine Kuchenbildungszeit von $t_1 = 14,3$ min. Nach Absenkung des pH-Wertes durch HCl-Zugabe auf $\text{pH} = 4,9$ konnte unter Beibehaltung der übrigen Versuchswerte der Kuchen bereits in 128 s gebildet werden.

Bei der magnetischen Trennung von Eisenerztrüben kann ein Anpassen des pH-Wertes entsprechend dem Ladungsnulldpunkt nachgewiesenermaßen²²⁾ zu einer erheblichen Steigerung im Eisen-Ausbringen führen. Diese Verbesserung des Aufbereitungserfolges kann u. a. auf einen höheren Widerstand der abgesetzten Teilchen gegen Scherkräfte und auf eine selektive magnetische und/oder ionisierte Flockenbildung von magnetischen bzw. Berge-Teilchen zurückgeführt werden.

Im gleichen Zusammenhang wird deutlich, daß sowohl der Flotationsmechanismus als auch die Selektivität dieses Verfahrens vom Oberflächenangebot und somit vom Koagulationszustand der Suspension beeinflusst werden.

Wichtige Abkürzungen — Important abbreviations

c_{sL}	Suspensionskonzentration m_s/V_{sL} suspension concentration
c_v	Suspensionsvolumenkonzentration V_s/V_{sL} suspension volume concentration
d	Porendurchmesser pore diameter
d_h	hydraulischer Durchmesser hydraulic diameter
h_K	Kuchenhöhe cake height
h_{Sed}	Höhe des sedimentierenden Trennspiegels height of the sedimenting separation interface
k	hydraulische Leitfähigkeit hydraulic conductivity
KGV	Korngrößenverteilung particle size distribution
L	Länge length
p	Druck pressure
P	Leistung power
P_c	spez. Kuchenpermeabilität specific cake permeability
$Q_d(x)$	Volumensummeverteilung volume sum distribution
r_c	spez. Filterkuchenwiderstand specific filter cake resistance
R_M	Filtermediumwiderstand filter medium resistance
S_v	spez. Oberfläche specific surface area
t_{Sed}	Sedimentationszeit sedimentation time
t_{Verw}	Verweilzeit residence time
T	Temperatur temperature
t_1	Kuchenbildungszeit cake formation time
t_2	Entfeuchtungszeit dewatering time
u	Geschwindigkeit velocity
v	lokale Geschwindigkeit local velocity
\dot{V}_L	Flüssigkeitsvolumenstrom fluid volume flow rate
x	Partikeldurchmesser particle diameter
$x_{90,3}$	Medianwert der Q_d -Verteilung mean particle diameter
Δp	Druckdifferenz pressure difference
f	Porösität porosity
η_L	Flüssigkeitsviskosität fluid viscosity
κ	Konzentrationsparameter Zeta-Potential concentration parameter Zeta-potential

sure difference of $\Delta p = 2$ bar. Upon adding HCl, to reduce the pH-value to 4.9, the cake was able to be formed after just 128 sec. under identical filtration conditions.

In the case of the magnetic separation of iron ore slurries, an adaption of the pH-value to the point of zero charge, has proven²²⁾ that a considerable capacity increase results. This beneficiation improvement may, among other things, be traced back to a higher resistance of the deposited particles against shear forces, and to a selective magnetic and/or ionized floc formation of magnetic particles.

It is, in the same respect obvious, that not only the flotation mechanism, but also the selectivity of these processes are influenced by the solids offered i. e. by the coagulation condition of the suspension.

Schrifttum — References

- 1) Darcy, H. P. G.: Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Paris: Dalmont 1856.
- 2) Schliephake, D., und Beyer, P.: Beitrag zum Filtrationsverhalten von Carbonationsschlämmen, Zucker 30 (1977) 8, S. 405 ff.
- 3) Stahl, W., Bott, R., und Anlauf, H.: Abschlußbericht zum AIF-Vorhaben Nr. 5564 (1985).
- 4) Brauer, H.: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen, Verlag Sauerländer (1971).
- 5) Schubert, H.: Kapillarität in porösen Feststoffsystemen, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1982.
- 6) Barrow, G. M.: Physikalische Chemie, Teil III, Vieweg, 1972.
- 7) Kitchener, J. A.: Flocculation in mineral processing, Sijthoff & Noordhoff, Alphen aan den Rijn, 1978.
- 8) Schäfer, W.: Zetapotential und Koagulation, Engler-Bunte-Institut, Bereich Wasserchemie, 1967
- 9) Lyklema, J.: Surface chemistry of colloids in connection with stability, Sijthoff & Noordhoff, Alphen aan den Rijn, 1978.
- 10) Gregory, J.: Flocculation by inorganic salts, Sijthoff & Noordhoff, Alphen aan den Rijn, 1978.
- 11) Koglin, B.: Einfluß der Agglomeration auf die Filtrierbarkeit von Suspensionen, Chem. Ing. Tech. 56 (1984) Nr. 2, S. 111/117.
- 12) Scott, K. J.: Theory of thickening: Factors affecting settling rate of solids in flocculation pulps, Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. C: Mineral Process. Extr. Metall.) 1968, C85/C97.
- 13) Michaels, A. S., und Bolger, J. C.: Settling rates and sediment volumes of flocculated kaolin suspension, I & EC Fundamentals 1, No. 1, Feb. 1962, S. 24/33.
- 14) Dedegil, M. Y.: Einfluß der Konzentration auf die Sedimentationsgeschwindigkeit einer Einkorn suspension, Verfahrenstechnik 14 (1980) Nr. 3, S. 160/163.
- 15) Scholl, K.-H.: Der Einfluß der Konzentration auf die Sinkgeschwindigkeit von Partikeln, Chem. Ing. Techn. 48 (1976), S. 149/153.
- 16) Bott, R.: Zur kontinuierlichen Druckfiltration, Dissertation Universität Karlsruhe 1985.
- 17) Richardson, J. F., und Zaki, W. N.: Sedimentation and fluidisation: Part I, Trans. Instn. Chem. Engrs. 32 (1954), S. 35/52.
- 18) Wyllie, M. R. J., und Gardner, G. H. F.: The generalized Kozeny-Carman Equation, World Oil, Production Section, March 1958, p. 121 ff.
- 19) Carman, P. C.: Flow of gases through porous media, Butterworths scientific publications, London, 1956.
- 20) Freidinger, R.: Sedimentation in Suspensionen mit großem Feststoffanteil, Maschinenmarkt Würzburg 89 (1983), Nr. 9, S. 140/143.
- 21) Ney, P.: Zeta-Potentiale und die Flotierbarkeit von Mineralien, Springer-Verlag, Wien, New York 1973.
- 22) Svoboda, J.: Untersuchungen über den Einfluß kolloidaler Stabilität von Suspensionen bei der magnetischen Trennung, Aufbereitungs-Technik 24 (1983), Nr. 9, S. 520/526.
- 23) Bott, R., Anlauf, H., und Stahl, W.: Kontinuierliche Druckfiltration feinstkörniger Kohlekonzentrate, Aufbereitungs-Technik 25 (1984), Nr. 5, S. 245/258.
- 24) Ives, K. J.: Orthokinetic flocculation in L. Svarovsky, Solid-Liquid-Separation, 2nd, Butterworth, London (1981), S. 86/119.