

6. Untersuchungen mit Kollektormatten

Unter Kollektormatten sollen im folgenden großflächige Matten verstanden werden, die aus einem hochporösen Werkstoff bestehen und zu Filtrationszwecken eingesetzt werden. Die im weiteren noch zu untersuchenden permeablen Kollektoren werden aus den Kollektormatten durch einen Zerkleinerungsprozeß (z. B. Stanzen) als deutlich kleinere Einzelkörper hergestellt, die dann in Schüttungen wie bei herkömmlichen Tiefenfiltern eingesetzt werden. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zwischen den Kollektormatten und den PSK hinsichtlich ihres Einsatzes als Filtermaterial ergibt sich aus den während der Filtration und Spülung vorliegenden Strömungsbedingungen. Die permeablen Kollektoren werden innerhalb der Schüttung sowohl durchströmt als auch umströmt, während eine Kollektormatte ausschließlich durchströmt werden kann.

Aufgrund der wesentlich einfacheren Strömungsbedingungen bei Kollektormatten werden zunächst einige grundlegende Vorgänge an Kollektormatten untersucht, so daß eine weitgehend isolierte Untersuchung der Abscheide- und Ablösevorgänge von den komplizierten Umströmungs- und Durchströmungsvorgängen möglich ist. Für die Untersuchungen wird eine Testzellenanlage verwendet, in denen eine Kollektormatte im Format 30x30x10 mm in einen definierten Strömungskanal eingespannt wird. In diesem Strömungskanal lassen sich sehr definierte Bedingungen für die Durchströmung der Kollektormatte, sowohl für die Filtration als auch die Regeneration mittels einer Wasserspülung, einstellen.

Die Testzelle der Versuchsanlage (Bild 6.1) besteht im wesentlichen aus einem transparenten Block, in dem ein rechteckiger Strömungsquerschnitt eingearbeitet wurde. In der mittleren Position der Testzelle, wo die Kollektormatte eingespannt wird, hat der Strömungsquerschnitt die Maße von 30x10mm. Zu den beiden Enden der Testzelle verengt sich der Strömungsquerschnitt geringfügig und geht in einen runden Querschnitt für den Anschluß der Rohrleitungen über.

Vor und hinter der eingespannten Kollektormatte wird zur Vergleichmäßigung der Strömung eine vergleichsweise grobe, retikulierte Schaumstoffmatte in dem Strömungskanal positioniert. Diese Schaumstoffmatten haben relativ schlechte Filtrationseigenschaften und sind insbesondere für die Restbeladung der zu untersuchenden Kollektormatte von weitgehend vernachlässigbarer Bedeutung. In den Strömungskanal ist seitlich eine quadratische Öffnung eingearbeitet, durch die die Kollektormatte eingelegt bzw. herausgenommen werden kann. Die Öffnung wird durch einen ebenfalls transparenten Deckel verschlossen, so daß im Strömungskanal keinerlei störende Kanten entstehen. Vor und hinter der Kollektormatte sind im Deckel Druckmeßleitungen installiert, die die Bestimmung der Druckverluste bei der Durchströmung der Kollektormatten ermöglichen.

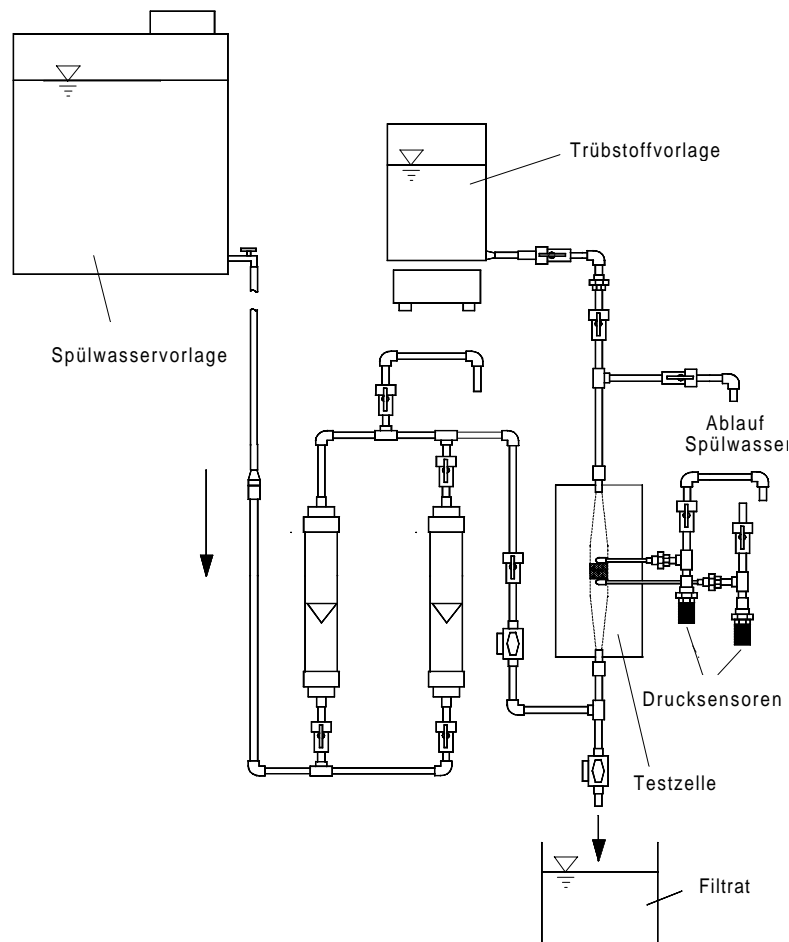


Bild 6.1: Darstellung der Testzellenanlage zur Untersuchung von Kollektormatten

6.1 Eigenschaften von Kollektormatten

Als Kollektormatten werden in dieser Arbeit offenporige Schaumstoffmatten aus Polyurethan auf Polyätherbasis verwendet. Die Größe und Struktur der inneren Oberflächen des Werkstoffes bestimmen maßgeblich, wie gut die Abscheidung und die Regeneration der Kollektormatten funktioniert. Die Bestimmung wesentlicher Kenngrößen von Kollektormatten für eine denkbare Optimierung von Abscheideleistung und Regenerierbarkeit ist insofern von großer Bedeutung.

6.1.1 Die innere Struktur der Kollektormatten

Die Polyurethanschaumstoffe (PUR) erhalten ihre offenporige Struktur durch einen sogenannten Retikulierungsprozeß, bei dem die dünnen Zellwände der zunächst noch geschlossenen Schaumstoffkammern z. B. weggebrannt oder weggeätzt werden. Übrig bleibt nach der Retikulierung lediglich ein Gittersystem aus Stegen, an denen bei der Filtration eine Abscheidung der Trübstoffe stattfinden soll. Die Stege stellen mit ihren geometrischen Abmessungen neben der Kollektorporosität den wichtigsten Kollektorparameter für den Filtrations- und Reinigungsprozeß dar. Sie bestimmen maßgeblich die Permeabilität des

Kollektors, d. h. welche Strömungsgeschwindigkeiten im Inneren der PSK bei einem bestimmten Druckgradienten erzielt werden.

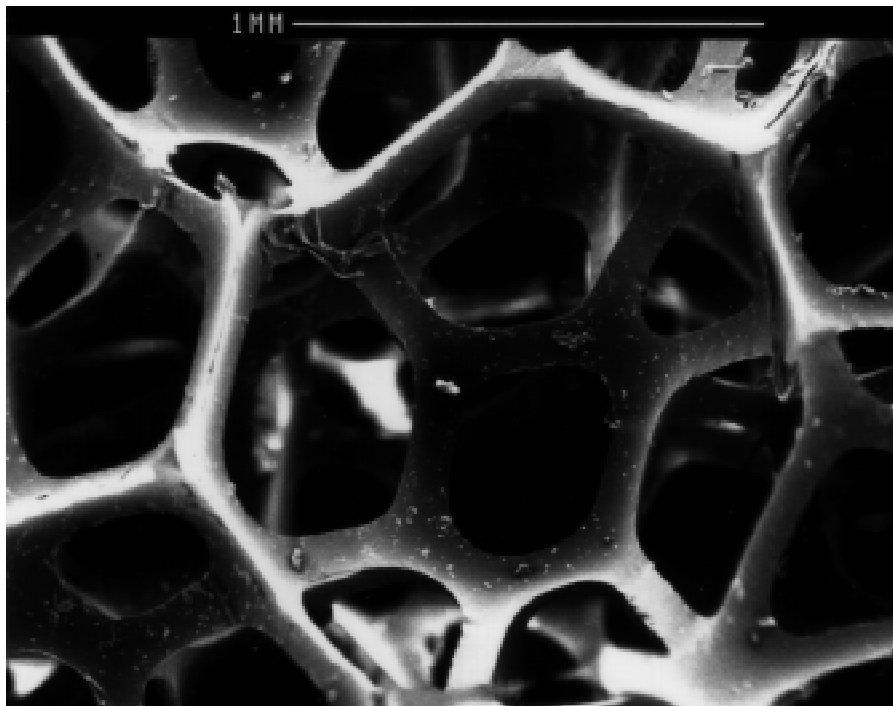


Bild 6.2: REM-Aufnahme der Kollektormatte T2540

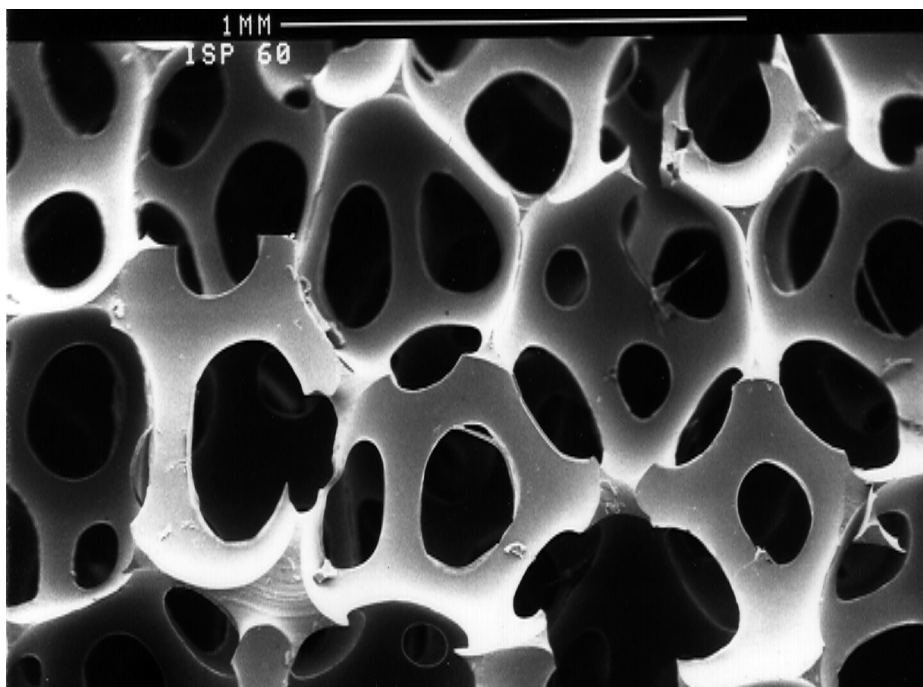


Bild 6.3: REM-Aufnahme der Kollektormatte I60

Die Bilder 6.2 und 6.3 zeigen rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von den in dieser Arbeit schwerpunktmäßig verwendeten Materialien T2540 und I60 mit gleichem Vergrößerungsfaktor. Das Material T2540 (Bild 6.2) ist aufgrund seiner hohen Porosität von 98% gegenüber dem Material I60 (Bild 6.3) mit einer Porosität von 95% wesentlich

offenporiger. Das aus dem Retikulierungsprozeß übriggebliebene Gittersystem des T2540 läßt die einzelnen Gitterstege als schlanke Fasern erkennen. Bei dem wesentlich kompakteren I60 sind die Fasern dagegen stark verkürzt und die Gitterknoten wesentlich stärker ausgebildet.

Bild 6.3 läßt die Entstehung des Schaumstoffes aus einer Aneinanderreihung von kugelförmigen Gasblasen erkennen, deren Zwischenräume mit dem Polymer ausgefüllt wurden. Aus den Kontaktstellen aneinanderliegender Gasblasen haben sich zunächst dünne Polymermembranen gebildet, die die einzelnen Blasen gegeneinander verschließen. Erst durch die Retikulierung verschwinden die dünnen Membranen, und aus den ehemaligen Kontaktstellen der Blasen werden Porenkanäle. Mit zunehmendem Raumgewicht des Schaumstoffes, d. h. abnehmender Porosität, werden die Zwischenräume der Gasblasen mit einem steigenden Polymervolumen ausgefüllt. Die Gitterstege und insbesondere die Gitterknoten werden dadurch voluminöser, wie es bei dem Material I60 zu erkennen ist.

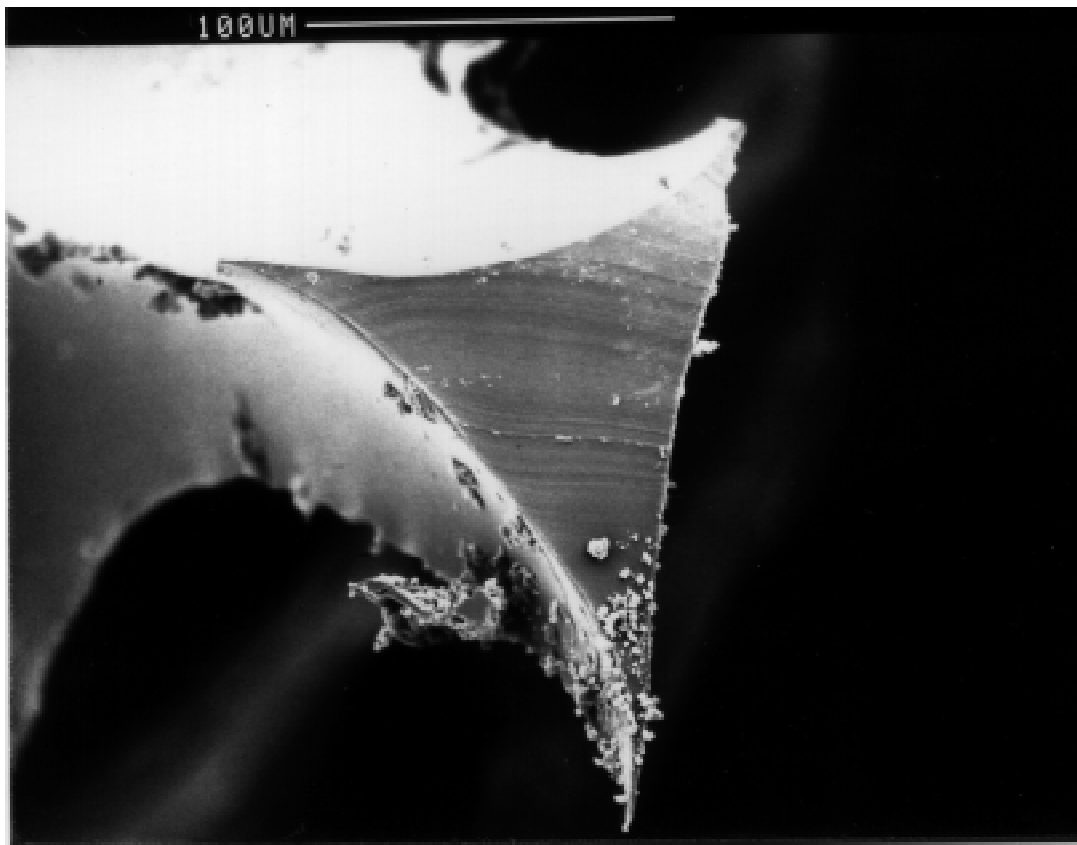


Bild 6.4: REM-Aufnahme eines Kollektorfaserquerschnittes des T2540

Die Entstehung der Schaumstoffe aus einem System von Blasen, an deren Kontaktstellen durch die Retikulierung Porenkanäle erzeugt wurden, erklärt auch die geometrische Form der Gitterstege. Die aus den Blasenzwischenräumen gebildeten Gitterstege besitzen einen näherungsweise dreieckigen Querschnitt mit leicht konkaven Schenkeln (Bild 6.4).

Zur Bestimmung der inneren Oberfläche der Kollektormatten wurden Messungen mit einem Quecksilberporosimeter vom Typ PASCAL 140 der Firma FISON'S Instruments² durchgeführt. Das Meßverfahren nutzt in Anlehnung an die DIN 66133 „Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion“ einen funktionellen Zusammenhang zwischen dem Porenradius der Probe und dem Pressdruck für das Intrudieren des Quecksilbers, der als WASHBURN-Gleichung bekannt ist (DIN 66133). Unter der Annahme zylindrischer Poren berechnet sich dann die innere Oberfläche der Probe aus den ermittelten Porenradien. In Tabelle 6.1 sind die Ergebnisse der Messungen zusammengestellt.

Tabelle 6.1: Übersicht über Meßergebnisse zu wichtigen Kenndaten der verwendeten Kollektormatten

Material- bezeichnung	Kollektor- porosität	innere Oberfläche in cm ² /cm ³	mittlerer Porenradius in µm	Raumgewicht in g/cm ³	Permeabilität in 10 ⁻⁹ m ²
I100	0,91	115	119	95,9	2,54
I80	0,92	130	129	81,2	2,74
I60	0,95	92,5	179	57,1	3,12
I6070	0,96	84,7	189	56,5	6,39
T2540	0,98	30,6	334	20,4	12,5

6.1.2 Druckverlust

Bei der Durchströmung der Kollektormatte entsteht zwischen Zu- und Ablaufquerschnitt eine Druckdifferenz, die dem Druckverlust bei der Durchströmung entspricht. Für schleichende Bedingungen steigt der Druckverlust lediglich proportional zur Strömungsgeschwindigkeit, was sich durch das sogenannte Darcy-Gesetz (Gl. 6.1) beschreiben läßt. Aus Gl. 5.1 folgt für eine über dem Strömungsquerschnitt konstante Strömungsgeschwindigkeit v_f , wie sie bei der Testzelle vorliegt, folgende Darstellung des Darcy-Gesetzes:

$$\Delta p_{\text{Darcy}} = -\frac{\eta}{k} v_f \quad (6.1)$$

Bei weiter steigender Strömungsgeschwindigkeit steigt der Druckverlust unter dem zusätzlichen Einfluß der Trägheitskräfte auch proportional zu v_f^2 , was sich in allgemeiner Weise durch den Ansatz

$$\Delta p = a_1 \cdot v_f + a_2 \cdot v_f^2 \quad (6.2)$$

² Der Firma POROTEC in Frankfurt sei an dieser Stelle für die Durchführung der Messungen gedankt.

ausdrücken läßt. Einen Spezialfall dieses Ansatzes stellt die ERGUN'sche Gleichung (Gl. 3.2) für Kugelschüttungen dar. Im Grenzfall der schleichenden Strömung reduziert sich der Druckverlust nach Gleichung (6.2) auf das Darcy-Gesetz

$$\lim_{v_f \rightarrow 0} \Delta p = \Delta p_{\text{Darcy}} \quad (6.3)$$

und die Permeabilität k berechnet sich lediglich aus dem Anpassungskoeffizienten a_1 :

$$k = \frac{\eta}{a_1} \cdot L \quad (6.4)$$

In Versuchen wurde der Druckverlust in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit v_f gemessen und eine Anpassung der Parameter a_1 und a_2 an die Meßwerte durchgeführt.

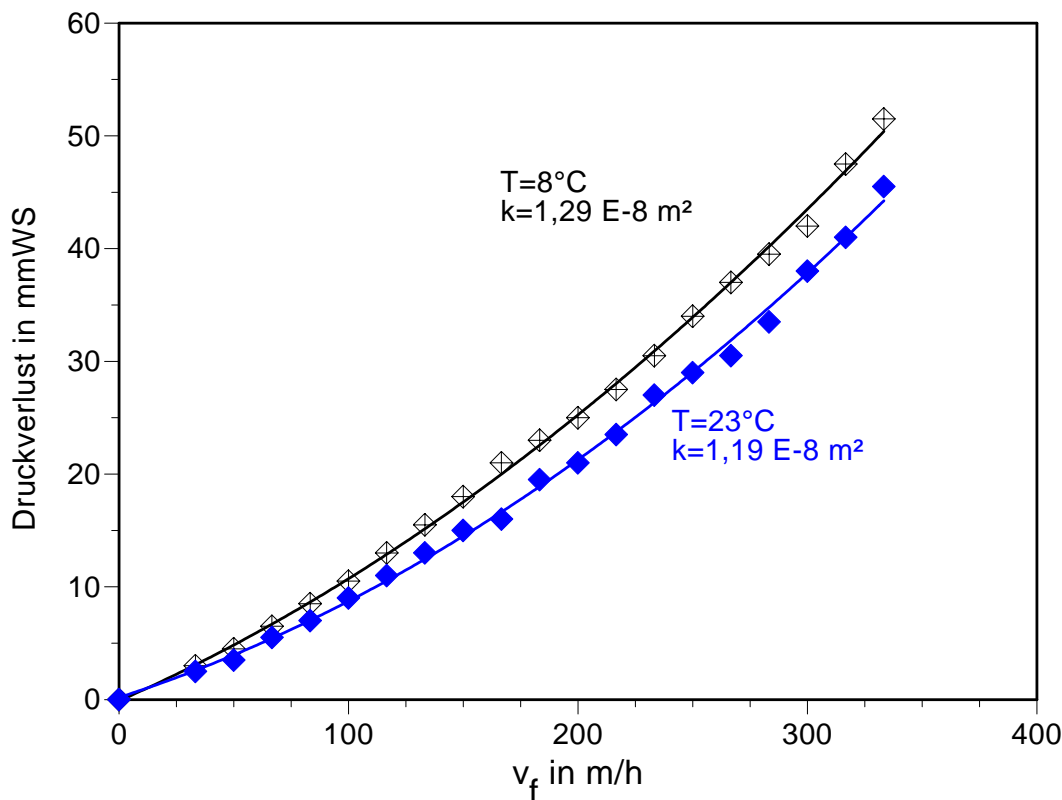


Bild 6.5: Verlauf des Druckverlustes als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit für den Typ T2540

Dann wurde mit Gleichung (6.4) unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit von η die Permeabilität k berechnet. Bild 6.5 zeigt am Beispiel des Mattentyps T2540 den Druckverlust in Abhängigkeit der Spülgeschwindigkeit für zwei verschiedene Temperaturen. Die beiden Meßreihen liefern annähernd die gleiche Permeabilität k von $1,25 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$. Die Abweichung des quadratisch ansteigenden Druckverlustes vom linearen Verlauf für

schleichende Strömungen zeigt im weiteren, bis zu welcher Geschwindigkeit die Annahme des linearen Darcy-Gesetzes noch vertretbar ist. Die Tabelle 6.1 zeigt zusammenfassend die gemessenen Permeabilitäten für alle eingesetzten Mattentypen.

6.2 Filtrationsversuche mit Kollektormatten

Die Untersuchung der Abscheidenvorgänge wird in der Testzelle zunächst unter der einfachen Bedingung einer kolbenartigen Anströmung untersucht. Die Kollektormatte im Format 30x30x10 mm wird dazu in die Testzelle so eingelegt, daß der gesamte Suspensionsstrom durch die Matte hindurchgehen muß. Eine sehr geringe Verformung der elastischen Kollektormatte dient lediglich einem dichten Abschluß an den seitlichen Kanalwänden.

In den Filtrationsversuchen wird die Kollektormatte mit einer 100 mg/l Suspension eines aus nahezu reinem Kalziumkarbonat bestehenden Trübstoffes aus der Trübstoffvorlage im Abstrom durchströmt. Bild 6.6 zeigt die Summendarstellung der Anzahlverteilung ($Q_0(x)$) und Volumenverteilung ($Q_3(x)$) nach DIN 66141 des Trübstoffes, der sich durch eine vergleichsweise enge Kornverteilung mit einer mittleren Partikelgröße von ca. 3 μm bei einem Ungleichförmigkeitsgrad von 2 auszeichnet.

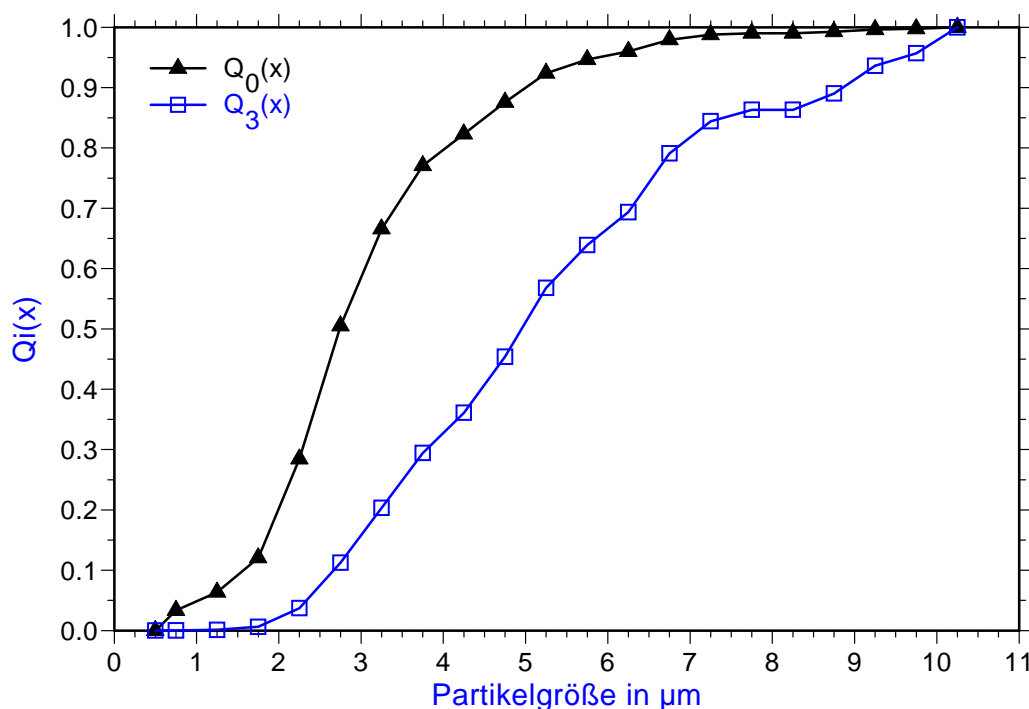


Bild 6.6: Partikelgrößenverteilung des verwendeten Trübstoffes Kalziumkarbonat

Bei der Durchströmung der Kollektormatte wird der größere Teil der Trübstoffpartikel an den Kollektorfasern abgeschieden. Nach einer Filtrationsdauer t_f zwischen 20 und 60 Minuten wird die Filtration abgebrochen und die Beladung auf den Matten abgelöst. Die Quantifizierung der abgeschiedenen Trübstoffmasse erfolgt im weiteren über die Analytik des

anorganischen Kohlenstoffs mittels eines Feststoff-TOC-Gerätes vom Typ C-Mat 5500 der Firma Ströhlein. Eine detaillierte Beschreibung der neu entwickelten Methode ist im Anhang A6.2 beschrieben. Im folgenden wird die Beladung als Verhältnis der abgeschiedenen Masse m_{ab} zum Volumen der Filtermatte V_M definiert.

$$\sigma = \frac{m_{ab}}{V_M} \quad (6.5)$$

Bild 6.7 zeigt als ein Ergebnis der Testzellenuntersuchungen die Veränderung der Beladung mit zunehmender Filtrationsdauer bei verschiedenen Filtergeschwindigkeiten für den Materialtyp I60. Man erkennt, daß die Beladung mindestens bis zu einer Beladung von 16 mg/cm³ linear mit der Filtrationsdauer ansteigt. Die Steigung der Geraden nimmt dabei mit zunehmender Filtrationsgeschwindigkeit zu. Es ist im weiteren erkennbar, daß der Zuwachs der Steigung mit der Filtergeschwindigkeit abnimmt.

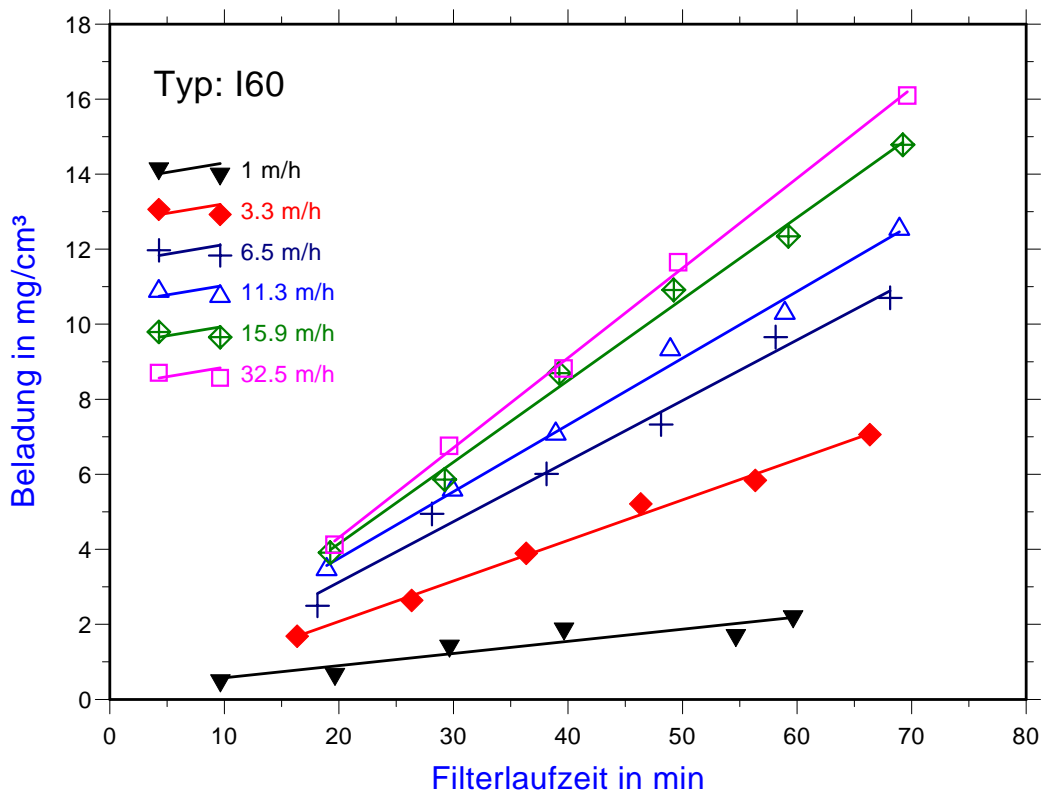


Bild 6.7: Änderung der Beladung mit der Filterlaufzeit und der Filtergeschwindigkeit in der Testzelle

6.3 Der Filterparameter einer Kollektormatte

Eine umfassende Theorie zur Abscheidung von Trübstoffen in hochporösen, retikulierten PUR-Schaumstoffen ist bisher nicht bekannt und kann im Rahmen dieser Arbeit auch nicht abgeleitet werden. Es kann jedoch angenommen werden, daß die Abscheidemechanismen, wie sie in den PUR-Matten auftreten, grundsätzlich mit denen in herkömmlichen Tiefenfiltern aus Schüttungen von kugelähnlichen Körnern sehr ähnlich bzw. identisch sind. Somit können existierende Korrelationen für die Abscheidung in Tiefenfiltern zur Anpassung der ermittelten Meßwerte der Kollektormatten eingesetzt werden, die im weiteren auch eine sinnvolle Extrapolation erwarten lassen.

6.3.1 Ermittlung des Filterparameters aus Beladungsversuchen

Bilanziert man die in die Kollektormatte eintretenden und austretenden Stoffströme, so ergibt sich die zeitliche Änderung der Beladung im Kollektor proportional dem Konzentrationsgradienten in Filtrationsrichtung.

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t^*} = -v_f \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \quad (6.6a)$$

$$\text{mit } t^* = t - t_0 \quad (6.6b)$$

Setzt man die zeitliche Änderung der Beladung als konstant voraus, wie sie für die Kollektormatte I60 bis zu einer Beladung von mindestens 16 mg/cm^3 gezeigt werden konnte (vgl. Bild 6.7), berechnet sich die Konzentration c im Ablauf der Kollektormatte aus

$$c = c_0 - \frac{\sigma(t^*) \cdot L}{v_f \cdot t^*} \quad (6.7)$$

Die korrigierte Filterlaufzeit t^* entspricht dabei der Betriebsdauer abzüglich der mittleren Aufenthaltszeit t_0 , in der die Front der Trübstoffsuspension ausgehend von der Trübstoffvorlage die Mitte der Kollektormatte erreicht.

Der Filterparameter der Filtermatte in der Anfangsphase der Filtration berechnet sich im weiteren aus

$$\lambda_{0,M} = -\frac{1}{L} \cdot \ln \frac{c}{c_0} \quad (6.8)$$

Zur Bestimmung des Filterparameters der Filtermatte wurden in der Regel die Beladungen nach verschiedenen Filtrationszeiten ermittelt (Bild 6.7). Somit ließ sich zum einen die Linearität der Beladung als Funktion der Zeit bestätigen und zum anderen eine Mittelung des Filterparameters $\lambda_{0,M}$ vornehmen.

6.3.2 Anpassung der Meßwerte

In der Theorie zur Tiefenfiltration herkömmlicher körniger Filtermaterialien unterscheidet man bei dem Abscheidvorgang den Transportvorgang des Partikels an die Kollektoroberfläche von dem danach folgenden Haftungsprozeß. Entsprechend setzt sich der elementare Abscheidegrad in der Anfangsphase der Filtration aus einer Transportwirksamkeit $\gamma_{0,T}$ und einer Haftwahrscheinlichkeit $\gamma_{0,H}$ zusammen (GIMBEL, 1984).

$$\gamma_0 = \gamma_{0,T} \cdot \gamma_{0,H} \quad (6.9)$$

Für die folgenden Betrachtungen soll die Haftwahrscheinlichkeit vereinfachend zu 100% angenommen werden, so daß der elementare Abscheidegrad der Transportwirksamkeit entspricht.

Für kolloidale Partikel unter $1\mu\text{m}$ wird im wesentlichen nur die Diffusion als dominierender Transportmechanismus gesehen, der die Partikel mit der Kollektoroberfläche aufgrund der Brown'schen Bewegung in Kontakt bringt. Nach PFEFFER und HAPPEL (1964) und COOKSEN (1970) ist die Transportwahrscheinlichkeit unter diesen Bedingungen lediglich eine Funktion der Peclet-Zahl

$$N_{\text{Pe}} = \frac{v_f \cdot d_k}{D_p} \quad (6.10)$$

und wird als proportional zu $N_{\text{Pe}}^{-\frac{2}{3}}$ angegeben. Der in Gl. 6.10 auftretende Partikeldiffusionskoeffizient D_p kann in diesem Zusammenhang mit der Stokes-Einstein-Gleichung berechnet werden.

$$D_p = \frac{k \cdot T}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d_p} \quad (6.11)$$

Bei feindispersen Partikeln gewinnen mit steigender Partikelgröße die Sedimentation und der Einfangmechanismus zunehmend an Bedeutung. Von RAJAGOPALAN und TIEN (1976) wird die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Transportwirksamkeit als proportional zu den dimensionslosen Kennzahlen $N_{\text{vdW}}^{\frac{1}{3}}$ und $N_G^{\frac{6}{5}}$ angegeben. Dabei sind die Kennzahlen wie folgt definiert:

$$N_{\text{vdW}} = \frac{H_{123}}{9 \cdot \pi \cdot \eta \cdot a_p^2 \cdot v_f} \quad (6.12)$$

$$N_G = \frac{(\rho_p - \rho) \cdot g \cdot d_p^2}{18 \cdot \eta \cdot v_f} \quad (6.13)$$

Insgesamt ergibt sich unter Einbeziehung der genannten Transportmechanismen im kolloidalen und feindispersen Partikelgrößenbereich folgende halbempirische Korrelation (auf der Basis des Zellenmodells von Happel) für die Transportwirksamkeit einer Filterschicht (GIMBEL,1984) unter der Bedingung $N_R < 0.18$.

$$\gamma_{0,T} = 5,97 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot A_s^{\frac{1}{3}} \cdot N_{Pe}^{-\frac{2}{3}} + \frac{3}{2} \cdot (1 - \varepsilon)^{\frac{1}{3}} \cdot A_s \cdot \left[0,72 \cdot N_{vdW}^{\frac{1}{8}} \cdot N_R^{\frac{15}{8}} + 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot N_G^{\frac{6}{5}} \cdot N_R^{-\frac{2}{5}} \right] \quad (6.14)$$

$$N_R = \frac{d_p}{d_k} \quad (6.15)$$

$$A_s = \frac{2 \cdot (1 - p^5)}{2 - 3 \cdot p + 3 \cdot p^5 - 2 \cdot p^6} \quad (6.16)$$

Der Filterparameter $\lambda_{0,M}$ in der Anfangsphase der Filtration berechnet sich im weiteren aus

$$\lambda_{0,M} = -\frac{1}{d_k} \cdot \ln(1 - \gamma_o) \quad (6.17)$$

Nimmt man eine weitgehende Analogie bezüglich der Abscheidung in einer Schüttung aus kugelförmigen Einzelkörpern und einer hochporösen Kollektormatte an, so kann die Gl. 6.17 zur Anpassung der experimentell ermittelten Meßwerte für den Filterparameter $\lambda_{0,M}$ eingesetzt werden. In Bild 6.8 sind die Meßergebnisse zum Filterparameter von zwei Kollektormatten des Typs T2540 und I60 mit Berechnungen nach Gl. 6.17 gegenübergestellt, wobei der Filterkorndurchmesser und die Hamakerkonstante als Anpassungsvariablen aufgefaßt wurden.

Die Berechnungen zeigen, daß eine sinnvolle Anpassung der Meßwerte zur Abscheidung in den Kollektormatten lediglich für einen verschwindenden Einfluß der van der Waals-Anziehung und der Sedimentation möglich ist. Die Vernachlässigung der van der Waals-Anziehung ist insofern auch in Einklang mit der Theorie zu sehen, da die Hamakerkonstante von Kunststoffen (VISSER,1976) sehr gering ist. Jedoch ist der Beitrag der van der Waals-Anziehung in Gl. 6.14 selbst bei einer Hamakerkonstante von 10^{-21} J noch so dominierend, daß sich keine sinnvolle Anpassung vornehmen läßt.

Die bisherigen Erkenntnissen zur Abscheidung widersprechende, jedoch hier erforderliche Vernachlässigung des van der Waals-Einflusses und des Sedimentationseinflusses zur

Beschreibung der Meßergebnisse läßt vermuten, daß das oben beschriebene Filtrationsmodell zur Klärung der Abscheidemechanismen in der Kollektormatte ungeeignet ist. Man darf daher die Diffusion nicht als den dominierenden Abscheidemechanismus ansehen, zumal die Trübstoffpartikel vergleichsweise groß sind und eine große Partikeldichte besitzen. Vermutlich resultieren die Differenzen zwischen dem Modell und den Meßergebnissen aus einer nicht zulässigen Annahme einer 100 prozentigen Haftwahrscheinlichkeit, was aufgrund fehlender Messungen zur Größenabhängigkeit der Partikelabscheidung aber auch nicht belegt werden kann. Für die weiteren Betrachtungen zur Beladungsverteilung im permeablen Kollektor ist die Klärung der Abscheidemechanismen allerdings unerheblich, da die stark vereinfachende Betrachtung zur Beschreibung der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Filterparameters völlig ausreichend ist.

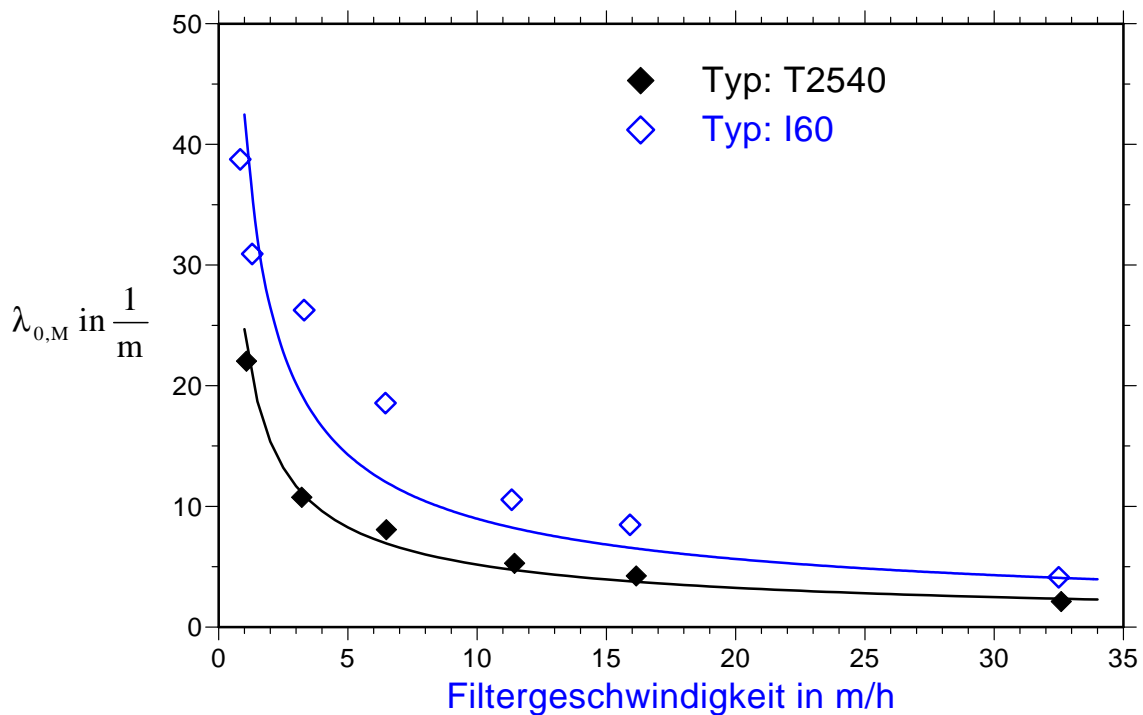


Bild 6.8: Darstellung des Filterparameters in Kollektormatten auf Grundlage von Meßwerten und Gleichung 6.14 bei 20 °C. (Parameter in Gl. 6.14: $\varepsilon=0,95$; $d_p=3\mu\text{m}$; $d_{k,I60}=11,41\mu\text{m}$; $d_{k,T2540}=15,8\mu\text{m}$; $T=20^\circ\text{C}$; $H_{123}=0\text{ J}$; $\Delta\rho=0$)

Der in Gl. 6.14 auftretende Filterkorndurchmesser darf im weiteren hinsichtlich physikalischer Interpretationen nicht als der Faserdurchmesser der Kollektormatte aufgefaßt werden, sofern man die ungeordnete Gitterstruktur der Kollektormatten überhaupt als Fasern betrachten kann. Vielmehr sollte man diesen Durchmesser als ein Maß für die innere Oberfläche betrachten, die durch die faserartigen Strukturen der Kollektormatte entstehen. Für die Kollektormatte vom Typ T2540 ergibt sich aus den Anpassungsrechnungen ein Durchmesser von 15,8 μm und für die Kollektormatte vom Typ I60 von 11,41 μm , was auf eine größere innere Oberfläche des Materials I60 gegenüber dem T2540 hindeutet und durch die Meßergebnisse zur inneren Oberfläche (Tabelle 6.1) bestätigt werden kann.

Aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten D_p , die sich sowohl explizit und in einem weitaus stärkerem Maße implizit über die temperaturabhängige Viskosität darstellt, resultiert aus der Stokes-Einstein-Beziehung (Gl. 6.11) auch eine Temperaturabhängigkeit des Filterparameters $\lambda_{0,M}$. Es ist aus Gl. 6.14 unmittelbar erkennbar, daß mit zunehmender Temperatur die Abscheideleistung in der Kollektormatte besser wird, da die Viskosität von Wasser mit zunehmender Temperatur sinkt.

6.4 Versuche zur Regeneration

Bevor die Ablösevorgänge während einer Wasserspülung unter den komplexen Bedingungen einer Schüttung aus permeablen Kollektoren untersucht werden soll, wird zunächst der einfachere Fall einer definiert durchströmten Kollektormatte betrachtet.

Die Kollektormatte wird wie in den oben beschriebenen Filtrationsversuchen in die Testzelle so eingelegt, daß lediglich eine Durchströmung der Kollektormatte mit einem näherungsweise kolbenförmigen Strömungsprofil möglich ist. Dann folgt ein Filtrationsvorgang über einen definierten Zeitraum zwischen ca. 20 und 180 Minuten, in dem die Kollektormatte mit der Trübstoffsuspension von 100 mg/l im Abstrom in immer gleicher Weise beladen wird.

Die Kollektormatte wird im Anschluß an die Beladung mit einer Strömungsgeschwindigkeit $v_{f,M}$ zwischen ca. 3 m/h und 200 m/h im Aufstrom gespült. Je nach Spülgeschwindigkeit wird ein mehr oder weniger großer Teil der Beladung im Scherfeld der Strömung abgelöst und mit dem Spülwasser abtransportiert. Es ließ sich durch die transparenten Wände der Testzelle beobachten, daß die Ablösung der Beladung nach Beginn der Spülung sehr schnell erfolgte. Die abgelöste Beladung wurde als Trübstoffwolke erkennbar in einem näherungsweise kolbenförmigen Profil mit dem Spülwasserstrom transportiert, wobei sich kein ausgeprägter auf ein Zeitverhalten der Ablösung hindeutender Trübungsnachlauf einstellte. Der Versuch wurde beendet, wenn im Spülwasser keine Trübstoffe mehr erkennbar waren. Die Quantifizierung der abgelösten Beladung erfolgt wie bei den Filtrationsversuchen über die Analytik des anorganischen Kohlenstoffs. Die Vorgehensweise ist mit derjenigen bei den Filtrationsversuchen sehr ähnlich und im Anhang A6.2 beschrieben.

Bild 6.9 zeigt am Beispiel des Materials I60 die gemessenen Restbeladungen nach einer Wasserspülung in Abhängigkeit der Spülwassergeschwindigkeit für drei verschiedene Anfangsbeladungen und die entsprechenden Ausgleichskurven auf der Grundlage eines im folgenden beschriebenen Modells.

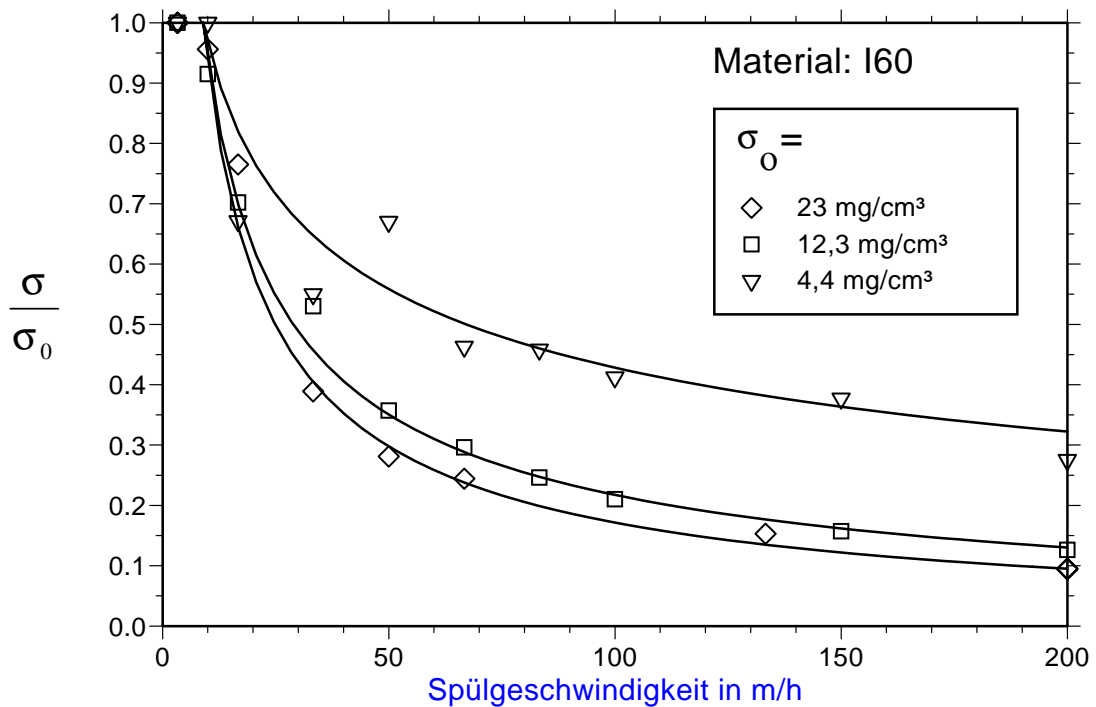


Bild 6.9: Ablösung der Beladung in Abhängigkeit der Spülwassergeschwindigkeit für die Kollektormatte vom Typ I60 bei einer Temperatur von 20°C

Man erkennt aus der Darstellung, daß die Beladung der Kollektormatte I60 mit zunehmender Spülgeschwindigkeit zunächst sehr stark und dann zunehmend weniger abnimmt. Es läßt sich je nach Anfangsbeladung eine Verminderung der Beladung bis auf eine Restbeladung zwischen ca. 30% und 10% der Ausgangsbeladung bei einer Spülgeschwindigkeit von 200 m/h erzielen. Bei der höchsten Anfangsbeladung stellt sich dabei die niedrigste relative Restbeladung ein. Ihr entspricht die größte absolute Restbeladung.

Die mit steigender Spülgeschwindigkeit schnell abnehmenden Steigungen der Kurven belegen, daß bei hohen Spülgeschwindigkeiten eine angestrebte Verminderung der Restbeladung durch eine weitere Steigerung der Spülgeschwindigkeit zunehmend uneffektiv wird. Eine Verminderung der Restbeladung unter 10% der Anfangsbeladung ist mit wirtschaftlich vertretbaren Spülgeschwindigkeiten sicherlich nicht zu erreichen. Die Meßergebnisse zeigen weiterhin, daß erst oberhalb einer Spülgeschwindigkeit $v_{f,M,0}$ von ca. 9m/h eine Verminderung der Beladung erkennbar wird. Offensichtlich sind die Ablösekräfte der Scherströmung unterhalb von 9m/h noch geringer als die Haftkräfte zwischen den Partikeln bzw. zwischen den Agglomeraten der Partikeln und den Faseroberflächen.

6.5 Modellierung der Trübstoffablösung in Kollektormatten

Die Meßergebnisse zur Ablösung der Beladung mit verschiedenen Spülgeschwindigkeiten und Anfangsbeladungen legen den Schluß nahe, daß die auf den Kollektormatten zurückbleibende Restbeladung σ sowohl eine Funktion der Spülgeschwindigkeit als auch von der Anfangsbeladung σ_0 ist.

In diesem Zusammenhang ist zu beachten (vgl. Kapitel 3.3), daß allerdings nicht die Spülgeschwindigkeit die entscheidende Größe zur Ablösung anhaftender Partikel von einer ebenen Oberfläche ist, sondern der Schergradient der Strömung an der Oberfläche. Der Schergradient kann dabei eine sehr komplexe Funktion der mittleren Strömungsgeschwindigkeit sein, wie für die Kugeloberfläche in einem Bett dargelegt wurde, und hängt in der Regel auch noch vom Ort ab. Aufgrund der sehr komplexen Oberflächengeometrie der Kollektormatten ist der Schergradient an deren inneren Oberflächen nicht bzw. nur mit sehr aufwendigen numerischen Methoden bestimmbar. Daher soll die Restbeladung als Funktion eines mittleren Schergradienten κ_w an den Faseroberflächen angenommen werden. Es wird ein makroskopischer Ansatz formuliert, daß die Abnahme der Beladung auf den Kollektorfasern mit dem mittleren Schergradienten κ_w sowohl proportional zur Beladung σ als auch zu einer Potenz des Schergradienten ist:

$$\frac{d\sigma}{d\kappa_w} = -k_3 \cdot \sigma \cdot \kappa_w^{k_4} \quad (6.18)$$

Mit der Bedingung, daß die Anfangsbeladung σ_0 bis zu einem Schergradienten $\kappa_{w,0}$ unverändert bleibt, ergibt sich folgende Lösung:

$$\begin{aligned} \sigma(\kappa_w, \sigma_0) &= \sigma_0 && \text{für } 0 < \kappa_w < \kappa_{w,0} \\ \sigma(\kappa_w, \sigma_0) &= \sigma_0 \cdot \exp\left[-\frac{k_3}{k_4 + 1} \left(\kappa_w^{k_4+1} - \kappa_{w,0}^{k_4+1}\right)\right] && \text{für } \kappa_w > \kappa_{w,0} \end{aligned} \quad (6.19)$$

Da der mittlere Schergradient κ_w an der Faseroberfläche ebenfalls unbekannt ist, wird die zusätzliche Annahme getroffen, daß der mittlere Schergradient in den fest eingespannten Kollektormatten als proportional zur Spülgeschwindigkeit $v_{f,M}$ approximiert werden kann. Diese Annahme ist bspw. dann zutreffend, wenn eine Analogie zwischen schleichenden Porenströmungen und laminaren Rohrströmungen postuliert wird. MAEKELBURG (1978) macht bspw. von dieser Analogie Gebrauch und leitet aus den Gesetzmäßigkeiten von laminaren Rohrströmungen eine Beziehung zum Druckverlust in schleichend durchströmten Porensystemen ab, die mit empirisch bestätigten Widerstandsgesetzen in Einklang stehen. Für das parabolische Geschwindigkeitsprofil einer Rohrströmung findet man auch die geforderte

lineare Abhängigkeit des Wandschergradienten von der mittleren Geschwindigkeit im Rohr v_m und dem Rohrdurchmesser d_R in der Form

$$\kappa_w = \frac{8 \cdot v_m}{d_R} \quad (6.20)$$

Ohne die Analogie zwischen Rohr- und Porenströmung nach Gleichung (6.20) auszunutzen, ergibt sich mit obiger Annahme folgende Beziehung zur Beschreibung der Ablösung einer Beladung unter der Wirkung einer Scherströmung mit der Spülgeschwindigkeit $v_{f,M}$:

$$\begin{aligned} \sigma(v_{f,M}, \sigma_0) &= \sigma_0 && \text{für } 0 < v_{f,M} < v_{f,M,0} \\ \sigma(v_{f,M}, \sigma_0) &= \sigma_0 \cdot \exp\left[-\frac{k_1}{k_2 + 1} \left(v_{f,M}^{k_2+1} - v_{f,M,0}^{k_2+1}\right)\right] && \text{für } v_{f,M} > v_{f,M,0} \end{aligned} \quad (6.21)$$

In Tabelle 6.2 sind die Ergebnisse der Anpassung der Parameter k_1 und k_2 für drei verschiedene Kollektormatten mit unterschiedlichen Anfangsbeladungen zusammengefaßt. Bild 6.9 zeigt die Ergebnisse der Anpassung unter Verwendung von k_1 und k_2 im Vergleich zu den Meßdaten am Beispiel des Materials I60.

Tabelle 6.2: Ergebnis der Anpassung zur Ablösung der Beladung bei Kollektormatten

Material	σ_0 in mg/cm ³	k_1 in (m/h) ^{-0,1}	k_2	$v_{f,M,0}$ in m/h	mittlerer Porenradius µm	spezif. Oberfläche cm ² /cm ³	σ_0^* in mg/cm ²
I60	23	0,52	-0,9	9	179	92,5	0,249
I60	12,3	0,45	-0,9	9	179	92,5	0,133
I60	4,4	0,25	-0,9	9	179	92,5	0,048
T2540	6,5	0,55	-0,9	9	334	30,6	0,212
I6070	6,8	0,4	-0,9	7	189	84,7	0,080

Der Parameter k_2 konnte bei allen Versuchen und Materialien zu -0,9 und die Mindestspülgeschwindigkeit $v_{f,M,0}$, oberhalb derer erst eine Ablösung möglich ist, zu 9 m/h bestimmt werden. Im Gegensatz zu k_2 stellt der Parameter k_1 keine Konstante dar, sondern eine Funktion der Anfangsbeladung σ_0 . Für das Material I60 kann die Abhängigkeit des Anpassungskoeffizienten k_1 von der Anfangsbeladung σ_0 in mg/cm³ bis zu einer Beladung von ca. 23 mg/cm³ durch folgende empirische Funktion beschrieben werden:

$$k_1(\sigma_0) = 0,535 \cdot [1 - \exp(-0,15 \cdot \sigma_0)] \quad (6.22)$$

Da der Parameter k_1 in Gl. 6.22 für große Anfangsbeladungen gegen einen Grenzwert läuft, verändern sich mit zunehmender Anfangsbeladung der Parameter k_1 und die relative Restbeladung nur noch sehr wenig. Für sehr große Anfangsbeladungen müßte die relative Restbeladung sogar bei gleicher Spülgeschwindigkeit immer das gleiche Ergebnis liefern. Aufgrund der geringen Datenbasis ist derzeit noch nicht absehbar, inwieweit der Parameter k_1 bei sehr großen Beladungen tatsächlich noch durch Gl. 6.22 beschrieben werden kann. Daher sollte Gl. 6.22 für die Kollektormatte I60 lediglich bis zu einer Anfangsbeladung von $23\text{mg}/\text{cm}^3$ verwendet werden.

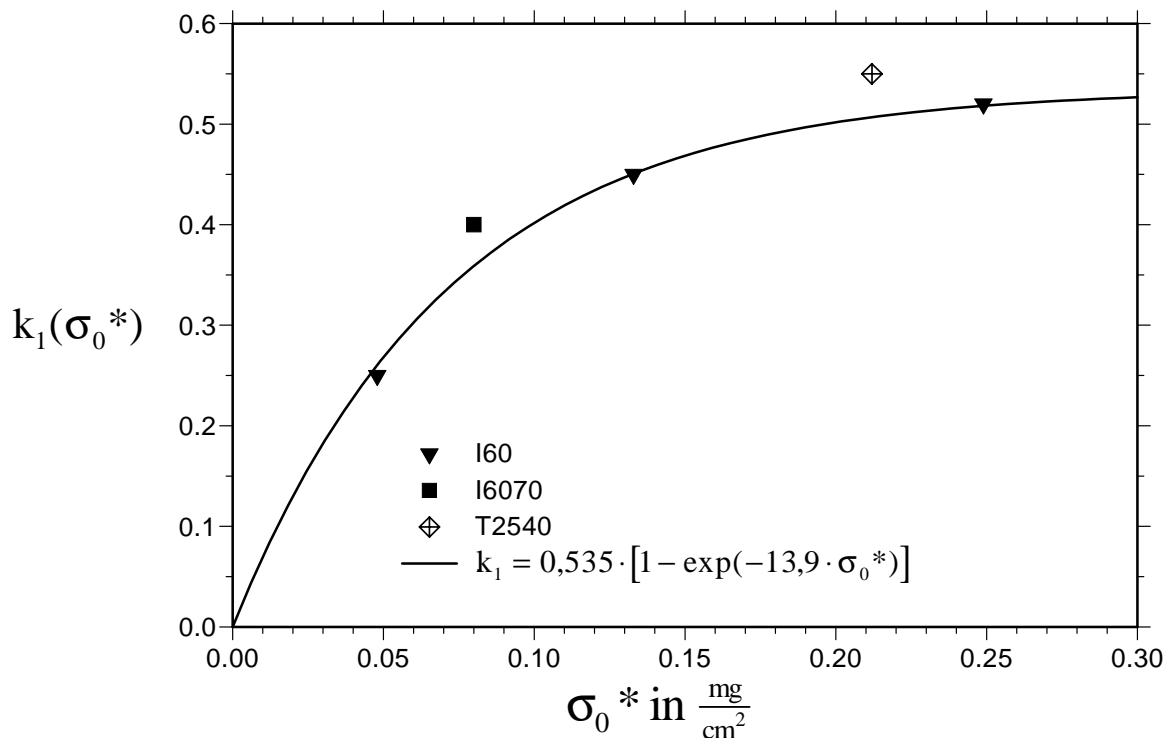


Bild 6.10: Zusammenhang zwischen dem Parameter k_1 und der flächenbezogenen Anfangsbeladung für verschiedene Kollektormatten

Es fällt im weiteren auf, daß die Anpassungswerte für den Parameter k_1 der Materialien T2540 und I6070 sich nicht einmal tendenziell mit der für das Material I60 gewonnenen Korrelation nach Gl. 6.22 beschreiben lassen. Eine verallgemeinerte Gültigkeit der Korrelation nach Gl. 6.22 für verschiedene Kollektormatten ist daher zunächst nicht zu vermuten. Wird als unabhängige Variable statt der auf das Kollektorstapel bezogenen Anfangsbeladung σ_0 die auf die Faseroberfläche bezogene Anfangsbeladung σ_0^* betrachtet, so kann man eine Korrelation zwischen dem Parameter k_1 und σ_0^* auch für die verschiedenartigen Kollektormatten nach Tabelle 6.2 erkennen (vgl. auch Bild 6.10). Aufgrund der geringen Datenbasis kann die Existenz einer Korrelation zwischen dem Parameter k_1 und der flächenbezogenen Beladung in einer verallgemeinerten Form für verschiedene Kollektormatten allerdings bestenfalls vermutet werden. Daher sollte die speziell für den Parameter k_1 des Materials I60 gefundene Gl. 6.22 in bezug auf andere

Kollektormatten auch bei Verwendung der flächenbezogenen Anfangsbeladung, wie in Bild 6.10 dargestellt, nur als eine Näherung angesehen werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Kollektormatte aus einem anderen Werkstoff als Polyurethan besteht und bzw. oder eine Beladung mit anderen Trübstoffpartikeln betrachtet wird.

Wenn der Parameter k_1 im wesentlichen von σ_0^* abhängt, so folgt aus der Modellierung der Ablösung mit Gl. 6.21, daß bei identischer flächenbezogener Beladung der Kollektorfasern auch bei verschiedenartigen Kollektormatten die gleiche relative Beladung mit einer Wasserspülung abgelöst wird. Die absolut gesehene Restbeladung auf den Fasern des Kollektors wird in der Regel allerdings unterschiedlich sein. In einer mikroskopischen Sichtweise kann der Effekt so interpretiert werden, daß die geometrische Ausdehnung der Beladung auf den Fasern als wesentliche Einflußgröße den ablösbaren Beladungsanteil bestimmt. D. h. je weiter die Beladung auf einer Faser in den Fluidstrom hineinragt, umso mehr wird davon relativ gesehen abgelöst. Da anhaftende Partikel mit zunehmender Größe leichter abgelöst werden (vgl. Kapitel 3.4), wird die Beladung von den Fasern vermutlich als größere Agglomerate abgelöst. Dabei umfassen die Agglomerate, die die Beladung auf den Fasern bilden, im Mittel umso mehr Partikeln, je größer die flächenbezogene Beladung ist.

Wird im weiteren auch die Gültigkeit von Gleichung (6.20) gefordert und somit das Kollektorinnere durch ein Porenmodell mit dem Durchmesser d_R angenähert, ergeben sich zwischen den Anpassungsparametern k_i unter Verwendung von Gl. 6.19 folgende Zusammenhänge:

$$\begin{aligned} k_4 &= k_2 \\ k_3 &= k_1 \cdot \left(\frac{8}{d_R} \right)^{-(k_2+1)} \end{aligned} \quad (6.23)$$

Für einen dimensionslosen Parameter $k_2 = -0,9$ (vgl. Tabelle 6.2) läßt sich aus den Gleichungen nach (6.23) unmittelbar ablesen, daß eine Verdopplung des Porendurchmessers d_R lediglich eine Zunahme des Koeffizienten k_3 um den Faktor 1,07 bewirkt. Für die bisher untersuchten Kollektormatten mit Porenradien zwischen 179 μm und 334 μm wird daher der Porenradius, was die Scherwirkung der Strömung anbetrifft, nicht als entscheidende Größe hinsichtlich der Ablösevorgänge aufzufassen sein. Allerdings existiert eine Abhängigkeit zwischen Porenradius und innerer Oberfläche der Kollektormatte, wodurch ein Zusammenhang zur Beladungsmorphologie entsteht. Prinzipiell steigt die innere Oberfläche mit abnehmendem Porenradius, so daß dadurch mit abnehmendem Porenradius die flächenbezogene Beladung abnimmt. Wie oben beschrieben wurde, ist der Parameter k_1 im wesentlichen von der flächenbezogenen Beladung abhängig. Die dadurch hervorgerufene Abhängigkeit des Ablöseprozesses vom Porenradius geht daher ursächlich auf die Beladungsmorphologie und nicht auf die Schereffekte der Strömung zurück.