

## 8. Spülung von PSK mit Wasser

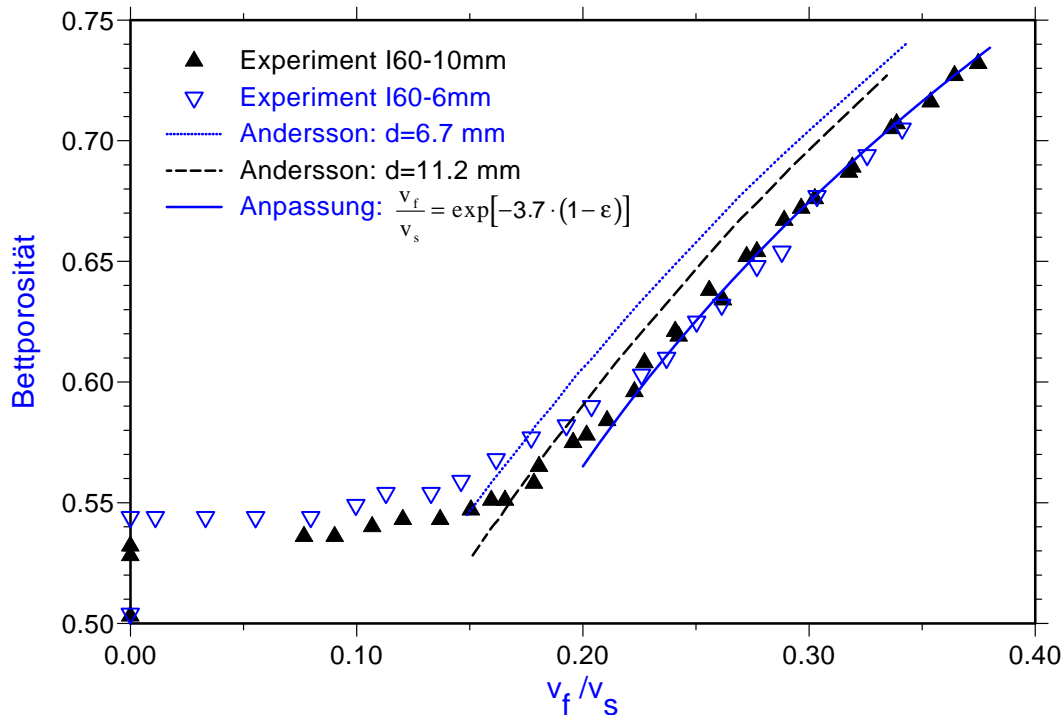
Zur Entwicklung eines Regenerationsverfahrens für permeable Kollektoren empfiehlt es sich zu überprüfen, ob die Wasserspülung von herkömmlichen massiven Filtermaterialien im Aufstrom auch auf permeable Kollektoren sinnvoll angewendet werden kann. Die Ablösung einer Beladung durch eine Wasserspülung wird wie bei herkömmlichen Filtermaterialien von der Bettausdehnung stark beeinflusst werden. Die Kenntnis des Ausdehnungs- und Sedimentationsverhaltens ist daher von sehr grundsätzlicher Bedeutung. Dies gilt insbesondere dann, wenn im Rahmen einer Fortentwicklung des Reinigungsverfahrens das Filtermaterial durch hydraulischen Transport in eine externe Reinigungskammer transportiert werden soll.

Eine geringfügige Variante der herkömmlichen Wasserspülung besteht darin, das Filterbett während des Spülvorganges durch das obere Begrenzungsgitter fixiert zu belassen, so daß eine Bettausdehnung verhindert wird. Eine Beweglichkeit des Filtermaterials wird dadurch zwar verhindert, jedoch erhöht sich der permeierende Volumenstrom durch den permeablen Kollektor und damit die Schergradienten an den inneren Oberflächen.

### 8.1 Bettausdehnung und Sedimentation von PSK

Die Ausführungen in den vorhergehenden Kapiteln zeigten, daß die Bettausdehnung bei der Spülung von Schüttbettfiltern unmittelbar von der Sedimentationsgeschwindigkeit des verwendeten Filtermaterials abhängt. Während die in Kapitel 5. abgeleitete Beziehung lediglich für sehr kleine PSK brauchbare Ergebnisse liefern kann, existieren bisher keine Korrelationen für größere Reynoldszahlen. Man ist hier bisher noch auf experimentelle Untersuchungen angewiesen.

Bild 8.1 zeigt experimentelle Ergebnisse zur Bettausdehnung für PSK vom Kollektortyp I60-6mm und I60-10mm. Als x-Achse wurde wie in den Korrelationen von Richardson & Zaki (Gl. 3.5) sowie Andersson (Gl. 3.9) das Verhältnis von Spülgeschwindigkeit zur Sedimentationsgeschwindigkeit verwendet. Man erkennt, daß die Bettausdehnungskurven der beiden Schüttungen oberhalb von 20% der jeweiligen Sedimentationsgeschwindigkeit (104 m/h für die 10 mm großen PSK bzw. 71,3 m/h für die 6mm großen PSK) im Rahmen der Meßwertschwankungen identisch sind. Unterhalb der genannten Grenze lassen sich geringe Unterschiede in den Meßwerten der Bettporosität erkennen, die unter Umständen durch die Meßmethode, d. h. den Einfluß des relativ kleinen Filtersäulendurchmessers von 284 mm, bedingt sein können. Insgesamt ist die Bettporosität unterhalb der Lockerungsgeschwindigkeit mit ca. 53% bis 54% vergleichsweise hoch, was durch z. T. inhomogene Lagerungszonen innerhalb des Bettes erklärt werden kann. Durch mehrfaches, impulsartiges Spülen können die Inhomogenitäten in der Lagerungsdichte stark vermindert werden, so daß für beide Schüttungen die Bettporosität auf ca. 50% sinkt.



**Bild 8.1:** Ausdehnungen zweier Schüttung aus PSK bei abnehmender Spülgeschwindigkeit (Typ: I60,  $k=3,12 \cdot 10^9 \text{ m}^2$ ,  $T=17,7^\circ\text{C}$ ,  $d_1 = 11,2\text{mm}$ ,  $v_{s1} = 104,0 \text{ m/h}$ ,  $d_2 = 6,7\text{mm}$ ,  $v_{s2} = 71,3 \text{ m/h}$ )

In Bild 8.1 sind zusätzlich die nach Andersson (Gl. 3.9) berechneten Ausdehnungskurven eingetragen, die im Vergleich zu der Korrelation von Richardson und Zaki (Gl. 3.8) eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen liefert. Man erkennt, daß die Übereinstimmung zwischen Experiment und Berechnung für den größeren PSK deutlich besser ist. Der Effekt ist dadurch zu erklären, daß bei den größeren PSK ein wesentlich geringerer Volumenstrom durch den permeablen Kollektor hindurchtritt, so daß der größere PSK sich bezüglich seiner Betausdehnung noch eher wie ein massiver Kollektor verhält. Faßt man den Exponenten  $n$  in Gl. 3.8 als Anpassungsparameter auf, wird die Übereinstimmung von Gl. 3.8 mit den Meßwerten besser, jedoch nicht befriedigend. Die Meßdaten zur Betausdehnung beider PSK lassen sich vergleichsweise gut mit einem empirischen Ansatz der Form

$$\frac{dv_f}{d(1-\varepsilon)} = -a_b \cdot v_f \quad (8.1)$$

beschreiben. Eine zusätzliche Bedingung zur Lösung des Ansatzes resultiert daraus, daß im Grenzfall eines verschwindenden Filtermaterialanteils ( $1-\varepsilon$ ) die Spülgeschwindigkeit in die Sedimentationsgeschwindigkeit übergehen muß. Man erhält:

$$\frac{v_f}{v_s} = \exp[-a_b \cdot (1-\varepsilon)] \quad (8.2)$$

Aus einer Anpassungsrechnung wurde der Parameter  $a_b$  zu 3.7 bestimmt. Es ist davon auszugehen, daß der Parameter  $a_b$  keine Konstante darstellt, sondern wie in den Gl. 3.8 und 3.9 von der Reynoldszahl des sedimentierenden Filterkorns abhängt. Im weiteren ist sicherlich auch eine Abhängigkeit des Parameters  $a_b$  von dem Permeabilitätsparameter  $\beta$  des permeablen Kollektors bzw. des permeierenden Volumenstromanteils vorhanden, wie schon für schleichende Bedingungen gezeigt werden konnte (vgl. Kapitel. 5.1).

Die Qualität einer berechneten Betaausdehnung wird neben der Größe des permeierenden Volumenstroms auch maßgeblich durch die genaue Kenntnis der Sedimentationsgeschwindigkeit bestimmt. Für nicht kugelförmige PSK ist man hier sicherlich auf eine experimentelle Bestimmung angewiesen, während eine Berechnung der Sedimentationsgeschwindigkeit für kugelförmige PSK auch bei größeren Reynoldszahlen mit dem in Kapitel 5. beschriebenen numerischen Strömungsmodell möglich ist. Da der äußere Rand des Strömungsgitters einer frei umströmten Kugel mit einem erheblich größeren Abstand zur Kugeloberfläche definiert werden kann, d. h. es wird lediglich das Fernfeld vorgegeben, wirken sich hier Ungenauigkeiten bei der Formulierung der Randbedingungen auch wesentlich geringer aus als bei den Zellenmodellen von Happel oder Kuwabara.

Die Strömungskraft auf eine permeable Kugel ergibt sich, wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben, aus der Druck- und Reibungskraft (NEALE et al., 1973) auf den Kollektor. Wegen der durchlässigen Oberfläche der PSK berechnen sich die hierzu erforderliche Verteilung des Druckes (vgl. Gl. A4.14) und der Schubspannung an der Oberfläche ( $r=a_k$ ) abweichend von der Vorgehensweise bei massiven Kollektoren durch Gl. 8.3a und Gl. 8.3b.

$$\left. \frac{\partial p}{\partial \theta} \right|_w = -\frac{\rho}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} (v_r^2 + v_\theta^2) - \rho \cdot v_r \cdot a_k \cdot \phi_w + \eta \cdot \left. \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot \phi) \right|_w \quad (8.3a)$$

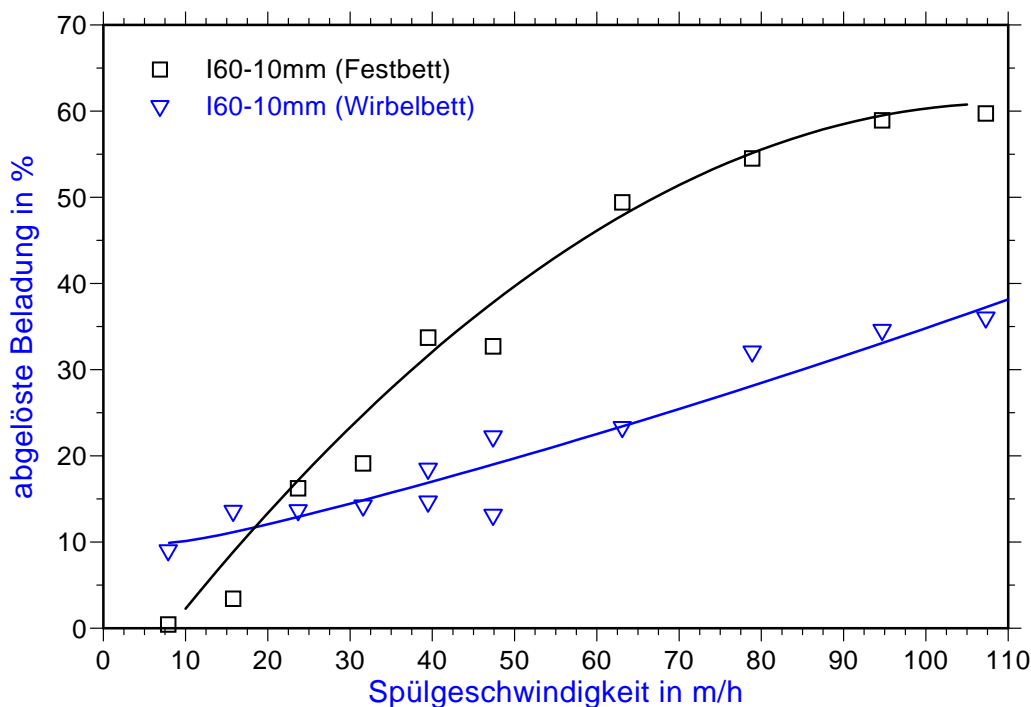
$$\tau_w = \eta \cdot \left[ -\phi_w + 2 \cdot \frac{\partial v_\theta}{\partial r} \right] \quad (8.3b)$$

In der Überprüfung des Ansatzes nach Gl. 8.1 sowie der Klärung der Abhängigkeiten des Parameters  $a_b$  ist noch Forschungsbedarf zu sehen, der nicht nur Bedeutung für den Einsatz der permeablen Kollektoren in der Tiefenfiltration besitzt. Die Analogie zwischen den permeablen Kollektoren und Flocken aus einem Flockungsverfahren eröffnet insbesondere die Möglichkeit, die Sedimentation der Flocken mit dem vorgestellten Modell vorzuberechnen. Im weiteren liefert das Strömungsmodell auch Informationen zur Durchströmung der Flocken, so daß analog zur Vorgehensweise bei PSK die Abscheideleistungen von Flocken analysiert werden können mit der Zielsetzung eines tieferen Verständnisses der ablaufenden Mechanismen und einer optimierten Reinigungswirkung.

## 8.2 Ablösung der Beladung durch eine Wasserspülung

Zur Quantifizierung des Einflusses verschiedener Verfahrensparameter auf die Reinigungswirkung einer Wasserspülung wurde ein Bett aus PSK im Verlauf einer Filtration mit einer Trübstoffsuspension von Kalziumkarbonat definiert beladen (vgl. Kapitel 7.1). Bezogen auf das komprimierte Kollektorstadium stellte sich eine mittlere Beladung von  $4,13 \text{ mg/cm}^3$  ein. Das auf diese Weise reproduzierbar beladene Filterbett wurde in verschiedenen Versuchsreihen mit unterschiedlichen Spülwassergeschwindigkeiten von bis zu  $110 \text{ m/h}$  im Aufstrom gespült.

In zwei Versuchsreihen wurde anhand des Materials I60-10mm geprüft, ob die bei herkömmlichen Filtermaterialien angestrebte Ausdehnung des Filterbettes sich als vorteilhaft gegenüber einem in seiner Position fixierten Filterbettes erweist (Bild 8.2). Die Untersuchungsergebnisse belegen sehr deutlich, daß die Spülvariante mit dem fixierten Bett z. T. erheblich mehr Beladung abzulösen vermag. In dem Vergleich wird die Reinigungswirkung der Spülung mit Bettausdehnung sogar dadurch begünstigt, daß nach Ende der Filtration das obere Fixiergitter zur Vergrößerung der Filterkammer nach oben verfahren wird.

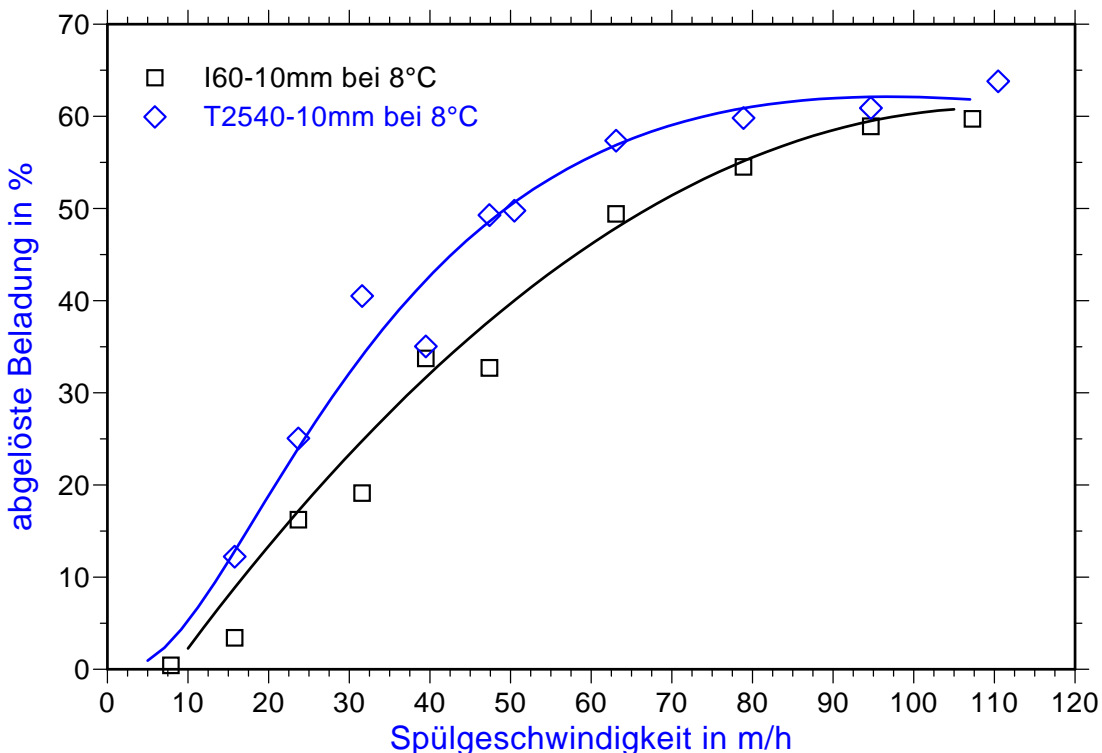


**Bild 8.2:** Ablösung der Beladung bei einem fixierten und einem nicht fixierten Bett, das in ein Wirbelbett übergehen kann, in Abhängigkeit der Spülgeschwindigkeit ( $T = 8^\circ\text{C}$ ).

Das zuvor komprimierte Filterbett dehnt sich bei diesem Vorgang aus und löst schon einen Anteil von ca. 10% der Beladung ab, obwohl noch keine Wasserspülung eingesetzt hat. Berücksichtigt man diesen Effekt, so wird im fixierten Bett bei einer Spülgeschwindigkeit von

50 m/h eine ca. 3,5-fach höhere Beladung und bei 100 m/h noch eine 2-fach höhere Beladung im Vergleich zum nicht fixierten Bett abgelöst. Ein Vergleich der Versuchsergebnisse belegt daher, daß durch die permeablen Kollektoren des fixierten Bettes zumindest kurzfristig ein erheblich höherer Spülwasserstrom im Vergleich zum nicht fixierten Filterbett fließen muß.

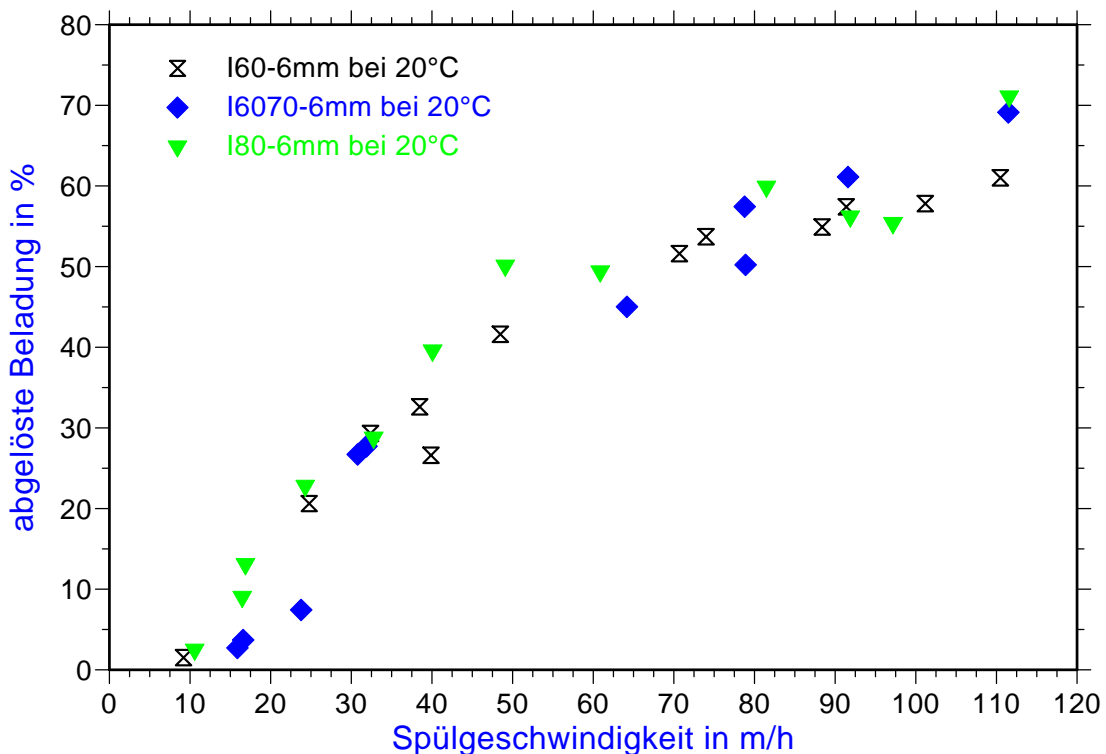
Die besseren Reinigungsergebnisse bei einem fixierten Bett führten dazu, daß weitere experimentelle Untersuchungen zur Bedeutung der Verfahrensparameter ausschließlich an der Spülvariante mit fixiertem Filterbett vorgenommen wurden. Bild 8.3 zeigt die zuvor dargestellten Versuchsergebnisse für den Kollektor I60-10mm im Vergleich zum Kollektor T2540-10mm. Das Material T2540 unterscheidet sich vom I60 im wesentlichen darin, daß es eine deutlich höhere Porosität und mit  $k=1,25 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$  auch eine deutlich größere Permeabilität im Vergleich zum I60 ( $k=3,12 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ ) besitzt. Wie Untersuchungen an Kollektormatten gezeigt haben, läßt sich bei dem Kollektor T2540-10mm im Vergleich zum I60-10mm bei gleicher Ausgangsbeladung und Strömungsgeschwindigkeit eine deutlich höhere Beladung ablösen (vgl. Kapitel 6). Dieser Effekt allein ist ausreichend, um den höheren ablösbaren Beladungsanteil des T2540 gegenüber dem I60 in Bild 8.3 zu erklären.



**Bild 8.3:** Vergleich zweier PSK mit stark unterschiedlicher Permeabilität und innerer Oberfläche hinsichtlich der Regenerierbarkeit mit einer Wasserspülung

Entgegen den Erwartungen kann eine deutliche Auswirkung der Permeabilität auf den ablösbaren Beladungsanteil bei der Spülung im fixierten Filterbett nicht festgestellt werden, obwohl die um den Faktor 4 höhere Permeabilität beim Kollektor T2540-10mm einen

entsprechend höheren permeierenden Volumenstrom bei der Spülung unter stationären Bedingungen zuläßt. Zu dem gleichen Resultat kommen auch experimentelle Untersuchungen an drei lediglich in ihrer Permeabilität sich unterscheidenden PSK der Typen I60-6mm, I80-6mm und I6070-6mm (Bild 8.4). Obwohl der Materialtyp I6070 mit ca.  $6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  im Vergleich zu den Materialtypen I60 und I80 eine ca. doppelt so große Permeabilität besitzt, wird mit einer Wasserspülung der fixierten Schüttung bei allen Materialien näherungsweise die gleiche Beladung abgelöst.

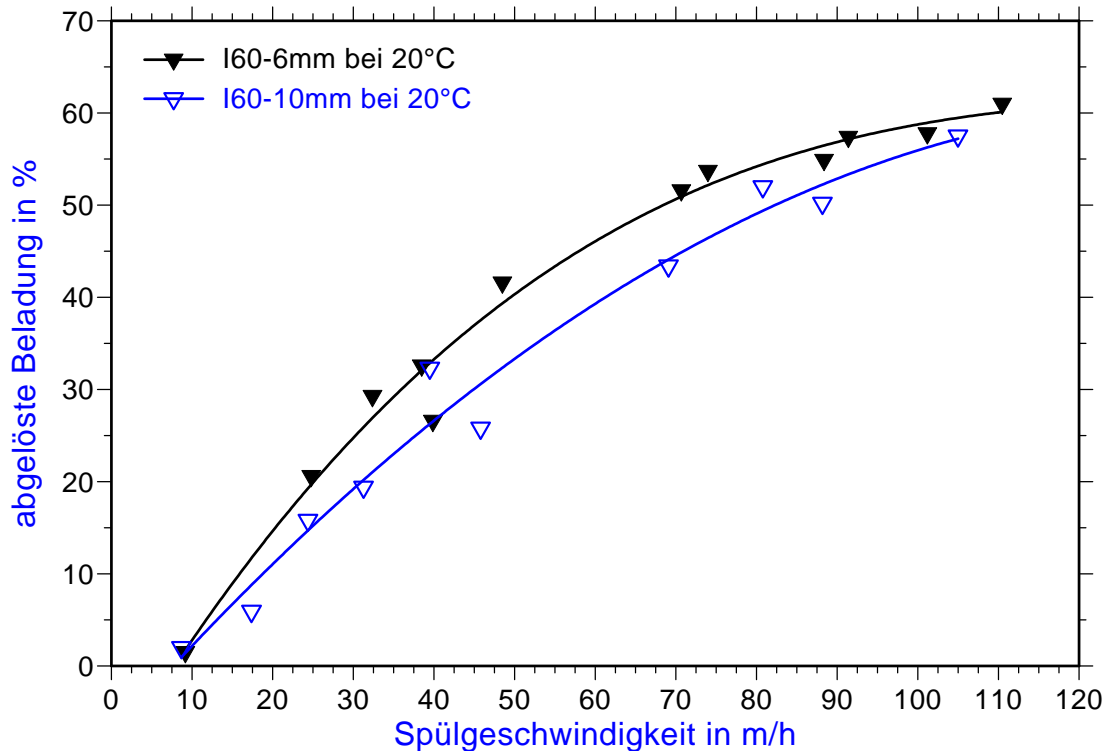


**Bild 8.4:** Einfluß der Permeabilität auf die Regenerierbarkeit mit einer Wasserspülung bei gleicher Temperatur und Kollektordurchmesser

In Bild 8.5 wurde der Einfluß des Kollektordurchmessers auf die Regenerierung mit einer Wasserspülung für den Kollektortyp I60 dargestellt. Die Untersuchungsergebnisse belegen lediglich geringfügig bessere Reinigungsergebnisse bei den PSK mit 6 mm Durchmesser gegenüber den PSK mit 10 mm Durchmesser. Hier macht sich offenbar der in Bild 8.6 dargestellte Effekt bemerkbar, daß die inneren Zonen von kleineren PSK bei gleicher Permeabilität mit einer höheren Geschwindigkeit durchströmt werden.

Allerdings sind die inneren Geschwindigkeiten im PSK, die sich aufgrund von Berechnungen mit dem in Kapitel 5. beschriebenen Strömungsmodell unter stationären Verhältnissen im PSK einstellen, bei weitem zu gering, um die Größe der experimentell ermittelten, ablösbaren Beladung bei den Schüttschichtfiltern zu erklären. Die Untersuchungen an Kollektormatten

vom Typ I60 (vgl. Kapitel 6.) zeigten, daß erst oberhalb einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 9 m/h die Ablösung des Modelltrübstoffes von den Oberflächen einsetzte.

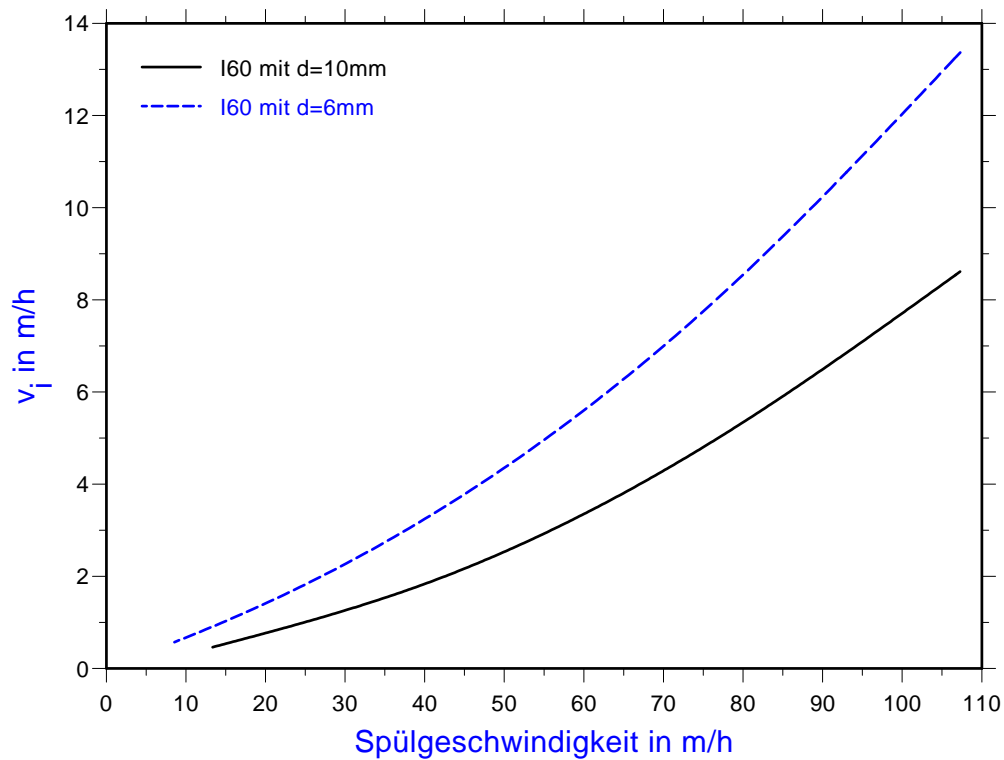


**Bild 8.5:** Einfluß des Kollektordurchmessers auf die Regenerierbarkeit mit einer Wasserspülung

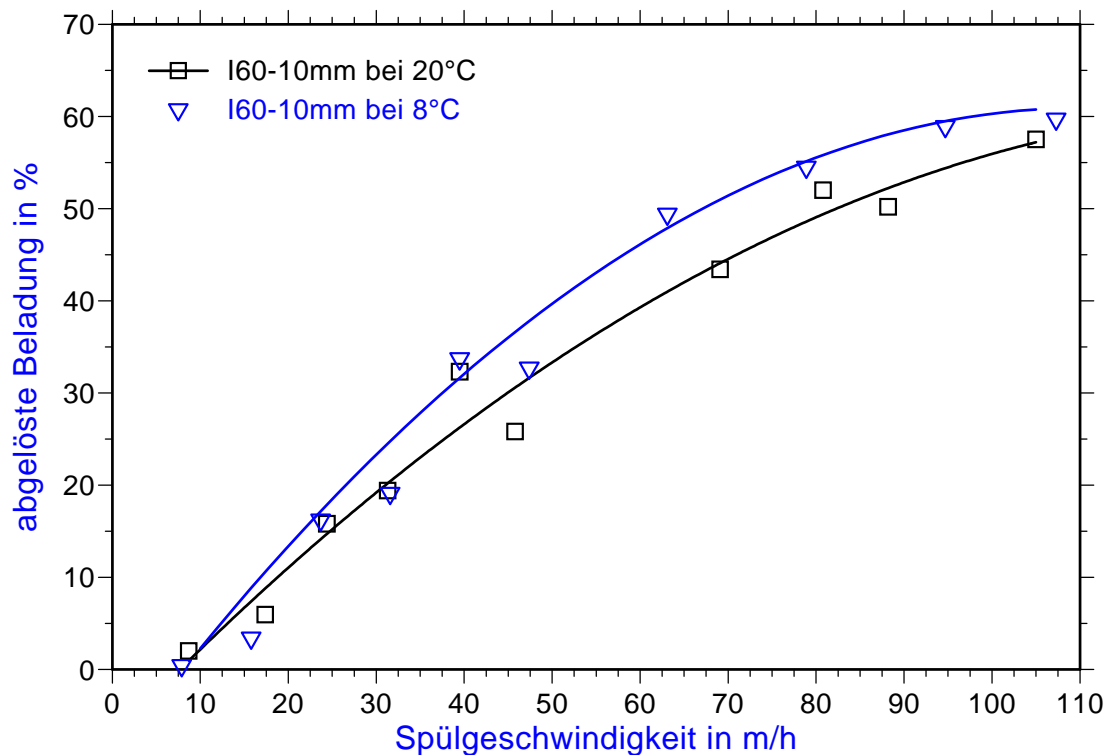
Bei Vernachlässigung der höheren Strömungsgeschwindigkeiten in den unmittelbaren Randzonen des PSK dürfte aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb des PSK (Bild 8.6) eine Ablösung der Beladung erst oberhalb einer Spülgeschwindigkeit von 83 m/h für die PSK mit einem Durchmesser von 6 mm bzw. von 110 m/h bei einem Durchmesser von 10 mm einsetzen. Die in Bild 8.6 dargestellte mittlere, innere Strömungsgeschwindigkeit berechnet sich wie in der Arbeit von MULDER (1990) über das numerisch berechnete Geschwindigkeitsfeld aus dem permeierenden Volumenstrom (Gl. 7.18) und der Querschnittsfläche des PSK

$$v_i = \frac{4 \cdot Q_{\text{perm}}}{d_k^2 \cdot \pi} \quad (8.4)$$

Die Vernachlässigung der erheblich höheren Strömungsgeschwindigkeit in den Randzonen des PSK rechtfertigt sich dabei durch die nur sehr geringe Ausdehnung dieser Randzone. Obwohl in den Randzonen der lokal ablösbare Anteil sicherlich nennenswert ist, trägt die dort abgelöste Beladung wegen des sehr geringen Volumenanteils der Randzone nur unerheblich zur gesamten ablösbaren Beladung bei.



**Bild 8.6:** Mittlere innere Strömungsgeschwindigkeit im PSK vom Typ I60 in Abhängigkeit der Spülgeschwindigkeit ( $T=20^\circ\text{C}$ )



**Bild 8.7:** Einfluß der Spülwassertemperatur auf die Regenerierbarkeit von PSK mit einer Wasserspülung



Durch eine Veränderung der Spülwassertemperatur sind zwei Effekte abzusehen, die durch die starke Temperaturabhängigkeit der Viskosität von Wasser Auswirkungen auf den Ablöseprozeß erwarten lassen. Eine veränderte Viskosität beeinflusst über die Reynoldszahl das gesamte Strömungsfeld und bestimmt damit insbesondere, wie groß der permeierende Volumenstrom durch den permeablen Kollektor ist. Pauschal kann man sagen, daß mit abnehmender Viskosität des Spülwassers der permeierende Volumenstrom zunimmt. Da die für den Ablöseprozeß bestimmende Schubspannung sowohl mit der Viskosität als auch dem Schergradienten ansteigt, nimmt mit steigender Viskosität wegen des abnehmenden permeierenden Volumenstroms die Schubspannung an den inneren Oberflächen insgesamt nur weniger zu als durch die Proportionalität der Schubspannung zur Viskosität zu erwarten wäre. Experimentelle Untersuchungen am Materialtyp I60 mit einem Kollektordurchmesser von 10 mm bestätigen, daß bei niedrigerer Temperatur und daher steigender Viskosität ein größerer Beladungsanteil bei gleicher Spülgeschwindigkeit abgelöst werden kann (Bild 8.7).

### **8.3 Modellvorstellung zur Trübstoffablösung bei PSK**

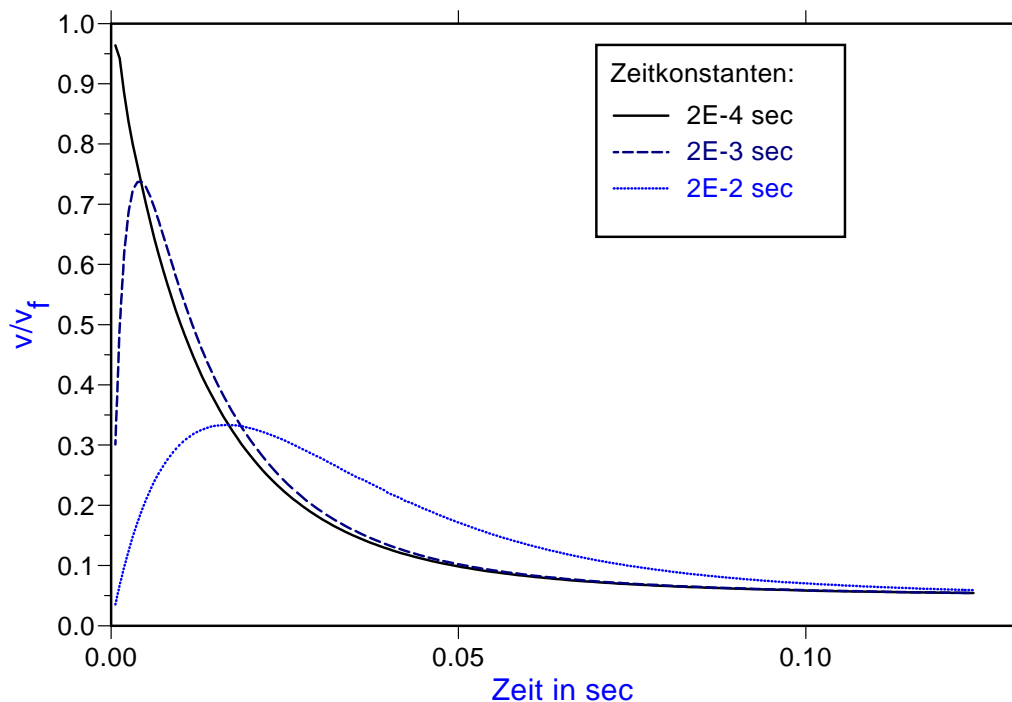
Wie die bisherigen Ausführungen zeigten, erfolgt die Ablösung einer Trübstoffbeladung unter dem Einfluß der Schubspannung des Strömungsfeldes an der Kollektoroberfläche. Bei den permeablen Kollektoren sind darunter insbesondere die Faseroberflächen im Inneren der Kollektoren zu verstehen.

Überschreitet die Schubspannung eine kritische Größe, so wird ein Trübstoffpartikel von der Kollektoroberfläche abgelöst und mit dem Fluidstrom wegtransportiert. Es wird im folgenden vereinfachend angenommen, daß ein einmal abgelöstes Trübstoffpartikel nicht wieder abgeschieden werden kann. Grundsätzlich muß man allerdings insbesondere bei kleineren Spülgeschwindigkeiten in Erwägung ziehen, daß ein geringer Anteil der abgelösten Trübstoffe an den Faseroberflächen auch wieder abgeschieden werden kann.

Bei dem Spülvorgang eines beladenen Filterbettes von permeablen Kollektoren ist der stationäre Strömungszustand hinsichtlich der Trübstoffablösung weitgehend unbedeutend, wie ein Vergleich der mittleren, stationären Strömungsgeschwindigkeit innerhalb der permeablen Kollektoren und den daraus resultierenden ablösbaren Beladungen mit experimentellen Ergebnissen gezeigt haben (Kapitel 8.2). Wird in den Ablösemechanismus der instationäre Anfahrvorgang der Wasserspülung miteinbezogen, so stellen sich innerhalb des permeablen Kollektors kurzfristig weitaus höhere Strömungsgeschwindigkeiten und damit entsprechend heftigere Schubspannungen an den Faseroberflächen ein.

Man muß sich die Strömungsverhältnisse im Inneren der permeablen Kollektoren eines Filterbettes während des instationären Anfahrvorganges so vorstellen, daß bei intensiver Beschleunigung das Strömungsfeld in der Anfangsphase näherungsweise ein kolbenartiges

Geschwindigkeitsprofil in dem gesamten Filterquerschnitt inklusive der inneren Bereiche des permeablen Kollektors einzustellen versucht. Da die Durchströmung der permeablen Kollektoren einen in der Regel erheblich größeren Strömungswiderstand als die Umströmung darstellt, wird das zunächst kolbenartige Geschwindigkeitsfeld zunehmend zur Umströmung der permeablen Kollektoren gezwungen. Diese zunehmende Verdrängung des Spülwasserstromes aus dem permeablen Kollektor heraus in die Umströmungszonen wird solange fortgesetzt, bis die Strömungswiderstände der Durchströmung und der Umströmung ausgeglichen sind. Bei diesem gleichgewichtsartigen Zustand stellt sich dann das stationäre Strömungsfeld ein.



**Bild 8.8:** Zeitlicher Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit innerhalb eines PSK nach Beginn der Spülung, Parameter:  $Re=100$ ,  $\beta=89,5$ ,  $\varepsilon=0,4$ ,  $r^*=0,625$ ,  $\theta=\pi/2$

Bild 8.8 zeigt beispielhaft, welche Strömungsgeschwindigkeiten sich in Abhängigkeit der Spüldauer im Inneren der PSK aufgrund von Berechnungen mit dem Strömungsmodell aus Kapitel 5. einstellen; der instationäre Anfahrvorgang der Spülung wird dabei durch Gl. 4.43 approximiert. In den Beispielen von Bild 8.8 durchläuft die Strömungsgeschwindigkeit im Inneren des permeablen Kollektors bei großen Beschleunigungswerten ein Maximum und nähert sich dann mit zunehmender Zeit asymptotisch der stationären Strömungsgeschwindigkeit. Bei einer intensiven Beschleunigung des Spülwasserstromes, die durch eine Zeitkonstante  $T$  von  $2 \cdot 10^{-4}$  sec in Gl. 4.43 approximiert wird, erreicht der Maximalwert der Spülgeschwindigkeit kurzfristig ca. das 20-fache der stationären Strömungsgeschwindigkeit. In der Konsequenz muß man davon ausgehen, daß bei dem instationären Anfahrvorgang erheblich heftigere Ablösebedingungen vorherrschen als bei dem stationären Zustand, und daher der instationäre Anfahrvorgang als der dominierende Mechanismus anzusehen ist.

### 8.3.1 Berechnung des ablösbaren Beladungsanteils

Mit dem instationären Strömungsmodell für permeable Kollektoren können die lokal größten Strömungsgeschwindigkeiten während der Spülung von PSK-Tiefenfiltern, ausgehend von dem Anfahrvorgang bis zum stationären Zustand, berechnet werden. Da im weiteren die Beladung nach der Filtration mit Hilfe des neu abgeleiteten und experimentell bestätigten Filtrationsmodells auch in ihrer lokalen Verteilung ermittelt werden kann, läßt sich mit den experimentell an Kollektormatten gefundenen Zusammenhängen zur Trübstoffablösung nach Gl. 6.21, aus der lokalen Anfangsbeladung und aus der lokal größten Strömungsgeschwindigkeit die lokale Restbeladung nach einer Spülung berechnen.

Die ablösbare Masse je Kollektor folgt dann aus dem Volumenintegral der Beladungsdifferenz vor und nach der Spülung.

$$m_{ab} = \int_V (\sigma_0(r, \theta) - \sigma(r, \theta)) dV \quad (8.5)$$

Unter Verwendung von Polarkoordinaten und Ausnutzung der Symmetrie im Kollektor vereinfacht sich das Volumenintegral zu einem Doppelintegral über die radiale und tangentielle Koordinate.

$$m_{ab} = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^{\pi} \left( \int_0^{a_k} (\sigma_0(r, \theta) - \sigma(r, \theta)) \cdot r^2 \cdot \sin \theta \cdot dr \right) d\theta \quad (8.6)$$

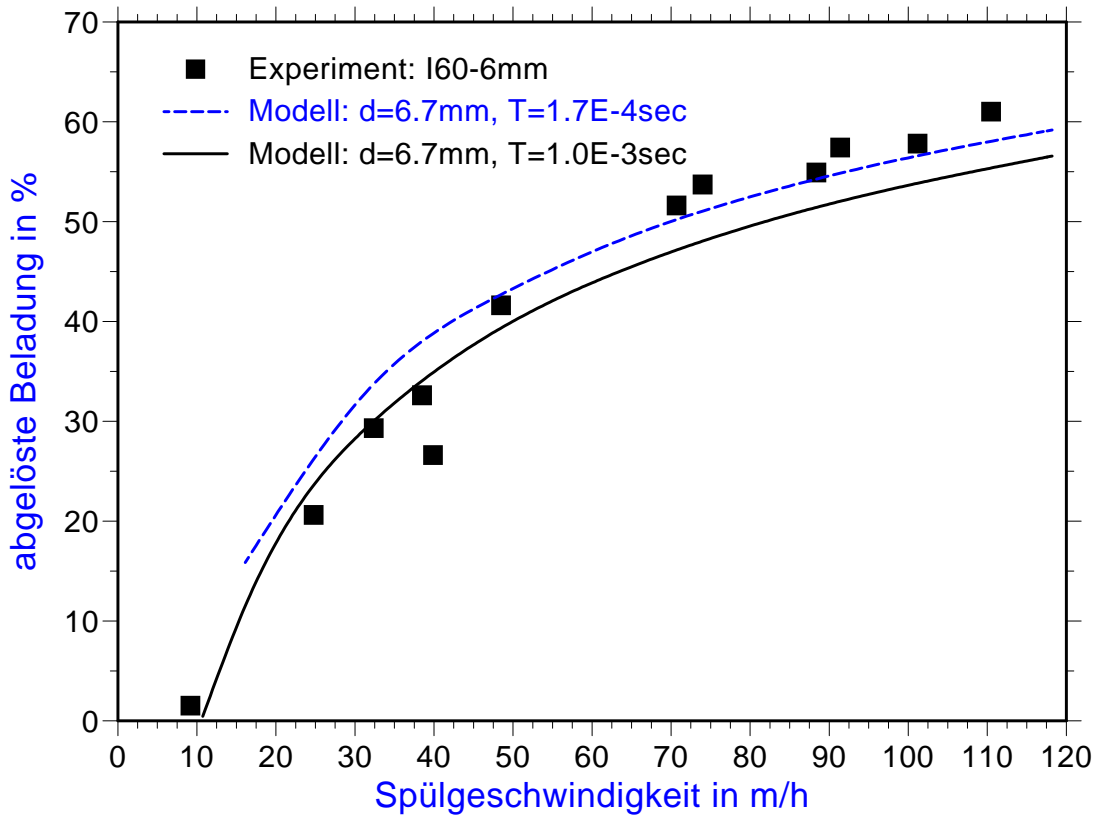
Der abgelöste Beladungsanteil berechnet sich im weiteren als Verhältnis der abgelösten Masse  $m_{ab}$  zur ursprünglichen Trübstoffmasse  $m_0$  auf dem permeablen Kollektor nach der Filtration.

### 8.3.2 Vergleich zwischen Modell und Experiment

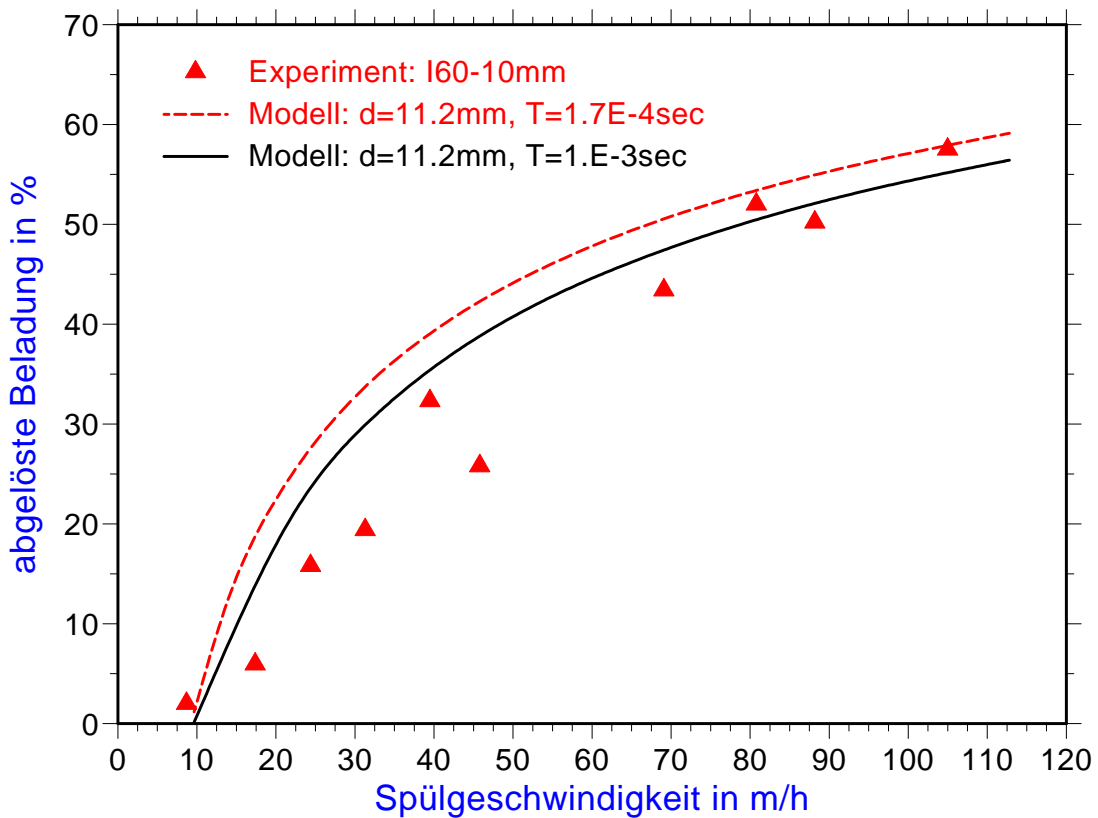
Zur Überprüfung der beschriebenen Modellvorstellungen zur Ablösung der Beladung wurden Berechnungen am Beispiel des Kollektortyps I60 durchgeführt, für den die erforderlichen Parameter aus experimentellen Untersuchungen mit Kollektormatten ermittelt wurden, und mit den in Kapitel 7. vorgestellten experimentellen Ergebnissen verglichen. Die unbekannte Zeitkonstante  $T$  wurde in den Modellrechnungen wie ein Anpassungsparameter aufgefaßt und im Sinne einer optimalen Anpassung so variiert, daß sich eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Modell einstellte.

Die Bilder 8.9 und 8.10 zeigen Vergleiche experimenteller Untersuchungen am Kollektormaterial I60 mit einem Kollektordurchmesser von 6 mm und 10 mm mit den entsprechenden Modellrechnungen bei einer Temperatur von 20°C. Es zeigte sich, daß die Meßergebnisse der permeablen Kollektoren mit einem Durchmesser von 6 mm für Spülgeschwindigkeiten bis zu 50 m/h mit einer Zeitkonstante von  $1 \cdot 10^{-3}$  sec vergleichsweise gut beschrieben werden können, während die Meßwerte oberhalb von 50 m/h besser durch eine Zeitkonstante von  $1,7 \cdot 10^{-4}$  sec zu beschreiben sind. Dieses Ergebnis bestätigt die tatsächlichen experimentellen Randbedingungen auch insofern, da für den Spülgeschwindigkeitsbereich oberhalb von 50 m/h eine wesentlich leistungsfähigere Kreiselpumpe mit entsprechend höherer Beschleunigungsleistung eingesetzt werden mußte. Weitere Berechnungen mit einer noch kleineren Zeitkonstante bis zu  $5 \cdot 10^{-5}$  sec, die eine entsprechend höhere Beschleunigung des Spülwasserstromes simulieren sollte, führten nur noch zu einer sehr geringfügigen Steigerung der ablösbaren Beladung. Eine optimale Anpassung in dem oberen Geschwindigkeitsbereich erhält man insofern bei einer Zeitkonstanten von  $1,7 \cdot 10^{-4}$  sec.

Die Zeitkonstanten, die aus den zuvor durchgeführten Anpassungsrechnungen ermittelt wurden, sind im weiteren auch für Vergleiche mit dem Kollektortyp I60-10mm verwendet worden (Bild 8.10). Der Vergleich der Meßwerte mit den Modellrechnungen ergibt etwas zu hoch berechnete ablösbare Beladungen für beide verwendeten Zeitkonstanten. Dabei läßt sich dennoch die schon zuvor getroffene Feststellung bestätigen, daß unterhalb einer Spülgeschwindigkeit von 50 m/h eine größere Zeitkonstante bessere Übereinstimmungen mit den Meßwerten liefert im Vergleich zur Spülgeschwindigkeit über 50m/h. Die Abweichungen erklären sich einerseits durch den experimentellen Befund, daß die ablösbare Beladung mit zunehmendem Kollektordurchmesser abnimmt. Andererseits wird modellmäßig mit steigendem Kollektordurchmesser entgegen der experimentell ermittelten Tendenz eine geringfügig höhere ablösbare Beladung berechnet, die sich durch steigende Maximalgeschwindigkeiten während der Beschleunigung erklären. Dieser Widerspruch zu dem genannten experimentellen Befund führt in der Summe zu einem weiteren Anwachsen der Differenz von Modell und Experiment in Bild 8.10. Eine Erklärung dieses scheinbaren Widerspruchs zwischen Modell und Experiment ist vermutlich in der modellmäßig vernachlässigten Wiederanlagerung bereits abgelöster Trübstoffteilchen zu sehen. Bei den größeren permeablen Kollektoren ist der mittlere Weg von der ursprünglichen Ablöseposition innerhalb des permeablen Kollektors bis in das Umströmungsgebiet naturgemäß größer, wobei die zeitlich wieder schnell abnehmende Strömungsgeschwindigkeit innerhalb des Kollektors zusätzlich zu berücksichtigen ist, und somit eine insgesamt höhere Wahrscheinlichkeit der Wiederanlagerung bereits abgelöster Trübstoffe bewirkt wird.

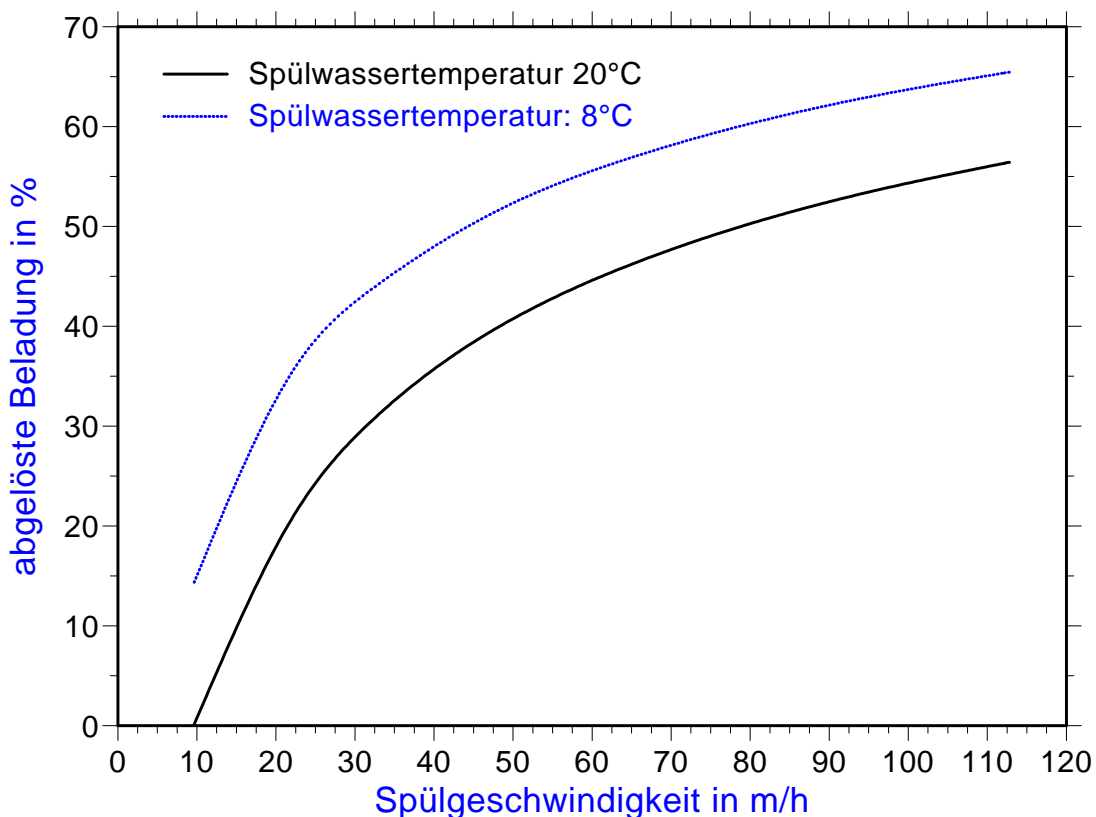


**Bild 8.9:** Vergleich der abgelösten Beladung nach Modell und Experiment für den Typ I60-6mm bei 20°C



**Bild 8.10:** Vergleich der abgelösten Beladung nach Modell und Experiment für den Typ I60-10mm bei 20°C

In Bild 8.11 werden Modellrechnungen zum experimentell festgestellten Temperatureinfluß des Spülwassers auf die ablösbare Beladung beim Kollektor I60-10mm (vgl. Bild 8.7) dargestellt. Ein Temperatureinfluß macht sich bei der Spülung prinzipiell dadurch bemerkbar, daß einerseits bei steigender Viskosität des Spülwassers die innere Maximalgeschwindigkeit unter instationären Bedingungen sinkt, andererseits die Ablösekräfte proportional zur Viskosität ansteigen. Die abnehmende Maximalgeschwindigkeit innerhalb des permeablen Kollektors bei steigender Viskosität erklärt sich durch den vergrößerten Strömungswiderstand, der nach den obigen Erläuterungen die Strömung dann auch schneller aus dem Kollektor in die Umströmungszone verdrängt.



**Bild 8.11:** Vergleich der modellmäßig ablösbaren Beladungen bei verschiedenen Temperaturen für den Kollektortyp I60-10mm mit  $T=1 \cdot 10^{-3}$ sec

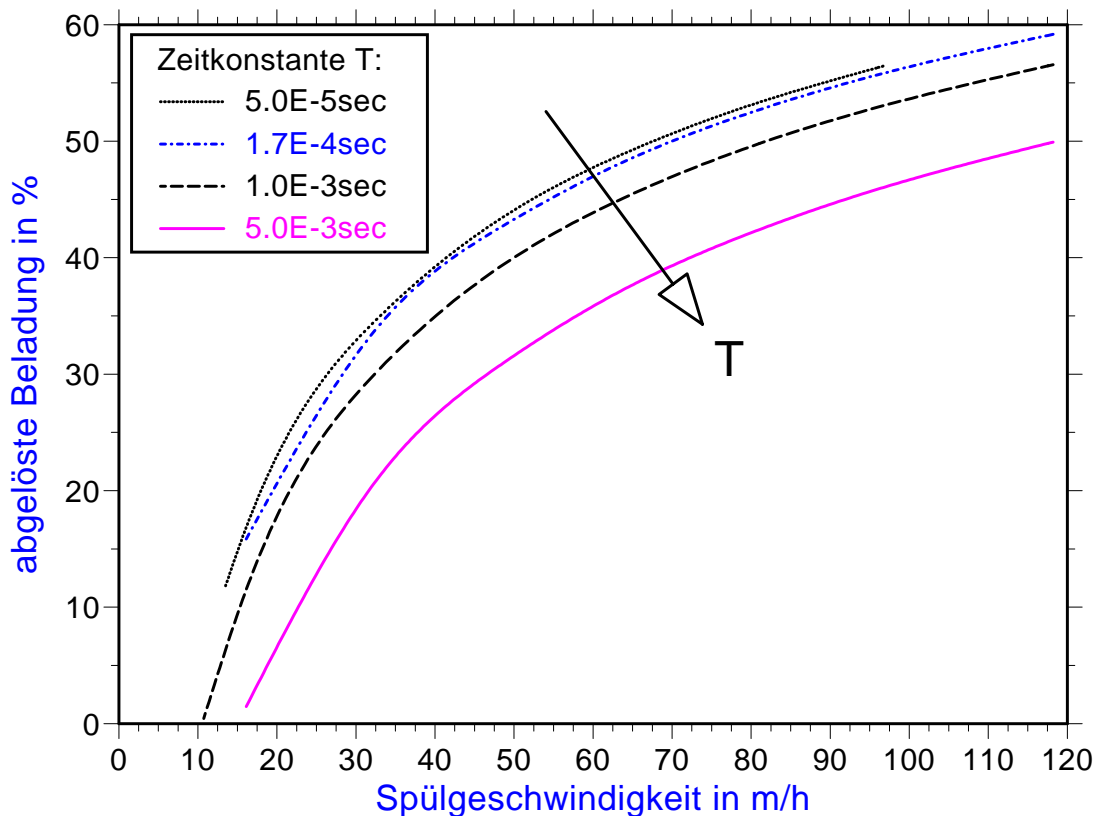
Für die auf das System „permeabler Kollektor“ beschränkten Modellrechnungen sind einige zusätzliche Annahmen bezüglich des Temperatureinflusses bei dem Ablöseprozeß vorzunehmen, bei denen mit Auswirkungen auf die Qualität der Modellierung zu rechnen ist. So wird für die Modellrechnungen gefordert, daß

- die Ablösekräfte durch die Strömung proportional zu  $\eta v_f$  ansteigen,
- die Haftkräfte keinem gravierenden Temperatureinfluß unterliegen,
- das Anfahrverhalten des gesamten Systems bestehend aus Pumpe, Rohrleitungen und Filter (ausschließlich des Filtermaterials) sich nicht wesentlich durch die Temperatur verändert.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen in Bild 8.11 kommen wie die experimentellen Untersuchungen in Bild 8.7 zu dem Ergebnis, daß mit abnehmender Temperatur die ablösbare Beladung ansteigt. Es ist allerdings festzustellen, daß modellmäßig ein etwas stärkerer Temperatureinfluß gefunden wird. Dies ist vermutlich auch auf die erforderlichen vereinfachenden Annahmen zurückzuführen.

### 8.3.3. Weiterführende Erkenntnisse aus den Modellrechnungen

Die Modellvorstellung zur Regeneration von permeablen Kollektoren zeigte, daß die Beschleunigung des Spülwasserstromes den Ablöseprozeß der Beladung von den Oberflächen der permeablen Kollektoren maßgeblich beeinflusst und daher einen wichtigen, technisch beeinflussbaren Parameter für den Regenerationsprozeß darstellt. Die Grenzen und Bedeutung dieses Parameters für den Regenerationsprozeß lassen sich zumindest qualitativ mit dem Modell abschätzen.

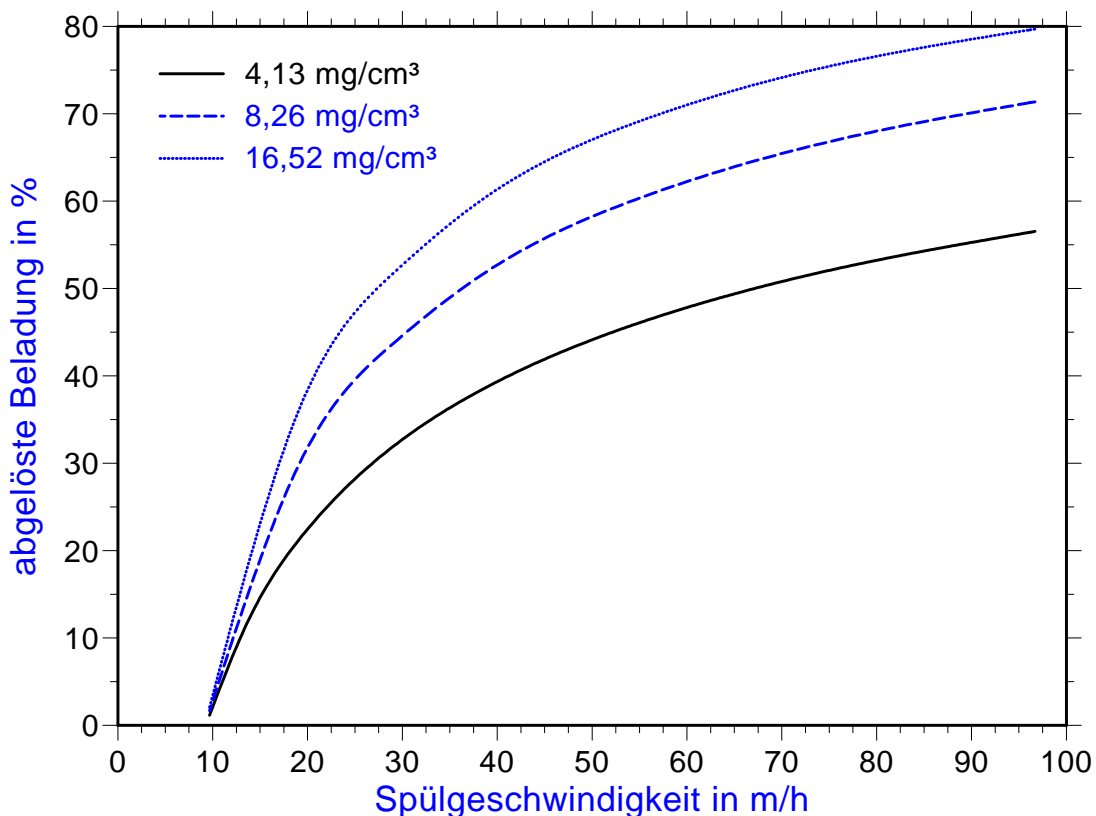


**Bild 8.12:** Einfluß der Beschleunigung des Spülwasserstroms auf die abgelöste Beladung (modellhaft)  
 Parameter:  $d=6,7\text{mm}$ ,  $\epsilon=0,4$ ,  $\beta=60$ ,  $\sigma_0 = 4,13\text{mg/cm}^3$

Bild 8.12 zeigt, inwieweit sich eine Veränderung der Beschleunigung, d. h. für die hier durchgeführten Modellrechnungen eine Veränderung der Zeitkonstanten  $T$  über den aus Experimenten gefundenen Bereich von  $1,7 \cdot 10^{-4}$  bis  $1 \cdot 10^{-3}$  sec, auswirkt. Es wird deutlich, daß eine weitere Steigerung der Beschleunigung ( $T=5 \cdot 10^{-5}$  sec) nur noch einen unerheblichen

Zugewinn an ablösbarer Beladung bewirkt. Dagegen macht sich eine Verminderung der Beschleunigung ( $T=5 \cdot 10^{-3} \text{sec}$ ) durch einen deutlichen Rückgang der ablösbaren Beladung bemerkbar. Für eine vorteilhafte technische Umsetzung wäre daher zu fordern, die Rohrleitung des Spülwasserstrangs möglichst kurz zu gestalten, damit die zu beschleunigende Wassermasse möglichst klein gehalten werden kann.

Ein weiterer Effekt, der durch Modellrechnungen quantifizierbar wird, resultiert aus der Beladungsabhängigkeit des ablösbaren Beladungsanteils. In den experimentellen Untersuchungen wurde eine Ausgangsbeladung nach der Filtration von lediglich  $4,13 \text{ mg/cm}^3$  eingestellt, wodurch ein Einfluß der Beladung nach der Filtration experimentell nicht dargelegt werden kann. Allerdings belegen die experimentellen Untersuchungen an den Kollektormatten, daß der ablösbare Beladungsanteil mit zunehmender Beladung ansteigt, wodurch der gleiche Effekt auch bei den PSK erwartet werden muß. In Bild 8.13 sind die theoretischen Ergebnisse zur ablösbaren Beladung für drei verschiedene Anfangsbeladungen dargestellt. Deutlich erkennbar steigt der ablösbare Anteil mit zunehmender Anfangsbeladung an, obgleich die Restbeladung absolut gesehen natürlich auch ansteigt.



**Bild 8.13:** Einfluß der Anfangsbeladung auf die abgelöste Beladung für den Typ I60-10mm bei  $20^\circ\text{C}$  und einer Zeitkonstanten  $T$  von  $1,7 \cdot 10^{-4} \text{sec}$

Insgesamt kann man sagen, daß durch eine Wasserspülung mit hoher Geschwindigkeit und hoher Beschleunigung weitgehend unabhängig von den Eigenschaften des permeablen



Kollektors der größte Teil der Beladung abgelöst werden kann. Es verbleibt jedoch eine Restbeladung auf den inneren Oberflächen des permeablen Kollektors, die mit zunehmender Anzahl an Filtrationszyklen zu einem Wachstum der Restbeladung führen kann. Langfristig müßte dann mit einer Störung der Filtration gerechnet werden. Es ist daher empfehlenswert, die sehr einfach durchzuführende Wasserspülung lediglich als Grundreinigungsverfahren einzusetzen und nach einer festzulegenden Anzahl von Filtrationszyklen eine Intensivreinigung durchzuführen. Sie könnte z. B. in Form einer Ultraschallreinigung vorgenommen werden, wie sie nachfolgend noch beschrieben wird.