

Wolfgang WIEDENROTH

Universität-Gesamthochschule-Paderborn, Abteilung Meschede, Fachbereich Maschinentechnik II, Lindenstr. 53, 5778 Meschede

KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT UND TRANSPORTKONZENTRATION - NEUE EXPERIMENTELLE ARBEITEN ÜBER DIESE EINFLUSSGRÖSSEN

Zusammenfassung. Die Anregung zu diesen Arbeiten erfolgte anlässlich des Seminars "Hydraulischen Transport und Sedimentation" 1984 in Wrocław. Damals stellte man fest, daß für die Zusammenhänge zwischen Transportkonzentration, Schlupf, Übergangs- und Grenzgeschwindigkeit Wissenslücken bestehen. Vor allem erhob sich die Frage, wie die kritische Geschwindigkeit zu messen sei und auf welche Werte die Transportkonzentration dabei abfiel. Die Versuche geschahen im Versuchskreislauf mit 125 mm Nennweite und etwa 25 m Länge. Es wurden zwei verschiedene Wege zur Messung der kritischen Geschwindigkeit eingeschlagen: Körperschall- und Impedanzmessungen. Die bisher erzielten Ergebnisse sind erfolgversprechend, die Arbeiten jedoch noch nicht abgeschlossen.

Einleitung

Wie eine Literaturdurchsicht schnell zeigt, war die "kritische" Geschwindigkeit stets Diskussionsgegenstand. Obgleich daran intensiv gearbeitet wurde, hat es bisher noch keine allgemein gültige Antwort gegeben. Dies hängt u.a. damit zusammen, daß verschiedene Definitionen verwendet wurden und nur unzureichende Meßverfahren bereit standen. Darum soll zunächst ein kurzer historischer Abriss gegeben und dann über die in Meschede durchgeführten Versuche berichtet werden.

Historischer Überblick

Ohne zu den Ursprüngen des hydraulischen Feststofftransportes zurückzugehen, kann man recht schnell einen zufriedenstellenden Eindruck über die historische Entwicklung zum Begriff "kritische" Geschwindigkeit bekommen.

Durand /1/, einer der meistgenannten Forscher auf dem Gebiet des hydraulischen Transportes, scheint ein guter Beginn zu sein. Nach seiner Festlegung erreicht der Gemischstrom die kritische Geschwindigkeit im Druckverlustminimum, man findet jedoch keinerlei weitergehende Anmerkungen über den Strömungszustand im Rohr. Eingehender beschreibt Newitt /2/ seine Vorstellungen über die Vorgänge beim hydraulischen Feststofftransport. Er stellte seine Modellvorstellung über die verschiedenen Transportmechanismen und die damit gekoppelten Strömungserscheinungen vor. Aufgrund seiner theoretischen Überlegungen gelangt Newitt zu verschiedenen ausgezeichneten Geschwindigkeiten, bei denen sich der Transportmechanismus bei turbulenter Strömung ändert. Insbesondere der Übergang vom quasi homogenen Zustand in heterogene Gemischströmung, Übergangsgeschwindigkeit genannt, und von der heterogenen Form in die mit rutschendem Feststoff auf der Rohrsohle, kritische Geschwindigkeit bezeichnet, werden hergeleitet und definiert. All diese Festlegungsversuche basierten jedoch nicht auf wissenschaftlich fundierten Meßergebnissen, sondern auf subjektiven Beobachtungen des Feststoffes in durchsichtigen Rohrleitungsabschnitten. Wegen dieses Mangels und bekräftigt durch von Sinclair /3/ entwickelte Vorstellungen über den Zusammenhang zwischen kritischer Geschwindigkeit und Durchmesser Verhältnis führte der

Berichter Mitte der Sechziger Messungen der mittleren Geschwindigkeit von Feststoff und Trägerflüssigkeit durch. Dabei wurden Impedanzänderungen zwischen Elektrodenpaaren im waagerechten Rohr, hervorgerufen durch Feststoff- bzw. Salzwolken als Signal verwendet und aus der Laufzeit der Wolken der Schlupf ermittelt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen finden sich in /4/, sie sind im Bild 1 dargestellt. Das Diagramm stellt die Schlupffunktion dar und aus ihrer Extrapolation läßt sich die Geschwindigkeit ableiten, bei der kein Feststofftransport mehr geschieht.

Wegen des Vorschlages von Durand, der Arbeiten von Newitt und zahlreicher anderer Forscher mußte eine Definition der "kritischen" Geschwindigkeit gefunden werden. Die überwiegende Zahl der mit dem hydraulischen Feststofftransport Befassten entschied sich für die Geschwindigkeit, bei der erste Partikel auf dem Rohrboden zur Ruhe kamen. Obgleich diese Festlegung vom wissenschaftlichen wie praktischen Standpunkt recht vage ist, fand sie verbreitet Anklang. Eine Berechnung dieser Größe auf der Basis vorgeschlagener Formeln konnte anläßlich Hydrotransport 2 /5/ vorgestellt werden. Wie dem Bild 2 zu entnehmen ist, streuen die berechneten Werte bei vorgegebenen Förderbedingungen außerordentlich. In der Folgezeit unternahmen weitere Forscher neue Versuche unter ihnen auch Kazanski. Er schlug vor in der Rohrwand einen Stopfen aus isolierendem Material einzulassen, der mit zwei dünnen Drähten als Elektroden versehen war, um so aus den Widerstandsänderungen auf die Bewegung des Feststoffes zu schließen, wobei er an die Arbeiten von Führböter und Wiedenroth anschloß. Es gelang ihm die grundsätzliche Wirksamkeit des Verfahrens nachzuweisen.

Etwa parallel zu seinen Arbeiten unternahmen wir in Meschede Versuche in unserem Versuchskreislauf, um den Zusammenhang zwischen Transportkonzentration und mittlerer Geschwindigkeit in den waagerechten Leitungen des Kreislaufes zu erarbeiten. Die Bilder 3 bis 5 zeigen die Abhängigkeit der Transportkonzentration von der mittleren Geschwindigkeit der Flüssigkeit für zwei Feststoffsorten und den Verlauf der bezogenen Transportkonzentration für einen Feststoff und den gesamten untersuchten Konzentrationsbereich. Aus den Diagrammen läßt sich eindeutig ableiten, daß der Schlupf zwischen Feststoff und Flüssigkeit, ausgedrückt durch die Abnahme der Transportkonzentration, von der Korngröße abhängt. Dabei wächst der Schlupf für eine betrachtete Strömungsgeschwindigkeit mit der Teilchengröße gleiche Dichten vorausgesetzt.

Bezieht man die gemessene Transportkonzentration auf die volumetrische Konzentration im Kreislauf, so fallen die Meßwerte für alle Konzentrationen zu einer recht schmalbandigen Funktion zusammen.

Parzonka griff alle verfügbaren Informationen zum Problem "kritische" Geschwindigkeit auf und stellte seine Ergebnisse 1984 in Wroclaw vor /6/. Ihre Diskussion ergab, daß bis heute noch viel Wissen fehlt, um für die Geschwindigkeit, bei der erste Ablagerungen auftreten, eine allgemein gültige Formel anzugeben. Deshalb wurde beschlossen, in Meschede neue Versuche in dieser Richtung einzuleiten-

Jüngste Arbeiten in Meschede

Wie oben ausgeführt, ließ sich der Zusammenhang zwischen der Transportkonzentration und der mittleren Geschwindigkeit des Wassers ermitteln. Dies wurde deshalb als Basis angenommen, weil die Flüssigkeit die Energie für den Transport des Feststoffes liefern muß und deren Geschwindigkeit ein Maß dafür ist.

Es stellte sich die Frage, an welchem Punkt der Funktion der Transportkonzentration als Abhängige von der Wassergeschwindigkeit erste Teilchen auf der Rohrsohle liegen bleiben,

und wie man das messen kann.

Zunächst erfolgten Vorüberlegungen und Vorversuche, bei denen sich zwei Marschrichtungen als aussichtsreich herauskristallisierten. Die erste nutzt die Impedanzschwankungen zwischen zwei Elektrodenpaaren. Diese werden durch die unterschiedlichen Leitfähigkeiten der beteiligten Stoffe hervorgerufen. Die zweite basiert auf dem Geräusch, das die Partikel erzeugen, wenn sie gegen die Rohrwand stoßen.

Den größten Teil der bisher verrichteten Arbeit trug Kollmann /7/ bei. Wegen eines Antriebsschadens konnte er nur ein schmales Spektrum der vorgesehenen Untersuchungen durchführen. Es ist beabsichtigt, die Arbeiten weiterzuführen, sowie dringliche andere abgeschlossen sind.

Beide vorgeschlagene Meßverfahren beruhen darauf von der Feststoffbewegung hervorgerufene Signalschwankungen für die Messung der Geschwindigkeit zu nutzen, bei der erster Feststoff zur Ruhe kommt. Sie sollen im weiteren getrennt näher vorgestellt werden.

Körperschalluntersuchungen

Bei diesen Versuchen versuchten wie herauszufinden, ob in dem Geräuschspektrum zwischen 20 Hz und 16 KHz eine signifikante Spitze enthalten war, die durch die Teilchenstöße hervorgerufen wurde. Für die Experimente wurde ein Beschleunigungsgeber am Boden des Rohres am Ende der oberen Druckleitung des Kreislaufes befestigt. Sein Aufbau ist Bild 6 zu entnehmen. Für die Signalaufbereitung diente ein Frequenzanalysator von Bruel und Kjaer, dem ein Pegelschreiber des gleichen Herstellers nachgeschaltet war, um die Meßwerte zu registrieren. Der Versuchsaufbau für diese Messungen ist schematisch im Bild 7 wiedergegeben. Um die Meßwerte aus dem Frequenzanalysator und vom Dichtemeßgerät parallel über der mittleren Strömungsgeschwindigkeit des Gemisches aufzuzeichnen, verwendete man zwei gleiche X-Y-Schreiber in Parallelanordnung, Bild 8. Trägt man die Ergebnisse der Frequenzanalyse mit der Gemischgeschwindigkeit als Parameter auf, wie in Bild 9 geschehen, so erkennt man die große Abnahme des Pegels, wenn der Feststoff zur Ruhe kommt, für $v_g = 1,68 \text{ m/s}$ war kein meßbarer Pegel mehr vorhanden. Diesen Zusammenhang unterstreicht Bild 10, in dem über der Gemischgeschwindigkeit der Verlauf der bezogenen Transportkonzentration und der Pegel für verschiedene Frequenzen dargestellt ist. Man erkennt auch hier das starke Absinken des Pegels sobald Ablagerungen auftreten.

Wie die Ergebnisse mit bisher nur einem einzigen Feststoff zeigen, scheint sich ein meßtechnischer Ansatz zur Lösung des Problems abzuzeichnen. Darüber werden ausgedehntere Versuchsreihen Auskunft geben.

Impedanzuntersuchungen

Wie schon erwähnt, haben Widerstandsmeßverfahren beim hydraulischen Feststofftransport eine lange Geschichte. Während man für Konzentrationsmessungen und Schlupfuntersuchungen großflächige Elektroden verwendete, eignen sie sich nicht, um die Ablagerung erster Partikel messend zu erfassen. Kazanskij führte Elektroden aus Platindraht von 0,3 mm Durchmesser dafür ein. Diese waren relativ teuer und zeigten nur mäßige Verschleißbeständigkeit. Deshalb ergab sich zunächst die Frage nach einem geeigneten Geber. Er sollte preiswert, druckfest, verschleißarm, leicht beschaffbar und schnell montierbar sein. Diese Eigenschaften hielt man für einen möglichen industriellen Einsatz für besonders wichtig. Alle Anforderungen erfüllten Zündkerzen für Ottomotoren in hervorragender Weise. Mit vier davon wurden zwei Brückenschaltungen aufgebaut. Die erste bestand aus einer Kerze am Rohrboden und einer auf dem Scheitel, die zweite aus zwei hintereinander angeordneten

am Rohrboden. Während die erste Anordnung zur Erfassung der von Newitt beschriebenen Übergangsgeschwindigkeit diente, galt die zweite der Bestimmung erster Ablagerungen am Rohrboden. Die Schaltungen wurden mit einer Trägerfrequenz von 5 KHz gespeist, um Polarisationserscheinungen zu unterdrücken. Das Ausgangssignal der Trägerfrequenzmeßbrücken gibt die Impedanzschwankungen zwischen den Elektroden der Zündkerzen wieder. Im zweiten Schritt mußte eine Auswerterschaltung entwickelt werden, die Gleichspannungs- und Wechsellspannungsanteil im Meßsignal trennte und eine dem Schwankungsanteil proportionale Spannung lieferte. Diese Filterstufe erwies sich als besonders problematisch, es mußte ein Kompromiß bezüglich Dämpfung/Auflösung geschlossen werden. Er genügt bisher den experimentellen Anforderungen, erlaubt dagegen nur bedingt reine Nein-Ja-Entscheidungen. Diese Frage wird in absehbarer Zukunft auch gelöst sein.

Bild 11 zeigt den Verlauf des Ausgangssignals am Ende der experimentellen Schaltung als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit des Gemisches. Es wurde erzielt mit einem Quarzsand von etwa 1 mm mittlerer Körnung und sehr schmalen Kornband, wie aus Bild 12 ersichtlich.

In einem nächsten Schritt verließ man die analoge Registrierung und erfaßte die Meßwerte mit dem Rechner der Versuchsanlage. Dabei wurde für die jeweils angesteuerte mittlere Wassergeschwindigkeit in den horizontalen Rohrstrecken die Messung der Transportkonzentration und des Ausgangssignals für die Brückenschaltung mehrfach durchgeführt, die Mittelwerte gebildet und graphisch ausgegeben.

Bild 13 stellt den gemessenen Verlauf für eine Konzentration, $c_x = 30\%$ dar. Man erkennt, daß bereits bei einer Abnahme der Transportkonzentration auf etwa 50 % des Wertes bei hoher Fördergeschwindigkeit Ablagerungen auf der Rohrsohle vorhanden sind, erste Ablagerungen zeigen sich schon bei einer relativen Transportkonzentration von 70 %.

Die schon oben erwähnte Feststellung, daß der Verlauf der Transportkonzentration über die Wassergeschwindigkeit für die Förderung durch horizontale Rohre unabhängig von der Volumenkonzentration im Kreislauf ist, bestätigt sich auch hinsichtlich des Ausgangssignales für die Ermittlung erster Ablagerungen. Diesen Zusammenhang verdeutlicht Bild 14 in hervorragender Weise.

Schlußbemerkungen

Im Beitrag wurde ausgehend von Berechnungsvorschlägen für die "kritische" Geschwindigkeit beim hydraulischen Feststofftransport durch waagerechte Rohrleitungen aufgezeigt, daß diese Größe vielfach definiert wurde und die vorgelegten Berechnungsansätze zu sehr divergierenden Ergebnissen führen. Deshalb wurden neue meßtechnische Verfahren zur Erfassung der kritischen Geschwindigkeit, definiert als die, bei der erste Ablagerungen auftreten, vorgestellt. Sowohl die Auswertung von Körperschallmessungen am Rohr als auch Impedanzmessungen zwischen den Elektroden von Zündkerzen erwiesen sich als gangbar. Dabei erzielte Ergebnisse wurden vorgestellt und diskutiert. Für eine abschließende Beurteilung der eingeschlagenen Wege sind weitere Versuche erforderlich.

Literatur

- /1/ Durand, R.: Basic relationships of the transportation of solids in pipes - Experimental research. Proceedings minnesota International Convention. Minneapolis Minnesota, (1953).

- /2/ Newitt D.M. et al.: Hydraulic conveying of solids in horizontal pipes.
Trans.Instn.Chem.Engrs., 33, 2 pp. 93 - 113 (1955)
- /3/ Sinclair C.G.: The limit deposit-velocity of heterogeneous suspensions
Third congress of the European federation of chemical engineering, London,
pp.A68-A76. Instn.chem.Engrs., London. (Juni 20th, 1962)
- /4/ Wiedenroth W.: Untersuchungen über die Förderung von Sand-Wasser-Gemischen
durch Rohrleitungen und Kreiselpumpen
Diss.Techn. Hochschule Hannover (1967)
- /5/ Wiedenroth W. a. M.Kirchner: A summary and comparison of known calculations
of critical velocity of solid-water-mixtures and some aspects of the opti-
misation of pipelines.
Hydrotransport 2, 20. - 22. Sept. 1972, Coventry, University of Warwick
- /6/ Parzonka W.: Le processus du transport solide en conduites horizontales en
regime limite de composition.
Seminar Transport and Sedimentation of Solid Particles, 3.-7. Sept. 1984,
Wrocław, Academie Rolnicza
- /7/ Kollmann M.: Meßtechnische Möglichkeiten zur Erkennung des Förderzustandes
beim hydraulischen Feststofftransport durch waagerechte Rohrleitungen
Unveröffentlichte Arbeit an der Universität-Gesamthochschule-Paderborn, Abt.
Meschede, 4.1986.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Maciej ZARZYCKI

Wpłynęło do Redakcji 1987.04.2

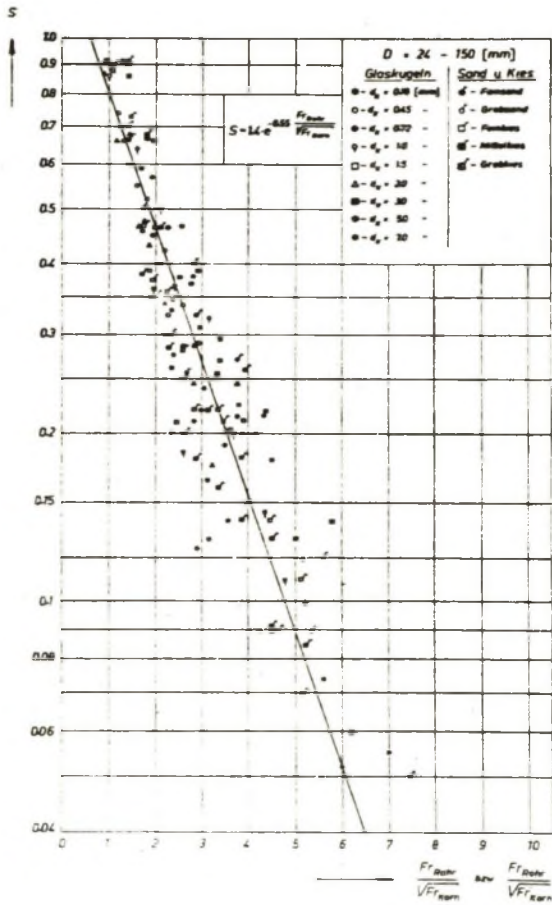


Bild 1. Der Schlupf von Glaskugeln, Sänden und Kies in Rohren von 24 bis 150 mm Nennweite, [4]

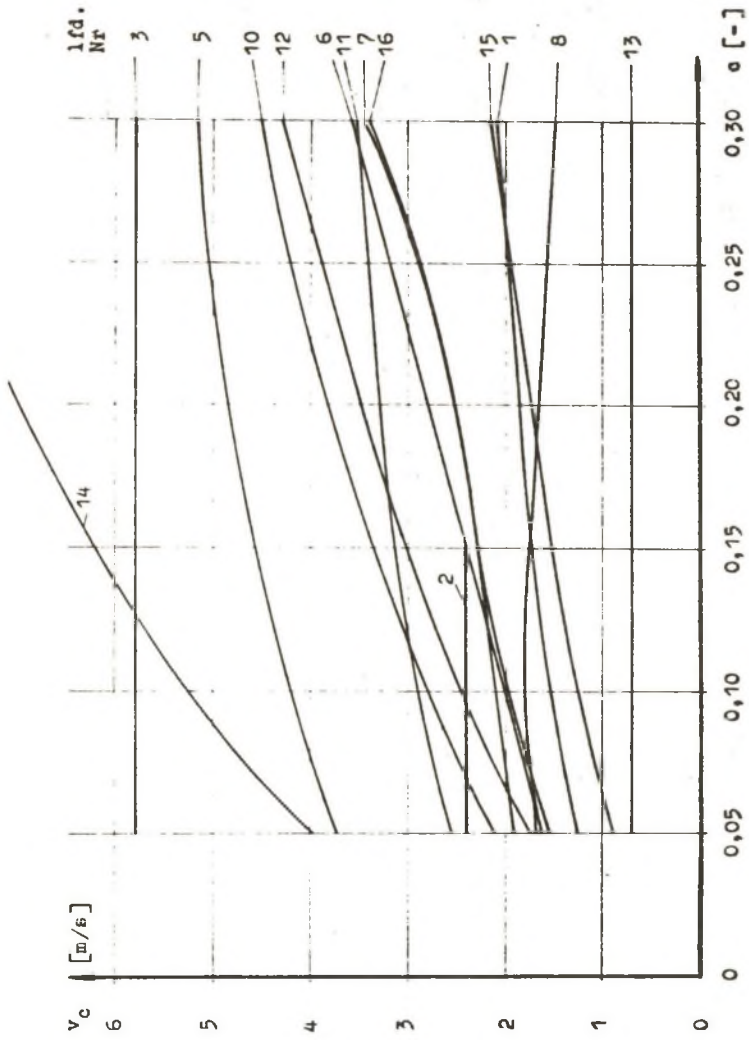


Bild 2. Einfluss der Konzentration auf die kritische Geschwindigkeit für Grobkiess bei konstantem Rohrdurchmesser nach Berechnungsvorschlägen verschiedener Autoren [5]

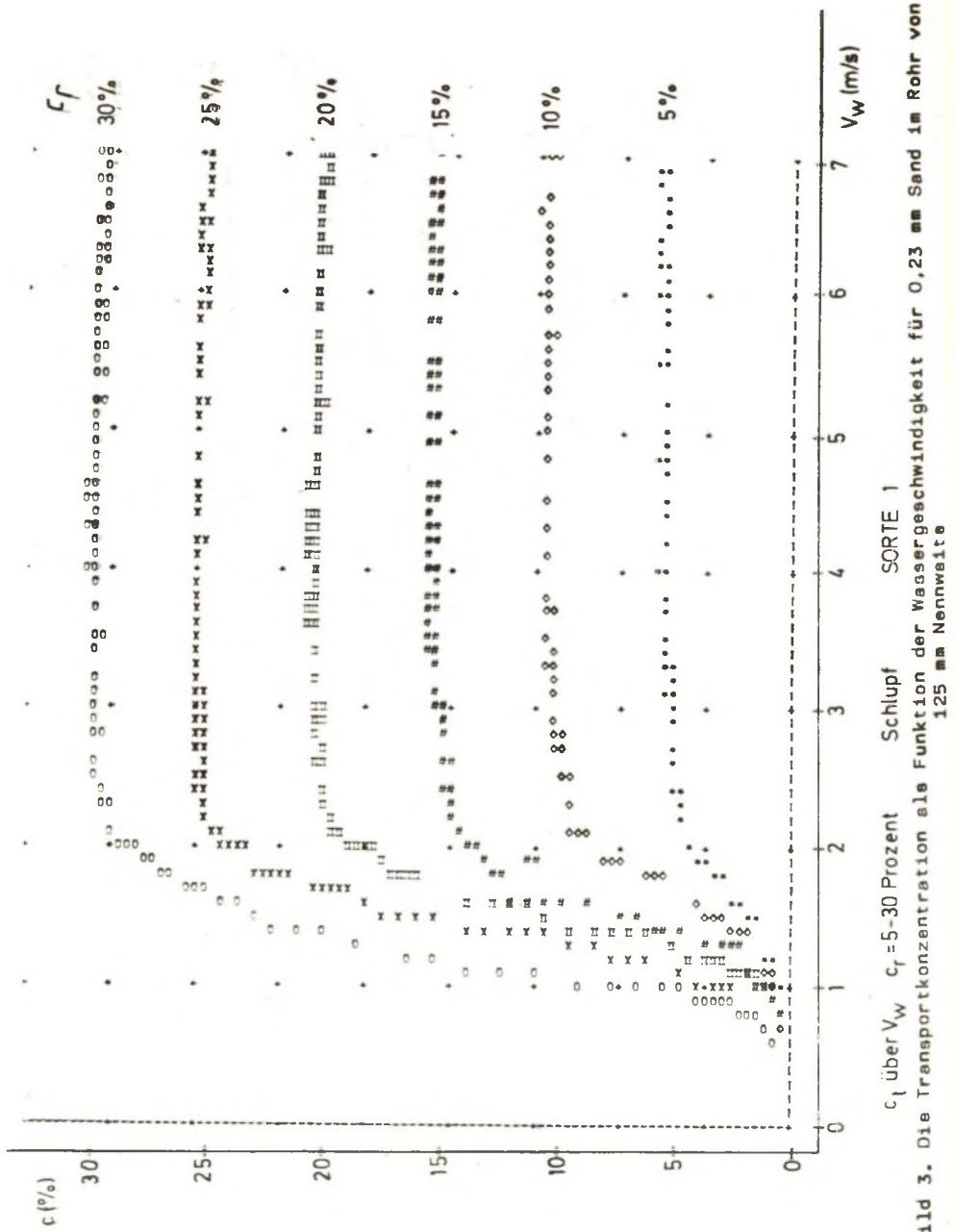


Bild 3. Die Transportkonzentration als Funktion der Wassergeschwindigkeit für 0,23 mm Sand im Rohr von 125 mm Nennweite

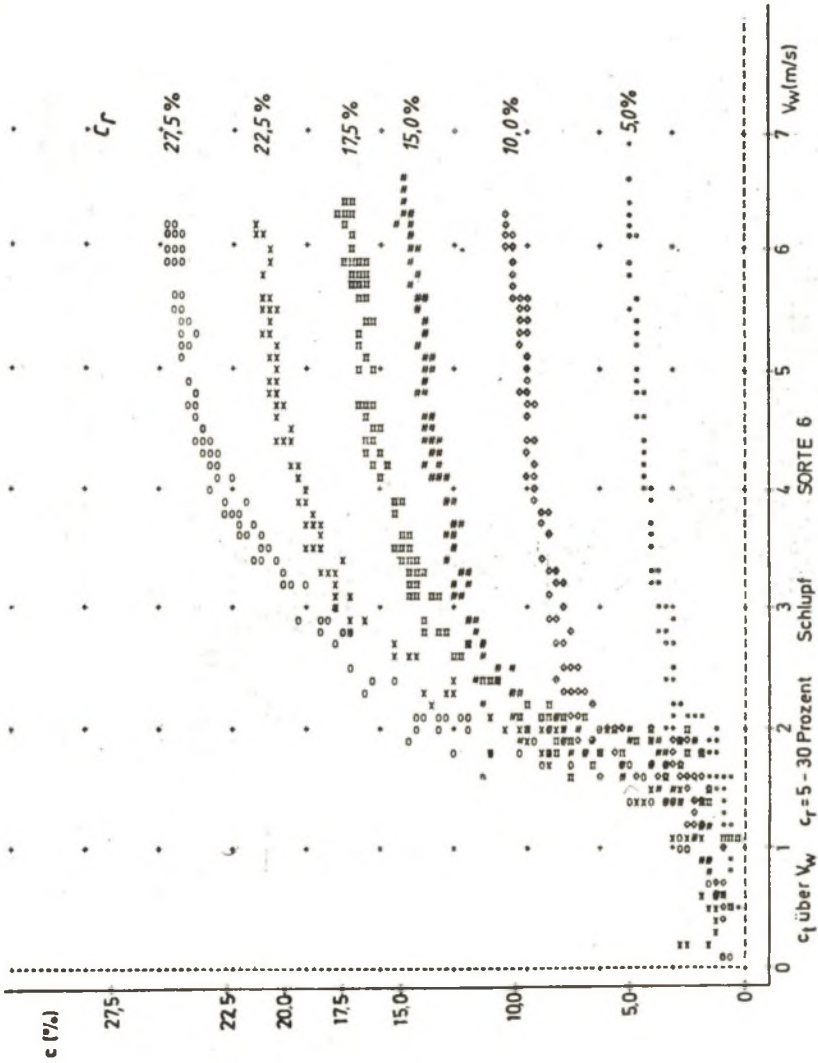


Bild 4. Die Transportkonzentration als Funktion der Wassergeschwindigkeit für 2,20 mm Sand im Rohr von 125 mm Nennweite

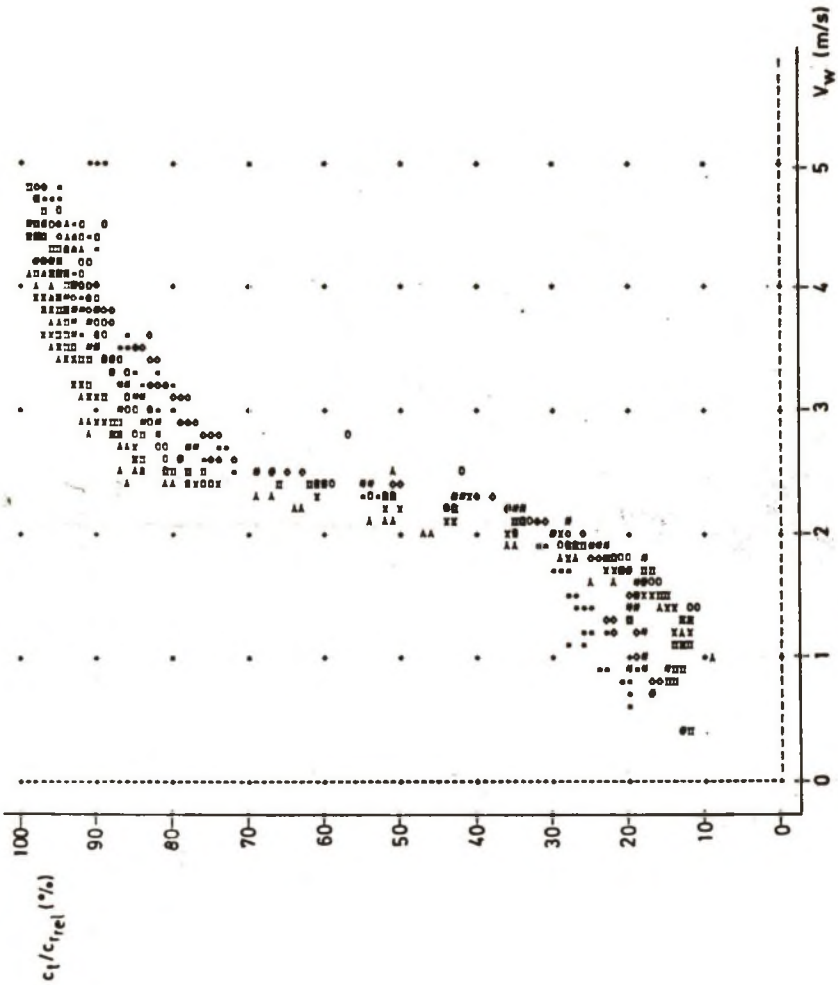


Bild 5. Die bezogene Transportkonzentration als Funktion der Wassergeschwindigkeit für 0,60 mm Bauxit

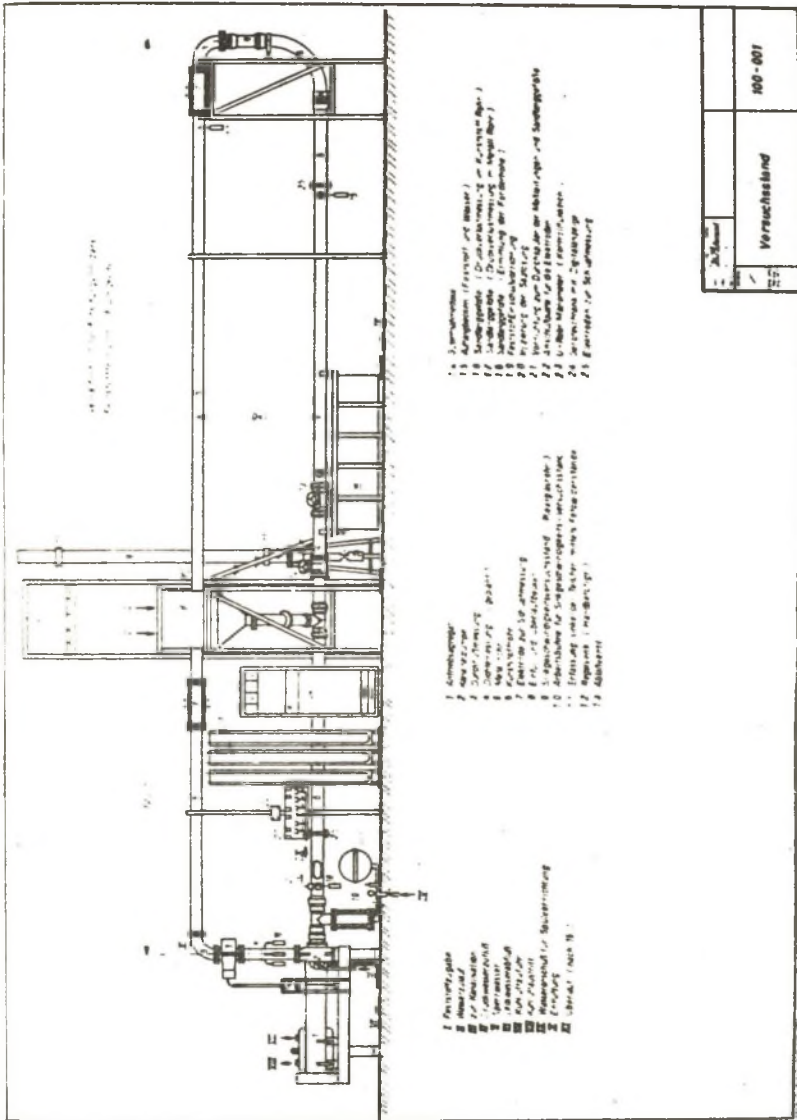


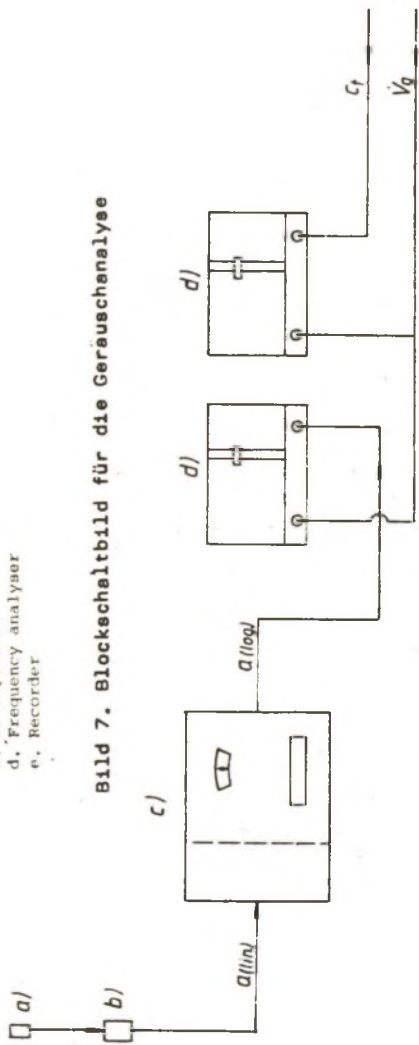
Bild 6. Schema des Versuchsreislaufes

	100-007
Versuchsland	



- a. Acceleration transducer
- b. Cable
- c. Preamplifier
- d. Frequency analyzer
- e. Recorder

Bild 7. Blockschaltbild für die Geräuschanalyse



Blockschaltbild Meßaufbau zur Aufzeichnung des Beschleunigungsniveaus

Block diagram: rig for recording the acceleration-level

- a) Beschleunigungsaufnehmer (acceleration pickup)
- b) Vorverstärker (pre-amplifier)
- c) Frequenzanalyator mit Meßverstärker (wave analyzer with amplifier)
- d) x-y Recorder

Bild 8. Parallele Registrierung von Geräuschpegel und Transportkonzentration als Funktion der Gemischgeschwindigkeit

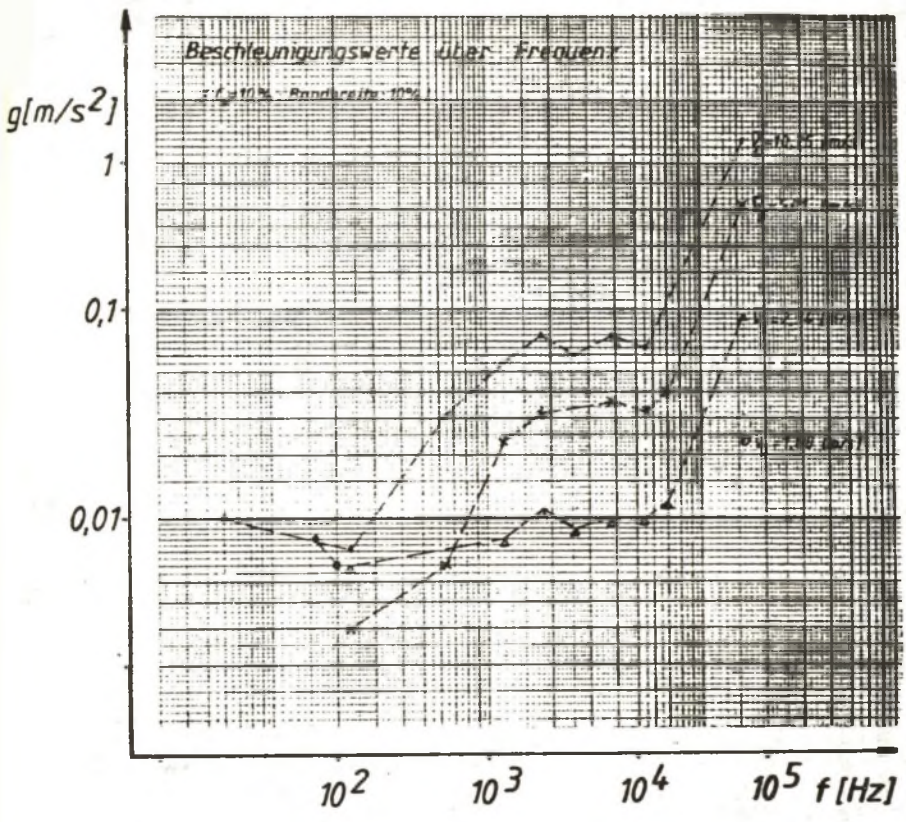


Bild 9. Abhängigkeit der Frequenzpegel von der mittleren Gemischgeschwindigkeit

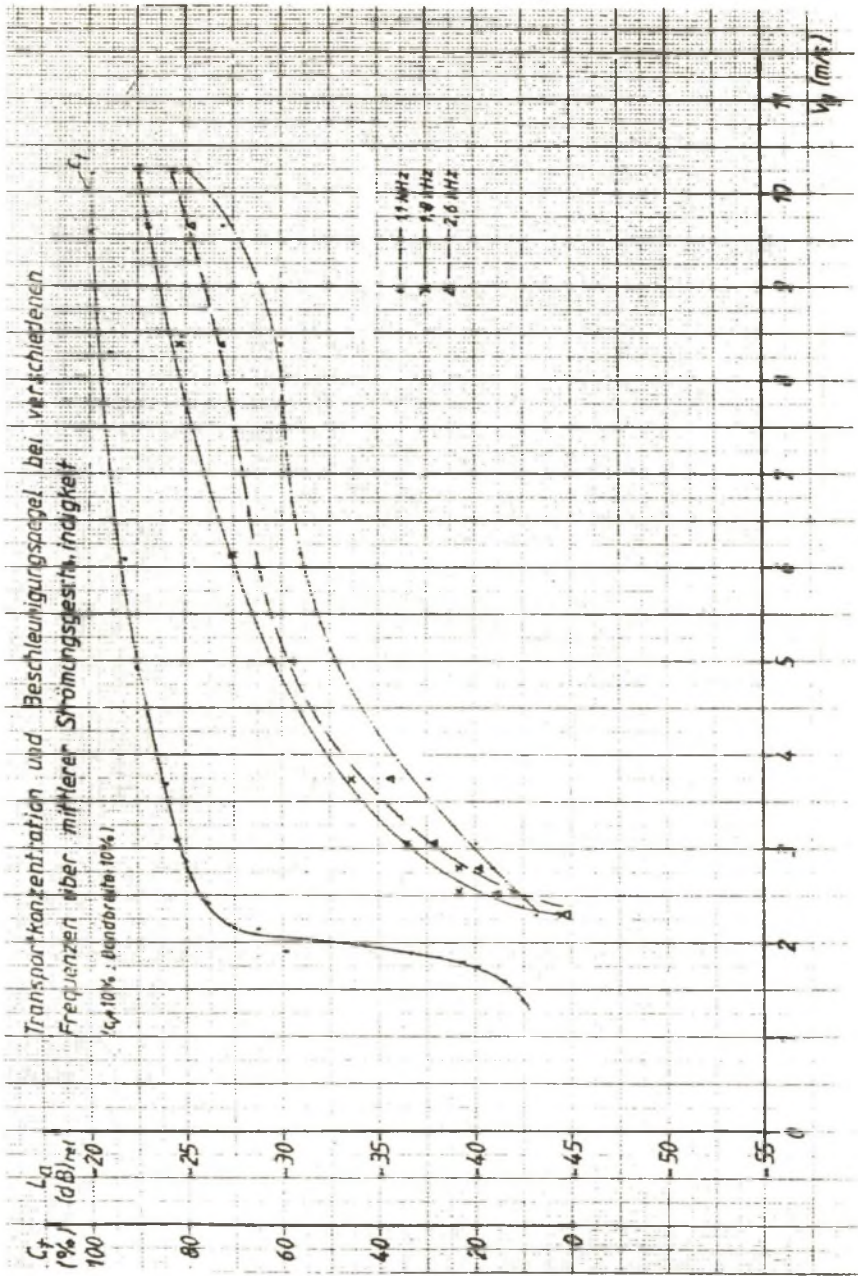


Bild 10. Transportkonzentration und Beschleunigungspegel bei verschiedenen Frequenzen als Funktion der Gemischgeschwindigkeit

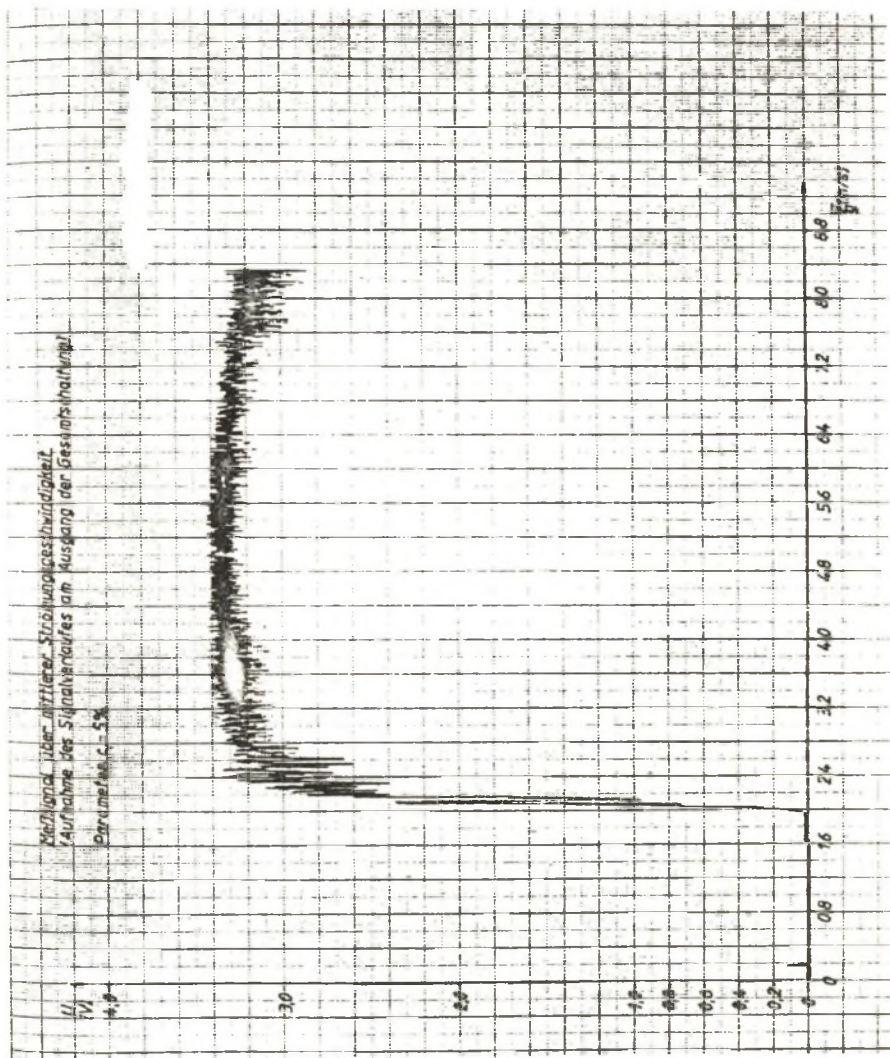


Bild 11. Ausgangssignal der Impedanzmessung für 5% Raumkonzentration in Abhängigkeit von der Gemischgeschwindigkeit

Kornverteilung

Quarzsand $\rho_s = 2,60 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

Dr. Paul Bern
Abt. Mech. H. G. C.

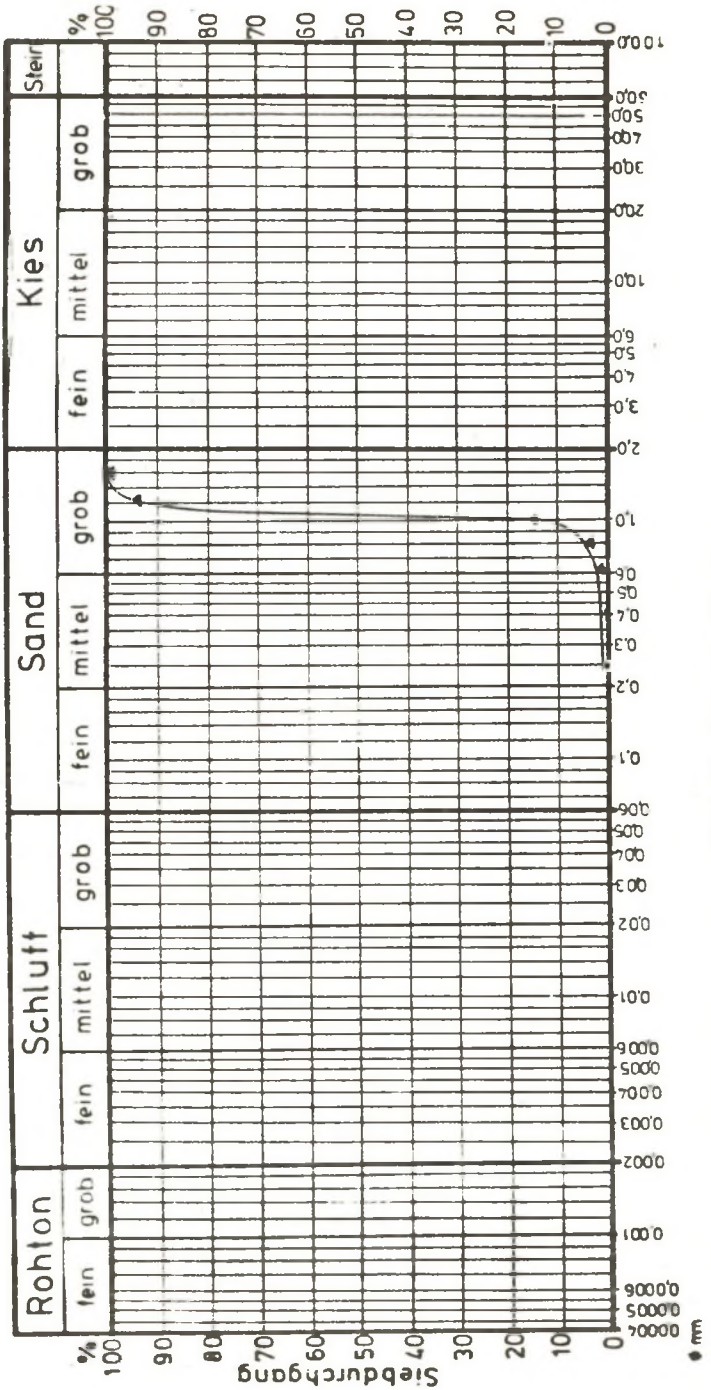


Bild 12. Kornverteilung

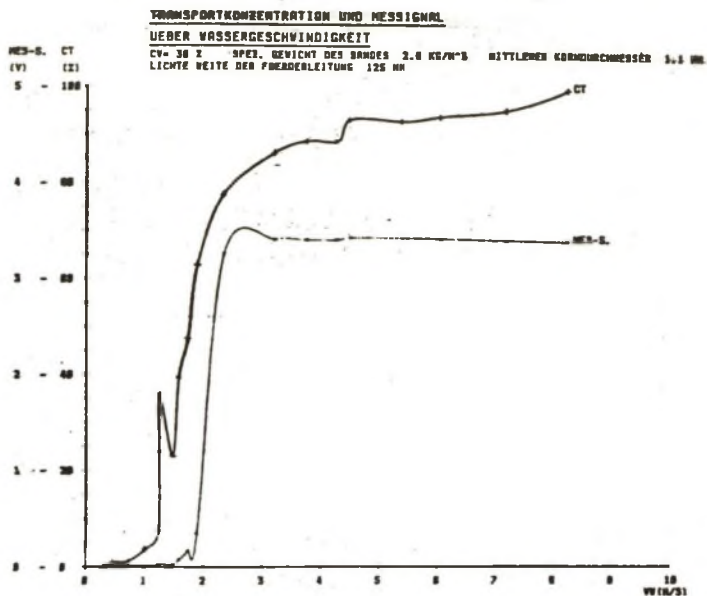


Bild 13. Abhängigkeit von Transportkonzentration und Ausgangssignal der Impedanzmessung von der Wassergeschwindigkeit

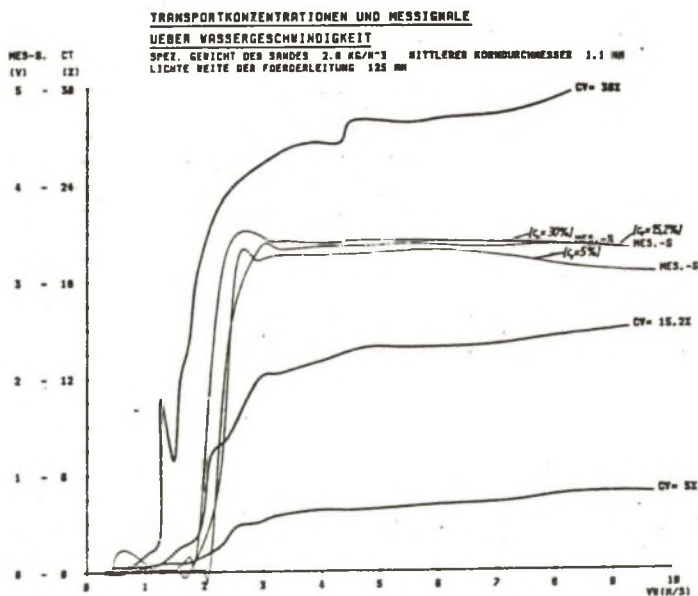


Bild 14. Transportkonzentration und Ausgangssignal der Impedanzmessung als Funktion der Wassergeschwindigkeit für mehrere Raumkonzentrationen

PREDKOŚCI KRYTYCZNE I KONCENTRACJA TRANSPORTU - NOWE PRACE
DOŚWIADCZALNE ODNOŚNIE TYCH WIELKOŚCI CHARAKTERYSTYCZNYCH

S t r e s z c z e n i e

Bodźcem do powstania tych prac było seminarium "Transport hydrauliczny i sedymentacja" odbyte w 1984 r. we Wrocławiu. Wtedy to stwierdzono, że zależności pomiędzy koncentracją transportu, poślizgiem, prędkościami przejściową i graniczną stanowią lukę w wiadomościach na te tematy. Przede wszystkim wyłoniło się pytanie jak mierzyć prędkość graniczną i jakie wartości koncentracji transportu jej odpowiadają. Doświadczenia przebiegały w obiegu doświadczalnym o średnicy nominalnej 125 mm i ok. 25 m długości. Obrano dwie różne drogi w celu pomiaru prędkości krytycznej: za pomocą dźwięku materiałowego oraz pomiaru oporności. Dotychczas uzyskane wyniki są bardzo obiecujące, mimo że prace nie dobiegły jeszcze końca.

КРИТИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ И ТРАНСПОРТНАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ -
НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ КАСАЮЩИЕСЯ ЭТИХ
ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Р е з ю м е

Данные работы были предприняты из-за недостатка сведений по вопросу транспортной концентрации, буксированием, переходной и предельной скоростям. Основным вопросом является способ замера предельной скорости и отвечающей ей значений транспортных концентраций. Опыты производились в трубопроводе номинальным диаметром в 125 мм длиной около 25 м, в замкнутом цикле. Критическая скорость измерялась при помощи анализа звука и замера электрического сопротивления. Были получены весьма обещающие результаты.