



TECHNISCHER BERICHT 92-06

Herstellung von Bentonit- Granulat mit hoher Schüttdichte zur Bohrlochabdichtung

W. Naundorf
R. Wollenberg

Mai 1992

Bergakademie Freiberg
Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Umwelt-
verfahrenstechnik und Agglomerationstechnik

TECHNISCHER BERICHT 92-06

Herstellung von Bentonit- Granulat mit hoher Schüttdichte zur Bohrlochabdichtung

W. Naundorf
R. Wollenberg

Mai 1992

Bergakademie Freiberg
Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Umwelt-
verfahrenstechnik und Agglomerationstechnik

Der vorliegende Bericht wurde im Auftrag der Nagra erstellt. Die Autoren haben ihre eigenen Ansichten und Schlussfolgerungen dargestellt. Diese müssen nicht unbedingt mit denjenigen der Nagra übereinstimmen.

"Copyright (c) 1992 by NAGRA, Wettingen (Schweiz). / Alle Rechte vorbehalten.

Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Uebersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw."

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen von Machbarkeitsuntersuchungen wurden im Labor- und Technikumsmaßstab Preßlinge und Granulat aus einem Na-Bentonit MX-80 (Wyoming) hergestellt. Die Versuche hatten das Ziel, einen Verfahrensweg für die Herstellung von dispersen, schüttfähigen Bentonitprodukten mit variabler oberer Korngrenze und hoher Schüttdichte von $> 1,5 \text{ g/cm}^3$ (bezogen auf Trockenmasse) zu finden. Diese Schüttdichte ist erforderlich, um beim Einsatz des Bentonitgranulates zur Versiegelung von Bohrlöchern oder von anderen untertägigen Hohlräumen die geforderten Materialeigenschaften der Versiegelung zu erreichen.

Durch Preßversuche mit der hydraulischen Stempel­presse mit geschlossener Preßform wurden die optimalen Bedingungen für die einachsige Verpressung gefunden:

Preßdruck:	$\geq 200 \text{ MPa}$
Preßtemperatur:	$20 \text{ }^\circ\text{C}$
Feuchtegehalt:	$\approx 1 \%$

Unter diesen Bedingungen entstehen Bentonitpreßlinge mit Rohdichten von $2,1$ bis $2,2 \text{ g/cm}^3$ und guten Druck- und Abriebfestigkeiten, die auch hohe Beanspruchungen beim Handling gestatten.

Aus den Bentonitpreßlingen kann ein dichtes, festes und rieselfähiges Granulat durch Zerkleinern gewonnen werden, wenn die Zerkleinerungsbedingungen an die physikalischen Eigenschaften der Preßlinge angepaßt sind.

Anhand von Schüttversuchen mit Bentonitgranulat und -preßlingen wurde festgestellt, daß nach den häufig bevorzugten Korngrößenverteilungsfunktionen zur Herstellung optimaler Packungsdichten, wie z. B. die Fullerkurve, keine Schüttdichten von $> 1,5 \text{ g/cm}^3$ erzielbar sind. Die höchsten Schüttdichtewerte ergeben sich stets dann, wenn eine Grobkornfraktion in Form von Preßlingen mit einem staubfreien, feinkörnigen Granulat, das als Füllmaterial fungiert, kombiniert wird. Bei maximalen Preßlingsabmessungen von 10 bis 50 mm sollte das Granulat eine Körnung von $0,63 - 3 \text{ mm}$ haben. Das optimale Mengenverhältnis von Preßlingen und Granulat ist etwa $70 : 30$.

Unter diesen Bedingungen sind Schüttdichtewerte von $1,6$ bis $1,7 \text{ g/cm}^3$ erreichbar, wenn die Bentonitprodukte einzeln und wechselweise aus separaten Behältnissen geschüttet werden. Nach Schüttung einer Preßlingsschicht werden deren Hohlräume durch das feinkörnige und rieselfähige Granulat ausgefüllt.

Für die Herstellung von qualitätsgerechten Bentonitpreßlingen ist die Formmuldenwalzenpresse eine geeignete technische Presse. Ein besonderer Vorteil dieses Pressentypes ist die günstige Preßdruckverteilung bei der Gutverdichtung, so daß hohe Preßlingsdichten erreicht werden können. Durch Auswechseln der Preßsegmente können Form und Größe der Preßlinge variiert werden.

Das als Füllmaterial benötigte Granulat (0,63 - 3 mm) kann unter technischen Bedingungen aus Brikettbruch, -abrieb sowie ganzen Preßlingen mit der Spezialgranulatomühle erzeugt werden.

SUMMARY

As part of a feasibility study, compacted pellets and granulate were produced from an Na-bentonite (MX-80, Wyoming), initially in the laboratory and later on a larger scale. The aim of the experiments was to find a technique for manufacturing disperse, pourable bentonite products with variable maximum grain size and a high bulk density of $> 1.5 \text{ g/cm}^3$ (related to dry mass). This bulk density is required in order to achieve the necessary material properties when using bentonite products to seal boreholes or other underground cavities.

Compaction tests using a hydraulic press with closed mould provided the optimum conditions for uniaxial pressing:

Pressing power:	$\geq 200 \text{ MPa}$
Temperature:	20°C
Moisture content	$\approx 1\%$

Compacted bentonite pellets with densities of 2.1 to 2.2 g/cm^3 and good compressive strength and abrasion resistance can be produced under these conditions; these also withstand high stresses during handling.

A dense, pourable granulate can be produced from the bentonite by way of pulverization, provided the pulverization conditions are adjusted to the physical properties of the pellets.

Pouring tests with bentonite granulate and bentonite pellets showed that, in terms of the preferred grain size distribution functions for producing optimum packing densities (e.g. the Fuller curve), bulk densities of $> 1.5 \text{ g/cm}^3$ cannot be achieved. The highest bulk density values result if a coarse-grained fraction in the form of pellets is combined with dust-free, fine-grained granulate which acts as a filling material. With maximum pellet dimensions of 10 to 50 mm, the granulate should have a grain size of 0.63-3 mm. The optimum quantity ratio of pellets to granulate is around 70:30.

Under such conditions, bulk density values of 1.6 to 1.7 g/cm^3 can be achieved if the bentonite products are poured individually and alternately from separate containers. After a layer of pellets has been poured, the voids are filled with the fine-grained pourable granulate.

A roller (cylinder) press is a suitable machine for manufacturing high-quality bentonite pellets. A particular advantage of this type of press is the favourable pressure distribution on compaction which allows high densities to be achieved. The shape and size of the pellets can be varied by changing the pressing segments.

The granulate which acts as a filling material (0.63-3 mm) can be produced commercially from breaking up or abrading briquettes, or from whole pellets, using a special granulate mill. A method is suggested for the production of the granulate products.

RESUME

Dans le cadre d'investigations, des pièces estampées et des granules ont été fabriquées à partir de bentonite au Na, MX-80 (Wyoming), à l'échelle du laboratoire et de l'installation pilote. Ces essais avaient pour objet l'élaboration d'un procédé de fabrication de particules de bentonite aptes à être déversées, de granulométries diverses permettant d'atteindre une densité en vrac $> 1,5 \text{ g/cm}^3$ (pour la masse sèche). Une telle densité est nécessaire pour réaliser, à l'aide de grains de bentonite, un scellement de haute qualité de forages ou autres cavités souterraines.

Par des essais de compression réalisés à l'aide d'une presse à estamper hydraulique à piston avec matrice fermée, il a été possible de déterminer les conditions optimales pour le pressage uniaxial.

Pression de pressage:	$\geq 200 \text{ MPa}$
Température de pressage:	$20 \text{ }^\circ\text{C}$
Humidité:	$\approx 1\%$

On obtient dans ces conditions des pièces de bentonite estampées de densité brute de $2,1$ à $2,2 \text{ g/cm}^3$, présentant une bonne résistance à la compression et à l'abrasion qui peuvent en outre être soumises à de fortes sollicitations lors de leur manutention.

Il est possible d'obtenir des granules denses et résistantes, aptes à ruisseler, par mise en menus morceaux de pièces de bentonite estampées lorsque les conditions de réduction de dimensions sont bien adaptées aux caractéristiques physiques des pièces estampées.

Des essais de déversement de granules avec des pièces estampées de bentonite, en utilisant les distributions de granulométrie généralement recommandées pour la réalisation de densités en vrac optimales, telles par exemple celles données par la courbe de Fuller, ont montré qu'il n'était pas possible de dépasser $1,5 \text{ g/cm}^3$. Les densités en vrac maximales sont réalisées lorsqu'on introduit de fines granules exemptes de poussières, comme matériau de remplissage dans un lit de forte granulométrie constitué de pièces estampées. Pour des dimensions maximales des pièces estampées de 10 à 50 mm le matériau de remplissage devrait présenter une granulométrie de $0,63$ à 3 mm . Le rapport massique optimal entre pièces estampées et granules se situe aux alentours de $70 : 30$.

Dans ces conditions des densités en vrac de $1,6$ à $1,7 \text{ g/cm}^3$ sont atteignables si les produits de bentonite sont déversés alternativement à partir de conteneurs distincts. Après mise en place d'une couche de pièces estampées les interstices subsistant sont remplis de granules aptes au ruissellement.

Une presse à rouleaux pour matricer constitue un équipement adéquat pour la fabrication de pièces de bentonite estampées de qualité. Un avantage particulier de ce type de presse est représenté par la répartition favorable de la force de compaction lors du pressage de la bentonite, ce qui permet d'obtenir des pièces estampées de densité élevée. Il est possible de varier la forme et les dimensions des pièces estampées en changeant les segments portant les matrices de la presse.

Le matériau de remplissage nécessaire, les granules (0,63 - 3 mm), peut pratiquement être réalisé à partir de bris, débris ou de pièces estampées entières à l'aide d'une meule à granules spéciale. Le présent rapport propose une méthode d'élaboration des granules.

Inhaltsverzeichnis		<u>Seite</u>
ZUSAMMENFASSUNG		I
SUMMARY		III
RESUME		V
INHALTSVERZEICHNIS		VII
VERZEICHNIS DER FIGUREN		VIII
VERZEICHNIS DER TABELLEN		X
SYMBOLVERZEICHNIS		XI
1	Aufgabenstellung	1
2	Charakterisierung des Bentonits	2
3	Laborversuche zur Herstellung von Bentonit-Preßlingen	9
4	Laborversuche zur Herstellung von Bentonit-Granulat	26
5	Laborversuche zur Erzielung einer hohen Schüttdichte von Bentonit-Produkten aus Preßlingen und Granulaten	29
6	Herstellung von Bentonitpreßlingen im halbtechnischen Maßstab und Technologievorschlag	37
7	Schlussfolgerungen	43

Verzeichnis der Figuren

		<u>Seite</u>
Figur 1	Röntgenbeugungsanalyse	3
Figur 2	Korngrößenverteilung des Bentonits	4
Figur 3	Trocknungsverlauf von Bentonit	5
Figur 4	Differential-Thermoanalyse	6
Figur 5	Thermogravimetrische Analyse	7
Figur 6	Einfluß des Preßdrucks auf die Rohdichte von Bentonitpreßlingen	11
Figur 7	Einfluß des Preßdrucks auf die Druckfestigkeit von Bentonitpreßlingen	12
Figur 8	Einfluß des Preßdrucks auf die Abriebfestigkeit von Bentonitpreßlingen	13
Figur 9	Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Rohdichte von Bentonitpreßlingen	15
Figur 10	Einfluß des Feuchtegehaltes auf die reduzierte Rohdichte von Bentonitpreßlingen	16
Figur 11	Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Druckfestigkeit von Bentonitpreßlingen	17
Figur 12	Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Abriebfestigkeit von Bentonitpreßlingen	18
Figur 13	Einfluß der Preßdauer auf die Rohdichte von Bentonitpreßlingen	20
Figur 14	Einfluß der Preßdauer auf die Druckfestigkeit von Bentonitpreßlingen	21
Figur 15	Einfluß der Preßdauer auf die Abriebfestigkeit von Bentonitpreßlingen	22
Figur 16	Einfluß des Formates auf die Rohdichte von Bentonitpreßlingen	23

Verzeichnis der Figuren (Fortsetzung)

		<u>Seite</u>
Figur 17	Einfluß des Formates auf die Druckfestigkeit von Bentonitpreßlingen	24
Figur 18	Granulatmühle	27
Figur 19	Zerkleinerung von Preßlingen mit der Granulatmühle	30
Figur 20 - 22	Korngrößenverteilung und Schüttdichte von zusammengesetzten Bentonitgranulaten	31-33
Figur 23	Schema der Kompaktieranlage des Technikums	37
Figur 24	Preßsegment	38
Figur 25	Technologievorschlag zur Herstellung von Bentonitpreßlingen und -granulat	41

Verzeichnis der Tabellen

		<u>Seite</u>
Tabelle 1	Zusammensetzung von Bentonit nach dem energiedispersiven Röntgenstrahlen-Analyseverfahren KEVEX	2
Tabelle 2	Reindichte, Schüttdichte und Rütteldichte von Bentonit (Sekundärkorn)	8
Tabelle 3 - 6	Zusammensetzung und Schüttdichte von Bentonitprodukten	34-36

Symbolverzeichnis

b	- Schlitzweite Spaltsieb in mm
d	- Korngröße in mm
d_m	- mittlere Korngröße in mm
d_{95}	- Korngröße für einen Durchgang des Prüfsiebes von 95 %
D_p	- Durchgang des Prüfsiebes in %
F_A	- Achslast in kN
F/b	- spezifische Anpreßkraft in kN/cm
h	- Preßlingsstärke
m	- Pressendurchsatz in t/h
n	- Drehzahl
n_p	- Pressendrehzahl
n_{st}	- Stopfschneckendrehzahl
P	- Leistungsaufnahme des Pressenmotors in kW
$R10(100)$	- Rückstand auf dem 10 mm-Prüfsieb nach 100 Umdrehungen der Prüftrommel in %
$R30(100)$	- Rückstand auf dem 30 mm-Prüfsieb nach 100 Umdrehungen der Prüftrommel in %
t_p	- Preßdauer in s
v	- Geschwindigkeit in m/s
w	- Feuchtegehalt in %
W_m	- spezifischer Arbeitsbedarf bezog. auf Durchsatz in kWh/t
$W_{m > 10}$	- spezifischer Arbeitsbedarf bezog. auf Preßprodukt > 10 mm in kWh/t
Δd	- Körnung in mm
ϑ_p	- Preßtemperatur in °C
ρ_{roh}	- Rohdichte der Preßlinge in g/cm ³
$\rho_{roh, red}$	- reduzierte Rohdichte der Preßlinge (bezogen auf Trockenmasse) in g/cm ³
ρ_{Sch}	- Schüttdichte in g/cm ³
σ_p	- Druckfestigkeit in MPa
Ψ_m	- Anteil der Fraktion mit der Körnung $\Delta d = d_o/d_u$ in %
\varnothing	- Durchmesser in mm

1 AUFGABENSTELLUNG

In den vorgesehenen Verfüll- und Versiegelungskonzepten für radioaktive Endlager spielen Bentonite eine wesentliche Rolle. Der Bentonit soll u. a. auch als Versiegelungsmaterial für Bohrlöcher eingesetzt werden. Eine der betrachteten Varianten für die Bohrlöcherversiegelung erfordert den Einsatz eines dispersen Bentonitproduktes definierter Korngröße, das in die zu versiegelnden Hohlräume geschüttet werden kann. Voraussetzung hierfür ist, daß mit diesem Bentonitprodukt eine ausreichend hohe Schüttdichte realisiert werden kann, weil die Schüttdichte maßgebend ist für den durch Quellung bedingten Versiegelungseffekt. Für eine qualitätsgerechte Versiegelung werden Schüttdichten (bezogen auf Trockenmasse) des Bentonitproduktes von $> 1,5 \text{ g/cm}^3$ gefordert. Des weiteren soll das Bentonitprodukt möglichst staubfrei sein.

Das Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Umweltverfahrenstechnik und Agglomerationstechnik der Bergakademie Freiberg erhielt von der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Schweiz) den Auftrag, Verfahrenswege zur Herstellung eines geeigneten Bentonitproduktes durch Laboruntersuchungen und Versuche im halbtechnischen Massstab auszuarbeiten. Neben der Schüttdichte war die maximale Korngröße des Bentonitproduktes als wesentliches Qualitätsmerkmal zu berücksichtigen. Das vereinbarte Arbeitsprogramm beinhaltete sowohl die Herstellung von Preßlingen mit definierter Größe und Form als auch die Erzeugung von Granulaten durch Zerkleinern von Preßlingen. In Versuchsreihen sollten die Bedingungen systematisch ermittelt werden, unter denen die Produkte eine höchstmögliche Schüttdichte ergeben. Außerdem waren Proben der Bentonitprodukte in ausreichenden Mengen dem Institut für Geotechnik in Zürich zur Durchführung von Quellungsuntersuchungen zu übergeben. Die Quellungsuntersuchungen sollen letztlich Aufschluß über die Qualität der Bentonitprodukte hinsichtlich der für den Versiegelungseffekt maßgeblichen Merkmale, wie Quelldruck, Durchlässigkeit u. a. m., geben.

2 CHARAKTERISIERUNG DES BENTONITS

Für die Untersuchungen wurde vom Auftraggeber ein Na-Bentonit mit der Bezeichnung MX 80 aus Wyoming (USA) zur Verfügung gestellt. Die nach dem energiedispersiven Röntgenstrahlen-Analysenverfahren KEVEX ermittelte Elementarzusammensetzung ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

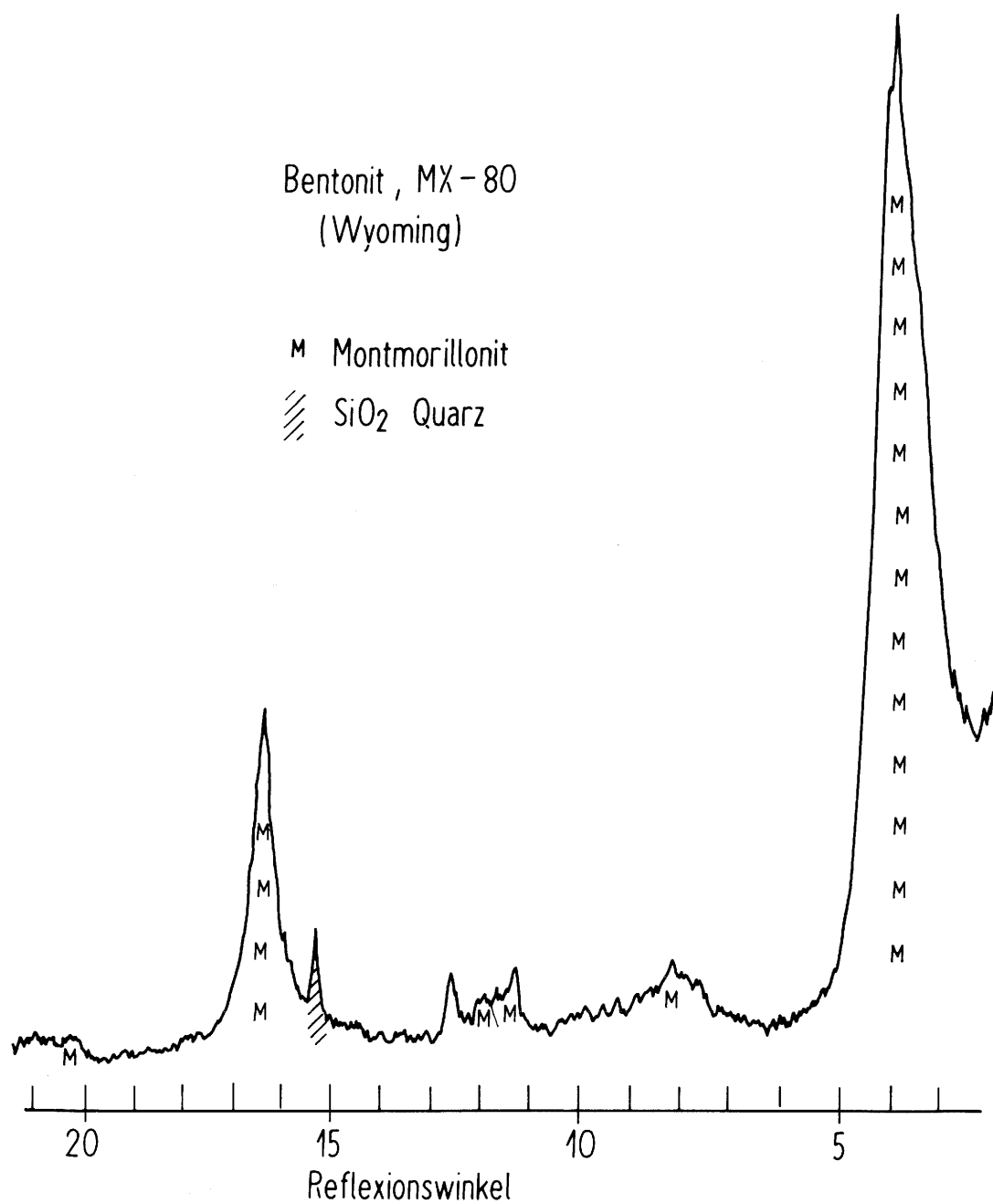
Tabelle 1: Zusammensetzung von Bentonit nach dem energiedispersiven Röntgenstrahlen-Analyseverfahren KEVEX

Na-Bentonit MX-80, Wyoming (USA)

Zusammensetzung Bentonit	Angaben in Ma.-%
Na ₂ O	2,15
MgO	2,19
Al ₂ O ₃	23,68
SiO ₂	64,82
SO ₃	1,37
K ₂ O	0,51
CaO	1,24
TiO ₂	0,12
FeO	3,71

Der für die guten Quelleigenschaften dieses Bentonits verantwortliche Na₂O-Gehalt beträgt 2,15 %. Die Röntgenbeugungsanalyse (Figur 1) zeigt, daß die mineralische Hauptkomponente eine Montmorillonit-Mischphase ist. Außerdem ist ein geringer Anteil an freiem Quarz enthalten.

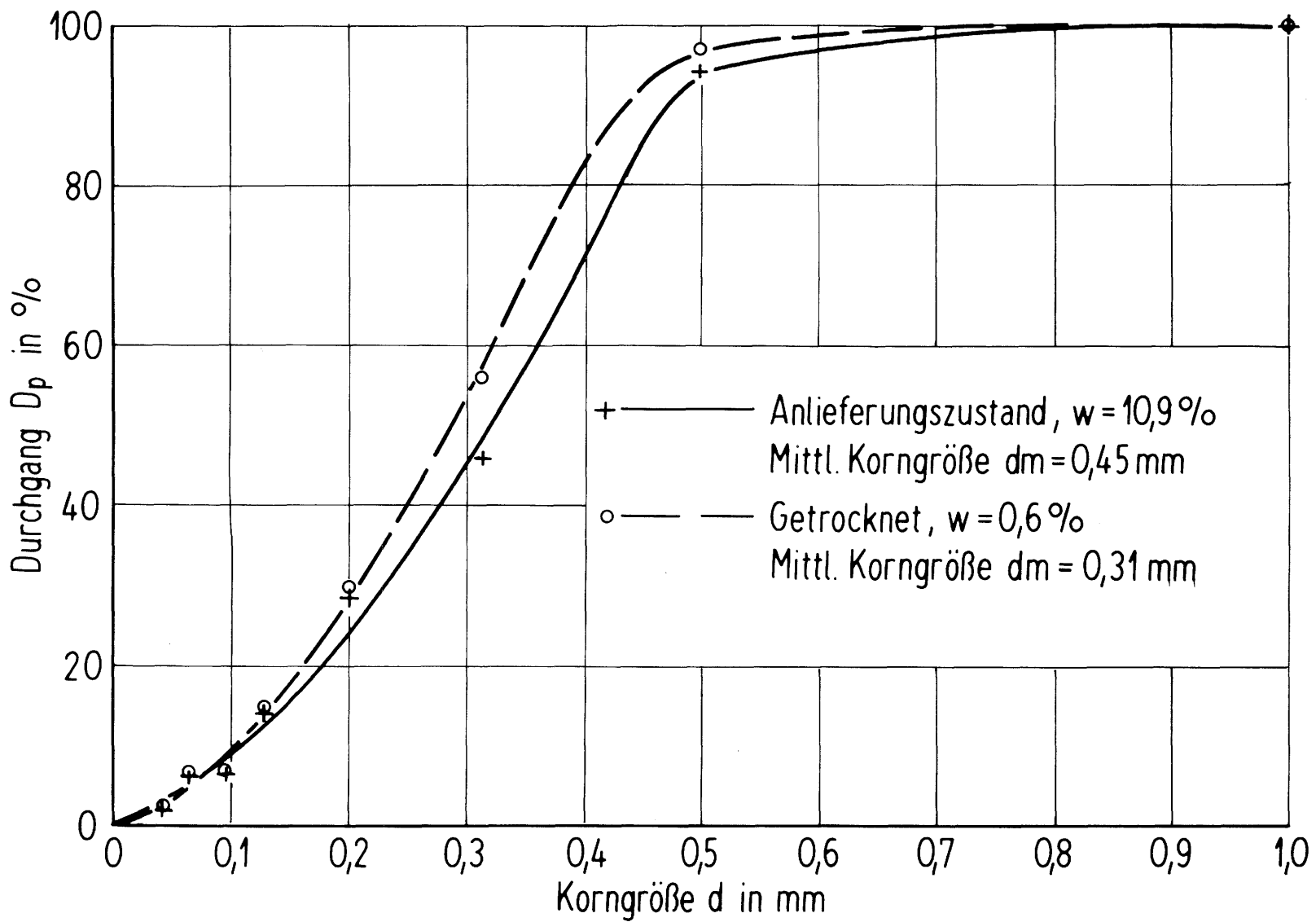
Die Korngrößenanalyse des angelieferten (w = 10,9 %) und getrockneten (w = 0,6 %) Bentonits ist in der Figur 2 graphisch dargestellt. Die Durchgangskurven repräsentieren Korngrößenverteilungen, die auch Sekundärkorn enthalten, das durch Agglomeration entstanden ist. Vom Auftraggeber wird für den Bentonit die maximale Größe des Primärkorns mit ca. 60 µm angegeben, bei einem Korngrößenanteil < 2 µm von ca. 75 - 80 %. Für die technologischen Eigenschaften des Bentonits, wie Schüttverhalten, Rieselfähigkeit, Lager- und Bunkerungseigenschaften sowie Preßverhalten, ist die angelieferte Kornverteilung maßgebend, für die eine mittlere Korngröße von $d_m = 0,45$ mm (angeliefert) bzw. $d_m = 0,31$ mm (getrocknet) gemessen wurde. Die d_{95} -Werte liegen bei ca. 0,5 mm. Durch Kornschumpfung und trockenungsbedingte Zerkleinerungsvorgänge verfeinert sich das Sekundärkorn etwas bei der Trocknung.

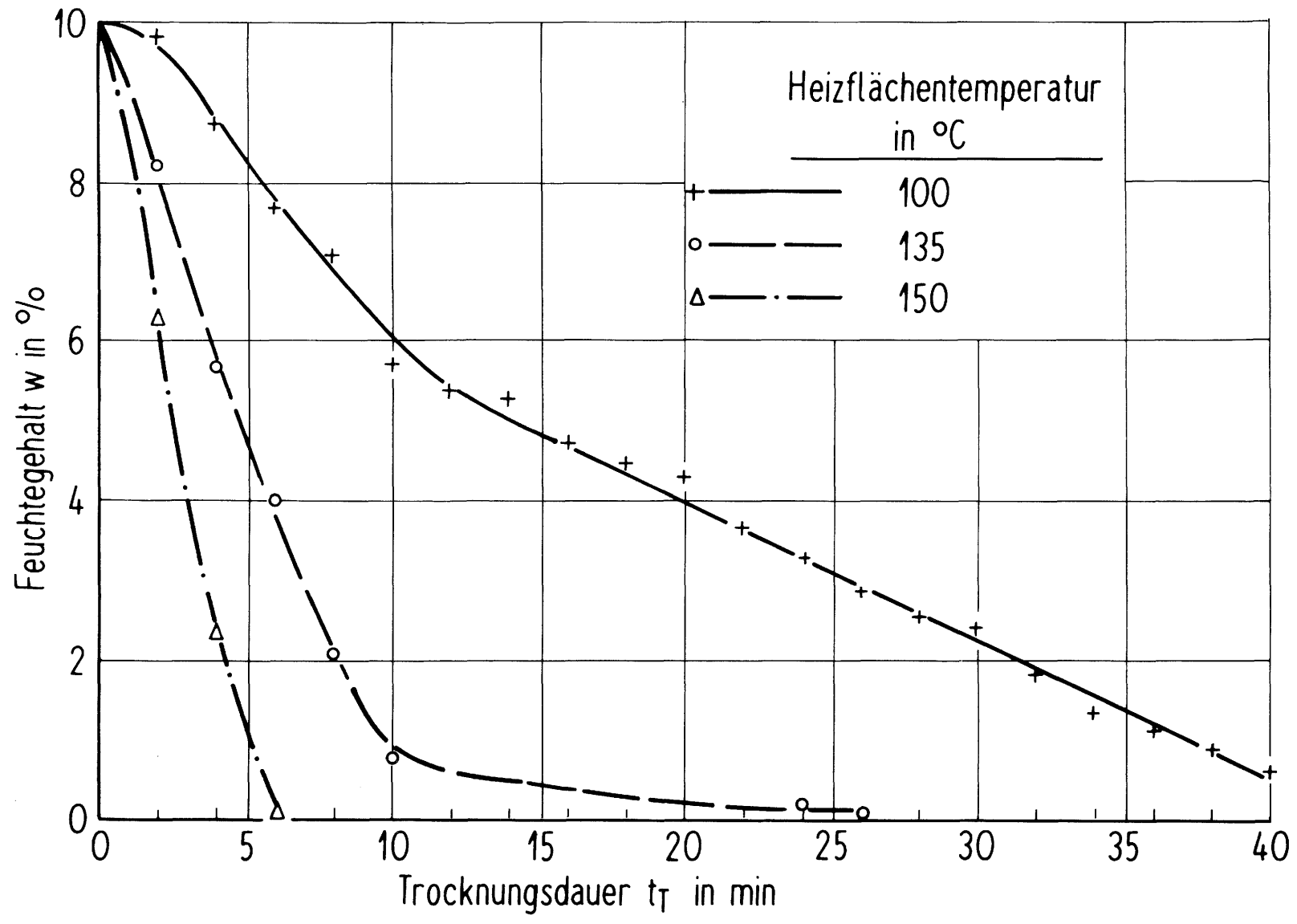


Figur 1: Röntgenbeugungsanalyse

Zur Darstellung des Trocknungsverhaltens des Bentonits wurden Trocknungsverlaufskurven bei verschiedenen Trocknungstemperaturen ermittelt (Figur 3). Für die Untersuchungen stand ein Laborröhrentrockner zur Verfügung. Der Restfeuchtegehalt der getrockneten Proben wurde mit Hilfe eines Schnellfeuchtebestimmers bei 130 °C bestimmt.

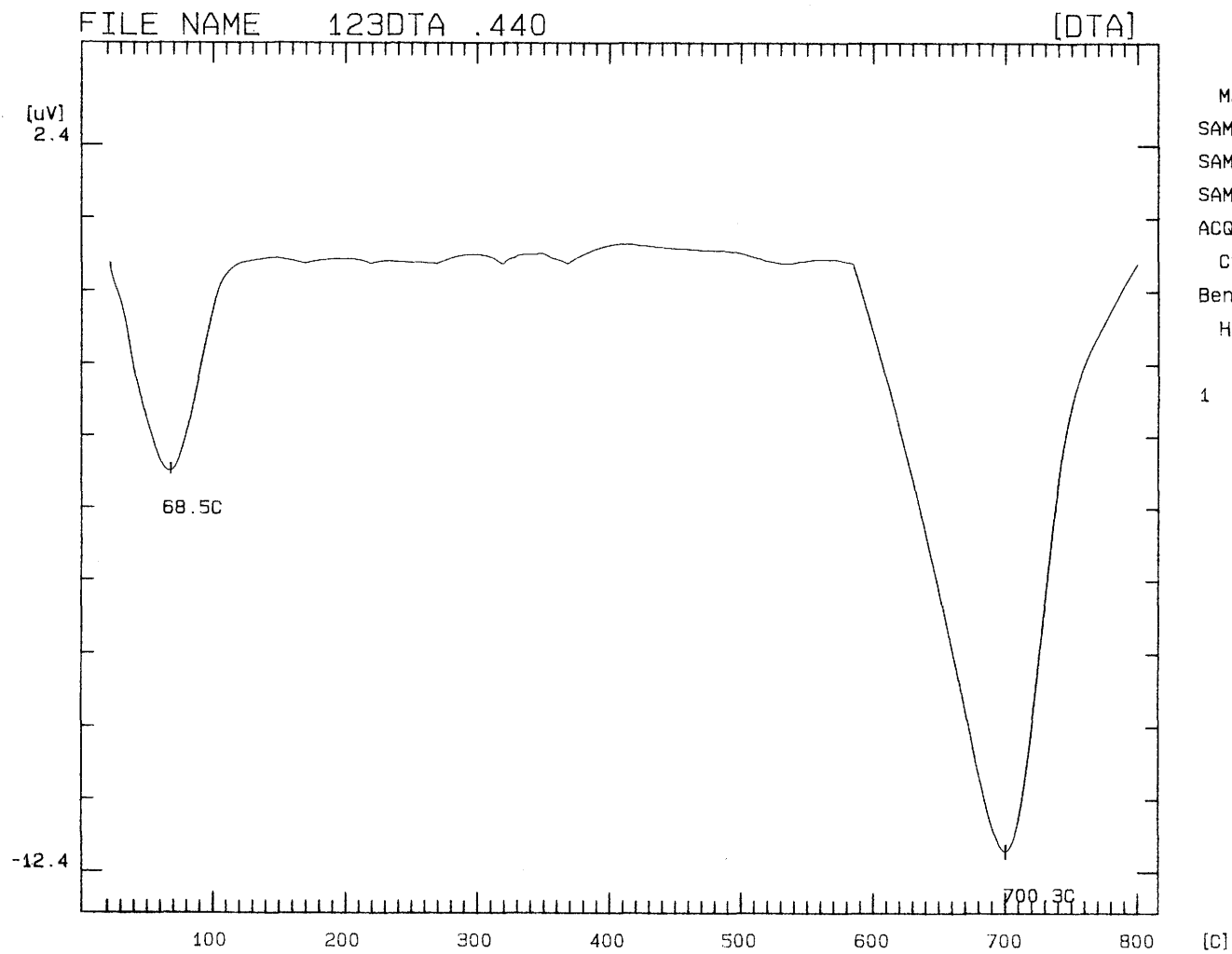
Figur 2: Korngrößenverteilung des Bentonits (Sekundärkorn)





Figur 3: Trocknungsverlauf von Bentonit

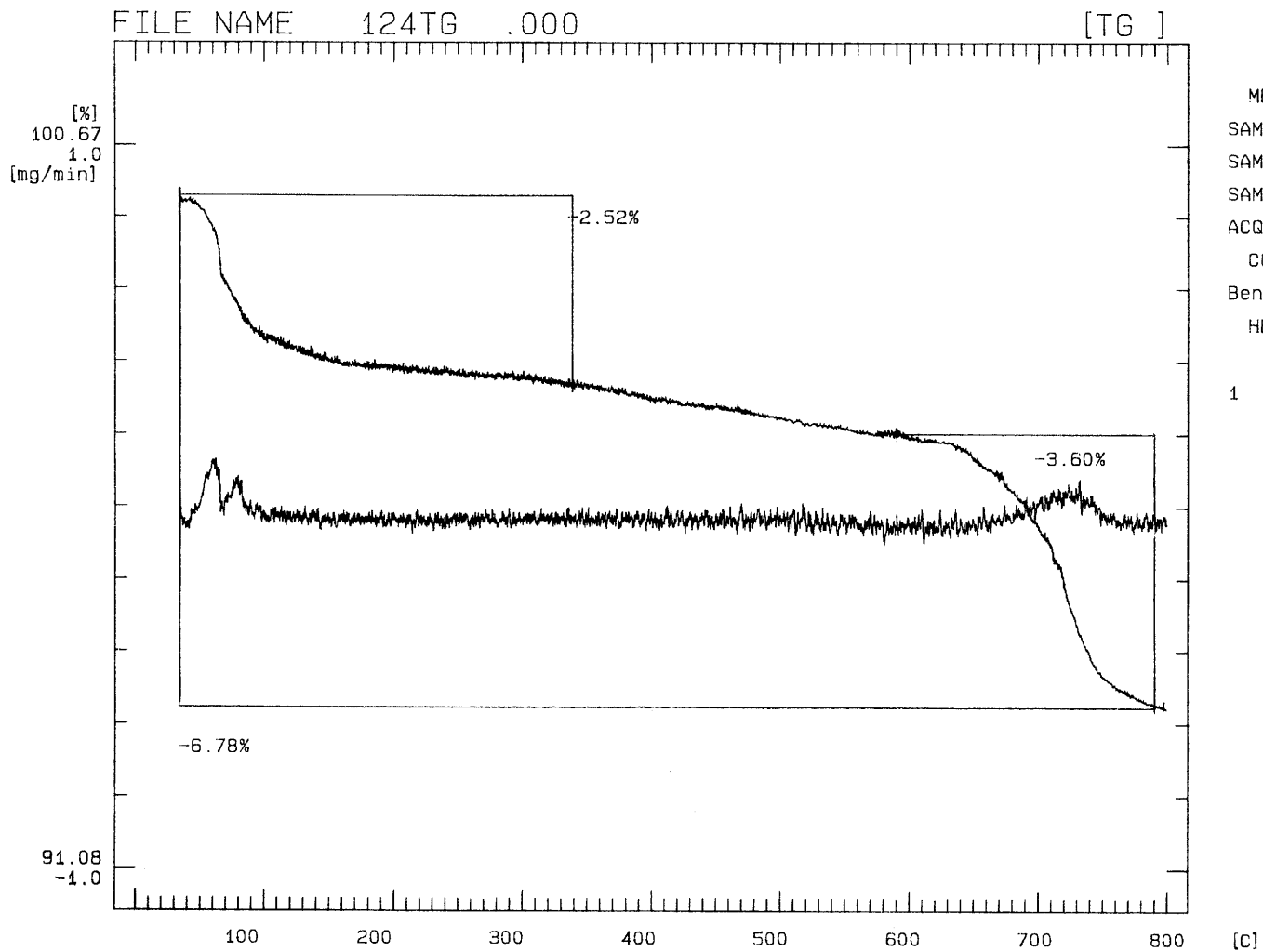
DATE 92/05/07



MEASURING CONDITIONS
 SAMPLE NAME Wollenberg
 SAMPLE SIZE 20.170 mg
 SAMPLING INT 1.0 sec
 ACQ. DATE 92/05/07
 COMMENT
 Bentonit
 HEATING PROGRAM
 RATE TEMP TIME
 1 10.0 800.0 0

Figur 4: Differential-Thermoanalyse

Figur 5: Thermogravimetrische Analyse



DATE 92/05/07

Die Trocknungskurven zeigen den für Tone typischen Verlauf. Nach einer Übergangszeit zur Aufwärmung der Probe erfolgt die Trocknung von locker gebundener Oberflächenfeuchte mit nahezu konstanter, hoher Trocknungsgeschwindigkeit. Durch einen Knick in der Trocknungskurve wird angezeigt, daß in einer weiteren Trocknungsphase stärker an die Feststoffoberfläche gebundene Feuchtigkeit mit geringerer Trocknungsgeschwindigkeit abgetrennt wird. Dies betrifft Feuchtigkeit in engeren Poren sowie in Adsorptionsschichten. Dabei verschiebt sich der Kurvenknicke mit steigender Trocknungstemperatur zu kleineren Trocknungszeiten und kleineren Feuchtegehalten. Die DTA- und TG-Analyse (Figuren 4 und 5) weist aus, daß bei Trocknungstemperaturen von 100 bis 150 °C nur physikalisch gebundene Feuchte entfernt wird. Das Kristallwasser des Bentonits wird erst bei Temperaturen von über 600 °C entbunden.

Zur Charakterisierung des Bentonits wurden des weiteren Reindichte-, Schüttdichte- und Rütteldichtemessungen durchgeführt (Tabelle 2). Nach Angaben des Auftraggebers hat der Bentonit eine Reindichte von 2,6 -2,8 g/cm³. Die nach der Xylolmethode am Sekundärkorn gemessene Reindichte liegt in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt zwischen 2,2 und 2,5 g/cm³. Die Schüttdichte des angelieferten und getrockneten Bentonits beträgt etwa 1,0 g/cm³. Für die Schüttdichtemessungen wurde ein würfelförmiges Gefäß mit einer Kantenlänge von 200 mm verwendet. Durch Einrütteln erhöhen sich die Schüttdichtewerte auf 1,2 bis 1,25 g/cm³.

Tabelle 2: Reindichte, Schüttdichte und Rütteldichte von Bentonit (Sekundärkorn)

Na-Bentonit MX-80 aus Wyoming (USA)

	angeliefert w = 10,9 %	getrocknet w = 0,6 %
Reindichte in g/cm ³	2,317	2,450
Schüttdichte in g/cm ³	1,017	1,038
Rütteldichte nach 1000 Stößen in g/cm ³	1,200	1,250

3 LABORVERSUCHE ZUR HERSTELLUNG VON BENTONIT-PREBLINGEN

Die Preßversuche wurden mit der hydraulischen Stempel­presse mit geschlossener Preßform durchgeführt. Folgende Parameter wurden variiert:

Preßdruck p :	100 bis 250 MPa
Preßtemperatur ϑ_p :	20 bis 120 °C
Feuchtegehalt w :	1,0 bis 11,0 %
Preßdauer t_p (bei p_{max}):	0 bis 30 s

Preßlingsformat (Rundformat):

\varnothing in mm	h in mm
50	12
	20
	30
30	12
	20
20	20

Neben der Rohdichte der Preßlinge wurde deren Druck- und Abriebfestigkeit nach genormten Prüfverfahren bestimmt. Bei der Druckfestigkeitsmessung wurde der Preßling zwischen zwei Prüf­stempel mit 30 mm Durchmesser eingespannt und bis zum Bruch belastet. Die Vorschubgeschwindigkeit des bewegten Prüf­stempels betrug 12 mm/min.

Die Bestimmung der Abriebfestigkeit erfolgte mit Hilfe einer Prüftrommel mit den Abmaßen 500 mm Durchmesser und 500 mm Breite. Im Trommelinneren befinden sich 4 Mitnehmer-Stege von 50 mm Höhe. Die Trommel rotiert mit einer Drehzahl von 25 min^{-1} . Nach 100 Trommelumdrehungen wurde als Maß für die Abriebfestigkeit der Rückstand auf dem 30 mm-Sieb ermittelt. Für die Festigkeitsprüfungen wurden aus Standardisierungsgründen vorrangig nur Preßlinge mit dem Format 50 mm Durchmesser und 20 mm Höhe verwendet.

Die angewandten Prüfverfahren für die Bestimmung der Druck- und Abriebfestigkeit sind in der Agglomerationstechnik allgemein üblich. Es ist zu beachten, daß sie Kennwerte für spezielle Beanspruchungsverhältnisse liefern, die sich aus der Probekörper-, Prüf­stempel- und Trommelgeometrie ergeben. Die Vergleichbarkeit zu anderen Prüfverfahren ist daher nur bezüglich der qualitativen Festigkeitstrends gegeben.

Das primäre Ziel dieser Versuche bestand in der Herstellung von Preßlingen mit hoher Rohdichte, weil das eine wichtige Voraussetzung für die Erzielung einer hohen Schüttdichte ist. Außerdem sollten die Preßlinge eine Mindestfestigkeit haben, um den Beanspruchungen beim Handling

standhalten zu können. Die Festigkeit ist außerdem erwünscht, um eine gewisse Tragfähigkeit zu gewährleisten, wenn die Preßlinge z.B. als Unterlage für Endlagerungskanister verwendet werden sollen.

Die Herstellung von qualitätsgerechten Bentonit-Preßlingen erfordert die Anwendung optimaler Preßparameter.

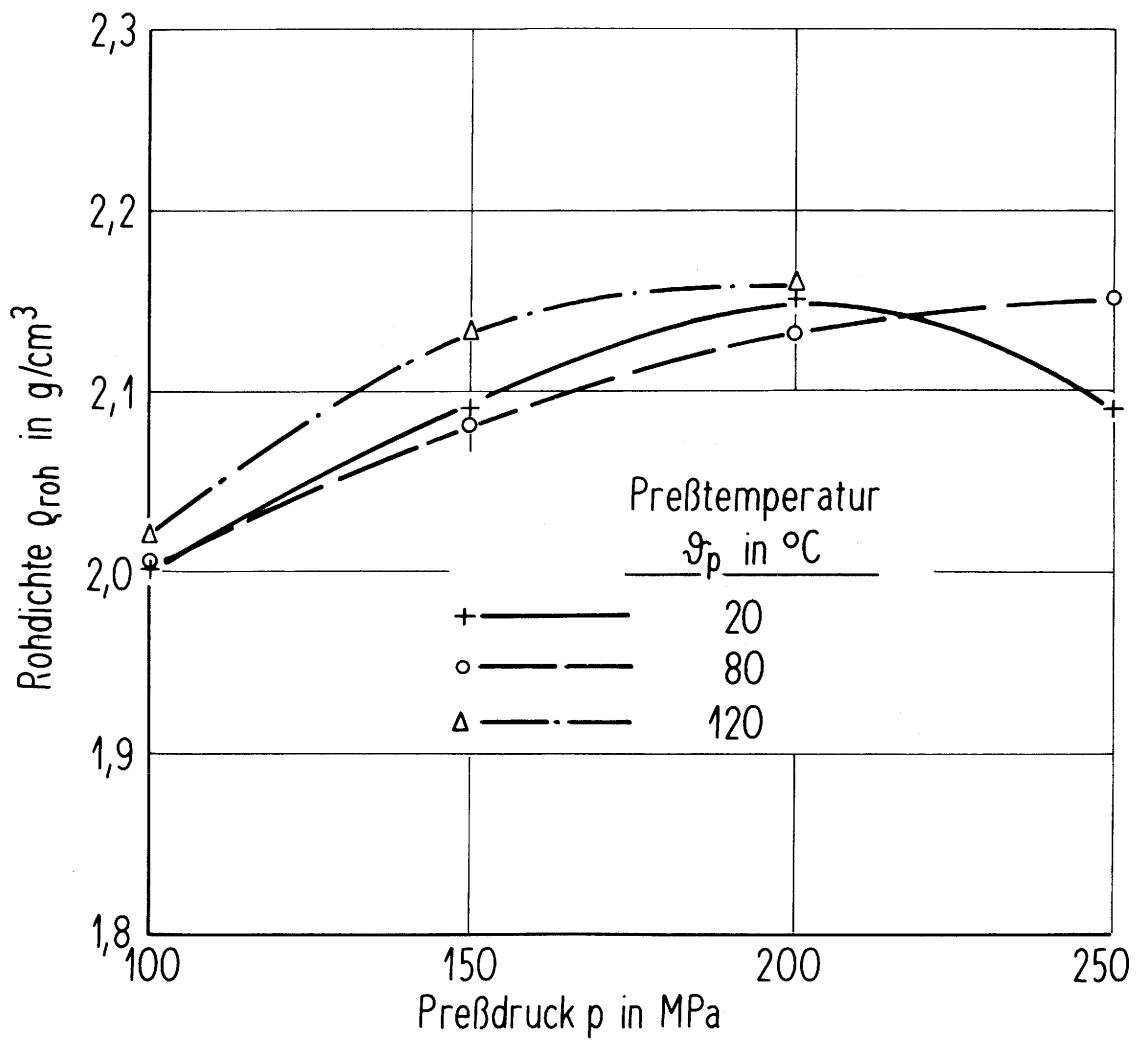
Einfluß des Preßdrucks (Figuren 6 - 8)

Hohe Rohdichten und Festigkeiten sind nur unter Anwendung hoher Preßdrücke erzielbar. Die positive Wirkung des Preßdruckes geht erst dann verloren, wenn bei zu hohen Drücken im überoptimalen Bereich Gefügebeschädigungen in den Preßlingen durch eine zu starke elastische Rückexpansion beim Ausstoßen aus der Preßform oder lokale Überpressungserscheinungen auftreten. Bei Anwendung eines Preßdruckes von 200 MPa entstehen aus dem getrockneten Bentonit Preßlinge mit einer Rohdichte zwischen 2,1 und 2,2 g/cm³ (Figur 6). Die Festigkeit dieser Preßlinge kann als gut eingeschätzt werden. Mit Druckfestigkeiten von > 20 MPa und Abriebfestigkeiten von > 80 % (Figuren 7, 8) haben die Bentonitpreßlinge eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen die Beanspruchungen bei der Handhabung und dürften auch ausreichend fest sein, um eine stabile Unterlage für Endlagerungskanister zu bilden. Diese Werte gelten für rein axiale Verdichtung des Bentonits. Bei gleichzeitiger Querverdichtung (Walzenpresse) sind höhere ρ_{roh} -Werte erreichbar.

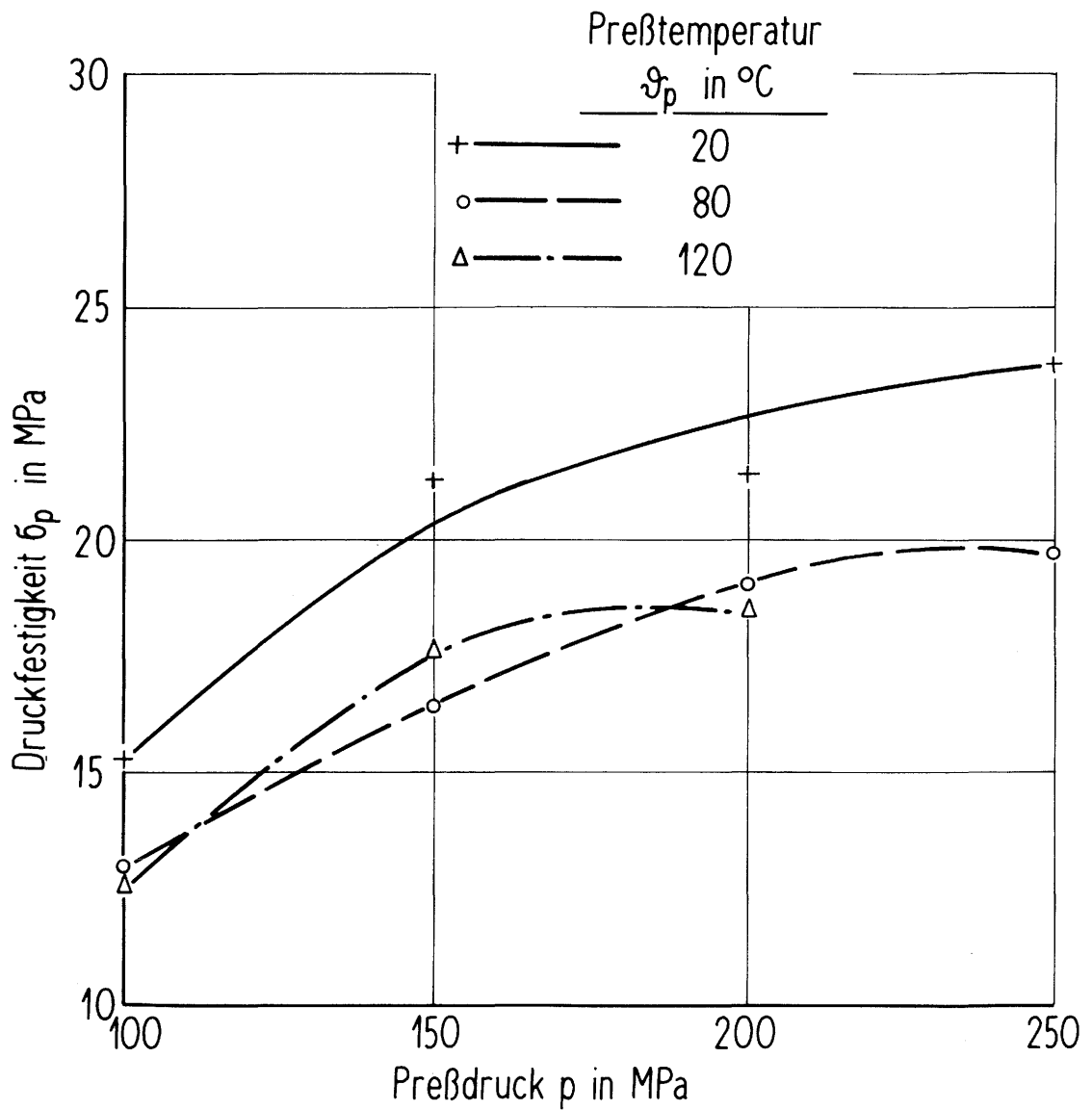
Einfluß der Preßtemperatur (Figuren 6 - 8)

Für anorganische Preßgüter gilt allgemein, daß durch Anwenden erhöhter Preßtemperaturen die Qualität der Preßlinge gesteigert werden kann. Mit zunehmender Preßtemperatur werden die druckplastischen Eigenschaften der Materialien verbessert und die Bindekräfte aktiviert. Dies trifft im Prinzip auch für den Bentonit zu. Bei der Verpressung des Bentonits tritt jedoch ein preßtechnisch bedingter gegenläufiger Effekt auf, der zu einer Beeinträchtigung der Preßlingsqualität führt. Der erwärmte Bentonit hat eine sehr große Haftneigung an die auf gleiche Temperatur aufgeheizten Preßwerkzeuge. Daraus resultieren Probleme beim Auslösen der Preßlinge aus der geschlossenen Preßform, die sich in sichtbaren Rissen im Preßlingsgefüge äußern. Der Qualitätsverlust wird vor allem bei der Druckfestigkeit (Figur 7) deutlich. Eine Erhöhung der Preßtemperatur bei der Herstellung von Bentonitpreßlingen ist daher nicht zu empfehlen. Es muß auch bei anderen Preßwerkzeugen mit ähnlichen Problemen gerechnet werden.

Feuchtegehalt $w = 1,0\%$

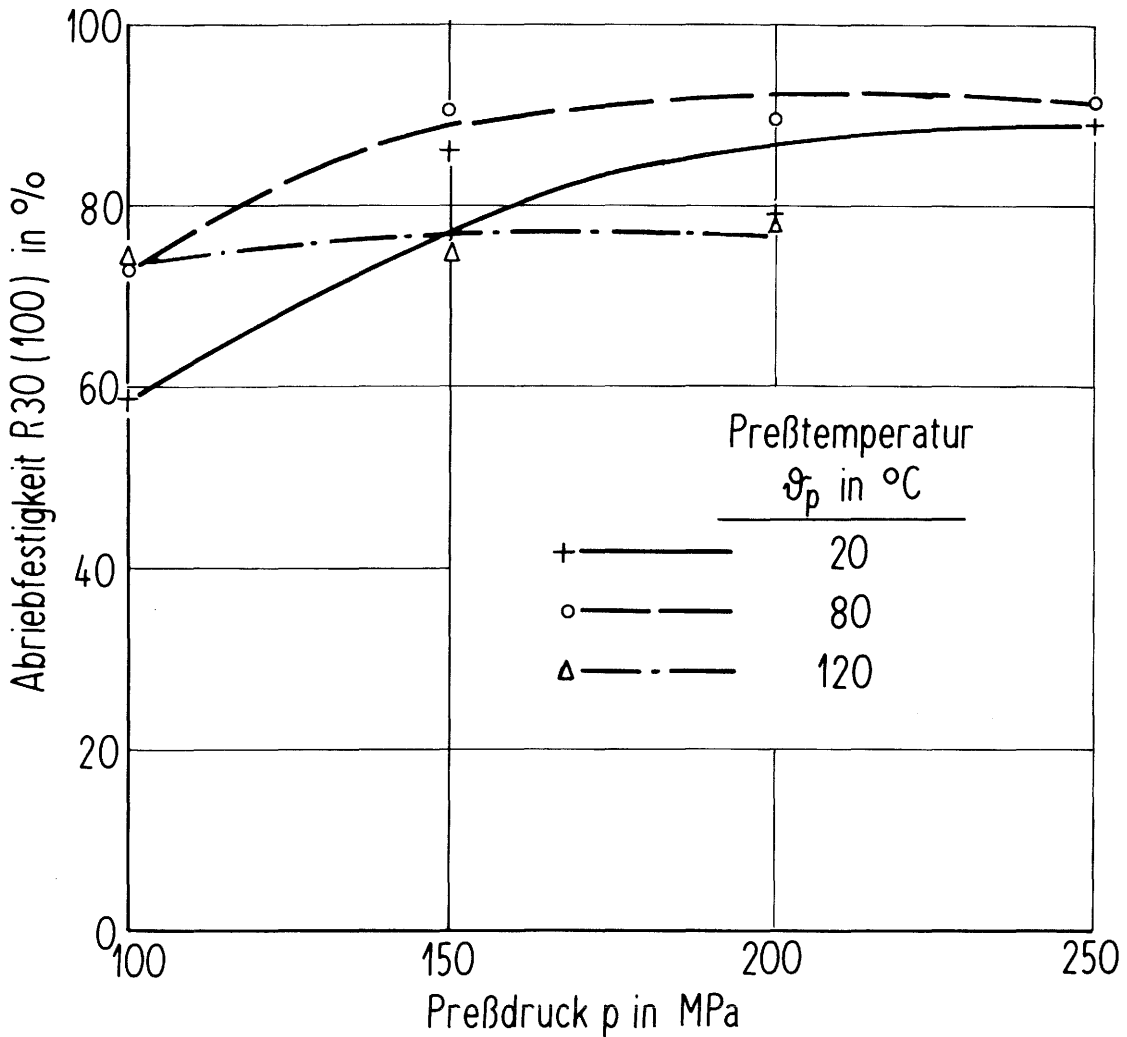


Figur 6: Einfluß des Preßdrucks auf die Rohdichte von Bentonitpreßlingen

Feuchtegehalt $w = 1,0\%$ 

Figur 7: Einfluß des Preßdrucks auf die Druckfestigkeit von Bentonitpreßlingen

Feuchtegehalt $w = 1,0\%$



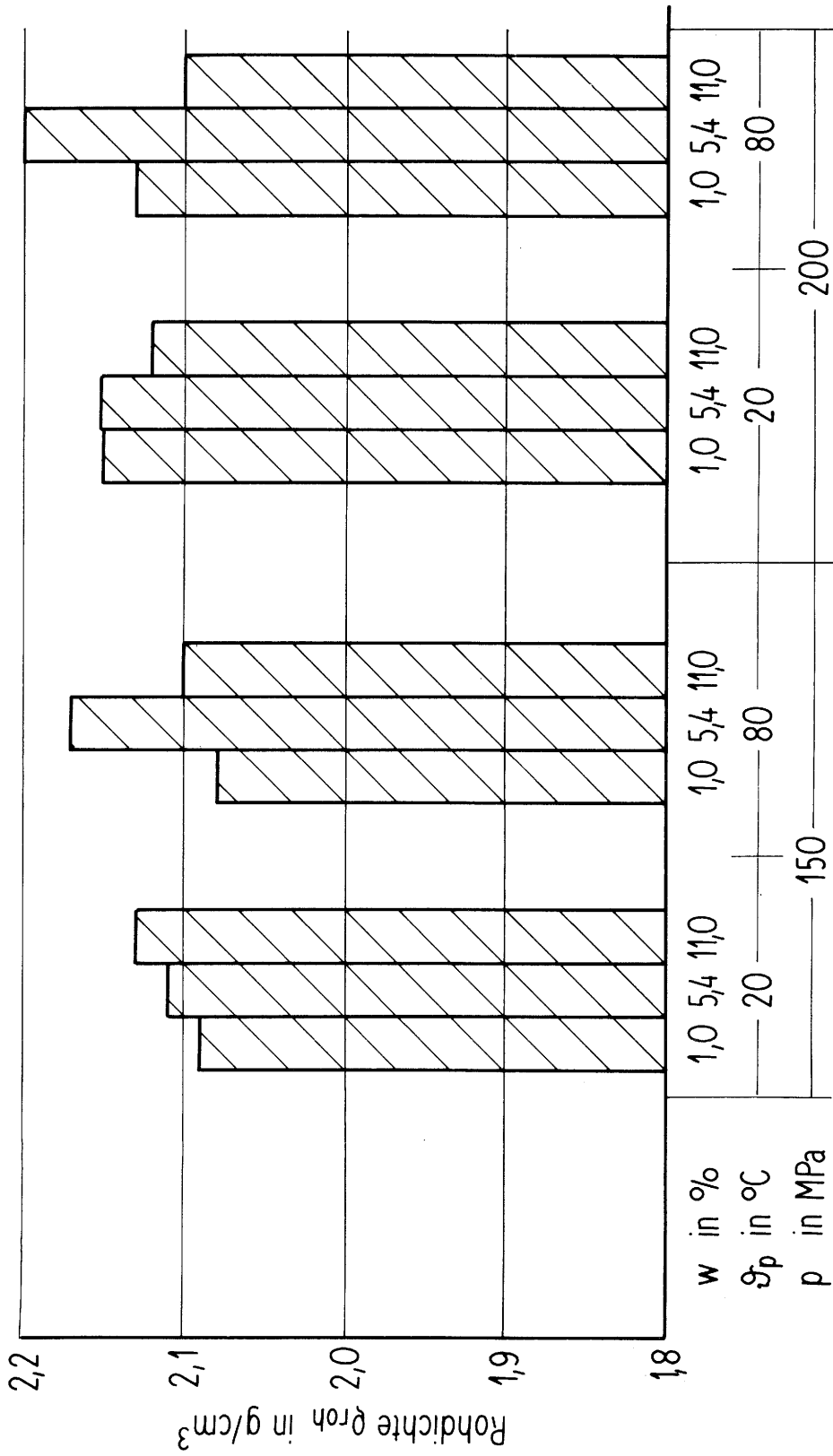
Figur 8: Einfluß des Preßdrucks auf die Abriebfestigkeit von Bentonitpreßlingen

Einfluß des Feuchtegehaltes (Figuren 9 - 12)

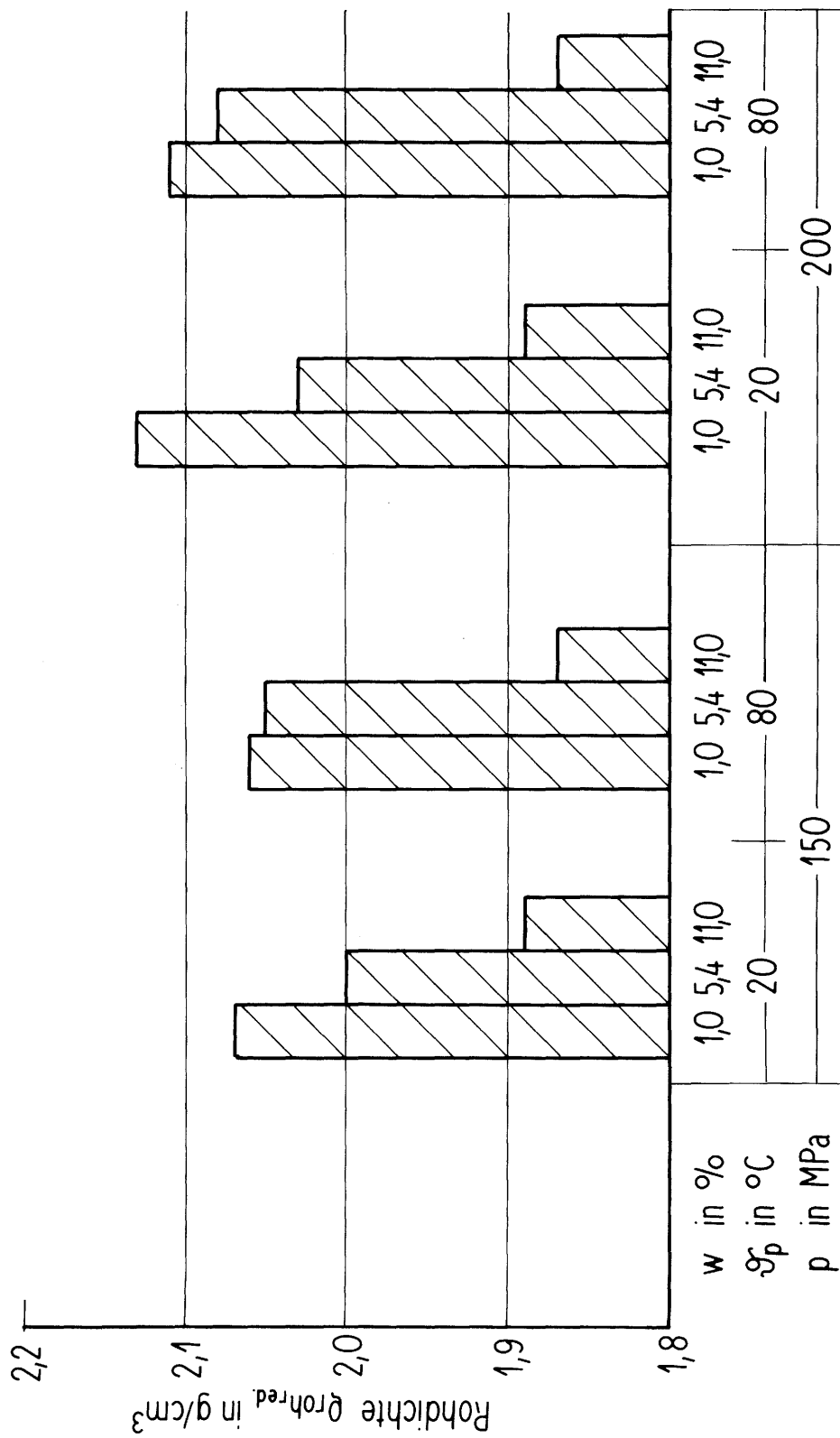
Für jedes Preßgut existiert im allgemeinen ein optimaler Feuchtegehalt. Dabei begünstigt die Feuchtigkeit die Verdichtung durch ihre plastifizierende Wirkung und vermittelt außerdem Bindekräfte zwischen den Partikeloberflächen. Ein zu hoher Feuchtegehalt des Preßgutes behindert jedoch

den Verdichtungsprozeß. Das Wasser füllt dann in zunehmendem Maße das Porenvolumen aus, wirkt als Sperrflüssigkeit und blockiert die Bindekräfte.

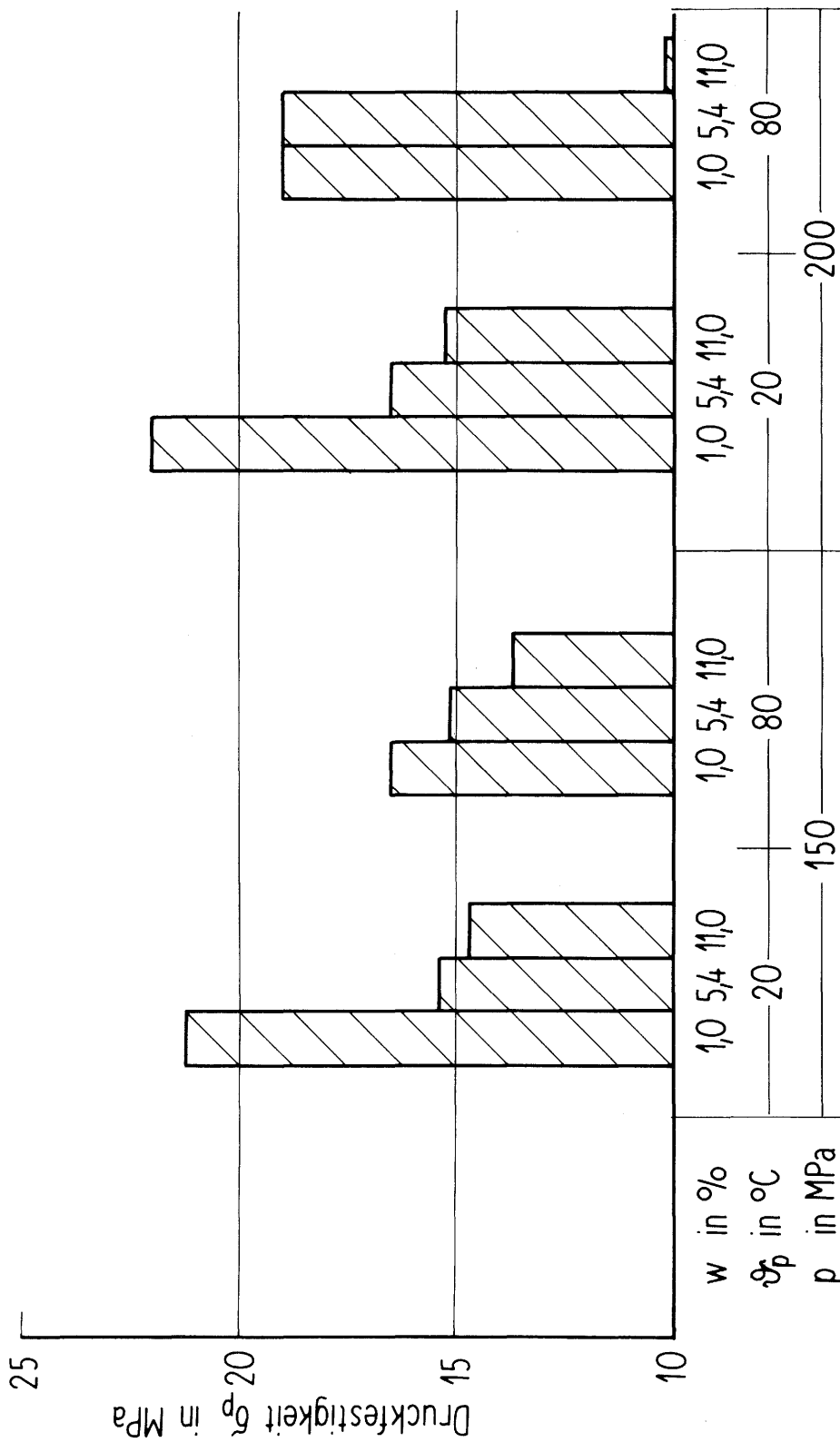
Für den Versiegelungseffekt des Bentonits ist die Trockendichte maßgebend. Daher besteht die Forderung, den Bentonit mit möglichst geringem Feuchtegehalt zu verpressen. Die Verhältnisse für den untersuchten Bentonit werden anhand der Figuren 9 bis 12 deutlich. Der Anstieg der Rohdichte der Preßlinge bei Erhöhung der Preßgutfeuchte von 1 auf 11 % (Figur 9) resultiert aus der Ausfüllung von Poren im Preßling mit Wasser. Bereits bei einer Preßgutfeuchte von 5,4 % wirkt das Wasser als Sperrflüssigkeit, die eine Annäherung der Bentonitpartikel behindert. Dies ist eindeutig anhand der errechneten, auf Trockenmasse bezogenen reduzierten Rohdichten (Figur 10) nachweisbar. Mit sinkender Trockenrohddichte fällt auch die Druckfestigkeit stark ab (Figur 11), weil das Wasser nicht nur die Verdichtung, sondern auch die Bindekräfte behindert. Anders verhält sich der Trend der Abriebfestigkeit der Bentonitpreßlinge (Figur 12). Hier ist kein negativer Einfluß der Preßgutfeuchte zu verzeichnen, weil die feuchteren und damit plastischeren Preßlinge weniger zum Spröbruch bei der Trommelung neigen. Der optimale Verpressungsfeuchtegehalt des Bentonits liegt bei ca. 1,0 %. Bei einem Preßdruck von 200 MPa können unter den Bedingungen der rein axialen Verdichtung mit der hydraulisch betriebenen Stempelpresse Trockenrohddichten von $> 2,1 \text{ g/cm}^3$ erzielt werden.



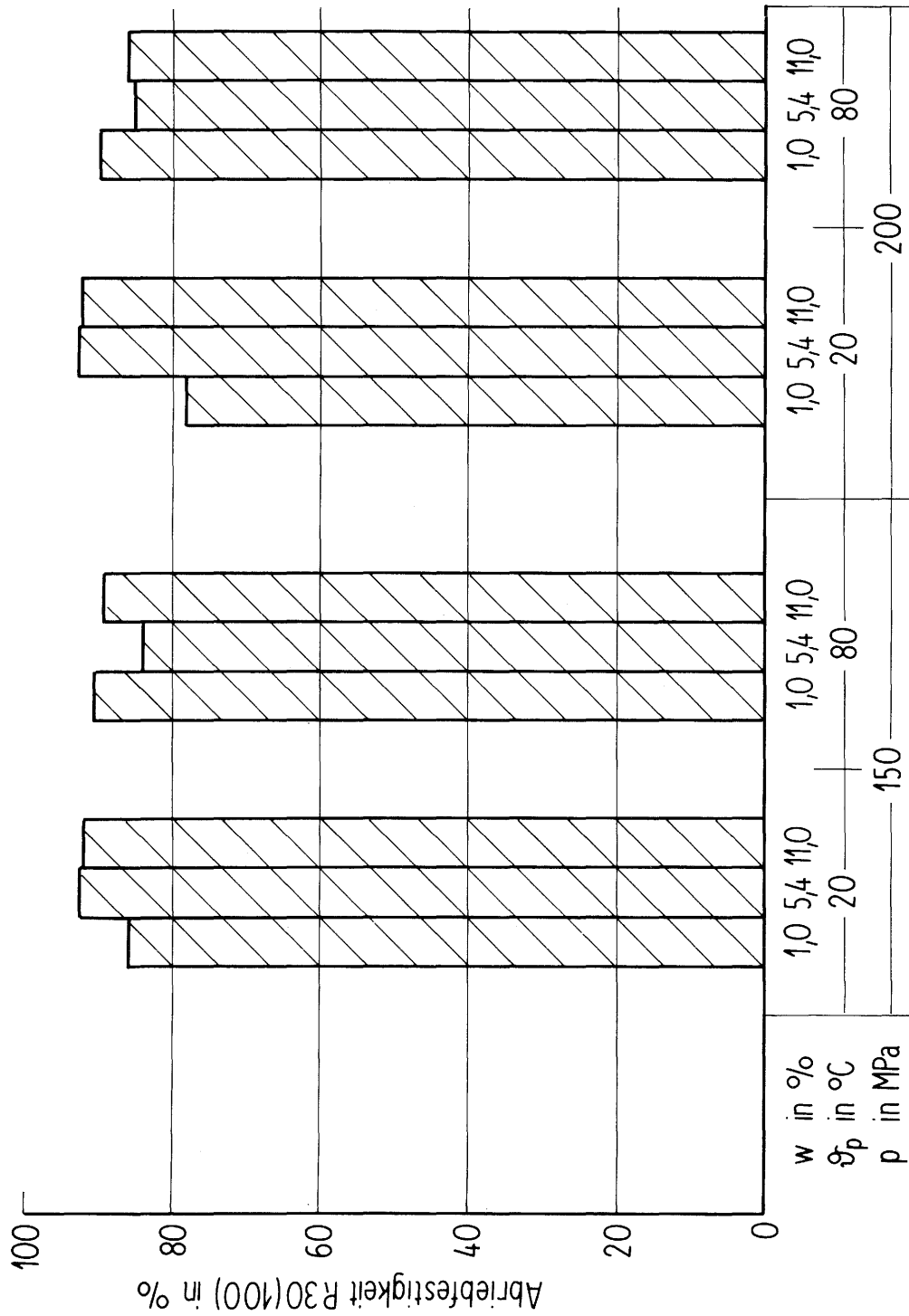
Figur 9: Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Rohdichte von Bentonitpreßlingen



Figur 10: Einfluß des Feuchtegehaltes auf die reduzierte Rohdichte von Bentonitpreßlingen



Figur 11: Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Druckfestigkeit von Bentonitpreßlingen



Figur 12: Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Abriebfestigkeit von Bentonitpreßlingen

Einfluß der Preßdauer (Figuren 13 - 15)

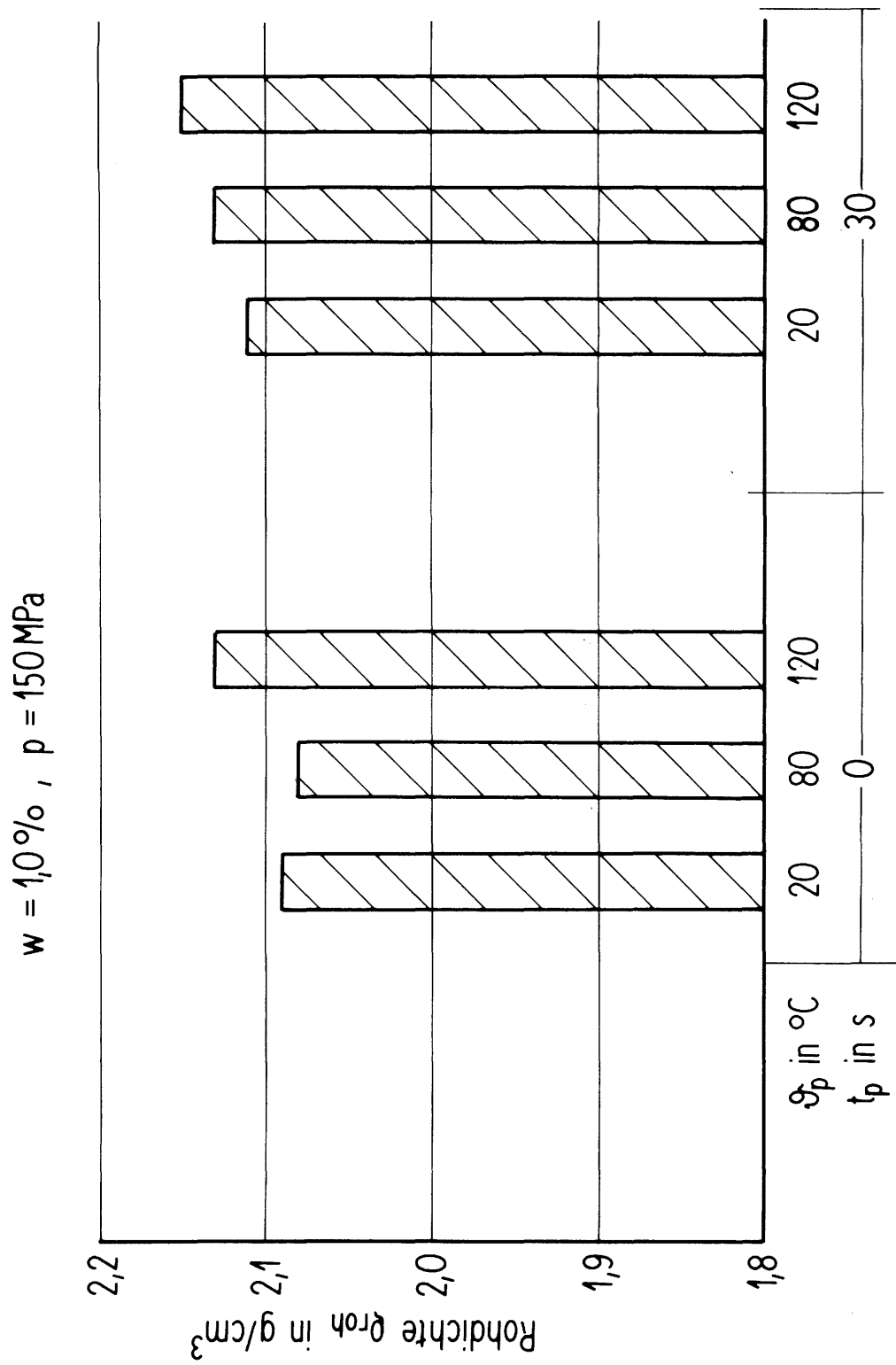
Die Preßgutverdichtung und die Ausbildung von Bindekräften zwischen den Partikeln sind zeitabhängige Prozesse. Daher kann die Preßlingsqualität bei gut verdichtbaren Rohstoffen in der Regel durch Verlängern der Preßdauer verbessert werden. In den Preßversuchen wurde die Preßdauer durch Halten des Stempels beim Maximaldruck von 0 auf 30 s verlängert. Der positiven Wirkung der Preßdauer steht wiederum ein preßtechnisch bedingter Nachteil entgegen. Mit zunehmender Preßdauer erhöht sich der Querdruck in der geschlossenen Preßform und damit die Reibungskraft an der Preßformwand, was zur Verstärkung der Ribbildung in den Preßlingen führt. Trotzdem ist der Qualitätsfortschritt bei der Preßlingsrohichte zu erkennen (Figur 13). Hinsichtlich der Festigkeitsmerkmale ist hingegen kein signifikanter Trend zu verzeichnen (Figuren 14 - 15).

Einfluß des Preßlingsformates (Figuren 16 - 17)

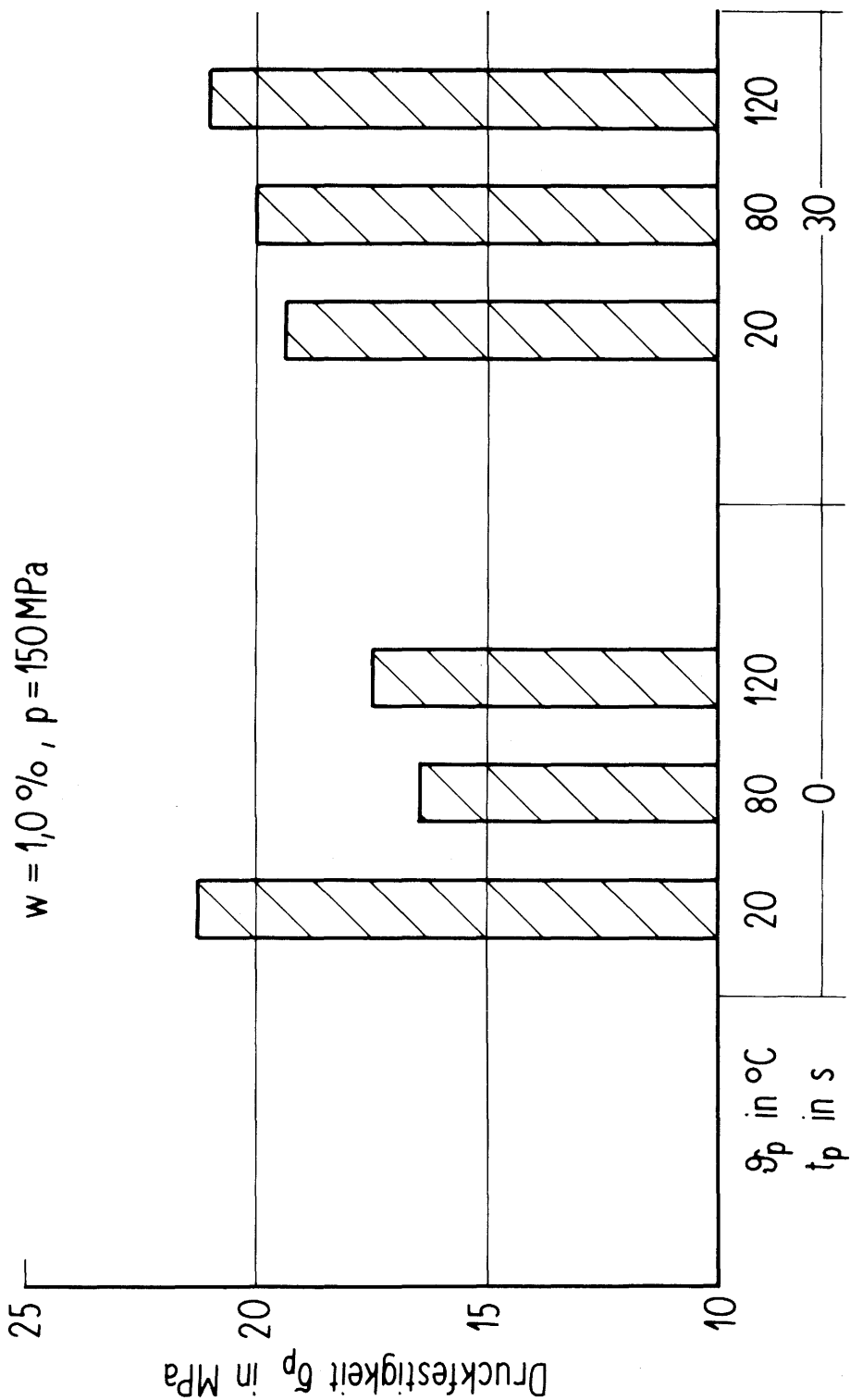
Die Reibungskräfte an der Preßformwand der hydraulisch betriebenen Laborstempelpresse bedingen einen Durchpressungsverlust in Richtung des Unterstempels. Dieser Durchpressungsverlust kann reduziert werden, wenn die Preßlingsstärke verringert wird, bzw. wenn ein großes Verhältnis von Preßlingsdurchmesser zu Preßlingsstärke eingehalten wird. Außerdem kann damit das Problem der Ribbildung beim Ausstoßen aus der Preßform gedämpft werden. Aus diesem Grund existiert ein starker Zusammenhang zwischen Preßlingsqualität und Preßlingsformat (Figur 16). Der Anstieg der Rohdichte der Bentonitpreßlinge mit zunehmendem \varnothing/h -Verhältnis bringt das sehr deutlich zum Ausdruck. Wegen der Kopplung von Dichte und Festigkeit ist dieser Trend auch für die Festigkeitsmerkmale relevant (Figur 17). Beim Vergleich der Druckfestigkeitswerte in der Figur 17 muß man allerdings berücksichtigen, daß hier ein geometrischer Faktor den Festigkeitstrend dominierend beeinflusst, der unabhängig ist von der Qualität der inneren Preßlingsstruktur. Bei der angewandten Druckfestigkeitsbestimmungsmethode erhöht sich der Meßwert mit steigendem \varnothing/h infolge des sich verändernden Spannungszustandes bei der Beanspruchung.

Des weiteren ist darauf hinzuweisen, daß mit zunehmendem \varnothing/h sich die Kornform immer weiter von der idealen Kugelgeometrie, die die höchsten Packungsdichten liefert, entfernt. Damit verschlechtern sich die Bedingungen für eine hohe Schüttdichte. Es ist daher nicht sinnvoll, ein zu hohes \varnothing/h -Verhältnis anzuwenden.

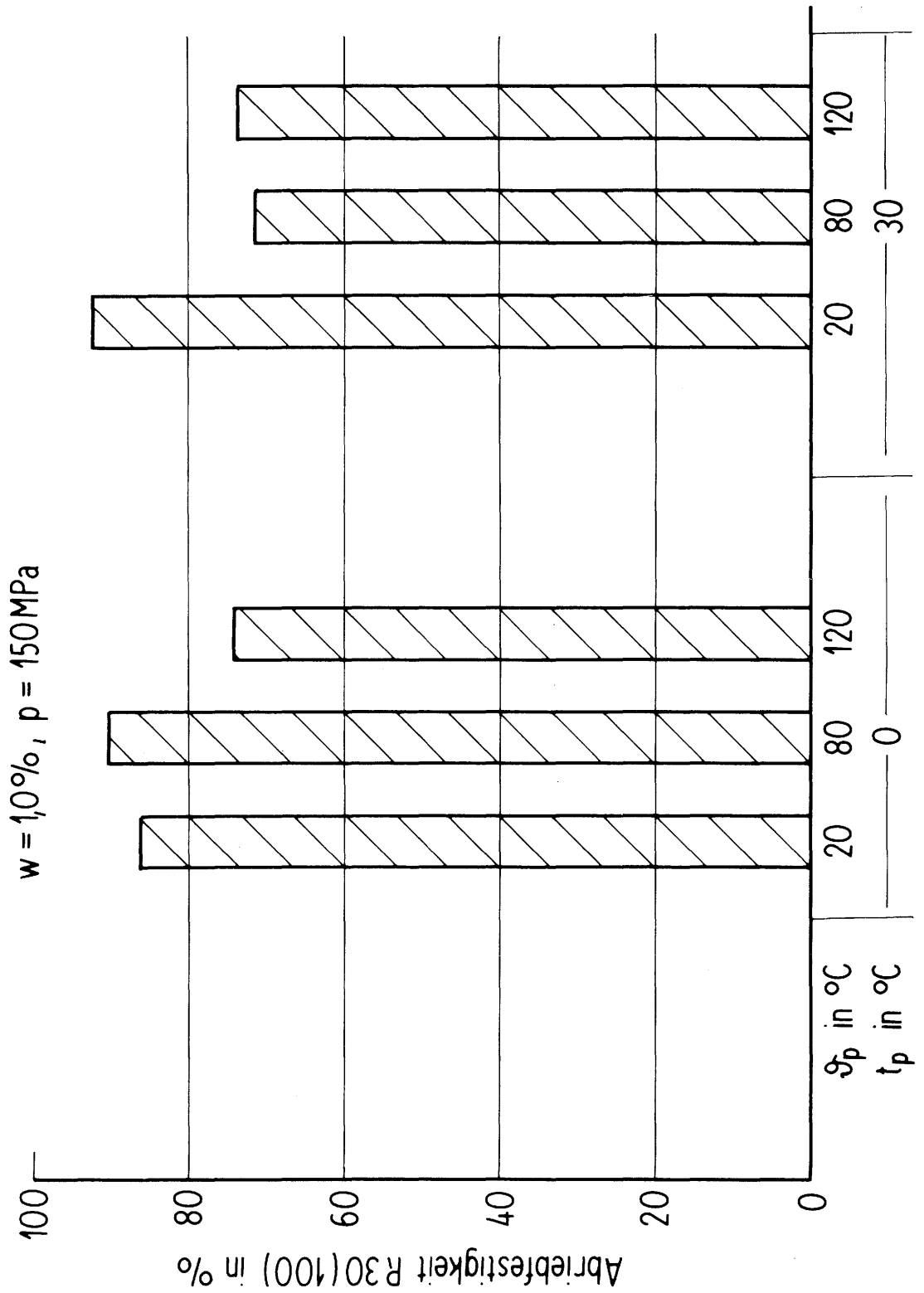
Zusammenfassend ist festzustellen, daß in den Preßversuchen mit der hydraulisch betriebenen Stempelpresse mit geschlossener Preßform unter den Bedingungen der einachsigen Preßverdichtung bei Einhaltung optimaler Preßparameter Trockenrohichten für Bentonitpreßlinge zwischen 2,1 und 2,2 g/cm³ erreicht worden sind. Die Festigkeit dieser Preßlinge ist hoch.



Figur 13: Einfluß der Preßdauer auf die Rohdichte von Bentonitpreßlingen

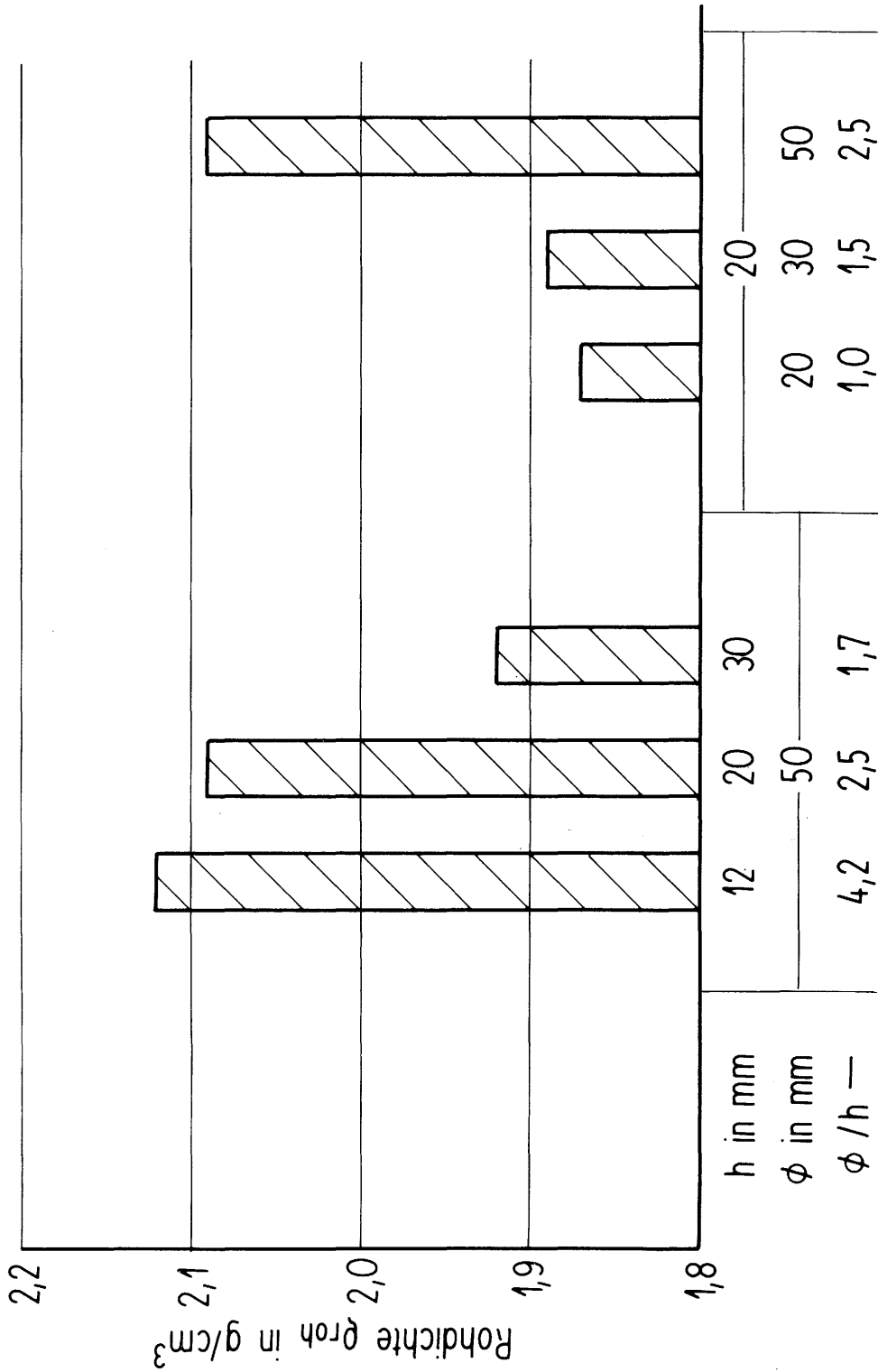


Figur 14: Einfluß der Preßdauer auf die Druckfestigkeit von Bentonitpreßlingen

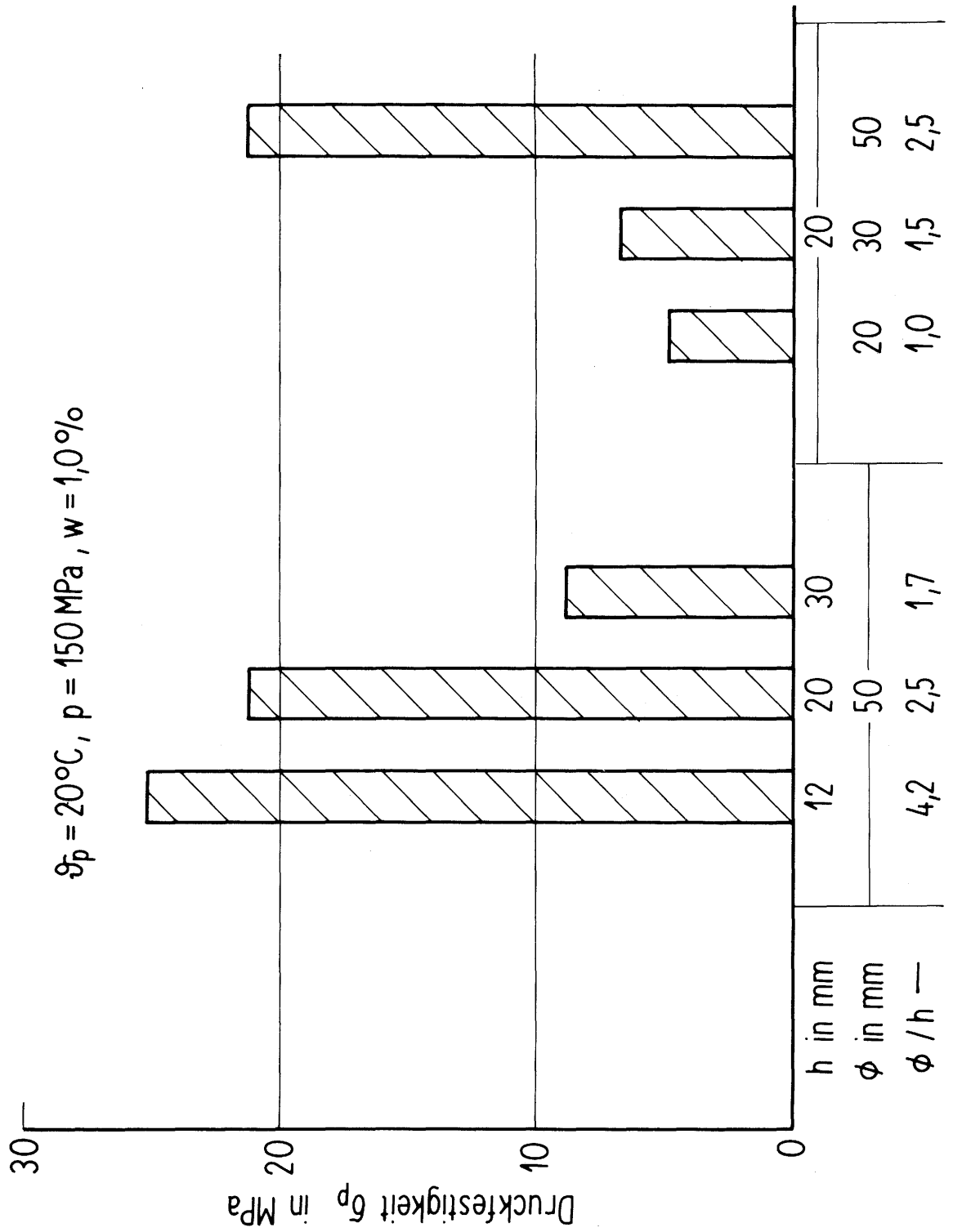


Figur 15: Einfluß der Preßdauer auf die Abriebfestigkeit von Bentonitpreßlingen

$\sigma_p = 20^\circ\text{C}$, $p = 150\text{ MPa}$, $w = 1,0\%$



Figur 16: Einfluß des Formates auf die Rohdichte von Bentonitpreßlingen



Figur 17: Einfluß des Formates auf die Druckfestigkeit von Bentonitpreßlingen

Sie gewährleistet eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen die Beanspruchungen beim Handling. Bezieht man die Rohdichte der Preßlinge auf die gemessene Reindichte des Bentonits von $2,45 \text{ g/cm}^3$, so errechnet sich für die Preßlinge ein Dichtegrad von 85 bis 90 %. Eine wesentlich höhere Verdichtung ist nur durch Anwendung effektiverer Preßverfahren, wie z.B. hydrostatisches Pressen, möglich, bei denen durch Einleiten zusätzlicher Querspannungen in den sich bildenden Preßling eine höchstmögliche Packungsdichte der Partikel erreicht wird. Diesen Verpressungsbedingungen nähert man sich bei der Verpressung des Bentonits mit Formmuldenwalzenpressen mit optimal gestalteten Formmulden.

In Auswertung der Preßversuche wurden zur Herstellung von Preßlingsproben für Schütt- und Quellungsversuche folgende Preßparameter angewandt:

Preßdruck:	200 MPa
Preßtemperatur:	20 °C
Feuchtegehalt:	1 %
Preßdauer:	0 s
Preßlingsformate:	$\varnothing = 20 \text{ mm}$, $h = 20 \text{ mm}$
	= 30 , = 12
	= 50 , = 30

4 LABORVERSUCHE ZUR HERSTELLUNG VON BENTONITGRANULAT

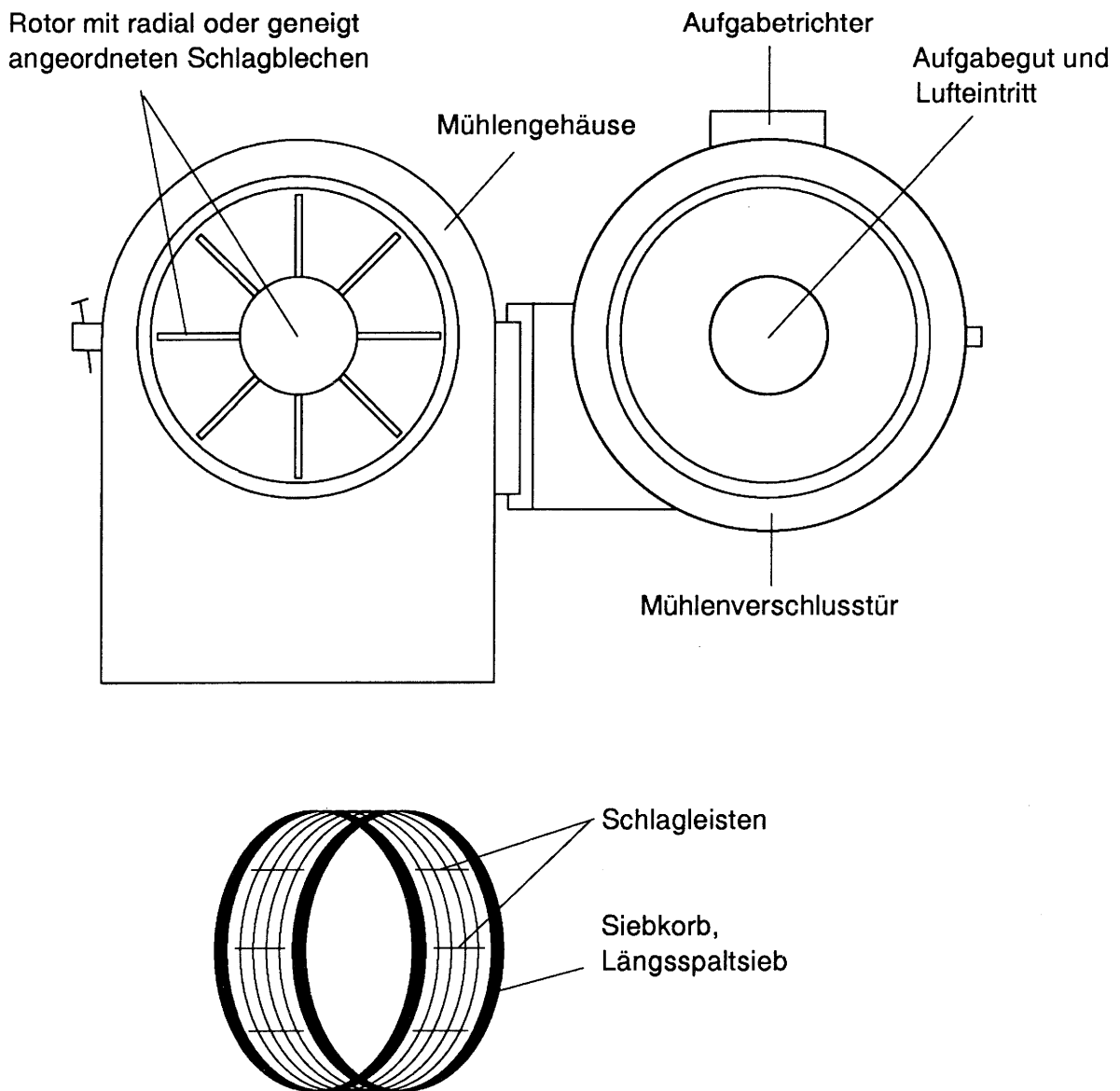
Das Ziel der Untersuchungen bestand zunächst in der Herstellung von dichten und festen Bentonitgranulaten mit Korngrößen bis zu 10 mm durch Zerkleinern von Bentonitpreßlingen. Das Kompaktier-Zerkleinerungs-Verfahren zur Herstellung von Granulat wird zum Beispiel in der Düngemittelindustrie im großtechnischen Maßstab angewandt. Dieses Verfahren ist insbesondere dann effektiv, wenn die Zerkleinerungsbedingungen den Bruchigenschaften der Preßlinge angepaßt werden.

Die Herstellung von qualitätsgerechtem Granulat erfordert als wesentliche Voraussetzung zunächst die Herstellung von genügend dichten und festen Preßlingen. Zur Erzeugung der Preßlinge wurden die in den vorangegangenen Untersuchungen gefundenen günstigen Preßparameter angewandt:

Preßdruck:	200 MPa
Preßtemperatur:	20 °C
Feuchtegehalt:	≈ 1 %
Preßdauer:	0 s
Preßlingsformat:	∅ = 75 mm, h = 8 bis 10 mm.

Für die Zerkleinerung ist ein hohes \varnothing/h -Verhältnis günstig, weil dann weniger Zerkleinerungsarbeit aufgewandt werden muß und die Zerkleinerung schonender erfolgt. Dies wirkt sich insbesondere auf die Granulatdichte und -festigkeit positiv aus. Entsprechend der angestrebten oberen Granulatgröße wurde eine Preßlingsstärke von 8 - 10 mm eingestellt. Die Zerkleinerung ist dann effektiv, wenn wenig Feinstkorn durch Abrieb entsteht. Dazu muß der Zerkleinerungsapparat spezielle Anforderungen erfüllen. Für die Zerkleinerung der Preßlingscheiben wurde eine im Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Umweltverfahrenstechnik und Agglomerationstechnik entwickelte Spezialmühle zur Granulatherstellung eingesetzt (Figur 18). Der Grundaufbau dieser Mühle entspricht dem einer Schlägermühle. Der Rotor ist mit flügelähnlichen Schlägern bestückt. Der Siebkorb hat die Gestalt eines Spaltsiebes mit den Schlitzen längs zur Auftreffrichtung des Mahlgutstromes. Die Schlitze (Weite 8 mm) sind in regelmäßigen Abständen durch Querstege unterbrochen, von denen eine zusätzliche Zerkleinerungswirkung ausgeht. Durch die konstruktiven Merkmale der Mühle wird eine günstige Beanspruchung der Preßlinge mit bevorzugter Spröbruchauslösung erreicht. Damit können hohe Granulatausbeuten bei guter Granulatqualität gewährleistet werden. Für die Bentonitpreßlinge wurden folgende optimale Zerkleinerungsbedingungen gefunden:

Weite der Siebschlitze:	b = 8 mm
Rotordrehzahl:	n = 500 min ⁻¹
Umfangsgeschwindigkeit des Rotors:	v = 5,8 m/s



Figur 18: Granulatmühle

Die Korngrößenverteilung des Zerkleinerungsproduktes ist in der Figur 19 dargestellt. Die Ausbeute an Granulat der Körnung 0,63 - 10 mm beträgt ca. 73 %. Die Granulatkörner sind fest und haben eine Rohdichte um $2,0 \text{ g/cm}^3$. Die Rohdichte der Ausgangspreßlinge ist höher, weil durch die Zerkleinerungsbeanspruchung in der Mühle eine gewisse Auflockerung des

Korngefüges unvermeidbar ist. Die spezielle Zerkleinerungsbeanspruchung in der Schlägermühle hat aber den Vorteil, daß vorwiegend kubische Körner entstehen, die der idealen Kugelform am nächsten kommen. Damit bestehen günstige Voraussetzungen für die Erzielung einer hohen Schüttdichte.

5 LABORVERSUCHE ZUR ERZIELUNG EINER HOHEN SCHÜTTDICHTEN VON BENTONIT-PRODUKTEN AUS PREBLINGEN UND GRANULATEN

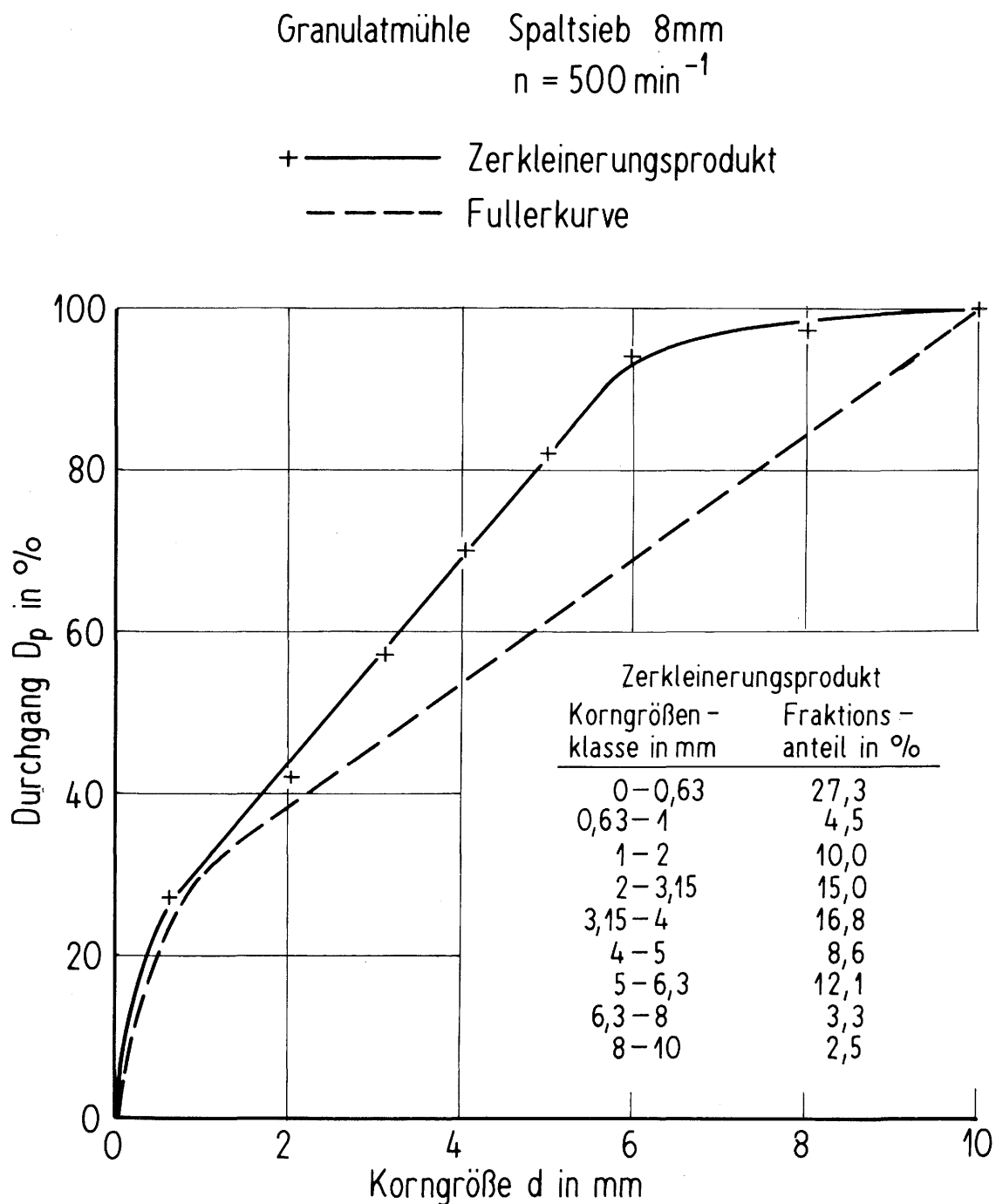
Zur Durchführung der Schüttversuche wurde eine einfache Versuchsapparatur verwendet. Das Granulat bzw. Kombinationen von Granulat und Preßlingen wurden von einem trichterförmigen Behälter mit Bodenklappe in den darunter angeordneten Würfel mit Kantenlängen von 200 x 200 x 200 mm geschüttet. Der sich oberhalb der Würfelkante bildende Schüttkegel wurde sorgfältig abgestrichen, so daß eine komplette Würfel­füllung resultierte.

Von den sehr umfangreichen Schüttversuchen sind in den Figuren 20 - 22 sowie in den Tabellen 3 bis 6 nur einige charakteristische Ergebnisse zusammengefaßt.

Zunächst galten die Untersuchungen Granulaten, die, wie im Abschnitt 4 beschrieben, durch Zerkleinern von Preßlingen gewonnen worden waren. Das Original-Zerkleinerungsprodukt von der Granulatmühle weist eine beträchtliche Abweichung von der in der Literatur für optimale Packungsdichten angegebenen Fullerkurve auf (Figur 19). Die Fullerkurve wird zum Beispiel im Straßenbau zur Erzielung optimaler Schüttdichten von Schotter angewandt. Die Abweichung von dieser häufig bevorzugten Korngrößenverteilungsfunktion resultiert bei dem ursprünglichen Bentonitgranulat hauptsächlich aus einem zu geringen Anteil der oberen Korngrößenklassen von 6 - 10 mm. Die Schüttdichtewerte dieses Granulates lagen bei 1,2 g/cm³.

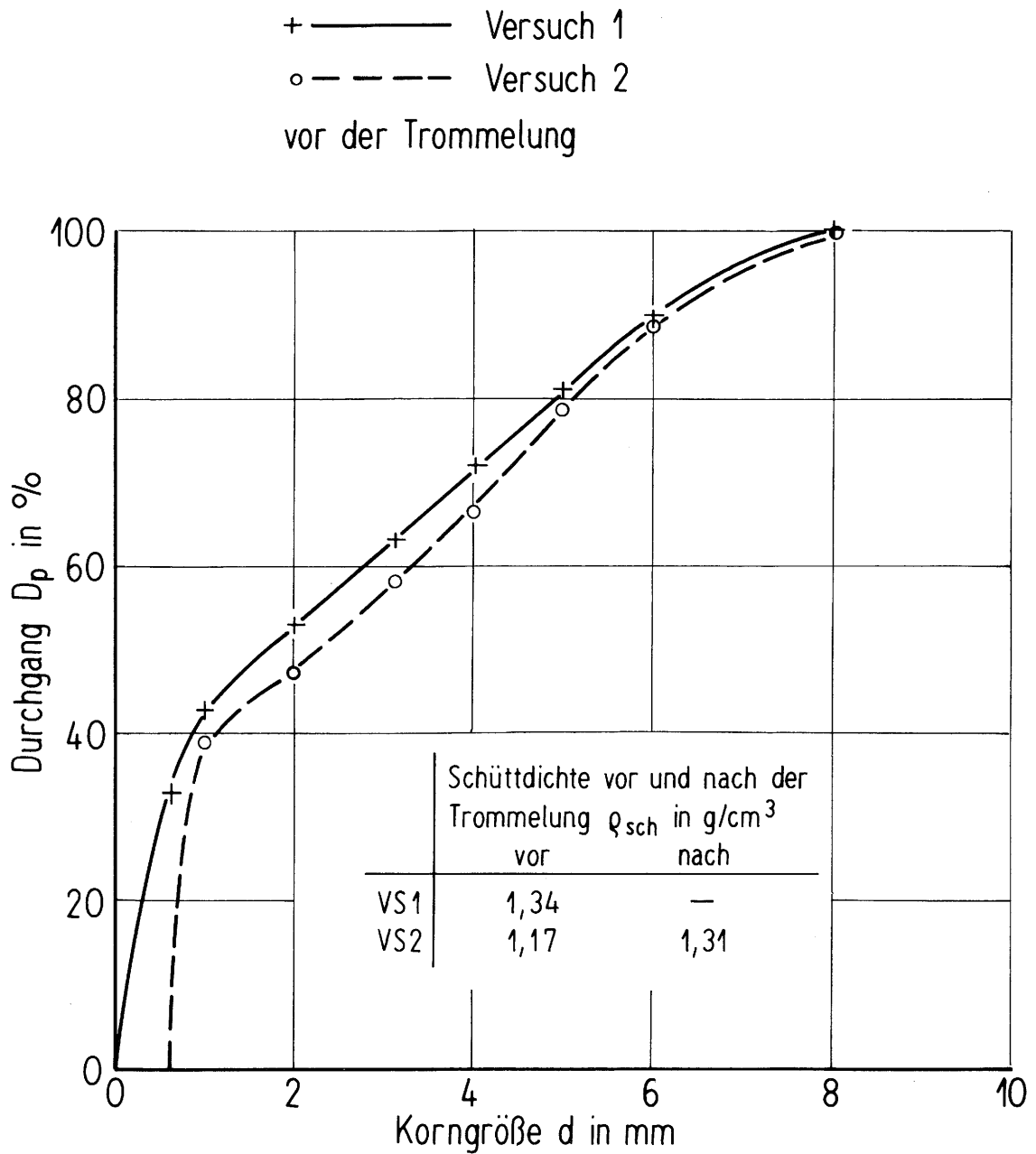
Durch Aussieben und Zusammensetzen der in der Figur 19 angegebenen Korngrößenklassen wurde in den weiteren Versuchen die Korngrößenzusammensetzung des Bentonitgranulates gezielt verändert. Mit den Versuchen 1 und 5 (Figuren 20 und 22) sollte eine weitgehende Annäherung an die Bedingungen der Fullerkurve erreicht werden. Für diese Granulate wurden Schüttdichtewerte von ca. 1,3 g/cm³ gemessen, die noch weit unter den wenigstens notwendigen 1,5 g/cm³ liegen. Beim Schütten der Granulate war zudem deren Staubigkeit auffällig, die zur Bildung lästiger Staubwolken führte. Aus diesem Grund wurde beim Versuch 2 (Figur 20) das Feinstkorn 0 - 0,63 mm aus dem Granulat entfernt. Durch diese Maßnahme fiel die Schüttdichte unter 1,2 g/cm³. Das Feinstkorn wird zur Ausfüllung kleiner Schüttungshohlräume benötigt. Bei den Versuchen 3 und 4 (Figur 21) wurde die Menge des Oberkorns 6 - 8 mm auf Kosten des Unterkorns 0 - 1 mm erhöht, wodurch die Schüttdichte ebenfalls deutlich abfiel. Auch eine Verringerung des Mittelkorns bei höheren Anteilen von Oberkorn und Unterkorn gemäß Versuch 6 (Figur 22) führte nicht zum Erfolg.

Um eine Verbesserung der Ergebnisse zu erzielen, wurden die Granulate 5 Minuten lang in der Abriebtrommel getrommelt. Durch diese Beanspruchung sollten die Granulat­körner abgerundet werden. Außerdem sollte dabei in-



Figur 19: Zerkleinerung von Preßlingen mit der Granulatmühle

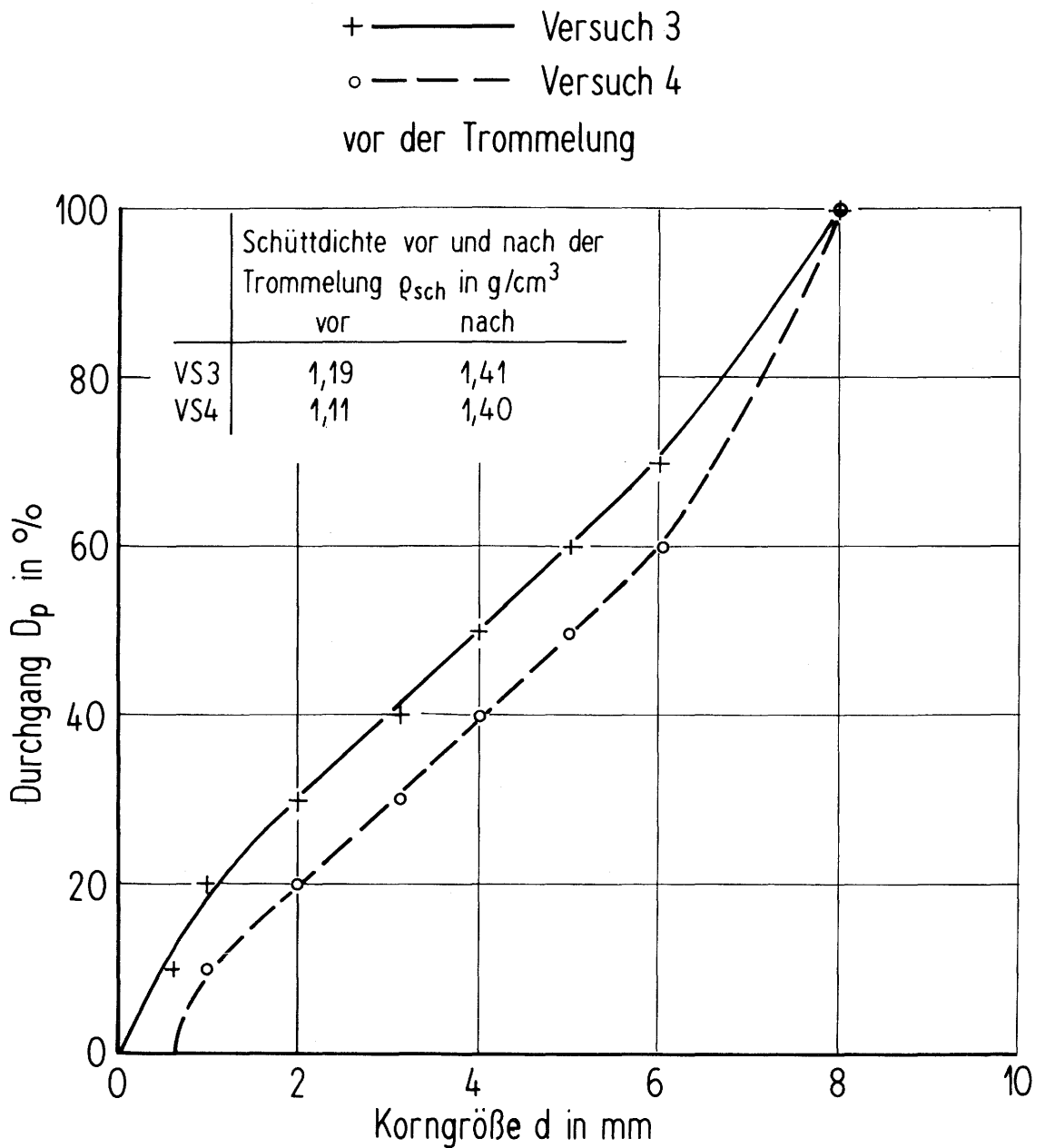
folge von Zerkleinerungsprozessen Mittel- und Feinkorn gebildet werden, das sich quasi "automatisch" optimal in die Hohlräume der Granulatschüttung einordnet. Wie die Ergebnisse zeigen, brachte die Trommelung insbesondere für die Granulate der Versuche 3 und 4 (Figur 21) eine beachtliche Steigerung der Schüttdichte. Die angestrebten Werte von > 1,5 g/cm³



Figur 20: Korngrößenverteilung und Schüttdichte von zusammengesetzten Bentonitgranulaten

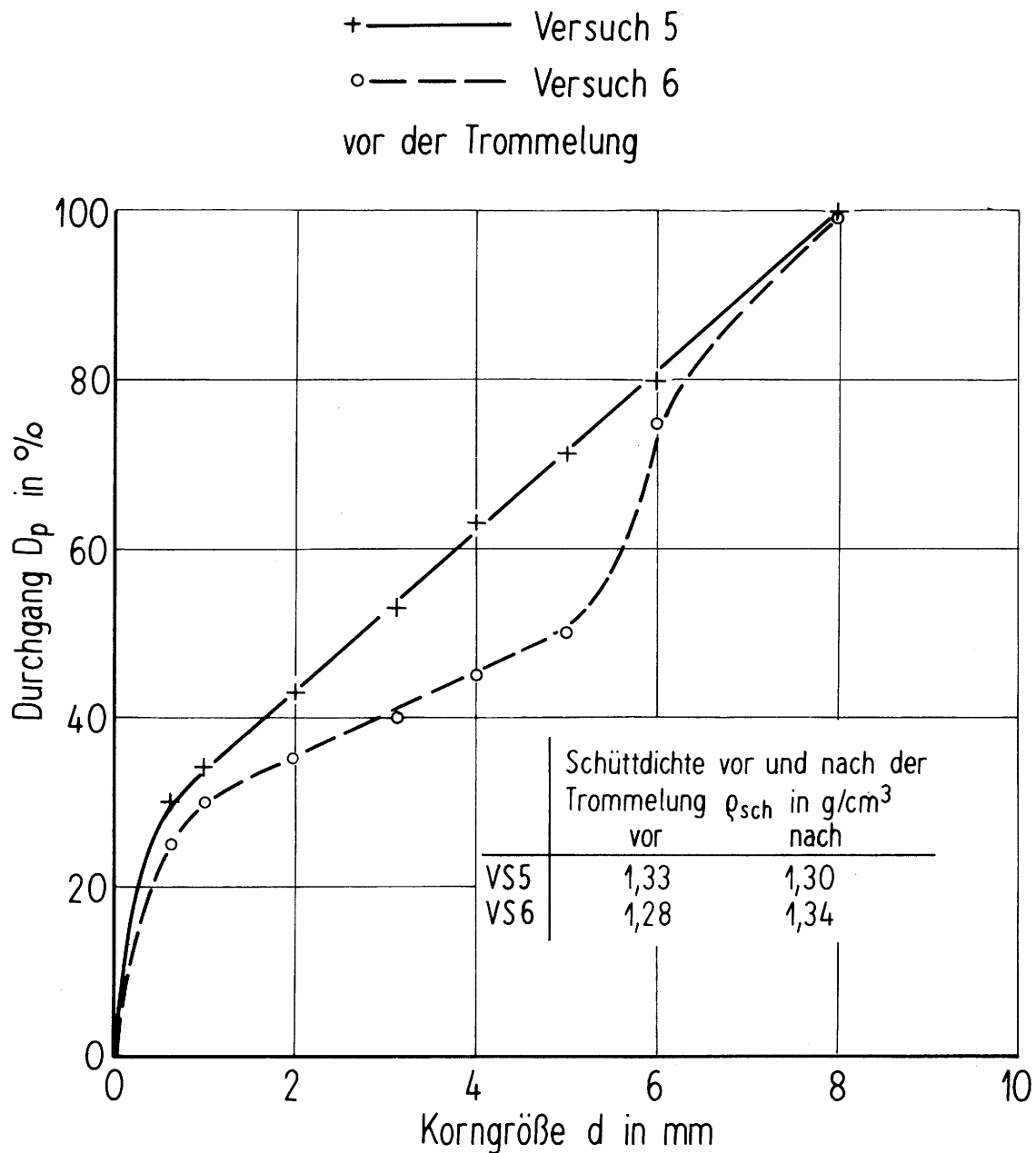
blieben jedoch unerreicht.

Weitere Schüttversuche wurden mit Kombinationen von Granulat und Preßlingen durchgeführt. Dabei wurde gemäß Aufgabenstellung über das Preßlings-



Figur 21: Korngrößenverteilung und Schüttdichte von zusammengesetzten Bentonitgranulaten

format die obere Korngröße des Bentonitproduktes variiert (Tab. 3 - 6). Für die gewünschte obere Korngröße von 10 - 15 mm stand zu Beginn der Untersuchungen kein entsprechendes Formzeug für die hydraulische Stempel-
 presse zur Verfügung. Diese Korngrößenklasse mußte daher durch Brechen



Figur 22: Korngrößenverteilung und Schüttdichte von zusammengesetzten Bentonitgranulaten

von 15 mm starken Preßlingen hergestellt werden, wobei zur Abrundung der eckigen Körner anschließend eine 10 minütige Trommelung mit der Abriebtrommel erfolgte. Eine Kombination dieser Bentonitkörner mit staubfreiem Granulat von 1 - 3 mm, das als Füllmaterial dienen sollte, brachte noch

nicht das gewünschte Ergebnis (Versuche 1 bis 4, Tab. 3). Ebenfalls unbefriedigend waren die mit einer Kombination von Preßlingen 20 x 20 mm und Granulat 5 - 8 mm erreichten Schüttdichten (Versuche 5 - 9, Tab. 3 und 4). Bei diesen Bentonitprodukten blieb die Schüttungsporosität infolge fehlenden Feinkorns zu hoch.

Tabelle 3: Zusammensetzung und Schüttdichte von Bentonitprodukten

Vers.-Nr.	1	2	3	4	5	6	7
	Zusammensetzung in %						
Bentonitprodukt							
<u>Preßlinge</u>							
∅ h							
20 x 20					40	50	60
30 x 12							
50 x 30							
<u>Granulat</u>							
Pulver							
0,63 - 1							
1 - 3	50	40	30	20			
5 - 8					60	50	40
10 - 15	50	60	70	80			
	Schüttdichte in g/cm ³						
	1,36	1,38	1,42	1,36	1,31	1,33	1,34

In den Versuchen 1 bis 9 wurden Preßlinge und Granulat vorvermischt und gemeinsam aus dem Behälter geschüttet. Es zeigte sich jedoch, daß höhere Schüttdichten immer dann resultieren, wenn die Kornfraktionen einzeln und wechselweise aus separaten Behältnissen geschüttet werden. Daher wurde bei den weiteren Versuchen eine schichtenweise Schüttung angewandt. Nach Schüttung einer Preßlingsschicht wurden deren Hohlräume durch rieselfähiges, feinkörniges Granulat ausgefüllt. Auf diese Weise konnten Schüttdichten zwischen 1,6 und 1,7 g/cm³ erreicht werden (Vers. 10 - 12, 15 - 17, 22 - 25, Tab. 4 - 6). Unter Berücksichtigung des Feuchtegehaltes der Bentonitprodukte von 1 % ergeben sich daraus Schüttdichtewerte bezogen auf die Trockenmasse von 1,58 - 1,68 g/cm³. Voraussetzung für das gute Ergebnis ist, daß die Korngrößendifferenz zwischen Oberkorn (Preßlinge) und feinkörnigem Füllmaterial (Granulat) ausreichend groß ist. Das Granulat muß außerdem gut rieselfähig sein. Nur unter diesen Bedingungen kann es effektiv in die Hohlräume der Preßlingsschicht einfließen. Als

Tabelle 4: Zusammensetzung und Schüttdichte von Bentonitprodukten

Vers.-Nr.	8	9	10	11	12	13	14
	Zusammensetzung in %						
Bentonitprodukt							
<u>Preßlinge</u>							
∅ h							
20 x 20	70	80				18	
30 x 12							
50 x 30			69	69	69	46	34
<u>Granulat</u>							
Pulver							
0,63 - 1				31	31		
1 - 3			31				
5 - 8	30	20					
10 - 15							34
	Schüttdichte in g/cm ³						
	1,34	1,32	1,63	1,62	1,63	1,48	1,42

Tabelle 5: Zusammensetzung und Schüttdichte von Bentonitprodukten

Vers.-Nr.	15	16	17	18	19
	Zusammensetzung in %				
Bentonitprodukt					
<u>Preßlinge</u>					
∅ h					
20 x 20	68	69	69	38	58
30 x 12					
50 x 30					
<u>Granulat</u>					
Pulver					
0,63 - 1			31		
1 - 3	32	31		25	24
5 - 8					
10 - 15				37	18
	Schüttdichte in g/cm ³				
	1,56	1,62	1,64	1,45	1,52

Tabelle 6: Zusammensetzung und Schüttdichte von Bentonitprodukten

Vers.-Nr.	20	21	22	23	24	25
	Zusammensetzung in %					
Bentonitprodukt						
<u>Preßlinge</u>						
∅ h						
20 x 20						
30 x 12		65	68	67	70	70
50 x 30						
<u>Granulat</u>						
<u>Pulver</u>						
0,63 - 1	34		32		8	15
1 - 3		35			22	15
5 - 8						
10 - 15	66					
	Schüttdichte in g/cm ³					
	1,58	1,61	1,69	1,65	1,62	1,65

Füllmaterial hat sich in den Versuchen staubfreies Granulat mit der Körnung 0,63 - 1 mm, 1 - 3 mm bzw. 0,63 - 3 mm bewährt.

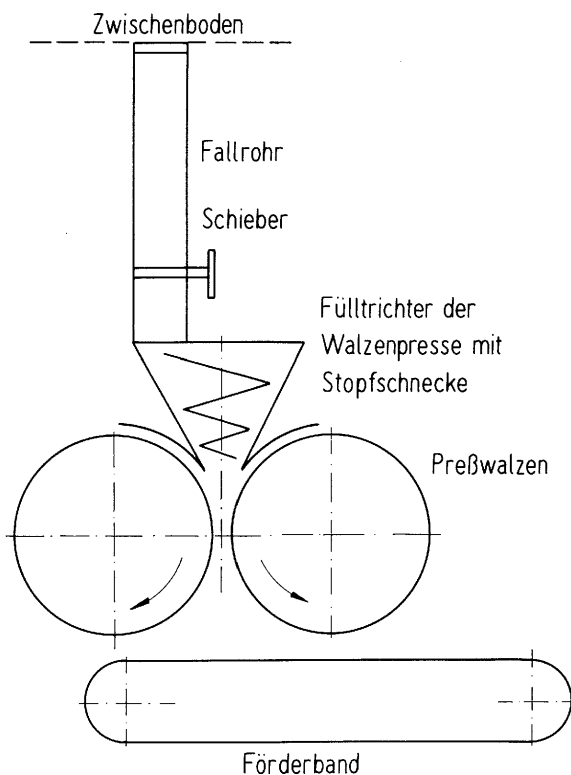
Auch mit dem getrockneten Ausgangsbentonit (0 - 0,5 mm) als Füllstoff wurden die hohen Schüttdichten erzielt (Vers. 12, 17, 23). Allerdings kann die Verwendung dieses Materials wegen der starken Staubentwicklung beim Schütten nicht empfohlen werden. Die Versuchsergebnisse weisen des weiteren darauf hin, daß durch die Verwendung von Mittelkorn zusätzlich zum Oberkorn und feinkörnigen Füllstoff die Schüttdichten wieder stark reduziert werden (Vers. 13 - 14, 18 - 19). Offensichtlich behindert das Mittelkorn das feinkörnige Granulat am Ausfüllen der Schüttungshohlräume.

Die Ergebnisse der Schüttversuche führen zusammenfassend zu der Schlußfolgerung, daß mit optimalen Korngrößenverteilungen von Bentonitprodukten im Sinne der Fullerkurve keine hohen Schüttdichten von > 1,5 g/cm³ erreicht werden können. Für die praktische Anwendung ist daher in jedem Fall eine Kombination von Preßlingen und feinkörnigem Granulat in der beschriebenen Weise zu empfehlen. Dabei beträgt das optimale Mengenverhältnis von Preßlingen zu Granulat etwa 70 : 30.

6 HERSTELLUNG VON BENTONITPREBLINGEN IM HALBTECHNISCHEN MAßSTAB UND TECHNOLOGIEVORSCHLAG

Die technische Herstellung von Bentonit-Preßlingen erfordert die Klärung der Frage nach einem geeigneten Pressentyp. Zu diesem Zweck wurde ein Testversuch mit der Technikumswalzenpresse des Institutes für Thermische Verfahrenstechnik, Umweltverfahrenstechnik und Agglomerationstechnik unter praxisnahen Bedingungen durchgeführt.

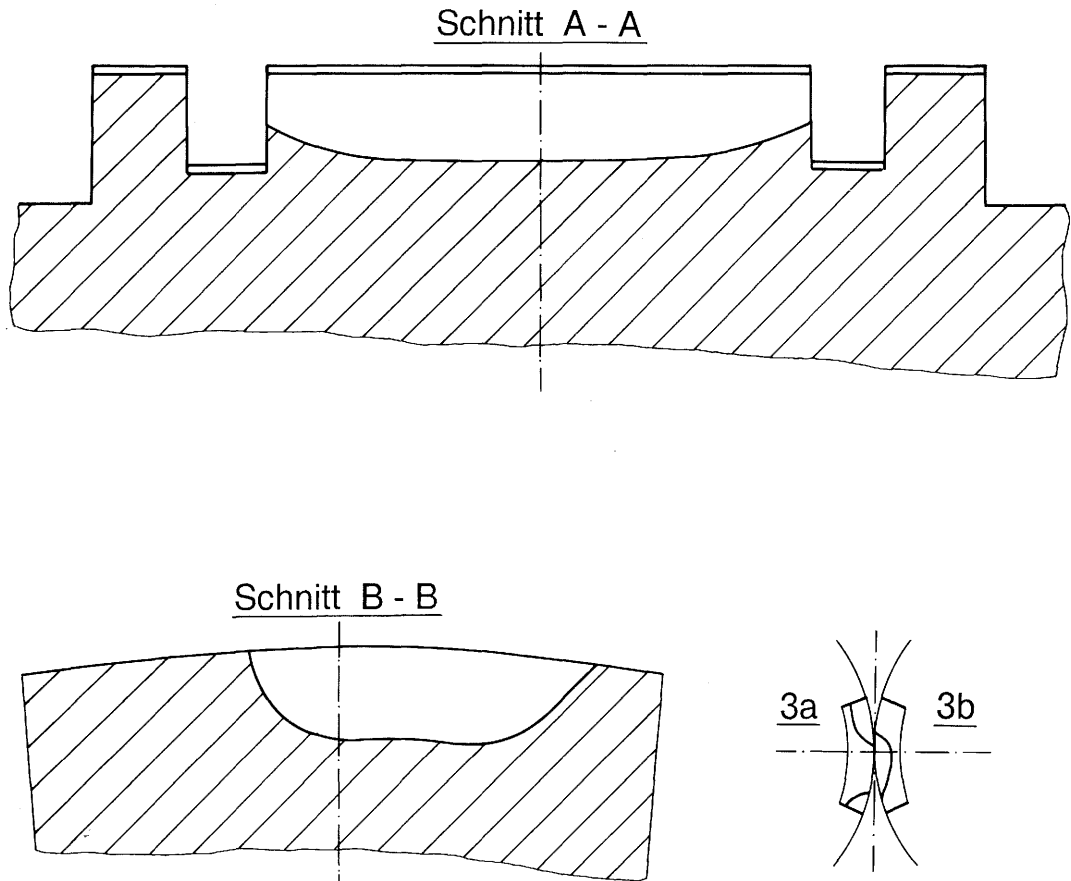
Figur 23 enthält das Schema der Formmuldenwalzenpresse. Der Walzendurchmesser beträgt 630 mm. Die Walzenkörper sind mit Formmuldensegmenten gemäß Figur 24 bestückt. Beide Walzen sind starr gelagert. Das Preßgut gelangt über ein Fallrohr in den Fülltrichter und wird von der Stopfschnecke in den Einzugskeil der Formmuldenwalzen gefördert. Das Preßprodukt fällt auf ein Transportband und wird in Probenbehälter gefördert.



Figur 23: Schema der Kompaktierungsanlage des Technikums

Die Klassierung des brikettierten Produktes erfolgt mittels Kreiswuchtschwingsieb. Der Antrieb der Walzen erfolgt durch einen 17 kW-Gleichstrommotor und Thyristorsteuerung. Die Drehzahl der Stopfschnecke kann mittels Stellgetriebemotor (7 kW) und über auswechselbare Keilriemenscheiben eingestellt werden.

(nach Zeichnungs-Nr. 08.3 - 212b)



Figur 24: Preßsegment

Der getrocknete Bentonit ($w \approx 1,0\%$) ließ sich aufgrund seiner guten Rieselfähigkeit der Presse störungsfrei aufgeben. Das Preßgut wurde kontinuierlich und störungsfrei in den Walzenspalt eingezogen, so daß gut durchpreßte stabförmige Preßlinge entstanden. Auch das Auslösen der Preßlinge aus den kalten Formmulden verlief ohne Beanstandung. Die günstigen Eigenschaften des Bentonit bedingten einen stabilen Pressenlauf. Über die Einstellung der Walzen- und Stopfschneckendrehzahl ließen sich die spezifische Anpreßkraft sowie die Durchsatzleistung der Presse gut regulieren. Wichtig ist die optimale Abstimmung von Walzen- und Stopfschneckendrehzahl. Dazu sollten die Drehzahlbereiche möglichst groß sein. Außerdem muß die Geometrie der Stopfschnecke an die Eigenschaften des Preßgutes angepaßt sein. Letztere Bedingung konnte für den Testversuch nicht gewährleistet werden. Die zur Verfügung stehende Stopfschnecke war für Braunkohlenstaub und Futtermittel entwickelt worden. Aus diesem Grund mußte für die Erzielung einer hohen spezifischen Anpreßkraft eine kleine Walzendrehzahl eingestellt werden.

Die Preßparameter bei dem Testversuch waren:

Pressendrehzahl	$n_p = 2,0 \text{ min}^{-1}$
Stopfschneckendrehzahl	$n_{st} = 21 \text{ min}^{-1}$
Achslast	$F_A = 400 - 450 \text{ kN}$
spezifische Anpreßkraft (bezogen auf Breite der Preßsegmente)	$F/b = 68,8 - 77,4 \text{ kN/cm}$
Leistungsaufnahme der Presse	$P \approx 5 \text{ kW}$
Pressendurchsatz	$m = 0,36 \text{ t/h.}$

Unter diesen Verpressungsbedingungen wurden folgende Qualitäts- und Leistungskennziffern gemessen:

Masseanteile in den ver- schiedenen Korngrößenklassen des Preßproduktes:	$\Psi_{m6/0} = 34,0 \%$
	$\Psi_{m10/6} = 4,8 \%$
	$\Psi_{m30/10} = 37,6 \%$
	$\Psi_{m > 30} = 23,6 \%$

Rohdichte der Preßlinge	$\rho_{roh} = 2,2 - 2,3 \text{ g/cm}^3$
-------------------------	---

Abriebfestigkeit der Preßlinge	$R10(300) = 81 \%$
-----------------------------------	--------------------

spezifischer Arbeitsbedarf, W_m bez. auf den Durchsatz	$= 13,9 \text{ kWh/t}$
---	------------------------

spezifischer Arbeitsbedarf, $W_{>10}$ bez. auf das Preßprodukt $>10 \text{ mm}$	$= 22,7 \text{ kWh/t}$
--	------------------------

Die Ausbeute an Preßprodukt lag bei einer Bezugskorngröße von 10 mm bei 61 %. Der Körnungsanteil $< 10 \text{ mm}$ resultierte aus Bruch und Abrieb beim Sturz der Preßlinge auf das Transportband sowie aus unverpreßtem Gut, das hauptsächlich durch die seitliche Labyrinthabdichtung des Walzenkeils rieselte. Bei modernen Maschinen wird durch eine bessere Passung dieser Abdichtung eine Preßproduktausbeute von $> 90 \%$ erreicht. Der Hauptanteil des Preßproduktes lag im Korngrößenbereich von 10 bis 30 mm und hatte die Form stabförmiger Preßlinge. Die Preßlinge waren abriebfest. Von 10 kg ausgesiebttem Preßgut $> 10 \text{ mm}$ wurde die Abriebfestigkeit $R10(100)$ ermittelt. Es wurden zumeist nur die relativ scharfen Preßlingskanten und die weniger durchpreßten seitlichen Stirnflächen abgerieben. Der Abriebanfall $< 10 \text{ mm}$ betrug 19 %.

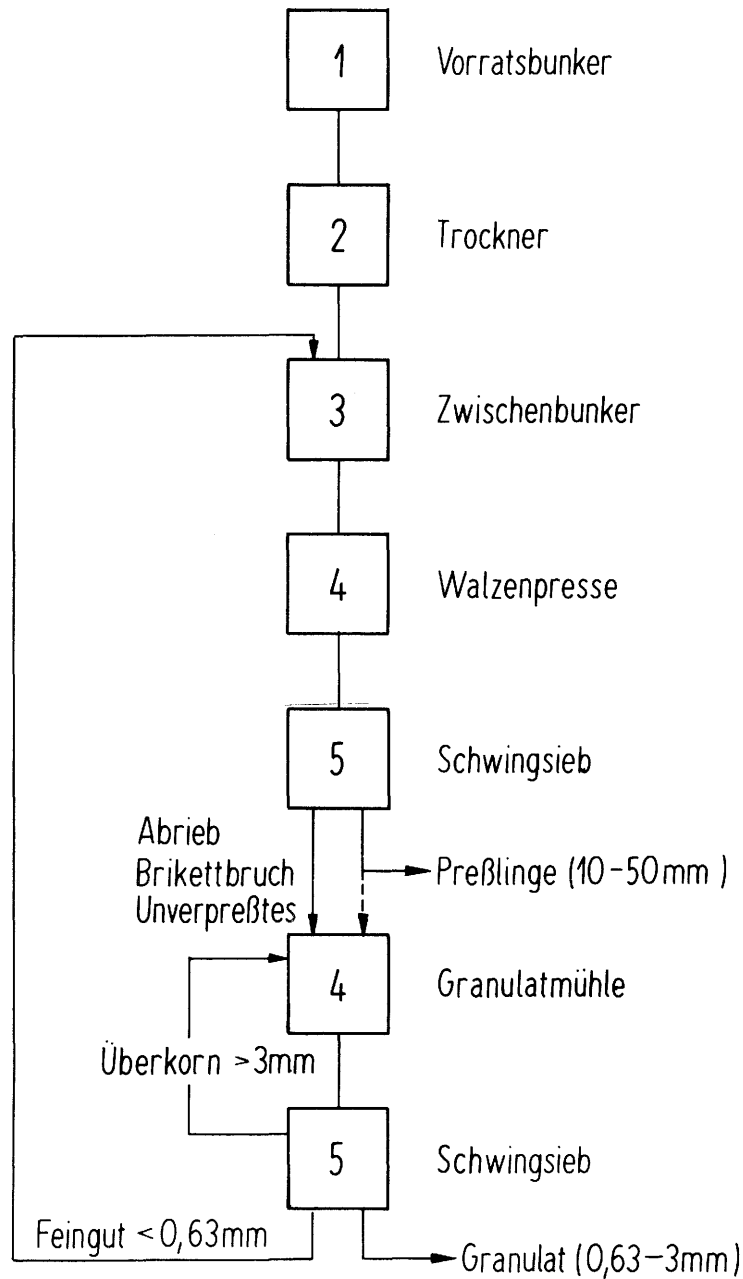
Als besonders positiv ist die hohe Rohdichte der Preßlinge von 2,2 - 2,3 g/cm³ einzuschätzen. Die Rohdichten liegen somit noch geringfügig über den Rohdichten der in der hydraulischen Stempelpresse bei optimalen Preßparametern hergestellten Preßlinge. Die hohe Verdichtung des Bentonits wird durch die günstige Preßdruckverteilung im Walzenspalt der Presse erreicht. Dies ist ein wichtiger Vorteil der Walzenpresse. Durch die Drehbewegung der Formmulden werden zusätzlich Scherkräfte in den entstehenden Preßling eingeleitet, die den Verdichtungsprozeß bei den stabförmigen Preßlingen im Sinne der zweiachsigen Verdichtung begünstigen.

Aus dem Pressendurchsatz, der Menge an Preßprodukt > 10 mm und der Leistungsaufnahme des Pressenmotors errechnet sich der spezifische Arbeitsbedarf der Kompaktierung. Er betrug in dem Testversuch 13,9 kWh/t, bezogen auf den Durchsatz sowie 22,7 kWh/t, bezogen auf das Preßprodukt > 10 mm. Korrekterweise müßte in diese Kennziffer auch die Leistung der Stopfschnecke mit eingehen. Da sie aber im Fall des Bentonits im wesentlichen nur eine Transportfunktion hat, ist ihr Anteil am Gesamtenergiebedarf gering. Der in dem Testversuch ermittelte spezifische Arbeitsbedarf kann als Richtwert für den zu erwartende Energieaufwand angesehen werden. Für die exakte Aufwandsbestimmung müssen Leistungsmessungen unter den jeweiligen technischen Bedingungen durchgeführt werden, bei denen alle relevanten apparativen und verfahrenstechnischen Einflußfaktoren berücksichtigt werden können.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß hohe Bentonitschüttdichten erreicht werden können, wenn Preßlinge mit einer definierten Korngröße > 10 mm und ein durch Zerkleinern von Preßlingen gewonnenes Granulat mit der Körnung $\Delta d \approx 3/0,63$ mm kombiniert werden. Für die Herstellung von qualitätsgerechten Preßlingen ist die Formmuldenwalzenpresse geeignet. Figur 25 enthält einen Technologievorschlag zur Herstellung der Bentonitprodukte. Zur Einhaltung optimaler Verpressungsbedingungen muß der angelieferte Bentonit von $w \approx 10$ % auf $w \approx 1$ % getrocknet werden. Aufgrund des günstigen Trocknungsverhaltens und der guten Rieselfähigkeit des Bentonits könnten hierfür z.B. indirekt beheizte Röhrentrockner oder Teller- bzw. Schneckenrockner eingesetzt werden. Anhaltswerte für die Auslegung eines solchen Trockners liefern die Trocknungsverlaufskurven (Figur 3). So wird z. B. bei einer Heizflächentemperatur von 150 °C und einem Röhrendurchmesser von 80 mm der gewünschte Trocknungseffekt mit einer Verweilzeit von ca. 5 min erreicht.

Der in einem Zwischenbunker abgekühlte Bentonit wird dann der Walzenpresse aufgegeben. Das Preßgut ist mit Hilfe einer vertikal angeordneten Stopfschnecke in den Walzenkeil zu fördern, damit durch den Aufbau eines gewissen Vordrucks in der eigentlichen Kompaktierzone hohe Preßkräfte erreicht werden können. Wenigstens ein Antrieb - bevorzugt der Stopf-

schnecke - sollte stufenlos regelbar sein. Er gewährleistet eine optimale Einstellung der Stopfschneckendrehzahl, was für die Aufrechterhaltung eines stabilen Preßprozesses mit hohem Preßdruck wichtig ist.



Figur 25: Technologievorschlag zur Herstellung von Bentonitpreßlingen und -granulat

Neben der Rohdichte und Festigkeit müssen die Bentonitpreßlinge eine günstige Form haben. Die längliche Form der in dem Walzenpressenversuch hergestellten Preßlinge ist natürlich für die Erzielung einer hohen Schüttdichte nicht geeignet. Die Walzenpresse ist mit Segmenten zu bestücken, die z. B. kissen- oder mandelförmige Preßlinge liefern. Diese Preßlingsformate begünstigen das möglichst vollständige Ausfüllen der Hohlräume mit Granulat. Außerdem haben die Preßlinge eine höhere Rohdichte, weil bei diesen Formaten nahezu ideal eine Volumenverdichtung erzielt wird. Durch die relativ leichte Auswechselbarkeit der Preßformsegmente kann die Walzenpresse flexibel an veränderte Anforderungen hinsichtlich der Preßlingsgröße und -form angepaßt werden. Für die Herstellung von Preßlingen mit hoher Rohdichte und Festigkeit sind spezifische Anpreßkräfte von 65 bis 75 kN/cm erforderlich. Als technische Presse wird eine Formmuldenwalzenpresse der Firma Köppern (Hattingen, Deutschland) vorgeschlagen, deren Kapazität an die geforderte Produktionsleistung anzupassen ist.

Bei modernen Walzenpressen enthält das Preßprodukt insgesamt nur < 10 % oder höchstens 15 % Brikettbruch, Brikettabrieb sowie unverpreßtes Gut. Dieses Produkt ist von den gut durchpreßten und unversehrten Preßlingen durch Siebklassierung abzutrennen und kann zum Teil für die Herstellung des als Füllmaterial benötigten staubfreien Granulates verwendet werden. Dazu wird es einer Granulatsmühle aufgegeben, die wie im Abschnitt 4 beschrieben konstruiert sein sollte. Durch die Beanspruchung im Mahlraum gelangen nur die aus festerem Abrieb und Brikettbruch entstehenden Körner in den Korngrößenbereich des Granulates von 0,63 - 3 mm. Dadurch wird eine gute Granulatqualität gewährleistet. Das erforderliche Mengenverhältnis von Preßlingen und Granulat beträgt etwa 70 : 30. Da der Anteil von Brikettbruch und Abrieb für die Herstellung der benötigten Granulatmenge -latmenge nicht ausreicht, ist ein Teil der Preßlinge der Granulatsmühle zuzuführen.

In einer zweiten Klassierstufe wird das staubfreie Granulat (0,63 - 3 mm) gewonnen. Das Überkorn wird der Mühle erneut aufgegeben. Das Feingut wird in den Zwischenbunker zurückgeführt.

7 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die durchgeführten Laboruntersuchungen zur Herstellung von Preßlingen und Granulaten aus einem Na-Bentonit MX-80 zeigen, daß die für die vorgesehenen Versiegelungsaufgaben dieses Materials (z. B. Bohrlochversiegelung, Versiegelung von anderen nicht oder nur schwer zugänglichen untertägigen Hohlraumteilen) erforderlichen Bentoniteigenschaften (Rohdichte, Schüttdichte, Druckfestigkeit, Abriebfestigkeit) erreicht werden. Ein Vorschlag zur großtechnischen Herstellung eines Bentonitgranulates (Bentonitpellets) mit diesen Eigenschaften wurde erarbeitet und die Herstellungstechnologie erfolgreich im halbtechnischen Maßstab erprobt.

Vor einem in situ-Einsatz dieses Bentonitgranulates sind noch Laboruntersuchungen unter Wassereinwirkung erforderlich, um diese für Versiegelungsaufgaben wesentlichen physikalischen Materialparameter zu ermitteln und mit den theoretisch, aufgrund der Granulateigenschaften vorausgesagten Werten bei Wassereinwirkung zu vergleichen. Dies betrifft vor allen Quellvermögen und Quelldruckausbildung, Durchlässigkeit und Diffusionsparameter.