

# Bundesamt für Strahlenschutz

## Genehmigungsunterlagen

Konrad

EU 425

---

**Gesamte Blattzahl dieser Unterlage: 81 Blatt**

Die Übereinstimmung der ~~vorstehenden~~  
Abschrift ~~- auszugsweisen Abschrift -~~  
~~Photokopie~~ mit der Urschrift wird beglaubigt.

Hannover, den

15. Jan. 98



**Deckblatt**

Projekt NA A N	PSP-Element NNNNNNNNNN	Obj Kenn NNNNNN	Aufgabe X A A X X	UA A A	Lfd Nr NNNN	Rev. NN		Seite: I.
9K	33192		GHS	RB	0005	02	EU 425	Stand: 21.09.95

**Titel der Unterlage:**  
Hydrostatische Asphaltabdichtung für die Schächte Konrad 1 und 2

**Ersteller:**  
BfS

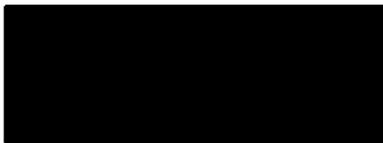
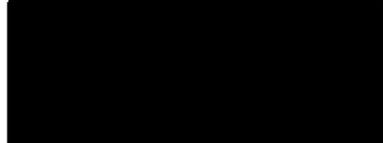
**Textnummer:**

**Stempelfeld:**

Unterlage stimmt mit Original überein!

 Archiv Peine

Datum: [redacted]  
Unterschrift: [redacted]

	<b>Freigabe für Behörden:</b>   Datum und Unterschrift	<b>Freigabe im Projekt:</b>   Datum und Unterschrift
--	---	--

Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung des BfS.

Revisionsblatt

Projekt NAAN	PSP-Element NNNNNNNNNN	Obj Kenn NNNNNN	Aufgabe XAAXX	UA AA	Lfd Nr NNNN	Rev NN	Seite: II.
9K	33192		GHS	RB	0005	00	Stand: 19.12.90
EU 425							

Titel der Unterlage:

Hydrostatische Asphaltichtung für die Schächte Konrad 1 und 2

Rev.	Rev.-Stand Datum	UVST	Prüfer (Kürzel)	rev. Seite	Kat *)	Erläuterung der Revision
01	14.02.92	[Redacted]	[Redacted]	5 6 8 10 11 14 15 16 28 30 42 43 49 53 54 55 56 57 58	R	Korrektur der Teufe auf der Basis EU 438
02	21.09.95	[Redacted]	[Redacted]	1 2 8 9 9 12 13 31 59 59 61 66 71 72 68 72 73 74	R R R R R R R R R R R R R R R R R R	Verfasser gestrichen Verfasser, Ort und Datum gestrichen Verweis auf Plan Konrad wird gestrichen Verweise auf /1/ u. /2/ werden gestrichen Verweise auf /3/ u. /4/ u. /5/ werden gestrichen Verweise auf /6/ u. /7/ werden gestrichen Verweise auf /4/ , /5/ u. /15/ werden gestrichen Berichtigung der Verweise auf die betreffenden Abbildungen Verweis auf /2/ wird gestrichen Verweis auf /20/ wird gestrichen DIN-Norm aktualisiert DIN 1986 durch DIN 1996 ersetzt, Schreibfehler Ergänzung Güte- und Prüfbestimmungen Verweise im Literaturverzeichnis gestrichen

\*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur  
 Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung  
 Kategorie S = substantielle Revision

mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden



Hydrostatische Asphaltichtung für die  
Schächte Konrad 1 und 2



02

**Titel:** Hydrostatische Asphaltichtung für die  
Schächte Konrad 1 und 2

02

Der Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) erstellt. Das BfS behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit Zustimmung des BfS zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.



I n h a l t s v e r z e i c h n i s

1. Vorbemerkungen
- 1.1 Aufgabenstellung der Schachtverfüllung
- 1.2 Aufgabenstellung der hydrostatischen Asphaltabdichtung
2. Aufbau der hydrostatischen Asphaltabdichtung
- 2.1 Allgemeines
- 2.2 Beschreibung der hydrostatischen Asphaltabdichtung in den Schächten Konrad
3. Eigenschaften der hydrostatischen Asphaltabdichtung
- 3.1 Allgemeines
- 3.2 Ermittlung der Viskosität von Bitumen und Asphalten
- 3.3 Feststoffsedimentation im Asphalt
- 3.3.1 Theoretische Ermittlung der Feststoffsedimentation
- 3.3.2 Laboruntersuchungen zur Sedimentation
- 3.3.3 Rechnerische Abschätzung der Feststoffsedimentation in der hydrostatischen Asphaltabdichtung
- 3.4 Druckübertragung im Asphalt
- 3.5 Eindringen von Asphalt in Gebirgsklüfte
4. Einbau der hydrostatischen Asphaltabdichtung
5. Qualitätssicherung
- 5.1 Allgemeines
- 5.2 Überprüfung des Asphalts sowie seiner Ausgangsstoffe
- 5.3 Überprüfungen an der hydrostatischen Säule beim bzw. nach dem Einbau
6. Vorschriften und Richtlinien
7. Literaturverzeichnis



T a b e l l e n v e r z e i c h n i s

- Tab. 1: Auszug aus den Analysedaten für Bitumensorten entsprechend DIN 1995
- Tab. 2: Physikalische Kennwerte für verschiedene Bitumen /6/
- Tab. 3: Abzissenwerte  $b$  der Walther-Gleichung bei  $T_0 = 373 \text{ K}$
- Tab. 4: Errechnete druck- und temperaturabhängige kinematische und dynamische Viskositäten des Bitumens B 25
- Tab. 5: Errechnete druck- und temperaturabhängige kinematische und dynamische Viskositäten des Bitumens B 200
- Tab. 6: Errechnete dynamische Viskositäten des Asphalts (B 25 mit Kalksteinmehlfüller)
- Tab. 7: Errechnete dynamische Viskositäten des Asphalts (B 200 mit Kalksteinmehlfüller)
- Tab. 8: Sedimentationsgeschwindigkeiten des Kalksteinmehlfüllers (nach Anlage 1) im Bitumen B 25
- Tab. 9: Sedimentationsgeschwindigkeiten des Kalksteinmehlfüllers (nach Anlage 1) im Bitumen B 200
- Tab. 10: Sedimentationsweg des Kalksteinmehlfüller (nach Anlage 1) im Asphalt
- Tab. 11: Anforderungen an Normenbitumen (DIN 1995)
- Tab. 12: Prüfungen für die Güteüberwachung von Gesteinsmehlfüllern (Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau RG Min-StB)
- Tab. 13: Qualitätsprüfung der Asphaltmischung



A b b i l d u n g s v e r z e i c h n i s

Abb. 1:	Verfüllschema Schacht Konrad 1	01
Abb. 2:	Verfüllschema Schacht Konrad 2	01
Abb. 3:	Spaltströmung Bitumen Asphalt Kluftweite 0,1 mm, Teufe ca. 160 m - 170 m	01
Abb. 4:	Spaltströmung Bitumen Asphalt	01
Abb. 5:	Temperaturverteilung nach Temperaturlogs in der Kluftweite 0,1 mm, Teufe ca. 209 m - 226 m Bohrung Konrad 101	
Abb. 6:	Kinematische Viskosität von Normbitumen nach /6/	
Abb. 7:	Schubspannung in Abhängigkeit vom Schergefälle	
Abb. 8:	Korngrößenverteilung des Kalksteinmehlfüllers	
Abb. 9:	Korngrößenverteilung für die Sedimentationsversuche des verwendeten Kalksteinmehles	
Abb. 10:	Eichkurve für B-25-Asphalte verschiedener Dichte	
Abb. 11:	Sedimentationskurven von Kalksteinmehl in B-25-Asphalt bei einer Lagerungstemperatur von 150°C (Kornverteilung nach Abb. 9)	
Abb. 12:	Sedimentationskurven von Kalksteinmehl in B-200-Asphalt bei einer Lagerungstemperatur von 60°C (Kornverteilung nach Abb. 9)	
Abb. 13:	Abkühlungskurve in der Mittelachse der hydrostatischen Asphaltichtung	
Abb. 14:	Gemessene Druckübertragung in einer Bitumensäule (B 25)	
Abb. 15:	Gemessene Druckübertragung in einer Asphaltsäule (B 80 gefüllert)	
Abb. 16:	Druckübertragung in den Asphaltversorgungsbohrungen	
Abb. 17:	Anordnung der Asphaltversorgungsbohrungen bzw. der Bohrungen zur Vorabdichtung mit Tonsuspension	
Abb. 18:	Spaltströmung Bitumen B 200 Kluftweite 0,01 mm, 0,05 mm, 0,1 mm Teufe ca. 209 m - 226 m	01



- |          |  |    |
|----------|--|----|
| Abb. 19: | Spaltströmung Asphalt B 200<br>Kluftweite 0,1 mm, 0,5 mm, 1 mm<br>Teufe ca. 209 m - 226 m        | 01 |
| Abb. 20: | Spaltströmung Asphalt B 25<br>Kluftweite 0,1 mm, 0,5 mm, 1 mm<br>Teufe ca. 209 m - 226 m         | 01 |
| Abb. 21: | Radiale Strömung Bitumen B 200<br>Kluftweite 0,01 mm, 0,05 mm, 0,1 mm<br>Teufe ca. 209 m - 226 m | 01 |
| Abb. 22: | Radiale Strömung Asphalt B 200<br>Kluftweite 0,1 mm, 0,5 mm, 1 mm<br>Teufe ca. 209 m - 226 m     | 01 |
| Abb. 23: | Radiale Strömung Asphalt B 25<br>Kluftweite 0,1 mm, 0,5 mm, 1 mm<br>Teufe ca. 209 m - 226 m      | 01 |
| Abb. 24: | Eindringvermögen Bitumen/Asphalt<br>- Parallelkluftsystem  |    |
| Abb. 25: | Absinken des Asphaltspiegels in Gleitschächten /14/  |    |



Anlagenverzeichnis

- Anlage 1: Kalksteinmehlfüller
- Anlage 2: Versuchsapparatur zur Bestimmung der  
Sedimentation im Asphalt



1. Vorbemerkungen

1.1 Aufgabenstellung der Schachtverfüllung

Die Aufgabenstellung der Schachtverfüllung wird wie folgt beschrieben: 02

Nach Beendigung der Betriebsphase muß das gesamte Endlager sicher gegen die Biosphäre abgeschlossen werden. Auch nach der Stilllegung dürfen Radionuklide, die als Folge von nicht vollständig ausschließbaren Transportvorgängen aus dem verschlossenen Endlager im Bereich der Schächte in die Biosphäre gelangen könnten, nicht zu unzulässigen Individualdosen führen.

Dies gilt nicht nur für die zu verfüllenden Schachtquerschnitte als potentielle Wegsamkeit, sondern auch für die die Schächte umgebenden Auflockerungszonen.

Aufgabe der Schachtverfüllung und gleichzeitig auch der Begrenzung der Auflockerungszone ist es, den Zutritt des Transportmediums Wasser aus oberflächennahen wasserführenden Schichten zu den radioaktiven Abfällen zu erschweren und eine mögliche Radionuklidfreisetzung mit dem Transportmedium Wasser aus dem vollgelaufenen Endlager über den Bereich der Schächte derart zu begrenzen, daß die für die Endlagerung radioaktiver Abfälle bestehenden Schutzziele eingehalten werden. 01

Die Schachtverfüllung muß über einen Zeitraum von etwa 10.000 Jahren wirksam sein; die Funktionsfähigkeit wird weit darüber hinaus bestehenbleiben.



## 1.2 Aufgabenstellung der hydrostatischen Asphaltichtung

Aufgabenstellung und Anforderungen an die hydrostatische Asphaltichtung lassen sich wie folgt beschreiben:

02

Ausgehend von der aufgeschlossenen Schichtenfolge in den Schächten Konrad 1 und Konrad 2 wird die Schachtverfüllung hinsichtlich der zu erfüllenden Anforderungen in drei Bereiche unterteilt.

Die Abb. 1 und 2 geben einen Überblick über die Verfüllung der Schächte Konrad 1 und Konrad 2.

Eine hydrostatische Asphaltichtung soll im Bereich des Quartärs und der Oberkreide mögliche Zuflüsse von Tages- und Grundwasser bereits unmittelbar nach Einbringen der Verfüllung reduzieren und möglichst weitgehend verhindern.

02

Das Quartär besteht am Schacht Konrad 1 aus Lehm und Schiebemergel. Ihnen folgen am Schacht Konrad 2 noch quartäre Kiese und Sande. Die Oberkreide (Turon und Cenoman) besteht aus einer Abfolge von Kalksteinen, mergeligen Kalksteinen und Mergeln (Plänerkalke), die im Mittelcenoman und stärker noch im Untercenoman zunehmende Sand- und/oder Tonanteile enthalten. Die Plänerkalke sind dünnbankig bis plattig ausgebildet: das entspricht Schichtflächenabstände im dm-Bereich. Die Gesteine weisen eine hohe Klüftigkeit und einen geringen Durchtrennungsgrad auf. Auch die Kluftabstände liegen im dm-Bereich.

02

02



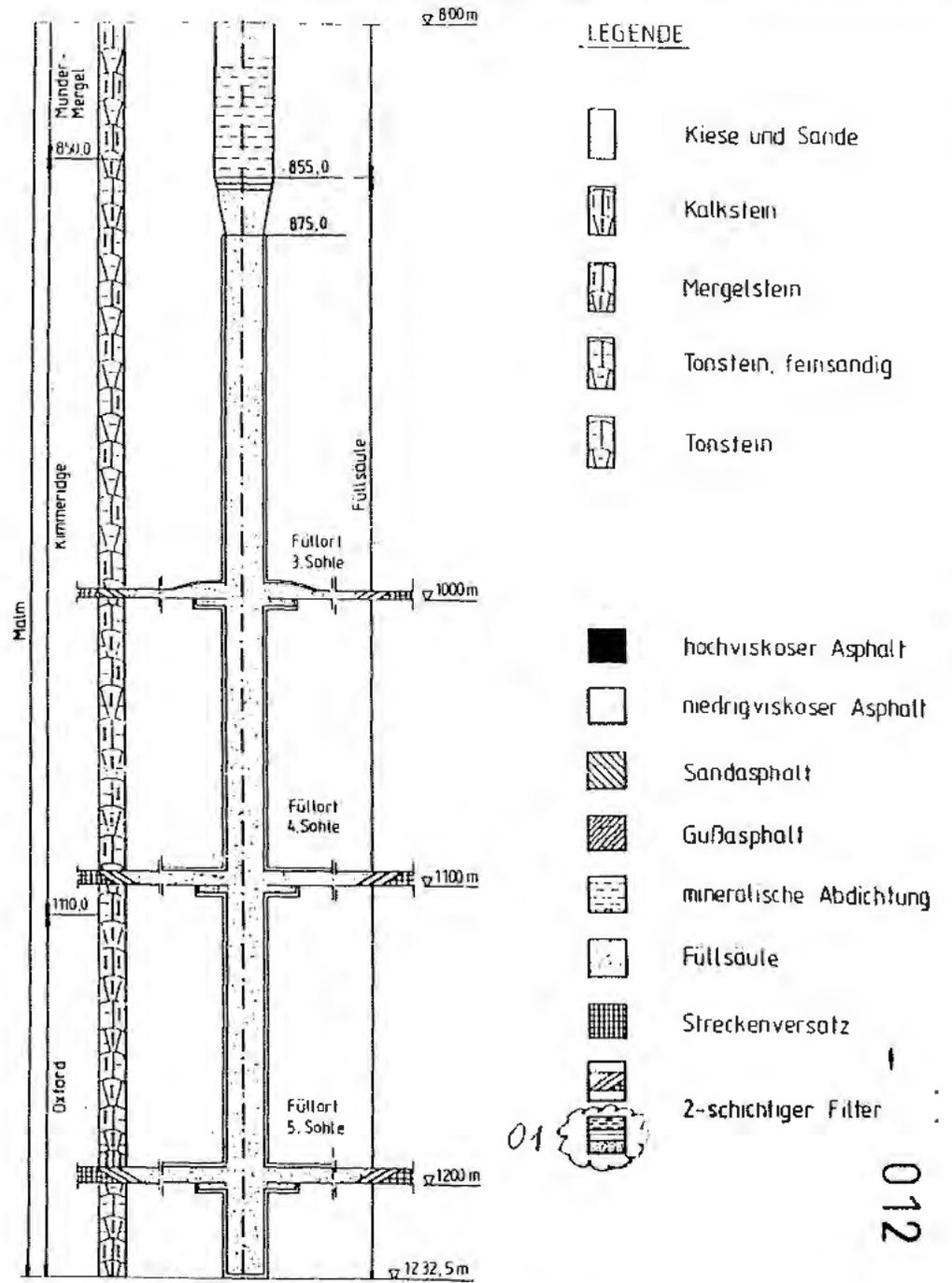
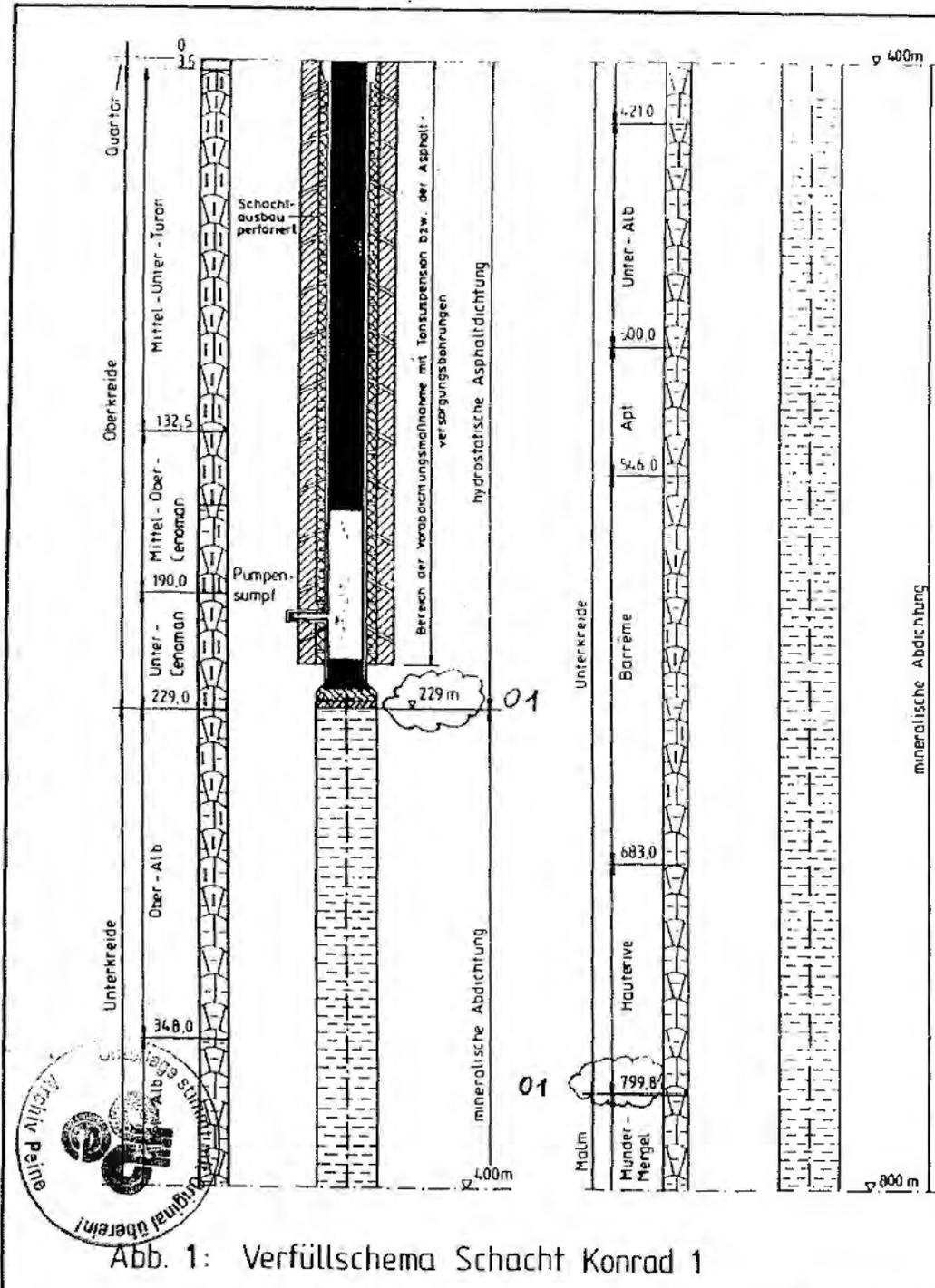
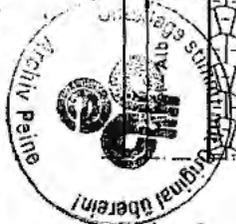
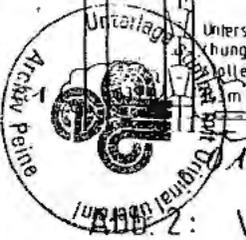
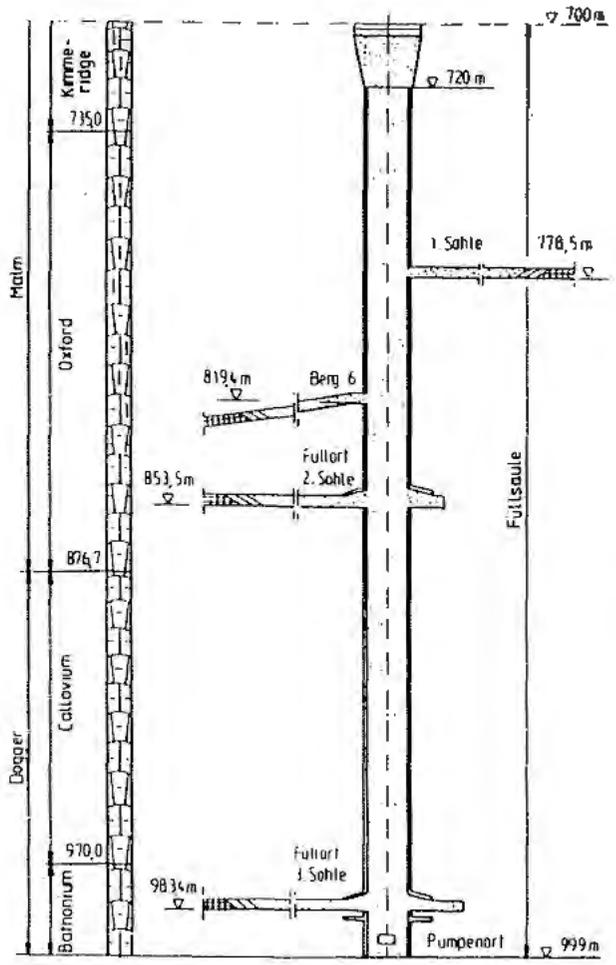
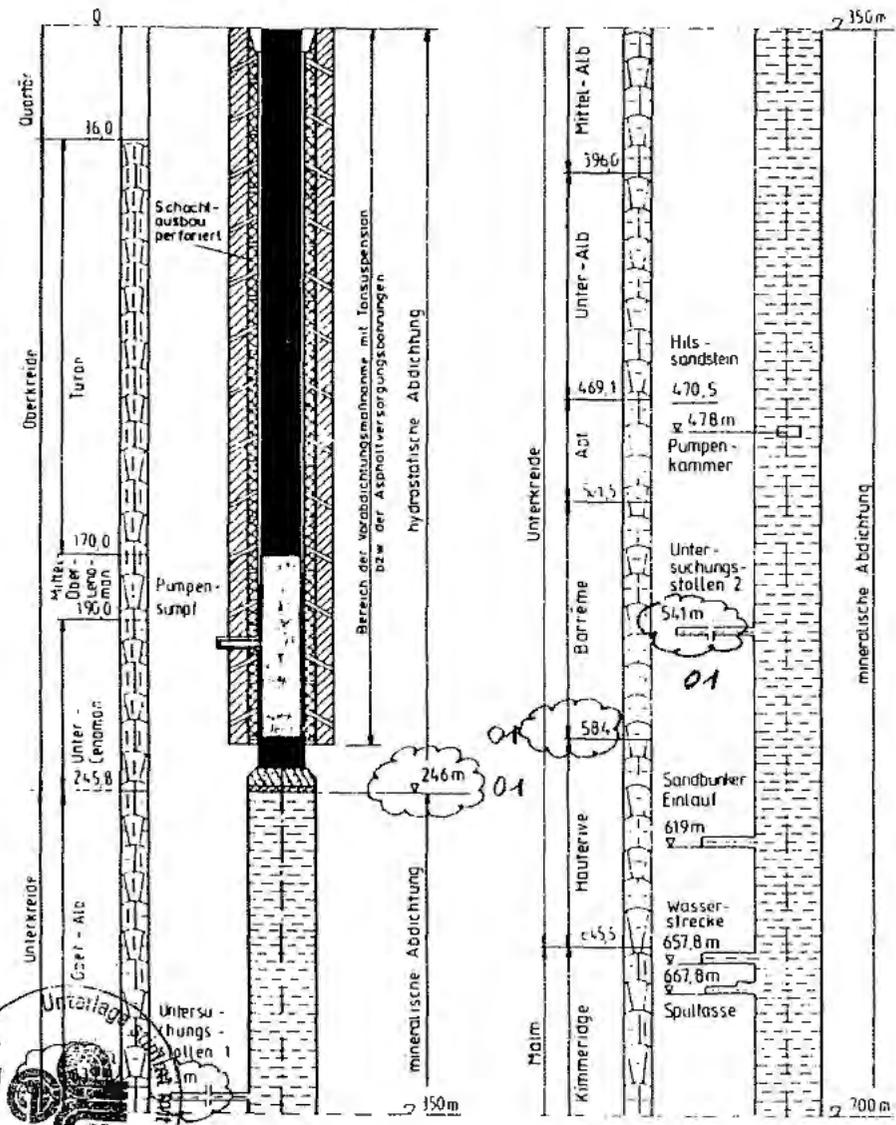


Abb. 1: Verfüllschema Schacht Konrad 1



LEGENDE

-  Kies und Sande
-  Kalkstein
-  Mergelstein
-  Tonstein, feinsandig
-  Tonstein
-  hochviskoser Asphalt
-  niedrigviskoser Asphalt
-  Sandasphalt
-  Gußasphalt
-  mineralische Abdichtung
-  Füllsäule
-  Streckenversatz
-  2-schichtiger Filter



2: Verfüllschema Schacht Konrad 2

## 2. Aufbau der hydrostatischen Asphaltabdichtung

### 2.1 Allgemeines

Hydrostatische Asphaltabdichtungen werden im Schachtbau seit etwa drei Jahrzehnten als Regelabdichtung dort verwendet, wo von den Bergbaubetrieben extreme Dichtigkeitsanforderungen an die Ausbausysteme gestellt werden. Dies gilt insbesondere

- für Schächte in nicht standfestem wasserführendem Gebirge, deren Ausbau dauerhaft wasser- bzw. laugedicht sein und bei denen im Schachtbereich ein sicherer Abschluß zwischen wasser- oder laugeführendem Deckgebirge und den darunterliegenden trockenen Gebirgsschichten erreicht werden muß und
- für den Verschuß von Schächten aufgelassener Bergwerke, in denen Gase unter hohem Druck gespeichert werden.

| 02  
| 02

Hydrostatische Asphaltabdichtungen sind im Schachtbau bewährter Stand der Technik. Sie haben auch bei tiefen Schächten (bis 600 m) und langen Betriebszeiten (mehr als 30 Jahre) Wasser von Grubenräumen abgeriegelt, und zwar auch dort, wo anfänglich Wasserzutritte über die abteufbedingte Auflockerungszone um den Schacht herum beobachtet worden waren und wo Gebirgsbewegungen erfolgten. Da der Asphalt die physikalischen Eigenschaften einer viskosen Flüssigkeit hat und sein hydrostatischer Druck über dem der Gebirgswässer liegt, dringt er in die Poren und Risse des Gebirges ein und verstopft sie.

Die Abdichtungseigenschaften von hydrostatischen Asphaltabdichtungen in den Turon- und Cenoman-Plänerkalksteinen des Ruhrbergbaus sind bekannt. Hydrostatische Asphaltabdichtungen



haben sich dort bewährt. Dies rechtfertigt den Einsatz einer hydrostatischen Asphaltichtung in der Oberkreide an den Schächten Konrad.

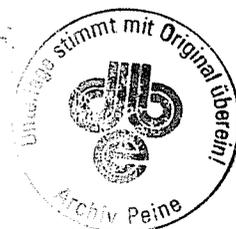
Was die Dauerhaftigkeit von Asphalten betrifft, so haben sie in der Form des Naturasphalts (Naturasphalte sind natürlich vorkommende Gemische von Bitumen und Mineralstoffen) ihre Beständigkeit über geologische Zeiträume erwiesen. Bekannteste Beispiele sind der Trinidad-Asphalt aus dem Asphaltsee der Insel Trinidad und die meterdicken und viele Kilometer langen Asphaltadern im amerikanischen Bundesstaat Utah.

| 02

Auch als Baumaterial hat Asphalt seine Beständigkeit über 5000 Jahre hinweg bewiesen. Sumerer, Babylonier, Assyrer und Ägypter verwandten Naturasphalt für die Abdichtung und Stabilisierung von Abwässerkanälen, Ufermauern, Dämmen und Böschungen. Die Mauern von Ur und Babylon waren mit Asphalt vermörtelt und sind heute teilweise noch erhalten. Uferbefestigungen am Tigris, die 1300 v.Chr. in Asphaltbauweise errichtet wurden, sind heute noch voll funktionsfähig.

| 02

Bitumen ist zwar unter bestimmten Bedingungen mikrobiell angreifbar, doch würde auch unter optimalen Bedingungen ein Bitumenabbau nur sehr langsam ablaufen; so benötigt z.B. der Abbau von 1 cm Tiefe in einen Bitumenkörper hinein mehrere tausend Jahre /8/, /9/. Die im Umfeld der hydrostatischen Asphaltichtung herrschenden Bedingungen für einen mikrobiellen Abbau müssen allerdings als äußerst ungünstig angesehen werden. Eine Beeinflussung der Funktion der hydrostatischen Asphaltichtung in ihrer Gesamtheit kann daher ausgeschlossen werden.



## 2.2 Beschreibung der hydrostatischen Asphaltabdichtung in den Schächten Konrad

Die hydrostatische Asphaltabdichtung für die Schächte Konrad ist auf Abb. 1 und 2 dargestellt. Sie besteht aus einer mehrschichtigen Asphaltssäule (Dichte ca.  $1,5 \text{ t/m}^3$ ) mit Asphalten unterschiedlicher Viskosität sowie Bohrungen, die gezielt einzelne Gebirgspartien mit Asphalt versorgen, und Verpressungen mit Tonsuspension, die ein Abfließen von Asphalt in stark geklüfteten Gebirgspartien einschränken.

In der hydrostatischen Asphaltssäule werden zwei hinsichtlich ihres Eindringverhaltens unterschiedliche Asphalte eingesetzt. Dies sind

- eine schnell wirksame Dichtung aus niedrigviskosem Asphalt (Bitumenqualität: B 200) und
- eine langsam wirksame Dichtung aus hochviskosem Asphalt (Bitumenqualität: B 25).

Der Unterschied im Eindringverhalten geht beispielhaft aus den Abb. 3 und 4 hervor. Die Auswahl der Bitumenqualitäten ist beispielhaft. Andere Bitumensorten zeigen ähnliches Verhalten.

Im Teufenbereich von ca. 160 m bis ca. 209 m (Schacht Konrad 1) bzw. ca. 170 m bis ca. 226 m (Schacht Konrad 2) wird niedrigviskoser Asphalt eingebaut. Somit soll sichergestellt werden, daß der Übergangsbereich zur mineralischen Abdichtung schnell und sicher abgedichtet werden kann.



# SPALTSTRÖMUNG BITUMEN / ASPHALT

KLUFWEITE 0.1mm, TEUFE 160-170m

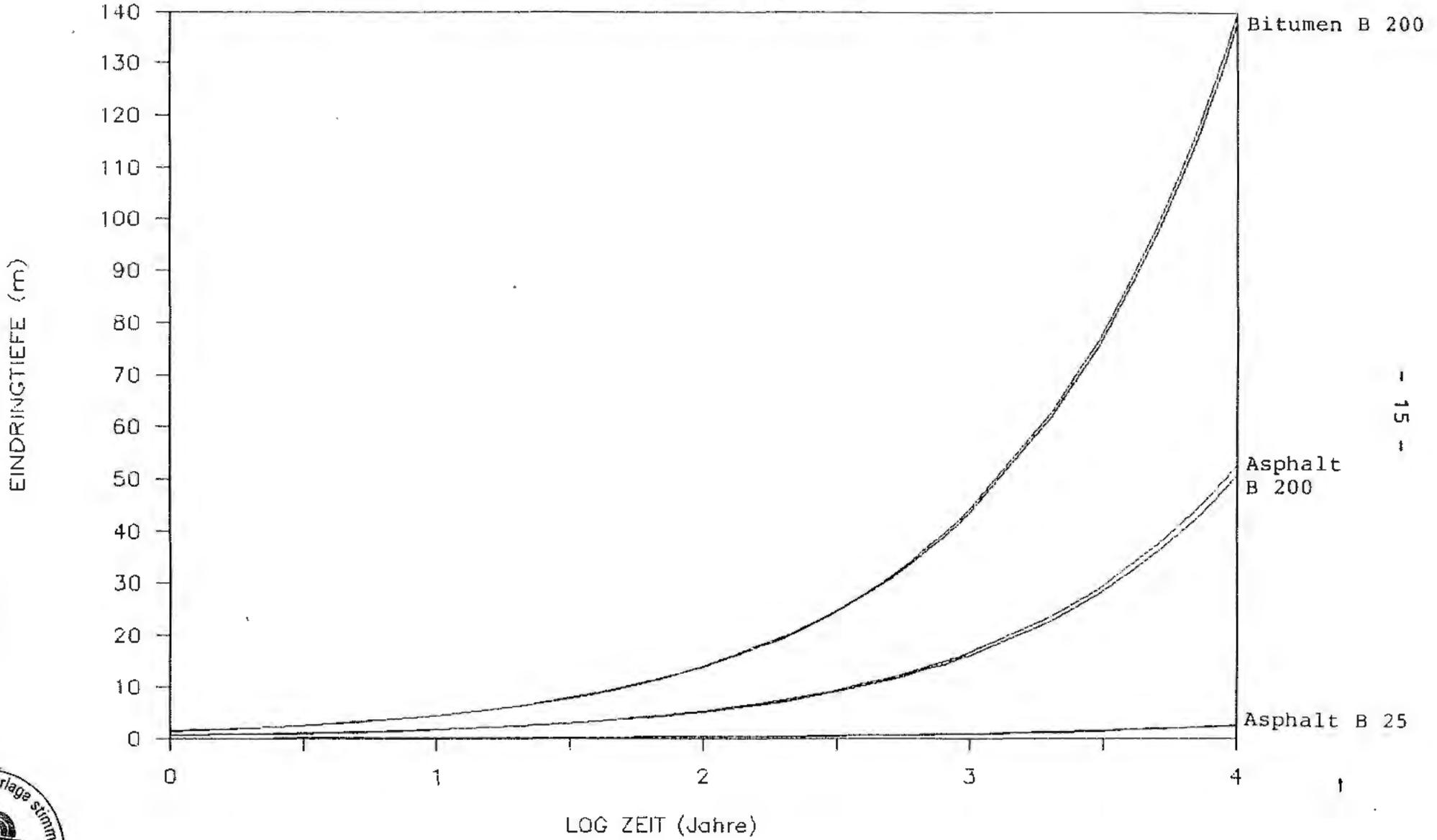


Abb. 3: Spaltströmung Bitumen/Asphalt  
Kluftweite 0,1 mm, Teufe ca. 160 m - 170 m



# SPALTSTRÖMUNG BITUMEN / ASPHALT

Kluftweite 0,1mm Teute 209-226m

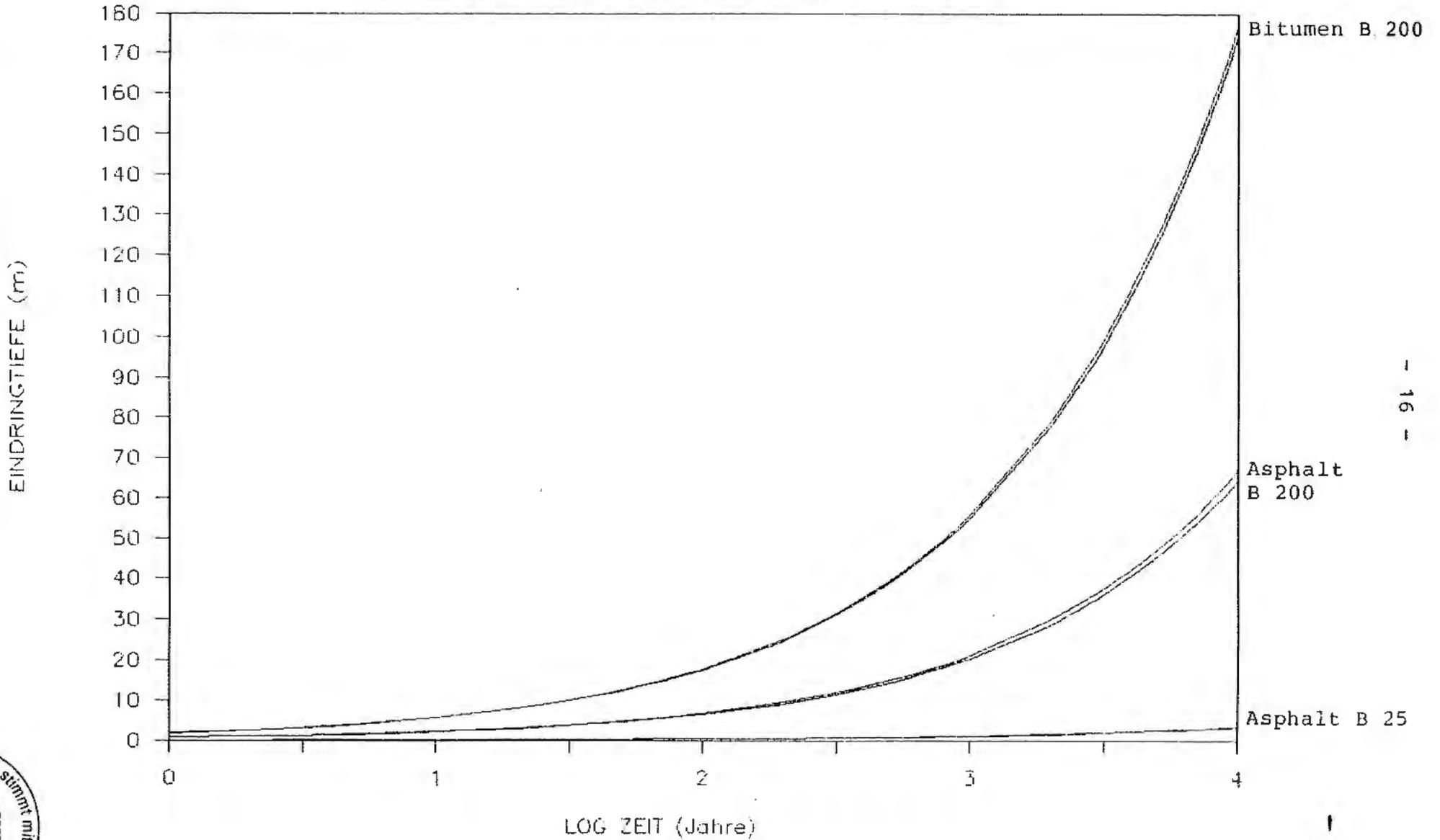


Abb. 4: Spaltströmung Bitumen/Asphalt  
Kluftweite 0,1 mm, Teufe ca. 209 m - 226 m

EINDRINGTIEFE (m)

LOG ZEIT (Jahre)

Bitumen B. 200

Asphalt B 200

Asphalt B 25

- 16 -

018



Darüber wird bis zum Schachtdeckel hochviskoser Asphalt eingebaut. Er dringt langsam in die Klüfte des Gebirges ein und ersetzt im unteren Bereich die in das Gebirge eingedrungenen Teile der vorher eingebrachten Dichtung aus niedrigviskosem Asphalt. Die Spiegelabsenkung der hydrostatischen Säule, die durch das gewollte Abfließen des Asphalts entsteht, wird durch Nachverfüllungen mit hochviskosem Asphalt ausgeglichen.

Um das Eindringen des Asphalts in die Auflockerungszone zu beschleunigen, wird die gesamte Auflockerungszone bis in das gesunde Gebirge hinein zusätzlich durch ein dichtes Netz von Vollbohrungen perforiert (Abb. 1 und 2). Über diese Bohrungen ist sichergestellt, daß auch die hinteren Bereiche der Auflockerungszone schnell mit Asphalt versorgt werden.

Die Viskosität des Asphalts (B 25) ist hoch genug, daß er auch in 10.000 Jahren nicht so weit in das Gebirge - insbesondere in die Klüfte des Turons und Cenomans - eindringt, daß die Wirksamkeit der hydrostatischen Abdichtung beeinträchtigt wird. Zusätzlich wird aber dort, wo größere Klüfte zu erwarten sind, der Bereich vom Ende der Auflockerungszone bis ca. 7,5 m hinter der Schachtwand durch die Verfüllung mit Ton vorgedichtet. Dieser Bereich ist in Abb. 1 und 2 dargestellt. Die Spiegelabsenkung des Asphalts infolge des Eindringens in diese Klüfte wird dadurch weiter eingeschränkt.

Zwischen der Unterkante des Asphalts (B 200) und der Oberkante der mineralischen Abdichtung ist entsprechend den Erfahrungen des Schachtbaus zusätzlich ein Dichtsystem aus Asphalten, deren Viskosität von oben nach unten zunimmt, angeordnet:



- Asphalt (Bitumen B 25, Gesteinsmehlfüller),
- Sandasphalt bzw. Asphaltmastix (Bitumen B 25, Gesteinsmehlfüller, Feinsand),
- Gußasphalt (Bitumen B 25, Gesteinsmehlfüller, Feinsand, Edelsplitt).

Die Erfahrungen der Praxis zeigen, daß ein solches Dichtsystem ein Eindringen des Asphalts in die Schachtbereiche unterhalb der hydrostatischen Asphaltichtung verhindert.



### 3. Eigenschaften der hydrostatischen Asphaltdeckung

#### 3.1 Allgemeines

Asphalt, wie er für die hydrostatischen Abdichtungen in den Schächten Konrad vorgesehen ist wird durch Mischung von Normenbitumen nach DIN 1995 und einem im Wasser weder löslichen noch quellenden Gesteinsmehlfüller (Anlage 1) bei hohen Temperaturen hergestellt.

Bitumen im hier gebrauchten Sinn sind die höchst- und nichtsiedenden Komponenten einer mehrstufigen schonenden Destillation von Erdöl. Sie sind keine chemisch genau definierbaren Stoffe, sondern Vielstoffgemische aus Kohlenwasserstoffverbindungen (einschließlich Heteroverbindungen) in Form von oleophilen Assoziationskolloiden. Durch die Destillation des Erdöls werden sie chemisch nicht verändert. Sie sind wie das Erdöl Naturstoffe. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand unterscheidet man im komplexen Gemisch "Bitumen" verschiedene hochmolekulare Komponenten. Dabei fungieren molekulardispers gelöste Moleküle als ölige Dispersionsmittel, die sog. Maltene, in denen kolloiddispers gelöste Micellen verteilt sind. Diese Micellkolloide werden von den Asphaltene und Erdölharzen gebildet.

Die Micellen sind außerordentlich stabil. Sie vereinigen im Inneren polare Komponenten, die von den Kohlenwasserstoffresten umgeben sind und damit oleophile Oberflächen für solubilisierende Kohlenwasserstoffe bilden. Es konnte festgestellt werden, daß in den Micellen leicht wasserlösliche Salze eingeschlossen sind. In geologischen Zeiträumen haben Bitumen bzw. Erdöl mit Wasser im Kontakt gestanden. Trotzdem sind diese leicht löslichen Stoffe nicht extrahiert worden, d.h. sie sind so gut geschützt, daß sie unextrahierbar bleiben.



Die Asphaltene sind Endprodukte einer Kondensation, die über Oxidationsreaktionen Öle → Erdöle → Erdölharze → Asphaltene abläuft. Der Harzgehalt und die Aromatizität beeinflussen sehr stark die Dispersion der Asphaltene in der öligen Phase. Dabei bilden die Asphaltene und Erdölharze eine netzwerkähnliche Struktur aus, die im wesentlichen das rheologische Verhalten des Bitumens bestimmt. Die chemische Zusammensetzung spielt dabei eine untergeordnete Rolle.

Entsprechend DIN 1995 sind die Spezifikationsgrenzen für Destillationsbitumen aus Tab. 1 und Tab. 2 ersichtlich.

	Bitumensorte				
	B 200	B 80	B 65	B 45	B 25
Penetration bei 25°C 1/10 mm	160-210	70-100	50-70	35-50	20-30
Erweichungspunkt "Ring und Kugel" °C	37-44	44-49	49-54	54-59	59-67
Brechpunkt nach Fraaß höchstens °C	- 15	- 10	- 8	- 6	- 2
Asche höchstens Gew.-%	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Tab. 1: Auszug aus den Analysedaten für Bitumensorten entsprechend DIN 1995

Das Verhalten von Bitumen und Asphalt bei Belastungen verschiedenster Art ist durch visko-elastische Zustandsänderungen gekennzeichnet. Die Eigenschaften von Bitumen werden in der Praxis jedoch vorwiegend durch die folgenden vier standardisierten konventionellen Kennzahlen, die bei Routineuntersuchungen gewonnen werden, beschrieben:

- Penetration bei 25° C in 1/10 mm
- Erweichungspunkt "Ring und Kugel" in °C
- Brechpunkt nach Fraaß in °C
- Duktilität bei 25° C in cm



	Bitumensorte				
	B 200	B 80	B 65	B 45	B 25
Duktilität bei 15°C bei 25°C mindestens cm	- 100	- 100	- 100	- 40	- 15
Unlösliches abzüglich Asche höchstens Gew.-%	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Paraffin höchstens Gew.-%	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Flammpunkt über °C	220	240	250	260	280
Dichteverhältnis 25°C/25°C	1,01-1,04	1,01-1,04	1,02-1,05	1,02-1,06	1,03-1,06
Gewichtsverluste bei 163°C/5 h höchstens Gew.-%	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0
Anstieg des Erwei- chungspunktes "Ring und Kugel" nach dem Erhitzen höchstens °C	10	10	10	10	8
Verminderung der Penetration nach dem Erhitzen höchstens um %	60	60	60	60	50

Tab. 2: Physikalische Kennwerte für verschiedene Bitumen /6/

Für folgende Vorgänge in der hydrostatischen Asphalt-dichtung ist die Kenntnis der rheologischen Parameter und der physikalischen Gesetzmäßigkeiten notwendig:

- Sedimentation von Feststoffpartikeln (Füllmaterial) in Bitumen,
- Druckübertragung im Asphalt,
- Eindringen von Bitumen und Asphalt in Gebirgsklüfte.



Diese Vorgänge verlaufen stetig und in langen Zeiträumen.

Die Vorgänge im Dichtsystem lassen sich in zwei Bereiche einordnen:

- Kurzzeitbereich mit relativ hohen Temperaturen  
(Einbautemperatur: ca. 100° C)
- Langzeitbereich mit Temperaturen zwischen ca. 14° C und ca. 19° C entsprechen der Gebirgstemperatur (Abb. 5)

### 3.2 Ermittlung der Viskosität von Bitumen und Asphalten

Die Viskosität von Bitumen ist sehr stark temperaturabhängig. Wenn rein Newton'sches Verhalten für Fließvorgänge angesetzt wird (als Faustregel gilt, daß oberhalb des Erweichungspunktes "Ring und Kugel" sich die Destillationsbitumen wie Newton'sche Flüssigkeiten verhalten. Ab einer "gewissen" Belastung tritt bei einer Vielzahl von Bitumen strukturviskoses Verhalten auf, d.h. die Viskosität sinkt deutlich bei zunehmender Belastung), kann die kinematische Viskosität von Bitumen in Abhängigkeit von der Temperatur nach der Walther-Gleichung /12/ wie folgt abgeschätzt werden:

$$\lg (\lg (\nu_B + 0,8)) = m \left( \lg \frac{T}{T_0} \right) + b (T_0)$$

- mit
- $\nu_B$  = kinematische Viskosität von Bitumen in cSt
  - T = Temperatur in K
  - $T_0$  = Bezugstemperatur in K
  - m = Anstieg der Viskositätskurve
  - b = Ordinatenabschnitt

Im Walther-Ubbelohde-Diagramm ergeben sich für die einzelnen Bitumenarten Geraden. Abb. 6 zeigt diesen Verlauf.



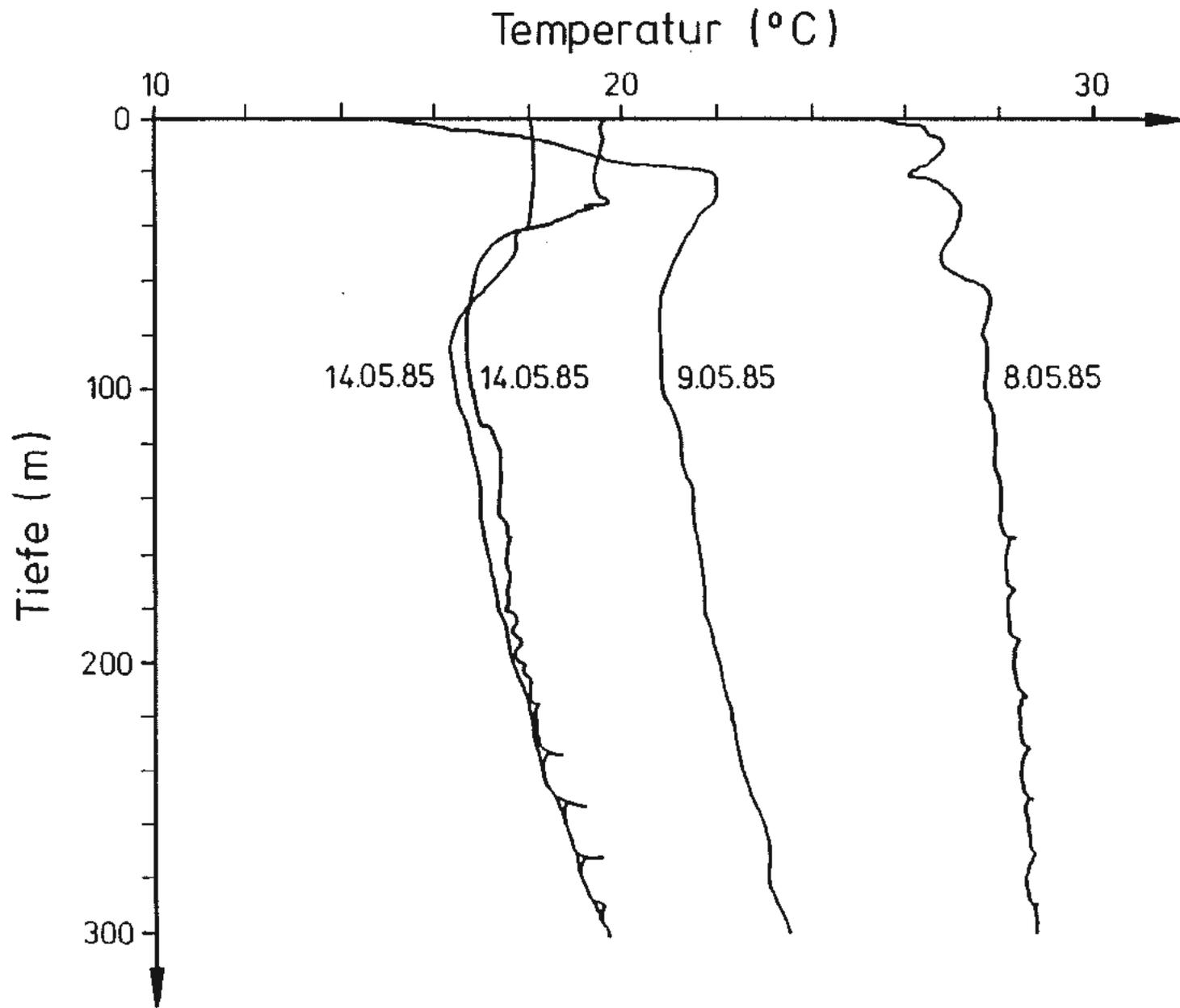


Abb. 5: Temperaturverteilung nach Temperaturlogs in der Bohrung Konrad 101

025

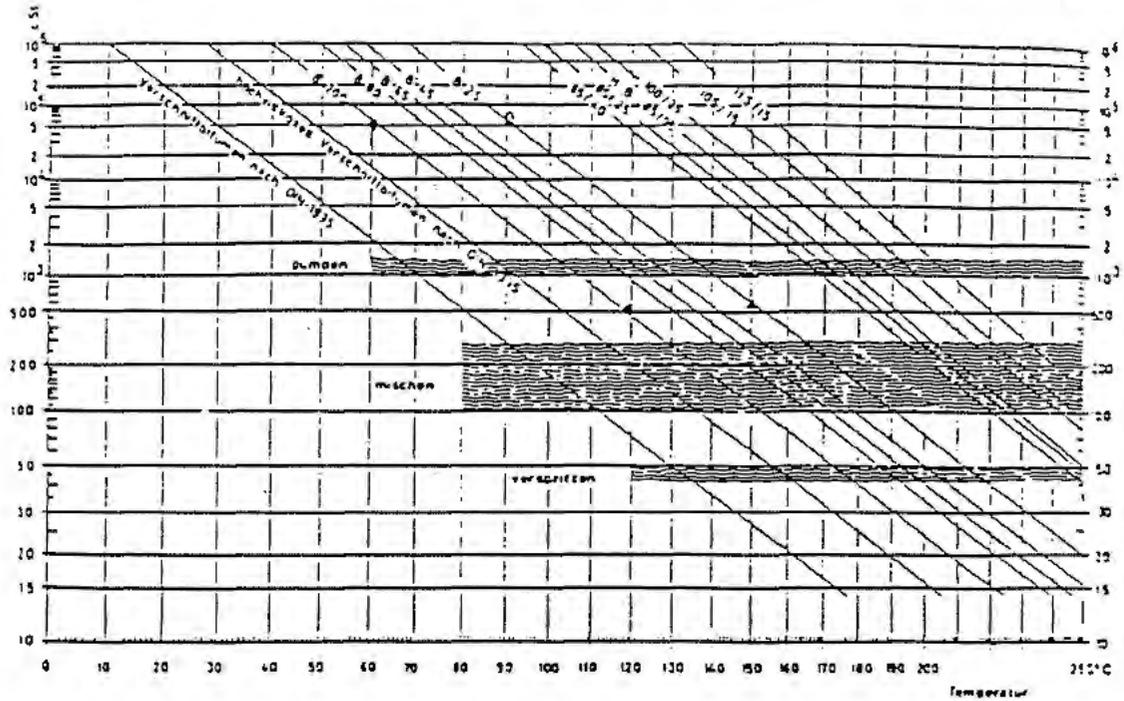


Abb. 6: Kinematische Viskosität von Normbitumen nach /6/

Auf der Basis von Viskositätswerten aus /6/, /12/ wurden für die zwei Bitumenarten der hydrostatischen Asphaltverdichtung die Koeffizienten  $b(T_0)$  bestimmt.

Der Anstieg  $m$  ist unabhängig von der Bitumensorte und wurde mit  $m = - 3,5345$  ermittelt. In Tab. 3 sind die entsprechenden Werte angegeben.

Bitumensorte	$b(T_0 = 373 \text{ K})$
B 25	0,633574
B 200	0,505866

Tab. 3: Abzissenwerte  $b$  der Walther-Gleichung bei  $T_0 = 373 \text{ K}$

Mit der Walther-Gleichung lassen sich nun die Viskositätswerte für die in Tab. 1 und 2 spezifizierten Bitumen ermit-



teln. Da diese Spezifikation immer für einen bestimmten Wertebereich von Penetration und Erweichungspunkt gilt, sind Unterschiede in der Viskosität in Abhängigkeit von der Herkunft und Herstellung des Bitumens möglich. Die Schwankungsbreite kann mit dem Faktor 2 angegeben werden /12/.

Die dynamische Viskosität wird mit

$$\eta_B = \nu_B \cdot \rho_B (T, p)$$

ermittelt. Temperatur- und Druckabhängigkeit der Bitumendichte sind bei dem vorgesehenen Einsatz nicht mehr vernachlässigbar. Sie werden wie folgt abgeschätzt:

$$\rho_B (p, T) = \rho_B (25^\circ \text{ C}) \cdot (1 + c \cdot \Delta p - \alpha_{th} \cdot \Delta T)$$

- mit  $\rho_B (25^\circ \text{ C})$  = Bitumendichte bei Normaldruck und  $25^\circ \text{ C}$   
 $\Delta p$  = Druckdifferenz zum Normaldruck in MPa  
 $\Delta T$  = Temperaturdifferenz zur Bezugstemperatur ( $25^\circ \text{ C}$ ) in K  
 $c$  = Kompressibilität des Bitumens  
 $\approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$   
 $\alpha_{th}$  = thermischer Ausdehnungskoeffizient (kubisch) für Bitumen  $\approx 6 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$

Asphalte als Mischungen von Bitumen und Gesteinsmehl-Füller haben in Abhängigkeit von der Volumenkonzentration des Füllermaterials höhere Viskositäten als Bitumen. Dabei spielen Mineraltyp, Kornform und Kornabstufung ebenfalls eine Rolle. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind jedoch mathematische Formulierungen dafür nicht bekannt. Zur Abschätzung der Viskosität von hohlraumfreiem Asphalt wird deshalb die empirisch gewonnene Gleichung nach Ewers und Heukelom /11/ benutzt.



$$\eta_A = \eta_B \cdot \left( 1 + \frac{1,25 \cdot C_V}{1 - V_P \cdot C_V} \right)^{3,6 \cdot V_P - 2,3}$$

$$= \eta_B \cdot \eta_r$$

- wobei
- $\eta_A$  = Asphaltviskosität
  - $\eta_B$  = Bitumenviskosität
  - $C_V$  = Volumenkonzentration des Füllermaterials
  - $V_P$  = Packvolumen des Füllers
  - $\eta_r$  = relative Asphaltviskosität

Die Volumenkonzentration  $C_V$  ist nach /11/ definiert:

$$C_V = \frac{V_M}{V_A} = \frac{\text{Mineralvolumen}}{\text{Asphaltvolumen}} = \frac{\rho_A - \rho_B}{\rho_M - \rho_B}$$

- wobei  $\rho_M$  = Dichte des Füllermanerals

Das Packvolumen  $V_P$  ergibt sich als Verhältnis des Volumens bei dichtester Lagerung zum Feststoffvolumen oder bei Kenntnis des Hohlraumgehaltes zu

$$V_P = \frac{1}{1 - \frac{H_t}{100}}$$

- $H_t$  = Hohlraumgehalt des trockenen Prüfgutes in Vol.-%

Die Gleichung ist gültig bis zu einer Füllerkonzentration von ca. 80 Vol.-%. Oberhalb dieses Wertes verliert die Mischung ihren Flüssigkeitscharakter und nähert sich dem Verhalten eines Festkörpers. Die Einstellung der Asphalt-dichte  $\rho_A$  bzw. die Ermittlung der Füller- und Bitumenanteile M und B erfolgt nach DIN 1996:

$$\rho_A = \frac{100}{\frac{M}{\rho_M} + \frac{B}{\rho_B}}$$



Die durch Berechnung ermittelten Viskositätswerte weichen im Temperaturbereich unter ca. 30° C von gemessenen Werten ab.

Grund dafür sind die in diesem Temperaturbereich auftretenden strukturviskosen Eigenschaften des Asphalts. Die in dem relevanten Temperaturbereich von ca. 20° C rein rechnerisch ermittelten Viskositäten betragen ca. 60 % der gemessenen Werte und liegen damit innerhalb des Faktors 2, der für Asphalte beim Vergleich zwischen Rechen- und Meßwerten als technisch akzeptabel anerkannt ist /12/. Eine Fließgrenze für die Asphalte B 25 und B 200 - auch mit Dichten von 1.500 kg/m<sup>3</sup> - wurde in Versuchen nicht beobachtet (Abb. 7).

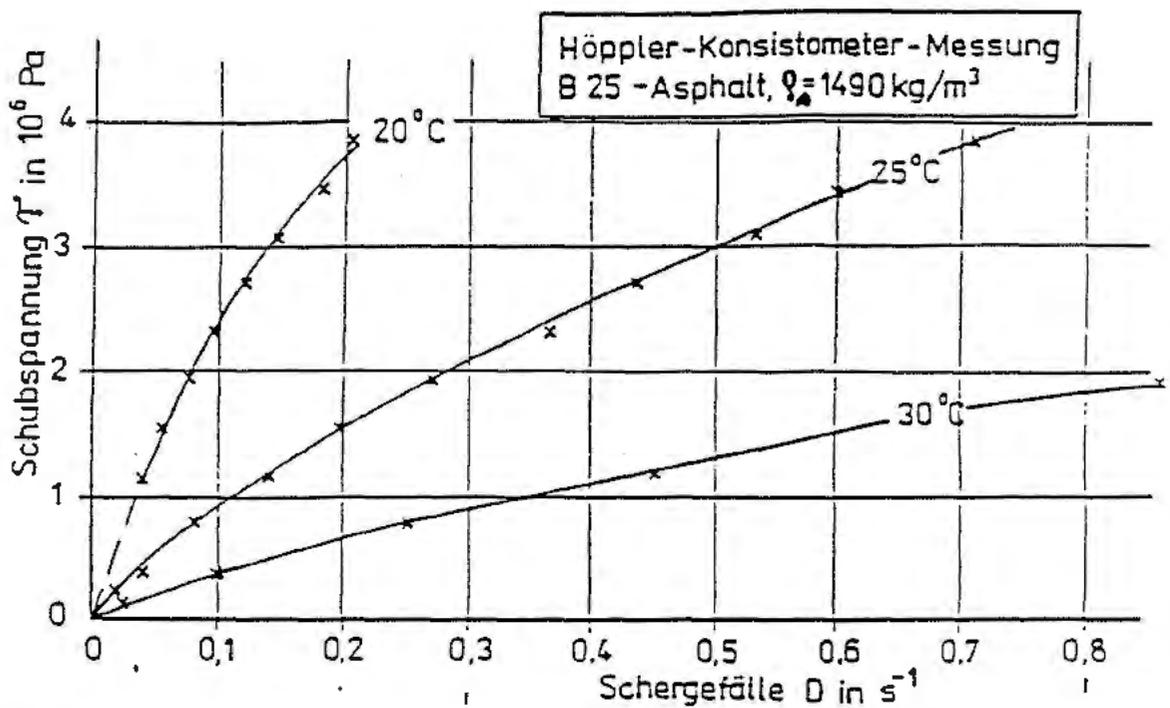


Abb. 7: Schubspannung in Abhängigkeit vom Schergefälle

Im Schachtverschluß der Schächte werden das ungefüllerte Bitumen B 200 sowie die folgenden Asphaltarten eingesetzt:



- Asphalt (Dichte 1.500 kg/m<sup>3</sup>) aus Bitumen B 25 und Kalksteinmehlfüller.

In den Tab. 4 und 5 wurden für Bitumen B 25 und B 200 nach den o.g. Gleichungen druck- und temperaturabhängige dynamische Bitumenviskositäten ermittelt. Die Temperaturverteilung in der Dichtung, die dabei berücksichtigt wurde, wurde an die Temperaturlogs der Bohrung Konrad 101 angelehnt (Abb. 5).

Tiefe m	Druck MPa	Temperatur °C	Temperatur- differenz zu 25° C °C	Bitumen- rhdichte t/m <sup>3</sup>	kinematische Bitumen- viskosität cSt	dynamische Bitumen- viskosität Pas
0	0	~ 14	- 11	1,04/1,07	$7,27 \cdot 10^{10}$	$7,56 \cdot 10^7 / 7,78 \cdot 10^7$
160	2,4	~ 17	- 8	1,04/1,07	$2,95 \cdot 10^{10}$	$3,07 \cdot 10^7 / 3,16 \cdot 10^7$
170	2,6	~ 17	- 8	1,04/1,07	$2,95 \cdot 10^{10}$	$3,07 \cdot 10^7 / 3,16 \cdot 10^7$
209	3,1	~ 18	- 7	1,04/1,07	$2,20 \cdot 10^{10}$	$2,29 \cdot 10^7 / 2,35 \cdot 10^7$
226	3,4	~ 18	- 7	1,04/1,07	$2,20 \cdot 10^{10}$	$2,29 \cdot 10^7 / 2,35 \cdot 10^7$

Tab. 4: Errechnete druck- und temperaturabhängige kinematische und dynamische Viskositäten des Bitumens B 25

Tiefe m	Druck MPa	Temperatur °C	Temperatur- differenz zu 25° C °C	Bitumen- rhdichte t/m <sup>3</sup>	kinematische Bitumen- viskosität cSt	dynamische Bitumen- viskosität Pas
160	2,4	~ 17	- 11	1,02/1,05	$6,34 \cdot 10^7$	$6,47 \cdot 10^4 / 6,66 \cdot 10^4$
170	2,6	~ 17	- 8	1,02/1,05	$6,34 \cdot 10^7$	$6,47 \cdot 10^4 / 6,66 \cdot 10^4$
209	3,1	~ 18	- 7	1,02/1,05	$5,10 \cdot 10^7$	$5,20 \cdot 10^4 / 5,36 \cdot 10^4$
226	3,4	~ 18	- 7	1,02/1,05	$5,10 \cdot 10^7$	$5,20 \cdot 10^4 / 5,36 \cdot 10^4$

Tab. 5: Errechnete druck- und temperaturabhängige kinematische und dynamische Viskositäten des Bitumens B 200

Die Kornverteilungskurve des in der hydrostatischen Asphalt-dichtung verwendeten Kalksteinmehlfüllers (Anlage 1) ist in Abb. 8 dargestellt. Der in der Eigenüberwachung des Füllers ermittelte Hohlraumgehalt beträgt 43,1 Vol.-%. Die Rohdichte beträgt 2.720 kg/m<sup>3</sup>.



Korngrößenverteilung  
Produktbezeichnung: **MIKROSÖHL**

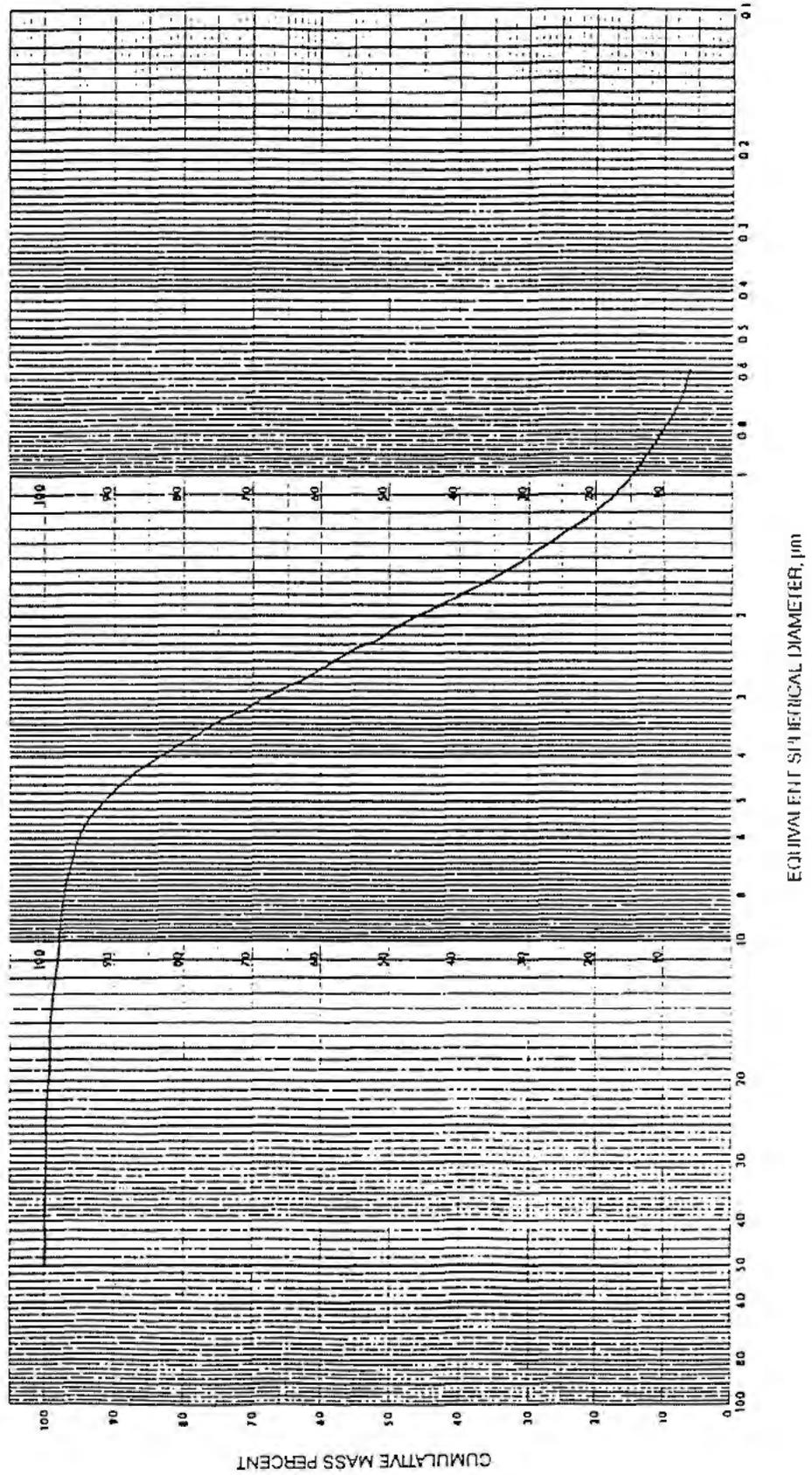


Abb. 8 Korngrößenverteilung des Kalksteinmehlfüllers



- Volumenkonzentration: B 25  $\rho_B = 1.040 \text{ kg/m}^3$ :  $c_V = 0,27$   
 $\rho_B = 1.070 \text{ kg/m}^3$ :  $c_V = 0,26$
- B 200  $\rho_B = 1.020 \text{ kg/m}^3$ :  $c_V = 0,28$   
 $\rho_B = 1.050 \text{ kg/m}^3$ :  $c_V = 0,27$

- Packvolumen:  $V_D = 1,76$

Unter Benutzung dieser Werte kann die dynamische Asphaltviskosität ermittelt werden. Die errechneten Werte sind in den Tab. 6 und 7 enthalten.

Teufe m	Bitumen- rohdichte kg/m <sup>3</sup>	dynamische Bitumen- viskosität Pas	relative Asphalt- viskosität ( - )	dynamische Asphalt- viskosität Pas
0	1040	$7,56 \cdot 10^7$	6,80	$5,14 \cdot 10^8$
	1070	$7,78 \cdot 10^7$	6,12	$4,76 \cdot 10^8$
160 bzw. 170	1040	$3,07 \cdot 10^7$	6,80	$2,09 \cdot 10^8$
	1070	$3,16 \cdot 10^7$	6,12	$1,93 \cdot 10^8$
209 bzw. 226	1040	$2,29 \cdot 10^7$	6,80	$1,56 \cdot 10^8$
	1070	$2,35 \cdot 10^7$	6,12	$1,44 \cdot 10^8$

01

Tab. 6: Errechnete dynamische Viskositäten des Asphalts (B 25 mit Kalksteinmehlfüller)

Teufe m	Bitumen- rohdichte kg/m <sup>3</sup>	dynamische Bitumen- viskosität Pas	relative Asphalt- viskosität ( - )	dynamische Asphalt- viskosität Pas
160 bzw. 170	1020	$6,47 \cdot 10^4$	7,58	$4,9 \cdot 10^5$
	1050	$6,66 \cdot 10^4$	6,80	$4,53 \cdot 10^5$
209 bzw. 226	1020	$5,20 \cdot 10^4$	7,58	$3,94 \cdot 10^5$
	1050	$5,36 \cdot 10^4$	6,80	$3,64 \cdot 10^5$

01

Tab. 7: Errechnete dynamische Viskositäten des Asphalts (B 200 mit Kalksteinmehlfüller)



### 3.3 Feststoffsedimentation im Asphalt

#### 3.3.1 Theoretische Ermittlung der Feststoffsedimentation

Die Betrachtungen zur Sedimentation von Füllerteilchen in Bitumen werden in der Praxis nach dem Stokes'schen Gesetz durchgeführt. Damit läßt sich die Sinkgeschwindigkeit von kugelförmigen Einzelteilchen in Flüssigkeiten beschreiben: 02

$$w = d_k^2 \frac{(\rho_k - \rho_{F1}) \cdot g}{18 \eta_{F1}}$$

- mit
- w = Sinkgeschwindigkeit in m/s
  - dk = Teilchendurchmesser in m
  - $\rho_k$  = Teilchendichte in kg/m<sup>3</sup>
  - $\rho_{F1}$  = Flüssigkeitsdichte in kg/m<sup>3</sup>
  - $\eta_{F1}$  = dynamische Viskosität der Flüssigkeit in Pa · s

Die Beziehung für w gilt für die freie Sedimentation bei Feststoffvolumenkonzentrationen von  $c_v$  kleiner als 0,5%. Bei schleichender Umströmung (Reynoldszahl kleiner als 0,5) spielt die Oberflächenform der Partikel keine Rolle mehr. Steigt die Füllerkonzentration über 0,5 %, liegt eine gestörte Sedimentation vor. Dabei wird die Sinkgeschwindigkeit durch Ausweichströme und Grenzflächeneffekte mit zunehmender Volumenkonzentration stark vermindert. Bei höheren Feststoffgehalten beginnen die Partikel mehr oder weniger als Schwarm zu sedimentieren. Die gestörte Sedimentation der Einzelteilchen geht in die Zonensedimentation über. Im Schwarm sind die Teilchen untereinander scheinbar verbunden und der Verband besitzt in sich eine gewisse Fließgrenze. 02

Die Bewegungsmöglichkeiten der Einzelteilchen mit unterschiedlichem Durchmesser sind stark eingeschränkt. Größere



Teilchen werden abgebremst, kleine dagegen mitgerissen. Die Flüssigkeit wird im oberen Teil völlig geklärt, darunter liegt die Sedimentationszone, in der die Sinkgeschwindigkeit nur eine Funktion der Konzentration ist. Die obere Klarzone vergrößert sich mit der Zeit, d.h. die Trennfläche wandert nach unten. Unterhalb der Sedimentationszone befindet sich meist noch eine Übergangszone bis zum Sediment (eingedickter Schlamm) am Boden des betreffenden Behälters.

In der Nähe des Sediments (Übergangszone) vermindert sich die Absetzgeschwindigkeit infolge der höheren Teilchenkonzentration. Bei sehr hohen Feststoffkonzentrationen ist ein starker Abbremsseffekt von Beginn der Sedimentation an zu beobachten, d.h. die Teilchenkonzentration und die Sinkgeschwindigkeit sind in jeder Höhe unterschiedlich. Der Vorgang verläuft stark instationär. Wenn sich die Teilchen berühren, tritt mechanische Kompression ein. Die Feststoffpartikel bilden dann ein Gerüst, das sich im Laufe der Zeit weiter verfestigt.

Das konzentrationsabhängige Sedimentationsverhalten von wäßrigen Suspensionen (Zonensedimentation) läßt sich durch Versuche in Standzylindern recht gut nachbilden wenn keine Grenzflächeneffekte oder elektrokinetischen Beeinflussungen auftreten, während die Vorgänge in der Übergangs- bzw. Kompressionszone nur schwer modellierbar sind. Näherungsweise kann das Absetzen durch eine modifizierte Schwarmgeschwindigkeit ermittelt werden.

$$w_s = \frac{d_k^2 (\rho_K - \rho_A) g}{18 \eta_A}$$

Dabei werden die Parameter Dichte und Viskosität der reinen Flüssigkeit durch die der Suspension - in diesem Fall von Asphalt - ersetzt. Als Partikeldurchmesser  $d_k$  wird ein mittlerer Durchmesser eingesetzt.



### 3.3.2 Laboruntersuchungen zur Sedimentation

Zur Klärung des Absetzverhaltens von Feststoffen in Bitumen bzw. Asphalten wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt. In den Asphalten wurde als Füller Kalksteinmehl (nach Abb. 9) verwendet. Die Aussage der Versuche ist aber auch auf andere Füllersorten übertragbar.

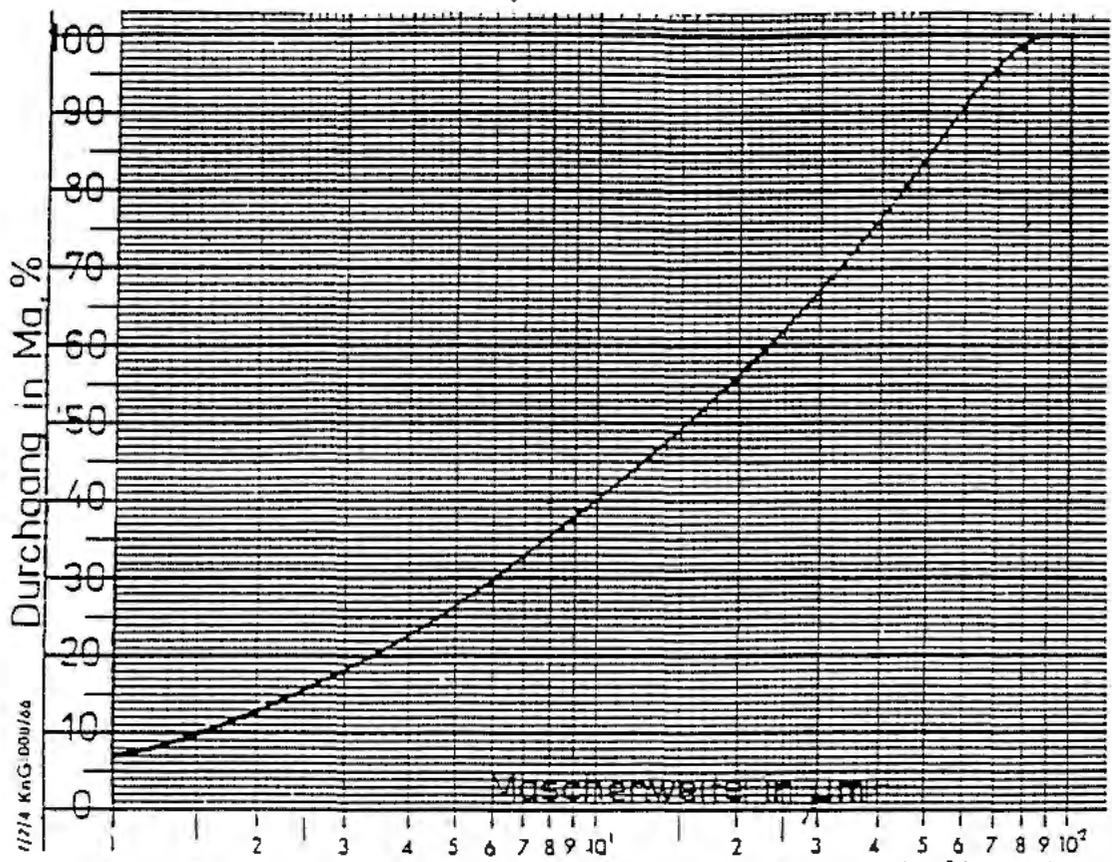


Abb. 9: Korngrößenverteilung für die Sedimentationsversuche des verwendeten Kalksteinmehles

1. Um einen Überblick zur Gültigkeit des Stokes'schen Gesetzes für das Sinkverhalten von Einzelkugeln im kolloiddispersen System "Bitumen" zu bekommen, wurde die



Sinkgeschwindigkeit von Stahlkugeln von 6 mm und 10 mm Durchmesser in Bitumen der Sorte B 200 bei verschiedenen Temperaturen gemessen. (Die Sorte B 200 wurde aus Gründen der Zeitraffung gewählt.) Die Untersuchungen wurden mit bitumengefüllten Glaszylindern von 4 cm Durchmesser vorgenommen. Die Fallhöhe der Kugeln betrug 20 cm. Die Kugeln wurden mit Hilfe eines Induktionsmeßgerätes geortet.

Es konnte festgestellt werden, daß sowohl bei Temperaturen von 90° C und 75° C als auch bei Raumtemperatur von 21° C die Fallgeschwindigkeit der Kugeln nur 20 % - 25 % der mit der Stokes'schen Gleichung errechneten Werte betrug. Beim Sinken der Kugeln lag stationäre Strömung vor. Da der Reynoldszahlbereich kleiner als 0,5 eingehalten wurde und auch das Kriterium für schleichende Umströmung nach

$$\text{Gr (Grashof-Zahl)} = \frac{(\rho_K - \rho_B) g \cdot d_K^2}{\rho_B \cdot \nu^2}$$

erfüllt war, kann die Abweichung nur auf die innere Struktur des Bitumens zurückzuführen sein.

2. Die Untersuchungen des Sedimentationsverhaltens von feinkörnigen Feststoffen in Bitumen bei hohen Feststoffkonzentrationen ( $c_v$  größer als 15 %) wurden mit Hilfe der in Anlage 2 dargestellten Versuchsanordnung vorgenommen. Mit der Anlage wird die Impulsdichte einer radioaktiven Strahlung nach der Durchdringung von Proben gemessen. Ein Übersichtsplan der Strahlungsmeßeinheit ist in Anlage 2 enthalten.



In Glaszylindern (max. 1,5 m Höhe), die in einem Führungsschlitten (Probehalter) justiert eingebaut werden, wird die Sedimentation ähnlich den realen Verhältnissen im Dichtsystem nachgebildet und untersucht.

Die Absorption der radioaktiven Strahlung beim Durchdringen von Materialien hängt im wesentlichen von deren Masse ab. In einem Feststoff-Flüssigkeitssystem mit unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten der Einzelkomponenten ändert sich die Intensität der am Detektor auftreffenden Strahlung mit dem Feststoffgehalt in dem Gemisch. Dadurch ist bei geeigneter Eichung eine Feststoffkonzentrations- bzw. Dichtebestimmung möglich. Unter Anwendung des Beer-Bouguer-Lambert-Gesetzes kann die Intensität der Strahlung mit der Dichte des Gemisches Asphalt wie folgt verknüpft werden:

$$I(x) = I_0 e^{-ad} \cdot \rho_A(x)$$

wobei I die Intensität der Strahlung nach dem Passieren der Probe (in Abhängigkeit von der Probenstellung) ist.  $I_0$  ist die Intensität der Quelle. a ist eine Komplexgröße, die durch den Absorptionskoeffizienten des Materials bestimmt wird. Mit d wird die Probendicke bzw. der Durchmesser bezeichnet und  $\rho_A(x)$  ist die Dichte der Asphaltprobe an der Stelle x.

In Abb. 10 ist die Eichkurve für eine Probegröße mit B-25-Asphalten dargestellt. In der semi-logarithmischen Auftragung ergibt sich eine Gerade. Die Meßpunkte bestätigen den Verlauf. Zur Eichung wurden Asphaltproben mit abgestufter definierter Dichte verwendet.

In Vorversuchen zur Sink- bzw. Absetzgeschwindigkeit von Kalksteinpartikeln (Kornverteilung nach Abb.9) in nicht-



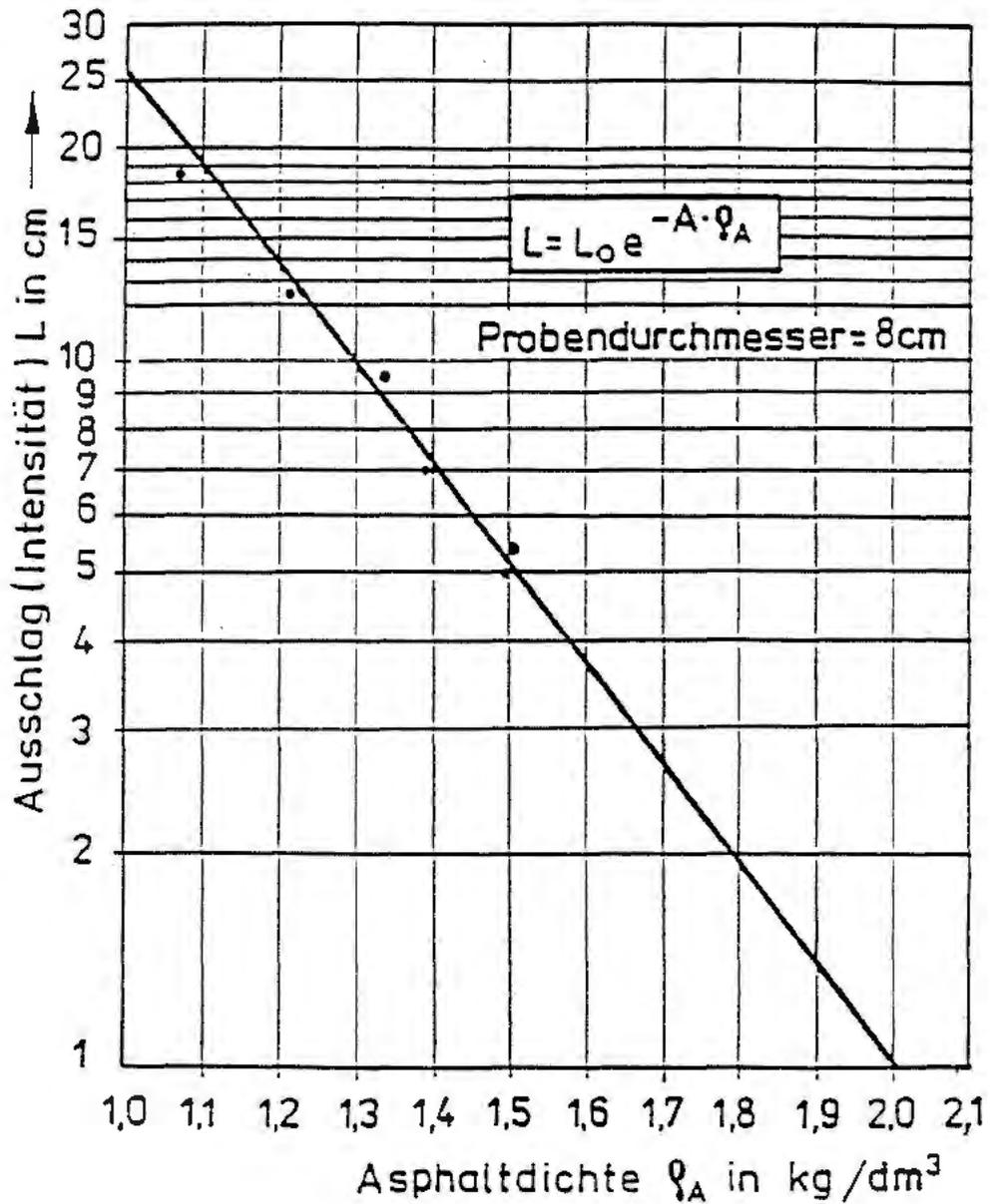


Abb. 10: Eichkurve für B-25-Asphalte verschiedener Dichte

wäßrigen Flüssigkeiten wurde als öliges Dispersionsmittel Silikonöl mit einer Viskosität von 0,2 Pas bei 20° C gewählt. Diese Viskosität weist auch die Bitumensorte B 25 bei 170°C - 175°C auf. Das Ziel der Versuche war die Gewinnung von Aussagen zum Sedimentationsverhalten bei hohen Bitumentemperaturen. Es konnten mittels der radioaktiven Dichtemessung folgende Beobachtungen gemacht werden:



Im oberen Teil des Probebehälters bildet sich eine scharf abgegrenzte Klarzone mit reiner Flüssigkeit heraus. Darunter befindet sich eine Sedimentationszone mit nach oben abnehmender Dichte. Unterhalb der Sedimentationszone entwickelt sich eine Kompressionszone mit einer Dichte von ca.  $2.300 \text{ kg/m}^3$ . Diese Zone hebt sich ebenfalls klar von der Sedimentationszone ab. Die Dichteverteilung ist relativ homogen. Da immer mehr Teilchen aus der Sedimentationszone absinken, verringert sich deren Dichte und ebenso die Höhe zugunsten von Klarzone mit Kompressionszone. Diese Vorgänge sind typisch für eine Zonensedimentation von Partikelschwärmen.

Die Geschwindigkeit der Trennfläche zwischen Klarzone und Sedimentationszone kann für den größten Teil der Sedimentationszeit sehr gut nach Gleichung für die Schwarm-sinkgeschwindigkeit mit den Parametern der Suspension (Dichte und Viskosität) bei Teilchendurchmessern von  $80 \cdot 10^{-6} \text{ m}$  berechnet werden.

Zur weiteren Klärung des Absetzmechanismus der Feststoffpartikel wurden Versuche mit folgenden Asphalten vorgenommen (Kornverteilung nach Abb. 9):

B 25-Asphalt,  $\rho_A = 1330 \text{ kg/m}^3$ , Lagerungstemperatur  $150^\circ\text{C}$   
Lagerungszeit 126 h

B 25-Asphalt,  $\rho_A = 1330 \text{ kg/m}^3$ , Lagerungstemperatur  $60^\circ\text{C}$   
Lagerungszeit 744,5 h

B200-Asphalt,  $\rho_A = 1330 \text{ kg/m}^3$ , Lagerungstemperatur  $60^\circ\text{C}$   
Lagerungszeit 744,5 h

Es ergaben sich für die verschiedenen Zeiten die in den Abb. 11 und 12 dargestellten Sedimentationskurven, für die folgende Feststellungen getroffen werden können:



040

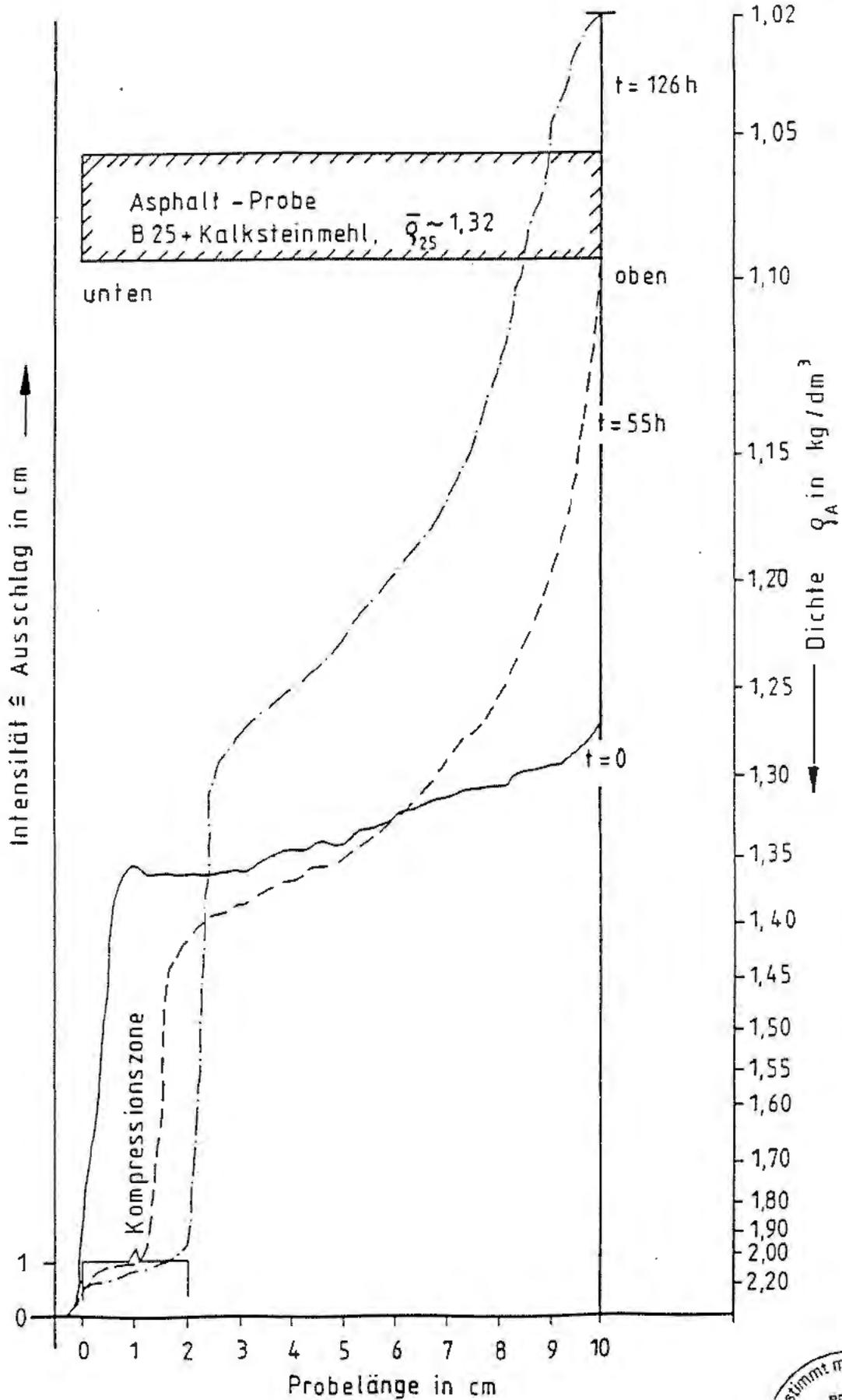


Abb. 11: Sedimentationskurven von Kalksteinmehl in B-25-Asphalt bei einer Lagerungstemperatur von 150° C (Kornverteilung nach Abb. 9)



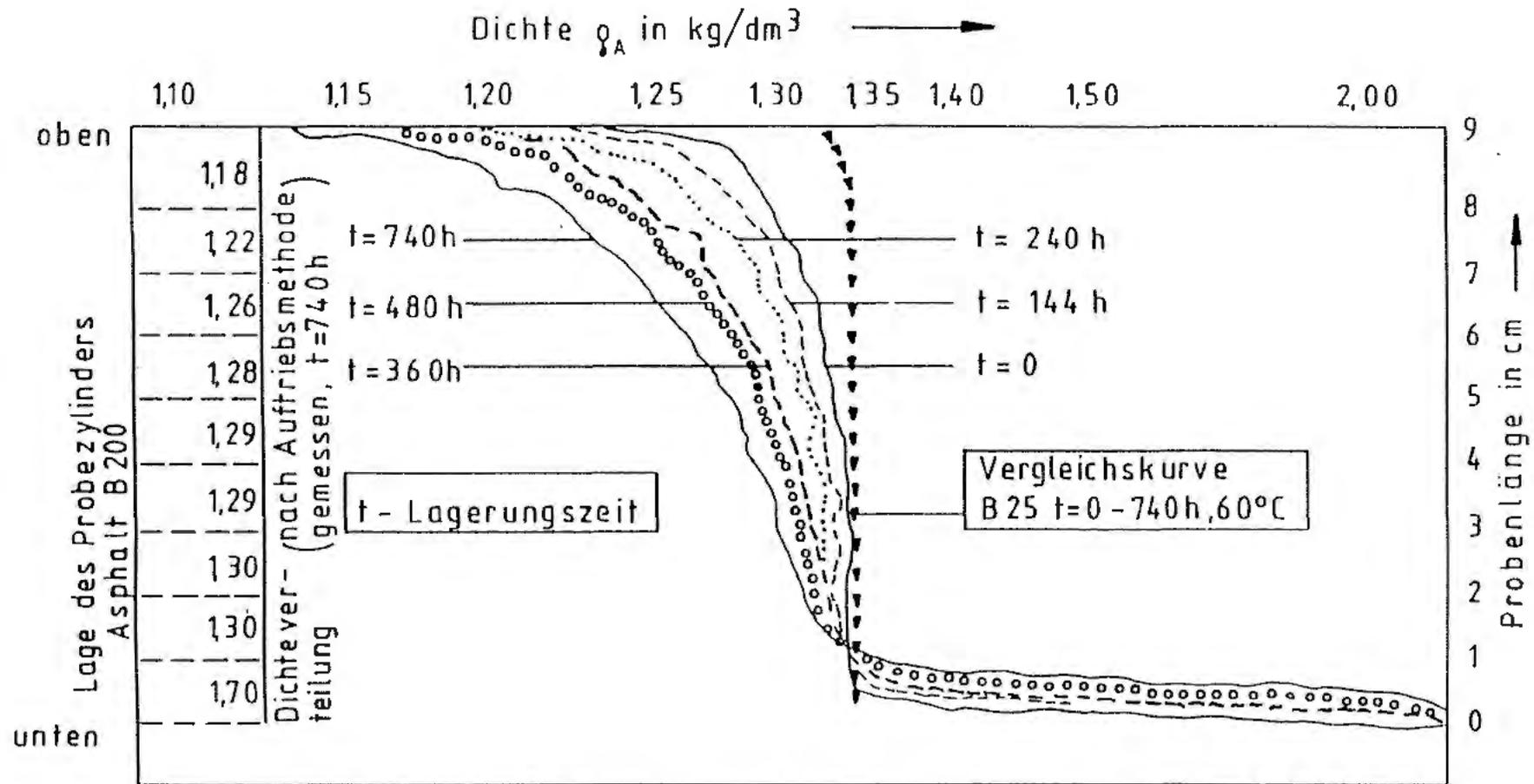


Abb. 12: Sedimentationskurven von Kalksteinmehl in B-200-Asphalt bei einer Lagerungstemperatur von 60° C (Kornverteilung nach Abb. 9)



Nach anfänglich leicht mit der Teufe zunehmender Dichte infolge der hohen Anmischtemperatur bildet sich eine klar abgegrenzte Kompressionszone mit einer Dichte von ca.  $2.000 - 2.100 \text{ kg/m}^3$ . Darüber befindet sich die Sedimentationszone mit nach oben fallender Dichte. Eine Klarzone konnte im Gegensatz zu den Versuchen mit Silikonöl nicht festgestellt werden.

Diese Beobachtung zeigt, daß durch die innere Struktur des Bitumens auch bei relativ hohen Temperaturen die Teilchen nach Größe bzw. Masse mehr oder weniger stark beim Sinken abgebremst werden. Durch das Stokes'sche Gesetz bzw. die Gleichung zur Schwarmsinkgeschwindigkeit kann das Sedimentationsverhalten des Füllers im Asphalt nur zur konservativen Seite hin abgeschätzt werden. Die tatsächlichen Sinkgeschwindigkeiten sind geringer als die errechneten.

### 3.3.3 Rechnerische Abschätzung der Feststoffsedimentation in der hydrostatischen Asphaltverdichtung

Da bei hohen Temperaturen, d.h. niedrigen Bitumenviskositäten, besonders hohe Sedimentationsgeschwindigkeiten auftreten, ist es notwendig, den Abkühlungsvorgang des mit relativ hohen Temperaturen eingebauten Asphalts abzuschätzen. Die Abschätzung erfolgt nach /16/, /17/.

Eingangswerte für die Abschätzung:

Gebirgstemperatur	ca. $18^\circ\text{C}$
Einbautemperatur des Asphalts	ca. $120^\circ\text{C}$
Temperaturleitzahl des Asphalts	ca. $0,086 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Durchmesser der Asphaltssäule	ca. 7 m

Der berechnete Temperaturverlauf für die Abkühlungsphase des Asphalts in der Mittelachse der Asphaltssäule ist in Abb. 13 dargestellt.



# ASPHALT ABKÜHLUNG

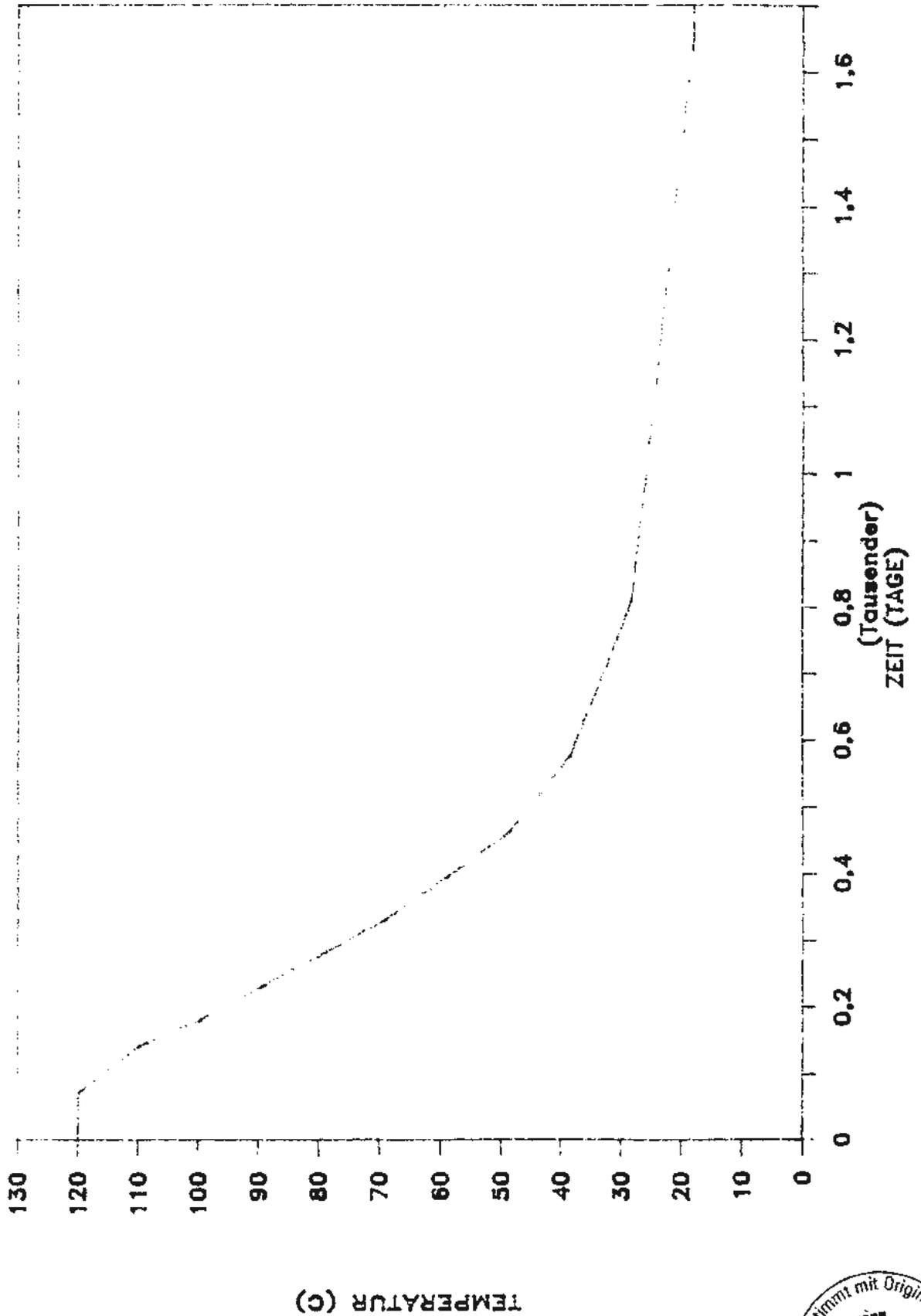


Abb. 13: Abkühlungskurve in der Mittelachse der hydrostatischen Asphaltabdichtung



Zur Bestimmung der Sedimentationsgeschwindigkeiten bei verschiedenen Temperaturen werden diese konservativ als Schwarmsinkgeschwindigkeit für den Temperaturbereich von 18°C bis 120°C abgeschätzt. Aus konservativen Gründen wird als für die Sedimentation maßgeblich das Größtkorn von 0,03 mm angesetzt. Die so ermittelten Sedimentationsgeschwindigkeiten sind in den Tab. 8 und 9 aufgeführt.

Zur Bestimmung des Sedimentationsweges, den die oberste Füllerschicht während der Abkühlungsphase durchläuft, wird die Abkühlungskurve durch eine bereichsweise konstante Treppenfunktion angenähert.

Für die jeweils angenäherte konstante Temperaturverteilung wird in dem jeweiligen Zeitraum der Sedimentationsweg abgeschätzt. Die für die beiden Asphalte errechneten Sedimentationswege bis zum Ende der Abkühlphase sind in Tab. 10 enthalten.

Temperatur* °C	Sedimentationsgeschwindigkeit (mm / Tag)	
	relative Asphalt- viskosität 6,12 (-)	relative Asphalt- viskosität 6,8 (-)
18	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$
28	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$
38	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$
49	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$
59	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
69	$7,3 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$
79	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$
89	$8,8 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$
100	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$2,3 \cdot 10^{-1}$
110	$6,1 \cdot 10^{-1}$	$5,6 \cdot 10^{-1}$
120	1,4	1,3

Tab. 8: Sedimentationsgeschwindigkeiten des Kalksteinmehlfüllers (nach Anlage 1) im Bitumen B 25

\* Temperaturwerte teilweise gerundet



Temperatur* °C	Sedimentationsgeschwindigkeit (mm / Tag)	
	relative Asphalt- viskosität 6,8 (-)	relative Asphalt- viskosität 7,58 (-)
18	$8,2 \cdot 10^{-5}$	$7,6 \cdot 10^{-5}$
28	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$
38	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$
49	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$
59	$6,7 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-2}$
69	$2,1 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$
79	$5,1 \cdot 10^{-1}$	$4,7 \cdot 10^{-1}$
89	1,3	1,2
100	2,8	2,6
110	5,6	5,2
120	10,1	9,4

Tab. 9: Sedimentationsgeschwindigkeiten des Kalksteinmehlfüllers (nach Anlage 1) im Bitumen B 200

Temperatur °C	Sedimentationsweg (m)			
	B 25		B 200	
	6,12 (-)	6,8 (-)	6,8 (-)	7,58 (-)
120	0,10	0,09	0,72	0,67
110	0,02	0,02	0,22	0,20
100	0,01	0,01	0,14	0,13
89	0,004	0,004	0,06	0,06
79	0,001	0,001	0,03	0,02
69	0,0005	0,0004	0,01	0,01
59	0,0001	0,0001	0,004	0,004
49	0,00003	0,00003	0,002	0,002
38	0,000009	0,000008	0,0009	0,0009
18	0,000003	0,000003	0,0006	0,0005
	$\Sigma = 0,14$	$\Sigma = 0,13$	$\Sigma = 1,19$	$\Sigma = 1,10$

Tab. 10: Sedimentationsweg des Kalksteinmehlfüllers (nach Anlage 1) im Asphalt

\* Temperaturwerte teilweise gerundet



Unter Berücksichtigung des Austauscheffektes infolge des Dichteunterschiedes an der Grenzfläche der beiden Asphalte in der hydrostatischen Asphalt dichtung ergibt sich zum Ende der Abkühlungsphase eine errechnete Klarzone von ca. 1,3 m.

Nach Beendigung der Abkühlungsphase erfolgt die Sedimentation im Bitumen B 25 rechnerisch mit einer Geschwindigkeit von ca.  $2,3 \cdot 10^{-7}$  m/Jahr, im B 200 rechnerisch mit einer Geschwindigkeit von ca.  $8,2 \cdot 10^{-5}$  m/Jahr. Dies bedeutet, daß sich die Klarzone in 10.000 Jahren rechnerisch um ca. 0,3 m auf ca. 1,6 m vergrößern wird. (In 100.000 Jahren vergrößert sich die Klarzone rechnerisch auf ca. 4,3 m.) Dabei ist konservativ vorausgesetzt, daß kein Abfluß von Asphalt (B 200) in das Gebirge auftritt. Der Einfluß der Füllersedimentation auf die Dichtwirkung der hydrostatischen Asphalt dichtung ist somit vernachlässigbar. Zur Reduzierung der Sedimentation wird in der Bauausführung der hydrostatischen Asphalt dichtung (Kapitel 4) die Einbautemperatur so gesteuert, daß sie nicht mehr als 100°C beträgt.

### 3.4 Druckübertragung im Asphalt

Die Druckübertragung in einer zähen Flüssigkeit ohne Fließgrenze, die elastisch gebettet ist, erfolgt mit einer zeitlichen Verzögerung. Zur Bestätigung der Gültigkeit dieser Aussage wurden für Bitumen- bzw. Asphaltsäulen mehrere Versuche durchgeführt. In den Abb. 14 und 15 sind die gemessenen Druckaufbaukurven für zwei verschiedenen Medien dargestellt. Die Untersuchungen erfolgten in einem Stahlrohr mit 4 cm Durchmesser und 4 mm Wanddicke. Die Füllhöhe des Bitumens bzw. Asphaltes betrug 0,3 m. Der Druck wurde schlagartig am oberen Ende als Luftdruck  $p_0$  aufgegeben und während des Versuches konstant gehalten. Am unteren Ende erfolgte



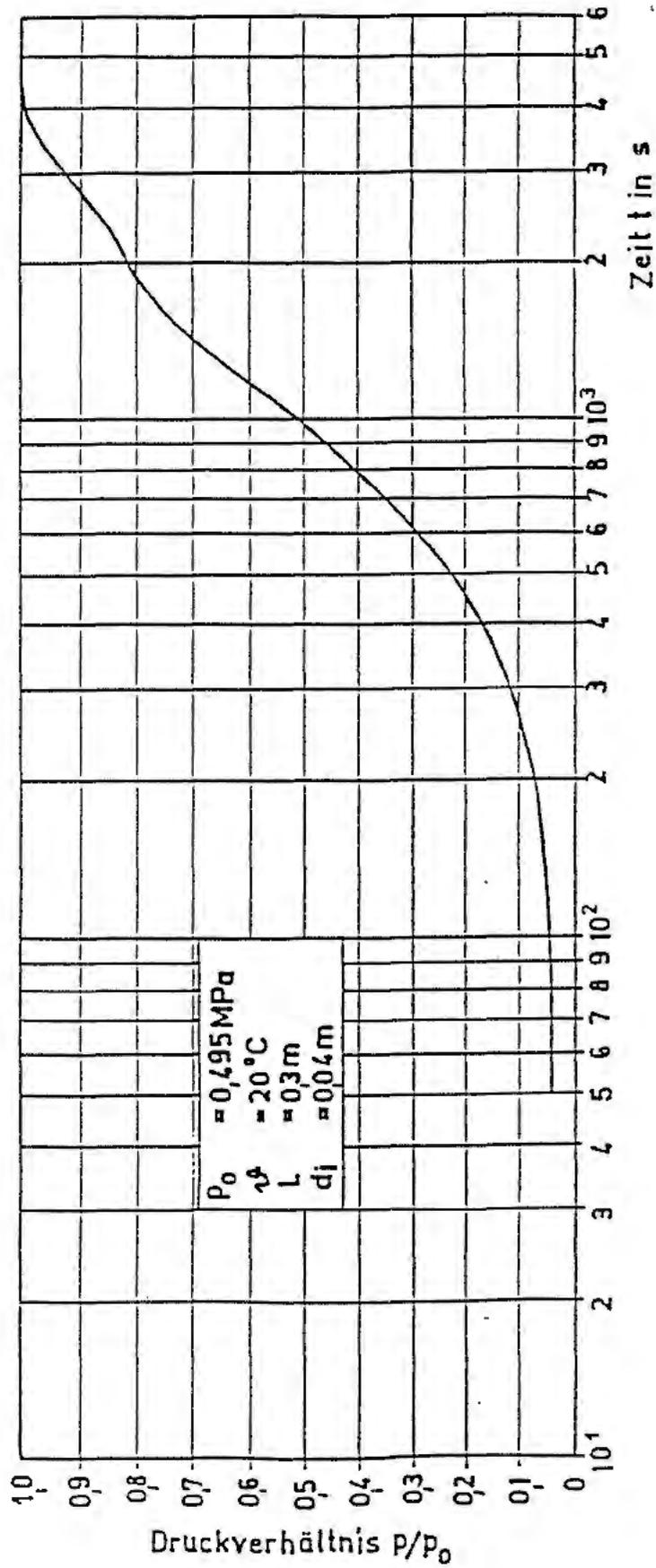


Abb. 14: Gemessene Druckübertragung in einer Bitumensäule  
(B 25)



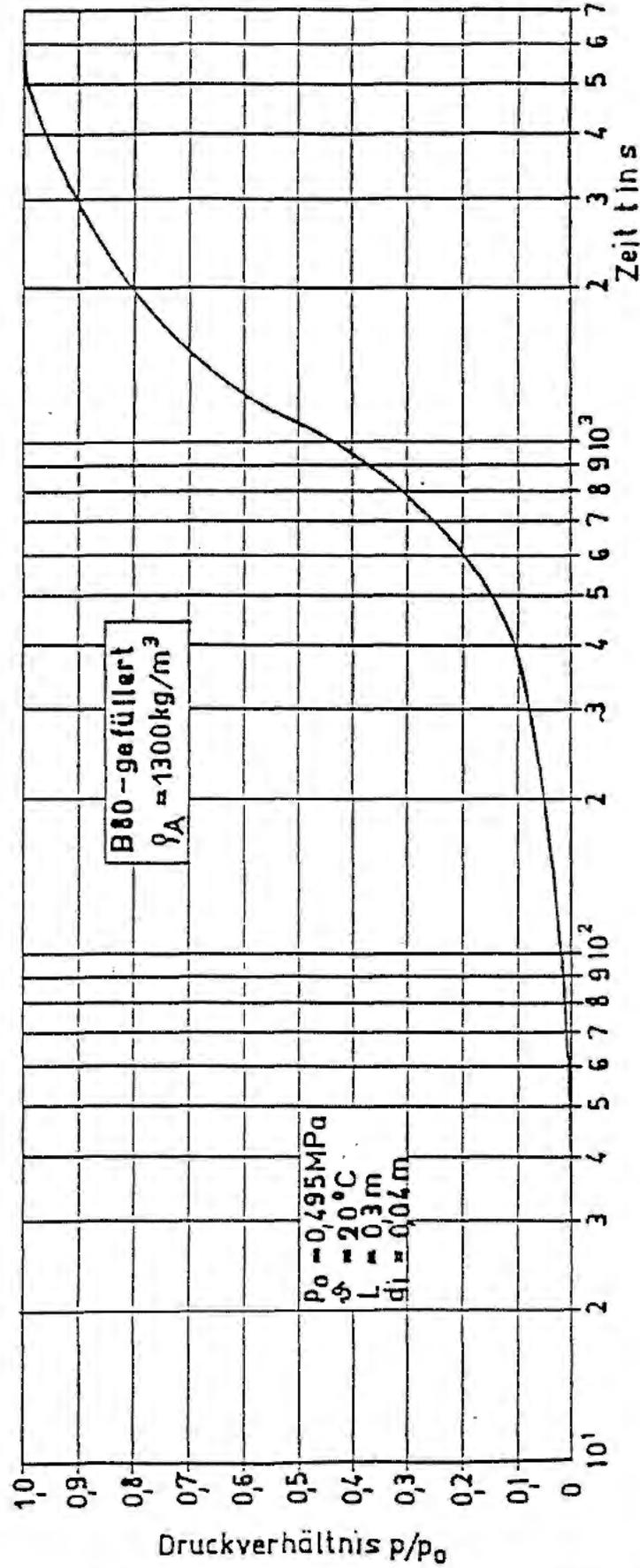


Abb. 15: Gemessene Druckübertragung in einer Asphaltssäule (B 80 gefüllt)



die Messung mittels Druckmeßdose und Manometer. Es wurden Bitumen B 25 und B 80-Asphalt ( $1.300 \text{ kg/m}^3$ ) bei einer Raumtemperatur von  $20^\circ \text{ C}$  untersucht. In allen Untersuchungen konnte ein Druckaufbau in Abhängigkeit von der Zeit und der Bitumensorte bis zum Maximaldruck erzielt werden, der sich bei Druckentlastung von oben wieder vollständig abbaute. Damit kann das Auftreten einer Fließgrenze in meßbarer Größenordnung ausgeschlossen werden.

Für die Druckentwicklung in einem mit einer Newton'schen Flüssigkeit gefüllten Rohr gilt

$$p(x, t) = p_0 \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{2 \sqrt{P \cdot t}}$$

Für ein endliches System (Rohr bzw. Schacht) erhält man als Druckanstieg  $p(t)$  an der Stelle  $x = L$ .

$$p(t) = p_0 \left( 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \cdot \exp \left( - \left( \frac{2n-1}{2} \right)^2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{pt}{L^2} \right) \right)$$

- mit  $p_0$  = Druck an der Stelle  $x = 0$  ( $p_0 = \text{const f. } t > 0$ )  
 $\operatorname{erfc} \alpha$  = Komplement des Fehlerintegrals  
 $L$  = Länge (Höhe) in m  
 $P$  = Druckleitfähigkeit in  $\text{m}^2/\text{s}$   
 $P = \frac{d_i^2}{32 \cdot \eta \cdot c'_{\text{ges.}}}$   
 $t$  = Zeit in s  
 $d_i$  = Innendurchmesser des Rohres bzw. Schachtes in m  
 $\eta$  = Viskosität der Flüssigkeitssäule (Bitumen bzw. Asphalt)  
 $c'_{\text{ges.}}$  = Kompressibilität des Systems Flüssigkeit-Rohr bzw. Flüssigkeit-Schachtausbau-Gebirge



Die Kompressibilität  $c_{ges.}$  ergibt sich wie folgt für

- zylindrische Hohlräume mit Ausbau

$$c_{ges.} = c_{Fl} + \frac{2 (D_a^2 + D_i^2)}{E (D_a^2 - D_i^2)}$$

- zylindrische Hohlräume ohne Ausbau näherungsweise

$$c_{ges.} = c_{Fl} + \frac{2}{E_G}$$

mit  $E$  = E-Modul des Ausbaus  
 $D_i, D_a$  = Innen- bzw. Außendurchmesser des Rohres  
 $E_G$  = E-Modul des Gebirges  
 $c_{Fl}$  = Asphaltkompressibilität  $5 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$

In Abb. 16 ist die Druckübertragung in den Asphaltversorgungsbohrungen (Abb. 17) für die Teufen ca. 160 m bis ca. 170 m und ca. 209 m bis ca. 226 m dargestellt. In den dem Diagramm zugrundeliegenden Rechnungen wurde die Viskosität des Asphalts (B 25) entsprechend den Werten der Tab. 6 variiert. Für das Gebirge der Oberkreide wurde ein Elastizitätsmodul zwischen 5.000 MPa bis 6.500 MPa berücksichtigt. Die Druckübertragungslänge beträgt 4,25 m.

Aus Abb. 16 wird deutlich, daß der Aufbau des Druckes auf seine volle Höhe auch in den Asphaltversorgungsbohrungen ohne nennenswerte Verzögerungen erfolgt.

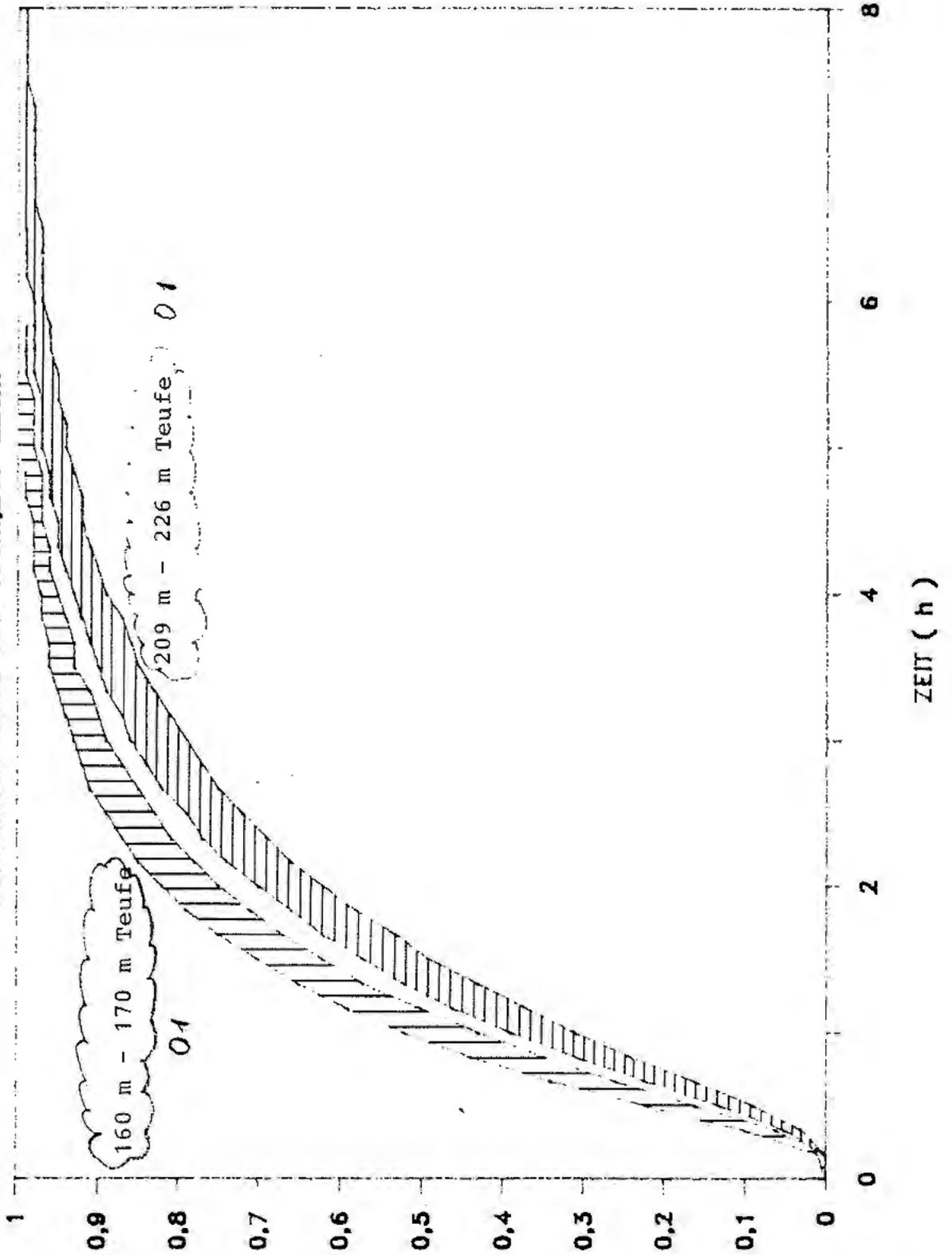
### 3.5 Eindringen von Asphalt in Gebirgsklüfte

Die Dichte des Asphalts für die hydrostatische Dichte zum Verschuß der Schächte Konrad wird durch die Zugabe von Gesteinsmehlfüllern so eingestellt, daß sie mit  $1,5 \text{ g/cm}^3$  deutlich über der im Gebirge anstehenden Wasser liegt. Dadurch steht der viskose Asphalt unter einem höheren hy-



# DRUCKÜBERTRAGUNG IM ASPHALT B25

BOHRUNGEN TEUFE 160-170m, 209-226m



DRUCKVERHÄLTNIS P/P0

Abb. 16: Druckübertragung in den Asphaltversorgungsbohrungen



052

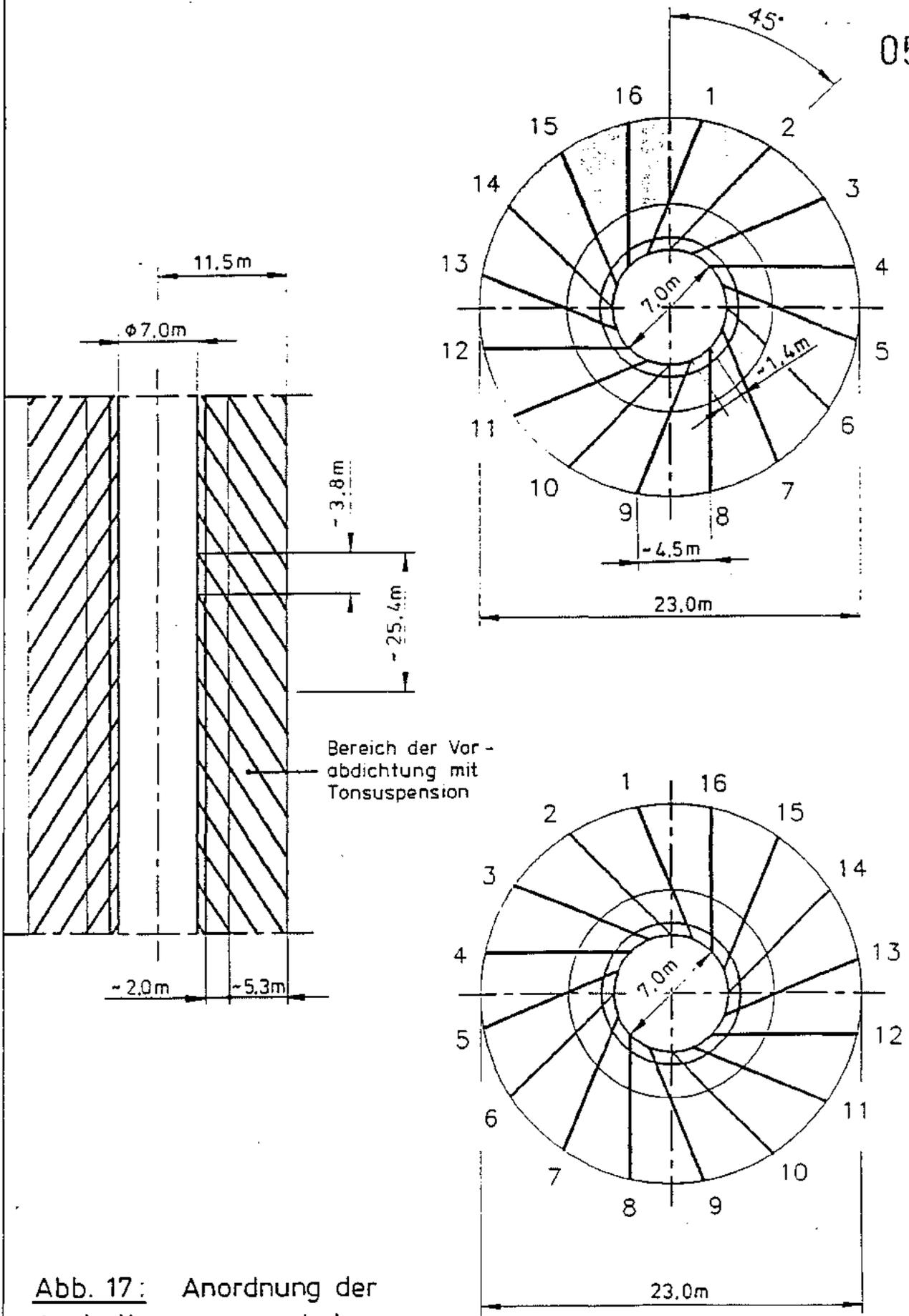
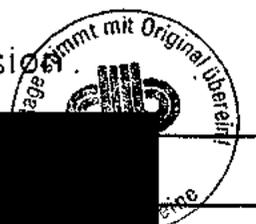


Abb. 17: Anordnung der Asphaltversorgungsbohrungen bzw. der Bohrungen zur Vorabdichtung mit Tonsuspension



drostatischen Druck als die Gebirgswässer. Diese werden durch den allmählich in die im Gebirge vorhandenen Poren und Risse eindringenden Asphalt verdrängt; Poren und Risse werden verstopft. So dichtet der Asphalt den Schachtquerschnitt und die ihn umgebende vom Abteufen des Schachtes herrührende Auflockerungszone ab. Dies gilt auch dann, wenn sich die Verhältnisse in der Umgebung des Schachtes im Laufe der Zeit, z.B. durch Gebirgsbewegungen, ändern. Ein sich neu bildener Riß füllt sich mit Asphalt und wird verschlossen. Dies kennzeichnet Asphalt als ein aktives Dichtungsmittel.

Damit auch feinste Risse abgedichtet werden, werden die Asphaltversorgungsbohrungen vor Einbau der eigentlichen Asphaltichtung mit Bitumen (Qualität B 200) gefüllt. Dieses Bitumen wird nach Einbau der Asphaltichtung durch den hydrostatischen Druck in das Gebirge verpreßt. Die verpreßten Mengen werden durch den nachfließenden Asphalt B 200 bzw. Asphalt B 25 ersetzt. Eine Umschichtung des Asphaltes aufgrund seiner Dichte mit dem Bitumen wird durch die syphonartige Form eines Aufsatzes auf das Standrohr der Asphaltversorgungsbohrung verzögert.

Das Eindringen des Bitumens und des Asphalts in Klüfte und Gebirgsporen ist wegen seiner Flüssigkeitseigenschaften zeitlich nicht begrenzt. Die Eindringgeschwindigkeit nimmt jedoch mit zunehmender Eindringtiefe so stark ab, daß der Abfluß nach einer gewissen Zeit praktisch bedeutungslos wird. Nach welcher Zeit dieser Zustand des Beinahe-Stillstandes eintritt, hängt wesentlich von der Spaltbreite der Klüfte und der Viskosität des Asphaltes ab.

Das Eindringen von Bitumen bzw. Asphalt wird im allgemeinen entweder als Spaltströmung oder als Radialströmung in einer ebenen Kluft mit parallelen Wänden rechnerisch abgeschätzt.



Das Eindringverhalten wird durch die folgenden Beziehungen beschrieben:

Spaltströmung /12/

$$t = \frac{6 \cdot \eta}{\Delta p} \cdot \frac{l^2}{h^2}$$

Radialströmung /18/

$$t = \frac{6 \cdot \eta}{\Delta p} \cdot \frac{1}{h^2} \cdot \left[ r^2 \cdot \left( \ln \frac{r}{R_0} - \frac{1}{2} \right) + \frac{R_0^2}{2} \right]$$

wobei

- t = Eindringzeit
- $\eta$  = dynamische Viskosität
- $\Delta p$  = Druckdifferenz
- l = Eindringtiefe
- r = Eindringradius
- $R_0$  = Anfangsradius des Eindringvorganges
- h = Kluftweite

Für die beiden Strömungsarten wird im folgenden das Eindringverhalten für die Phasen des Betriebszustandes abgeschätzt. Das hohe Eindringvermögen des heißen Asphalts (niedrige Viskosität) während der Abkühlungsphase wird aus konservativen Gründen vernachlässigt. Der tatsächliche Eindringweg und damit erreichte Abdichtungserfolg ist größer als hier dargestellt.

Die Auswertung der o.g. Gleichungen zur Ermittlung des Eindringverhaltens von Bitumen und Asphalt in das Gebirge ist in Abb. 18 bis Abb. 20 für eine Spaltströmung bei unterschiedlichen Kluftweiten dargestellt. In den Abb. 21 bis Abb. 23 ist die Auswertung für eine radiale Spaltströmung dargestellt. Die Bitumen bzw. Asphaltviskositäten wurden dabei in den Grenzen der Tab. 5, 6 und 7 angesetzt.



# SPALTSTRÖMUNG BITUMEN B200

Kluftweite .01mm,.05mm,.1mm;T=209-226m

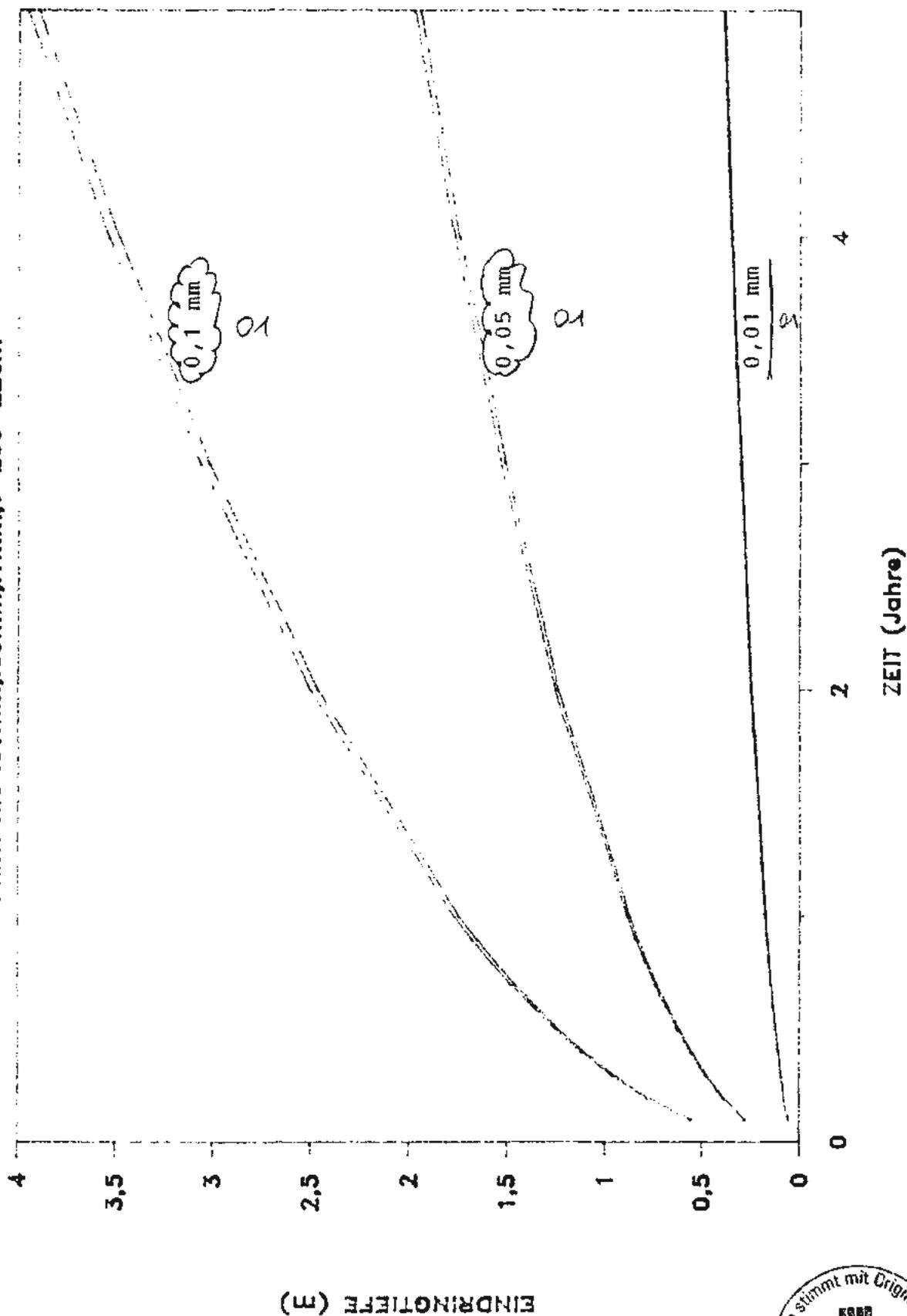
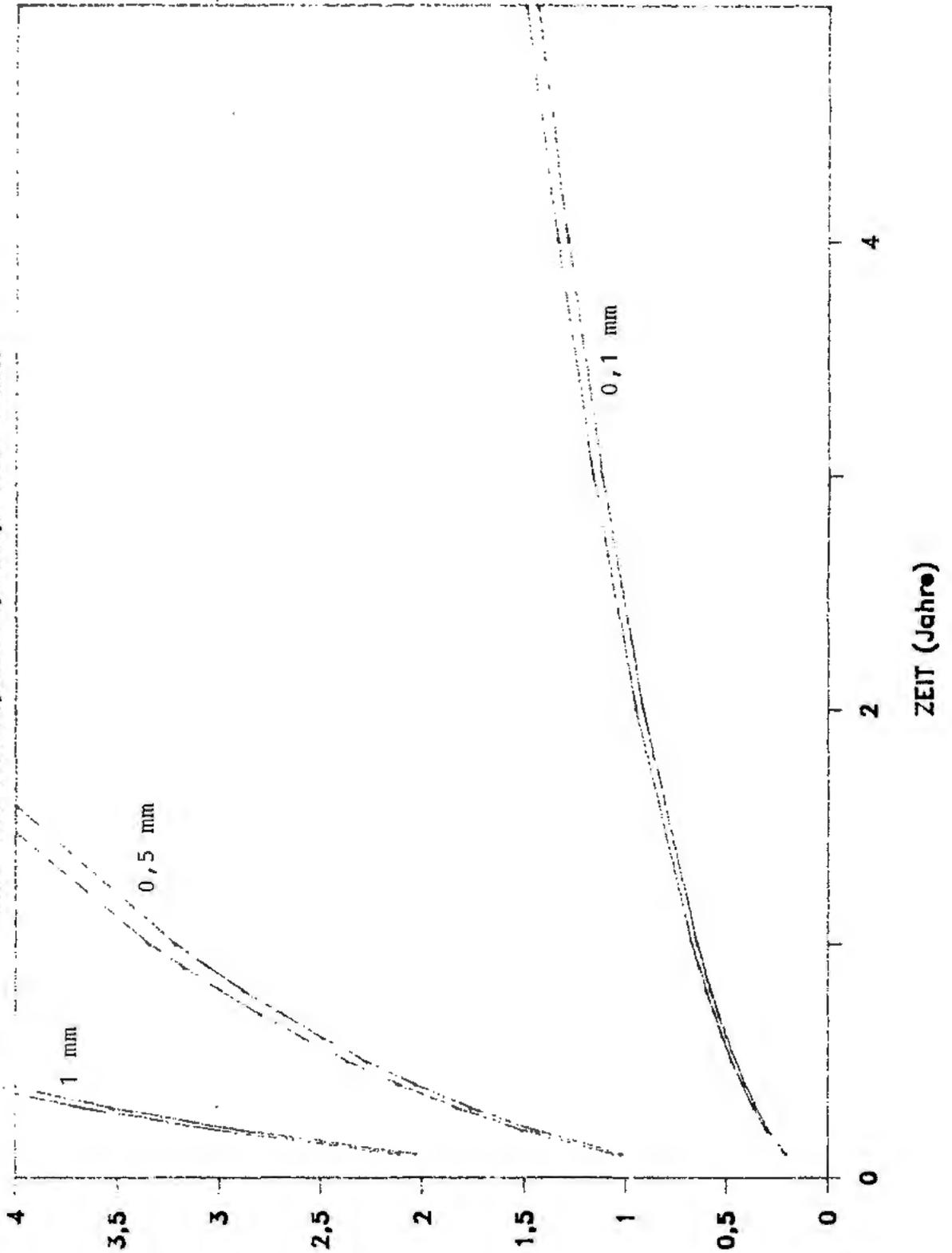


Abb. 18: Spaltströmung Bitumen B 200  
Kluftweite 0,01 mm, 0,05 mm, 0,1 mm  
Teufe ca. 209 m - 226 m



# SPALTSTRÖMUNG ASPHALT B200

Kluftweite 0,1 mm, 0,5 mm, 1 mm; T=209-226 m



EINDRINGTIEFE (3)

Abb. 19: Spaltströmung Asphalt B 200  
Kluftweite 0,1 mm, 0,5 mm, 1 mm  
Teufe ca. 209 m - 226 m



# SPALTSTRÖMUNG ASPHALT B25

Kluftweite 0.1mm,0.5mm,1mm;T=209-226m

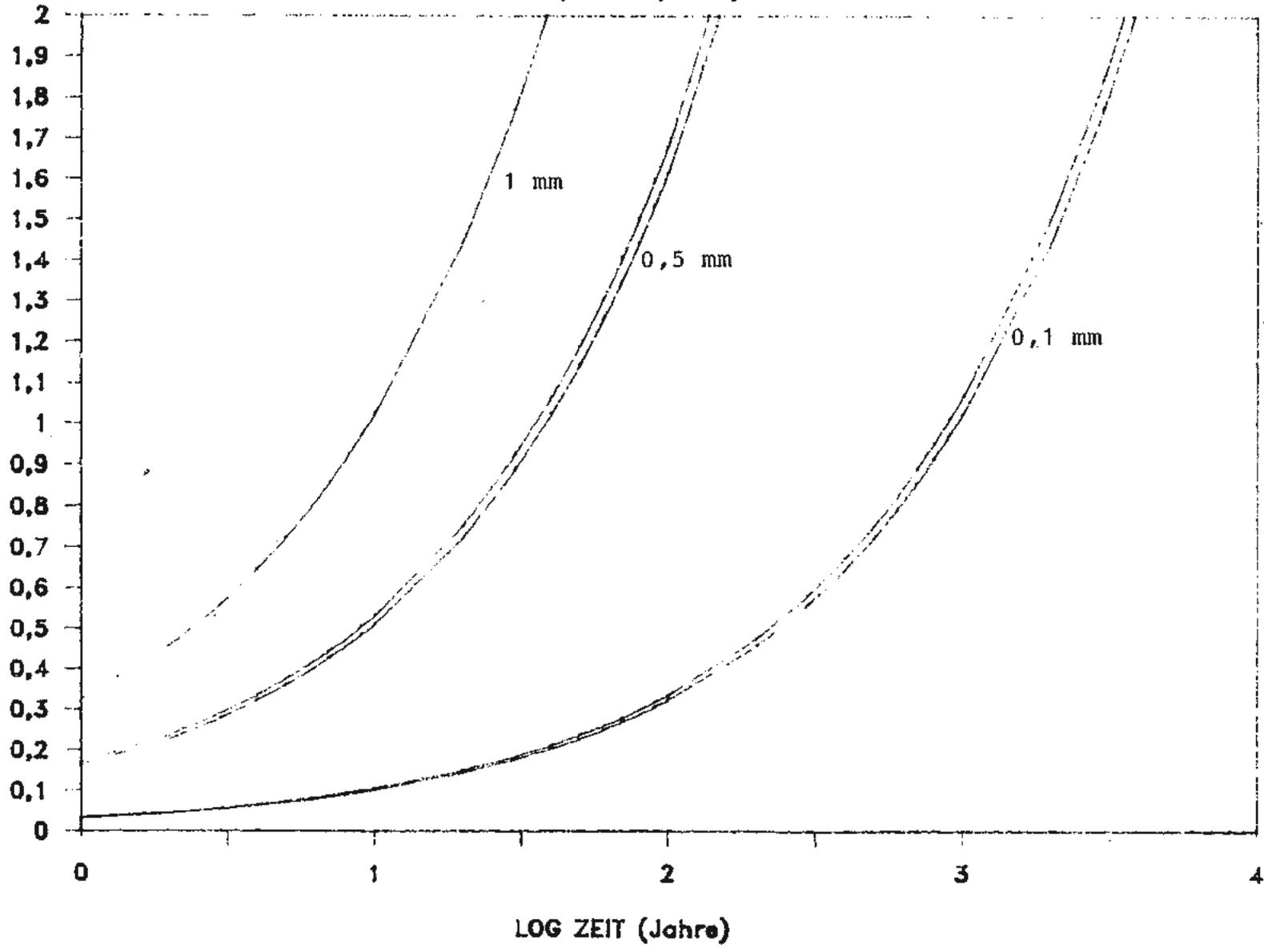


Abb. 20: Spaltströmung Asphalt B 25  
Kluftweite 0,1 mm, 0,5 mm, 1 mm  
Tiefe ca. 209 m - 226 m



# RADIALE STRÖMUNG BITUMEN B200

Kluftweite 0,01 mm, 0,05 mm, 1 mm; T = 209 - 226 m

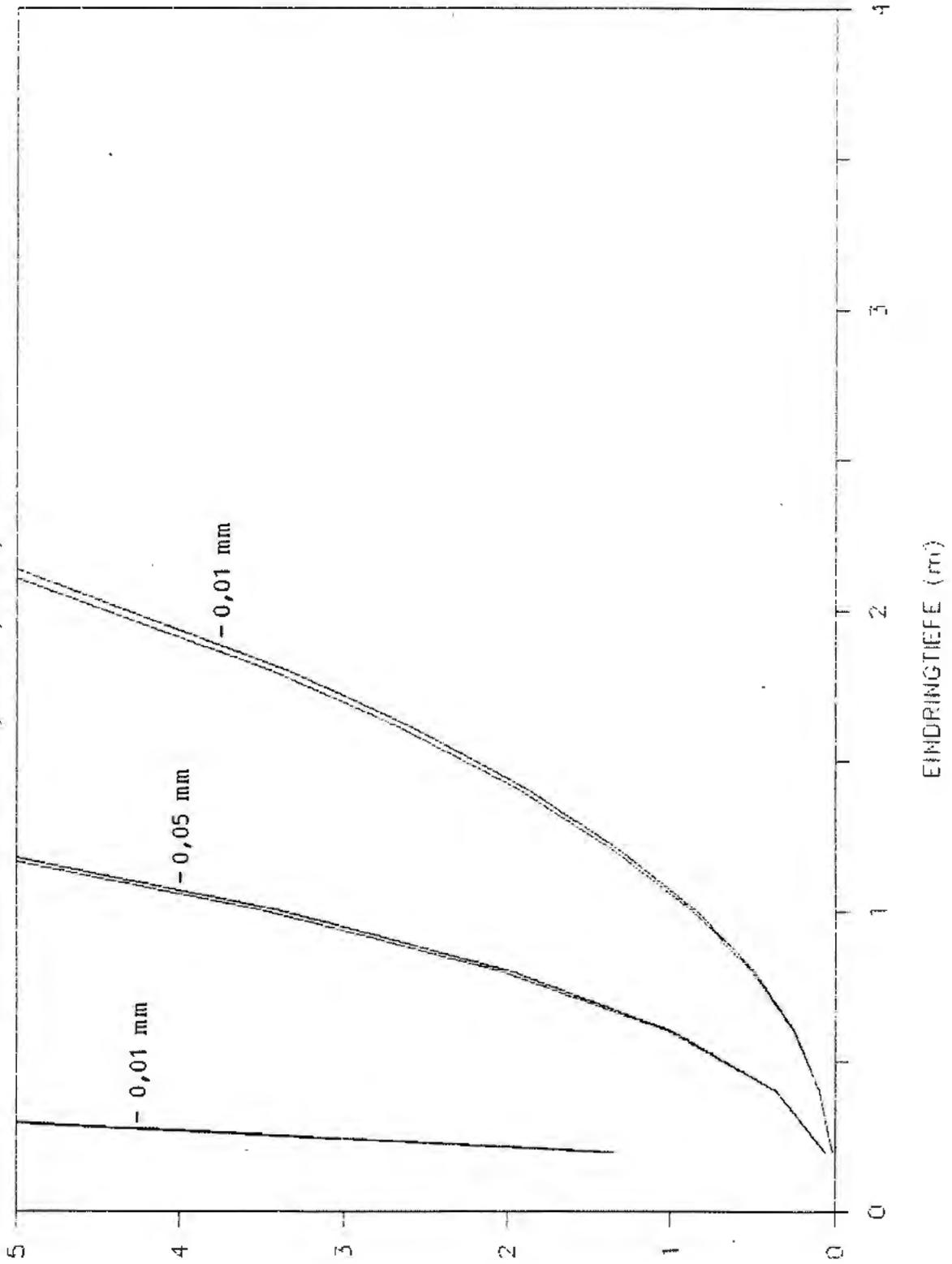


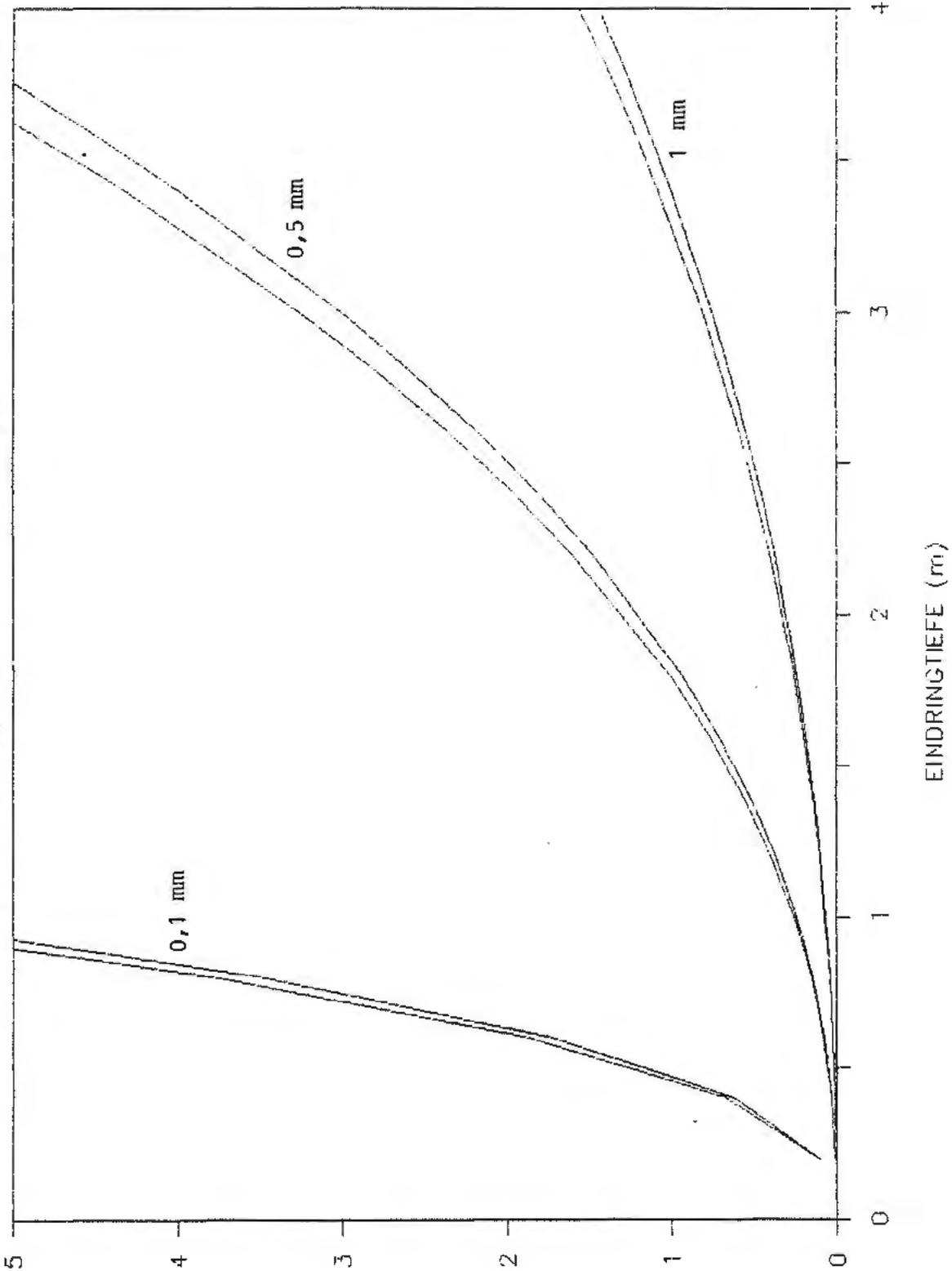
Abb. 21: Radiale Strömung Bitumen B 200  
Kluftweite 0,01 mm, 0,05 mm, 0,1 mm  
Teufe ca. 209 m - 226 m



059

# RADIALE STRÖMUNG ASPHALT B200

Kluftweite 0,1 mm, 0,5 mm, 1 mm; T=209-226 m



ZEIT (Jahre)

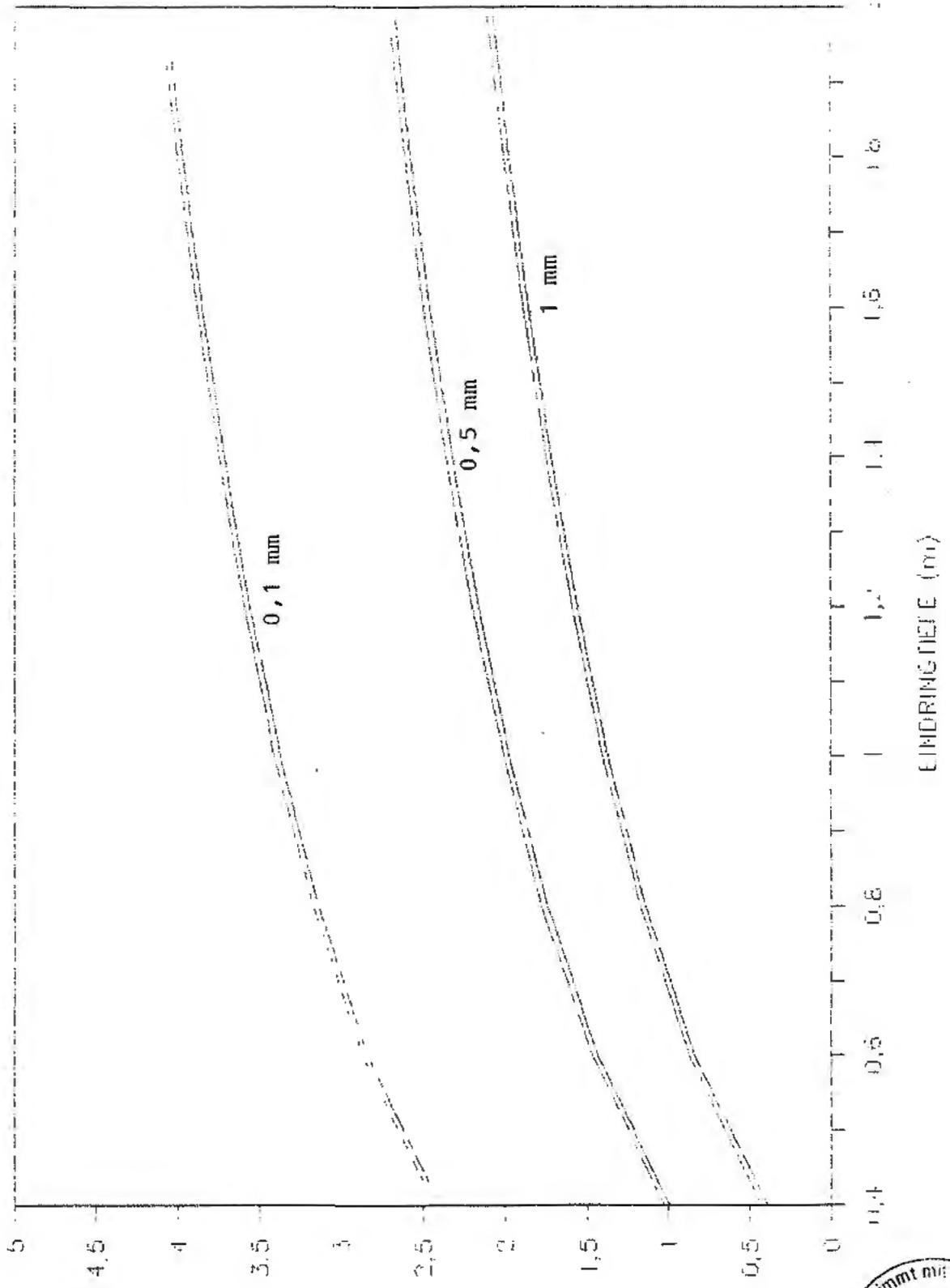
Abb. 22: Radiale Strömung Asphalt B 200  
Kluftweite 0,1 mm, 0,5 mm, 1 mm  
Teufe ca. 209 m - 226 m

01



# RADIALE STRÖMUNG ASPHALT B25

Kluftweite = 0,1 mm, 0,5 mm, 1 mm, Teufe ca. 209 - 226 m



100 ZERT (unreiner)

Abb. 23: Radiale Strömung Asphalt B 25  
Kluftweite 0,1 mm, 0,5 mm, 1 mm  
Teufe ca. 209 m - 226 m



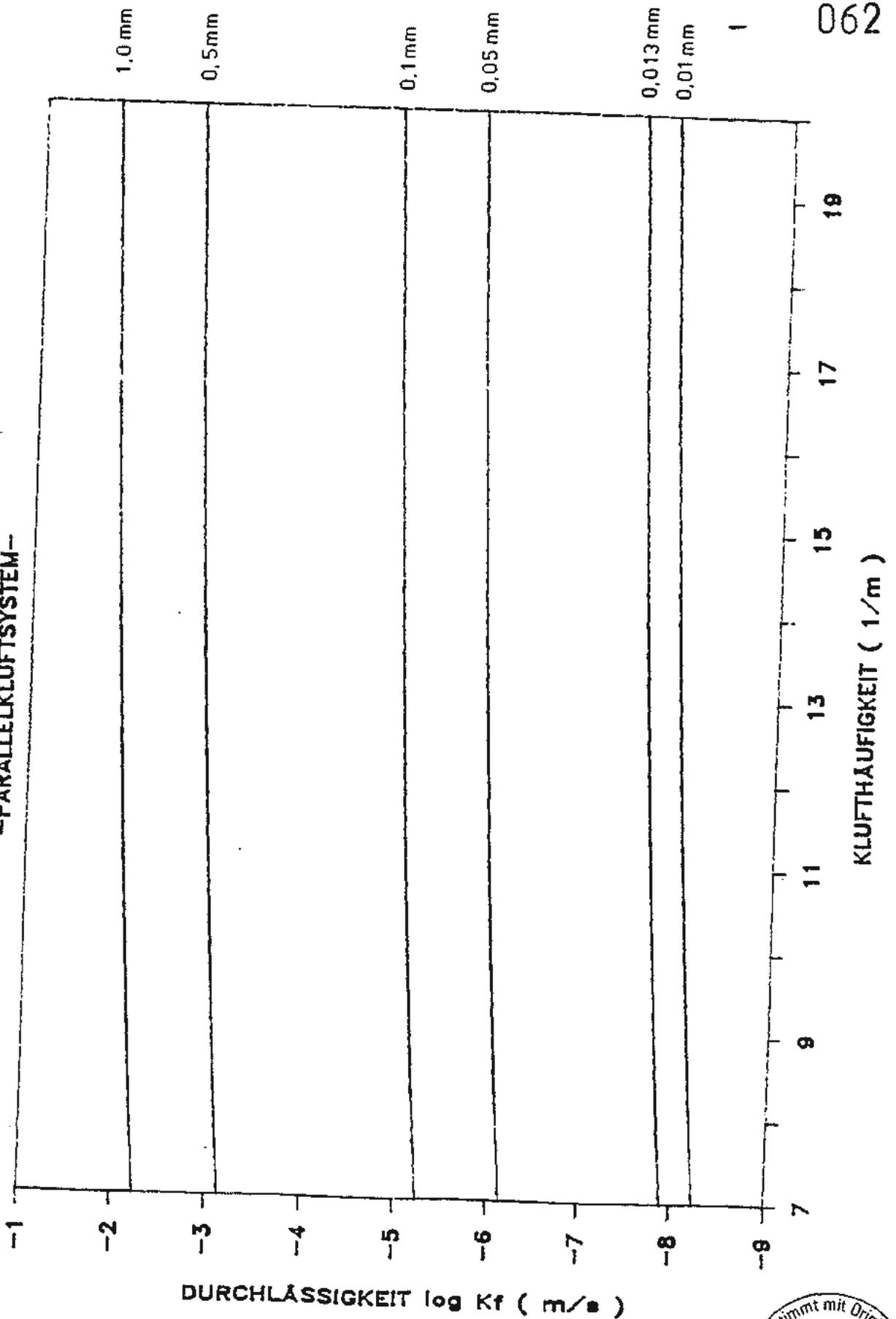
Abb. 18 und 21 beschreiben das Eindringverhalten der zu Beginn des Abdichtvorganges in den Asphaltversorgungsbohrungen befindlichen Bitumen B 200. Als Flüssigkeit ohne Fließgrenze ist das Bitumen in seinem Eindringvermögen auch in feinste Gebirgsöffnungen nicht eingeschränkt. Die Auswertung erfolgte beispielhaft für Kluftweiten von 0,01 mm, 0,05 mm und 0,1 mm. Berechnungen mit kleineren Kluftweiten zeigen ähnliche Verläufe. In Abb. 24 ist für ein Parallelkluftsystem /19/ die Zuordnung von Kluftweite und Häufigkeit zu der Durchlässigkeit eines hydraulisch äquivalenten Porenwasserleiters dargestellt. Aus Untersuchungsbohrungen im Schachtstoß ist bekannt, daß Schichtflächenabstände und Kluftabstände im dm-Bereich liegen, d.h. in der Größenordnung zwischen ca. 0,05 m und 0,15 m. Dies entspricht einer Klufthäufigkeit zwischen ca. 7 und 20 Klüften pro m. Es werden also dort, wo im Auswertungsbeispiel das Bitumen in das Gebirge eingedrungen ist, Kluftsysteme mit vorhandenen Durchlässigkeiten bis ca.  $10^{-8}$  m/s verschlossen. Die durch die Abdichtungsmaßnahme erreichte Durchlässigkeit ist damit kleiner als  $10^{-8}$  m/s. Dies entspricht den Durchlässigkeiten, wie sie in etwa auch im unverritzten Gebirge vorhanden sind. In der Praxis wird das Bitumen aber auch in Klüfte mit kleinerer Weite als 0,01 mm eindringen. Es können daher im Laufe der Zeit auch Kluftsysteme mit kleineren Durchlässigkeiten als  $10^{-8}$  m/s durch das Bitumen abgedichtet werden. Das Eindringvermögen von Bitumen wurde in der Praxis durch Bitumenverpressungen, z.B. am Kraghammer Sattel/Biggetalsperre 1963 eindrucksvoll bestätigt. Nach Durchführung der Bitumenverpressung und Auffahren eines Stollens im verpreßten Bereich konnte durch Inaugenscheinnahme nachgewiesen werden, daß das Bitumen auch in die feinsten freien Gebirgsklüfte eingedrungen war.

Abb. 19 und 22 sowie Abb. 20 und 23 beschreiben das Eindringverhalten des Vorabdichtungsasphalts aus Bitumen B 200



# EINDRINGVERMÖGEN BITUMEN / ASPHALT

-PARALLELKLUFTSYSTEM-



062

Abb. 24: Eindringvermögen Bitumen/Asphalt  
- Parallelkluftsystem -



bzw. des Asphalts aus Bitumen B 25 in das Gebirge. Die Auswertung erfolgte beispielhaft für die Kluftweiten 0,1 mm, 0,5 mm und 1 mm. Es ist deutlich, daß das Eindringverhalten des gefüllerten Bitumens gegenüber dem des ungefüllerten Bitumens verzögert ist. Dies ist in den Abb. 3 und 4 für die Teufen 160 m und 226 m dargestellt. (Eine Begrenzung der Eindringtiefe durch Kluftenden bzw. durch die Toninjektion im Umfeld des Schachtes wurde in diesen Abbildungen nicht berücksichtigt.)

Der Asphalt kann aber auch in Klüfte mit kleinerer Weite als 0,1 mm eindringen. Erst nach relativ langen Zeiten wird es infolge einer Brückenbildung von Füllerteilchen zu einer Behinderung des Eindringens in sehr feinen Klüften kommen. Allerdings sind diese durch den Füller gebildeten Brücken auch weiterhin durchlässig für das im Asphalt befindliche Bitumen, dessen Eindringfähigkeit auch in feinste Klüfte wie zuvor geschildert aufgrund seines Flüssigkeitscharakters quasi unbegrenzt ist.

Diese Brückenbildung wird nach den allgemeinen Regeln der Injektionstechnik etwa dann beginnen, wenn die Kluft- | 02  
weite gleich dem 3fachen Füllerteilchendurchmesser bei 85 % Siebdurchgang ist. Dies entspricht im hier vorliegenden Fall (Anlage 1) einer Korngröße von ca. 0,0042 mm. Der Asphaltfluß wird somit erst in Klüften mit einer kleineren Weite als  $3 \cdot 0,0042 = 0,013$  mm stärker behindert. Das Verfüllen von Kluftweiten bis in den Bereich von ca. 0,013 mm bedeutet, daß nach Abb. 24 Kluftsysteme mit vorhandenen Durchlässigkeiten von ca.  $10^{-8}$  m/s, d.h. bis in den Bereich der im unverritzten Gebirge vorhandenen Durchlässigkeit durch Asphalt verschlossen werden können. Die nach der Abdichtung mit Asphalt im Gebirge erzielte Durchlässigkeit ist kleiner.



#### 4. Einbau der hydrostatischen Asphaltichtung

Der Einbau der hydrostatischen Asphaltichtung einschl. der vorbereitenden Arbeiten und der Bohr- und Injektionsarbeiten erfolgt unter Berücksichtigung der einschlägigen bergbehördlichen Vorschriften und Richtlinien. Er gliedert sich in die vorbereitenden Arbeiten und die Verfüllung des Schachtes mit Asphalt.

Zu Beginn der Arbeiten erfolgt das Rauben der Schachteinbauten, das Perforieren des Schachtausbaus und der Auflockerungszone mit den Asphaltversorgungsbohrlöchern bzw. das Vorabdichten der Klüfte im Turon und Cenoman. Die Anordnung der Bohrungen zur Vorabdichtung der Klüfte bzw. zur Versorgung der Auflockerungszone im Asphalt ist prinzipiell auf Abb. 17 dargestellt.

Die Ausführung der Bauarbeiten erfolgt mit einer mehretagigen Arbeitsbühne von oben nach unten.

Auszubauende Materialien werden mit einem Spezialgehänge an das Förderseil angeschlagen, von ihren Halterungen gelöst und zutage gefördert. Die Durchführung baubegleitender geophysikalischer Untersuchungen, das Herstellen der Asphaltversorgungsbohrlöcher in der Auflockerungszone bzw. der Bohrlöcher für die Vorabdichtung der Klüfte erfolgt im nächsten Arbeitstag. Die Bohr- und Vorabdichtungsarbeiten werden mit schachtbauüblichen Geräten und Einrichtungen horizontweise durchgeführt, im letzten Arbeitstag werden die Bohrungen mit Bitumen B 200 aufgefüllt, ein Syphon auf das Standrohr montiert und ebenfalls mit Bitumen gefüllt. Diese Arbeiten werden von unten nach oben ausgeführt.

Der Einbau der hydrostatischen Asphaltssäule beginnt mit dem Einbau der Gußasphalt- und Sandasphaltpackung. Gußasphalt



als auch Sandasphalt werden in stationären Asphaltmischanlagen bei hohen Temperaturen gemischt. Am Schacht wird der gemischte Asphalt in den Schacht eingefördert.

Die Mischung der Asphalte (B 25, B 200) erfolgt übertage in mobilen Mischeinrichtungen. Für die Mischung der Asphalte werden Mischtemperaturen von 160°C und 190°C benötigt. Wird Asphalt mit diesen hohen Temperaturen im Schacht eingebaut, kommt es infolge des langsamen Auskühlungsverhaltens der großen Asphaltmengen zu unerwünschten Sedimentationerscheinungen im Asphalt. Um die Sedimentation in Grenzen zu halten, sollte der Asphalt nach dem Einbau nur Temperaturen unter 100°C aufweisen.

Es ist daher folgende Verfahrensweise vorgesehen:

In übertage installierten Mischkesseln wird das Bitumen erhitzt und mit dem Gesteinsmehlfüller gemischt. Ein Teil des heißen Asphaltes wird in Formen abgefüllt und in einem Kältebad abgekühlt. Kalte im Schacht mit Bodenentleerer eingebaute Asphaltblöcke werden mit heißen über Rohrleitungen eingeförderten Asphalt übergossen. Kalter und heißer Asphalt vermischen sich zu einer einheitlichen Asphaltmasse mit wesentlich geringerer Temperatur als der Anmischtemperatur.

Nach dem Verfüllen des Schachtes mit Asphalt wird sich der Asphaltspiegel senken. Ursache dafür ist im wesentlichen die Schrumpfung des Asphalts infolge seiner Abkühlung, die mögliche Zusammendrückung der mineralischen Abdichtung sowie das gewollte Eindringen des Asphalts in die Gebirgsklüfte. Abb. 25, die der Literatur /14/ entnommen wurde, zeigt das Absinken des Asphaltspiegels einiger Gleitschächte. Der Volumenverlust an Asphalt wird ohne Schwierigkeiten durch Nachverfüllungen so lange ausgeglichen; bis er zu einem quasi Stillstand führt.

Zum Abschluß der Arbeiten werden die Schächte mit einem Schachtdeckel verschlossen.



m<sup>3</sup> Asphalt / 1000m<sup>2</sup> Schachtwand

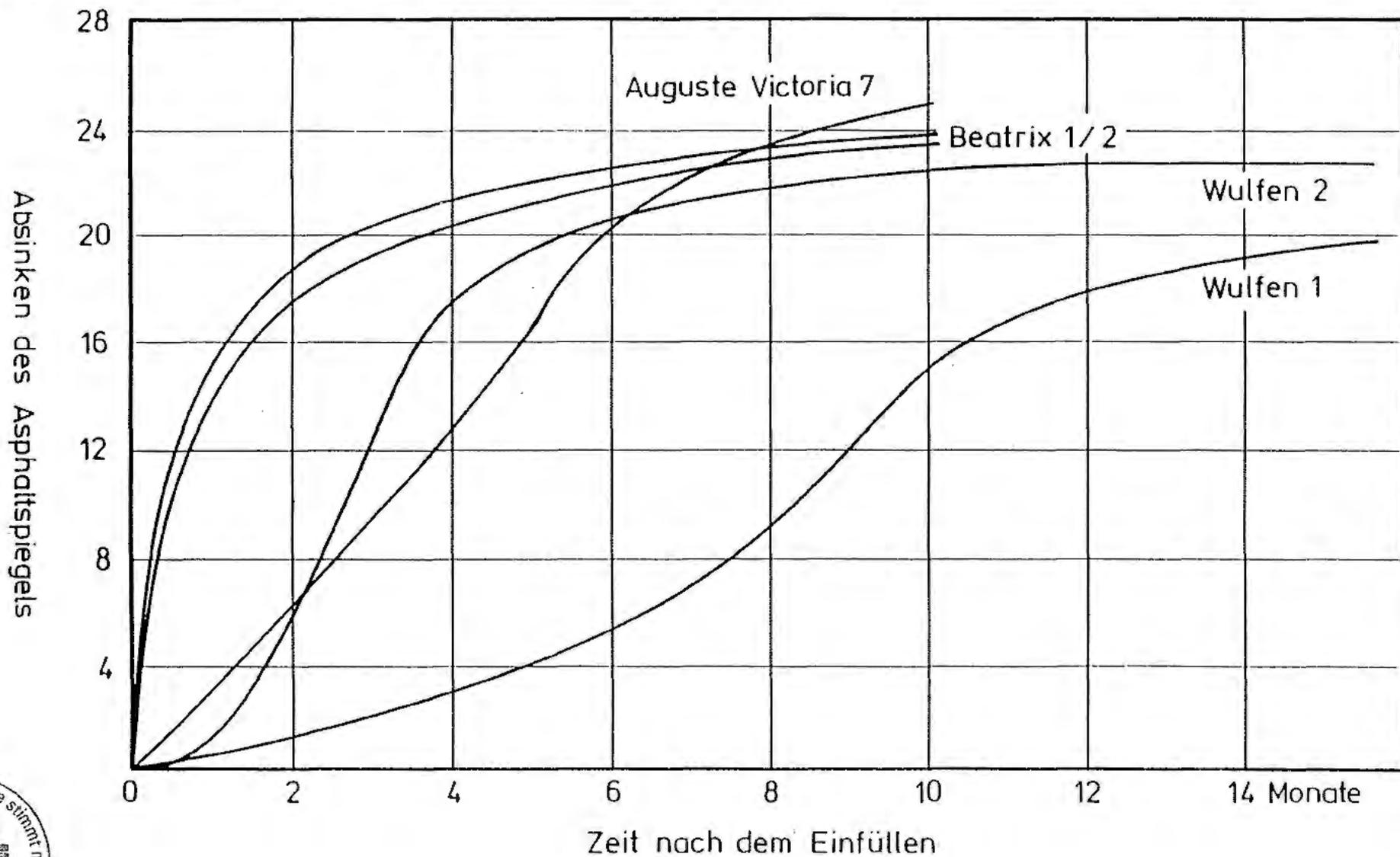


Abb. 25: Absinken des Asphaltspiegels in Gleitschächten /14/.

## 5. Qualitätssicherung

### 5.1 Allgemeines

Die Planung und Ausführung der hydrostatischen Asphaltabdichtung erfolgt durch Firmen, die über eine Qualitätssicherung verfügen.

### 5.2 Überprüfung des Asphalts sowie seiner Ausgangsstoffe

Die Überwachung des Asphalts und seiner Ausgangsstoffe geschieht durch die Qualitätsprüfungen, Eigenüberwachungsmaßnahmen sowie die Fremdüberwachungsmaßnahmen.

Qualitätsprüfungen sind Prüfungen zum Nachweis der Qualität der Baustoffe (Bitumen und Gesteinsmehlfüller) bzw. der Baustoffgemische (Asphalt) für den vorgesehenen Verwendungszweck. Die Zusammensetzung der Asphaltmischung wird festgelegt, zulässige Toleranzen werden ermittelt. Die Mischanweisung wird erstellt.

Der Nachweis der Qualität des Bitumens erfolgt durch Überprüfung der in Tab. 11 genannten Eigenschaft (DIN 1995) und Prüfvorschriften.

Der Gesteinsmehlfüller erfüllt die Anforderungen der Güte- und Prüfbestimmungen "Kalksteinmehl für den Straßenbau RAL - RG 544/4". Die Qualitätsüberwachung des Füllers wird nach RG Min Stb (Tab. 12) genannten Prüfverfahren durchgeführt.

In der Qualitätsprüfung der Asphaltmischung werden in Anlehnung an die "Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau" des Arbeitskreises 8 b "Asphaltbauweisen" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. die in Tab. 13 genannten Prüfungen durchgeführt.



Anforderungen an Straßenbaubitumen										Prüfung nach DIN
Lfd. Nr.			B 300	B 200	980	965	945	B 25	B 15	
1	Nadelpenetration (100 g, 5 s, 25°C)	1/10 mm	250 bis 320	160 bis 210	70 bis 100	50 bis 70	35 bis 50	20 bis 30	10 bis 20	52 010
2	Erweichungspunkt <sup>1)</sup> Ring und Kugel	°C	27 bis 37	37 bis 44	44 bis 49	49 bis 54	54 bis 59	59 bis 67	67 bis 72	52 011
3	Brechkpunkt nach Fraas	höchstens °C	-20	-15	-10	-8	-6	-2	-3	52 012
4	Asche	höchstens Gew.-%	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	52 005
5	Trichlorethen- oder Tetrachlorkohlenstoff-Unlösliches abzüglich Asche	höchstens Gew.-%	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	52 014, 52 005
6	Cyclonexan-Unlösliches abzüglich Asche	höchstens Gew.-%	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	52 014, 52 005
7	Duktilität bei 15°C	mindestens cm	100	-	-	-	-	-	-	52 013
	bei 25°C	mindestens cm	-	100	100	100	40	15	5	
8	Paraffin	höchstens Gew.-%	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	52 015
9	Dichte bei 25°C	mindestens g/cm <sup>3</sup>	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	52 004
10	Gewichtsänderung durch thermische Beanspruchung: relative Gewichtsabnahme	höchstens %	2,5	2,0	1,5	1,3	1,0	1,0	1,0	52 016
11	Anstieg des Erweichungspunktes Ring und Kugel nach thermischer Beanspruchung	höchstens °C	10	10	10	10	10	8	8	52 016, 52 011
12	Brechkpunkt nach thermischer Beanspruchung	höchstens °C	-15	-10	-8	-6	-5	±0	+5	52 016, 52 012
13	Verminderung der Nadelpenetration nach thermischer Beanspruchung	höchstens %	60	60	60	60	60	50	40	52 016, 52 010
14	Duktilität nach thermischer Beanspruchung bei 15°C	mindestens cm	50	-	-	-	-	-	-	52 016, 52 013
	bei 25°C	mindestens cm	-	50	50	50	15	5	2	
1) Hinweis: Entsprechend Erweichungspunkt nach Kraemer-Sarnow			18 bis 24	24 bis 30	30 bis 35	35 bis 40	40 bis 45	45 bis 53	53 bis 58	52 025
2) Hinweis: Bitumen, deren Aschegehalt höher ist, dürfen mit besonderem Hinweis angeboten werden.										

102

Tab. 11: Anforderungen an Normenbitumen (DIN 1995)



Lfd. Nr.	Prüfgegenstand	Prüfverfahren	FREMDFÜLLER			EIGENFÜLLER <sup>1)</sup>			
			Eignungs-nachweis	Güte-überwachung E   F		Eignungs-nachweis	Güte-überwachung E   F		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Herkunft bzw. Gewinnungsstätte und Aufbereitung	TP Min-StB Teil 2.1	+	-	●	+	-	●	
2	Äußere Beschaffenheit	TP Min-StB Teil 3.1.3	ohne Prüfmittel	+	****	●	+	****	●
			Mikrosk. Betrachtung	+	-	●	+	-	●
3	Überprüfung der Eigenüberwachung		+	-	●	+	-	●	
4	Korngrößenverteilung	TP Min-StB Teil 6.3.1/2/3.1 und 6.3.3.2	Überkorn > 0,09 mm	+	***	●	-	-	-
			Sieblinie	+	-	●	-	-	●
			Anteil < 0,09 mm	-	-	-	+	***	●
5	Rohdichte	TP Min-StB Teil 3.2.3	+	-	●	+	-	●	
6	Rigden-Hohlraum	TP Min-StB Teil 3.8.3	+	•• <sup>2)</sup>	●	+	•• <sup>2)</sup>	●	
7	Versteifende Eigenschaften	TP Min-StB Teil 3.7.3	Stabilisierungsindex	+	-	○	+	-	○
			Erweichungspunkterhöhung 65/35	+ <sup>1)</sup>	-	●	+ <sup>1)</sup>	-	●
8	Organische Bestandteile	TP Min-StB Teil 6.6.3	+	••	○	-	-	-	
9	Wasserlösliche Anteile	TP Min-StB Teil 4.6.3.1	+	-	○ <sup>3)</sup>	+	-	○ <sup>3)</sup>	
10	Wasserempfindlichkeit	TP Min-StB Teil 4.6.3.2	+	-	●	+	-	●	

E = Eigenüberwachung: ●●● täglich  
●●● wöchentlich  
●● monatlich

F = Fremdüberwachung: ● zweimal im Jahre  
● bei wesentlichen Veränderungen  
○ alle zwei Jahre

<sup>1)</sup> aus graphischer Auftragung gemäß Abschnitt 6.1  
<sup>2)</sup> nötigenfalls mit der Rohdichte der letzten Fremdüberwachung  
<sup>3)</sup> bei Füllern aus Naturgestein, sonst u. U. häufiger  
<sup>4)</sup> die Güteüberwachung des Eigenfüllers erfolgt im Rahmen der Sandüberwachung (s. auch Ziffer 3 der TL-Füller  
+ Prüfung erforderlich  
- keine Prüfung erforderlich

Tab. 12: Prüfungen für die Güteüberwachung von Gesteinsmehlfüllern (Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau RG Min-StB)



Kornverteilung der Mineralstoff-	
mischung	DIN 1996 Teil 14
Bindemittelgehalt	DIN 1996 Teil 6
Dichte der Probekörper	DIN 1996 Teil 7
berechneter Hohlraumgehalt	DIN 1996 Teil 7
Quellversuch	DIN 1996 Teil 9
Viskosität	Höppler-Konsistometer

|02

Tab. 13: Qualitätsprüfung der Asphaltmischung

Durch Eigen- und Fremdüberwachungsmaßnahmen während der Bauausführung werden Voraussetzungen geschaffen, die die Herstellung und Verarbeitung eines Asphaltes mit den von der Qualitätsprüfung geforderten Eigenschaften in gleichmäßiger Qualität sicherstellen. Auf der Basis der Prüfungen kann - falls erforderlich - bei Qualitätsabweichungen steuernd in den Herstellungs- bzw. Verarbeitungsprozeß des Asphalts eingegriffen werden.

In der Eigenüberwachung werden an jedem Produktionstag an drei verschiedenen Asphaltmischungen die folgenden Untersuchungen durchgeführt:

- Kornverteilung Mineralstoffmischung nach DIN 1996, Teil 14
- Bindemittelgehalt nach DIN 1996, Teil 6
- Rohdichte nach DIN 1996, Teil 7
- Ermittlung der Viskosität mit dem Höppler-Konsistometer.



Die Prüfergebnisse der Eigenüberwachung müssen innerhalb der in der Qualitätsprüfung festgelegten Bandbreite liegen. Die Ergebnisse der Eigenüberwachung werden in einem Bautagebuch festgehalten. Von jeder Tagesproduktion des Asphalts ist eine Rückstellprobe in der Menge zu entnehmen, so daß an ihr gegebenenfalls eine vollständige Eigenüberwachungsprüfung durchgeführt werden kann. Die Probe ist bei dem mit der Fremdüberwachung der Baustelle beauftragten Institut aufzubewahren.

Die Fremdüberwachung dient der Kontrolle der zur Sicherung der Asphaltqualität vorgesehenen Maßnahmen. Die Fremdüberwachung wird von einer unabhängigen mit der Übernahme von Asphaltarbeiten vertrauten Institution durchgeführt. Die Fremdüberwachung überprüft stichprobenartig die

- Aufzeichnungen des Bautagebuches,
- Mischanweisung,
- Lieferscheine der Ausgangsstoffe,
- Beschaffenheit und Lagerung der Ausgangsstoffe,
- Beherrschung der Verfahren zur Probenahme und Prüfung durch das mit der Eigenüberwachung betraute Personal,
- Asphalteeigenschaften entsprechend den Eigenüberwachungsprüfungen.

Bei negativen Ergebnissen, die eine nicht ordnungsgemäße Beschaffenheit des Asphaltes erwarten lassen, unterrichtet die Fremdüberwachung die Baustelle sowie die zuständige Aufsichtsbehörde und stimmt mit ihr weitere Maßnahmen ab.

### 5.3 Überprüfungen an der hydrostatischen Säule beim bzw. nach dem Einbau

Durch baubegleitende gebirgsphysikalische Untersuchungen werden ermittelt:



- Tiefe der Auflockerungszone
- Durchlässigkeit der Auflockerungszone
- Kluftweiten in der Auflockerungszone
- Kluftabstände in der Auflockerungszone.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in der Ausführungsplanung der hydrostatischen Asphaltabdichtung berücksichtigt.

Der Einbau der hydrostatischen Asphaltabdichtung in die Schächte erfolgt in Anlehnung an die einschlägigen bergbehördliche Richtlinien für das Verfüllen und Abdecken von Tagesschächten. Die dort genannte Maßnahme hinsichtlich der vorbereitenden Arbeiten, Einbau und Überwachung, sowie die Sicherung der Tagesoberfläche werden beachtet.

Zusätzlich zu den in den Richtlinien genannten Überwachungen wird beim Einbau die Temperatur der Asphaltsäule mit verlorenen Temperaturmeßfühlern überwacht. Die Einbautemperatur in der Asphaltsäule sollte nach Vermischung von kalt und heiß eingebautem Asphalt 100° C nicht überschreiten.

Nach Einbau der hydrostatischen Asphaltabdichtung wird das Absenken des Asphaltspiegels beobachtet. Der Volumenverlust wird durch Nachverfüllungen mit Asphalt B 25 so lange ausgeglichen, bis ein quasi Stillstand in der Absenkung erreicht wird. Für Planung und Ausführung der Nachverfüllungen werden dieselben Qualitätssicherungsmaßnahmen durchgeführt wie bei der Planung und dem Einbau der hydrostatischen Asphaltabdichtung.



## 6. Vorschriften und Richtlinien

Bei der Planung und Ausführung kommen u.a. folgende Bitumen bzw. Asphalte betreffende Normen, Vorschriften und Empfehlungen in der jeweils gültigen Fassung zur Anwendung:

- DIN 1995 Bitumen und Steinkohlenteerpech, Anforderungen an die Bindemittel 02
- DIN 1996 Prüfung bituminöser Massen für den Straßenbau und verwandte Gebiete 02
- DIN 52004 Prüfung bituminöser Bindemittel; Bestimmung der Dichte und des Dichteverhältnisses
- DIN 52005 Prüfung bituminöser Bindemittel; Bestimmung der Asche
- DIN 52010 Prüfung bituminöser Bindemittel; Bestimmung der Nadelpenetration
- DIN 52011 Prüfung bituminöser Bindemittel; Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel
- DIN 52012 Prüfung bituminöser Bindemittel; Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß
- DIN 52013 Prüfung bituminöser Bindemittel; Bestimmung der Duktilität
- DIN 52014 Prüfung bituminöser Bindemittel; Bestimmung des Gehaltes an unlöslichen Anteilen
- DIN 52015 Prüfung bituminöser Bindemittel; Bestimmung des Gehaltes an Paraffinen



- DIN 52016 Prüfung bituminöser Bindemittel; Thermische Beanspruchung im rotierenden Kolben und Bestimmung der Gewichtsänderung durch thermische Beanspruchung 02
- DIN 52025 Prüfung bituminöser Bindemittel; Bestimmung des Erweichungspunktes nach Kraemer-Sarnow
- Güte- und Prüfbestimmungen "Kalksteinmehl von Mineralstoffen im Straßenbau" RAL-RG 544/4 02
- Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau, RG Min-StB 83
- "Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau" des Arbeitskreises 8b Asphaltbauweise der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V.



7. Literaturverzeichnis

/1/ entfällt

/2/ entfällt

/3/ entfällt

/4/ entfällt

/5/ entfällt

/6/ Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e.V.: Bitumen und Asphalt - Taschenbuch, 5. neubearbeitete Auflage; Wiesbaden 1976

/7/ entfällt

/8/ Abdellah N.A., Pedersen P.M.

Microbial degradation of bitumen used for the conditioning of low and medium level radioactive waste.

In: Krischer W., Simon R. (eds.): Testing, evaluation and shallow land burial of low and medium radioactive waste form, Harwood Academic Publ. Chur. CONF-8309289, 163-181, 1984

02

02



/9/ Sambell R.A.J. (ED)  
 Characterization of low and medium level radioactive waste forms, CEC Nuclear Science and Technology, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities 983, ISBN 92-825-3897-4, 1983

/10/ entfällt

| 02

/11/ Ewers, J.W., und Heukelom W.: Die Erhöhung der Viskosität von Bitumen durch die Zugabe von Füllern Straße und Autobahn; 1969

/12/ [REDACTED] Bitumen - Möglichkeiten für Berechnungen in der Praxis - Deutsche Shell AG, Hamburg

/13/ entfällt

| 02

/14/ Kampschulte, Lehmann, Link: Das Abteufen und Ausbauen der Gefrierschächte Wulfen 1 und 2, Glückauf 100, Heft 25; 1964

/15/ entfällt

| 02

/16/ Grigull, U.: Temperaturlausgleich in einfachen Körpern, Springer-Verlag, Berlin, Göttingen und Heidelberg, 1964

/17/ Grigull, U.: Sadner, H.: Wärmeleitung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1979

/18/ Albring, W., Angewandte Strömungslehre, Akademie-Verlag, Berlin 1978 .

/19/ Wittke, W.: Felsmechanik - Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels, Springer-Verlag, 1984.

/20/ entfällt

| 02



## Analysenwerte MIKROSÖHL 40

Chemische Analyse  
(Durchschnittswerte)

CaCO <sub>3</sub>	93,25	%
(davon MgCO <sub>3</sub> )	1,10	%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,55	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,45	%
Mn	0,01	%
SO <sub>4</sub>	0,20	%
SiO <sub>2</sub>	5,24	%
H <sub>2</sub> O	0,30	%

Physikalische Werte

Kornverteilung siehe Sedimentationsanalyse

Spezifisches Gewicht	2,68
Pulverhelligkeit (Elrepho-Gerät, Grünfilter)	80,8
Ölaufnahme (Rub-out-Methode)	21,3
Litergewicht (DIN 1060)	570 g/l

Genannte Werte sind Durchschnittswerte. Abweichungen sind möglich, weil Naturprodukte unbeeinflussbare Strukturveränderungen im Rohmaterial aufweisen können.



Dammann KG

mikrosöhl-Eigenüberwachung 40 my-Ware

Hohlraum nach Rigden: vom 28.02.1990

Der Hohlraumgehalt nach Rigden ermittelt am  
trockenen Füller  $\leq$  40 my

betrug  $H = 43.1 \text{ Vol.-%}$   
t

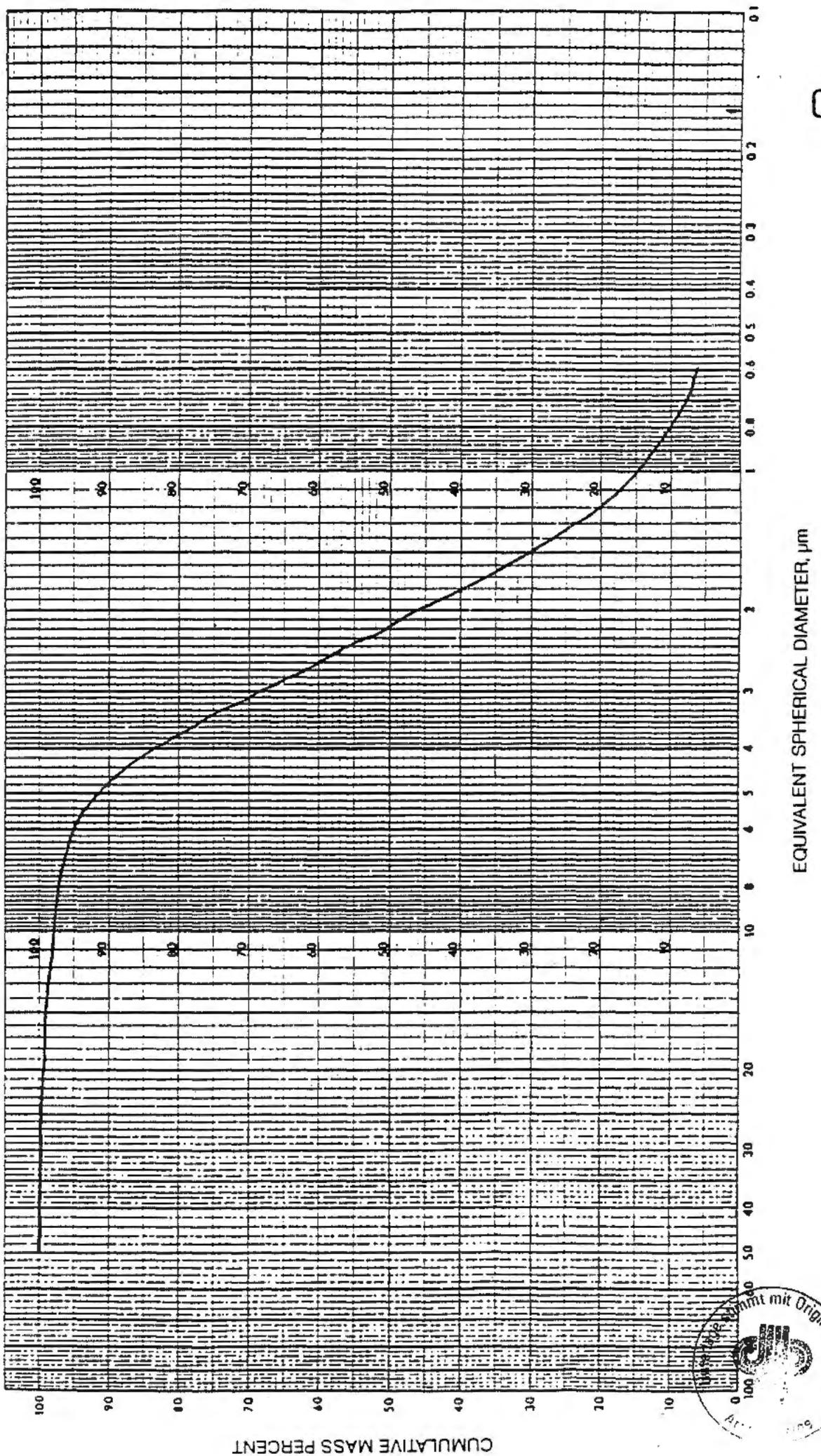
Rohdichte =  $2.72 \text{ g/cm}^3$

Letter, d. 28. 2. 90

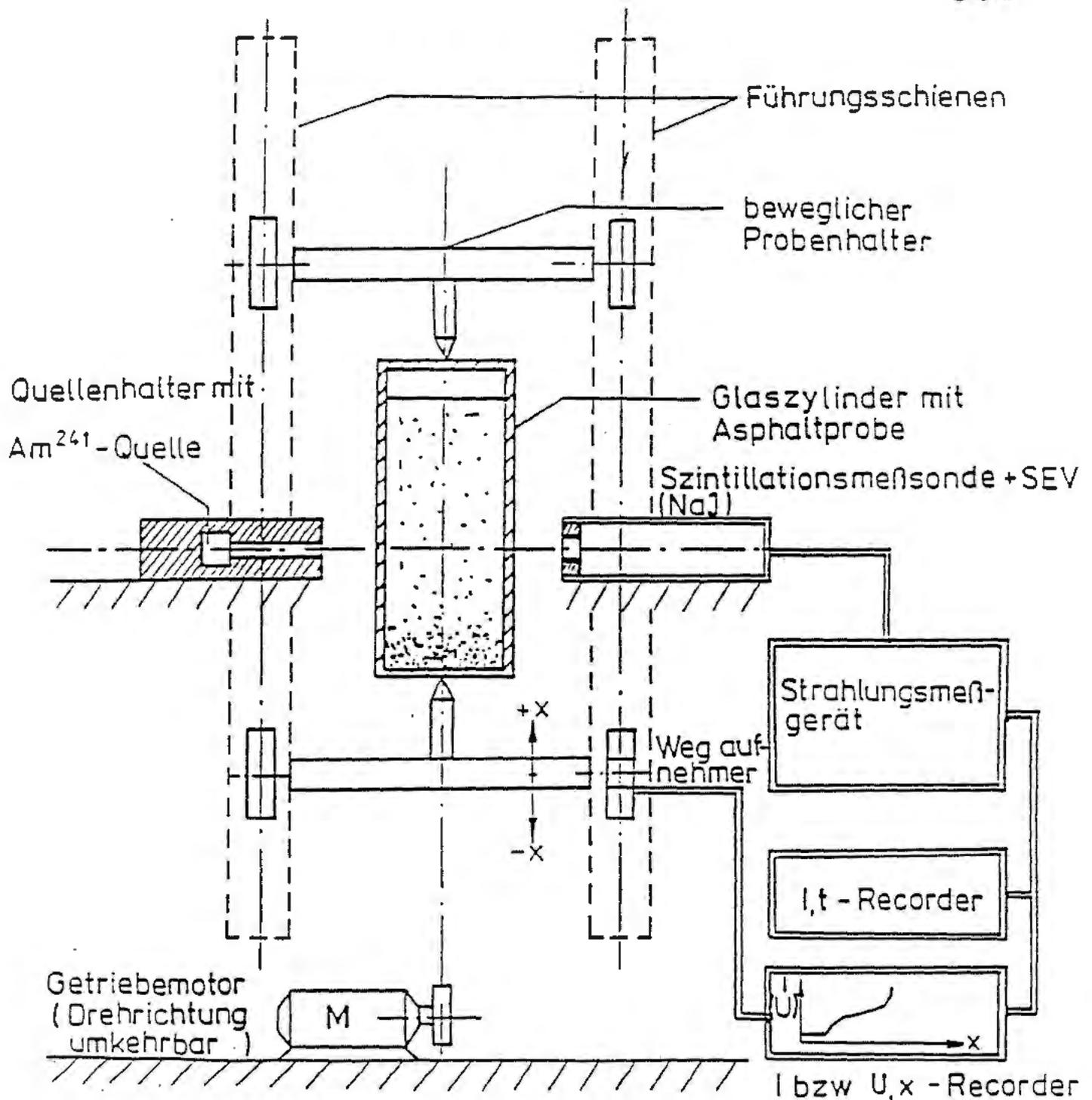


# Korngrößenverteilung

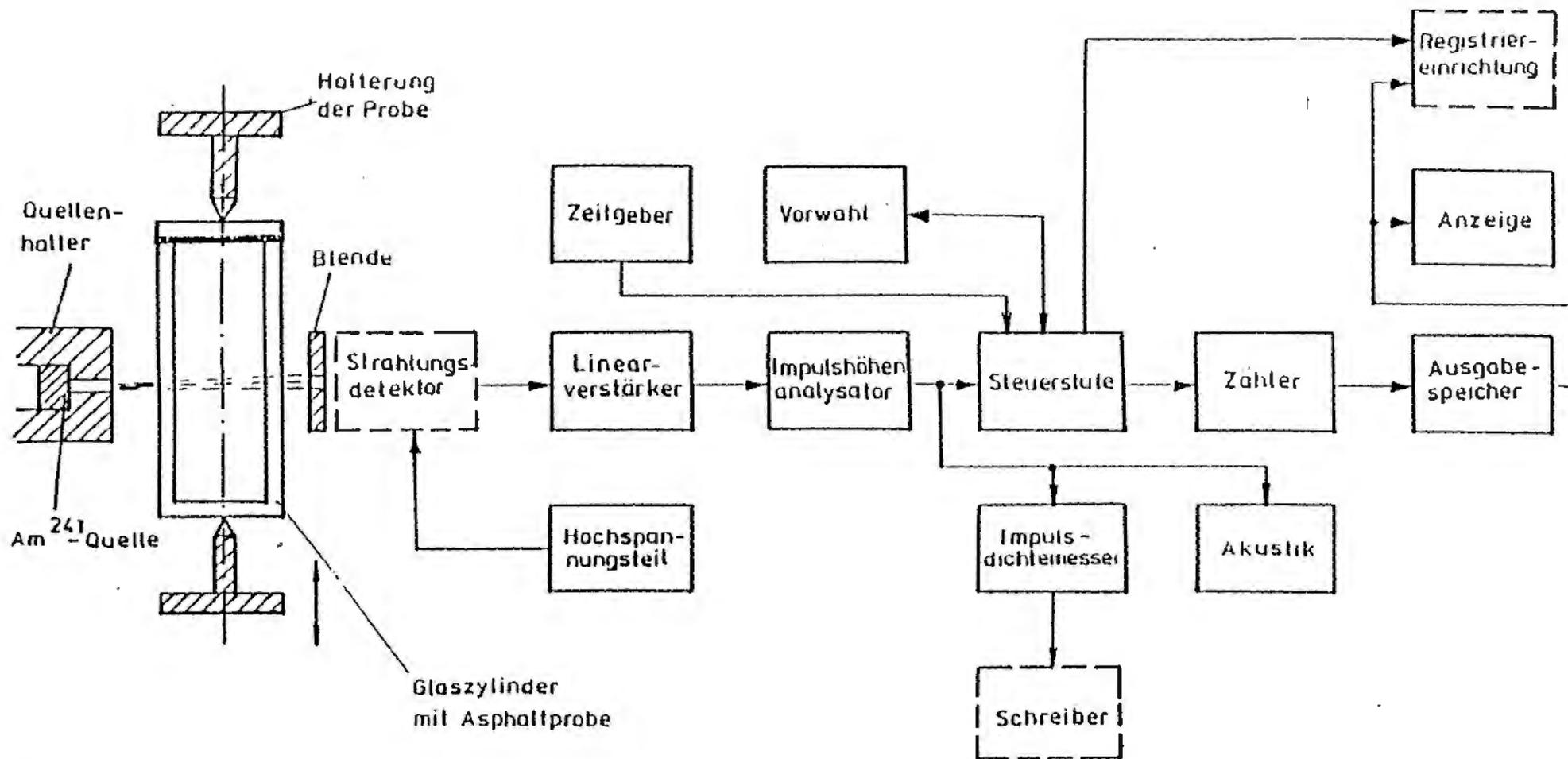
Produktbezeichnung: **MIKROSÖHL**



080



Versuchsapparatur zur Untersuchung des Sedimentationsverhaltens in Bitumen mittels radioaktiver Durchstrahlung und nachfolgender Impulsdichtemessung (Prinzipiskizze)



Übersichtsschaltplan des STRALUNGSMESSGERÄTES 20 046  
 (VEB Robotron Messelektronik „OTTO SCHÖN“ Dresden)

