FORSCHUNGSAUFTRAG 22/88
DES EIDGENÖSSISCHEN VERKEHRS- UND
ENERGIEWIRTSCHAFTSDEPARTEMENTES
SCHLUSSBERICHT MÄRZ 1988

Verfasser: Fei-Loung YANG, dipl. Bauing. ETH
Ingenieurbureau Heierli AG, Zürich

Bram van EGMOND, Bauingenieur HTL
Betonstrassen AG, Wildegg

LABORUNTERSUCHUNG ZUM EINSATZ VON ZUSATZMITTELN ZUR VERRINGERUNG DER SCHWINDRISSE IN ZEMENTSTABILISIERUNGEN

8.3.1991

Ya - ms

Nr. 1545-5

HEIERLI
Ingenieurbureau Heierli AG
Culmannstr. 56, 8033 Zürich 6
Tel. 01 363 06 60, Fax 01 361 11 77

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
-	ZUSAMMENFASSUNG	2
1.	EINLEITUNG	3
1.1	Ausgangslage und Zielsetzung	3
1.2	Ergebnis	4
2.	EIGNUNGSPRÜFUNG	5
2.1	Ausgangskiesmaterial	5
2.2	Klassifikation	5
2.3	Stabilisierungsprüfung (ohne Zusatzmittel)	7
2.4	Festigkeitsentwicklung	7
2.5	Portlandzement	10
2.6	Zusatzmittel	11
2.7	Dosierung des Zusatzmittels bei den Laborversuchen	12
2.8	Bezeichnung der Zylinderproben	13
2.9	Frostauftauprüfung an Zylinderproben mit Zusatzmitteln	14
2.10	Beurteilung	15
3.	SCHWINDMESSUNG	16
3.1	Bezeichnung der Prismenproben	17
3.2	Auswertung und Ergebnis	19
3.3	Beurteilung	24
4.	SCHLUSSFOLGERUNG	27
LITERATURVERZEICHNIS		28
ANHANG: Bericht der Eignungsprüfung nach SN 640 509a		30

ZUSAMMENFASSUNG

Zur Verringerung von Schwindrissen in der Zementstabilisierung wurden zwei schwindhemmende Zusatzmittel zum normalen Portlandzement labormässig untersucht. Dabei wurde unter anderem das Schwindmass an Prismenproben gemessen.

Das Schwindmass der Proben mit einer Zementdosierung von 60 kg/m3, jedoch ohne Zusatzmittel, liegt zwischen 0.5 bis 0.7‰. Das Schwindverhalten entspricht dem des normalen Betons.

Das gemessene Schwindmass der Proben mit den Zusatzmitteln bei gleichem Zement- und Wassergehalt liegt wider Erwarten höher als das der Proben ohne Zusatzmittel. Eine Erklärung dafür kann im Rahmen dieser Untersuchung nicht gegeben werden.

Aufgrund der negativen Ergebnisse kann die Beimengung der Zusatzmittel zum normalen Portlandzement zur Verbesserung des Schwindverhaltens von Stabilisierungen nicht empfohlen werden.

RESUME

Afin de réduire les fissures dues au retrait dans les stabilisations au ciment, on a analysé en laboratoire deux additifs réduisant la fissuration. A cette occasion, on a, entre autre, mesuré le retrait sur échantillons de prismes.

La mesure de retrait des échantillons, avec une dose de ciment de 60 kg/m3, mais sans additifs, est de 0.5 à 0.7‰. Le comportement de retrait correspond à celui du béton normal. On a constaté que la mesure de retrait des échantillons avec des additifs - ayant la même teneur en ciment et en eau - était, contre toute attente, plus grande que celle des échantillons sans additifs. Une explication pour cela ne peut être donnée dans le cadre de cette étude.

En regard des résultats négatifs, l'adjonction des additifs au ciment normal Portland, afin d'améliorer le comportement au retrait de stabilisations, ne peut être recommandée.

1. EINLEITUNG

1.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Der grösste Anteil der bis heute in der Schweiz eingebauten Zementstabilisierungen besteht aus relativ körnigen Kiessandmaterialien der Klassen II und III mit normalem Portlandzement ohne Zusatzmittel. In den Zementstabilisierungen entstehen trotz allen Vorsichtsmassnahmen Risse, die dann in bituminöse Beläge durchschlagen können. Obwohl die Risse die Tragfähigkeit des zementstabilisierten Oberbaus nur mässig beeinträchtigen, werden sie in der Regel aus Gründen des Belagsunterhaltes und wegen möglicher Schäden infolge eindringenden Salzwassers repariert. Diese Reparatur ist häufig kostspielig. Daher ist heute das Rissproblem ein wichtiges Anliegen für den Fachkreis geworden.

Im Auftrag des Eidgenössischen Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartementes hat das Ingenieurbureau Heierli 1987/88 neue Erkenntnisse zur Vermeidung des Durchschlagens von Rissen gesammelt und sie im Forschungsbericht Nr. 157 zusammengefasst.

Dabei wurden die Erfahrungen in den umliegenden Ländern, die in einer Tagung in Strasbourg ausgetauscht wurden, gesammelt und beurteilt, mit dem Ziel, für die schweizerischen Verhältnisse Empfehlungen zur Vermeidung von Rissen auszuarbeiten. **Zu solchen Massnahmen gehört unter anderem die Zugabe von Zusatzmitteln zum normalen Portlandzement.**

Diese Massnahmen wurden bis anhin weder bei uns noch in den umliegenden Ländern erprobt, obwohl bereits 1968 Barksdale und Vergnolle aus den USA in einem Aufsatz "Expansive Cement Stabilization of Bases" [8] über die positive Wirkung von quellfördernden Zusatzmitteln zur Verringerung von Schwindrissen berichtet hatten. Dieser Bericht basierte hauptsächlich auf Laboruntersuchungen und nicht auf Feldversuchen.

Nach Abschluss der genannten Forschungsarbeit (Bericht Nr. 157) erteilte uns das Eidgenössische Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement 1988 anschliessend den Auftrag, die vorliegende Forschungsarbeit durchzuführen, mit dem Ziel, **durch experimentelle Untersuchungen wie Zugabe von Zusatzmitteln zum normalen Portlandzement** zu prüfen, wie Schwindrisse in Zementstabilisierungen verringert werden könnten.
Ursprünglich war ein Vorgehen in zwei Phasen vorgesehen:

1. Phase: Laboruntersuchungen
Im Falle positiver Ergebnisse, Realisierung der 2. Phase.

2. Phase: Versuchsstrecken
Langzeitversuche an der 1990 noch im Bau befindlichen Nationalstrasse N3/05.

1.2 Ergebnis

Die Laboruntersuchungen wurden bei der Betonstrassen AG, Wildegg, durchgeführt. Es wurden Proctor-Zylinderproben mit und ohne Zusatzmittel hergestellt; anschliessend wurden die Druckfestigkeit und die Frostbeständigkeit gemäss SN 640 509a geprüft. Die Frostauftauprüfung hat ergeben, dass die Zusatzmittel die Frostbeständigkeit der Stabilisierungsproben beeinträchtigen können. Auch stellt eine zuverlässige und homogene Beimengung von Zusatzmitteln in der Praxis gewisse Probleme.

Als Zusatzmittel wurden zwei auf dem Markt vorhandene Produkte ausgewählt:

- ein Zusatzmittel der Firma SIKA AG und
- ein Zusatzmittel der Firma MÜLLER AG.

Zudem wurden Prismenproben mit und ohne Zusatzmittel hergestellt, um das Schwindmass der Zementstabilisierungen zu messen. Solche Messungen wurden bis anhin in der Schweiz nicht vorgenommen. **Die vorliegenden Messergebnisse liefern keine Indizien, wonach die gewählten Zusatzmittel unter den vorgenommenen Versuchsbedingungen eine schwindhemmende Wirkung auf die Zementstabilisierungen haben könnten.**

Aufgrund dieser negativen Ergebnisse wurde beschlossen, die Untersuchung abzubrechen und auf ein Erstellen von Versuchsstrecken und die Verwendung der Zusatzmittel auf der Nationalstrasse N3/05 zu verzichten.

2. EIGNUNGSPRÜFUNG

2.1 Ausgangskiesmaterial

Als Ausgangsmaterial wurde der Kiessand von Münchenstein/AG gewählt. Dieses Kiessandmaterial wurde bis 1989 für den Einbau der herkömmlichen Stabischichten auf der N3/05 verwendet, und dessen Benützung als Ausgangsmaterial lag daher nahe.

Die Stabilisierungsprüfung des Ausgangsmaterials wurde im April 1989 im Auftrag des Baudepartementes des Kantons Aargau im Rahmen des Bauprojektes N3/05 von der Betonstrassen AG, Wildegg, vorgenommen. Der Bericht über die Prüfergebnisse ist in Anhang 1 zu finden.

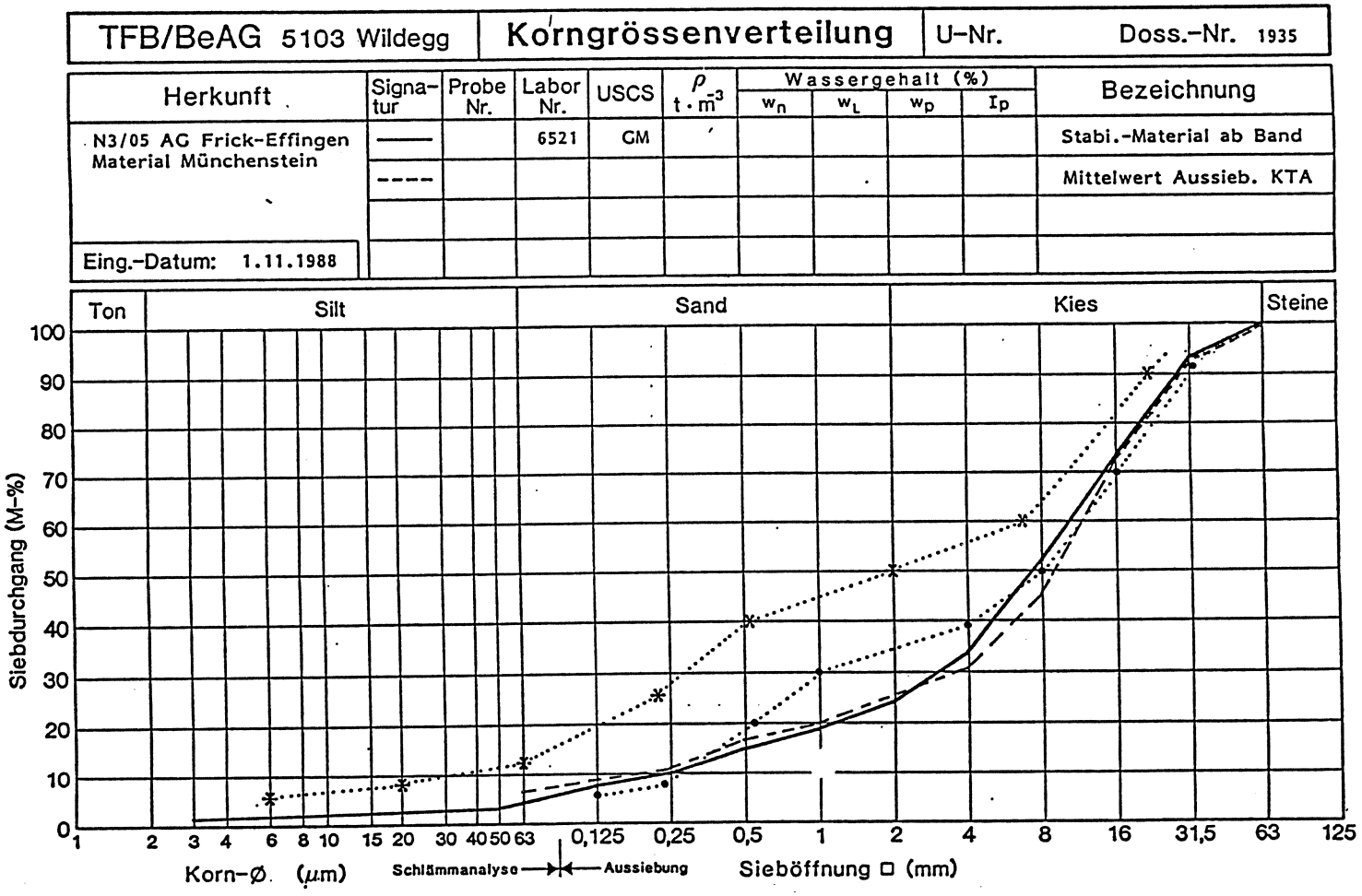
Wir geben im folgenden die wichtigsten Daten wieder:

2.2 Klassifikation

Beim Münchensteiner Kiessand handelt es sich um siltigen Kies der USCS-Klassifikation GM. Das Maximalkorn beträgt nach Brechen 45 mm. Der unter 0.125 mm liegende Kornanteil beträgt ca. 9%. Die Kornverteilungskurve geht aus Fig. 1 hervor. Dort sind als Vergleich ferner zwei ausgewählte Kornverteilungskurven aus den Kantonen Bern und Zürich dargestellt. Aus diesen Angaben geht hervor, dass das Ausgangsmaterial sehr kiesig war und wenig Feinanteile aufwies.

Fig. 1 Kornverteilungskurve des Ausgangsmaterials von Münchenstein AG

Stabilisierungsmaterial: Siltiger Kiessand GM:
Kanton Aargau, Münchenstein, Ausgangsmaterial der vorliegenden Untersuchung
• Kanton Zürich, N1 Versuchspiste Weininger-Kreuz, zum Vergleich
x Kanton Bern, Lätti-Bundkofen, Kiesgrube Deisswil, zum Vergleich



2.3 Stabilisierungsprüfung (ohne Zusatzmittel)

Die Stabilisierungsprüfung wurde nach der SN-Norm 640 509a durchgeführt. Dabei betrug das Maximalkorn 16 mm.

Es resultierten folgende Laborwerte:

- Trockenrohdichte 2.22 t/m3
- Maximalkorn 16 mm
- Anteil der Körner unter 16 mm an der Gesamtfraktion 73 %
- Optimaler Wassergehalt 6.0 %
- Erforderliche Zementdosierung PC 3.6% 77 kg/m3.

Aus den Laborwerten wurden die Feldwerte für die Bauausführung ermittelt. Die Feldwerte der Gesamtfraktion betrugen:

- Trockenrohdichte 2.29 t/m3
- Maximalkorn 45 mm
- Optimaler Wassergehalt 4.8 %
- Erforderliche Zementdosierung PC 60 kg/m3.

Zur Bestimmung der Zementdosierung ist gemäss der SN-Norm 640 509a die Druckfestigkeit im Alter von 7 Tagen massgebend. Die erforderliche Mindestfestigkeit beträgt 2.0 N/mm2.

Die Proctor-Zylinderproben ohne Zusatzmittel wurden normgemäss einer Frostauftauprüfung unterzogen. Nach den 12 Frostauftauzyklen darf die Summe aller Massenverluste eines Prüfkörpers durch Abbürsten nach jedem erfolgten Zyklus 14% nicht überschreiten. Der effektive Massenverlust betrug lediglich ca. 6% und war somit nicht massgebend.

2.4 Festigkeitsentwicklung

Die Festigkeiten der Proben ohne Zusatzmittel zum Portlandzement (Nullproben) betrugen im Alter von

- 7 Tagen 2.4 N/mm2
- 28 Tagen 3.1 N/mm2
- 90 Tagen 4.0 N/mm2
- 365 Tagen 5.2 N/mm2.

Sie sind in Fig. 2 dargestellt. Dort sind als Vergleich ebenfalls Festigkeitswerte der Proben mit Zusatzmitteln angegeben.

Fig. 2 Festigkeitsentwicklung Proctor-Zylinderproben

Druckfestigkeit in N/mm2 im Alter von	Nullserie	MÜLLER 1%	MÜLLER 5%	MÜLLER 15%	SIKA 10%	SIKA 30%
7 Tagen	2.4	2.5	2.2	2.2	1.9	1.3
28 Tagen	3.1	3.4	3.3	3.1	2.6	2.2
90 Tagen	4.0	4.3	3.9	3.4	3.3	2.7
365 Tagen	5.2	4.8	4.0	5.3	4.8	3.5

Figur 2

Druckfestigkeitsentwicklung der Stabilisierungsproben

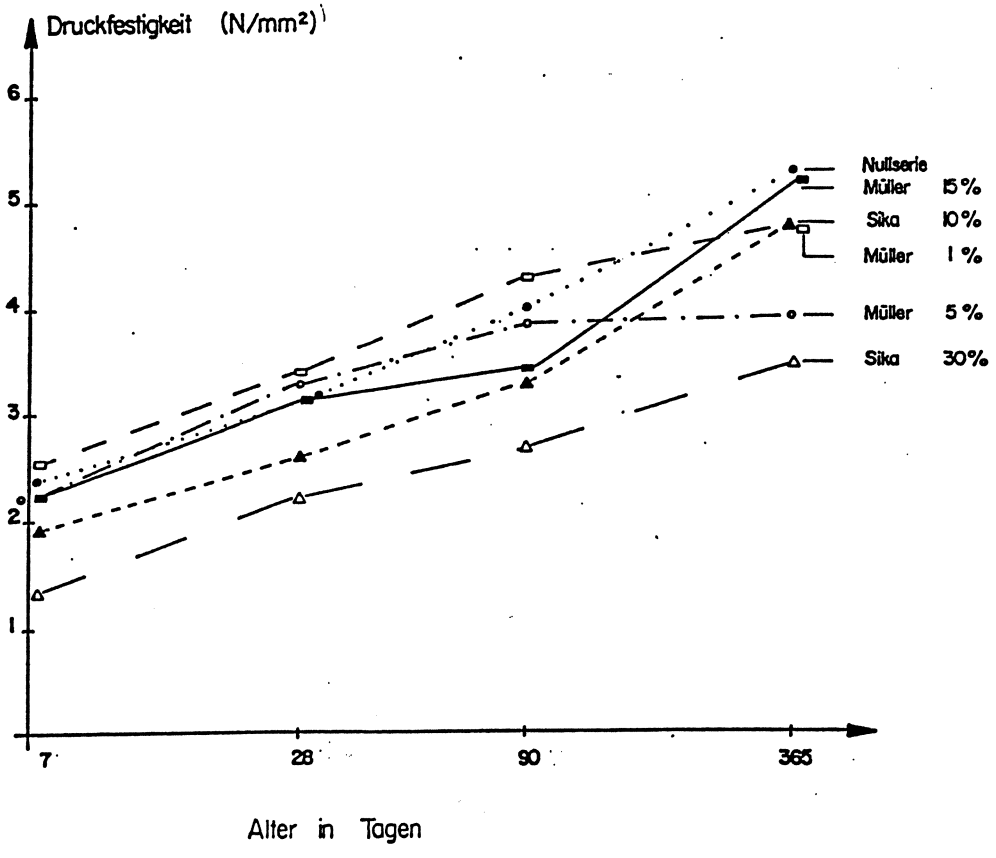


Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der Portlandzemente und der Zusatzmittel

CH = PC Jura, Schweiz, für die vorliegenden Untersuchungen verwendet
D = Heidelberger Zement, PZ 35 F, Kiefersfelden, zum Vergleich
E = Angabe von Biczok, Europa, zum Vergleich
* = Angaben fehlen

	Normale Portlandzemente			Zusatzmittel	
				von SIKA AG	von MÜLLER AG
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
	CH	D	E		
Glühverlust bei 1000°C	2.0	1.7	1.3	1.19	39.20
SiO_2	20	20.6	21.9	5.21	36.18
Al_2O_3	6	6.4	5.9	11.75	3.71
Fe_2O_3	3	2.5	2.5	1.02	1.68
CaO	63	61.8	63.4	52.86	0
MgO	1.5	3.9	2.5	0.72	2.06
SO_3	3.4	3.1	1.5	29.57	1.87
K_2O	1	0.8	0	0.23	0.32
Na_2O	0.2	*	*	0.18	0.18
TiO_2	0.3	*	*	0.25	0.29
Mn_2O_3	0.05	*	*	0.56	0.64
P_2O_5	0.1	*	*	0.33	0
Cl	0.01-0.05	*	*	0.04	0.07
Rest, unbekannt	*	*	*	0	13.8

2.5 Portlandzement

Der normale Portlandzement enthält in der Regel 20-22% SiO_2-, 6-7% Al_2O_3- und 60-65% CaO-Hauptanteile. Der Glühverlust beträgt nur 1-2%. Der Al_2O_3-Anteil ist hauptsächlich verantwortlich für das Schwinden. Je höher der Al_2O_3-Anteil, desto stärker ist das Schwinden der Stabilisierungsproben. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde der Portlandzement "Jura", Schweiz, verwendet. In der Schweiz weisen Zementprodukte in der Regel keine grossen Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung auf. In Tabelle 1 ist die chemische Zusammensetzung verschiedener Portlandzemente sowie der in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Zusatzmittel aufgeführt.

Der Alkaligehalt der Zemente, in Oxiden Na_2O, K_2O angegeben, ist in die sogenannten "Restprozente" einzuberechnen. Früher hatte man dem Alkaligehalt der Zemente, schon wegen des geringen Prozentsatzes, keine besondere Wichtigkeit beigemessen. Die entsprechenden Angaben sind aus Tabelle 1 ersichtlich. Nach neuesten Forschungsergebnissen können Alkalien in die Silikate und Aluminate der Klinkermineralien eingebaut werden, wodurch die Bindefähigkeit der Zemente beeinflusst werden kann. Die Alkalien können brenntechnische Schwierigkeiten verursachen und bei einem Anteil von mehr als 0.6% schwere Korrosionsschäden bewirken.

Bei der Zementstabilisierung werden dem Kiessand kleine Mengen von Portlandzement (60 bis 70 kg/m3) zugemischt, um die kleinste Partikelfraktion im Kiessand zu binden. Die Kleinstfraktionen bilden die grössten spezifischen Materialoberflächen und exponieren infolgedessen den zugemischten Zement als grösste Reaktionsfläche. Im abgebundenen und kompaktierten Zustand wird dadurch die Struktur des Kiessandes dermassen "vergröbert", dh. die spezifische Gesamtmaterialoberfläche verkleinert, dass das Material nun eine ausreichende Frostsicherheit aufweist. Modellmässig gesehen werden die groben Kiespartikel punktförmig mit einem Gemisch aus Zement und Feinteilen verkittet.

2.6 Zusatzmittel

Als Zusatzmittel zum normalen Portlandzement standen zu Beginn der Forschungsarbeit grundsätzlich folgende Möglichkeiten zur Diskussion:

- **Auswahl von einzelnen Mitteln aus einer Vielzahl von schwindhemmenden Zusatzmitteln,**
  zB. Kochsalz (NaCl), Calciumchlorid ($CaCl_2$), Zucker ($nC_6H_{12}O_6$), Flugasche, Magnesiumsulfate ($MgSO_4$), Calciumsulfate (Gips, $CaSO_4$), Natriumsulfate (Na_2SO_4
  oder
- **Kombination solcher schwindhemmender Zusatzmittel.**
  Diese Möglichkeit wäre zu umfangreich gewesen und hätte den Rahmen der vorliegenden Arbeit zeitlich und finanziell bei weitem gesprengt. Obwohl die Suche nach geeigneten Zusatzmitteln labormässig zwar interessant ist, bringt die praktische Anwendung (Dosierung = Apothekerarbeit) dieser Mittel für die Baupraxis Schwierigkeiten und Unsicherheiten mit sich.

- **Marktprodukte.**
  Aus diesen Überlegungen wurden beide Möglichkeiten fallengelassen, und man einigte sich auf die Verwendung vorhandener Marktprodukte, was bekanntlich auch baupraxiskonform ist.

Für die vorliegende Untersuchung wurden Zusatzmittel der Firmen SIKA AG und MÜLLER AG gewählt.

Die schwindhemmenden Zusatzmittel sind ursprünglich für Beton entwickelt und in der Praxis erprobt worden.

Die chemische Zusammensetzung beider Zusatzmittel ist aus Tabelle 1 ersichtlich.

Das Zusatzmittel von SIKA weist einen geringeren SiO_2-Anteil, jedoch einen auffallend hohen SO_3-Anteil (Sulfate) auf. Es enthält offensichtlich Quellmittel wie etwa Gips $CaSO_4$. Die Sulfate sind bekanntlich gefährlich für den Zementstein.

Das Zusatzmittel von MÜLLER weist einen ungewöhnlich grossen Glühverlust von 39.2% und einen unbekannten Rest von 13.8% auf (total 53%). Mehr als die Hälfte der Substanz ist unbekannt (vermutlich organischer Natur).

2.7 Dosierung des Zusatzmittels bei den Laborversuchen

Bei der Herstellung der Proctor-Zylinderproben (mit Maximalkorn kleiner als 16 mm) wurde der Gehalt an Portlandzement mit 3.6% (77 kg/m3) konstant gehalten, ebenso der Wassergehalt mit 6.0%.

Die Zusatzmittel zum Portlandzement wurden gemäss den Empfehlungen der Hersteller wie folgt dosiert:

a) **Zusatzmittel von SIKA**
2 Dosierungen: 10% und 30%
des Gehaltes an Portlandzement von 77 kg/m3,
dh. Zusatzmittel = 7.7 kg/m3 und 23.1 kg/m3 im Kiessand mit Korn < 16mm.

b) **Zusatzmittel von MÜLLER**
3 Dosierungen: 1%, 5% und 15%
des Gehaltes an Portlandzement von 77 kg/m3,
dh. Zusatzmittel = 0.8 kg, 3.9 kg und 11.6 kg/m3 im Kiessand mit Korn < 16 mm.

2.8 Bezeichnung der Zylinderproben

Zur Bestimmung der Druckfestigkeit und für die Frostauftauprüfung wurden insgesamt 92 Proctor-Zylinderproben (Durchmesser 100 mm, Höhe 100 mm, im folgenden als "Zylinderproben" bezeichnet) hergestellt. Die Numerierung geht aus Tabelle 2 hervor.

Tabelle 2: Numerierung der Zylinderproben zur Prüfung der Festigkeit und des Frostauftauens

Proben Nr.	Zusatzmittel zum Portlandzement	Verwendung zur Prüfung von
1 - 6	Nullproben ohne Zusatzmittel	Frostauftauen
7 - 11	SIKA 10%	Festigkeit + Frostauftauen
12 - 16	SIKA 30%	Festigkeit + Frostauftauen
17 - 18	Nullproben ohne Zusatzmittel	Festigkeit
19 - 23	MÜLLER 5%	Festigkeit + Frostauftauen
24 - 28	MÜLLER 15%	Festigkeit + Frostauftauen
29 - 33	MÜLLER 1%	Festigkeit + Frostauftauen
34 - 35	MÜLLER 15%	Festigkeit
36 - 38	Nullproben ohne Zusatzmittel	Festigkeit
39 - 41	SIKA 10%	Festigkeit
42 - 44	SIKA 30%	Festigkeit
45 - 47	Nullproben ohne Zusatzmittel	Festigkeit
48 - 50	MÜLLER 1%	Festigkeit
51 - 53	MÜLLER 5%	Festigkeit
54 - 56	MÜLLER 15%	Festigkeit
57 - 62	Nullproben ohne Zusatzmittel	Festigkeit (Langzeitversuch)
63 - 68	MÜLLER 1%	Festigkeit (Langzeitversuch)
69 - 74	MÜLLER 5%	Festigkeit (Langzeitversuch)
75 - 80	MÜLLER 15%	Festigkeit (Langzeitversuch)
81 - 86	SIKA 10%	Festigkeit (Langzeitversuch)
87 - 92	SIKA 30%	Festigkeit (Langzeitversuch)

2.9 Frostauftauprüfung an Zylinderproben mit Zusatzmitteln

Analog zu den Proben ohne Zusatzmittel (siehe Abschnitt 2.3) wurden die Zylinderproben mit Zusatzmitteln Frostauftauprüfungen unterzogen. Danach wurden die Druckfestigkeit und die Massenverluste bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Festigkeit der Stabilisierungsproben an Zylinderproben

n = Anzahl der Proben
x = Mittelwert der Festigkeit in N/mm2
xx = Festigkeit nach Frostauftauprüfung in N/mm2
* = Proben zerstört während Versuch
dM = Massenverlust in % durch Abbürsten nach Frostauftauprüfung

Serie	Festigkeit im Alter von 7 Tagen		Festigkeit und Wasserverlust nach Frostauftau		Festigkeit ohne Frostauftauzyklen im Alter von		
	n	x (N/mm2)	xx (N/mm2)	dM (%)	28 Tg. x	90 Tg. x (N/mm2)	365 Tg. x
Ohne Zusatzmittel:							
Nullserie	8	2.4	2.0	7.0	3.1	4.0	5.2
Mit Zusatzmitteln:							
MÜLLER 01%	7	2.5	1.8	3.2	3.4	4.3	4.8
MÜLLER 05%	7	2.2	1.9	4.2	3.3	3.9	4.0
MÜLLER 15%	9	2.2	1.6	11.7	3.1	3.4	5.3
SIKA 10%	7	1.9	1.1	3.1	2.6	3.3	4.8
SIKA 30%	7	1.3	*	*	2.2	2.7	3.5

2.10 Beurteilung

Massenverlust

Gemäss SN-Norm 640509a beträgt der zulässige Massenverlust dM 14% für das GM-Material. **Alle Proben mit oder ohne Zusatzmittel haben diesen Wert nicht überschritten.** Das Kriterium des Massenverlustes ist wegen der ausreichenden Zementdosierung nicht massgebend.

Druckfestigkeit

Die besagte SN-Norm schreibt ferner vor, dass

1. die Druckfestigkeit im Alter von 7 Tagen 2 N/mm2 nicht unterschreiten darf und
2. nach den Frostauftauzyklen nicht kleiner als die im Alter von 7 Tagen gemessene Druckfestigkeit

sein darf. Mit andern Worten: die Druckfestigkeit nach den Frostauftauzyklen soll höher sein als diejenige im Alter von 7 Tagen (ohne Frostauftauprüfung), da die Frostauftauzyklen mindestens 24 Tage dauern und die Festigkeit sich in dieser Zeit noch weiter entwickelt - vorausgesetzt, die Proben sind frostsicher.

Die erste Forderung wurde von allen Proben mit dem Zusatzmittel von SIKA knapp (1.9 N/mm2 bei 10% Zusatzmittel) bzw. massiv (1.3 N/mm2 bei 30% Zusatzmittel) nicht erfüllt. Die anderen Proben hingegen entsprachen der Bedingung (2.2. bis 2.5 N/mm2 > 2 N/mm2) voll.

Die zweite Forderung wurde von allen Proben nicht erfüllt. Die Druckfestigkeiten nach der Frostauftauprüfung waren ohne Ausnahme kleiner als die 7-tägigen Werte.

Es muss ausdrücklich erwähnt werden, dass die Festigkeitswerte nach den Frostauftauzyklen (Tabelle 3) **Einzelwerte darstellen und daher statistisch nicht gesichert sind.** Trotzdem lässt sich vermuten, dass die Zusatzmittel wegen der Quellwirkung eine Verringerung der Festigkeit während des Frostauftauprozesses verursacht haben könnten (Tabelle 3, MÜLLER 15%, SIKA 10% und SIKA 30%), denn ohne Frostauftauzyklen entwickelten sich die Festigkeiten der Proben mit Zusatzmitteln genau so normal wie bei der Nullserie (Fig. 2).

3. SCHWINDMESSUNG

Zur Bestimmung des Schwindmasses wurden Prismen hergestellt. Diese wiesen eine Höhe/Breite/Länge von 120/120/360 mm auf. Das Maximalkorn der Proben betrug 45 mm, die Zementdosierung 60 kg/m3 und der Wassergehalt 4.8%.

Bei jeder Zusatzmitteldosierung wurden 3 Prismen hergestellt. Die Prismen wurden jeweils durch Stampfen verdichtet und unmittelbar nach der Herstellung ausgeschalt.

Zur Bestimmung des Schwindmasses wurde die Längenänderung der Prismenachse mittels einer Messuhr, Ablesegenauigkeit 1/1000 mm, gemessen. Die erste Schwindmessung (Nullablesung) wurde jeweils ca. 1 h nach der Herstellung vorgenommen; weitere Messungen erfolgten im Alter von 0.8, 1.2, 2, 3, 5, 7, 9 und 14 Tagen. Danach, bis zum Alter von 49 Tagen, erfolgten die Messungen wöchentlich und anschliessend bis 90 Tage jede 2 Wochen.

Bei 3 Prismen wurden die Messuhren in festen Ständern montiert (s. Fig. 3a). Da nicht so viele Ständer und Messuhren zur Verfügung standen, wurde das Schwinden der Prismen durch eine bewegliche Messvorrichtung erfasst (s. Fig. 3b). Letzte Messungen wiesen bei einigen Prismen zuerst starke Streuung auf. Die bewegliche Messvorrichtung wurde danach für die weiteren Proben verbessert.

Während diesen Versuchen wurden die Prismen im Schwindraum bei 20°C und 70% r.F. gelagert.

3.1 Bezeichnung der Prismenproben

Die Bezeichnung der Prismenproben geht aus Tabelle 4 hervor.
Die Bezeichnungen haben folgende Bedeutung (Beispiel P 01 M 05):

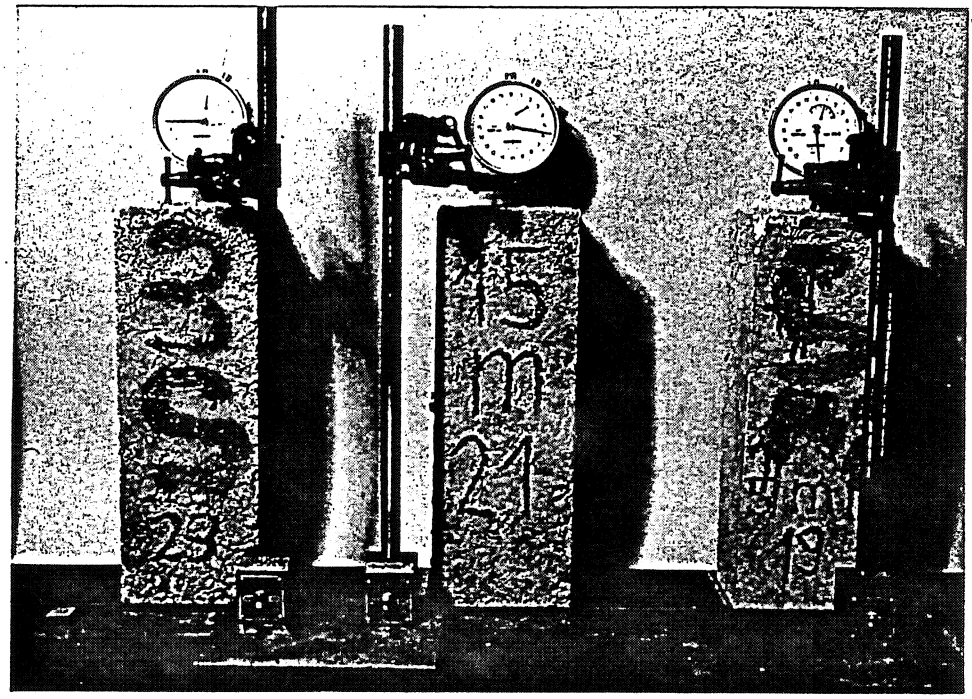
Erster Buchstabe:	P	= Prismenprobe
Zweite Zahlen:	00, 01, 30	= Prozentsatz des Zusatzmittels am Portlandzement
Dritter Buchstabe:	N	= Nullserie ohne Zusatzmittel
	M	= Zusatzmittel von MÜLLER AG
	S	= Zusatzmittel von SIKA AG
Vierte Zahl:	01 bis 24	= Nummer der Prismenproben.

Tabelle 4 **Bezeichnung der Prismenproben zur Messung des Schwindmasses**

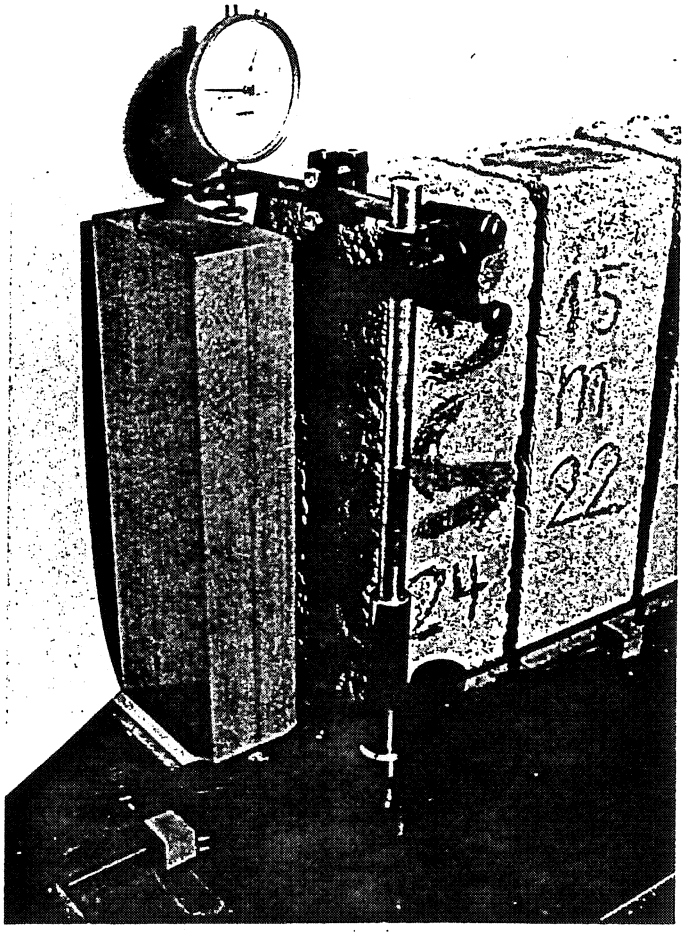
Bezeichnung der Prismenproben	Anzahl Prismen-proben	Zusatzmittel
P 00 N 01 - 03	3	Nullserie ohne Zusatzmittel
P 01 M 04 - 06	3	MÜLLER 01 %
P 05 M 07 - 09	3	MÜLLER 05 %
P 15 M 10 - 12	3	MÜLLER 15 %
P 10 S 13 - 15	3	SIKA 10 %
P 30 S 16 - 18	3	SIKA 30 %
P 05 M 19 - 20	2	MÜLLER 05 %
P 15 M 21 - 22	2	MÜLLER 15 %
P 30 S 23 - 24	2	SIKA 30 %
	Total 24	

Figur 3 : Schwindmessungen

a - Mit festen Messvorrichtungen



b - Mit beweglicher Messvorrichtung



3.2 Auswertung und Ergebnis

Die Messergebnisse sind in Fig. 5 und 6 "Schwindmass in Funktion der Zeit" dargestellt.

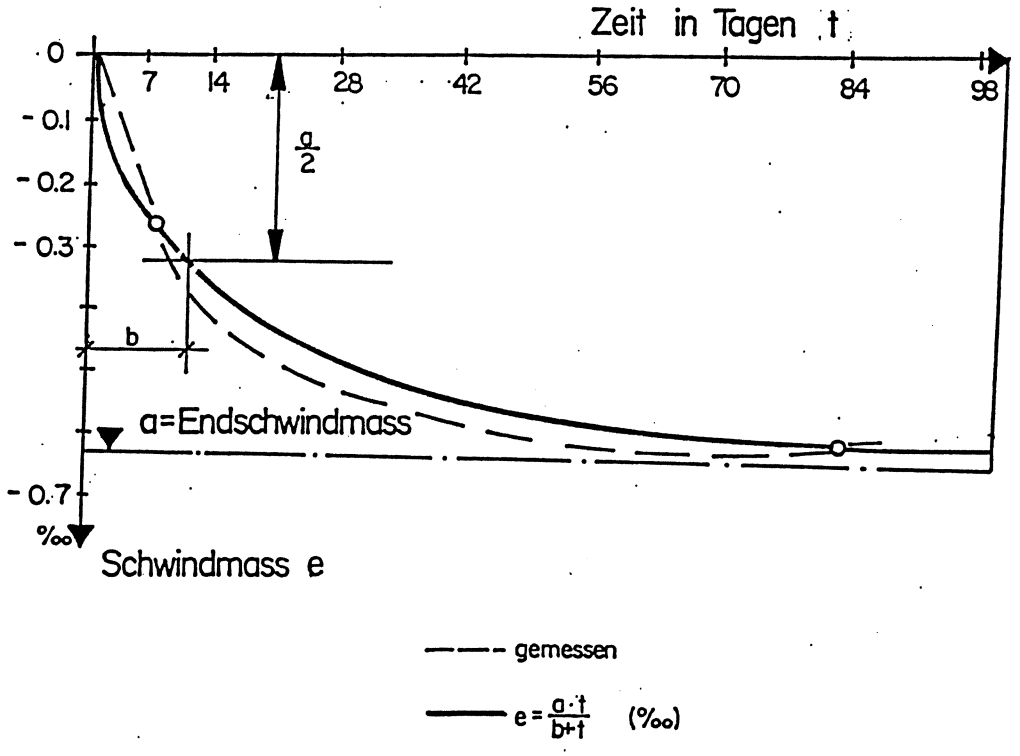
Als Schwindmass wird der Quotient "Verkürzung zur ursprünglichen Länge der Prismenprobe" (in %o) verstanden.

Die gemessenen Schwindkurven können mit einer einfachen Formel ausgedrückt werden. Sie lautet:

$$e = \frac{a\ t}{b + t}$$

e = Schwindmass zur Zeit t, in %o
t = Zeit in Tagen
a = Endschwindmass in %o (t = unendlich -> e = a)
b = die Zeit, bei der die Hälfte des Endschwindmasses erreicht ist (t = b -> e = 1/2 a).

Figur 4: Schwindkurve



Für die Auswertung der Schwindkurven wurde grundsätzlich von zwei gemessenen Wertpaaren für t = 7 und 84 Tage ausgegangen, um die zwei Koeffizienten, a und b, zu bestimmen. Die so ermittelten Formen sind in den Figuren angegeben. Die Koeffizienten a und b sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Das Schwindmass erreichte bereits im Alter von 84 Tagen im Minimum 85% und im Maximum 98% des Endschwindmasses.

Die Halbzeit b (Zeit für halbes Endschwindmass) beträgt 2 bis 8 Tage für Proben mit Zusatzmitteln (Ausnahme: P 10S13 16 Tage), während sie für die Nullserie ohne Zusatzmittel ca. 12 Tage dauert.

Offenbar schwinden die Prismenproben mit Zusatzmitteln schneller als diejenigen ohne Zusatzmittel.

Tabelle 5 Auswertung der gemessenen Schwindmasse

Schwindmass $e = \frac{a\,t}{b + t}$ in ‰, t in Tagen

Prismen-proben	Endschwind-mass a (‰)	Zeit für halbes Endschwindmass b (Tag)	Schwindmass bei t = 7 e7 (‰)	Schwindmass bei t = 84 e84 (‰)	Verhältnis e84/a (%)
#P 00 N 01	- 0.63	10.67	- 0.25	- 0.56	89
*P 00 N 03	- 0.53	5.42	- 0.30	- 0.50	94
#P 10 S 13	- 0.65	15.89	- 0.20	- 0.55	85
xP 30 S 23	- 0.89	6.79	- 0.45	- 0.82	92
>P 30 S 24	- 1.01	3.56	- 0.67	- 0.97	96
#P 01 M 04	- 0.77	8.40	- 0.35	- 0.70	91
*P 01 M 05	- 0.42	4.85	- 0.25	- 0.40	95
*P 01 M 06	- 0.47	4.00	- 0.30	- 0.45	96
*P 05 M 07	- 0.76	3.67	- 0.50	- 0.73	96
*P 05 M 08	- 0.68	3.54	- 0.45	- 0.65	96
*P 05 M 09	- 0.46	2.24	- 0.35	- 0.45	98
xP 05 M 19	- 1.09	3.17	- 0.75	- 1.05	96
>P 05 M 20	- 1.22	3.07	- 0.85	- 1.18	97
*P 15 M 10	- 0.93	3.04	- 0.65	- 0.90	97
*P 15 M 11	- 0.72	2.14	- 0.55	- 0.70	97
xP 15 M 21	- 1.36	2.09	- 1.05	- 1.33	98
>P 15 M 22	- 2.10	1.54	- 1.72	- 2.06	98

* Bei diesen Prismenproben handelt es sich um Proben der ersten Serie, die mit der ersten beweglichen Messvorrichtung gemessen wurden. Die Schwindkurven wiesen dabei Schwankungen auf und wurden für die Auswertung noch ausgeglichen.

> Mit der zweiten (verbesserten) beweglichen Messvorrichtung gemessen.

\# Feste Messvorrichtung, 1. Serie.

x Feste Messvorrichtung, 2. Serie

Fig. 5 Schwindmass in Funktion der Zeit
Proben mit dem Zusatzmittel der Firma SIKA,
als Vergleich eine Nullserie (ohne Zusatzmittel)

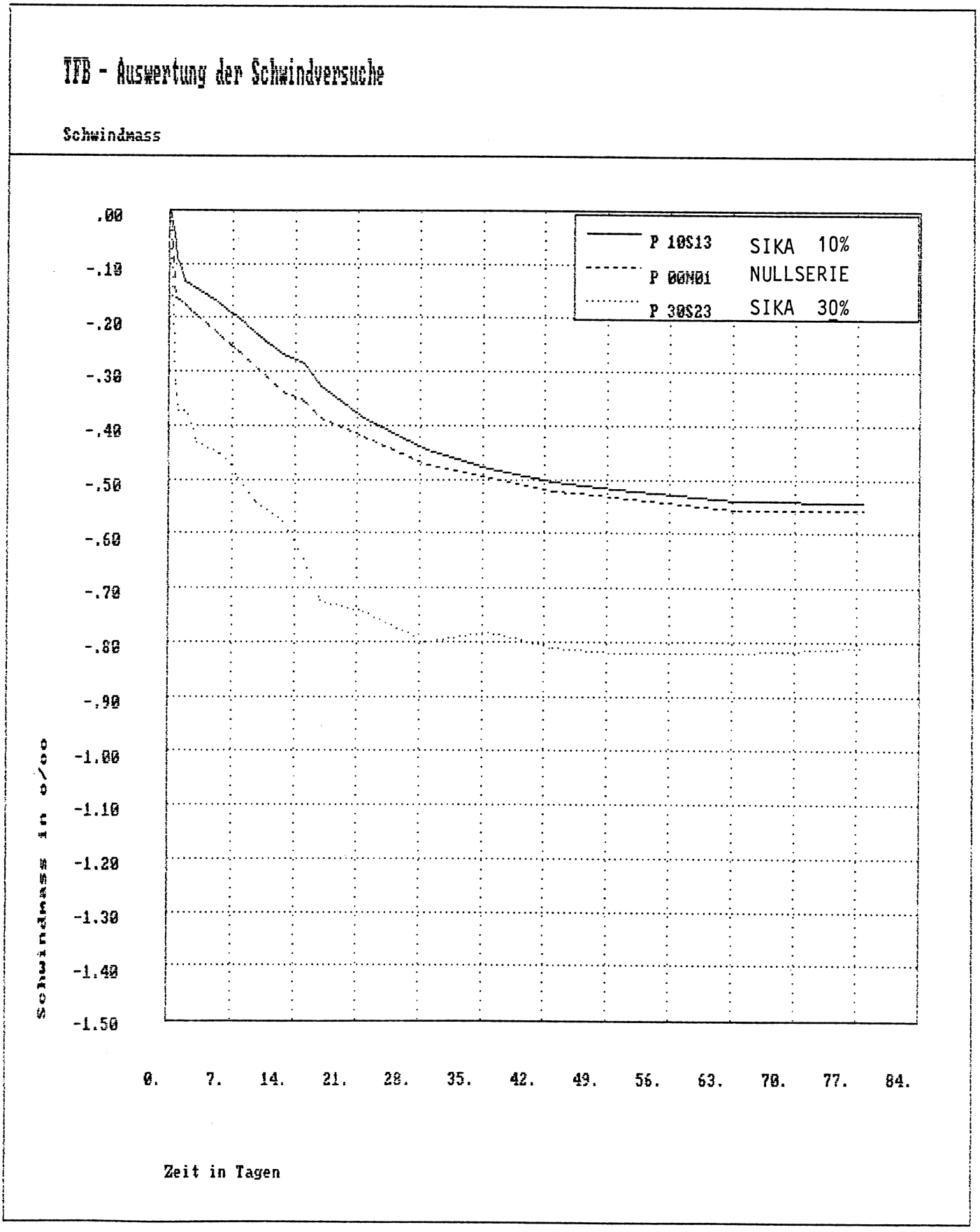
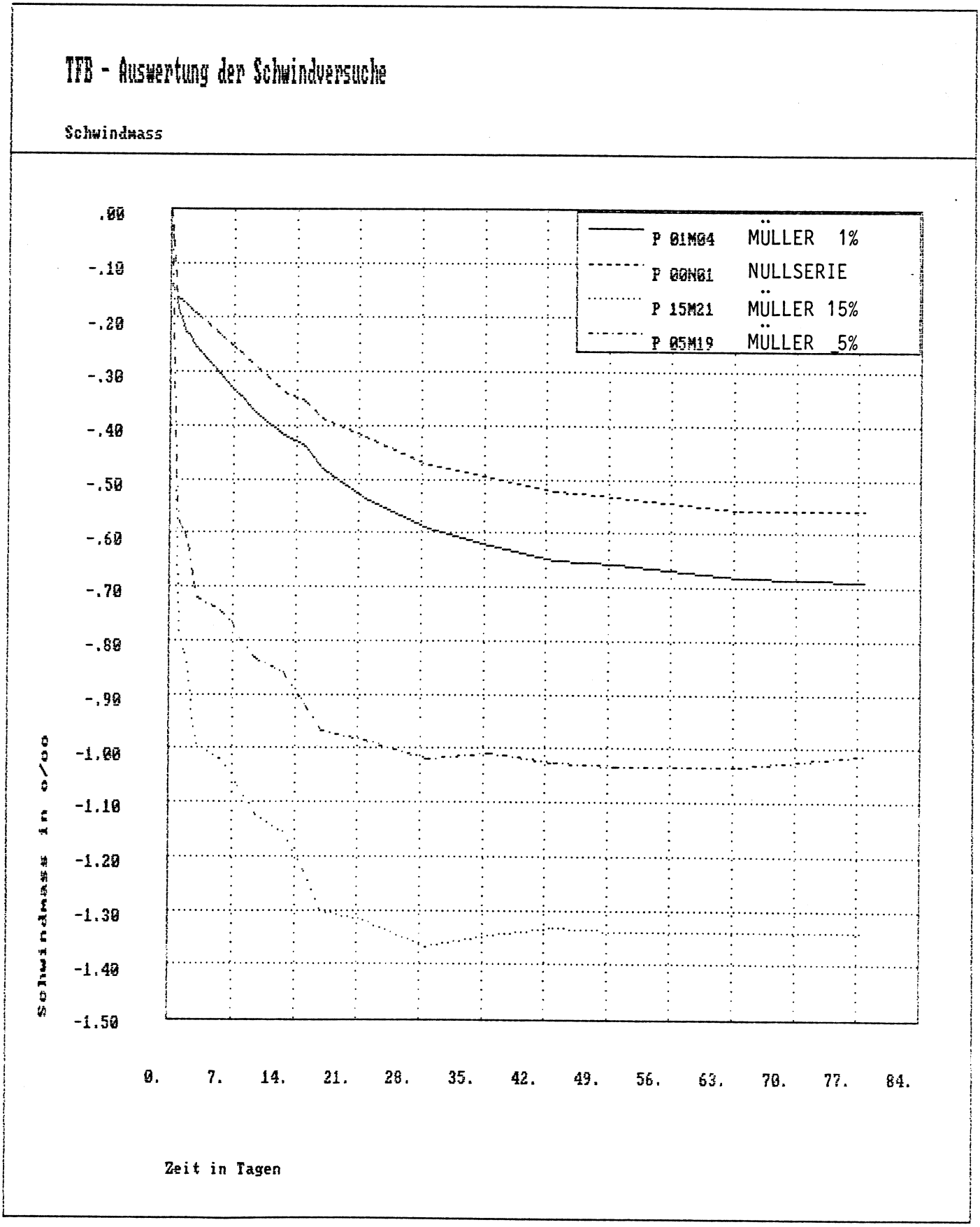


Fig. 6 Schwindmass in Funktion der Zeit
Proben mit dem Zusatzmittel der Firma MÜLLER,
als Vergleich eine Nullserie (ohne Zusatzmittel)



3.3 Beurteilung

Aus den vorstehenden Tabellen gehen folgende Resultate hervor:

- Das Endschwindmass der Nullserie (ohne Zusatzmittelprobe P 00 N 01) beträgt ca. - 0.63‰ (Tabelle 5).

- Die Endschwindmasse der Proben mit Zusatzmitteln sind zum Teil grösser als diejenige der Nullserie. **Diese Resultate sind überraschend und unerwartet** (Tabelle 5, Fig. 5/6).

- Das Schwindmass vergrössert sich bei einem bestimmten Zusatzmittel mit zunehmender Zusatzmittel-Dosierung. **Auch dies ist entgegen den Erwartungen**, hatte man doch angenommen, dass die Zusatzmittel eine Quellwirkung hätten und das Schwindmass bei höherer Zusatzmittel-Dosierung demzufolge merklich abnehmen würde. Das Gegenteil ist eingetreten.

- Vorläufig kann ein Endschwindmass von rund - 0.70‰ für die Proben ohne Zusatzmittel angenommen werden. Mit dem Zusatzmittel von SIKA (30%) liegt das Endschwindmass um rund - 1.00 ‰ (Tabelle 5). Die gleiche Grössenordnung ist beim Zusatzmittel von MÜLLER festgestellt worden (zwischen 0.42 und 1.36 ‰, Tabelle 5).

Zusammenfassend ergaben die Messungen folgende Endschwindmasse:

		Endschwindmass a in ‰
Ohne Zusatzmittel		
00% ->	P 00 N 01	- 0.63
	P 00 N 03	- 0.53
Mit dem Zusatzmittel von SIKA AG		
10% ->	P 10 S 13	- 0.65
30% ->	P 30 S 23	- 0.89
30% ->	P 30 S 24	- 1.01
Mit dem Zusatzmittel von MÜLLER AG		
1% ->	P 01 M 04	- 0.77
5% ->	P 05 M 07	- 0.76
	P 05 M 19	- 1.09
	P 05 M 20	- 1.22
15% ->	P 15 M 10	- 0.93
	P 15 M 11	- 0.72
	P 15 M 21	- 1.36
	P 15 M 22	- 2.10

Zum Vergleich der gemessenen Schwindmasse sind in Tabelle 6 Angaben aus der Literatur herangezogen worden. Es handelt sich dabei um Werte von Beton mit normalem Portlandzement, Spezialbeton mit Quellzusatzmitteln, Roller Compacted Concrete mit Zusatzmitteln und Zementstabilisierungen.

Die Messungen zeigen, dass das Endschwindmass der Nullserie (ohne Zusatzmittel, mit PC = 60 kg/m3 in siltigem Kiessand GM), zwischen 0.53 bis 0.63‰ liegt - somit in der gleichen Grössenordnung wie das Schwindmass des Betons mit normalem Portlandzement (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6 Angaben von Forschern aus dem In- und Ausland über Schwindmasse

1.	Beton mit normalem Portlandzement Alter bis ca. 2 Jahre. Aus dem Bericht LMC, ETHL [11] Prof. Dr. F.H. Wittmann und Dr. F. Alou	Schwindmass in ‰ - 0.40 bis - 0.60
2.	Beton mit normalem Portlandzement Alter bis ca. 3.5 Jahre. Aus Literatur [12]	Endschwindmass - 0.50 bis - 0.70
3.	Beton mit normalem Portlandzement Alter bis 14 Jahre. Angaben des Werkes Heidelberger Zement.	Endschwindmass - 0.45 bis - 0.80
4.	Spezialbeton mit Quellzusatzmitteln aus den USA [15]. Alter bis 250 Tage (H.G. Russell). Alter bis 90 Tage (Hoff und Mather)	Schwindmass - 0.20 bis - 0.40 - 0.35 bis - 0.55
5.	Roller Compacted Concrete mit Phosphor- gips als Zusatzmittel. Alter bis 4 Monate. Aus Literatur [13].	Schwindmass - 0.40 bis - 0.60
6.	Zementstabilisierungen aus bindigem Material, PC-Gehalt 6 %. Aus Literatur [1].	Endschwindmass - 2.0 bis - 2.5
7.	Zementstabilisierungen, aus Literatur [5]. . Ottawasand PC = 10 % . Feinsand PC = 10 % . Silt PC = 12 % . Clay PC = 12 %	Endschwindmass - 0.20 bis - 0.30 - 0.50 bis - 0.65 - 0.65 bis - 0.70 - 0.50 bis - 1.00

4. SCHLUSSFOLGERUNG

Als Zusatzmittel zum normalen Portlandzement wurden zwei Markenprodukte der Firmen MÜLLER und SIKA ausgewählt. Mit diesen und Kiessand aus Münchenstein/AG wurden Stabilisierungsproben hergestellt, bei welchen unter anderem das Schwindmass gemessen wurde.

Das Schwindmass der Stabilisierungsproben (mit einer Zementdosierung von 60 kg/m3 und ohne Zusatzmittel) liegt zwischen - 0.53 bis - 0.69‰. Das Schwindverhalten entspricht dem des normalen Betons.

Das auffallendste Ergebnis ist, dass das Schwindmass der Proben mit den Zusatzmitteln, bei gleichem Zement- und Wassergehalt, höher ist als die Proben ohne Zusatzmittel. Dies wurde nicht erwartet, und eine Erklärung dafür kann im Rahmen dieser Untersuchung nicht gegeben werden.

Spekulativ kann darauf hingewiesen werden, dass die untersuchten Zusatzmittel leicht plastifiziert wirkten und somit versuchsbedingt mehr Wasser "Abstossen" als die Nullproben.

Aufgrund dieser negativen Ergebnisse kann die Beimengung der Zusatzmittel zum normalen Zement zur Verbesserung des Schwindverhaltens von Stabilisierungen für die Praxis nicht empfohlen werden.

LITERATURVERZEICHNIS

[1] Sanan, Balk, George K.P.
Viscoelastic Shrinkage Stress in Soil-Cement Base
ISMF, December 1972.

[2] George K.P.
Cracking in Pavements Influenced by Viscoelastic Properties of Soil-Cement
HRR 263, 1969.

[3] George K.P.
Cracking in Cement-Treated Bases and Means for Minimizing it
HRR 255, 1968.

[4] Hobbs D.W.
Influence of Aggregate Restraint on the Shrinkage of Concrete
ACI Journal, September 1974.

[5] Nakayama H., Handy R.L.
Factors Influencing Shrinkage of Soil-Cement
HRR 86, 1965.

[6] Pretorius P.C., Monismith C.L. et all
Prediction of Shrinkage Stresses in Pavements Containing Soil-Cement Bases
HRR, 1969.

[7] George K.P.
Shrinkage Characteristics of Soil-Cement Mixtures
HRR 225, 1968.

[8] Barksdale R.D., Vergnolle R.R.
Expansive Cement Stabilization of Bases
HRr 255, 1968.

[9] Wang W.H
Use of Additives and Expansive Cements for Shrinkage Crack Control in Soil-Cement. A Riview.
HRR, 1973.

[10] George K.P.
Shrinkage Cracking of Soil-Cement Base: Theoretical and Modell Studies
HRR 351, 1971.

[11] Wittmann, F.H., Alou F.
Influence des Forts Dosages en Ciment sur le Retrait de Dessiccation du Béton
Laboratoire des Matériaux de Construction, ETHL, Octobre 1982.

[12] Wittmann F.H., Alou F.
Etude Expérimentale du Retrait du Béton
Materials and Structure, 20. 323-333, 1987.

[13] Nanni A., Chang W.F.
Phosphogypsum - Based Roller Compacted Concrete
Concrete International, November 1989.

[14] Biczok
Betonkorrosion, Betonschutz
Bauverlag GmbH, Wiesbaden.

[15] Expansive Cement
Cedric Willson Symposium
Publication SP-64, American Concrete Institute.

[16] Expansive Cement Concretes
Klein Symposium
Publikation SP-38, American Concrete Institute.

BAUDEPARTEMENT
DES KANTONS AARGAU
ABTEILUNG: TIEFBAU
5000 AARAU

Nationalstrasse N3/05
Bodenstabilisierung mit Zement
Eignungsprüfung nach SN 640.509a
Material "Münchenstein"

Dossier-Nr. 1989
Bericht-Nr. 5382/B
25. April 1989

1. AUFTRAG

Das Baudepartement des Kantons Aargau, Abteilung Tiefbau, Aarau, beauftragte die Betonstrassen AG (BeAG) in Wildegg, das Material "Münchenstein", aufbereitet in Frick (ab Anlage Eberhard) auf Stabilisierbarkeit mit Zement zu untersuchen.

2. ENTNAHME

Am 1. November 1988 wurde durch die BeAG Proben aus dem aufbereiteten Material entnommen. Bei diesen Proben handelt es sich um siltigen Kies der USCS-Klasse GM.
Vergleicht man diese Korngrössenverteilung mit Untersuchungen vom Kantonalen Tiefbaulabor, so stellt man eine grosse Uebereinstimmung fest.
Der Anteil < 0.125 mm beträgt ca. 9 % (siehe Beilage 1 und 2).

3. STABILISIERUNGSPRUEFUNG

Die Ergebnisse der Stabilisierungsprüfung durchgeführt nach SN 640.509a, sind in Beilage 3 angegeben.
Die Prüfung wurde bewusst mit einer minimalen Zementdosierung vorgenommen. Für die Berechnung der Bindemitteldosierung wird ein Labor-Bindemittelgehalt von $\sim$ 3.8 % festgelegt (Festigkeit nach Frost massgebend).

Die Anforderung des Massenverlustes nach der Frostauftauprüfung (max. 14 %) wird bei dieser Dosierung nicht überschritten (Massenverlust bei 3.8 % PC ca. 6 %).

4. VERDICHTUNGSWERTE UND BINDEMITTELDOSIERUNG

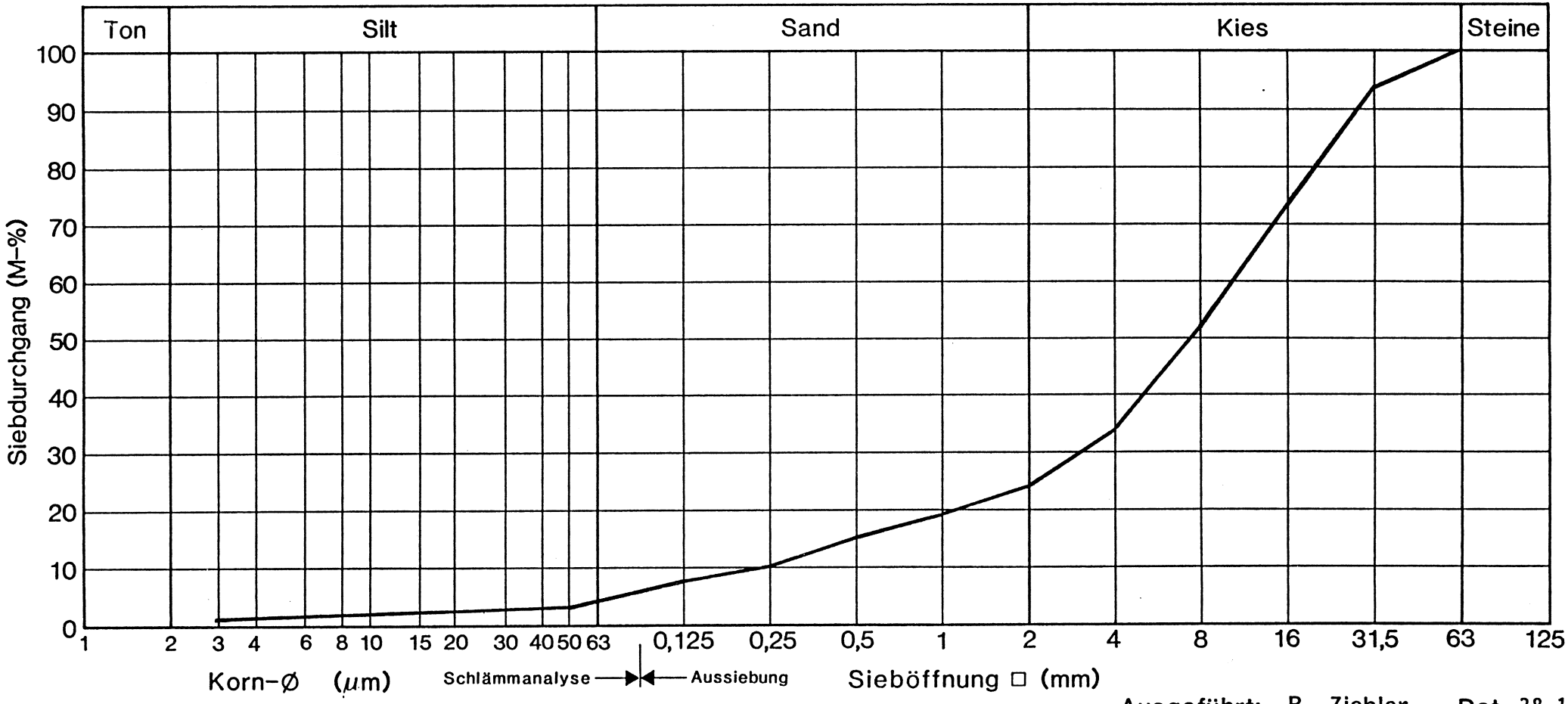
Die Anforderungen für die Feldverhältnisse sind in Beilage 4 angegeben.
Es wird eine Zementdosierung von 60 kg/m3 vorgeschlagen. In einem Versuchsfeld (Probelauf) sind die vorgegebenen Verdichtungswerte unter den gegebenen Baustellenverhältnissen zu überprüfen.

BETONSTRASSEN AG
Zentrallabor

A. van Egmond

TFB/BeAG 5103 Wildegg	**Korngrössenverteilung**	U-Nr.	Doss.-Nr. 1935

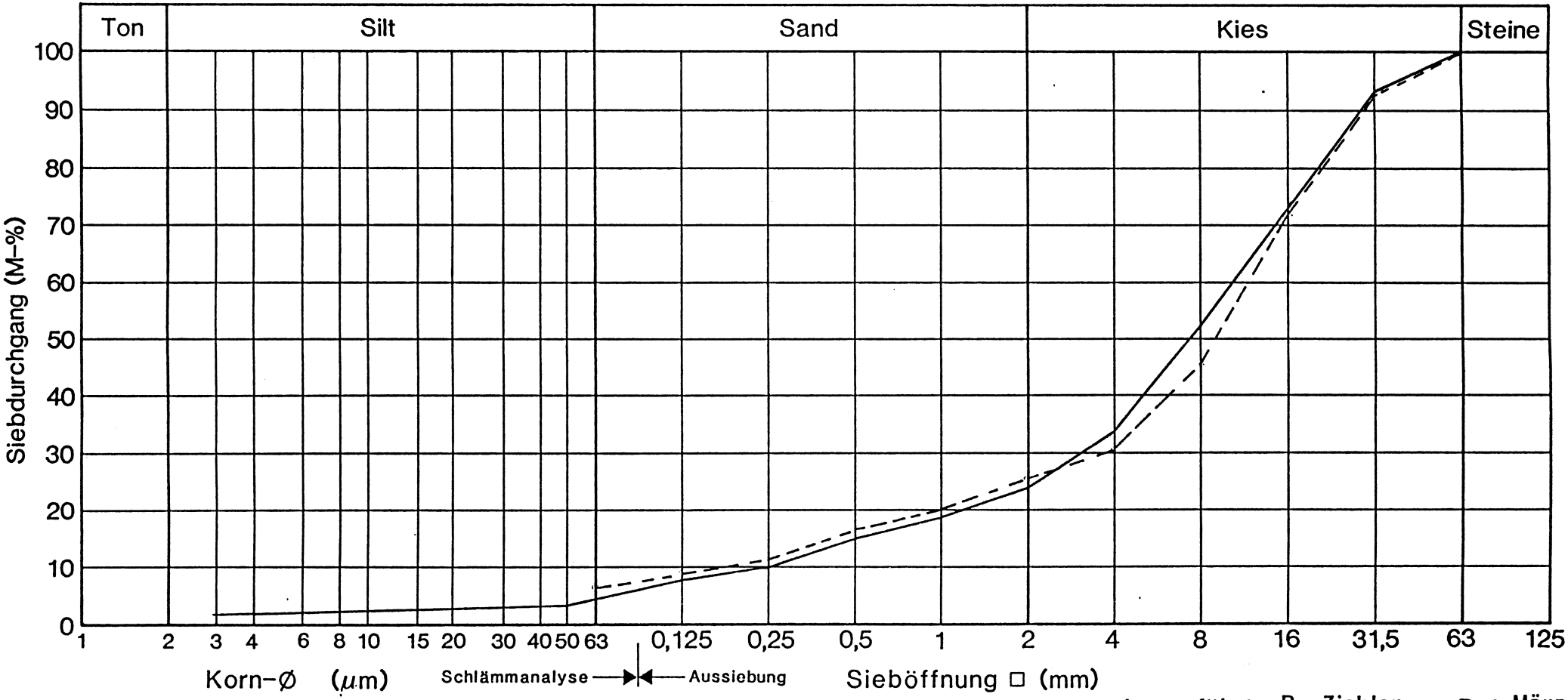
Herkunft	Signatur	Probe Nr.	Labor Nr.	USCS	ρ t · m^{-3}	Wassergehalt (%) w_n	w_L	w_p	I_p	Bezeichnung
N3/05 AG Frick-Effingen Material Münchenstein	——		6521	GM			-	-	-	Stabi.-Material ab Band
Eing.-Datum: 1.11.1988										



Ausgeführt: R. Ziehler Dat. 28.11.88

TFB/BeAG 5103 Wildegg	**Korngrössenverteilung**	U-Nr.	Doss.-Nr. 1935

Herkunft	Signatur	Probe Nr.	Labor Nr.	USCS	ρ t·m^{-3}	Wassergehalt (%) w_n	w_L	w_p	Ip	Bezeichnung
N3/05 AG Frick-Effingen Material Münchenstein	——		6521	GM						Stabi.-Mat. ab Band
	----									Mittelwert Aussieb. KTA
Eing.-Datum: 1.11.1988										



Ausgeführt: R. Ziehler Dat. März 1989

Betonstrassen AG 5103 Wildegg	STABILISIERUNG MIT ZEMENT FELDKONTROLLWERTE	Instr. Nr. 6 Dossier : 1934

Baustelle : N3/05 AG Frick-Effingen

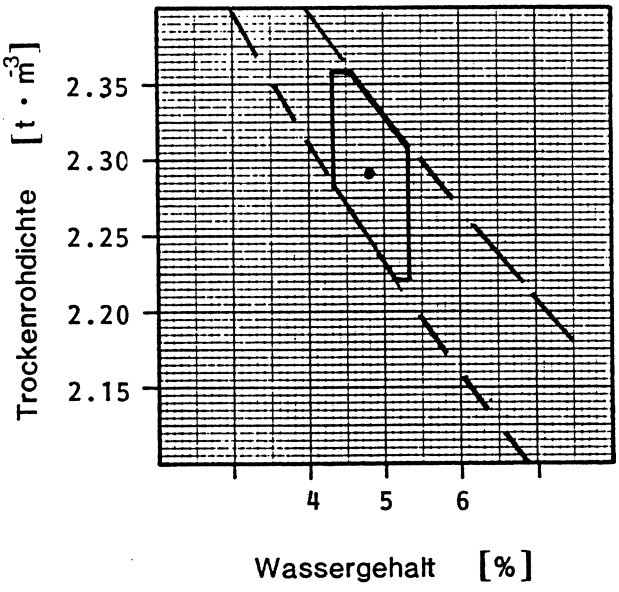
Material : Münchenstein

Anteil < 16mm	Labor Nr.			6521
	Trockenrohdichte	ρd_L	$[t \cdot m^{-3}]$	2.22
	Wassergehalt	W_L	[%]	6.0
	Anteil < 16mm	(1 – P)	[%]	73
Gesamtfraktion	Maximalkorn	Ø	[mm]	45
	Trockenrohdichte	ρd_F	$[t \cdot m^{-3}]$	2.29
	Wassergehalt	W_F	[%]	4.8
	Zementdosierung	pc	[%]	2.6
		PC	$[kg \cdot m^{-3}]$	60

Zulässiger Streubereich der Gesamtfraktion :

Variationskoeffizienten : $CV\rho_d$: 3%

CV_w : 10%

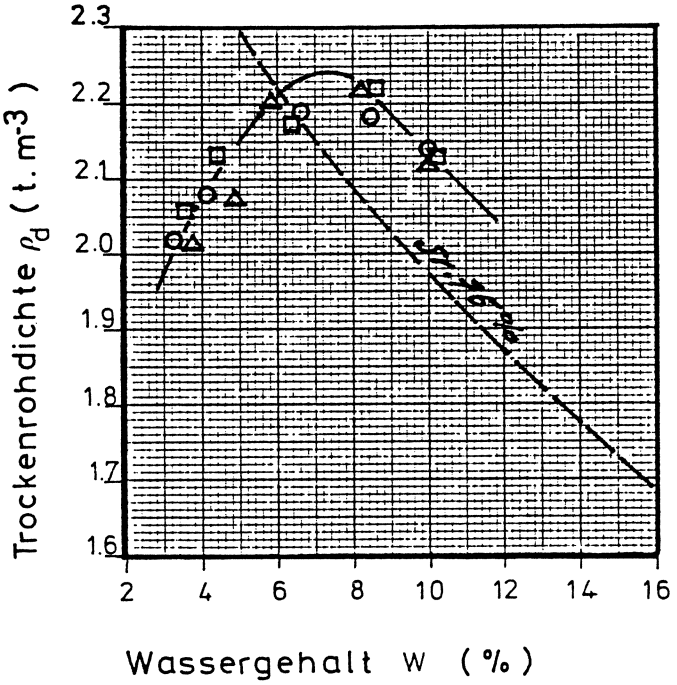


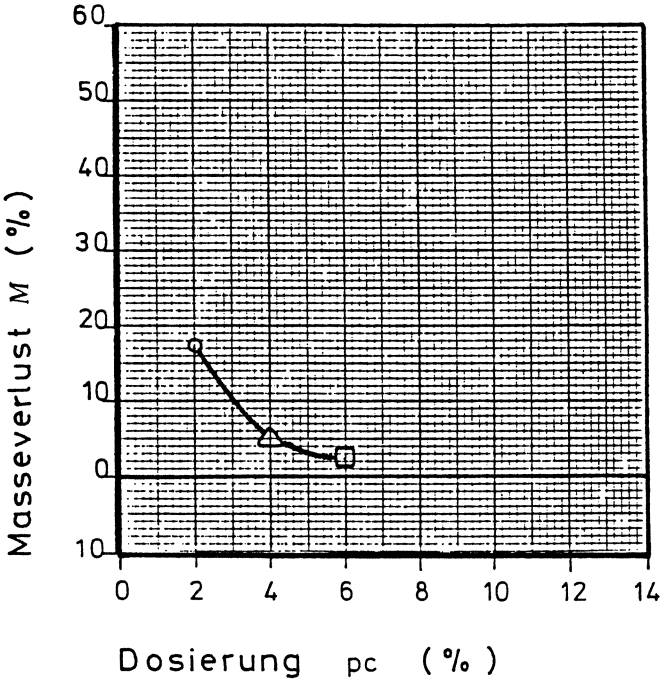
Bemerkungen :

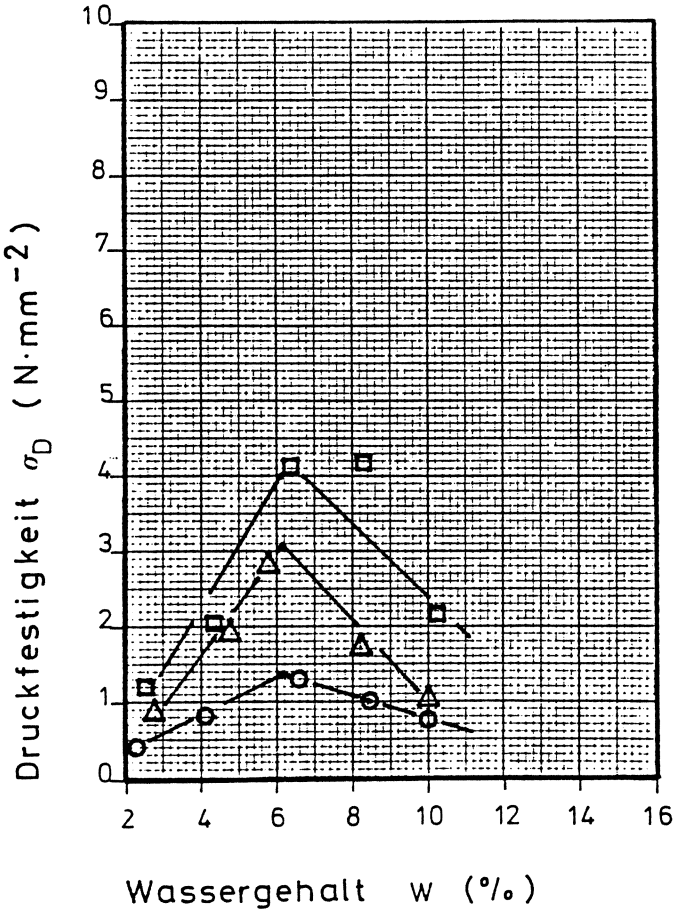
WILDEGG, 25.4.1989

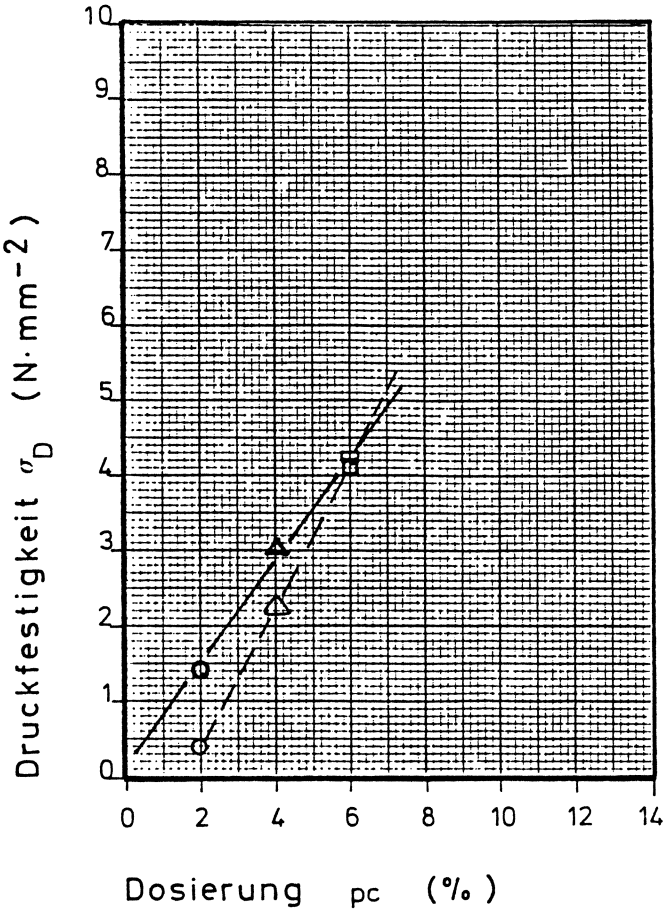
ZENTRALLABOR
A. van Egmond

BETONSTRASSEN AG 5103 WILDEGG	Bodenstabilisierung mit Zement SN 640 509a	BEILAGE : DOSSIER : 1934
ZEMENT: Jura	DOSIERUNG: ○ 2 %, △ 4 %, □ 6 %.	LABOR NR.: 6521



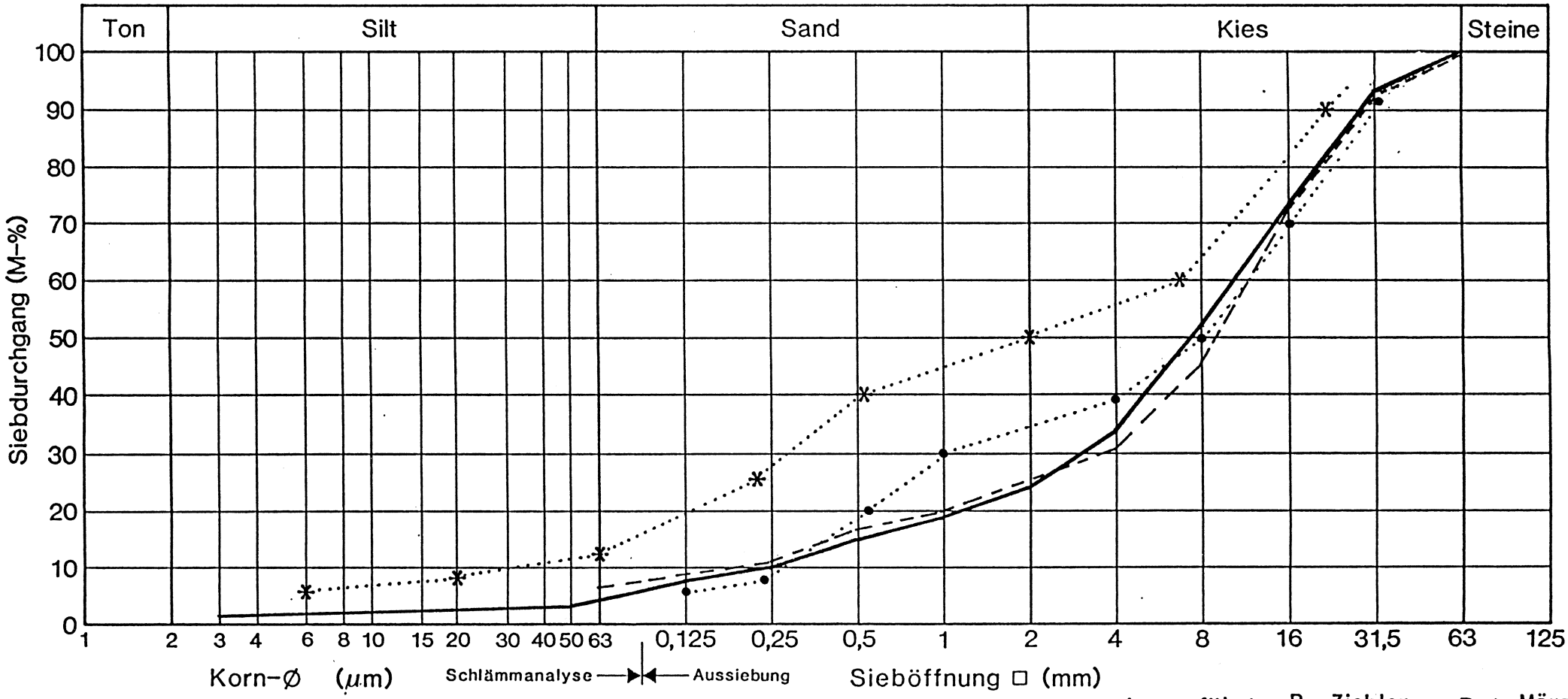






TFB/BeAG 5103 Wildegg	**Korngrössenverteilung**	U-Nr.	Doss.-Nr. 1935

Herkunft	Signatur	Probe Nr.	Labor Nr.	USCS	ρ t · m^{-3}	Wassergehalt (%) w_n	w_L	w_p	I_p	Bezeichnung
N3/05 AG Frick-Effingen Material Münchenstein	———		6521	GM						Stabi.-Material ab Band
	- - - -									Mittelwert Aussieb. KTA
Eing.-Datum: 1.11.1988										



Ausgeführt: R. Ziehler Dat. März 198