

Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement
Bundesamt für Strassenbau

Département fédéral des transports, des communications et de
l'énergie Office fédéral des routes

Dipartimento federale dei trasporti, delle comunicazioni e delle energie
Ufficio federale delle strade

Einwirkung von Frost / Tausalz auf den zementstabilisierten Oberbau in Rissnähe

Ingenieurbureau Heierli AG, Zürich

F. L. Yang, dipl. Ing. ETH

1. Dezember 1995

Zusammenfassung

Aus der Transportpiste bei einer Aufbereitungsanlage am Limmattalerkreuz (N1/N20) wurden Proben der Zementstabilisierung mittels Kernbohrung entnommen. Sie wurden anschliessend bei verschiedenen Labors zum Teil gemäss geltenden Normen, SN 640 509a und SIA 162/1, Frost / Tau-Prüfungen mit 3%-iger Salzlösung und mit reinem Wasser unterzogen. Die Proben wiesen ein Alter von 9 Jahren auf. Während sie die Frost / Tau-Zyklen mit reinem Wasser problemlos bestanden, widerstanden sie dem Test mit 3%-iger Salzlösung nicht. Es zeigte sich, dass Salzwasser bei mehrmaligem Gefrieren die Zementstabilisierung viel mehr schädigt als reines Wasser. Die genauen Gründe bzw. Mechanismen dafür sind bis heute noch nicht genau bekannt. Es handelt sich nicht um die Auswirkung eines Auftau-Temperaturchocks.

Parallel dazu wurden Probekörper während 14 Tagen abwechselnd in 3%-iger Salzlösung und bei Luft unter Zimmertemperatur gelagert. Dabei wurden die Gewichtsverluste durch Bürsten periodisch bestimmt. Die gleiche Prüfung erfolgte ebenfalls an den mit 3%-iger Salzlösung gesättigten und im Boden eingegrabenen Probekörpern. Beide Prüfungen ergaben sehr kleine Gewichtsverluste von $< 0.3\%$. Daraus kann geschlossen werden, dass Salzwasser bei Zimmertemperatur die Zementstabilisierung nicht schädigt. Auf der Transportpiste wurde in den Winterperioden 1990-1994 Kochsalz bei den Rissen gestreut. Damit wird angenommen, dass die Salzlösung die Oberflächen der Risse „besalzen“ kann. Sollte die Salzlösung die Oberflächen der Risse aus Zementstabilisierung schädigen, so kann dies durch die Muldenmessung mit dem Benkelmanbalken festgestellt werden. Als Referenz steht die Muldenmessung von 1985 zur Verfügung. Die Folgemessungen von 1991, 1994 und 1995 zeigen, dass die gemittelten Maximaldeflektionen im Felde (ohne Salzbelastung) von 1985 bis 1995 keine signifikanten Zunahmen aufweisen. Sie sind absolut gesehen klein und liegen unter 25 ($1/100$ mm) bei einer Messgenauigkeit von 5 ($1/100$ mm) des Gerätes. Die gemittelten Maximaldeflektionen bei den Rissen (mit Salzbelastung) nehmen seit 1991 nicht systematisch zu. Bei einigen Riss-Messpunkten ist allerdings eine Verschlechterung bzw. Vergrösserung der Maximaldeflektion um 10 bis 23 ($1/100$ mm) gemessen worden. Obwohl in den vergangenen 5 Jahren keine strengen Winter zu verzeichnen waren, könnte die Verschlechterung der Riss-Tragfähigkeit auf die Einwirkung von Frost / Tausalz zurückgeführt werden. Diese Aussage ist aber nicht sicher, da auch eine Durchnässung des Untergrundes bei den Rissen zu der Vergrösserung der Maximaldeflektion geführt haben könnte.

Mittels Muldenmessung wurden erwartungsgemäss Deflektionssprünge beim Ueberfahren der Risse gemessen. Der Deflektionssprung stellt ein Mass der Kraftübertragungsfähigkeit eines Risses dar. Je grösser er ist, desto lockerer ist die Rissfuge und desto schwächer ist die Kraftübertragung.

Als vorbeugende Massnahme zum Abdichten wird der Einbau einer SAMI-Schicht (Stress Absorbing Membrane Interlayer) über der Zementstabilisierung empfohlen, während als heilende Massnahme sofortiges Reparieren von Rissen (dicht machen) für die Praxis empfohlen wird.

Summary

From the service road located near a mix-plant and gravel deposit adjacent to the freeway junction Limmattal (N1/N20), specimens were taken of the soil cement subbase. The specimens obtained by boring and were then laboratory tested against part of the Standard Specifications SN 640 509a and SIA 162/1 using freeze-thaw-cycles of a 3% NaCl-solution and using water. The age of the cement stabilization which was tested was 9 years. The specimens passed the test using water without problem, but they failed in the test using the 3% salt water solution. This illustrated how salt water tends to damage the cement stabilization much more than water in instances of repeated freezing-thawing. The precise reasons or mechanisms are today as yet unknown. Nevertheless it is surmised that the damage to the specimens is not an effect of a temperature shock.

Concurrent to the freeze-thaw-tests, other specimens were alternatively submerged in a 3% salt water solution and stored in air at room temperature for a period of 14 days. Other samples were first saturated with a 3% salt water solution and then buried in the ground. At the conclusion of the tests, the loss of weight was determined by brushing. The weight losses amounted to merely 0.3%. This clearly showed that salt water does not damage cement stabilization at room temperature. In a further test, salt was scattered by the cracks on the service road during the wintertime. By doing this, it was assumed that the salt water can "salt" the cement stabilization surfaces. If salt water caused damage to the surfaces, this damage could then be ascertained by use of the deflection measurement with a Benkelman beam. For this test, the measurement results from 1985 were available for use as reference.

The measurements in 1991, 1994 and 1995 showed that the average maximum deflections of the fields between two cracks without salt attack had no significant increase from 1985 to 1995. The deflections seen are small and are less than 25 (1/100 mm) even with accuracy of 5 (1/100 mm) by Benkelman beam. The average maximum deflections of the cracks with salt attack did not systematically increase since 1990. Nevertheless, an increase in deflection of about 10 to 23 (1/100 mm) at some crack measuring points was recorded. Although there had been no severe winters in the past five years, the deterioration of the crack strength could be traced back to the effect of freeze-thaw with salt water. However, this assessment is not yet validated since a soaking of the roadbed near the cracks could also have caused the deflection increases.

Using the deflection measurement with the Benkelman beam, deflection jumps were measured by rolling over the cracks. The deflection jump presented a measure of force transfer ability across a specific crack: the greater the jump, the looser the crack, and therefore the weaker the force transfer capability.

As a preventive measure, a SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer) for sealing placed above the cement stabilization is recommended. As a temporary measure, the immediate sealing of pavement cracks is urgently recommended.

Résumé

Des sondages par carottage ont été effectués sur un tronçon de piste de chantier stabilisée au ciment 9 ans auparavant, située près des installations de préparation de gravier, au carrefour "Limmattal" (croisement de la N1 et de la N20, au Nord de Zurich). Les échantillons prélevés ont été soumis auprès de divers laboratoires aux essais de gel/sel selon les normes SN 640'509a et SIA 162/1 en employant une solution d'eau contenant 3% de NaCl. Tandis que les cycles de gel/dégel avec de l'eau non salée n'ont pas provoqué de détérioration visible, les échantillons n'ont pas résisté aux cycles gel/dégel avec une solution salée à 3 %. Après de nombreux cycles d'essais gel/dégel, l'eau salée a dégradé beaucoup plus la stabilisation au ciment que l'eau sans sel. Les mécanismes exacts ne sont pas encore suffisamment connus mais il ne s'agit pas du choc de température lors du dégel causé par le sel.

D'autres échantillons ont été testés en les exposant, à la température de 20°, à des cycles alternés de 14 jours à l'eau salée à 3 % et à l'air. Les pertes de poids ont été mesurées par brossage. Le même essai a été effectué sur des éprouvettes saturées d'eau salée à 3 % et enterrées. Ces deux essais n'ont montré que de très faibles pertes de poids. L'eau salée, donc, ne détruit pas la stabilisation au ciment à température ambiante, c'est-à-dire sans gel.

Sur la piste de chantier du sel a été répandu pendant les périodes hivernales des années 1990 - 1994 sur les fissures présentes, avec l'intention d'y faire pénétrer de l'eau salée et de les imprégner de sel. En cas de dégradation par le sel de la stabilisation au ciment au droit des fissures, le phénomène devrait pouvoir être mis en évidence par la mesure de cuvettes de déflexion de la route à l'aide de la poutre de Benkelman. Comme référence, il a été utilisé les mesures de déflexion de l'année 1985, alors que le sel n'avait pas encore été répandu. Les mesures des années 1991, 1994 et 1995 ont montré que les moyennes des déflexions maximales **entre fissures** (c'est-à-dire sans pénétration de sel) n'ont pas augmenté de manière notable entre 1985 et 1995. Elles sont faibles, inférieures à 25 centièmes de millimètre (la précision des mesures étant de plus ou moins 5 centièmes). Les valeurs moyennes de déflexions maximales à **proximité des fissures "salées"** n'ont pas augmenté systématiquement depuis 1991. Il existe cependant quelques points de mesure près des fissures où une détérioration, c'est-à-dire une augmentation significative des déflexions maximales (de 10 à 23 centièmes de millimètre) s'est manifestée.

Bien que les cinq derniers hivers n'aient pas été rigoureux, on peut quand même conclure que la perte de résistance des zones fissurées a été causée, au moins partiellement, par l'effet du gel en présence d'eau salée. Cette conclusion n'est pas définitive parce que la capacité portante du sol de fondation est susceptible d'avoir diminué sous l'influence des infiltrations d'eau à travers les fissures.

Les mesures de déflexion ont montré - comme prévu - des "sauts" lors du passage d'une charge d'un côté de la fissure à l'autre. L'importance des sauts donne la mesure de la résistance résiduelle aux efforts tranchants entre les deux lèvres de la fissure. Plus grand est le saut, plus lâche sont les liaisons entre les lèvres de la fissure et plus faible est la résistance aux efforts de cisaillement.

Pour prévenir la détérioration des couches stabilisées à proximité de fissures, il est recommandé l'application sur leur surface d'un enduit SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer), enduit qui a pour tâche d'empêcher la pénétration d'eau. Sur les tronçons sans SAMI, la réparation rapide des fissures dès leur apparition serait le meilleur moyen pour regagner l'étanchéité.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	7
1.1	Rückblick, Vorgeschichte	7
1.2	Auftrag	7
2.	Durchgeführte Arbeiten	8
2.1	Laboruntersuchungen	8
2.1.1	Durch das LPM Baustoffprüfinstitut, Beinwil am See	8
2.1.2	Durch die EMPA	8
2.1.3	Durch das Ingenieurbureau Heierli	8
2.2	Felduntersuchungen	9
2.2.1	Versuchsfelder	9
2.2.2	Streuung des Kochsalzes	12
2.2.3	Muldenmessung	12
2.2.4	Auswertung der Muldenmessung	16
3	Ergebnisse und Beurteilung	18
3.1	Laboruntersuchungen	18
3.1.1	Durch das LPM Baustoffprüfinstitut	18
3.1.2	Durch die EMPA	19
3.1.3	Durch das Ingenieurbureau Heierli	21
3.1.4	Gesamtbeurteilung der Laboruntersuchungen	21
3.2	Felduntersuchungen	23
3.2.2	Maximaldeflektionen im Felde	23
3.2.3	Maximaldeflektionen bei den Rissen	27
3.2.4	Deflektionssprünge bei den Rissen	32
3.2.5	Untergrundtragfähigkeit und E-Modul des Oberbaues	40
3.2.6	Ausgefallene Mulden bei den Rissen	41

4 Schlussfolgerung 47

Anhänge

Anhang 1	Gemessene Mulden Messung 1991	50
Anhang 2	Gemessene Mulden Messung 1994	57
Anhang 3	Gemessene Mulden Messung 1995	64
Anhang 4	Auswertung für k-Wert und E-Modul	71

1 Einleitung

1.1 Rückblick, Vorgeschichte

Anfang 1980 wurde bei einer Aufbereitungsanlage am Limmattalerkreuz (N1/N20, ZH) eine Versuchspiste mit zement-stabilisiertem Oberbau für Kie-
stransporte erstellt, welche während 15 Jahren für zwei aufeinander folgen-
de VSS-Forschungsarbeiten über das Verhalten von durchgeschlagenen
Schwindrissen diente.

Die erste Forschungsarbeit mit dem Thema: „Einfluss von Rissen auf die
Tragfähigkeit des zementstabilisierten Oberbaues“ wurde bereits 1987 ab-
geschlossen (Auftrag Nr. 26/80; Bericht Nr. 130). Darin wurden Deflektions-
mulden mit Hilfe des Benkelmanbalkens auf der Versuchspiste, insbesonde-
re bei den Rissen, periodisch gemessen. Daraus konnte die Entwicklung des
E-Moduls und der Deflektionen des Oberbaues verfolgt werden.

Von 1980 bis 1986 wurde die Versuchspiste sehr stark mit schweren Lastwa-
gen (Achslasten bis 240 kN) befahren. Der äquivalente Verkehr erreichte die 2
Millionen Grenze, was einen täglichen Wert von $TF = 930$ (Verkehrslastklasse
T4) ergab.

Beim Abschluss der ersten Forschungsarbeit war die Versuchspiste intakt
und tragfähig. Der „E-Modul“ des Oberbaues lag im „Feld“ (d.h. ohne Risse)
rund doppelt so hoch wie in Rissnähe. Der Belag wies bei den Rissufern kei-
ne Ausbrüche auf. Es hatten in der Gegend der Risse keine weiteren, pro-
gressiven Brüche stattgefunden. Die Deflektionen waren gering und betru-
gen weniger als 25 (1/100 Millimeter). Dies rührte zum Teil von dem relativ
hohen k-Wert des Untergrundes her.

Die Risse in der Zementstabilisierung beeinflussten die Tragfähigkeit dersel-
ben nur mässig, da die Verzahnung (Kraftübertragung) offensichtlich gut
war.

Nach dem Abschluss der ersten Forschungsarbeit über die Tragfähigkeit
des zementstabilisierten Oberbaues folgte die vorliegende Untersuchung über
Tausalzschäden in Rissnähe auf der gleichen Versuchspiste.

1.2 Auftrag

Mit Schreiben vom 1. Dezember 1987 erteilte das Eidgenössische Verkehrs-
und Energiewirtschaftsdepartement dem Ingenieurbureau Heierli, Zürich den
Auftrag, die Einwirkung von Frost-Tausalz auf den zementstabilisierten
Oberbau in Rissnähe zu untersuchen.

Der Forschungsauftrag trägt die Nummer 06/88 und stellt die Fortsetzung
des vorangehenden Auftrages, Nr. 26/80 dar. Beide wurden durch die Fach-
kommission 272 der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)
begleitet.

2. Durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen des vorliegenden Auftrages wurden Untersuchungen in verschiedenen Labors und im Felde auf der Versuchspiste durchgeführt.

Aus der Versuchspiste wurden 1989 siebzehn Proben der Zementstabilisierung, (Durchmesser 150 mm und Länge 250 bis 300 mm), mittels Kernbohrung entnommen. Die Proben wurden in drei Labors auf die Wirkung von Frost-Tausalz (Kochsalz, NaCl) auf die Zementstabilisierung untersucht.

Im Felde wurde während der Winterperioden Kochsalz bei den Rissen gestreut und Muldenmessungen mit dem Benkelmanbalken insbesondere bei den Rissen durchgeführt.

2.1 Laboruntersuchungen

2.1.1 Durch das LPM Baustoffprüfinstitut, Beinwil am See

Mit drei Proben der Zementstabilisierung hat das LPM Baustoffprüfinstitut folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Bestimmung des Gefügetyps der Zementstabilisierung
- Frost / Tau-Prüfung mit 3%-iger Salzlösung in Anlehnung an die Norm SIA 162/1, Prüfung Nr. 9 (für Beton).

2.1.2 Durch die EMPA

Aus neun Proben der Zementstabilisierung hat die EMPA folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Frost / Tau-Prüfung nach VSS-Norm SN 640 509a (für Stabilisierung) sowohl mit Wasser als auch mit 3%-iger Salzlösung.
- Frost / Tau-Prüfung nach Norm SIA 162/1, Prüfung Nr. 9 (für Beton) sowohl mit Wasser als auch mit 3%-iger Salzlösung.
- Frostbeständigkeitsprüfung nach Methode „Kritischer Sättigungsgrad“ gemäss EMPA-Richtlinien.
- Bestimmung der Druckfestigkeit.

2.1.3 Durch das Ingenieurbureau Heierli

Mit vier Proben der Zementstabilisierung wurden im Labor des Büros Heierli folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Wechselbad von Proben der Zementstabilisierung in Luft und 3%-iger Salzlösung
- Eingraben von gesalzenen Proben der Zementstabilisierung im Boden.
- Bestimmung der Gewichtsverluste durch Bürsten gemäss SN 640 509a
- Bestimmung der Druckfestigkeit (beim Tiefbauamt des Kantons Zürich).

2.2 Felduntersuchungen

Im Winter wurde Kochsalz bei den Rissen gestreut.

Es wurden 1991, 1994 und 1995 drei Serien der Muldenmessung im Felde und bei den Rissen durchgeführt.

2.2.1 Versuchsfelder

Schichtdicken

Die Versuchsfelder ist 182 m lang und in vier Felder von 40 bis 50 m unterteilt (Abb. 2.1). Die Pistenbreite beträgt 8 m. Die effektiven Schichtdicken der Felder gehen aus der folgenden Tabelle hervor:

Tabelle 2.1 Schichtdicken der Versuchsfelder

Feld Nr.		Feld 4	Feld 3	Feld 2	Feld 1
Feldlänge	m	40	42	50	50
TA 25 us	mm	71	71	70	64
Zementstabilisierung, PC 70kg/m ³	mm	248	307	276	326
Totaldicke	mm	319	378	346	390

Risse

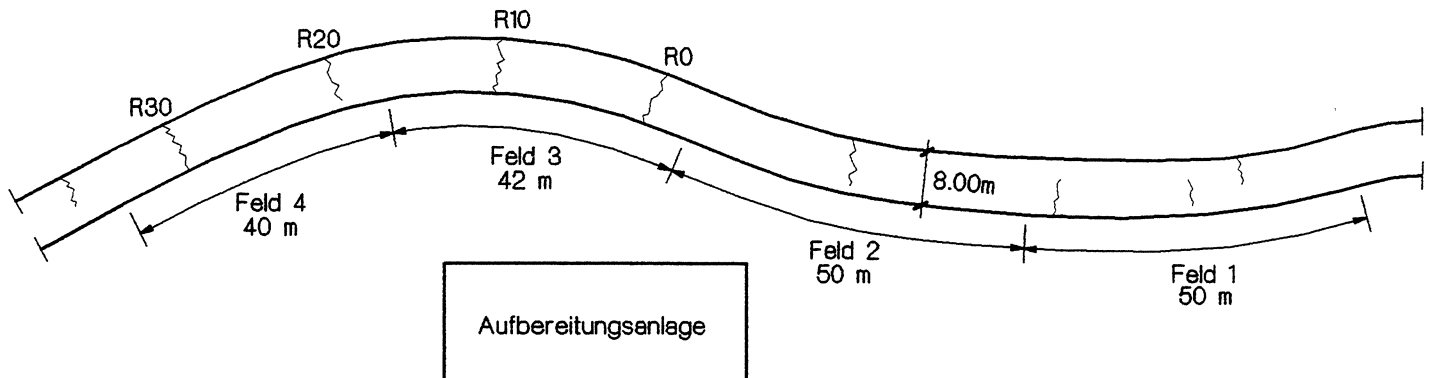
Damit mindestens ein Riss für die Untersuchung sicher zur Verfügung stehen konnte, wurde er beim Einbau 1980 künstlich durch Einlegen einer Plastikfolie an eine Arbeitsfuge im Feld 3 (R0) hergestellt. Auf dem bituminösen Belag traten später zusätzlich noch neun natürliche Risse auf; drei davon (R10, R20 und R30 in den Feldern 3 und 4) wurden zusätzlich für die Untersuchungen ausgewählt.

Abb. 2.1

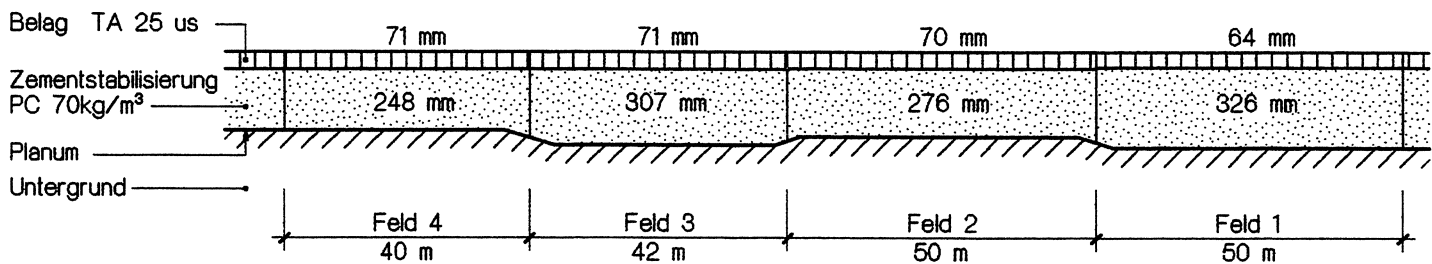
Versuchsfelder

Situation

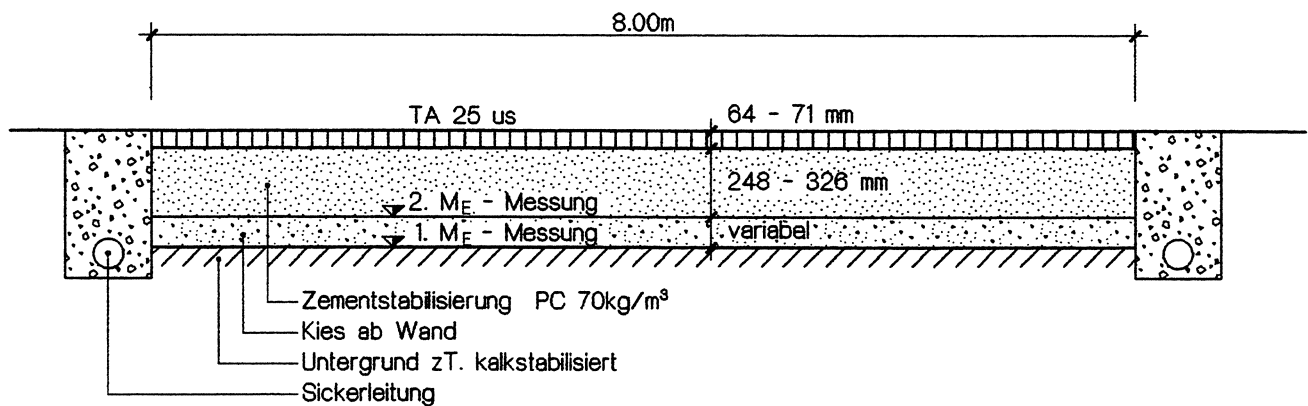
Versuchsfelder
für Kiestransporte bei
der Aufbereitungsanlage am
Limmatalerkreuz N1/N20 ZH



Aufbau



Normalprofil



Die Schichtdicken der Risse weichen nur wenig von denjenigen der Felder 3 bzw. 4 ab und sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Tabelle 2.2 Schichtdicken bei den Rissen R30, R20, R10 und R0

Riss- Nr.		R30 Feld 4	R20 Feld 4	R10 Feld 3	R0 Feld 3
Risslänge	m	8	8	8	8
TA 25 us	mm	77	68	78	74
Zementstabilisierung PC 70kg/m ³	mm	256	263	313	298
Totaldicken	mm	333	331	391	372

Untergrund

Der Untergrund wies ursprünglich eine ungenügende Tragfähigkeit auf dem Planum auf. Die gemessenen M_{E1} - Werte lagen zwischen 7'700 und 17'800 kN/m². Als zulässiger Wert wurde 15'000 kN/m² gefordert. Nach einer Verbesserung, bei der zum Teil (örtlich) mit Kalk stabilisiert wurde, betrug der M_{E1} -Wert zwischen 16'000 und 20'600 kN/m². Unmittelbar danach wurde die Zementstabilisierung eingebaut (1980).

Durch die Kalkstabilisierung entwickelte sich die Untergrundtragfähigkeit mit der Zeit noch, was durch die Muldenmessung bei der ersten Forschungsarbeit von 1980 bis 1987 indirekt bestätigt werden konnte.

Man kann annehmen, dass als Ausgangslage der vorliegenden Untersuchung der Untergrund der Versuchspiste tragfähig ist.

Verkehr

Wie bereits eingangs erwähnt, ist die Versuchspiste von 1980 bis 1987 sehr stark mit schweren Lastwagen befahren worden. Ab 1988 reduzierte sich der Transportverkehr erheblich, da grosse Bauvorhaben in der Umgebung vollendet wurden. Die Aufbereitungsanlage ist aber ständig im Betrieb. Aus der transportierten Kiesmenge kann der Verkehr auf der Versuchspiste von 1989 bis 1995 zu täglich 20 Lastwagen geschätzt werden. Dies entspricht einem TF-Wert von unter 50. Der Verkehr in dieser Periode kann als **leicht** (T2) bezeichnet werden.

2.2.2 Streuung des Kochsalzes

Seit 1989 wurden die Risse auf den Versuchsfeldern im Winter mit Kochsalz bestreut. Es darf daher angenommen werden, dass die Salzlösung in die Risse hinein dringen und dadurch die Oberflächen der Risse während des Winters „besalzen“ konnte.

Vom Frühling bis zum Herbst wurde kein Kochsalz gestreut, so dass in dieser Zeit die Anreicherung des Kochsalzes in den Rissen durch das Meteorwasser wieder reduziert wurde (Auswaschung).

Es wurden folgende Kochsalzmenge bei den Rissen gestreut:

Tabelle 2.3 Gestreute Kochsalzmenge bei den Rissen
(Totale Risslänge: 67 m)

Winterperioden		1990/91	1991/92	1992/93	1993/94	1994/95
Kochsalzmenge pro Winter	(kg)	44.6	10.5	4.5	4.5	6.0
Häufigkeit pro Winter		15	7	3	3	4
Kochsalzmenge pro m Risslänge	(g/m)	45	23	23	23	23

Im Winter, wo die Lufttemperatur unter den Gefrierpunkt sinkt, könnte die mit Kochsalz angereicherte Oberfläche der Risse beschädigt werden. Dann würde die Kraftübertragung der Risse geschwächt, was mit einer „Belastungsprobe“, links und rechts der Risse (durch Ueberfahren eines Lastwagens) und mit einer Messung der Einsenkungsmulden festgestellt werden kann.

2.2.3 Muldenmessung

Wahl der Methode

Die Messung von Einsenkungsmulden kann mit Hilfe von zwei unterschiedlichen Geräten erfolgen, nämlich: Vibraflect (Dynalect) und Benkelmanbalken.

Mit dem Vibraflect vom IVT-ETH-Zürich werden im Prinzip **dynamische** Einsenkungen der Strassenoberfläche durch einen Exzenter erzeugt und gemessen. Dabei wird mit einer konstanten Drehgeschwindigkeit der Scheibe über den Stempel (den ersten Messpunkt d_1) eine pulsierende Belastung erzeugt, welche einer Kraftamplitude von 2 kN mit einer Sinusfunktion und konstanter Frequenz von 8 Hz entspricht.

Der vertikale Weg (Einsenkung) wird durch doppelte Integration der gemessenen Beschleunigung im Steuergerät berechnet. Der gemessene Weg infolge der Belastung von 2 kN wird danach linear für einen Raddruck von 50 kN (Achslast 100 kN) extrapoliert, um die Deflektionen zu erhalten.

Als **Deflektion** wird die Einsenkung der Strassendecke unter einem Rad-
druck von 50 kN bzw. einer Achslast von 100 kN definiert. Die Deflektion
wird mit der Einheit Hundertstelmmillimeter (1/100 mm) angegeben.

Mit Hilfe des Benkelmanbalkens werden im Prinzip **statische** Einsenkungen
durch einen beladenen Lastwagen gemessen. Dabei misst man die Rückfe-
derung der Strassendecke beim abschnittsweise wegfahrenden Lastwagen
(Abb. 2.2). Die gemessenen Einsenkungen werden für die Normachslast von
100 kN extrapoliert, um die Deflektionen zu erhalten.

Schon zu Beginn der Forschungsarbeiten hat man sich für die Messung
ausschliesslich mit dem Benkelmanbalken entschieden. Die Gründe dafür
sind:

- Eine Untersuchung der Kraftübertragung in Rissen sollte am besten mit
einer wirklichkeitsnahen Belastung erfolgen.
- Mit dem Vibraflect wird eine äquivalente Kraft von nur 2 kN verwendet,
womit die Kraftübertragung nicht realistisch untersucht werden kann.
- Die Messungen mit dem Benkelmanbalken konnte durch das Tiefbauamt
des Kantons Zürich in dessen eigener Regie durchgeführt werden. Somit
belasteten sie die Forschungskredite nicht..

Gerät, Messvorgang und Anwendung des Benkelmanbalkens sind in der
Norm SN 670 362a genau beschrieben. Im Folgenden wird auf eine Wieder-
holung verzichtet.

Messpunkte

Das Feld 1 wurde nach Abschluss der ersten Forschungsarbeit 1987 einer
Umgestaltung der Aufbereitunganlage geopfert und stand somit für die vor-
liegende Untersuchung nicht mehr zur Verfügung.

Bei den Feldern 2, 3 und 4 wurden pro Feld 14 bis 18 Messpunkte in zwei
Messspuren im Mittelbereich der Piste angeordnet. Bei einer Messspur wur-
den Mulden in einem Abstand von 5 m gemessen. Für eine Mulde wurden
Einsenkungen (Rückfederungen) in Abständen von 0.0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2,
1.5, 2.5 und 5.0 m abgelesen (d_1 bis d_8). Bei der Messung kamen gleichzei-
tig zwei Benkelmanbalken für die beiden Messspuren zum Einsatz.

An jedem Riss wurden pro Seite vier Messpunkte mit 0.3 m Abstand zum
Riss, angeordnet, so dass pro Riss total 8 Messpunkte gemessen wurden.

Die Anordnung der Messpunkte bei den Rissen ist in Abb. 2.3 dargestellt.

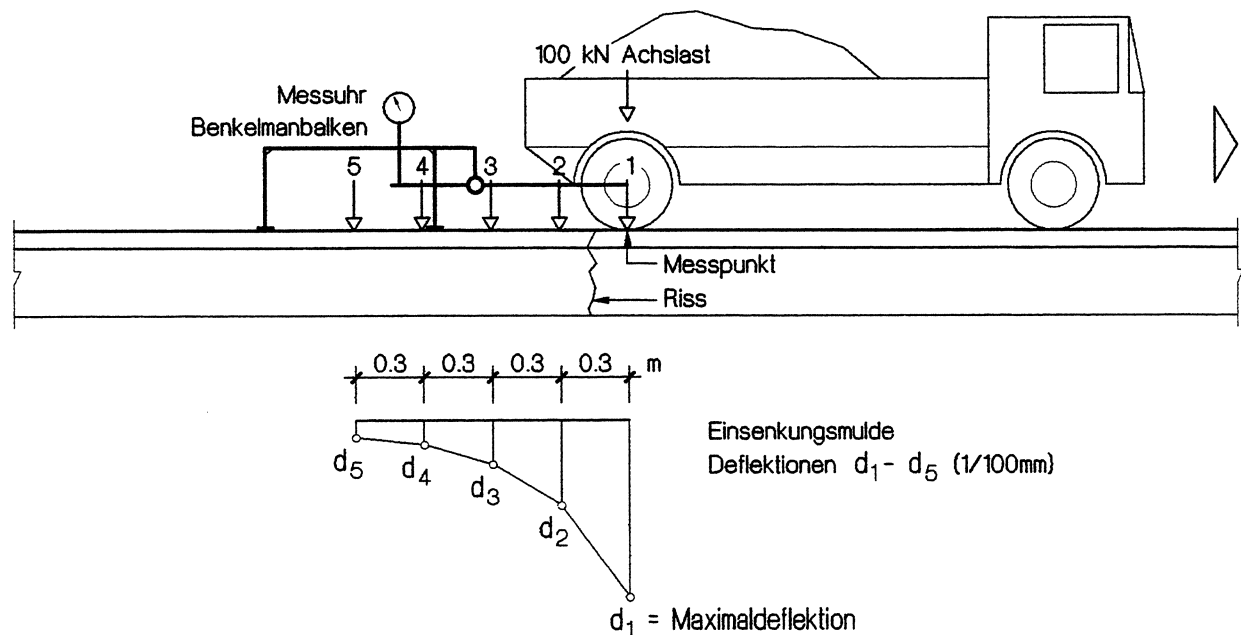


Abb. 2.3 Anordnung der Messpunkte
bei den Rissen
(Grundriss)

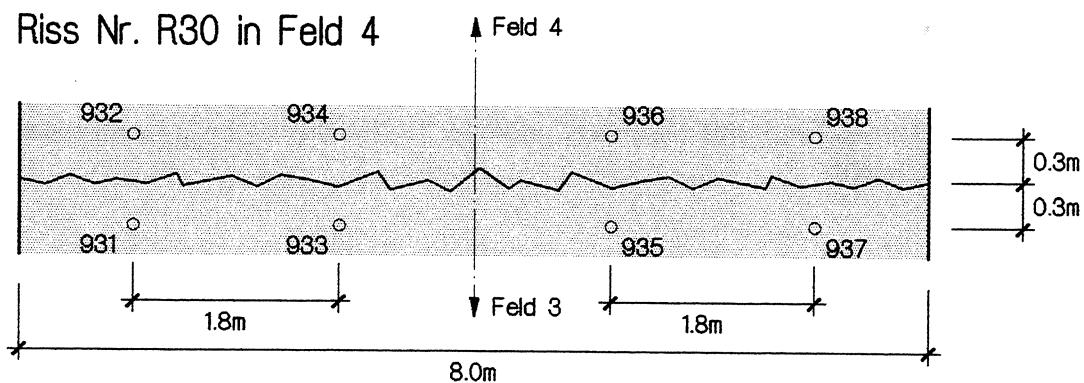
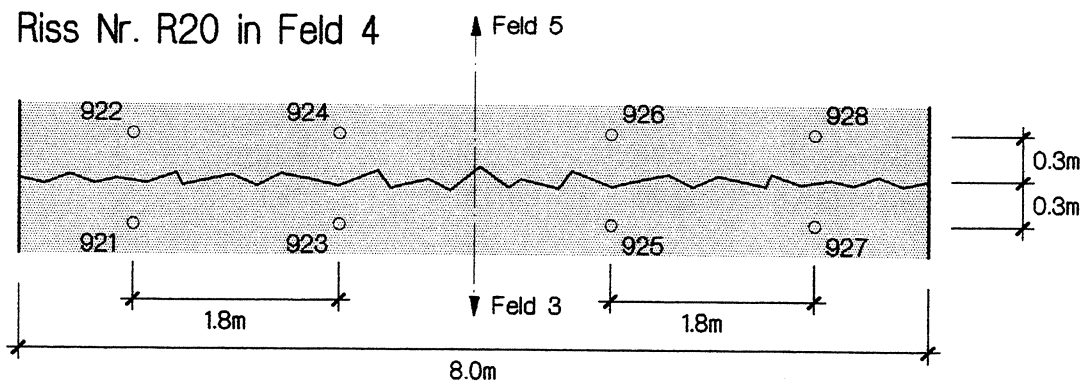
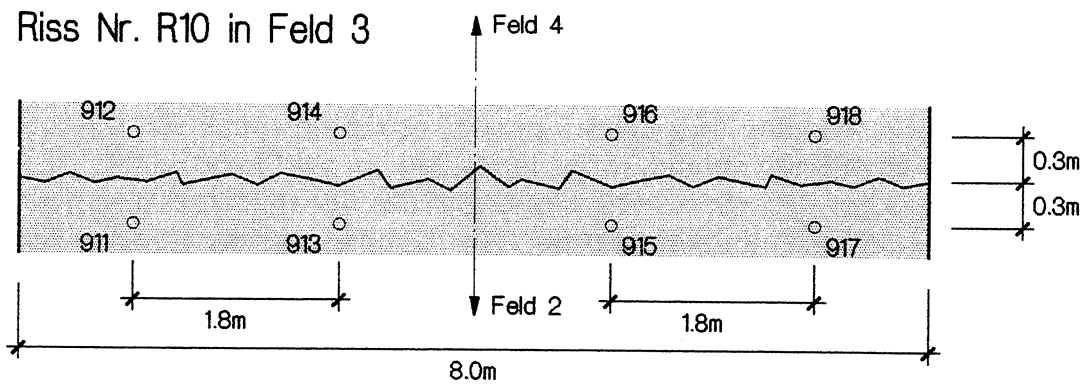
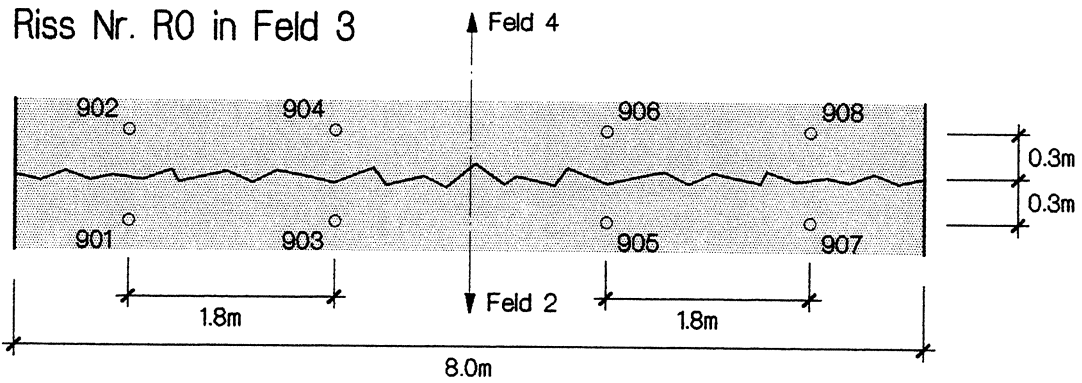


Tabelle 2.4 Anzahl und Bezeichnung der Messpunkte

	Feld 2	Feld 3	Feld 4	R0	R10	R20	R30
Anzahl Messpunkte	18	16	14	8	8	8	8
Bezeichnung der Messpunkte	201 bis 209 und 211 bis 219	300 bis 307 und 310 bis 317	401 bis 407 und 411 bis 417	901 bis 908	911 bis 918	921 bis 928	931 bis 938

Messrichtungen

Die Muldenmessung erfolgte auf zwei Bereichen der Versuchspiste, nämlich: im Felde und bei den Rissen.

Bei der Messung der Feldpunkte fuhr der Lastwagen vom Feld 2 bis zum Feld 4 in einer Fahrriichtung. Hingegen wurde bei der Messung der Risspunkte der Riss einmal überfahren und das andere Mal in umgekehrter Fahrriichtung, nicht überfahren (Abb. 2.2). Damit konnte der Einfluss des Risses untersucht werden.

Messserien

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurden drei Messerien, 1991, 1994 und 1995 durchgeföhrt.

Achslasten

Die verwendeten Achslasten für die drei Messerien betrugen:

Messerie	1991	1994	1995
Achslast (kN)	200	130	181

2.2.4 Auswertung der Muldenmessung**Statistisch gemittelte Mulden**

Die gemessenen Einsenkungen bzw. Rückfederungen werden zuerst für die Normachslast von 100 kN umgerechnet, um die Deflektionen zu erhalten. Die Deflektionen einzelner Mulden, d_1 , bis d_8 werden dann statistisch ausgewertet, um den Mittelwert (m), die Standardabweichung (s) und die Variationskoeffizienten (cv) zu bestimmen. Auf diese Weise ergibt sich eine gemittelte Mulde pro Feld und Messerie, welche für die Beurteilung des Feldes verwendet wird.

Die Deflektionen der Risspunkte werden ebenfalls statistisch ausgewertet, um sie mit dem Feldmittelwert zu vergleichen. Ferner werden ausgefallene Deflektionen der Risse gesondert analysiert.

Korrekturen

Bei der Auswertung war es generell erforderlich, eine Korrektur der ersten vier Deflektionen d_1 bis d_4 vorzunehmen, weil die Vorderbeine des Benkelmanbalkens zu Beginn der Messung in der Einflusszone (Mulde) standen. Dies kam daher, dass die Oberbausteifigkeit gross und die Achslast schwer waren. Die Korrektur erfolgte nach der Norm SN 670 362a (Benkelmanbalken).

Auf eine Temperaturkorrektur der Deflektionen wurden hingegen verzichtet. Die Temperaturkorrektur gilt in der Regel für Oberbauten aus dicken, bituminösen Belägen und Kiessand.

Die Auswertung der gemessenen Mulden finden sich in den Anhängen 1 bis 3.

3. Ergebnisse und Beurteilung

3.1 Laboruntersuchungen

3.1.1 Durch das LPM Baustoffprüfinstitut

Zur Zeit der Prüfungen waren die Stabilisierungen rund 9 Jahre alt.
Die Druckfestigkeit war entsprechend hoch.

Gefügetyp

Die drei Proben der Zementstabilisierung weisen einen sehr ähnlichen Gefügebau auf.

Gemäss VSS-Forschungsauftrag 25/80 vom März 1988 sind die Proben der Zementstabilisierung grundsätzlich dem Gefügetyp A zuzuordnen, wobei vereinzelt lokal auch der Gefügetyp B vorkommt. Gefügetyp A beinhaltet grobe Lunkernporosität, und schlechte Verbundqualität. Es ist ein ausgeprägtes Lockergefüge, bei dem grobe kommunizierende Lunkerporosität dominiert. Gefügetyp B hingegen zeigt ein kompaktes Gefüge, das mit feiner, lunkernartiger Makroporosität regelmässig durchsetzt ist.

Zuschläge

Die verwendeten Zuschläge bestehen mehrheitlich aus silikatischen Komponenten und Kalkstein. Wesentliche Risse oder Poren sind in den verwendeten Zuschlägen nicht vorhanden. Der Kornaufbau ist granulometrisch, wobei der Feinkornanteil < 0.20 mm in einer geringen Menge vorliegt.

Bindemittel

Das verwendete Bindemittel besteht aus einem Portlandzement, dessen Hydratationsgrad als gut zu beurteilen ist. Nur vereinzelt sind im Gefüge nicht hydratisierte Zementklinker feststellbar. Gemäss Dünnschliffbeurteilung ist über 90% des beigemischten Portlandzementes hydratisiert.

Frost / Tausalz-Prüfung (mit Salzlösung)

Die Proben der Zementstabilisierung zeigten nach vier Frost / Tau-Zyklen mit 3%-iger Salzlösung eine intakte Oberfläche. Erst nach acht Frost / Tau-Zyklen zeigten sie deutliche Schäden, bedingt durch Bindemittelabbau mit teilweisen Kornausbrüchen. Die Prüfkörper zeigten nach zehn Frost / Tau-Zyklen stärkere oberflächliche Abwitterungsschäden mit Bindemittelabplatzungen und Kornausbrüchen. Nach fünfzehn Zyklen mit Salzlösung wiesen alle Proben massive Abwitterungsschäden auf bzw. waren die Prüfkörper mehrheitlich zerstört. Danach wurde die Prüfung abgebrochen.

Beurteilung

Die Frost / Tau-Prüfung mit Salzlösung erfolgte nach Norm SIA 162/1 Nr. 9, welche für die Prüfung von Beton angewendet wird. Für Zementstabilisierungen ist diese Prüfung zu streng. Bis heute gibt es aber keine Normen der Frost / Tau-Prüfung mit Salzlösung für Zementstabilisierungen.

3.1.2 Durch die EMPA

Frost / Tau-Prüfung nach VSS-Norm SN 640 509a

Bei dieser Prüfung für Stabilisierungen werden die Gewichtsverluste nach 12 Frost / Tau-Zyklen durch Bürsten ermittelt. Die Prüfung wurde parallel mit zwei Medien, Wasser und 3%-iger NaCl-Lösung durchgeführt. In der Norm SN 640 509a wird nur mit Wasser geprüft.

Die Prüfergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Tabelle 3.1 Ergebnis der Frost / Tau-Prüfung gemäss SN 640 509a

Prüf-medium	Probe Nr.	Gewicht des Prüfkörpers vor Bürsten (g)	Gewicht des Prüfkörpers nach Bürsten (g)	Gewichtsverlust (g)	Gewichtsverlust (%)	Zulässiger Wert nach SN 640 509a (%)
NaCl-Lösung 3%	3	2683.6	2446.7	136.9	8.8	*
	5	2738.6	2422.5	316.1	11.5	*
Wasser	2	2660.9	2617.7	50.2	1.9	14
	4	2794.2	2732.6	61.6	2.2	14

* keine Wertangabe, da keine derartige Prüfung vorhanden ist.

Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit der Prüfkörper mit und ohne Frost / Tau-Belastung betrug:

- Ohne Frost / Tau-Belastung: 16.3 bis 36.2 N/mm² (aus 4 Proben)
- Mit Frost / Tau-Belastung:
 - Medium Wasser 33.1 N/mm²
 - Medium Salzlösung 15.9 N/mm²

Frost / Tausalz-Prüfung (mit Salzlösung) nach Norm SIA 162/1, Nr. 9

Die Prüfung wurde bereits beim LPM Baustoffprüfinstitut durchgeführt, und bei der EMPA nochmals wiederholt. Dabei wurden zusätzliche Prüfungen mit dem Medium Wasser durchgeführt.

Mit dieser Prüfung wird die Auswirkung von Frostwechseln unter gleichzeitiger Einwirkung von Tausalzen auf die Oberfläche der Stabilisierung bestimmt. Dabei werden die Gewichtsverluste nach 10, 20 und 30 Frost / Tau-Zyklen mit Salzlösung ermittelt. Damit wird die Frost / Tausalz-Beständigkeit beurteilt.

Das Ergebnis ist in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Tabelle 3.2 Ergebnis der Frost / Tau-Prüfung mit Salzlösung und Wasser durch die EMPA

Medium	freie Oberfläche A (cm ²)	Ablösungsmenge			Frost / Tau- Beständigkeit	
		ΔM_{10} (g)	ΔM_{20} (g)	ΔM_{30} (g)	Δm_{30} (g/m ²)	Beurteilung
NaCl- Lösung	13	144	37.85	71.85	80.20	
	14	156	37.63	50.60	98.40	
	15	156	36.80	183.95	166.10	
	16	144	50.80	92.50	145.50	
	Summe	600	163.08	398.90	490.20	
			1052.18		17600	(mit Salz) tief
Wasser	9	144	0.18	0.20	4.10	
	10	144	0.03	0.10	4.05	
	11	144	0.03	0.40	5.15	
	12	144	0.21	0.10	4.12	
	Summe	576	0.45	0.80	17.42	
			18.76		400	(mit Wasser) hoch

Richtwerte für Δm_{30} : hohe Tausalzbeständigkeit: $\Delta m_{30} \leq 600 \text{ g/m}^2$
 tiefe Tausalzbeständigkeit: $\Delta m_{30} \geq 3800 \text{ g/m}^2$

Frostbeständigkeit nach Methode „kritischer Sättigungsgrad“

Die Durchführung erfolgte nach der EMPA-Richtlinie mit dem Medium Wasser. Die Frostbeständigkeit wurde aus dem kritischen Sättigungsgrad S_{kr} und dem maximal erreichbaren kapillaren Sättigungsgrad S_E (kap) ermittelt.

Ergebnis: kritischer Sättigungsgrad $S_{kr} = 0.890$
 max. erreichbarer kapillarer Sättigungsgrad $S_E = 0.814$

Differenz $S_{kr} - S_E = \Delta S$ $\Delta S = 0.08$

Richtwerte für ΔS : hohe Frostbeständigkeit: $\Delta S \geq 0.05$
 tiefe Frostbeständigkeit: $\Delta S \leq 0.00$

Beurteilung: Frostbeständigkeit: hoch (Medium Wasser)

Beurteilung:

Dass die Prüfkörper die Prüfung **mit Wasser** nur mit einem Gewichtsverlust unter 2.2 % (Tabelle 3.1) glänzend bestanden haben, versteht sich von selbst, denn die Zementdosierung von 70 kg/m^3 ist vor dem Einbau 1980 im Labor mit der gleichen Eignungsprüfung (Medium Wasser) bestimmt worden. Im Laufe der 9 Jahre nahm die Druckfestigkeit von 3 bis 4 auf 16 bis 36 N/mm^2 zu, und ein Bestehen der Frost / Tau-Prüfung steht deshalb ausser Zweifel.

Die analoge Prüfung mit 3%-iger NaCl-Lösung zeigte, dass der Gewichtsverlust nach den 12 Frost / Tau-Zyklen das 5-fache betrug wie mit Wasser (Tabelle 3.1). Offensichtlich hat Kochsalz einen grossen Einfluss auf die Zerstörung von Zementstabilisierungen bei Frost. Dies geht auch aus Tabelle 3.2 hervor.

3.1.3. Durch das Ingenieurbureau Heierli**Gewichtsverluste bei Zimmertemperatur**

Ein Prüfkörper wurde ständig in 3%-iger NaCl-Lösung gelagert.

Ein anderer Prüfkörper wurde jeweils während 14 Tagen abwechselnd in 3%-iger Salzlösung und bei Luft gelagert (Wechselbad).

Drei andere Prüfkörper wurden nach einmaliger Sättigung in 3%-iger NaCl-Lösung 0.3 m tief im Boden eingegraben.

Eine Kernprobe der Zementstabilisierung wurde als Reserve bei Zimmertemperatur trocken gelagert.

Alle Prüfkörper wurde 1992 und 1995 zweimal gebürstet. Dabei wurden die Gewichtsverluste ermittelt. Diese waren sehr gering (weniger als 0.3%).

An diesen Proben der Zementstabilisierung wurde 1995 die Druckfestigkeit im Alter von rund 15 Jahren bestimmt. Sie betrug 2.75 N/mm^2 (Anzahl 6, Variationskoeffizient 0.11).

Beurteilung

Das Kochsalz schädigt Zementstabilisierungen bei Zimmertemperatur offensichtlich nicht.

3.1.4 Gesamtbeurteilung

1989 wurden Frost/Tausalz-Prüfungen an Zementstabilisierungen sowohl bei der EMPA als auch beim LPM Beinwil am See durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass Proben der Zementstabilisierung in Salzwasser sehr viel stärkere Schädigungen des Gefüges erleiden als Proben, welche lediglich in Wasser gelagert werden.

Die Tatsache, dass Salzwasser bei mehrmaligem Gefrieren den **Betonstein** schädigt, ist schon länger bekannt. Bis heute gibt es jedoch keine plausible Erklärung dafür. Gegenwärtig läuft gemäss Aussage der EMPA ein internationales Forschungsprojekt zu diesem Thema, an dem sich auch die EMPA beteiligt.

Folgende Phänomene sind bekannt:

- Kochsalz wird beim Gefrieren im Eis der Poren abgereichert; das Poreneis enthält eine tiefere NaCl-Konzentration als das Porenwasser.
- Der Zementstein kontrahiert beim Abkühlen stärker als das Eis. Da wegen der Schmelzpunktniedrigung das Kochsalzwasser erst bei tieferen Temperaturen erstarrt, könnte hier ein Grund gesehen werden: der Betonstein ist zum Zeitpunkt der Eisbildung schon stärker kontrahiert als bei reinem Wasser.
- Es ist ausserdem bekannt, dass bei 3%-iger Salzlösung die stärksten Schäden entstehen. Sowohl bei verdünnteren als auch bei konzentrierten Lösungen sind die Schäden weniger gravierend. Deshalb tritt das Phänomen bei Betonstrassen in der Praxis nicht in dem Masse auf, wie man das aufgrund der Laborversuche befürchten müsste.

3.2 Felduntersuchungen

3.2.1 Allgemeines

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden 1991, 1994 und 1995 pro Jahr eine Muldenmessung durchgeführt. Die Auswertung der Mulden findet sich in den Anhängen 1 bis 3.

Die letzte Muldenmessung der vorangehenden Forschungsarbeit fand 1985, statt; ihr Ergebnis wird im folgenden als Ausgangslage für die Beurteilung herangezogen.

Der Vergleich bzw. die Beurteilung der Ergebnisse erfolgt in der Regel mit den statistisch gemittelten Mulden und Deflektionen.

Bei der Messung 1991 wurde Feld 2 nicht gemessen, weil die zu untersuchenden Risse sich nicht in diesem Feld befinden und Messwerte des Feldes 2 nicht hätten verwertet werden können. Ferner wurden bei der Messung 1991 die Messpunkte bei den Rissen (R0, R10 in Feld 3 und R20, R30 in Feld 4) nur in einer Fahrriichtung gemessen, wobei die Risse immer überfahren wurden.

Hingegen wurden bei den nachfolgenden Messungen von 1994 und 1995 zum einen alle Felder 2, 3 und 4 (Feld 1 wurde 1987 bei einer Umgestaltung der Aufbereitungsanlage aufgehoben) untersucht, zum anderen wurden die Messpunkte bei den Rissen in zwei entgegengesetzten Fahrriichtungen gemessen, das heisst, die Risse wurden beim ersten Mal überfahren und beim zweiten Mal nicht (Abb.2.2).

3.2.2 Maximaldeflektionen im Felde

Unter Maximaldeflektion wird die Deflektion d_1 unter dem Zwillingsrad zu Beginn der Messung verstanden. Die Deflektion ist die grösste in der Mulde.

Die gemittelten Mulden der Felder 2, 3 und 4 sind in Abbildungen 3.1a bis 3.1c dargestellt.

Die gemittelten Mulden verlaufen in ähnlicher Form wie bei der ersten Forschungsarbeit von 1980 bis 1987. Sie liegen um die Mulden 1985 mit einer Abweichung von im Maximum 5 (1/ 100 mm), welche im Rahmen der Messgenauigkeit des Benkelmanbalkens liegt. Dies bedeutet, dass sich das Tragverhalten der Versuchspiste im Lauf der Zeit nicht verschlechtert hat. Denn die Mulden von 1991 bis 1995 sind nicht grösser bzw. voluminöser geworden.

Für die Beurteilung sind der Mittelwert und der Variationskoeffizient einer Messung von Bedeutung, die in der folgenden Tabelle 3.3 zusammengestellt sind.

Abb. 3.1a Gemittelte Mulden des Feldes 2

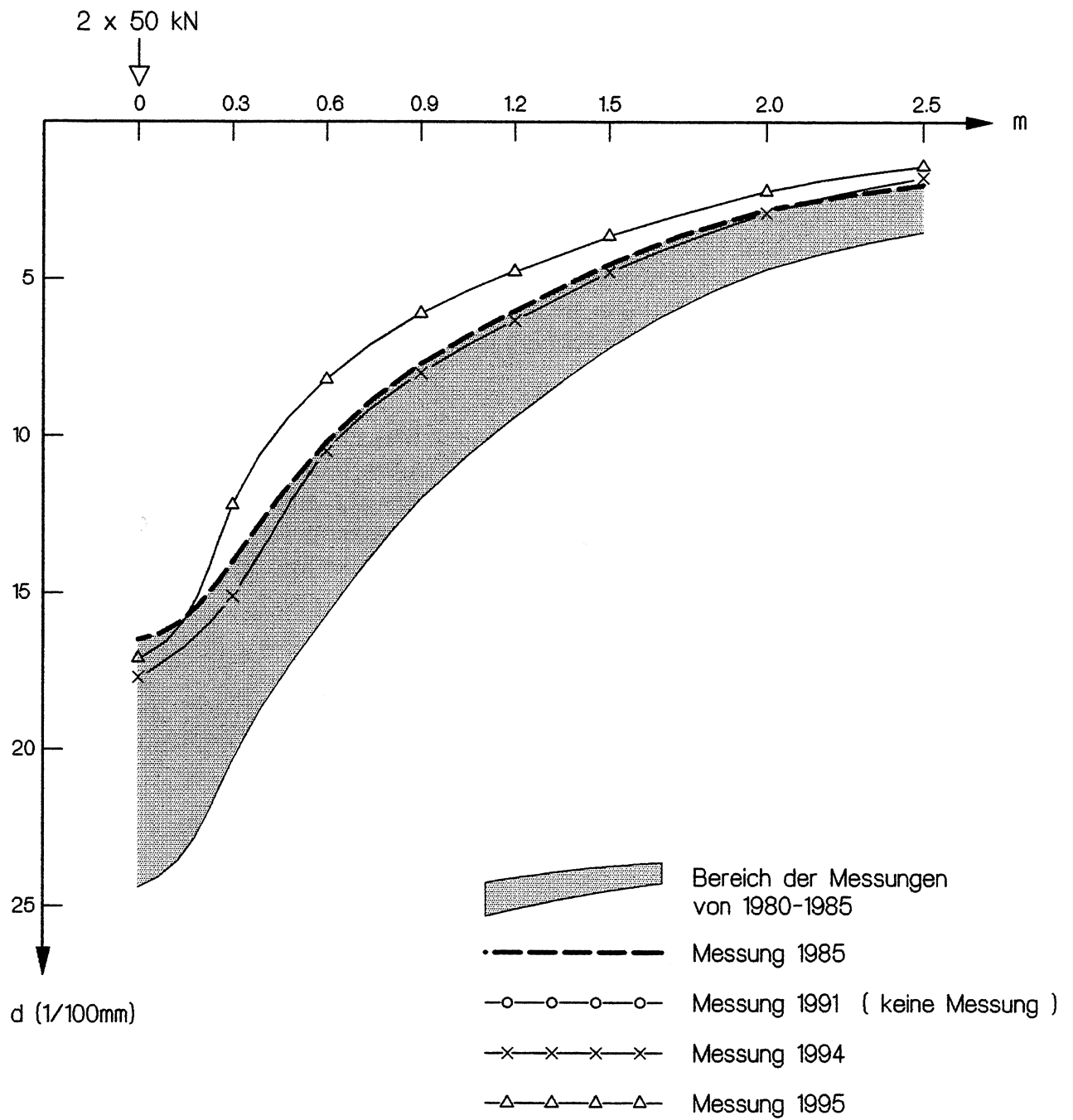


Abb. 3.1b

Gemittelte Mulden des Feldes 3

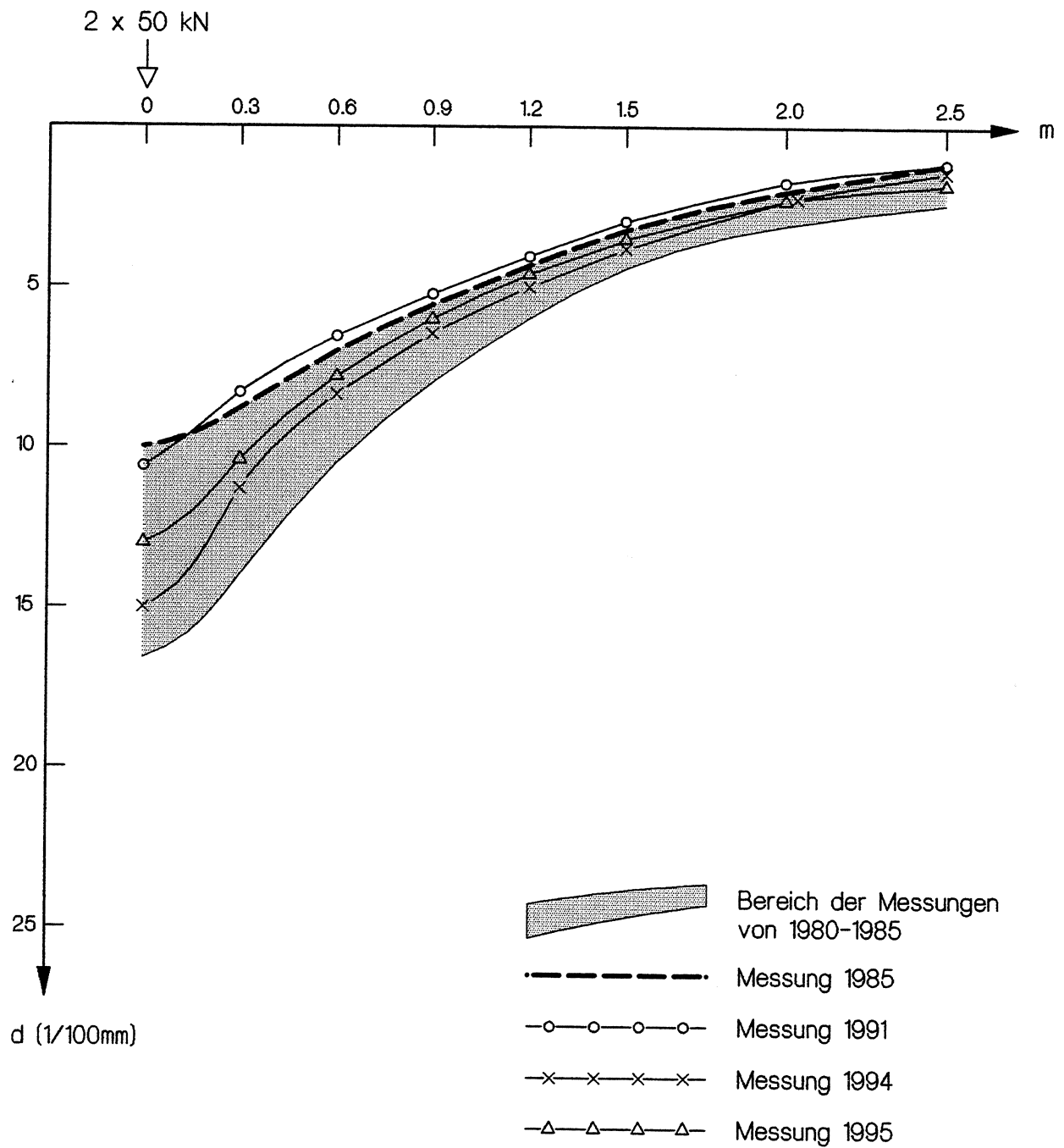


Abb. 3.1c Gemittelte Mulden des Feldes 4

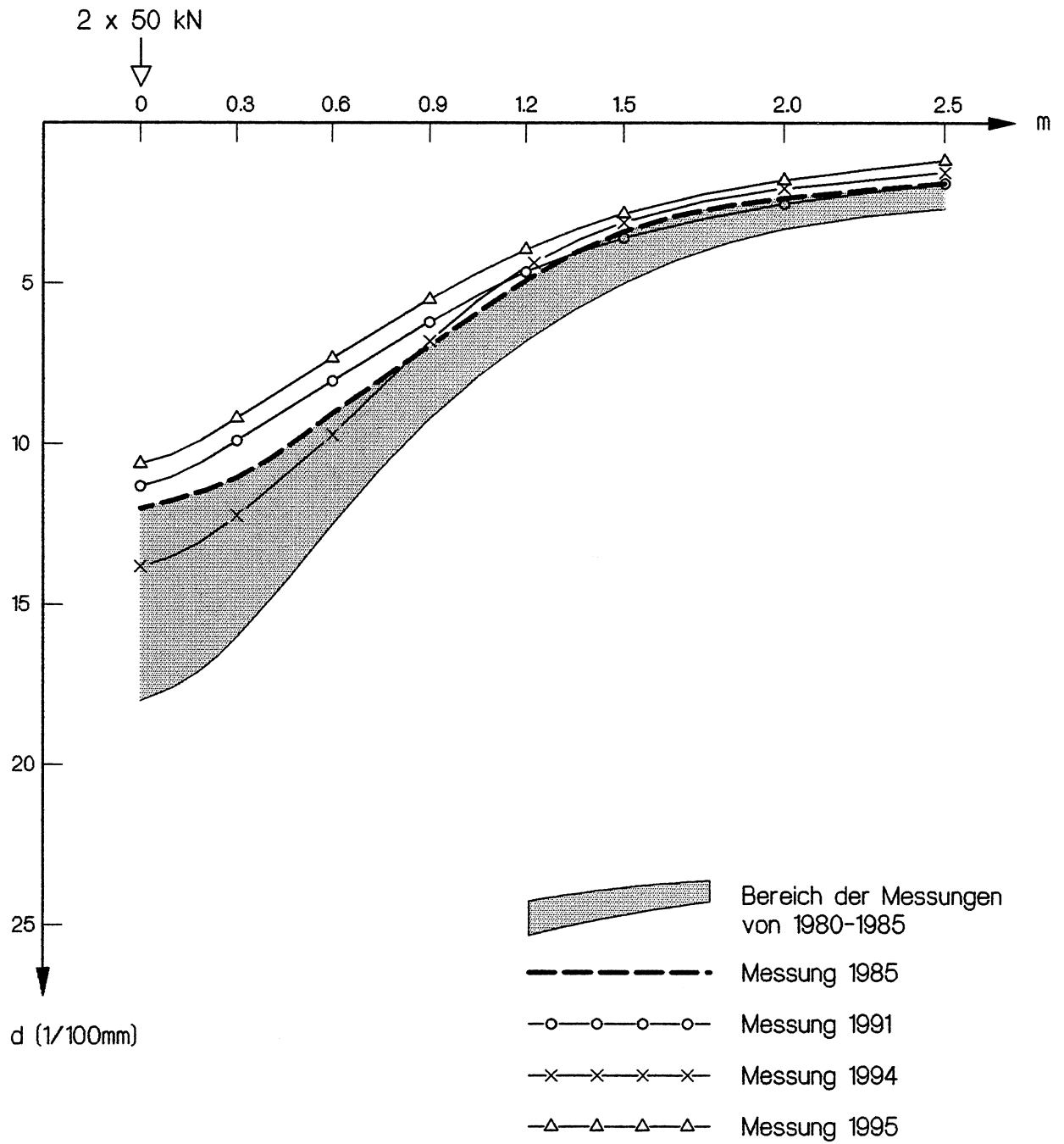


Tabelle 3.3 Mittelwert m und Variationskoeffizient cv der Maximaldeflektion d_1 im Felde

Messung Maximaldeflektion d_1		1991	1994	1995
Feld 2				
Mittelwert m	-		11.8	17.2
Variationskoeffizient cv	-		0.22	0.20
Feld 3				
Mittelwert m		11.0	15.1	13.5
Variationskoeffizient cv		0.21	0.30	0.32
Feld 4				
Mittelwert m		11.3	13.8	10.5
Variationskoeffizient cv		0.25	0.35	0.21

Die Variationskoeffizient liegt unter 0.35 (35%), was einer zuverlässigen Beurteilung der Maximaldeflektion d_1 erlaubt.

Ausserden sind die Maximaldeflektionen absolut gesehen klein und liegen unter 20 (1/100 mm).

3.2.3 Maximaldeflektionen bei den Rissen

Bei einem Riss wurden 8 Messpunkte angeordnet und gemessen (Abb. 2.3). Bei den in der Tabelle 3.4 angegebenen Messwerten handelt es sich um Maximaldeflektionen d_1 beim Ueberfahren der Risse.

Vergleicht man die Werte der beiden Tabellen 3.3 und 3.4, so erkennt man deutlich, dass die Deflektionen bei den Rissen grösser sind als diejenigen im Felde. Dies sagt aus, dass die Tragfähigkeit bei den Rissen allgemein schwächer ist als diejenige im Felde.

Absolut gesehen sind die Deflektionen bei den Rissen ebenfalls klein und liegen unter 25 (1/100 mm).

Der Variationskoeffizient der Messwerte bei den Rissen liegt in der Grössenordnung derjenigen im Felde.

Abb. 3.2a **Gemittelte Mulden des Risses R0**

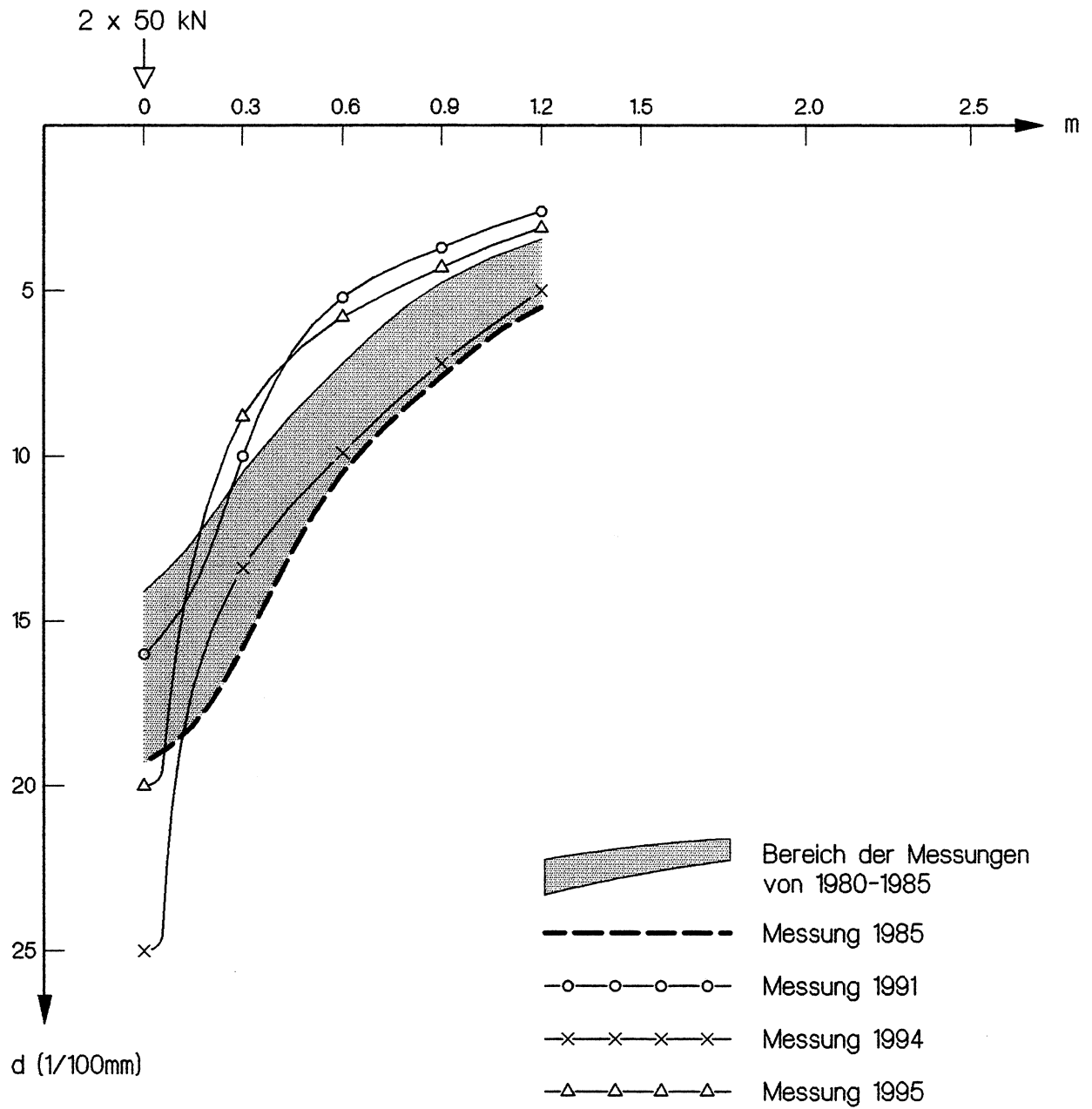


Abb. 3.2b

Gemittelte Mulden des Risses R10

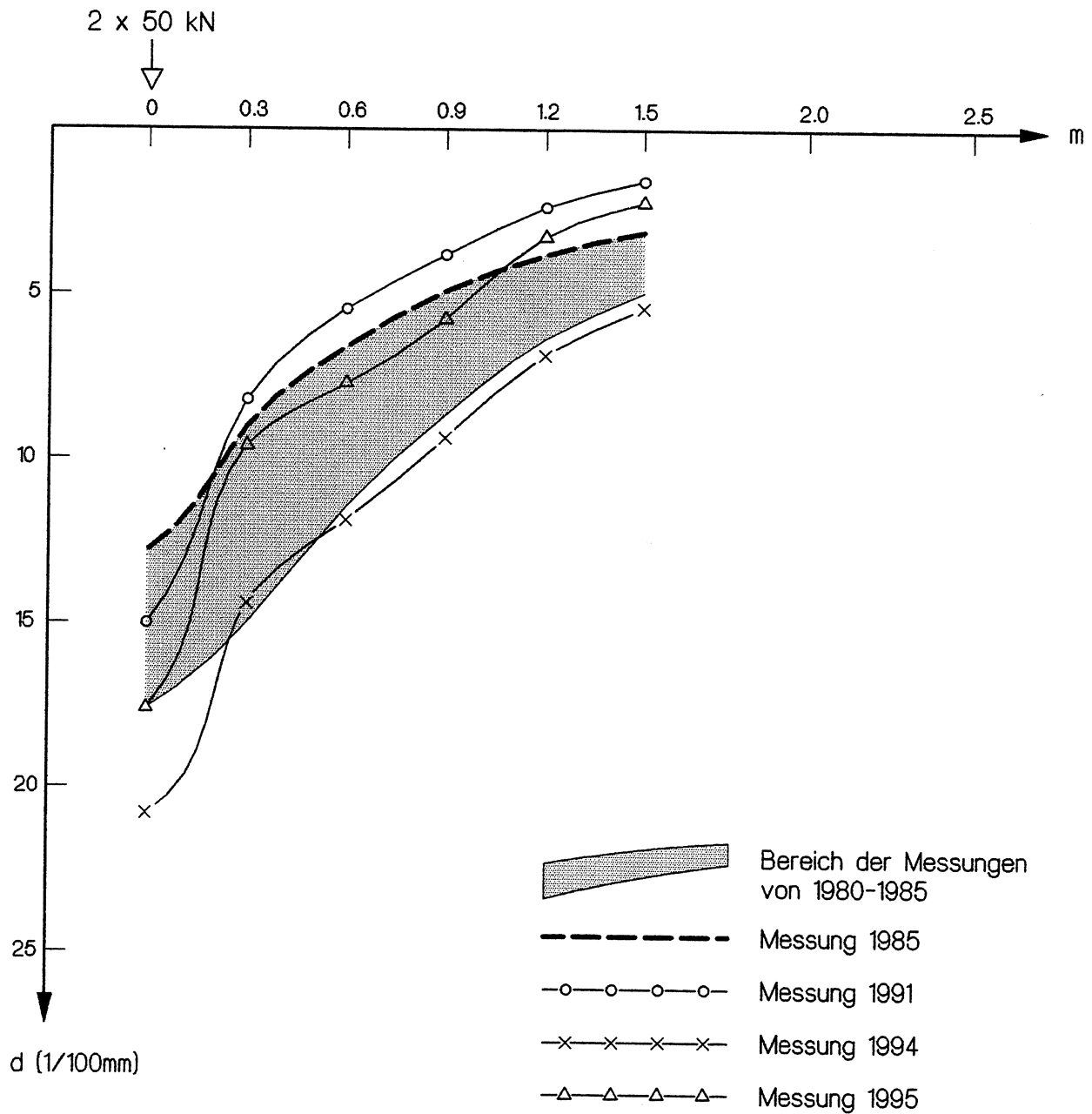


Abb. 3.2c Gemittelte Mulden des Risses R20

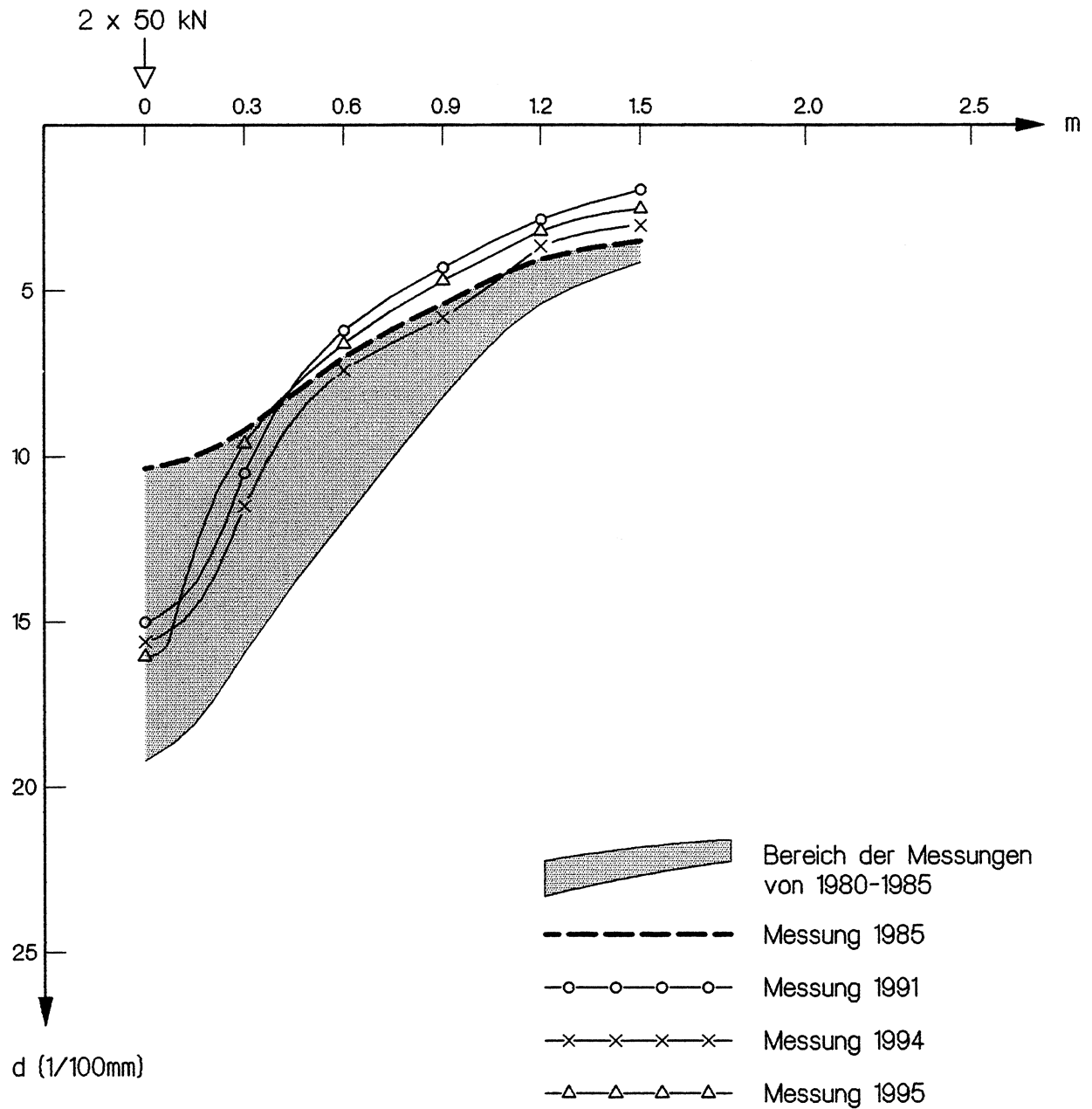


Abb. 3.2d

Gemittelte Mulden des Risses R30

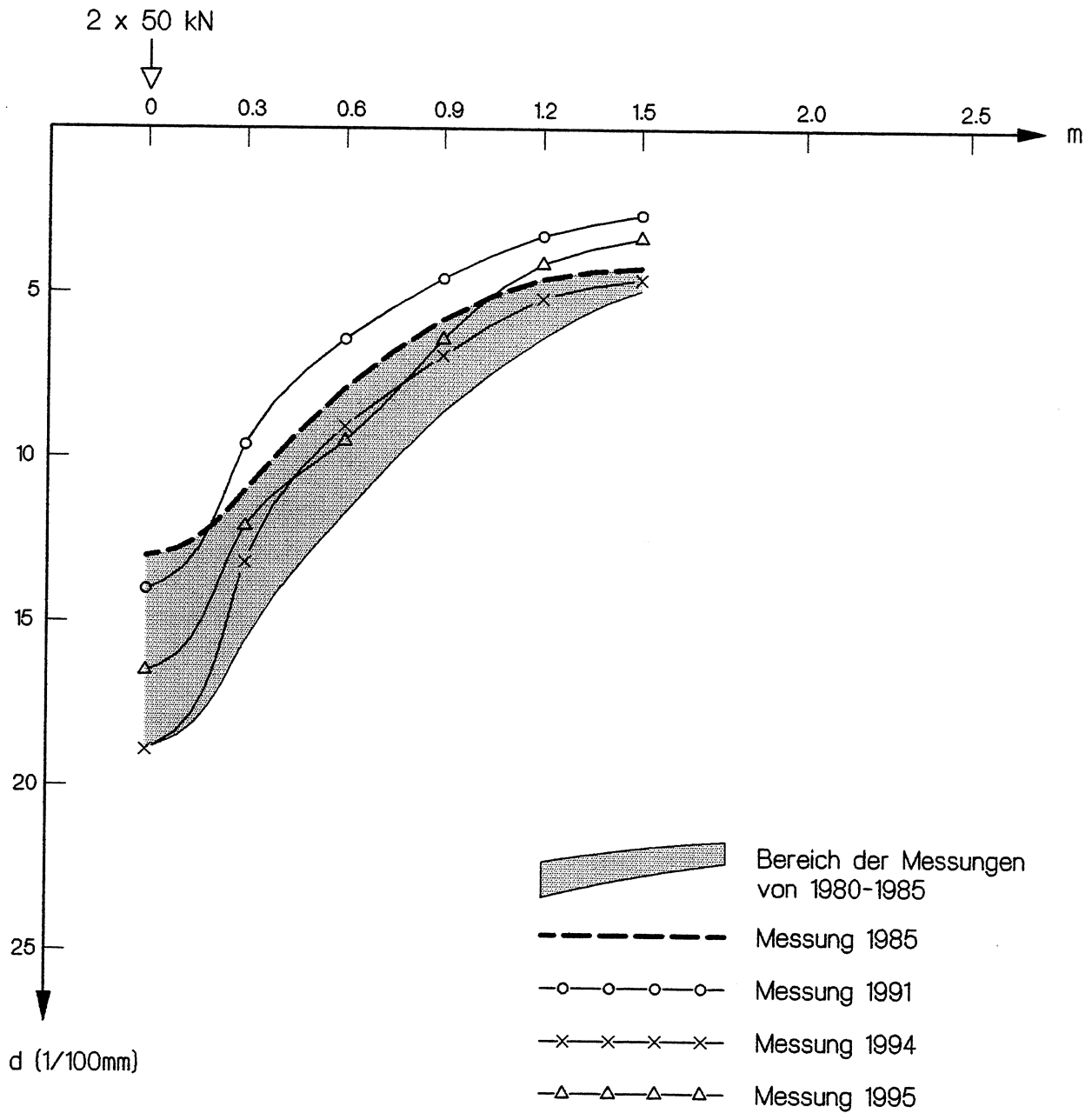


Tabelle 3.4 Mittelwert und Variationskoeffizient der Maximaldeflektion d_1 bei den Rissen, Risse wurden überfahren

Messung		1991	1994	1995
Riss R0				
Mittelwert	m	16.1	22.0	22.4
Variationskoeffizient	cv	0.28	0.21	0.24
Riss R10				
Mittelwert	m	15.1	16.1	16.0
Variationskoeffizient	cv	0.14	0.33	0.23
Riss R20				
Mittelwert	m	15.1	23.0	24.0
Variationskoeffizient	cv	0.17	0.39	0.21
Riss R30				
Mittelwert	m	14.1	20.2	19.5
Variationskoeffizient	cv	0.21	0.23	0.30

Die gemittelten Mulden bei den Rissen sind in den Abbildungen 3.2a bis 3.2d dargestellt. Die Abweichung der Deflektionen zu denjenigen von 1985 (Ausgangslage) beträgt rund 5 (1/100 mm). Sie liegen also in der Gössenordnung derjenigen im Felde. Mit anderen Worten: Eine signifikante Vergrößerung der Deflektionen ist daraus nicht festzustellen.

Bis jetzt wurden die Feld- und Riss-Mittelwerte beurteilt. Im folgenden werden nun die einzelnen Gruppen der Risswerte näher betrachtet.

3.2.4 Deflektionssprünge bei Rissen

An einem Riss sind je vier Messpunkte auf der rechten und linken Seite angeordnet und gemessen (Abb. 3.3). Die rechten Messpunkte tragen eine ungerade Zahl und ihre linken Gegenüber eine gerade.

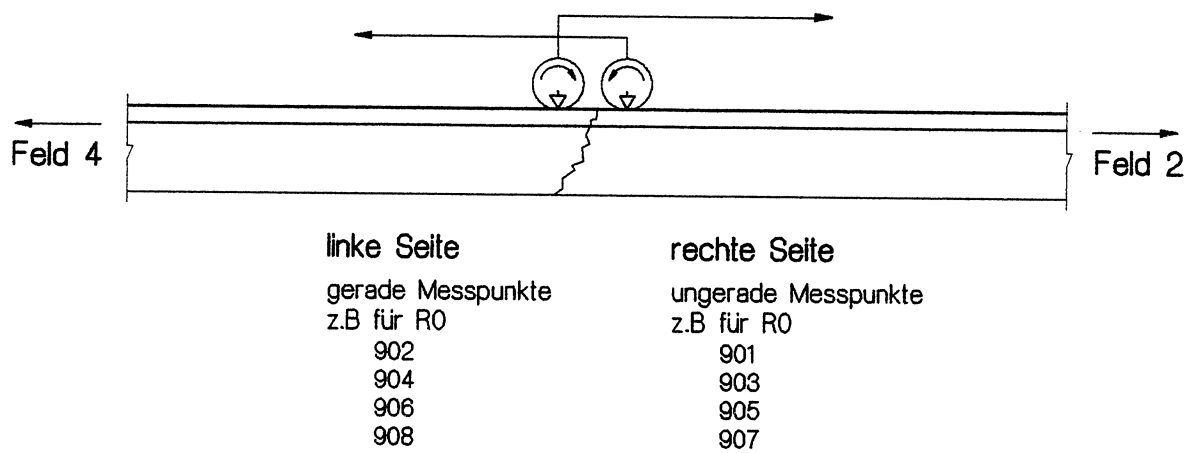
Wird der Riss überfahren, so kann ein merkbar grosser Deflektionssprung von d_1 zu d_2 gemessen werden, wenn die Neigung des Risses eine bestimmte Richtung aufweist. Dies wird mit den Skizzen in Abb. 3.4 illustriert:

Bei der Messung mit dem Benkelmanbalken wird die Rückfederung der Strassenoberfläche gemessen. Dabei wird der Messpunkt (1) beim Wegfahren des Lastwagens sukzessiv entlastet und dadurch zurückfedern (negative Einsenkung).

Abb. 3.3

Messungen bei den Rissen

Messrichtung 1 : Riss wird überfahren



Messrichtung 2 : Riss wird nicht überfahren

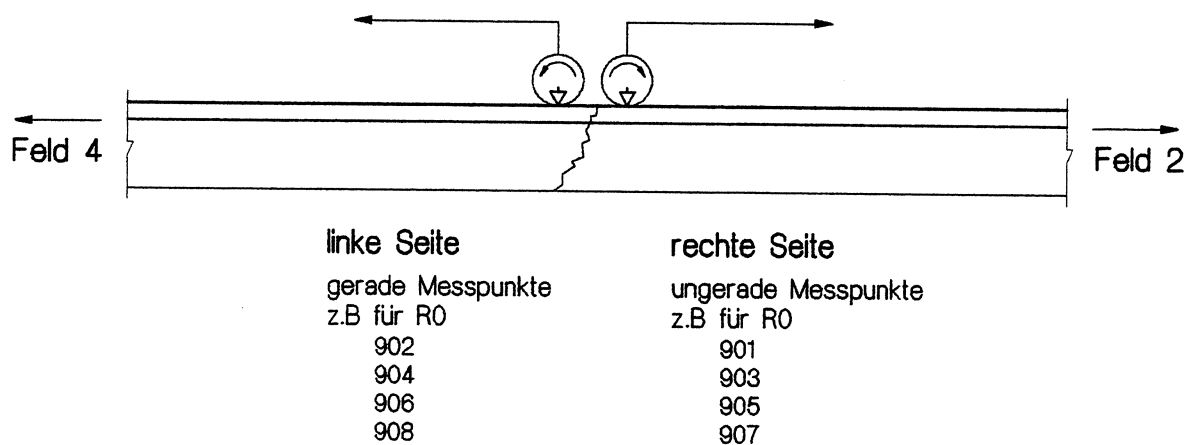


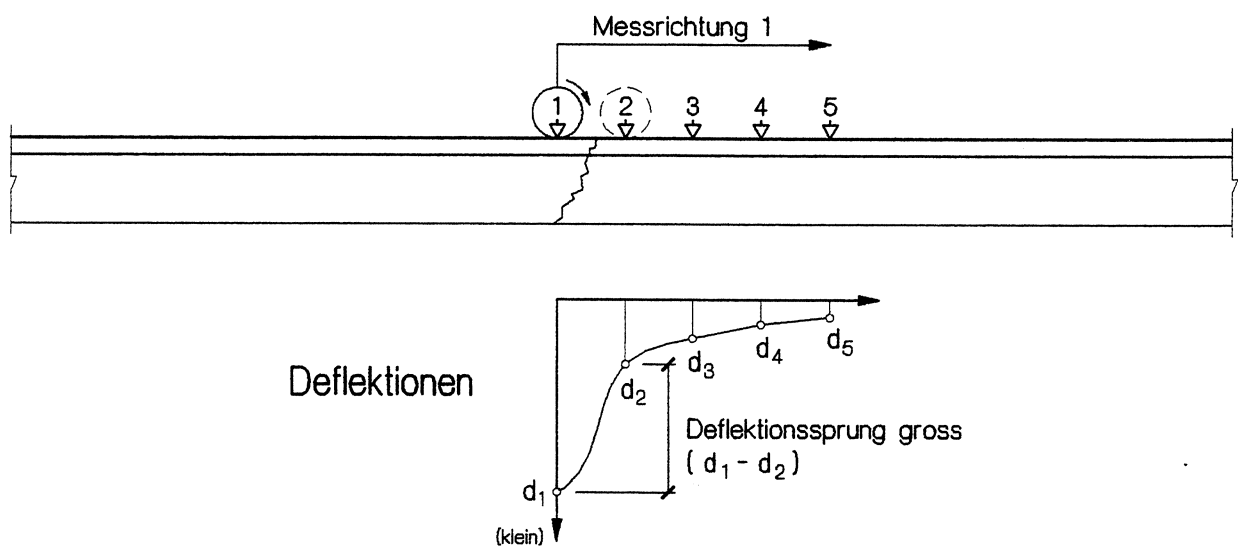
Abb. 3.4 **Deflektionssprung** ($d_1 - d_2$) **bei den Rissen**
Riss wird überfahren

linke Seite
gerade Messpunkte

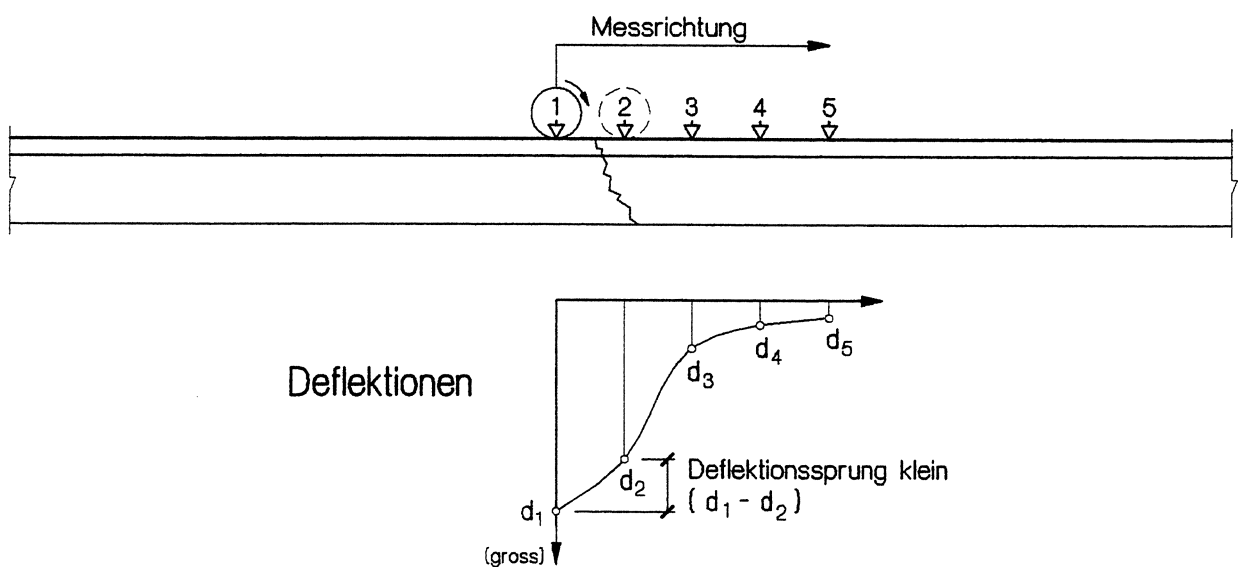
Riss

rechte Seite
ungerade Messpunkte

Fall 1 : Rissneigung 1 :



Fall 2 : Rissneigung 2 :



Bei der Messung bei den Rissen mit Ueberfahren sind zwei Fälle der Rissneigung zu unterscheiden, die in Abb. 3.4 schematisch skizziert sind. Im **Fall 1** mit der Rissneigung von oben rechts nach unten links und Messrichtung nach rechts, wird der Deflektionssprung ($d_1 - d_2$) gross, weil der Messpunkt (1) bei der Radstellung auf (2) weitgehend entlastet ist und dadurch mehr zurückfedern wird. Folglich wird die Deflektion d_2 klein, denn der Riss besitzt ja keine Zugfestigkeit und die linke Seite kann bei der Radstellung (2) frei zurückfedern. Hingegen ist im **Fall 2** mit umgekehrter Rissneigung, jedoch in gleicher Messrichtung, das Rissverhalten aus folgenden zwei Gründen anderes:

Zum einen wird der Betrag d_1 im Falle 2 grösser ausfallen als im Falle 1, weil der Riss bei der Radstellung (1) im Fall 2 den Raddruck nicht auf die rechte Seite übertragen kann. (Im Fall 1 kann der Riss den Raddruck nach rechts übertragen).

Zum anderen federt der Messpunkt (1) im Fall 2 bei der Radstellung auf (2) weniger zurück als im Fall 1, weil der Raddruck die linke Seite durch den Riss noch unter Druck setzt. Folglich wird der Deflektionssprung ($d_1 - d_2$) klein.

Durch eine Messung des Deflektionssprunges kann die Richtung der Rissneigung beurteilt werden.

Die gemessenen Deflektionssprünge ($d_1 - d_2$) sind in Tabellen 3.5a bis 3.5d zusammengestellt: Darin ist die Beurteilung der Rissneigung ebenfalls angegeben.

Die Neigung des Risses R_0 findet durch die gemessenen Deflektionssprünge Bestätigung, denn der Riss wurde künstlich durch Einlegen einer Plastikfolie auf die Arbeitsfuge erstellt; daher ist seine Neigung bekannt. Hingegen können die Neigung der Risse R_{10} , R_{20} und R_{30} , welche natürlich entstanden sind, an Hand der Deflektionssprünge (Tabellen 3.5a bis 3.5d) beurteilt werden. Die Ergebnisse daraus sind folgende:

- R₀: Der Riss verläuft von oben rechts nach unten links.
- R₁₀: Der Riss verläuft von oben rechts nach unten links.
- R₂₀: Der Rissverlauf ist noch nicht bestimmbar.
- R₃₀: Der Riss verläuft von oben links nach unten rechts.

Andererseits kann die Rissneigung auch durch einen Vergleich zweier Maximaldeflektionen, deren Messpunkte über einen Riss gegenüberstehen, bestimmt werden. In diesem Fall sind die Maximaldeflektionen ohne Ueberfahren der Risse zu berücksichtigen. Die Auswertung bestätigt das obige Ergebnis der Rissneigung, wie die Beurteilung in den Tabellen 3.6a bis 3.6d zeigt.

Tabelle 3.5a Deflektionssprünge $d_1 - d_2$ bei Ueberfahren der Risse**Riss-Nr. R0**

Messpunkte	Deflektionssprünge $d_1 - d_2$ (1/100 mm)			Beurteilung der Rissneigung
	1991	1994	1995	Messpunkte: linke Seite: gerade Nr. rechte Seite: ungerade Nr. Deflektionssprung links ist grösser als Deflektionssprung rechts Rissneigung verläuft von oben rechts nach unten links
gerade Nr.				
902	9	12	16	
904	10	6	14	
906	10	16	11	
908	17	18	16	
Statistik				
m	12	13	14	
cv	0.32	0.41	0.17	
ungerade Nr.				
901	1	11	4	
903	1	6	4	
905	2	13	5	
907	6	9	5	
Statistik				
m	3	10	14	
cv	0.95	0.31	0.17	

Tabelle 3.5b Deflektionssprünge $d_1 - d_2$ bei Ueberfahren der Risse**Riss-Nr. R10**

Messpunkte	Deflektionssprünge $d_1 - d_2$ (1/100 mm)			Beurteilung der Rissneigung
	1991	1994	1995	Messpunkte: linke Seite: gerade Nr. rechte Seite: ungerade Nr. Deflektionssprung links ist grösser als Deflektionssprung rechts Rissneigung verläuft von oben rechts nach unten links
gerade Nr.				
912	6	6	12	
914	10	8	9	
916	10	6	12	
918	8	9	8	
Statistik				
m	9	8	11	
cv	0.22	0.21	0.20	
ungerade Nr.				
911	5	1	6	
913	1	4	8	
915	2	5	1	
917	10	9	12	
Statistik				
m	5	5	7	
cv	0.90	0.70	0.68	

Tabelle 3.5c Deflektionssprünge $d_1 - d_2$ bei Ueberfahren der Risse

Riss-Nr. R20

Messpunkte	Deflektionssprünge $d_1 - d_2$ (1/100 mm)			Beurteilung der Rissneigung
	1991	1994	1995	Messpunkte: linke Seite: gerade Nr. rechte Seite: ungerade Nr. Deflektionssprung links ist fast wie Deflektionssprung rechts Rissneigung an Hand der Deflektionssprünge nicht bestimmbar
gerade Nr.				
922	3	8	-	
924	6	3	3	
926	5	2	5	
928	11	4	10	
Statistik				
m	7	5	6	
cv	0.55	0.62	0.60	
ungerade Nr.				
921	1	-	-	
923	2	10	7	
925	5	3	8	
927	4	3	6	
Statistik				
m	3	5	7	
cv	0.61	0.75	0.14	

Tabelle 3.5d Deflektionssprünge $d_1 - d_2$ bei Ueberfahren der Risse

Riss-Nr. R30

Messpunkte	Deflektionssprünge $d_1 - d_2$ (1/100 mm)			Beurteilung der Rissneigung
	1991	1994	1995	Messpunkte: linke Seite: gerade Nr. rechte Seite: ungerade Nr. Deflektionssprung links ist kleiner als Deflektionssprung rechts Rissneigung verläuft von oben links nach unten rechts
gerade Nr.				
932	2	3	5	
934	2	3	6	
936	4	1	5	
938	6	1	10	
Statistik				
m	4	2	7	
cv	0.55	0.58	0.37	
ungerade Nr.				
931	7	11	5	
933	6	8	5	
935	2	11	2	
937	4	7	4	
Statistik				
m	5	10	4	
cv	0.47	0.22	0.35	

Tabelle 3.6a Vergleich der Maximaldeflektionen,
Messungen am Riss R0,
Riss nicht überfahren

R0

linke Seite des Risses			rechte Seite des Risses		
Maximaldeflektionen: $d_{1, \text{links}}$ (1/100 mm)			Maximaldeflektionen: $d_{1, \text{rechts}}$ (1/100 mm)		
Messpunkte	1994	1995	Messpunkte	1994	1995
902	23	17	901	22	18
904	31	32	903	-	16
906	19	23	905	17	23
908	23	27	907	19	23

- Messwert nicht verwertbar

Messung 1994: $d_{1, \text{links}} > d_{1, \text{rechts}}$
 Messung 1995: $d_{1, \text{links}} > d_{1, \text{rechts}}$
 Beurteilung: Rissneigung von oben links nach unten rechts
 (stimmt mit der früheren Beurteilung nicht überein)

Tabelle 3.6b Vergleich der Maximaldeflektionen,
Messungen am Riss R10,
Riss nicht überfahren

R10

linke Seite des Risses			rechte Seite des Risses		
Maximaldeflektionen: $d_{1, \text{links}}$ (1/100 mm)			Maximaldeflektionen: $d_{1, \text{rechts}}$ (1/100 mm)		
Messpunkte	1994	1995	Messpunkte	1994	1995
912	11	11	911	20	11
914	9	16	913	23	20
916	14	14	915	15	19
918	14	17	917	23	20

Messung 1994: $d_{1, \text{links}} < d_{1, \text{rechts}}$
 Messung 1995: $d_{1, \text{links}} < d_{1, \text{rechts}}$
 Beurteilung: Rissneigung von oben rechts nach unten links
 (stimmt mit der früheren Beurteilung gut überein.)

Tabelle 3.6c Vergleich der Maximaldeflektionen,
Messungen am Riss R20,
Riss nicht überfahren

R20

linke Seite des Risses			rechte Seite des Risses		
Maximaldeflektionen: $d_{1, \text{links}}$ (1/100 mm)			Maximaldeflektionen: $d_{1, \text{rechts}}$ (1/100 mm)		
Messpunkte	1994	1995	Messpunkte	1994	1995
922	14	7	921	37	23
924	14	20	923	31	22
926	19	23	925	26	34
928	14	19	927	29	27

Messung 1994: $d_{1, \text{links}} < d_{1, \text{rechts}}$
 Messung 1995: $d_{1, \text{links}} < d_{1, \text{rechts}}$
 Beurteilung: Rissneigung von oben rechts nach unten links
 (stimmt mit der früheren Beurteilung gut überein.)

Tabelle 3.6d Vergleich der Maximaldeflektionen,
Messungen am Riss R30,
Riss nicht überfahren

R30

linke Seite des Risses			rechte Seite des Risses		
Maximaldeflektionen: $d_{1, \text{links}}$ (1/100 mm)			Maximaldeflektionen: $d_{1, \text{rechts}}$ (1/100 mm)		
Messpunkte	1994	1995	Messpunkte	1994	1995
932	19	-	931	14	29
934	25	20	933	9	14
936	17	-	935	20	13
938	26	22	937	-	19

- Messwerte nicht verwertbar

Messung 1994: $d_{1, \text{links}} > d_{1, \text{rechts}}$
 Messung 1995: $d_{1, \text{links}} > d_{1, \text{rechts}}$
 Beurteilung: Rissneigung von oben links nach unten rechts
 (stimmt mit der früheren Beurteilung gut überein.)

3.2.5 Untergrundtragfähigkeit und E-Modul des Oberbaues

Mittels Muldenmessung können die Untergrundtragfähigkeit (k-Wert) und die Oberbausteifigkeit (Eh^3) nach der Theorie der Platten auf elastischer Unterlage bestimmt werden. Danach kann der äquivalente E-Modul des zusammengesetzten Oberbaues (Belag und Zementstabilisierung) berechnet werden, weil die totale Dicke bekannt ist. Die berechneten Werte sind in Tabelle 3.7 zusammengestellt.

Tabelle 3.7 Untergrundtragfähigkeit (k-Wert) und äquivalenter E-Modul des Oberbaues

Einheiten: für k: MN/m^3 für E: N/mm^2

Mittelwerte	1985		1991		1994		1995	
	k	E	k	E	k	E	k	E
Feld 2	110	4100	-	-	120	2400	180	2000
Feld 3	160	5600	180	3700	150	2400	180	1900
Feld 4	130	9800	140	6200	150	4600	180	6200
Riss R0	140	1600	370	600	160	800	200	700
Riss R10	210	2000	300	700	140	1400	160	1400
Riss R20	180	8300	220	1800	110	3000	130	2200
Riss R30	160	4600	230	2200	150	1600	160	1600

Untergrundtragfähigkeit

Die Untergrundtragfähigkeit, k-Wert, indirekt aus der Muldenmessung bestimmt, variiert zwischen 110 und 220 MN/m^3 , wenn die drei hohen Werte 230, 300 und 370 NM/m^3 ausgenommen werden. Der k-Wert von 110 bis 220 MN/m^3 entspricht einem M_{E1} -Wert von 70'000 bis 150'000 kN/m^2 . Somit ist die Untergrundtragfähigkeit der Versuchspiste nach der Norm SN 640 324 (Dimensionierung Strassenoberbau) der Klasse S4 (Sehr hohe Tragfähigkeit) zuzuordnen. Die Kalkstabilisierung (1980) hat deutlich eine positive Wirkung gezeigt.

E-Modul des Oberbaues

Der E-Modul des aus Belag und Stabilisierung zusammengesetzten Oberbaues fällt in den letzten zehn Jahren rund auf die Hälfte ab. Das Feld 4 weist den höchsten und der Riss R0 (künstlich durch Einlegen einer Folie erstellt) den niedrigsten E-Modul auf.

Der Verkehr war zwar gering, die Achslasten waren aber gross (bis 240 kN)

3.2.6 Ausgefallene Mulden bei Rissen

In den Abb. 3.5a bis 3.5d sind vier ausgefallene Einzelmulden dargestellt, die nachstehend kommentiert werden:

Abb. 3.5a

R0 in Feld 3, Messpunkt 902 von Messung 1994

Ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Fällen ist ersichtlich:

Fall 1, Riss überfahren

mit Maximaldeflektion	d_1	= 29	(1/100 mm)
und Deflektionssprung	$d_1 - d_2$	= 12	(1/100 mm), und

Fall 2, Riss nicht überfahren

mit Maximaldeflektion	d_1	= 23	(1/100 mm)
und Deflektionsdifferenz	$d_1 - d_2$	= 6	(1/100 mm)

Während ein Deflektionssprung im Fall 1 ganz deutlich sichtbar ist, kann die Deflektionsdifferenz ($d_1 - d_2$) im Fall 2 aus dem folgenden Grund nicht als Deflektionssprung gedeutet werden: Alle Deflektionen sind allgemein gross und nehmen gleichmässig ab. Daher weist die Mulde keinen unregelmässigen Deflektionssprung auf.

Das Tragverhalten des Messpunktes hat sich verschlechtert.

Abb. 3.5b

R10 in Feld 3, Messpunkt 916 von Messung 1995

Ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Fällen ist erkennbar:

Fall 1, Riss überfahren

mit Maximaldeflektion	d_1	= 23	(1/100 mm)
und Deflektionssprung	$d_1 - d_2$	= 12	(1/100 mm), und

Fall 2, Riss nicht überfahren

mit Maximaldeflektion	d_1	= 14	(1/100 mm)
und Deflektionsdifferenz	$d_1 - d_2$	= 2	(1/100 mm)

Das Tragverhalten des Messpunktes hat sich ein wenig verschlechtert.

Abb. 3.5c

R20 in Feld 4, Messpunkt 925 von Messung 1995

Ebenfalls ist ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Fällen erkennbar:

Fall 1, Riss überfahren

mit Maximaldeflektion	d_1	= 12	(1/100 mm)
und Deflektionssprung	$d_1 - d_2$	= 8	(1/100 mm)

Fall 2, Riss nicht überfahren

mit Maximaldeflektion	$d_1 = 34$	(1/100 mm)
und Deflektionsdifferenz	$d_1 - d_2 = 10$	(1/100 mm)

Das Tragverhalten des Messpunktes hat sich stark verschlechtert.

Abb. 3.5d

R30 in Feld 4, Messpunkt **931** von Messung 1995

Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Fällen erkennbar:

Fall 1, Riss überfahren

mit Maximaldeflektion	$d_1 = 20$	(1/100 mm)
und Deflektionssprung	$d_1 - d_2 = 2$	(1/100 mm), und

Fall 2, Riss nicht überfahren

mit Maximaldeflektion	$d_1 = 29$	(1/100 mm)
und Deflektionsdifferenz	$d_1 - d_2 = 16$	(1/100 mm)

Das Tragverhalten des Messpunktes hat sich stark verschlechtert.

Abb. 3.5a

Einzelmulden des Messpunktes 902 bei Riss R0 in Feld 3 , Messung 1994

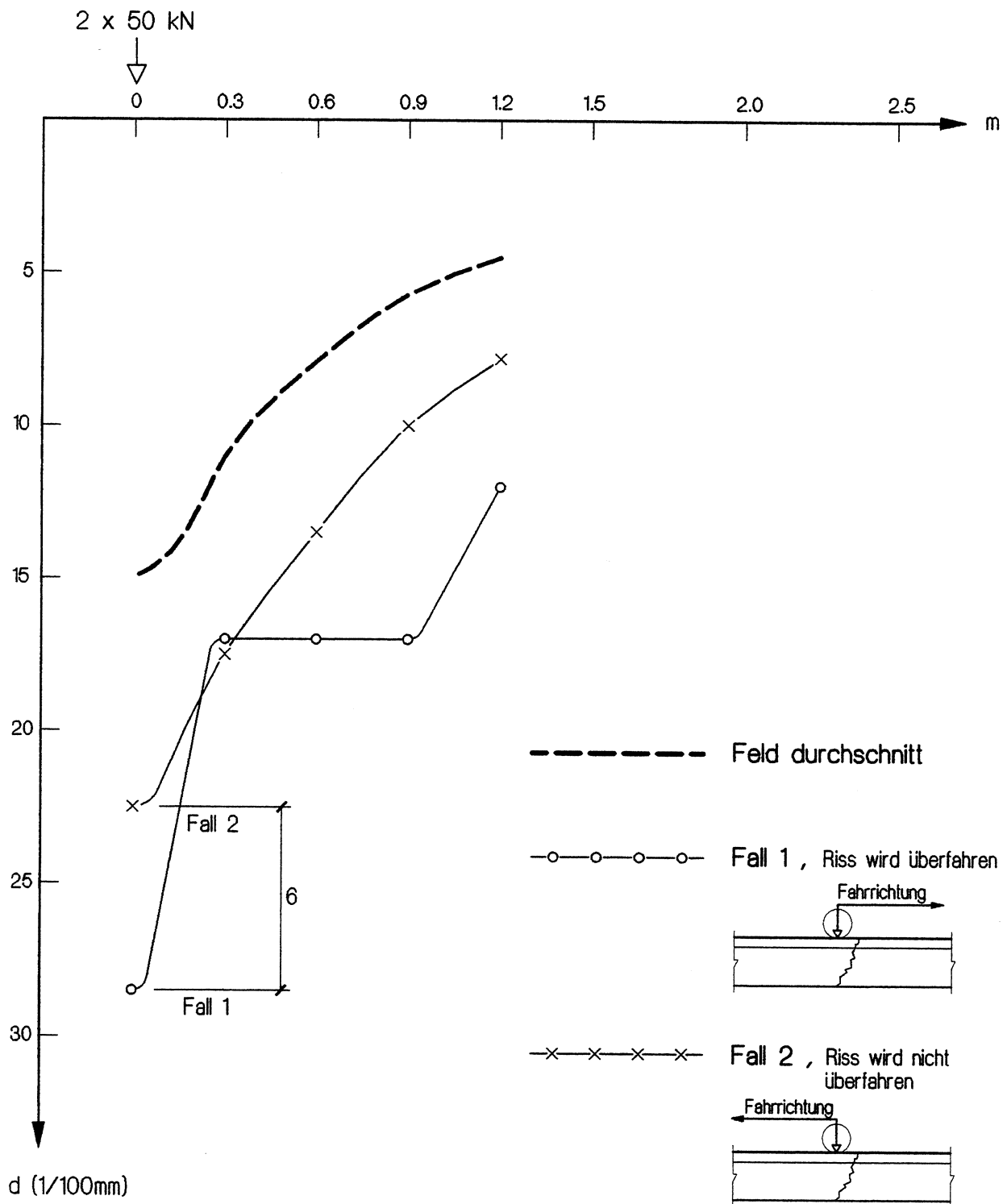


Abb. 3.5b

Einzelmulden des Messpunktes 916 bei Riss R10 in Feld 3 , Messung 1995

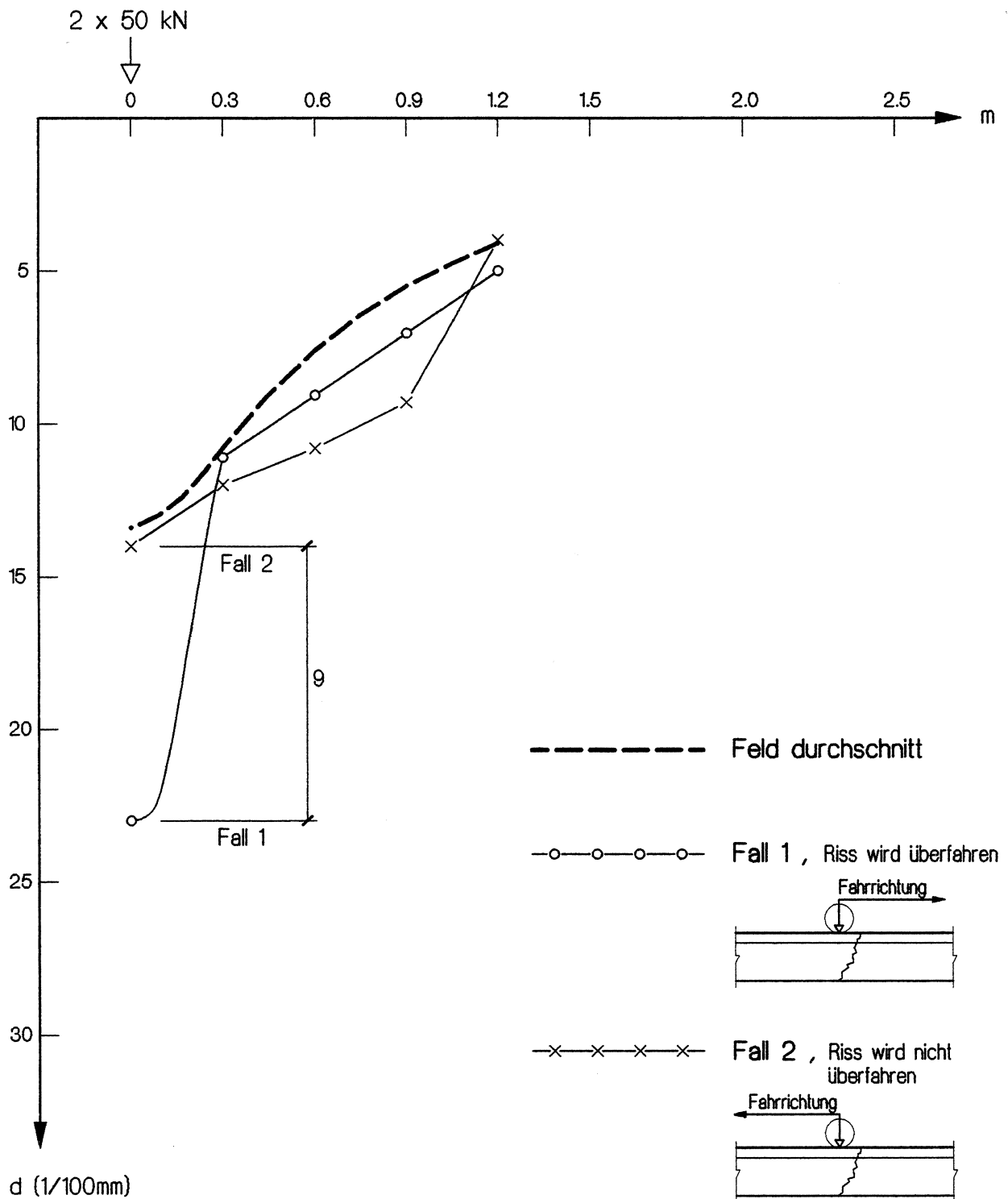


Abb. 3.5c

Einzelmulden des Messpunktes 925 bei Riss R20 in Feld 4 , Messung 1995

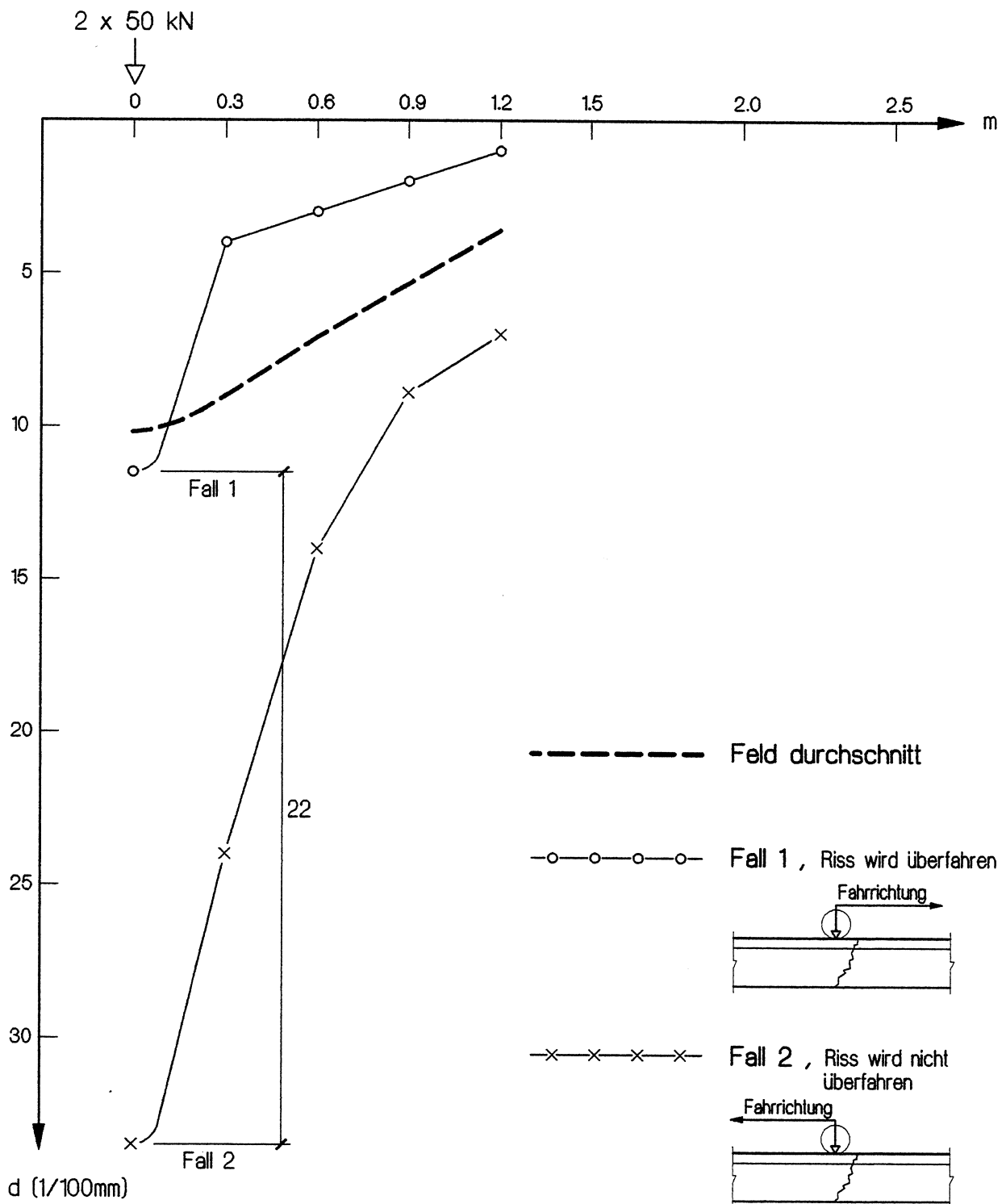
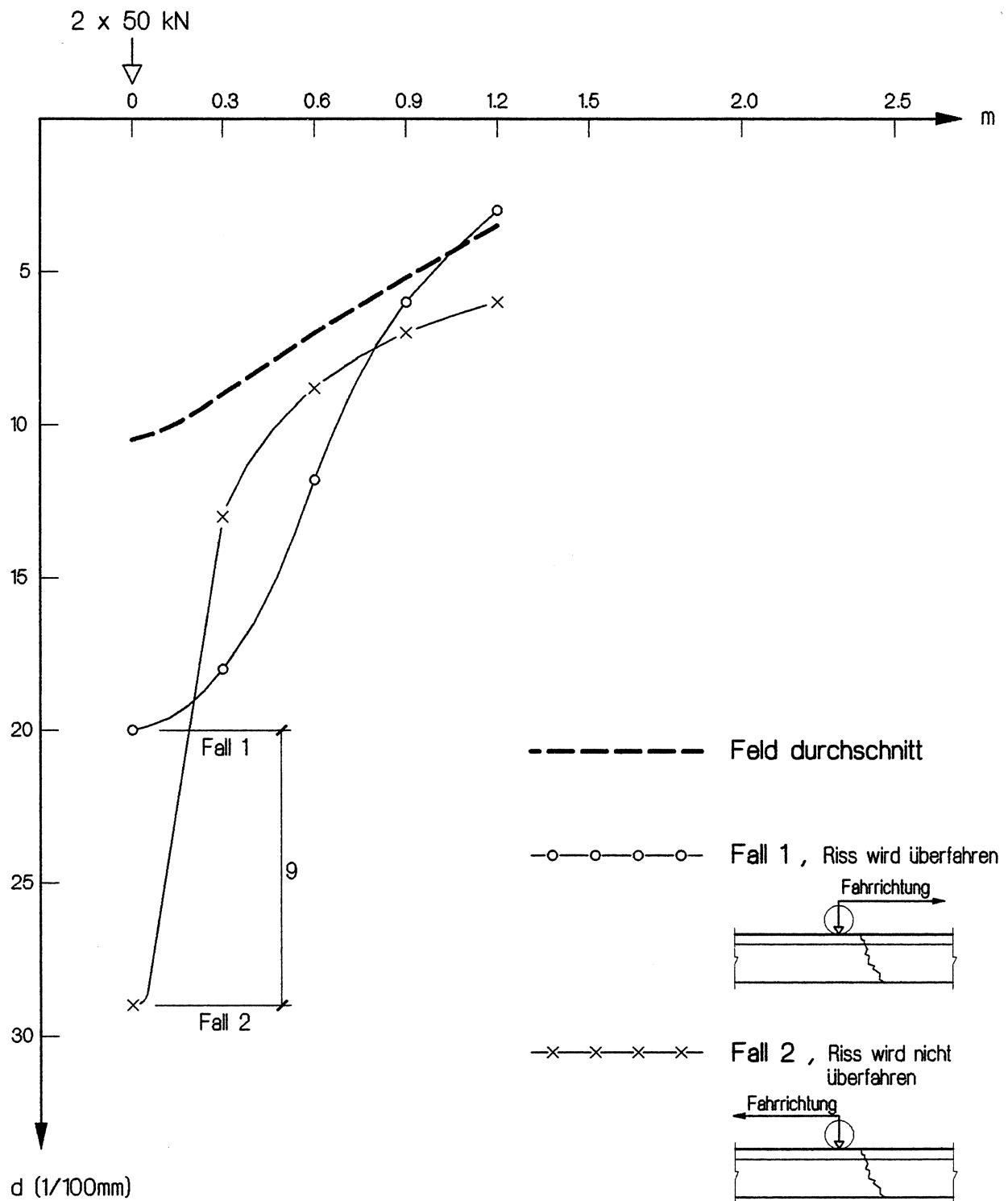


Abb. 3.5d

Einzelmulden des Messpunktes 931 bei Riss R30 in Feld 4 , Messung 1995



4. Schlussfolgerung

Bei der vorliegenden Forschungsarbeit mit dem Thema „Einwirkung von Frost / Tausalzssalz auf den zementstabilisierten Oberbau in Rissnähe“ wurden Labor- und Felduntersuchungen durchgeführt.

Zu Beginn der Arbeit wurden siebzehn Proben der Zementstabilisierung mittels Kernbohrung (D=150 mm, L=300 mm) aus der Versuchspiste an der Aufbereitungsanlage beim Limmattalerkreuz (N1/N20, ZH) entnommen. Die Versuchspiste wurde 1980 zwecks der vorangehenden Forschungsarbeit über die Tragfähigkeit des zementstabilisierten Oberbaues erstellt und weist durchgehende Schwindrisse auf, welche für die Untersuchung der vorliegenden Arbeit dienen.

In den Winterperioden 1990-1994 wurde Kochsalz bei den Rissen gestreut. Damit wird angenommen, dass die Salzlösung in die Risse eindringen und die Rissoberflächen „besalzen“ kann. Sollte die Salzlösung die Oberflächen der Risse aus Zementstabilisierung schädigen, so kann dies durch die Muldenmessung mit dem Benkelmanbalken festgestellt werden.

In den Labors (LPM Baustoffprüfinstitut, Beinwil am See, EMPA, und Ingenieurbureau Heierli AG) wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Frost/Tau-Prüfungen mit Wasser und 3%-iger Salzlösung.
- Wechselbad der Proben in 3%-iger Salzlösung und in Luft.
- Eingraben der Proben im Boden nach einmaliger Sättigung in 3%-iger Salzlösung

Die Laboruntersuchungen haben folgendes ergeben:

- Kochsalzwasser **schädigt** die Zementstabilisierung bei **Zimmertemperatur nicht**.
- Hingegen: Kochsalzwasser **schädigt** die Zementstabilisierung bei mehrmaligem Gefrieren **eindeutig**. Bis jetzt gibt es jedoch noch keine plausible Erklärung dazu. Gegenwärtig läuft gemäss Aussage der EMPA ein internationales Forschungsprojekt zu diesem Thema.
- Bei der Laboruntersuchung wird eine 3%-ige Salzlösung verwendet. Dies kommt daher, dass bei dieser Konzentration die stärksten Schäden entstehen. Sowohl bei verdünnteren als auch bei konzentrierteren Lösungen sind die Schäden weniger gravierend. Das Meerwasser weist in der Regel eine Kochsalzkonzentration von ca. 3 bis 3.5% auf.

Auf der Versuchspiste wurden 1991, 1994 und 1995 pro Jahr eine Serie von Muldenmessungen im Felde und insbesondere bei den Rissen durchgeführt. Die Messungen haben folgendes ergeben:

- Die Maximaldeflektionen bei den Rissen sind grösser als diejenigen in den Feldern zwischen den Rissen.
- Absolut gesehen sind die Maximaldeflektionen im Vergleich mit denjenigen von herkömmlichen Strassenoberbauten sehr klein und liegen unter 25 (1/100 mm), dies bei einer Messgenauigkeit des Benkelmanbalkens von 5 (1/100 mm).
- Die gemittelten Mulden im Felde sind in den letzten 10 Jahren, von 1985 bis 1995, nicht grösser bzw. voluminöser geworden.
- Die gemittelten Maximaldeflektionen bei den Rissen nehmen seit 1985 nicht systematisch zu. Die Zunahme der durchschnittlichen Deflektionen liegt im Bereich der Messgenauigkeit des Gerätes.
- Bei einigen Risspunkten ist allerdings eine Verschlechterung (Vergrösserung um 10 bis 25 (1/100 mm)) der Maximaldeflektion gemessen worden. Obwohl in den vergangen 5 Jahren keine strengen Winter da waren, könnte die Verschlechterung der Riss-Tragfähigkeit auf die Einwirkung von Frost/Tausalz zurückgeführt werden. Diese Erklärung ist allerdings noch unsicher, da auch eine Durchnässung des Untergrundes bei den Rissen zu der Vergrösserung der Maximaldeflektionen geführt haben könnte.
- Bei den Rissen wurden erwartungsgemäss Deflektionssprünge beim Ueberfahren der Risse gemessen. Die Deflektionssprünge sind je nach Riss Nr. unterschiedlich. Beim Riss R0 sind sie am grössten und betragen durchschnittlich bis 14 (1/100mm). Bei den anderen Rissen liegen sie um 5 bis 7 (1/100mm). Der Deflektionssprung stellt ein Mass der Kraftübertragungsfähigkeit eines Risses dar. Je grösser er ist, desto lockerer ist die Rissfuge und somit desto schwächer ist die Kraftübertragung.
- Die Risse sind heute noch „intakt“. Es ist keine Tendenz zu progressiven Brüchen festzustellen.
- Der E-Modul des zusammengesetzten Oberbaues (Belag und Zementstabilisierung zusammen) ist rund um die Hälfte abgefallen.
- Der Untergrund der Versuchspiste ist seit den letzten 10 Jahren etwa konstant und sehr tragfähig geblieben (S4- Boden).
- Mittels Muldenmessung kann die Rissneigung bestimmt werden. Den Beweis dafür liefert Riss R0, der künstlich durch Einlegen einer Plastikfolie bei einer Arbeitsfuge erstellt wurde und dessen Rissneigung daher bekannt ist. Bei den anderen Rissen, die natürlich entstanden sind, können ihre Rissneigungen nur durch Sondierung an Ort verifiziert werden. Darauf wurde im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit aber verzichtet.

Folgerungen:

Schwindrisse und Arbeitsfugen sind gemäss langjähriger Erfahrung mit zementstabilisierten Oberbauten unvermeidlich. Dabei hängt die Häufigkeit und Oeffnungsbreite der Schwindrisse von vielen Faktoren ab. Die Risse in der Zementstabilisierung schlagen häufig durch die bituminösen Beläge hindurch. Es entstehen somit Belagsschäden, wodurch Salzwasser in die Risse eindringen und die Zementstabilisierung bei mehrmaligem Gefrieren schädigen kann. Zudem können die Risskanten im Belag ausbrechen.

- Diesem Schaden kann zum Beispiel durch Einbau einer SAMI-Schicht zum Abdichten über der Zementstabilisierung vorgebeugt werden.
- Um den Schaden nachträglich zu beheben, gibt es in die Praxis nur eine Lösung, nämlich, die Risse so bald wie möglich zu reparieren, d.h. dicht machen.

Vermutlich ist das Kochsalz jedoch nicht die einzige Ursache für die Schäden an Zementstabilisierungen bei Frost. Man nimmt an, dass saures Meteorwasser ebenfalls eine der Ursachen darstellen könnte. Die Vermutung stützt sich auf die folgende Ueberlegung: Zementstabilisierungen werden in der Schweiz bisher nur mit normalem Portlandzement hergestellt, der bekanntlich einen hohen Gehalt an Tricalciumaluminat, C_3A (bis zu 12%) aufweist. Saurer Regen enthält Sulfate SO_4 , das mit C_3A das Mineral Ettringit bilden kann. Ettringit ist viel voluminöser als die Ausgangsstoffe, deshalb führt es zum Sulfat-Treiben, das die Zementstabilisierung zerstören kann.

[illegible]

Gemessene Mulden**im Felde**

Anhang 1-02

Feld 3**Messung 1991**Messung vom **19.03.1991** mit Achslast **200 kN**

Deflektionen umgerechnet für Normachslast 100 kN

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
300	-	-	-	-	-	-	-	-
301	12	7	5	4	2	2	1	0
302	12	11	6	6	5	2	1	0
303	9	7	6	6	5	4	1	0
304	10	8	6	6	5	2	1	0
305	13	11	9	8	6	2	1	0
306	10	8	6	5	4	3	1	0
307	8	6	4	3	2	2	2	0
311	8	6	4	3	2	1	1	0
312	12	11	10	7	6	3	1	0
313	8	7	6	5	4	3	1	0
314	10	6	5	4	3	2	1	0
315	15	12	10	8	6	4	2	0
316	14	12	10	8	6	5	2	0
317	13	10	8	7	5	3	1	0
Statistik								
n	14	14	14	14	14	14	14	
m	11.0	8.7	6.8	5.7	4.4	2.7	1.2	0
s	2.3	2.3	2.2	1.8	1.6	1.1	0.4	
cv	0.21	0.27	0.32	0.31	0.36	0.39	0.35	

Gemessene Mulden**im Felde**

Anhang 1-03

Feld 4**Messung 1991**Messung vom **19.03.1991** mit Achslast **200 kN**

Deflektionen umgerechnet für Normachslast 100 kN

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

Mess-Punkt	d ₁ 0.0 m	d ₂ 0.3 m	d ₃ 0.6 m	d ₄ 0.9 m	d ₅ 1.2 m	d ₆ 1.5 m	d ₇ 2.5 m	d ₈ 5.0 m
401	7	5	4	3	2	2	1	0
402	10	9	7	6	5	4	1	0
403	-	-	-	-	-	-	-	-
404	15	13	10	8	7	6	0	0
405	11	9	7	6	4	3	1	0
406	12	10	9	7	6	3	1	0
407	10	8	6	5	4	3	1	0
411	12	10	8	7	6	4	2	0
412	14	13	11	9	6	5	1	0
413	12	11	9	7	5	4	1	0
414	12	10	8	6	4	3	1	0
415	11	10	8	6	4	3	1	0
416	13	12	11	9	6	5	1	0
417	8	6	4	3	2	2	2	0
Statistik								
n	13	13	13	13	13	13	13	
m	11.3	9.7	7.9	6.3	4.7	3.6	1.1	0
s	2.2	2.4	2.3	1.9	1.6	1.2	0.5	
cv	0.20	0.25	0.29	0.30	0.33	0.33	0.46	

Gemessene Mulden bei den Rissen

Anhang 1-04

Riss R0**im Feld 3****Messung 1991**Messung vom **19.03.1991** mit Achslast **200 kN**Deflektionen umgerechnet für Normachslast **100 kN**

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

vor Riss: Riss wurde überfahren

nach Riss: Riss wurde nicht überfahren

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
vor Riss								
901	20	19	8	8	4	1	1	0
902	14	5	3	3	2	2	1	0
903	12	11	6	5	4	2	1	0
904	18	8	5	4	2	2	1	0
905	10	8	5	4	2	2	1	0
906	16	6	5	4	2	2	1	0
907	15	9	5	4	2	2	1	0
908	24	7	4	3	1	1	1	0
Statistik								
n	8	8	8	8	8	8	8	
m	16.1	9.1	5.1	4.4	2.4	1.8	1.0	0
s	4.5	4.4	1.5	1.6	1.1	0.5	0	
cv	0.28	0.48	0.28	0.37	0.45	0.26	0	
nach Riss								
901	-	-	-	-	-	-	-	-
902	-	-	-	-	-	-	-	-
903	-	-	-	-	-	-	-	-
904	-	-	-	-	-	-	-	-
905	-	-	-	-	-	-	-	-
906	-	-	-	-	-	-	-	-
907	-	-	-	-	-	-	-	-
908	-	-	-	-	-	-	-	-
Statistik								
n								
m								
s								
cv								

Gemessene Mulden bei den Rissen

Anhang 1-05

Riss R10**im Feld 3****Messung 1991**Messung vom **19.03.1991** mit Achslast **200 kN**

Deflektionen umgerechnet für Normachslast 100 kN

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

vor Riss: Riss wurde überfahren

nach Riss: Riss wurde nicht überfahren

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
vor Riss								
911	12	7	6	5	3	2	1	0
912	15	9	5	4	2	2	1	0
913	16	15	5	4	2	2	1	0
914	18	8	6	5	3	2	1	0
915	13	11	10	4	2	1	1	0
916	17	7	4	4	3	1	1	0
917	16	6	4	3	2	1	1	0
918	14	6	3	2	2	1	1	0
Statistik								
n	8	8	8	8	8	8	8	
m	15.1	8.6	5.4	3.9	2.4	1.5	1.0	0
s	2.0	3.1	2.1	1.0	0.5	0.5	0	
cv	0.14	0.36	0.40	0.26	0.22	0.35	0.00	
nach Riss								
911	-	-	-	-	-	-	-	-
912	-	-	-	-	-	-	-	-
913	-	-	-	-	-	-	-	-
914	-	-	-	-	-	-	-	-
915	-	-	-	-	-	-	-	-
916	-	-	-	-	-	-	-	-
917	-	-	-	-	-	-	-	-
918	-	-	-	-	-	-	-	-
Statistik								
n								
m								
s								
cv								

Gemessene Mulden bei den Rissen

Anhang 1-06

Riss R20**im Feld 4****Messung 1991**Messung vom **19.03.1991** mit Achslast **200 kN**

Deflektionen umgerechnet für Normachslast 100 kN

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

vor Riss: Riss wurde überfahren

nach Riss: Riss wurde nicht überfahren

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
vor Riss								
921	15	14	7	5	3	2	1	0
922	14	11	6	5	3	3	1	0
923	18	16	10	8	5	2	2	1
924	18	12	7	6	4	3	1	0
925	13	8	6	3	2	1	0	0
926	11	6	4	3	1	1	1	0
927	14	10	4	3	1	1	1	0
928	18	7	6	4	3	2	1	0
Statistik								
n	8	8	8	8	8	8	8	
m	15.1	10.5	6.3	4.6	2.8	1.9	1.0	0
s	2.6	3.5	1.9	1.8	1.4	0.8	0.5	
cv	0.17	0.33	0.31	0.38	0.50	0.46	0.53	
nach Riss								
921	-	-	-	-	-	-	-	-
922	-	-	-	-	-	-	-	-
923	-	-	-	-	-	-	-	-
924	-	-	-	-	-	-	-	-
925	-	-	-	-	-	-	-	-
926	-	-	-	-	-	-	-	-
927	-	-	-	-	-	-	-	-
928	-	-	-	-	-	-	-	-
Statistik								
n								
m								
s								
cv								

Gemessene Mulden bei den Rissen

Anhang 1-07

Riss R30**im Feld 4****Messung 1991**Messung vom **19.03.1991** mit Achslast **200 kN**

Deflektionen umgerechnet für Normachslast 100 kN

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

vor Riss: Riss wurde überfahren

nach Riss: Riss wurde nicht überfahren

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
vor Riss								
931	20	13	7	4	2	1	1	0
932	14	12	9	7	4	4	1	0
933	15	9	7	4	2	2	1	0
934	14	12	8	6	4	4	1	0
935	10	8	6	5	4	1	1	0
936	12	8	6	5	3	2	1	0
937	13	9	7	6	5	5	1	0
938	15	9	5	4	3	2	1	0
Statistik								
n	8	8	8	8	8	8	8	
m	14.1	10.0	6.8	5.1	3.4	2.6	1.0	0
s	2.9	2.0	1.0	1.1	1.1	1.5		
cv	0.21	0.20	0.15	0.22	0.31	0.57		
nach Riss								
931	-	-	-	-	-	-	-	-
932	-	-	-	-	-	-	-	-
933	-	-	-	-	-	-	-	-
934	-	-	-	-	-	-	-	-
935	-	-	-	-	-	-	-	-
936	-	-	-	-	-	-	-	-
937	-	-	-	-	-	-	-	-
938	-	-	-	-	-	-	-	-
Statistik								
n								
m								
s								
cv								

Gemessene Mulden**im Felde****Anhang 2-01****Feld 2****Messung 1994**Messung vom **10.05.1994** mit Achslast **130 kN**

Deflektionen umgerechnet für Normachslast 100 kN

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

keine Messungen

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
201	19	16	9	7	5	3	2	0
202	19	12	9	7	5	3	1	0
203	17	12	9	7	5	3	2	0
204	12	10	8	7	5	3	1	0
205	23	19	15	11	9	6	2	0
206	16	13	10	9	7	5	2	0
207	17	14	12	8	6	5	3	0
208	14	11	8	7	5	3	2	0
209	17	14	11	9	6	5	2	0
211	23	20	12	9	5	3	2	0
212	17	15	11	9	8	6	2	0
213	28	20	11	9	6	6	2	0
214	19	14	11	9	8	6	2	0
215	17	14	11	9	6	5	2	0
216	22	19	12	10	8	6	2	0
217	12	9	8	7	6	5	2	0
218	17	12	9	7	5	5	2	0
219	17	15	12	10	8	6	2	0
Statistik								
n	18	18	18	18	18	18	18	
m	18.1	14.4	10.4	8.4	6.3	4.7	2.0	0
s	4.0	3.3	1.9	1.3	1.4	1.3	0.4	
cv	0.22	0.23	0.18	0.15	0.22	0.28	0.21	

Gemessene Mulden**im Felde****Anhang 2-02****Feld 3****Messung 1994**Messung vom **10.05.1994** mit Achslast **130 kN**

Deflektionen umgerechnet für Normachslast 100 kN

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
300	25	17	11	7	5	3	2	0
301	14	9	8	5	5	2	1	0
302	12	9	8	5	5	3	2	0
303	12	9	8	5	5	3	2	0
304	14	11	9	7	5	3	1	0
305	9	8	6	5	5	3	1	0
306	-	-	-	-	-	-	-	-
307	-	-	-	-	-	-	-	-
311	11	9	6	5	5	3	2	0
312	15	11	8	5	3	3	2	0
313	14	11	8	7	5	5	2	0
314	22	15	11	9	5	3	2	0
315	19	15	12	12	8	5	2	0
316	14	12	9	7	3	2	1	0
317	15	12	9	6	3	3	0	0
Statistik								
n	13	13	13	13	13	13	13	
m	15.1	11.4	8.7	6.5	4.8	3.2	1.5	0
s	4.5	2.8	1.8	2.1	1.3	0.9	0.7	
cv	0.30	0.25	0.21	0.32	0.27	0.29	0.43	

Gemessene Mulden**im Felde****Anhang 2-03****Feld 4****Messung 1994**Messung vom **10.05.1994** mit Achslast **130 kN**

Deflektionen umgerechnet für Normachslast 100 kN

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
401	15	12	11	10	8	6	1	0
402	15	14	11	9	8	6	1	0
403	11	9	8	7	3	2	1	0
404	22	20	19	18*	15*	8*	2	0
405	15	12	9	3	1	1	1	0
406	9	6	3	3	2	1	1	0
407	9	6	5	3	2	1	1	0
411	15	14	12	9	5	2	1	0
412	17	15	14	13	9	5	2	0
413	9	8	6	3	2	1	1	0
414	22	20	19	18*	17*	9*	2	0
415	17	15	11	5	2	1	1	0
416	9	6	4	3	2	1	1	0
417	8	6	5	4	2	1	1	0
Statistik								
n	14	14	14	12	12	12	14	
m	13.8	11.6	9.8	6.0	3.8	2.3	1.2	0
s	4.8	5.0	5.1	3.5	2.9	2.0	0.4	
cv	0.35	0.43	0.52	0.58	0.75	0.88	0.35	

Gemessene Mulden bei den Rissen**Anhang 2-04****Riss R0****im Feld 3****Messung 1994**Messung vom **10.05.1994** mit Achslast **130 kN**Deflektionen umgerechnet für Normachslast **100 kN**

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

vor Riss: Riss wurde überfahren

nach Riss: Riss wurde nicht überfahren

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
vor Riss								
901	19	8	6	3	1	1	1	0
902	29	17	17	17*	12*	3	0	0
903	20	14	9	5	4	3	1	0
904	23	17	14	13	6	3	1	0
905	28	15	9	9	8	5	2	0
906	25	9	6	5	3	3	1	0
907	23	14	8	7	6	5	2	0
908	32	14	9	7	6	5	2	0
Statistik								
n	8	8	8	7	7	8	8	
m	24.9	13.5	9.8	7.0	4.9	3.5	1.2	0
s	4.5	3.3	3.8	3.3	2.3	1.4	0.7	
cv	0.18	0.25	0.39	0.47	0.48	0.40	0.56	
nach Riss								
901	22	14	11	10	6	5	2	0
902	23	17	14	10	8	6	2	0
903	11*	9*	8*	7	6	3	1	0
904	31	25	15	9	8	6	2	0
905	17	12	9	7	6	5	2	0
906	19	15	9	7	5	3	1	0
907	19	14	11	7	5	5	2	0
908	23	19	12	9	6	3	1	0
Statistik								
n	7	7	7	8	8	8	8	
m	22.0	16.6	11.6	8.3	6.3	4.5	1.6	0
s	4.6	4.4	2.3	1.4	1.2	1.3	0.5	
cv	0.21	0.26	0.20	0.17	0.19	0.29	0.32	

Gemessene Mulden bei den Rissen

Anhang 2-05

Riss R10**im Feld 3****Messung 1994**Messung vom **10.05.1994** mit Achslast **130 kN**Deflektionen umgerechnet für Normachslast **100 kN**

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

vor Riss: Riss wurde überfahren

nach Riss: Riss wurde nicht überfahren

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
vor Riss								
911	12	11	8	7	6	5	2	0
912	17	11	8	4	3	3	1	0
913	19	15	11	10	9	8	2	0
914	20	12	9	5	3	2	1	0
915	25	20	17	16	14*	12*	2	0
916	19	15	13	11	7	6	3	0
917	26	17	14	13	11	9	2	0
918	28	19	15	13	9	8	2	0
Statistik								
n	8	8	8	8	7	7	8	
m	20.8	15.0	11.9	9.9	6.9	5.9	1.9	
s	5.3	3.5	3.4	4.2	3.1	2.7	0.6	
cv	0.25	0.23	0.29	0.43	0.45	0.46	0.34	
nach Riss								
911	20	11	9	7	5	3	1	0
912	11	8	6	4	3	3	1	0
913	23	19	14	12*	8*	6*	2	0
914	9	8	6	5	5	3	1	0
915	15	12	11	3	2	1	1	0
916	14	9	8	5	5	5	2	0
917	23	17	11	7	5	3	1	0
918	14	12	9	7	3	3	1	0
Statistik								
n	8	8	8	7	7	7	8	
m	16.1	12.0	9.3	5.4	4.0	3.0	1.3	0
s	5.3	4.1	2.7	1.6	1.3	1.2	0.5	
cv	0.33	0.34	0.29	0.30	0.32	0.38	0.37	

Gemessene Mulden bei den Rissen

Anhang 2-06

Riss R20**im Feld 4****Messung 1994**Messung vom **10.05.1994** mit Achslast **130 kN**Deflektionen umgerechnet für Normachslast **100 kN**

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

vor Riss: Riss wurde überfahren

nach Riss: Riss wurde nicht überfahren

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
vor Riss								
921	-	-	-	-	-	-	-	-
922	23	15	11	9	5	3	1	0
923	22	12	6	5	3	2	1	0
924	14	11	8	7	5	3	1	0
925	11	8	5	3	2	1	1	0
926	11	9	6	6	5	3	1	0
927	15	12	6	4	3	3	1	0
928	17	13	9	7	6	5	2	0
Statistik								
n	7	7	7	7	7	7	7	
m	16.1	11.4	7.3	5.9	4.1	2.9	1.0	0
s	4.8	2.4	2.1	2.0	1.5	1.2		
cv	0.30	0.21	0.29	0.35	0.35	0.42		
nach Riss								
921	37	34	25	21	17	9	2	0
922	14	9	6	5	5	5	2	0
923	31	29	25	23	19	11	2	0
924	14	11	9	9	6	5	2	0
925	26	23	22	21	15	9	2	0
926	19	14	11	9	5	5	2	0
927	29	28	26	25	23	22	2	0
928	14	12	9	7	5	3	1	0
Statistik								
n	8	8	8	8	8	8	8	
m	23.0	20.0	16.6	15.0	11.9	8.6	1.9	0
s	9.0	9.7	8.6	8.2	7.4	6.1	0.4	
cv	0.39	0.48	0.52	0.55	0.63	0.70	0.21	

Gemessene Mulden bei den Rissen

Anhang 2-07

Riss R30**im Feld 4****Messung 1994**Messung vom **10.05.1994** mit Achslast **130 kN**

Deflektionen umgerechnet für Normachslast 100 kN

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

vor Riss: Riss wurde überfahren

nach Riss: Riss wurde nicht überfahren

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
vor Riss								
931	26	15	11	7	5	5	2	0
932	15	12	9	9	5	5	2	0
933	25	17	12	9	6	5	2	0
934	14	11	8	7	5	3	1	0
935	23	12	9	9	8	8*	2	0
936	12	11	6	4	3	3	1	0
937	22	15	11	9	8	6	2	0
938	15	14	8	4	3	3	1	0
Statistik								
n	8	8	8	8	8	7	8	
m	19.0	13.4	9.3	7.3	5.4	4.3	1.6	0
s	5.6	2.2	2.0	2.2	1.9	1.3	0.5	
cv	0.29	0.16	0.21	0.30	0.36	0.29	0.32	
nach Riss								
931	14	11	8	5	3	3	1	0
932	19	14	12	12	8	6	2	0
933	9*	8*	6	5	3	2	1	0
934	25	23	17	12	6	5	2	0
935	20	11	6	5	2	1	1	0
936	17	11	9	5	5	5	2	0
937	-	-	-	-	-	-	-	-
938	26	22	15	11	6	5	2	0
Statistik								
n	6	6	7	7	7	7	7	
m	20.2	15.3	10.4	7.9	4.7	3.9	1.6	0
s	4.6	5.7	4.4	3.6	2.1	1.9	0.5	
cv	0.23	0.37	0.41	0.46	0.45	0.48	0.34	

Gemessene Mulden**im Felde**

Anhang 3-01

Feld 2**Messung 1995**Messung vom **14.09.1995** mit Achslast **181 kN**

Deflektionen umgerechnet für Normachslast 100 kN

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
201	14	9	7	4	2	-	1	0
202	16	6	3	3	1	-	1	0
203	17	12	3	3	1	-	1	0
204	18	11	8	6	3	-	1	0
205	24	10	7	6	4	-	2	0
206	19	14	12	9	8	-	2	0
207	19	13	11	8	7	-	2	0
208	-	-	-	-	-	-	-	-
209	14	-	-	-	-	-	-	-
211	22	16	13	9	6	-	2	0
212	18	10	8	6	4	-	2	0'
213	20	17	13	8	5	-	2	0
214	21	13	11	9	5	-	2	0
215	12	10	8	7	6	-	2	0
216	16	9	6	4	3	-	2	0
217	12	10	8	6	4	-	2	0
218	14	10	8	6	3	-	1	0
219	16	12	9	8	8	-	1	0
Statistik								
n	17	16	16	16	16	-	16	
m	17.2	11.4	8.4	6.4	4.4	-	1.6	0
s	3.4	2.8	3.0	2.1	2.2	-	0.5	
cv	0.20	0.24	0.36	0.32	0.50	-	0.31	

Gemessene Mulden**im Felde**

Anhang 3-02

Feld 3**Messung 1995**Messung vom **14.09.1995** mit Achslast **181 kN**

Deflektionen umgerechnet für Normachslast 100 kN

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
300	22	17	9	6	4	-	2	0
301	14	10	8	6	2	-	1	0
302	8	7	4	4	3	-	1	0
303	16	12	7	5	4	-	1	0
304	13	9	6	5	2	-	1	0
305	8	7	6	5	4	-	1	0
306	-	-	-	-	-	-	-	-
307	-	-	-	-	-	-	-	-
311	11	9	7	6	5	-	2	0
312	16	11	8	6	5	-	2	0
313	12	10	8	6	5	-	2	0
314	12	10	8	6	5	-	2	0
315	21	14	11	7	5	-	2	0
316	13	10	8	7	6	-	2	0
317	10	9	7	5	3	-	1	0
Statistik								
n	13	13	13	13	13	-	13	
m	13.5	10.4	7.5	5.7	4.1	-	1.6	0
s	4.3	2.7	1.7	0.9	1.3	-	0.5	
cv	0.32	0.26	0.22	0.15	0.31	-	0.33	

Gemessene Mulden**im Felde****Anhang 3-03****Feld 4****Messung 1995**Messung vom **14.09.1995** mit Achslast **181 kN**

Deflektionen umgerechnet für Normachslast 100 kN

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
401	-	-	-	-	-	-	-	-
402	10	9	8	7	6	-	1	0
403	11	9	7	4	2	-	1	0
404	-	-	-	-	-	-	-	-
405	7	6	4	3	2	-	1	0
406	9	8	7	5	3	-	1	0
407	-	-	-	-	-	-	-	-
411	11	9	7	6	4	-	2	0
412	13	12	11	7	4	-	1	0
413	10	8	7	5	3	-	1	0
414	9	8	4	4	2	-	1	0
415	13	11	9	8	6	-	2	0
416	14	11	9	7	5	-	2	0
417	8	7	6	5	4	-	1	0
Statistik								
n	11	11	11	11	11	-	11	
m	10.5	8.9	7.2	5.5	3.7	-	1.3	0
s	2.2	1.8	2.1	1.6	1.5	-	0.5	
cv	0.21	0.20	0.29	0.28	0.40	-	0.36	

Gemessene Mulden bei den Rissen**Anhang 3-04****Riss R0****im Feld 3****Messung 1995**Messung vom **14.09.1995** mit Achslast **181 kN**

Deflektionen umgerechnet für Normachslast 100 kN

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

vor Riss: Riss wurde überfahren

nach Riss: Riss wurde nicht überfahren

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
vor Riss								
901	20	16	14	5	3	-	1	0
902	19	3	2	2	1	-	0	0
903	14	10	9	4	2	-	1	0
904	23	9	6	4	3	-	1	0
905	16	11	8	4	2	-	1	0
906	23	12	8	4	2	-	1	0
907	12	7	4	4	3	-	1	0
908	28	12	8	6	5	-	2	0
Statistik								
n	8	8	8	8	8	-	8	
m	19.4	10.0	7.4	4.1	2.6	-	1.0	0
s	5.3	3.9	3.6	1.1	1.2	-	0.5	
cv	0.27	0.39	0.49	0.27	0.45	-	0.53	
nach Riss								
901	18	11	9	6	3	-	1	0
902	17	11	8	6	3	-	1	0
903	16	10	8	6	4	-	1	0
904	32	24	16	10	5	-	2	0
905	23	21	18	11	4	-	1	0
906	23	10	4	2	1	-	1	0
907	23	14	11	7	6	-	2	0
908	27	19	14	9	6	-	2	0
Statistik								
n	8	8	8	8	8	-	8	
m	22.4	15.0	11.0	7.1	4.0	-	1.4	0
s	5.4	5.6	4.7	2.9	1.7	-	0.5	
cv	0.24	0.37	0.43	0.40	0.42	-	0.38	

Gemessene Mulden bei den Rissen**Anhang 3-05****Riss R10****im Feld 3****Messung 1995**Messung vom **14.09.1995** mit Achslast **181 kN**

Deflektionen umgerechnet für Normachslast 100 kN

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

vor Riss: Riss wurde überfahren

nach Riss: Riss wurde nicht überfahren

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
vor Riss								
911	13	7	6	4	2	-	1	0
912	17	8	6	4	2	-	1	0
913	17	9	8	5	2	-	1	0
914	20	11	8	6	4	-	2	0
915	18	17	16	14	2	-	1	0
916	23	11	9	7	5	-	2	0
917	19	7	6	5	2	-	1	0
918	14	6	4	4	2	-	1	0
Statistik								
n	8	8	8	8	8	-	8	
m	17.6	9.5	7.9	6.1	2.6	-	1.3	0
s	3.2	3.5	3.6	3.4	1.2	-		
cv	0.18	0.37	0.46	0.55	0.45	-		
nach Riss								
911	11	9	7	6	5	-	2	0
912	11	10	9	8	8	-	1	0
913	20	17	14	10	6	-	2	0
914	16	13	11	8	6	-	1	0
915	19	14	13	9	6	-	2	0
916	14	12	11	9	4	-	2	0
917	20	17	14	10	8	-	2	0
918	17	12	9	7	4	-	2	0
Statistik								
n	8	8	8	8	8	-	8	
m	16.0	13.0	11.0	8.4	5.9	-	1.8	0
s	3.7	2.9	2.6	1.4	1.6		0.5	
cv	0.23	0.23	0.23	0.17	0.26	-	0.26	

Gemessene Mulden bei den Rissen

Anhang 3-06

Riss R20**im Feld 4****Messung 1995**Messung vom **14.09.1995** mit Achslast **181kN**

Deflektionen umgerechnet für Normachslast 100 kN

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

vor Riss: Riss wurde überfahren

nach Riss: Riss wurde nicht überfahren

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
vor Riss								
921	11	-	-	-	-	-	1	0
922	21	-	-	-	-	-	1	0
923	18	11	10	7	6	-	1	0
924	17	14	11	8	5	-	2	0
925	12	4	3	2	1	-	1	0
926	13	8	3	1	0	-	0	0
927	17	11	9	5	3	-	1	0
928	20	10	7	5	3	-	1	0
Statistik								
n	8	6	6	6	6	-	8	
m	16.1	9.7	7.2	4.7	3.0	-	1.0	0
s	3.7	3.4	3.5	2.7	2.3	-	0.5	
cv	0.23	0.35	0.49	0.59	0.76	-	0.53	
nach Riss								
921	23	18	14	10	8	-	2	0
922	-	-	-	-	-	-	-	-
923	22	18	14	10	7	-	2	0
924	20	19	16	12	8	-	1	0
925	34	24	14	9	7	-	1	0
926	23	22	21	11	7	-	1	0
927	27	24	20	18	16	-	2	0
928	19	14	11	8	6	-	1	0
Statistik								
n	7	7	7	7	7	-	7	
m	24.0	19.9	15.7	11.1	8.4	-	1.4	0
s	5.1	3.7	3.6	3.3	3.4	-	0.5	
cv	0.21	0.19	0.23	0.30	0.40	-	0.37	

Gemessene Mulden bei den Rissen

Anhang 3-07

Riss R30**im Feld 4****Messung 1995**Messung vom **14.09.1995** mit Achslast **181 kN**

Deflektionen umgerechnet für Normachslast 100 kN

Abkürzungen:

- : keine Messungen oder Messwerte nicht verwertbar

* : Messwerte statistisch nicht berücksichtigt

n: Anzahl Messwerte

m: Mittelwert

s: Standardabweichung

cv: Variationskoeffizient

vor Riss: Riss wurde überfahren

nach Riss: Riss wurde nicht überfahren

Mess-Punkt	d₁ 0.0 m	d₂ 0.3 m	d₃ 0.6 m	d₄ 0.9 m	d₅ 1.2 m	d₆ 1.5 m	d₇ 2.5 m	d₈ 5.0 m
vor Riss								
931	20	18	12	6	3	-	2	0
932	14	9	7	4	3	-	1	0
933	17	12	9	6	4	-	2	0
934	17	11	7	5	2	-	1	0
935	20	18	16	13	5	-	2	0
936	14	9	8	6	3	-	2	0
937	16	10	7	4	2	-	1	0
938	21	11	9	6	4	-	2	0
Statistik								
n	8	8	8	8	8	-	8	
m	17.4	12.3	9.4	6.3	3.3	-	1.6	0
s	2.7	3.7	3.2	2.9	1.0	-	0.5	
cv	0.16	0.30	0.33	0.46	0.32	-	0.32	
nach Riss								
931	29	13	9	7	6	-	1	0
932	-	-	-	-	-	-	-	-
933	14	12	8	7	4	-	2	0
934	20	16	12	8	6	-	2	0
935	13	12	6	4	2	-	1	0
936	-	-	-	-	-	-	-	-
937	19	17	12	8	6	-	2	1
938	22	19	15	11	7	-	2	0
Statistik								
n	6	6	6	6	6	-	6	
m	19.5	14.8	10.3	7.5	5.2	-	1.7	0
s	5.8	2.9	3.3	2.3	1.8	-	0.5	
cv	0.30	0.20	0.32	0.30	0.36	-	0.31	

Auswertung für k- Wert und E-Modul aus den gemittelten Mulden im Felde

Anhang 4-01

h: Totale Dicke des Oberbaues

S: Ausbreitungsgrad der Mulde= $(d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5) / 5 / d_1 \times 100$ A: Fläche der Mulde abgegrenzt von d_1 und d_5

k: Bettungsmodul

E: E-Modul des zusammengesetzten Oberbaues

Feld 2		Deflektionen					Auswertung			
Messung von	h mm	d ₁	d ₂	d ₃ 1/100 mm	d ₄	d ₅	S %	A mm ²	k MN/m ³	E N/mm ²
1985	346	16	14	11	8	6	69	132	110	4100
1991	346	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1994	346	18	15	11	8	6	64	138	120	2400
1995	346	17	12	9	6	5	58	114	180	2000

Feld 3		Deflektionen					Auswertung			
Messung von	h mm	d ₁	d ₂	d ₃ 1/100 mm	d ₄	d ₅	S %	A mm ²	k MN/m ³	E N/mm ²
1985	378	10	9	7	6	4	72	87	160	5600
1991	378	11	9	7	6	4	67	89	180	3700
1994	378	15	12	9	7	5	64	114	150	2400
1995	378	14	11	8	6	4	61	102	180	1900

Feld 4		Deflektionen					Auswertung			
Messung von	h mm	d ₁	d ₂	d ₃ 1/100 mm	d ₄	d ₅	S %	A mm ²	k MN/m ³	E N/mm ²
1985	319	12	11	9	7	5	73	107	130	9800
1991	319	12	10	8	6	5	68	98	140	6200
1994	319	14	12	10	6	4	66	111	150	4600
1995	319	11	9	7	6	4	67	89	180	6200

Auswertung für k- Wert und E-Modul aus den gemittelten Mulden bei den Rissen

Anhang 4-02

h: Totale Dicke des Oberbaues

S: Ausbreitungsgrad der Mulde= $(d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5) / 5 / d_1 \times 100$ A: Fläche der Mulde abgegrenzt von d_1 und d_5

k: Bettungsmodul

E: E-Modul des zusammengesetzten Oberbaues

Riss R0		Deflektionen					Auswertung			
Messung von	h mm	d ₁	d ₂	d ₃ 1/100 mm	d ₄	d ₅	S %	A mm ²	k MN/m ³	E N/mm ²
1985	372	19	15	11	7	5	60	135	140	1600
1991	372	16	9	5	4	2	45	81	370	600
1994	372	24	15	11	8	6	53	147	160	800
1995	372	21	13	9	6	4	50	122	200	700

Riss R10		Deflektionen					Auswertung			
Messung von	h mm	d ₁	d ₂	d ₃ 1/100 mm	d ₄	d ₅	S %	A mm ²	k MN/m ³	E N/mm ²
1985	391	13	10	7	5	4	60	92	210	2000
1991	391	15	9	6	4	3	49	84	300	700
1994	391	19	14	11	8	6	61	137	140	1400
1995	391	17	12	10	7	5	60	120	160	1400

Auswertung für k- Wert und E-Modul aus den gemittelten Mulden bei den Rissen

Anhang 4-03

h: Totale Dicke des Oberbaues

S: Ausbreitungsgrad der Mulde= $(d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5) / 5 / d_1 \times 100$ A: Fläche der Mulde abgegrenzt von d_1 und d_5

k: Bettungsmodul

E: E-Modul des zusammengesetzten Oberbaues

Riss R20		Deflektionen					Auswertung			
Messung von	h mm	d ₁	d ₂	d ₃ 1/100 mm	d ₄	d ₅	S %	A mm ²	k MN/m ³	E N/mm ²
1985	331	10	9	7	5	4	70	84	180	8300
1991	331	15	11	7	5	3	55	96	220	1800
1994	331	20	16	12	11	8	67	159	110	3000
1995	331	20	15	12	8	6	61	144	130	2200

Riss R30		Deflektionen					Auswertung			
Messung von	h mm	d ₁	d ₂	d ₃ 1/100 mm	d ₄	d ₅	S %	A mm ²	k MN/m ³	E N/mm ²
1985	333	13	11	8	6	5	66	102	160	4600
1991	333	14	10	7	5	3	56	92	230	2200
1994	333	20	14	10	8	5	57	143	150	1600
1995	333	19	14	10	7	4	57	128	160	1600

