



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Institut für Geotechnik
Institute for Geotechnical Engineering

UNTERHALT 2000, Forschungspaket 4: Dauerhafte Beläge

UNTERHALT 2000, paquet de recherche 4: Revêtements durable

UNTERHALT 2000, research package 4: Sustainable pavements

UNTERHALT 2000, Pacchetto di ricerca 4 pavimentazioni durevoli

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Institut für Geotechnik
Carlo Rabaiotti, dipl. Ing.
Dr. Markus Caprez, dipl. Ing. ETH

Forschungsauftrag [ASTRA 2000/422] auf Antrag des Bundesamtes für Strassen
(ASTRA)

Zürich, Januar 2007

Inhalt

1 EINLEITUNG	1
1.1 Thematik.....	1
1.2 Auftrag.....	1
1.3 Ziel der Arbeit	1
1.4 Organisation der Forschungspartner	2
2 BESCHREIBUNG DER ANLAGE	3
2.1 Allgemeines	3
2.1.1 „Full-scale“ Versuchskonzeption auf der Rundlaufanlage	3
2.1.2 Die Infrastruktur.....	3
2.1.2.1 Fixe Elemente	3
2.1.2.2 Konzeption der Testmaschine	3
2.2 Eingebaute Sensoren	4
2.2.1 Temperatursensoren	4
2.2.2 DMS	6
2.2.3 VVS (Vertikale Verformung Messsensoren)	8
3 BETRIEBSKALENDER UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	10
3.1 Betriebszeit.....	10
3.2 Einteilung der Felder	13
3.3 Wahl der Achslasten.....	15
3.4 Verteilung der Lastübergänge mit der Zeit.....	15
4 MESSERGEBNISSE	17
4.1 Materialeigenschaften	17
4.1.1 Unterbau und Planum	17
4.1.2 Foundationsschicht	17
4.1.3 Tragschichten.....	18
4.2 Schichtdicken.....	22
4.3 Versuche an der Oberfläche	24
4.3.1 Deflektionsmessungen.....	25
4.3.1.1 Plattendruckversuche auf dem Planum.....	25
4.3.1.2 Plattendruckversuche auf der Planie.....	25
4.3.1.3 Benkelman-Versuche.....	27
4.3.2 Messungen der Oberflächengeometrie.....	30
4.3.2.1 Querebenheitsmessungen.....	30
4.3.2.2 Längsprofilmessungen.....	41
4.4 Sensoren	47

4.4.1	Dehnungs-Verformungsmessungen	47
4.4.1.1	Eingebaute DMS	47
4.4.1.2	DMS auf der Oberfläche	57
4.4.1.3	LVDT	58
4.4.2	Temperatur Messungen	63
5BEURTEILUNG DER MESSERGEBNISSE UND DER VERSUCHSANLAGE.		65
6AUSWERTUNG NACH AASHTO		66
6.1	Befahrbarkeitsindex (PSI)	66
7NUMERISCHE RÜCKRECHNUNG.....		68
7.1	Ziel und Vorgehen	68
7.2	Numerisches Modell: Vorwärts Analysis.....	68
7.2.1	Einleitung: Geometrisches Modell.....	68
7.3	Modellierung des „Interface“ und des Material Stoffgesetzes.....	69
7.4	Rückrechnung	71
7.4.1	Kurze Einführung in der Theorie der Rückrechnung mit nicht lineare Methoden der kleinste Quadrate	71
7.4.1.1	Allgemeiner Fall	71
7.4.1.2	Nicht lineare Methode der kleinsten Quadrate	72
7.4.2	Anwendungsmöglichkeit der Rückrechnung.....	74
7.5	Analyse der numerischen Rückrechnung	80
7.6	Folgerungen.....	80
8SCHLUSSFOLGERUNGEN.....		82
9LITERATUR		84
10ANHÄNGE.....		86
10.1	Allgemeine Beschreibung der durchgeführten Versuche	87
10.1.1	Versuche auf der Oberfläche	87
10.1.1.1	Bohrungen und Schichtdicke.....	87
10.1.1.2	Deflektionsmessungen	90
10.1.1.3	Geometrie der Oberfläche	90
10.1.2	Messsensoren.....	92
10.1.2.1	Dehnungsmessungen.....	92
10.1.2.2	Temperatur Messungen	93
10.2	Bauarbeiten.....	93
10.2.1	Geometrie des Baus	93
10.2.2	Ausbau der alten Felder.....	94
10.2.3	Einbau Geotextil und Foundationsschicht	95
10.2.3.1	Einbau Temperatursensoren	97
10.2.4	Einbau der Tragschichten	98
10.2.4.1	Einbau der Temperatursensoren.....	100

10.2.4.2	Einbau der DMS Sensoren.....	100
10.2.5	Einbau der Deckschichten	101
10.2.5.1	Einbau Temperatursensoren und DMS in der Deckschicht	101
10.2.5.2	Einbau LVDT	101
10.3	Unterbau und Foundationsschicht: Material-Eigenschaften	104
10.4	Benkelman-Versuche: Ergebnisse	106
10.5	Längsebenheitsmessungen.....	147
10.6	DMS Amplitude der Messsignale.....	157
10.7	Temperaturmessungen (PT100)	165

Zusammenfassung

Der Grossversuch Rundlauf Nr. 7 hatte zum Ziel, fünf verschiedene, gebräuchliche bituminös gebundene Tragschichten miteinander zu vergleichen und deren Eigenschaften zu ermitteln.

Es handelt sich um fünf Versuchsfelder mit denselben Unterbauten, denselben Foundationsschichten und denselben Deckschichten. Alle Schichtdicken in den fünf Feldern haben dieselbe Grösse. Der Unterschied zwischen den fünf Aufbauten besteht allein in der Art der bitumenhaltigen Tragschicht. Leider konnten nicht alle Elemente der Gleichheit im gewünschten Mass durchgezogen werden. Insbesondere die Tragfähigkeit auf Planum und Foundationsschicht des Feldes 4 entsprachen nicht den gewünschten Werten.

Durch den Start des Grossversuches in der heissesten Temperaturperiode des „heissen“ Sommers 2003, wurden zusätzlich verschärfende Verhältnisse simuliert.

Nachstehend sind die verschiedenen Tragschichten charakterisiert:

Feld 1: gebrochener Fluvialkies mit Bindemittel B50/70

Feld 2: Felsgebrochener Splitt mit Bindemittel B50/70

Feld 3: Felsgebrochener Splitt mit Bindemittel B50/70 (geplant war B70/100)

Feld 4: Felsgebrochener Splitt mit polymermodifiziertem Bindemittel

Feld 5: Felsgebrochener Splitt, EME2

Im folgenden sind die Resultate schlagwortartig wiedergegeben. Die Versuche und die Berechnungen lassen sich kurz wie folgend charakterisieren. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass wegen verschiedener Einflüsse und Bedingungen die Resultate teilweise interpretiert werden müssen:

Feld 5 mit dem Spezialbindemittel EME2 zeigt das beste Verhalten bezüglich Verformungen und Temperaturstabilität. Dies konnte sowohl mit den geometrischen und physikalischen Messungen im Feld als auch mit der numerischen Rückrechnung gezeigt werden. Die Resultate stimmen gut mit den Laborresultaten überein.

Feld 1 mit dem gebrochenen Fluvialkies und Bindemittel B50/70 zeigt ein schlechtes Verhalten. Schon bald nach dem Beginn des Versuches traten massive Spurrinnen auf.

Feld 3 mit felsgebrochener Gesteinskörnung und Bindemittel B50/70 (eigentlich war ein B70/100 vorgesehen) zeigt ein schlechtes Verhalten. Aufgrund der Penetration am rückgewonnenen Bindemittel wurde ein B50/70 geliefert.

Feld 2 mit felsgebrochener Gesteinskörnung und Bindemittel B50/70 zeigt ein gutes Verhalten. Die Tragschicht dieses Feldes wird bei tiefen Temperaturen relativ steif. Dies ist im Gegensatz zu Feld 5, wo die Steifigkeit weniger abhängig von der Temperatur ist.

Feld 4 mit felsgebrochener Gesteinskörnung und polymermodifizierten Bitumen verhält sich schlecht gegenüber Spurrinnenbildung.

Der Grossversuch zeigt recht eindrücklich die unterschiedliche Aussagekraft von verschiedenen Standardversuchen und die Verbesserung der Interpretation der Resultate mittels Kombinieren von Feldversuchen und numerischer Modellierung.

Kurzbewertung der Versuchsfelder nach 1.4 Mio Achslastübergängen

Feld	Aufbau	Spurrinnentiefe	DMS (*)	LVDT (**)	PSI	Moduli (***)	Gesamtbewertung	Bemerkungen
		[mm]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]		[MPa]		
1	HMT 22 B50/70 teilw. gebr.	17	170	(-)	1.15	1547	mittel	Me-Wert auf Planum = 42 Me-Wert auf Planie = 105 Hohlraumgehalt obere Tragschicht ungenügend
2	HMT 22 B50/70 100% gebr.	11	40	2300	3.01	2839	gut	Me-Wert auf Planum = 53 Me-Wert auf Planie = 79
3	HMT 22 B50/70 100% gebr.	25	80	3250	0.33	2718	(-)	Me-Wert auf Planum = 38 Me-Wert auf Planie = 74 Weitere Untersuchungen am Mischgut wünschenswert
4	HMT 22 PmB 100% gebr.	18	100	2800	1.50	990	mittel	Me-Wert auf Planum = 36 Me-Wert auf Planie = 52
5	HMT 22 EME 2 100% gebr.	10	35	2200	3.28	4380	Sehr gut	Me-Wert auf Planum = 52 Me-Wert auf Planie = 99

* Rückgerechnete Elastizitätsmoduli bei $\approx 25^\circ$
 ** DMS auf der Unterfläche der Tragschicht, $T \approx 36^\circ$, Geschw. = 25 km/h
 *** ≈ 160 sec Wartezeit, $T \approx 20^\circ$, Sensor im Feld 1 nicht zuverlässig (ausser Messbereich)

Resumé

L'essai en vraie grandeur « Rundlauf » 7 a comme objectif la comparaison et la détermination des caractéristiques de cinq différentes couches de base en enrobés bitumineux.

Cinq différents champs d'essai ont été testés pour lesquels le sol de fondation, la couche de fondation et la couche d'usure ont gardé des épaisseurs constantes sur tous les champs. Les caractéristiques des différentes couches de base sont résumées ci-après:

Champ no. 1: gravier de gravière concassé avec liant B50/70

Champ no. 2: gravillon de carrière avec liant B50/70

Champ no. 3: gravillon de carrière avec liant B50/70

Champ no. 4: gravillon de carrière avec PMB

Champ no. 5: gravillon de carrière avec EME2

Les essais et leur interprétation permettent les commentaires ci-dessous:

Le champ no. 5, avec gravillon de carrière et le liant spécial EME2, fournit le meilleur comportement quant à l'orniérage et à la variation de température. Aussi bien les résultats géométriques et physiques expérimentaux que les simulations numériques ont démontré les meilleures caractéristiques de ce mélange. Ces résultats concordent bien avec ceux des essais en laboratoire.

Le champ no. 1, avec gravier de gravière concassé et liant B50/70, montre un mauvais comportement puisque déjà dès le début de l'essai apparaissent des ornières assez profondes.

Aussi le champ no. 3, avec gravillon concassé et liant B50/70, montre un mauvais comportement malgré l'essai de pénétration sur le liant après récupération ne le laisse pas prévoir.

Le champ no. 2, avec gravillon concassé et liant B50/70, montre un bon comportement. La couche de base devient relativement rigide à basses températures. Ce comportement est en contradiction avec celui du champ no. 5 pour lequel la rigidité est indépendante de la température.

Le champ no. 4, avec concassé et liant PMB, montre un mauvais comportement à l'orniérage.

L'essai en vraie grandeur permet de mettre en évidence la variabilité de validité de différents essais standards et l'amélioration de l'interprétation des résultats grâce à la combinaison d'essais sur place avec la modélisation numérique.

Kurzbewertung der Versuchsfelder nach 1.4 Mio Achslastübergängen

Feld	Aufbau	Spurrinnentiefe	DMS (*)	LVDT (**)	PSI	Moduli (***)	Gesamtbewertung	Bemerkungen
		[mm]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]		[MPa]		
1	HMT 22 B50/70 teilw. gebr.	17	170	(-)	1.15	1547	mittel	Me-Wert auf Planum = 42 Me-Wert auf Planie = 105 Hohlraumgehalt obere Tragschicht ungenügend
2	HMT 22 B50/70 100% gebr.	11	40	2300	3.01	2839	gut	Me-Wert auf Planum = 53 Me-Wert auf Planie = 79
3	HMT 22 B50/70 100% gebr.	25	80	3250	0.33	2718	(-)	Me-Wert auf Planum = 38 Me-Wert auf Planie = 74 Weitere Untersuchungen am Mischgut wünschenswert
4	HMT 22 PmB 100% gebr.	18	100	2800	1.50	990	mittel	Me-Wert auf Planum = 36 Me-Wert auf Planie = 52
5	HMT 22 EME 2 100% gebr.	10	35	2200	3.28	4380	Sehr gut	Me-Wert auf Planum = 52 Me-Wert auf Planie = 99

* Rückgerechnete Elastizitätsmoduli bei $\approx 25^\circ$
 ** DMS auf der Unterfläche der Tragschicht, $T \approx 36^\circ$, Geschw. = 25 km/h
 *** ≈ 160 sec Wartezeit, $T \approx 20^\circ$, Sensor im Feld 1 nicht zuverlässig (ausser Messbereich)

Abstract

The main goal of the large-scale circular test track (Rundlauf) Number 7 was to compare five different base layer materials and to assess their mechanical properties.

The five test fields all had the same sub-grade, the same sub-base and wearing layer, and all of the layers were of the same thickness. The only difference between the test fields lay in the different bituminous mixtures used for the base layers.

Unfortunately the desired same properties could not be achieved for all the fields. In particular the subbase and subgrade bearing capacities in field nr. 4 did not match the desired standards. The start of the experiment under high temperature values (the “hot” summer 2003) allowed for critical climatic conditions to be simulated.

In the following list, the short descriptions of the various bituminous mixtures of the different test tracks are given:

Field 1: broken fluvial gravel with binder B50/70

Field 2: broken rock gravel with binder B50/70

Field 3: broken rock gravel with binder B50/70 (designed with B70/100)

Field 4: broken rock gravel with binder Polymermodifiziertes Bindemittel

Field 5: broken rock gravel with binder EME2

In the following paragraphs the summarized main results are given. The experimental results and the numerical calculations can be characterized as follows: (However, it has to be noticed that the results should be sometimes carefully interpreted due to different influences and conditions)

Field 5, with the special binder EME2, exhibited the best behaviour with respect to deformations and temperature stability. This can be seen through the geometrical and physical measurements in the field as well as by the numerical back-calculations. The results show very good correspondence with the laboratory results.

Field 1, with broken fluvial gravel and the binder B50/70, revealed very poor behaviour. Extensive rutting occurred very soon after the beginning of the test.

Field 3, with broken rock gravel and the binder B50/70, showed poor behaviour even though it could not be ascertained from penetration tests on binder samples taken afterwards if these was soft.

Field 2, with broken rock gravel and the binder B50/70, exhibited good behaviour. The base layer of this field was relatively stiff for low temperatures. This is in contrast with Field 5, where the stiffness was less dependent on temperature.

Field 4, with broken rock gravel and the binder PMB, showed poor behaviour in relation to rutting.

The large-scale tests clearly showed the different reliability of the various standard tests and the improvement in interpretation of the results using a combination of field tests and numerical modelling.

Kurzbewertung der Versuchsfelder nach 1.4 Mio Achslastübergängen

Feld	Aufbau	Spurrinnentiefe	DMS (*)	LVDT (**)	PSI	Moduli (***)	Gesamtbewertung	Bemerkungen
		[mm]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]		[MPa]		
1	HMT 22 B50/70 teilw. gebr.	17	170	(-)	1.15	1547	mittel	Me-Wert auf Planum = 42 Me-Wert auf Planie = 105 Hohlraumgehalt obere Tragschicht ungenügend
2	HMT 22 B50/70 100% gebr.	11	40	2300	3.01	2839	gut	Me-Wert auf Planum = 53 Me-Wert auf Planie = 79
3	HMT 22 B50/70 100% gebr.	25	80	3250	0.33	2718	(-)	Me-Wert auf Planum = 38 Me-Wert auf Planie = 74 Weitere Untersuchungen am Mischgut wünschenswert
4	HMT 22 PmB 100% gebr.	18	100	2800	1.50	990	mittel	Me-Wert auf Planum = 36 Me-Wert auf Planie = 52
5	HMT 22 EME 2 100% gebr.	10	35	2200	3.28	4380	Sehr gut	Me-Wert auf Planum = 52 Me-Wert auf Planie = 99

* Rückgerechnete Elastizitätsmoduli bei $\approx 25^\circ$
** DMS auf der Unterfläche der Tragschicht, $T \approx 36^\circ$, Geschw. = 25 km/h
*** ≈ 160 sec Wartezeit, $T \approx 20^\circ$, Sensor im Feld 1 nicht zuverlässig (ausser Messbereich)

Sommario

La prova a grandezza reale "Rundlauf" numero 7 ha come obiettivo il confronto e la determinazione delle caratteristiche di cinque differenti strati di base in conglomerato bituminoso.

Sono stati sottoposti a prova cinque campi di prova con lo stesso sottofondo, strato di fondazione e strato di usura. I diversi strati mantengono nei diversi campi lo stesso spessore. L'unica differenza tra le cinque pavimentazioni risiede nella formulazione dello strato di base.

Purtroppo tuttavia non è stato possibile, in alcuni casi, rendere uguali per tutti i campi alcune caratteristiche come da progetto. In particolare le capacità portanti del sottofondo e dello strato di fondazione non corrispondono in un caso agli standard richiesti. L'inizio della campagna sperimentale ha coinciso con l'estate eccezionalmente calda del 2003, le cui elevate temperature hanno permesso di simulare condizioni climatiche particolarmente critiche.

Di seguito sono riportate i risultati del comportamento dei diversi strati di base:

Campo 1: Ghiaia di fiume frantumata, Legante B50/70

Campo 2: Pietrisco frantumato, Legante B50/70

Campo 3: Pietrisco frantumato, Legante B50/70

Campo 4: Pietrisco frantumato, Legante bitume polimero modificato

Campo 5: Pietrisco frantumato, Legante EME2

I risultati sperimentali e le interpretazioni numeriche sono sommariamente descritte nei paragrafi seguenti. Gli esperimenti e i calcoli si possono quindi riassumere come di seguito (Si deve tuttavia sottolineare che a causa di diversi fattori e condizioni i risultati necessitano talvolta di una accurata interpretazione).

Il campo 5 con il legante speciale EME2 e pietrisco frantumato riporta il miglior comportamento nei confronti dell'ormaiamento e variazione della temperatura. I risultati sperimentali e le simulazioni numeriche hanno entrambe evidenziato le migliori caratteristiche di questo legante. I risultati concordano con i risultati da prova di laboratorio.

Il campo 1 con il legante B50/70 e ghiaia di fiume frantumata riporta un comportamento scadente. Ormaie profonde compaiono già all'inizio della prova.

Il campo 3 con il legante B50/70 e pietrisco frantumato riporta un comportamento scadente, anche se la prova di penetrazione sul legante recuperato non corrisponde ai valori standard per questo tipo di legante.

Il campo 2 con il legante B50/70 e pietrisco frantumato riporta un buon comportamento. Lo strato di base diviene relativamente rigido a basse temperature. Questo è in contrasto con il comportamento del campo 5 che è meno sensibile ai cambi di temperatura.

Il campo 4 con il legante PMB e pietrisco frantumato riporta un comportamento scadente nei confronti dell'ormaiamento

Le prova in grandezza reale mostra in modo evidente la diversa attendibilità delle prove di tipo standard ed il notevole miglioramento dell'interpretazione dei risultati attraverso la combinazione di prove sperimentali e modellazione numerica.

Kurzbewertung der Versuchsfelder nach 1.4 Mio Achslastübergängen

Feld	Aufbau	Spurrinnentiefe	DMS (*)	LVDT (**)	PSI	Moduli (***)	Gesamtbewertung	Bemerkungen
		[mm]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]	[$\mu\text{m}/\text{m}$]		[MPa]		
1	HMT 22 B50/70 teilw. gebr.	17	170	(-)	1.15	1547	mittel	Me-Wert auf Planum = 42 Me-Wert auf Planie = 105 Hohlraumgehalt obere Tragschicht ungenügend
2	HMT 22 B50/70 100% gebr.	11	40	2300	3.01	2839	gut	Me-Wert auf Planum = 53 Me-Wert auf Planie = 79
3	HMT 22 B50/70 100% gebr.	25	80	3250	0.33	2718	(-)	Me-Wert auf Planum = 38 Me-Wert auf Planie = 74 Weitere Untersuchungen am Mischgut wünschenswert
4	HMT 22 PmB 100% gebr.	18	100	2800	1.50	990	mittel	Me-Wert auf Planum = 36 Me-Wert auf Planie = 52
5	HMT 22 EME 2 100% gebr.	10	35	2200	3.28	4380	Sehr gut	Me-Wert auf Planum = 52 Me-Wert auf Planie = 99

* Rückgerechnete Elastizitätsmoduli bei $\approx 25^\circ$
** DMS auf der Unterfläche der Tragschicht, $T \approx 36^\circ$, Geschw. = 25 km/h
*** ≈ 160 sec Wartezeit, $T \approx 20^\circ$, Sensor im Feld 1 nicht zuverlässig (ausser Messbereich)

1 Einleitung

1.1 Thematik

Verschiedene Strassenabschnitte in der Schweiz zeigen hervorragende Langzeiteigenschaften auch unter sehr hohen Klima- und Verkehrsbeanspruchungen. Andere, weniger belastete Abschnitte hingegen zeigen Verschleisserscheinungen wie Spurrinnen etc., obwohl nach den geltenden Regeln der Baukunde projektiert und gebaut wurde.

Mit dem innerhalb der Massnahme M17 abgewickelten umfangreichen Forschungsprojekt, welches aus 7 miteinander verknüpften Forschungspaketen besteht, sollen die Gründe für das unterschiedliche Verhalten erforscht werden. Zudem sollen optimierte Rezepturen in einem Grossversuch validiert werden. Der Grossversuch wird auf der Rundlaufanlage der ETH Zürich, IGT gefahren.

1.2 Auftrag

In einem Grossversuch (Massstab 1:1) auf der Rundlaufanlage sollte das Verhalten verschiedener Belagsaufbauten unter gleichen Bedingungen direkt verglichen werden. Der Versuch dient der Evaluation und Bewertung dauerhafter Beläge und Aufbausysteme. Die zu testenden Aufbauten wurden aufgrund von Ergebnissen und Erfahrungen der Forschungspakete FP1, FP2 und FP3 ausgewählt, wobei bei Bedarf auch Recyclingmaterialien zu verwenden sind.

Dauerhafte Komponenten (FP2) und dauerhafte Mischgutarten (FP3) garantieren nicht automatisch ein dauerhaftes, mehrschichtiges Belagssystem. Das Zusammenspiel der einzelnen Schichten im Gesamtsystem kann auf dem Rundlauf mit verschiedenen Aufbauten unter vergleichenden Bedingungen getestet, beobachtet und optimiert werden. Der Versuch erlaubt es, selbst im Hinblick auf hochbelastete Strassen innerhalb relativ kurzer Zeit die Auswirkungen einer mehrjährigen Belastung praxisnah abzuklären. Frühere Versuche zeigten, dass mit dem Rundlauf Materialien im Hinblick auf die Dimensionierung zweckgemäss getestet und beurteilt werden konnten.

1.3 Ziel der Arbeit

Die Hauptstrassen der Schweiz erfahren jedes Jahr eine Mehrbeanspruchung durch den Schwerverkehr. Gleichzeitig werden die klimatischen Bedingungen für die Dauerhaftigkeit der Beläge immer ungünstiger. Dazu kommt, dass zur heutigen Zeit die Sparmassnahmen eine sehr wichtige Rolle spielen, besonders wird der Aufwand für den Unterhalt reduziert.

Das Hauptziel dieser Untersuchung besteht darin in der Zukunft eine günstige Wahl der Materialien, die in den Tragschichten eingesetzt werden, zu treffen. Insbesondere wird die Rolle des Bindemittels untersucht, um daraus eine aussagekräftige Bestimmung der Lebensdauer des Belages zu erhalten.

Es wurden deshalb die Materialeigenschaften der Materialien nach Möglichkeiten für alle Felder konstant gewählt, damit nur ein bestimmter Effekt einer Komponente untersucht werden konnte.

Kleine Abweichungen der Eigenschaften von den eingebauten Standardmaterialien können aber zu einer ungenauen Beurteilung der effektiven Eigenschaften des Bindemittels führen. Es wurden aus diesem Grund die wichtigsten Materialeigenschaften jeder Schicht des Straßenunterbaus und Oberbaus untersucht, um später auch mit Nachrechnungen die Einflüsse dieser Abweichungen zu isolieren. Es ging auch darum, diejenigen Sensoren zu planen und zu entwickeln, die sich für diese Aufgabe am besten eigneten.

Zuerst wurde die AASHTO Dimensionierungsmethode verwendet um den Straßenzustand zu beurteilen, der durch den PSI (Present Serviceability Index) ermittelt wird.

Auch die Möglichkeit des Einsatzes der „Finite Elemente“-Modellierung für die Analyse und Interpretation der Feldergebnisse wurde in Erwägung gezogen.

1.4 Organisation der Forschungspartner

Die Forschungsarbeit ist in 7 Forschungspakete unterteilt. Die Thematik der einzelnen Forschungspakete ist in Tabelle 1 dargestellt.

Forschungs- paket Nr.	Titel	Forschungsstelle
1	Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen	Viagroup
2	Dauerhafte Komponenten	EMPA
3	Modélisation des charges d'essieu	LAVOC
4	Dauerhafte Beläge	IGT-ETHZ
5	Brückenforschung	LAVOC
6	Griffigkeitsmessungen	IVT-ETHZ
7	Vergleichsstrecken A2 (Kt. BI)	IMP

Tabelle 1) Aufteilung in Forschungspakete

2 *Beschreibung der Anlage*

2.1 Allgemeines

2.1.1 „Full-scale“ Versuchskonzeption auf der Rundlaufanlage

1:1 Versuche bildeten in den letzten Jahrzehnten die Grundlage der Straßendimensionierung in vielen Ländern, sowie auch im Frankreich oder den USA.

Das Ziel ist, die Gebrauchsdauer eines Straßenoberbaus in einer im Verhältnis zur Wirklichkeit stark verkürzten Zeit (Zeitraffer) simulieren zu können. Durch diese Simulation können die größten Probleme und die möglichen Schwachstellen der Projektierung und Bemessung festgestellt werden.

Zu dieser Thematik gehören die vom Klima beeinflussten externen Bedingungen, sowie die Wahl der Geometrie und Verteilung der Lasten.

Aufgrund der hohen Kosten von Grossversuchen und der zunehmend neu entwickelten Möglichkeiten von Computersimulationen werden heutzutage solche grossmasstäblichen Versuche immer seltener geplant, und neue, billigere Anlagen vorgesehen. Ob diese eine gleichwertige Beurteilung des Verhaltens von Oberbaustrukturen liefern können, ist im heutigen Zeitpunkt offen.

Nachteile dieses Versuches sind die nicht konstant einstellbare Temperatur, der sehr schwierige Einbau der Felder und auch die hohen Kosten.

2.1.2 Die Infrastruktur

Die in 1978 gebaute Versuchsanlage besteht aus verschiedenen Elementen:

2.1.2.1 Fixe Elemente

Die einzelnen fixen Elemente der Anlage sind die Betonwanne, die Zufahrten, die Kabelkanäle und der Messraum. Die Testmaschine lässt sich durch folgende Parametern beschreiben: Der Durchmesser beträgt 32 Meter, der Querschnitt ist trapezförmig mit einer Tiefe von 2 Metern. Der Querschnitt ist unten 2.5 Meter breit, oben 4.5 Meter.

2.1.2.2 Konzeption der Testmaschine

Die von der Firma Streiff AG konstruierte Belastungsapparatur besteht aus drei Stahlrohrarmen (Durchmesser 650 mm), die gelenkig an einer zentralen Führungssäule befestigt sind. Jeder Arm wird durch einen eigenen Elektromotor von 55 kW Leistung angetrieben, der über Schleifringe an der zentralen Führungssäule gespeist wird. Die elektronische Steuerung ermöglicht eine gleichmässige Belastung aller drei Gleichstrommotoren.

Zusätzlich wurden die drei Arme mit Stahlseilen mitteneinander verbunden und verspannt. Die Seilswingungen wurden mittels Autostosdämpfern auf ein tolerierbares Maß eingeschränkt.

Die Zwillingsreifen sind in der Querrichtung verschiebbar. Die Querverteilung der Last kann damit so programmiert werden, dass sie, wie im vorliegenden Fall, den gemessenen Fahrverhältnissen des Schwerverkehrs auf Fahrstreifen von Autobahnen entsprechen.

Die befahrene Fahrbahnbreite beträgt 1.35m.

Die maximale Geschwindigkeit beträgt 80 km/h. Die Belastung kann durch Füllen der Belastungstanks mit Wasser von 50 kN (entspricht einer Achslast von 10 Tonnen) bis 80 kN gesteigert werden.

2.2 Eingebaute Sensoren

Mit Hilfe der in verschiedenen Tiefen eingebauten Sensoren kann die mechanische Leistung des Materials an bestimmten Orten untersucht werden.

Um eine ausreichende Charakterisierung zu ermöglichen, wurden die unten beschriebenen Messinstrumente eingesetzt:

2.2.1 Temperatursensoren

Für die Temperaturmessung wurden die bisher erprobten und bewährten Messwiderstände PT100 angewendet (welche an vieradrige Kabel angeschlossen sind, um so die Messleitung zu kompensieren). Der Messaufnehmer und ein kleines Stück Kabel stecken in einer 6 cm langen Stahlhülse, die mit Asphalt ausgegossen wurde. Die Kabel wurden durch die Kabelkanäle geleitet und von dort in den Steuerraum zu einer zentralen Messdatenerfassungsanlage geführt. Die Daten werden in einem Speicher abgelegt und können später für Auswertungen auf Disketten überspielt werden.

In diesem Versuch wurden 15 Messsensoren in der Fundationsschicht, Tragschicht und Deckschicht eingebaut. Die Temperaturen im Untergrund und der Luft wurden mit den alten eingebauten Sensoren gemessen. Das Zeitintervall besteht aus einer Messung pro Stunde. Die verschiedenen Tiefen sowie die Bezeichnung der Sensoren sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

Feld	Lage	Materialien (Bindemittel und Inert)	PT100 Bez.	Tiefe	Alte.Bez. PT100
F1	1a DS	AB 11	Temp 3	-3cm	T6411
	1b TS	HMT22 50/70 rund	Temp 2	-17cm	T6410
	1c FS	100% gebr. Kiessand	Temp 1	-27 cm	T6412
	1d1 UG	Siltiger Sand	T5107 def	-202 cm	bisher
	1d2 UG	Siltiger Sand	T5106	-162cm	bisher
	1d3 UG	Siltiger Sand	T5105	-112cm	bisher
F2	2a DS	AB 11	Temp 6	-3cm	neu
	2b TS	HMT22 50/70 gebr.	Temp5	-17cm	neu
	2c FS	100% gebr. Kiessand	Temp 4	-27cm	T6508
	2d1 UG	Siltiger Sand	T5213	-165cm	bisher
	2d2 UG	Siltiger Sand	T5212	-110 cm	bisher
F3	3a DS	AB 11	Temp 9	-3cm	neu
	3b TS	HMT22 70/100 gebr.	Temp 8	-17cm	T6102
	3c FS	100% gebr. Kiessand	Temp 7	-27cm	T6101
	3d1 UG	Siltiger Sand	T5317	-110cm	bisher
	3d2 UG	Siltiger Sand	T5318	-165cm	bisher
F4	4a DS	AB 11	Temp 12	-3cm	T6218
	4bTS	HMT PmB C85 gebr.	Temp 11	-17cm	T5533
	4c FS	100% gebr. Kiessand	Temp 10	-27cm	T5532
	4d1 UG	Siltiger Sand	T5535	-200cm	
F5	5a DS	AB 11	Temp 14	-3cm	T6315
	5b TS	EME2 gebr.	Temp 15	-17cm	T6309
	5c FS	100% gebr. Kiessand	Temp 13	-27cm	T6307
	5d1 UG	Siltiger Sand	T5534	-165cm	bisher
	Aussentemp		T5044	+ 200cm	bisher
	Referenz		R 100 Ohm		

Tabelle 2) Lage (Tiefe) der Temperatursensoren

2.2.2 DMS

Die eingebauten DMS bestehen aus einem 120 mm langen Streifen aus Acryl, und das Messprinzip basiert auf einer Widerstandsänderung der in einer Wheatstoneschen Brückenschaltung zusammengeschalteten DMS Sensoren. Die Kabelleitungen der DMS enden mit einem Stecker in den Schächten entlang dem Kanal für die Messkabel. Die Kabel wurden von dort zu speziell eingebauten Messkisten geführt, wo die Daten regelmässig auf einen Laptop geladen wurden. Die Geometrie und die Abmessungen des DMS Sensors sind aus den folgenden Bildern: Bild 1 Bild 2 Bild 3 Bild 4 nachvollziehbar.

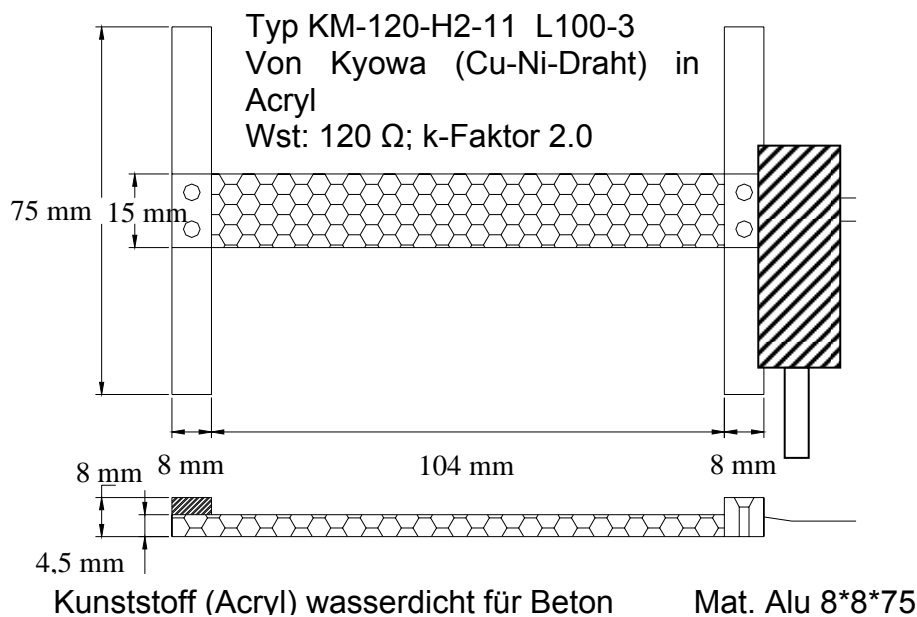


Bild 1 Skizze der Dehnungsmessstreifen (DMS)

Einige DMS Sensoren wurden auch auf der Oberfläche befestigt, um den Verformungszustand des Oberbaus in jedem kritischen Bereich beurteilen zu können.

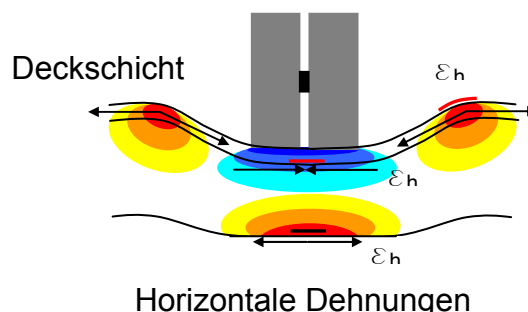


Bild 2 Positionierung der DMS in den kritischen Bereichen

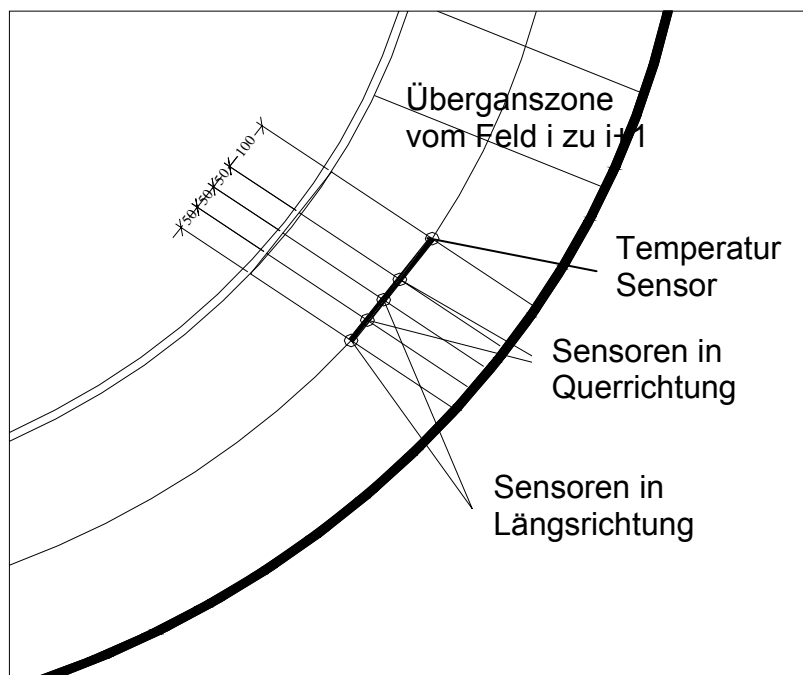


Bild 3 Lage der Sensoren

DMS (Dehnungsmessstreifen)

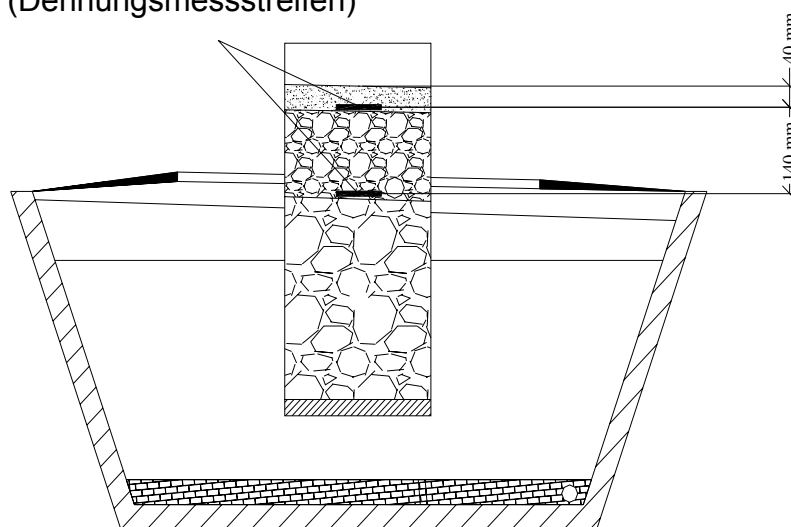


Bild 4 Tiefe der Sensoren in allen Felder

2.2.3 VVS (Vertikale Verformung Messsensoren)

Die Anfertigung dieser bekannten Sensoren (häufig verwendet in der Materialforschung), wurde spezifisch für diesen Versuch hergestellt, damit sie die Verformung des Asphaltpakets aufnehmen konnten.

Zwei verschiedene Modelle wurden beim Rundlauf eingesetzt, das erste Modell (Bild 5, Bild 6) besteht aus zwei Kolben die sich ineinander schieben lassen, dort nimmt ein Wegsensor die Verschiebung auf. Der Deckel und der unterste Teil wurden mit Epoxy am anstehenden Materialien fixiert.



Bild 5 Messensor

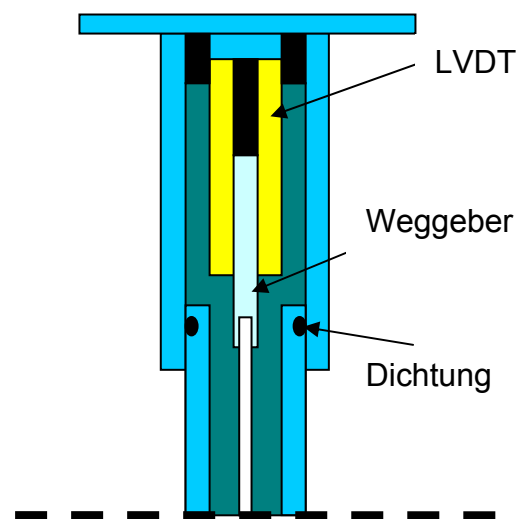


Bild 6 Schema

Der Wegaufnehmer ist ein kommerzieller Schaevitz Sensor, der günstig auf dem Markt erhältlich ist. Es wurde auf den unteren Spitz verzichtet (im Bild oben links), da die Epoxyfixierung schon eine genügend feste Verbindung gewährleistet hat. Das eingebaute System wurde zuerst im Labor getestet und kalibriert.

Nach einem Feldversuch, wurde festgestellt dass die Kalibrierung dieses Gerätes nicht so einfach war, da der Weggeber nur in einem gewissen Bereich eine zuverlässige Genauigkeit aufweist. Die untere Fixierung war zum Teil problematisch. Trotzdem wurden zuverlässige Ergebnisse erhalten.

Der neue Sensor stellt einen weiteren Schritt in der Messtechnik dar. Die neue Konzeption ist in den folgenden Bildern dargestellt (Bild 7, Bild 8).



Bild 7 Bauteile

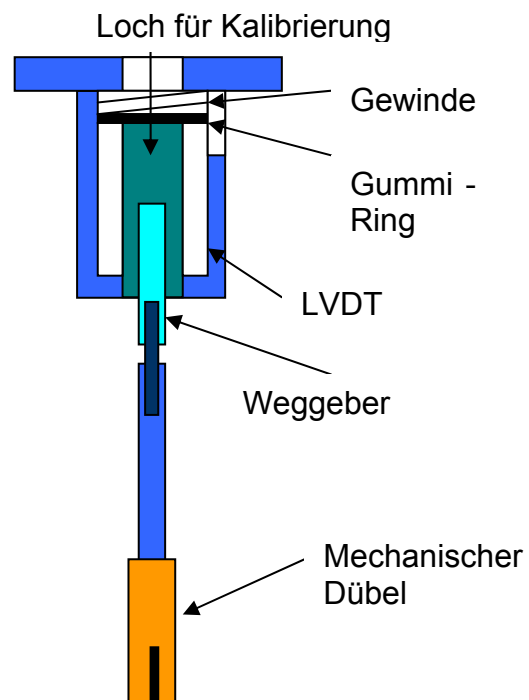


Bild 8 Schema

Der Deckel wird im vorliegenden Fall in ein Gehäuse eingeschraubt. Zwischen dem oberen Deckel und dem Sensor wird ein Gummiring eingebaut. Der LVDT Sensor wird so durch den Kontakt zwischen dem Boden des Gehäuses und dem von dem Gewinde zusammengedrückten Gummiring befestigt (siehe Bild 8).

Ein Loch, das sich durch einen Deckel mit Gewinde verschliessen lässt, wurde in der Mitte des Deckels gebohrt, damit der Sensor nach dem Einbau noch kalibriert werden kann.

Der Weggeber ist auf einer Gewindestahlstange eingeschraubt. Der Kopf dieser Stange wurde 6-eckig eingefräst, um diese mit einem Dübel in der unteren Schicht auf dem Asphalt fixieren zu können. Der Dübel, das Gehäuse und der Deckel bestehen aus Messing, die Stange aus Edelstahl. Die Gewinde zwischen der Stange und dem Weggeber besteht aus nicht magnetischem Material.

3 *Betriebskalender und Versuchsdurchführung*

3.1 Betriebszeit

Der Versuch wurde am 4 Juli gestartet, gleichzeitig wurden auch die ersten DMS Messungen durchgeführt.

Der Betrieb während der Sommer 2003/2004 hat verschiedene technische Problemen gegeben, da die extrem hohen Temperaturen die Elektromotoren sehr beansprucht haben. Vor dem Einbau wurden die Fahrachslasten gewogen und den Luftdruck kontrolliert.

Jede Messkampagne wurde regelmässig durchgeführt, nach ungefähr 100 – 150000 Anzahl Überrollungen.

Die Betriebsgeschwindigkeit wurde mit 25 km/h gewählt, für dynamische Messungen wurde bis auf 50km/h erhöht.

Die regelmäßig durchgeführten Messungen (Bild 10) und Versuche umfassten:

- Material- und Bohrkernuntersuchungen im Labor
- Längsebenheit
- Querebenheit
- Tragfähigkeit auf dem Planum und der Foundationsschicht
- Deflektionen (dynamisch und statisch)
- Zusammendrückung (dynamisch und statisch)
- Temperaturen in verschiedenen Tiefen
- Dehnungen in verschiedenen Tiefen
- Rückrechnung mit FEM Programme

In der Winterperiode wurde der Versuch jeweils unterbrochen. Im Frühjahr, sobald die Temperaturen nicht mehr unter Null Grad fielen wurde der Versuch wieder gestartet.

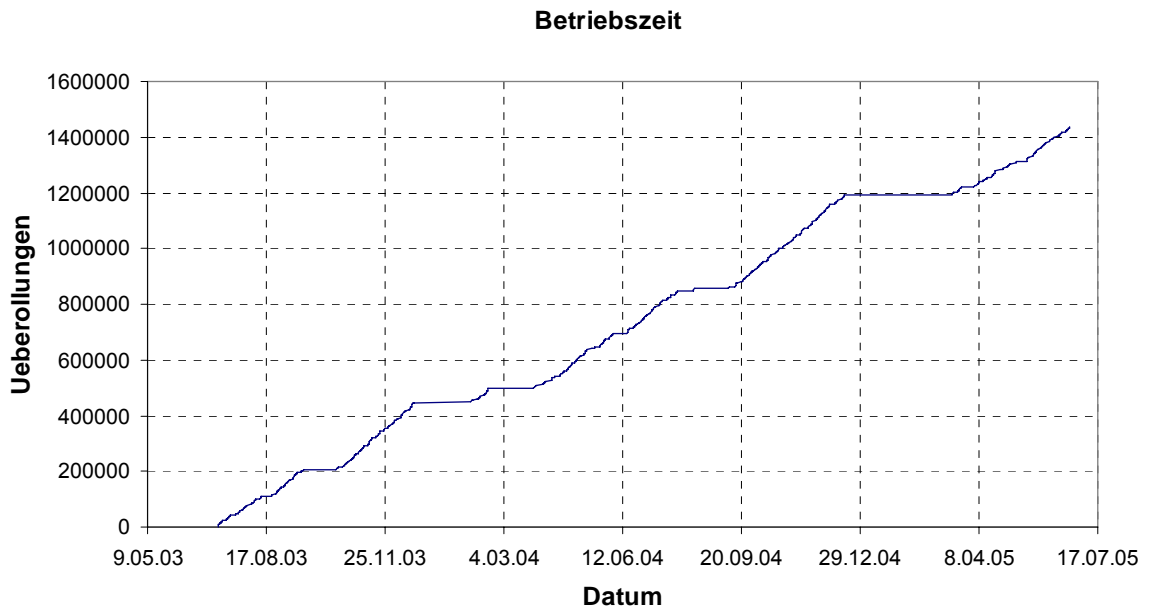


Bild 9 Betriebszeit

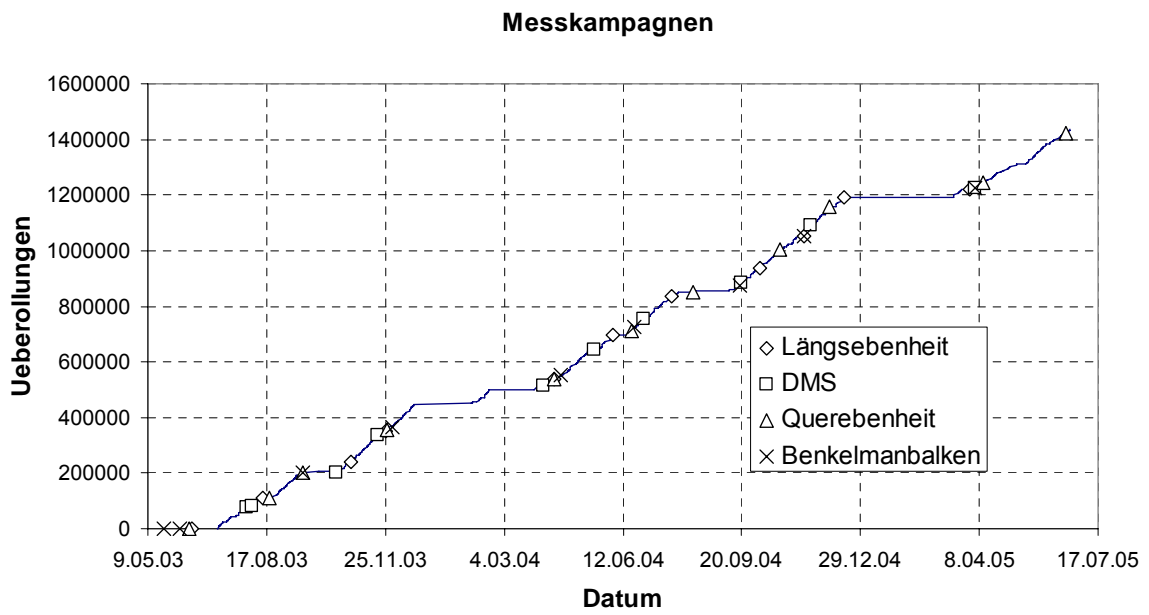


Bild 10 Durchgeführte Messkampagnen

DMS		Längseben.		Quereben.		Benkel.	
Datum	Runde (X 3)	Datum	Runde (X 3)	Datum	Runde (X 3)	Datum	Runde (X 3)
31.07.2003	76722	15.06.2003	0	13.06.2003	0	23.05.2003	0
05.08.2003	83259	14.08.2003	111000	19.08.2003	111000	05.06.2003	0
15.10.2003	201000	27.10.2003	240000	16.09.2003	201000	17.09.2003	201000
19.11.2003	334500	25.11.2003	352500	26.11.2003	354000	01.12.2003	366000
06.04.2004	511989	15.04.2004	539064	15.04.2004	539064	21.04.2004	551097
19.05.2004	644115	04.06.2004	697377	19.06.2004	712635	22.06.2004	724053
30.06.2004	753279	23.07.2004	833901	10.08.2004	850689	19.09.2004	876348
20.09.2004	883092	05.10.2004	935943	22.10.2004	1003698	11.11.2004	1051503
17.11.2004	1088373	12.11.2004	1052000	03.12.2004	1159938	05.04.2005	1226103
04.04.2005	1223430	15.12.2004	1191726	11.04.2005	1242759	07.06.2005	1389507
01.06.2005	1373088	31.03.2005	1221276	20.06.2005	1420548		
		02.06.2005	1373088				

Tabelle 3) Durchgeführte Messkampagnen

Während des Tages wurde die Anlage von 8:00 bis 12:00 und von 13:00 bis 17:00 Uhr betrieben. An Feiertagen wurde der Rundlauf aufgrund der Lärmemissionen und auch aus Sicherheitsgründen nicht betrieben.

3.2 Einteilung der Felder

Die 5 verschiedenen Felder haben eine Länge von ungefähr 20 Meter, mit einer circa 2 Meter langen Übergangszone. Die Einteilung und die Bezeichnung der verschiedenen Felder wird im Bild 11 dargestellt:

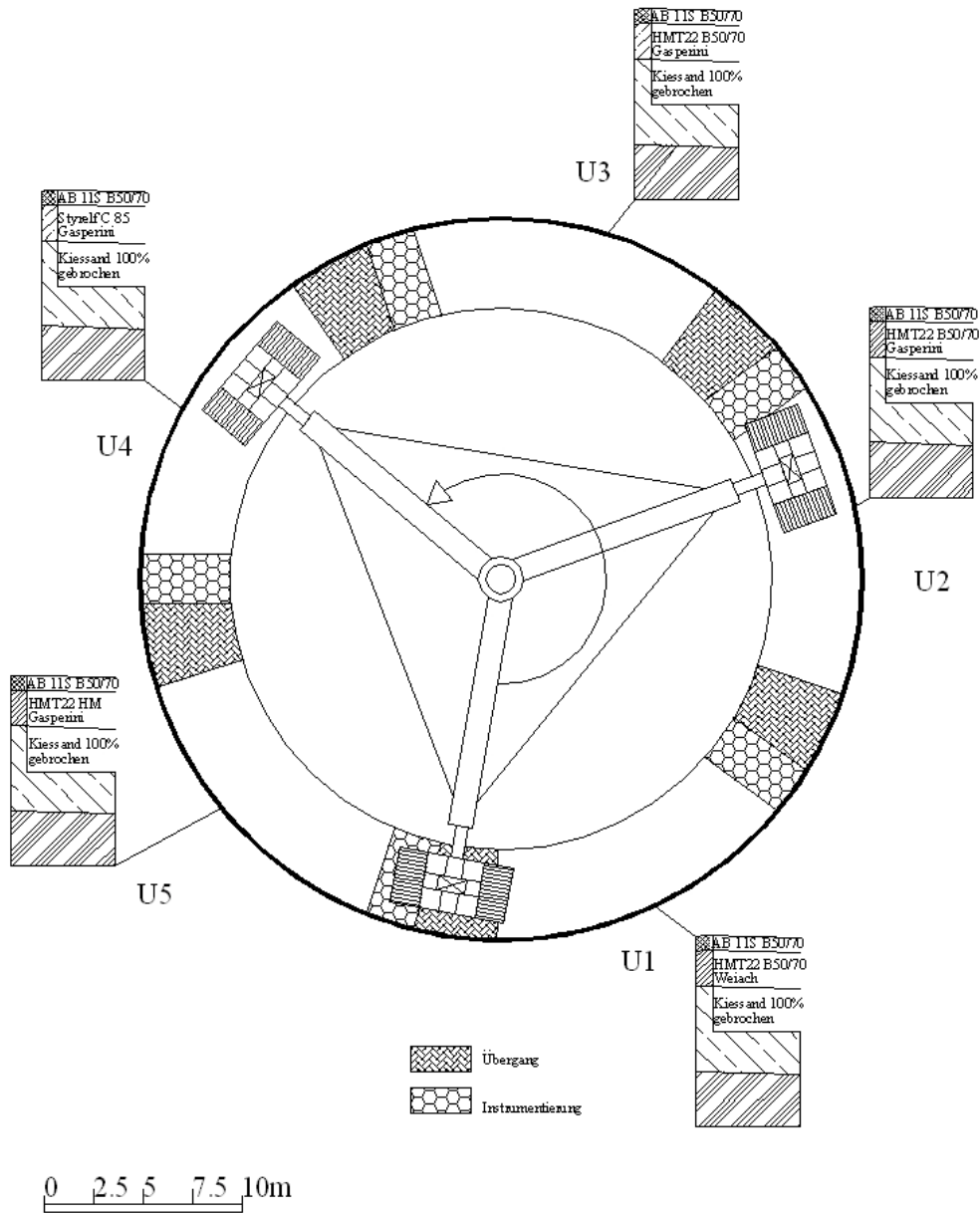


Bild 11 Feldereinteilung

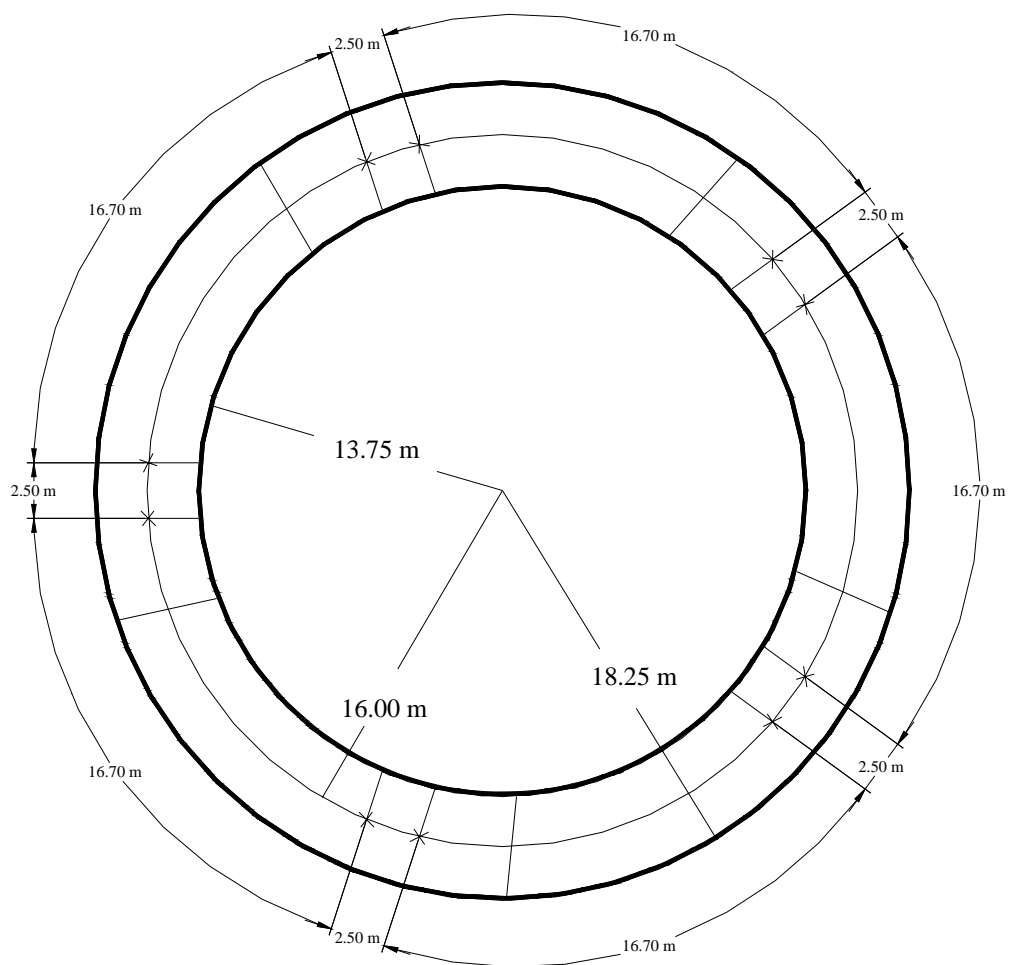


Bild 12 Instrumentierungszonen

Die 2,5 Meter langen Instrumentierungszonen (Bild 12) wurden am Ende jedes Feldes geplant. Die Felder werden so wie folgt unterteilt:

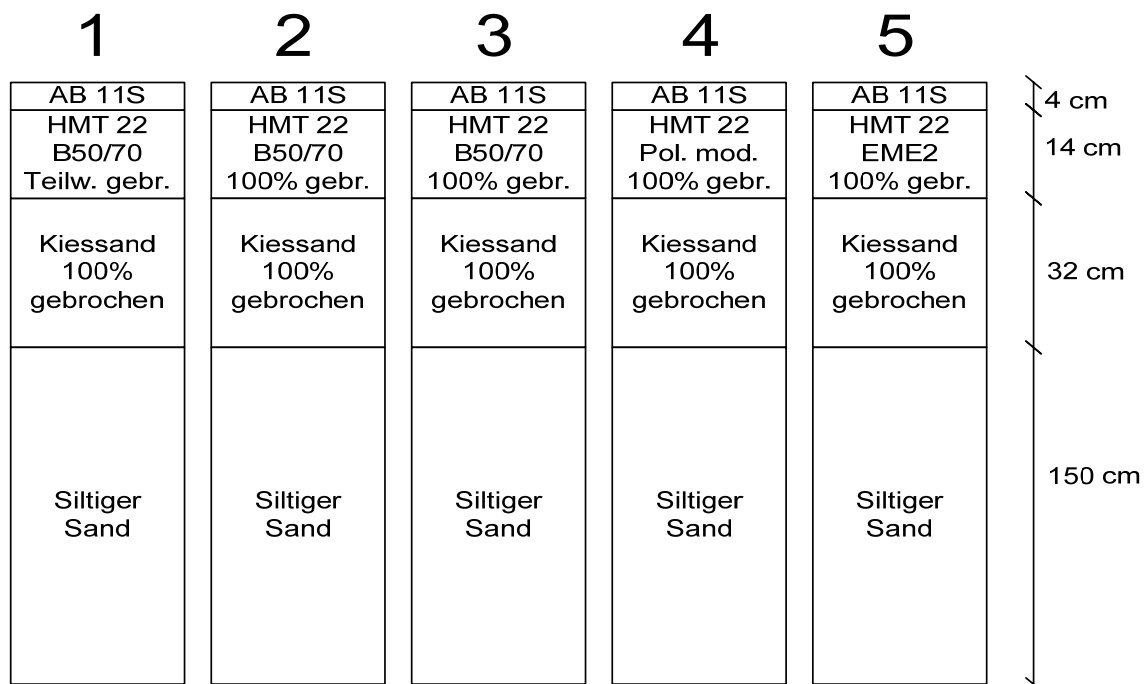


Bild 13 Aufbau der 5 Felder

Die Dicke der Schichten wurde für alle Felder gleich geplant:

Deckschicht: 40 mm

Tragschicht: 2 * 70 mm

Fundationsschicht: 320 mm

3.3 Wahl der Achslasten

Die selbstangetriebenen Achsen wurden mit 50 kN belastet, dies entsprechend einer gesamten Achslast von 100 kN. Am 20. Juni 2003 wurden die einzelnen Arme gewogen:

Arm 1	51.50 kN
Arm 2	51.50 kN
Arm 3	51.50 kN

Der Reifentyp war ein 11.00 R 20, mit einer Breite von 20 cm und einem Durchmesser von 110 cm. Der Luftdruck der Reifen beträgt 7.00 bar.

Der Abstand der beiden Räder (von Radmitte zu Radmitte) beträgt 35 cm.

3.4 Verteilung der Lastübergänge mit der Zeit

Die Lastverteilung (Bild 14) über dem Querschnitt ist durch die spezielle Konstruktion der Anlage frei wählbar. Es wurde die prozentuale Lastverteilung gewählt, die auch schon in den früheren Versuchen verwendet worden ist.

Die Breite der Fahrbahn beträgt 1.35 m.

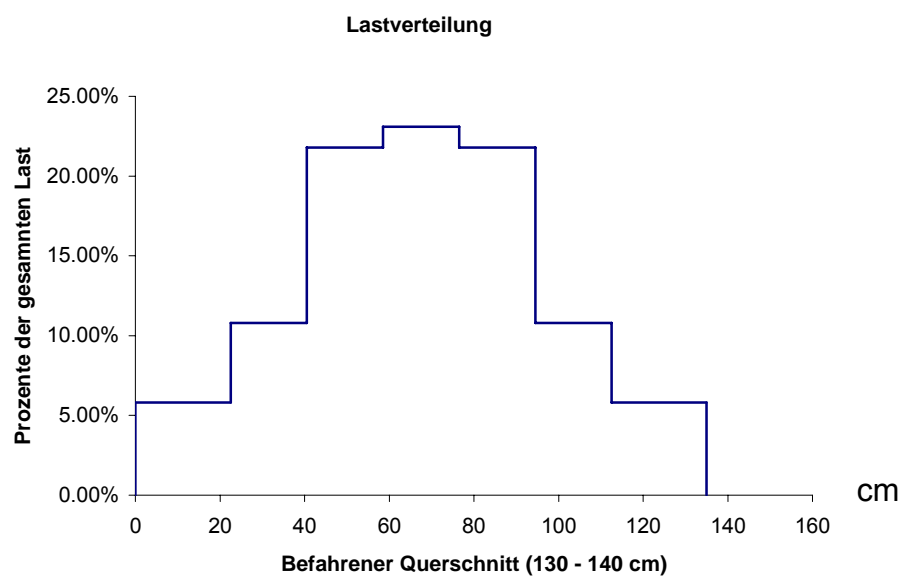


Bild 14 Prozentuale Lastverteilung beim Rundlaufversuch 7

4 Messergebnisse

4.1 Materialeigenschaften

4.1.1 Unterbau und Planum

Das Material des Unterbaus wurde von den vorhergehenden Rundlaufversuchen übernommen. Wo nötig wurde das Unterbaumaterial mit gleichem Material ergänzt. Die Korngrößenverteilung ist in Bild 15 dargestellt:

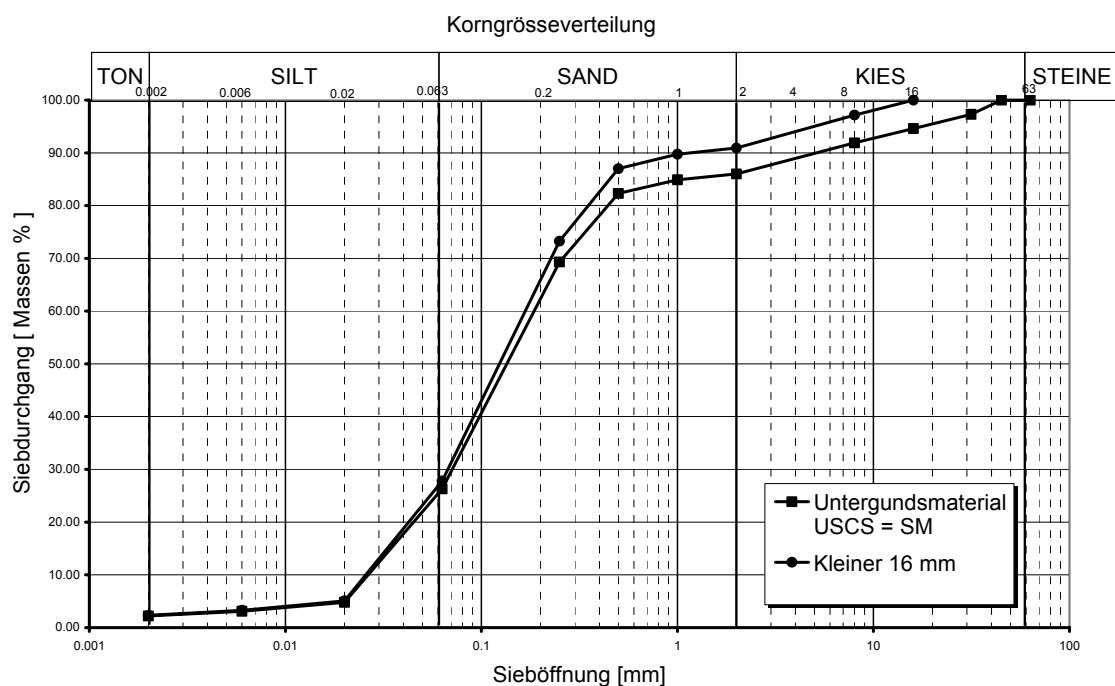


Bild 15 Korngrößenverteilung Untergrundmaterial

Beim Unterbaumaterial handelt es sich um ein feinkörniges, feinsandiges, frostempfindliches und wasserempfindliches Material, USCS Klasse SM. Der verdichtete Unterbau weist auf dem Planum eine Tragfähigkeit (gemessen mittels Plattendruckversuchen) von im Mittel E_v 37 MPa auf.

Die Frostempfindlichkeit des Unterbaumaterials wurde mittels des CBR-Frostversuchs nach SN –CBRF- gemessen. Die Resultate sind im Anhang zu diesem Bericht enthalten.

4.1.2 Fundationsschicht

Als Fundationsschicht wurde für alle fünf Felder das gleiche Material mit den gleichen Schichtdicken vorgesehen. Kleine baubedingte Abweichungen in den Schichtdicken sind in den Resultatetabellen enthalten. Die Fundationsschicht

besteht aus einem vollständig gebrochenen Kiessand (100% Brechkorn) mit einer Schichtdicke von 320 mm.

Die Korngrößenverteilung des Fundamentalschichtmaterials ist im Bild 16 dargestellt:

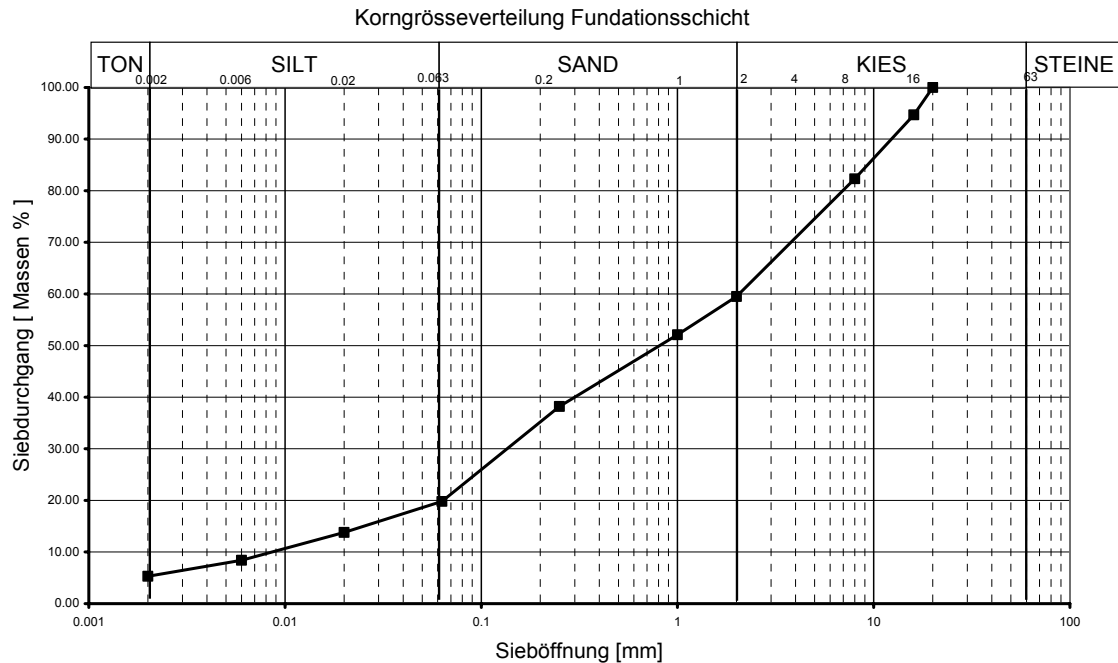


Bild 16 Korngrößenverteilung der Fundamentalschichten

4.1.3 Tragschichten

Die verschiedenen Rezepturen der Mischgutsorten wurden vom LAVOC (EPFL) bestimmt und sind im Anhang enthalten. Die Mischgutuntersuchungen wurden an Proben vom angelieferten Material durchgeführt. Es wurden auch Bohrkern entnommen, mit denen die effektive Schichtdicke und weitere Eigenschaften an bestimmten Stellen untersucht werden.

Die Rohdichte, die Dichte, der Hohlraumgehalt HM, der Hohlraumgehalt des Mineralstoffgerüsts HMM und der Füllungsgrad HFB wurden gemäss SN 671 967a, SN 671 965a, SN 671 967a, SN 640 431b, SN 640 431b an Proben, welche während dem Einbau entnommen wurden, bestimmt. Es wurden jeweils 2 Proben jeder Schicht untersucht. Im nachfolgenden Marschall Prüfverfahren wurden auch die Stabilität und die Fließwerte ermittelt. Weitere Untersuchungen bestimmten den Erweichungspunkt Ring und Kugel, die Penetration und den Penetrationsindex bei 25°C. Für jede Probe wurde zusätzlich die Korngrößenverteilung bestimmt.

Die wichtigsten Ergebnisse der Mischgutuntersuchungen sind in den nächsten Tabellen zusammengefasst.

Die Materialeigenschaften wurden auch an Bohrkernen geprüft. Die aus den Bohrkernen erhaltenen Ergebnisse sind dem Anhang beigefügt.

Im Allgemeinen weisen die rückgewonnenen Bindemittel eine höhere Penetration bei 25° C auf als geplant.

Die Versuchsergebnisse der Penetration der Bindemittel der Tragschichten der Felder 2 und 3 ergaben ähnliche oder fast gleiche Messwerte. Das Bindemittel der Tragschicht im Feld 3 ist deswegen nicht als 70/100 zu klassieren, sondern es handelt sich um ein B50/70.

HMT Feld 1 Untere Tragschicht Probe 1			HMT Feld 2 Untere Tragschicht Probe 1		
Mischgutsorte	HMT 22		Mischgutsorte	HMT 22	
Mischguttemperatur	159 °C		Mischguttemperatur	162 °C	
Bindemittel	B 50/70		Bindemittel	B 50/70	
löslicher Anteil	4.13	Masse - %	löslicher Anteil	4.59	Masse - %
Marshall Versuch (SN 671 969c)			Marshall Versuch (SN 671 969c)		
Rohdichte	2.352	g/cm ³	Rohdichte	2.411	g/cm ³
Dichte	2.516	g/cm ³	Dichte	2.506	g/cm ³
Hohlraumgehalt HM	6.5	Vol-%	Hohlraumgehalt HM	3.8	Vol-%
HM - Füllungsgrad HFB	60	%	HM - Füllungsgrad HFB	74	%
Stabilität SM	10.5	kN	Stabilität SM	13	kN
Fliessen FM	3.2	mm	Fliessen FM	3.1	mm
HM des Mineralstoffgerüsts HMM	16.1	Vol-%	HM des Mineralstoffgerüsts HMM	14.8	Vol-%
Eigenschaften des rückgew. Bindemittels			Eigenschaften des rückgew. Bindemittels		
Erweichungspunkt R. u. K.	57.4	°C	Erweichungspunkt R. u. K.	59.6	°C
Penetration bei 25°C	34	10 ⁻¹ mm	Penetration bei 25°C	24	10 ⁻¹ mm
Penetrationsindex PI	-0.4		Penetrationsindex PI	-0.6	
HMT Feld 3 Untere Tragschicht Probe 1			HMT Feld 4 Untere Tragschicht Probe 1		
Mischgutsorte	HMT 22		Mischgutsorte	HMT 22	
Mischguttemperatur	169 °C		Mischguttemperatur	158 °C	
Bindemittel	B 50/70		Bindemittel	PmB-C70/100-48	
löslicher Anteil	4.23	Masse - %	löslicher Anteil	4.34	Masse - %
Marshall Versuch (SN 671 969c)			Marshall Versuch (SN 671 969c)		
Rohdichte	2.372	g/cm ³	Rohdichte	2.369	g/cm ³
Dichte	2.51	g/cm ³	Dichte	2.513	g/cm ³
Hohlraumgehalt HM	5.5	Vol-%	Hohlraumgehalt HM	5.7	Vol-%
HM - Füllungsgrad HFB	64	%	HM - Füllungsgrad HFB	64	%
Stabilität SM	12.5	kN	Stabilität SM	12.1	kN
Fliessen FM	3.1	mm	Fliessen FM	2.6	mm
HM des Mineralstoffgerüsts HMM	15.4	Vol-%	HM des Mineralstoffgerüsts HMM	15.9	Vol-%
Eigenschaften des rückgew. Bindemittels			Eigenschaften des rückgew. Bindemittels		
Erweichungspunkt R. u. K.	56.4	°C	Erweichungspunkt R. u. K.	64.8	°C
Penetration bei 25°C	27	10 ⁻¹ mm	Penetration bei 25°C	35	10 ⁻¹ mm
Penetrationsindex PI	-1		Penetrationsindex PI	1.1	
HMT Feld 5 Untere Tragschicht Probe 1					
Mischgutsorte	HMT 22				
Mischguttemperatur	167 °C				
Bindemittel	B10-20				
löslicher Anteil	4.87	Masse - %			
Marshall Versuch (SN 671 969c)					
Rohdichte	2.377	g/cm ³			
Dichte	2.497	g/cm ³			
Hohlraumgehalt HM	4.8	Vol-%			
HM - Füllungsgrad HFB	70	%			
Stabilität SM	13.9	kN			
Fliessen FM	3.3	mm			
HM des Mineralstoffgerüsts HMM	16.3	Vol-%			
Eigenschaften des rückgew. Bindemittels					
Erweichungspunkt R. u. K.	67.2	°C			
Penetration bei 25°C	18	10 ⁻¹ mm			
Penetrationsindex PI	0.2				

Tabelle 4) Materialeigenschaften der unteren Tragschicht

HMT Feld 1 Obere Tragschicht Probe 1			HMT Feld 2 Obere Tragschicht Probe 1		
Mischgutsorte	HMT 22		Mischgutsorte	HMT 22	
Mischguttemperatur	163	° C	Mischguttemperatur	162	° C
Bindemittel	B 50/70		Bindemittel	B 50/70	
löslicher Anteil	4.53	Masse - %	löslicher Anteil	4.51	Masse - %
Marshall Versuch (SN 671 969c)			Marshall Versuch (SN 671 969c)		
Rohdichte	2.384	g/cm ³	Rohdichte	2.367	g/cm ³
Dichte	2.504	g/cm ³	Dichte	2.502	g/cm ³
Hohlraumgehalt HM	4.8	Vol-%	Hohlraumgehalt HM	5.4	Vol-%
HM - Füllungsgrad HFB	69	%	HM - Füllungsgrad HFB	66	%
Stabilität SM	13.4	kN	Stabilität SM	11.8	kN
Fliessen FM	3.2	mm	Fliessen FM	2.5	mm
HM des Mineralstoffgerüsts HMM	15.5	Vol-%	HM des Mineralstoffgerüsts HMM	16	Vol-%
Eigenschaften des rückgew. Bindemittels			Eigenschaften des rückgew. Bindemittels		
Erweichungspunkt R. u. K.	60	°C	Erweichungspunkt R. u. K.	61.7	°C
Penetration bei 25°C	25	10 ⁻¹ mm	Penetration bei 25°C	24	10 ⁻¹ mm
Penetrationsindex PI	-0.5		Penetrationsindex PI	-0.2	
HMT Feld 3 Obere Tragschicht Probe 1			HMT Feld 4 Obere Tragschicht Probe 1		
Mischgutsorte	HMT 22		Mischgutsorte	HMT 22	
Mischguttemperatur	165	° C	Mischguttemperatur	162	° C
Bindemittel	B 50/70		Bindemittel	PmB-C70/100-48	
löslicher Anteil	4.57	Masse - %	löslicher Anteil	4.52	Masse - %
Marshall Versuch (SN 671 969c)			Marshall Versuch (SN 671 969c)		
Rohdichte	2.395	g/cm ³	Rohdichte	2.36	g/cm ³
Dichte	2.497	g/cm ³	Dichte	2.506	g/cm ³
Hohlraumgehalt HM	4.1	Vol-%	Hohlraumgehalt HM	5.8	Vol-%
HM - Füllungsgrad HFB	73	%	HM - Füllungsgrad HFB	64	%
Stabilität SM	12.5	kN	Stabilität SM	14.5	kN
Fliessen FM	3.1	mm	Fliessen FM	3.5	mm
HM des Mineralstoffgerüsts HMM	14.9	Vol-%	HM des Mineralstoffgerüsts HMM	16.4	Vol-%
Eigenschaften des rückgew. Bindemittels			Eigenschaften des rückgew. Bindemittels		
Erweichungspunkt R. u. K.	56.4	°C	Erweichungspunkt R. u. K.	64.9	°C
Penetration bei 25°C	27	10 ⁻¹ mm	Penetration bei 25°C	35	10 ⁻¹ mm
Penetrationsindex PI	-1		Penetrationsindex PI	1.1	
HMT Feld 5 Obere Tragschicht Probe 1			AB 11 S		
Mischgutsorte	HMT 22		Mischgutsorte	AB 11S	
Mischguttemperatur	154	° C	Mischguttemperatur	156	° C
Bindemittel	B10-20		Bindemittel	B 50/70	
löslicher Anteil	5.46	Masse - %	löslicher Anteil	5.98	Masse - %
Marshall Versuch (SN 671 969c)			Marshall Versuch (SN 671 969c)		
Rohdichte	2.421	g/cm ³	Rohdichte	2.373	g/cm ³
Dichte	2.48	g/cm ³	Dichte	2.465	g/cm ³
Hohlraumgehalt HM	2.4	Vol-%	Hohlraumgehalt HM	3.7	Vol-%
HM - Füllungsgrad HFB	85	%	HM - Füllungsgrad HFB	79	%
Stabilität SM	22.4	kN	Stabilität SM	14.5	kN
Fliessen FM	3.9	mm	Fliessen FM	3.1	mm
HM des Mineralstoffgerüsts HMM	15.5	Vol-%	HM des Mineralstoffgerüsts HMM	17.8	Vol-%
Eigenschaften des rückgew. Bindemittels			Eigenschaften des rückgew. Bindemittels		
Erweichungspunkt R. u. K.	72.7	°C	Erweichungspunkt R. u. K.	61.3	°C
Penetration bei 25°C	10	10 ⁻¹ mm	Penetration bei 25°C	27	10 ⁻¹ mm
Penetrationsindex PI	0		Penetrationsindex PI	-0.1	

Tabelle 5) Materialeigenschaften der oberen Tragschicht

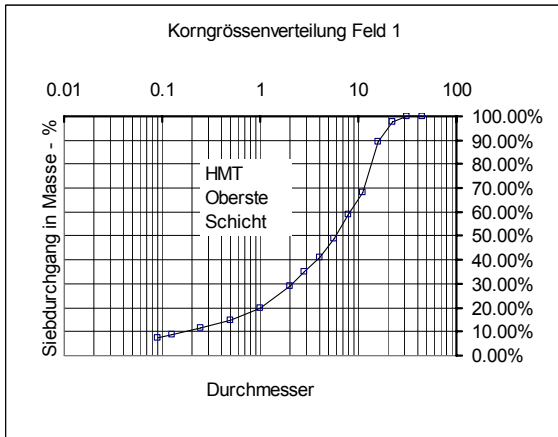


Bild 17 Kornverteilung HMT Feld1

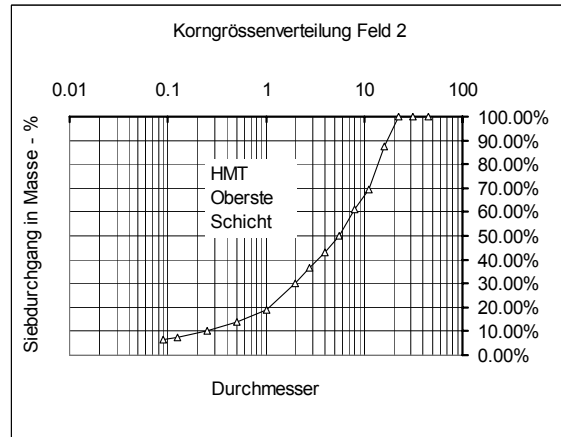


Bild 18 Kornverteilung HMT Feld2

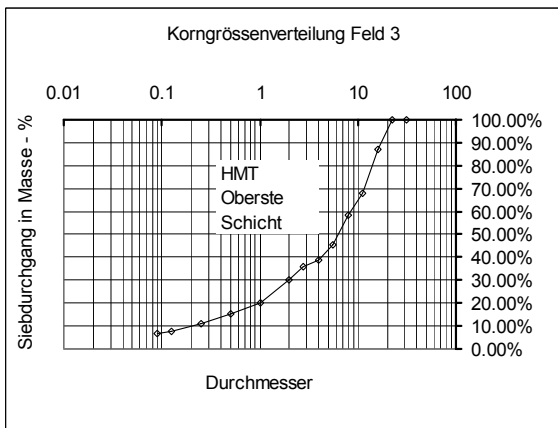


Bild 19 Kornverteilung HMT Feld3

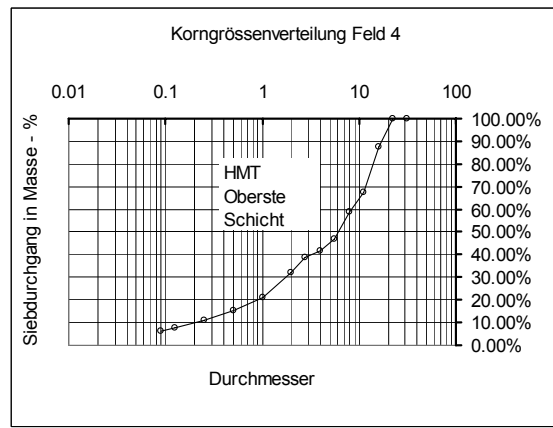


Bild 20 Kornverteilung HMT Feld4

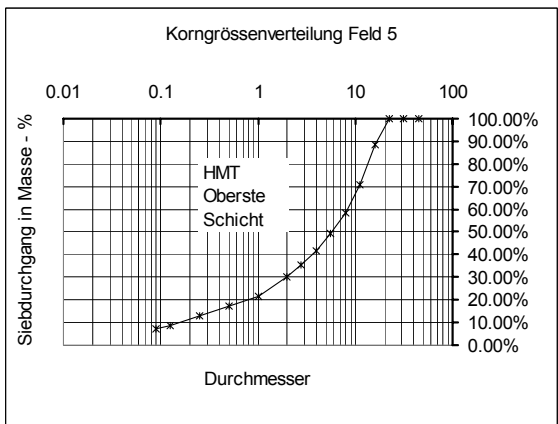


Bild 21 Kornverteilung HMT Feld5

4.2 Schichtdicken

Die Schichtdicken wurden durch Bohrkerns und durch verschiedene Nivellements geprüft. Die wichtigsten Ergebnisse werden in der nächsten Tabelle kurz zusammengefasst.

Abstand [cm]	Feld1			Feld3		
20	34.20		30.00	31.20	28.90	29.20
120	35.90	35.20	32.40	30.40	31.70	29.70
220	33.80	36.00	33.10	32.70	33.60	30.60
320	34.70	34.30	33.90	33.70	33.10	32.70
	Mittelwert	St. Abw.		Mittelwert	St. Abw.	
	31.13	1.70		31.46	1.71	
	Feld2			Feld4		
20	32.30	31.80	30.70	31.80		32.00
120	30.30	31.90	31.00	31.00	36.80	34.00
220	30.70	32.30	33.80	31.70	34.70	34.50
320	29.00	30.60	34.70	32.50	34.60	33.80
	Mittelwert	St. Abw.		Mittelwert	St. Abw.	
	31.59	1.57		30.62	1.74	
	Feld5					
20	27.60	29.10	27.30			
120	31.40	30.60	29.00			
220	34.00	34.30	32.30			
320	34.50	35.70	33.10			
	Mittelwert	St. Abw.				
	31.58	2.85				

Tabelle 6) Schichtdicken der Fundamentalschichten bei den Instrumentierungs-zonen in verschiedenen Abständen vom Aussenrand der Betonwanne (1 m Abstand zwischen den einzelnen radialen Messserien)

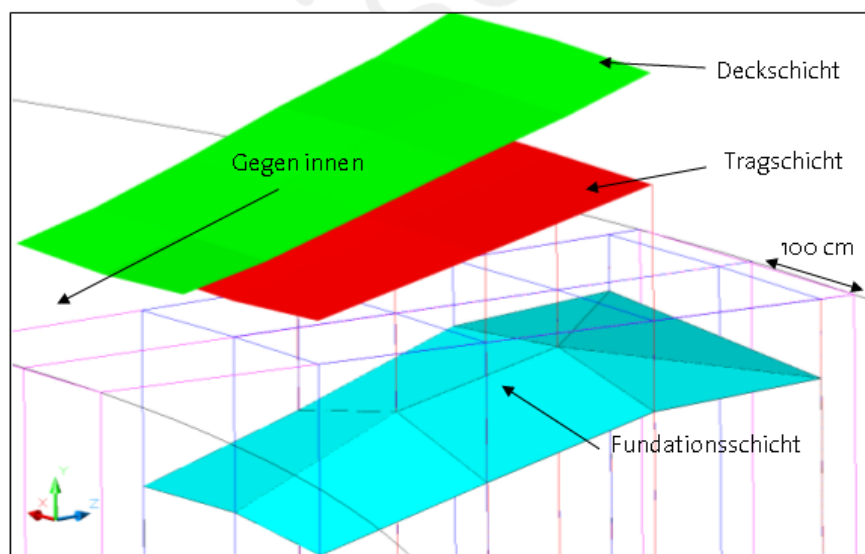


Bild 22 Dreidimensionale Darstellung der Nivellierung

Abstand [cm]	Feld1			Feld3		
20						
120	10.90	10.20	12.00	12.90	12.60	13.00
220	11.30	9.90	12.20	13.20	12.60	13.10
320	11.40	11.20	12.40	13.30	13.00	13.40
	Mittelwert	St. Abw.		Mittelwert	St. Abw.	
	11.28	0.86		13.01	0.28	
	Feld2			Feld4		
20						
120	13.90	12.70	14.60	13.00	8.00	11.20
220	13.50	13.30	13.80	11.90	8.50	11.10
320	14.10	14.00	13.30	11.50	8.80	11.60
	Mittelwert	St. Abw.		Mittelwert	St. Abw.	
	13.69	0.56		10.62	1.74	
	Feld5					
20						
120	12.90	14.40	13.20			
220	11.70	10.90	11.00			
320	12.80	11.90	10.60			
	Mittelwert	St. Abw.				
	12.16	1.26				

Tabelle 7) Schichtdicke der Tragschicht bei der Instrumentierungszonen in verschiedenen Abständen vom Aussenrand der Betonwanne (100 cm Abstand zwischen den einzelnen radialen Messserien)

Feld	1				2			
Bk Nr.	1		2		1		2	
Schichten [mm]	Belag	Stärke	Belag	Stärke	Belag	Stärke	Belag	Stärke
	AB 11	40	AB 11	36	AB 11	36	AB 11	37
	HMT 22	80	HMT 22	70	HMT 22	70	HMT 22	71
	HMT 22	67	HMT 22	68	HMT 22	70	HMT 22	70
Total [mm]		187		174		176		178
Feld	3				4			
Bk Nr.	1		2		1		2	
Schichten [mm]	Belag	Stärke	Belag	Stärke	Belag	Stärke	Belag	Stärke
	AB 11	40	AB 11	30	AB 11	33	AB 11	40
	HMT 22	71	HMT 22	77	HMT 22	67	HMT 22	67
	HMT 22	70	HMT 22	82	HMT 22	74	HMT 22	64
Total [mm]		181		189		174		171
Feld	5							
Bk Nr.	1		2					
Schichten [mm]	Belag	Stärke	Belag	Stärke				
	AB 11	41	AB 11	38				
	HMT 22	63	HMT 22	55				
	HMT 22	73	HMT 22	66				
Total [mm]		177		159				

Tabelle 8) Schichtdicken der gebundenen Schichten aus den Kernbohrungen

Deckschicht 0 Ueb.		Feld1				Feld3			
Abstand[cm]	Quergefälle [cm]			Mittelwert	Quergefälle [cm]			Mittelwert	
120	3.00%	3.00%	2.83%	2.96%	3.00%	2.67%	3.33%	3.36%	
180	2.83%	2.83%	3.00%	St.Abw.	3.00%	3.67%	4.00%	St.Abw.	
240	3.33%	3.33%	3.17%	0.28%	3.17%	3.17%	3.50%	0.36%	
300	3.00%	3.17%	3.17%		3.50%	3.83%	3.83%		
350	2.40%	3.00%	2.40%		3.20%	3.40%	3.20%		
Feld2		Feld4							
Abstand[cm]	Quergefälle [cm]			Mittelwert	Quergefälle [cm]			Mittelwert	
120	2.50%	3.00%	3.00%	3.17%	3.67%	3.83%	3.50%	3.85%	
180	3.17%	3.17%	3.17%	St.Abw.	4.00%	4.00%	4.00%	St.Abw.	
240	3.50%	3.33%	3.50%	0.44%	3.83%	4.00%	4.33%	0.61%	
300	3.83%	3.83%	3.50%		4.67%	4.67%	4.50%		
350	2.60%	3.00%	2.40%		2.40%	3.00%	3.40%		
Feld5									
Abstand[cm]	Quergefälle [cm]			Mittelwert					
120	3.33%	3.67%	3.33%	3.30%					
180	3.50%	3.33%	3.33%	St.Abw.					
240	3.50%	3.67%	3.67%	0.47%					
300	3.33%	3.67%	3.83%						
350	2.20%	2.60%	2.60%						

Tabelle 9) Quergefälle der Deckschicht

Wie aus Bild 22 ersichtlich ist, wurden besonders die unteren Schichten nicht ganz eben verdichtet, deswegen wurde die Dicke der Tragschicht auch leicht unregelmässig.

4.3 Versuche an der Oberfläche

Während und nach dem Einbau wurden Versuche durchgeführt um die mechanische Antwort und den Zustand des Belages und der darunter liegenden Schichten zu prüfen. Die Ergebnisse der verschiedenen Messkampagnen werden in den folgenden Paragraphen zusammengefasst.

4.3.1 Deflektionsmessungen

4.3.1.1 Plattendruckversuche auf dem Planum

Die Ergebnisse der M_E – Messungen vor dem Einbau auf dem Planum sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Sie wurden ungefähr in der Mitte der zukünftigen Instrumentierungszonen durchgeführt.

Feld	Datum	ME1 [MN/m ²]	ME2 [MN/m ²]	ME2/ME1	EV1 [MN/m ²]	EV2 [MN/m ²]	EV2/EV1
1	05.05.2003	42.6	90.1	2.12	23.20	74.80	3.22
2	05.05.2003	53.1	151.1	2.85	47.00	120.90	2.57
3	05.05.2003	37.8	152.9	4.04	33.80	109.70	3.25
4	05.05.2003	36.4	132.9	3.65	33.10	101.60	3.07
5	05.05.2003	52.8	151.6	2.87	47.40	118.40	2.50

Tabelle 10) Zusammenfassung der M_E E_V Messung auf dem Planum

Die Tragfähigkeitsklasse für alle Felder wurde nach SN 640 324 in die Klasse S3 eingestuft.

4.3.1.2 Plattendruckversuche auf der Planie

Die M_E – Messungen wurden an denselben Stellen wie auf dem Planum auch auf der Planie durchgeführt. Die Werte sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Feld	Datum	ME1 [MN/m ²]	ME2 [MN/m ²]	ME2/ME1	EV1 [MN/m ²]	EV2 [MN/m ²]	EV2/EV1
1	14.05.2003	104.9	371.2	3.54	81.80	279.70	3.42
2	14.05.2003	79.3	365.8	4.61	64.70	271.30	4.19
3	14.05.2003	74.3	249.2	3.35	59.70	191.20	3.20
4	14.05.2003	52.5	234.1	4.46	43.30	177.90	4.11
5	14.05.2003	98.8	220.7	2.23	77.70	201.20	2.59

Tabelle 11) Zusammenfassung der ME EV Messung auf der Planie

Die Ergebnisse zeigen in allgemeinen dass der Boden nicht so gut verdichtet wurde (die Setzungen nehmen in diesem Fall auch in der Erstbelastungskurve mit zunehmender Belastung ab, $ME2/ME1 \gg 2.5$). Beim Feld 4 (neben der Zone wo die Verstopfung der Drainage stattgefunden hat), war der Boden schwächer als in den anderen Feldern. Die Gefälle des Querschnitts könnte auch eine Rolle gespielt haben, da auch Scherkräfte in diesem Fall vorhanden sind.

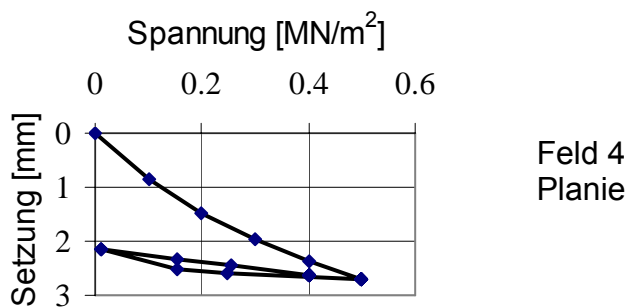


Bild 23 Plattendruckversuch auf dem Feld 4 (Planie)

Um die Homogenität der Verdichtung zu überprüfen wurden auch einige Messungen mit Gerät ZFG 2000 der Firma Viagroup gemacht. Die Technischen Daten sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

Die technischen Daten des leichten Fallgewichts ZFG 2000:

Durchmesser:	300 mm
Gesamtmasse:	15 kg
Werkstoff:	St 52, verzinkt

Belastungsvorrichtung mit Kipp- und Transportsicherung sowie Ausklinkvor

Masse Fallgewicht:	10 kg
Masse Vorrichtung:	15 kg
Maximale Stoßkraft:	7,07 kN ± 0,07 kN
Stoßdauer:	18 ms ± 2 ms



Elektronische Setzungsmeßeinrichtung als Handmeßgerät mit Uhr und Minidrucker

Abmessungen:	180 x 80 x 45 mm
Arbeitstemperatur:	0° C bis 50° C
Setzungsmeßbereich:	0,1 - 30 mm ± 0,01 mm
Meßbereich Verformungsmodul:	$E < 225 \text{ MN/m}^2$

Tabelle 12) LFG Technische Daten

Die Messungen wurden alle 6 Meter in der Mitte der Fahrbahn durchgeführt. Die Resultate (Kalibrierung mit der Hilfe des Plattendruckversuches durch einen Korrekturfaktor der 1.8 beträgt) zeigen eine gute Homogenität der Verdichtung.

Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Abstand [m]	LFG Werte	korrigierte LFG Werte [MN/m ²]	Feld	Mittelwert [MN/m ²]	St. Abw.
6	49.0	88.2	1		
12	34.8	62.64	1		
18	41.8	75.24	1	75.36	12.78
24	35.3	63.54	2		
Abstand	LFG Werte	korrigierte LFG	Feld	Mittelwert	St. Abw.

[m]		Werte [MN/m ²]		[MN/m ²]	
30	38.3	68.94	2		
36	46.8	84.24	2	72.24	10.74
42	46.8	84.24	3		
48	38.0	68.4	3		
54	38.4	69.12	3	73.92	8.94
60	44.8	80.64	4		
66	32.80	59.04	4		
72	43.30	77.94	4		
78	44.80	80.64	4	74.57	11.77
84	45.00	81	5		
90	37.00	66.6	5		
96	40.30	72.54	5	73.38	7.24
bei Ersatz Foundation (Feld 4)		29.4	52.92		
neben Fundationsflick		50.2	90.36		
neben Fundationsflick		38.2	68.76		

Tabelle 13) LFG Messergebnisse

4.3.1.3 Benkelman-Versuche

Die Benkelman-Versuche wurden gerade nach dem Einbau durchgeführt und danach regelmässig während dem normalen Betrieb. Die Korrekturfaktoren wurden nicht angewendet, da die Temperaturen dies nicht immer erlaubten. Die Veränderung der mechanischen Eigenschaften des Belages ist aus diesem Grund nur im Zusammenhang mit der Temperatur des Belages zu bewerten.

Datum	Feld 1 [mm]	T. [°C]	Feld 2 [mm]	T. [°C]	Feld 3 [mm]	T. [°C]	Feld 4 [mm]	T. [°C]	Feld 5 [mm]	T. [°C]
5.06.03	0.60	25	1.00	26	0.80	31	0.84	33	0.70	33
17.09.03	0.46	17	0.39	17	0.64	21	0.65	17	0.38	15
1.12.03	0.32	8	0.18	8	0.30	7	0.26	7	0.36	7
21.04.04	0.48	14	0.18	19	0.40	21	0.86	21	0.34	18
22.06.04	0.46	28	0.50	26	0.94	27	0.64	26	0.52	29
16.09.04	0.36	27	0.56	28	0.80	29	0.90	21	0.28	27
11.11.04	0.29	6	0.11	5	0.30	7	0.36	8	0.31	8
5.04.05	0.58	28	0.50	29	0.64	23	0.76	27	0.41	28
7.06.05	0.54	22	0.50	24	0.80	22	0.84	31	0.36	29
Tragschicht	0.91	33	1.40	40	1.02	38	1.15	32	1.06	32

Tabelle 14) Deflektionsmessungen auf dem Asphaltbelag

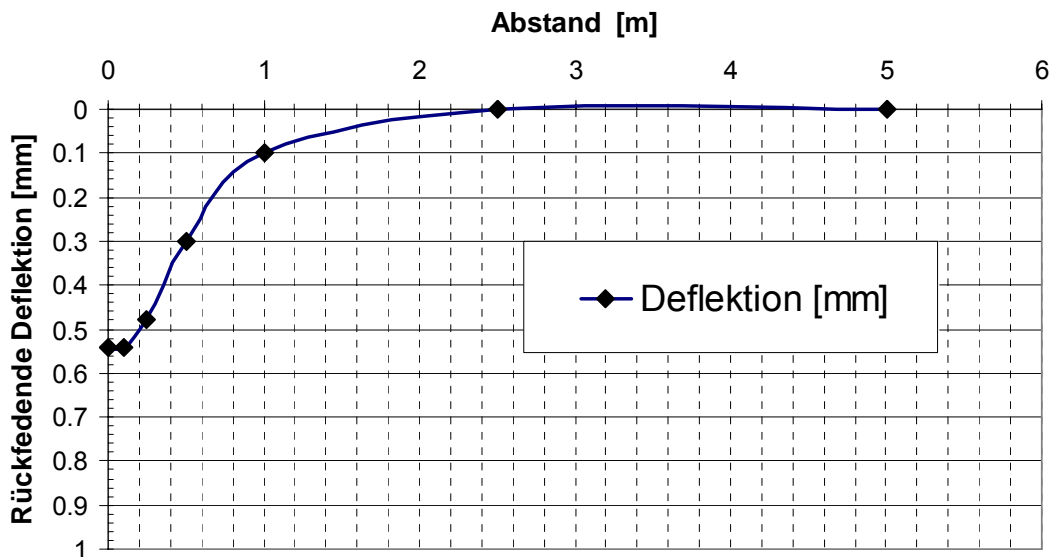
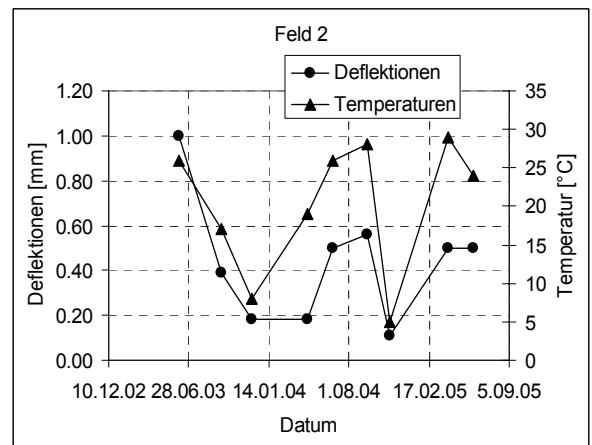
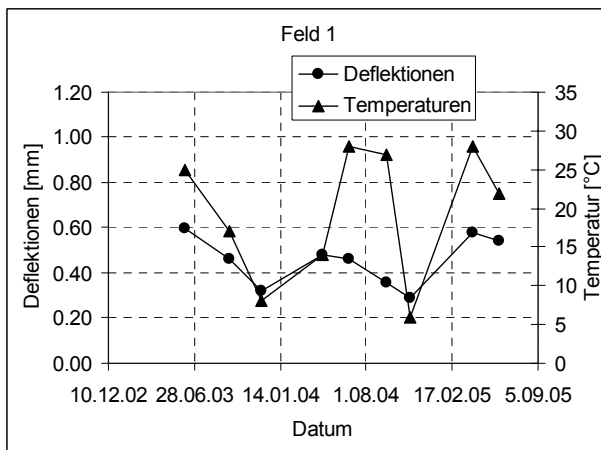


Bild 24 Typisches Ergebnis aus einem Benkelman-Versuch



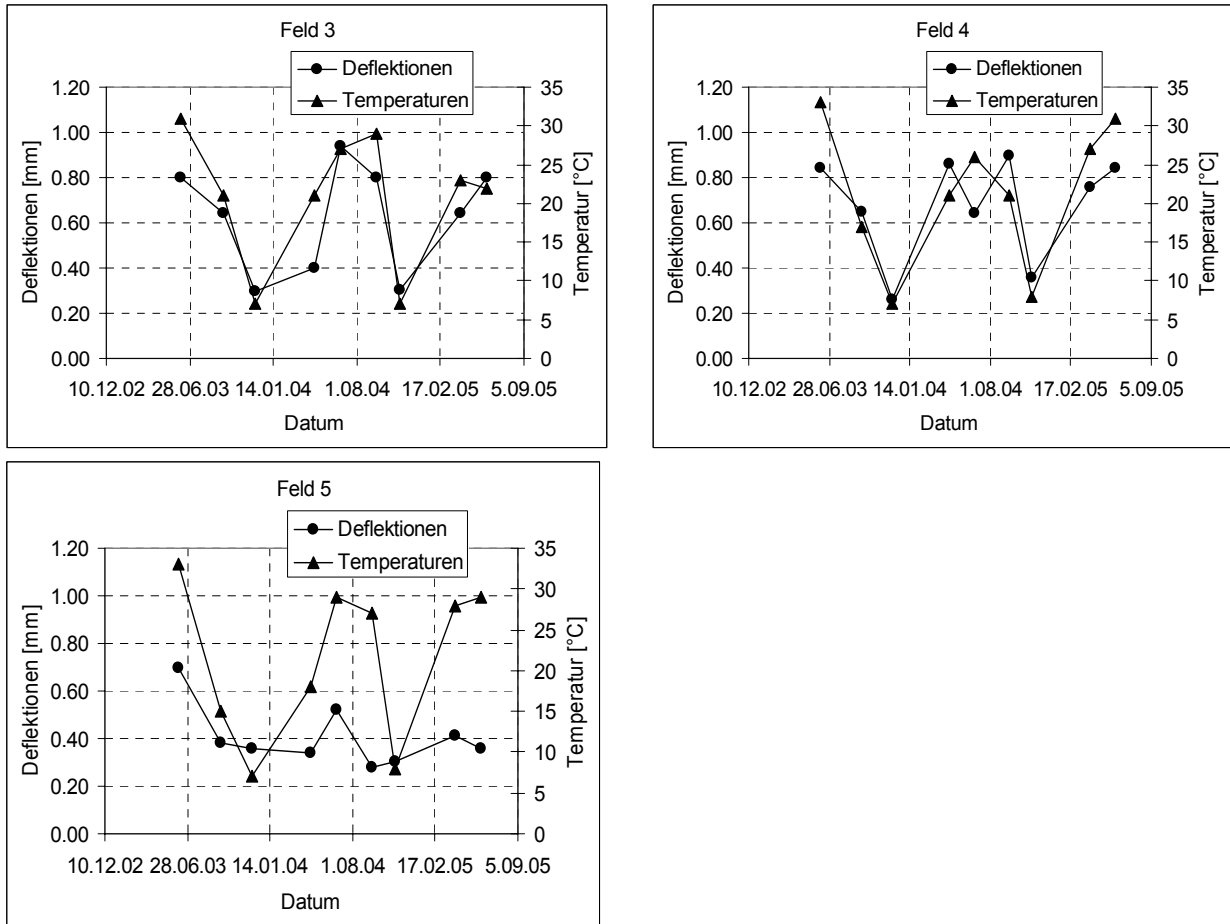


Bild 25 Deflektionsmessungen mit dem Benkelman-Versuch

Die Resultate zeigen, dass eine klare und definitive Aussage über die mechanische Antwort der Materialien, „a priori“ nicht möglich ist. Einerseits liegt der Balken in der Einflussmulde, andererseits erfährt der Belag zwischen den Zwillingrädern durch die grosse Beanspruchung der Auflast zum Teil eine nicht vernachlässigbare Hebung. Insbesondere könnte dieses Phänomen dort stattfinden, wo die Tragschicht eine geringere Steifigkeit hat und deswegen zu einer falschen Darstellung der mechanischen Eigenschaften der Felder führen (Eine kleinere Einsenkung könnte nicht immer als klares Zeichen für einen steiferen Oberbaus interpretiert werden).

Aufgrund dieser Betrachtungen wurden die neuen LVDT Sensoren geplant und eingesetzt.

Ein Vergleich zwischen den einzelnen Messungen mit den neuen Sensoren und mit dem Benkelman-Versuch wurde ebenfalls durchgeführt. Die Messergebnisse haben gezeigt, dass eine Hebung des Materials zwischen den Zwillingrädern entsteht.

Die Benkelman-Versuche wurden mit der Methode der Finiten Elemente (ABAQUS) erfolgreich modelliert und die entsprechenden mechanischen Eigenschaften der Oberbauschichten rechnerisch ermittelt. Mittels des Finite-Element-Modells konnte das Phänomen des Hebens zwischen den Zwillingrädern ebenfalls gezeigt werden.

4.3.2 Messungen der Oberflächengeometrie

Vor dem Beginn der Belastungen der Felder und periodisch während dem Betrieb wurden die geometrischen Grössen Querebenheit und Längsebenheit der Oberflächen und deren Änderungen gemessen. Diese Messungen wurden mittels Präzisions- Nivellement Messungen durchgeführt.

4.3.2.1 Querebenheitsmessungen

Querebenheitsmessungen wurden mit der Hilfe eines so genannten Planumgeräts durchgeführt. Die erste Messkampagne, nach 110000 Umdrehungen zeigte schon sehr tiefe Spurrinnen. Nach dieser ersten Materialeinsenkung fand während des Betriebs nur noch eine relative kleine Zunahme der Spurrinnen statt. Das ist durch den bedeutenden initialen Nachverdichtungsprozess und die sehr hohen Temperaturen des Sommers zu erklären. Einige Felder wurden aufgrund der Bäume am Rand der Strecke durch die Besonnung weniger aufgeheizt, dieser Umstand führte dann zu bedeutenden Verformungen im Feld 4 und 5 am folgenden Sommer, da alle Bäume am Rand der Teststrecke im Frühjahr gefällt wurden.

Für die Darstellung in diesem Bericht wurden die Bilder der Spurrinnen digitalisiert. Die Spurrinnenbildung wurde auch so ausgewertet, dass die Bilder immer eine Differenz zwischen der ersten Aufnahme des Querschnittes und den nachfolgenden Aufnahmewerten darstellen. Mit Hilfe dieser Darstellung ist es nun möglich eine Bilanz zwischen den Senkungen und den Hebungen aufgrund der Prozesse der Spurrinnenbildung nachzurechnen.

Deswegen ist es pro Querschnitt möglich den Materialanteil zu quantifizieren, der effektiv durch die Nachverdichtung und die plastischen Verformungen des Oberbaus und Unterbaus verdrängt wurde. Mit dieser Darstellung kann man die effektive mechanische Leistung der gesamten Schichtpakete besser bewerten. Diese Darstellung erlaubt auch die Materialhebungen seitlich der Spurrinnen besser zu visualisieren. Der Anteil der Spurrinnen welcher aus der Nachverdichtung stammt und derjenige welcher aus der seitlichen Materialverdrängung resultiert sind voneinander trennbar.

Man kann beobachten, dass die Spurrinentiefe nicht weiter zunimmt, während die gesamte eingedrückte Fläche im Laufe der Zeit kontinuierlich wächst.

Dies ist damit zu erklären, dass die Lastverteilung zuerst mehr die zentrale Spur beanspruchte, mit der Zeit jedoch wurden auch die Randspuren immer mehr befahren. Deswegen nehmen die Einsenkungen auch am Rand der Mittelspur zu. Das ist besonders wichtig, wenn man daran denkt, dass die Aquaplaning Gefahr deutlich mit der Bildung von grossen wassergefüllten Mulden zunimmt.

Die Hebungen, die durch das Ausstossen des Materials auftraten, haben im Laufe der Zeit abgenommen, deswegen schien es, dass die Zunahmen der Spurrinnenbildung kleiner wurden, während in der Tat die gesamte Einsenkung grösser wurde.

Die Umstellung auf einen neuen Reifentyp hat auch eine Änderung in der Form des Querschnitts verursacht, damit eine leicht unterschiedliche „Materialwanderung“. Die Beanspruchung des Belages wird durch die nun härtere Gummimischung und die dadurch erhöhte Steifigkeit der Reifen grösser sein.

Es ist zu beachten, dass die effektive Dicke der Schichten sowie die Bedingungen der Temperatur für jedes Feld auch eine entscheidende Rolle in der

Spurrinnenbildung spielen können. Angenommen, dass kleine Unterschiede (Klima, Schichtdicke, Steifigkeit des Untergrundes und der Fundamentalschicht) zwischen den einzelnen Feldern bestehen, was ausser den Bindemittelvariationen nicht erwünscht war, kann man trotzdem durch diese Auswertungen beweisen, dass die Aufbauten der Felder 2 und 5 sich besser verhalten haben und die entsprechenden Bindemittel in diesem Bereich zu besseren Ergebnissen führten.

Es ist weiter zu beachten, dass die Tragschicht im Feld 4 tatsächlich eine kleinere Dicke hat, trotzdem können die Unterschiede in einigen Fällen in den Schichtdicken die deutlichen Differenzen zwischen den spezifischen Verhalten der einzelnen Felder allein nicht begründen.

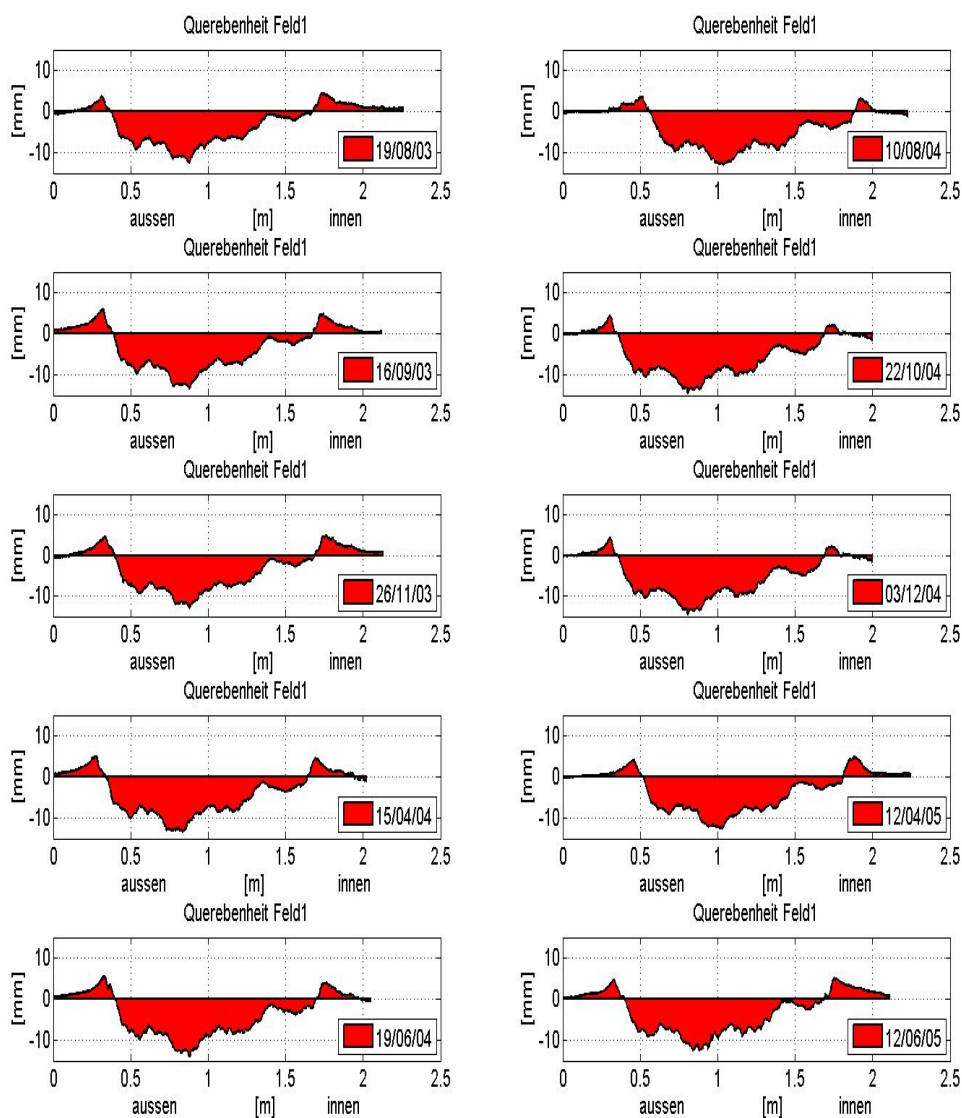


Bild 26 Senkungen und Hebungen der Oberfläche im Vergleich zum Anfangszustand.

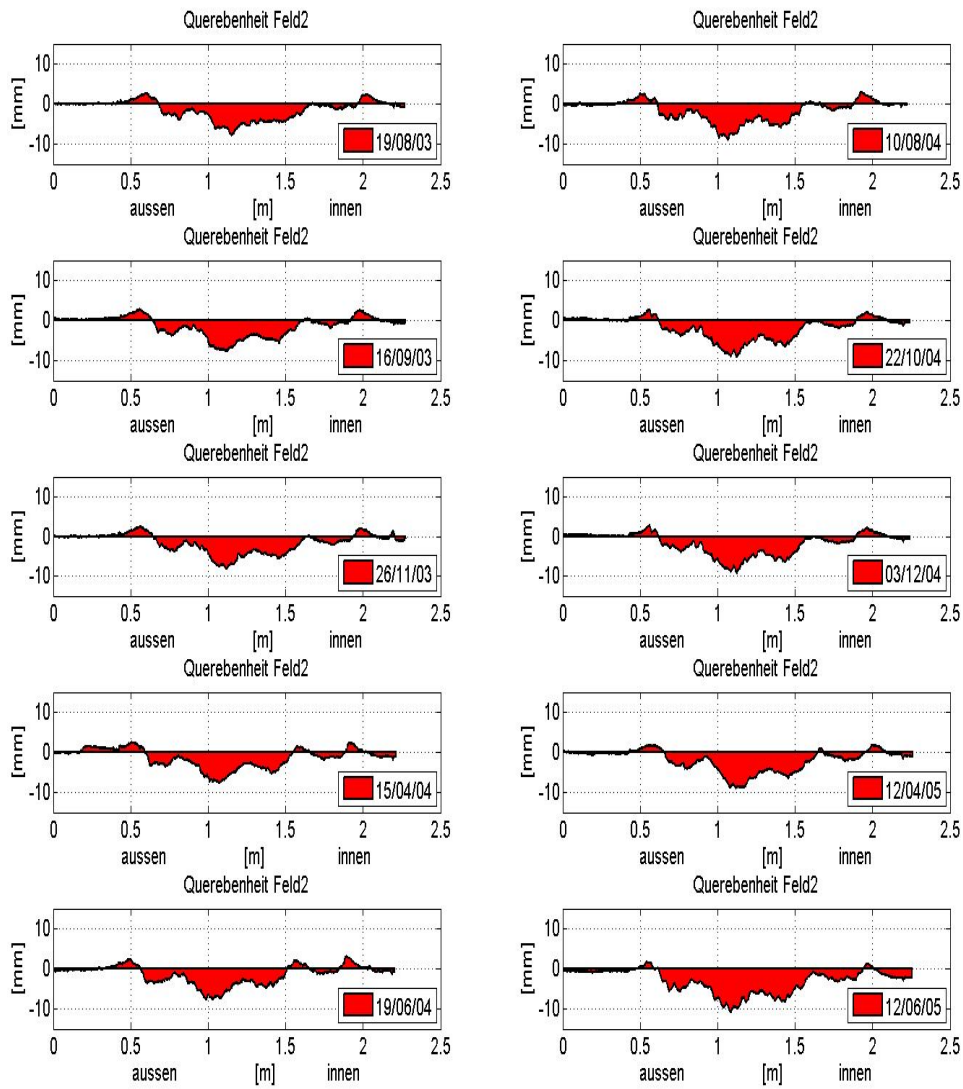


Bild 27 Senkungen und Hebungen der Oberfläche im Vergleich zum Anfangszustand.

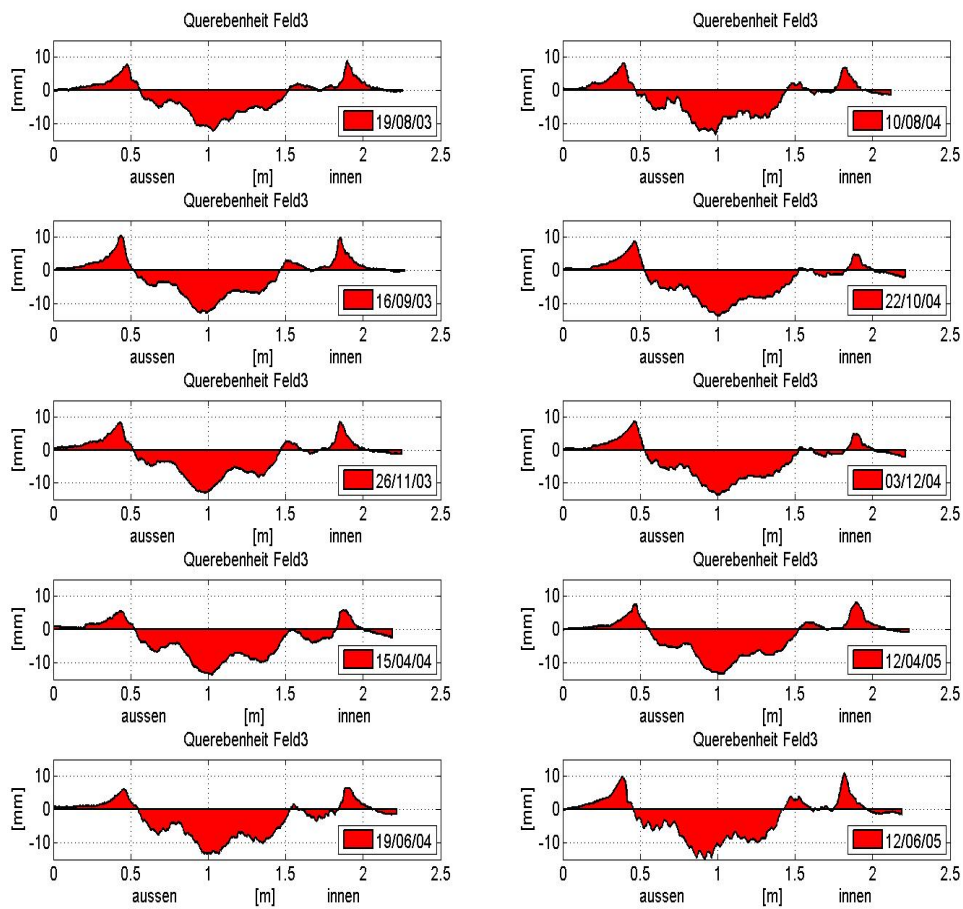


Bild 28 Senkungen und Hebungen der Oberfläche im Vergleich zum Anfangszustand.

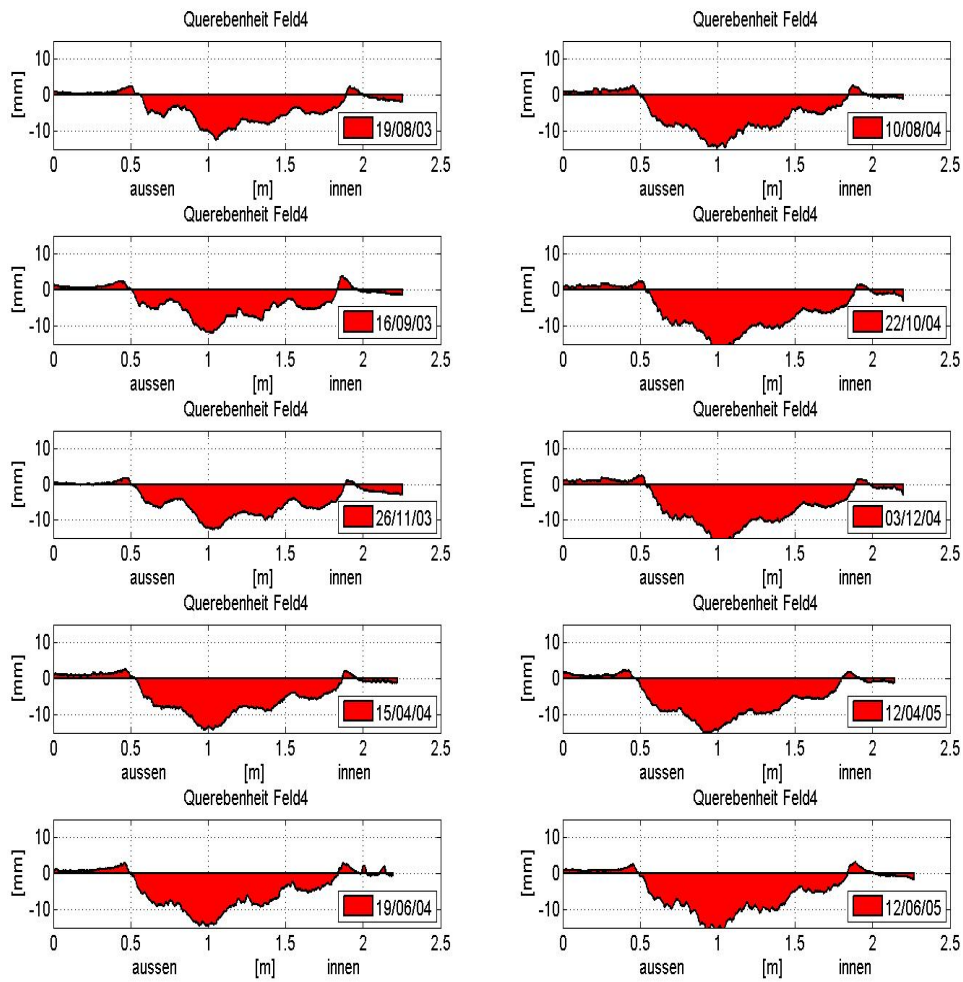


Bild 29 Senkungen und Hebungen der Oberfläche im Vergleich zum Anfangszustand.

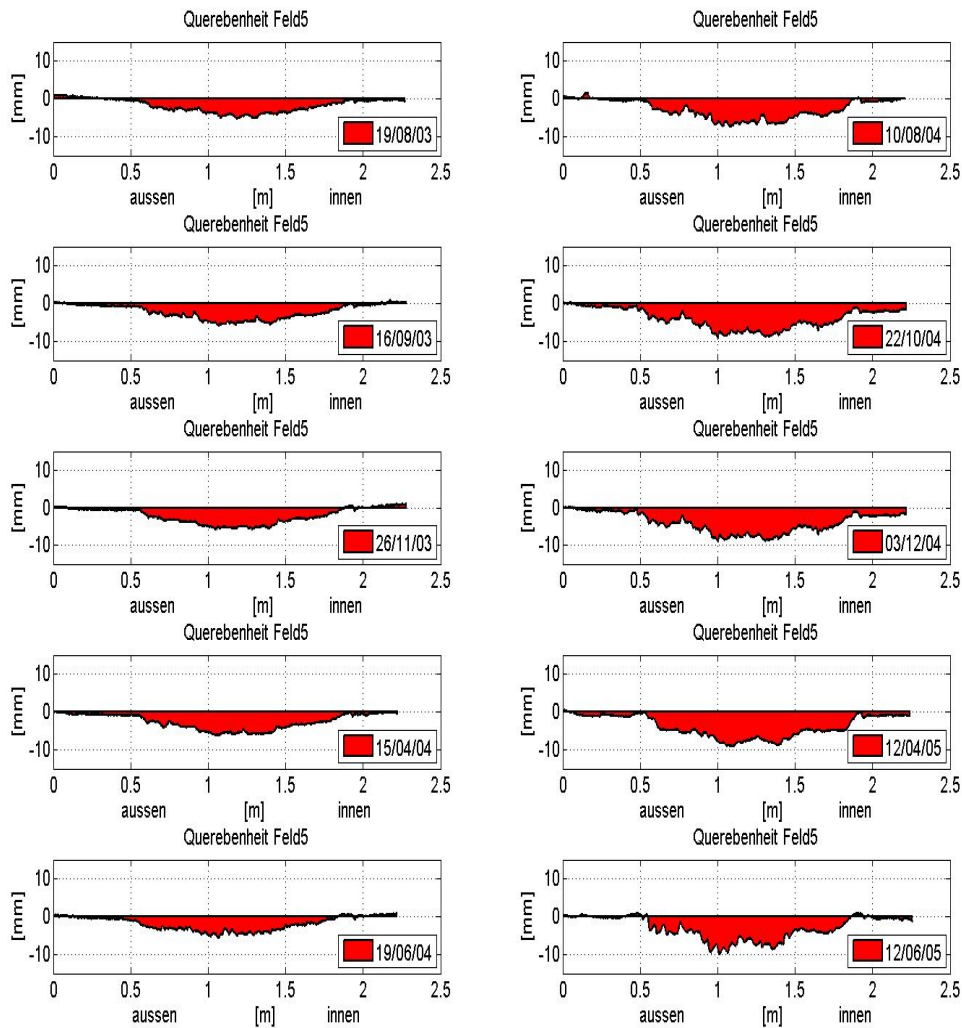


Bild 30 Senkungen und Hebungen der Oberfläche im Vergleich zum Anfangszustand.

Das Bild 31 bildet den integrierten eingesenkten Teil der obigen Querschnittflächen ab. Die Integration der Messlinien durch die Querschnittlänge wurde mit dem Programm MATLAB durchgeführt. Die Messungen wurden zuerst mit einer Kurve interpoliert, welche anschliessend über die Querschnittlänge integriert wurde. Als Integrationsalgorithmus wurde die „Adaptative Simpson Procedure“ angewendet. Diese Funktion ist im Programmcode von Matlab integriert. „QUAD“.

Die Auswertung zeigt, dass insbesondere während dem Sommer eine Zunahme der Materialverschiebung gegen aussen, weg von den Radspuren, stattfindet.

In der Winter-Frühling Periode bleiben die Querschnitte in der Grössenordnung stabil oder in einigen Fällen (Feld 2 -3- 4) werden sie sogar flacher.

Die Messungen zeigen, dass die Felder 4 und 5 als Folge der Besonnung eine weitere Nachverdichtung durchgemacht haben. Die Felder 1 und 4 haben schon

am Anfang eine merkbare Einsenkung des Querschnittes gezeigt, wobei Feld 1 während des Versuchs keine weitere massgebende Einsenkung gezeigt hat.

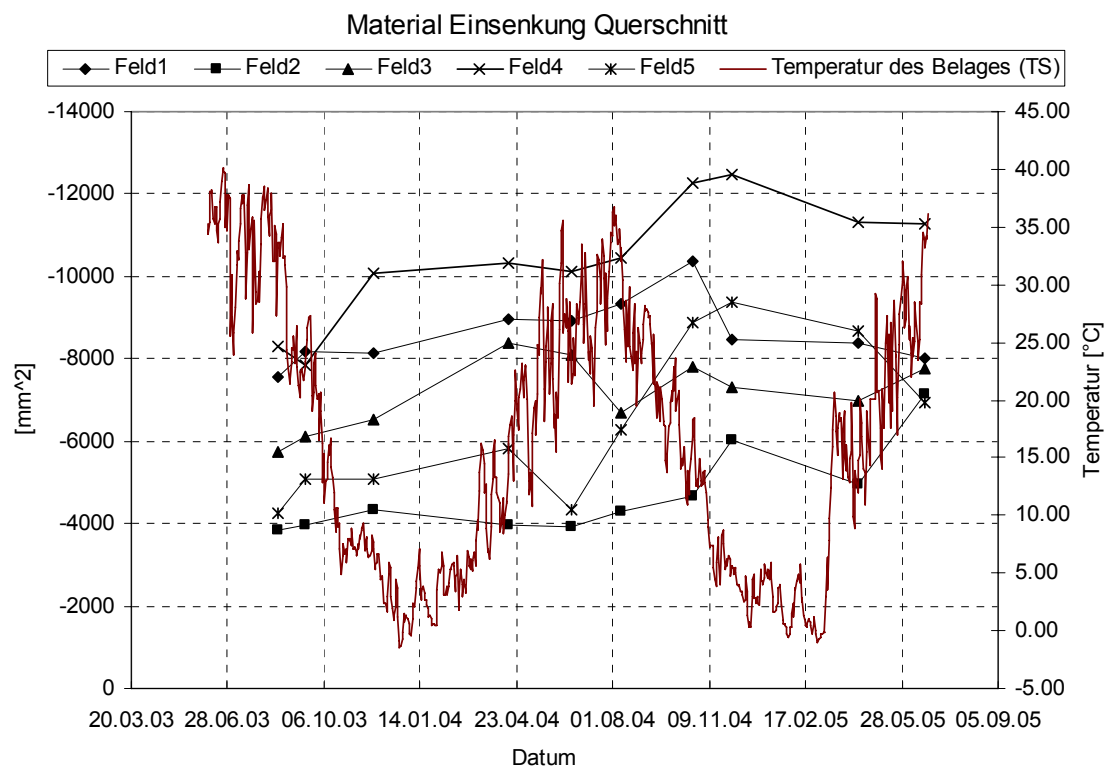


Bild 31 Senkungen und Hebungen der Oberfläche im Vergleich zum Anfangszustand

Das Bild 32 zeigt eine Beschreibung des Vergleichs zwischen der gesamten Querschnittsfläche und dem eingesenkten Teil der integrierten Querschnittsfläche. Mit dieser Darstellung ist deutlich erkennbar, dass das Feld 3 ein ziemlich unabhängiges Verhalten gezeigt hat. Die seitlichen Material-Hebungen haben im Feld 3 eine bedeutende Rolle im Vergleich zum eingesenkten Teil. Die Ursache ist in der markanteren Zunahme der Spurrinnenbildung in diesem Feld zu sehen. Die Material-Hebung ist in den Sommer Perioden grösser und nimmt während dem Winter ab.

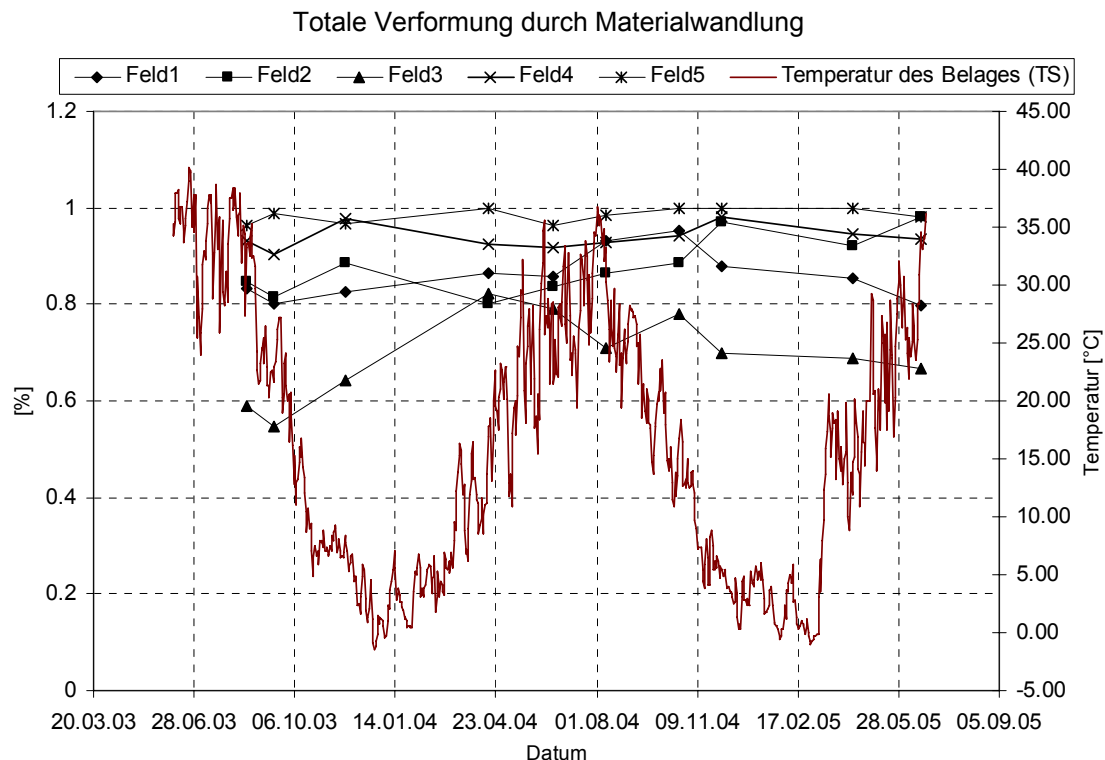


Bild 32 Integrierte totale Verformung durch Materialwandlung

Im Bild 33, Bild 34, Bild 35, Bild 36, Bild 37 wird die Veränderung des Querschnittes dargestellt.

Man kann somit beobachten, dass im Feld 3 die Hebungen eine grosse Rolle gespielt haben, diese Hebungen haben aber zuerst mit der Zeit langsam abgenommen.

Dieser Umstand hat zu einer „scheinbaren“ Reduktion des RD Wertes geführt, da die eingesenkte Fläche ständig zugenommen hat, auch wenn die Spurrinnentiefe geringer geworden ist.

Der Effekt des Pneuwechsels ist auch auf den Darstellungen deutlich erkennbar, besonders im Feld 5, wo der Belag am meisten beansprucht wurde.

Der wichtigste Parameter ist aber die Temperatur, wovon alle diese Phänomene abhängig sind.

Die hohen Sommertemperaturen vom Jahr 2003 haben den Belag sehr stark beansprucht, so dass die Spurrinnenbildung stärker als erwartet war.

Im folgenden Jahr 2004 traten kleinere Zunahmen der Spurrinnentiefen auf, insbesondere in denjenigen Feldern, die schon stark beansprucht worden waren und deren Oberfläche mehr Sonneneinstrahlung erfahren hatte.

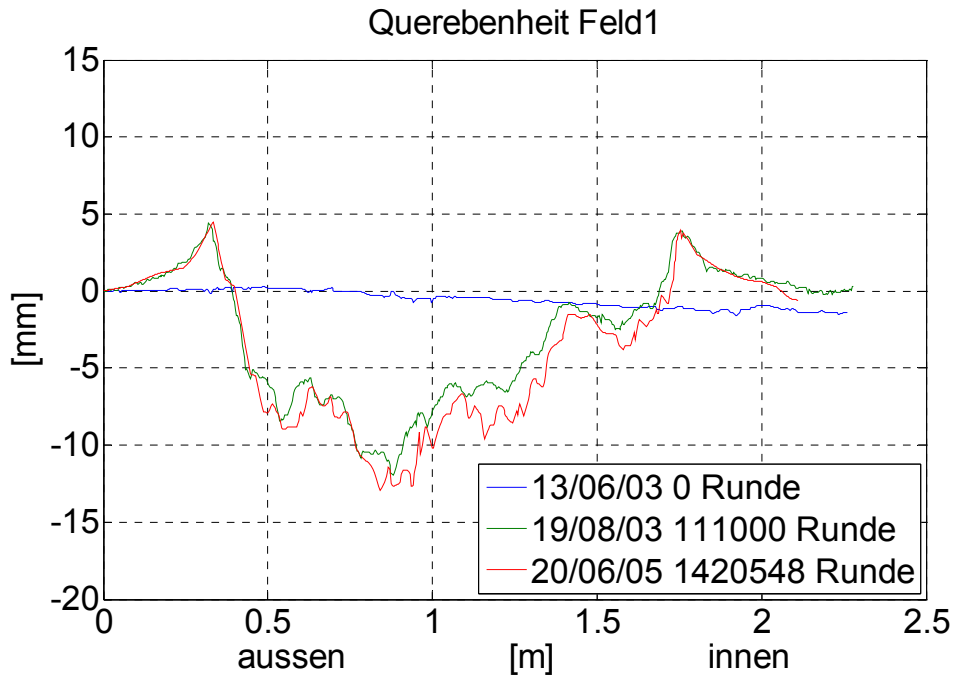


Bild 33 Spurrinnen, Entwicklung im Feld 1

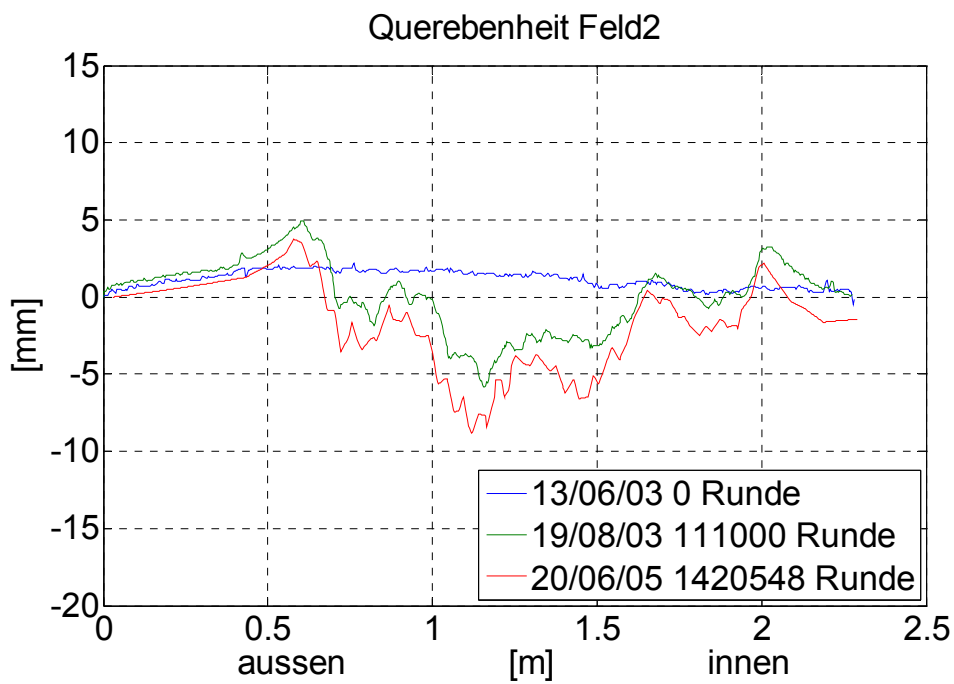


Bild 34 Spurrinnen, Entwicklung im Feld 2

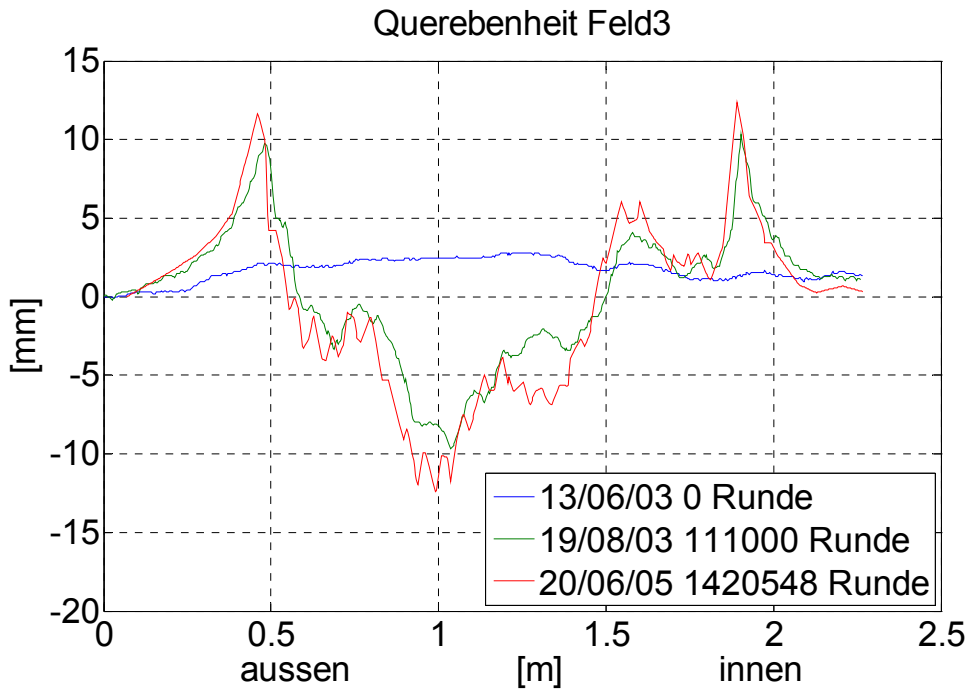


Bild 35 Spurrinnen, Entwicklung im Feld 3

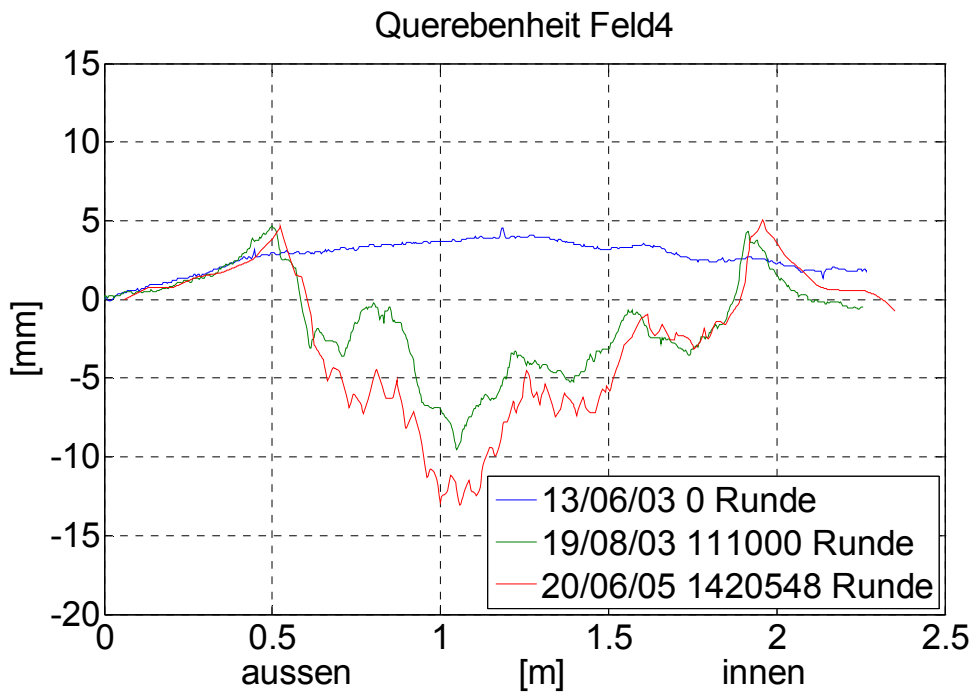


Bild 36 Spurrinnen, Entwicklung im Feld 4

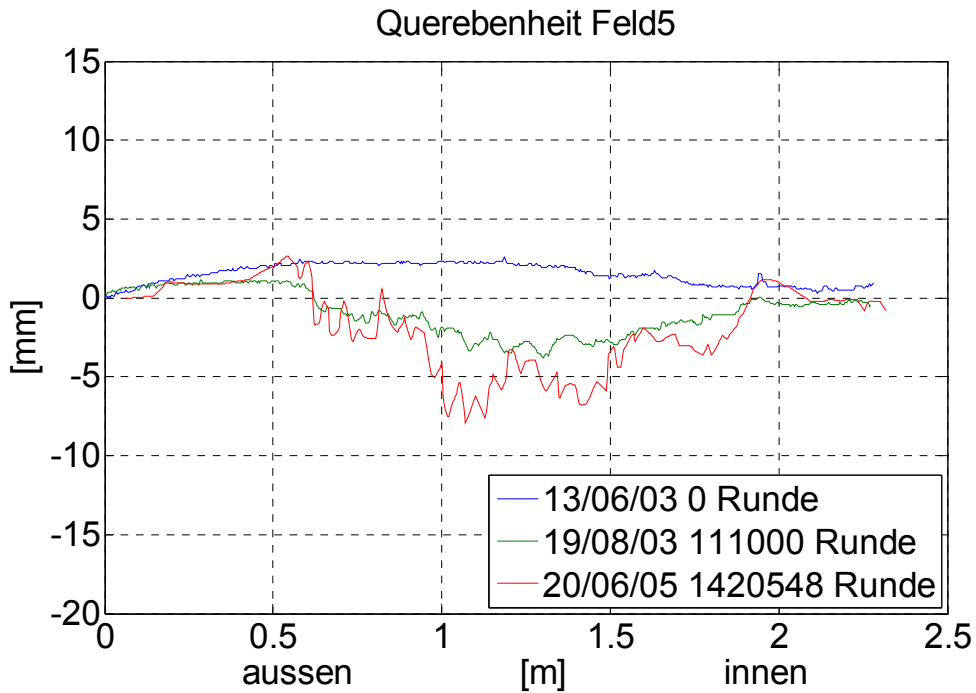


Bild 37 Spurrinnen, Entwicklung im Feld 5

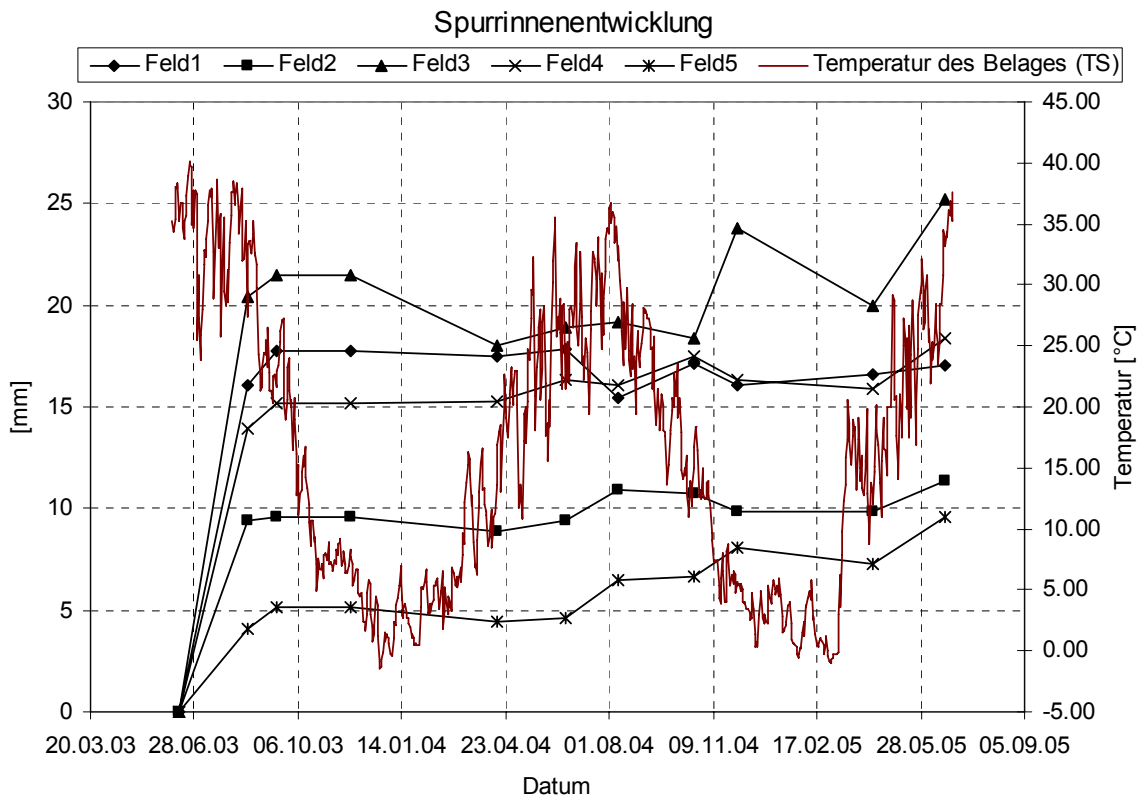


Bild 38 Spurrinnen, Entwicklung in den Feldern 1-5

4.3.2.2 Längsprofilmessungen

Die Längsprofilmessungen wurden pro Feld aufgenommen und ausgewertet, mit der Ausnahme von denen, die in der Übergangzone lagen. Insgesamt wurden circa 500 Punkte auf der Oberfläche markiert, deren Höhe regelmässig kontrolliert wurde.

Der Referenzpunkt befand sich am Rand der Betonwanne, bei der Instrumentierungszone des Feldes Nr. 1.



Bild 39 : Messpunkte der Längsebenheit (weiss, in der Mitte der Fahrbahn)

4.3.2.2.1 Profiländerungen

Das Profil wurde infolge der schwierigen Einbaubedingungen sehr unregelmässig.

Die Höhe der verschiedenen Felder im Bezug auf das Niveau der Betonwanne variiert etwa um 3 cm. Die maximalen Setzungen, die durch die Nachverdichtung der Felder entstanden, sind je nach Feld unterschiedlich, und erreichen einen maximalen Wert von circa 8 mm. Die Nivellements zeigen eine kontinuierliche Änderung der absoluten Höhe der Felder, besonders beim Feld 4 sind die Anfangssetzungen deutlich grösser als bei den anderen Feldern. Dies ist mit den geringeren Werten der Verdichtung der Foundation bzw. des Untergrundes zu erklären, da in diesem Feld das Problem einer verstopften Drainage aufgetreten ist. Bild 40 zeigt die mittlere Einsenkung pro Feld des Oberbauniveaus.

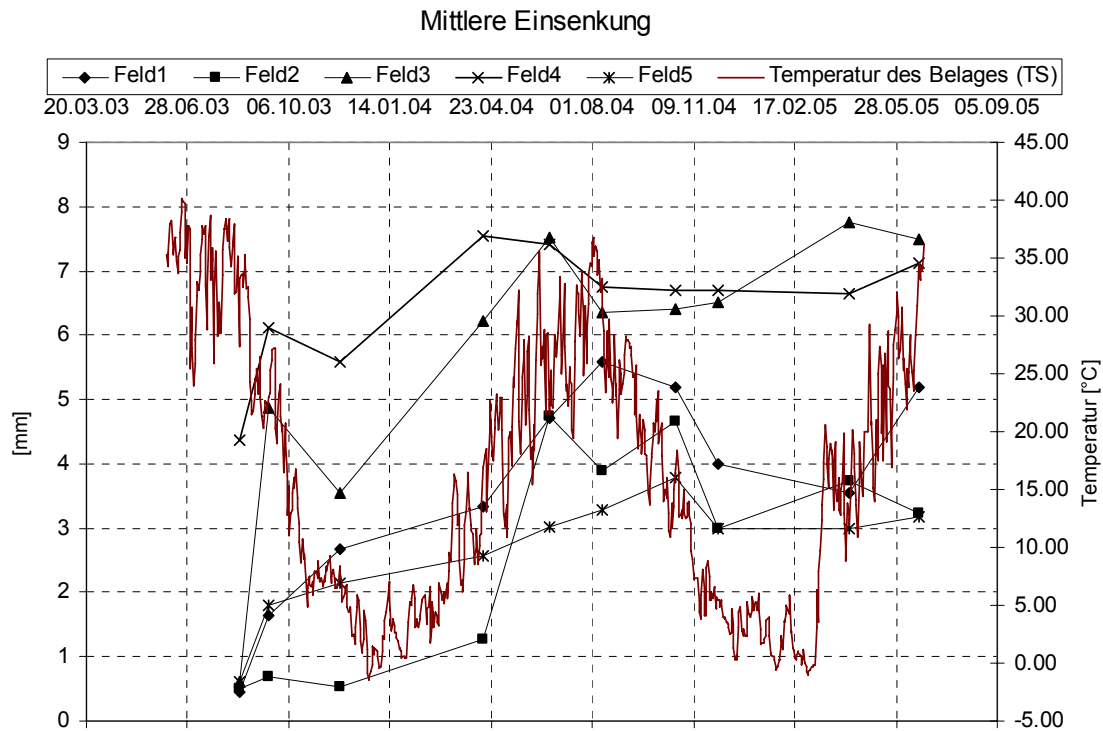


Bild 40 Mittlere Einsenkung der Felder

Die Einsenkung ist der Niveauunterschied zwischen der Anfangshöhe der Felder im Bezug zu einem festen Punkt auf der Betonwanne und den nachfolgenden Höhen der einzelnen Felder.

Die verschiedene Feldeinsenkungen wurden über die ganze Länge eines Feldes gemittelt, dadurch entsteht der mittlere Wert.

Das Phänomen ist auch auf die Spurrinnenbildung korrelierbar: es ist aus diesem Grund schwierig zwischen effektiven Einsenkung und Spurrinnen zu unterscheiden.

Die Darstellung zeigt dass die grössten Werte der Einsenkung dort stattfinden wo die Felder am stärksten von den Lastübergängen beeinflusst worden sind (Feld: 3,4). Das ist vermutlich auf die schlechtere Verdichtung des Unterbaus zurückzuführen. Durch die Belastung hat eine nachträgliche Verdichtung der Felder stattgefunden.

Der Temperatureinfluss ist deutlich erkennbar, die mittlere Einsenkung nimmt mit zunehmenden Temperaturen zu, wobei in der Frostauftauperiode die Tragfähigkeitsverminderung auch einen wichtigen Einfluss gehabt haben kann.

4.3.2.2.2 Längsebenheit

Die Längsebenheit wird durch den s_w Wert beschrieben. Die Variation wurde durch regelmässige Nivellements untersucht (Bild 41, Bild 42, Bild 43, Bild 44). Die Felder haben schon am Anfang einen sehr hohen s_w Wert gezeigt, da der Einbau aufgrund der besonderen Geometrie der Strecke kompliziert war. Im Allgemeinen nehmen die s_w Werte mit den hohen Temperaturen zu. Im Winter jedoch nehmen sie normalerweise ab oder bleiben stabil.

Die Veränderung bleibt auf alle Fälle in einem kleinen Bereich, mit Ausnahme der Felder 1 und 4, wo sie deutlich zugenommen hat.

Aus diesen Ergebnissen kann man auch ableiten, dass die Temperaturen in diesen Bereichen einen grösseren Einfluss als die Anzahl Überrollungen gespielt hat. Dies gilt besonders in den Bereichen, wo die Anfangsverdichtung schon stattgefunden hatte.

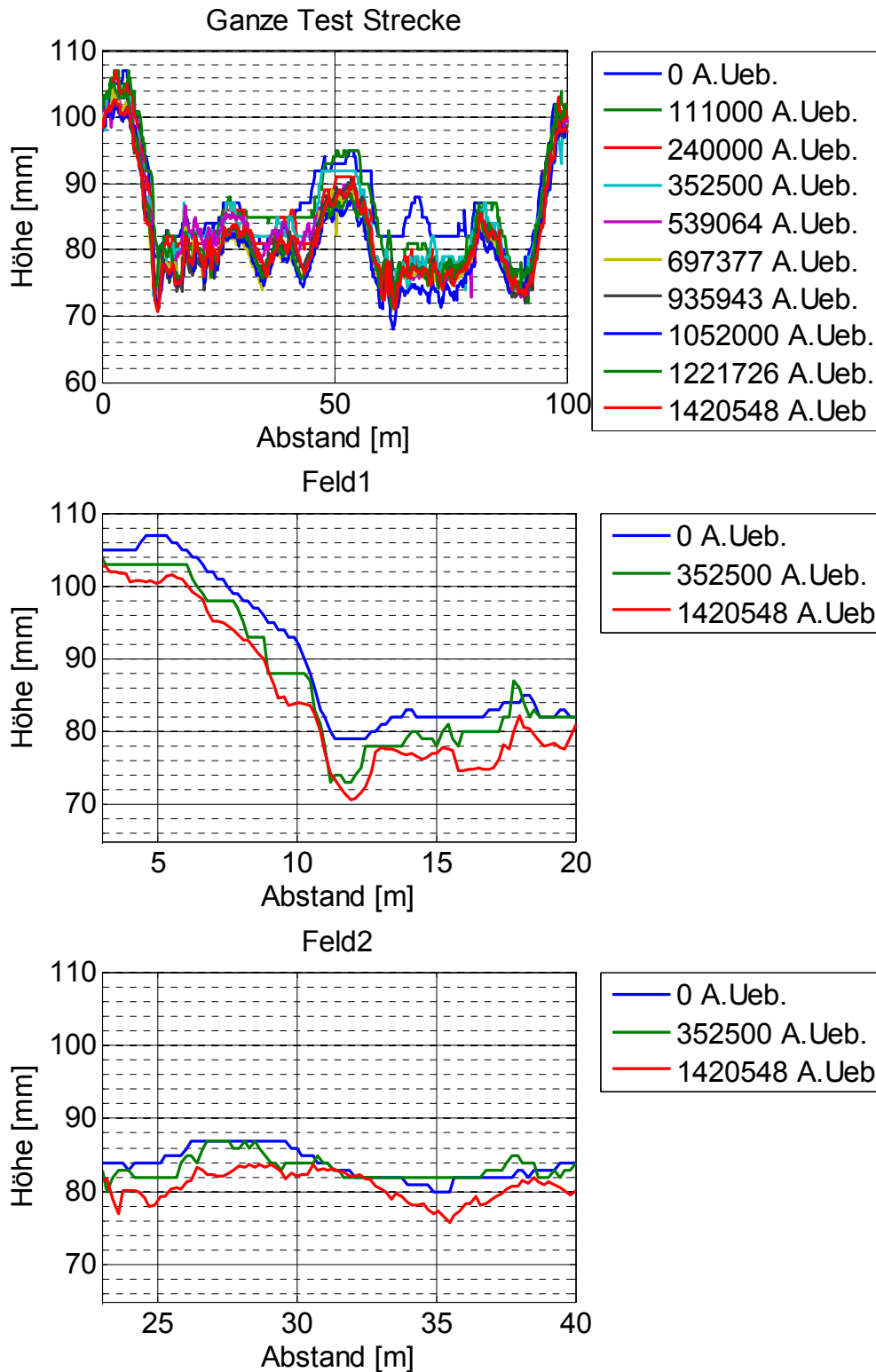


Bild 41 Längsprofil Felder 1+2

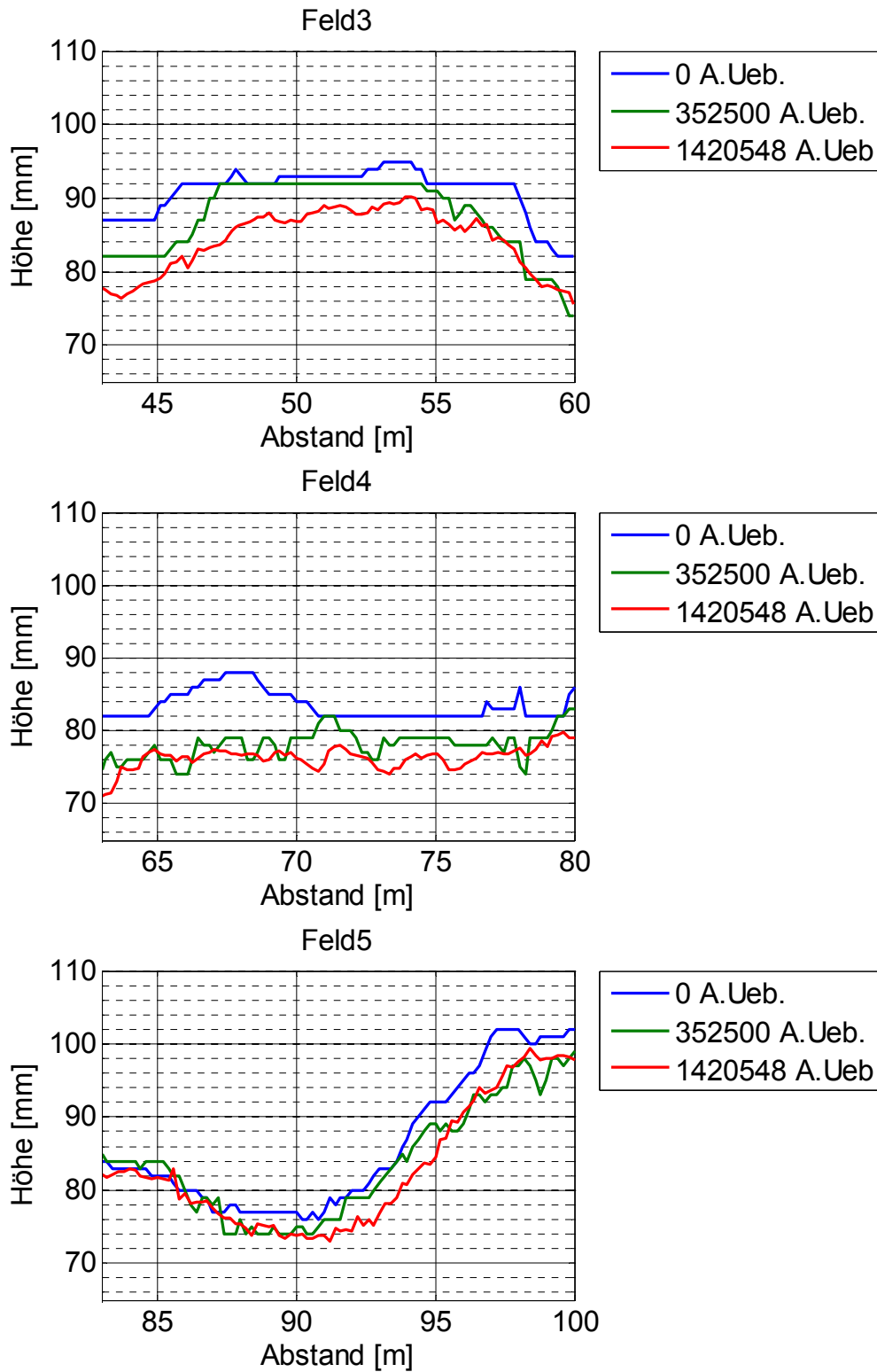


Bild 42 Längsprofil Felder 3+5

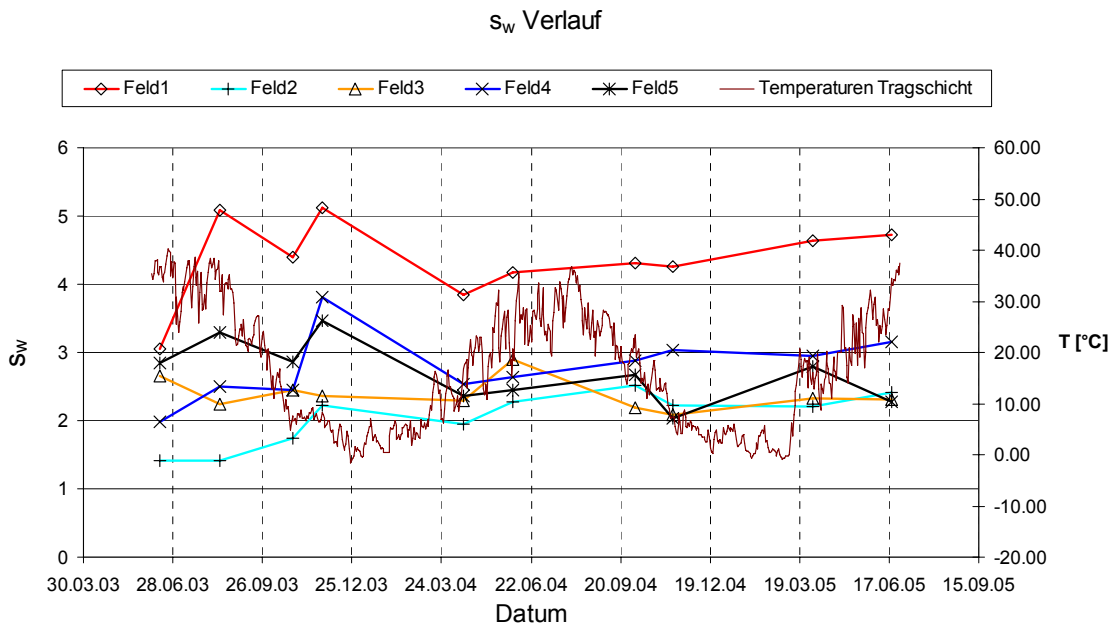


Bild 43 s_w Wert-Verlauf

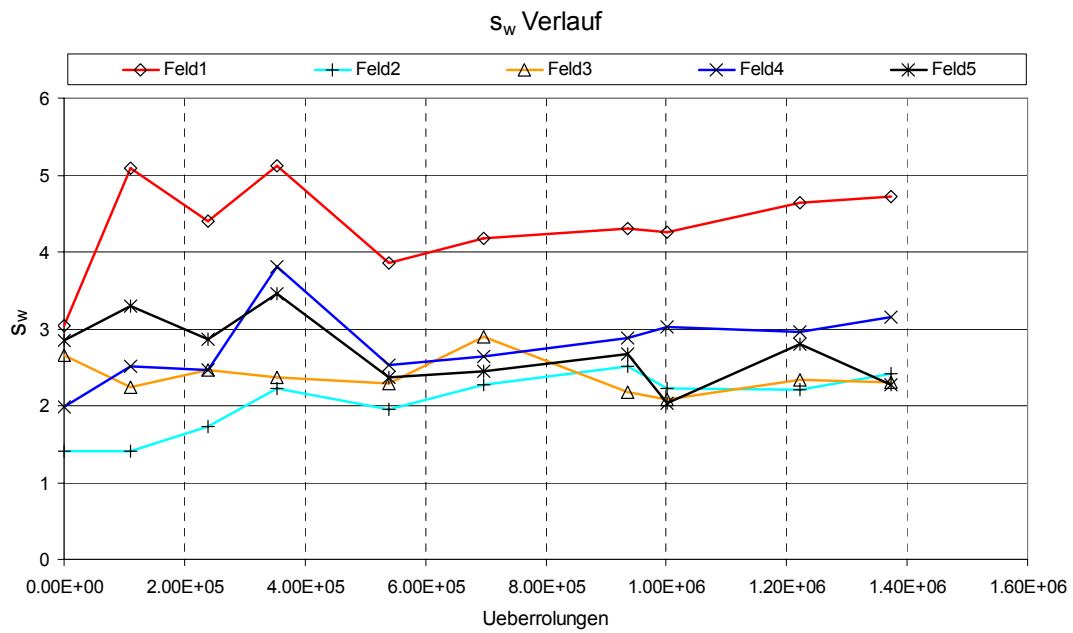


Bild 44 s_w Wert-Verlauf

4.4 Sensoren

Die Messungen mittels der eingebauten Sensoren wurden regelmässig ausgewertet und ermöglichen eine zusätzliche Beschreibung der mechanischen Eigenschaften der verwendeten Materialien. Ihr Einsatz ist besonders wichtig, wenn man nicht nur die zeitliche Entwicklung der Strassenoberfläche, sondern auch eine reelle Übersicht über die unterschiedlichen Verhaltensweisen der Prüffelder betrachten will.

Es ist sehr wichtig zu erwähnen, dass mit diesen Technologien all die notwendigen Feldbedingungen, die die Ergebnisse beeinflussen können, ermittelt werden können.

So sind zum Beispiel die verschiedenen gemessenen Verformungen und Dehnungen nicht unabhängig von der Anzahl der Überrollungen, der Fahrgeschwindigkeit und vor allem der Temperatur zu betrachten.

4.4.1 Dehnungs-Verformungsmessungen

Um die mechanischen Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Überrollungen und der Temperatur zu erhalten, wurden regelmässig Dehnungsmessungen durchgeführt und ausgewertet.

Wie aus den vorgestellten Messergebnissen zu sehen ist, wurden leider viele Sensoren aus verschiedenen Gründen am Anfang und während des Betriebes zerstört.

4.4.1.1 Eingebaute DMS

Die wichtigsten Ergebnisse sind in den folgenden Tabellen enthalten.

Die Messungen wurden mit dem Rad in der Spurmitte durchgeführt, wo die grösseren Dehnungen zu erwarten sind. Im Rundlauf Versuchsfeld Nr. 5 wurde diese Annahme belegt.

Die erste wichtige Schlussfolgerung lautet, dass die Geschwindigkeit der Lastbeanspruchung eine entscheidende Rolle in der mechanischen Antwort der eingebauten Materialien hat. Je geringer die Geschwindigkeit ist, desto grösser werden die Dehnungen im unteren Niveau der Tragschicht. Dieser Einfluss ist auch in der oberen Schicht zu beobachten, wobei einige bis jetzt unbekannte Phänomene stattfinden. Der Dehnungsverlauf hat in diesen Bereichen besonders bei hohen Temperaturen eine schwer interpretierbare Entwicklung, die nicht nur aufgrund des sehr hohen Druckbereichs auf der Oberfläche, die durch die Pressung der Räder entstehen, zu erklären ist.

Die grössten Unterschiede findet man zwischen 10 – 25 km/h und bei hohen Temperaturen, bei denen die Materialviskosität zunimmt.

Wie bei den anderen untersuchten Materialeigenschaften zeigen die Messergebnisse eine grosse Temperaturabhängigkeit. Die verschiedenen Dehnungen dürfen deswegen nur bei gleichen Temperaturbedingungen verglichen werden.

Die DMS wurden wie folgt bezeichnet:

- TQ: Tragschicht Querrichtung
- TL: Tragschicht Längsrichtung
- DQ: Deckschicht Querrichtung
- DL: Deckschicht Längsrichtung

Die Aufnahme der Messungen wurde mit einer Frequenz von 1000 Hz durchgeführt, das entspricht 1000 Ablesungen pro Sekunde.

Um die Schwankungen des Signals zu minimieren wurden die Messergebnisse gefiltert. Speziell war darauf zu achten, dass die Ergebnisse durch diesen Vorgang nicht verfälscht wurden.

Bild 45, Bild 46, Bild 47, Bild 48 zeigen zwei typische Messergebnisse aus den in verschiedenen Tiefen eingebauten DMS.

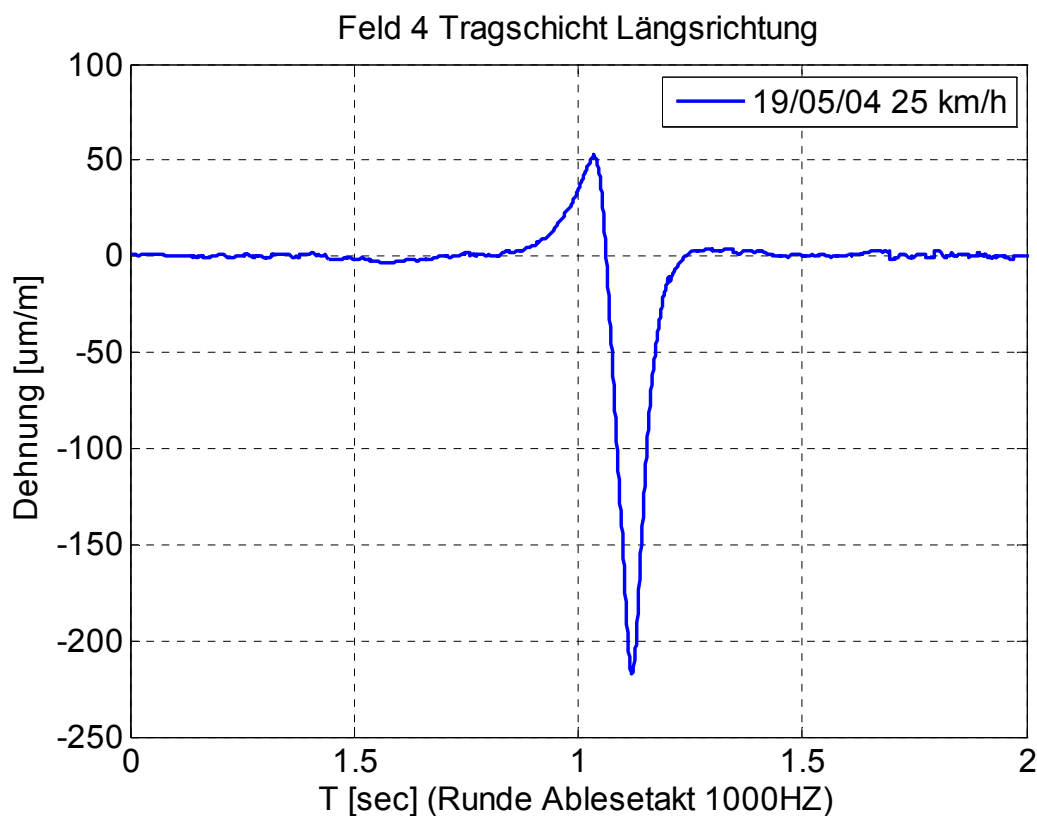


Bild 45 Messsignal eines in der Tragschicht längs- eingebauten DMS

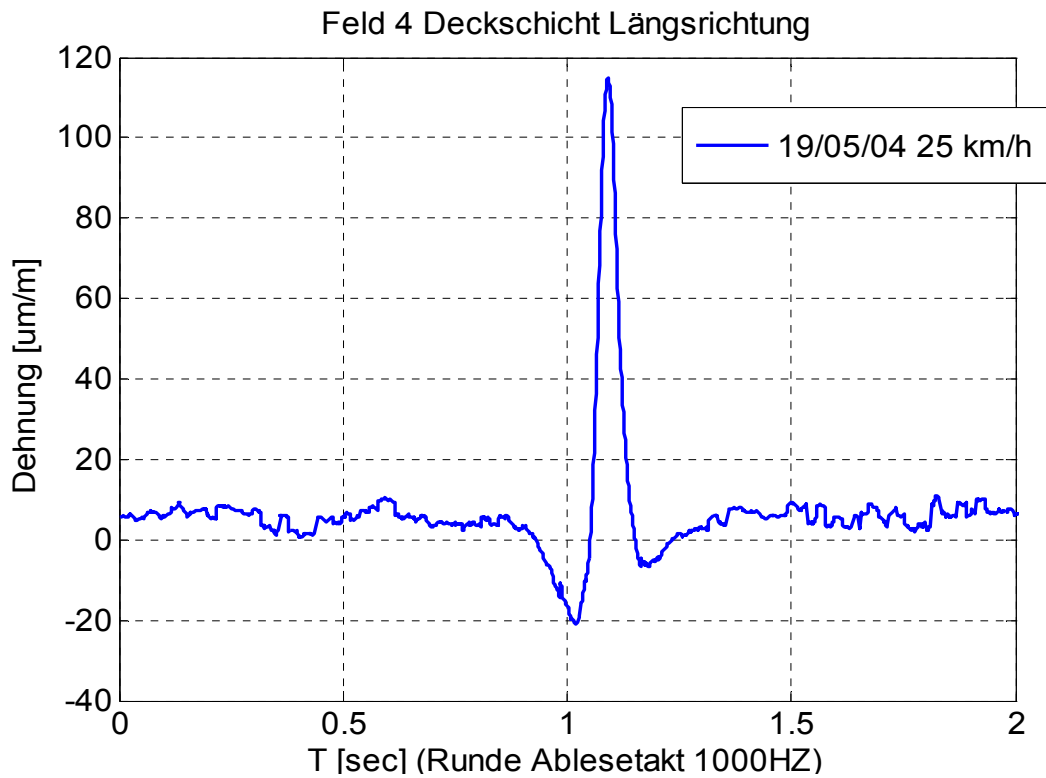


Bild 46 Messsignal eines in der Deckschicht längs- eingebauten DMS

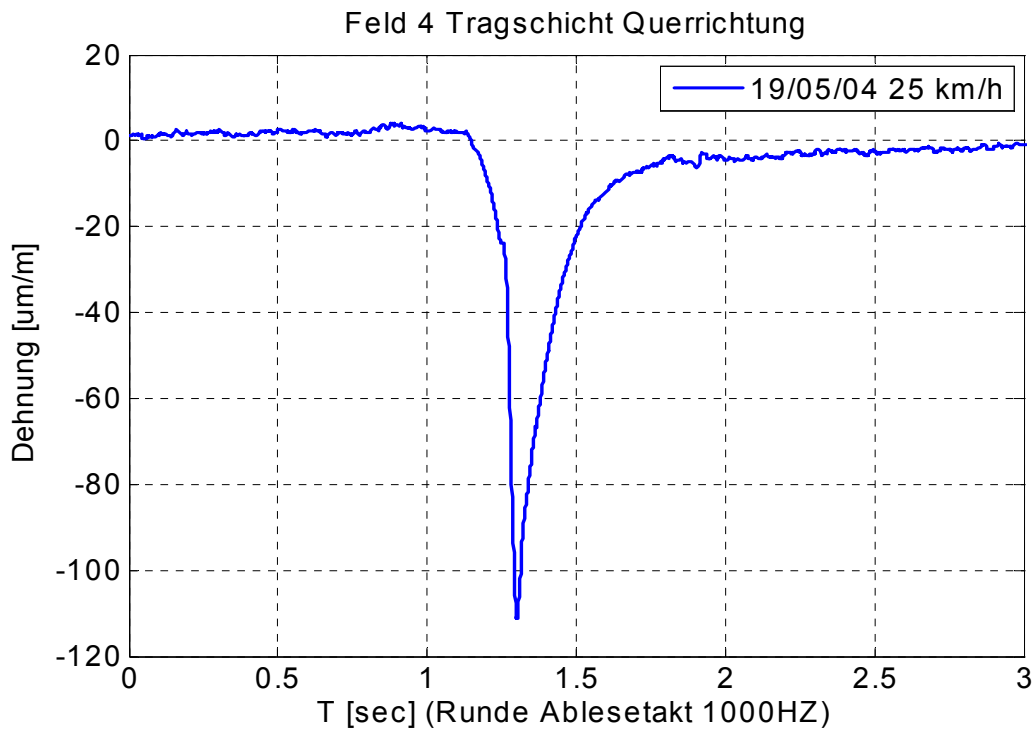


Bild 47 Messsignal eines in der Tragschicht quer- eingebauten DMS

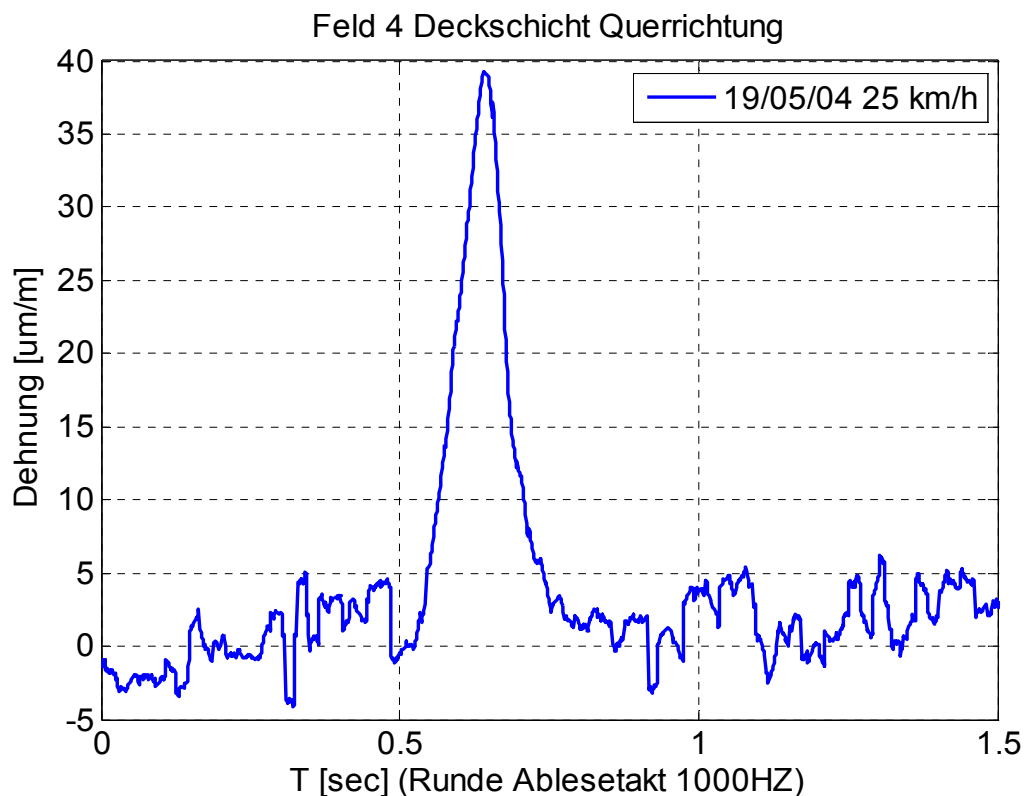


Bild 48 Messsignal eines in der Deckschicht quer- eingebauten DMS

Die Form des Signals ist unterschiedlich in Längs- und in Querrichtung. Die Sensoren, die in Längsrichtung liegen, erfahren eine Belastung bevor das Rad darüber fährt. Das ist auf die Einflussmulde unter der Last zurückzuführen. Die visco-elastische Komponente des Materials ist in der Entlastungsphase der Kurve deutlich erkennbar, als zeitverzögerte Relaxation gegen Null. Plastische Verformungen werden selten und nur bei hohen Temperaturen gemessen. Die Anzahl der Überrollungen hat weniger Einfluss auf die Materialeigenschaften als die Temperatur, aber es wurde auch in einigen Fällen festgestellt, dass im ähnlichen Temperaturbereich mit zunehmender Anzahl der Überrollungen auch die entsprechenden Dehnungen angestiegen sind.

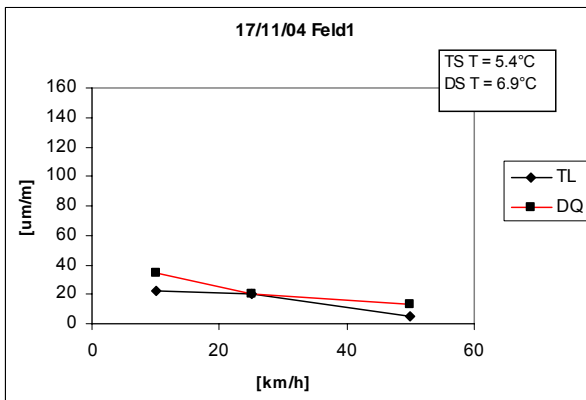
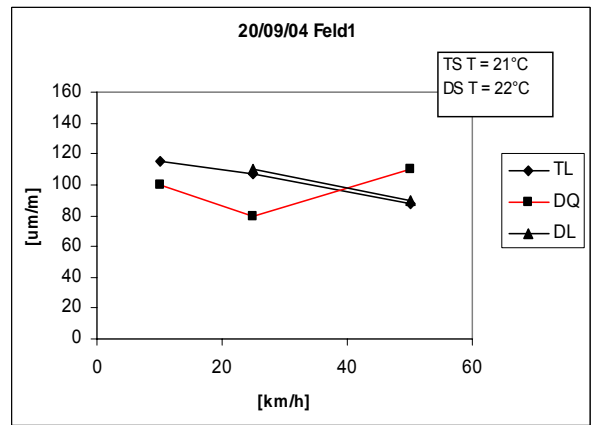
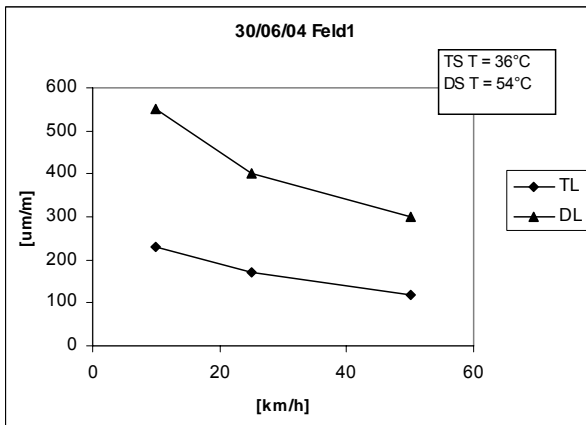
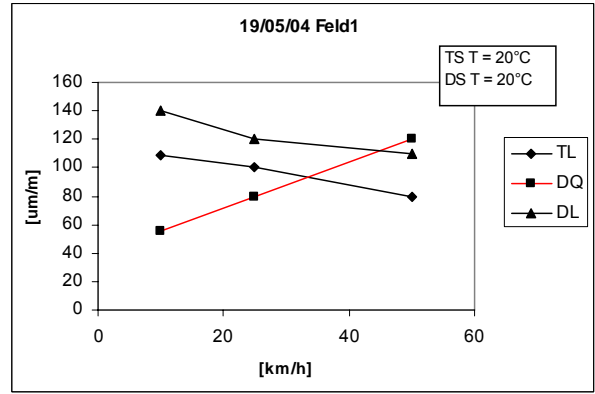
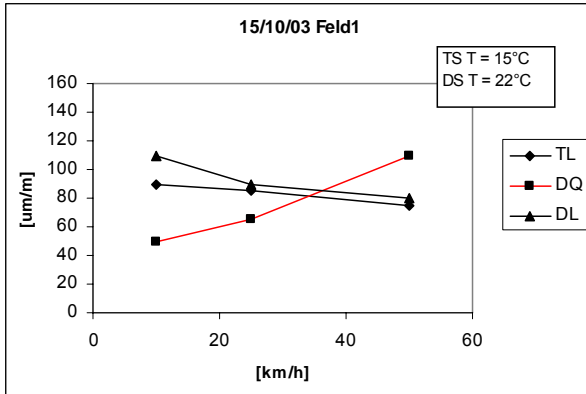


Bild 49 Einfluss der Überrollgeschwindigkeit auf die DMS Feld1

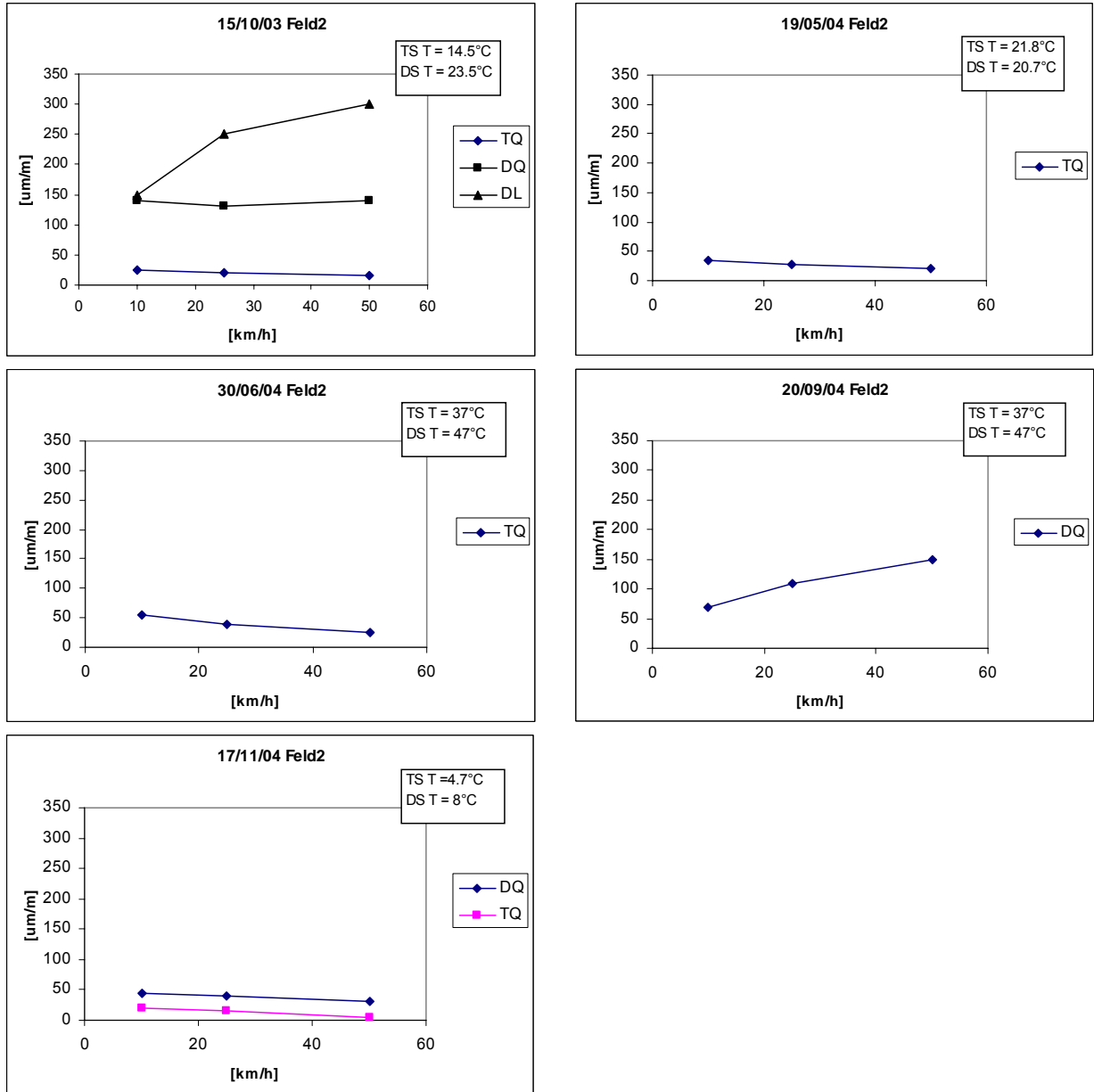


Bild 50 Einfluss der Überrollgeschwindigkeit auf die DMS Feld2

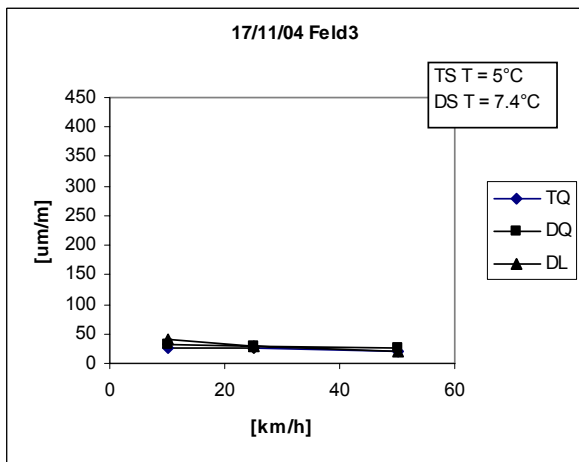
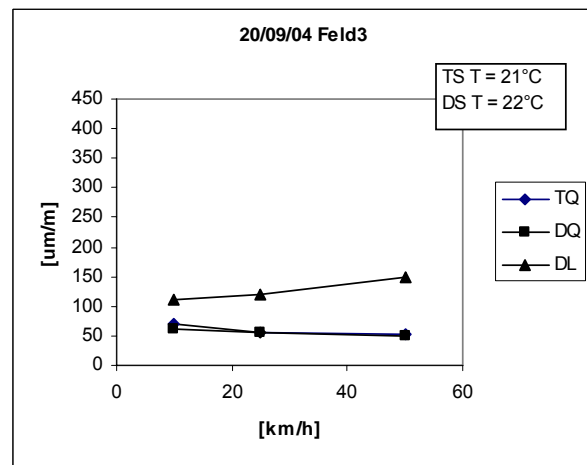
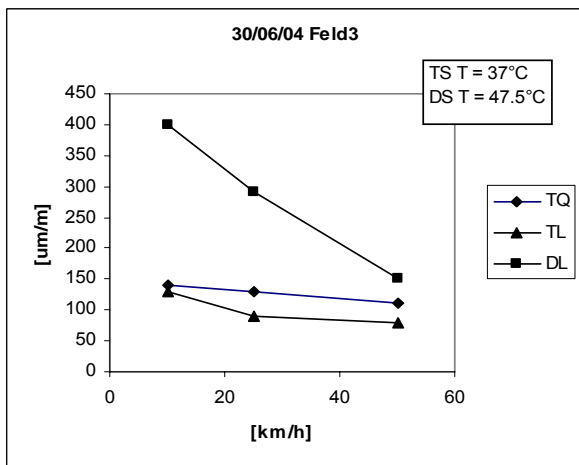
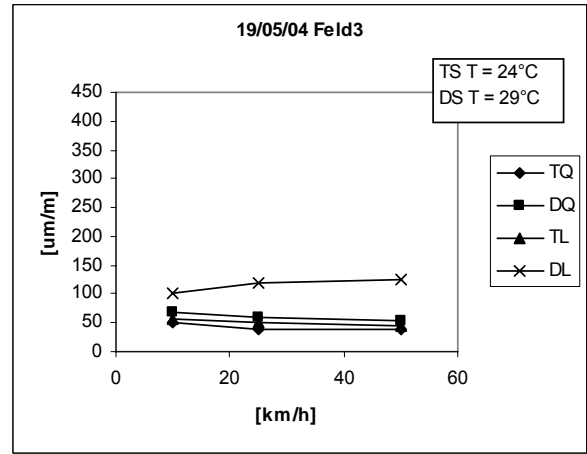
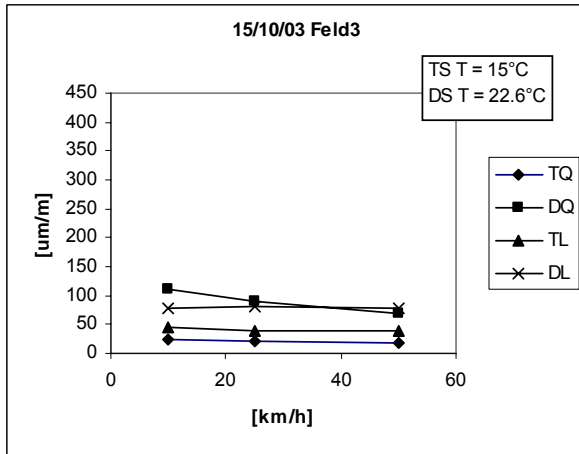


Bild 51 Einfluss der Überrollgeschwindigkeit auf die DMS Feld3

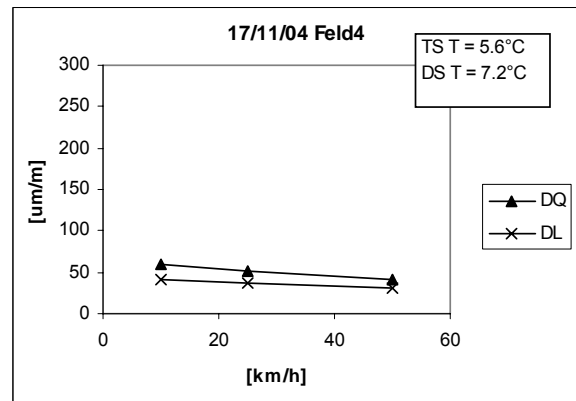
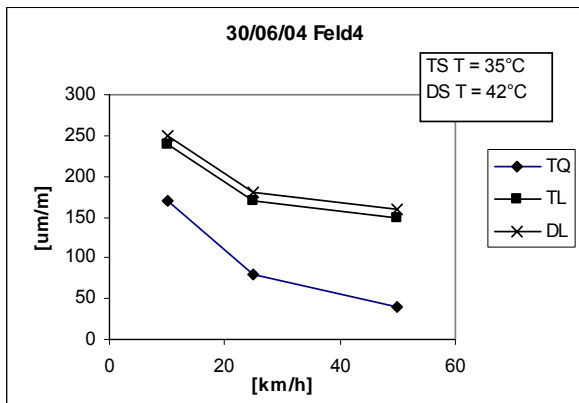
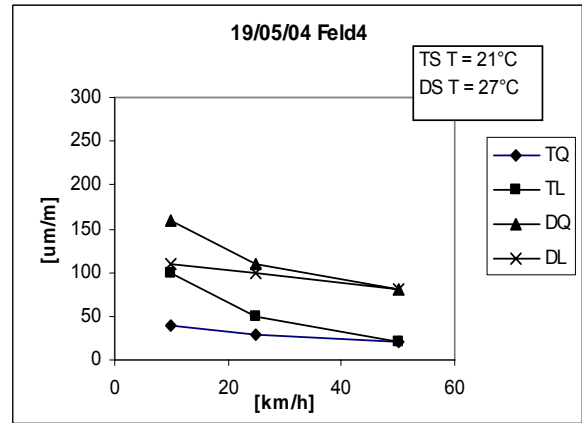
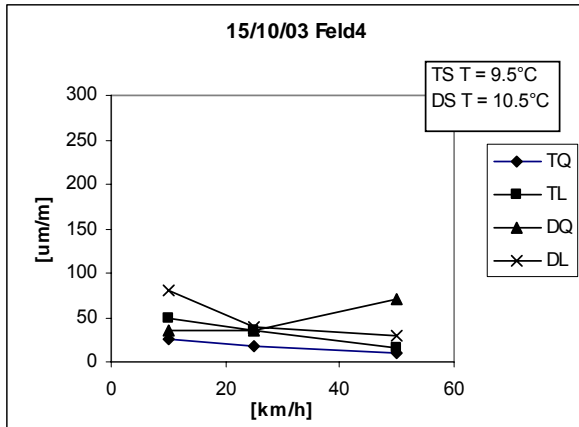


Bild 52 Einfluss der Überrollgeschwindigkeit auf die DMS in Feld4

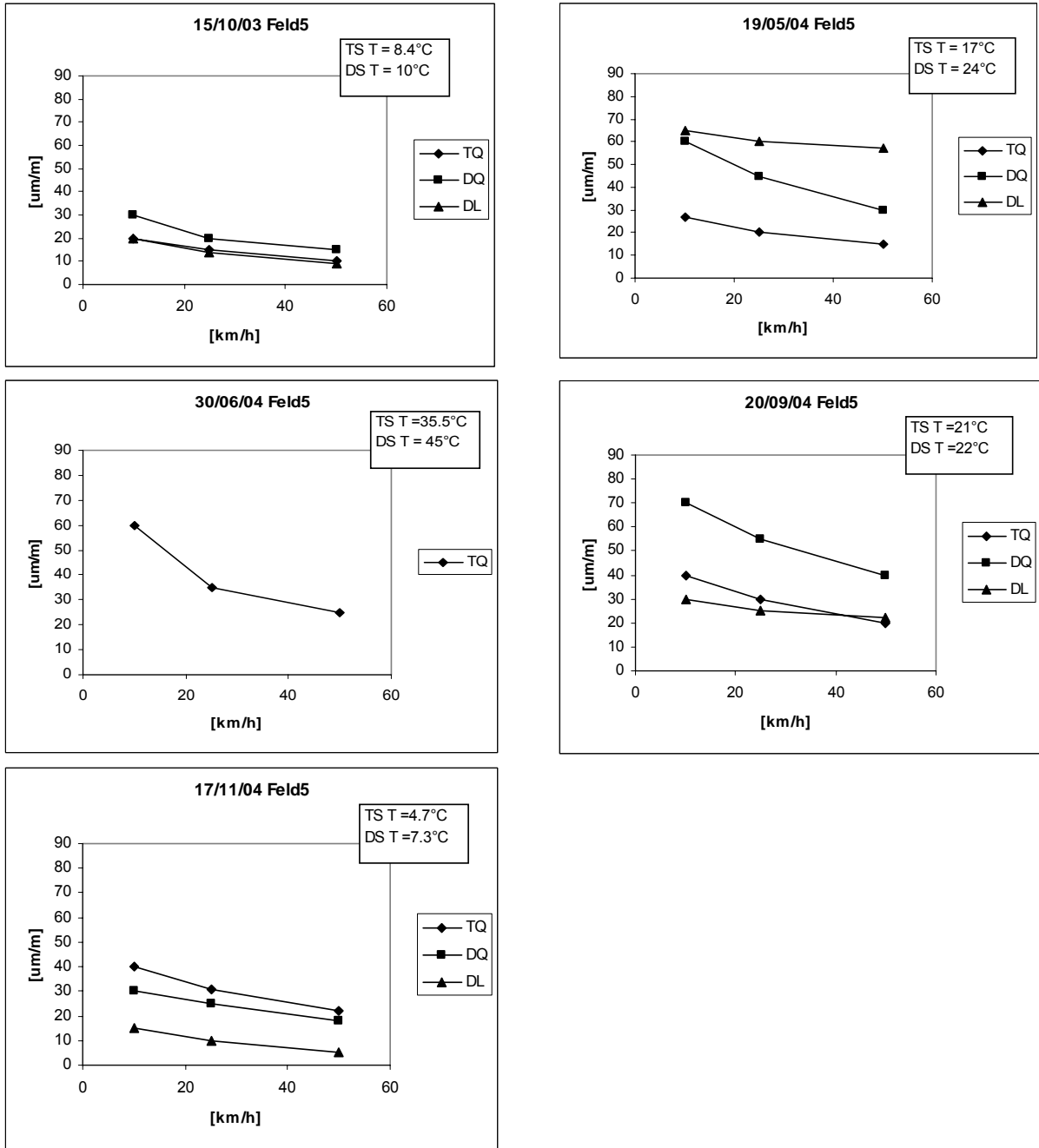


Bild 53 Einfluss der Überrollgeschwindigkeit auf die DMS Feld5

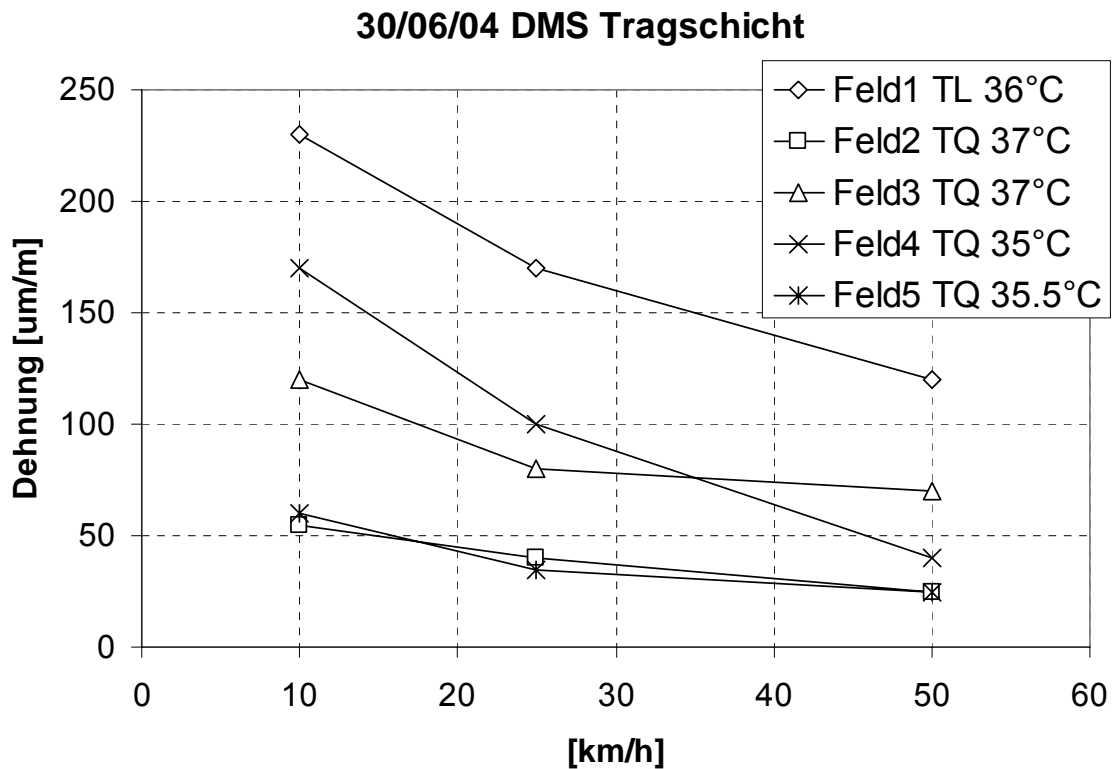


Bild 54 : Vergleich der verschiedenen DMS (TS) Messsignale

Ein Vergleich zwischen den verschiedenen DMS Messsignalen ist im Bild 54 gegeben. Die in den Felder 1 und 4 eingebauten DMS zeigen die grössten Verformungen, der Einfluss der Überrollgeschwindigkeit ist auch deutlich erkennbar. Feld 3 zeigt, wie auch weitere Felder, ein sonderbares Verhalten, da die Belastungsgeschwindigkeit keine so grosse Rolle spielt wie bei den Feldern 1 und 4. Die Grössenordnung der Verformungen liegen im selben Bereich. Das ist vermutlich auf eine schwächere Untergrundtragfähigkeit zurückzuführen oder auf strukturelle Schwächen des Materials, die nicht vom Bindemittel abhängig sind. Die Einflüsse der Lastübergänge und der Temperatur bei den Sensoren in der Deckschicht (in Längsrichtung) sind im Bild 55 dargestellt. Die Darstellung zeigt einige sonderbare Formen der Messsignale wie sie vor allem bei hohen Temperaturen auftreten.

Einige Voruntersuchungen mit einem 3D Finite Elemente Modell haben gezeigt, dass diese Phänomene nachmodelliert werden können. Aufgrund der hohen Last wird der Spannungszustand unter dem Rad von Druck zu Zug verändert, falls das Deckschichtmaterial besonders weich wird.

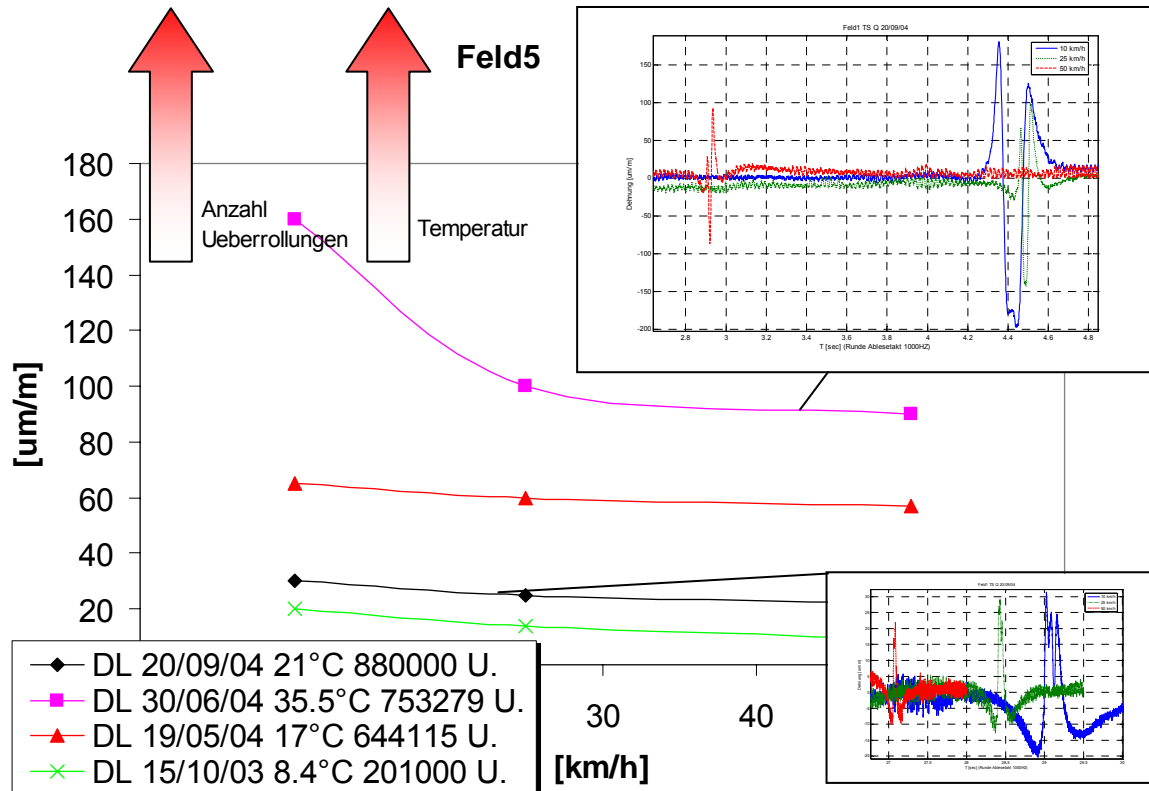


Bild 55 Temperatureinfluss (DMS in der Deckschicht)

4.4.1.2 DMS auf der Oberfläche

Die Form bzw. die Ausbreitung der Einflussmulde und der Dehnungen mit zunehmendem Radabstand, ist stark vom Schichtaufbau abhängig. Die Steifigkeit der Schichten beeinflusst die Breite und Form der Mulde, so dass unterschiedliche Aufbauten (Schichtstärke, Bindemittel, etc.) unter gleichwertiger Belastung ähnliche Einsenkungswerte, in der Mitte der Fahrbahn aber unterschiedliche Ausdehnungen und Formen der Setzungsmulde zeigen. Ob die Tragschicht oder tiefere Asphaltsschichten eine Rolle in der Einsenkung spielen, oder die Steifigkeit der oberen Schichten auch mitspielt, kann man aus der Form der Einflussmulde ermitteln.

Es muss erwähnt werden dass diese Messungen bis jetzt in der Literatur noch nicht sehr häufig anzutreffen sind, und dass dieses Argument mit anderen Messgeräte (FWD, neue Deflektionssensoren) auch vertieft werden sollte.

Bild 56 zeigt die Ergebnisse der Messungen, die beim Rundlauf durchgeführt worden sind.

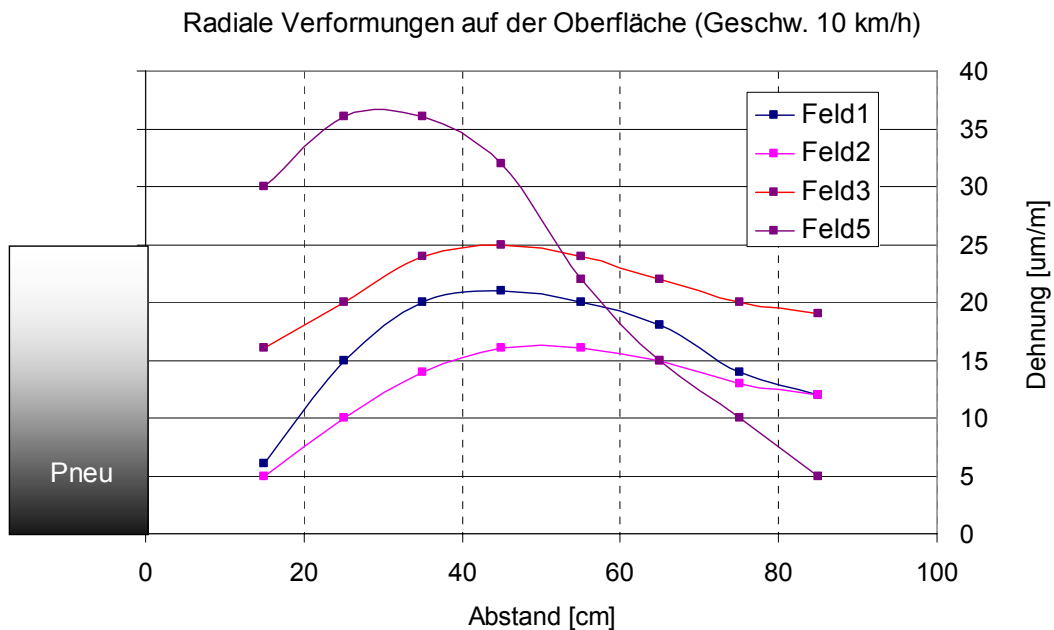


Bild 56 Ergebnisse aus dynamischen Versuchen in den Felder 1-2-3-5 (DMS auf der Deckschicht)

Die neben dem Rad am meisten beanspruchte Deckschicht befindet sich im Feld 5, dort wo die steifere Tragschicht eingebaut wurde. Aus diesen Ergebnissen ist erkennbar, dass wenn die Tragschicht steifer ist, die Krümmung der Oberfläche sehr gross ist neben dem Rad und mit dem radialen Abstand sehr schnell abnimmt. Das Feld 5 hat das steifere Verhältnis gezeigt. Feld 3 hat aufgrund eines vielleicht schwächeren Unterbaus die grösste weiteste radiale Verformung. Die oberflächlichen Verformungen der Feld 1 und Feld 2 sind ähnlich, wobei im Feld 2 kleinere Verformungen gemessen wurden. Der Messsensor im Feld 4 wurde leider zerstört.

4.4.1.3 LVDT

Dynamische Belastung

Die mit den LVDT's durchgeführten Messungen zeigen eine klare Abhängigkeit der gemessenen Verformungen aus den Steifigkeiten der verschiedenen Aufbauten, so wie den markanten Einfluss der Radgeschwindigkeit (Bild 57).

Die Messungen wurden statisch und dynamisch durchgeführt, und das Rad wurde in der Querrichtung verschoben, um auch den Einfluss der Lage der Belastung über dem Belag aufzunehmen.

Die folgenden Bilder zeigen den Einfluss der Geschwindigkeit auf die Zusammendrückung der Asphaltsschichten und das Ergebnis einer statischen Messkampagne.

Das Kriechen bildet bei den statischen Messungen ein wichtiges Phänomen, das sich durch das nichtlineare Verhalten des Asphaltes erklären lässt.

Die Tiefe, so wie auch die Länge der verschiedenen eingebauten Sensoren betragen:

Feld 1: 157 mm
 Feld 2: 174 mm
 Feld 3: 195 mm
 Feld 4: 189 mm
 Feld 5: 170 mm

LVDT 17/11/04

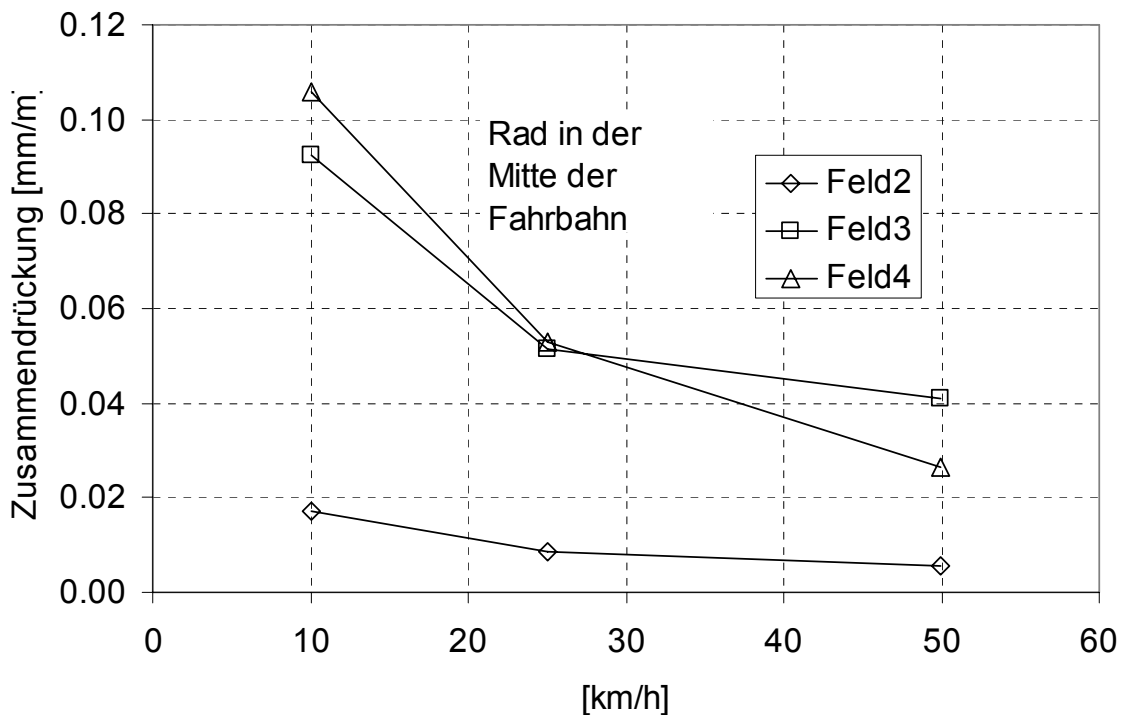


Bild 57 Vergleich LVDTs dynamische Messungen (Felder 2,3,4)

Die unterschiedlichen Verhalten der eingebauten Materialien sind aus diesen Messergebnissen deutlich erkennbar, wie z.B. beim Feld 5 wo die gesamte Zusammendrückung des Asphaltpakets viel kleiner ist als in den anderen Feldern.

Es muss aber erwähnt werden, dass diese Sensoren vielleicht noch weitere Entwicklungen benötigen und dass die erreichte Genauigkeit gut aber noch verbesserungsbedürftig ist. Die Sensoren, welche im Feld 1 und 5 eingebaut wurden, haben wegen ihrem ungeeigneten Aufbau (erster Prototyp) zu schwache Messsignale unter dynamischer Belastung geliefert.

Der Einfluss der Lage des Rades auf die Zusammendrückung der Asphaltsschicht wird im Bild 58 vorgestellt. Das Rad wurde über den Querschnitt kontinuierlich gerollt und gleichzeitig wurden die Signale des Wegsensors aufgenommen.

Die gravierende Lage ist nicht die mittlere, sondern die Zusammendrückung wird grösser, wenn das Zwillingsrad sich gerade neben dem Sensor befindet.

Dieser Umstand ist so zu erklären, dass wenn das Rad gerade in der Mitte des Querschnittes liegt, sich der Sensor genau zwischen den zwei Reifen befindet wo das Material sich leicht nach oben heben kann. Das kann auch aus der Form der Spurrinnen geschlossen werden.

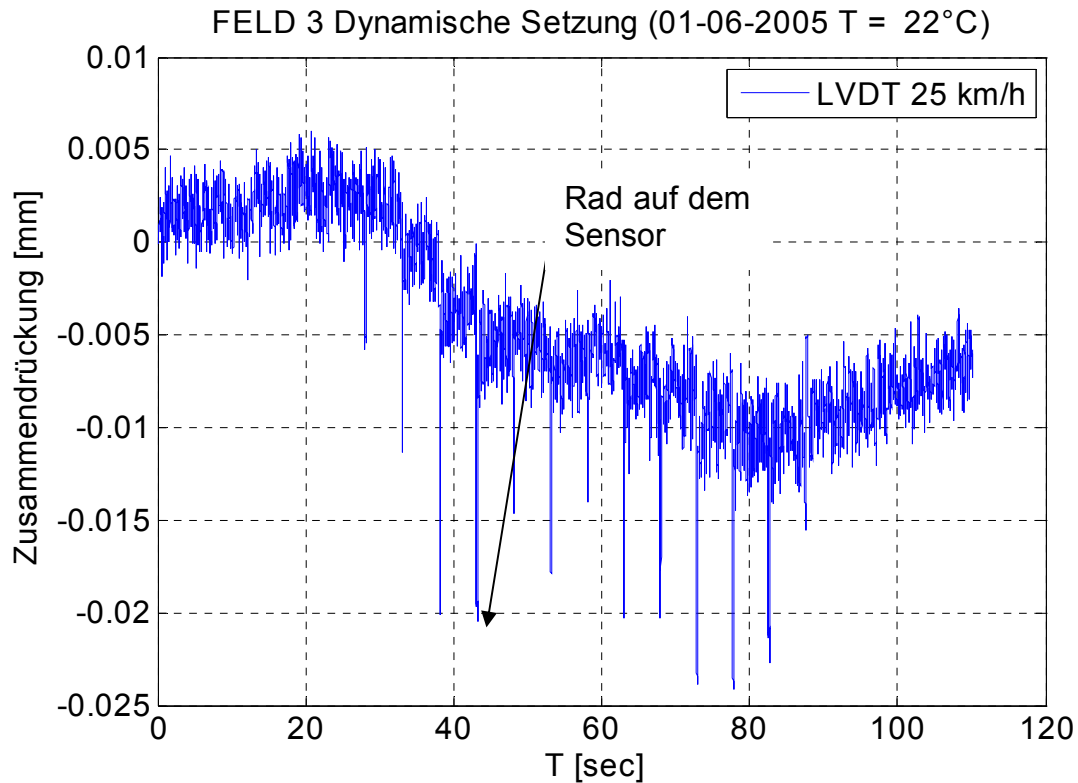


Bild 58 Zusammendrückung der Asphalt Schichten unter dynamischen Belastung

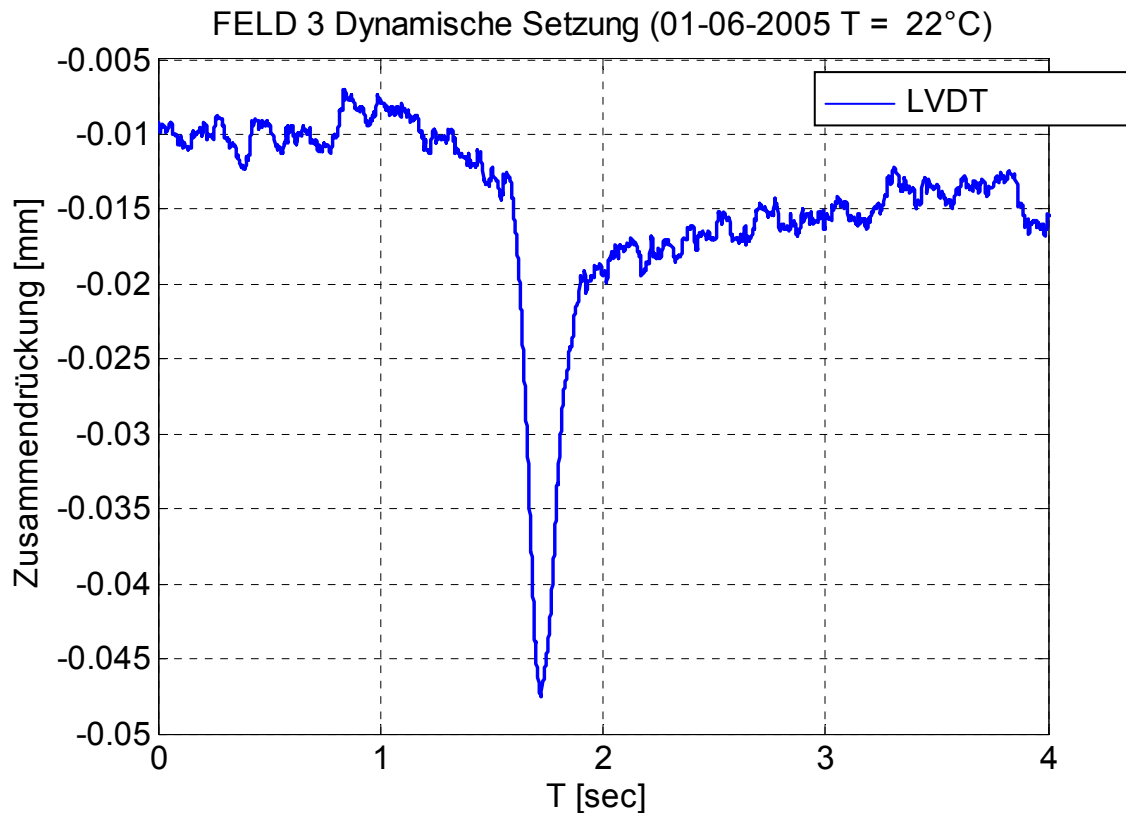


Bild 59 Form des LVDT Messsignals (Dynamische Belastung)

Statische Belastung

Die mechanische Antwort der gebundenen Schichten unter statische Belastung wurde auch mit den vertikalen Verformungssensoren untersucht (Bild 60). Die eingebauten Sensoren sind unterschiedlich aufgebaut, wie oben schon beschrieben wurde. Die erste Version des Sensors hat unter dynamischer Belastung nicht gut funktioniert, wogegen statische Messungen gute Ergebnisse ergeben haben. Es ist aber zu bezweifeln dass der Sensor im Feld 1 zuverlässige Messergebnisse zur Verfügung liefert, da der Messsensor nicht ganz im Messbereich war. Die zweite Version des Sensors ermöglichte eine Verstellung des Messsensors und damit eine sorgfältige Kalibrierung.

Die zweite Version des Sensors hat in beiden Fälle gut funktioniert.

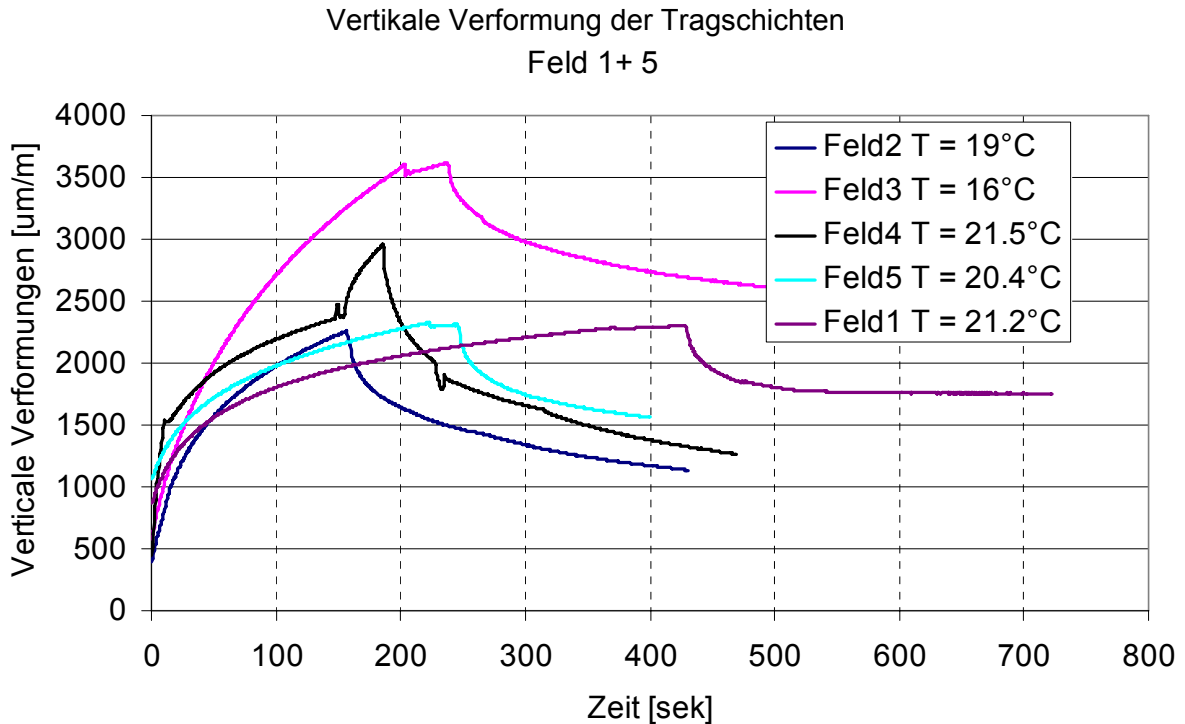


Bild 60 Vertikale Verformungen der Tragschichten

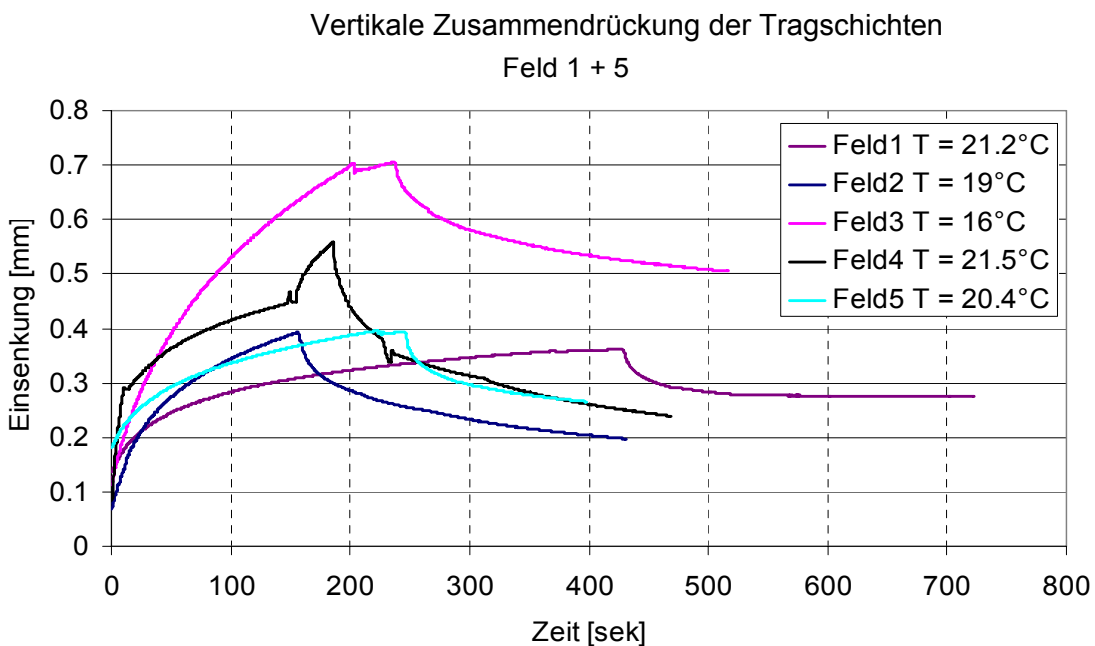


Bild 61 Vertikale Zusammendrückung der Tragschichten

Neben den Benkelman-Versuchen wurden auch die LVDT Messsignale ausgewertet. Das Rad wurde auf dem Sensor direkt positioniert. Es ist deswegen zu erwarten, dass die Belagseinsenkung bei dem Sensor grösser ist als wo der Benkelman-Versuch durchgeführt wurde.

Die am meisten zusammendrückbaren gebundenen Schichten sind in den Feldern 3 und 4. Das Messsignal beim Versuch auf dem Feld 4 ist leicht gestört, weil das Rad auf dem Sensor am Anfang nicht richtig positioniert wurde.

Die rückfedernde Deflektion stellt den elastisch –viscoelastischen- Anteil des Materialverhaltens während dem statischen Versuch dar. Aus dieser Sicht haben die Tragschichten in Feld 2 und Feld 3 dieselben Eigenschaften, wobei in Feld 3 viel grössere plastische Verformungen gemessen wurden. Daraus folgt dass die Tragschicht im Feld 3 empfindlicher auf das „rutting“ Phänomen ist.

Die Tragschichten im Feld 2 und 5 zeigen während dem Versuch ähnliche mechanische Eigenschaften.

4.4.2 Temperatur Messungen

Die folgenden Darstellungen zeigen die zeitliche Entwicklung der täglichen Mittelwerte der Temperatur. Die Temperaturen wurden jede Stunde abgelesen und entsprechend statistisch verarbeitet.

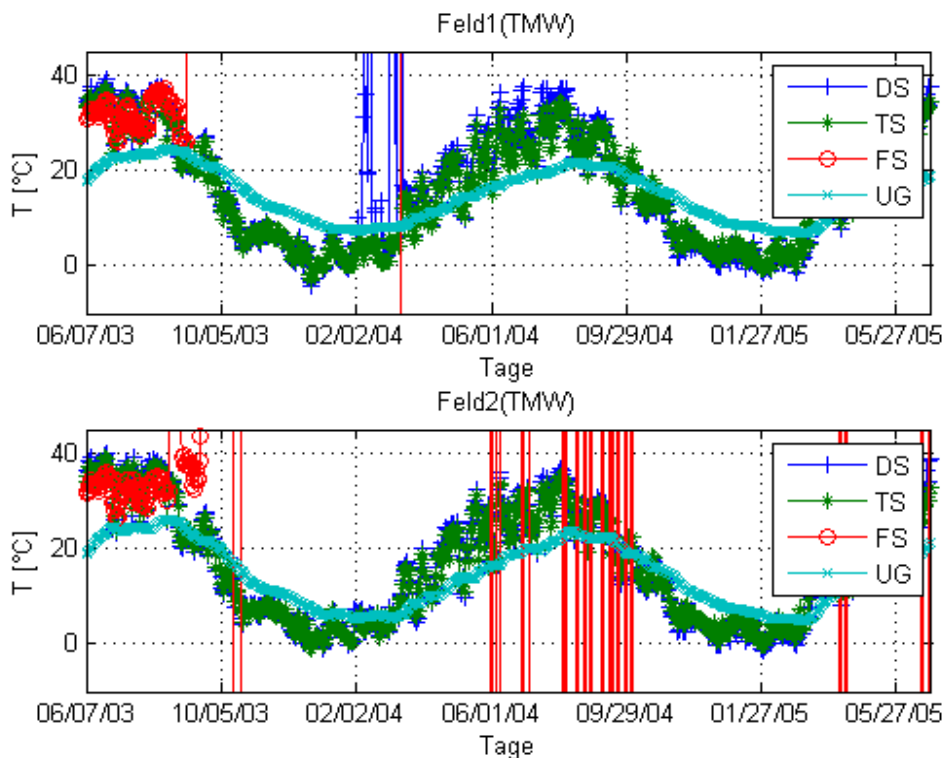


Bild 62 Täglicher Mittelwert der Temperatur in den Feldern 1+2

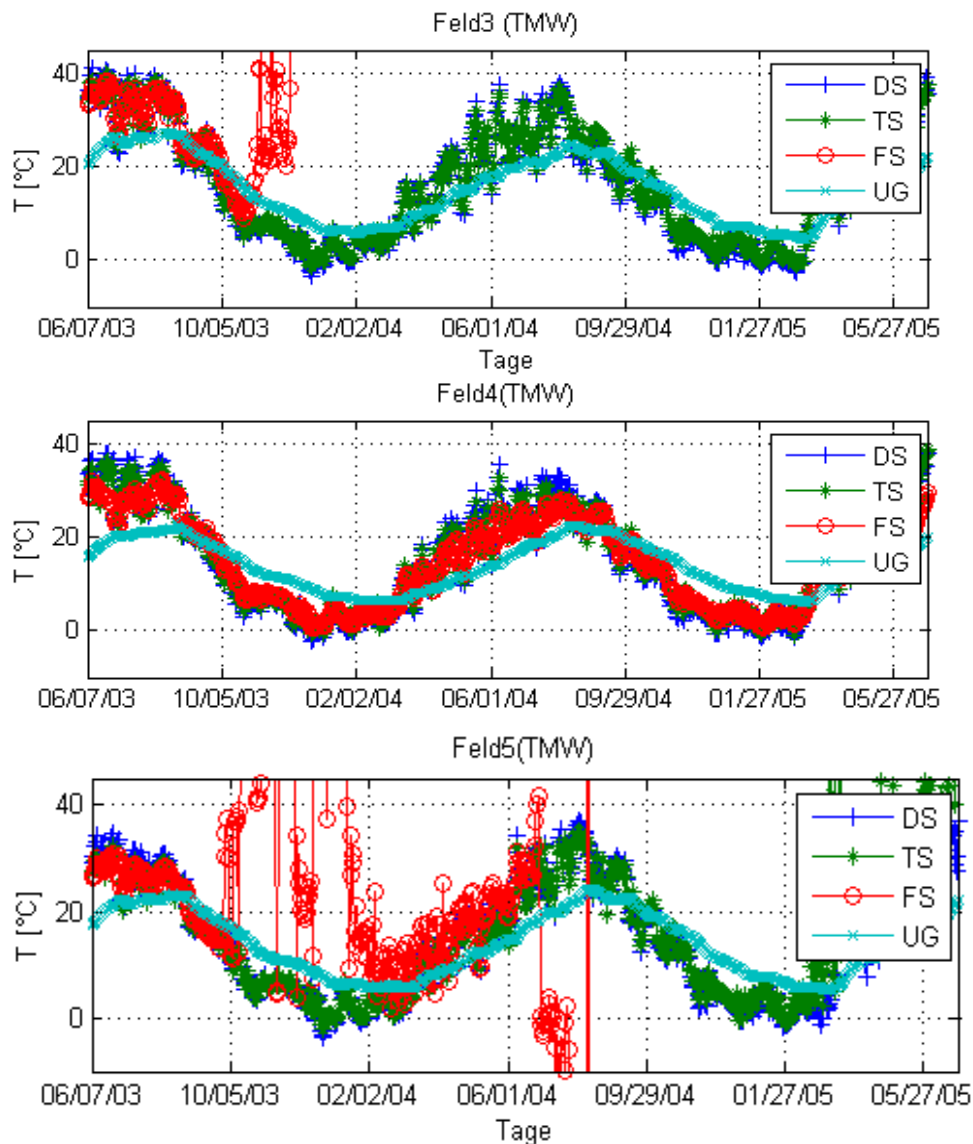


Bild 63 Täglicher Mittelwert der Temperatur in den Feldern 3+5

Die Temperaturen wurden jede Stunde im Datalogger gespeichert. Die PT100 der Fundationsschicht in den Feldern 1-2-3-5 wurden nach einigen Monaten stark in Mitleidenschaft gezogen. Das Jahr 2003 wurde insgesamt das wärmste Jahr des Versuches.

Die Maschine hat jeweils im Sommer technische Probleme gezeigt wegen der hohen Temperaturen. Der tägliche Mittelwert der Temperatur wurde für jedes Feld ausgewertet. Im Jahr 2003 aufgrund der Beschattung der Bäume haben Feld 4 und Feld 5 kühlere Temperaturen erfahren. Nach dem Schnitt der Bäume im Frühjahr 2004 weisen diese Felder dieselben Temperaturen auf wie die anderen Felder.

5 *Beurteilung der Messergebnisse und der Versuchsanlage*

Die erhaltenen Resultate aus dem Grossversuch sind bis auf wenige Schwierigkeiten zufriedenstellend bis sehr aussagekräftig. Die einzelnen Probleme sind nachstehend genannt:

Ein optimaler Einbau der Felder war aufgrund der schwierigen Einbaubedingungen nur zum Teil zu erreichen: Es ist bekannt, dass zu den heiklen Punkten für die Einbauarbeiten die runde Geometrie (enger Radius) der Strecke und die relativ enge Fahrstreifenbreite gehören. Zusätzlich zeigte sich an einigen Stellen eine nicht optimal arbeitende Drainage. Die Wiederherstellung der vollen Funktionstüchtigkeit der Drainage ist leider nur teilweise gelungen.

Die Schichtstärke der Felder war nicht durchwegs gleich, wie dies geplant und gewünscht wurde. Durch den engen Zeitplan, konnten die gewünschten Genauigkeiten nicht überall eingehalten werden. Die Dicke der einzelnen Schichten und der Felder wurde anhand von Bohrkernen und mittels Nivellement genau gemessen und die effektiven Schichtstärken wurden in die Berechnungen eingeführt.

Mittels Laboranalysen des Tragschichtmaterials wurde festgestellt, dass das HMT-Material des Feldes 3 die gewünschten Anforderungen nicht vollständig erfüllt. Die am rückgewonnenen Bindemittel der Tragschichten 2 und 3 zeigen bei 25°C ähnliche Penetrationswerte. Dabei sollte der Unterschied in den Feldern 2 und 3 nur bei der Härte des Bindemittels bestehen.

In den Felder 3 und 4 wurden geringere Tragfähigkeitseigenschaften des Untergrundes gemessen und konnten auch so rückgerechnet werden. Die Plattendruckversuche und die dynamischen Fallgewichtsversuche auf der Fundationsschicht haben eine gute aber zum Teil leicht unterschiedliche Verdichtung gezeigt (wie im vorhergehenden Fall bei den Felder 3 und 4).

Die Besonnung der Felder war im ersten Sommer 2003 für die Felder 4 und 5 weniger gravierend. Die Bäume am Rand der Strecke wurden im Frühjahr 2004 entfernt. Die Temperaturen wurden für alle Felder bei unterschiedlichen Tiefen kontinuierlich gemessen. Alle Sensor- und Tragfähigkeitsversuche wurden zu den jeweiligen Temperaturen ausgewertet.

6 Auswertung nach AASHTO

6.1 Befahrbarkeitsindex (PSI)

Die Befahrbarkeit stellt eine empirische Beschreibung des Oberflächenzustands der Straßenoberfläche dar. Die Anzahl der Überrollungen sowie die Alterung der gebundenen Materialien führen zu einer progressiven Zerstörung des Oberbaus: Unebenheiten, Verdrückungen, Spurrinnen, Risse, Schlaglöcher verschlechtern im Laufe der Zeit die Befahrbarkeit der Straßenoberfläche.

Die Befahrbarkeit nach AASHTO wird durch den PSI (present serviceability index) bewertet. Der PSI Wert basiert auf objektiv gemessenen Größen sowie auch teilweise auf subjektiven Beobachtungen.

Der PSI-Wert wird mit der folgenden Formel berechnet:

$$PSI = 5.03 - 1.91 \cdot \log(1 + SV) - 0.01 \cdot \sqrt{CP} - 1.38 \cdot RD^2$$

Wobei: (Objektive Beobachtungen)

SV: $0.67Sw^2$

Sw: Standardabweichung des Winkelwertes W,

C+P: Risse und Flickstellen

RD: Rinnentiefe (Rut Depth) in Zoll

Die PSI Werte liegen zwischen 0 (sehr schlecht) und 5 (sehr gut)

Bild 64 und Bild 65 zeigen die zeitliche Entwicklung des Befahrbarkeitsindex (PSI) während der gesamten Versuchsdauer. Die Anfangsbefahrbarkeit war für die Felder unterschiedlich: die PSI Werte variieren zwischen 3.5 (Feld 1-3-5), 4 (Feld 4) und 4.3 (Feld 2). Die Felder 1 und 3 werden relativ schnell an eine Grenze (Zumutbarkeit) der Befahrbarkeit geführt: (PSI = 1.5). Im Feld 3 spielen die Spurrinnen eine wichtigere Rolle, im Feld 1 die Längsunebenheiten. Es muss aber erwähnt werden, dass die Spurrinnentiefen im Feld 3 sehr stark von der Materialhebung am Rand der Fahrbahn verursacht wurden.

Das Feld 3 hat während des Versuches eine Verbesserung der Befahrbarkeit erfahren: im Jahr 2004 wurden die Spurrinnen weniger tief (die Materialhebungen kleiner) und die Längsebenheit flacher. Am Ende des Versuches erreichten die Felder 1,3,4 das Ende der Gebrauchsdauer. Die Felder 2 und 5 waren am Ende des Versuches noch in einem relativen guten Zustand, insbesondere Feld 5 wo keine merkbaren Änderungen des PSI gemessen wurden.

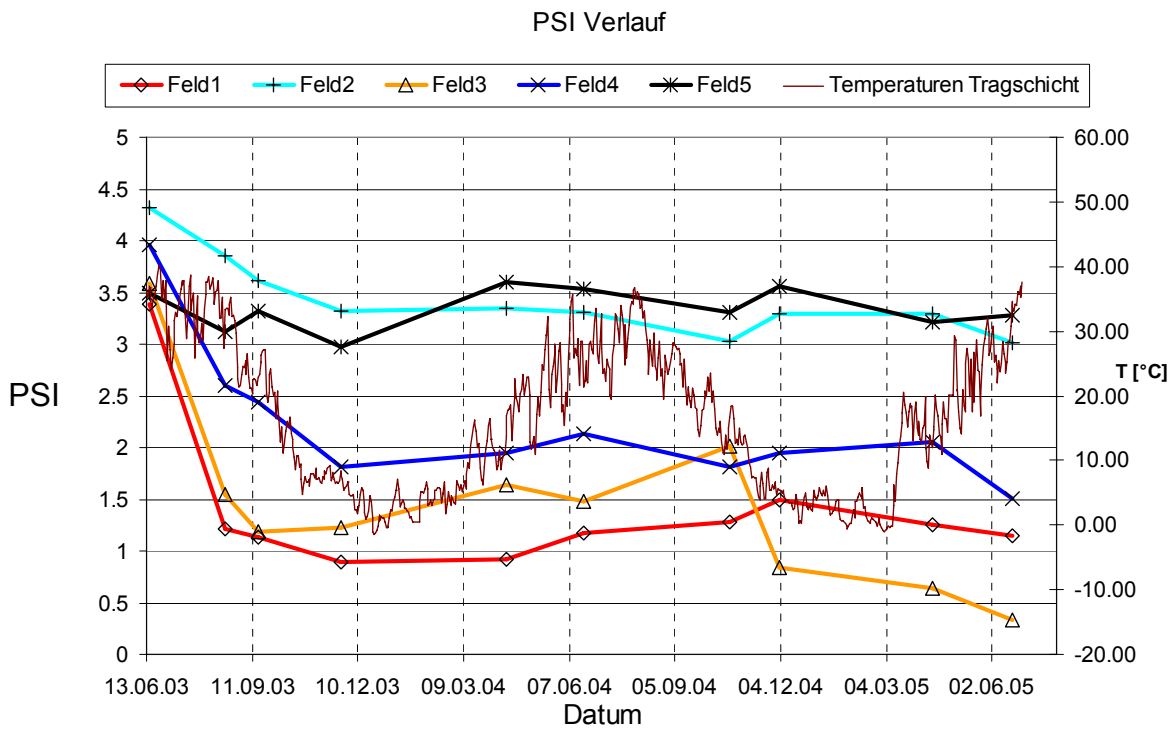


Bild 64 PSI Wert Entwicklung versus Temperatur

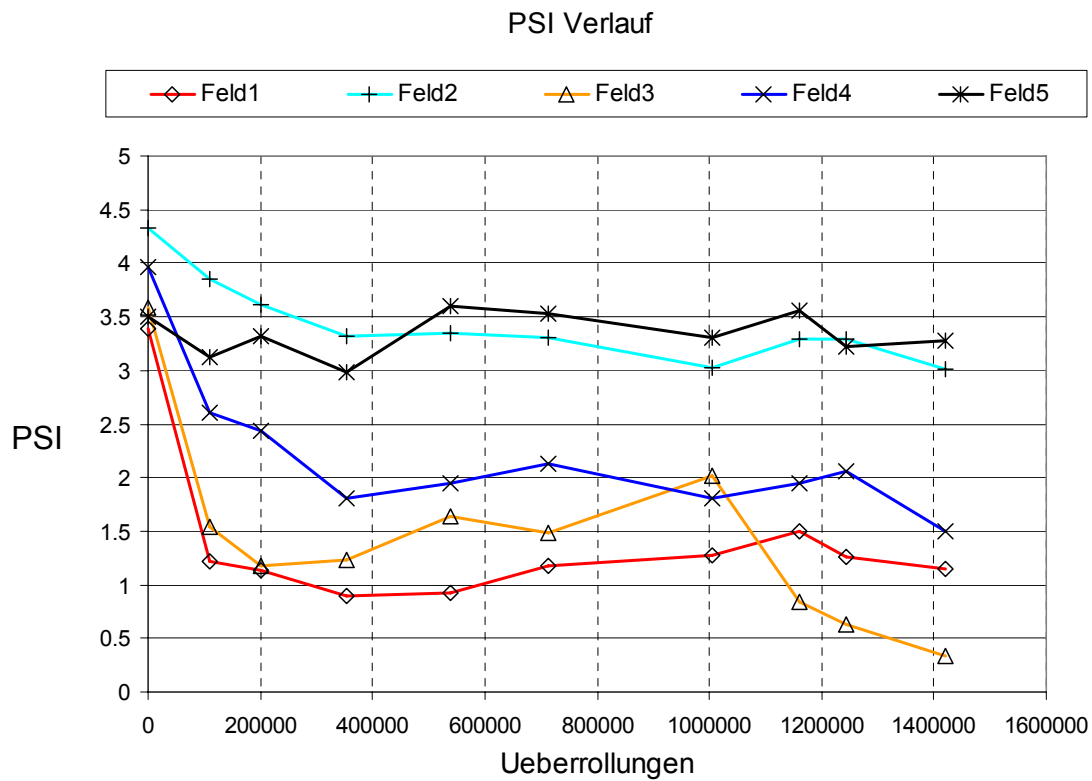


Bild 65 PSI Wert Entwicklung (Anzahl Überrollungen)

7 Numerische Rückrechnung

7.1 Ziel und Vorgehen

Der Ziel der numerischen Modellierung liegt in einer genaueren Bewertung der Tragfähigkeitseigenschaften der eingebauten Materialien. Der Strassenoberbau ist ein komplexes, mehrschichtiges Bauwerk, welches durch unterschiedliche Belastungsarten und Achslastgrößen beansprucht wird. Die Belastung wird statisch oder dynamisch mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aufgebracht. Die Reaktion auf diese Belastungen ist nicht dieselbe, insbesondere die mechanische Antwort der gebundene Materialien zeigt eine klare Zeitabhängigkeit. Schnelle Belastungen erzeugen eine grundsätzlich elastische Verformung der Oberfläche, bei den statischen Belastungen wird der visco-plastische Anteil der Verformung deutlich erkennbar. Eine andere sehr wichtige Eigenschaft des Oberbaus liegt in der Charakteristik des Schichtverbundes zwischen den einzelnen Schichten. Sind die Schichten miteinander mehr oder weniger verbunden, ist diese Verbindung elastisch oder visco-elastisch, bekommt man sehr unterschiedliche Abschätzungen der gesamten Tragfähigkeit des Pakets (Romanoschi and Metcalf 2002).

Dies sind nur zwei Aspekte der grossen Komplexität der Parameterwertschätzung: Die Messgenauigkeit, die Anzahl und Lage von gemessenen Punkte und die Geometrie des Bauwerks müssen klar definiert werden. Eine einzige numerische Lösung ist nicht immer vorhanden und numerische Ergebnisse müssen immer mit ähnlichen, bekannten Parameterwerten verglichen werden.

7.2 Numerisches Modell: Vorwärts Analysis

7.2.1 Einleitung: Geometrisches Modell

Die Benkelman-Versuche sind die ausgewählten Versuche für die numerische Rückrechnung. Mit den Resultaten der Benkelman-Versuche verfügen wir über eine direkte Messung der –vornehmlich- elastischen rückfedernden Deformation der Strassenoberfläche die über 6 Punkte mit bekanntem Radabstand erfasst wurde. Die dynamischen Versuche eignen sich weniger für eine Rückrechnung der Materialparameter da zu wenige und nur punktuelle Messungen zu hohen Ungenauigkeiten in der Parameterabschätzung führen können. Das kommerzielle FEM Programm ABAQUS wurde ausgewählt, um das Netz zu generieren (ABAQUS CAE) und die Rechnungen durchzuführen (ABAQUS Standard). Die folgende Abbildung zeigt das generierte Finite-Element-Netz. Das Modell wurde symmetrisch generiert, und stellt einen Viertel des realen Versuchsfeldes dar. Die Länge des Modells entspricht der maximalen Einflusslänge bezüglich des Benkelman-Versuches (5m). Das Netz hat für jede Schicht dieselben geometrischen Elemente. Die Geometrie der Radaufstandsfläche wurde

quadratisch angenommen mit den Abmessungen: 19.5 cm (Länge) x 18 cm (Breite) Die Last beträgt 7 bar (700kN/m^2).

Das numerische Modell (Bild 66) ist symmetrisch, deswegen muss nur die Hälfte des Rades berücksichtigt werden. Die gemessenen Messpunkte liegen zwischen den Zwillingenrädern. Im Modell befinden sich die Messpunkte genau am Rand der generierten Struktur (siehe Abbildung). Das Modell ist am Rand waagrecht, und auf der Basis senkrecht fixiert.

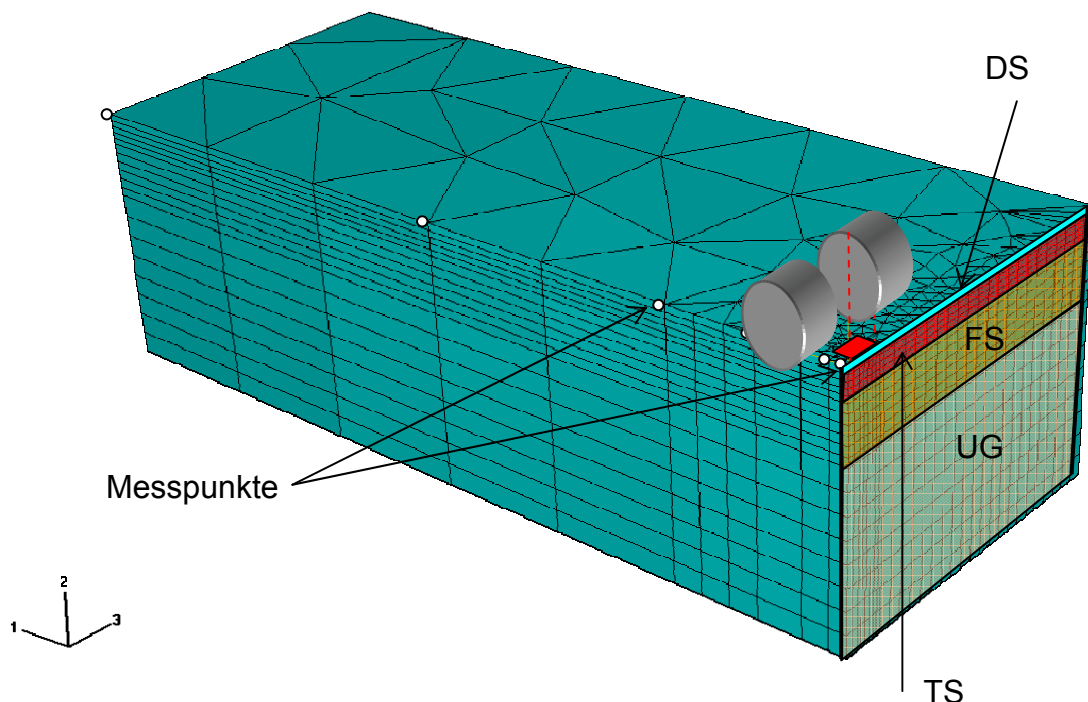


Bild 66 : Numerisches Modell (ABAQUS CAE)

7.3 Modellierung des „Interface“ und des Material Stoffgesetzes

Die rückfedernde Deformation der Oberfläche wird mittels Benkelman-Versuch gemessen. Das heisst dass die plastischen Deformationen nicht vollumfänglich berücksichtigt werden können. Obwohl die eingebauten Materialien sicher nicht rein elastisch sind, gehen wir davon aus, dass wir diesen Versuch in einer guten Näherung mit linear-elastischen Material Stoffgesetzen verhalten. Das Interface zwischen den gebundenen und den gebundenen mit den ungebundenen Materialien wurde mit einem Reibungselement und Kohäsion mit unterschiedlichen Reibungsgrössen modelliert. In jedem Feld wird angenommen dass die Interface Eigenschaften dieselbe sind.

Zwischen den gebundenen Schichten wurde die maximale Scherfestigkeit $\tau_{\max} = 1415$ MPa angenommen (Romanoschi and Metcalf 2002) und Reibungskoeffizient 0.7. (Romanoschi and Metcalf 2002) Zwischen gebundenen und ungebundenen Schichten wurde ein Reibungskoeffizient 0.4 angenommen.

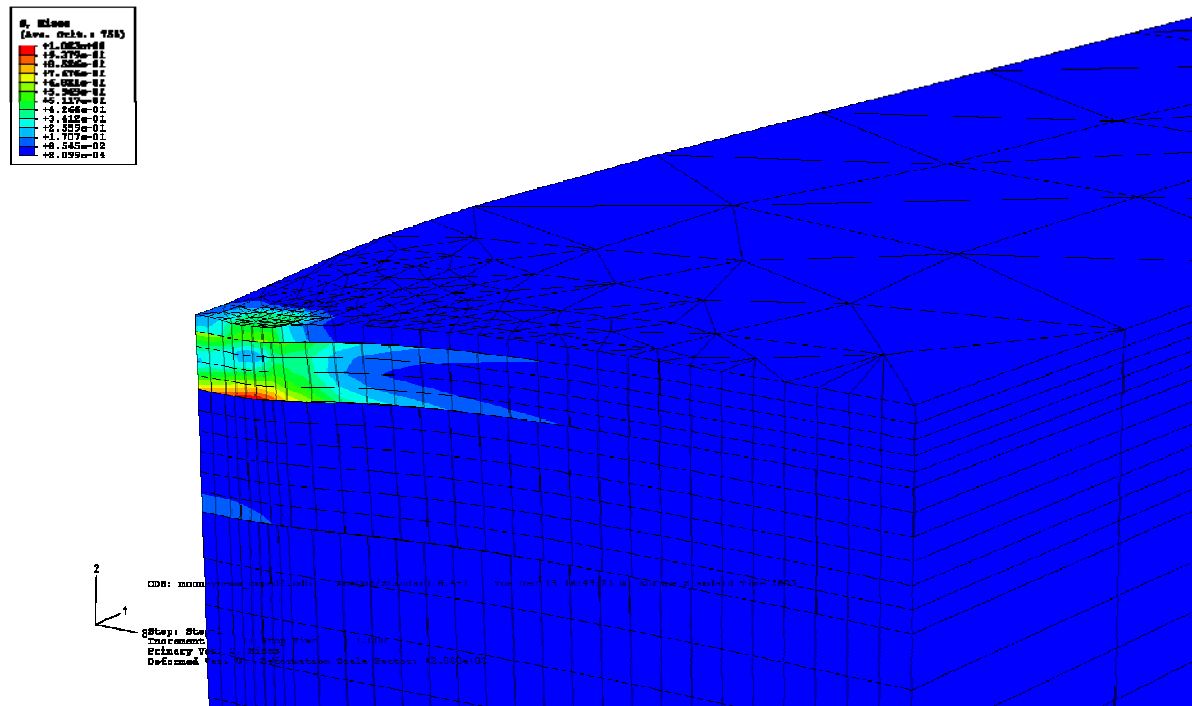


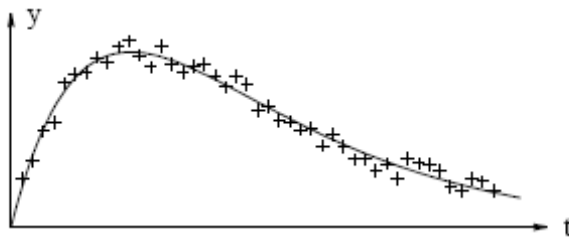
Bild 67 Ausbreitung der Spannungen (von Mises)

7.4 Rückrechnung

7.4.1 Kurze Einführung in der Theorie der Rückrechnung mit nicht lineare Methoden der kleinste Quadrate

7.4.1.1 Allgemeiner Fall

Betrachten wir zuerst ein einfaches Problem. Gegeben sei eine experimentelle Datenreihe $(t_1, y_1), \dots, (t_m, y_m)$:



Wir wählen jetzt ein Fittings Modell:

$$M(x, t) = x_3 e^{x_1 t} + x_4 e^{x_2 t}$$

Das Modell hängt von den folgenden Parametern ab:

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$$

Wir nehmen an dass die folgende Grösse \mathbf{x}^\dagger existiert so dass

$$y_i = M(\mathbf{x}^\dagger, t_i) + \varepsilon_i$$

Wo $\{\varepsilon_i\}$ Störungen in den Messergebnisse sind

Je nach input \mathbf{x} , können wir die folgende Residuals rechnen:

$$\begin{aligned} f_i(\mathbf{x}) &= y_i - M(\mathbf{x}, t_i) \\ &= y_i - x_3 e^{x_1 t_i} - x_4 e^{x_2 t_i}, \quad i = 1, \dots, m \end{aligned}$$

Unser Ziel ist es jetzt ein „minimizer“ für die folgende Funktion $F(\mathbf{x})$ zu finden

$$F(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (f_i(\mathbf{x}))^2$$

wo

$$f_i: \mathbf{R}^n \mapsto \mathbf{R}, \quad i = 1, \dots, m$$

Gegebene Funktionen sind und $m \geq n$

Es gibt dann zwei Arten von „minimizer“:

Global minimizer:

$F : \mathbf{R}^n \mapsto \mathbf{R}$, finde dann $\mathbf{x}^+ = \operatorname{argmin}_{\mathbf{x}} \{F(\mathbf{x})\}$

Local minimizer:

$F : \mathbf{R}^n \mapsto \mathbf{R}$, finde \mathbf{x}^* so dass:

$$F(\mathbf{x}^*) \leq F(\mathbf{x}) \quad \text{for } \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*\| < \delta$$

Mit dem zweiten Ansatz ist das Endziel viel einfacher erreichbar, da der Suchbereich viel kleiner ist. Wir nehmen in Allgemeinen an, dass F differenzierbar ist.

7.4.1.2 Nicht lineare Methode der kleinsten Quadrate

Wir betrachten jetzt den Fall: $\mathbf{f} : \mathbf{R}^n \mapsto \mathbf{R}^m$. Ziel ist es \mathbf{x}^* zu finden

$$\mathbf{x}^* = \operatorname{argmin}_{\mathbf{x}} \{F(\mathbf{x})\}$$

wobei

$$F(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (f_i(\mathbf{x}))^2 = \frac{1}{2} \|\mathbf{f}(\mathbf{x})\|^2 = \frac{1}{2} \mathbf{f}(\mathbf{x})^\top \mathbf{f}(\mathbf{x})$$

Wir schreiben jetzt die Taylor Entwicklung von dieser Funktion (wir linearisieren das Problem):

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}+\mathbf{h}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{J}(\mathbf{x})\mathbf{h} + O(\|\mathbf{h}\|^2) \quad \text{wo}$$

$\mathbf{J} \in \mathbf{R}^{m \times n}$ ist der Jacobian der Form: $(\mathbf{J}(\mathbf{x}))_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(\mathbf{x})$.

Es folgt:

$$\mathbf{F}'(\mathbf{x}) = \mathbf{J}(\mathbf{x})^\top \mathbf{f}(\mathbf{x})$$

Und analog folgt es:

$$\mathbf{F}''(\mathbf{x}) = \mathbf{J}(\mathbf{x})^\top \mathbf{J}(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m f_i(x) \mathbf{f}_i''(\mathbf{x})$$

Für einen kleinen Schritt kann man schreiben:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}+\mathbf{h}) \simeq \ell(\mathbf{h}) \equiv \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{J}(\mathbf{x})\mathbf{h}$$

Rechnen wir damit F

$$\begin{aligned} F(\mathbf{x}+\mathbf{h}) &\simeq L(\mathbf{h}) \equiv \frac{1}{2} \ell(\mathbf{h})^\top \ell(\mathbf{h}) \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{f}^\top \mathbf{f} + \mathbf{h}^\top \mathbf{J}^\top \mathbf{f} + \frac{1}{2} \mathbf{h}^\top \mathbf{J}^\top \mathbf{J} \mathbf{h} \\ &= F(\mathbf{x}) + \mathbf{h}^\top \mathbf{J}^\top \mathbf{f} + \frac{1}{2} \mathbf{h}^\top \mathbf{J}^\top \mathbf{J} \mathbf{h} \end{aligned}$$

Wir müssen jetzt folgendes finden

$$\mathbf{h}_{\text{gn}} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{h}} \{L(\mathbf{h})\}$$

Rechnen wir deshalb den Jacobian und Hessian:

$$\mathbf{L}'(\mathbf{h}) = \mathbf{J}^\top \mathbf{f} + \mathbf{J}^\top \mathbf{J} \mathbf{h}, \quad \mathbf{L}''(\mathbf{h}) = \mathbf{J}^\top \mathbf{J}$$

Man kann beweisen dass L'' positiv definiert ist, das heisst \mathbf{h}_{gn} ist ein „minimezer“ der Form ($L' = 0$):

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J}) \mathbf{h}_{\text{gn}} = -\mathbf{J}^T \mathbf{f}$$

Die Konvergenzrichtung ist damit die steilste da:

$$\mathbf{h}_{\text{gn}}^T \mathbf{F}'(\mathbf{x}) = \mathbf{h}_{\text{gn}}^T (\mathbf{J}^T \mathbf{f}) = -\mathbf{h}_{\text{gn}}^T (\mathbf{J}^T \mathbf{J}) \mathbf{h}_{\text{gn}} < 0$$

Der Rückrechnungsalgorithmus (Gauss Newton) dann lautet:

$$\text{Solve } (\mathbf{J}^T \mathbf{J}) \mathbf{h}_{\text{gn}} = -\mathbf{J}^T \mathbf{f}$$

$$\mathbf{x} := \mathbf{x} + \alpha \mathbf{h}_{\text{gn}}$$

Levenberg und Marquard haben dann eine Korrektur gemacht um den Algorithmus effektiver zu machen:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \mathbf{I}) \mathbf{h}_{\text{lm}} = -\mathbf{g}$$

$$\mathbf{g} = \mathbf{J}^T \mathbf{f}$$

und

$$\mu \geq 0$$

Damit folgt dass:

Wenn $\mu > 0$ die Matrix der Koeffizienten ist positiv definiert, und das gewährleistet dass die Konvergenzrichtung die steilste ist.

Wenn μ sehr gross ist:

$$\mathbf{h}_{\text{lm}} \simeq -\frac{1}{\mu} \mathbf{g} = -\frac{1}{\mu} \mathbf{F}'(\mathbf{x})$$

Das ist ein kurzer Schritt in der steilsten Konvergenz Richtung. Das ist sehr gut wenn wir weit zu der Lösung sind (Lineare Konvergenz).

Wenn μ sehr klein ist (nah zu der Lösung)

$$\mathbf{h}_{\text{lm}} \simeq \mathbf{h}_{\text{gn}}$$

Das ist sehr effizient wenn wir nahe zu der Lösung sind (Quadratische Konvergenz). Es folgt dass μ beeinflusst beide die Richtung and die Grösse des Schrittes, und damit wird der Algorithmus sehr effizient. Wenn wir weit von der Lösung sind suchen wir die Lösung in der steilsten Richtung, nah zu der Lösung wird der Algorithmus als Gauss Newton sich verhalten und daher wird die Konvergenz schneller (Quadratisch).

Ein Beispiel einer Implementierung ist im untenstehenden Algorithmus aufgezeigt.

Levenberg–Marquardt step

$[x_{\text{new}}, \text{found}, \text{better}, \text{method}, \dots] := \text{LMstep}(x, \dots)$

begin

$x_{\text{new}} := x$; $\text{method} := \text{L-M}$

Solve $(\mathbf{J}(x)^T \mathbf{J}(x) + \mu \mathbf{I}) \mathbf{h}_{\text{lm}} = -\mathbf{F}'(x)$

if $\|\mathbf{h}_{\text{lm}}\| \leq \varepsilon_2 (\|x\| + \varepsilon_2)$

$\text{found} := \text{true}$

else

$x_{\text{new}} := x + \mathbf{h}_{\text{lm}}$

$\rho := (F(x) - F(x_{\text{new}})) / (L(0) - L(\mathbf{h}_{\text{lm}}))$

if $\rho > 0$

$\text{better} := \text{true}$; $\text{found} := (\|\mathbf{F}'(x_{\text{new}})\|_{\infty} \leq \varepsilon_1)$

if $\|\mathbf{F}'(x_{\text{new}})\|_{\infty} < 0.02 * F(x_{\text{new}})$

$\text{count} := \text{count} + 1$

if $\text{count} = 3$

$\text{method} := \text{Q-N}$

else

$\text{count} := 0$

else

$\text{count} := 0$; $\text{better} := \text{false}$

end

7.4.2 Anwendungsmöglichkeit der Rückrechnung

Die Messdaten stammen von den mit dem Benkelman-Versuch gemessenen Deflektionen. Der LM Algorithmus ist im Allgemeinen sehr stabil und, falls eine genügende Anzahl Messungen vorhanden ist, lässt es dieser Algorithmus zu, eine bestimmte Menge von unbekanntem Materialparametern zu bestimmen. Die zur Verfügung stehenden Benkelman-Messungen genügen nicht um die gesamten unbekanntem Parameterwerte zu berechnen. Es gibt zwar mehrere mögliche sets von Parameterwerten die fast identische Lösungen ergeben, so dass die Berechnung oft nicht konvergiert. Aus diesem Grunde wurde entschieden, einige Parameter aufgrund von durchgeführten Versuchen (z.B. Plattendruckversuche) zu fixieren. Es wurde nur der E-Modul der Tragschicht als unbekannt berechnet, was das Ziel der Hauptuntersuchung ist.

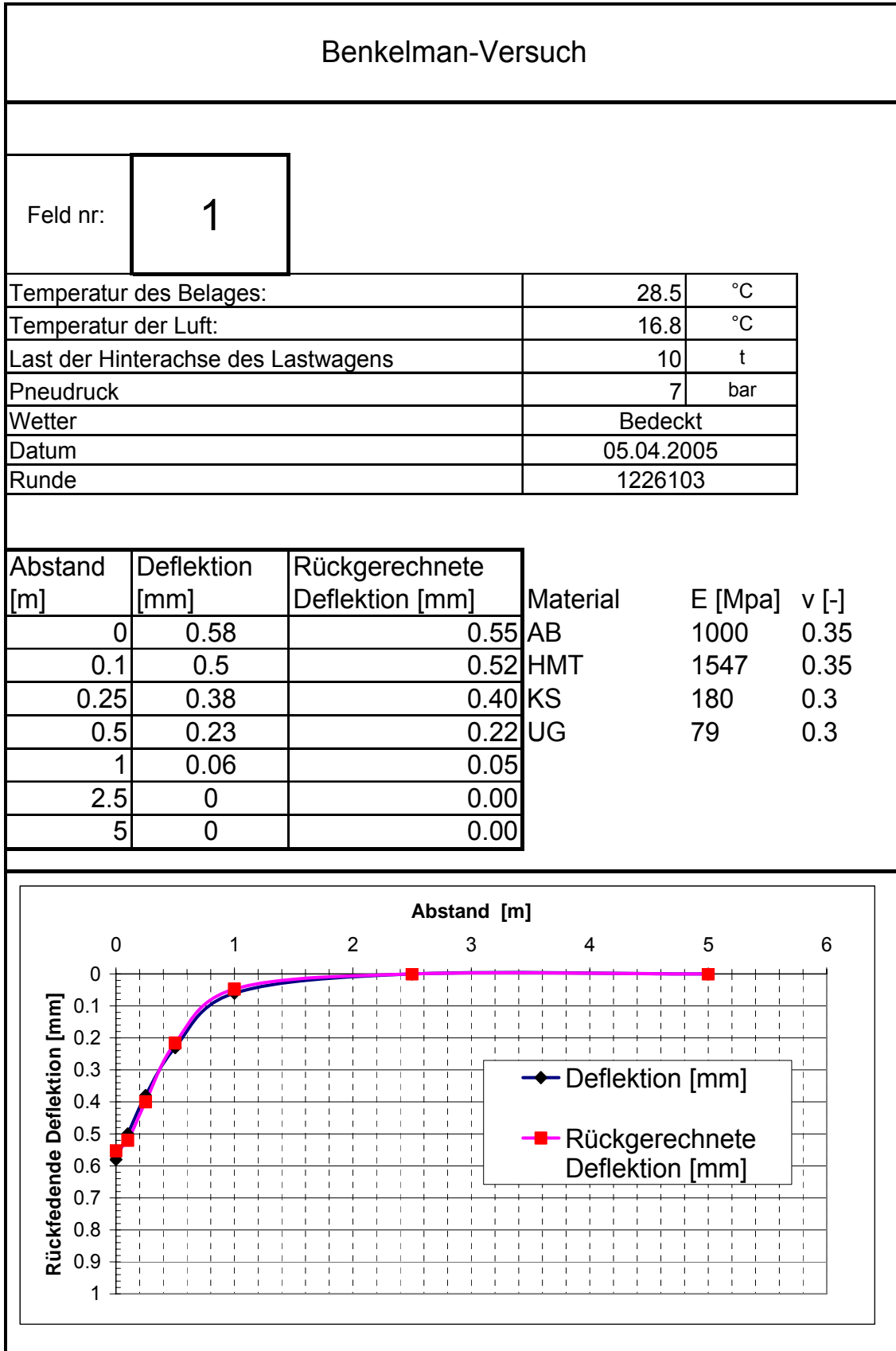


Bild 68 Rückrechnung eines Benkelman-Balken-Versuches Feld 1

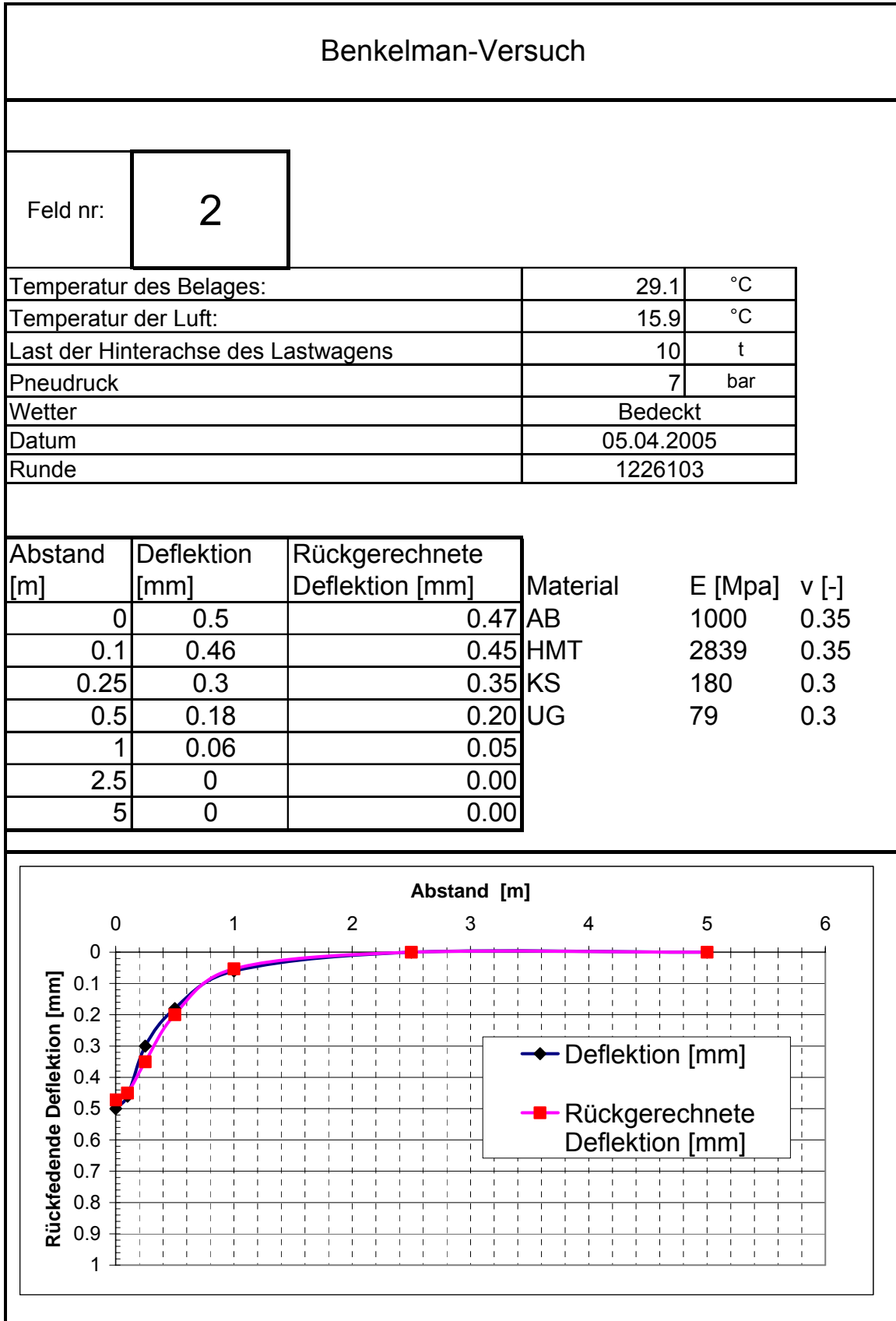


Bild 69 Rückrechnung eines Benkelman-Balken-Versuches Feld 2

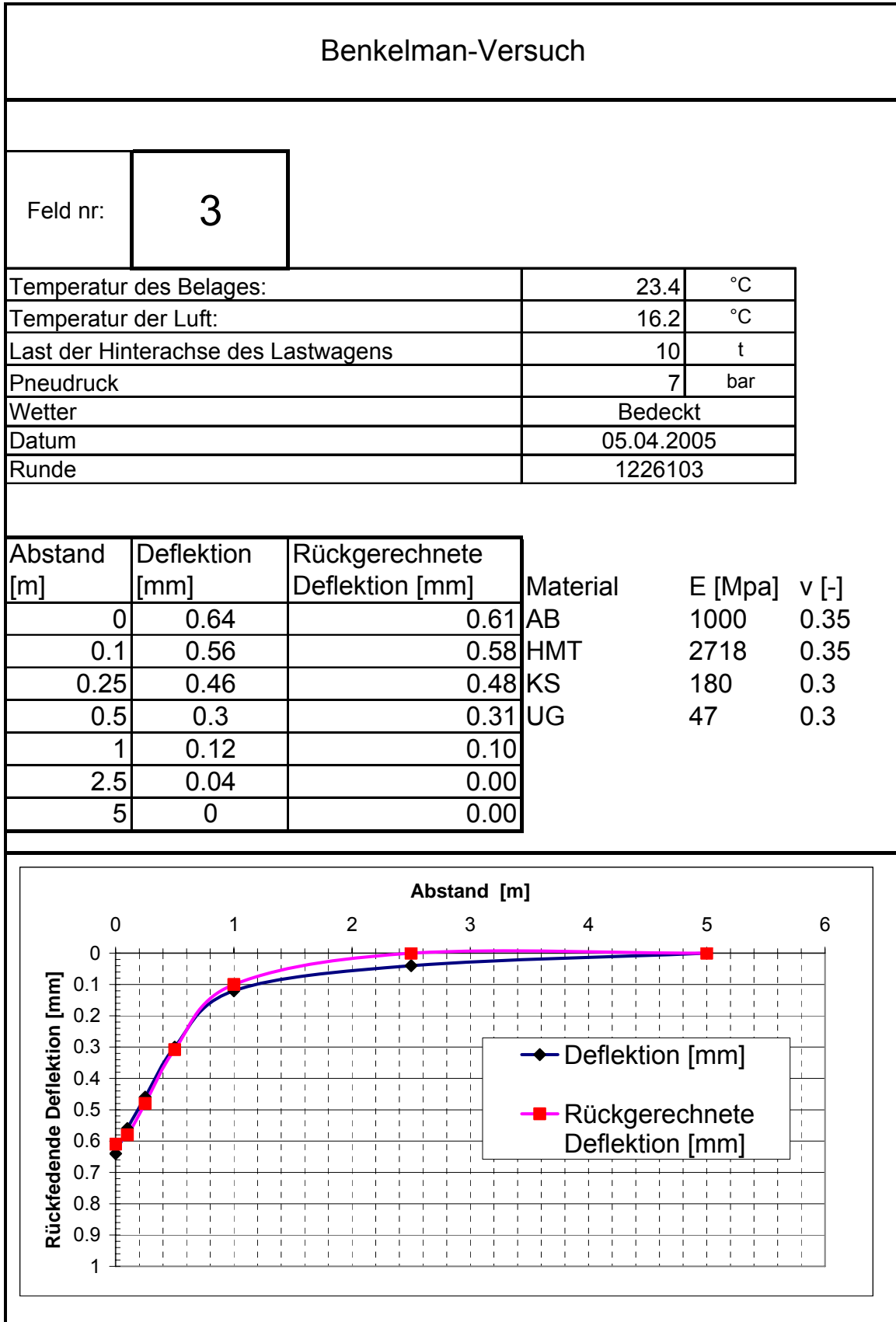


Bild 70 Rückrechnung eines Benkelman-Balken-Versuches Feld 3

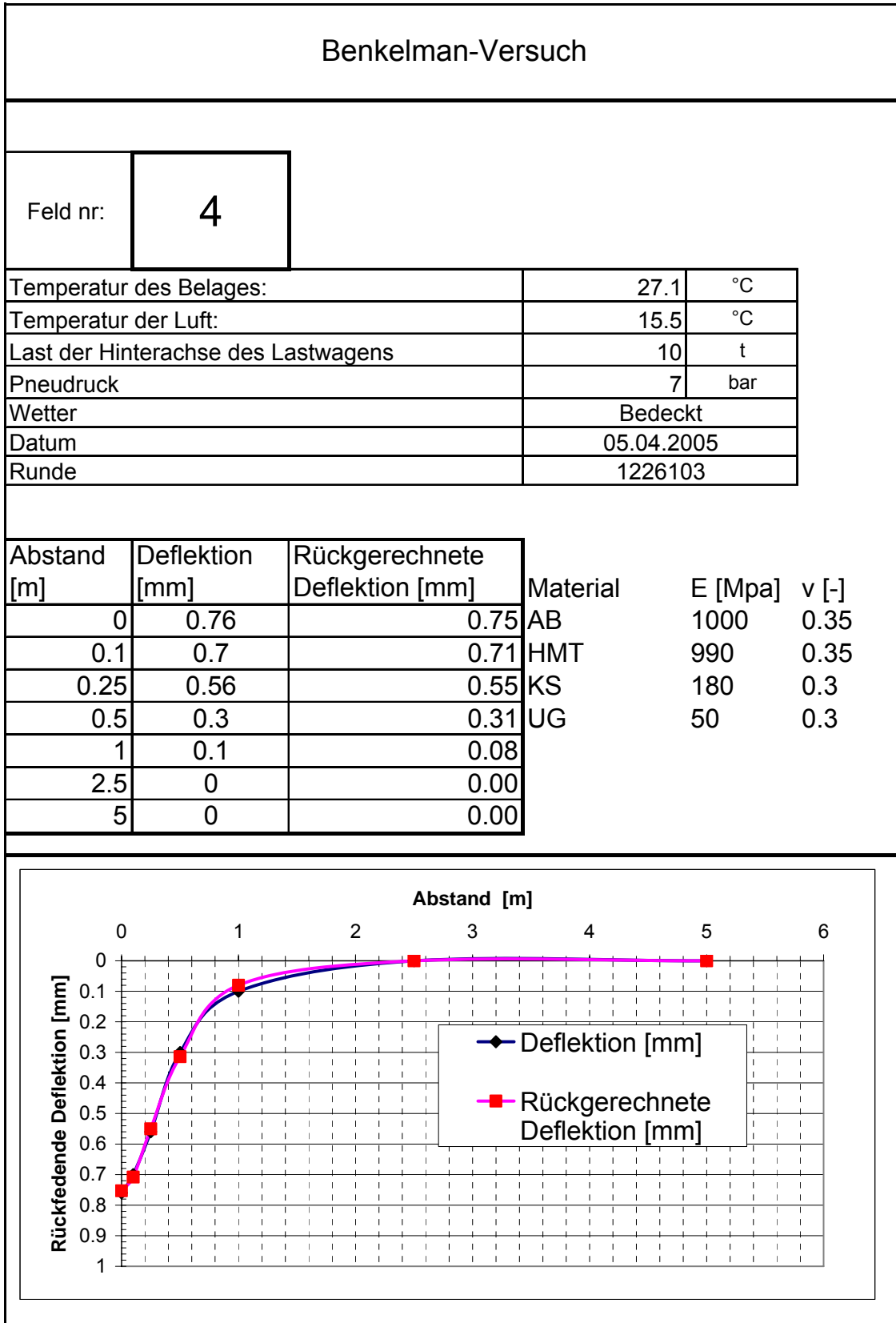


Bild 71 Rückrechnung eines Benkelman-Balken-Versuches Feld 4

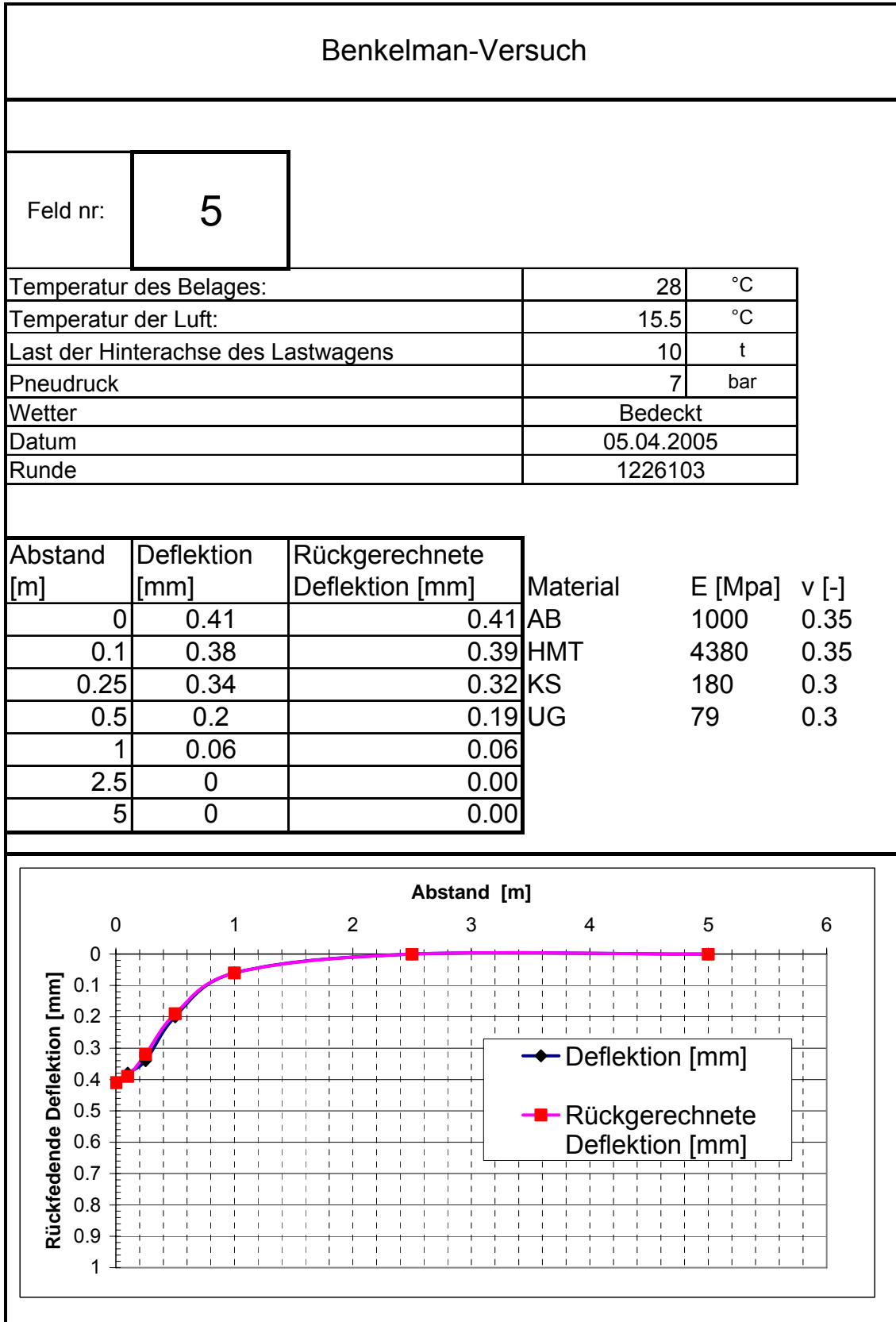


Bild 72 Rückrechnung eines Benkelman-Balken-Versuches Feld 5

7.5 Analyse der numerischen Rückrechnung

Schichten	Feld1 (MPa)	Feld2 (MPa)	Feld3 (MPa)	Feld4 (MPa)	Feld5 (MPa)
DS	1000	1000	1000	1000	1000
TS	1547	2839	2718	990	4380
FS	180	180	180	180	180
UG	79	79	47	50	79

*Tabelle 15)*Zusammenfassung der rückgerechneten E Moduli

Die Form der Einflussmulde die durch den Benkelman-Versuch gemessen wurde ermöglichte nicht nur die elastischen Module der Tragschichten rückzurechnen, aber auch zum Teil die möglichen Schwachstellen im Untergrund zu erkennen. Eine weiter ausgebreitete Mulde ist ein eindeutiges Zeichen eines schwächeren Untergrundes. Es wurde deswegen festgestellt dass der Untergrund im Feld 3 und 4 geringere Tragfähigkeit gehabt haben muss. Es muss auch erwähnt werden, dass im Feld 4 die Verstopfung der Drainage und die Einbauprobleme eine wichtige Rolle in diesem Zusammenhang gespielt haben können. Die elastischen Module des Unterbaus dieser Felder wurden rechnerisch angepasst (vermindert), damit logische, mögliche Werte eingeführt werden konnten: Natürlich ist dies nur ein Hilfsmittel um die Rechenmethode zu verifizieren. Ein sehr interessantes Ergebnis ist, dass in den Tragschichten der Felder 2 und 3 fast die gleichen E-Module rückgerechnet wurden. Das könnte der zuverlässige Hinweis sein, dass diese zwei Mischungen ziemlich ähnliche festigkeitscharakteristische Eigenschaften aufweisen, Es ist aber zu beachten, dass im Feld 3 viel grössere Spurrinntiefen gemessen wurden: Das ist sehr wahrscheinlich einerseits auf einen schwächeren Untergrund (siehe Bild 32) und andererseits auf einen grösseren plastischen Anteil des Materials zurückzuführen. Diese Letzte Betrachtung wird auch durch die LVDT Sensorenergebnisse nachgewiesen. (siehe Bild 61).

Feld 5 hat den grössten E-Modul,. Wenn man die Benkelman-Versuchsergebnisse bei unterschiedlichen Temperaturen vergleicht, ist deutlich zu erkennen, dass bei dieser Tragschicht die Festigkeitseigenschaften bei kühlen Temperaturen nicht so stark erhöht werden wie bei den anderen Feldern.

7.6 Folgerungen

Das FORTRAN Programm wurde vom Cem Ozan, während seinem Aufenthalt an der ETH-IGT entwickelt um Parameterwerte von biologischen Materialien im Bereich Medizinforschung zu erhalten. Wir danken Cem für die freundliche und hilfreiche Unterstützung bei der Anwendung seines Programmcodes.

Das Programm wurde im November 2005 in Zusammenarbeit sehr erfolgreich für die Problematiken dieses Projektes implementiert.

Die numerische Rück-Rechnung hat gezeigt dass eine reine phänomenologische Analyse des Strassenzustandes keine vollständigen und brauchbaren Ergebnisse für die Praxis darstellen kann. Andererseits muss die Numerik mit genügenden und

zuverlässigen Versuchen unterstützt werden, damit die Resultate validiert werden können. Mehrere und genauere sowie fortgeschrittene Versuche sind gefragt, um die Materialparameterwerte zuverlässiger rückrechnen zu können.

8 Schlussfolgerungen

Ziel des Forschungsprojektes 4 war es, den Einfluss von verschiedenen Tragschicht Materialien und den Einfluss verschiedener Bindemittel auf die gesamte Strassenstruktur zu quantifizieren. Dieses Ziel konnte mit geringen Abstrichen erreicht werden. Die Grundidee des Forschungsprojektes war, dass alle eingebauten Felder den gleichen Aufbau und bis auf die verschiedenen Tragschichten auch gleiche Materialeigenschaften hatten. Ferner sollten die fünf Versuchsfelder mit der gleichen Anzahl und Schwere von Achslasten befahren werden und die gleichen Temperaturzyklen durchmachen. Leider konnten nicht alle gewünschten Elemente durchgesetzt werden. So stellten wir zum Beispiel gewisse Ungleichheiten in den Tragfähigkeitseigenschaften des Unterbaus und der Foundationsschichten fest. Ein weiterer Abstrich an der Aussagekraft ist die Tatsache, dass das Tragschichtmischgut in Feld 3 nicht den gewünschten Anforderungen entsprach.

Die Tragschichten unterschieden sich in der Gesteinskörnung und in der Härte und Art der Bindemittel.

Feld 1: gebrochener Fluvialkies mit Bindemittel B50/70

Feld 2: Felsgebrochener Splitt mit Bindemittel B50/70

Feld 3: Felsgebrochener Splitt mit Bindemittel B50/70 (geplant B70/100)

Feld 4: Felsgebrochener Splitt mit polymermodifiziertem Bindemittel

Feld 5: Felsgebrochener Splitt, EME2

Die Tiefen und Formen der Spurrinnen wurden regelässig gemessen und digitalisiert, deren Fläche wurde über die gesamte Länge integriert und der eingesenkte Teil mit dem Aufgewölbten verglichen. Der Verlauf der Spurrinentiefe zeigt bei den Feldern 2 und 5 die niedrigste und bei Feld 3 die grössten Werte. Im Feld 5 wurde das Material fast nur eingesenkt oder zusammengedrückt und nicht seitlich aufgewölbt. Die Aufwölbung des Materials spielt eine sehr grosse Rolle im Feld 3.

Die Nivellments in Längsrichtung zeigen, dass in den Feldern 3 und 4 eine grössere Einsenkung entstanden ist. Dies ist vermutlich auf die geringere Verdichtung und Tragfähigkeit des Untergrundes zurückzuführen. Die Felder 3 und 4 hätten damit in der gesamten Struktur als ganzes eine geringe Setzung aufgewiesen.

Die Längsebenheit der Felder war schon am anfangs für alle Felder relativ schlecht (>3). Die S_w Werte haben dann im Allgemeinen im Sommer etwas zugenommen und im Winter sind sie stabil geblieben.

Zu den Hauptversuchen für die Tragfähigkeit der Oberbauten zählen die regelmässig durchgeführten Deflektionsmessungen mittels Benkelman-Balken. Im Feld 5 wurde bei hohen Temperaturen die niedrigste Einsenkung unter der Last gemessen. Die Form der Einflussmulde wurde auch gemessen und gilt als

Basis für die numerische Rückrechnung. Nachteile und Beschränkungen des Versuchs wurden auch erwähnt.

Die mechanischen Eigenschaften des Oberbaus wurden zusätzlich mit Dehnungsmessstreifen und vertikalen Verformungssensoren untersucht. Dehnungsmessstreifen die auf der Oberfläche positioniert wurden zeigten den Einfluss der steiferen Tragschicht auf die Verformungsausbreitung neben der Last.

Die speziell entwickelten Verformungssensoren für die Messung der vertikalen Verformung haben interessante Ergebnisse für die Beurteilung der Tragschicht und für die numerische Rückrechnung gebracht. Es wurden unterschiedliche plastische Komponenten der statischen und dynamischen Verformung der Felder 2 und 3 gemessen, obwohl diese aufgrund der Materialuntersuchungen ähnliche mechanische Eigenschaften haben sollten. Die elastische Komponente wurde für beide Felder gleich gemessen.

Durch Anwendung der traditionellen AASHTO Analyse der Befahrbarkeit (PSI Index) wurde folgendes festgestellt: Feld 2 und 5 waren am Ende des Versuches noch funktionstüchtig ($PSI > 3$). Der PSI Wert hat im Feld 4 langsam abgenommen, am Ende des Versuches lag aber sein Wert nahe bei 1.5 (Endzustand). Feld 1 hat sehr bald nach Beginn des Befahrens am Anfang des Versuches seine Funktionstüchtigkeit verloren. Später ist der Verlauf dann einigermaßen stabil geblieben. Feld 3 hat auch am Anfang sehr grosse Verschlechterungen des Oberflächenzustandes gezeigt, anschliessend ist der PSI Wert wieder leicht gestiegen. Am Ende des Versuches war die Oberfläche von Feld 3 fast komplett zerstört ($PSI < 0.5$).

Zusätzlich wurde eine numerische Analyse der Versuchsergebnisse durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen geben einen besseren Überblick über die effektiven mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Tragschichten. Damit konnten die festgestellten Eigenschaften und Verhalten der 5 Felder recht präzise erklärt werden. Die Deflektionsmulden wurden mit dem FE Programm ABAQUS unter Verwendung eines Optimierungsalgorithmus rückgerechnet. Zu den wichtigsten Ergebnissen dieser Analyse gehört die Feststellung, dass die Tragschichten in Feld 2 und 3 ähnliche Tragfähigkeitseigenschaften haben. Die unterschiedlichen Leistungen der Schichtenpakete im Feld 2 und 3 sind auf unterschiedlich tragfähigen Untergrund und auf die nicht linearelastischen Eigenschaften der gebundenen Materialien zurückzuführen. Aufgrund von Rückrechnungen wurde in der Sommerperiode in Feld 5 der grösste E Modul berechnet.

Der Rundlaufversuch Nr. 7 war der letzte Versuch mit dieser Anlage und wurde am 20. Juni 2005 mit nahezu 1,5 Millionen (1420548) Überrollungen abgeschlossen. Die Rundlaufanlage wurde im Juli 2005 abgebaut.

9 Literatur

Rabaiotti C., Caprez M. (2006) "Mechanical response of asphalt-pavements under static and moving wheel-load" GeoCongress Atlanta 2006, invited presentation

Rossner H.P., et al. „Verhalten des Strassenoberbaus unter wiederholter Belastung“ (Rundlaufversuch Nr. 1), Schlussbericht zu Forschungsauftrag 13/77 und 34/80, Forschungsberichte des Eidg. Departementes des Innern, Nr. 50; Bern, März 1982

Jacot A. „Langzeitverhalten und Dimensionierung von Zementstabilisierungen“ (Rundlaufversuch Nr. 2), Schlussbericht zu Forschungsauftrag 8/83, Forschungsberichte des Eidg. Departementes des Innern, Nr. 113, Bern, Februar 1985

Scazziga I., et al., „Vergleich von Oberbauvarianten für Kantons- und Gemeindestrassen“ (Rundlaufversuch Nr. 3), Schlussbericht zu Forschungsauftrag 35/80 und 17/85, Bundesamt für Strassenbau, Bern, Nr. 316, August 1994

Horat M., et al., „Untersuchung des Verhaltens von Recycling- und teilweise gebrochenen Materialien für die fundationsschicht“ (Rundlaufversuch nr. 4) Schlussbericht zu Forschungsauftrag 7/85, Bundesamt für Strassenbau, Bern, Nr. 311, März 1994

Beligni M., et al., „Heiss- und Kaltmischfundationsschichten aus recyciertem Ausbausphalht“ (Rundlaufversuch Nr. 5), Schlussbericht zu Forschungsauftrag 14/91, Bundesamt für Strassenbau, Bern, Nr. 351, August 1995

Oekzul O., et al., „Zementstabilisierte Fundationsschichten aus Asphaltgranulat und Kiessand unter dünnen bituminösen Deckschichten“ (Rundlaufversuch Nr. 6), Schlussbericht zu Forschungsauftrag 08/95, Bundesamt für Strassenbau, Bern, Nr. 451, Mai 1999

Several Authors: "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993" American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

ABAQUS "Theory and Users Manual" Version 6.4, Hibbit, Karlsson & Sorenson, Inc., Pawtucket, Rhode Island., 2003 Design

Marquardt D.W. "An algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters" Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, Volume 11, Issue 2 (Jun., 1963), 431-441.

SN 640 324a : Dimensionierung Strassenoberbau, VSS Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute"

Romanoschi S.A: and Metcalf J.B. (2003), "Errors in Pavement Layer Backcalculation due to Improper Modeling of the Layer Interface Condition" 82 Annual Meeting of the Transportation Research Board

Uzan J. (2004), "Linear and Nonlinear Backcalculation for Site 1 in Hanover" 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board

Madsen K., Nielsen H.B., Tingleff O., "Methods for Non-linear Least Squares Problems" Technical University of Denmark, 2004. Lectures notes

Hiptmair R., Jeltsch R., "Numerische Mathematik" Skript der Vorlesung an der ETHZ WS 05/06

10 Anhänge

Die folgenden Anhänge enthalten die allgemeine Beschreibung der durchgeführten Versuche, des Baus und der Ausrüstung der einzelnen Felder, sowie die wichtigsten Messergebnisse.

10.1 Allgemeine Beschreibung der durchgeführten Versuche

10.1.1 Versuche auf der Oberfläche

Auf der Oberfläche der verschiedenen Felder wurden vor und während dem Betrieb verschiedene Messungen durchgeführt, um die Materialeigenschaften und den Belagszustand zu untersuchen und zu kontrollieren:

10.1.1.1 Bohrungen und Schichtdicke

Die entnommenen Bohrungen wurden für die Kontrolle der Schichtdicke und des Bindemittels verwendet. An den Bohrkernen wurden die Rohdichte, die Dichte, der Hohlraumgehalt und der Schichtverbund gemessen. Der Verdichtungsgrad wurde mittels der Basiswerte aus der Mischgutuntersuchung gerechnet. Wegen der Empfindlichkeit der Versuchsfelder auf Störungen durch Bohrkernentnahmen, wurden solche auf ein absolutes Minimum reduziert. Es wurden zwei Bohrkern in jedem Feld je von der unteren HMT-Schicht, von der oberen HMT-Schicht sowie von der Deckschicht untersucht.

In der untenstehenden Tabelle 16 sind die Messresultate der untersuchten Bohrkern aller fünf Versuchsfelder im Detail aufgeführt.

In Tabelle 17 sind die Mittelwerte der Messgrößen aus den Bohrkernen aufgeführt.

Feld1

BK-Nr	Schicht	Rohdichte BK	Dichte	Hohlraum	Rohd. MS.	Verd. - grad	Schicht-verbund
		[g/cm ³]	[g/cm ³]	[Vol.-%]	[g/cm ³]	[%]	[kN]
1	HMT22 unten	2.4	2.516	4.6	2.367	101.4	
1	HMT22 oben	2.439	2.505	2.6	2.385	102.3	12.6
1	AB 11 S	2.28	2.471	7.7	2.378	95.9	15.7
2	HMT22 unten	2.399	2.516	4.7	2.367	101.3	
2	HMT22 oben	2.456	2.505	1.9	2.385	103	21.9
2	AB 11 S	2.271	2.471	8.1	2.378	95.5	15.2

Feld2

BK-Nr	Schicht	Rohdichte BK	Dichte	Hohlraum	Rohd. MS.	Verd. - grad	Schicht-verbund
		[g/cm ³]	[g/cm ³]	[Vol.-%]	[g/cm ³]	[%]	[kN]
1	HMT22 unten	2.403	2.507	4.2	2.409	99.7	
1	HMT22 oben	2.374	2.502	5.1	2.355	100.8	16.1
1	AB 11 S	2.295	2.471	7.1	2.378	96.5	20.7
2	HMT22 unten	2.364	2.507	5.7	2.409	98.2	
2	HMT22 oben	2.347	2.502	6.2	2.355	99.7	18.4
2	AB 11 S	2.268	2.471	8.2	2.378	95.4	9.8

Feld3

BK-Nr	Schicht	Rohdichte BK	Dichte	Hohlraum	Rohd. MS.	Verd. - grad	Schicht-verbund
		[g/cm ³]	[g/cm ³]	[Vol.-%]	[g/cm ³]	[%]	[kN]
1	HMT22 unten	2.391	2.513	4.8	2.371	100.9	
1	HMT22 oben	2.405	2.498	3.7	2.395	100.4	8.1
1	AB 11 S	2.307	2.471	6.6	2.378	97	22.3
2	HMT22 unten	2.397	2.513	4.6	2.371	101.1	
2	HMT22 oben	2.401	2.498	3.9	2.395	100.3	19.1
2	AB 11 S	2.135	2.471	13.6	2.378	89.9	14.1

Feld4

BK-Nr	Schicht	Rohdichte BK	Dichte	Hohlraum	Rohd. MS.	Verd. - grad	Schicht-verbund
		[g/cm ³]	[g/cm ³]	[Vol.-%]	[g/cm ³]	[%]	[kN]
1	HMT22 unten	2.354	2.516	6.4	2.367	99.5	
1	HMT22 oben	2.366	2.509	5.7	2.359	100.3	19.8
1	AB 11 S	2.233	2.471	9.6	2.378	93.9	18.2
2	HMT22 unten	2.367	2.516	5.9	2.367	100	
2	HMT22 oben	2.382	2.509	5.1	2.359	101	22.5
2	AB 11 S	2.237	2.471	9.5	2.378	94.1	20.9

Feld5

BK-Nr	Schicht	Rohdichte BK	Dichte	Hohlraum	Rohd. MS.	Verd. - grad	Schicht-verbund
		[g/cm ³]	[g/cm ³]	[Vol.-%]	[g/cm ³]	[%]	[kN]
1	HMT22 unten	2.395	2.5	4.2	2.38	100.6	
1	HMT22 oben	2.355	2.488	5.3	2.42	97.3	23.9
1	AB 11 S	2.309	2.471	6.6	2.378	97.1	24.3
2	HMT22 unten	2.415	2.5	3.4	2.38	101.5	
2	HMT22 oben	2.35	2.488	5.5	2.42	97.1	24.8
2	AB 11 S	2.279	2.471	7.8	2.378	95.8	23.6

Tabelle 16) Zusammenstellung der Bohrkernresultate

Feld1

Mittelwerte	Rohdichte BK	Dichte	Hohlraum	Rohd. MS.	Verd. - grad	Schichtverbund
	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[Vol.-%]	[g/cm ³]	[%]	[kN]
<i>Deckschicht</i>	2.2755	2.471	7.9	2.378	95.7	
HMT oben	2.4475	2.505	2.25	2.385	102.65	17.25
HMT unten	2.3995	2.516	4.65	2.367	101.35	15.45
HMT gesamt	2.4235	2.5105	3.45	2.376	102	

Feld2

Mittelwerte	Rohdichte BK	Dichte	Hohlraum	Rohd. MS.	Verd. - grad	Schichtverbund
	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[Vol.-%]	[g/cm ³]	[%]	[kN]
<i>Deckschicht</i>	2.2815	2.471	7.65	2.378	95.95	
HMT oben	2.3605	2.502	5.65	2.355	100.25	17.25
HMT unten	2.3835	2.507	4.95	2.409	98.95	15.25
HMT gesamt	2.372	2.5045	5.3	2.382	99.6	

Feld3

Mittelwerte	Rohdichte BK	Dichte	Hohlraum	Rohd. MS.	Verd. - grad	Schichtverbund
	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[Vol.-%]	[g/cm ³]	[%]	[kN]
<i>Deckschicht</i>	2.221	2.471	10.1	2.378	93.45	
HMT oben	2.403	2.498	3.8	2.395	100.35	13.6
HMT unten	2.394	2.513	4.7	2.371	101	18.2
HMT gesamt	2.3985	2.5055	4.25	2.383	100.675	

Feld4

Mittelwerte	Rohdichte BK	Dichte	Hohlraum	Rohd. MS.	Verd. - grad	Schichtverbund
	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[Vol.-%]	[g/cm ³]	[%]	[kN]
<i>Deckschicht</i>	2.235	2.471	9.55	2.378	94	
HMT oben	2.374	2.509	5.4	2.359	100.65	21.15
HMT unten	2.3605	2.516	6.15	2.367	99.75	19.55
HMT gesamt	2.36725	2.5125	5.775	2.363	100.2	

Feld5

Mittelwerte	Rohdichte BK	Dichte	Hohlraum	Rohd. MS.	Verd. - grad	Schichtverbund
	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[Vol.-%]	[g/cm ³]	[%]	[kN]
<i>Deckschicht</i>	2.294	2.471	7.2	2.378	96.45	
HMT oben	2.3525	2.488	5.4	2.42	97.2	24.35
HMT unten	2.405	2.5	3.8	2.38	101.05	23.95
HMT gesamt	2.37875	2.494	4.6	2.4	99.125	

Tabelle 17) Mittelwerte der Bohrkernresultate

10.1.1.2 Deflektionsmessungen

Die Bewertung und die Entwicklung des Belagzustandes konnten durch die Deflektionsmessungen untersucht werden. Es ist aber zu beachten, dass diese Versuche sehr von der Art der Durchführung beeinflusst werden können.

Plattendruckversuche

Der mit dem Plattendruckversuch gemessene M_E Modul gilt als Bestimmung der Verformbarkeit (Tragfähigkeit) des untersuchten Schichtpakets bis zu einer gewissen Einflusstiefe. Ein Nachteil dieses Versuches ist, dass die untersuchten Materialeigenschaften nur zu einem bestimmten Ort gehören (Punktuelle Versuch).

Benkelmanbalken

Zweck dieses Versuches ist die Bestimmung der elastischen Rückfederung eines gebundenen Materials. Plastische Verformungen sind mit diesem Versuch sehr schwierig zu messen, und auch sind die mechanischen Eigenschaften der gebundenen Schichten untrennbar mit der von der Fundationsschicht verbunden. Deswegen wurden neue Sensoren eingerichtet, die mindestens die mechanischen Eigenschaften der Asphaltsschichten unter verschiedenen Lastbedingungen (Ort und Geschwindigkeit) beschreiben. Die Beschreibung dieser Sensoren wurde im Abschnitt 2.4.3 erläutert.

Die Korrekturfaktoren der Normen wurden nicht angewendet. Die Temperaturwerte werden immer neben den Deflektionsmessungen dargestellt. Auswertungen ohne den Temperaturbeitrag können zu komplett falschen Interpretationen der Ergebnisse führen.

10.1.1.3 Geometrie der Oberfläche

Die Beobachtung der Oberfläche ist die erste Analyse des Strassenzustandes, die auch direkt vom Auge eine sehr rasche Aussage über den Zustand des Belages ermöglicht. Während Mikrorisse und innere Materialschwächen nicht so deutlich erkennbar sind, werden die Spurrinnen und die Längsunebenheiten für den normalen Strassenanwender sofort spürbar. Um diese Eigenschaften zu quantifizieren braucht man zwei verschiedene Arten von Nivellement die unten beschrieben werden.

Querebenheitsmessungen

Die Querebenheitsmessungen wurden mit einem Oberflächenprofilschreiber durchgeführt. Die untersuchten Querschnitte liegen alle 2 Meter auseinander, und wurden am Rande der Fahrbahn markiert. Der Anfangszustand der Oberfläche ohne Überrollungen wurde auch gemessen, um die spätere Entwicklung der Spurrinnen besser auszuwerten. Die Daten wurden digitalisiert und später mit MATLAB ausgewertet, um die Änderung der Materialeigenschaften mit Anzahl der Übergänge mathematisch zu beschreiben.

Längsprofilmessungen

Einer der wichtigsten Parameter der AASHTO Dimensionierungsmethode ist die Standardabweichung des Winkelwertes.

Um die zu messen, wurden alle 20 cm Punkte aufgemalt deren Höhen immer regelmässig gemessen wurden. Die Auswertung ergibt sich wie im Bild 73 dargestellt.

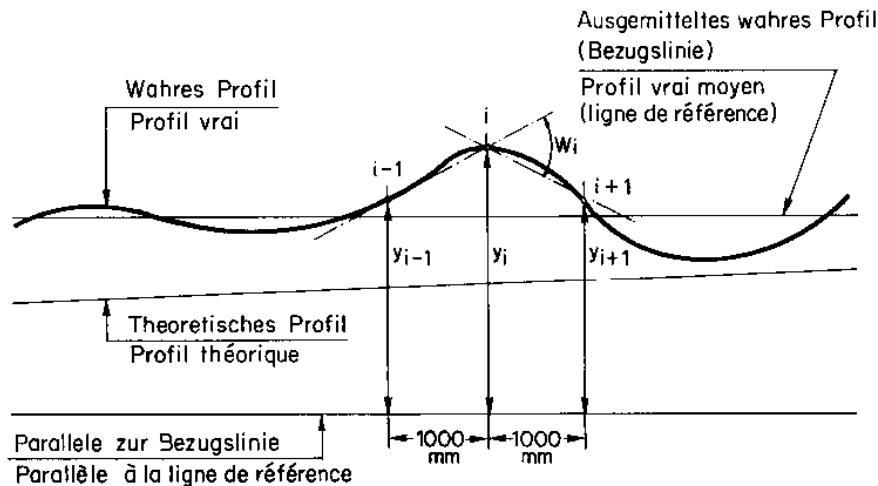


Bild 73 Längsebenheit

Die Berechnung wurde für jeden Punkt durchgeführt, und der entsprechende Wert von s_w folgt aus der Formel:

$$s_w = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2} \left[\frac{0}{100} \right]$$

$$W_i = \text{Neigungsänderung in } \frac{0}{100}$$

$$\bar{W} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i \left[\frac{0}{100} \right]$$

Mit den Längsprofilmessungen wurden auch die Setzungen des Querschnittes im Vergleich zu einem Punkt auf der Betonwanne gemessen.

Es ist aber auch zu beachten, dass kleine horizontale Verschiebungen der aufgemalten Punkte ebenfalls stattgefunden haben könnten. Aus diesem Grund ist auch in diesem Bereich mit einer gewissen Ungenauigkeit zu rechnen.

Befahrbarkeitsindex

Der Befahrbarkeitsindex stellt eine der wichtigsten Größen in der alten AASHTO Dimensionierungsmethode dar, die sich auf empirisch-analytische Ansätze gründet. Es wird nach folgender Formel gerechnet:

$$PSI = 5.03 - 1.91 \cdot \log(1 + SV) - 0.01 \cdot \sqrt{(C + P)} - 1.38 \cdot RD^2$$

Wobei:

SV: $0.67 s_w^2$ = Neigungsstreuung (Slope Variance),

s_w : Standardabweichung des Winkelwertes W

C+P:; Risse und Flickstellen

RD: Rinnentiefe (RUT DEPTH) in Zoll unter einer 1.2 m Latte

10.1.2 Messsensoren

Die Daten der Messsensoren wurden mit einem LABVIEW Programm gemessen und mit MATLAB gefiltert und ausgewertet. Die Schwankungen in den Messsignalen mussten mit Filtern korrigiert werden, und deswegen sind die Ergebnisse mit einer gewissen Toleranz zu betrachten. Kritisch sind auch die Einbaubedingungen (wie zum Beispiel eine Verlagerung während der Verdichtung oder eine ungenügend Verbindung zwischen Sensor und Belag) und die Interpretation der Ergebnisse im Zusammenhang mit den möglichen Einbaufehlern, die z.B. für die DMS durch die Verdichtung der Schichten stattgefunden haben könnten.

10.1.2.1 Dehnungsmessungen

In einigen europäischen Ländern wie Frankreich spielen die Verformungen auf der Basis der Tragschicht eine zentrale Rolle in der Dimensionierung der Strassen. Diese Parameter werden normalerweise aus Laborversuchen erhalten. Die Anzahl der dynamischen Belastungszyklen wird nachher auf eine entsprechende Anzahl einer gewissen Achslast übersetzt. Die mechanische Antwort des Materials ist aber auf dem Feld durch die Dehnungsmessstreifen manchmal nicht so gut nachvollziehbar, trotzdem stehen leider heutzutage nicht viele andere Sensoren zur Verfügung um die ebenen Verformungen der Asphaltsschichten in dem Strassenoberbau zu messen.

DMS

Die schon erwähnten und technisch beschriebenen DMS Sensoren wurden während dem Einbau der verschiedenen Felder eingesetzt. Leider wurden durch die schweren Walzen einige Sensoren während der Verdichtung zerstört. Die, die übrig geblieben sind, haben ihre Aufgabe erledigt, ausser einige die auch während dem Betrieb keine oder unzuverlässige Signale gesendet haben. Es werden in dieser Veröffentlichung nur diejenigen Resultate, die gut und zuverlässig (nach der Meinung der Autoren) sind, publiziert. Einige DMS wurden während dem Versuch auf der Deckschicht angeklebt, um die Dehnungen auf der Oberfläche messen zu können. Durch das Rad, dessen Achsabstand sich einstellen lässt, wurden die unterschiedlichen Dehnungen durch die Variation des Radabstandes gemessen.

VVS (Vertikale Verformung Sensoren)

Die VVS Sensoren wurden schon im Laufe des Versuches eingeplant. Diese Sensoren können nicht nur eine Dehnungsmessung, sondern für die gesamte gebundene Schicht die effektive Zusammendrückung statisch und dynamisch messen.

10.1.2.2 Temperatur Messungen

Wie schon erwähnt, sind die Temperaturen für die Beurteilung des Asphaltverhaltens eine unvernachlässigbare Grösse, aufgrund des thermoviskoelastoplastischen Verhaltens des Asphalts. Statische und dynamische Messungen, sowie die Entwicklung des Belagszustands hängen sehr stark vom Klima ab.

Die Wärmeleitfähigkeit spielt auch eine wesentliche Rolle in der Temperaturverteilung der verschiedenen Schichten, deshalb ist es sehr wichtig, dass die Temperaturen in verschiedenen Tiefen gemessen werden können, damit immer die Temperaturbedingungen der untersuchten Schicht bekannt sind.

10.2 Bauarbeiten

10.2.1 Geometrie des Baus

Der Querschnitt (Quergefälle und Schichtdicke) wurde für alle Felder gleich gewählt, da der Einfluss des Bindemittels die wichtigste Eigenschaft war, die es zu untersuchen galt.

Das Quergefälle beträgt 3%, so dass das Wasser sehr schnell von der Oberfläche abfliessen kann. Für die zentrifugalen Kräfte waren keine besonderen Anforderungen von Nöten, da diese vollständig von den Armen aufgenommen wurden.

Die Eigenschaften sind im Bild 74 dargestellt:

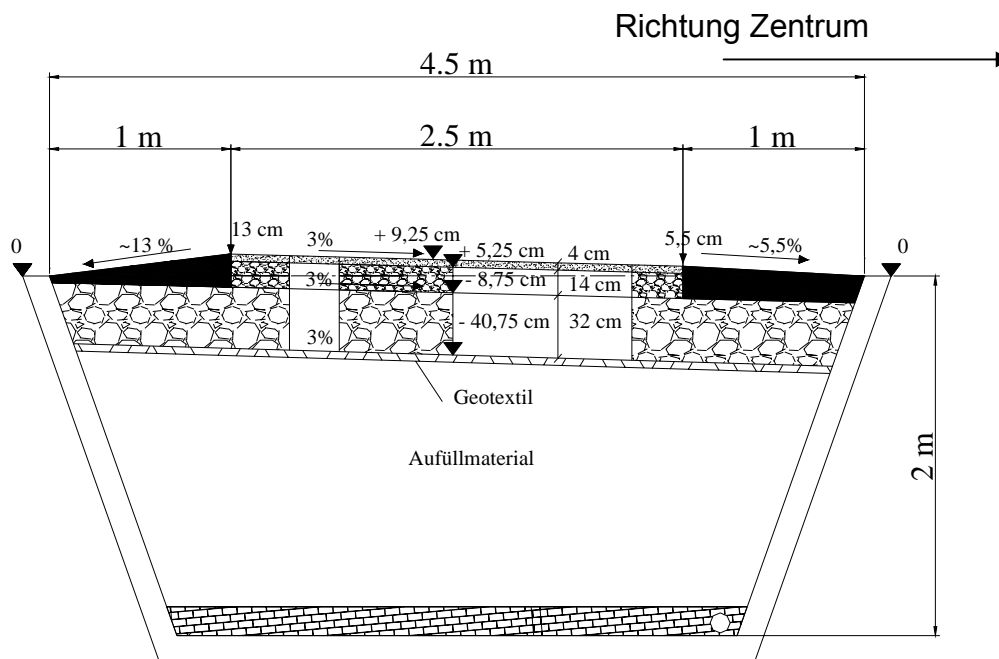


Bild 74 Typischer Querschnitt

10.2.2 Ausbau der alten Felder

Am 14 April 2003 fanden die ersten Arbeiten des 7 Rundlaufversuchs statt, welche zuerst die Vorbereitung der Sockel und Kabel beinhaltet.

Beim Ausbau der alten Felder am 28 April, wurde bemerkt, dass in einem Bereich des Rundlaufs Auffüllungen notwendig waren, da die Mächtigkeit eines alten, bereits entfernten Feldoberbaus deutlich grösser war als die der anderen.

Infolge des nassen Wetters, das die Verdichtungsarbeiten nicht ermöglichte, wurde der Untergrund erst am 5 Mai verdichtet. Die grossen Wassermengen, die den Untergrund sehr durchnässt hatten, führten zu einer Verstopfung der Drainage am inneren Rand der Betonwanne. Deswegen musste die Drainage im Feld 4 ersetzt werden (Bild 75).



Bild 75 Verstopfung der Drainage (Feld4)

Am folgenden Tag, nach dem Versetzen der Drainage, wurden einige Plattendruckversuche auf dem Planum durchgeführt, um den Verdichtungsgrad des Materials zu überprüfen und zusätzlich auch ein Nivellement der Planumsoberfläche. Der Boden des Unterbaus war in diesem Feld sehr schwer verdichtbar.

10.2.3 Einbau Geotextil und Foundationsschicht

Vor dem Planieeinbau wurde ein Geotextil auf das Planum verlegt, um die Einsenkung der Kiessandkörner der Foundationsschicht in den Untergrund zu verhindern (Bild 76).



Bild 76 Geotextil verlegen



Bild 77 Verdichtung der Foundationsschicht

Der Einbau der Foundationsschicht dauerte 2 Tage, vom 8 Mai bis 9 Mai 2003. Das Material wurde mit dafür am besten geeigneten Walzen vibriert und verdichtet um eine gute Tragfähigkeit und Ebenheit zu erhalten (Bild 77). Bei der Verdichtung sind viele Schwierigkeiten aufgetreten, insbesondere wurde es sehr schwierig die gewünschte Ebenheit der Oberfläche zu erhalten, da das Material unter der Walze nicht sehr stabil war. Die Foundationsschicht wurde mit

einer Vibrowalze BOMAG und einer Pneuwalze der Firma GS verdichtet (Bild 78 Bild 79).



Bild 78 Vibrowalze Bomag BW144 AD2 Bild 79 Pneuwalze GS GRW 10

Die Technischen Eigenschaften der beiden Verdichtungsmaschinen sind in der nächsten Tabelle vorgestellt.

Bomag BW 144 AD-2			GS GRW 10		
Betriebsgewicht	Kg	7300	Leergewicht	Kg	10800
Betriebsgewicht mit Kabine	Kg	7750	Leergewicht mit Kabine	Kg	11500
Achslast vorn/hinten	Kg	4050/3500	Höchstgewicht	Kg	24000
Stat. Linienlast vorn/hinten	Kg/cm	27/24.7	Radlast max.	kg	3000

Tabelle 18) Technische Eigenschaften der Verdichtungsmaschinen

10.2.3.1 Einbau Temperatursensoren

Während dem Einbau der Foundationsschicht wurden in die zukünftigen Instrumentierungszonen Temperatursensoren PT100 in die Mitte der Schicht hineingelegt (Bild 80). Die Sensoren wurden nach dem Einbau mit Sand bedeckt, damit die harte Kiessandkornen durch die Verdichtung die Temperaturfühler und die Kabel nicht zerstörten. Die Kabel wurden danach in die jeweilige Schachtel eingeführt.



Bild 80 Temperatursensoren mit Sand bedeckt

10.2.4 Einbau der Tragschichten

Der Einbau der Tragschicht (Bild 81, Bild 82) hat leider unter schwierigen Bedingungen stattgefunden. Auf der einen Seite war das Wetter meist regnerisch und kühl, auf der anderen hatte es das Belagslieferwerk leider nicht geschafft all die verschiedenen Beläge in einem Tag zu liefern (Die obere Schicht des Feld Nr. 5 wurde einen Tag später als die anderen geliefert).

Die Schichten wurden an den folgenden Tagen aufgetragen:

HMT22 untere Schicht:	HMT22 obere Schicht:
Feld 1: 14.05.03 9:05	Feld 1: 16.05.03 13:00
Feld 2: 14.05.03 14:10	Feld 2: 16.05.03 14:10
Feld 3: 14.05.03 16:10	Feld 3: 16.05.03 15:00
Feld 4: 14.05.03 18:30	Feld 4: 16.05.03 16:00
Feld 5: 14.05.03 12:20	Feld 5: 20.05.03 17:00

Tabelle 19) Chronologie des Aufbaus der Felder



Bild 81 Kühles Wetter bei dem Einbau (8 – 12°C regnerisch)



Bild 82 Kontrolle der Mischgutedichte

Der Belag besteht aus zwei 7 cm dicken HMT Schichten. Die Dichte des Mischguts wurde immer sofort nach dem Einbau und der Verdichtung kontrolliert. Um einen Verbund zwischen den einzelnen Schichten herzustellen, wurde die erste Schicht vor dem Einbau der zweiten mit einer Bitumenemulsion eingespritzt.

10.2.4.1 Einbau der Temperatursensoren

Die Temperatursensoren wurden auf der Fundationsschicht verlegt (Bild 83 Bild 84). Sie liegen in der Instrumentierungszone vor der Übergangszone, wo auch die anderen Sensoren eingebaut wurden. Als Unterlage diente ein Asphaltbett, damit die Sensoren während der Verdichtung stabil blieben. Die Kabel wurden auch auf der unterliegenden Schicht mit Asphalt fixiert.



Bild 83 Aufbau der PT100 Sensoren



Bild 84 Einbau der PT100 Sensoren

10.2.4.2 Einbau der DMS Sensoren

Die DMS Sensoren (Dehnungsmessstreifen), die die Dehnungsmessungen in der Schicht ermöglichen, wurden am Ende jedes Feldes in Quer- und Längsrichtung eingebaut (Bild 85, Bild 86).

Der Abstand zwischen den einzelnen Sensoren betrug 50 cm. Der Einbau und die Sensoreinrichtungen werden im Bild 87, und Bild 88 dargestellt. Für die DMS Sensoren wurde ebenfalls eine Bettung aus Asphalt vorgenommen, damit die Sensoren während der Verdichtung stabil blieben.

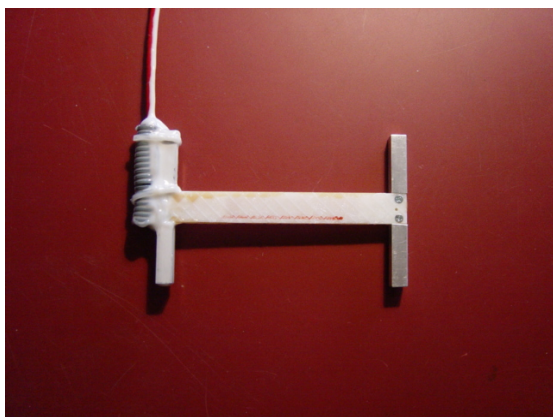


Bild 85 DMS Einrichtung



Bild 86 Anschlussbox



Bild 87 Lage der Sensoren



Bild 88 Positionierung

Aufgrund der grossen Lastbeanspruchungen der Walzen brachen leider einigen DMS Sensoren während der Verdichtung.

10.2.5 Einbau der Deckschichten

Die Deckschicht wurde am 28 Mai 2003 geliefert und verdichtet, nachdem die Tragschicht mit Emulsion eingespritzt wurde. Die 4 Zentimeter dicke Schicht wurde kontinuierlich bei sonnigem Wetter eingebaut.

Am Ende wurden die Bankette mit AB 8 spezial erstellt.

10.2.5.1 Einbau Temperatursensoren und DMS in der Deckschicht

Die Temperatursensoren und die DMS wurden auf die Tragschicht gelegt, ungefähr in derselben Position und mit denselben Verfahren wie die in der Trag- und Fundationsschicht enthaltenen Sensoren installiert.

10.2.5.2 Einbau LVDT

Im Frühjahr 2004 wurden zusätzlich andere Sensoren entwickelt, um die Zusammendrückung des Asphaltes zu messen.

Die ersten zwei Prototypen wurden am 2 April 2004 in der Fundationsschicht eingebaut und in der Deckschicht mit Epoxy fixiert. Es wurde auch ein 2 cm tiefer Schlitz für das Kabel vorbereitet. Das Kabel wurde danach mit Epoxy im Schlitz fixiert. Die anderen 3 Messsensoren wurden am 10 September 2004 verlegt (Bild 89 Bild 90).



Bild 89 Bohrung



Bild 90 Sensoreinbau

Nr.	Task Name	DAUER	ABFANG	ENDE	MAI 03	APRIL	MAI	JUNI
0	Rudauf Einbau	61 Tage	Mon 14.04.03	Fre 04.07.03				
1	Sockeln und Kabeln Vorbereitung	1 Tag	Mon 14.04.03	Mon 14.04.03				
2	Einklappen Arme	2 Tage	Die 15.04.03	Mit 16.04.03				
3	Ausbau	5 Tage	Mon 28.04.03	Fre 02.05.03				
4	Untergundverdichtung	0,5 Tage	Mon 05.05.03	Mon 05.05.03				
5	<u>Plattendruckversuch UG</u>	0,5 Tage	Mon 05.05.03	Mon 05.05.03				
6	Geometrie Planum UG	1 Tag	Mit 07.05.03	Mit 07.05.03				
7	Einbau der Fundationsschicht und Verdichtung	3 Tage	Don 08.05.03	Sam 10.05.03				
8	<u>Plattendruckversuch FS</u>	0,5 Tage	Mon 12.05.03	Mon 12.05.03				
9	Geometrie Planie FS	0,5 Tage	Mon 12.05.03	Mon 12.05.03				
10	Einbau der Tragschicht und Verdichtung 1	2 Tage	Don 15.05.03	Fre 16.05.03				
11	Einbau der Tragschicht und Verdichtung 2	1 Tag	Die 20.05.03	Die 20.05.03				
12	Benkelm anbacken TS	0,5 Tage	Fre 23.05.03	Fre 23.05.03				
13	Geometrie Planie TS	0,5 Tage	Fre 23.05.03	Fre 23.05.03				
14	Einbau der Deckschicht und Verdichtung 1	1 Tag	Mit 28.05.03	Mit 28.05.03				
15	Einbau der Deckschicht und Verdichtung 2	1 Tag	Mit 04.06.03	Mit 04.06.03				
16	Benkelm anbacken DS	0,5 Tage	Don 05.06.03	Don 05.06.03				
17	Geometrie Planie DS	0,5 Tage	Fre 08.06.03	Fre 08.06.03				
18	Langs abehneit messungen	1 Tag	Don 12.06.03	Don 12.06.03				
19	Querebeneit messungen	1 Tag	Fre 13.06.03	Fre 13.06.03				
20	Ausklappen Arme, Wiegen	0,5 Tage	Mon 16.06.03	Mon 16.06.03				
21	Armen gewogen und Betonwannen weggenommen	1 Tag	Mon 16.06.03	Die 17.06.03				
22	Start, DMS	1 Tag	Fre 04.07.03	Fre 04.07.03				

The Gantt chart displays the project schedule from April to June. The main task 'Rudauf Einbau' spans from Monday, April 14, 2003, to Friday, July 4, 2003. Subsequent tasks include 'Einbau der Tragschicht und Verdichtung 1' (May 15-16), 'Einbau der Tragschicht und Verdichtung 2' (May 20), 'Benkelm anbacken TS' (May 23), 'Geometrie Planie TS' (May 23), 'Einbau der Deckschicht und Verdichtung 1' (May 28), 'Einbau der Deckschicht und Verdichtung 2' (June 4), 'Benkelm anbacken DS' (June 5), 'Geometrie Planie DS' (June 8), 'Langs abehneit messungen' (June 12), 'Querebeneit messungen' (June 13), 'Ausklappen Arme, Wiegen' (June 16), and 'Armen gewogen und Betonwannen weggenommen' (June 16-17). The final task 'Start, DMS' occurs on Friday, July 4, 2003.

Tabelle 20) Projektplan des Einbaus

10.3 Unterbau und Fundationschicht: Material-Eigenschaften

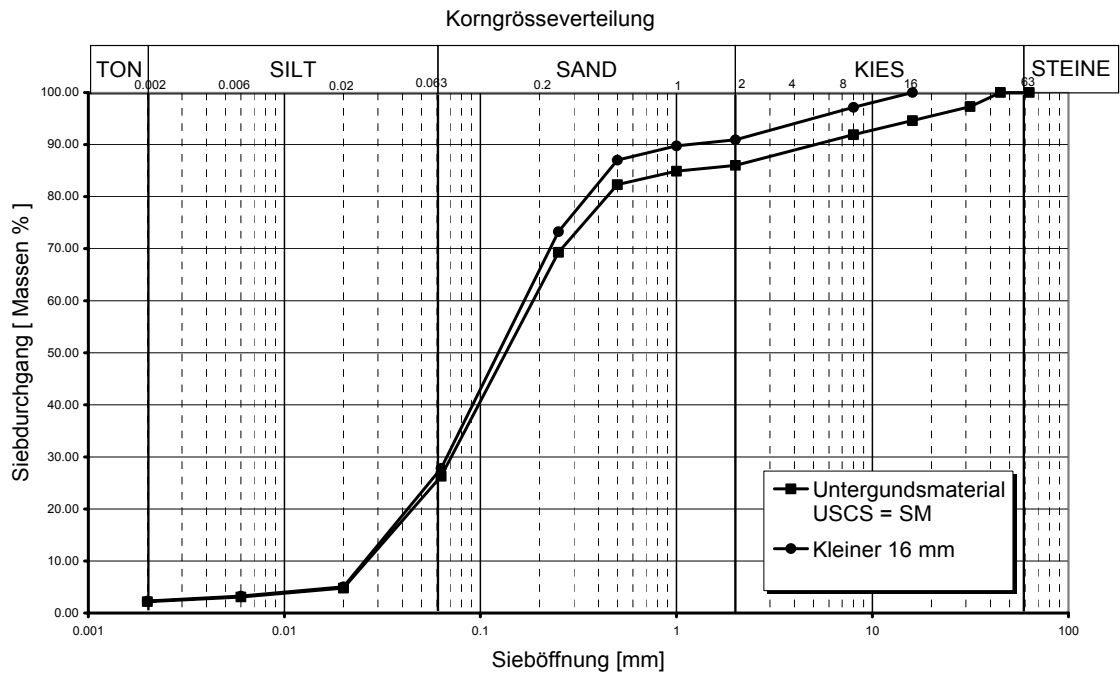


Bild 91 KV des Untergrundmaterials

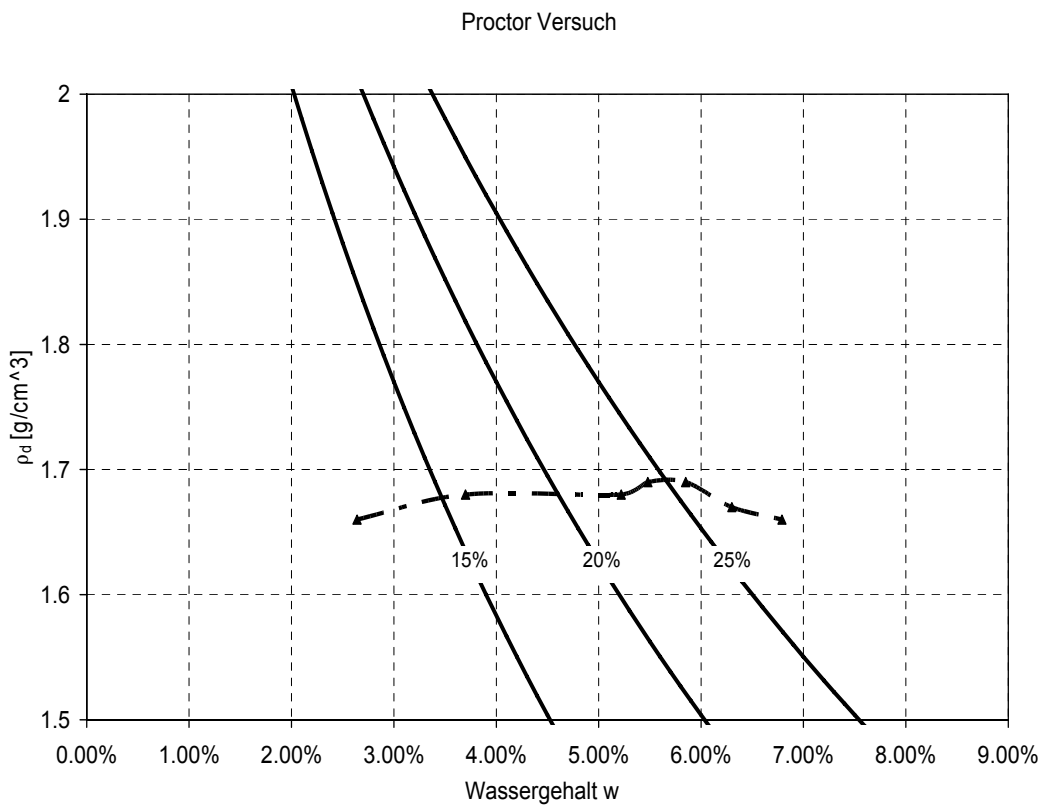


Bild 92 Auswertung des Proctor-Versuchs



Bild 93 Hebungen während dem Frostversuch

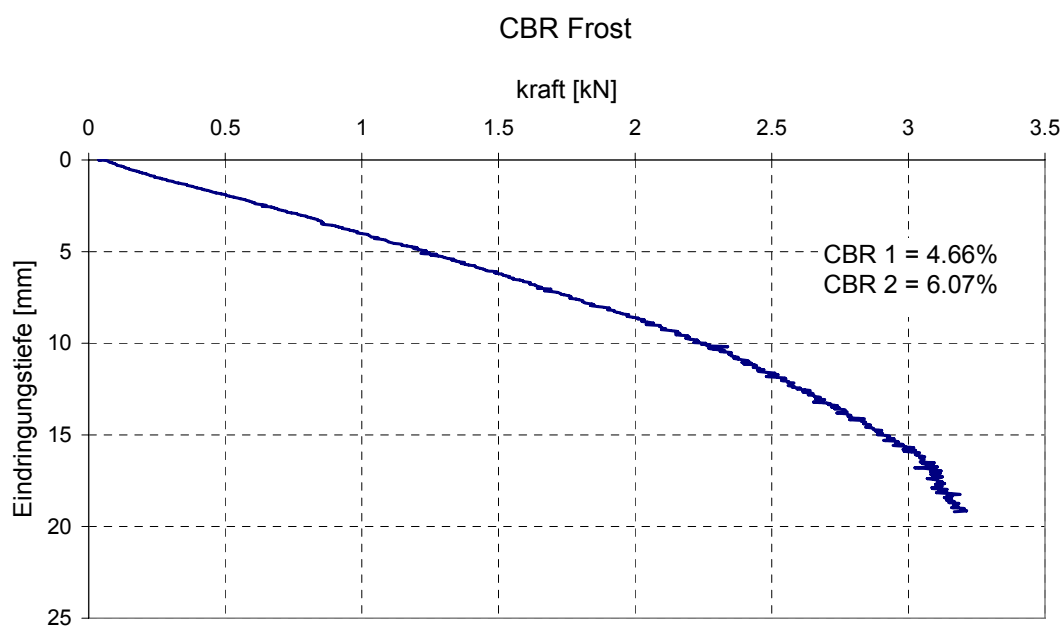


Bild 94 Auswertung des CBR Versuchs

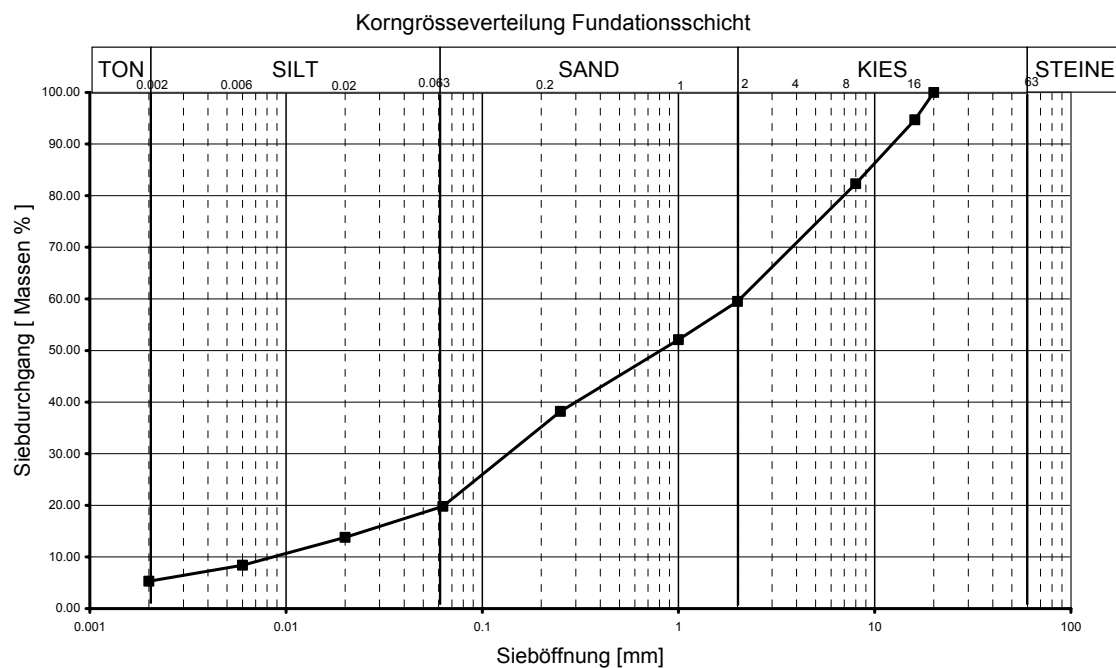


Bild 95 Korngrößenverteilung des Fundationsschichtmaterials

10.4 Benkelman-Versuche: Ergebnisse

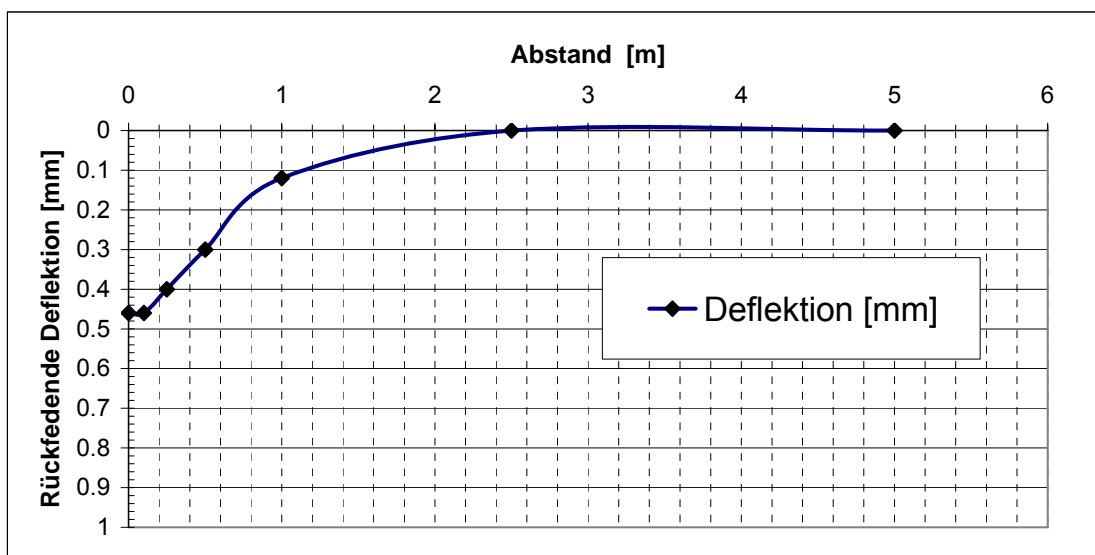
Benkelman-Versuch

Feld nr:

1

Temperatur des Belages:	17	°C
Temperatur der Luft:	14	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Sonnig	
Datum	17.09.2003	
Runde	201000	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.46
0.1	0.46
0.25	0.4
0.5	0.3
1	0.12
2.5	0
5	0



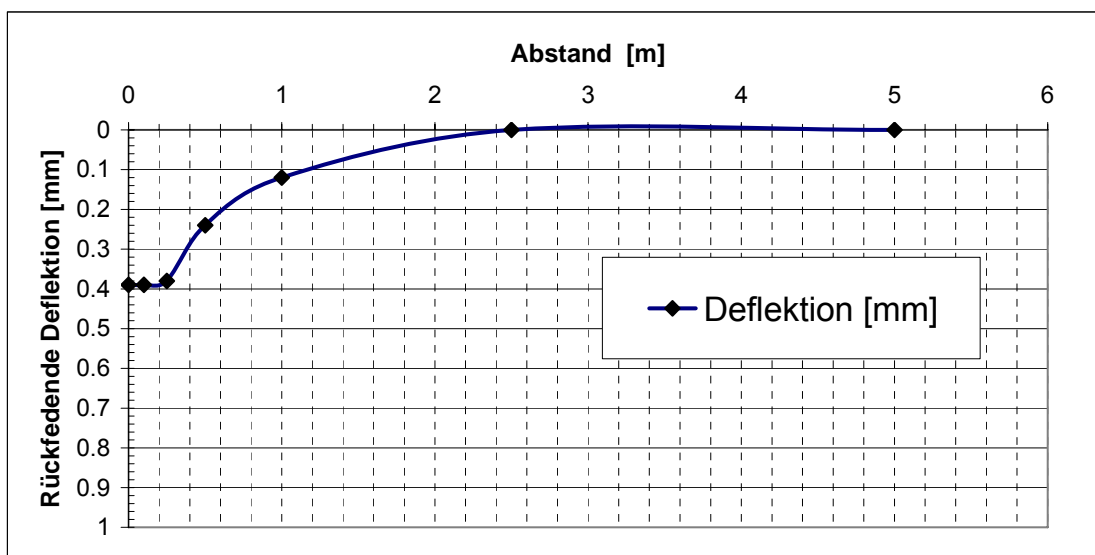
Benkelman-Versuch

Feld nr:

2

Temperatur des Belages:	17	°C
Temperatur der Luft:	14	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Sonnig	
Datum	17.09.2003	
Runde	201000	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.39
0.1	0.39
0.25	0.38
0.5	0.24
1	0.12
2.5	0
5	0



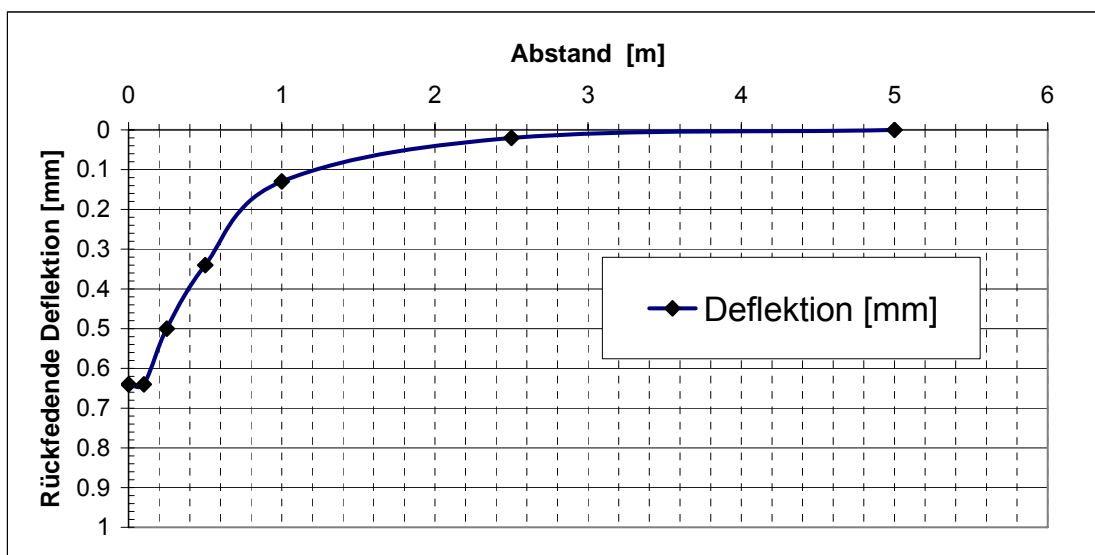
Benkelman-Versuch

Feld nr:

3

Temperatur des Belages:	21	°C
Temperatur der Luft:	14	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Sonnig	
Datum	17.09.2003	
Runde	201000	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.64
0.1	0.64
0.25	0.5
0.5	0.34
1	0.13
2.5	0.02
5	0



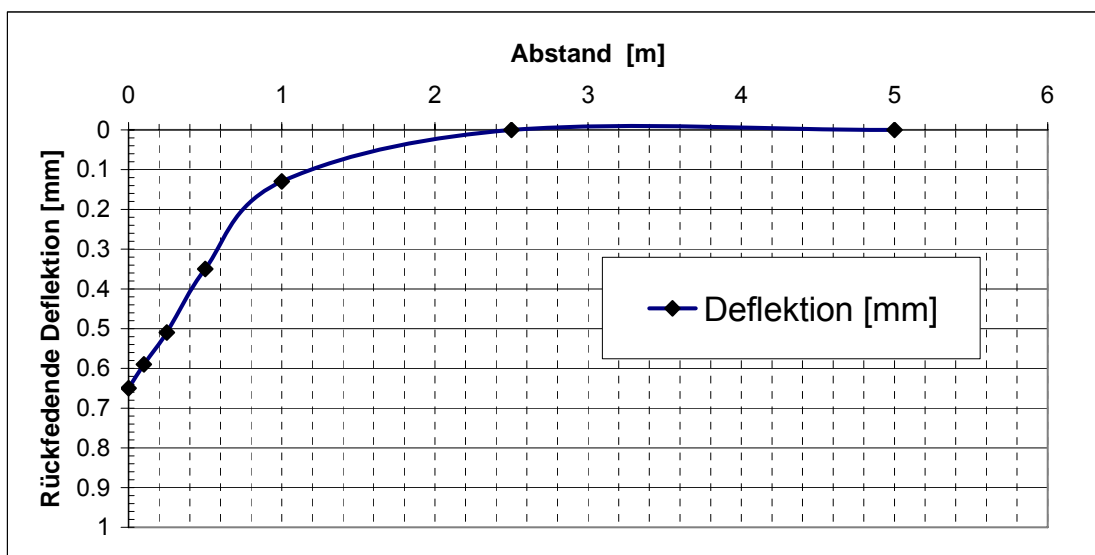
Benkelman-Versuch

Feld nr:

4

Temperatur des Belages:	17	°C
Temperatur der Luft:	14	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Sonnig	
Datum	17.09.2003	
Runde	201000	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.65
0.1	0.59
0.25	0.51
0.5	0.35
1	0.13
2.5	0
5	0



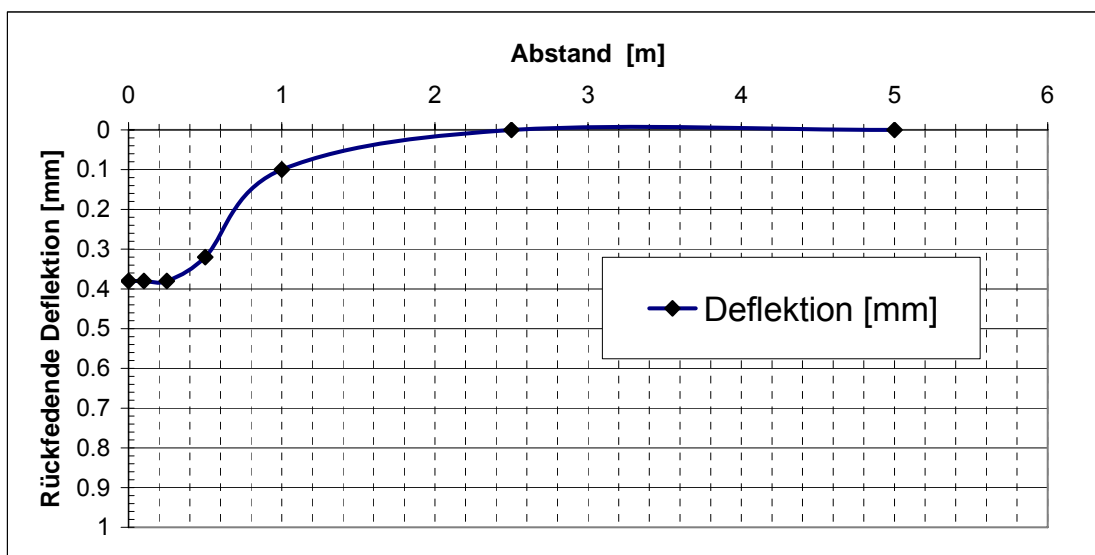
Benkelman-Versuch

Feld nr:

5

Temperatur des Belages:	15	°C
Temperatur der Luft:	14	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Sonnig	
Datum	17.09.2003	
Runde	201000	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.38
0.1	0.38
0.25	0.38
0.5	0.32
1	0.1
2.5	0
5	0

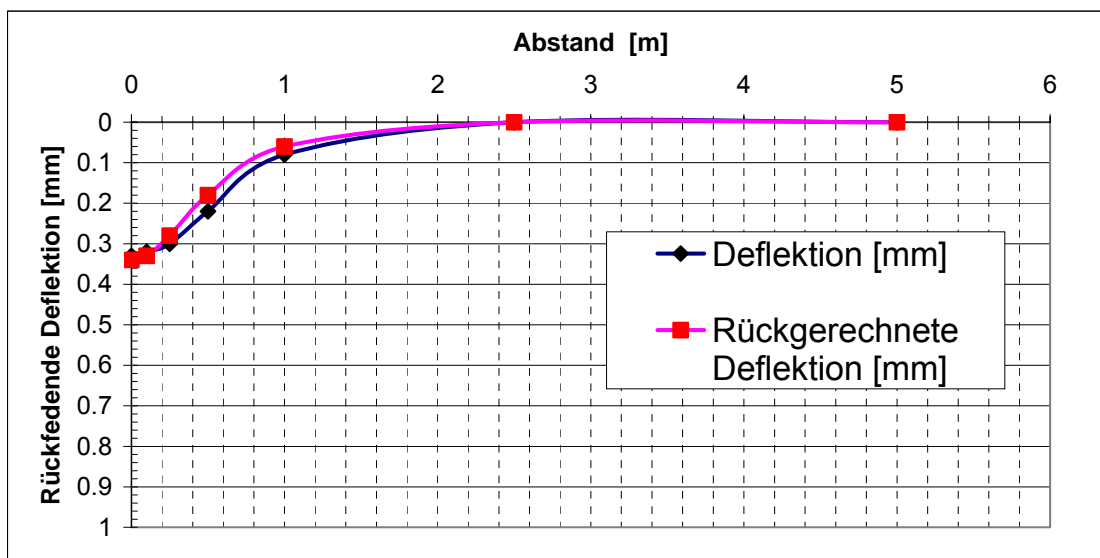


Benkelman-Versuch

Feld nr:	1
----------	---

Temperatur des Belages:	8.1	°C
Temperatur der Luft:	7.3	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Bedeckt, Trocken	
Datum	01.12.2003	
Runde	371451	

Abstand [m]	Deflektion [mm]	Rückgerechnete Deflektion [mm]	Material	E [Mpa]	v [-]
0	0.33	0.34	AB	10000	0.35
0.1	0.32	0.33	HMT	6205	0.35
0.25	0.3	0.28	KS	180	0.3
0.5	0.22	0.18	UG	79	0.3
1	0.08	0.06			
2.5	0	0.00			
5	0	0.00			

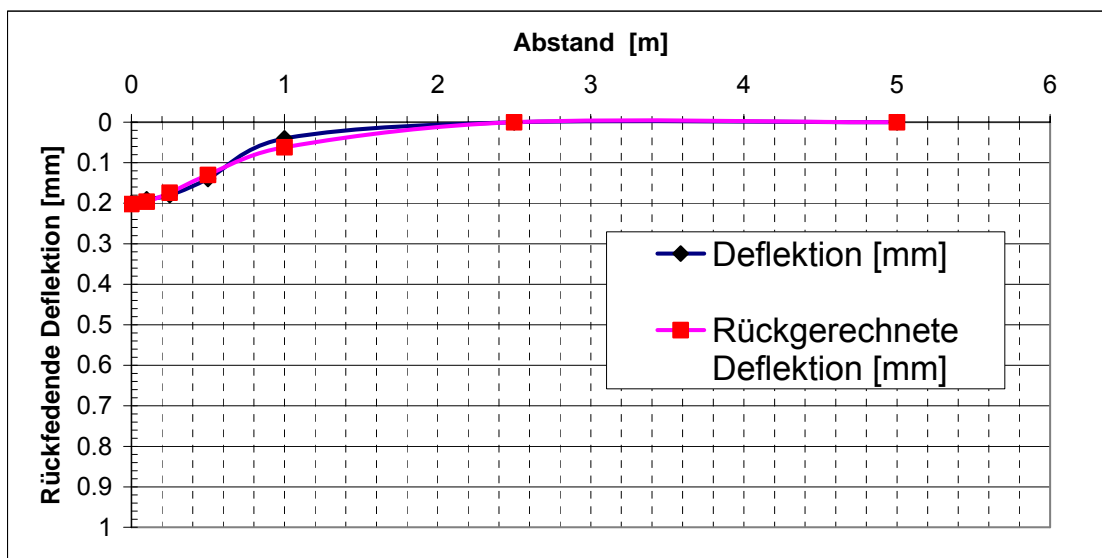


Benkelman-Versuch

Feld nr:	2
----------	---

Temperatur des Belages:	8.1	°C
Temperatur der Luft:	7.3	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Bedeckt, Trocken	
Datum	01.12.2003	
Runde	371451	

Abstand [m]	Deflektion [mm]	Rückgerechnete Deflektion [mm]	Material	E [Mpa]	v [-]
0	0.2	0.20	AB	10000	0.35
0.1	0.19	0.20	HMT	21999	0.35
0.25	0.18	0.17	KS	180	0.3
0.5	0.14	0.13	UG	79	0.3
1	0.04	0.06			
2.5	0	0.00			
5	0	0.00			

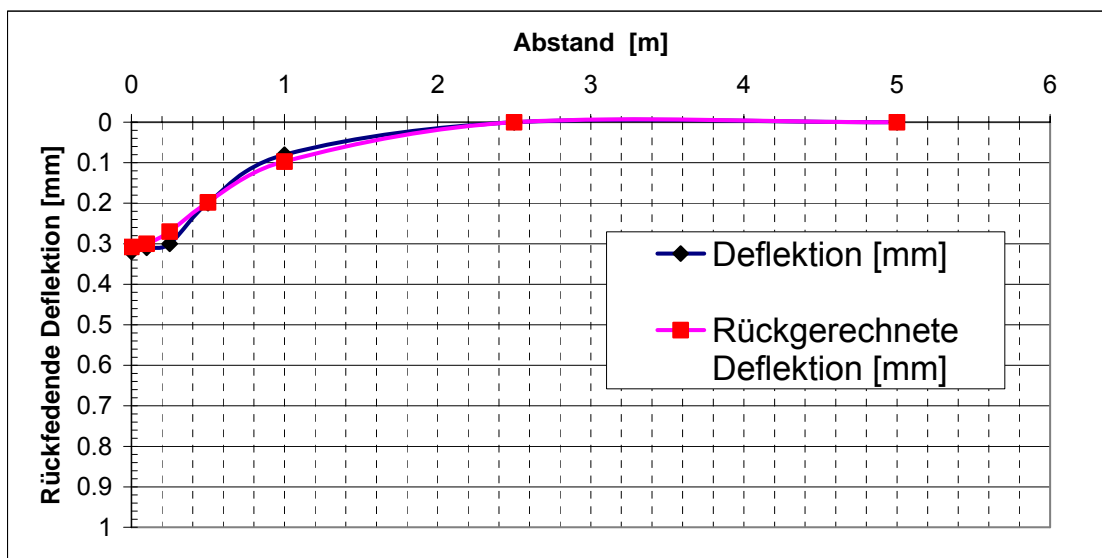


Benkelman-Versuch

Feld nr:	3
----------	---

Temperatur des Belages:	7.3	°C
Temperatur der Luft:	7.3	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Bedeckt, Trocken	
Datum	01.12.2003	
Runde	371451	

Abstand [m]	Deflektion [mm]	Rückgerechnete Deflektion [mm]	Material	E [Mpa]	v [-]
0	0.32	0.31	AB	10000	0.35
0.1	0.31	0.30	HMT	14058	0.35
0.25	0.3	0.27	KS	180	0.3
0.5	0.2	0.20	UG	79	0.3
1	0.08	0.10			
2.5	0	0.00			
5	0	0.00			

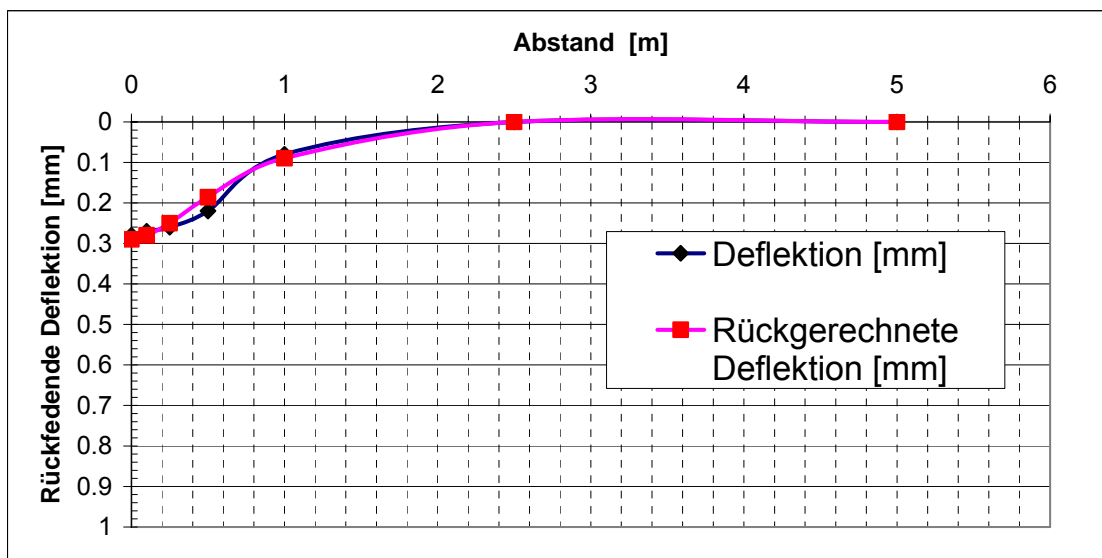


Benkelman-Versuch

Feld nr:	4
----------	---

Temperatur des Belages:	7.3	°C
Temperatur der Luft:	7.3	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	5	t
Pneudruck	10	bar
Wetter	Bedeckt, Trocken	
Datum	01.12.2003	
Runde	371451	

Abstand [m]	Deflektion [mm]	Rückgerechnete Deflektion [mm]	Material	E [Mpa]	v [-]
0	0.28	0.29	AB	10000	0.35
0.1	0.27	0.28	HMT	15249	0.35
0.25	0.26	0.25	KS	180	0.3
0.5	0.22	0.186	UG	50	0.3
1	0.08	0.09			
2.5	0	0			
5	0	0			

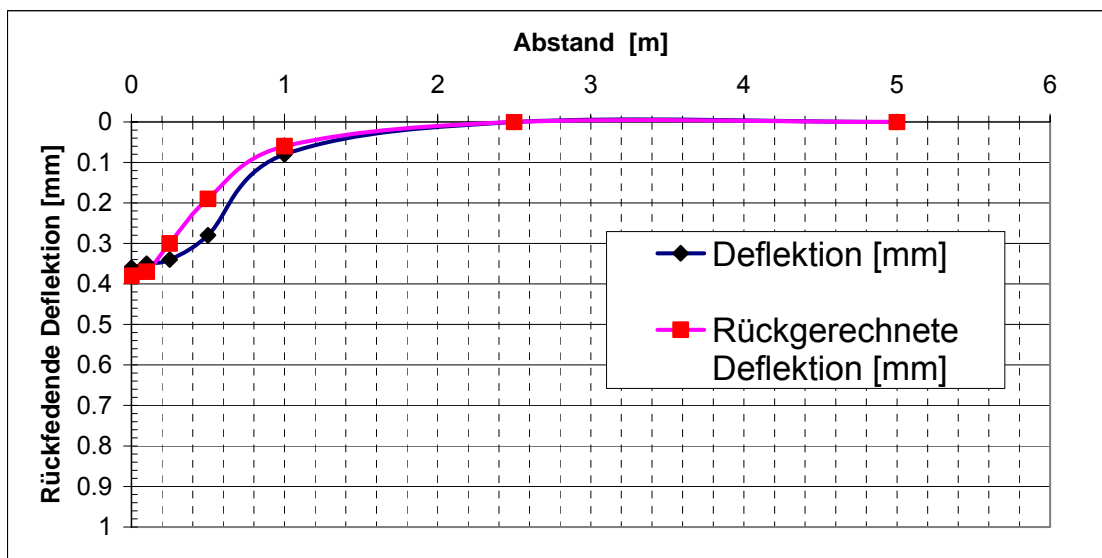


Benkelman-Versuch

Feld nr:	5
----------	---

Temperatur des Belages:	7.3	°C
Temperatur der Luft:	7.3	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Bedeckt, Trocken	
Datum	01.12.2003	
Runde	371451	

Abstand [m]	Deflektion [mm]	Rückgerechnete Deflektion [mm]	Material	E [Mpa]	v [-]
0	0.36	0.38	AB	10000	0.35
0.1	0.35	0.37	HMT	4698	0.35
0.25	0.34	0.3	KS	180	0.3
0.5	0.28	0.19	UG	50	0.3
1	0.08	0.06			
2.5	0	0			
5	0	0			



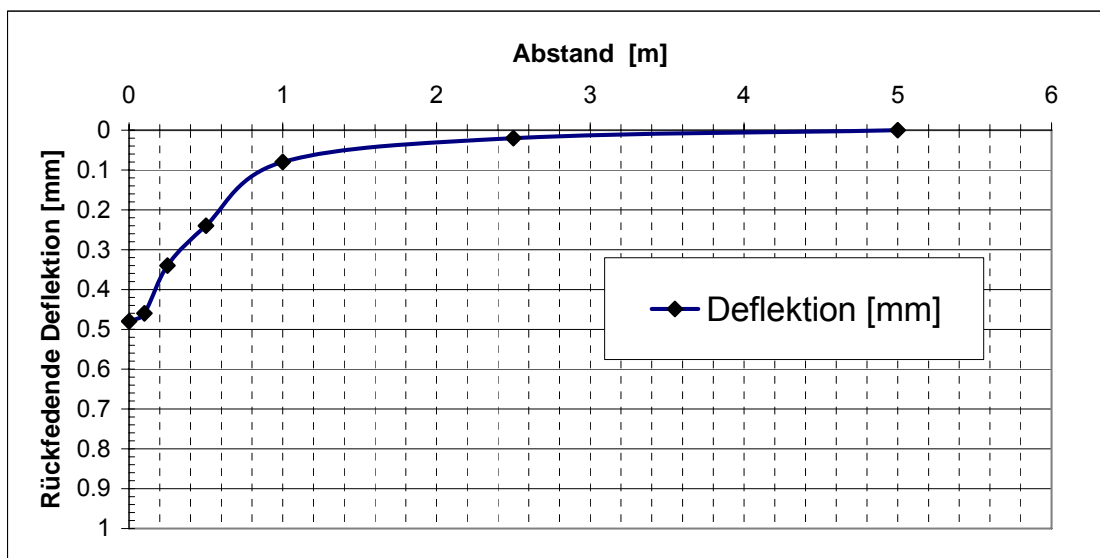
Benkelman-Versuch

Feld nr:

1

Temperatur des Belages:	14.4	°C
Temperatur der Luft:	11.3	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	sonnig	
Datum	21.04.2004	
Runde	551097	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.48
0.1	0.46
0.25	0.34
0.5	0.24
1	0.08
2.5	0.02
5	0



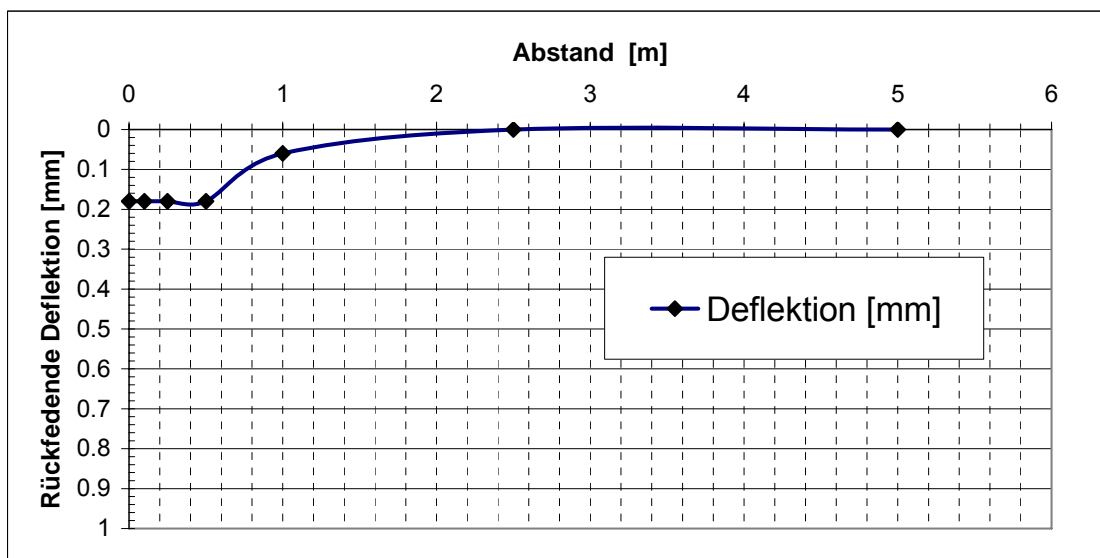
Benkelman-Versuch

Feld nr:

2

Temperatur des Belages:	19.1	°C
Temperatur der Luft:	12.6	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	sonnig	
Datum	21.04.2004	
Runde	551097	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.18
0.1	0.18
0.25	0.18
0.5	0.18
1	0.06
2.5	0
5	0



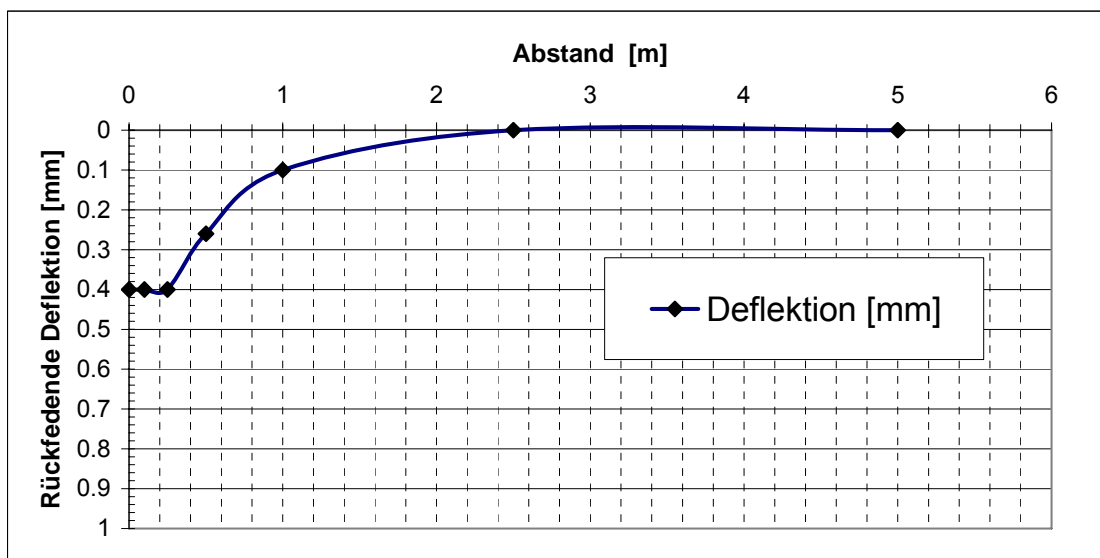
Benkelman-Versuch

Feld nr:

3

Temperatur des Belages:	21.3	°C
Temperatur der Luft:	13.6	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	sonnig	
Datum	21.04.2004	
Runde	551097	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.4
0.1	0.4
0.25	0.4
0.5	0.26
1	0.1
2.5	0
5	0



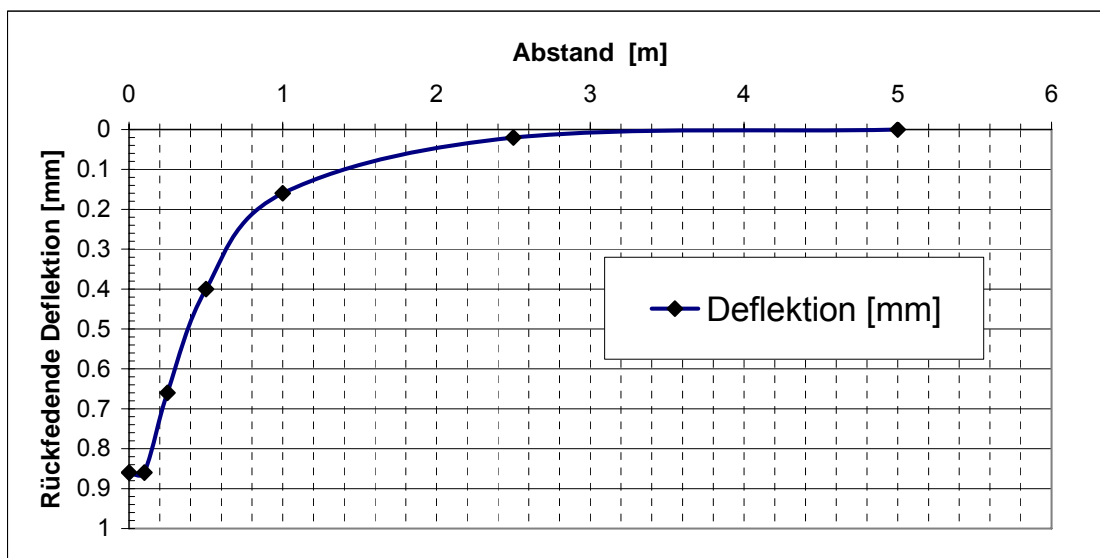
Benkelman-Versuch

Feld nr:

4

Temperatur des Belages:	21.6	°C
Temperatur der Luft:	14	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	sonnig	
Datum	21.04.2004	
Runde	551097	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.86
0.1	0.86
0.25	0.66
0.5	0.4
1	0.16
2.5	0.02
5	0



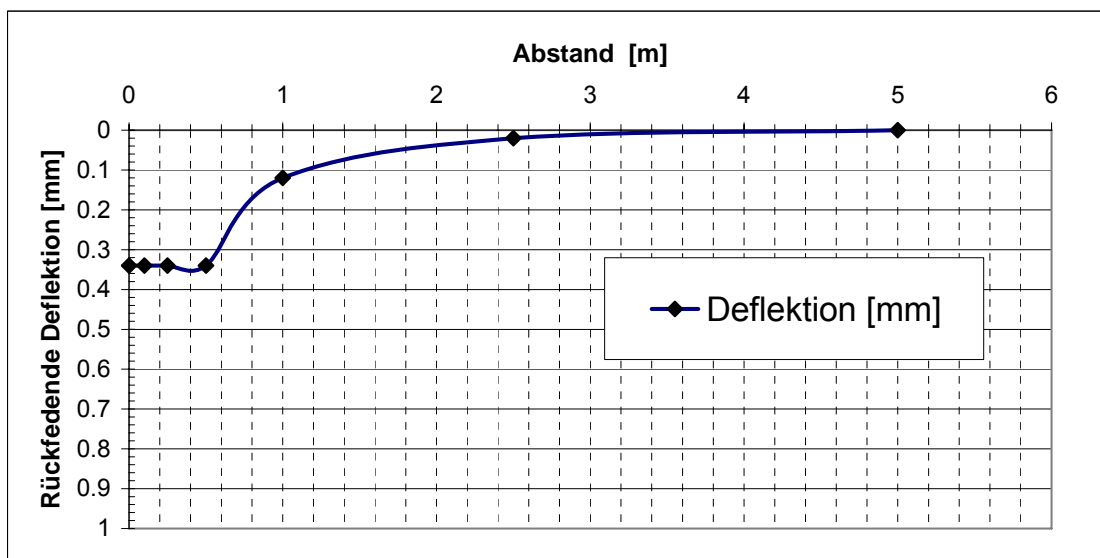
Benkelman-Versuch

Feld nr:

5

Temperatur des Belages:	18.3	°C
Temperatur der Luft:	14.7	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	sonnig	
Datum	21.04.2004	
Runde	551097	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.34
0.1	0.34
0.25	0.34
0.5	0.34
1	0.12
2.5	0.02
5	0



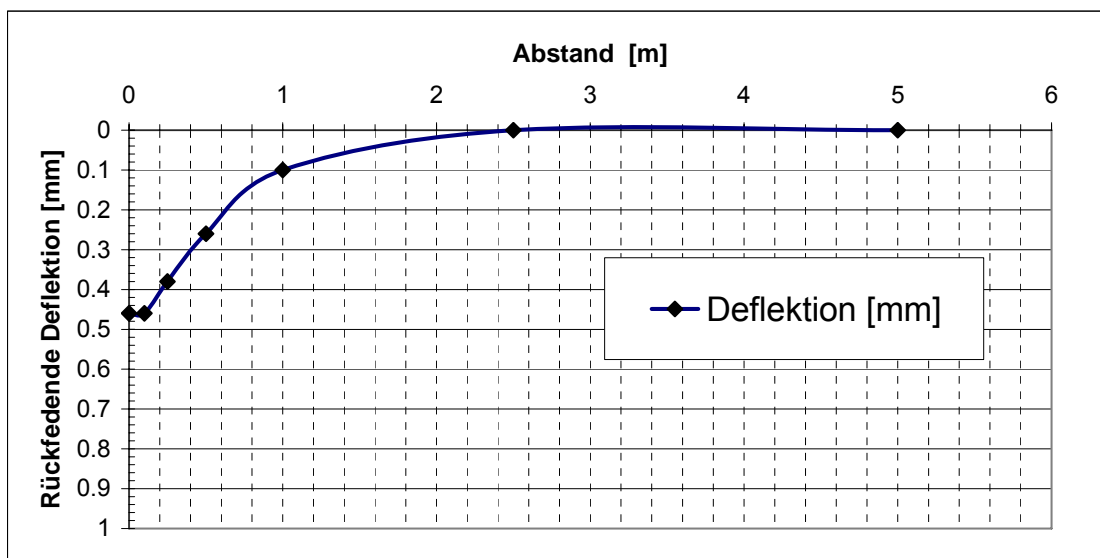
Benkelman-Versuch

Feld nr:

1

Temperatur des Belages:	28.7	°C
Temperatur der Luft:	20.4	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10.0	t
Pneudruck	7.0	bar
Wetter	sonnig	
Datum	22.06.2004	
Runde	724053	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.46
0.1	0.46
0.25	0.38
0.5	0.26
1	0.1
2.5	0
5	0



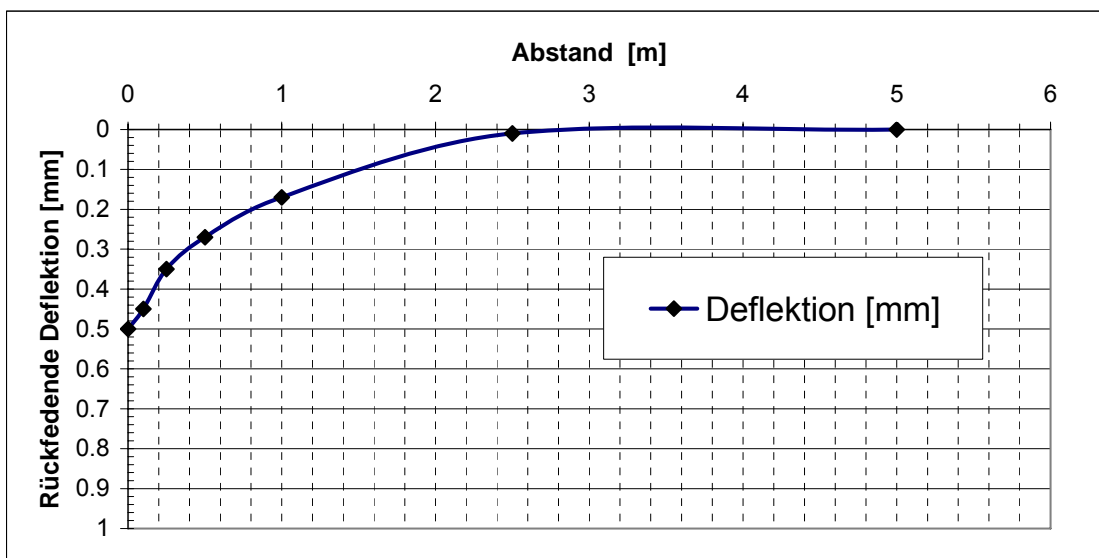
Benkelman-Versuch

Feld nr:

2

Temperatur des Belages:	26.1	°C
Temperatur der Luft:	21.7	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10.0	t
Pneudruck	7.0	bar
Wetter	sonnig	
Datum	22.06.2004	
Runde	724053	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.5
0.1	0.45
0.25	0.35
0.5	0.27
1	0.17
2.5	0.01
5	0



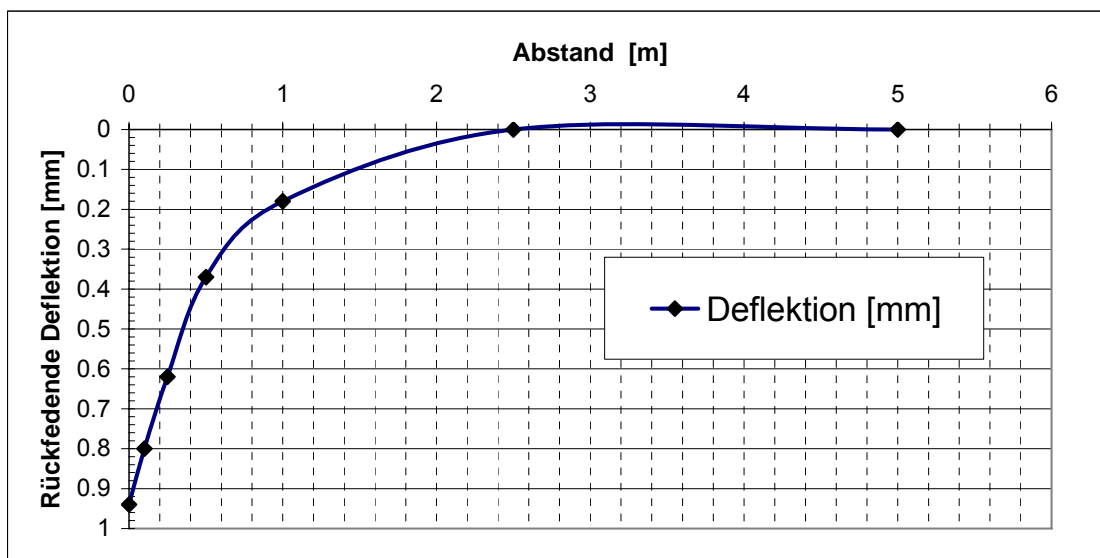
Benkelman-Versuch

Feld nr:

3

Temperatur des Belages:	27	°C
Temperatur der Luft:	22.19	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	sonnig	
Datum	22.06.2004	
Runde	724053	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.94
0.1	0.8
0.25	0.62
0.5	0.37
1	0.18
2.5	0
5	0



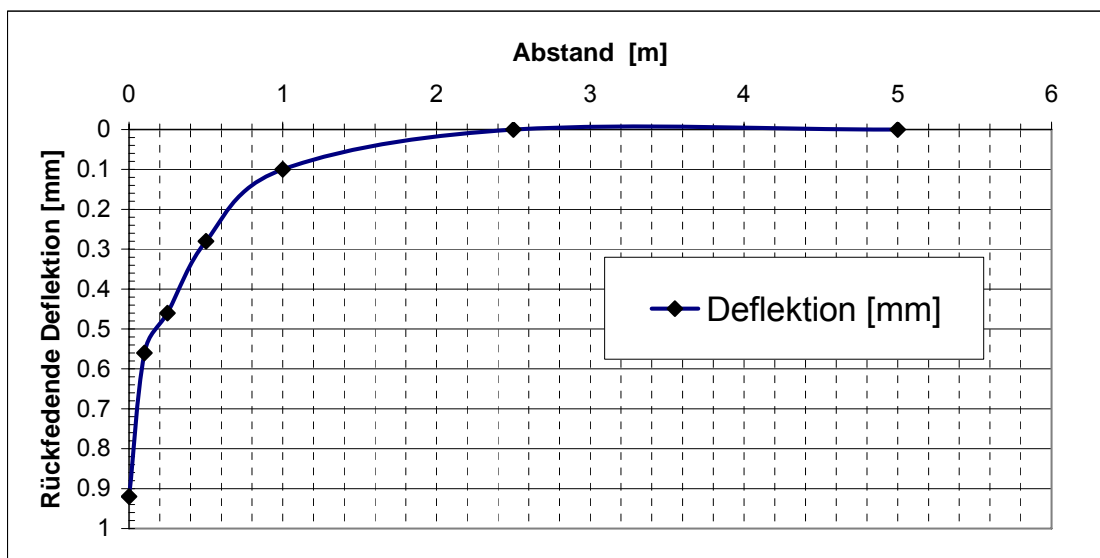
Benkelman-Versuch

Feld nr:

4

Temperatur des Belages:	26.2	°C
Temperatur der Luft:	21.6	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10.0	t
Pneudruck	7.0	bar
Wetter	sonnig	
Datum	22.06.2004	
Runde	724053	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.92
0.1	0.56
0.25	0.46
0.5	0.28
1	0.1
2.5	0
5	0



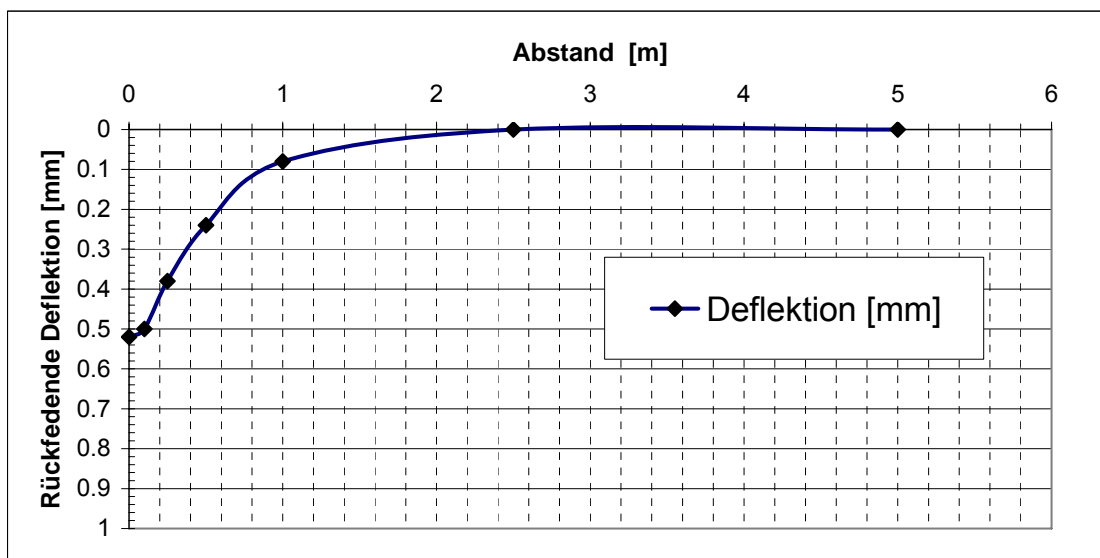
Benkelman-Versuch

Feld nr:

5

Temperatur des Belages:	29.3	°C
Temperatur der Luft:	22.2	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10.0	t
Pneudruck	7.0	bar
Wetter	sonnig	
Datum	22.06.2004	
Runde	724053	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.52
0.1	0.5
0.25	0.38
0.5	0.24
1	0.08
2.5	0
5	0



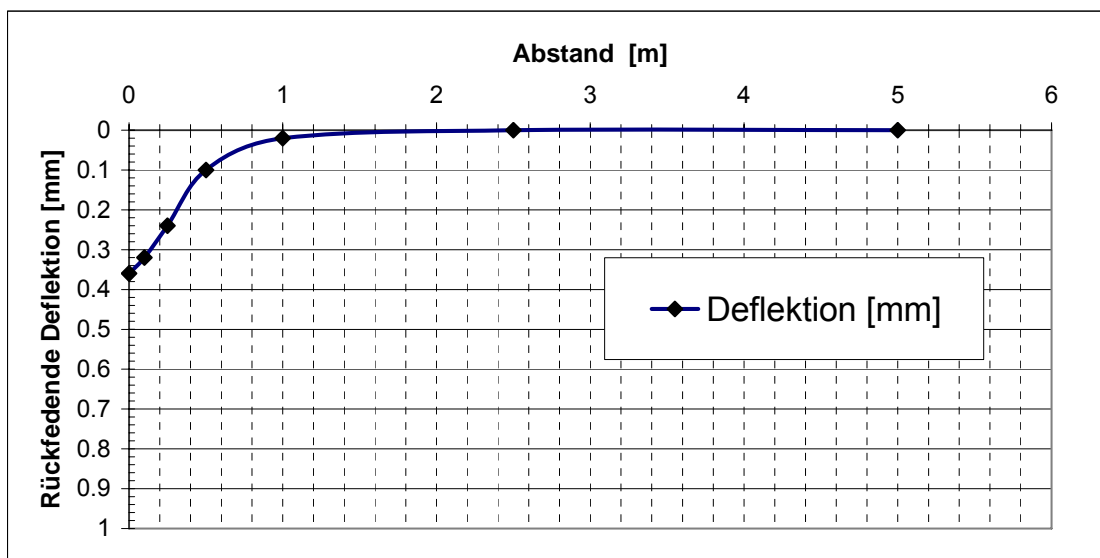
Benkelman-Versuch

Feld nr:

1

Temperatur des Belages:	27	°C
Temperatur der Luft:	16	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	sonnig	
Datum	16.09.2004	
Runde	876348	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.36
0.1	0.32
0.25	0.24
0.5	0.1
1	0.02
2.5	0
5	0



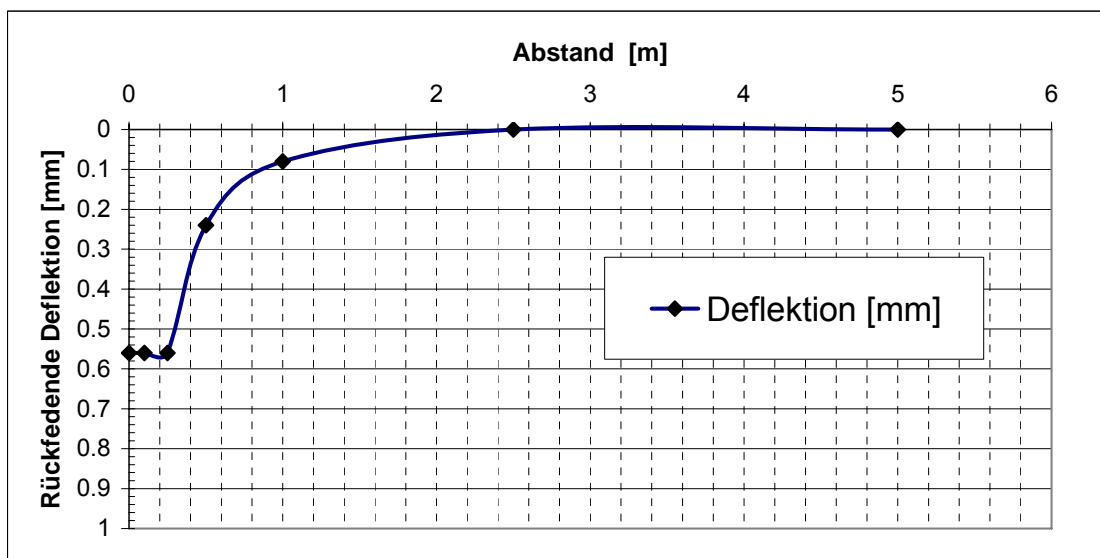
Benkelman-Versuch

Feld nr:

2

Temperatur des Belages:	28.18	°C
Temperatur der Luft:	16.16	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	sonnig	
Datum	16.09.2004	
Runde	876348	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.56
0.1	0.56
0.25	0.56
0.5	0.24
1	0.08
2.5	0
5	0



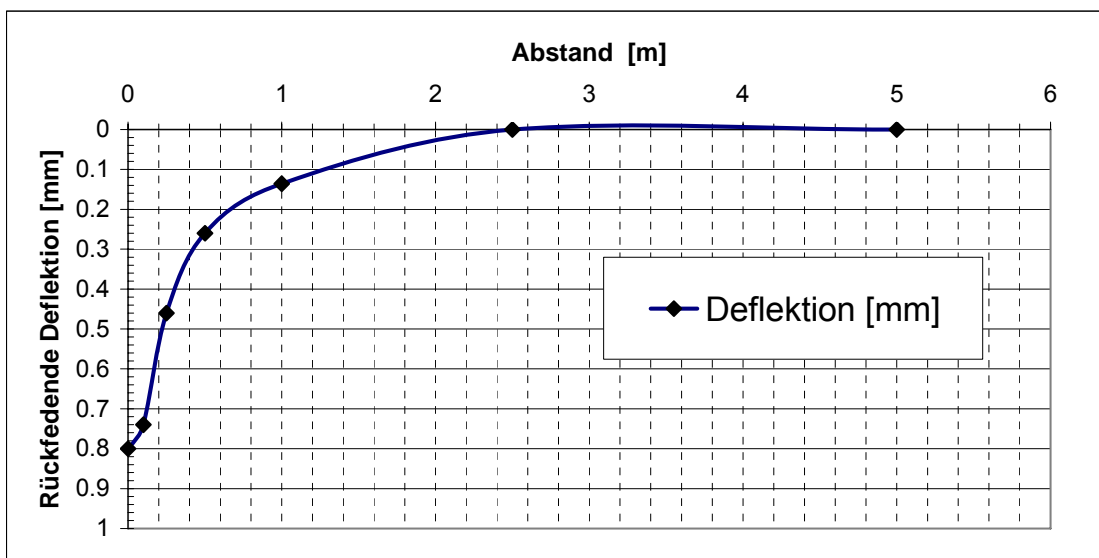
Benkelman-Versuch

Feld nr:

3

Temperatur des Belages:	28.7	°C
Temperatur der Luft:	17	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	sonnig	
Datum	16.09.2004	
Runde	876348	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.8
0.1	0.74
0.25	0.46
0.5	0.26
1	0.136
2.5	0
5	0



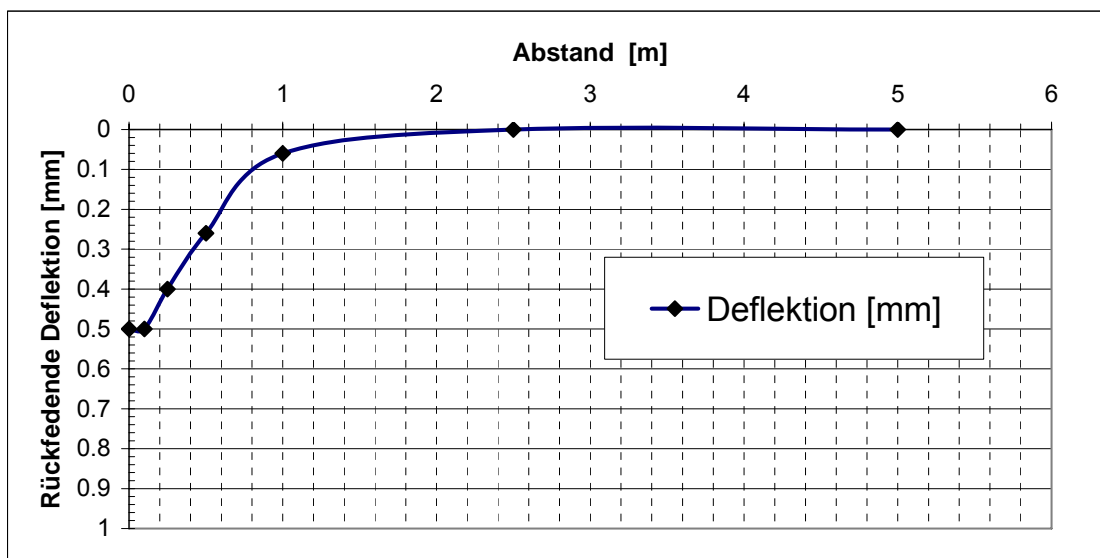
Benkelman-Versuch

Feld nr:

4

Temperatur des Belages:	20.9	°C
Temperatur der Luft:	16.6	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	sonnig	
Datum	16.09.2004	
Runde	876348	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.5
0.1	0.5
0.25	0.4
0.5	0.26
1	0.06
2.5	0
5	0



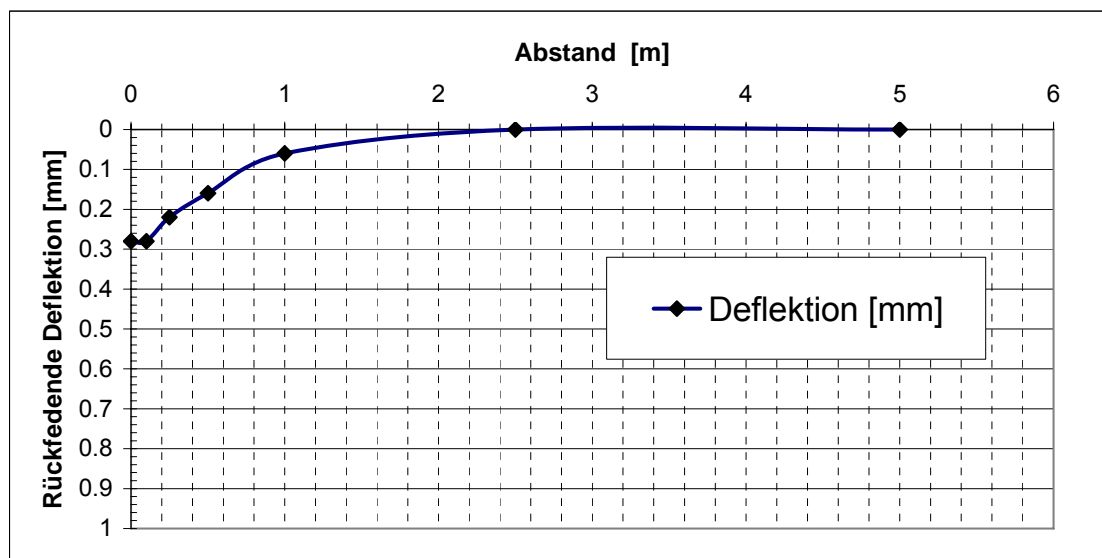
Benkelman-Versuch

Feld nr:

5

Temperatur des Belages:	27	°C
Temperatur der Luft:	17.3	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	sonnig	
Datum	16.09.2004	
Runde	876348	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.28
0.1	0.28
0.25	0.22
0.5	0.16
1	0.06
2.5	0
5	0



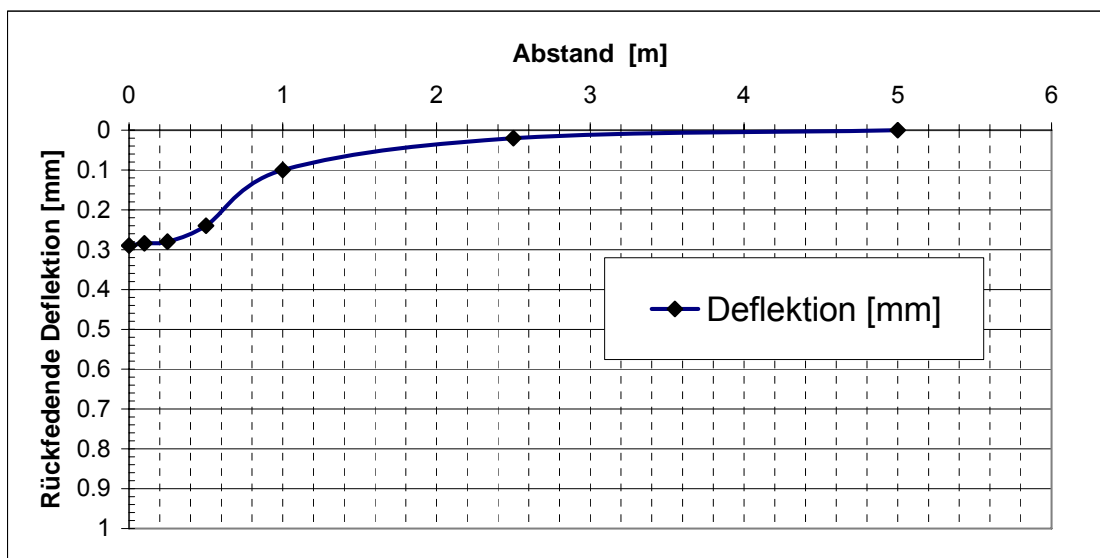
Benkelman-Versuch

Feld nr:

1

Temperatur des Belages:	5	°C
Temperatur der Luft:	3.2	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	sonnig	
Datum	11.11.2004	
Runde	1051503	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.29
0.1	0.284
0.25	0.28
0.5	0.24
1	0.1
2.5	0.02
5	0



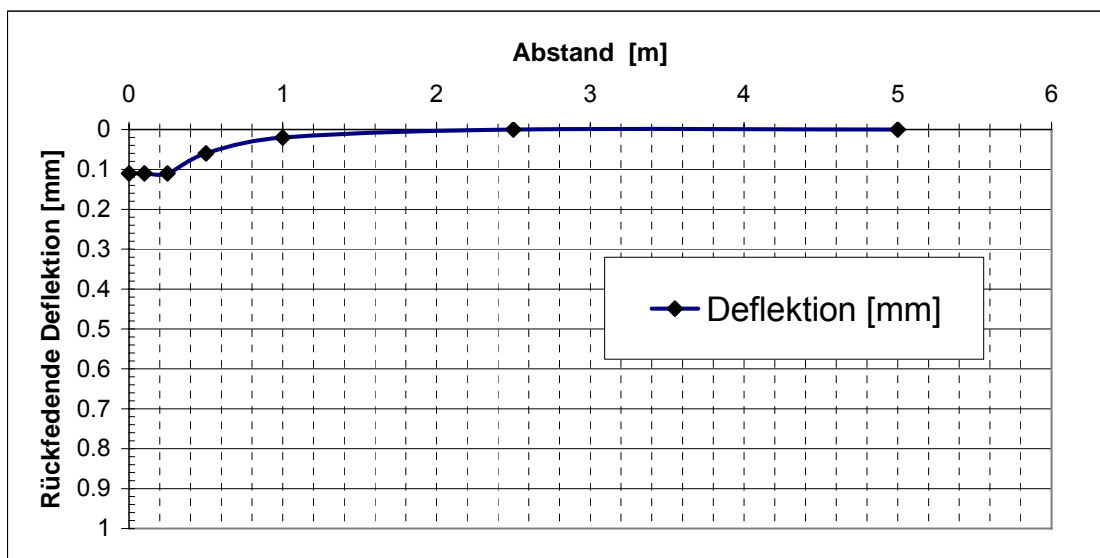
Benkelman-Versuch

Feld nr:

2

Temperatur des Belages:	5.3	°C
Temperatur der Luft:	3.2	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	sonnig	
Datum	11.11.2004	
Runde	1051503	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.11
0.1	0.11
0.25	0.11
0.5	0.06
1	0.02
2.5	0
5	0



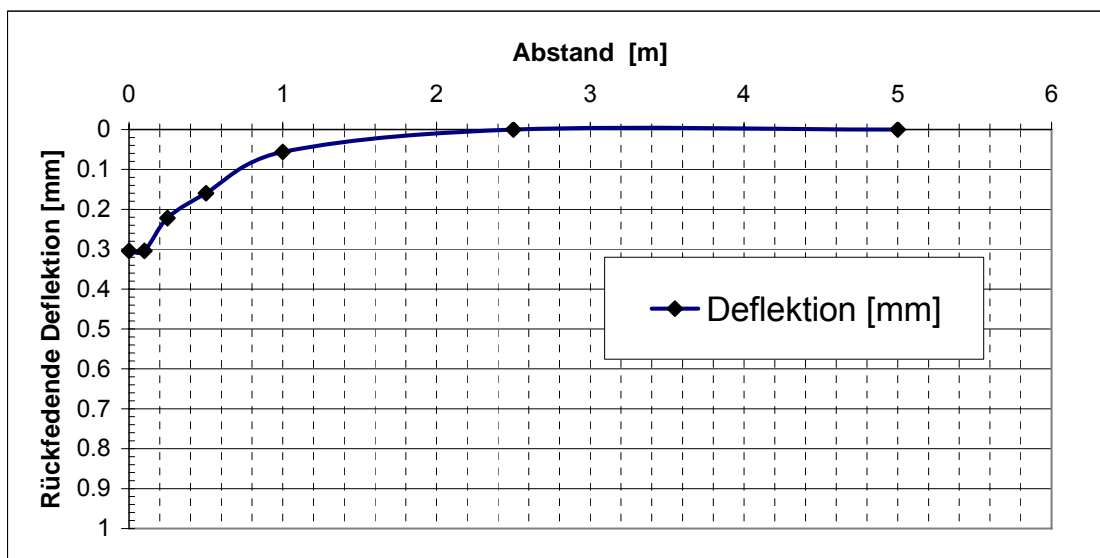
Benkelman-Versuch

Feld nr:

3

Temperatur des Belages:	7	°C
Temperatur der Luft:	4	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	sonnig	
Datum	11.11.2004	
Runde	1051503	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.304
0.1	0.304
0.25	0.222
0.5	0.16
1	0.056
2.5	0
5	0



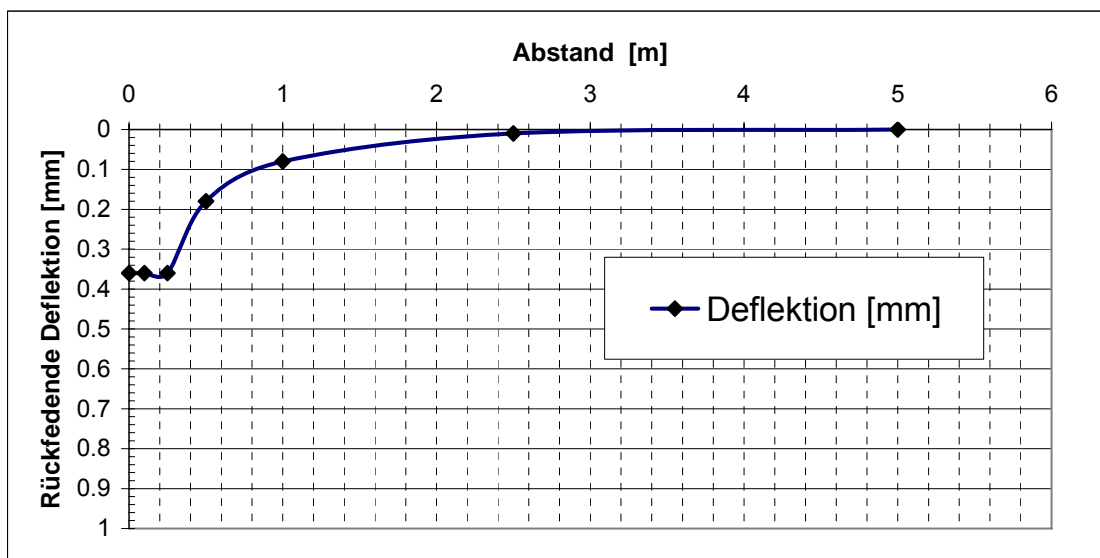
Benkelman-Versuch

Feld nr:

4

Temperatur des Belages:	8.1	°C
Temperatur der Luft:	4	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	sonnig	
Datum	11.11.2004	
Runde	1051503	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.36
0.1	0.36
0.25	0.36
0.5	0.18
1	0.08
2.5	0.01
5	0



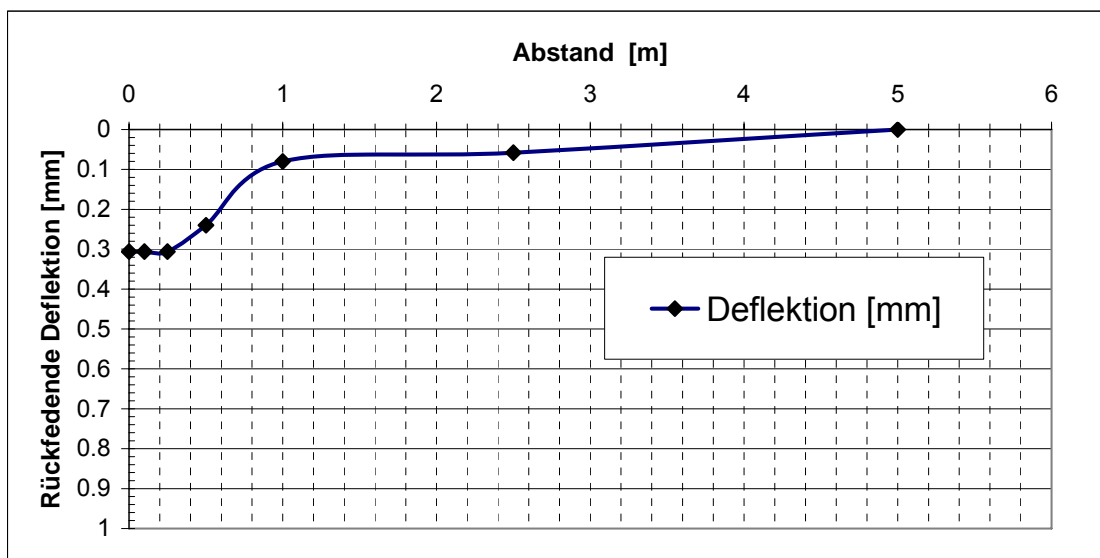
Benkelman-Versuch

Feld nr:

5

Temperatur des Belages:	8.5	°C
Temperatur der Luft:	4.3	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	sonnig	
Datum	11.11.2004	
Runde	1051503	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.306
0.1	0.306
0.25	0.306
0.5	0.24
1	0.08
2.5	0.058
5	0

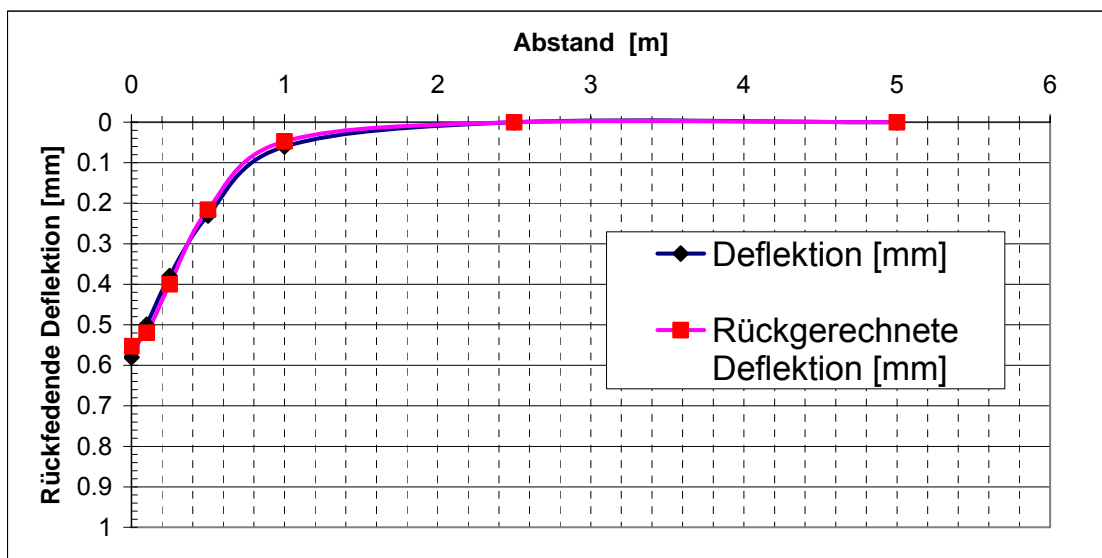


Benkelman-Versuch

Feld nr:	1
----------	---

Temperatur des Belages:	28.5	°C
Temperatur der Luft:	16.8	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Bedeckt	
Datum	05.04.2005	
Runde	1226103	

Abstand [m]	Deflektion [mm]	Rückgerechnete Deflektion [mm]	Material	E [Mpa]	v [-]
0	0.58	0.55	AB	1000	0.35
0.1	0.5	0.52	HMT	1547	0.35
0.25	0.38	0.40	KS	180	0.3
0.5	0.23	0.22	UG	79	0.3
1	0.06	0.05			
2.5	0	0.00			
5	0	0.00			

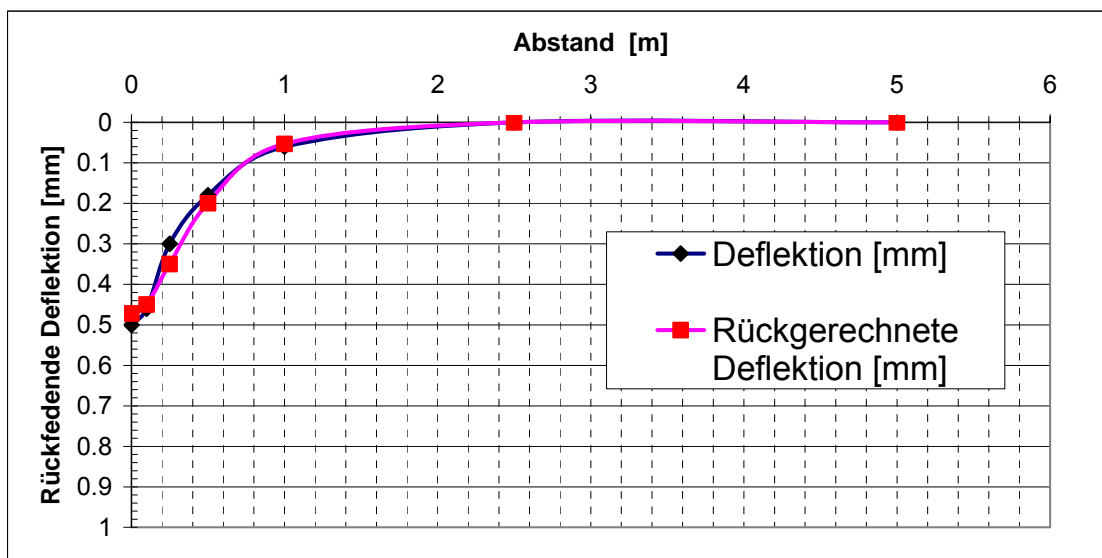


Benkelman-Versuch

Feld nr:	2
----------	---

Temperatur des Belages:	29.1	°C
Temperatur der Luft:	15.9	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Bedeckt	
Datum	05.04.2005	
Runde	1226103	

Abstand [m]	Deflektion [mm]	Rückgerechnete Deflektion [mm]	Material	E [Mpa]	v [-]
0	0.5	0.47	AB	1000	0.35
0.1	0.46	0.45	HMT	2839	0.35
0.25	0.3	0.35	KS	180	0.3
0.5	0.18	0.20	UG	79	0.3
1	0.06	0.05			
2.5	0	0.00			
5	0	0.00			

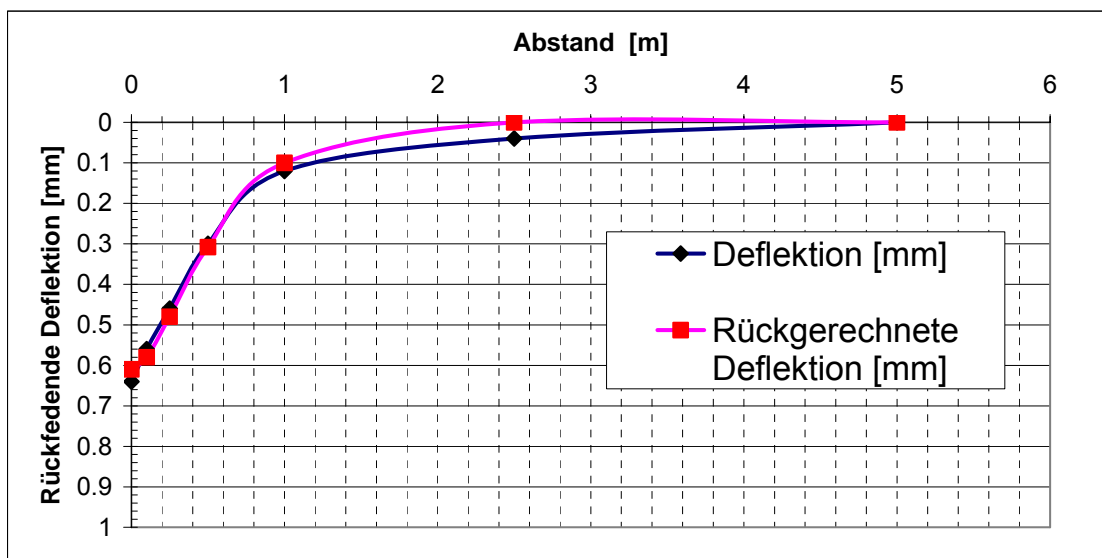


Benkelman-Versuch

Feld nr: 3

Temperatur des Belages:	23.4	°C
Temperatur der Luft:	16.2	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Bedeckt	
Datum	05.04.2005	
Runde	1226103	

Abstand [m]	Deflektion [mm]	Rückgerechnete Deflektion [mm]	Material	E [Mpa]	ν [-]
0	0.64	0.61	AB	1000	0.35
0.1	0.56	0.58	HMT	2718	0.35
0.25	0.46	0.48	KS	180	0.3
0.5	0.3	0.31	UG	47	0.3
1	0.12	0.10			
2.5	0.04	0.00			
5	0	0.00			

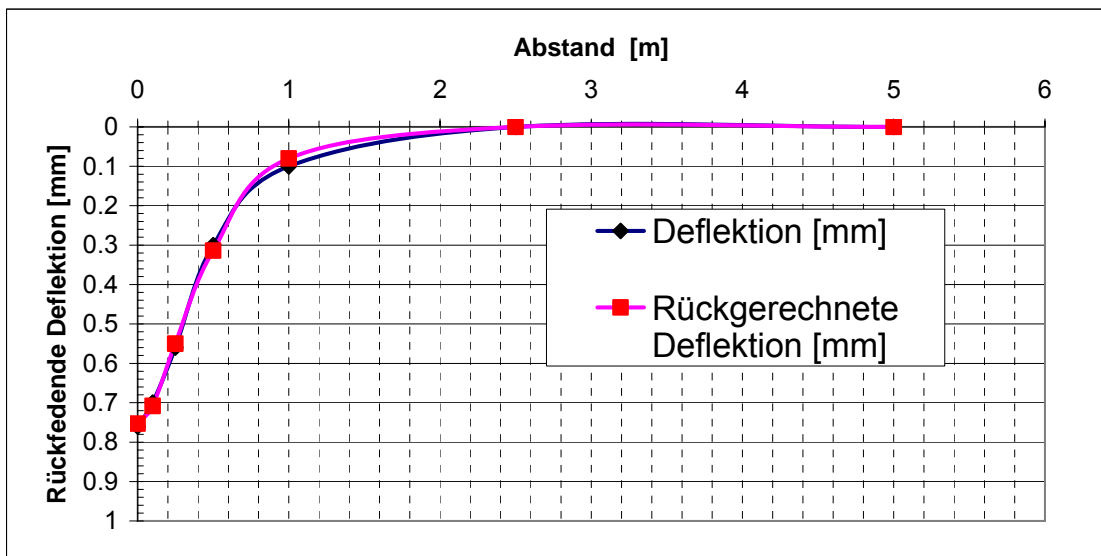


Benkelman-Versuch

Feld nr: 4

Temperatur des Belages:	27.1	°C
Temperatur der Luft:	15.5	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Bedeckt	
Datum	05.04.2005	
Runde	1226103	

Abstand [m]	Deflektion [mm]	Rückgerechnete Deflektion [mm]	Material	E [Mpa]	ν [-]
0	0.76	0.75	AB	1000	0.35
0.1	0.7	0.71	HMT	990	0.35
0.25	0.56	0.55	KS	180	0.3
0.5	0.3	0.31	UG	50	0.3
1	0.1	0.08			
2.5	0	0.00			
5	0	0.00			

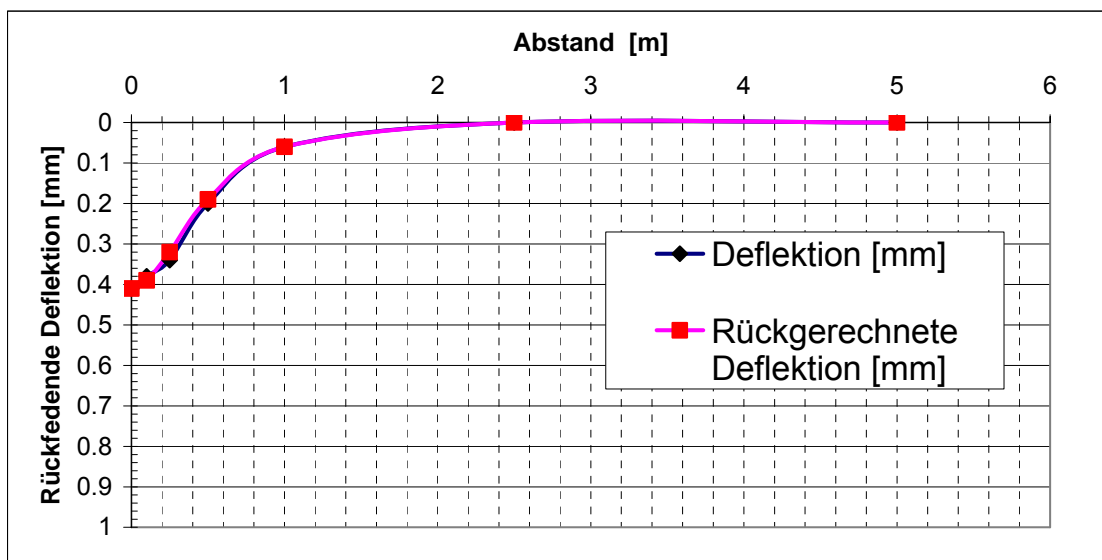


Benkelman-Versuch

Feld nr: 5

Temperatur des Belages:	28	°C
Temperatur der Luft:	15.5	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Bedeckt	
Datum	05.04.2005	
Runde	1226103	

Abstand [m]	Deflektion [mm]	Rückgerechnete Deflektion [mm]	Material	E [Mpa]	ν [-]
0	0.41	0.41	AB	1000	0.35
0.1	0.38	0.39	HMT	4380	0.35
0.25	0.34	0.32	KS	180	0.3
0.5	0.2	0.19	UG	79	0.3
1	0.06	0.06			
2.5	0	0.00			
5	0	0.00			



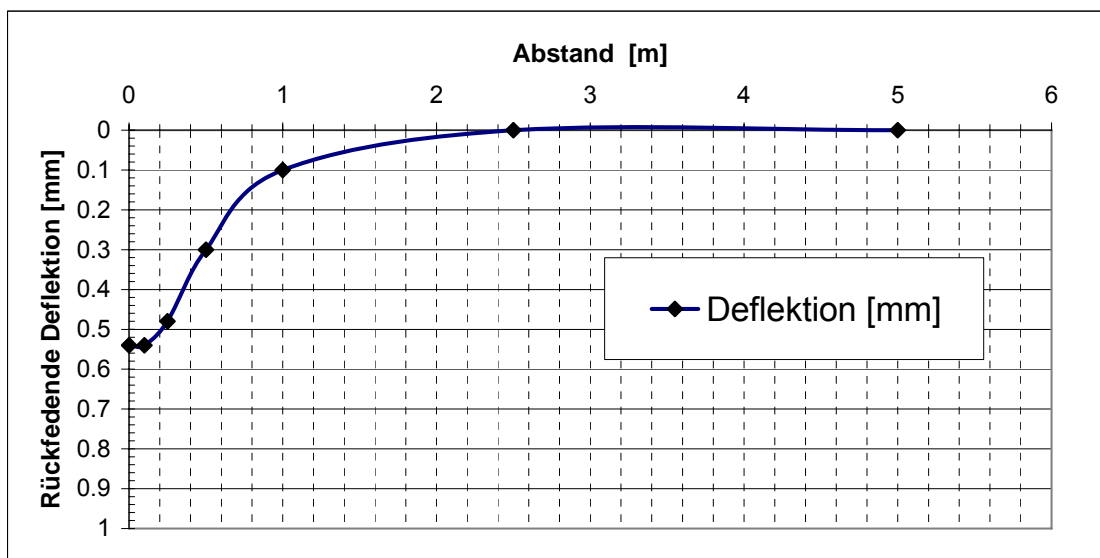
Benkelman-Versuch

Feld nr:

1

Temperatur des Belages:	21.9	°C
Temperatur der Luft:	13.6	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Bedeckt	
Datum	07.06.2005	
Runde	1389507	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.54
0.1	0.54
0.25	0.48
0.5	0.3
1	0.1
2.5	0
5	0



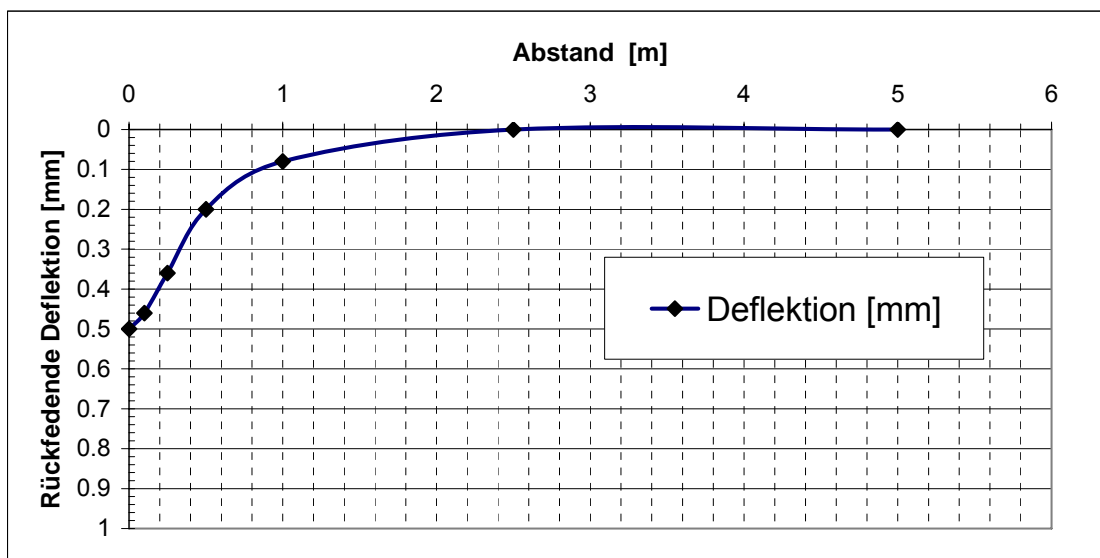
Benkelman-Versuch

Feld nr:

2

Temperatur des Belages:	23.38	°C
Temperatur der Luft:	14.16	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Bedeckt	
Datum	07.06.2005	
Runde	1389507	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.5
0.1	0.46
0.25	0.36
0.5	0.2
1	0.08
2.5	0
5	0



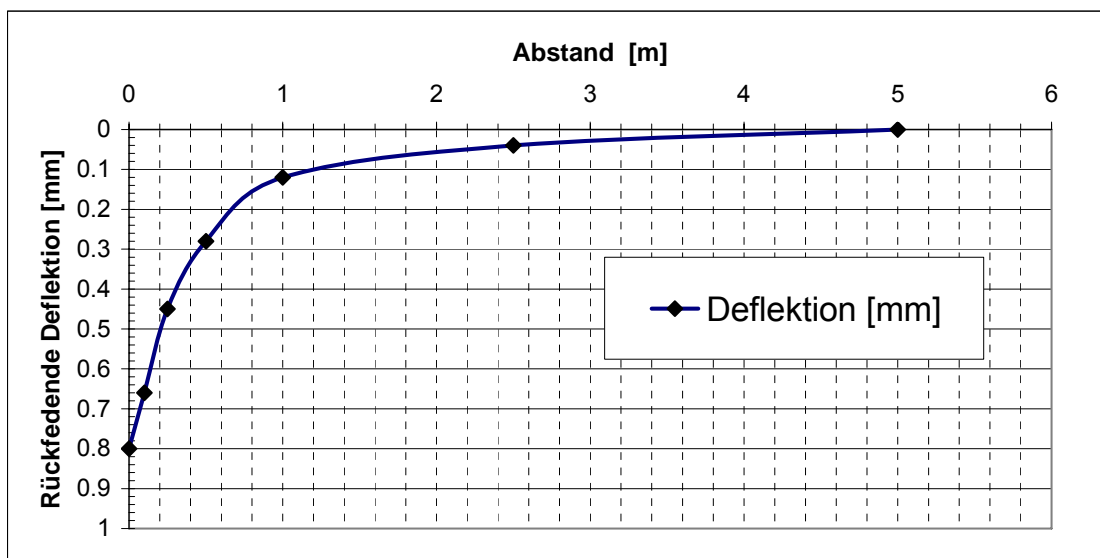
Benkelman-Versuch

Feld nr:

3

Temperatur des Belages:	21.63	°C
Temperatur der Luft:	15.66	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Bedeckt	
Datum	07.06.2005	
Runde	1389507	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.8
0.1	0.66
0.25	0.45
0.5	0.28
1	0.12
2.5	0.04
5	0



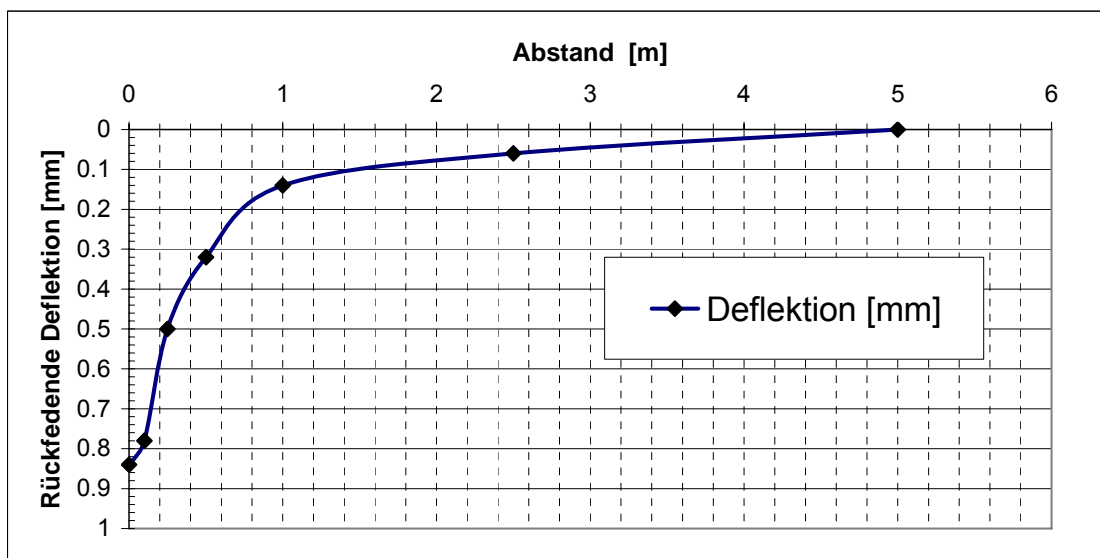
Benkelman-Versuch

Feld nr:

4

Temperatur des Belages:	31.21	°C
Temperatur der Luft:	17	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Bedeckt	
Datum	07.06.2005	
Runde	1389507	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.84
0.1	0.78
0.25	0.5
0.5	0.32
1	0.14
2.5	0.06
5	0



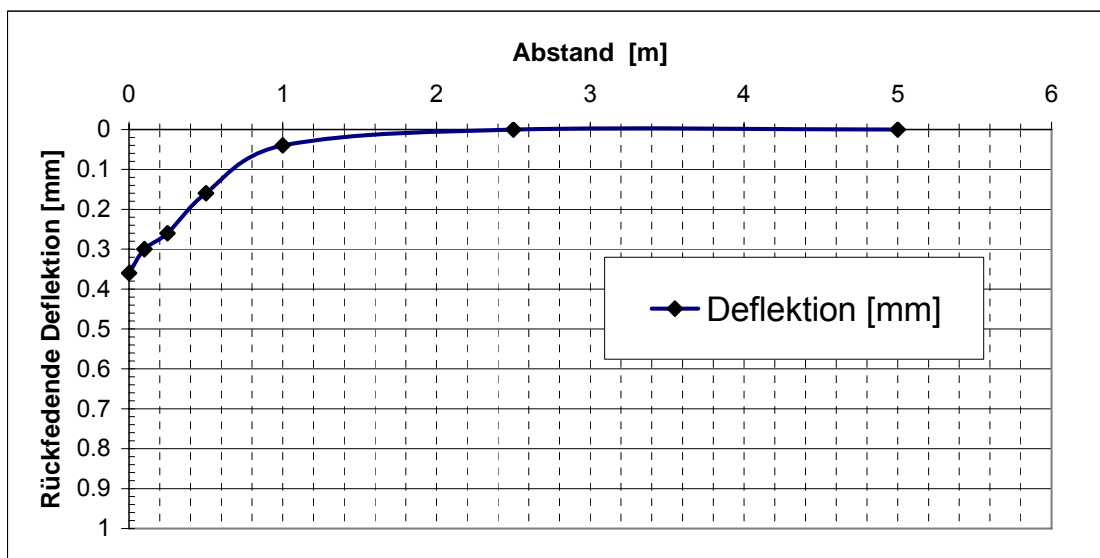
Benkelman-Versuch

Feld nr:

5

Temperatur des Belages:	29.6	°C
Temperatur der Luft:	17	°C
Last der Hinterachse des Lastwagens	10	t
Pneudruck	7	bar
Wetter	Bedeckt	
Datum	07.06.2005	
Runde	1389507	

Abstand [m]	Deflektion [mm]
0	0.36
0.1	0.3
0.25	0.26
0.5	0.16
1	0.04
2.5	0
5	0



10.5 Längsebenheitsmessungen

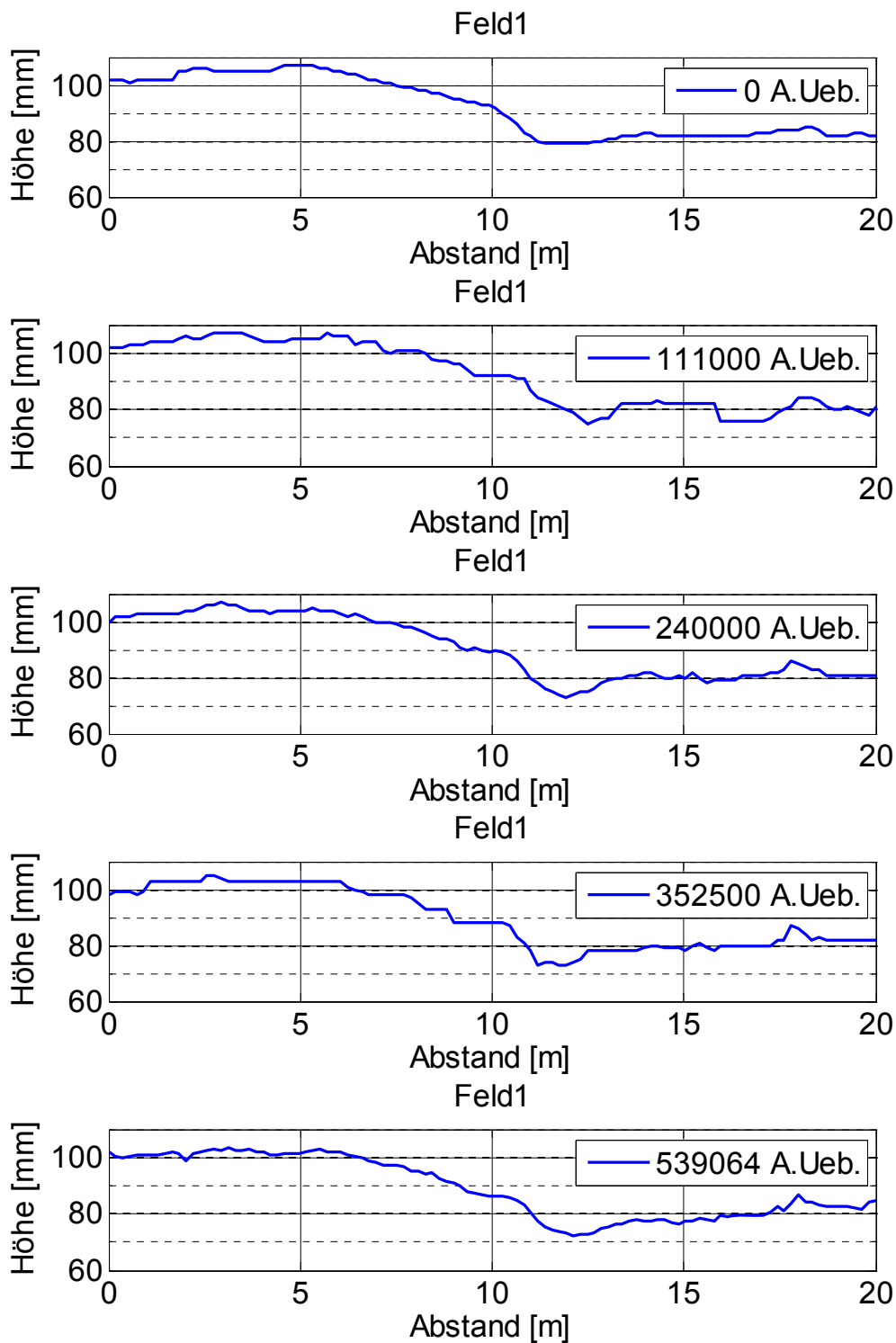


Bild 96 Längsprofilmessungen Feld1

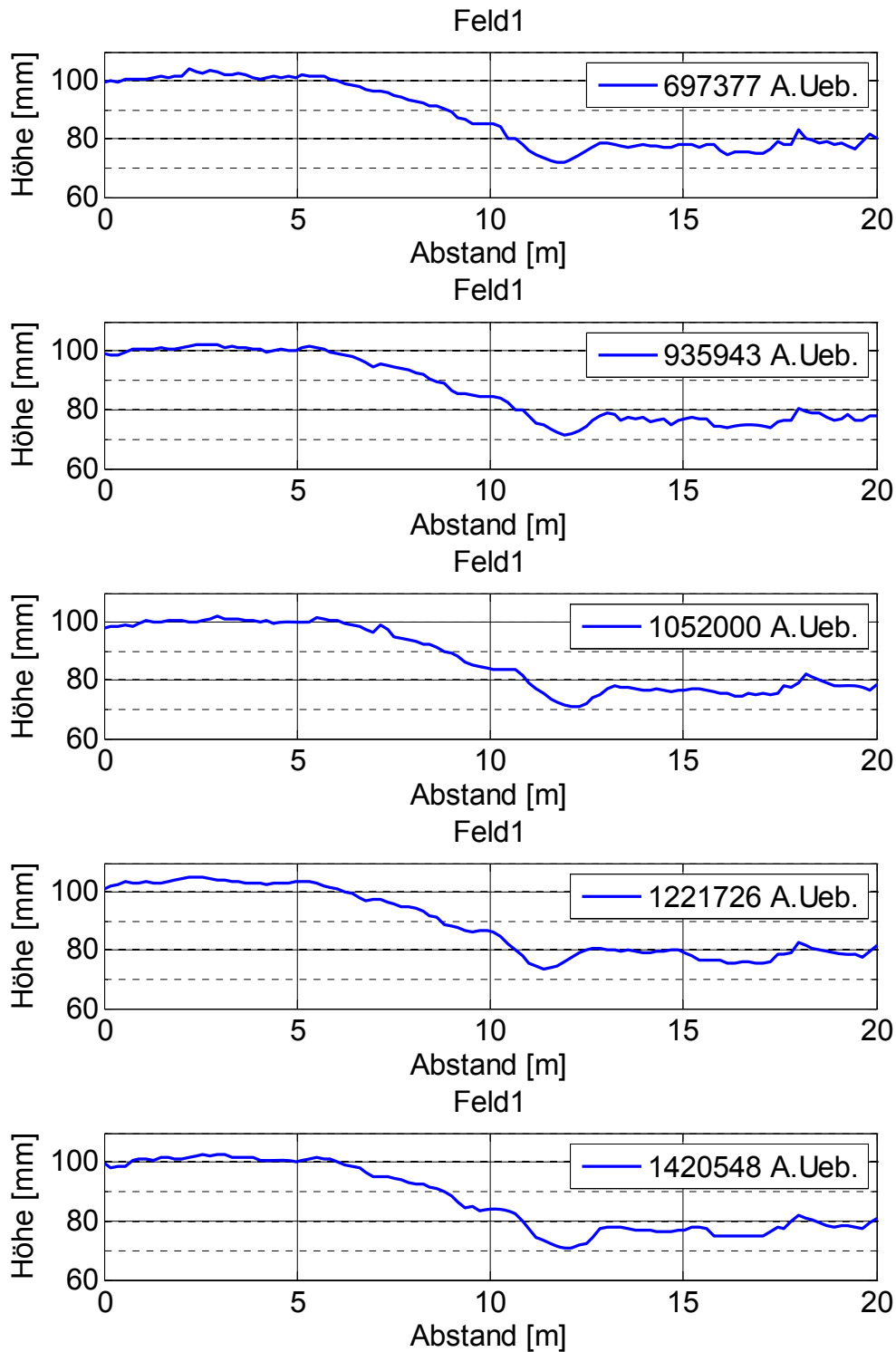


Bild 97 Längsprofilmessungen Feld1

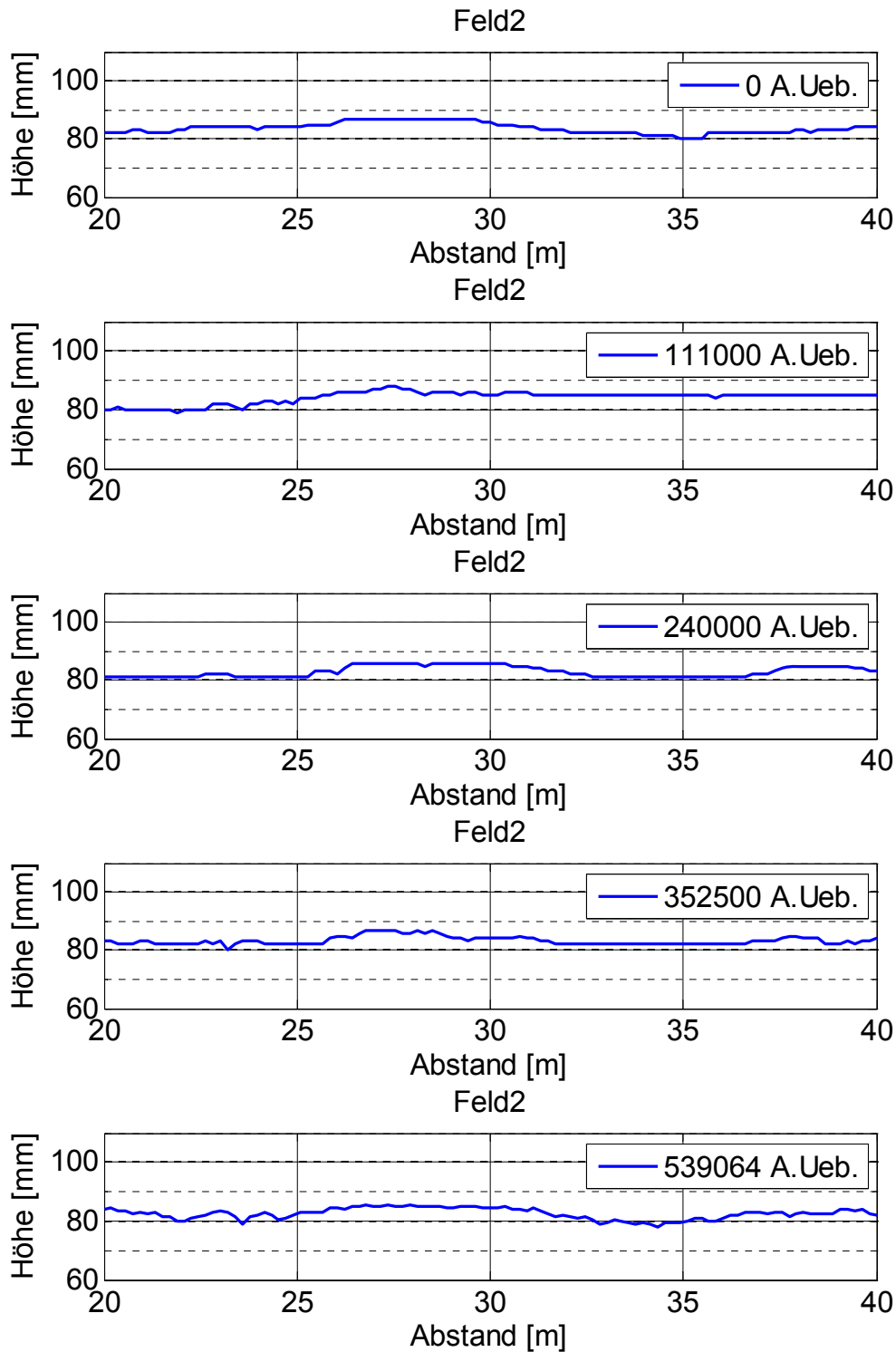


Bild 98 Längsprofilmessungen Feld2

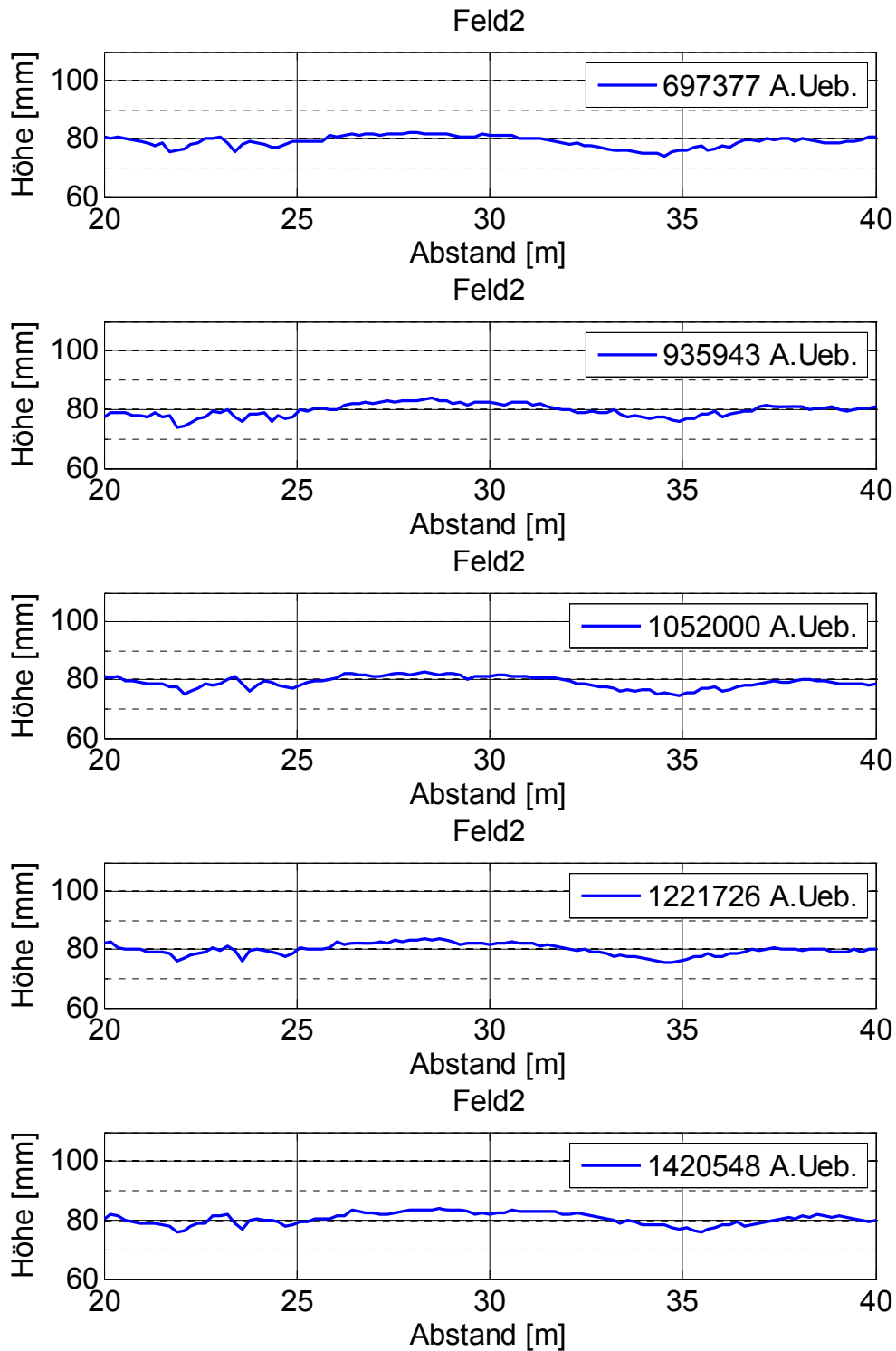


Bild 99 Längsprofilmessungen Feld2

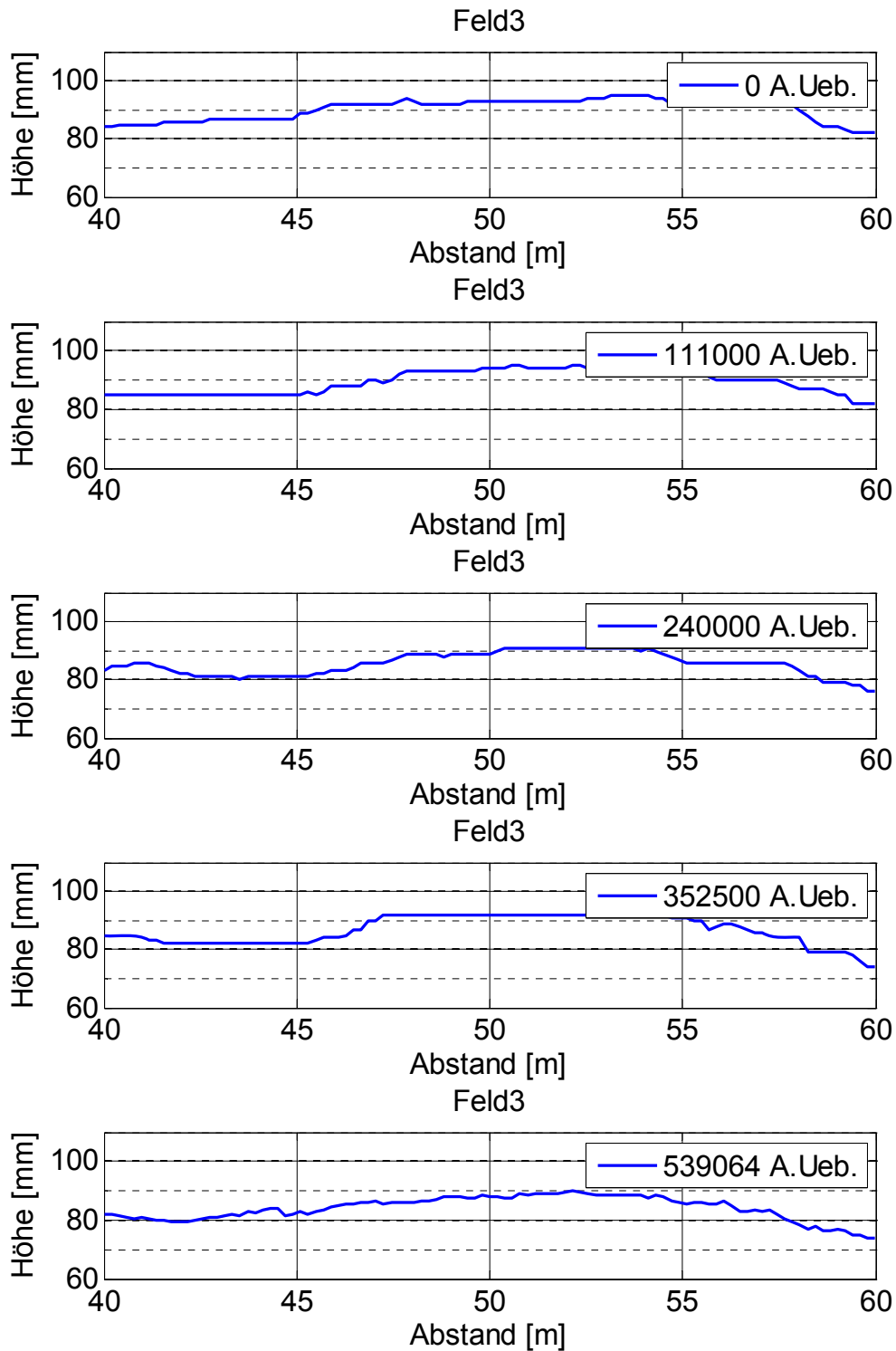


Bild 100 Längsprofilmessungen Feld3

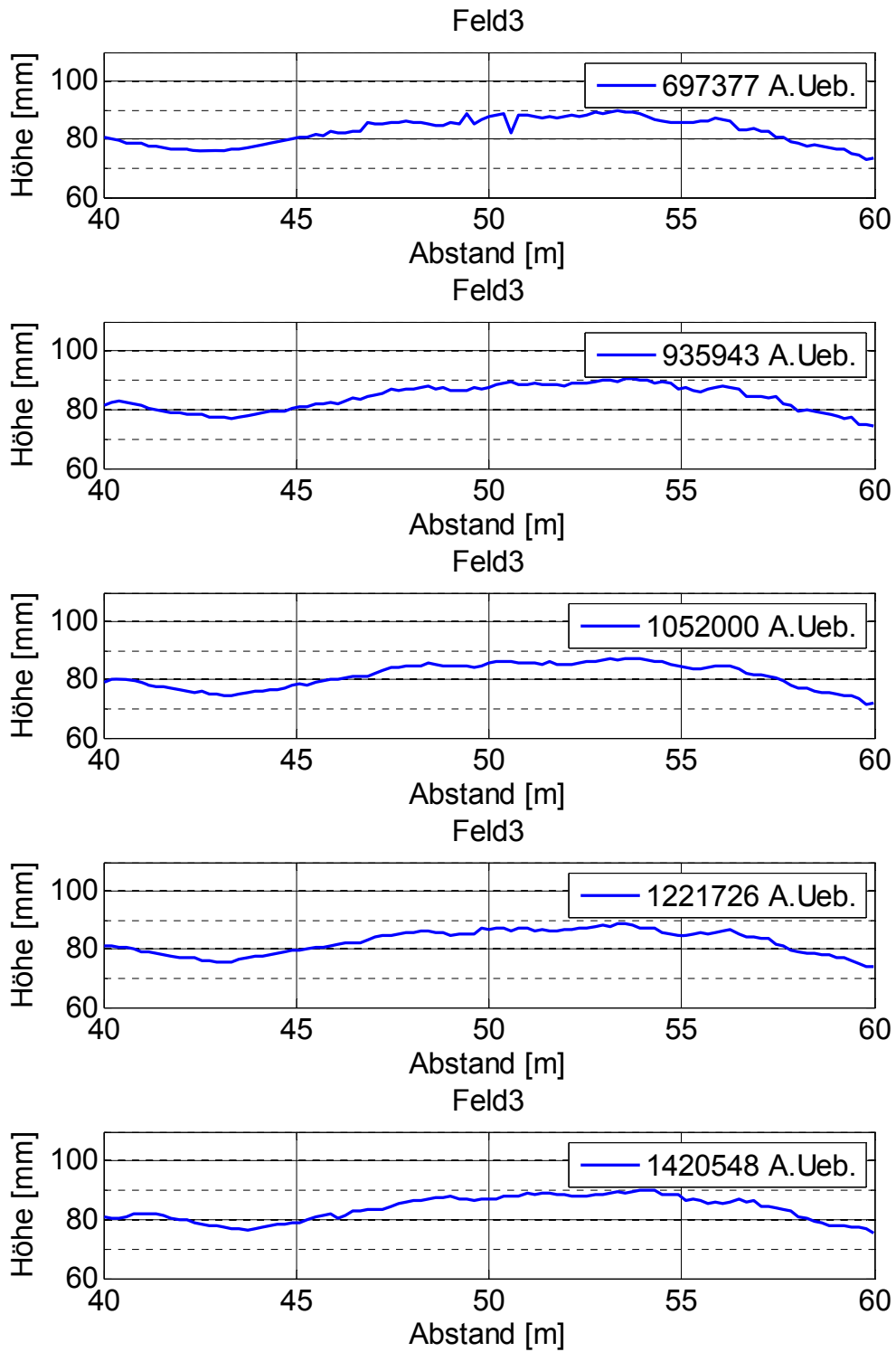


Bild 101 Längsprofilmessungen Feld 3

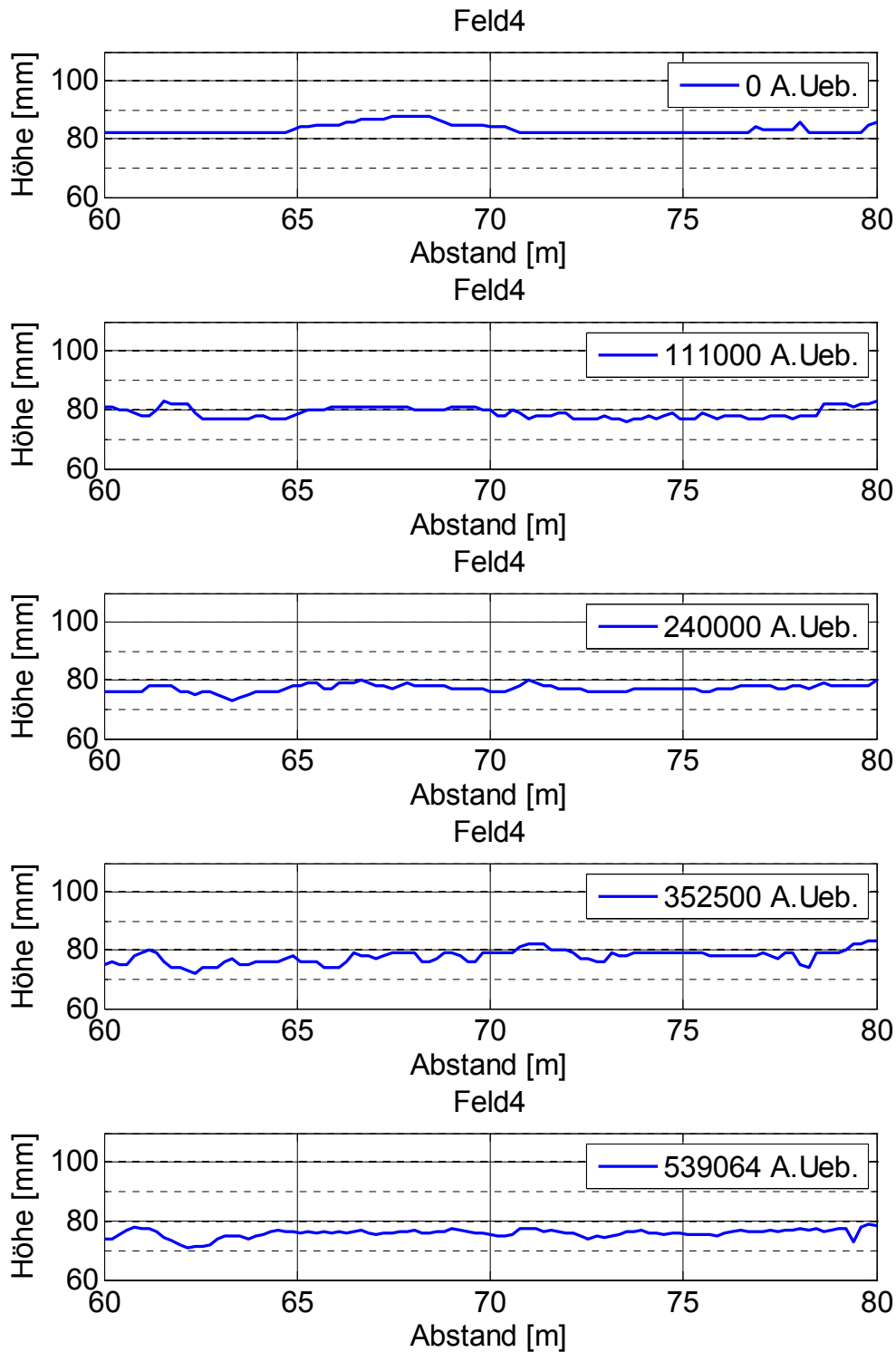


Bild 102 Längsprofilmessungen Feld 4

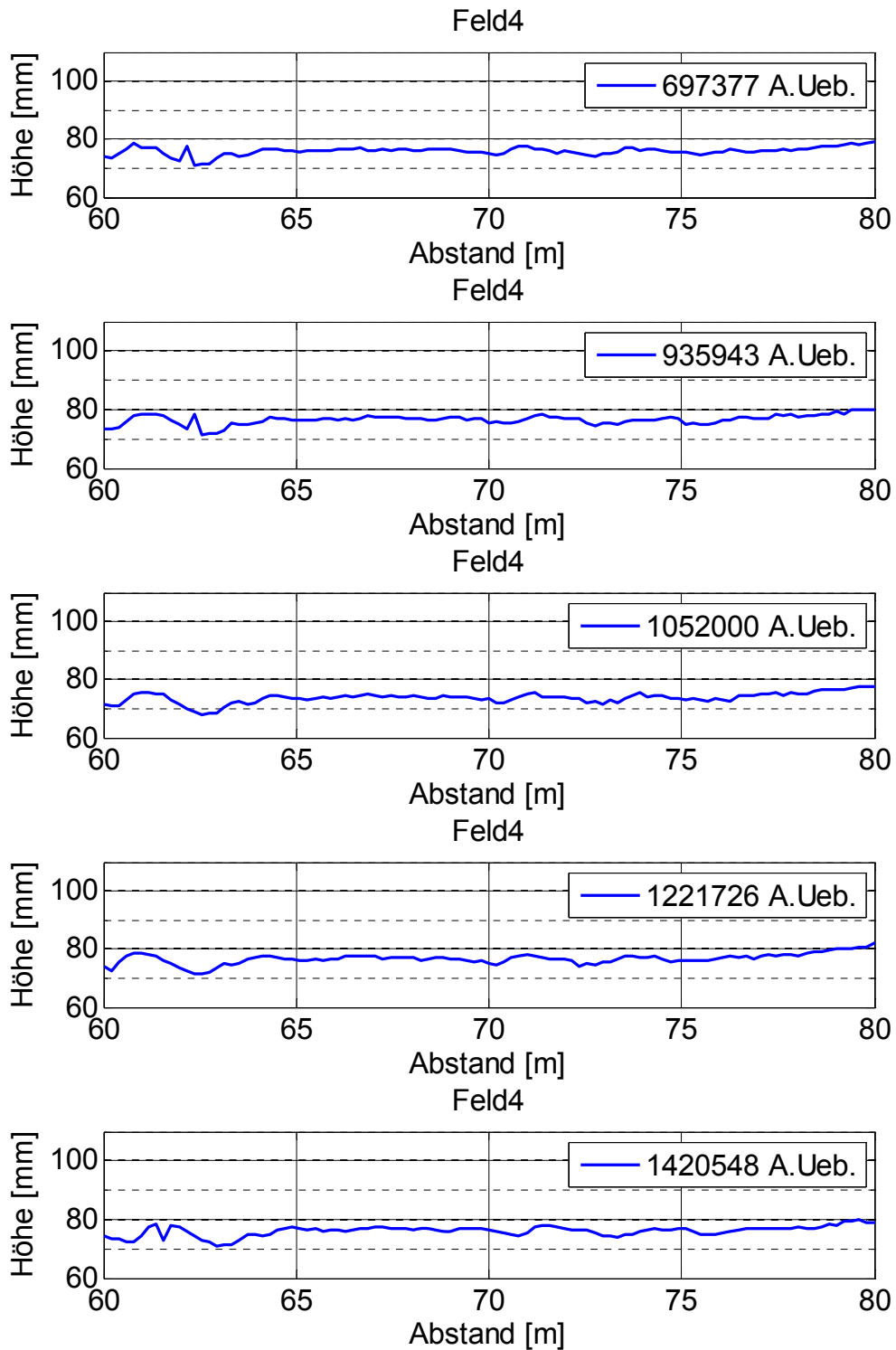


Bild 103 Längsprofilmessungen Feld 4

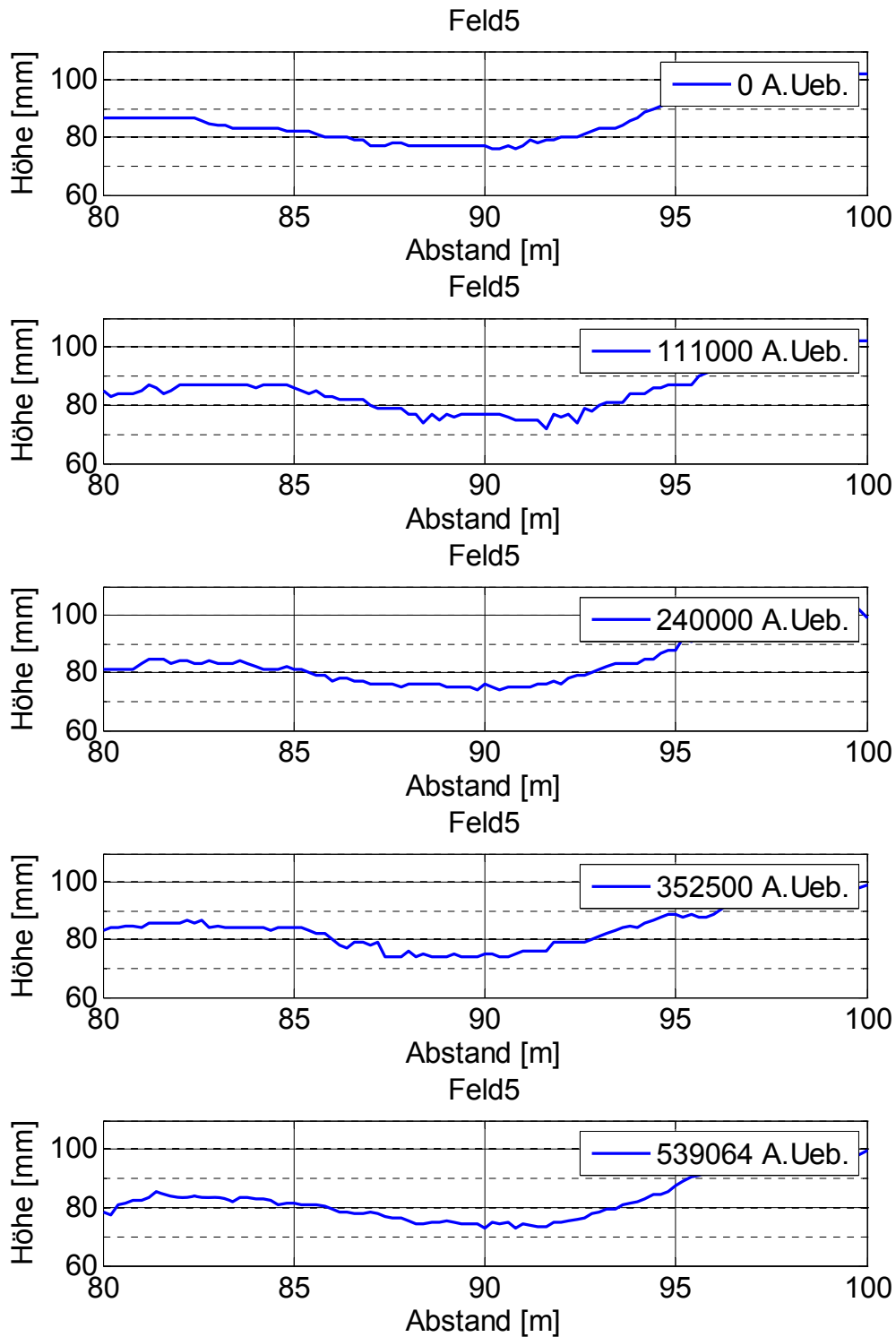


Bild 104 Längsprofilmessungen Feld 5

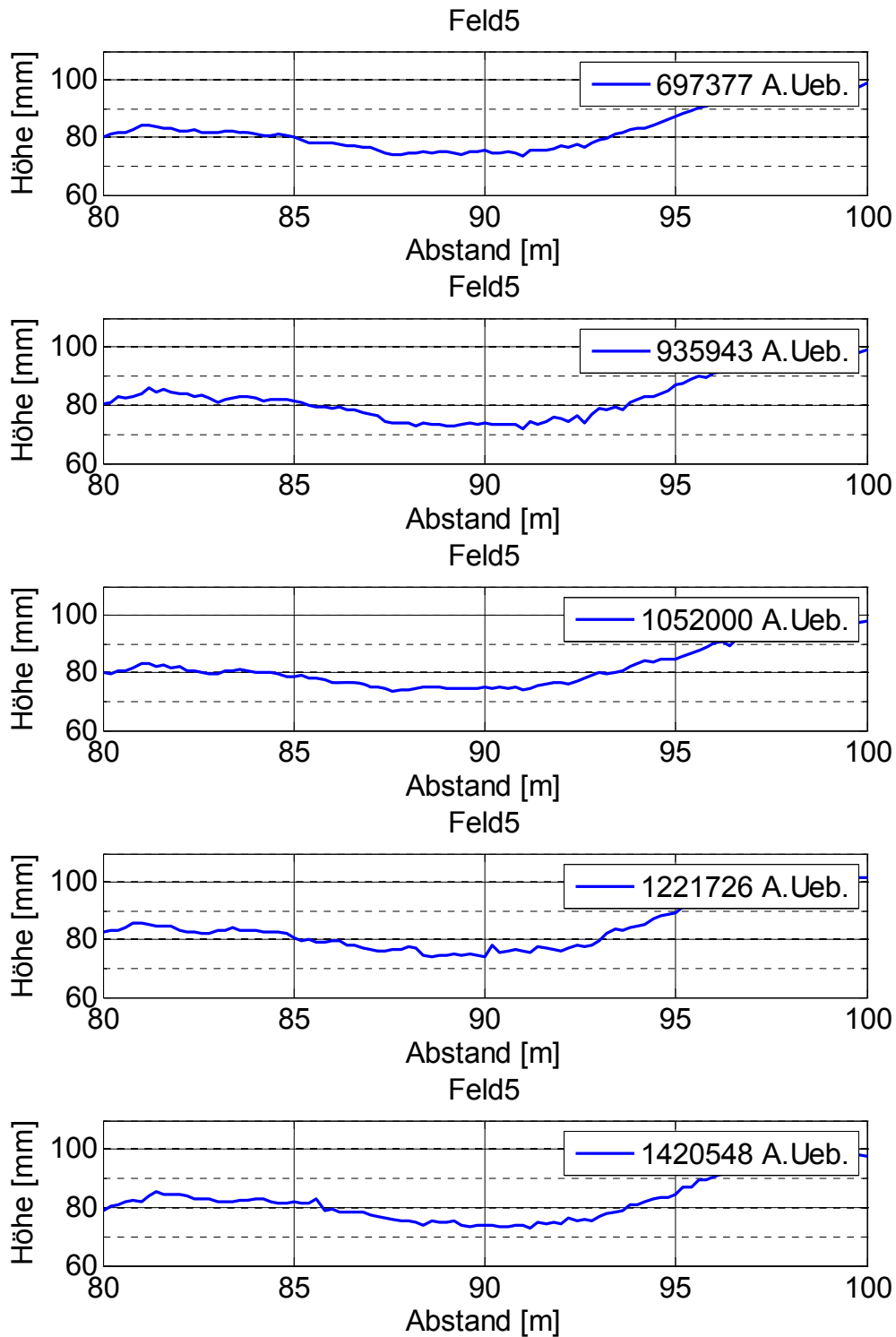


Bild 105 Längsprofilmessungen Feld 5

10.6 DMS Amplitude der Messsignale

DMS: Geschwindigkeit 10km/h, Rad in Mitte der Fahrbahn

DMS FELD1				
Datum	05.08.2003	Ueberrollungen		1200
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	35	[°C]	38	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]

Datum	15.10.2003	Ueberrollungen		201000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	15	[°C]	22	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
		90	50	110
		85		

Datum	19.11.2003	Ueberrollungen		334500
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	9.5	[°C]	13	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
		50	60	75
		70		

Datum	06.04.2004	Ueberrollungen		511989
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	8.8	[°C]	9.6	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]

Datum	19.05.2004	Ueberrollungen		644115
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	20	[°C]	20	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
		109	55	140
		100		

Datum	30.06.2004	Ueberrollungen		753279
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	36	[°C]	54	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
		230		550
		240		

Datum	20.09.2004	Ueberrollungen		880000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	21	[°C]	22	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
		115	100	130

Datum	17.11.2004	Ueberrollungen		1088373
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	5.4	[°C]	6.9	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
		22	34	

DMS: Geschwindigkeit 25km/h, Rad in Mitte der Fahrbahn

DMS FELD1				
Datum	05.08.2003	Ueberrollungen		1200
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	35	[°C]	38	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
		90	40	50
		80		

Datum	15.10.2003	Ueberrollungen		201000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	15	[°C]	22	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
		85	65	90
		90		

Datum	19.11.2003	Ueberrollungen		334500
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	9.5	[°C]	13	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
		55	50	55
		60		

Datum	06.04.2004	Ueberrollungen		511989
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	8.8	[°C]	9.6	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
		55	50	70
		60		

Datum	19.05.2004	Ueberrollungen		644115
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	20	[°C]	20	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
		100	80	120
		80		

Datum	30.06.2004	Ueberrollungen		753279
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	36	[°C]	54	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
		170		400
		200		

Datum	20.09.2004	Ueberrollungen		880000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	21	[°C]	22	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
		107	80	110

Datum	17.11.2004	Ueberrollungen		1088373
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	5.4	[°C]	6.9	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
		20	20	

Tabelle 21) Maximalamplitude der dynamischen Verformungen (DMS)

DMS: Geschwindigkeit 50km/h, Rad in Mitte der Fahrbahn

DMS: Geschwindigkeit 10km/h, Rad in Mitte der Fahrbahn

DMS FELD1			
Datum	05.08.2003	Ueberrollungen	1200
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht
Temperatur:	35 [°C]	38 [°C]	
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	L [um/m]

DMS FELD2			
Datum	05.08.2003	Ueberrollungen	1200
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht
Temperatur:	40 [°C]	40 [°C]	
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	L [um/m]

Datum	15.10.2003	Ueberrollungen	201000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht
Temperatur:	15 [°C]	22 [°C]	
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	L [um/m]
		75	110
		70	80

Datum	15.10.2003	Ueberrollungen	201000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht
Temperatur:	14.5 [°C]	23.5 [°C]	
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	L [um/m]
		25	140
			150

Datum	19.11.2003	Ueberrollungen	334500
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht
Temperatur:	9.5 [°C]	13 [°C]	
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	L [um/m]

Datum	19.11.2003	Ueberrollungen	334500
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht
Temperatur:	8.4 [°C]	14.5 [°C]	
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	L [um/m]
		24	60
			180

Datum	06.04.2004	Ueberrollungen	511989
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht
Temperatur:	8.8 [°C]	9.6 [°C]	
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	L [um/m]
		50	35
		60	70

Datum	06.04.2004	Ueberrollungen	511989
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht
Temperatur:	10.4 [°C]	9 [°C]	
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	L [um/m]

Datum	19.05.2004	Ueberrollungen	644115
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht
Temperatur:	20 [°C]	20 [°C]	
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	L [um/m]
		80	120
		80	110

Datum	19.05.2004	Ueberrollungen	644115
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht
Temperatur:	21.8 [°C]	20.7 [°C]	
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	L [um/m]
			90

Datum	30.06.2004	Ueberrollungen	753279
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht
Temperatur:	36 [°C]	54 [°C]	
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	L [um/m]
		120	300
		170	

Datum	30.06.2004	Ueberrollungen	753279
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht
Temperatur:	37 [°C]	47 [°C]	
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	L [um/m]
		55	

Datum	20.09.2004	Ueberrollungen	880000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht
Temperatur:	21 [°C]	22 [°C]	
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	L [um/m]
		88	110
			90

Datum	20.09.2004	Ueberrollungen	880000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht
Temperatur:	21 [°C]	22 [°C]	
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	L [um/m]
			70
			250

Datum	17.11.2004	Ueberrollungen	1088373
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht
Temperatur:	5.4 [°C]	6.9 [°C]	
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	L [um/m]
		5	13

Datum	17.11.2004	Ueberrollungen	1088373
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht
Temperatur:	4.7 [°C]	8 [°C]	
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	L [um/m]
		20	40

Tabelle 22) Maximalamplitude der dynamischen Verformungen (DMS)

DMS: Geschwindigkeit 25km/h, Rad in Mitte der Fahrbahn

DMS: Geschwindigkeit 50km/h, Rad in Mitte der Fahrbahn

DMS FELD2

Datum	05.08.2003	Ueberrollungen		1200
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	40	[°C]	40	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	70		120	700

DMS FELD2

Datum	05.08.2003	Ueberrollungen		1200
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	40	[°C]	40	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]

Datum	15.10.2003	Ueberrollungen		201000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	14.5	[°C]	23.5	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	20		130	250

Datum	15.10.2003	Ueberrollungen		201000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	14.5	[°C]	23.5	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	15		140	300

Datum	19.11.2003	Ueberrollungen		334500
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	8.4	[°C]	14.5	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	20		70	300

Datum	19.11.2003	Ueberrollungen		334500
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	8.4	[°C]	14.5	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]

Datum	06.04.2004	Ueberrollungen		511989
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	10.4	[°C]	9	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	22		40	

Datum	06.04.2004	Ueberrollungen		511989
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	10.4	[°C]	9	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	25		40	

Datum	19.05.2004	Ueberrollungen		644115
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	21.8	[°C]	20.7	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	30		100	

Datum	19.05.2004	Ueberrollungen		644115
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	21.8	[°C]	20.7	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	24		110	

Datum	30.06.2004	Ueberrollungen		753279
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	37	[°C]	47	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	40			

Datum	30.06.2004	Ueberrollungen		753279
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	37	[°C]	47	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	25			

Datum	20.09.2004	Ueberrollungen		880000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	21	[°C]	22	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
			110	

Datum	20.09.2004	Ueberrollungen		880000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	21	[°C]	22	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
			150	

Datum	17.11.2004	Ueberrollungen		1088373
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	4.7	[°C]	8	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	15		40	

Datum	17.11.2004	Ueberrollungen		1088373
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	4.7	[°C]	8	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	5		30	

Tabelle 23) Maximalamplitude der dynamischen Verformungen (DMS)

DMS: Geschwindigkeit 10km/h, Rad in Mitte der Fahrbahn

DMS: Geschwindigkeit 25km/h, Rad in Mitte der Fahrbahn

DMS FELD3				
Datum	05.08.2003	Ueberrollungen		1200
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	42	[°C]	40	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]

DMS FELD3				
Datum	05.08.2003	Ueberrollungen		1200
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	42	[°C]	40	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	100	150	200	180
	140	80		

Datum	15.10.2003	Ueberrollungen		201000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	15	[°C]	22.6	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	25	45	110	78
	18	40	100	

Datum	15.10.2003	Ueberrollungen		201000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	15	[°C]	22.6	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	20	40	90	82
	17	40		

Datum	19.11.2003	Ueberrollungen		334500
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	9.5	[°C]	12.5	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	25	60	180	50
	40	50	35	

Datum	19.11.2003	Ueberrollungen		334500
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	9.5	[°C]	12.5	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	24	45	32	60
	30	30		

Datum	06.04.2004	Ueberrollungen		511989
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	9.6	[°C]	9	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]

Datum	06.04.2004	Ueberrollungen		511989
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	9.6	[°C]	9	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	20	40	25	50
		35		

Datum	19.05.2004	Ueberrollungen		644115
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	24	[°C]	29	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	50	58	70	100
	40	60		

Datum	19.05.2004	Ueberrollungen		644115
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	24	[°C]	29	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	40	52	60	120
	40	50		

Datum	30.06.2004	Ueberrollungen		753279
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	37	[°C]	47.5	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	120	130		
	140			

Datum	30.06.2004	Ueberrollungen		753279
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	37	[°C]	47.5	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	80	90		
	130			

Datum	20.09.2004	Ueberrollungen		880000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	21	[°C]	22	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	70		60	110

Datum	20.09.2004	Ueberrollungen		880000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	21	[°C]	22	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	55		55	120
	70			

Tabelle 24) Maximalamplitude der dynamischen Verformungen (DMS)

DMS: Geschwindigkeit 50km/h, Rad in Mitte der Fahrbahn

DMS: Geschwindigkeit 10km/h, Rad in Mitte der Fahrbahn

DMS FELD3

Datum	05.08.2003	Ueberrollungen		1200
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	42	[°C]	40	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]

DMS FELD4

Datum	05.08.2003	Ueberrollungen		1200
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	35	[°C]	36	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]

Datum	15.10.2003	Ueberrollungen		201000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	15	[°C]	22.6	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	18	38	70	78
	15	38		

Datum	20.10.2003	Ueberrollungen		201000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	9.5	[°C]	10.5	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	25	50	35	80

Datum	19.11.2003	Ueberrollungen		334500
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	9.5	[°C]	12.5	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]

Datum	19.11.2003	Ueberrollungen		334500
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	8	[°C]	10	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	35	60	45	100

Datum	06.04.2004	Ueberrollungen		511989
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	9.6	[°C]	9	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	20	45	30	65
	22	30		

Datum	06.04.2004	Ueberrollungen		511989
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	10	[°C]	9.5	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]

Datum	19.05.2004	Ueberrollungen		644115
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	24	[°C]	29	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	38	45	55	125
	38	50		

Datum	19.05.2004	Ueberrollungen		644115
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	21	[°C]	27	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	40	100	160	110

Datum	30.06.2004	Ueberrollungen		753279
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	37	[°C]	47.5	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	70	80		
	110			

Datum	30.06.2004	Ueberrollungen		753279
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	35	[°C]	42	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	170	240	800	250

Datum	20.09.2004	Ueberrollungen		880000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	21	[°C]	22	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	52		50	150
	65			

Datum	20.09.2004	Ueberrollungen		880000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	21	[°C]	22	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	50	115	125	60

Datum	17.11.2004	Ueberrollungen		1088373
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	5.6	[°C]	7.2	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
			60	42
				40

Tabelle 25) Maximalamplitude der dynamischen Verformungen (DMS)

DMS: Geschwindigkeit 25km/h, Rad in Mitte der Fahrbahn

DMS: Geschwindigkeit 50km/h, Rad in Mitte der Fahrbahn

DMS FELD4

Datum	05.08.2003	Ueberrollungen		1200
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	35	[°C]	36	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	140	100	250	
		140		

DMS FELD4

Datum	05.08.2003	Ueberrollungen		1200
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	35	[°C]	36	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]

Datum	20.10.2003	Ueberrollungen		201000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	9.5	[°C]	10.5	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	18	35	35	40
				40

Datum	20.10.2003	Ueberrollungen		201000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	9.5	[°C]	10.5	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	10	15	70	30
				25

Datum	19.11.2003	Ueberrollungen		334500
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	8	[°C]	10	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	30	45	45	48

Datum	19.11.2003	Ueberrollungen		334500
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	8	[°C]	10	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]

Datum	06.04.2004	Ueberrollungen		511989
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	10	[°C]	9.5	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	35	60	40	40

Datum	06.04.2004	Ueberrollungen		511989
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	10	[°C]	9.5	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	20	50	60	130
				40

Datum	19.05.2004	Ueberrollungen		644115
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	21	[°C]	27	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	30	50	110	100

Datum	19.05.2004	Ueberrollungen		644115
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	21	[°C]	27	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	20	20	80	80
				80

Datum	30.06.2004	Ueberrollungen		753279
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	35	[°C]	42	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	80	170	500	180

Datum	30.06.2004	Ueberrollungen		753279
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	35	[°C]	42	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	40	150	400	160

Datum	20.09.2004	Ueberrollungen		880000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	21	[°C]	22	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	40	60	100	120

Datum	20.09.2004	Ueberrollungen		880000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	21	[°C]	22	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	30	25	70	170

Datum	17.11.2004	Ueberrollungen		1088373
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	5.6	[°C]	7.2	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
			52	38
				18

Datum	17.11.2004	Ueberrollungen		1088373
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	5.6	[°C]	7.2	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
			42	30
				10

Tabelle 26) Maximalamplitude der dynamischen Verformungen (DMS)

DMS: Geschwindigkeit 10km/h, Rad in Mitte der Fahrbahn

DMS: Geschwindigkeit 25km/h, Rad in Mitte der Fahrbahn

DMS FELD5

Datum	05.08.2003	Ueberrollungen		1200
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	29	[°C]	30	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]

DMS FELD5

Datum	05.08.2003	Ueberrollungen		1200
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	29	[°C]	30	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	40	55	60	100
			60	70

Datum	15.10.2003	Ueberrollungen		201000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	8.4	[°C]	10	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	20		30	20
			22	25

Datum	15.10.2003	Ueberrollungen		201000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	8.4	[°C]	10	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	15		20	14
			20	21

Datum	19.11.2003	Ueberrollungen		334500
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	7.6	[°C]	11.4	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	25		25	20
			30	24

Datum	19.11.2003	Ueberrollungen		334500
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	7.6	[°C]	11.4	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	20		26	25
			35	20

Datum	06.04.2004	Ueberrollungen		511989
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	9	[°C]	10	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]

Datum	06.04.2004	Ueberrollungen		511989
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	9	[°C]	10	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
		25	24	24
			30	26

Datum	19.05.2004	Ueberrollungen		644115
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	17	[°C]	24	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	27		60	65
			60	60

Datum	19.05.2004	Ueberrollungen		644115
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	17	[°C]	24	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	20		45	60
			50	30

Datum	30.06.2004	Ueberrollungen		753279
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	35.5	[°C]	45	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]

Datum	30.06.2004	Ueberrollungen		753279
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	35.5	[°C]	45	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	100		200	180

Datum	20.09.2004	Ueberrollungen		880000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	21	[°C]	22	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	40		70	30
			45	50

Datum	20.09.2004	Ueberrollungen		880000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	21	[°C]	22	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	30		55	25
			40	40

Datum	17.11.2004	Ueberrollungen		1088373
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	4.7	[°C]	7.3	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	40		30	15
			30	

Datum	17.11.2004	Ueberrollungen		1088373
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	4.7	[°C]	7.3	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	31		25	10
			25	

Tabelle 27) Maximalamplitude der dynamischen Verformungen (DMS)

DMS: Geschwindigkeit 50km/h, Rad in Mitte der Fahrbahn

DMS FELDS

Datum	05.08.2003	Ueberrollungen		1200
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	29	[°C]	30	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]

Datum	15.10.2003	Ueberrollungen		201000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	8.4	[°C]	10	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	10		15	9
			32	24

Datum	19.11.2003	Ueberrollungen		334500
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	7.6	[°C]	11.4	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	22		30	20
			22	24

Datum	06.04.2004	Ueberrollungen		511989
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	9	[°C]	10	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]

Datum	19.05.2004	Ueberrollungen		644115
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	17	[°C]	24	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	15		30	57
			50	55

Datum	30.06.2004	Ueberrollungen		753279
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	35.5	[°C]	45	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]

Datum	20.09.2004	Ueberrollungen		880000
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	21	[°C]	22	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	20		40	22
			50	50

Datum	17.11.2004	Ueberrollungen		1088373
Schicht:	Tragschicht		Deckschicht	
Temperatur:	4.7	[°C]	7.3	[°C]
Lage:	Q [um/m]	L [um/m]	Q [um/m]	L [um/m]
	22		18	5
			20	

Tabelle 28) Maximalamplitude der dynamischen Verformungen (DMS)

10.7 Temperaturmessungen (PT100)

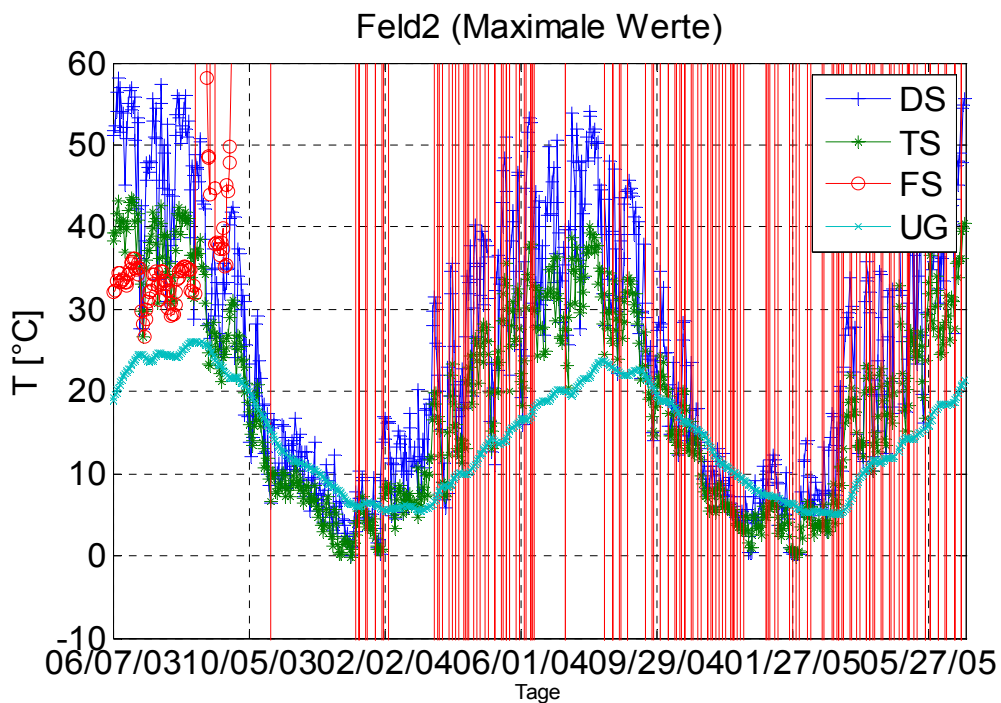
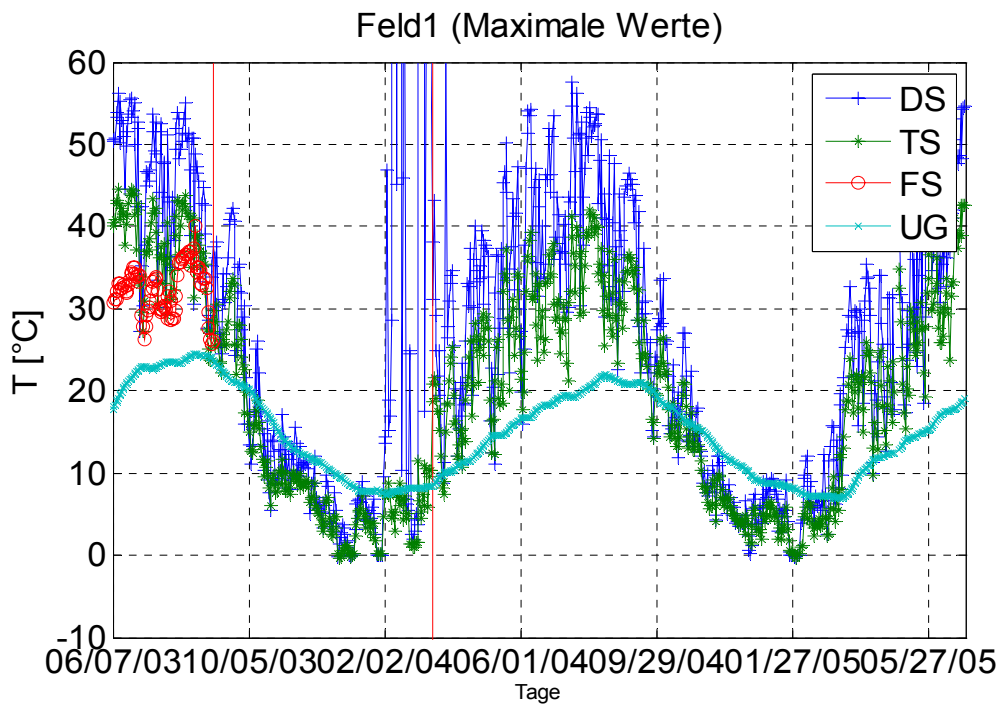


Bild 106 Maximale Werte der Temperatur

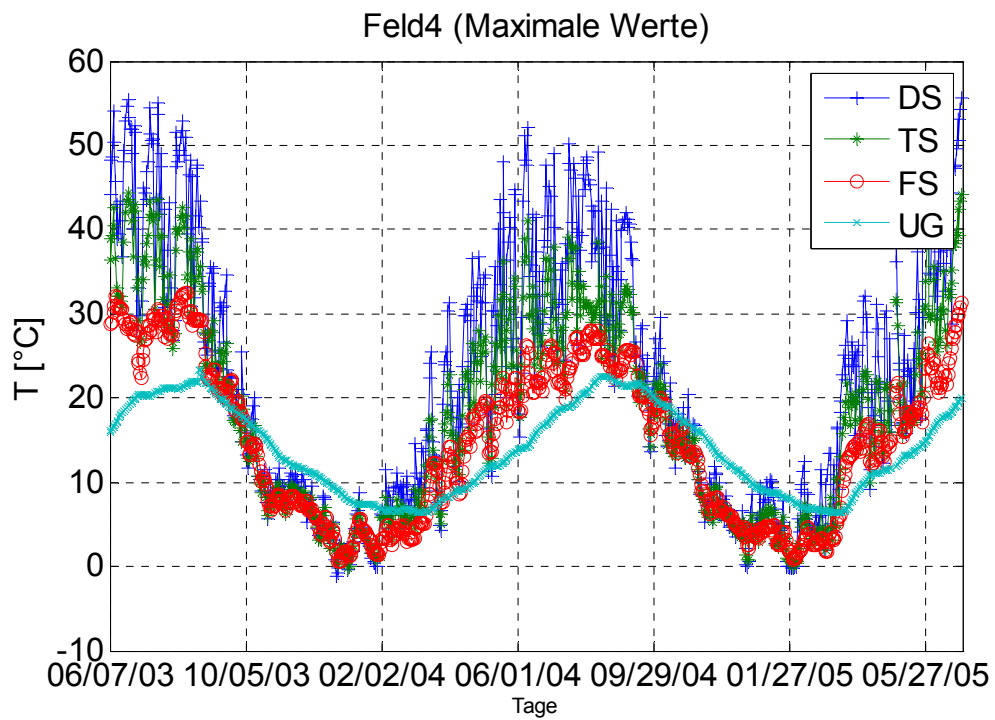
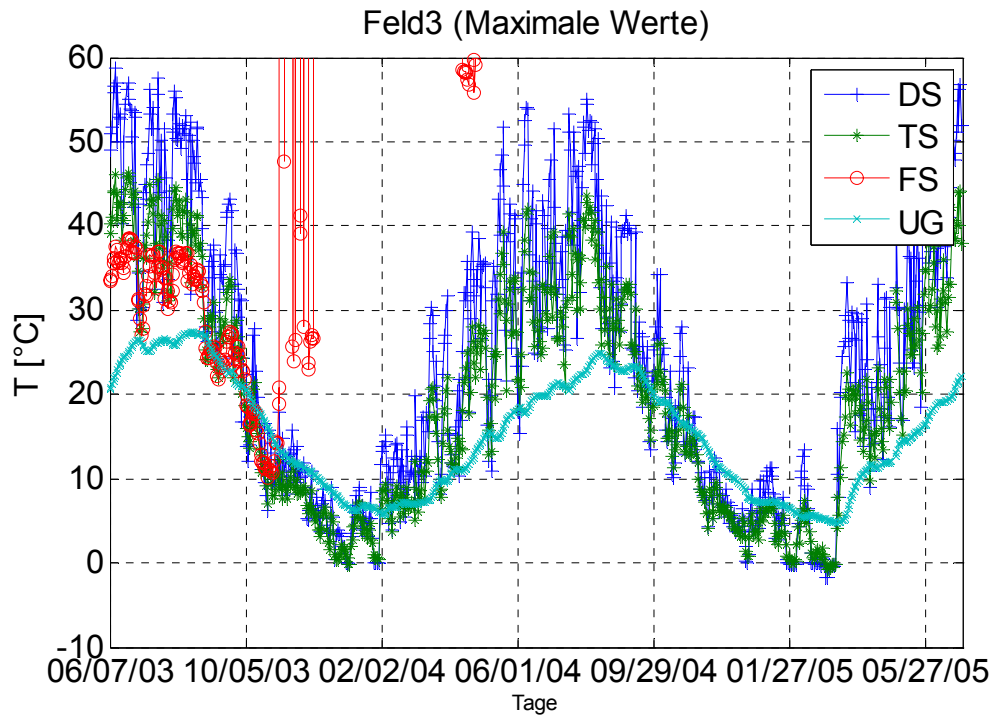


Bild 107 Maximale Werte der Temperatur

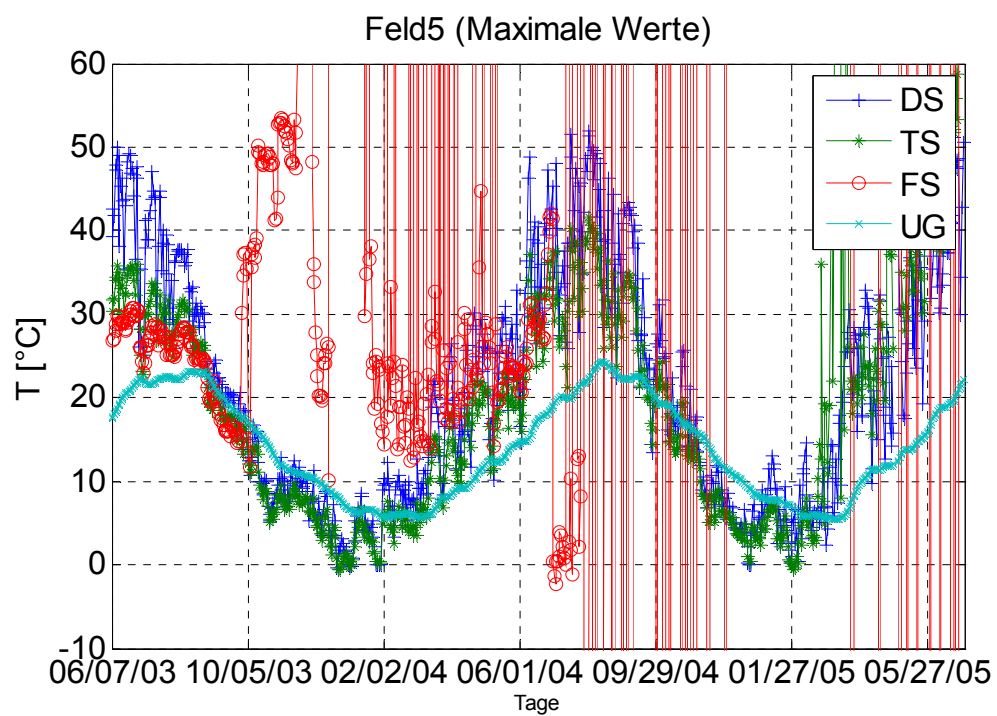


Bild 108 Maximale Werte der Temperatur

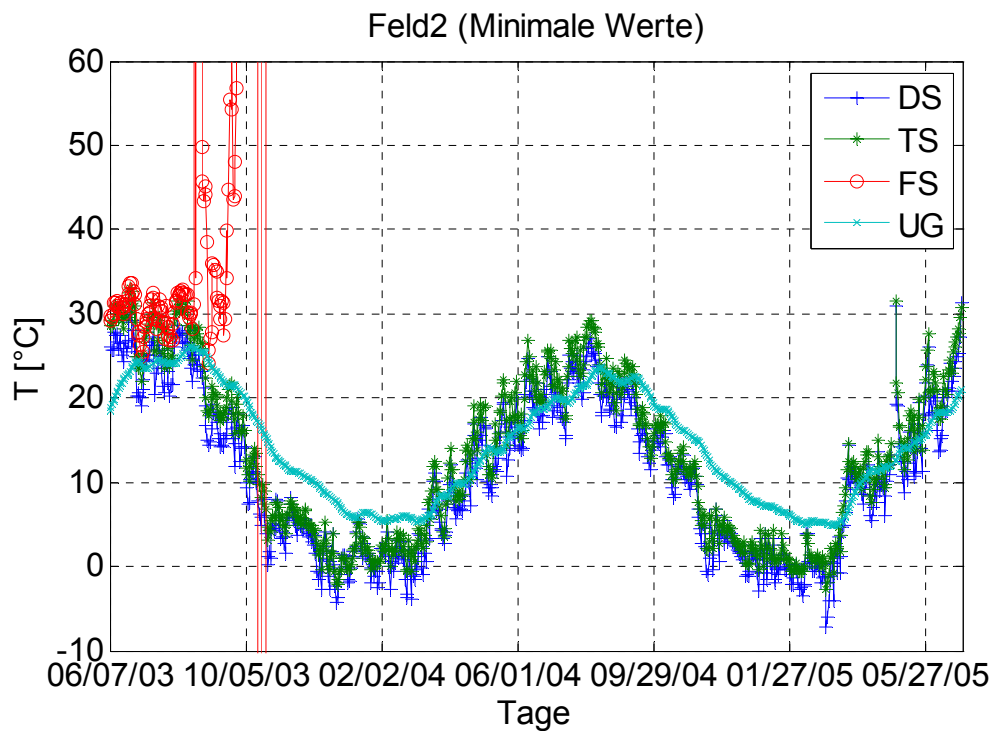
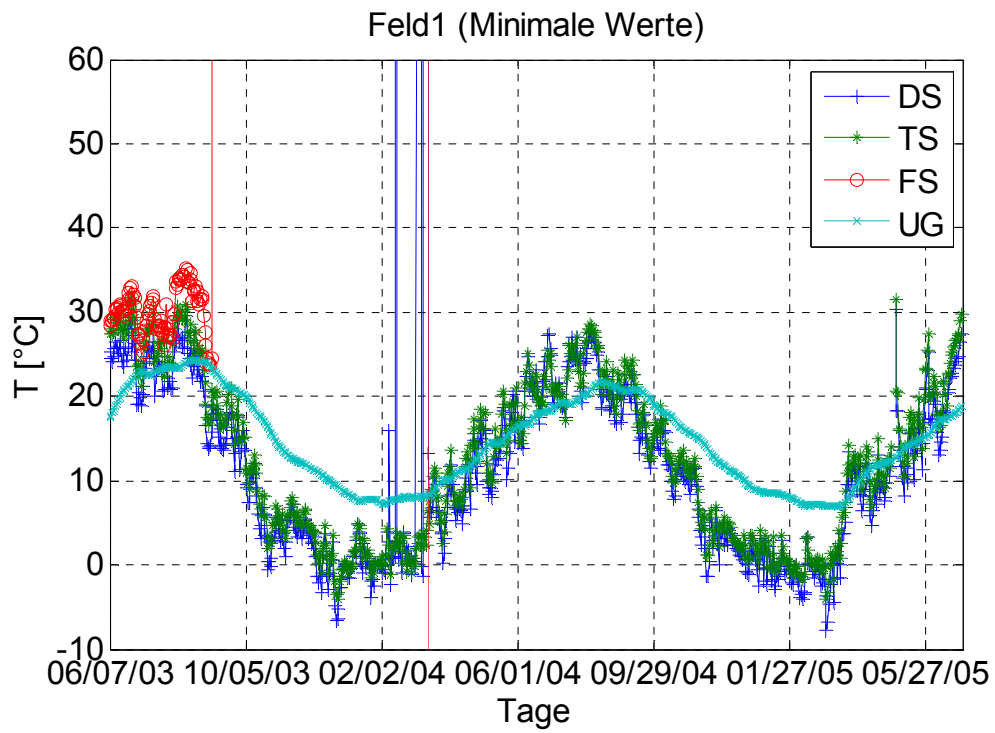


Bild 109 Minimale Werte der Temperatur

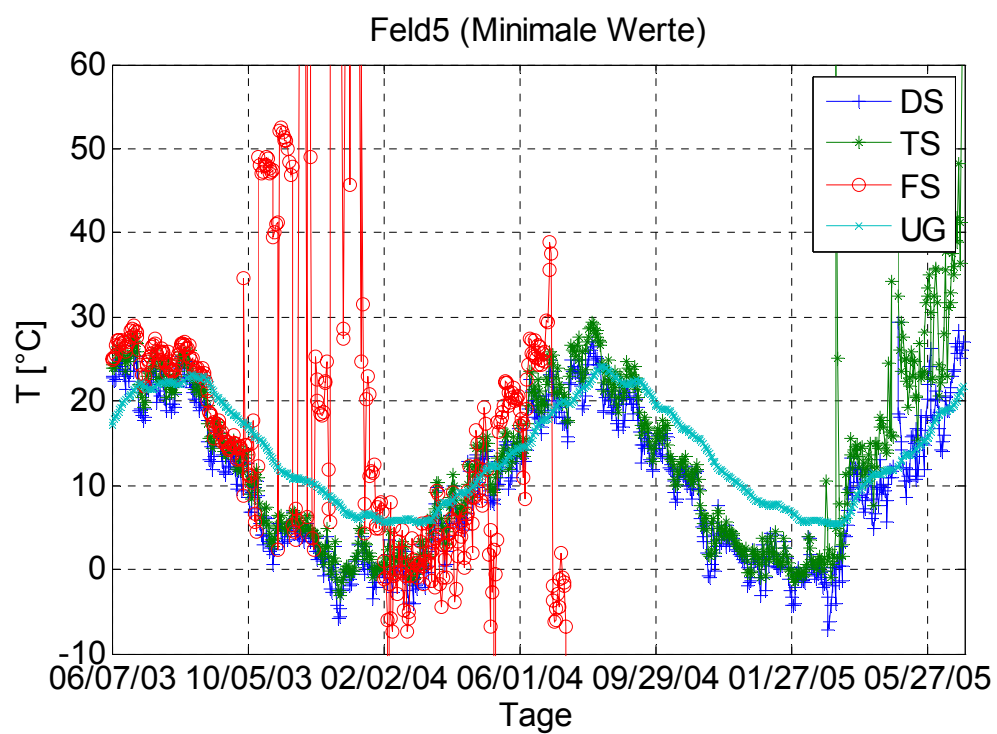


Bild 110 Minimale Werte der Temperatur