IVT INSTITUT FÜR VERKEHRSPLANUNG, TRANSPORTTECHNIK, STRASSEN- UND EISENBAHNBAU ETH ZÜRICH

DQM-2

Ein Gerät zur dynamischen Querprofilmessung auf Strassen

VSS-Forschungsauftrag Nr. 18/85

U. Scheifele, dipl. Phys. ETHZ

Schriftenreihe des IVT Nr. 80
Zürich, März 1989

Vorwort

Der vorliegende Schlussbericht über Entwicklung und Bau eines Messgerätes für die Aufnahme von Querprofilen einer Fahrbahn unter Verkehr stellt den - lange erwarteten - Abschluss einer längeren Arbeit dar, die vor gut 10 Jahren ihren Anfang genommen hatte und an welcher eine Vielzahl von Personen und Institutionen mitgearbeitet haben. In dieser Zeit wurde nicht nur das ursprüngliche Konzept wesentlich abgeändert, sondern auch die Randbedingungen und die Technik haben sich stark gewandelt.

Die zwei genannten Faktoren - Entwicklungszeit und Anzahl Beteiligte - sind nicht ohne Einfluss auf den Werdegang und den Abschluss des Projektes geblieben und müssen berücksichtigt werden, wenn die Frage nach der Lösung der gestellten Aufgabe beantwortet wird.

Das ursprüngliche Konzept hatte im Rahmen eines Gesamtkredites von knapp unter Fr. 100'000.- Entwicklung und Bau von zwei Messgeräten für die Querprofilaufnahme vorgesehen, wobei eines für die stationäre Messung (Ersatz des Planum-Gerätes) dienen sollte, das andere hingegen für die Erfassung längerer Streckenabschnitte aus der Bewegung heraus, wofür damals weltweit erst in Ansätzen gewisse Lösungen vorhanden waren. Dieses zweite Gerät entsprach ursprünglich einer eher einfachen Konzeption und hatte bezüglich der Genauigkeit reduzierten Anforderungen zu genügen (für eine Bewertung längerer Abschnitte, bzw. ganzer Strassennetze ausreichend, dennoch nicht den Möglichkeiten der stationären Messung entsprechend). Im Laufe der Zeit wurde dann einerseits aufgrund neu erkannter technischer Möglichkeiten auf den Gebieten der Optik und der Elektronik das Gesamtkonzept wesentlich geändert und die Erwartungen bezüglich Leistungsfähigkeit und Genauigkeit massiv erhöht und andererseits auch der finanzielle Rahmen stark gesprengt.

Die neue Lösung erforderte notwendigerweise die interdisziplinäre Durchführung der Arbeit in einem grösseren Team mit Beteiligten innerhalb und ausserhalb der Hochschule, worüber in früheren Berichten im Detail Auskunft gegeben wurde. Nun ist es eine spezifische Eigenart von Hochschulinstituten, dass die an der Forschung beteiligten Leute, in erster Linie Absolventen der Schule, dieselbe nach einigen Jahren wieder verlassen um in der Praxis das Gelernte weiter nutzbringend anzuwenden. Wenn sich nun, wie im vorliegenden Fall, ein Projekt über eine längere Zeitdauer hinzieht, kann nicht erwartet werden, dass dieselben Leute während der ganzen Zeit dabei sind. Diese natürliche Rotation von Hochschulmitarbeitern kann also auf den Werdegang eines Projektes wesentlichen Einfluss ausüben, der noch vergrössert wird, wenn der gleichzeitig weiterschreitende technische Fortschritt berücksichtigt wird. Bei diesem Projekt erwies sich zudem noch der plötzlich eingetretene Todesfall des zuständigen Sachbearbeiters, dipl. Ing Georg Bachner, als erschwerend. In einer Zeit, die auch durch organisatorische Aenderungen innerhalb der Hochschule charakterisiert war, dauerte es gut eineinhalb Jahre, bis wieder eine definitive Lösung für die Stelle des Sachbearbeiters gefunden werden konnte und auch dies nur auf Zeit.

Heute, bei Projektabschluss, ist keine der direkt am Projekt beteiligten Personen mehr an der Hochschule, oder dann in anderen Instituten und mit anderen Funktionen. Zehn Jahre nach Inangriffnahme des Projektes sind aufgrund technischer Entwicklungen viele der im DQM-2 eingebauten Komponenten und Lösungen als technisch veraltet zu betrachten. Für den gleichen Zweck bestehen heute mindestens ein halbes Dutzend neuere Lösungen und Geräte, die z.T. auch in mehreren Exemplaren vorhanden sind.

Der von dipl. Phys. ETH Urs Scheifele verfasste Bericht beschreibt die letzte Phase der Entwicklungsarbeiten mit Modifikationen und Verbesserungen am Gerät und an den Programmen sowie den Ergebnissen verschiedener statischer und dynamischer Kontrollmessungen unter Mitarbeit von Herrn W. Hermann. Ist damit die gestellte Aufgabe erfüllt worden? Ein "Jein" oder "Ja, aber" dürften am zutreffendsten sein, wenn folgendes berücksichtigt wird:

- Die Realisierbarkeit der gewählten technischen Lösung ist nachgewiesen worden, und das Gerät kann im Prinzip hohen Genauigkeitsanforderungen genügen.

- Die Auswerteprogramme funktionieren gut, enthalten eine Fülle von praktischen Optionen und sind benutzerfreundlich konzipiert.

- Die bereits in einem früheren Stadium der Projektbearbeitung erkannten Probleme mit Lichtleistung und Blendenregelung konnten nicht gelöst werden, so dass die Einsatzmöglichkeiten am Tage reduziert sind und auch die Messkadenz bei hoher Fahrgeschwindigkeit die gewünschten Werte nicht ganz erreicht.

- Das Gerät ist noch stark pannenanfällig und kann nicht als zuverlässig genug für den Routineeinsatz bezeichnet werden.

Wenn trotzdem auch von einem "Erfolg" gesprochen werden kann, so geschieht dies auch aus der Überlegung heraus, dass mit dem DQM-2 ein **Prototyp** entwickelt worden ist, welcher das gestellte Pflichtenheft weitgehend erfüllt. Bei der gegebenen Komplexität des Gerätes ist es allerdings eine Illusion anzunehmen, dass sich ein Prototyp im praktischen Einsatz so verhält, wie dies von einem ausgereiften Serienprodukt erwartet werden kann. Entsprechend dem Vorgehen in der Industrie müsste auch beim DQM-2 auf der Basis der bisher verfügbaren Erkenntnisse und mit heutiger Technologie ein zweites Exemplar gebaut werden. Die Durchführung weiterer Verbesserungsarbeiten am vorhandenen Gerät dürfte aufgrund der bisherigen Erfahrungen sehr leicht in eine Sisyphus-Arbeit ausarten.

Die Forschungsstelle dankt allen hier nicht namentlich erwähnten Mitarbeitern, die zum Gelingen des Messgerätes DQM-2 bis auf den heutigen Stand beigetragen haben. Spezieller Dank gilt der Kommission für Forschung im Strassenverkehr des EVED und der Schulleitung der ETHZ für die Finanzierung des Vorhabens.

Prof. K. Dietrich

I. Scazziga, dipl. Ing. ETH

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
VORWORT		1
ZUSAMMENFASSUNG		5
RESUME		6
1. EINLEITUNG		
1.1	Auftrag	7
1.2	Gegenstand	7
1.3	Werdegang	7
1.4	Frühere Aufträge und Berichte	8
2. TECHNISCHE BESCHREIBUNG		
2.1	Anhänger	9
2.2	Zugfahrzeug	9
2.3	Das Messprinzip des DQM-2	11
2.4	Steuerung des Messablaufes	11
2.5	Eichung	13
3. AUSWERTUNG DER ROHPROFILDATEN		
3.1	Rohdaten	15
3.2	Die Auswerteprogramme	15
3.3	Auswertealgorithmen	16
4. ERGEBNISSE		
4.1	Statische Tests	19
4.1.1	Quantisierungsfehler	19
4.1.2	Fehler durch Abbildung	19
4.1.3	Gesamtfehler	20
4.2	Dynamische Tests und Versuchsfahrten	21
4.3	Einige illustrative Beispiele zu den Möglichkeiten der Auswerteprogramme	22

Seite

5. ERFAHRUNGEN UND VERBESSERUNGS-VORSCHLÄGE

5.1 Probleme bei Messfahrten 25

5.2 Verbesserungsvorschläge 26

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN 28

ABBILDUNGEN 1-49 30

BEILAGE

Beteiligung am interdisziplinären Forschungsprojekt DQM-2 74

ZUSAMMENFASSUNG

Der folgende Bericht beschreibt den Werdegang, die Funktion und Resultate eines Messgeräte-Prototypes zur Erfassung von Spurrinnen auf Strassen.
Das Ziel des Forschungsprojektes war es, ein Gerät zu entwickeln, das eine rasche Aufnahme der Querunebenheiten der Fahrbahn ohne Verkehrsbehinderungen erlaubt und zwar auch auf Autobahnen. Dies erfordert eine berührungslose Oberflächenabtastung.
Das im Folgenden beschriebene Dynamische Querprofil-Messgerät "DQM-2" benutzt eine stabförmige Xenon-Blitzlampe um einen schmalen Lichtstreifen quer auf die Fahrbahn zu projizieren. Mit einer Videokamera wird dessen Bild unter einem flachen Winkel aufgenommen, dann elektronisch verarbeitet und die so extrahierte Profillinie auf Magnetband gespeichert.
Einflüsse des Umgebungslichtes sowie der Belagshelligkeit werden überwacht und mit dem Computer, der auch alle Aufnahmevorgänge steuert, kompensiert. Die beschriebenen Magnetbänder werden nach der Messfahrt in ein grösseres Computersystem (z.B. VAX) eingelesen. Eine speziell dafür entwickelte Software bereitet dort die Messdaten auf, beseitigt Abbildungsfehler und wertet die Profillinien so aus, dass die gewohnten, normierten Latten- und Wasserwerte gewonnen werden. Die erreichbaren Genauigkeiten liegen bei etwa 1 mm.
Die Resultate lassen sich statistisch weiterverarbeiten. In wenigen Minuten lässt sich eine Übersicht des Belagszustandes über viele Kilometer erstellen. Auch einzelne Profile und Strassenstücke lassen sich zu Dokumentationszwecken herausgreifen und auf vielfältige Weise grafisch darstellen. Die Auswerteresultate können wieder auf Magnetband gespeichert und archiviert werden. Mit wenig Aufwand wäre es nun auch möglich, die Resultate auf eine Datenbank zu überspielen.

RESUME

Ce rapport décrit le développement, le fonctionnement et les résultats d'un prototype d'appareil de mesure de la planéité transversale.

Le but de ce projet de recherche était de développer un appareil qui permette un relevé rapide du profil en travers d'une route sans en entraver la circulation, et ce même sur autoroute. Cela n'est possible que sans contact entre l'appareil de mesure et la surface de la chaussée.
Le DQM-2 (pour "Dynamisches Querprofil-Messgerät") décrit ici utilise une ligne de lumière projetée transversalement à la chaussée par un flash au xénon. Cette image est filmée sous un angle plat par une caméra vidéo, traitée par ordinateur, puis mémorisée sur bande magnétique.
L'ordinateur qui dirige tout le relevé tient compte de la luminosité ambiante et de la clarté du revêtement. Après la campage de mesures, les bandes magnétiques sont lues par un ordinateur de plus grande capacité (par ex. VAX). Un logiciel spécialement développé à cet effet prépare les données, supprime les erreurs d'image et analyse les profils afin d'obtenir la profondeur d'ornière et la hauteur d'eau théorique selon leur définition normalisée. La précision atteinte est de l'ordre du millimètre.
Les résultats peuvent être tout de suite analysés statistiquement. En quelques minutes, on obtient ainsi un aperçu de l'état du revêtement sur plusieurs kilomètres. Il est aussi possible de ressortir des profils ou des tronçons particuliers à des fins de documentation et de les représenter graphiquement. Les résultats des analyses peuvent également être mémorisés et classés sur bandes magnétiques. A peu de frais, il serait possible de les transferer dans une banque de données.

1. Einleitung

1.1 Auftrag

Der vorliegende Bericht stellt den Abschluss der Arbeiten im Rahmen des Forschungsauftrages Nr. 18/85 an das IVT dar. Gemäss Beschluss des EVED vom 30.9.85 wurde das IVT beauftragt, das Gerät bis zur Betriebsreife fertigzustellen.

1.2 Gegenstand

Entsprechend dem Auftrag werden im vorliegenden Bericht nur diejenigen Bestandteile (Hardware und Software) und Arbeitsschritte detailliert beschrieben, die im Rahmen der Arbeiten am IVT zur Fertigstellung des DQM2-Prototypes durchgeführt wurden und das Gerät somit in seinem jetzigen Zustand kennzeichnen. Genauere Angaben über weitere Komponenten dieses als Gemeinschaftsprojekt mehrerer Forschungsstellen angefangenen Meßsystems (siehe 1.3 Werdegang) sind in bisher erschienenen Berichten und Publikationen enthalten, welche ebenfalls in dieser Einleitung aufgeführt sind.

1.3 Werdegang

Aufgrund des verstärkten Auftretens des Schadenbildes "Spurrinnenbildung" in den 70er Jahren wurde das Bedürfnis nach Lösungen des Problems der Messung der Ebenheiten im Querprofil als dringlich empfunden und in das Mehrjahres-Forschungsprogramm aufgenommen. 1979 stellte das Institut für Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau an der ETH (ISETH) ein erstes Gesuch für die Entwicklung von zwei Geräten für die Querprofilaufnahme, mit der Absicht einerseits eine moderne, genauere (± 0.2 mm) Variante des bekannten Planum-Gerätes zu entwickeln und andererseits ein Gerät für die Erfassung von Querprofil und Querneigung während der Fahrt mit etwas geringeren - aber für den Zweck immer noch sehr hohen - Genauigkeitsanforderungen (± 1 mm). Dieses Gesuch wurde zu einem Zeitpunkt eingereicht, da auf dem Markt noch keine Geräte vorhanden waren, die für den gedachten Einsatzbereich mit genügender Genauigkeit und Auflösung arbeiten konnten. Kurz nach Erteilung dieses Forschungsauftrages (4/79) wurde ein vielversprechender Lösungsweg (berührungslose optische Methode mit Aufzeichnung auf Video-Kamera) vorgeschlagen, der den gesteckten Finanzrahmen allerdings wesentlich sprengte. Mit dieser Lösung, die sich u.a. aufgrund früherer Arbeiten des Institutes für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH (IGP) anbot, war es notwendig, unter der Leitung des ISETH ein interdisiplinäres Forschungsteam (siehe Beilage) zusammenzustellen und neue Aufträge zu erteilen (im Rahmen des FA 4/79 ging die Entwicklung des "statischen" Gerätes alleine weiter). So wurde ein Auftrag an das IGP erteilt für die Erstellung der notwendigen Auswerteprogramme (FA 25/79) und ein anderer an das ISETH als koordinierende Forschungsstelle für die eigentliche Geräteentwicklung (FA 45/80). Die ursprünglich wesentlich unterschätzten Entwicklungskosten führten später zum Einreichen weiterer Gesuche für Fortsetzungskredite (FA 26/82 und 19/85) mit welchen das Projekt bis zur Auflösung des ISETH auf Ende März 1985 vorangetrieben wurde. Zu diesem Zeitpunkt zeigte sich jedoch, dass das fertige Messsystem (zum eigentlichen Messanhänger wurde aus allgemeinen Mitteln der ETH noch ein Zugfahrzeug beschafft und dementsprechend eingerichtet) noch einige Unzulänglichkeiten aufwies und aus verschiedenen Gründen noch nicht genügend im Einsatz hatte ausgetestet werden können. Nachdem von einem unabhängigen Experten das Projekt mit der Empfehlung weiterer Entwicklungsschritte evaluiert wurde, stellte das IVT das letzte Kreditgesuch für Forschungsarbeiten zur Fertigstellung des Gerätes (FA 18/85). Diese Arbeiten und deren Ergebnisse sind in diesem Bericht beschrieben.

1.4 Frühere Aufträge und Berichte

- Aufträge:	4/79,	ISETH,	Fr.	98'800.--
	25/79,	IGP,	Fr.	106'500.--
	45/80,	ISETH,	Fr.	300'000.--
	26/82,	ISETH,	Fr.	153'000.--
	19/85,	ISETH,	Fr.	71'457.--
	früher:		Fr.	729'757.--
	18/85,	IVT,	Fr.	98'600.--
	DQM-2	Total:	Fr.	828'357.--

Zu dieser Summe sind interne Aufwendungen der ETHZ hinzuzufügen. Ferner ist zu berücksichtigen, dass der eingebaute Kreisel vom BAMF unentgeltlich leihweise überlassen wurde.

Die genannte Summe mag - im Nachhinein zurecht - als sehr hoch erscheinen, dennoch ist dies der Preis der heutzutage für solche komplexe, in der Entwicklung sehr arbeitsintensive Projekte bezahlt werden muss, was nicht zuletzt auch am Preis der heute auf dem Markt in zahlreichen Varianten angebotenen Messgeräten abgelesen werden kann. In den USA beispielsweise steht zur Zeit ein Gerät für die automatische Erfassung und Auswertung von Bildern der Strassenoberfläche kurz vor der definitiven Fertigstellung, wobei bisher gut 2.3 Millionen Dollar an Entwicklungskosten verbraucht wurden.

- Berichte und Artikel

H. Matthias, H. Wüst
Dynamische Profilaufnahme auf Strassen, Bericht Nr. 19 des Institutes für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich, Dezember 1978;

S. Baradun, H. Matthias
Ein Meßsystem zur dynamischen Aufnahme der Ebenheit im Querprofil von Strassen - Forschungsprojekt DQM-2, IGP-Bericht Nr. 60, Zürich, August 1982;

H. Grob, G. Bachner, S. Huschek
DQM-2 - Ein Gerät zur dynamischen Querprofilmessung auf Strassen, Zwischenbericht zu FA 4/79, 45/80 und 26/82, ISETH, Zürich, März 1985.

2. Technische Beschreibung

Das DQM-2 Messgerät besteht aus zwei Hauptteilen:

- Anhänger mit Aufnahmeoptik, Blitz, Kreisel etc.
- Zugfahrzeug mit Computersystem und Messhardware.

2.1 Anhänger

Der Anhänger (s. Abb. 1) weist im wesentlichen eine einzige, hinter einer langen Deichsel montierte Achse auf, ist 6 m lang und ca. 500 kg schwer. Vorn an der Deichsel ist eine CCD-Kamera (8) aufgehängt, der ein anamorphotisches Objektiv mit einer Irisblende vorgesetzt ist. Das Objektiv dehnt das Bild in vertikaler Richtung um das 20-fache, so dass die sehr lange Profillinie besser dem Bildformat der Kamera angepasst wird. Ebenfalls im Kameragehäuse wurde ein Belichtungsmesser eingebaut, der die Helligkeit des Belages im Gebiet des Blitzes misst.

Oberhalb der Kamera ist ein Kreiselsystem montiert, das die Lage der Kamera im Raum feststellt und dem Computer weitergibt. Der Magnetkompass (1) wird zum Aufstarten des Kreisels gebraucht. Eine wasserdicht eingeschlossene Photodiode (2) auf dem Blitzgehäuse misst die Umgebungshelligkeit.

Die Aufnahmelichtquelle besteht aus einer langen Blitzröhre die in ein Gehäuse, der Blitzblende (6) eingebaut ist. Mit einer recht aufwendigen Optik aus Spiegeln und Zylinderlinsen wird ein langer, schmaler Lichtstreifen auf den Boden projiziert. Die zum Blitz gehörende Elektronik (4) ist wie die Kreisel-Elektronik (3) über der Anhängerachse angebracht. Ein Kühlaggregat schützt das System vor Überhitzung im Sommer.

Die Scheinwerfer (5) dienen nur dazu, bei Dunkelheit das Bildfeld zu Kontrollzwecken zu beleuchten, haben aber für die eigentliche Messung keine Bedeutung.
Die Verbindung vom Anhänger zum Zugfahrzeug erfolgt über 14 mehradrige Kabel mit wasserdichten Steckverbindungen.

2.2 Zugfahrzeug

Als Zugfahrzeug dient ein RENAULT-Lieferwagen Typ Master T 35 in einer Spezialversion. Im Zugfahrzeug befindet sich neben dem Aufnahmesystem, welches unten beschrieben wird, ein Drehstrom-Generator (3x380 V/50Hz; 6 kW) und eine USV-Anlage (220V/1kW), welche die Stromversorgung des gesamten Systems sicherstellen. Im Sommer kann zusätzlich eine Klimaanlage eingeschaltet werden.

Die Meßsteuerung selbst besteht aus mehreren Komponenten, die auf einem fahrbaren Tisch eingebaut sind und so auch ausserhalb des Zugfahrzeuges betrieben werden können. Einen Überblick über das System gibt Abb. 2.

Ansicht des DQM-2-Messgerätes

Messanhänger auf der Fahrt

Nahaufnahme des Messanhängers mit Bordcomputer und Steuerpult

2.3 Das Messprinzip des DQM-2

Während der Fahrt wird mit dem Blitzaggregat ein etwa 4.5 m langer und 3 cm breiter Lichtstreifen quer zur Fahrbahn auf die Strassenoberfläche projiziert. Dieser Streifen, der im Querprofil mit der Gestalt der Strassenoberfläche identisch ist, wird von der Videokamera aufgenommen (Abb. 3). Der verwendete Kameratyp enthält als bildaufnehmendes Element einen CCD (Carged-Coupled-Device) mit einer Auflösung von 240 Zeilen à 320 Punkten. Um eine bessere Vertikalauflösung zu erreichen wurde die Kamera aber um 90° verdreht montiert, so dass deren Bildebene nun 240 Siliziumdioden (Pixel) in horizontaler und 320 in vertikaler Richtung enthält. Das anamorphotische Objektiv bildet die schmale Objektebene (320x4500 mm) auf die nahezu quadratische Bildebene ab. Somit ergibt sich in vertikaler Richtung eine Auflösung von 1 mm, in horizontaler eine solche von ca. 19 mm.

Die Profildetektion erfolgt auf einfache Weise: Entsprechend der Lichtintensität der Objektpunkte erhalten die einzelnen Siliziumdioden unterschiedliche Lichtmengen Qv. Das Signal, das man über eine vertikale Diodenzeile erhält, sieht etwa so aus wie in Abb. 4 gezeigt. Beim Überqueren der Lichtlinie steigt die Lichtmenge an und fällt dann wieder ab. Mit X1 wird diejenige Diodennummer bezeichnet, bei der die Lichtmenge zum ersten Mal einen vorgegebenen Schwellwert überschreitet, mit X2 diejenige, nach der die Schwelle wieder unterschritten wird. Das Profilbild wird dann als Streifen aller 240 Werte X1 und X2 gebildet.

Der Schwellwert QVS wird wegen der Inhomogenität des Blitzstreifens für jede Kolonne anders gesetzt. Das Bild wird mit normaler TV-Rate ausgelesen, d.h. eine Kolonne muss in 64 Mikrosekunden ausgewertet und die Werte X1 und X2 müssen bestimmt werden. Deshalb wird das Auslesen weitgehend hardwaremässig gelöst: Zu Beginn gibt der Steuercomputer einen Schwellwert über eine parallele Schnittstelle aus. Dieser wird automatisch eingestellt durch die Blitzintensität (diese ist wiederum abhängig von den Lichtverhältnissen, die mittels Umfeldlichtdetektor gemessen werden), die Blende der Videokamera und die Verstärkung der Videokamera. Dann wird die Bildzeile Pixel um Pixel aus der Kamera geschoben, digital gewandelt und von einem digitalen Komparator mit dem Schwellwert verglichen. Sobald der Schwellwert überschritten wurde, wird die Nummer des zugehörigen Pixels(X1) gespeichert und entsprechendes erfolgt beim nächsten Unterschreiten (X2). Ist die ganze Kolonne ausgelesen, liest der Computer X1 und X2 ein und gibt den Schwellwert für die nächste Kolonne aus usw..

Sind alle 240 Werte gewonnen, so wird die gesamte Profillinie auf den Monitor gezeichnet, und auf das Magnetband werden ausser den X1 und X2-Werten noch weitere Angaben (Profilnummer, Neigung, Kilometer, Strassenbelag etc.) geschrieben. Es werden noch keinerlei Mulden und andere Profilwerte bestimmt. Die eigentliche Auswertung erfolgt erst nach der Messfahrt auf einem leistungsfähigeren Computersystem.

2.4 Steuerung des Messablaufes

Zentraler Steuerteil ist ein PDP-11/23 Computer. Daran angeschlossen als Peripherie sind (Abb. 5):

- ein Terminal (Typ VT200) zur Bedienung des Computers,
- eine Dual-Floppystation, von der das System und das Messprogramm geladen werden,
- eine Magnetband-Station, wo die Profildaten aufgezeichnet werden,
- eine Operateur-Tastatur, mit der bei der Messfahrt verschiedene Parameter verändert werden können,

- über eine weitere serielle Schnittstelle wird die Irisblende im Kamera-Objektiv gesteuert und die Belagshelligkeit gemessen,
- verschiedene PDP-Bus-(Q-Bus)-Karten die mit weiterer Elektronik zusammen Messwerte aufnehmen oder Funktionen steuern.

Diese zusätzlichen Karten übernehmen folgende Funktionen:

- Ein spezieller A/D-Wandler (Synchron-Wandler) übernimmt das Signal des Kreisels und gibt es als zwei 12-Bit-Werte (Längs- und Querneigung) über eine Parallel-Karte an den Computer weiter.
- Das Kamerasignal gelangt einerseits zu einem Schwarz-Weiss-Monitor und andererseits über einen weiteren A/D-Wandler in das Computer-System.
- Die Umgebungshelligkeit wird auf dieselbe Weise eingelesen.
- Ein mit der Tachometerwelle verbundener Weggeber gibt Impulssignale an das Computersystem, die von einem Zähler verarbeitet werden und die zurückgelegte Strecke anzeigen.
- Schliesslich sorgen weitere Karten für die zeitliche Steuerung all dieser Vorgänge und lösen bei Bedarf den Blitz aus.

Während der Fahrt kann der Operator verschiedene Parameter ändern. Zu diesem Zweck steht ihm ein spezielles Tastenfeld, das Operator-Keyboard zur Verfügung, das über eine RS 232-Schnittstelle mit dem PDP verbunden ist.

Die Kontrolle des Messablaufes ist über einen s/w-Monitor möglich. Ausser dem direkten Bild der Kamera erscheinen dort nach jeder Aufnahme die Profillinie und verschiedene Systemparameter (Abb. 6).

Am häufigsten ist wohl eine Korrektur der Belichtung nötig, da die automatische Regelung nicht immer das Optimum findet und zudem etwas langsam ist (Reaktionszeit ca. 1 Sek.). Eine solche Korrektur kann auf verschiedene Arten erfolgen:

- Änderung der Blitzintensität mit den Tasten Blitz- und Blitz+;
- Korrektur der Schwellwerte, wobei sich diese Korrektur immer auf alle 240 Kolonnen auswirkt. Wie man sich leicht vorstellen kann, entspricht eine Erhöhung einer schwächeren Belichtung und ergibt eine dünnere Profillinie;
- Veränderung des Blendenwertes an der Videokamera mit Blende- bzw. Blende+.

Mit einer weiteren Taste kann an einem beliebigen Ort ein sogenanntes Spontanprofil ausgelöst werden, im Gegensatz zu den regulären Profilen, die in konstanten, vorgewählten Intervallen aufgenommen werden.

Es ist auch möglich, zu jedem einzelnen Profil noch Angaben über den Strassenbelag oder Kunstbauten anzugeben, die auch auf Band aufgezeichnet werden. Die Möglichkeiten sind:

Beläge:
- Asphalt
- Spezialasphalt
- Beton
- Spezialbeton

Kunstbauten:
- Tunnel
- Brücke
- Galerie

In ähnlicher Weise gibt es noch Tasten "Stein", "Fuge" und "Deckel", die allerdings nach dem Drücken nur auf das nächste Profil wirken.

Einige Tasten werden beleuchtet, wenn deren Funktion aktiv ist.

2.5 Eichung

Wie schon erwähnt, verzerrt das anamorphotische Kameraobjektiv das Bild nicht nur so, dass die vertikale Achse gegenüber der horizontalen um den 20-fachen Betrag gestreckt wird. Zusätzlich entsteht auch eine sogenannte tonnenförmige Verzeichnung, vor allem in vertikaler Richtung, so dass horizontale Geraden im oberen Bildteil nach unten und im unteren Bildteil nach oben gekrümmt werden. Die Abweichungen betragen in der Objektebene bis 1 cm, also das Zehnfache der geforderten Genauigkeit und müssen daher unbedingt korrigiert werden. Ausserdem ist auch die projizierte Lichtlinie auf der Strasse keine exakte Gerade, so dass auch noch weitere kleine Fehler entstehen.

Die Korrektur dieser Abbildungsfehler wird im Prinzip so erreicht, dass mit der Kamera ein Rechteckgitter aufgenommen wird und das verzerrte Gitter, das in der Bildebene erscheint, dann mit Software weiterverarbeitet wird, so dass eine Abbildungsmatrix entsteht, die sich für eine Berechnung der Umkehrabbildung eignet.

Früher ist das Rechteckgitter so erzeugt worden, dass mit einer vertikalen Lämpchenreihe die verschiedenen Pixel in der Kamera einzeln angeleuchtet wurden. Dazu brauchte es auf dem Messfahrzeug eine spezielle Eichsoftware. Die ganze Prozedur dauerte sehr lange, und zudem wurde die Krümmung des Blitzes nicht erfasst. Es wurde deshalb ein neues Eichverfahren entwickelt: Ein langer, oben gefräster Aluminiumbalken ist an seiner Oberfläche abwechselnd weiss und schwarz gespritzt und lagert auf zwei mit Schrittmotoren versehenen Spindelhubgetrieben (s. Abb. 7). Die Schrittmotoren werden von einem Mikroprozessorensystem so gesteuert, dass der Balken sowohl an einem Ende allein abgesenkt oder angehoben werden kann, und auch eine exakte parallele Verschiebung möglich ist. Die Steuerung erzeugt auch Pulse, die über einen speziellen Anschluss auf den Weggeber-Eingang geleitet werden und so das Aufnahmeprogramm synchronisieren.

Bei einer Eichaufnahme wird der Balken zuerst bis zum oberen Bildrand angehoben und mit einer Wasserwaage horizontal gestellt. Auf dem Computer startet man nun das gewöhnliche Profilaufnahme-Programm, schliesst aber anstelle des Weggebers den entsprechenden Ausgang der Schrittmotorsteuerung an. Auf einen Knopfdruck wird der Balken nun langsam abgesenkt und in gleichmässiger Folge werden Profile aufgenommen. Es entsteht eine Serie von unterbrochenen Profilen. Die weissen Stellen des Balkens bilden natürlich so ein exaktes Rechteckgitter und da die Belichtung mit dem Aufnahmeblitz erfolgt, geht auch dessen Krümmung ein. Abb. 8 zeigt eine solche Eichserie. Dass nicht alle Flecken exakt positioniert sind und auch einige fehlen, spielt keine Rolle. Da nämlich die Verzeichnung des Objektivs sicher stetig und "gutmütig" ist, kann beim Auswerten der Eichdaten eine Ausgleichsrechnung vorgenommen werden.

Durch die maximal 23 Flecken eines Profils wird eine Parabel 2. Ordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate gelegt. Die seitlichen Abstände werden an einem Profil ungefähr in der Bildmitte ebenfalls in 2. Ordnung ausgeglichen. Wie Messungen gezeigt haben, werden senkrecht stehende Geraden nicht gekrümmt. Somit kann aus den Schnittpunkten der horizontalen Parablen und senkrechten Geraden durch die ausgeglichenen Punkte in der horizontalen Achse, eine Abbildungsmatrix erhalten werden, die den wirklichen Abbildungseigenschaften gut entspricht (s. Abb. 9).
Danach wird die Umkehrmatrix berechnet, welche die Abbildung des Profilbildes auf die Objektebene (Strasse) beschreibt (Abb. 10). Sie wird als File auf der Disk des Auswertecomputers gespeichert, und bei der Auswertung wird jedes Profilbild mit dieser Matrix wieder entzerrt.

Wie genau ist nun die Eichung? Aus Fehlerüberlegungen, die unten noch beschrieben werden und auch hier gelten, da ja ebenfalls Profile aufgenommen werden, erwartet

man pro Matrixpunkt einen durch die Aufnahmetechnik verursachten Fehler von etwa 0.5 mm. Da aber für jede Aufnahme eine Parabel über ca. 20 Punkte gemittelt wird, reduziert er sich auf ca. 0.1 mm.

Schlimmer wirken sich Fehler aus, die dadurch entstehen, dass der Eichbalken nicht ganz gerade ist. Vermutlich durch innere Spannungen ist er gegenwärtig um etwa 2 mm verbogen, und zwar asymmetrisch, etwa in der Form einer Parabel 3. Ordnung. Dieser Effekt ergäbe einen maximalen systematischen Fehler von 1 mm.

Da die Eichinterpolation mit einer Parabel 2. Ordnung erfolgt, wird dieser Fehler aber gut eliminiert. Dies zeigt sich dann so, dass der Referenzbalken, selbst als Profil aufgenommen und ausgewertet, nicht schnurgerade ist (Abb. 11 und 12), sondern eben diese Krümmung zeigt. Er weist aber zuoberst und zuunterst im Bildfeld, wo die Verzeichnungen extrem und entgegengesetzt sind, fast exakt dieselbe Form auf, was beweist, dass die Eichung dennoch gute Resultate liefert. Eine Genauigkeit von 0.3 mm im benutzten Bildfeld erscheint realistisch.

3. Auswertung der Rohprofildaten

Die zur Auswertung der Rohprofildaten notwendigen Programme wurden zuerst auf einer PDP 11-23 und später auf der ZIR-VAX "JANUS" auf dem Hönggerberg entwickelt und sind in PASCAL geschrieben.

3.1 Rohdaten

Nach einer Messfahrt liegen die Rohprofildaten im RT-11-Format auf Magnetband vor. Ein gesamtes Messfile enthält:

- Am Anfang einen sog. "Openrecord" mit der Länge von 3 Blocks à 512 Bytes, der allgemeine Angaben über die Messfahrt enthält, z.B. Operateur-Name, Wetter, Strassenzustand, Daten über die gemessene Strecke etc..

- Dann folgen die "Profilrecords"; jeder umfasst 3 Blocks und stellt ein Profil dar. Am Anfang des Profilrecords sind Daten wie Kilometerstand, Neigung etc. aufgezeichnet, dann die 2 x 240 Profilwerte (Pixelnummern, siehe 2.3) im Bereich von 2 bis 320.

- Die letzten 3 Blocks bilden den "Endrecord", der eigentlich eine Kopie des Openrecords ist. Nur einige Daten sind noch hinzugefügt, die zu Beginn noch unbekannt waren (Anzahl Profile, Anzahl Spontanprofile).

Ein solches Band kann auf der VAX-Tape-Station eingespannt werden. Beim Einlesen werden die Daten auf die Disk kopiert, wobei das Datenformat gleichzeitig ins VMS-Format gewandelt wird. Nun können die Rohdaten verarbeitet werden.

3.2 Die Auswerteprogramme

Das gesamte Programmpaket besteht aus 5 grösseren Programmen, die über ein Command-File mit Menü-Technik aufgerufen werden (s. Abb. 13).

Das abgebildete Hauptmenü verzweigt dann in weitere Sub-Menüs. Durch die vollständige Menü-Steuerung sind die Auswerteprogramme sehr benutzerfreundlich, und Bedienungsfehler sind weitgehend ausgeschlossen. Ausserdem wird auf Wunsch zu jedem gerade ausführbaren Befehl eine Erklärung auf dem Bildschirm gezeigt.

Vom Command-File aus können ausserdem VAX-spezifische Funktionen aufgerufen werden, so etwa An- und Abmelden der Bandstation. Der Benutzer braucht daher das VAX-Betriebssystem nicht zu kennen; das Command-File erledigt zum Beispiel die Initialisierung der Tape-Station zum Lesen des PDP-RT-11-Band-Formates.

Bei der Auswerteprozedur werden zu jedem Rohdatenfile 3 weitere Files erzeugt (siehe Abb. 14):

- Textfile, mit der Extention .Txx; es enthält im wesentlichen die Daten aus dem Open- und Endrecord, ist aber als editierbares Textfile formatiert (weiter hinten ist ein solcher Text gedruckt).

- Global-Datenfile, mit der Extention .Dxx; in diesem sind ebenfalls Daten aus dem Open- und Endrecord angelegt, die jedoch nur intern von den Auswerte- und Dokumentationsprogrammen gebraucht werden und für den Benutzer unsichtbar bleiben.

- Das Archiv-Datenfile (Extention .Axx) schliesslich enthält die ausgewerteten Profile mit allen Profilkennwerten. Durch Datenkompression ist es aber dennoch kürzer als das Rohdaten-File und eignet sich zur Archivierung. Welche Files und Daten die einzelnen Programme erzeugen und benutzen ist in Abb. 14 dargestellt.

Im Folgenden soll nur ganz kurz auf die Funktion der Programmteile eingegangen werden, für eine genauere Beschreibung gibt es eine Software-Dokumentation.

Das Rohdatenfile wird eingelesen mit dem Programmteil PRTMNU. Dann werden Open- und Endrecord gesucht und daraus das Textfile und das Global-Datenfile erzeugt. Dieses Programm **muss** daher aktiviert worden sein, bevor man die anderen Programme benutzen kann, die da sind:

PRIMNU: Lässt einen direkten Blick auf die Profilrecords zu. Die Werte am Anfang des Records (Neigung etc.) werden auf den Schirm geschrieben und die beiden Linien, bestehend aus den X1- und X2-Werten, erscheinen auf dem Schirm. So können Profilrecords direkt inspiziert werden. Es ist auch möglich, alle diese Daten in Tabellenform auf den Terminal-Printer zu drucken.

PRAMNU: Das eigentliche Auswerteprogramm. Die X1-X2-Linien werden zuerst korrigiert, d.h. Löcher und offensichtlich unbrauchbare Profilstücke werden durch plausible Geradenstücke ersetzt, die Ränder werden nach innen verschoben, bis evtl. Kanten (Randsteine, Wasserrinnen) ausserhalb der Ränder liegen und der Mittelwert zwischen den beiden Linien wird als Profillinie berechnet. Dann erfolgt die Bildentzerrung, die durch die Abbildung mit dem nicht nur anamorphotisch verzerrenden Objektiv entstanden ist, wobei die Verzerrung im Eichdatenfile EICH.DAT gespeichert ist. Nun liegt die wahre Profillinie vor.
Darauf werden alle Profilkennwerte (Latten- und Wassertiefen, Flächenwerte, Querneigung) wie nachfolgend beschrieben berechnet und in das Archivdatenfile übertragen.

3.3 Auswertealgorithmen

Mulden: Zuerst wird die Profillinie "Median-gefiltert" und so geglättet. Kleinste Mulden und kleine Ausreisser fallen dann heraus. Bei der Median-Filterung werden jeweils um einen Profilpunkt gleichviele linke wie rechte Nachbarn herausgegriffen und der Grösse nach geordnet. Von diesen Punkten wird derjenige, der nun in der Mitte steht, anstelle des ursprünglichen Profilpunktes eingesetzt. Median-7 bedeutet bespielsweise, dass 3 linke und 3 rechte Nachbarn gewählt werden. Nach dem Filtern wird die Profillinie differenziert und die Ableitung untersucht. Eine Mulde ist gefunden, wenn diese das Vorzeichen von minus nach plus wechselt. Stösst das Programm auf eine solche Stelle, so wird darauf an der ungefilterten Profillinie nach dem exakten Minimum gesucht, da durch die Median-Filterung die Mulden flache Böden erhalten. Alle so gefundenen Mulden werden vorerst in einer Liste gespeichert.

Der Übersichtlichkeit halber sollen aber nicht mehr als je 2 Wasser- resp. Lattenwerte pro Fahrstreifen bezeichnet werden. Deshalb wird die Anzahl Mulden reduziert, indem zuerst von zwei Mulden, die näher als 20 cm beieinanderliegen die kleinere wieder aus der Mul-

denliste eliminiert wird.
Falls die Liste immer noch zu viele Mulden umfasst, werden pro Fahrstreifen nur diejenigen zwei mit den grössten Werten (T oder t) ausgewählt.

Wasserwerte: Um die Wassermulden zu erhalten, wird die Profillinie zuerst mit Hilfe der Querneigungsangabe der Kreiselplattform in die wirkliche Lage gedreht. Dann findet der oben beschriebene"Mulden-Algorithmus" diejenigen Stellen, wo das Wasser am tiefsten liegt. Zur Bestimmung der Wassertiefe wird nun von jeder Mulde aus geschaut, wohin das Wasser abfliesst. Es fliesst natürlich nach derjenigen Seite ab, wo die Profillinie eine kleinere maximale Erhebung zeigt. Der Wasserspiegel reicht dann gerade bis zu dieser Höhe.
Das Programm sucht daher von einer Wassermulde nach links und rechts je den höchsten Profilpunkt. Das kleinere der beiden Maxima ergibt die Höhe des Wasserspiegels, und die Differenz zum Muldenminimum ist die gesuchte Wassertiefe.

Latten: Um die Lattenwerte bestimmen zu können, müssen zuerst eine oder zwei Latten auf das Profil gelegt werden. Dies erfolgt durch eine schrittweise Iteration. Abb. 15 zeigt den Vorgang mit der linken Latte:
Vom linken Profilrand her wird eine Latte (1) drehbar befestigt (Drehpunkt 01) und nach innen abgesenkt, bis sie entweder an einer Stelle des Profiles aufliegt oder der bei konvexem Profilverlauf nach rechts wandernde Schnittpunkt eine Mindestdistanz (istep Profilpunkte) von O1 entfernt liegt (Latte 2). (So wird verhindert, dass bei konvexem Profilverlauf am Rand das Verfahren stagniert). Nun wird der Berührungspunkt zum neuen Drehpunkt gemacht (O2) und das oben beschriebene Verfahren solange wiederholt, bis die Auflagepunkte eine fest gewählte Minimaldistanz auseinanderliegen (3).
Nun wird der neue Auflagepunkt (O4) zum Drehpunkt und die Latte wird von rechts abgesenkt ((4)-->(5)), bis sie links wieder aufliegt (O6). Um einen letzten entstandenen kleinen Fehler bei O4 zu korrigieren, wird das Verfahren nochmals mit Latte (6) um O6 ausgeführt. Am Schluss liegt die Latte sehr genau auf den beiden Buckeln.

Nun wendet das Programm denselben Algorithmus auf die rechte Latte an. Sind danach beide Latten gleich, wird nur noch eine berücksichtigt, sind sie verschieden, gibt es einen rechten und einen linken Fahrstreifenteil, getrennt vom Schnittpunkt der beiden Latten. Ein solches Profil wird als "Dachprofil" bezeichnet.
Selbstverständlich sieht das Programm einen "Notausgang" aus der Routine vor, falls das Interationsverfahren bei einem sehr ungünstigen Profil einmal nicht konvergieren sollte. Es wird dann eine Fehlermeldung ausgegeben; das Programm arbeitet aber weiter und berechnet alle übrigen Profilwerte trotzdem.

Lattenwerte: Nachdem die Latten gefunden sind, erfolgt die Bestimmung der Mulden gleich wie für die Wassermulden, nur wird die Profillinie vorher so gedreht, dass die jeweilige Latte horizontal zu liegen kommt. So findet man mit dem oben beschriebenen Mulden-Algorithmus die grössten Abstände von der Latte. Der Lattenwert ergibt sich dann durch die Differenz der Höhe des tiefsten Muldenpunktes und einem Auflagepunkt der Latte.

Mit PRAMNU können sowohl einzelne Profile wie auch eine ganze Serie vollautomatisch ausgewertet werden. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit ist natürlich abhängig von der Leistungsfähigkeit des verwendeten Computersystems. Sie beträgt bei der JANUS-VAX am ZIR mit durchschnittlicher Belastung (ca. 25 Users) etwa 200 Profile pro Minute.

PRDMNU: Mit diesem Programm kann ein bereits ausgewertetes Einzelprofil dargestellt werden, entweder als Bild auf dem Terminalschirm, das auch auf den Printer ausgegeben werden kann, (siehe als Beispiel Abb. 36) oder als Profil-Dokumentation in Tabellenform (Abb.38).

PRSMNU: Dieses Programm dient dem Erstellen von Statistiken über den Strassenzustand. Alle Profilwerte können als Säulendiagramme dargestellt werden. Die Streckenausschnitte und die Auflösung können in weiten Grenzen verändert werden. Auch der Neigungsverlauf und ein Längsprofil der gefahrenen Strecke (gewonnen aus der Längsneigungsangabe des Kreisels) kann gezeichnet werden.
Es ist möglich, extreme Profilwerte speziell zu bezeichnen und den Strassenbelag oder Kunstbauten als Balken unten ins Bild einzublenden. So ist z.B. sehr schön die Änderung der Spurrinnentiefe bei einem Belagswechsel sichtbar. Einige Beispiele zu den Darstellungsmöglichkeiten der Einzelprofile und den Statistiken folgen im nächsten Kapitel.

Zusätzlich gibt es noch das Programm PREMNU. Es wird bei der Profilauswertung nicht gebraucht, sondern erzeugt aus den Daten, die bei einer Eichung anfallen, die Eichdatentabelle EICH.DAT wie dies in 2.5 beschrieben ist.

4. Ergebnisse

1987 wurden mit dem DQM-2 verschiedene Versuchsfahrten und mehrere statische Tests ausgeführt.

4.1 Statische Tests

Zum überprüfen der verschiedenen Querprofil-Messgeräte gibt es in der Bauhalle des HIF-Gebäudes ein Testprofil, das aus gebogenen, grau gespritzten Aluminiumplatten besteht, die auf einem Eisenbalken montiert sind.

Die verschiedenen Fehlerquellen sollen im Folgenden genauer betrachtet werden.

4.1.1 Quantisierungsfehler

Hier handelt es sich um Fehler, die dadurch entstehen, dass das Bild aus Pixels zusammengesetzt ist. In der Objektebene beträgt deren Abstand (= Auflösung) in vertikaler Richtung (h) 1 mm und horizontal (q) 19 mm. Im ungünstigsten Fall liegt ein Punkt gerade in der Mitte zwischen zwei Pixels. Dann ist $\Delta h = 0.5$ mm und $\Delta q = 10$ mm. Da die Profillinie aus 2 Werten (X1 und X2) gewonnen wird, reduziert sich der Fehler in h um $\sqrt{2}$ und man erhält $\Delta h = 0.3$ mm.

4.1.2 Fehler durch Abbildung

- Belichtung:
  Getestet wurde der Einfluss der Belichtung auf die Profillinie. Zu diesem Zweck wurde am Testprofil eine Aufnahmeserie mit verschiedenen Belichtungsstärken gemacht. Die Auswertung mit dem Statistik-Programm zeigt Abb. 16. Bei km 0 ist die Belichtung normal; sie wurde dann vermindert bis keine Profile mehr erschienen (km 12-15), und wieder erhöht bis zu einer massiven Überbelichtung.

  Die Abweichungen vom Mittelwert betragen ca. 0.3 mm und zeigen keine Abhängigkeit von der Belichtungsstärke. Es zeigt sich also nur der Quantisierungsfehler, und der Belichtungseinfluss kann vernachlässigt werden. (Bei der Lücke im Diagramm handelt es sich um Profile, die zu wenig belichtet waren und vom Statistikprogramm richtigerweise nicht mehr berücksichtigt wurden).

- Abbildungsverzeichnungen:
  Weiter wurde der Einfluss der Lage des Profiles in der Objektebene getestet. Dieser Test ist besonders empfindlich auf die Objektiv-Entzerrung, da das Abbildungsobjektiv am oberen Bildrand eine Gerade stark nach unten krümmt und am unteren Rand nach oben. Während der Aufnahmeserie wurde deshalb das Testprofil parallel von unten nach oben verschoben.

  Nur in der obersten Extremlage wurde in den Bildecken eine Abweichung von ca. 3 mm gefunden. Diese Lage kommt aber bei der Fahrt nicht vor, da sich ja die Strassenoberfläche immer bei der Lage der Räder befindet und der Anhänger nicht 15 cm zusammengestaucht werden kann.

  In Abb. 17 wurde das Profil kontinuierlich von oben durch das Bildfeld abgesenkt und die Lattenwerte aufgezeichnet. Die Abweichungen vom Mittel betragen maximal 0.8 mm. (In der letzten Säule ist das Profil unten aus dem Bildfeld geraten und wurde am Rand abgeschnitten, deshalb die kleinere Lattentiefe). Nach Abzug des Quantisierungsfehlers ergibt sich ein Fehlerbeitrag von etwa 0.5 mm.

Als weiterer Test wurde die Neigung des Testprofiles verändert (km 0: horizontal, km 1: Neigung extrem nach links, km 3: Neigung extrem nach rechts). Funktionieren die Entzerrung und der Auswerte-Algorithmus richtig, so müssen die Lattenwerte konstant bleiben. Wie aus Abb. 18 ersichtlich ist, verschwindet der Effekt im Quantisierungsrauschen.

Seitliche Verschiebungen (Δq) lagen in allen Fällen unter 5 cm, d.h. die seitliche Lage einer Spurrinne wird auf diesen Betrag genau gemessen.

Schliesslich wurde eine DQM-2-Aufnahme des Testprofiles mit einer Aufnahme mit dem SQM, einem statischen Messgerät, das mit Ultraschall funktioniert, verglichen (Abb. 19). Die beiden Profillinien sind parktisch deckungsgleich; die maximale Abweichung beträgt ca. 1 mm.

4.1.3 Gesamtfehler

Dieser lässt sich nun aus den oben beschriebenen Tests ungefähr abschätzen:

- Eichungsfehler (systematischer Fehler) $\Delta h = 0.3$ mm
- Quantisierungsfehler $\Delta h = 0.3$ mm
- Fehler bei extremer Verschiebung $\Delta h = 0.5$ mm

Daraus ergibt sich ein Erwartungswert des Gesamtfehlers für einen Einzelpunkt bei stehendem Gerät von ca. 0.7 mm.

Den grössten Anteil liefern die Extremlagen des Profiles am oberen und unteren Bildrand, die aber im praktischen Betrieb nicht vorkommen können, so dass man sicher mit gutem Gewissen diesen Bereich etwa halbieren darf und dann einen Fehler von etwa 0.5 mm erhält. Für die Latten- und Wasserwerte wird der Fehler um $\sqrt{2}$ grösser, da ein Wasserwert durch zwei Profilpunkte gewonnen wird (einem Minimun in der Wassermulde und dem nebenliegenden "Buckel"), ein Lattenwert durch die Lattenhöhe (die grob betrachtet als Mittelwert von 2 Profilpunkten aufgefasst werden kann) und die Muldentiefe. Für die Lattenwerte kommt man so auf eine zu erwartende Genauigkeit von 0.7 mm.

Dies gilt bei den glatten Oberflächen. Meistens ist aber die Körnigkeit der Strassenoberfläche grösser als 1 mm, so dass die theoretische Genauigkeit von 0.7 mm gar nicht erreicht werden kann und auch wenig Sinn ergibt. In der Praxis muss wohl mit einem Fehler gerechnet werden, der etwa in der Grössenordnung der Oberflächenunebenheit liegt.

Bei den Wassertiefen kommt noch ein weiterer Effekt hinzu. Wassertiefen sind natürlich von der Querneigung des Profiles abhängig, wobei besonders bei flachen Profilen diese Abhängigkeit stark ausgeprägt ist.

Anhand von drei verschiedenen Profilen (Abb. 20), einem sehr flachen, einem mit schmalen und einem mit breiten Spurrinnen wurde die Variation der t-Werte in Abhängigkeit der Querneigung untersucht. Dazu wurden jeweils im Auswerteprogramm die Querneigungen korrigiert und die Profile neu ausgewertet. Das Ergebnis zeigt Abb. 21.

Die Variation ist bei den flachen Profilen grösser, da der höchste Punkt, über den das Wasser abfliessen muss, vom tiefsten weit entfernt liegt. So ergibt eine leichte Verdrehung einen grösseren Höhenunterschied. Bei schmalen Rinnen ist der Effekt kleiner, steigt aber ebenfalls an, wenn das Profil sehr flach liegt.

Die maximale Variation beträgt in diesem Diagramm ca. 15 mm/°. Im Mittel liegt sie bei flachen Profilen (Nr. 360) bei etwa 10 mm/°, bei ausgeprägter Spurbildung bei 4 mm/°.

Betreibt man Statistik, wird die Abhängigkeit kleiner, da sich Änderungen manchmal aufheben. Über ein 4 km langes Stück Autobahn wurde die Querneigung durch Korrektur verändert. Das Ergebnis zeigen die Abb. 22 - 27.

Die Abhängigkeit beträgt also in der Praxis etwa 5 mm/°. Das bedeutet, dass die Stabilität der Kreiselplattform mit einer Drift von ca. 0.2°/h (Spezifikation) für eine halbe Stunde Messzeit gut ausreicht, aber dass der Fehler beim Aufstarten (bis 0.6° gemäss Spezifikation) zu gross ist. Die Wassertiefen könnten dann bis um 3 mm falsch sein. Wie Beobachtungen zeigten, ist zum Glück der Aufstartvorgang in den allermeisten Fällen wesentlich genauer (ca. 0.2°), aber dies ist nicht garantiert, so dass sich eine Verbesserung lohnen würde (s. auch 5.2).

Die Auflösung der Kreiselangaben beträgt 12 Bit für den ganzen Kreis, also 0.09°, so dass noch ein Quantisierungsfehler von maximal 0.05° (im Mittel 0,02°) dazugezählt werden muss.

4.2 Dynamische Tests und Versuchsfahrten

Nun war noch zu testen, ob die geforderte Genauigkeit auch während der Fahrt, bis zu einer Messgeschwindigkeit von 80 km/h noch erreicht wird. Allerdings ist dies mit Schwierigkeiten verbunden, da man zum voraus nicht genau bestimmen kann, wo in der Fahrt ein Blitz ausgelöst wird. Die Unsicherheit beträgt einige Dutzend cm. Dies wurde so gelöst, dass an Orten, wo ein Profil ausgelöst wurde, ein Beobachter versuchte, den Ort des Blitzes, der vom vorbeifahrenden DQM-2 ausgelöst worden war, möglichst genau festzuhalten. An dieser Stelle wurde dann mit dem "Planum", einem mechanisch arbeitenden Profilaufzeichnungsgerät mit einem Tastrad, ein Vergleichsprofil aufgenommen. Zusätzlich wurde an derselben Stelle auch mit dem DQM-2 ein zweites Profil im Stand aufgezeichnet.

Einige Ergebnisse der Vergleichsmessungen sind in den Abb. 28a-d und Abb. 29a-e zu sehen. Teilweise stimmen die Profile sehr genau überein, vor allem die Planum--Profile mit denjenigen DQM-Profilen, die im Stand aufgenommen worden sind. An einigen Stellen betragen die Abweichungen zu den in Fahrt aufgenommenen Profilen jedoch mehrere mm was ziemlich sicher mit der schlechten Ortung des Blitzes bei 80 km/h zu tun hat.

Nun wurde noch untersucht, wie sich das DQM-2 beim Messen von längeren Strecken verhält. Um die Reproduzierbarkeit zu testen, wurde die Autobahnstrecke N3 zwischen den Anschlüssen Thalwil und Wädenswil insgesamt 4 mal befahren. Vor der 3. Fahrt (File TALWAE.VO5) wurde der Kreisel neu gestartet. Die Abbildungen 30-33 zeigen die statistische Auswertung. Es zeigte sich, dass die Lattenwerte gut innerhalb der Fehlergrenze von 1 mm bleiben.

Die Kreiselwerte waren nach dem Neustart erstaunlich genau, vor der 4. Fahrt betrug die driftbedingte Abweichung allerdings bereits 0.2° nach 20 Minuten Fahrt, was die Abweichungen der Wasserwerte im File TALWAE.v07 erklärt. Nach Berücksichtigung der maximal möglichen Quantisierungsfehler ergibt sich gerade 0.1°, das Maximum des Erlaubten.

Die dadurch verursachten Abweichungen der Wasserwerte liegen bei maximal 1.5 mm, der Fehler zum wahren Wert dürfte mit 1 mm gerade noch innerhalb der gewünschten Grenze liegen. Allerdings kann dies aus den oben genannten Gründen nicht immer garantiert werden.

Ausserdem stellte sich heraus, dass die zu Beginn der Entwicklung geforderte Kadenz von 2 Profilen pro Sekunde nicht erreicht wird. Bei Tageslicht begrenzt die Leistung der Blitzelektronik die Aufnahmefrequenz. Die maximale Blitzfolge beträgt dann etwa 0.8 pro Sek., mehr Profile können nicht aufgenommen werden. Dies bedeutet, dass bei maximaler Fahrgeschwindigkeit (80 km/h gemäss Strassenverkehrsgesetz) das Aufnahme-Intervall mindestens 30 m betragen muss.

Mit verminderter Blitzleistung (Nachtmessung) ist eine Erhöhung der Dichte auf 20 m bei 80 km/h möglich, bei höherer Aufnahmefrequenz wird der Steuercomputer zu langsam.

4.3 Einige illustrative Beispiele zu den Möglichkeiten der Auswerteprogramme

Zuerst ist der als Text formatierte Openrecord abgebildet (Abb. 34). Ausser einigen formalen Angaben erkennt man unten eine Streckentabelle, aus der abzulesen ist, wo und wie dicht die Profilaufnahme erfolgte. Hier z.B. zwischen 0.5 und 30 km vom Start an, wobei alle 30 m ein Profil aufgenommen wurde. Diese Angaben werden vor dem Start dem Steuercomputer im Messfahrzeug eingegeben. Bis zu 5 Teilstrecken sind möglich.

Abb. 35 zeigt eine Profilaufnahme direkt ab dem Rohdatenfile. Zur besseren Sichtbarkeit kann das Bild wie im Beispiel in der vertikalen Richtung gestreckt werden. Deshalb sind in vertikaler Richtung nicht 320 Pixel sichtbar.

Man erkennt die beiden Schwellwertlinien X1 und X2, sowie die Mittellinie, die der aufgenommenen Profillinie ohne jede Korrektur entspricht. Rechts am Rand ist andeutungsweise die Pannenstreifenmarkierung sichtbar, dort kann die Profillinie nicht ausgewertet werden (mehr dazu in 5.2). Man beachte, dass die Koordinaten-Einheiten in Pixel angegeben sind, da ja das direkte Bild auf der Kameraebene gezeigt wird.

Im nächsten Bild (Abb. 36) ist dasselbe Profil nun entzerrt, ausgewertet und mit den Kennwerten T und t bezeichnet. Da die geforderte Genauigkeit im Millimeterbereich liegt, werden nur ganze Millimeter angegeben (im Gegensatz zu den Profilzeichnungen für die Genauigkeitstests, die Bezeichnungsart lässt sich wählen). Das Profil ist so dargestellt, wie es in Wirklichkeit liegt, allerdings 20-fach überhöht. Die Überhöhung lässt sich auch beliebig ändern, z.B. 1:40 für besonders flache Profile oder 1:10, wenn das Profil das Bildfeld sprengen würde.

Der oben angegebene Maßstab stimmt übrigens nur, wenn das Profil mit dem LA 50-Drucker im Mode "Rotated Print" gedruckt wird (s. die Beispiele für den Vergleich mit dem Planum), sonst ist es kleiner. Die Auflösung wird aber dadurch nicht schlechter.

Das Profil lässt sich auch so darstellen, wie man es vom Planum gewohnt ist: Die Regressionsgerade, deren Neigung als Neigung des Profiles definiert wird, verläuft dann horizontal (Abb. 37). Ein Pfeil zeigt die Richtung des Lotes an.

Für eine umfangreichere Dokumentation lassen sich die Profilwerte auch in Tabellenform ausgeben (Abb. 38). Zu den Werten T und t sind noch die Lagen der entsprechenden Mulden, die Fläche unter der (den) Latte(n) und die Wasserfläche (im Quer-

schnitt) aufgeführt. Die Profilqualität gibt an, wieviele Punkte in den Korrektur-Routinen ersetzt worden sind. Sie ist ein Mass für die Zuverlässigkeit einer Messung. Werte unter 50 bedeuten in der Regel gute Aufnahmen, d.h. von den 480 Werten sind gut 10% korrigiert worden.

Die folgenden Bilder zeigen einige Möglichkeiten des Statistikprogrammes. Bei den Beispielen handelt es sich um Messungen auf der Autobahn N1 vom Anschluss Zürich-Affoltern an Richtung Baden/Neuenhof, eine stark vom Schwerverkehr befahrene Strecke.

Abb. 39 zeigt den Querneigungsverlauf der Meßstrecke. Man erkennt deutlich, dass auf der Autobahn (ab km 4) die Querneigung abschnittweise ziemlich konstant bleibt, zwischendurch aber relativ schnell das Vorzeichen wechselt. Diese Stellen sind auch die gefährlichen, da dort das Wasser schlecht abfliesst und sich bei grösseren Lattenwerten auch entsprechende Wassertiefen bilden, siehe z.B. das Gebiet bei km 15.5 in Abb. 48 (zu Beginn des Tunnels waren die Aufnahmen nicht brauchbar, weil die Belichtungsregelung nicht gut funktionierte (siehe Abschnitt 5.1)), deshalb der merkwürdige Verlauf der Querneigung: Der Computer zieht von einem Profil zum nächsten eine Gerade.

Ebenso kann die Längsneigung angegeben und dargestellt werden (Abb. 40). Aus der Längsneigung lässt sich nun durch Integration das Höhenprofil der befahrenen Strecke rekonstruieren, was einen anschaulichen Überblick gibt (Abb. 41): Der Start liegt bei der ETH-Hönggerberg. Dann geht es zur Ausfahrt ETH herunter (km 0.6), über eine Kuppe weiter und dann die Schauenbergstrasse weiter abwärts bis zum Zehntenhausplatz (km 2.4). Bei der kleinen, nach unten gerichteten Spitze (km 2.8) handelt es sich um die Bahnunterführung der Wehntalerstrasse. Bei km 4.1 beginnt die Autobahnauffahrt und bei 4.3 befindet man sich im Gubristtunnel etc..

Man erkennt auch, dass sich auf Wunsch die Lage der Kunstbauten auf den Statistikdiagrammen darstellen lässt (falls der Operateur während der Fahrt die entsprechenden Tasten gedrückt hat). Ebenso können die Beläge bezeichnet werden, wie z.B. in den vorangegangenen Diagrammen der Autobahn N3: Deutlich ist sichtbar, wie im Bereich eines neueren Belages (mit "Asphalt" bezeichnet) die Lattenwerte geringer werden (Abb. 33).

Abb. 42 zeigt eine Statistik über die Lattenwerte auf der ganzen Strecke. Die Höhe der fest ausgezogenen Balken entspricht dem Mittelwert aller Lattenwerte derjenigen Profile, die sich innerhalb des Balkens befinden und eine gewisse Qualität erreichen; d.h. es dürfen bei der Auswertung nicht zuviele Löcher oder sonst unbrauchbare Profilstücke vorgekommen sein. Die Grenze lässt sich verändern. Falls auf einem Streckenstück keine brauchbaren Profile vorhanden sind, wird dies mit einem speziellen Muster angezeigt (z.B. zwischen km 5.2 und 5.8), damit diese Gebiete von solchen unterschieden werden können, bei denen die Muldentiefe tatsächlich Null ist.

Die gestrichelt gezeichneten Balken bedeuten den oberen Bereich der Standardabweichung der Werte und sind ein Mass für die Streuung der Kennwerte. In diesem Beispiel beträgt die Balkenbreite ca. 600 m, mit einem Profilintervall von 30 m wurde also über jeweils zwanzig Profile gemittelt.

Eine Toleranz-Schwelle lässt sich wählen, oberhalb welcher die Balken ausgefüllt (Mittelwerte über Toleranz) oder schraffiert (Standardabweichung) werden.

Die Standardabweichung kann auch ausgeschaltet werden, und die Säulenbreite ist in weiten Grenzen wählbar. Zusätzlich lassen sich Werte der linken oder der rechten Fahrbahnhälfte einzeln darstellen (Abb. 43). Werden beide Seiten berücksichtigt, so übernimmt das Statistikprogramm immer den grössten aller Werte.

Auch der Beginn und das Ende der Statistik-Strecke können vorgegeben werden. So ist es möglich, ein interessantes Gebiet mit einer "Lupe" zu betrachten (Abb. 44, Bereich km 14 bis km 17).

Gleichzeitig wurde noch eine andere Option verwendet. Verdächtige, schlechte Profile (mit grossen Tiefen) können sofort aufgespürt werden: Das Programm kann das schlechteste Profil jeder Säule speziell bezeichnen. Die Höhe des Pfeiles ergibt den Wert, dessen Lage entspricht der Lage des Profiles. Am Fusse der Säule wird die Profilnummer hingeschrieben, so dass das Profil mit dem Dokumentationsprogramm einzeln betrachtet werden kann. Hier fällt z.B. die Nummer 507 sofort auf. Tatsächlich handelt es sich um eine Strassenstelle auf der das Fahren bei Regen kein Vergnügen mehr ist (Abb. 45)!

Auch Flächenwerte lassen sich ebenso statistisch auswerten (Abb. 46 und 47).

Mit diesen Statistik-Routinen kann in kurzer Zeit ein recht guter Überblick über den Strassenzustand gewonnen werden. Auch ein ungeübter Benutzer findet sich dank der Menü-Steuerung schnell zurecht, besonders da die Programme zu jedem Befehl auf Bedarf eine Anleitung ausgeben.

Abb. 48 zeigt noch die Wassertiefen auf einem 3 km langen Ausschnitt. Man erkennt auf einen Blick, dass die Fahrbahn dringend sanierungsbedürftig ist.

5. Erfahrungen und Verbesserungsvorschläge

5.1 Probleme bei Messfahrten

a) Hardware-Probleme

Vor allem beim Messen "im Feld" gab es ab und zu Pannen und "Abstürze" des Computersystems. Einerseits ist das ganze Computersystem relativ alt, und die zusätzliche Elektronik ist weder aus elektronischer noch mechanischer Hinsicht stabil gebaut, so dass gerade bei der Fahrt Erschütterungen Fehler verursachen können.

b) Tageslicht

Bei hellem Tageslicht (Sonnenschein oder dünne Wolkendecke, Beleuchtungsstärken über 10'000 Lux) wird die Messung schwierig. Der Grund ist recht verblüffend und liegt darin, dass die Blitzblende am Anhänger selbst in der Mitte der Fahrbahn einen Schatten wirft.

Bei der Wahl der Schwellwerte durch den Steuercomputer, die für jede vertikale Bildzeile anders sind (s. Abschnitt 2.3), wird eine konstante Umgebungshelligkeit über den erfassten Bereich angenommen. Die Profillinie wird erkannt, wenn die gesamte Helligkeit (Blitz und Untergrund) den Schwellwert übersteigt. Fällt ein Schatten auf die Fahrbahn, so wird die Gesamthelligkeit geringer, und der Schwellwert wird unter Umständen nicht mehr überschritten, so dass dort Lücken in der Profillinie entstehen. Zur Korrektur können die Schwellwerte nur gesamthaft abgesenkt werden, was dann aber Überbelichtung in den anderen Bereichen bringt.

Allerdings sind Aufnahmen mit Lücken nur im Mittelteil meist dennoch brauchbar, besonders wenn nicht das gesamte Profilbild, sondern nur die Spurrinnentiefe interessieren. Das Auswerte-Programm ersetzt ja die Lücken durch Geradestücke und auf die Tiefe der Spurrinnen, die sich meist nicht im Mittelteil der Fahrbahn befinden, hat das dann kaum Einfluss.

Es ist aber trotzdem besser, bei sehr hellem Tageslicht keine Messungen durchzuführen.

c) Bodenmarkierungen

Betrachtet man das Messprinzip des DQM-2, so müsste man nach einer oberflächlichen Überlegung zum Schluss kommen, dass weisse Bodenmarkierungen (Mittelstreifen, Pannenstreifen etc.) keinen Einfluss auf die Aufnahme haben, die Profillinie wird dort nur etwas breiter. Leider macht hier helles Umfeldlicht einen Strich durch die Rechnung.

Weil nämlich der Blitz selbst nicht viel heller ist als helles Tageslicht, andererseits weisse Farbe das Licht etwa 10 mal besser reflektiert als ein durchschnittlicher Strassenbelag, wird natürlich bei einer solchen Markierung der Schwellwert vom Tageslicht allein überschritten. So werden zum Beispiel dann auf einer Autobahn Randmarkierung und Mittellinie als sehr breite Profillinien aufgenommen. Man erkennt in verzerrter Perspektive die Markierung (Abb. 49).

Das Auswerteprogramm behilft sich so, dass bei groben Unstetigkeiten in der Nähe der Ränder diese nach innen verschoben werden und so nur der stetige Teil der Profillinie ausgewertet wird.

Steigt allerdings die Fahrbahn gegen den Rand hin stark an, können die Rinnentiefen zu gering ausfallen.

d) Kreisel

Der auf der Kamera aufgesetzte Kreisel weist nicht in jedem Fall eine genügende Genauigkeit auf. Nach dem Aufstarten ist das System zwar während etwa einer halben Stunde bis auf 0.1 Grad stabil, aber beim Aufrichten selbst können gemäss Spezifikation Abweichungen vom Lot um bis 1° entstehen. Zum Glück erfolgt das Aufrichten meistens viel genauer, aber Abweichungen von 0.5° wurden schon beobachtet.

Dies hat einen Einfluss auf die Wassertiefen, wie im Abschnitt 4.2 bereits beschrieben worden ist.

e) Belichtungsregelung

Wie schon beschrieben, erfolgt die Regelung der Belichtung einer Profilaufnahme über den Steuercomputer automatisch. Es erfolgt jeweils eine Anpassung der Kamerablende, der Blitzleistung und der Schwellwerte in Abhängigkeit der Umfeldhelligkeit und der Helligkeit des Belages. Dies führt aber zu Problemen:

Erstens wird die Helligkeiten nur etwa zweimal pro Sekunde erfasst, und die Regelung ist daher entsprechend träge und neigt auch zum Überschwingen. Fährt man daher durch Gebiete mit schnell wechselnder Helligkeit (schattenwerfende Häuser oder Bäume am Strassenrand, unter Brücken etc.), so werden viele Profile falsch belichtet. Auch nach der Einfahrt in einen Tunnel braucht es einige Zeit, bis die Belichtung wieder stimmt.

Zweitens sind alle Regelgrössen in komplizierter und unübersichtlicher Weise voneinander abhängig (z.B. die Blitzleistung, Schwellwerte und die Blende von der Umfeldhelligkeit und die Schwellwerte wiederum von der Blitzleistung, so dass diese sich ungewollt auch bei einer Handkorrektur des Blitzes verändern).

5.2 Verbesserungsvorschläge

Die im Folgenden erwähnten Vorschläge beziehen sich auf die im Abschnitt 5.1 genannten Probleme.

a) Schwierig! Eigentlich müsste die Hardware teilweise neu gebaut werden, was aber grossen Aufwand mit sich bringt.

b) Dieses Problem kann nur durch eine grössere Blitzleistung gelöst werden, oder genauer gesagt: Das Verhältnis der Blitzintensität gegenüber dem Tageslicht muss grösser werden.
Dies könnte z.B. dadurch erreicht werden, dass man den jetzigen Xenon-Blitz durch eine andere Konstruktion ersetzt. Gemäss Überschlagsrechnungen sollte es möglich sein, mit einer Reihe von ca. 400 Infrarot-Leuchtdioden, deren Licht mit Zylinderlinsen auf die Strasse gebündelt wird, eine Verbesserung zu erreichen. Die absolute Intensität dieses Infrarot-Blitzes liegt zwar tiefer, aber mit einem Infrarotfilter vor der Kamera kann der Kontrast zum Tageslicht wesentlich verbessert werden.

c) Siehe b).

d) Ein genaueres Kreiselsystem kommt aus Preisgründen nicht in Frage. Als Kompromisslösung könnte man aber einen genaueren statischen Neigungsmesser anbringen. Während dem Aufstarten des Kreisels (wo das Fahrzeug stillsteht) kann der statische Wert eingelesen und als Referenz verwendet werden.
Als Abhilfe kann auch im Auswerteprogramm der Kreiselwert für die Querneigung vor der Auswertung korrigiert werden, indem ohne Korrektur ein Profil ausgewertet wird, dessen Neigung anhand einer präzisen Messung bekannt ist.

e) Das Regelsystem kann nicht beschleunigt werden, da die Rechenkapazität des Steuercomputers zu klein ist. Am einfachsten wäre es wohl, die Automatik auszuschalten und mit Blitzstufe 6 belichten. Innerhalb eines grossen Bereiches ergäben sich dann brauchbare Aufnahmen. Korrekturen von Hand sind mit den Spezialtasten bei starken Lichtänderungen möglich.

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abb. 1	DQM-2-Anhänger
Abb. 2	System-Übersicht
Abb. 3	Prinzipskizze Videokamera
Abb. 4	Diodenzeile
Abb. 5	Block-Schema für Messfahrzeug und DQM-2-Anhänger
Abb. 6	Monitor während der Messfahrt
Abb. 7	Eichvorrichtung zum Messen der Objektivverzerrung
Abb. 8	Serie von Eichprofilen
Abb. 9	Ausgeglichene Abbildungsmatrix
Abb. 10	Invertierte Abbildungsmatrix
Abb. 11	Eichprofil ganz oben
Abb. 12	Eichprofil ganz unten
Abb. 13	Das Hauptmenü im Auswerteprogramm
Abb. 14	Datenfluss im Auswerteprogrammpaket
Abb. 15	So wird die Latte auf das Profil gelegt
Abb. 16	Testprofil mit Belichtungsänderung
Abb. 17	Testprofil mit paralleler Verschiebung
Abb. 18	Testprofil mit Drehung
Abb. 19	Profilvergleich: oben SQM, unten DQM-2
Abb. 20	3 Beispiel-Profile zu Abb. 21
Abb. 21	Abhängigkeit der t-Werte von der Neigung
Abb. 22-27	Wasserwerte derselben Strecke bei unterschiedlicher Querneigungskorrektur
Abb. 28a-d	Vergleichsmessung PLANUM-DQM-2 auf Teststrecke bei Dielsdorf
Abb. 29a-e	Vergleichsmessung PLANUM-DQM-2 auf Teststrecke bei Buchs

Abb. 30 Messung N3; Thalwil - Wädenswil 1. Fahrt

Abb. 31 Messung N3; Thalwil - Wädenswil 2. Fahrt

Abb. 32 Messung N3; Thalwil - Wädenswil 3. Fahrt

Abb. 33 Messung N3; Thalwil - Wädenswil 4. Fahrt

Abb. 34 Dokumentationstext aus "Open- und Endrecord"

Abb. 35 Rohprofil: X1, X2 und Mittellinie

Abb. 36 Profil in wirklicher Lage

Abb. 37 Profil in horizontaler Lage

Abb. 38 Profildokumentation in Tabellenform

Abb. 39 Querneigungsverlauf

Abb. 40 Längsneigungsverlauf

Abb. 41 Höhenprofil

Abb. 42 Lattenwerte

Abb. 43 Lattenwerte links, kleinere Abschnitte

Abb. 44 Lattenwerte, Streckenausschnitt

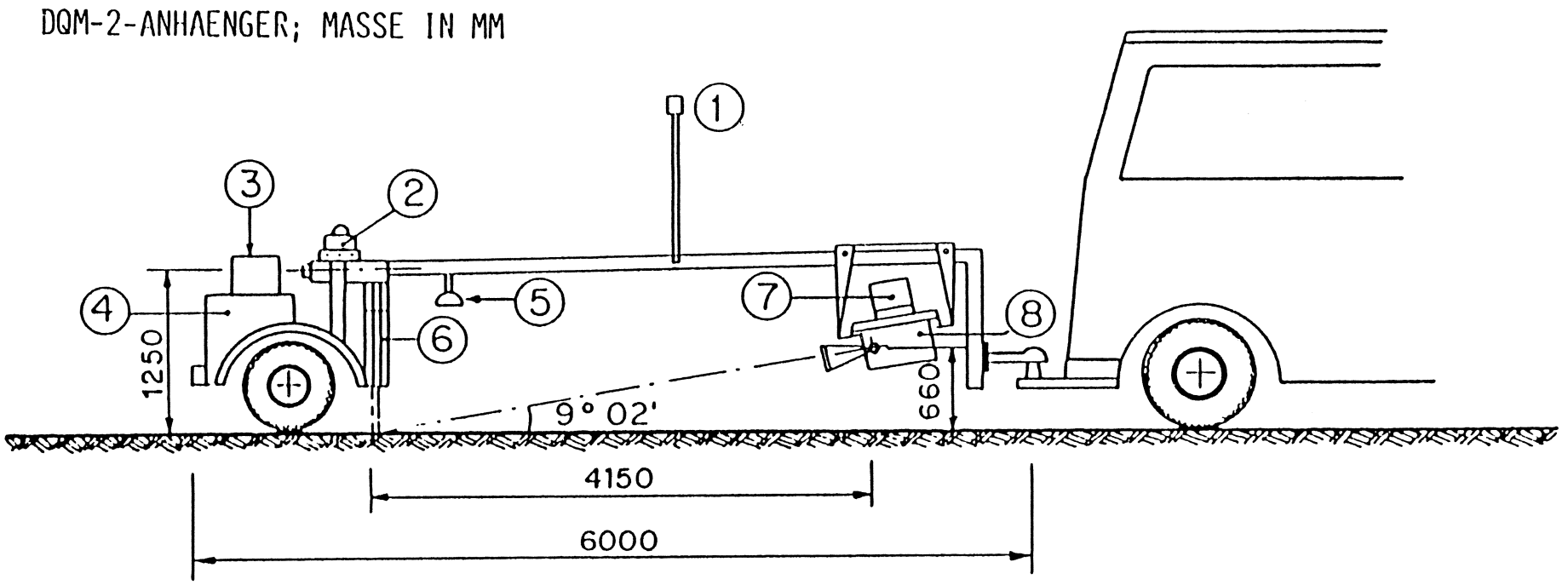
Abb. 45 Lattenwerte "schlechtestes" Profil aus Abb. 44

Abb. 46 Flächenwerte (Wasser)

Abb. 47 Flächenwerte (unter der Latte)

Abb. 48 Wassertiefen in schlechtem Teilstück

Abb. 49 Erscheinen der Bodenmarkierung bei hellem Tageslicht



LEGENDE:

1 FLUX VALVE (MAGNETKOMPASS)
2 UMFELDLICHTDETEKTOR
3 STROMUMFORMER FÜR PLATTFORM
4 BLITZELEKTRONIK
5 SCHEINWERFER
6 BLITZBLENDE
7 KREISEL-PLATTFORM
8 VIDEOKAMERA MIT ANAMORPHOT

Abb. 1 DQM-2-Anhänger

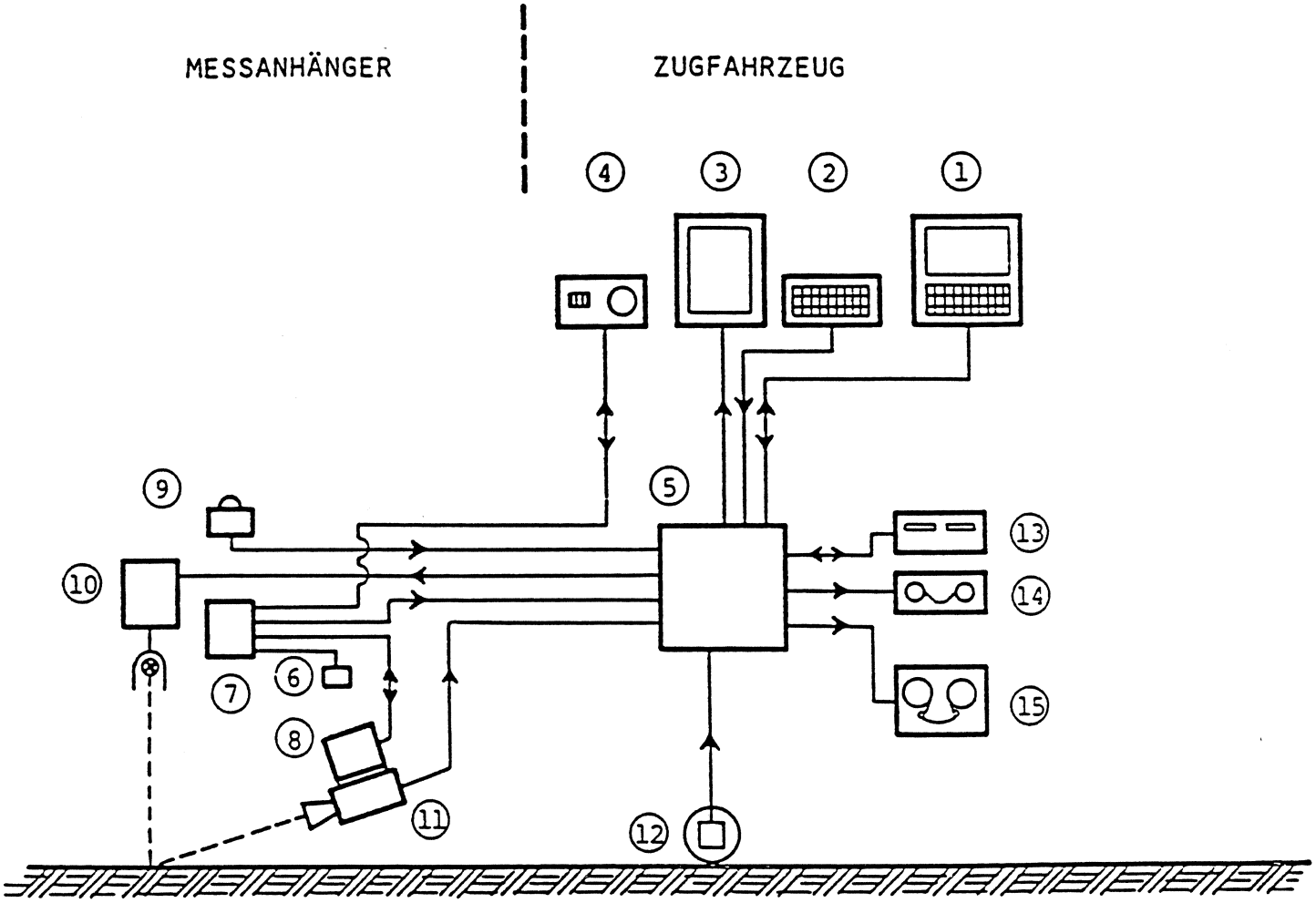
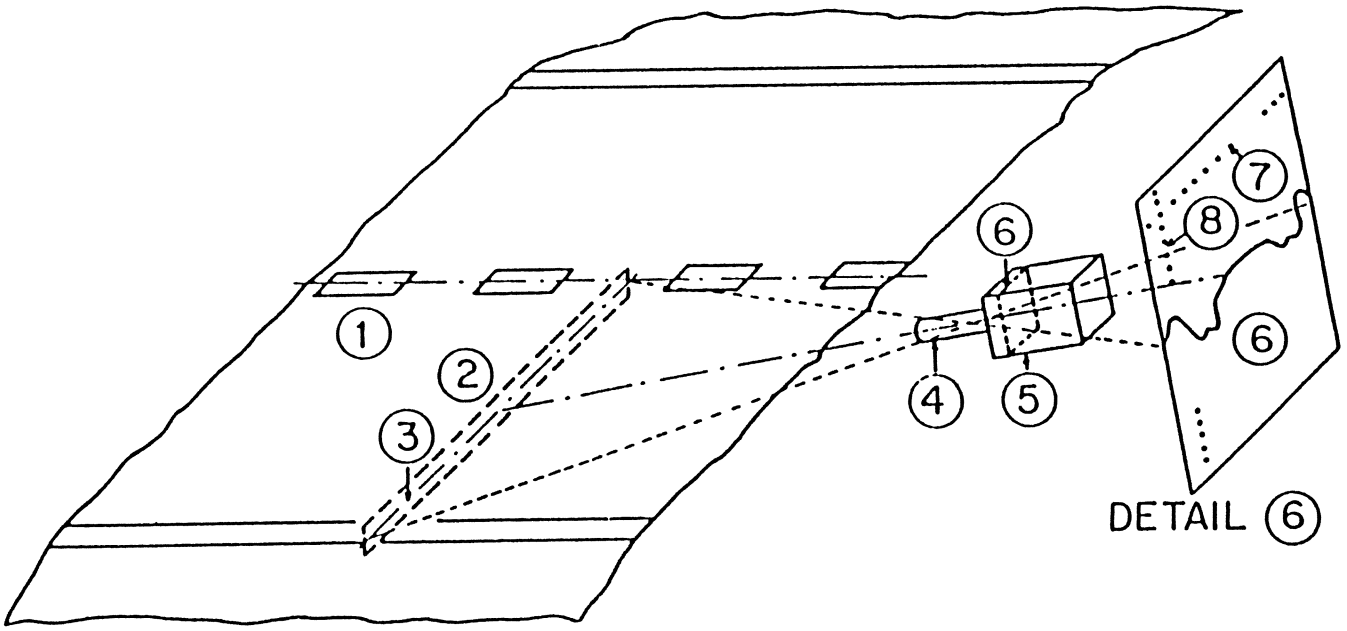


Abb. 2 System-Übersicht

LEGENDE:

1. Terminal
2. Operateurtastatur
3. Bildmonitor
4. Kommando- und Anzeigepult der Plattform
5. Computer LSI 11/23 mit Extender
6. Kompass für die Plattform
7. Elektronik der Plattform
8. Plattform
9. Umfeldlichtdetektor
10. Blitzlichtvorrichtung
11. Videokamera
12. Weggeber
13. Floppydiskstation
14. Videobandgerät (Option)
15. Digital Bandgerät

PRINZIPSKIZZE FUER DIE AUFNAHME DES QUERPROFILS MITTELS VIDEOKAMERA



LEGENDE:

1 STRASSENABSCHNITT MIT MARKIERUNG

2 OBJEKTEBENE 4500 x 320 MM

3 LICHTSPUR

4 ANAMORPHOT

5 VIDEOKAMERA

6 TRAGPLATTE MIT PHOTODIODEN 9,7 x 7,3 MM

7 ZEILE MIT 240 PHOTODIODEN ENTSPRICHT DER OBJEKTBREITE VON 4500 MM; HORIZONTALER ABSTAND DER IN DER OBJEKTEBENE ERMITTELTEN PUNKTE VON CA. 19 MM

8 KOLONNE MIT 320 PHOTODIODEN ENTSPRICHT DER OBJEKTHÖHE VON 320 MM, VERTIKALER ABSTAND DER IN DER OBJEKTEBENE ERMITTELTEN PUNKTE CA. 1 MM

Abb. 3 **Prinzipskizze Videokamera**

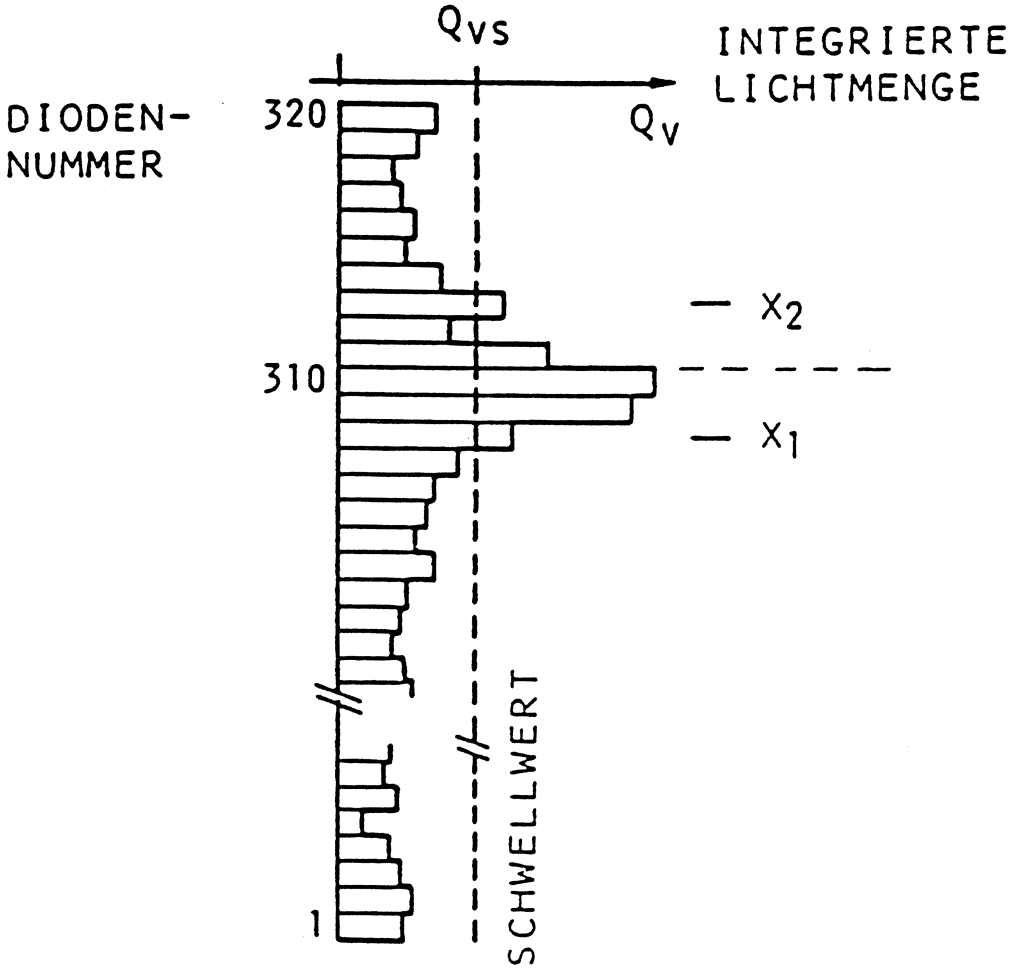


Abb. 4 Diodenzeile

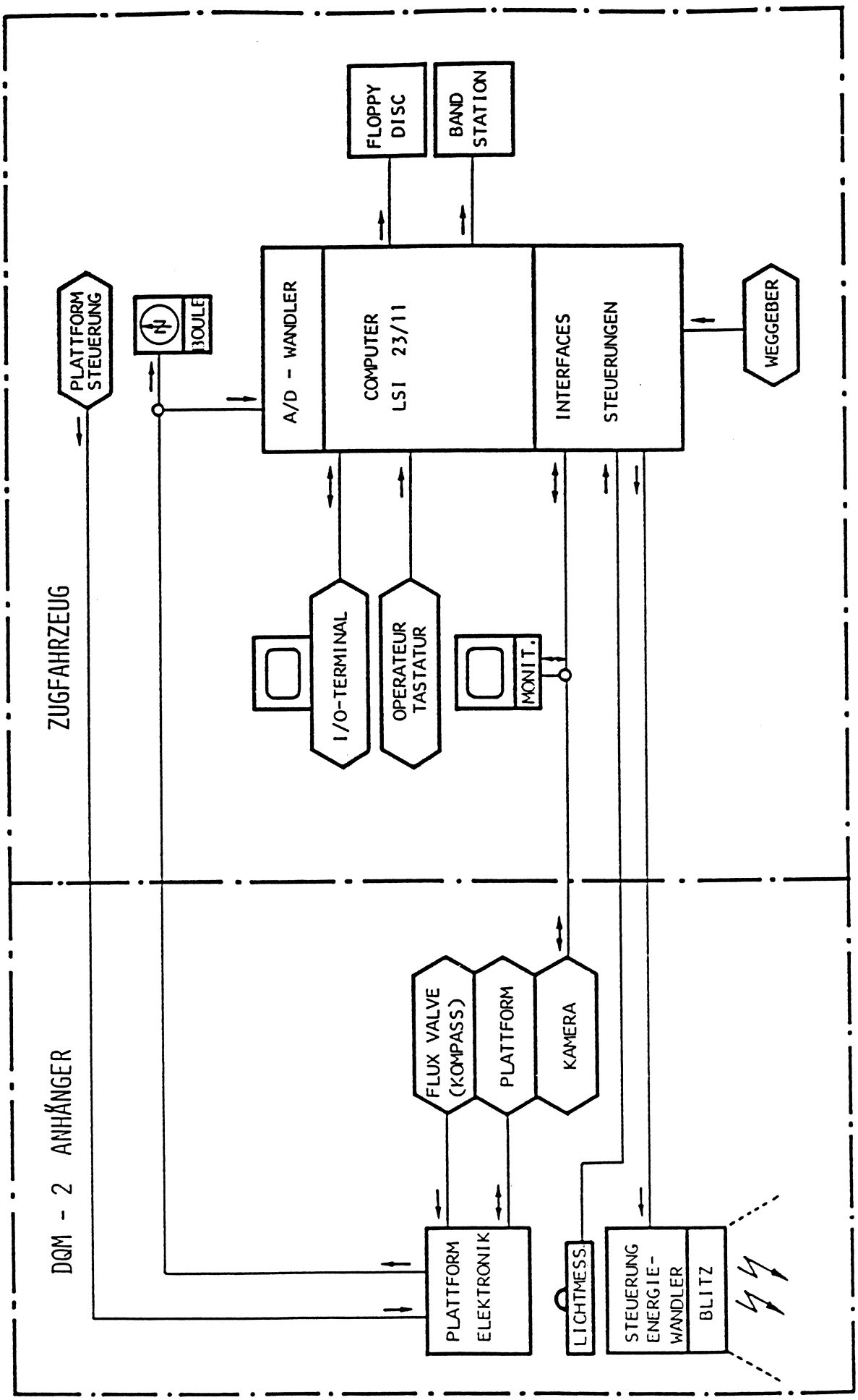


Abb. 5 Block-Schema für Messfahrzeug und DQM-2-Anhänger

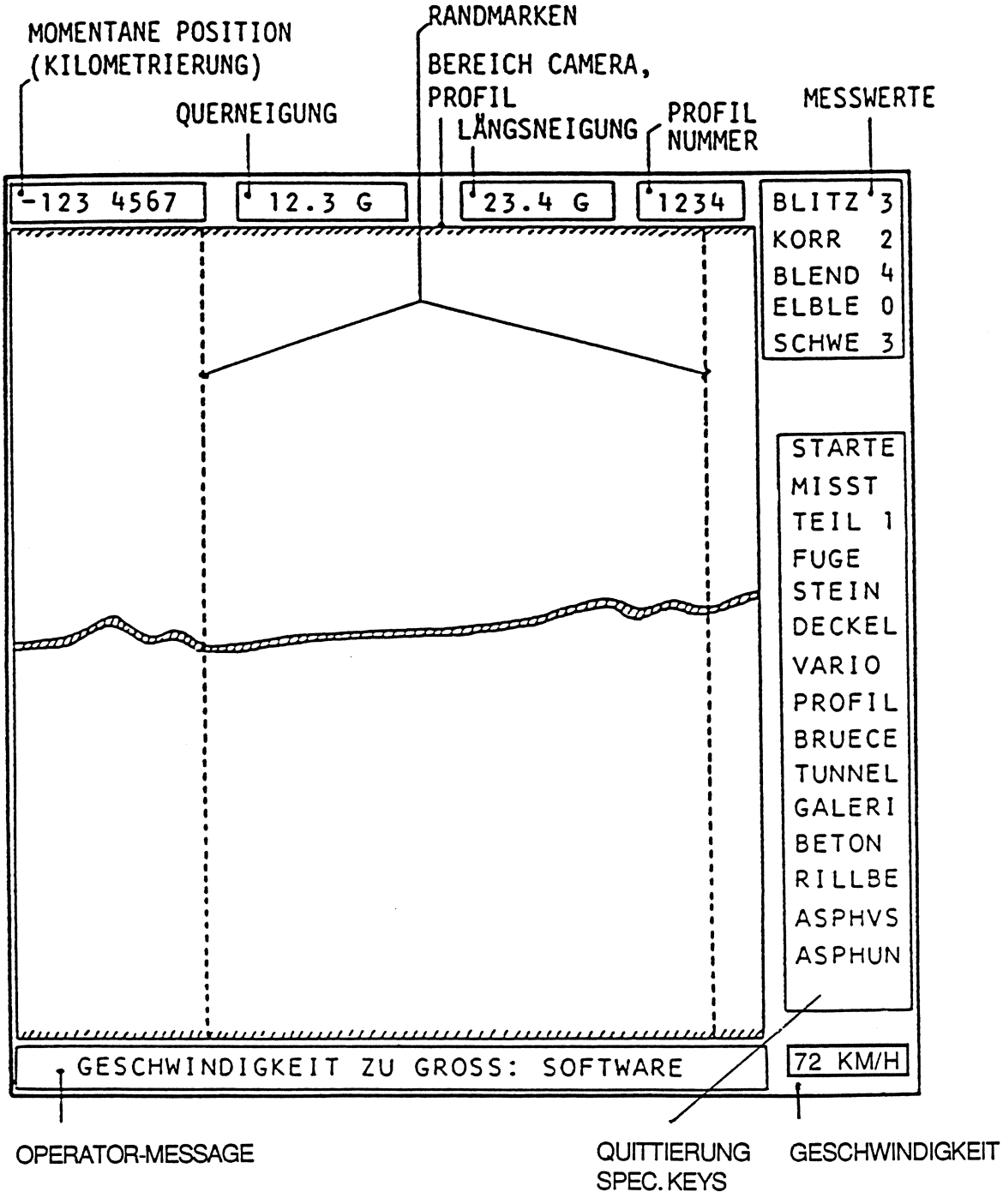


Abb. 6 Monitor während der Messfahrt

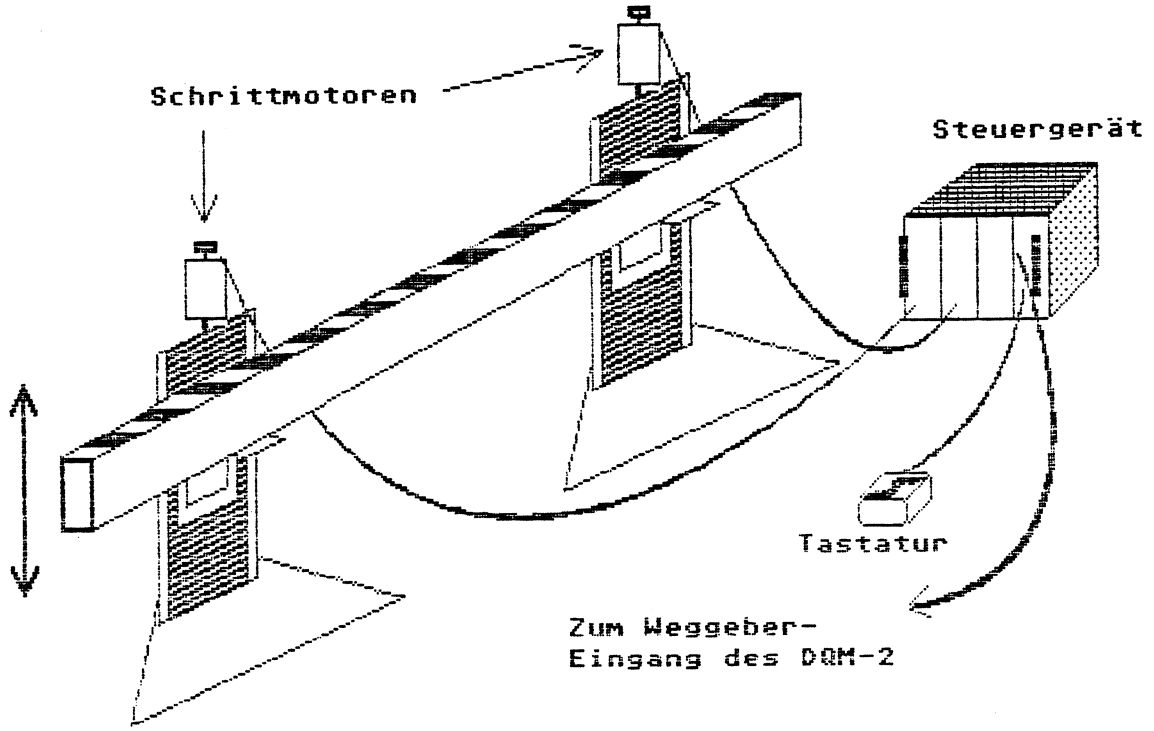


Abb. 7 Eichvorrichtung zum Messen der Objektivverzerrung

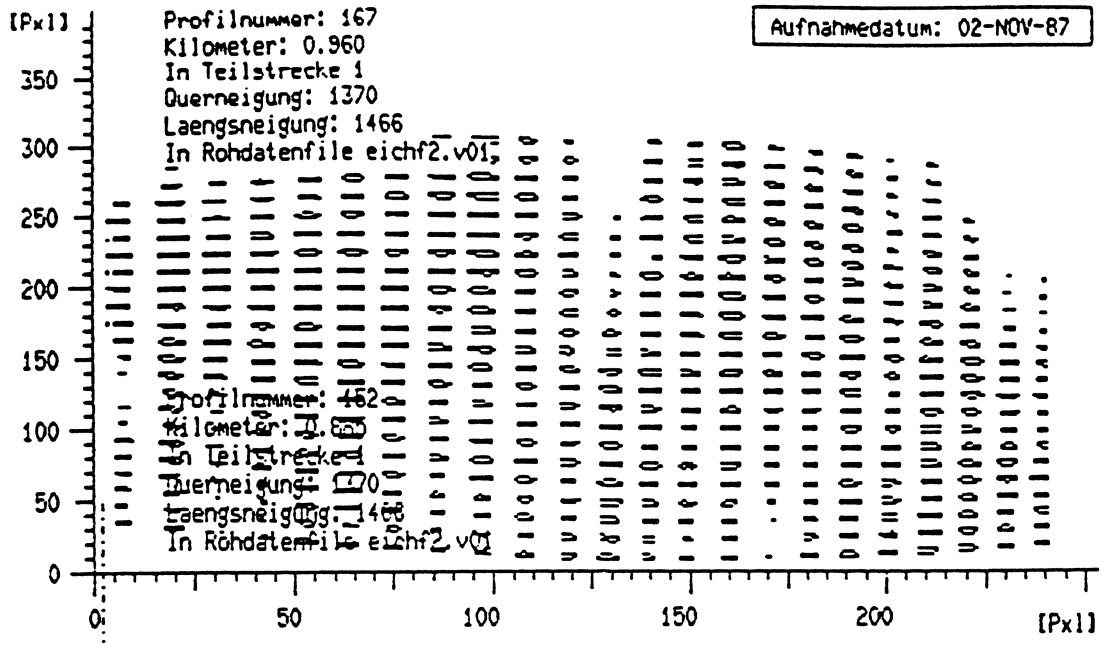


Abb. 8 Serie von Eichprofilen

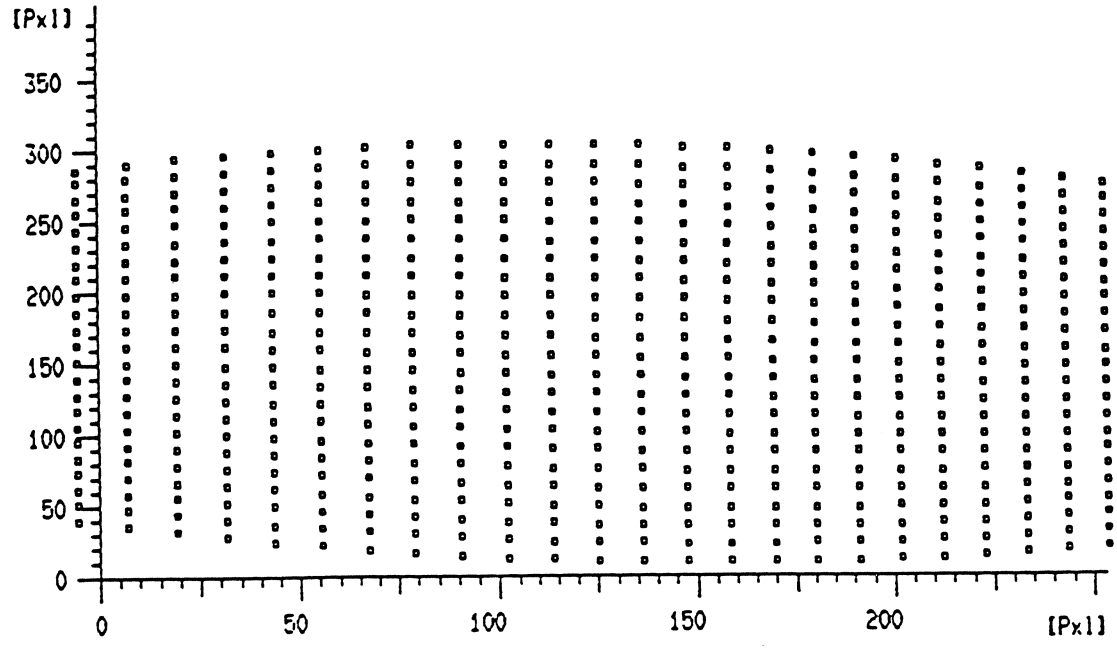


Abb. 9 Ausgeglichene Abbildungsmatrix

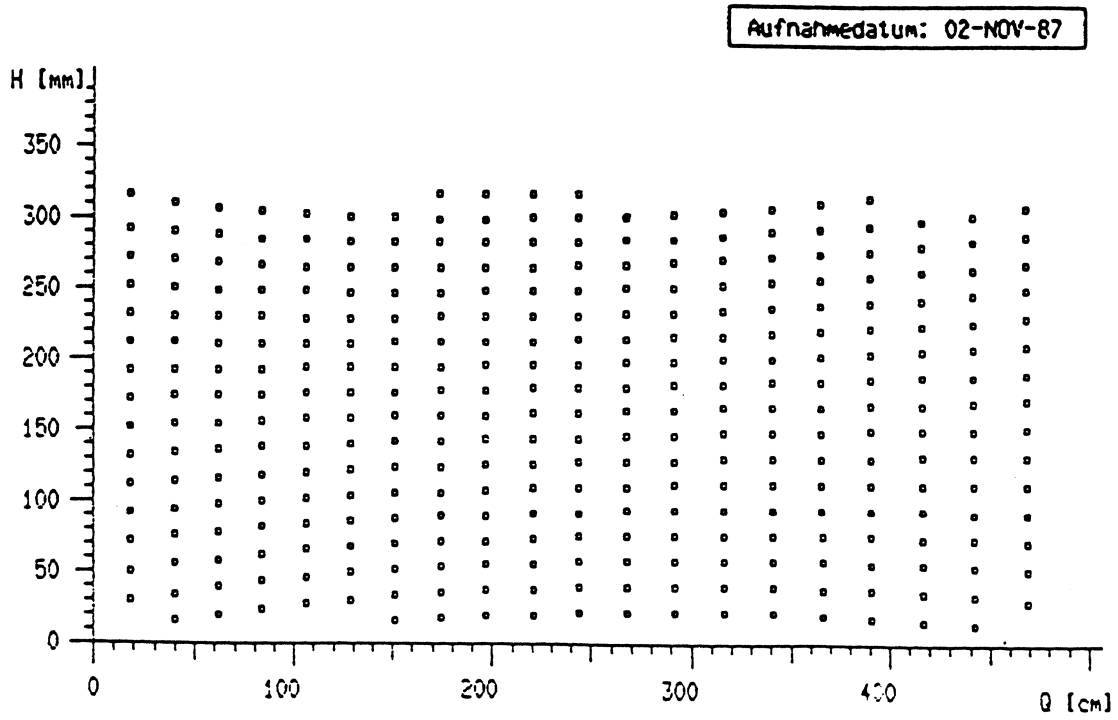


Abb. 10 Invertierte Abbildungsmatrix

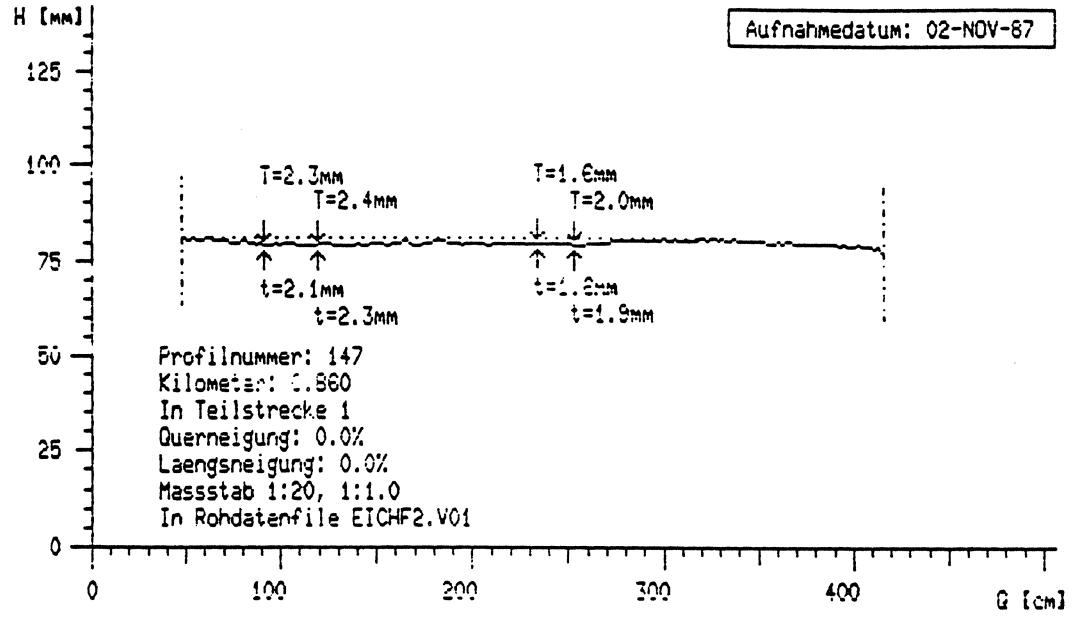


Abb. 11 Eichprofil ganz oben

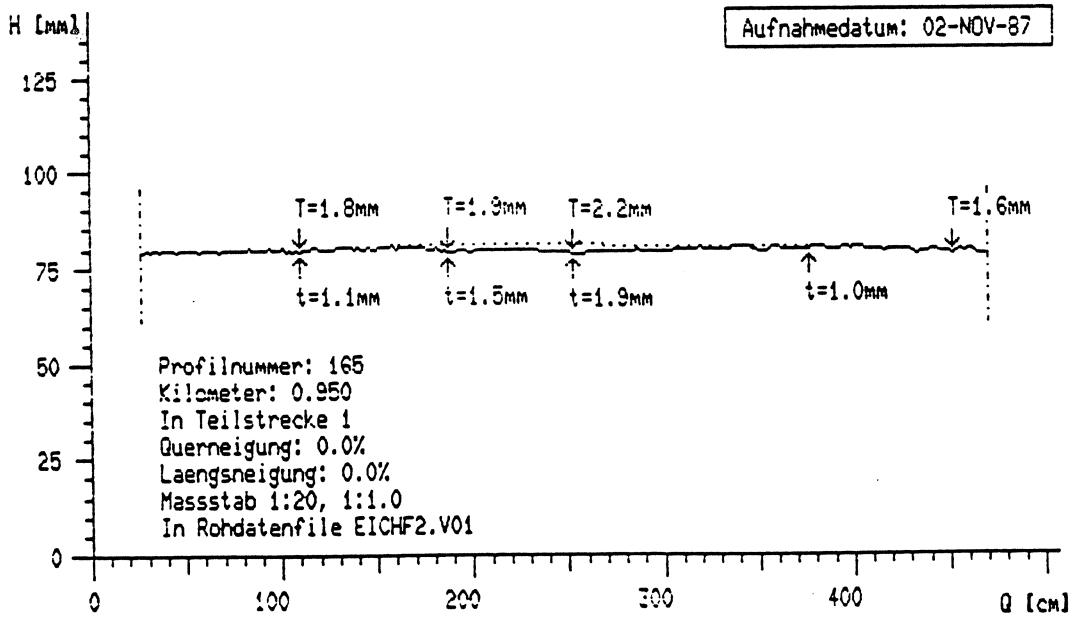


Abb. 12 Eichprofil ganz unten

```
DQM2 - Profil-Auswertung
------------------------

Der Name des aktuellen Rohdatenfiles ist:
LD1:EICHF2.V01
--------------

  Menues:   N - Neues Rohdatenfile bearbeiten
            L - Liste aller Rohdatenfiles auf Disk
            T - Textrecord bearbeiten
            I - Profile inspizieren
            A - Profile auswerten
            D - Profile dokumentieren und zeichnen
            S - Streckenstatistik
            E - Eichmatrix berechnen
            M - Magnetbandstation anmelden
            F - Magnetbandstation freigeben
            H - Hilfe

            X - Ende der Session (mit LOGOUT)
            0 - Sprung ins System

Ihre Wahl: 
```

Abb. 13 Das Hauptmenü im Auswerteprogramm

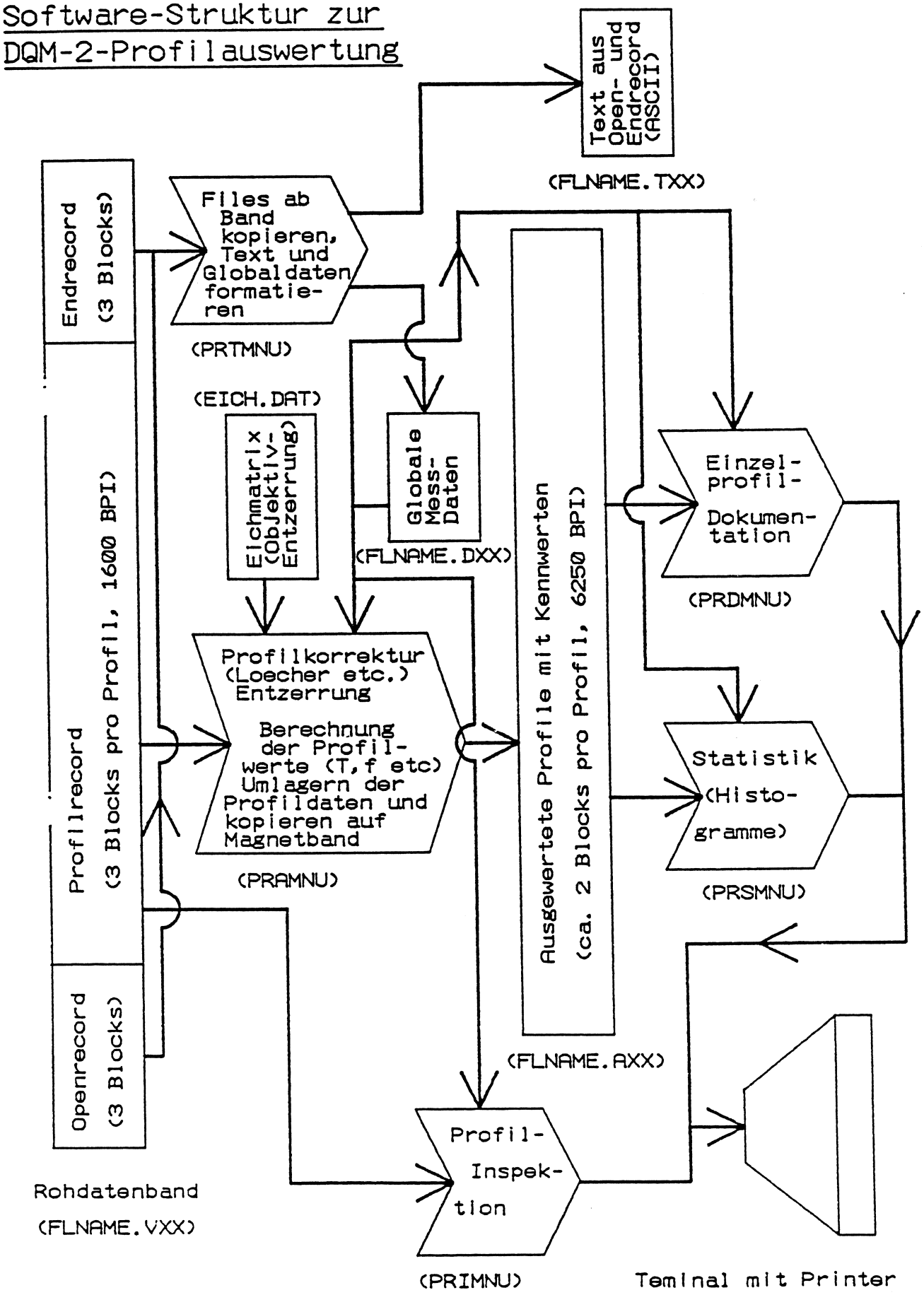


Abb. 14 Datenfluss im Auswerteprogrammpaket

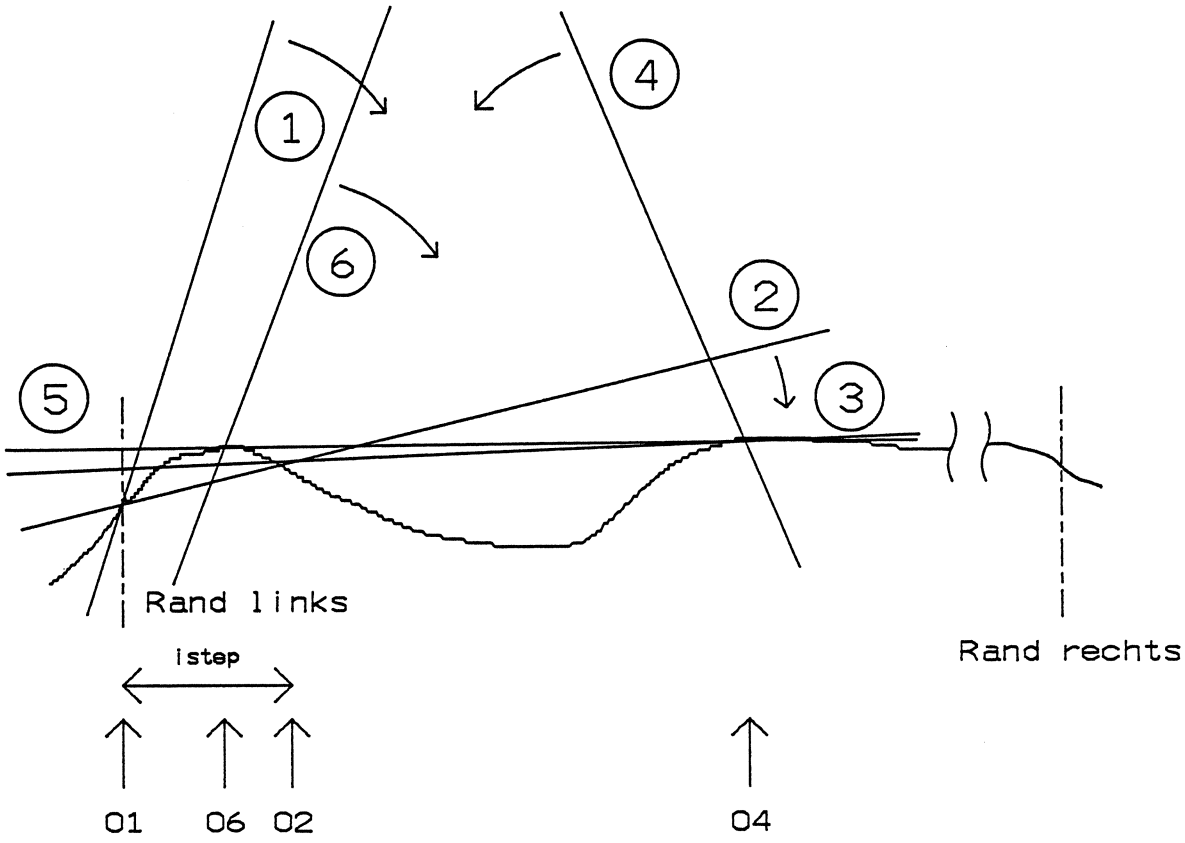


Abb. 15 So wird die Latte auf das Profil gelegt

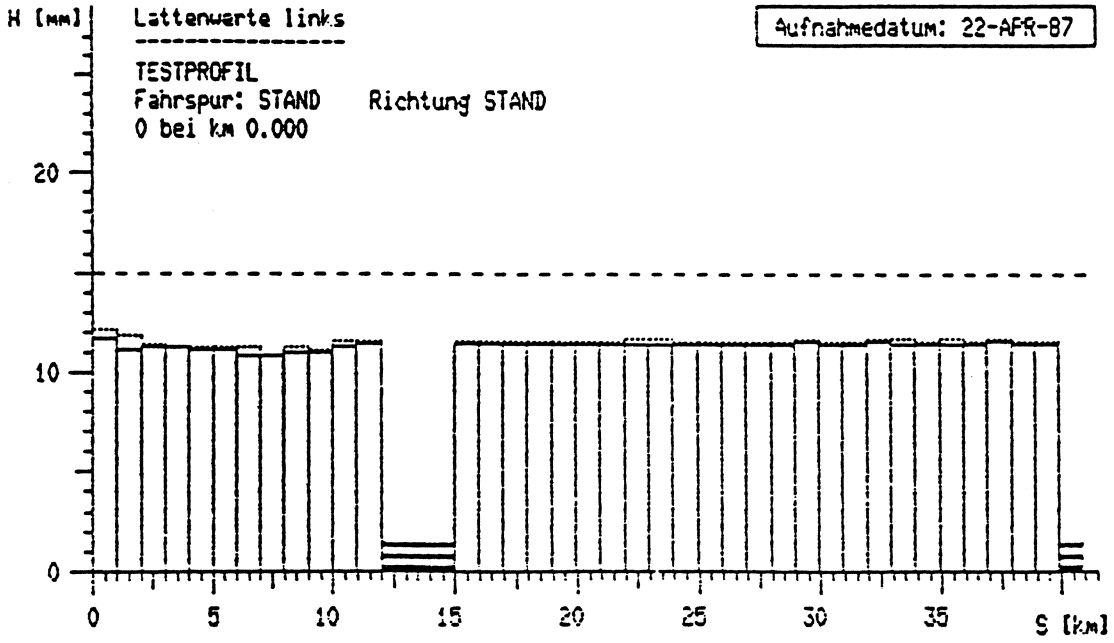


Abb. 16 Testprofil mit Belichtungsänderung

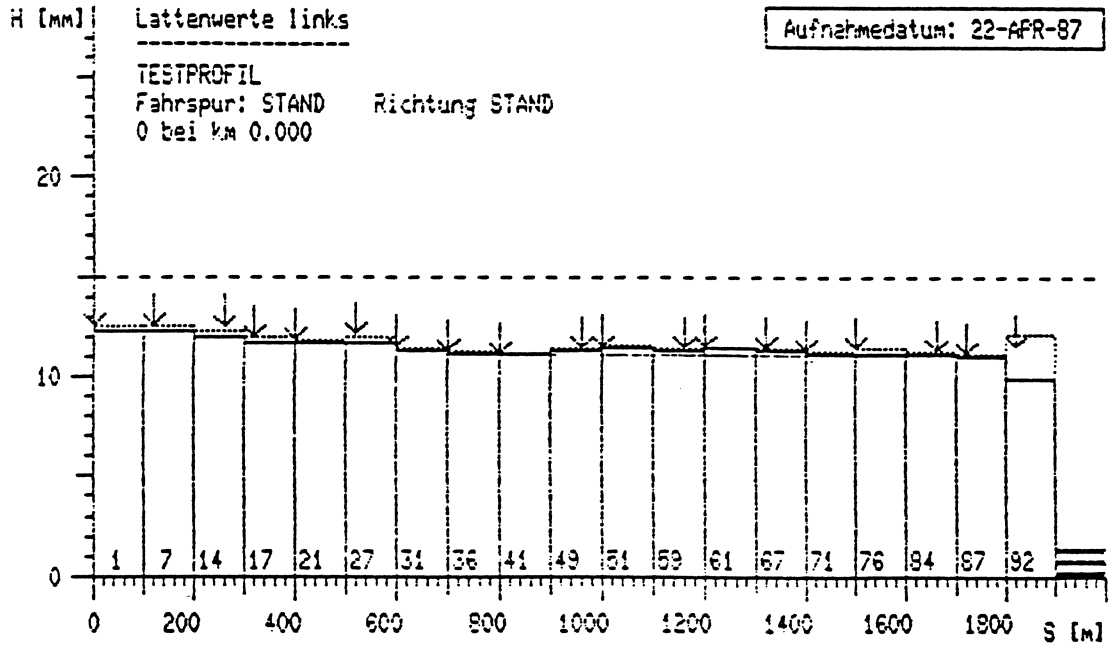


Abb. 17 Testprofil mit paralleler Verschiebung

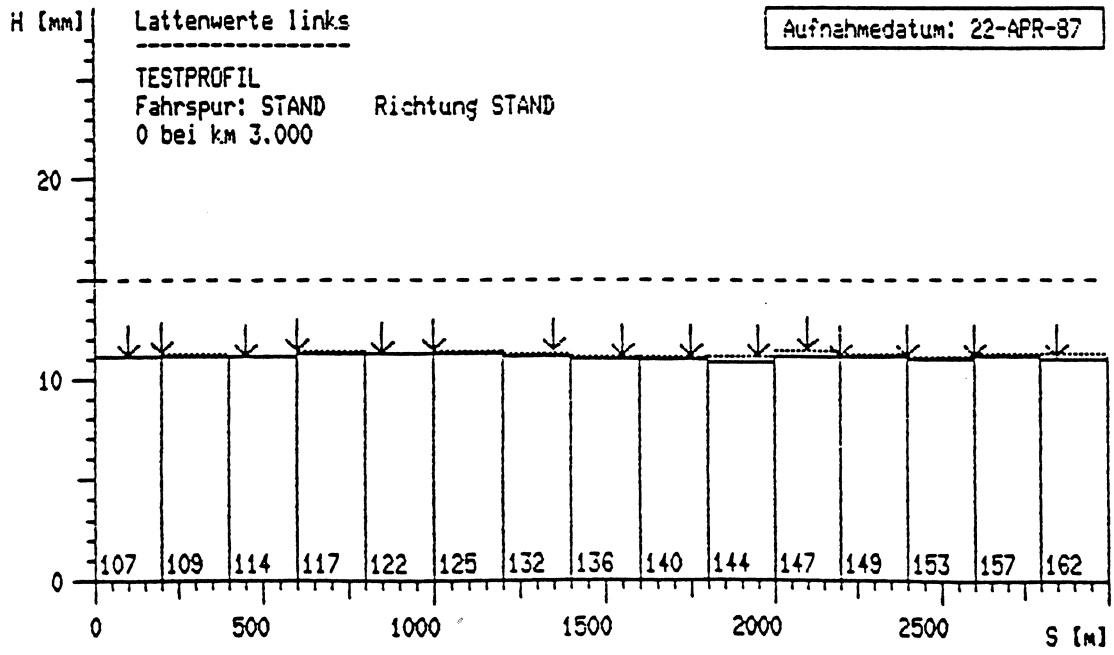


Abb. 18 Testprofil mit Drehung

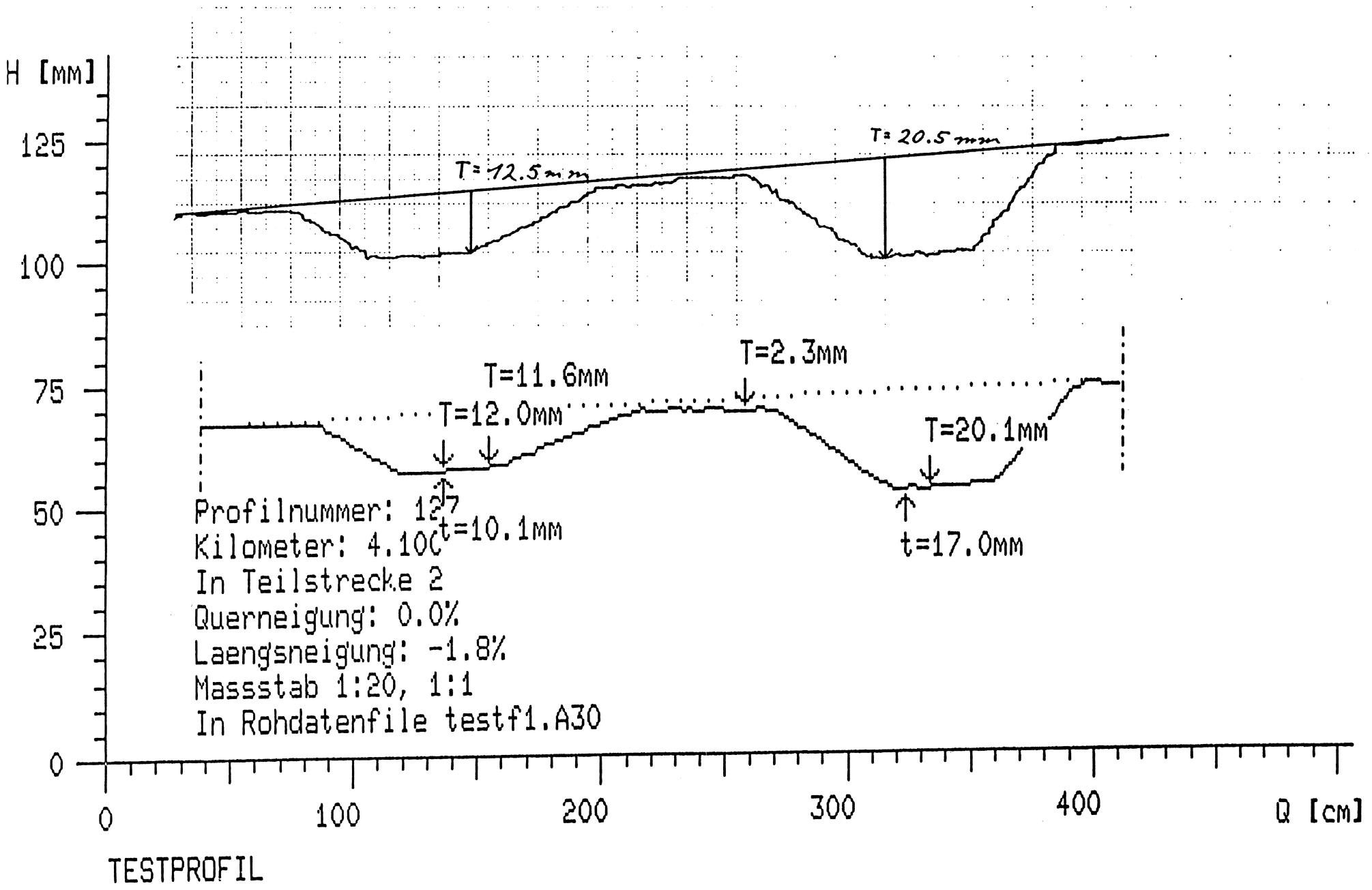


Abb. 19 Profilvergleich: oben SQM, unten DQM-2

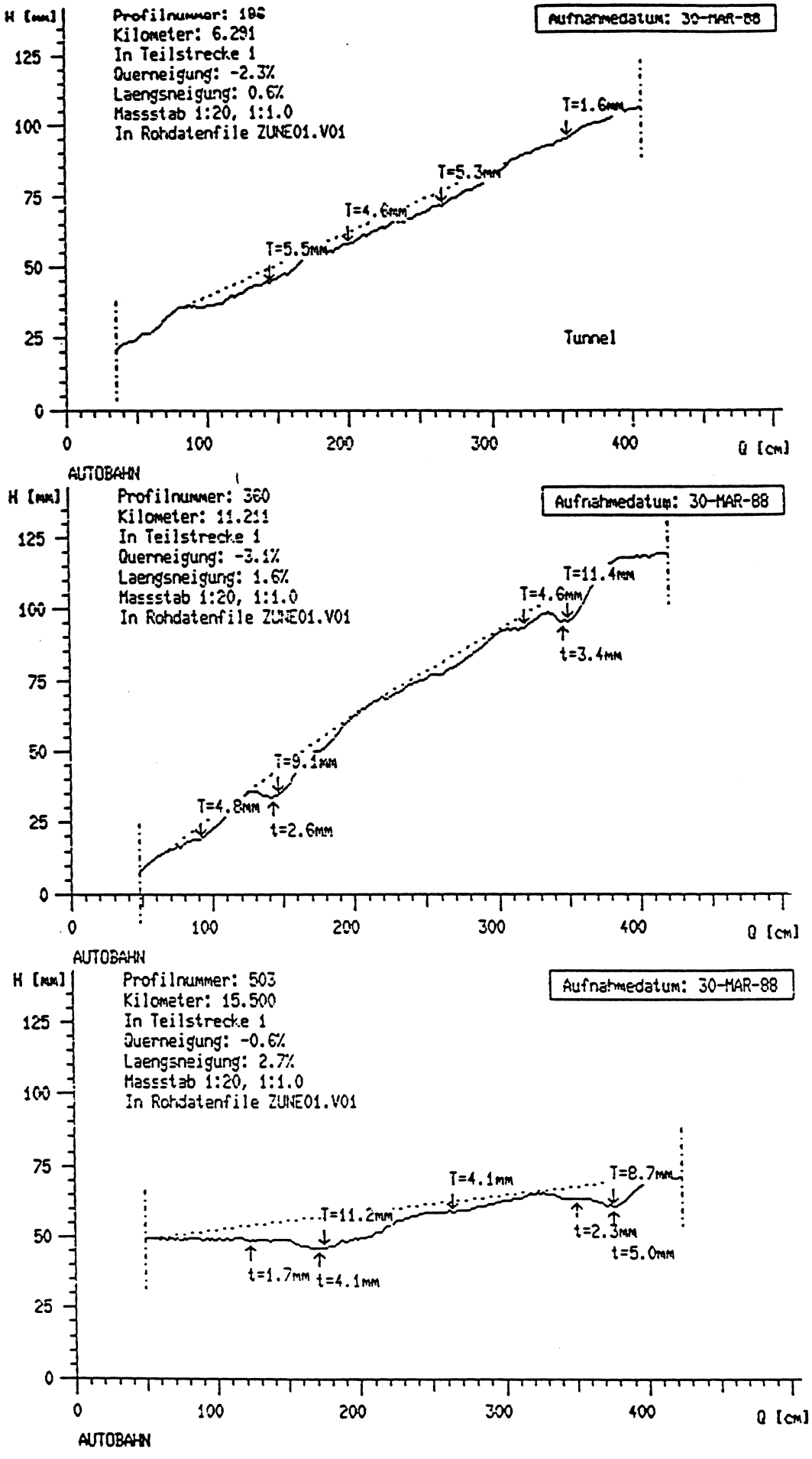


Abb. 20 3 Beispiel-Profile zu Abb. 21

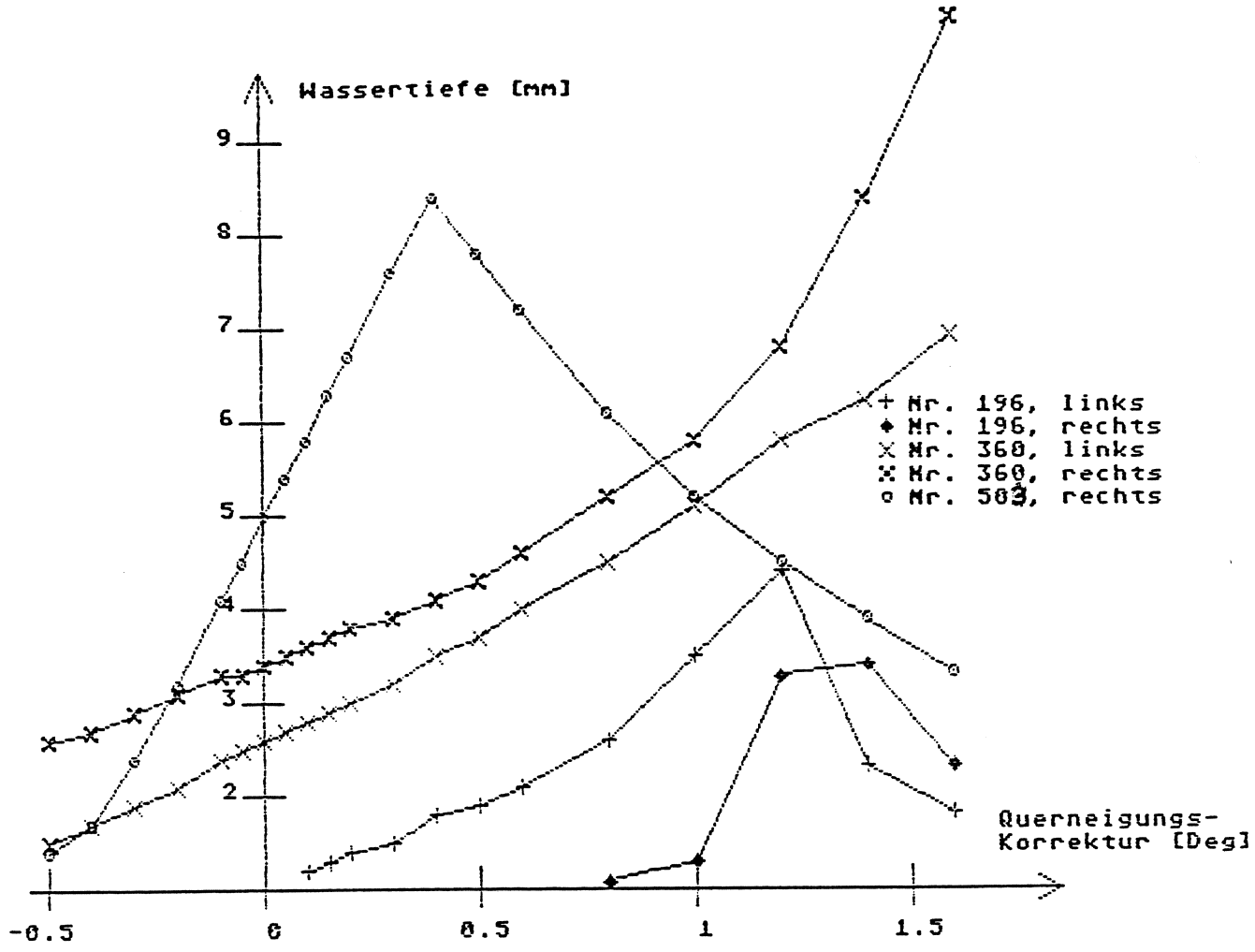


Abb. 21 Abhängigkeit der t-Werte von der Neigung

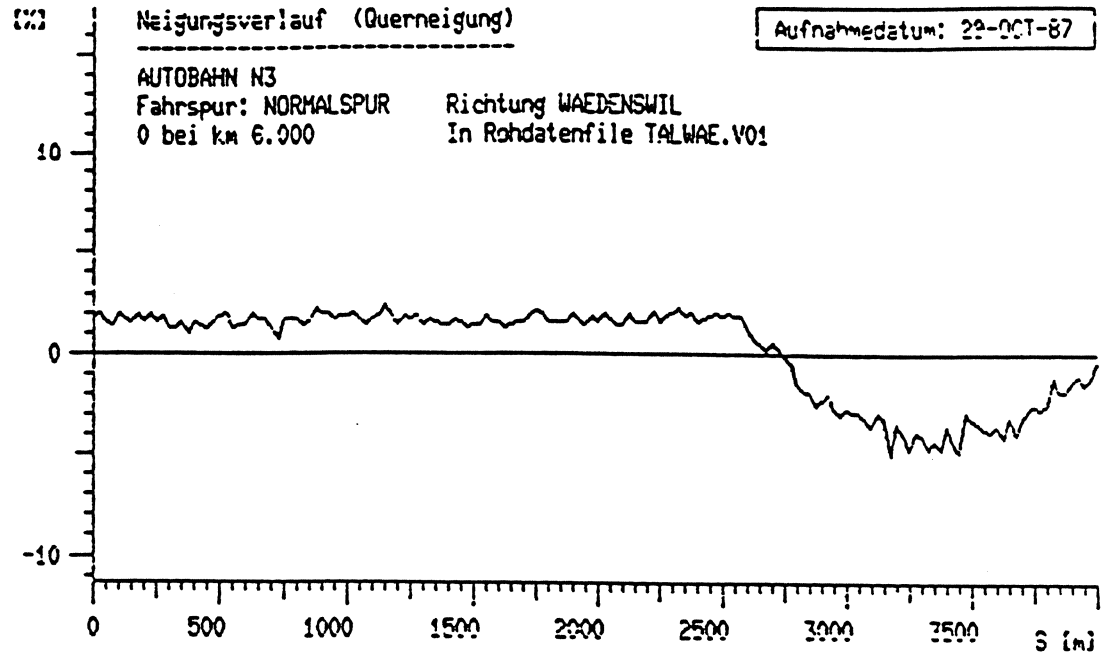


Abb. 22 Teststrecke N3, Neigungsverlauf

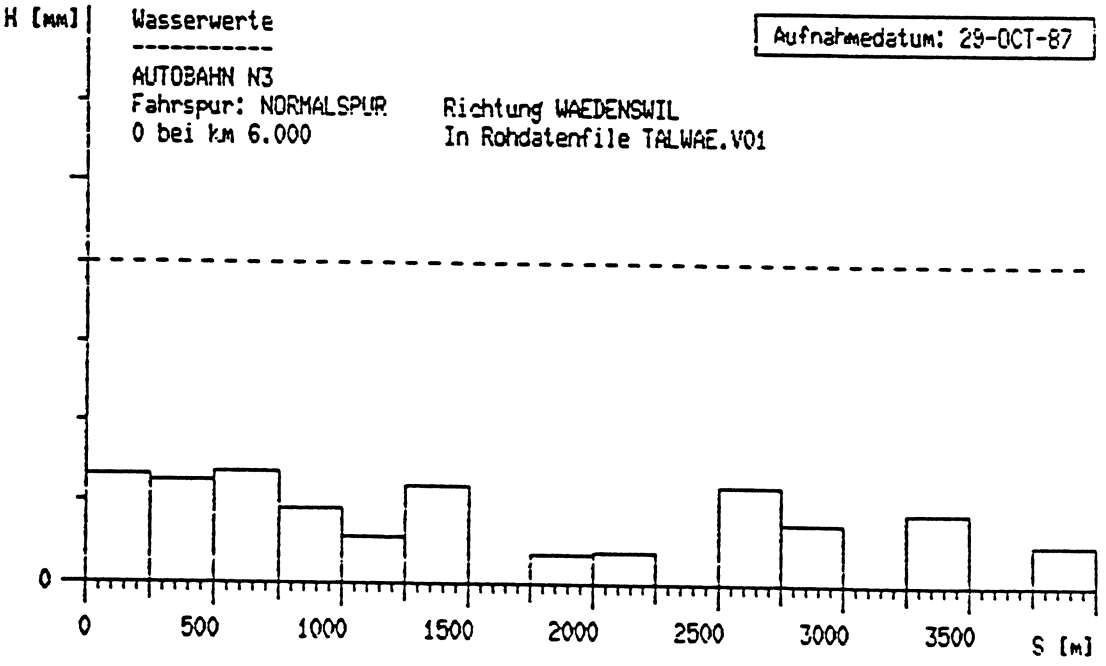


Abb. 23 Teststrecke N3, Wasserwerte ohne Querneigungskorrektur

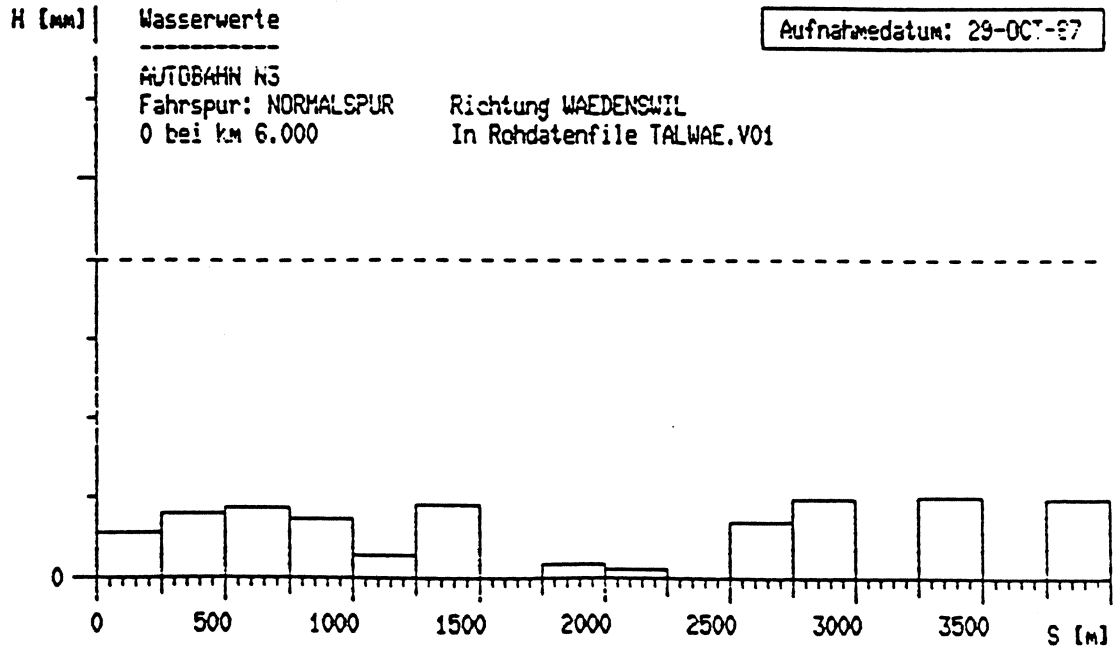


Abb. 24 Teststrecke N3, Wasserwerte Querneigungskorrektur + 0.2°

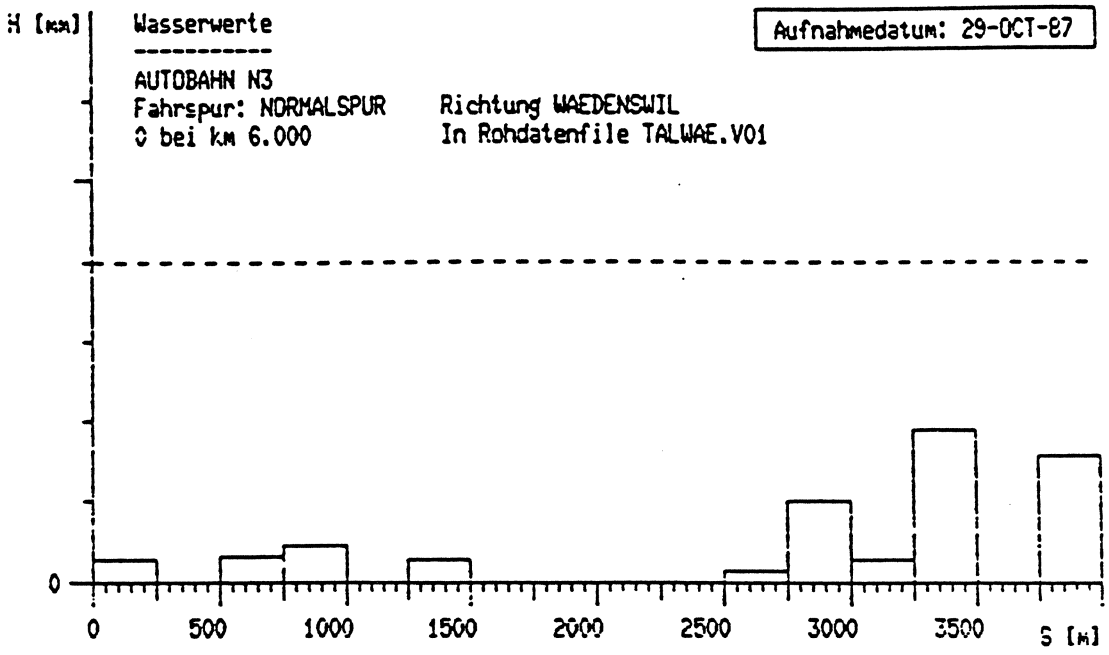


Abb. 25 Teststrecke N3, Wasserwerte Querneigungskorrektur + 0.5°

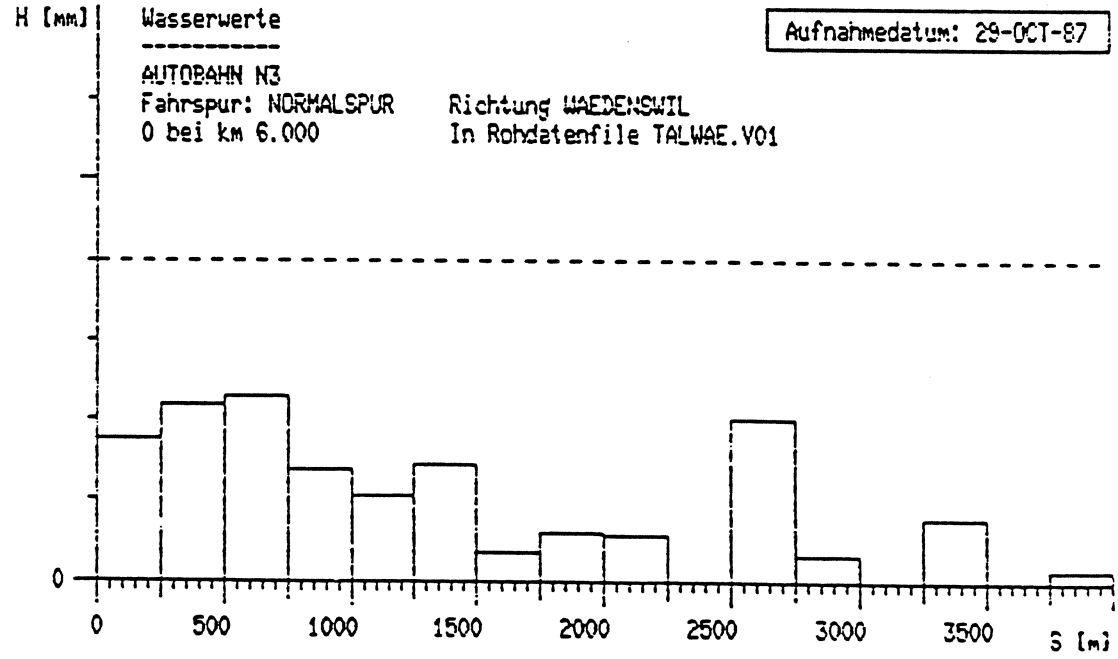


Abb. 26 Teststrecke N3, Wasserwerte Querneigungskorrektur - 0.2°

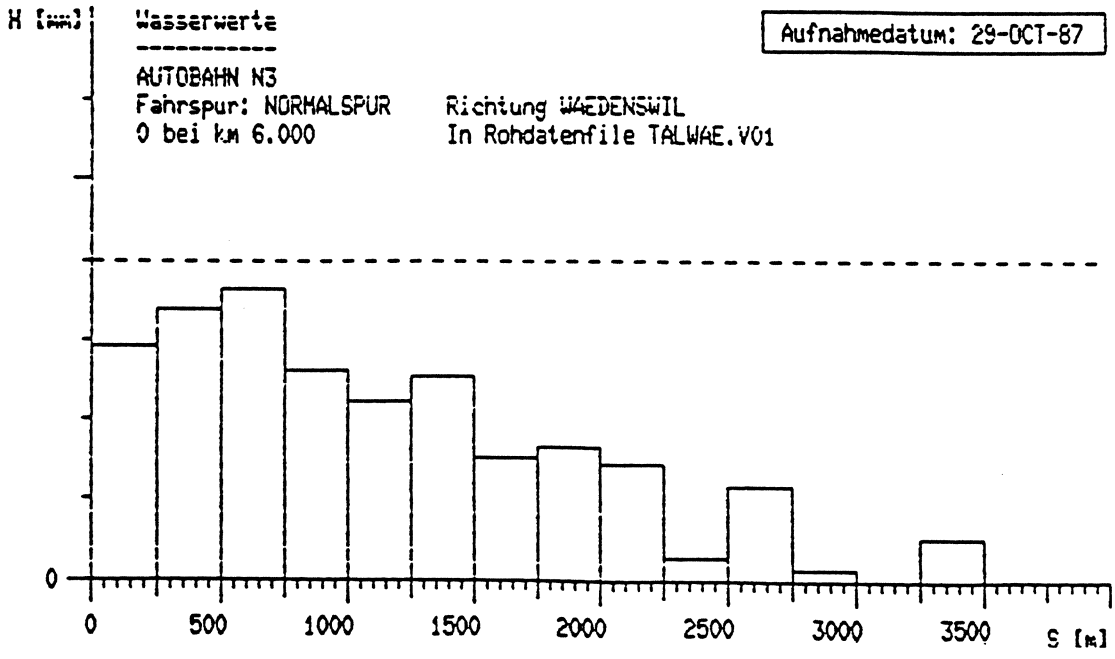


Abb. 27 Teststrecke N3, Wasserwerte Querneigungskorrektur - 0.5°

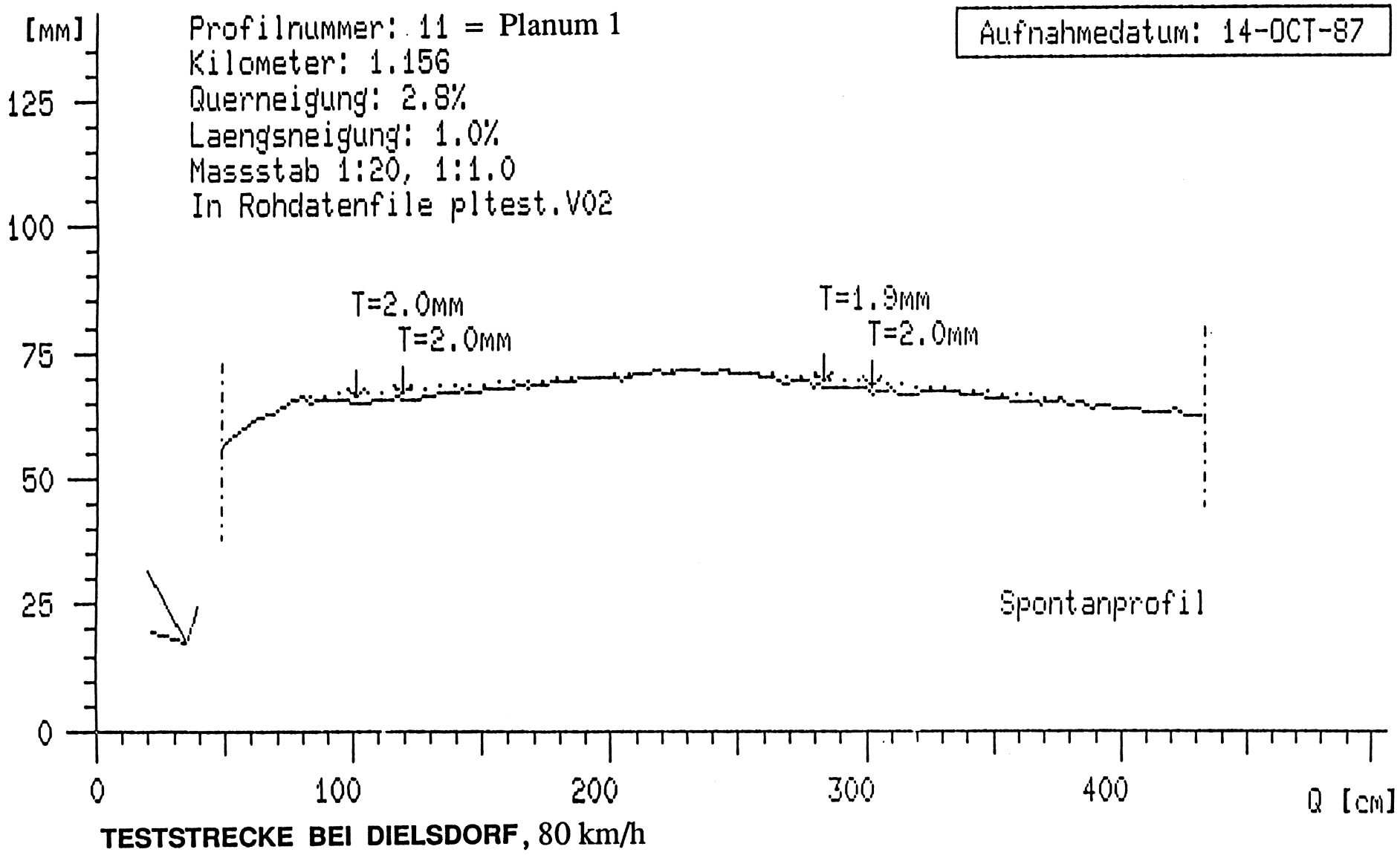


Abb. 28a Vergleichsmessung PLANUM-DQM-2 auf Teststrecke bei Dielsdorf

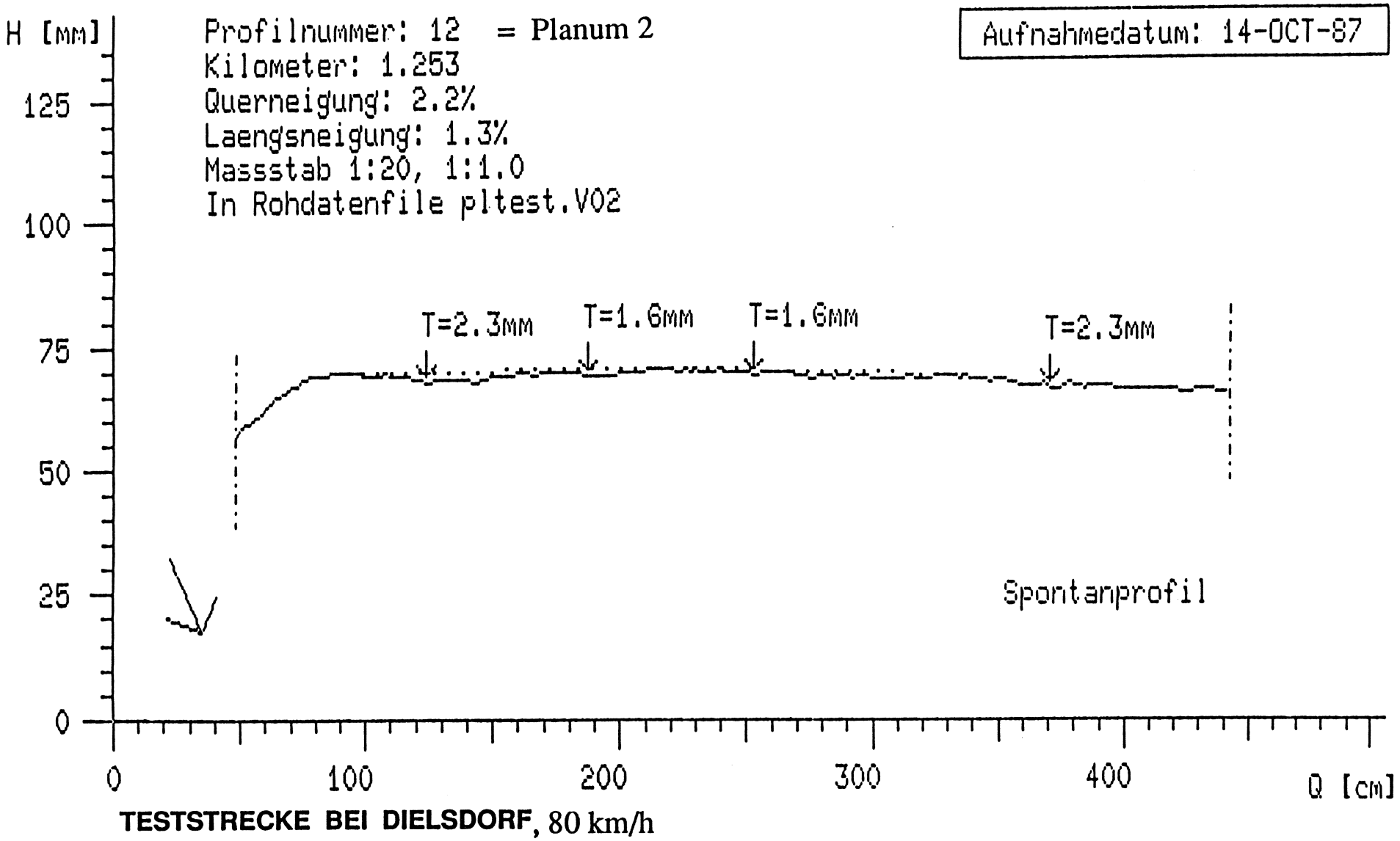


Abb. 28b Vergleichsmessung PLANUM-DQM-2 auf Teststrecke bei Dielsdorf

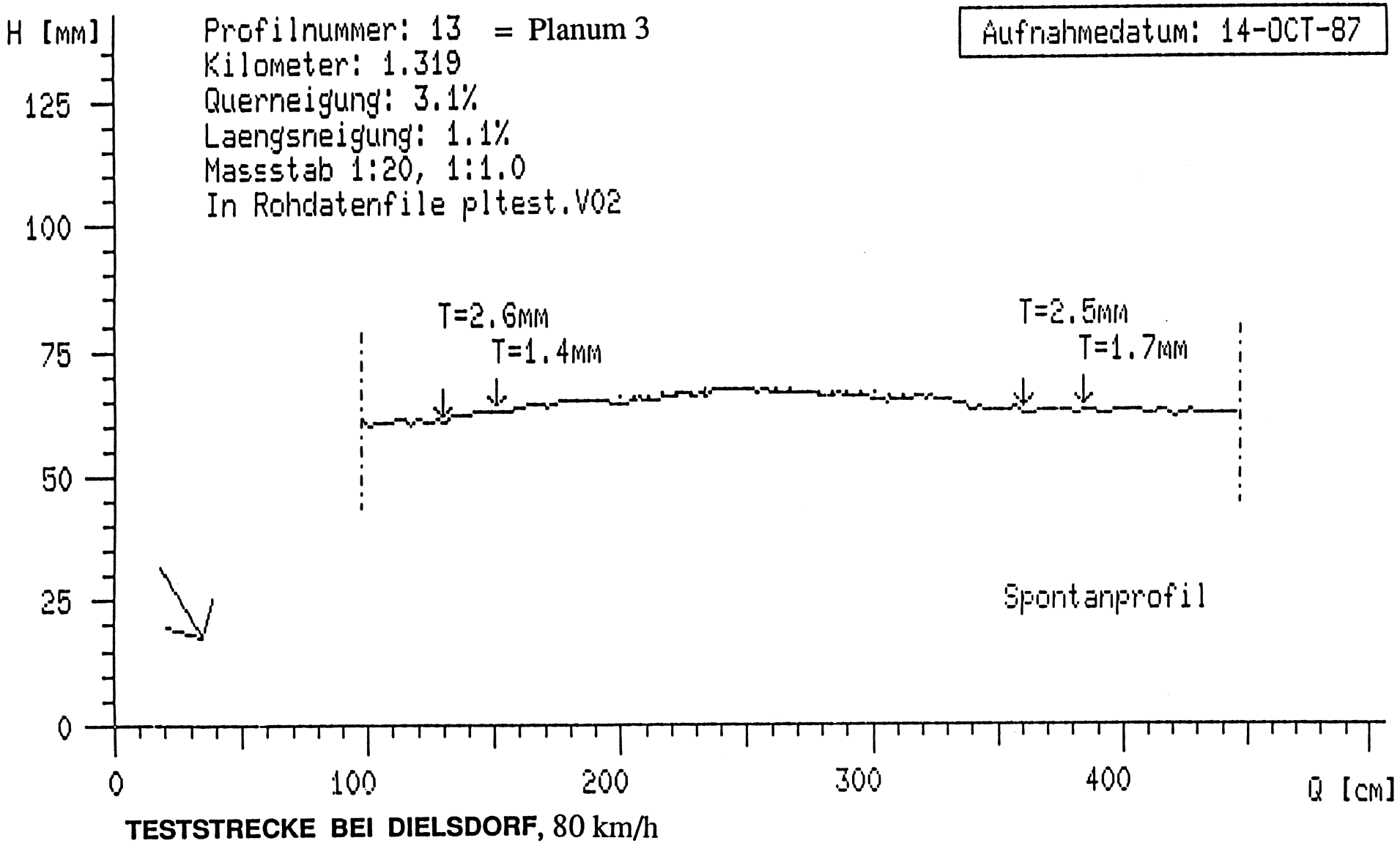


Abb. 28c Vergleichsmessung PLANUM-DQM-2 auf Teststrecke bei Dielsdorf

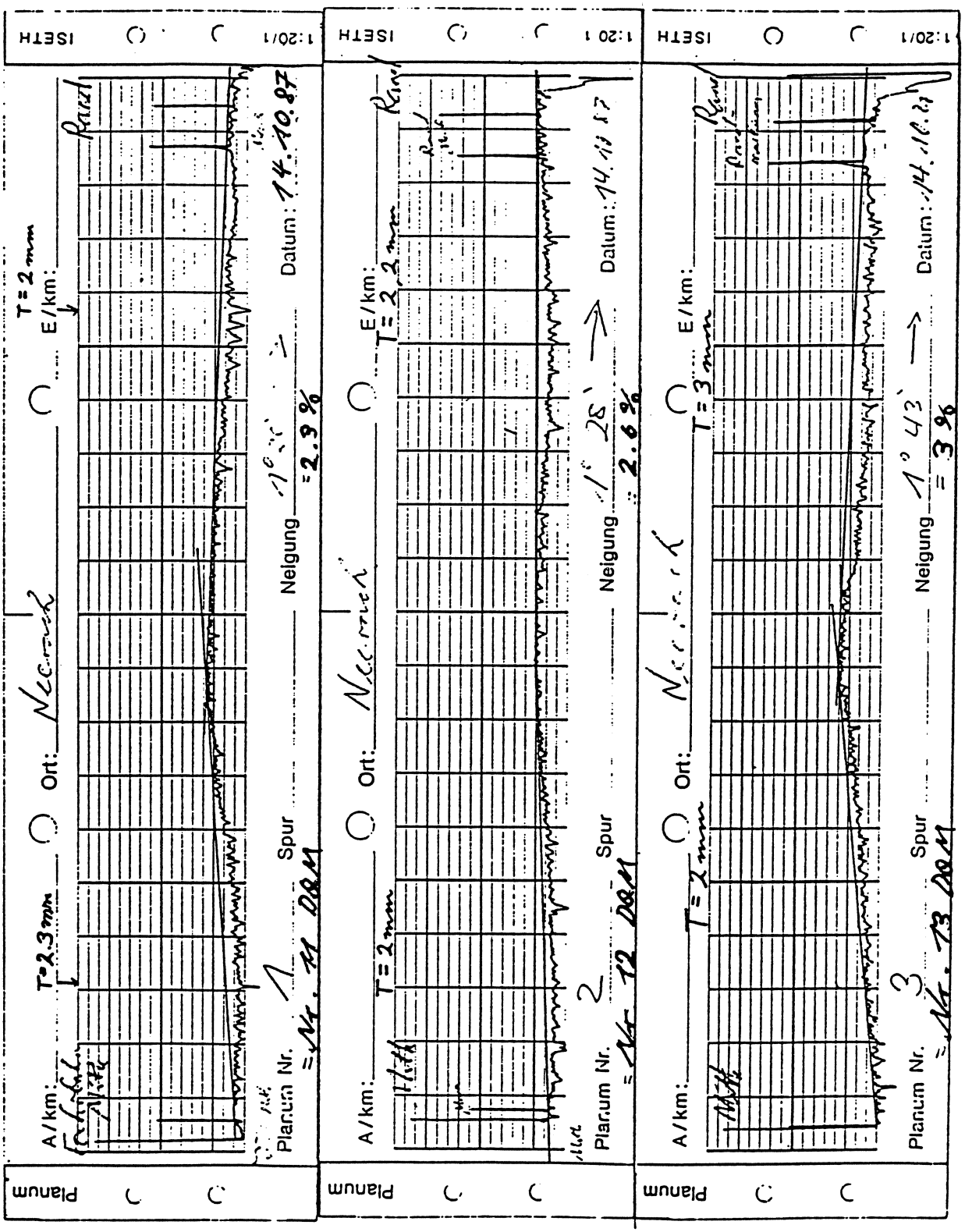


Abb. 28d Vergleichsmessung PLANUM-DQM-2 auf Teststrecke bei Dielsdorf

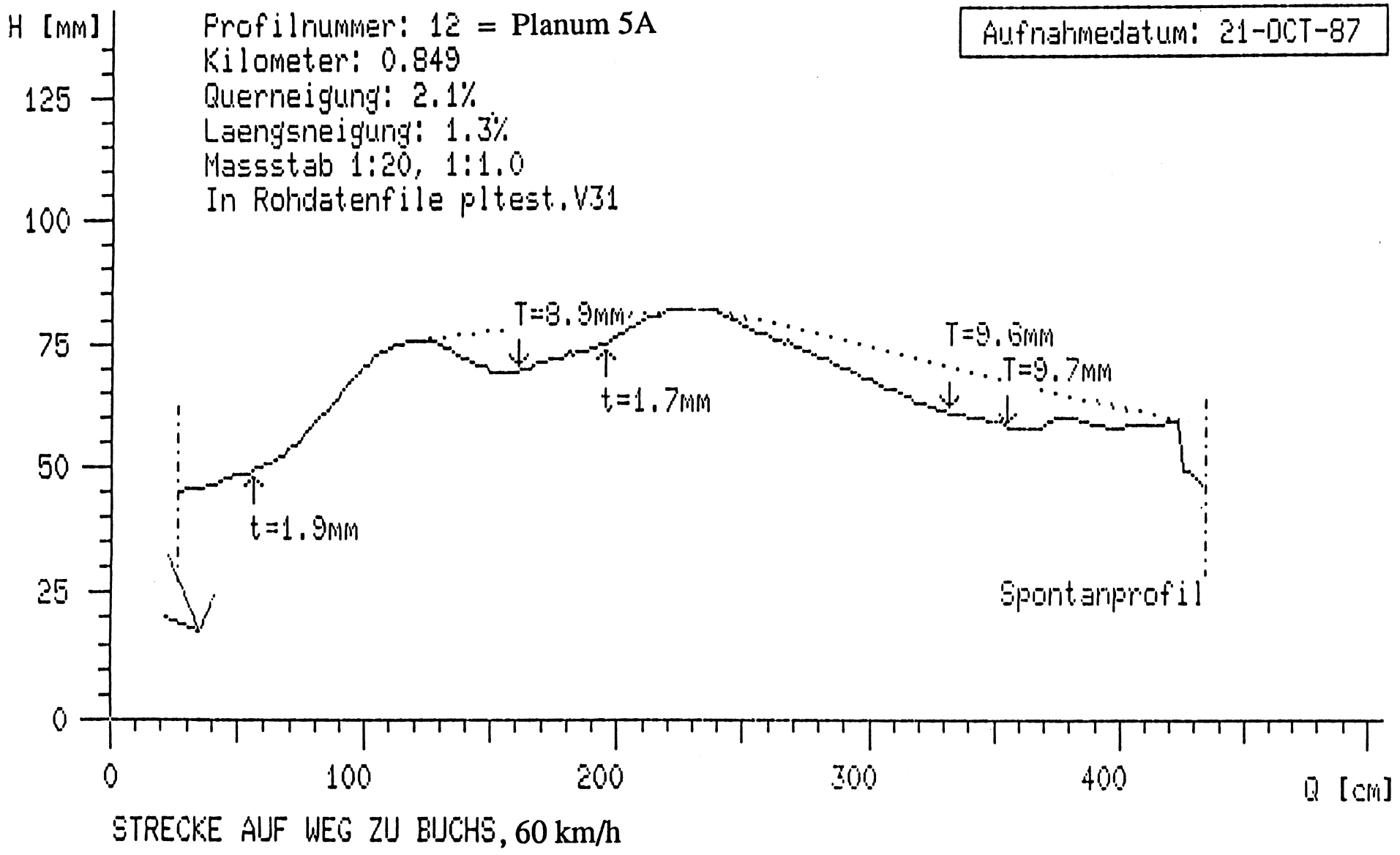


Abb. 29a Vergleichsmessung PLANUM-DQM-2 auf Teststrecke bei Buchs

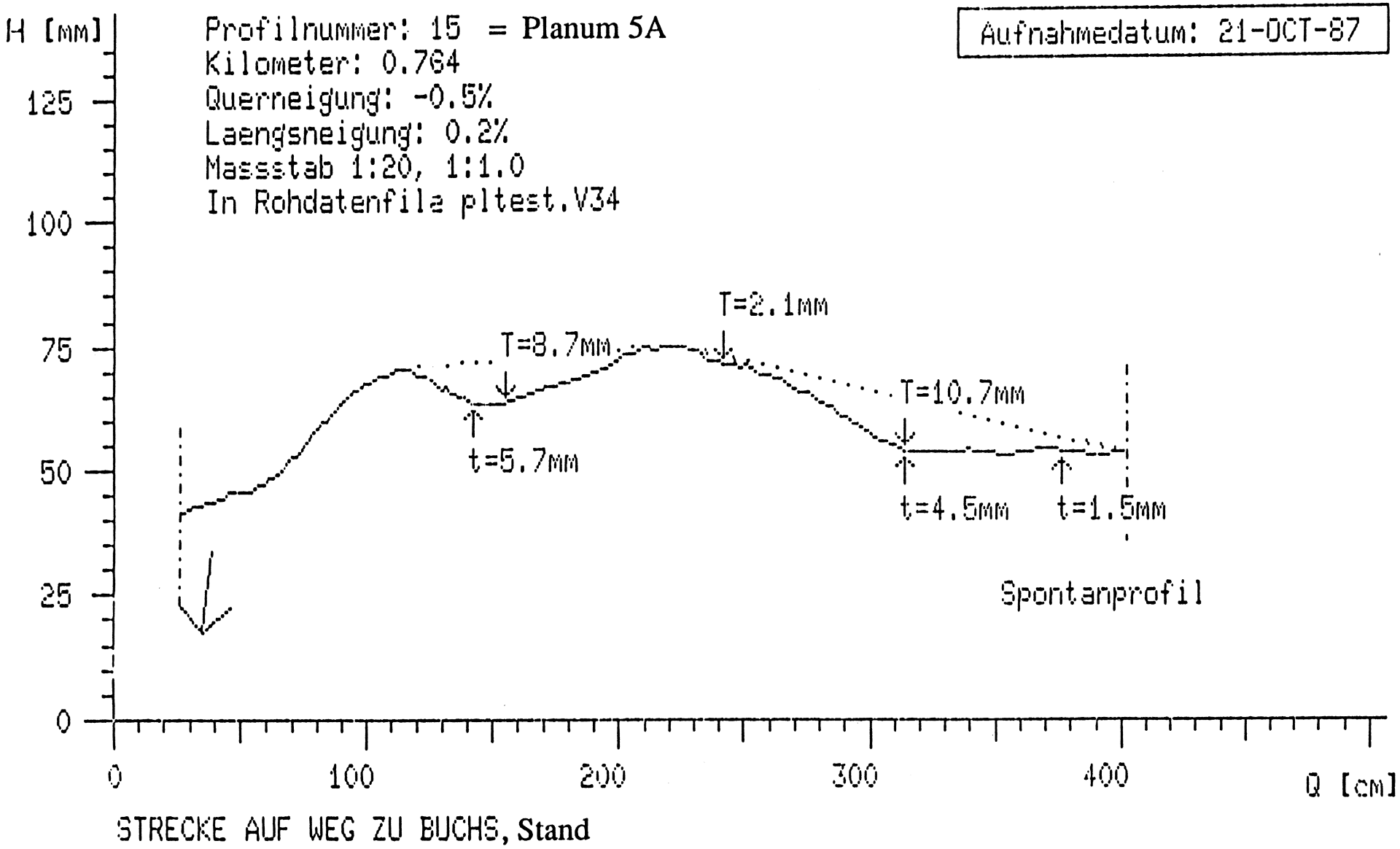


Abb. 29b Vergleichsmessung PLANUM-DQM-2 auf Teststrecke bei Buchs

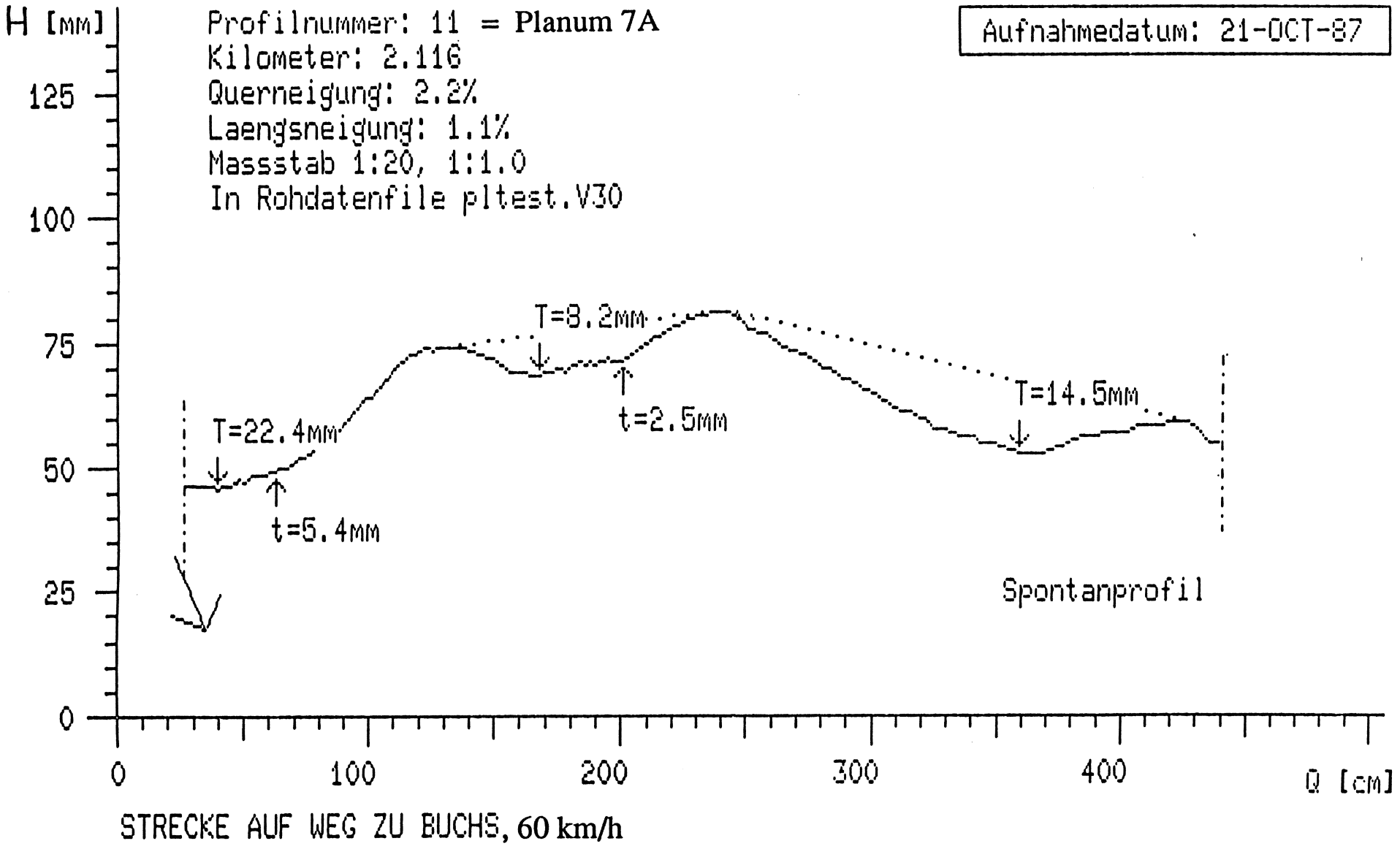


Abb. 29c Vergleichsmessung PLANUM-DQM-2 auf Teststrecke bei Buchs

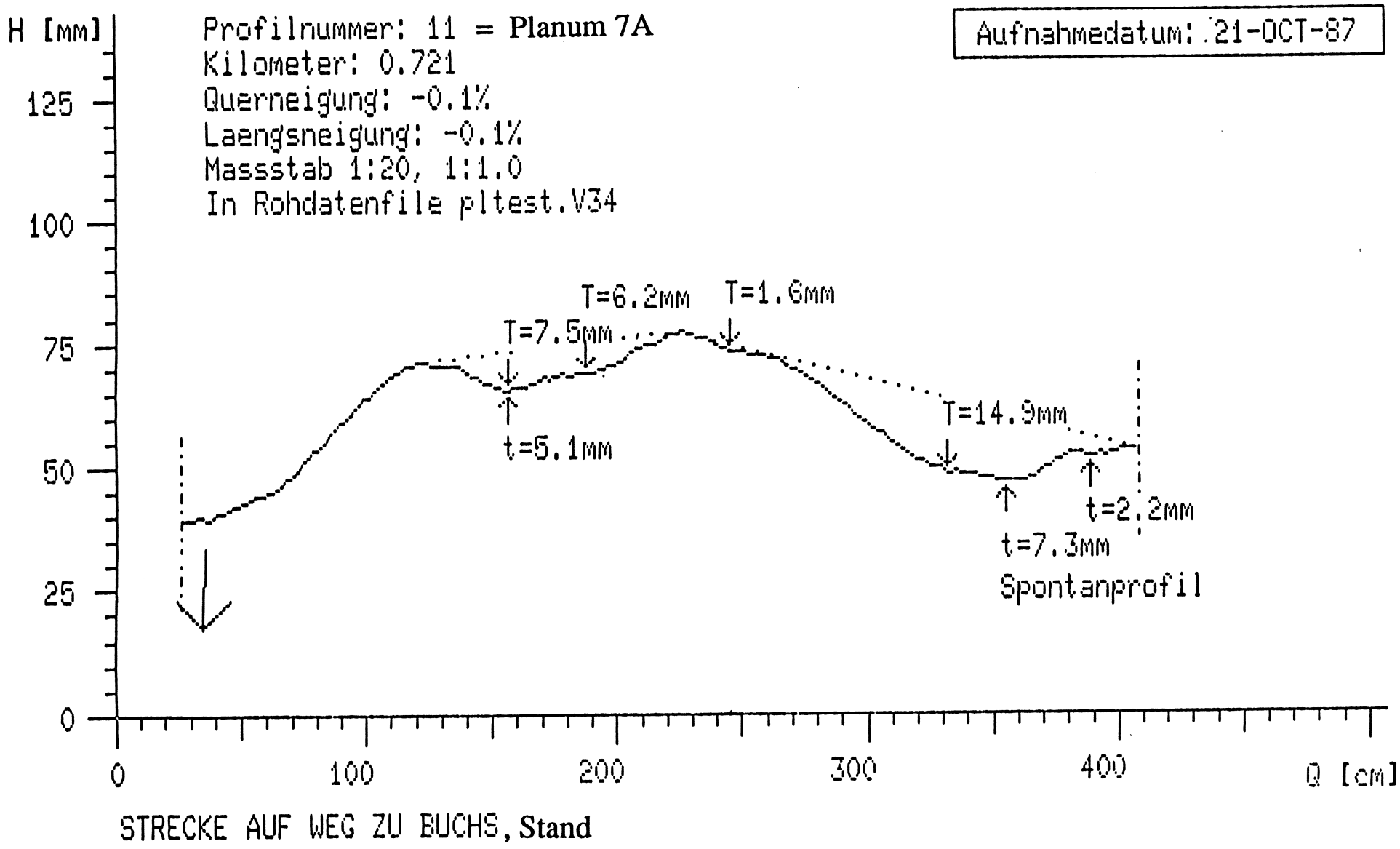


Abb. 29d Vergleichsmessung PLANUM-DQM-2 auf Teststrecke bei Buchs

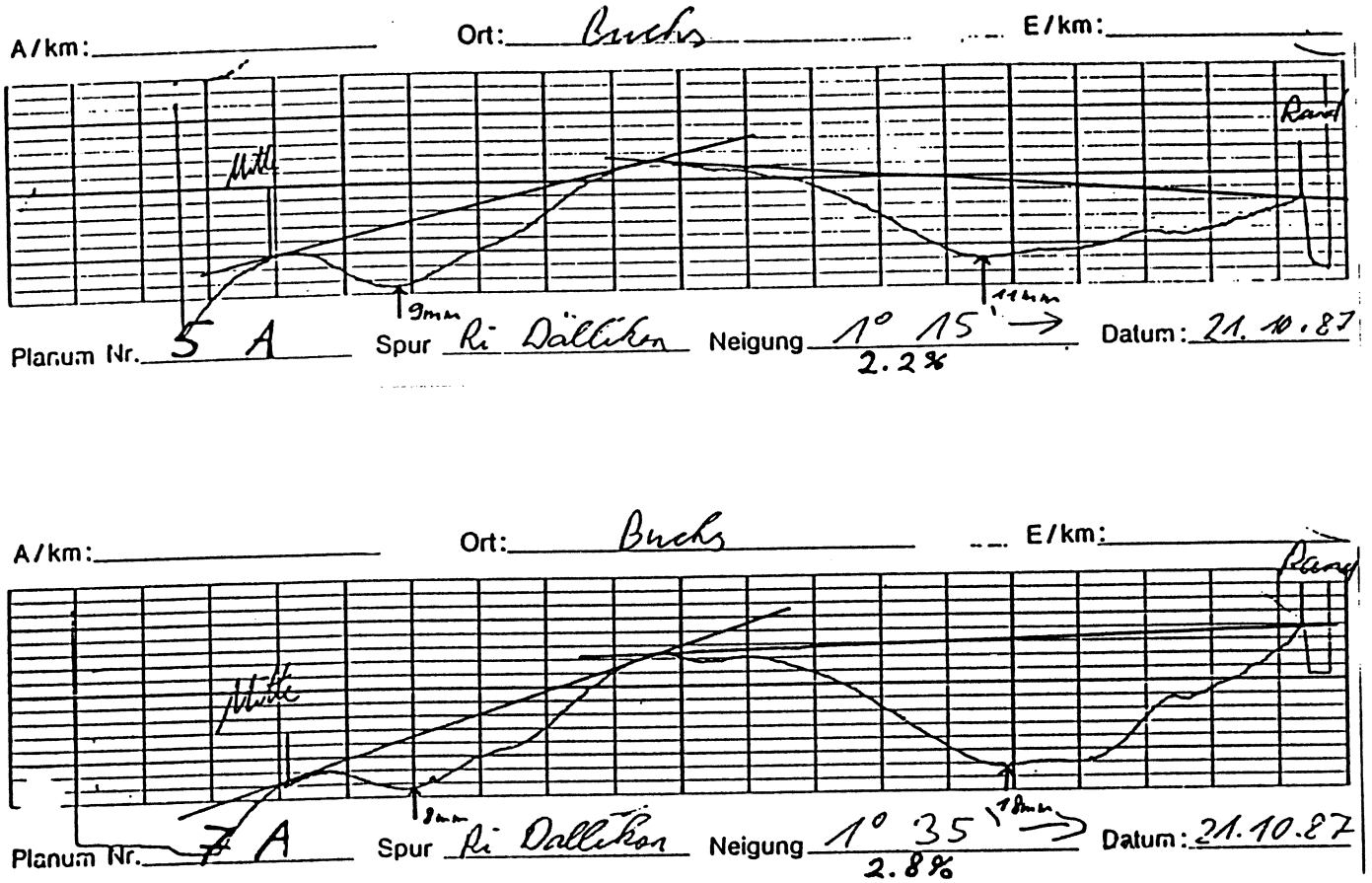
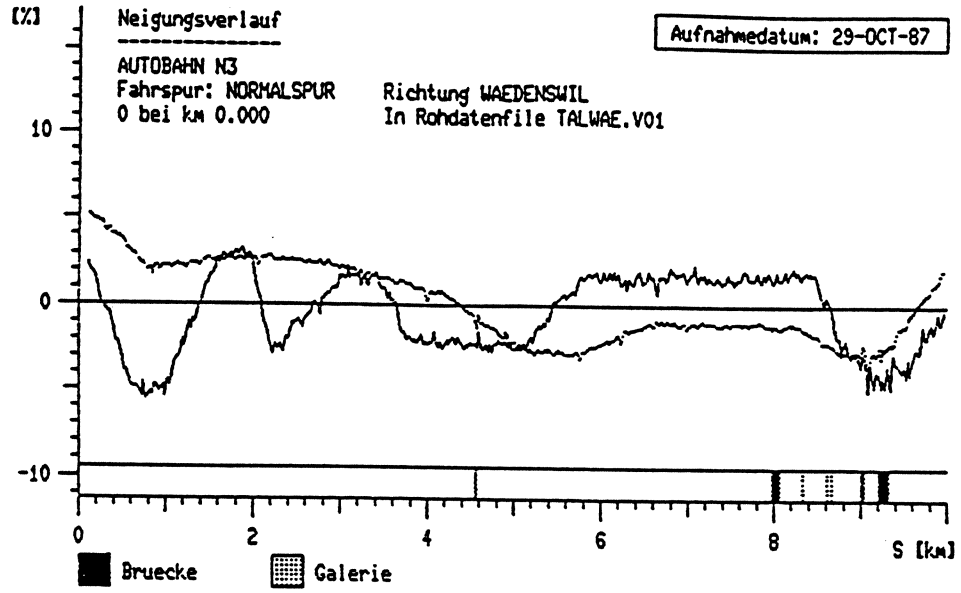
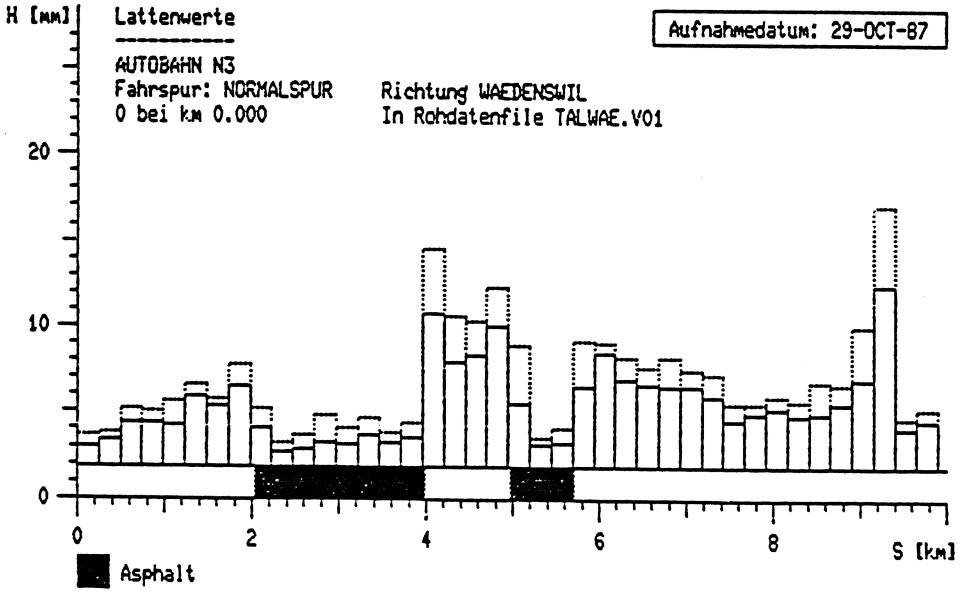


Abb. 29e Vergleichsmessung PLANUM-DQM-2 auf Teststrecke bei Buchs

Messergebnisse 1. Fahrt





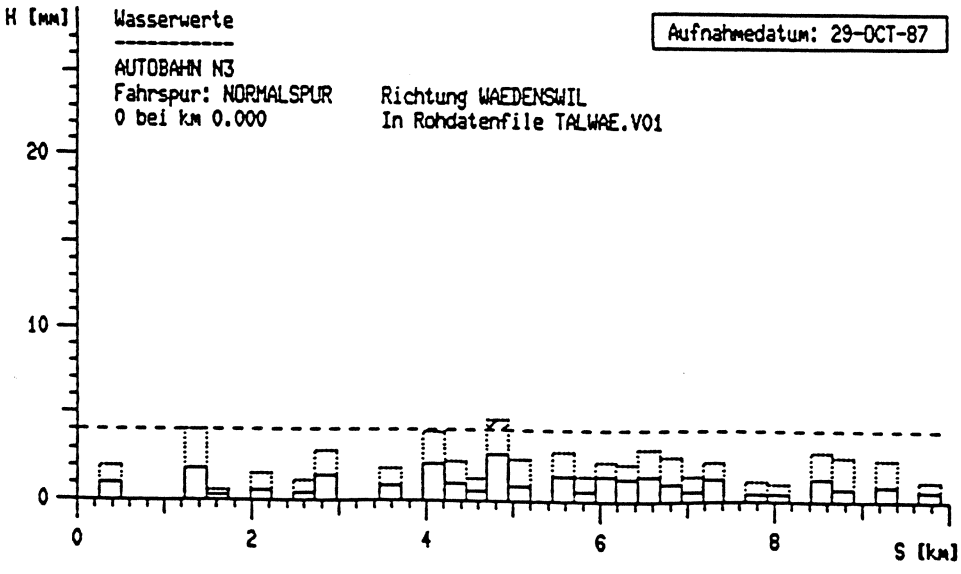


Abb. 30 Messung N3; Thalwil-Wädenswil 1. Fahrt

Messergebnisse 2. Fahrt

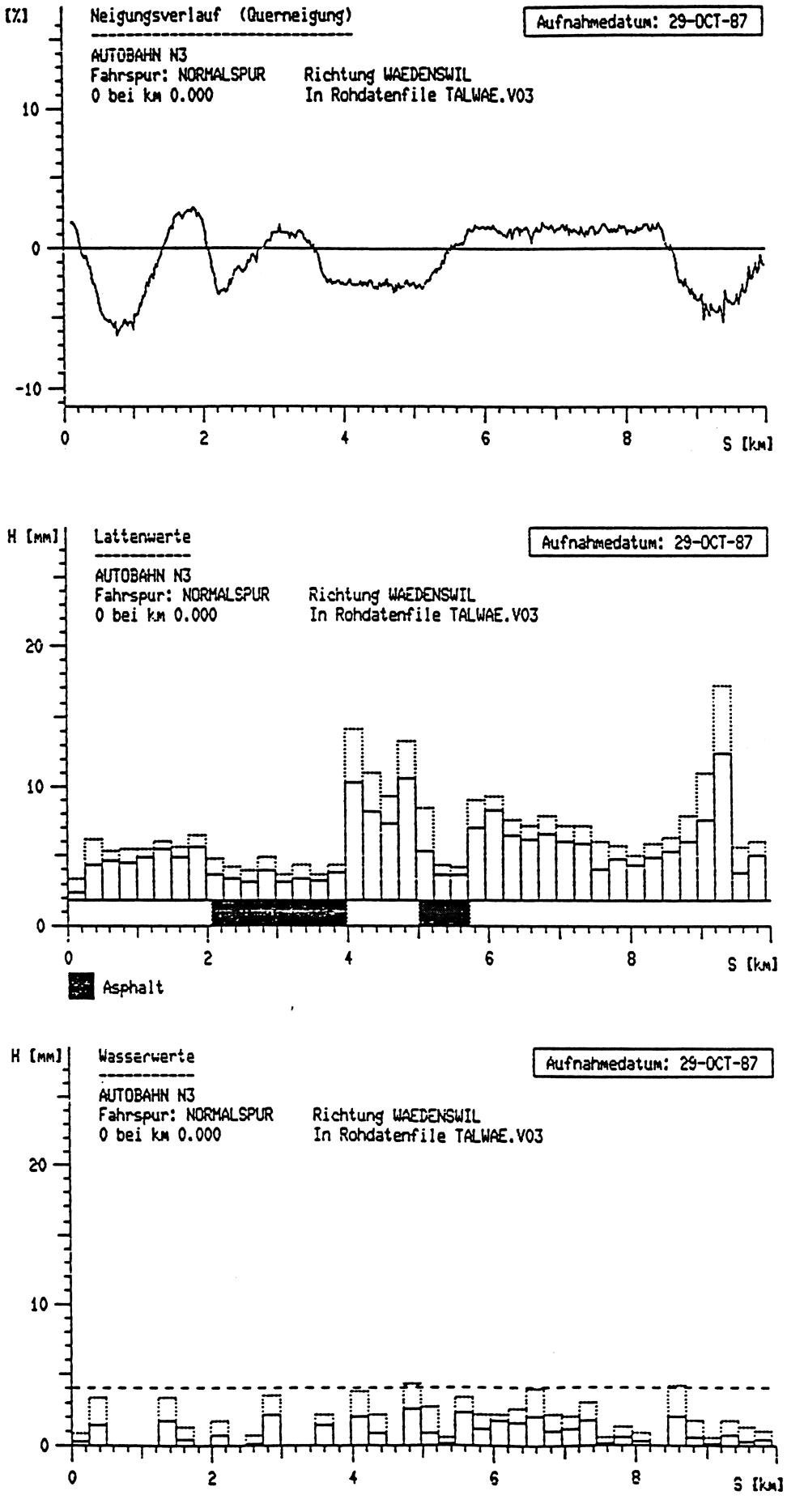


Abb. 31 Messung N3; Thalwil-Wädenswil 2. Fahrt

Messergebnisse 3. Fahrt

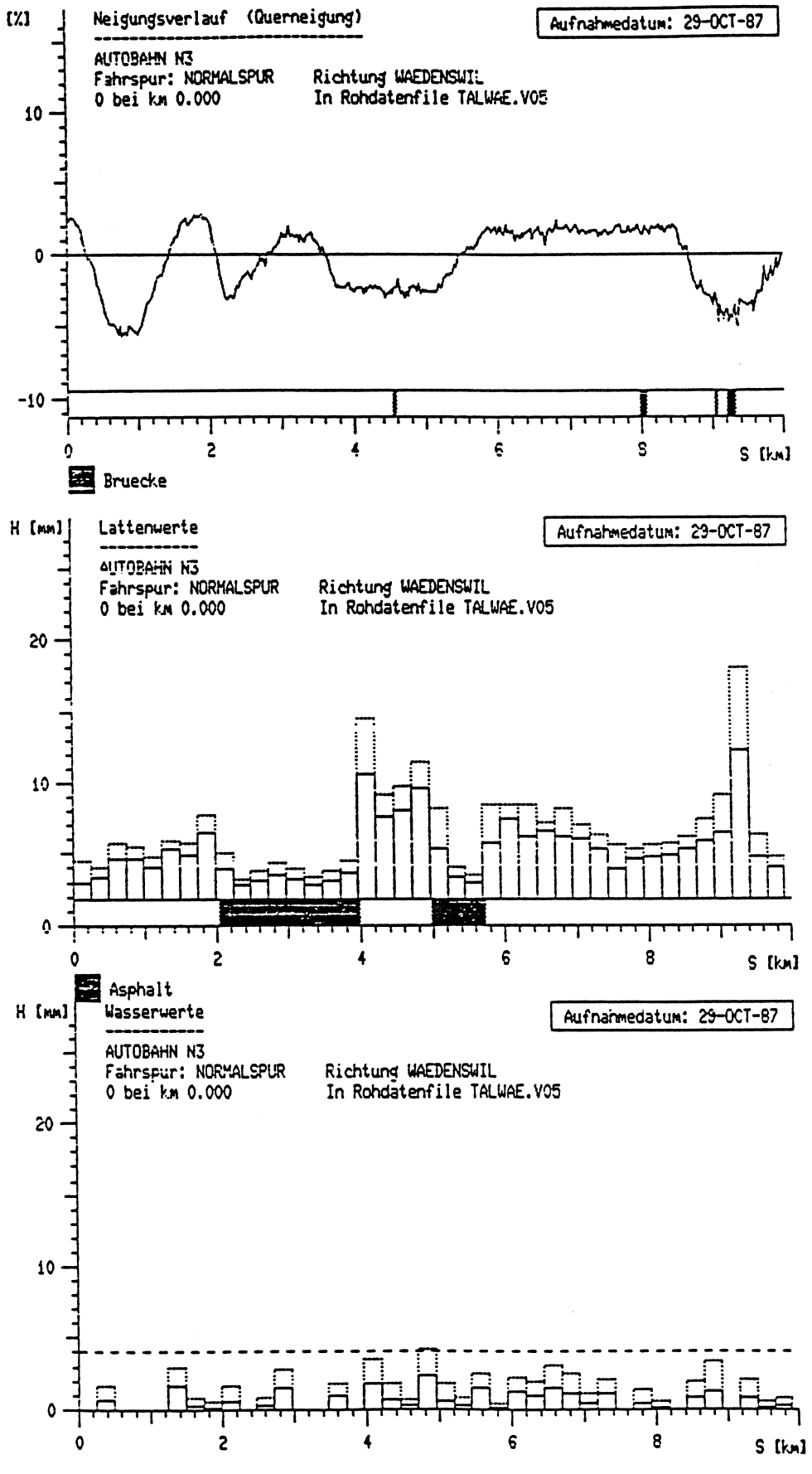


Abb. 32 Messung N3; Thalwil-Wädenswil 3. Fahrt

Messergebnisse 4. Fahrt

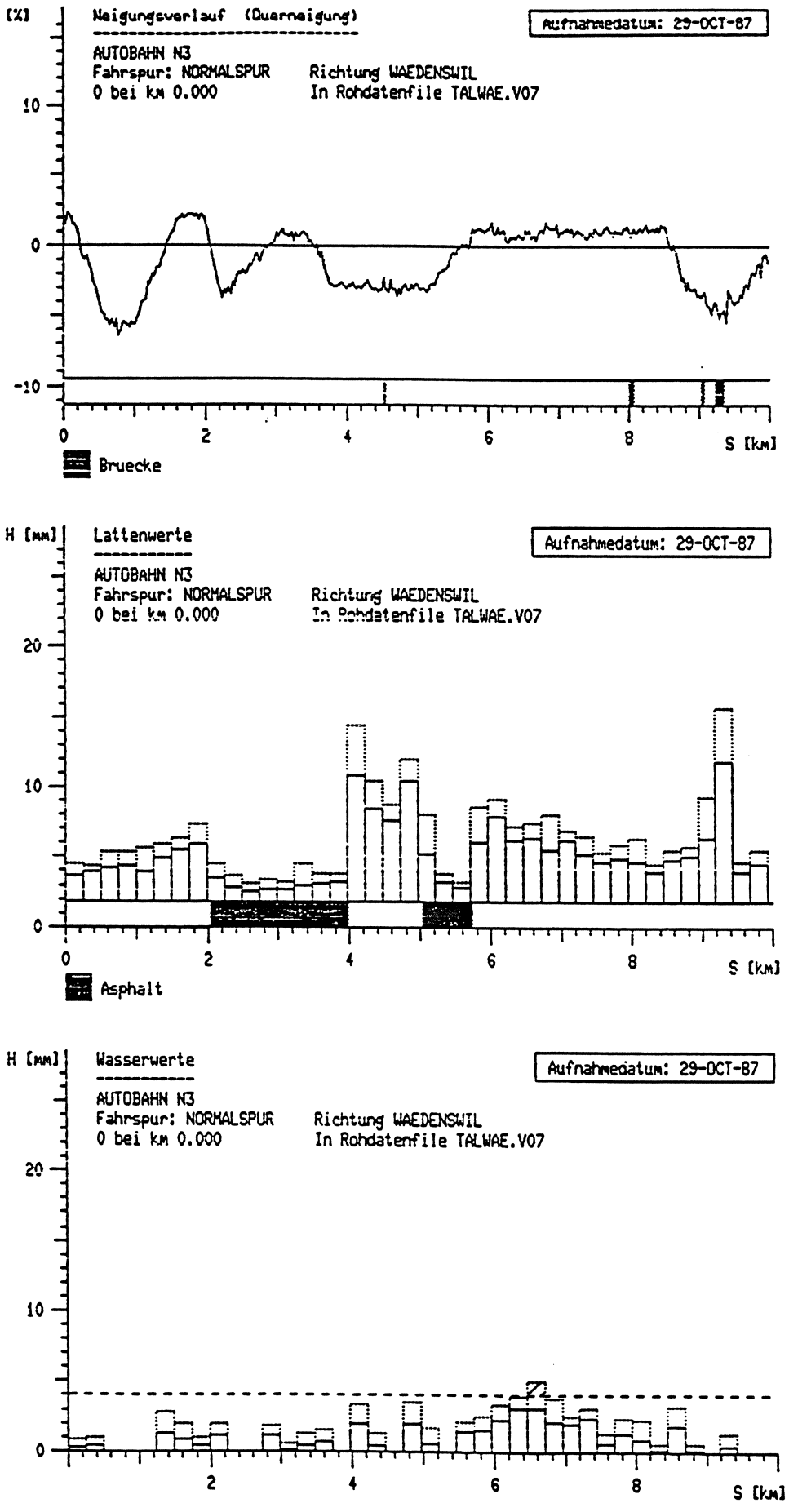


Abb. 33 Messung N3; Thalwil-Wädenswil 4. Fahrt

```
*****      DQM-2 Textrecord      *****

Systemdisk Nr.          001
Messprogramm-Version:   001
Filename:               ZUNE01.V01
Konto:                  S 41
Aufnahmedatum:          30-MAR-88;    09:00:41 - 09:20:26
Auftrag:                INTERN

Messobjekt:             AUTOBAHN

Fahrspur:               NORMAL              Richtung ZUERICH-NEUENHOF
Belag:                  ASPHALT

Wetter:                 HELL BEW.TROCKEN
Fahrer:                 HANS
Operateur:              WILLI



Angaben zum System:
-------------------

Abstand Operateur-Blitzblende: 7.8 m
Wegmesserkorrektur:            0.0 %
Kamerahoehe:                   80.0 cm

629 Profile, davon 3 Spontanprofile


                  *****  Streckentabelle ****
                  ----------------------------

Messstrecke:      Anfang:    0.0000 km
                  Soll-Ende: 30.0000 km
                  Ist-Ende:  19.3145 km


1 Teilstrecke:    Anfang[km]      Ende[km]     Intervall[m]  Spurbreite[cm]
-------------------------------------------------------------------------
1.                   0.5000        30.0000          30.00           400.
-------------------------------------------------------------------------


  Bemerkungen des Operateurs vor der Messfahrt:
  ---------------------------------------------

  VERSUCHSFAHRT
  80 KM/H
```

Abb. 34 Dokumentationstext aus "Open- und Endrecord"

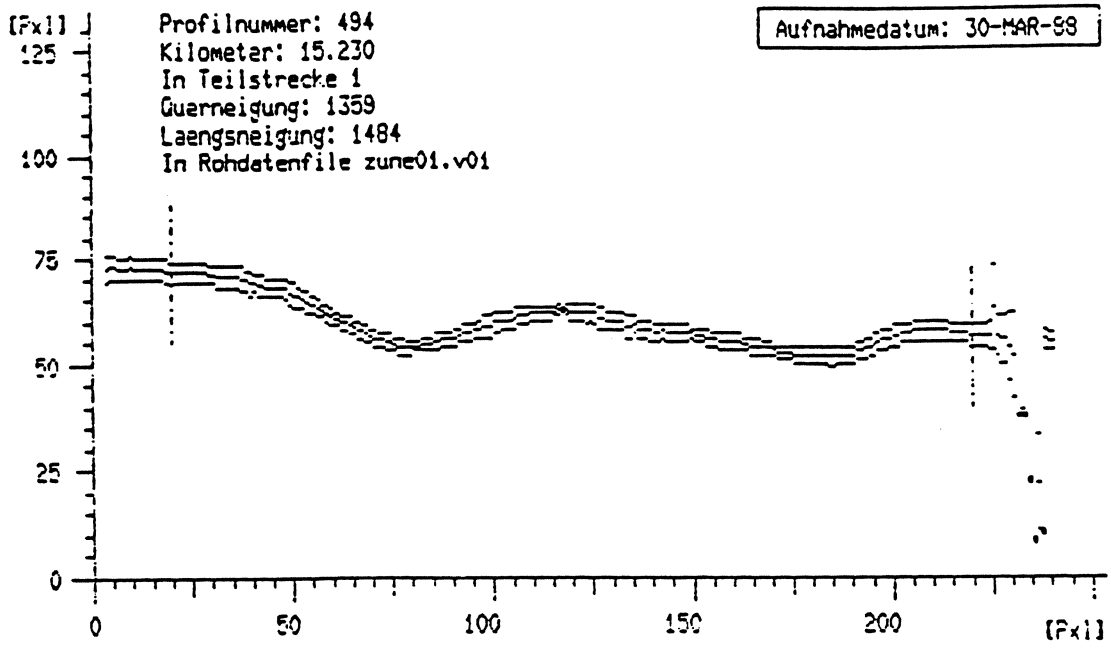


Abb. 35 Rohprofil: X1, X2 und Mittellinie

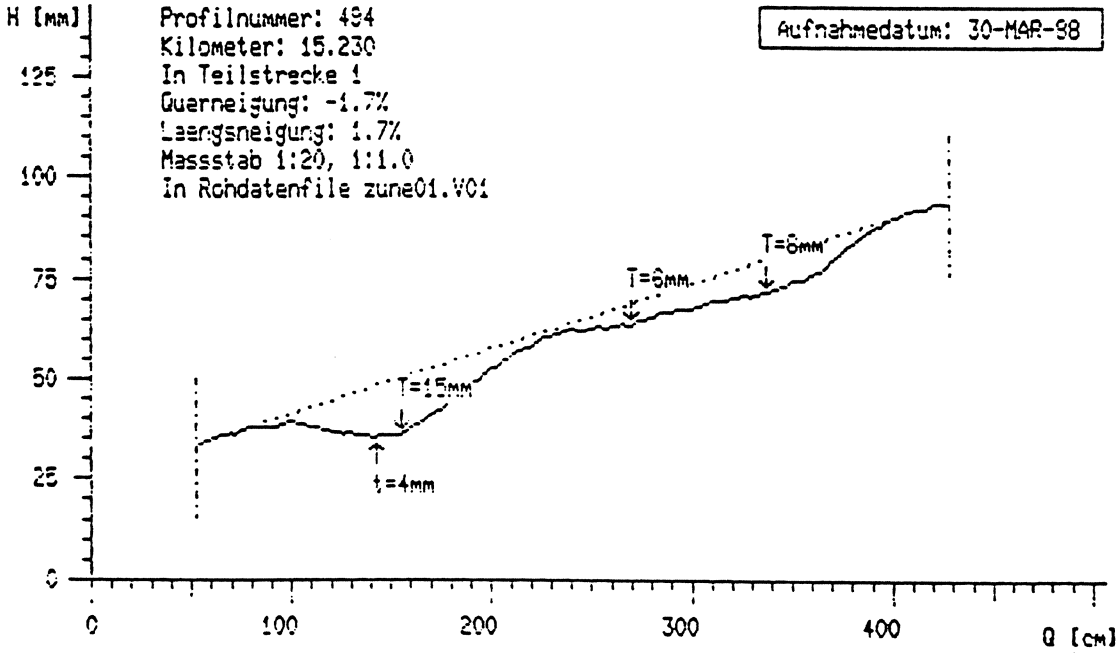


Abb. 36 Profil in wirklicher Lage

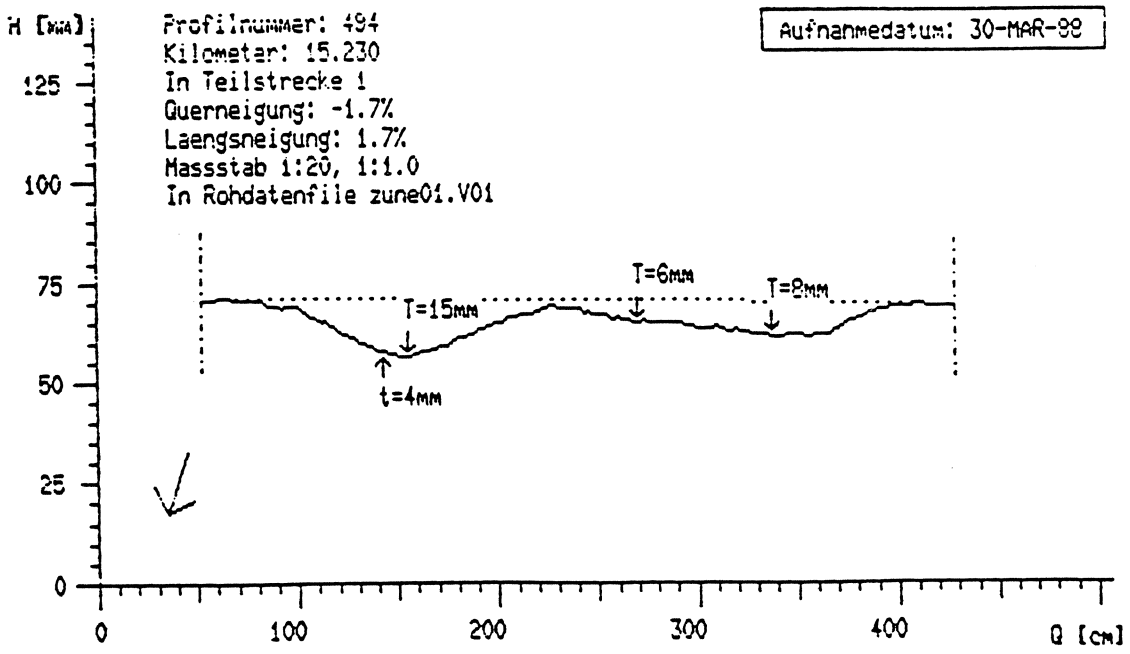


Abb. 37 Profil in horizontaler Lage

Profildokumentation

Profil bei Kilometer 15.230
Profilnummer: 494
In Rohdatenfile ZUNE01.v01
Aufnahmedatum: 30-MAR-88
Auftrag: INTERN
Messobjekt: AUTOBAHN
Belag: ASPHALT
Fahrspur: NORMAL
Richtung: ZUERICH-NEUENHOF

Querneigung: -1.7%
Laengsneigung: 1.7%

Profil-Kennwerte	linke Haelfte	rechte Haelfte
	Muldenwerte	
Hauptrinne:	T= 14.7 mm Q= 155 cm	T= 8.4 mm Q= 338 cm
Nebenrinne:		T= 5.6 mm Q= 270 cm
Flaeche:	F= 203 qcm	
	Wasserwerte	
Hauptrinne:	t= 4.3 mm q= 143 cm	
Nebenrinne:		
Flaeche:	f= 17 qcm	

Operateureingaben waehrend der Fahrt:

Profilqualitaet: 0 Fehler korrigiert

Abb. 38 Profildokumentation in Tabellenform

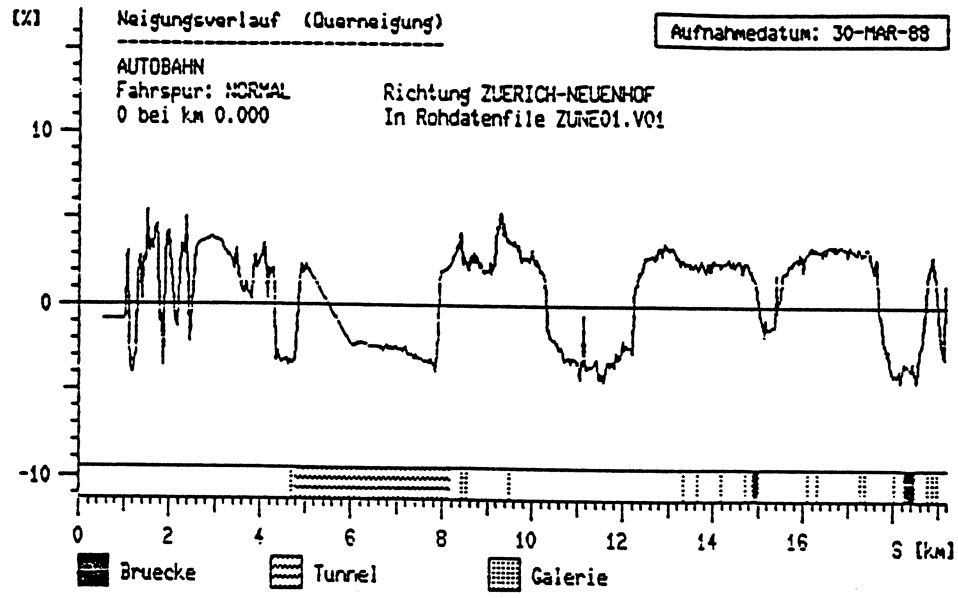


Abb. 39 Querneigungsverlauf

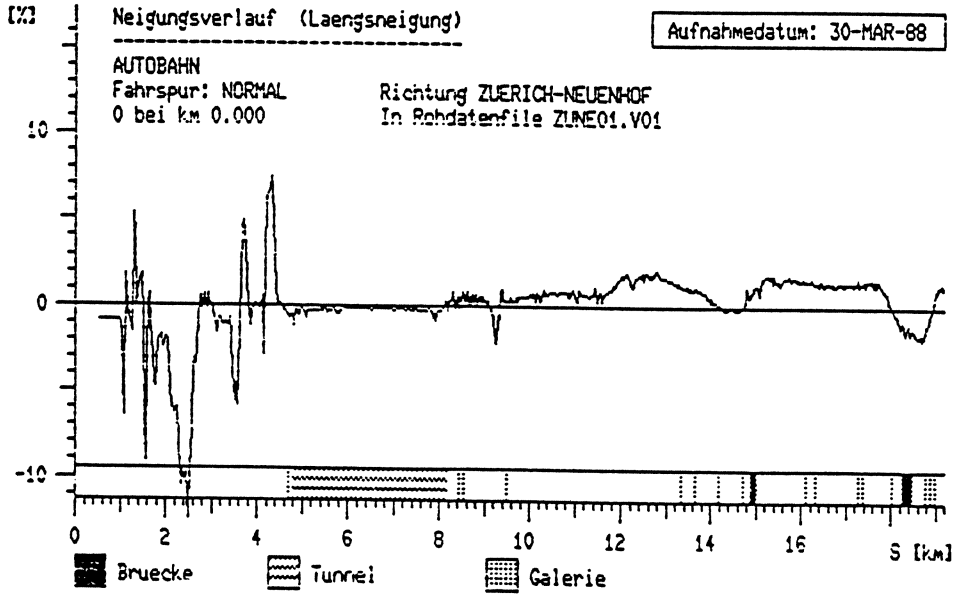


Abb. 40 Längsneigungsverlauf

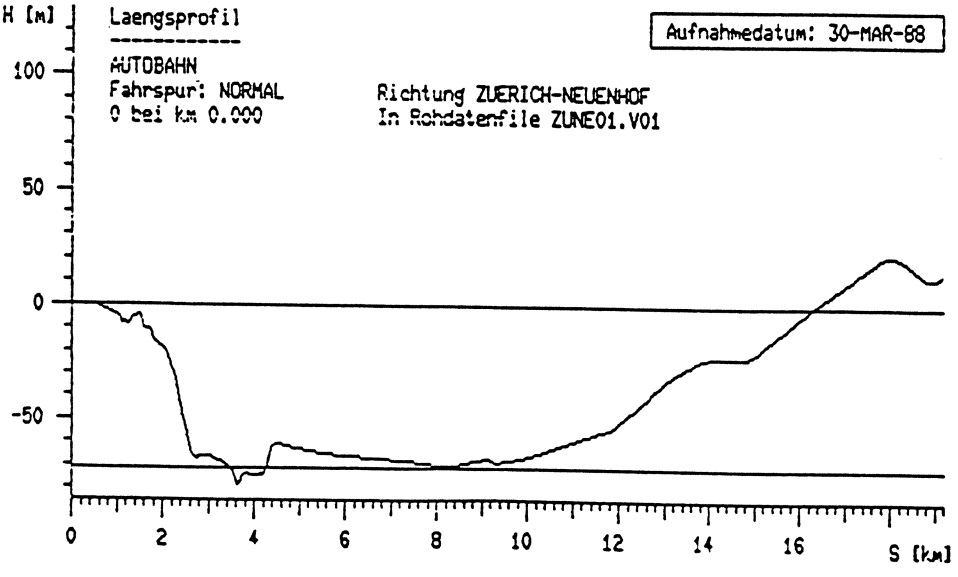


Abb. 41 Höhenprofil

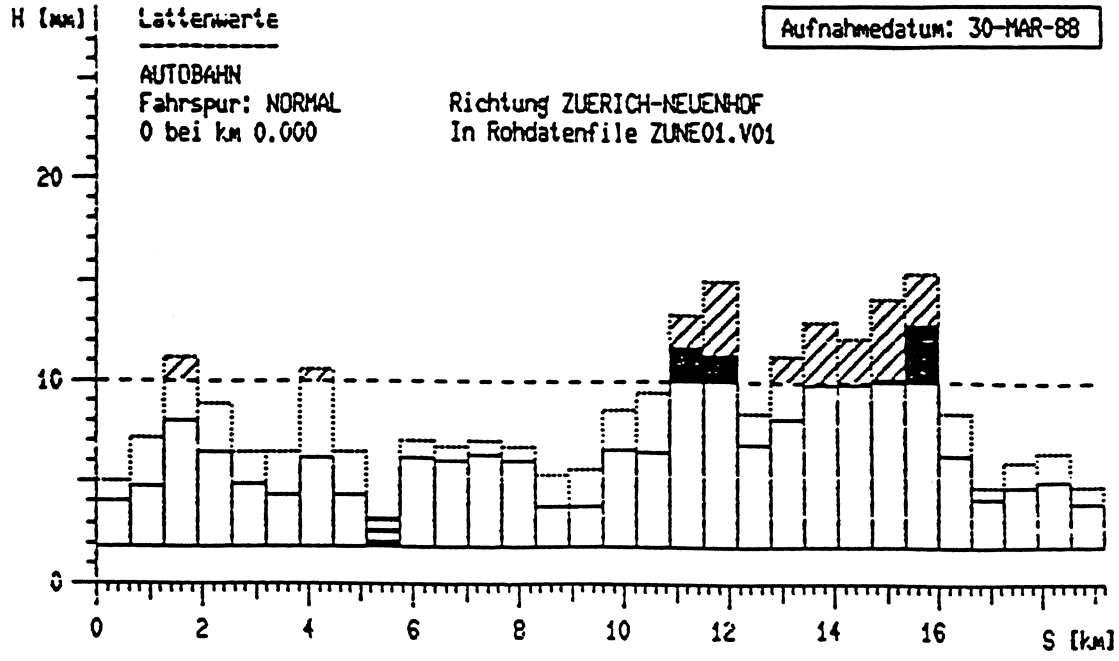


Abb. 42 Lattenwerte

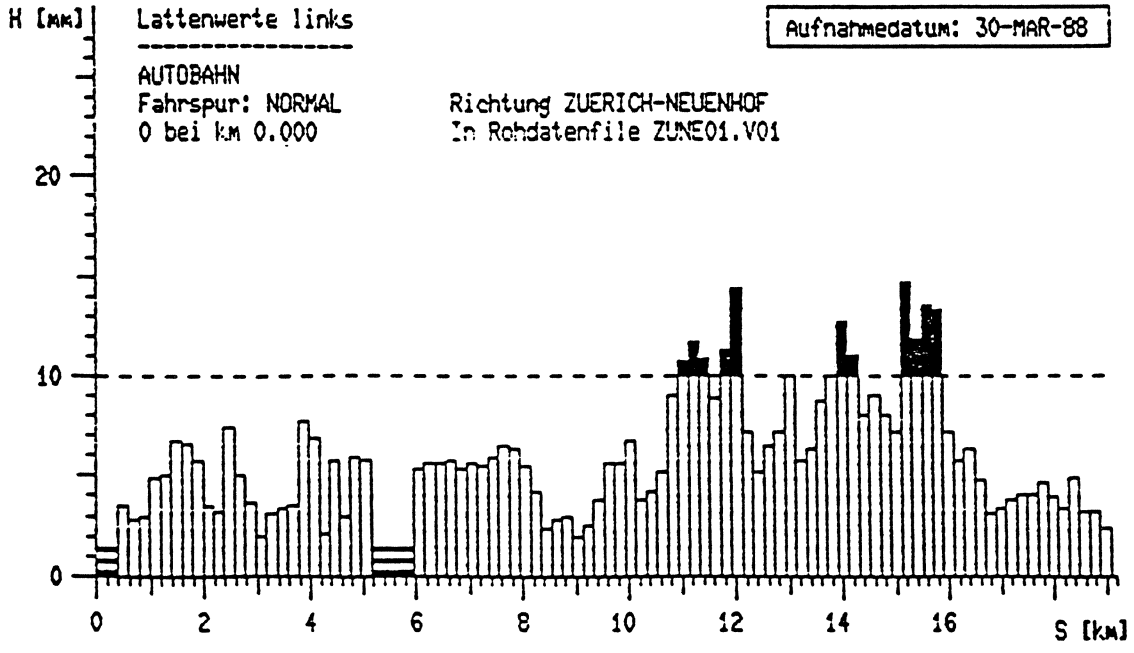


Abb. 43 Lattenwerte links, kleinere Abschnitte

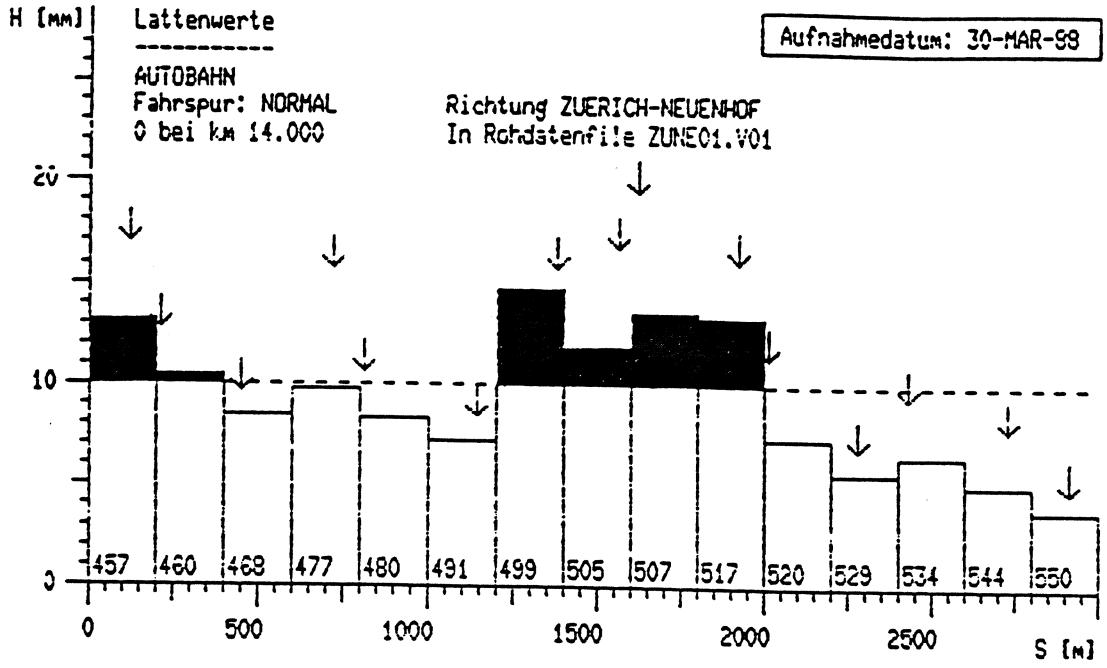


Abb. 44 Lattenwerte, Streckenausschnitt

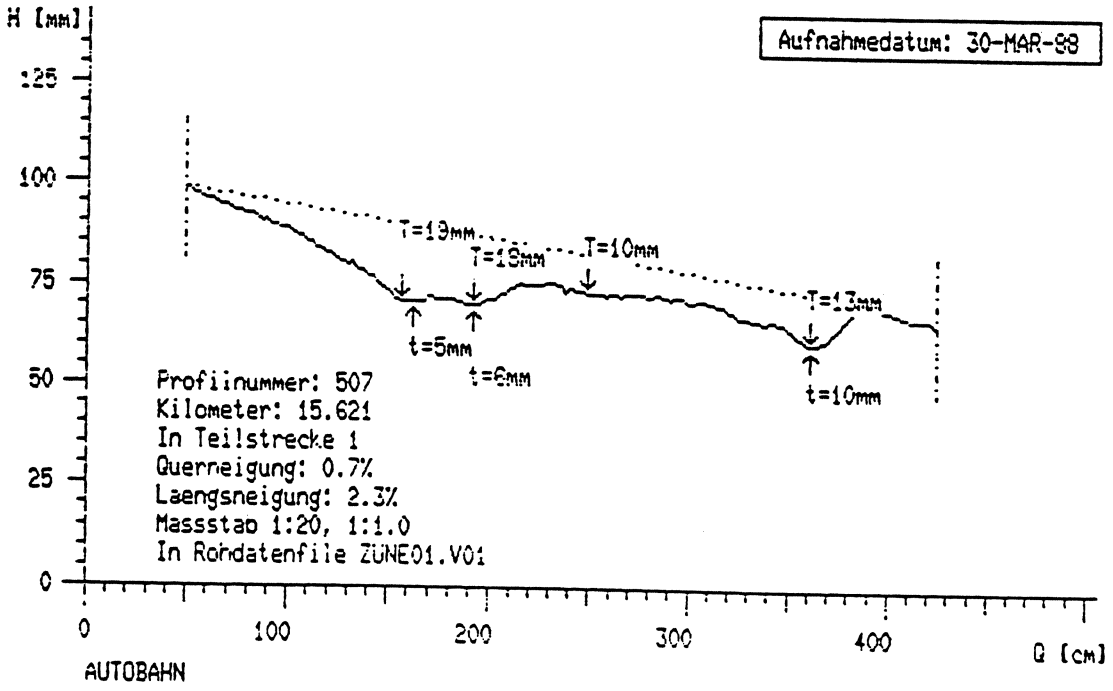


Abb. 45 Lattenwerte "schlechtestes" Profil aus Abb. 44

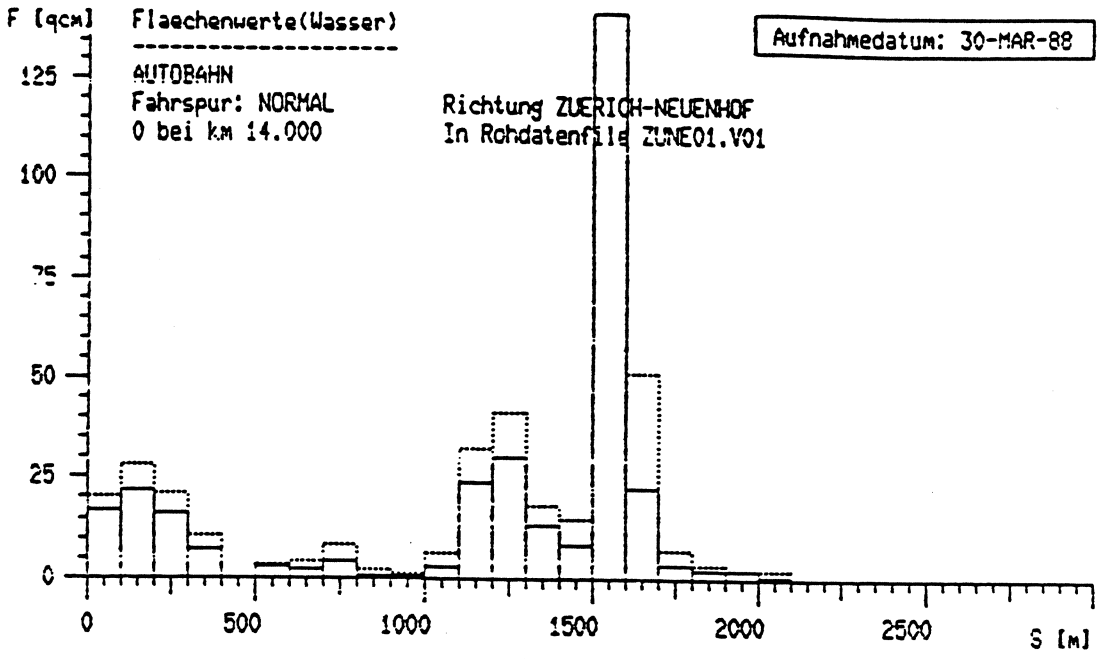


Abb. 46 Flächenwerte (Wasser)

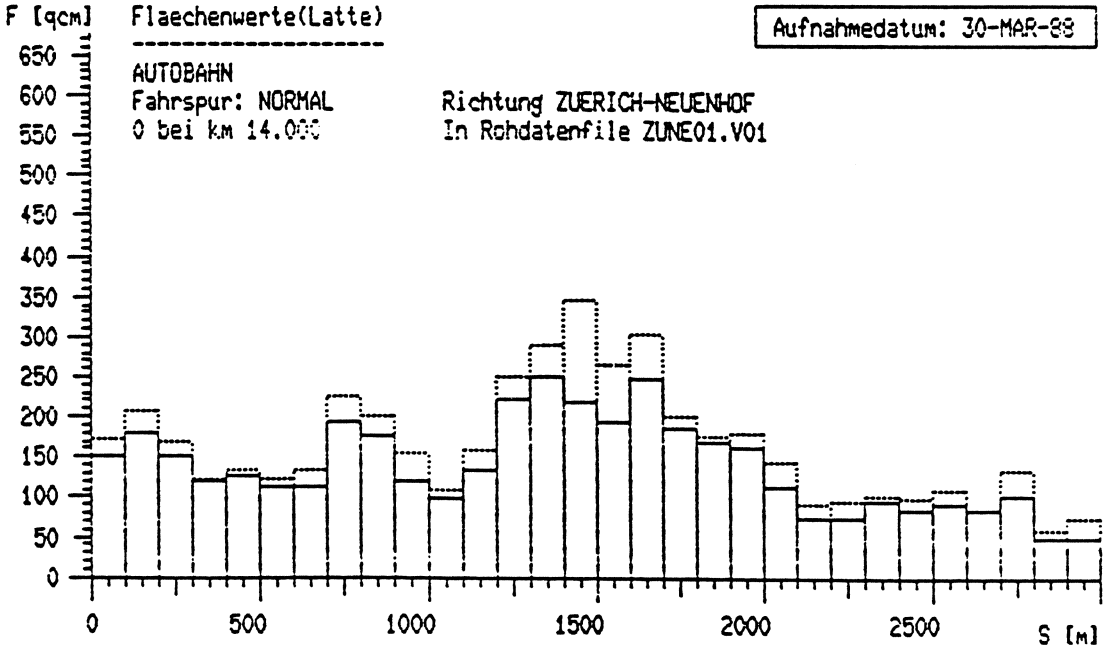


Abb. 47 Flächenwerte (unter der Latte)

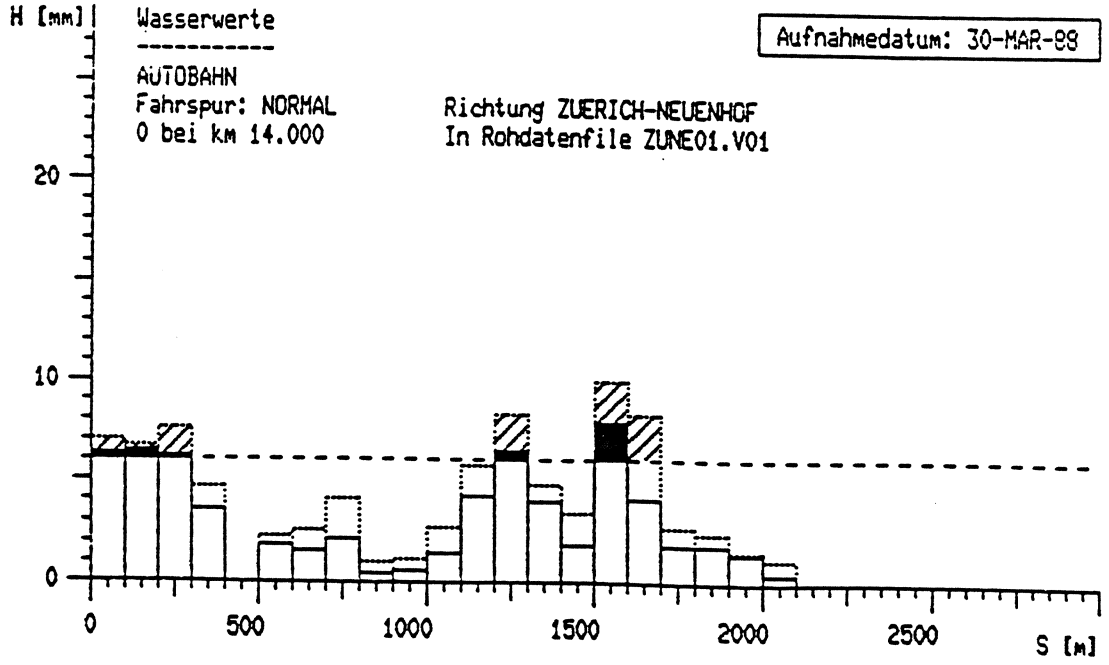


Abb. 48 Wassertiefen in schlechtem Teilstück

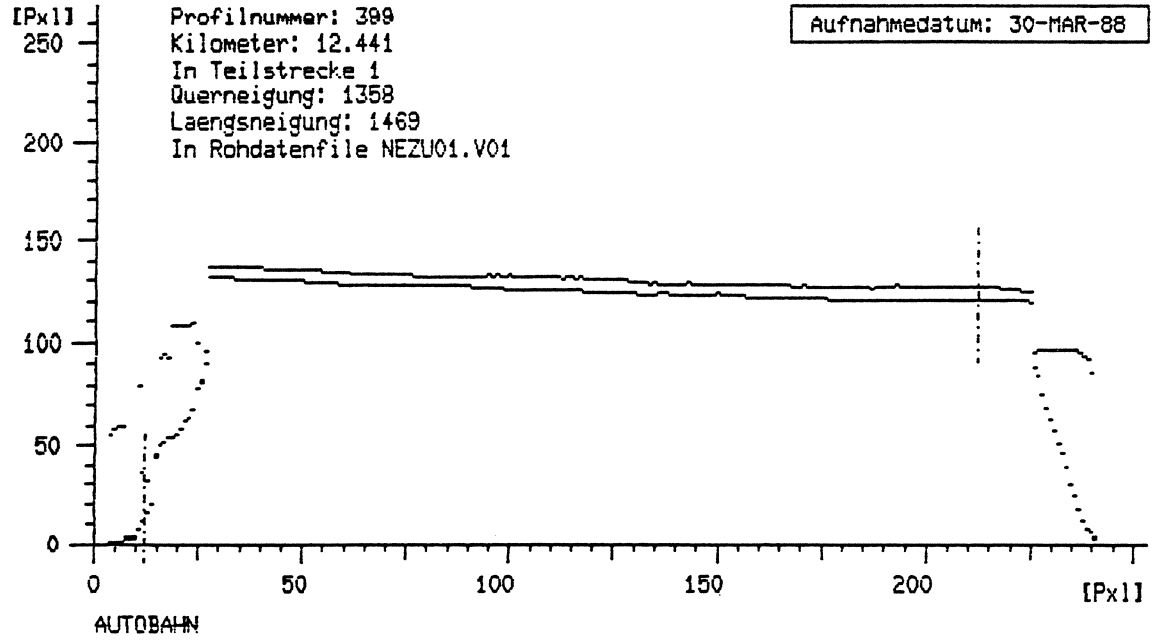


Abb. 49 Erscheinen der Bodenmarkierung bei hellem Tageslicht

BEILAGE

Beteiligung am interdisziplinären Forschungsprojekt DQM-2 1979-1986

ISETH **Institut für Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau**

Prof. H. Grob		Vorsitz, Projektleitung
G. Bachner, +1986	dipl. Bauing.	Pflichtenheft, Anwendung
J. Burgstaller,	Ing. HTL	elektr. Installationen
Dr. S. Huschek,	dipl. Bauing.	Koordination
J. Hilpertshauser		mechan. Installation
B. Frommelt		Anwendung

IGP **Institut für Geodäsie und Photogrammetrie**

Prof. Dr. H. Matthias		Projektleitung
S. Barandung,	dipl. Ing. ETH	Software
H. Wüst,	dipl. Ing. ETH	Vorstudie, Vorprojekt

AFIF **Arbeitsgemeinschaft für industrielle Forschung der Gesellschaft**
GFF **zur Förderung der Industrieorientierten Forschung an der ETH**

Dr. A. Aemmer,	dipl. Phys. ETH	Software
Prof. Dr. E. Baumann, + 1981		Direktor AFIF, Projektleiter
J.P.Graf,	dipl. Ing. ETH	Systemanalyse (bis 1979)
Dr. H. Hügeli,	dipl. Ing. ETH	Systemanalyse (bis 1979)
Prof. Dr. H. Melchior		Projektleitung
M.Nai,	dipl. Ing, ETH	Hardware
R. Richner,	El. Ing.	Hardware
H. Rytz,	dipl. Phys. ETH	Software
B. Schneuwly,	dipl. Ing. ETH	Hardware

BAMF **Bundesamt für Militärflugplätze, Betriebsgruppe Buochs**

H. Krähenbühl
H. Brandenberger

Sachbearbeiter ausserhalb der ETH

Dr. T. Celio,	dipl. Ing. ETH	Technische Projektleitung (bis 1982), sowie
Ufficio d'ingegneria per l'ellettronica e la luce, CH-6775 Ambri		Entwicklung und Herstellung Blitzaggregat und Beleuchtungsoptik
J. Codoni,	Ing. HTL	Blitzaggregat und Beleuchtungsoptik
G. Gendotti,	Konstrukteur	
Eumig-Bolex International SA		Entwicklung und Herstellung anamorphotisches Kameraobjektiv 1:20
F. Laurent,	Ing. Opt.	Herstellung anamorphotisches Kameraobjektiv 1:20
Calcules et Techniques Optiques, CH-1400 Yverdon		

FINANZIERUNG

Kommission für Forschung im Strassenwesen (ASB)

Schulleitung der ETH Zürich