



Institut für Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau an der  
Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich

Vorsteher: Prof. H. Grob

---

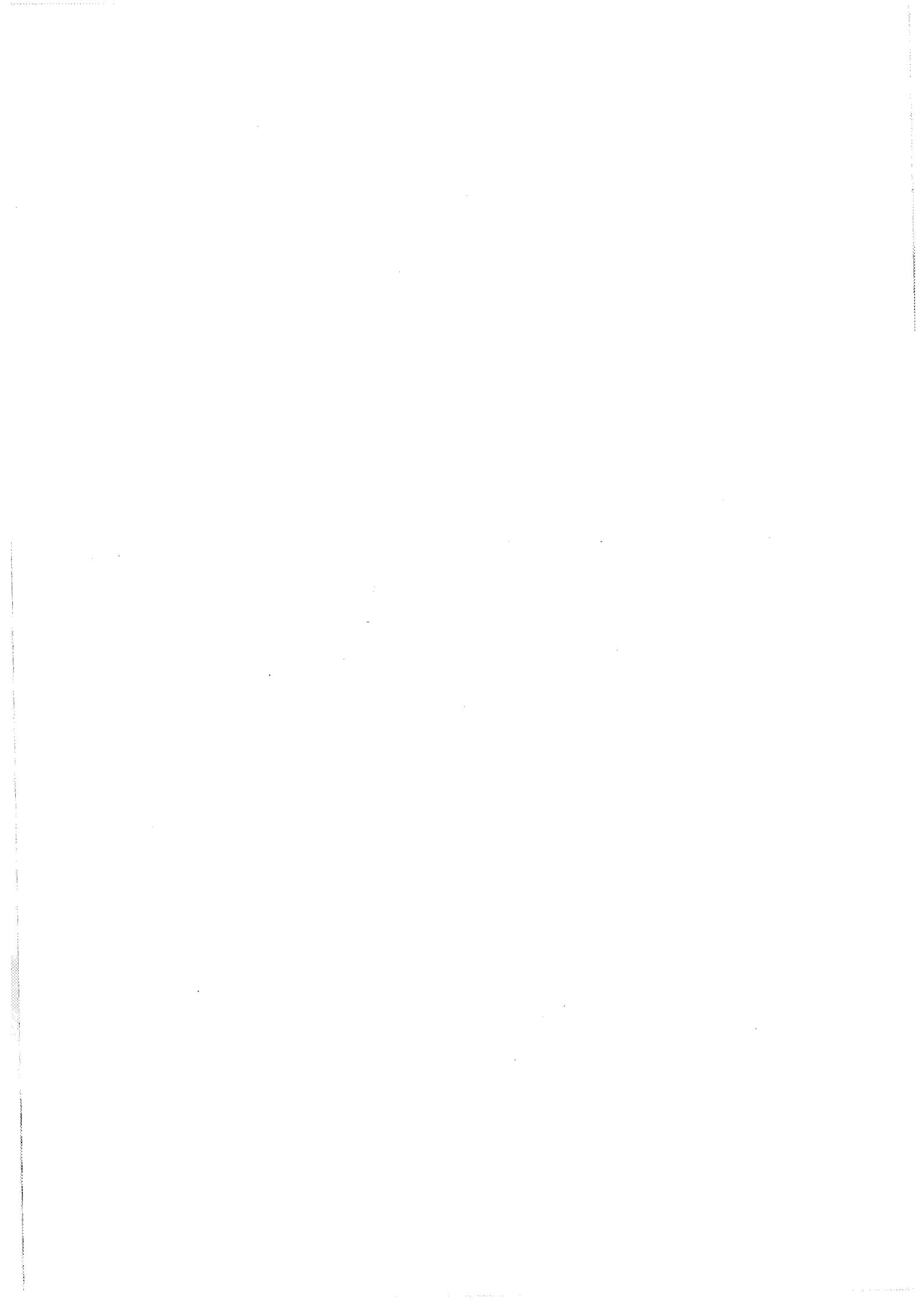
# VERHALTEN DES STRASSEN- OBERBAUES UNTER DYNAMISCHER RADLAST

COMPORTEMENT DE LA SUPERSTRUCTURE  
ROUTIERE SOUS CHARGE DYNAMIQUE

S. Huschek, Dr. sc. techn.

---

Forschungsauftrag 18/74  
des Eidgenössischen Departementes des Innern  
Schlussbericht, März 1985



I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

	Seite:
1. EINLEITUNG	3
2. FAHRBAHNUNEVENHEITEN UND DYNAMISCHE RADLASTEN	5
3. MESSTECHNIK	9
3.1. Beschleunigungsmessung	9
3.2. Druckmessung	9
3.3. Temperaturmessung	13
4. EINRICHTEN DER MESSSTELLEN	19
5. DURCHFÜHRUNG DER MESSUNGEN	25
5.1. Belastungsfahrzeug	25
5.2. Messfahrten	27
5.3. Zeitplan	28
6. AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE	31
6.1. Beschleunigungsmessung	31
6.2. Druckmessung	43
6.3. Temperaturmessung	48
7. RECHNUNGEN MIT "BISAR"	53
8. VERGLEICH VON GEMESSENEN UND GERECHNETEN WERTEN	61
8.1. Krümmungsradien	61
8.2. Druckzustand	67
9. FOLGERUNGEN	71
10. LITERATUR	75
11. ANHANG I, II und III	77-120



# Verhalten des Strassenoberbaues unter dynamischer Radlast

---

## 1. EINLEITUNG

Die wichtigsten Tragfähigkeitsprüfungen im Strassenbau werden der Einfachheit halber unter statischer Belastung durchgeführt (so zum Beispiel Plattenversuch und Deflektionsmessungen). Im Gegensatz dazu ist aber die effektive Beanspruchung des Strassenkörpers unter dem rollenden Rad dynamischer Natur. Zum Thema der dynamischen Radlasten auf unebener Strassenoberfläche gibt es eine Vielzahl von Veröffentlichungen. Hingegen ist über den Spannungszustand und das Verformungsverhalten des Strassenoberbaues unter dynamischer Beanspruchung bis heute wenig bekannt. Der Grund dafür ist in erster Linie darin zu sehen, dass sich die im Strassenbau verwendeten Materialien im Bereich relativ hoher Gebrauchstemperatur und relativ grosser Belastungsdauer nicht elastisch verhalten und deshalb die auf der Elastizitätstheorie aufbauenden Berechnungsmethoden nur beschränkt anwendbar sind.

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurde deshalb versucht mittels Messungen einen Ueberblick über den Spannungszustand und Verformungszustand des bituminösen Oberbaues zu gewinnen. Dabei mussten auch Temperatur, Fahrgeschwindigkeit und statische Radlast als wichtige Versuchsbedingungen gemessen werden.

Im Einzelnen wurden mit der vorliegenden Forschungsarbeit die folgenden Ziele verfolgt:

- Ermittlung des Spannungszustandes und des Verformungsverhaltens des Strassenoberbaues unter dem rollenden Rad in Funktion von der Fahrgeschwindigkeit, wie auch in Funktion von der Temperatur bzw. der Jahreszeit.
- Ermittlung des Spannungszustandes und des Verformungsverhaltens der bituminös gebundenen Schichten auf verschiedenen Unterlagen
  - a. auf Kiessandschichten (konventionelle Foundation)
  - b. auf bituminös stabilisierten Schichten (HMF)
  - c. auf hydraulisch gebundenen Schichten (hydraulische Stabilisierungen).
- Aus der Gegenüberstellung von Spannungszustand und Verformungsverhalten sollte abgeklärt werden, in welchem Temperatur- bzw. Geschwindigkeitsbereich ein elastisches Rechenmodell möglich ist oder unter welchen Bedingungen andererseits ein viskoelastisches Modell erforderlich wird.

- Aus der Gegenüberstellung von Spannungszustand und Verformungsverhalten sollen die entsprechenden physikalischen Materialkennwerte abgeleitet werden, die die Grundlage späterer Rechenmodelle sein können.

## 2. FAHRBAHNUNEVENHEITEN UND DYNAMISCHE RADLASTEN

Auf einer ideal ebenen Fahrbahn ist bei jeder Fahrgeschwindigkeit und zu jedem Zeitpunkt die auf die Strasse wirkende Radlast gleich gross wie die statische Radlast. Durch die auf jeder Fahrbahn vorhandenen Unebenheiten und bedingt durch die Fahrgeschwindigkeit wird das als ein "Schwingsystem" zu betrachtende Fahrzeug zu Schwingungen angeregt. Dabei wird die statische Radlast von dynamischen Kräften überlagert wodurch die effektiv wirksame Radlast entsteht. Diese ist eine Funktion von der Zeit bzw. vom Weg, was bedeutet, dass die Beanspruchung einer Strasse in Längsrichtung betrachtet von Punkt zu Punkt in hohem Masse variiert und, dass neben anderen Bedingungen die Unebenheit der Oberfläche erheblichen Einfluss auf die Beanspruchung der Strasse hat.

Im Folgenden soll nun der Einfluss der Unebenheit einer Strassenoberfläche auf die Beanspruchung dargestellt werden. In der Schweiz werden Unebenheiten auf Strassen nach der Winkelmessmethode gemessen (SN 640 520 und SN 640 521) und durch die Standardabweichung  $s_W$  der Winkelwerte  $W$  charakterisiert [1][2]. Zwischen dem  $s_W$ -Wert [%] und der spektralen Dichte  $\phi$  für eine Wellenlänge  $\lambda = 6,3$  m (dies entspricht einer Wegfrequenz  $\Omega = 2\pi/\lambda = 1$  [1/m]) besteht der auf Abbildung 1 dargestellte Zusammenhang. Dieser Zusammenhang ist 1972 im Rahmen von FA 15/72 [1] durch Korrelationsmessungen ermittelt worden. Die  $s_W$ -Werte wurden mit dem Winkelmesser ISETH, die spektrale Dichte  $\phi$  mit dem französischen APL ermittelt.

Bei der Berechnung der Strassenbeanspruchung wird von der spektralen Dichte  $\phi$  ( $\Omega = 1$ ) ausgegangen. Die Methode ist in der Literatur [3][4][5][6][7] ausführlich beschrieben. Der auf Abbildung 1 dargestellte Zusammenhang eröffnet somit den Zugang zu dieser Methode.

Nach dem AASHO-Road-Test ist die Strassenbeanspruchung  $\theta$  proportional der vierten Potenz der Radlast,  $\theta \sim P^4$ . Berücksichtigt man den statischen Anteil  $P_{stat}$  und den dynamischen Anteil  $P_{dyn}$  so ergibt sich:

$$\theta = k \cdot (P_{stat} + P_{dyn})^4 = P_{stat}^4 \left(1 + \frac{P_{dyn}}{P_{stat}}\right)^4$$

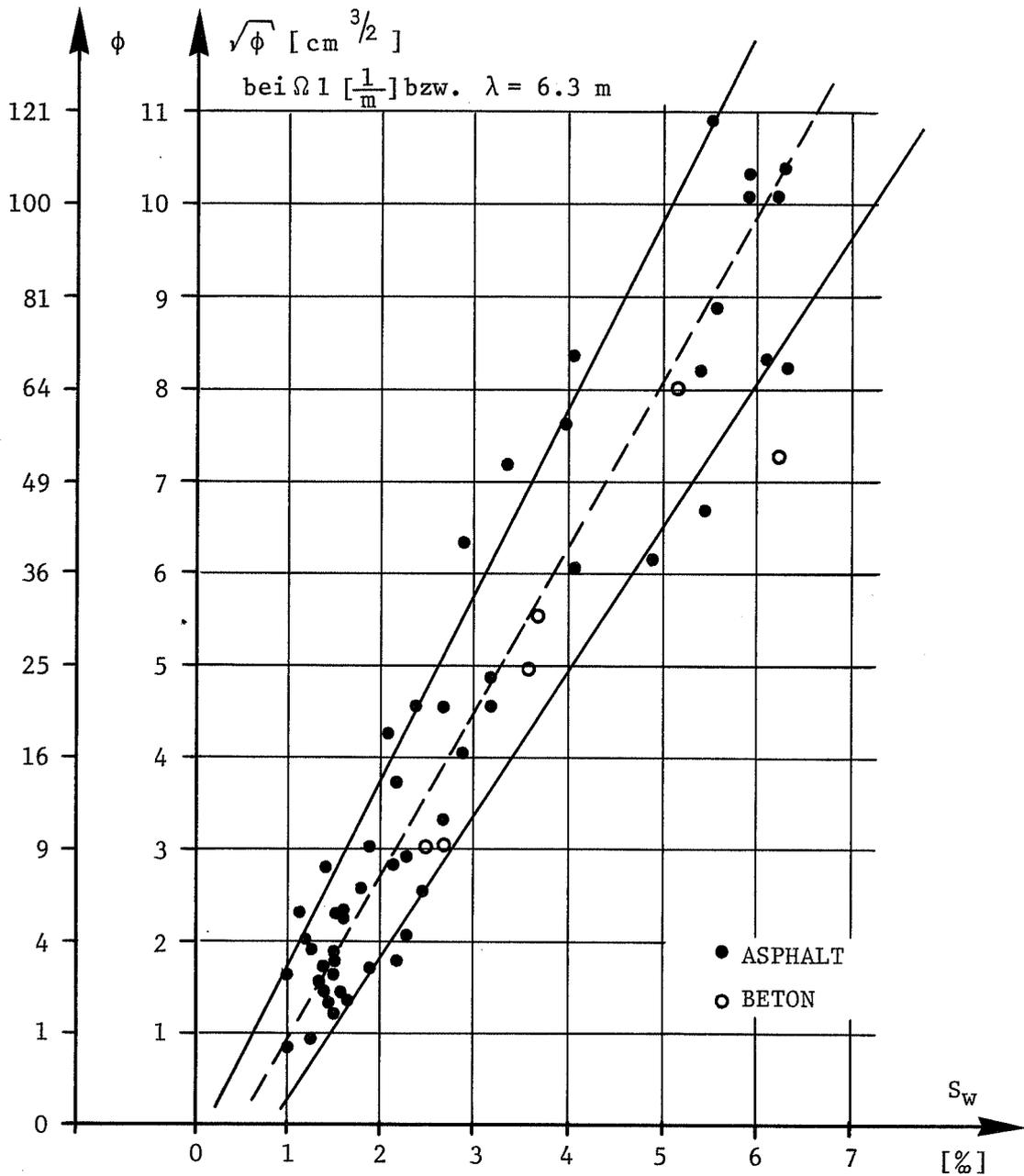


Abbildung 1: Korrelation zwischen dem mit dem Winkelmesser ermittelten  $s_w$ -Wert und der mit dem französischen APL ermittelten spektralen Dichte  $\phi$  bei  $\lambda = 6.3 \text{ m}$ . Vergleiche [1] und [9]

Da  $P_{\text{dyn}}$  in Abhängigkeit von der Zeit ständig schwankt, auch positive und negative Werte annimmt, wird mit dem Effektivwert der dynamischen Radlast gerechnet. Daraus ergibt sich dann nach [4][8] für die Strassenbeanspruchung:

$$\theta = k \cdot P_{\text{stat}}^4 \left[ 1 + 6 \left( \frac{P_{\text{dyn,eff}}}{P_{\text{stat}}} \right)^2 + 3 \left( \frac{P_{\text{dyn,eff}}}{P_{\text{stat}}} \right)^4 \right]$$

Die Strassenbeanspruchung hängt ausser von der Unebenheit der Fahrbahn ab von:

- der statischen Radlast
- der Fahrgeschwindigkeit
- den Schwingungseigenschaften des Fahrzeuges (Resonanzen)

Für die folgenden konkreten Daten wurde der Einfluss der Unebenheiten der Strassenoberfläche auf die Strassenbeanspruchung ermittelt:

- Fahrgeschwindigkeit 20 m/s = 72 km/h
- statische Radlast 5 [t]
- Wert  $F = 200 \text{ s/m}^2$ , der die Schwingungseigenschaften des Fahrzeuges charakterisiert. Der Wert  $F$  liegt bei Nutzfahrzeugen mit Einzelachsen zwischen  $F = 80 \dots 400 \text{ s/m}^2$  [3].

Auf Abbildung 2 ist der Wert für die relative Strassenbeanspruchung  $\theta_{rel}$  (bezogen auf den Zustand bei ideal ebener Oberfläche) in Abhängigkeit von der Oberflächenunebenheit, gekennzeichnet durch den  $s_W$ -Wert, dargestellt. Auf Grund dieser Beziehung kann die Wertminderung einer Strasse bzw. die Verkürzung ihrer "Lebensdauer" infolge der Oberflächenunebenheit abgeschätzt werden.

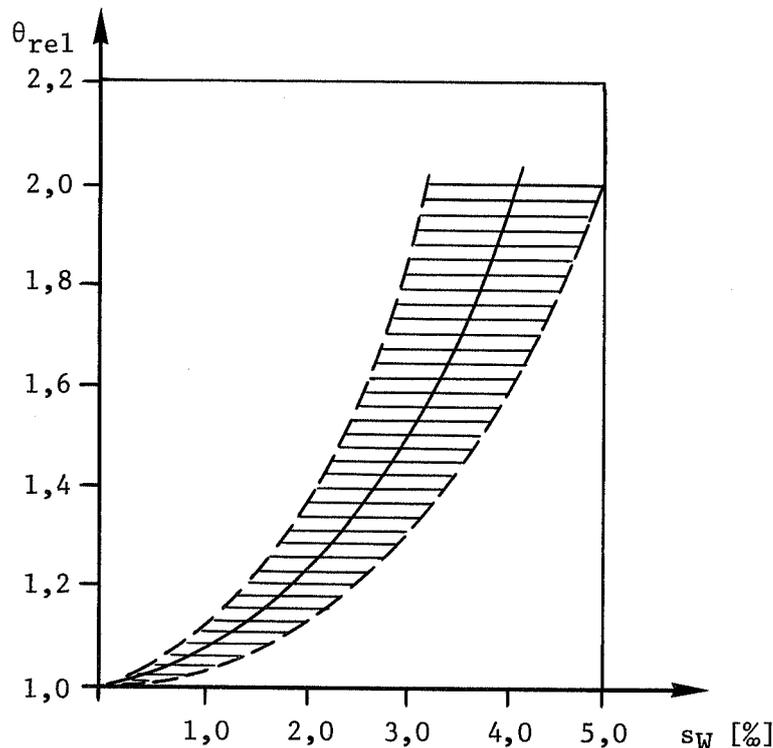


Abbildung 2:

Relative Strassenbeanspruchung  $\theta_{rel}$  in Abhängigkeit vom  $s_W$ -Wert.

- Ermittelt für:
- Fahrgeschwindigkeit  $v = 72 \text{ km/h}$
  - Schwingungscharakteristik des Fahrzeuges  $F = 200 \text{ s/m}^2$
  - statische Radlast 5 t

Der angedeutete Bereich ist durch die Streuung der  $s_W$ - $\phi$ -Korrelation bedingt.



### 3. M E S S T E C H N I K

Die Ermittlung des Spannungs- und Verformungszustandes des Strassenoberbaues unter dem rollenden Rad ist eine ausserordentlich anspruchsvolle Aufgabe, die einen erheblichen messtechnischen Aufwand erfordert. Wenn auch die Messgenauigkeit und die Zuverlässigkeit der zur Verfügung stehenden Messinstrumente im allgemeinen für diese Zwecke gut ausreicht, so besteht die grosse - und letztlich auch unlösbare - Schwierigkeit doch darin, dass der Messwertaufnehmer selbst als Fremdkörper das Kontinuum stört, so dass der Messwert immer mehr oder weniger verfälscht wird. Es ist somit, streng genommen, nicht möglich Spannungen oder Dehnungen im ungestörten Bereich zu messen. Im folgenden wird die im Rahmen dieses Forschungsauftrages eingesetzte Messtechnik beschrieben.

#### 3.1. Beschleunigungsmessung

Wird ein Strassenkörper an der Oberfläche durch eine dynamische Last (rollendes Rad) beansprucht, so entstehen in einem gewissen Bereich um die Last Beschleunigungen, Verformungsgeschwindigkeiten und Verformungen. Da Wegmessungen im überrollten Bereich der Fahrbahn wegen eines fehlenden, stabilen Bezugspunktes unmöglich sind, muss man sich mit Beschleunigungsmessungen behelfen. Die auftretenden Beschleunigungen können mittels Beschleunigungsaufnehmer gemessen werden. Im vorliegenden Fall wurden Servo-Beschleunigungsaufnehmer für niederfrequente Anwendungen im Bereich kleiner Beschleunigungen in den Belag eingebaut. Da diese Geber relativ teuer sind, kam ein "verlorener Einbau" nicht in Frage. Es wurden deshalb Bohrlöcher hergestellt, Aluminiumbüchsen eingepasst und fest verklebt. Die Beschleunigungsgeber wurden dann jeweils für die Messung in diese Büchsen eingeschraubt. Nach der Messung wurde der Beschleunigungsgeber wieder entfernt und das Bohrloch mittels Gummizapfen verschlossen. Diese Methode hat sich gut bewährt und zufriedenstellende Messungen ermöglicht. Vergleiche Abbildungen 6 und 7.

#### 3.2. Druckmessung

Zur Messung der vertikalen Druckspannungen an der Grenzfläche bituminöser Schichten wurden die von der Bundesanstalt für Strassenwesen, Köln erprobten Druckmessdosen verwendet. Diese Dosen werden in der Literatur [10]

[11][12][13][14] ausführlich beschrieben. Die Erfahrungen beschränkten sich allerdings auf den Einbau der Druckmessdosen in kohäsionslosen Böden. Ueber das Verhalten der Dosen und deren Messgenauigkeit in bituminös gebundenen Materialien war zunächst nichts bekannt. Im folgenden sei kurz auf das grundsätzliche Problem der Druckmessung mittels eines "Fremdkörpers" in einem gegebenen Medium hingewiesen:

"Wird ein linearelastischer kreiszylindrischer Körper mit einem Elastizitätsmodul  $E_D$  in einem homogenen, isotropen, idealelastischen Vollraum mit einem Elastizitätsmodul  $E_B$  eingebettet, so ist die ursprüngliche Druckspannung ( $\sigma_B$ ) nicht mehr über die Fläche konstant, sondern nimmt die in Abbildung 3 angegebene Form an.

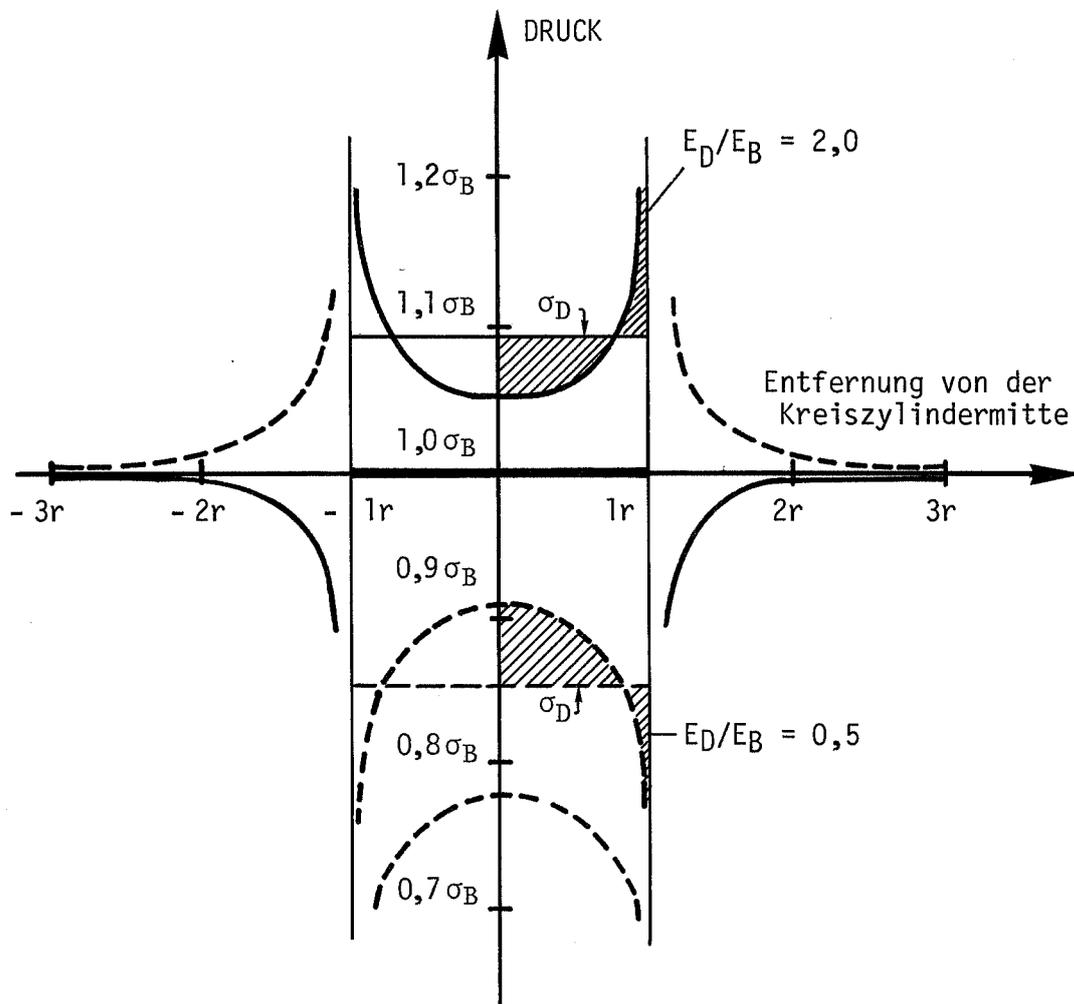


Abbildung 3: Änderung eines konstanten Druckes im Vollraum durch einen eingelagerten Kreiszyylinder in der Mittelebene des Kreiszyklinders  $r/h = 2,5$

Die dort gekennzeichnete mittlere Druckspannung  $\sigma_D$  über den Kreisflächen des Zylinders folgt der Gleichung:

$$\sigma_D = \sigma_B \cdot \left[ 1 + \frac{\frac{E_D}{E_B} - 1}{k \cdot \frac{r}{h} \frac{E_D}{E_B} + 1} \right] \quad (1)$$

mit  $r$  = Radius des Kreiszylinders

$h$  = Höhe des Kreiszylinders

$E_D$  = Elastizitätsmodul des Materials des Kreiszylinders

$E_B$  = Elastizitätsmodul des Materials des Vollraumes

$\sigma_D$  = die über die Kreisfläche gemittelte Normalspannung

$\sigma_B$  = konstante Druckspannung in der zur Zylinderachse senkrechten Ebene ausserhalb des Einflussbereiches des Zylinders

$k$  = konstanter Faktor, abhängig von der Querkontraktionszahl des Materials des Vollraumes und der Form der Kreisflächendeformation ( $k \approx 3$ )

Für Abbildung 3 und Gleichung (1) gelten neben den Voraussetzungen der Elastizitätstheorie die Bedingungen, dass die Kreisflächen des Zylinders reibungslos sind und die Spannungen zwischen Zylindermantel und Umgebung vernachlässigt werden können.

Für kreiszylindrische Erddruckaufnehmer gibt Gleichung (1) einen Ueberblick über die Beziehung zwischen der von dem Messgerät aufgenommenen Spannung  $\sigma_D$  und derjenigen, die ohne das eingebettete Messgerät vorhanden wäre ( $\sigma_B$ ). Bei Druckspannungszuständen in Erdstoffen, die zur Zylinderachse symmetrisch sind, ergibt diese Gleichung qualitativ befriedigende Ergebnisse.

Die Beziehung zwischen dem Spannungsverhältnis  $\sigma_D/\sigma_B$  in Abhängigkeit von  $h/r$  ist in Abbildung 4 mit dem Parameter  $E_D/E_B$  dargestellt, in Abbildung 5 ist  $E_D/E_B$  auf der Abszisse aufgetragen und  $h/r$  als Parameter gewählt. Nach Abbildung 4 empfiehlt es sich, Erddruckaufnehmer mit einem möglichst kleinen Verhältnis von Höhe zu Radius zu wählen, weil dann die vom Messgerät aufgenommene Spannung ( $\sigma_D$ ) von der zu messenden ( $\sigma_B$ ) nur wenig abweicht. Aus Abbildung 5 wird deutlich, dass eine Aenderung des Elastizitätsmodulverhältnisses  $E_D/E_B$  für höhere Werte von  $E_D/E_B$  (im Bereich A) einen geringeren Einfluss auf das Spannungsverhältnis hat als bei kleinen Werten (Bereich B)". Zitat aus Keller [10]

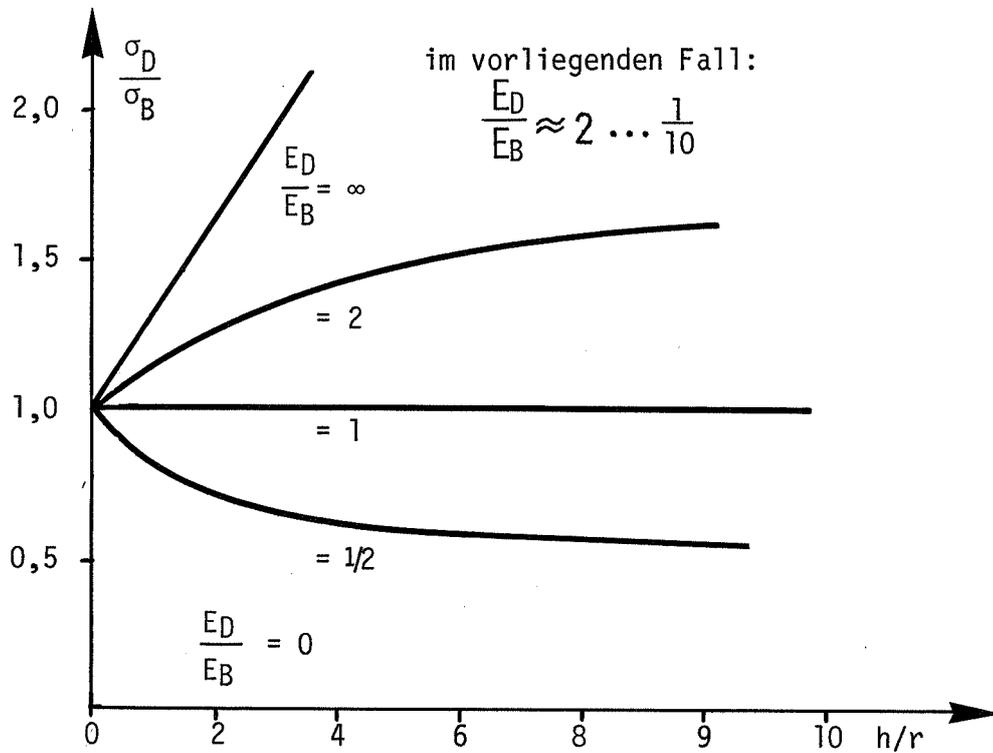


Abbildung 4: Verhältnis der aufgenommenen Drücke zu den zu messenden in Abhängigkeit von den Abmessungen des kreiszylindrischen Druckaufnehmers

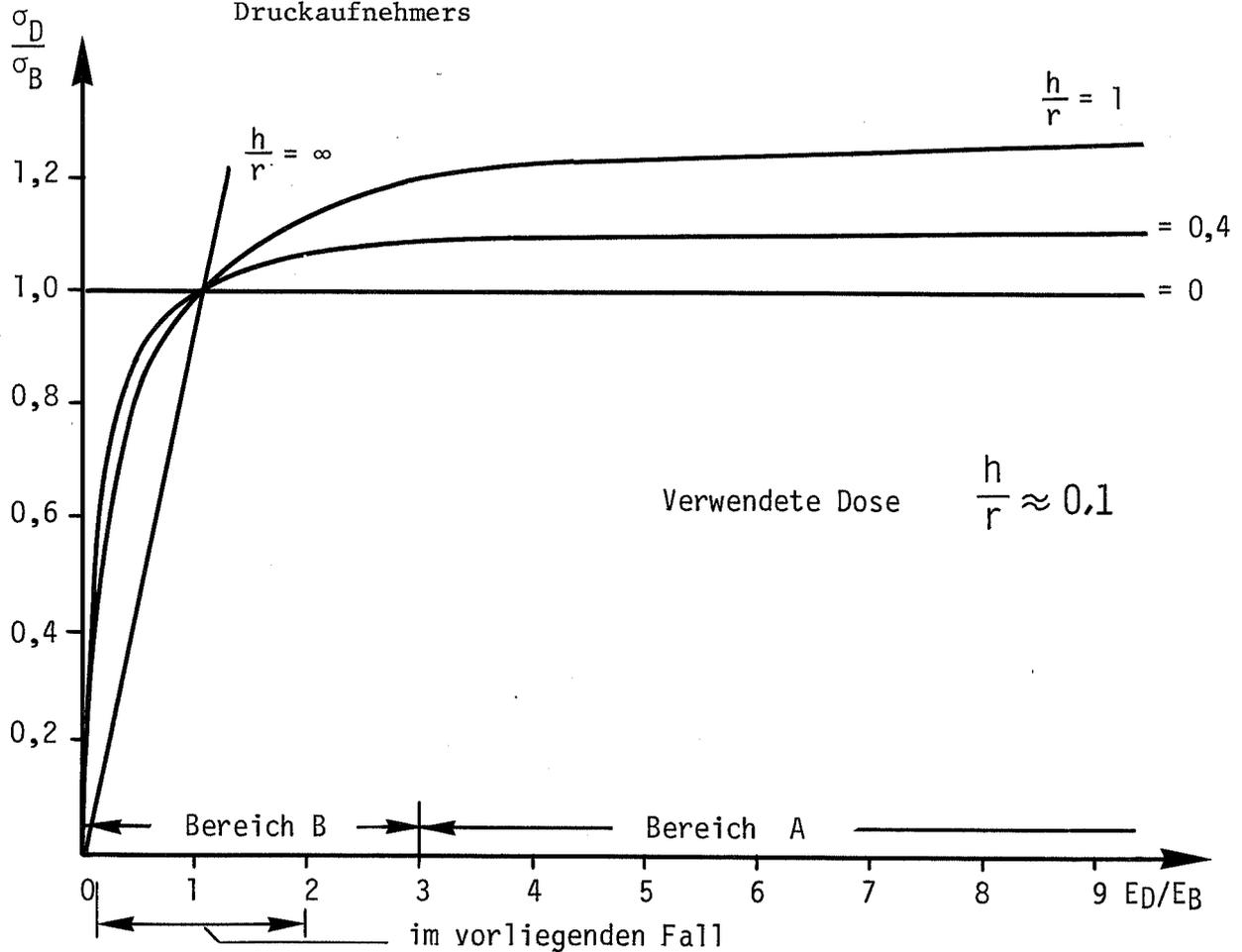


Abbildung 5: Verhältnis der aufgenommenen Drücke zu den zu messenden in Abhängigkeit von den Elastizitätsmoduln des Druckaufnehmers und des Erdstoffes

#### Einbau der Druckmessdosen:

Um einen einwandfreien Einbau der jeweils folgenden Schicht zu ermöglichen, wurden alle Druckmessdosen samt Zuleitungskabel in die vorhandene Schicht (HMF Zementstabilisierung oder HMT) vertieft und mit der jeweiligen Oberfläche bündig verlegt. Die hitzebeständigen Kabel wurden vor mechanischer Beanspruchung geschützt in Stahlrohren bis zum Anschlusskasten verlegt. Vergleiche Abbildungen 8 und 9.

Die auf der Druckmessdose liegende bituminöse Schicht sollte ungestört eingebaut werden, um Veränderungen der mechanischen Eigenschaften (z.B. infolge ungenügender Verdichtung) möglichst zu vermeiden. Die Installation der Druckmessdosen musste deshalb jeweils in Abhängigkeit vom Baufortschritt erfolgen.

#### 3.3. Temperaturmessungen

Der Spannungs- und Verformungszustand bituminöser Strassenbeläge ist in starkem Masse temperaturabhängig. Spannungs- und Verformungsmessungen müssen deshalb gleichzeitig von umfangreichen Temperaturmessungen begleitet werden. Die Messung der Oberflächentemperaturen allein genügt nicht. Es muss vielmehr der Temperaturverlauf über alle bituminös gebundenen Schichten aufgezeichnet werden. Auf den einzelnen Messstellen waren deshalb jeweils zwischen 4 und 7 Messfühler installiert. Vergleiche Abbildungen 10 und 11.

Als Messmethode kamen sowohl Thermoelemente als auch die Widerstandsmesstechnik in Frage. Nach eingehenden Voruntersuchungen entschied man sich für Platin-Widerstands-Fühler (Pt 100-Fühler), die sich dann auch im feldmässigen Einsatz sehr gut bewährt haben (keine Steckerprobleme, keine Nullpunktbezugsquelle erforderlich). Die in Glas vergossenen Messfühler wurden zum Schutz vor mechanischer Beanspruchung in Stahlrohre eingebaut und mit Silikon-Kautschuk vergossen. Die dadurch entstandene grössere Messträgheit konnte in Kauf genommen werden, da der Strassenkörper auf Temperaturschwankungen ebenfalls recht träge reagiert. Es mussten hitzebeständige Kabel verwendet werden. Um die zum Teil recht langen Zuleitungen (bis ca. 20 m) kompensieren zu können, wurde die Dreileiter-Messmethode gewählt. Während der dynamischen Messungen wurden alle Temperaturen einer Messstelle mittels 12-Kanal-Punktendrucker aufgezeichnet. Dieser diente auch für Langzeitmessungen.

Für die Ueberprüfung der Momentanwerte wurde ein digitales Temperaturmessgerät für Pt 100 Messfühler an den Anschlusskasten am Strassenrand angeschlossen. Das System arbeitete jederzeit zuverlässig und mit einer Genauigkeit besser als  $\pm 0,5$  °C.

## Installation Beschleunigungsgeber

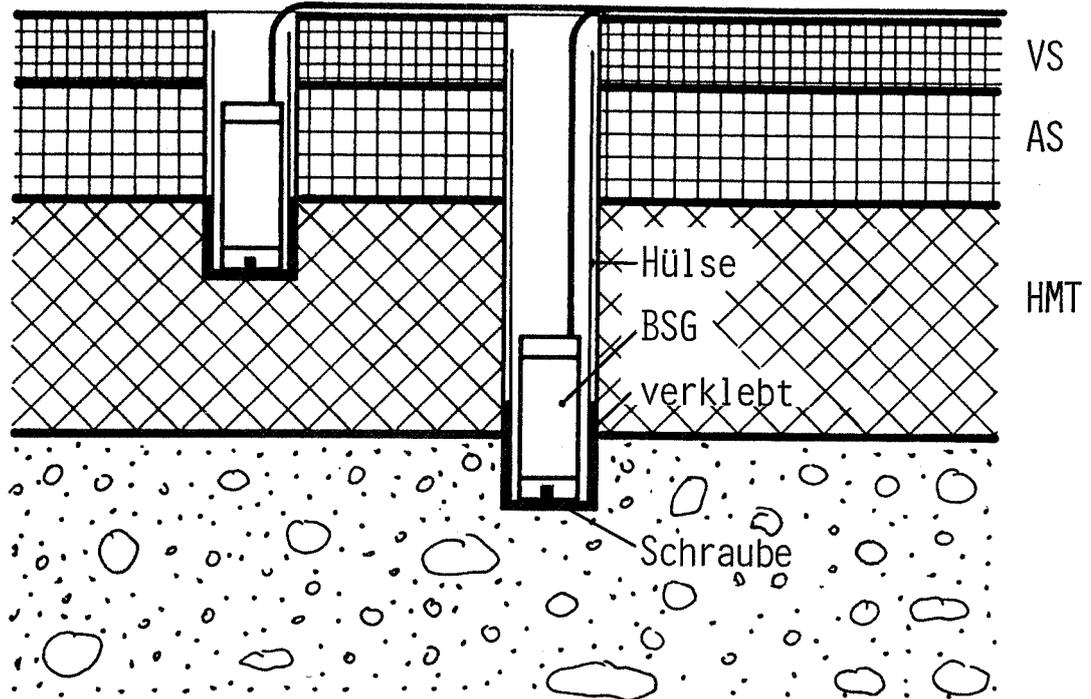


Abbildung 6: Schema für die Installation der beiden Beschleunigungsgeber

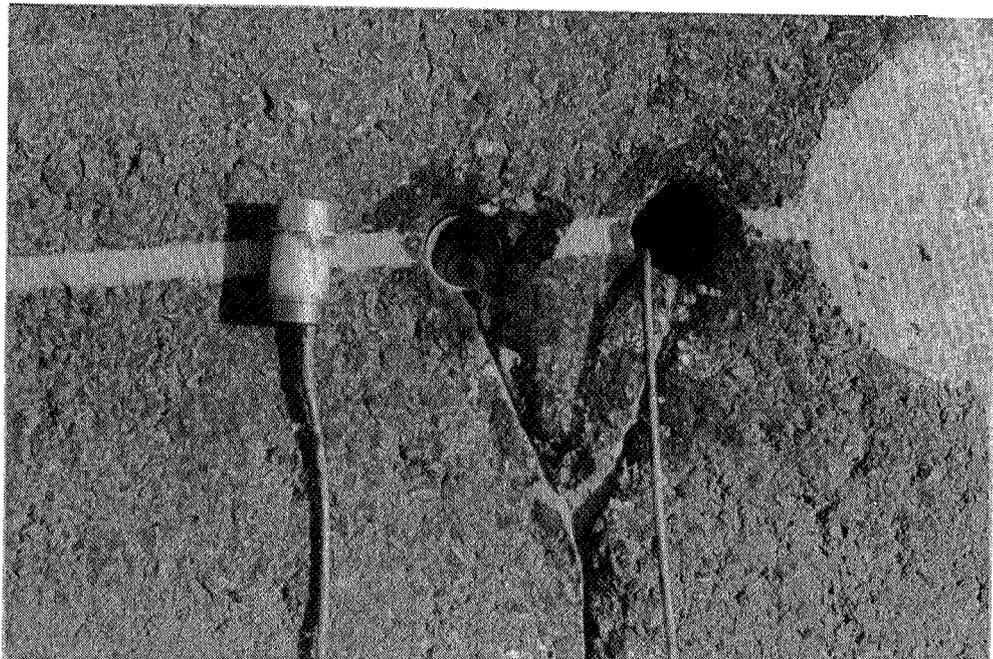


Abbildung 7: Zwei Beschleunigungsgeber auf unterschiedlicher Tiefe, der untere installiert, der obere aus der Dose entnommen

# Installation Druckmessung

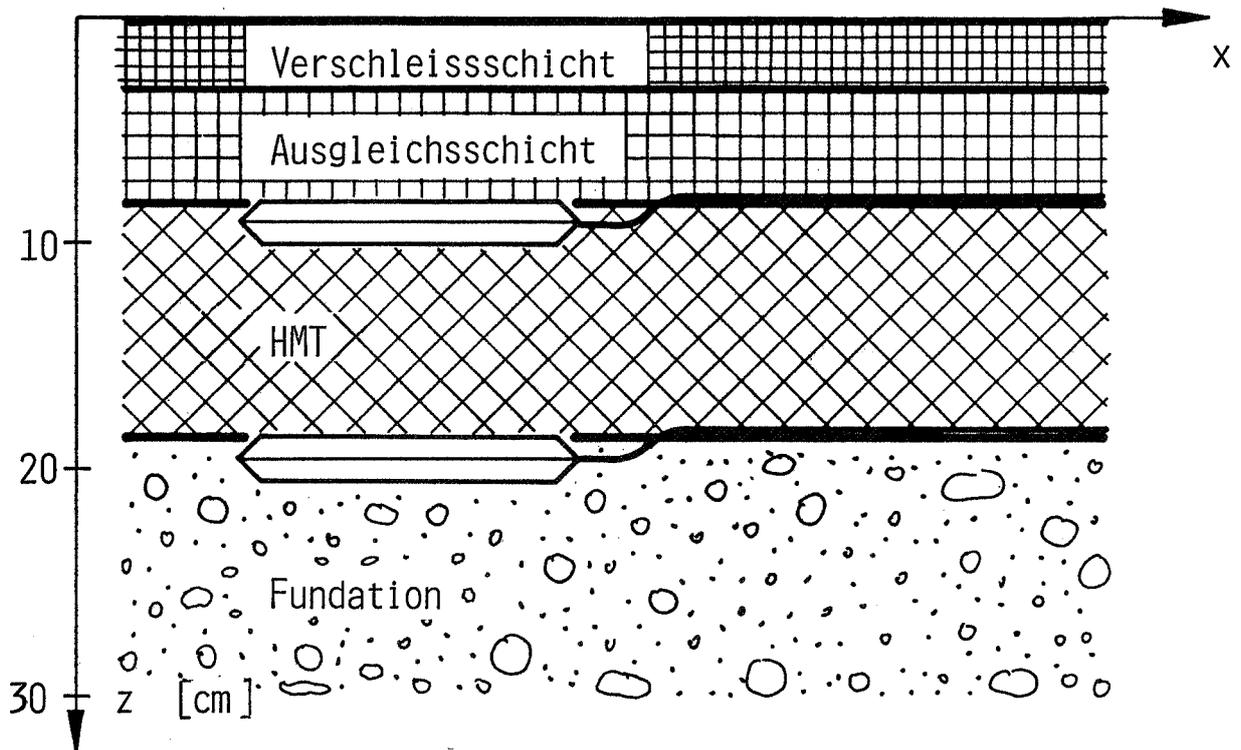


Abbildung 8: Schema für die Installation der Druckmessdosen



Abbildung 9: Installation der Druckmessdosen;  
Verlegen der Kabel in der HMT

## Installation Temperatur

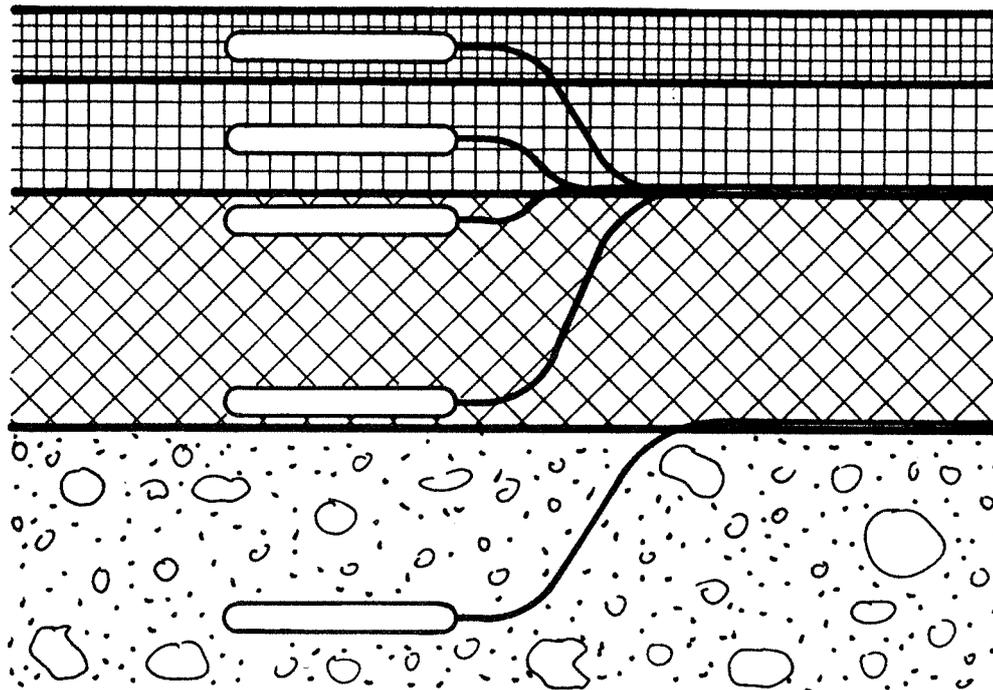


Abbildung 10: Schema für die Installation der Pt-100 Temperaturfühler



Abbildung 11: Temperaturfühler und Druckmessdosen



#### 4. EINRICHTEN DER MESSSTELLEN

Beim Einrichten der Messstellen wurden vorrangig die folgenden Gesichtspunkte berücksichtigt:

- Die Druckmessdosen und Temperaturfühler sollten grundsätzlich nicht nachträglich in eine vorhandene Struktur sondern im Zuge des Baufortschrittes zwischen die einzelnen Schichten eingebaut werden. Damit kamen für die Instrumentierung nur Baustellen in Frage. Dies erschwerte unsere Aufgabe, da dadurch terminliche Zwangspunkte und die Abhängigkeit vom Baufortschritt gegeben waren.
- Die jeweilige (darüberliegende) Folgeschicht musste ohne Behinderung eingebaut und verdichtet werden können und die mechanische Eigenschaft dieser Schicht sollte durch unsere Instrumentierung in keiner Weise beeinträchtigt werden.
- Die Messstellen wurden ausschliesslich auf Autobahnen angelegt, weil diese einen mehrschichtigen und dickeren Oberbau aufweisen. Autobahnen schienen auch im Hinblick auf die spätere Durchführung der Messungen wegen der Absperrmöglichkeit einer Fahrbahn günstiger.
- Druckmessdosen und Beschleunigungsgeber wurden jeweils in die rechte Radspur verlegt. Jede Messstelle wurde **n u r d o p p e l t** instrumentiert. Das war etwas zu optimistisch; unserer jetzigen Erfahrung nach sollte man derartige Messstellen drei- oder vierfach instrumentieren.
- Druckmessdosen und Dosen zur Aufnahme der Beschleunigungsgeber wurden bei allen Messstellen jeweils unter- und oberhalb der HMT eingebaut. Die obere Druckmessdose lag jeweils ca. 40 mm bis ca. 110 mm unterhalb der Fahrbahnoberfläche, d.h. unter der Verschleisschicht und, soweit vorhanden, unter der Ausgleichsschicht.

Es ergaben sich schliesslich die im folgenden auf Abbildung 13 dargestellten vier Messstellen, die im weiteren Bericht mit (A) (B) (C) und (D) abgekürzt gekennzeichnet sind:

(A) N 3, Fahrspur Richtung Frick, bei Möhlin, Kanton AG

Der untere Teil der Foundationsschicht besteht aus Kiessand, der obere Teil hingegen aus einer HMF. Die untere Druckmessdose liegt auf der HMF, die obere auf der HMT. Die genauen Masse der Instrumentierung können der Abbildung 14 entnommen werden.

ⓑ N 3, Standspur Richtung Frick bei Möhlin, Kanton AG

Die Standspur ist etwas schwächer dimensioniert. Die Foundationsschicht besteht ganz aus Kiessand. Somit liegt auch die untere Druckmessdose auf Kiessand und die obere auf der HMT. Die genauen Masse der Instrumentierung können der Abbildung 15 entnommen werden.

ⓒ N 1, Fahrspur Richtung Winterthur, bei Wallisellen (km 295.580) Kanton ZH

Die Tragschicht (Foundationsschicht) besteht aus einer ca. 480 mm dicken Zementstabilisierung mit einem bituminösen Belag, bestehend aus ca. 45 mm Verschleisschicht und ca. 80 mm Ausgleichsschicht. Es handelt sich hier um einen "halbstarren" Aufbau mit ausserordentlich grosser Tragfähigkeit. Die genauen Masse der Instrumentierung können Abbildung 16 entnommen werden.

ⓓ N 7, Fahrspur Richtung Zürich, bei Frauenfeld (km 9.825) Kanton TG

Der untere Teil der Tragschicht besteht aus einer ca. 430 mm starken hydraulisch stabilisierten Kiesschicht (Mörtelbinder). Der obere Teil der Tragschicht besteht aus ca. 70 mm HMT B. Darauf folgen jeweils 50 mm Ausgleichs- und 50 mm Verschleisschicht. Die Druckmessdosen und Beschleunigungsgeber befinden sich unter- und oberhalb der HMT B. Auch dieser Aufbau ist als "halbstarr" zu bezeichnen und weist eine sehr hohe Tragfähigkeit auf. Die genauen Masse der Instrumentierung können Abbildung 17 entnommen werden.

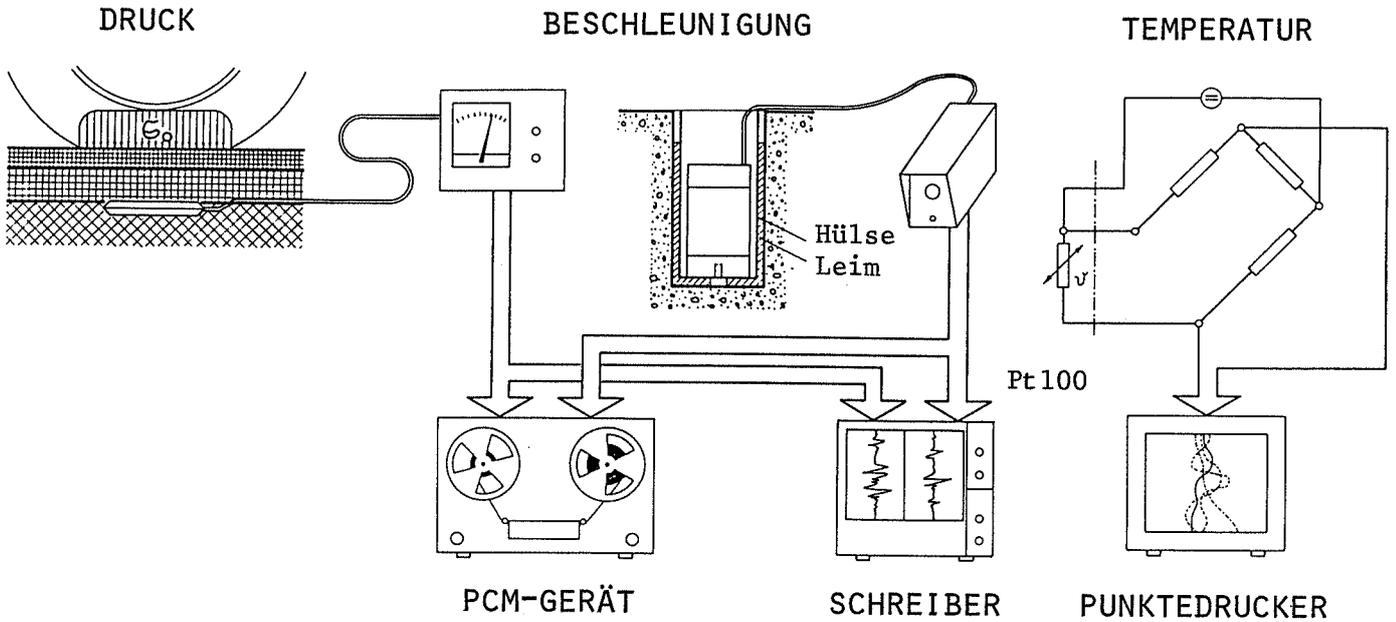


Abbildung 12: Aufnahme der Messwerte

MEHRSCICHTENSYSTEME  
(für die BISAR - Rechnungen vereinfacht)

(A)	(B)	(C)	(D)
<p>85 TA 16 85 TA 16u 90 HMT 100 HMF KIES</p>	<p>95 TA 16 95 TA 16u 105 HMT KIES</p>	<p>45 TA 16s 80 TA 25u 480 HYDRAUL. GEB. FUNDATIONSSCHICHT KIES</p>	<p>50 TA 16 50 TA 16u 65 HMT B 430 HYDRAUL. GEB. FUNDATION (MÖRTEL-BINDER) KIES</p>
MASSE IN mm			

Abbildung 13: Oberbaustrukturen der vier Messstellen

Abbildung 14: SITUATION DER MESSWERTGEBER

(A)

Messstelle : Möhlin Kt. AG  
N 3 Fahrspur Ri. Frick  
km

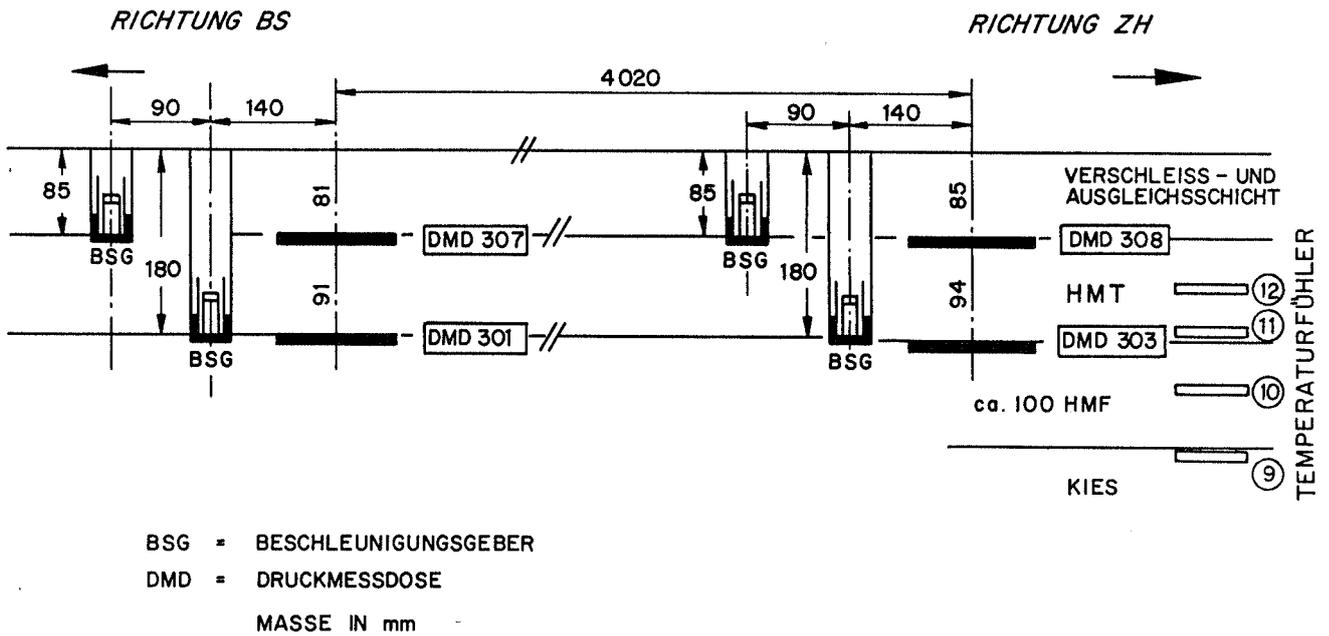


Abbildung 15: SITUATION DER MESSWERTGEBER

(B)

Messstelle : Möhlin Kt. AG  
N 3 Standspur Ri. Frick  
km

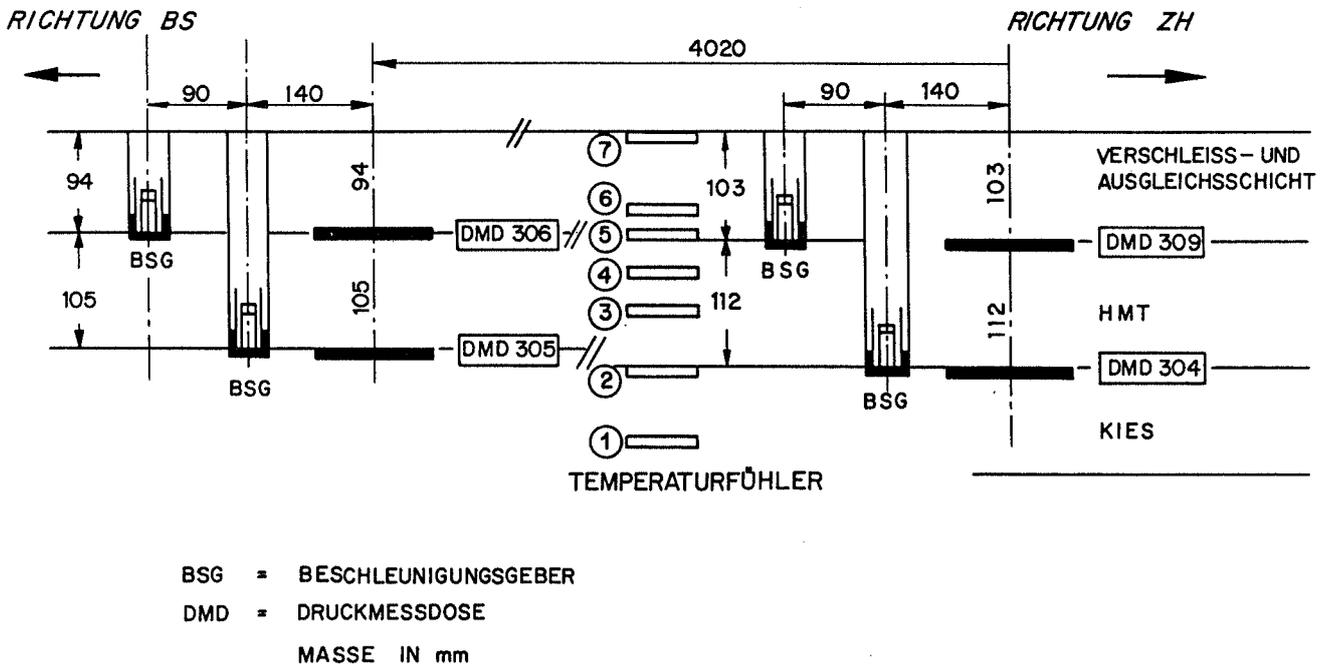


Abbildung 16: SITUATION DER MESSWERTGEBER

(C)

Messstelle: Wallisellen Kt. ZH  
N1 Fahrspur Ri. Winterthur  
Profil 295.580

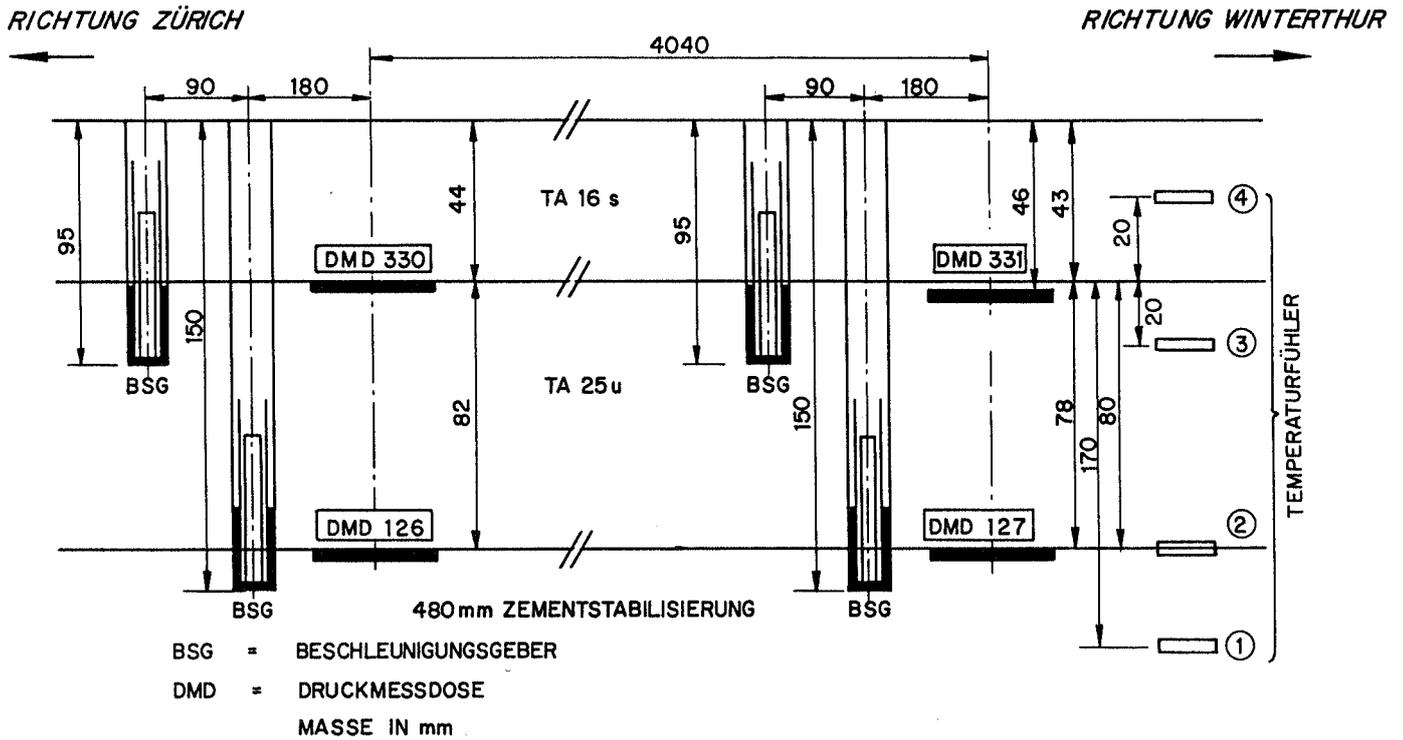
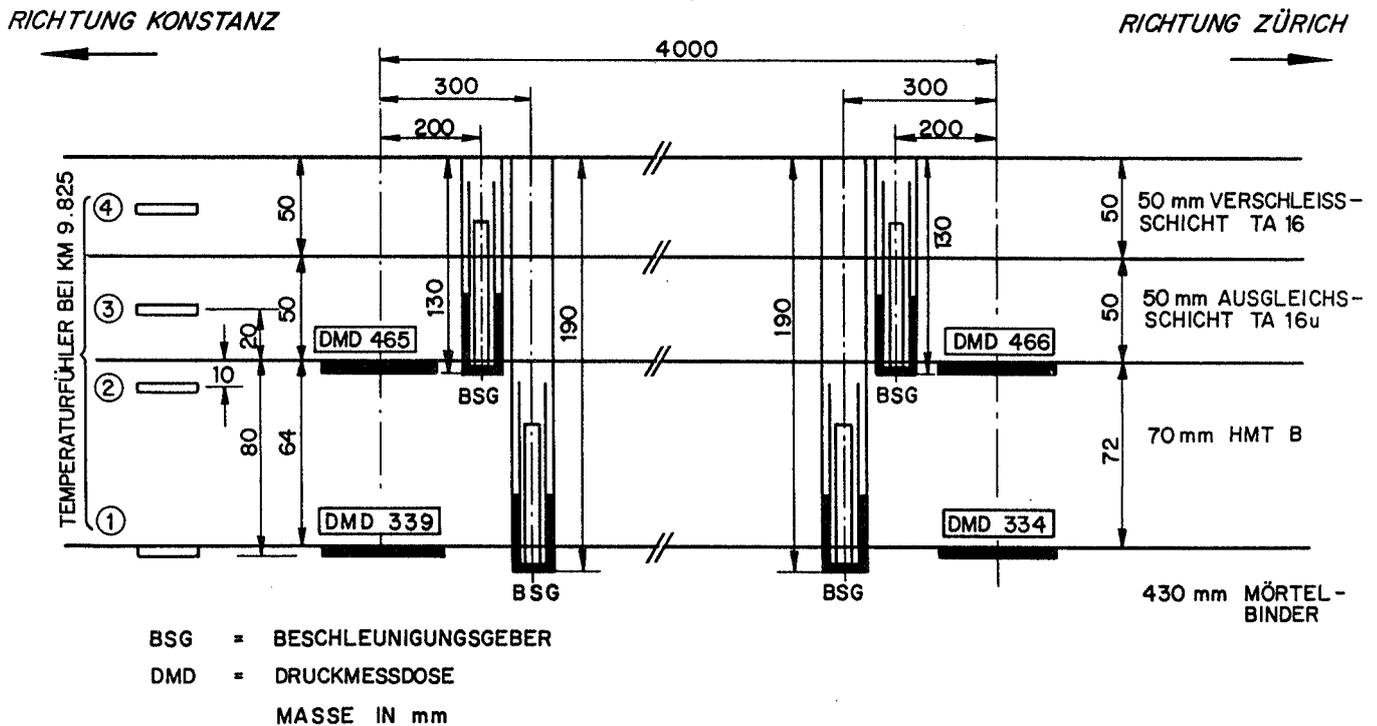


Abbildung 17: SITUATION DER MESSWERTGEBER

(D)

Messstelle: Frauenfeld Kt. TG  
N7 Fahrspur Ri. Zürich  
bei km 9,825





## 5. DURCHFÜHRUNG DER MESSUNGEN

### 5.1. Belastungsfahrzeug

An das Belastungsfahrzeug wurden die folgenden Anforderungen gestellt:

- Genügend grosse Achslast (ca. 10 t bis 12 t) damit für Druck und Beschleunigung genügend grosse Messwerte erzeugt werden können. Einstellbares und über mehrere Jahre hinweg etwa gleichbleibendes Gesamtgewicht.
- Möglichst feines Reifenprofil. Reifen mit groben Stollen regen den Oberbau zu hochfrequenten Schwingen an, die die Beschleunigungsmessung beeinträchtigen.
- Ueber mehrere Jahre verfügbares Fahrzeug mit unveränderten Abmessungen.

Nach umfangreichen Voruntersuchungen mit mehreren Fahrzeugen des AMP wurde schliesslich das auf Abbildung 18 dargestellte Fahrzeug FBW des Amtes für Messwesen (früher: Eidgenössisches Amt für Mass und Gewicht) als Belastungsfahrzeug gewählt. Die geometrischen Abmessungen dieses Fahrzeuges sind auf Abbildung 19, die Abmessungen der Kontaktflächen Reifen/Fahrbahn sind auf Abbildung 20 angegeben. Die vor jeder Messung ermittelten wichtigen Daten des Belastungsfahrzeuges sind in Tabelle I zusammengestellt. Es ist daraus ersichtlich, dass die Konstanthaltung der Radlasten nicht einwandfrei gelungen ist.

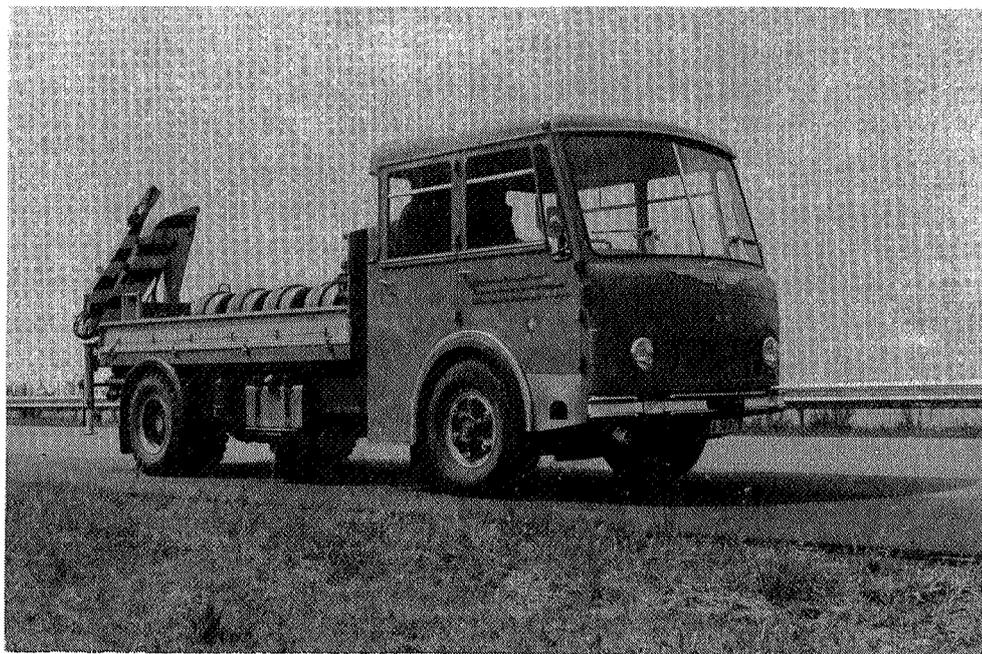


Abbildung 18: Belastungsfahrzeug vom Eidgenössischen Amt für Mass und Gewicht

Abbildung 19:

Geometrische Abmessungen des Belastungsfahrzeuges vom Eidgenössischen Amt für Messwesen

(Fahrzeug FBW)

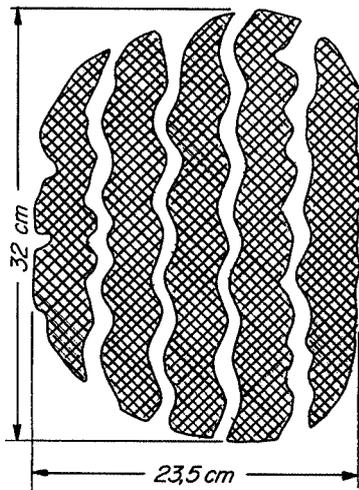
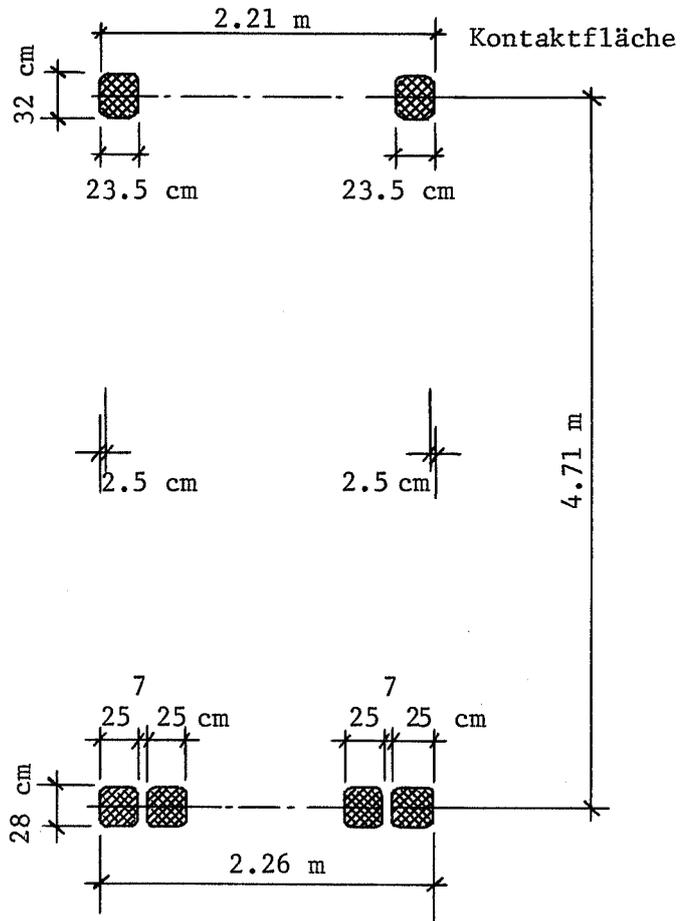
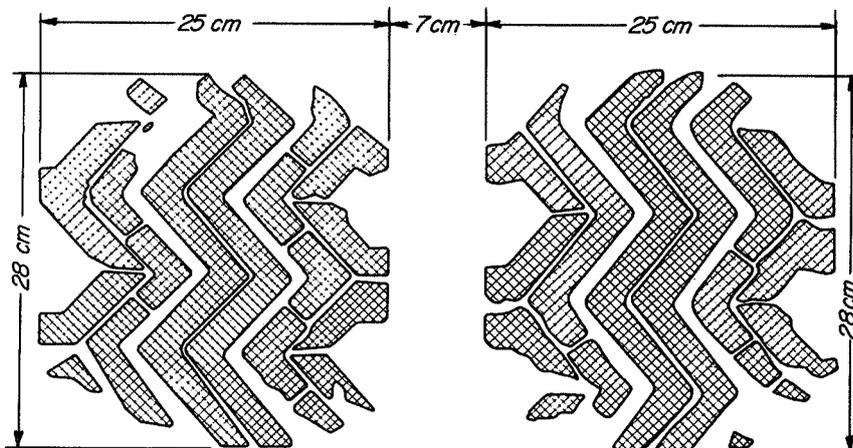


Abbildung 20:

Abmessungen der Reifen/Fahrbahn Kontaktflächen des Belastungsfahrzeuges



D A T U M	V O R D E R R Ä D E R						Z W I L L I N G S R Ä D E R (HINTEN)						
	Radlast [kg]	Kontakt- fläche [cm <sup>2</sup> ]	Länge [cm]	Breite [cm]	äquival. Radius [cm]	Kontakt- druck [kg/cm <sup>2</sup> ]	Radlast [kg]	Kontakt- fläche [cm <sup>2</sup> ]	Länge [cm]	Breite [cm]	Zwischen- raum [cm]	äquival. Radius [cm]	Kontakt- druck [kg/cm <sup>2</sup> ]
1. 7.1974	3.600	640	32	23,5	14,3	5,6	6.150	1120	28	25	7	13,35	5,5
11.11.1974	3.650	650	31	24	14,4	5,6	6.300	966	26	25	7	12,4	6,5
rechts	3.590	625	29	23	14,1	5,7	6.220	1330	33	23	9	14,4	4,7
8. 4.1975 links	3.590	590	29	23	13,7	6,1	6.110	1300	31	23	9	14,4	4,7
rechts	3.490	570	27	23,5	13,5	6,1	6.110	1414	31	24	8	15,0	4,3
13. 8.1975 links	3.670	614	27,8	23,7	14,0	6,0	6.490	1330	31	23	8	14,4	4,9
rechts	3.370	581	30	20,8	13,6	6,1	5.970	1100	25	23	8	13,2	5,4
5.12.1975 links	3.570	581	30	20,8	13,6	6,1	5.970	1100	25	23	8	13,2	5,4
rechts	3.570	634	31,5	21,8	14,2	5,6	6.040	1552	37	24,5	7,5	15,7	3,9
18. 8.1976 links	3.570	624	31	21,8	14,1	5,7	6.040	1452	35	24,5	7,5	15,2	4,2

Tabelle I: Daten des Belastungsfahrzeuges

## 5.2. Messfahrten

Zur Durchführung der Messungen musste die Fahrspur im Bereich der Messstelle jeweils für einen Tag abgesperrt werden. Im Messprogramm war die Ueberrollung der Messstelle mit Fahrgeschwindigkeiten im Bereich von Schrittgeschwindigkeit (ca. 2 km/h) bis 60 km/h vorgesehen. Die jeweilige Fahrgeschwindigkeit konnte mit Hilfe der auf Abbildung 21 dargestellten Lichtschranke sehr genau gemessen werden. Die seitliche Position des Rades d.h. der Radspur zum Messpunkt (Druckmessdosen bzw. Beschleunigungsgeber) hat einen grossen Einfluss auf den Messwert. Die Position der Radspur in Querrichtung der Strasse kann vom Fahrer nicht genau genug eingehalten werden. Es war deshalb erforderlich, diese nachträglich zu messen und zu notieren. Infolge der Variation der Fahrgeschwindigkeit und der seitlichen Position der Radspur ergaben sich pro Messtag etwa 50 Messfahrten.

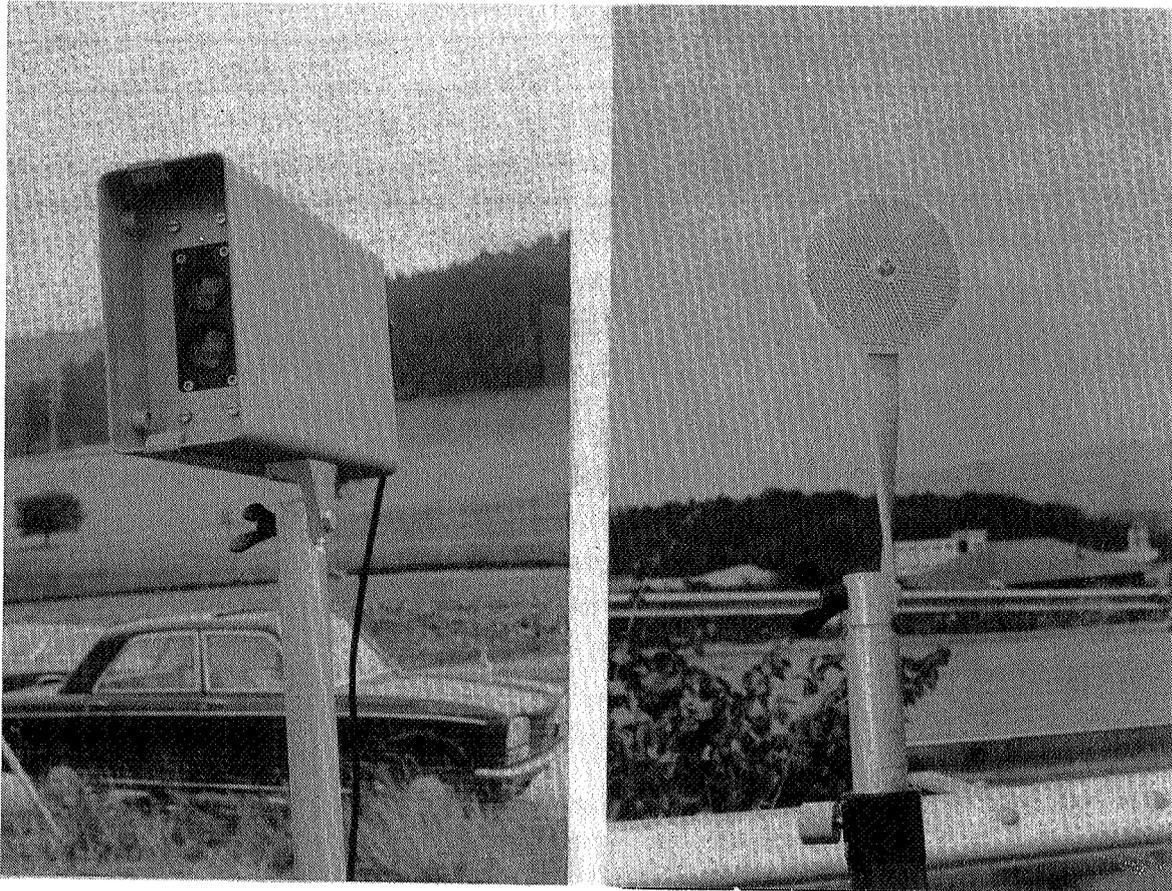


Abbildung 21: Lichtschranke zur Bestimmung der Fahrgeschwindigkeit

Bei jeder Fahrt wurden die folgenden Messsignale aufgezeichnet:

- obere Druckmessdose
- untere Druckmessdose
- oberer Beschleunigungsgeber
- unterer Beschleunigungsgeber
- die Messwerte aller Temperaturfühler wurden über den ganzen Messtag kontinuierlich aufgezeichnet.

### 5.3. Zeitplan

Da beabsichtigt war den Spannungs- und Verformungszustand des Oberbaues sowohl bei möglichst hoher als auch bei tiefer Gebrauchstemperatur zu ermitteln, wurden die Messungen sowohl im Sommer als auch im Spätherbst bzw. Frühling durchgeführt. Mit Ausnahme der Messstelle ① wurde überall mindestens an 4 Tagen gemessen (je zwei warme und zwei kalte Tage). Der Zeitplan ist in Tabelle II dargestellt.

M E S S S T E L L E		D U R C H G E F Ü H R T E M E S S U N G E N							
A	MÖHLIN KANTON: AG N3 / FAHRSPUR RICHTUNG FRICK	3./10. JULI 1974	12. NOV. 1974	8. APRIL 1975	13. AUG. 1975	/	/	/	/
		3./10. JULI 1974	13. NOV. 1974	9. APRIL 1975	13. AUG. 1975	/	/	/	/
B	MÖHLIN KANTON: AG N3 / STANDSPUR RICHTUNG FRICK	/	15. NOV. 1974	11. APRIL 1975	14. AUG. 1975	2. DEZ. 1975	17. AUG. 1976	/	/
		/	/	/	/	3./4. DEZ. 1975	18./19. AUG. 1976	/	/
C	WALLISELLEN KANTON: ZH N1 / FAHRSPUR RI. WINTERTHUR	/	/	/	/	/	/	/	/
		/	/	/	/	/	/	/	/
D	FRAUENFELD KANTON: TG N7 / FAHRSPUR RICHTUNG ZÜRICH	/	/	/	/	/	/	/	/
		/	/	/	/	/	/	/	/

Tabelle II: Zeitplan



## 6. AUSWERTUNG UND ERGEBNISSE

### 6.1. Beschleunigungsmessung

Gemessen wurde die vertikale Beschleunigungskomponente eines oberflächennahen Punktes des Strassenoberbaues infolge Ueberrollung durch ein Lw-Rad. Für jede Messfahrt wurde das Signal des oberen und unteren Beschleunigungsgebers graphisch auf schnelllaufende Papierstreifen aufgezeichnet. Beispiele sind auf den Abbildungen 22, 23, 24 und 25 dargestellt. Später erfolgte die Aufnahme auf der Messstelle mittels PCM-Anlage auf Magnetband. Im Büro wurden dann die Signale im Hinblick auf die graphische Auswertung auf Papierstreifen überspielt.

#### Auswertung:

Die vertikale Beschleunigungskomponente des Verformungsvorganges ist eine wenig anschauliche Grösse. Es besteht jedoch die Möglichkeit, durch eine doppelte Integration der Beschleunigung die Verschiebung des Messpunktes aus seiner ursprünglichen Ruhelage zu berechnen. Aus vielen Ueberrollungen im Bereich des Messpunktes kann somit die Gestalt der Verformungsmulde ermittelt werden. Für einige Beispiele (Abbildung 26) wurde die Integration graphisch durchgeführt. Abgesehen vom Zeitaufwand und der Mühe, führt die graphische Integration bei einiger Sorgfalt zu guter Genauigkeit [15]. Die Bemühungen die Integration elektronisch durchzuführen hatten keinen Erfolg. Sie scheiterten in erster Linie an einer "unruhigen" Nulllinie (vergleiche Abbildungen 24 und 25), die als Bezugslinie für die Genauigkeit des Ergebnisses von entscheidender Bedeutung ist. Die Beschleunigungsmessung zur Ermittlung der Gestalt der Verformungsmulde erfordert eine Auflösung im Bereich von ca. 0.005 g. Beschleunigungen in dieser Grössenordnung wurden aber bereits durch den Lw-Verkehr auf der Ueberholspur (nur die Fahrspur konnte abgesperrt werden) und auf der Gegenfahrbahn verursacht. Des weiteren wird das Messsignal von höher frequenten Schwingungen, die durch das Reifenprofil verursacht werden, überlagert, wodurch die Genauigkeit der Integration ebenfalls beeinträchtigt wird.

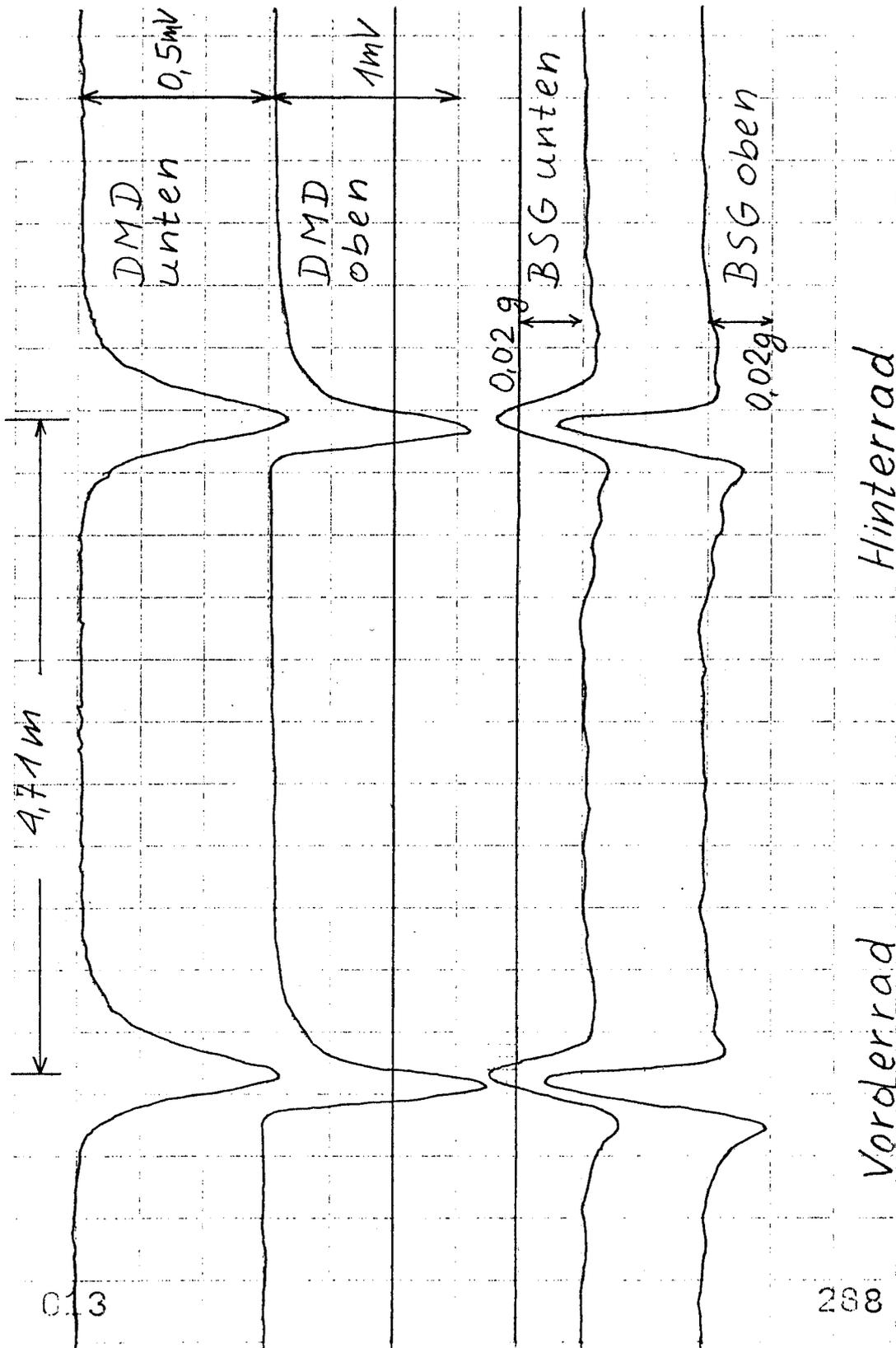


Abbildung 22: Beispiel für Druck- und Beschleunigungsmessung  
Messstelle (B) Fahrt Nr. 43 am 13.8.1975 mit 40 km/h, Temperatur T = 32°C

23  
63  
00

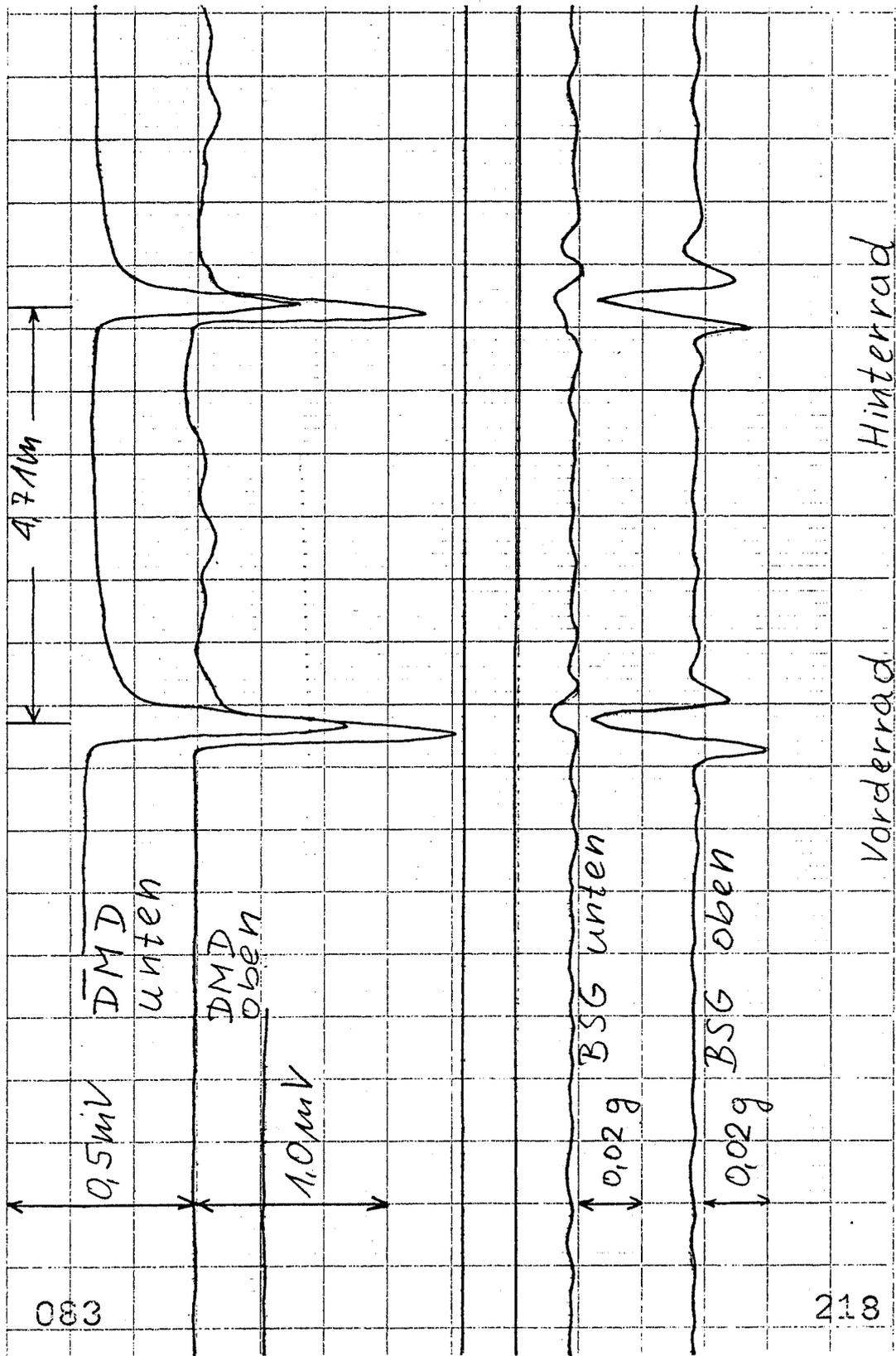


Abbildung 23: Beispiel für Druck- und Beschleunigungsmessung  
Messstelle © Fahrt Nr. 88 mit 63 km/h am 14.8.1975, Temperatur T = 27°C

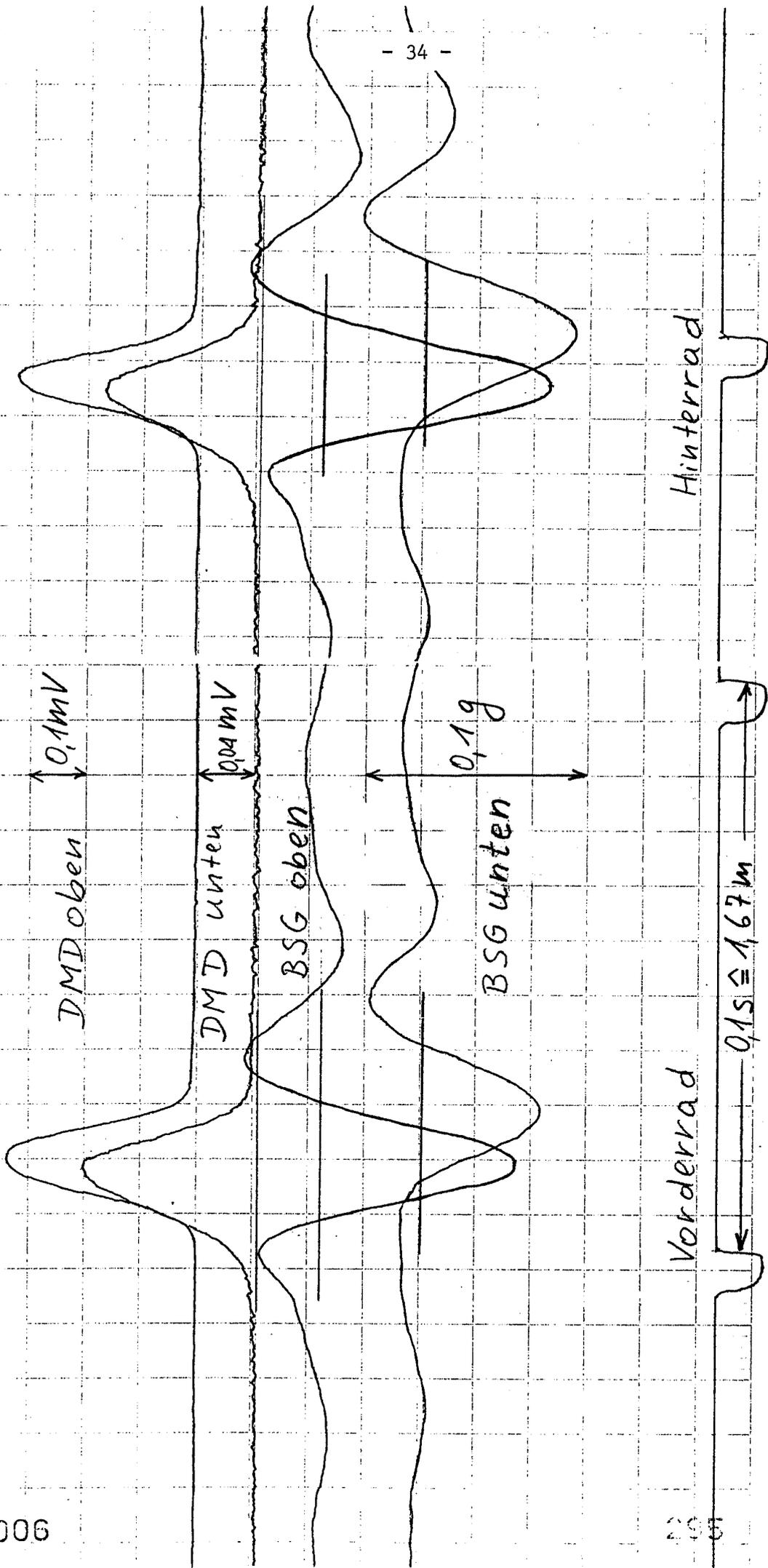


Abbildung 24: Beispiel für die Druck- und Beschleunigungsmessung  
 Messstelle © Fahrt Nr. 19 mit 60 km/h am 15.11.1974, Temperatur 40C

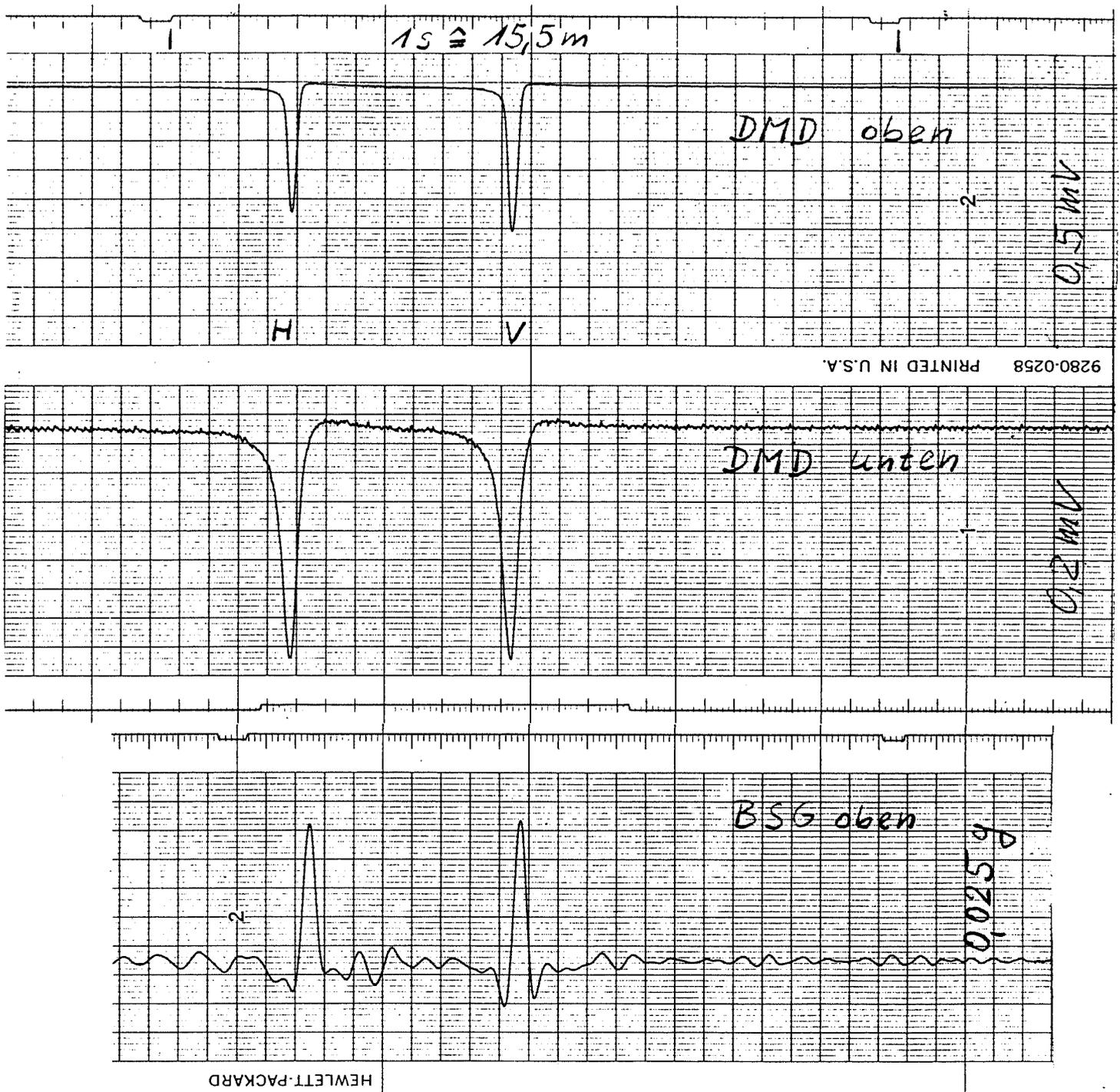


Abbildung 25: Beispiel für Druck- und Beschleunigungsmessung  
Messstelle ① Fahrt Nr. 22 mit 55,7 km/h am 4.12.1975,  
Temperatur T = 5°C

Abbildung 26:  
Beispiel für die graphische Integration

$$K = \frac{1}{R} = \frac{z''(x)}{[1 + z'^2(x)]^{3/2}}$$

$$R = \frac{1}{z''(x)}$$

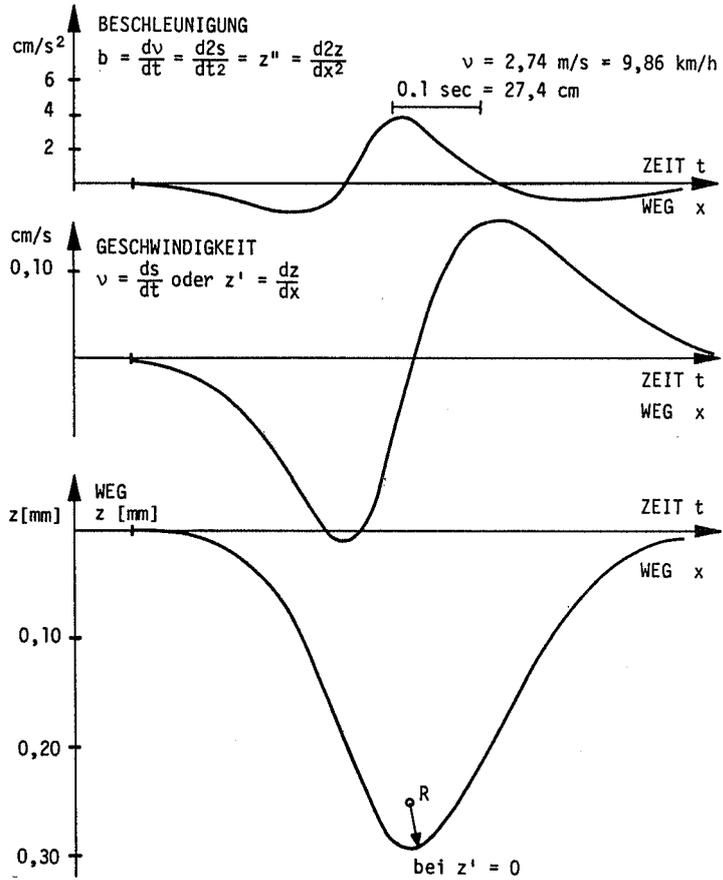
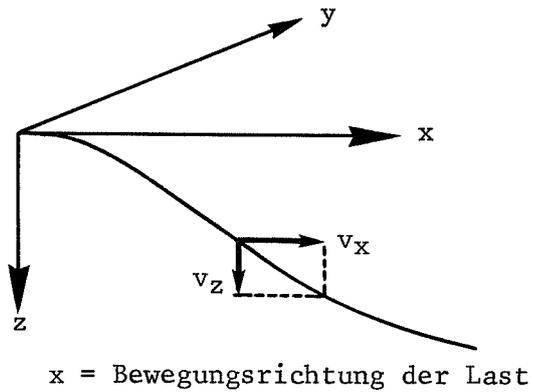


Abbildung 27:  
Geschwindigkeitsvektoren im Raum

Die allgemeinen Zusammenhänge von Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg lauten:



$$v_x = \frac{dx}{dt}$$

$$\frac{v_z}{v_x} = \frac{dz}{dx}$$

$$b_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{dz}{dx} \cdot \frac{v_x}{dt} \quad v_z = \int b_z \cdot dt$$

$$z = \iint \frac{b_z}{v_x} dt \cdot dx = \iint b_z \cdot dt \cdot dt$$

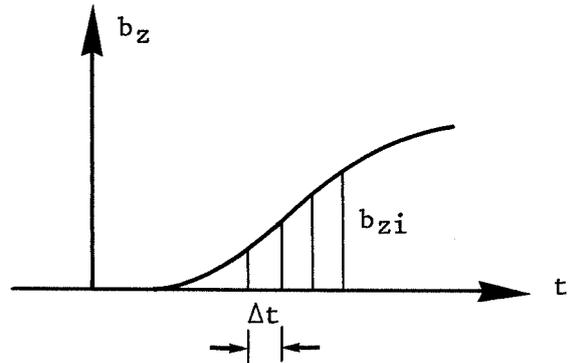
Die graphische Integration erfolgt nach folgenden Formeln:

$$b_z = f(t) \quad \text{bzw. mit } v_x = \frac{x}{t} = b_z = f(x)$$

$$v_z = \Delta t \sum_{i1=0}^{n1} b_{zi}$$

$$z = \Delta t \sum_{i2=0}^{n2} v_{zi} = \Delta t^2 \sum_{i2=0}^{n2} \left( \sum_{i1=0}^{n1} b_{zi1} \right) i2$$

Abbildung 28:  
Graphische Integration



$b_z$  = Beschleunigung des Punktes  $(x,y,z)$  in z-Richtung  
 $v_z$  = Geschwindigkeit des Punktes  $(x,y,z)$  in z-Richtung  
 $z$  = Verschiebung des Punktes  $(y,y,z)$  in z-Richtung  
 infolge einer in der x-Richtung sich bewegenden Last.

Geht man von der Annahme aus, dass die Gestalt der Einflusslinie identisch ist mit der Gestalt der Verformungslinie, so lassen sich folgende Aussagen über die Verformungslinie machen:

$z = f(x)$  (= Gleichung der Verformungslinie als Funktion vom Weg  $x$  bei sich bewegendem Koordinatensystem;  $z = f(x)$  ist identisch der durch doppelte Integration ermittelten Einflusslinie  $z = f(t)$ )

$$z' = \frac{dz}{dx} = \frac{v_z}{v_x}$$

$$z'' = \frac{d^2z}{dx^2} = \frac{b_z}{v_x^2}$$

Krümmungsradius R:

$$R = \frac{(1 + z'^2)^{3/2}}{z''} \quad \text{für } z' = 0; \quad v_z = 0$$

$$R = \frac{1}{z''} \quad \boxed{R = \frac{v_x^2}{b_z}}$$

Bei den Messungen wurde angestrebt, immer möglichst zentral oder nur mit geringer seitlicher Abweichung ( $< 30$  cm) über den Messpunkt zu fahren. Die Variablen an einem Messtag waren deshalb die Geschwindigkeit  $v_x$  und die seitliche Abweichung. Der Geschwindigkeitsbereich erstreckte sich von ca. 2 km/h bis 60 km/h.

Es wurden sämtliche Daten in Funktion der Geschwindigkeit und der seitlichen Abweichung aufgetragen (siehe Anhang).

Würde sich der Strassenkörper unter bewegter Belastung rein elastisch verhalten, so wäre die Gestalt der Verformungslinie unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit  $v_x$ . Die folgenden Grössen  $z = f(x)$ ;  $z'$ ;  $z''$  und Krümmungsradius  $R_{z'=0}$  müssten dann konstant sein.

Es konnte jedoch festgestellt werden, dass sich die Gestalt der Verformungslinie mit zunehmender Geschwindigkeit  $v_x$  folgendermassen ändert:

- die Verformung  $z_{\max}$  wird kleiner
- der Krümmungsradius wird grösser
- der Abstand der Wendepunkte vom Scheitelpunkt ( $z_{\max}$ ) wird grösser
- die Verformungslinie wird flacher.

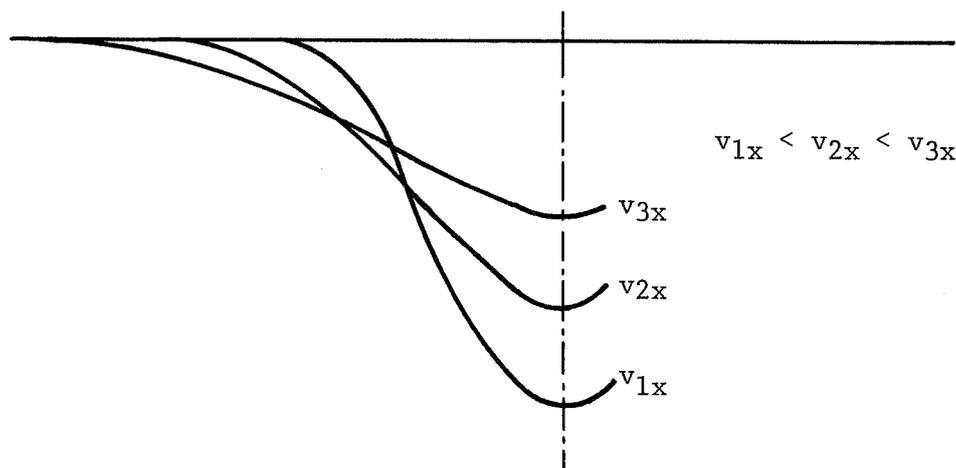


Abbildung 29: Gestalt der Verformungsmulde in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Aus diesen Beobachtungen folgt, dass die Materialkennwerte ( $E, \nu$ ) in starkem Masse von der Belastungsgeschwindigkeit abhängen.

Die Einflusslinie ist nicht symmetrisch zum Lastzentrum. Die nach unten gerichtete Geschwindigkeit (Verformungsgeschwindigkeit) ist bei al-

len Fahrgeschwindigkeiten  $v_x$  wesentlich grösser als die nach oben gerichtete (Rückformungsgeschwindigkeit siehe Abbildung 26).

Es bleibt eine irreversible Verformung zurück. Die Ermittlung dieser bleibenden Verformung ist sehr ungenau, da es sich beim Ausklingen der Rückverformung um ausserordentlich geringe Beschleunigungen handelt, die vom Geber nicht mehr registriert werden, die aber über eine längere Zeitdauer noch eine gewisse Rückverformung verursachen.

Aus dieser Feststellung folgt eindeutig, dass der untersuchte flexible Strassenkörper bei dynamischer Belastung sich **n i c h t e l a s t i s c h** sondern **v i s k o e l a s t i s c h** verhält. Das Verhalten kann aber näherungsweise als elastisch betrachtet werden.

Es folgt daraus ferner, dass jeder einzelne Belastungsvorgang mit einem erheblichen Verlust an äusserer Energie verbunden ist. Die absorbierte Energie kann nach [16] in 3 Arten eingeteilt werden:

- Durch die dynamische Deformation der Strassenoberfläche entsteht eine "seismische Energie", die sich in Form von Oberflächenwellen und halbkugelförmigen Kompressionswellen über grössere Entfernungen fortpflanzt.
- Beträchtliche Energiemengen werden durch innere Reibung des Materials verbraucht. Diese Energie wird fast ganz in Wärme umgewandelt.
- Eine dritte Energieart bewirkt eine Materialveränderung (Alterung) bzw. gar die Materialzerstörung.

#### Ergebnisse:

Aus den gemessenen maximalen Beschleunigungen wurde der kleinste Krümmungsradius der Verformungsmulde berechnet, d.h. der Krümmungsradius unter dem Vorderrad in Fahrtrichtung (x-Richtung). Dieser ist für die einzelnen Messstellen **(A)** **(B)** **(C)** **(D)** auf den Abbildungen 30,31,32, und 33 in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit und der Temperatur graphisch dargestellt. Beide Einflüsse, Fahrgeschwindigkeit wie auch Temperatur sind auf allen 4 Oberbaustrukturen stark ausgeprägt.

N 3 Mumpf, Fahrspur, Vorderrad

(A)

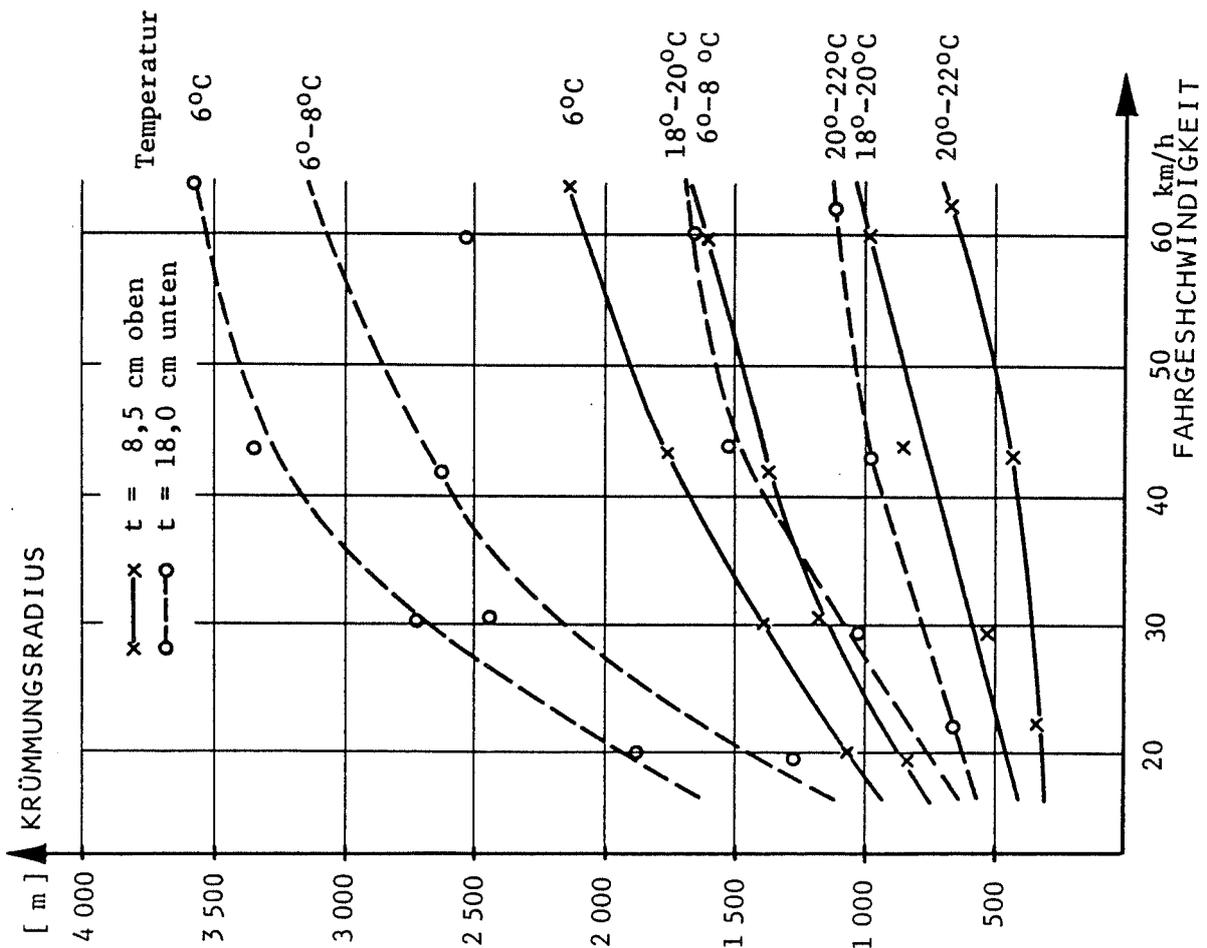


Abbildung 30: Krümmungsradius der Verformungsmulde in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Temperatur

N 3 Mumpf, Standspur, Vorderrad

(B)

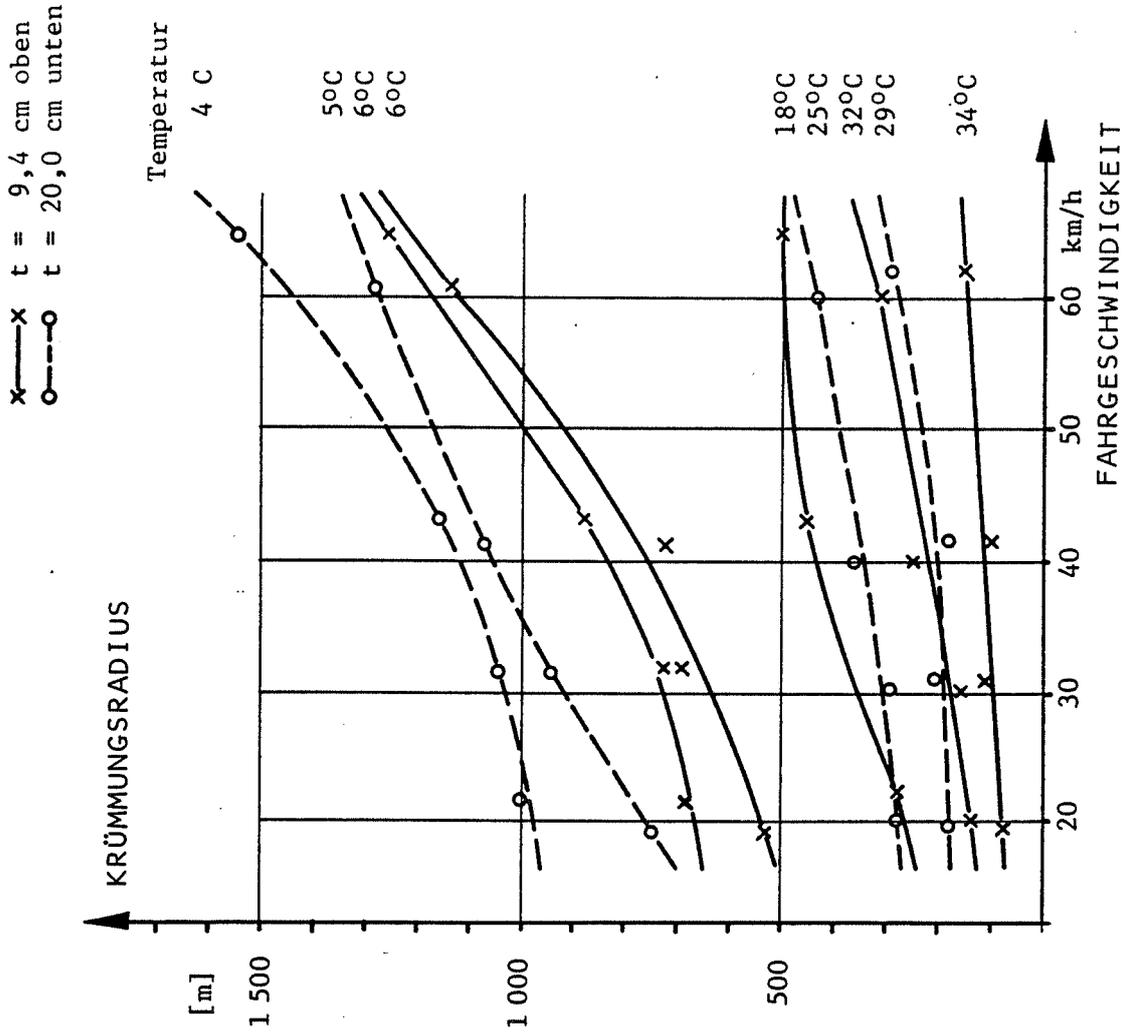


Abbildung 31: Krümmungsradius der Verformungsmulde in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Temperatur

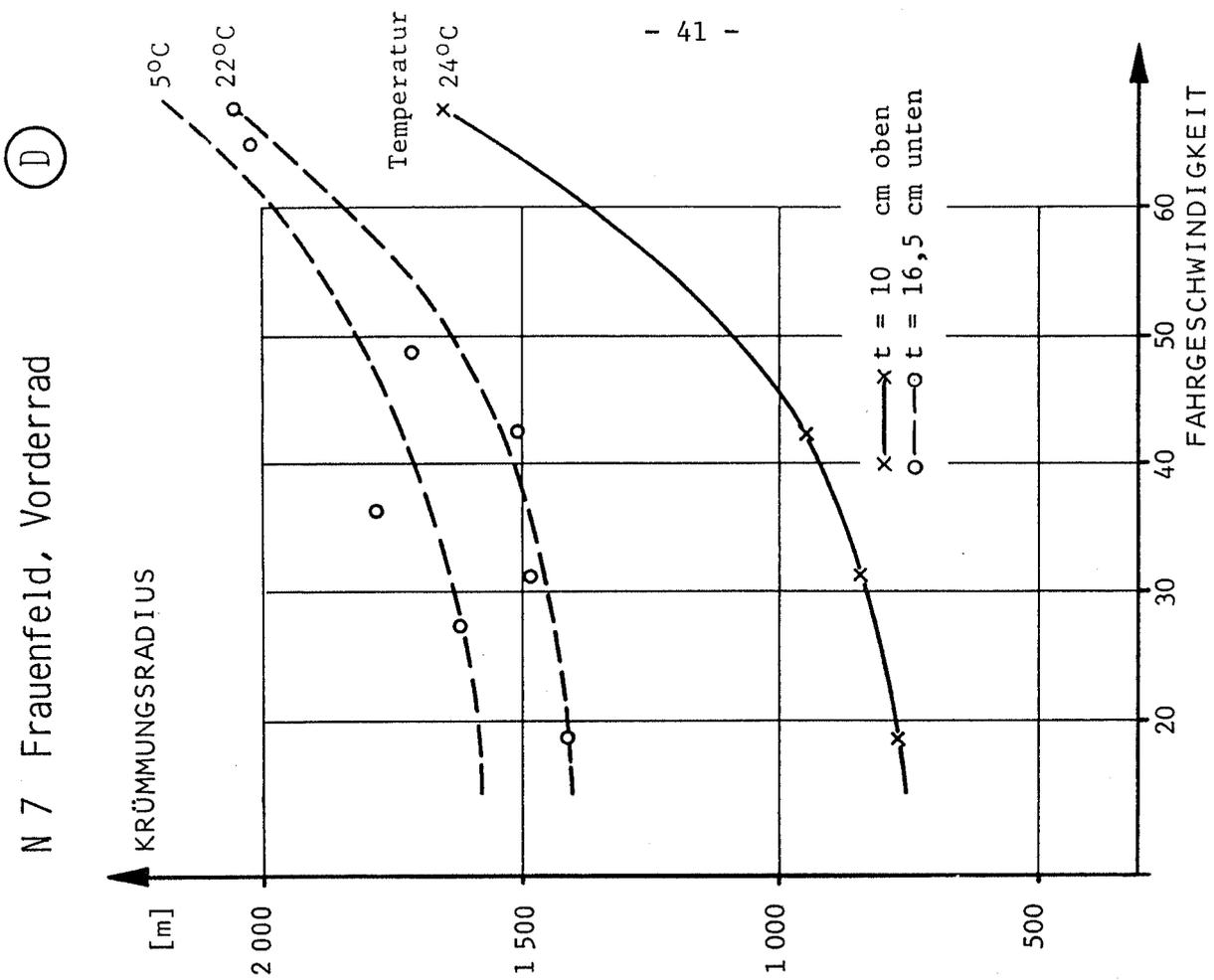
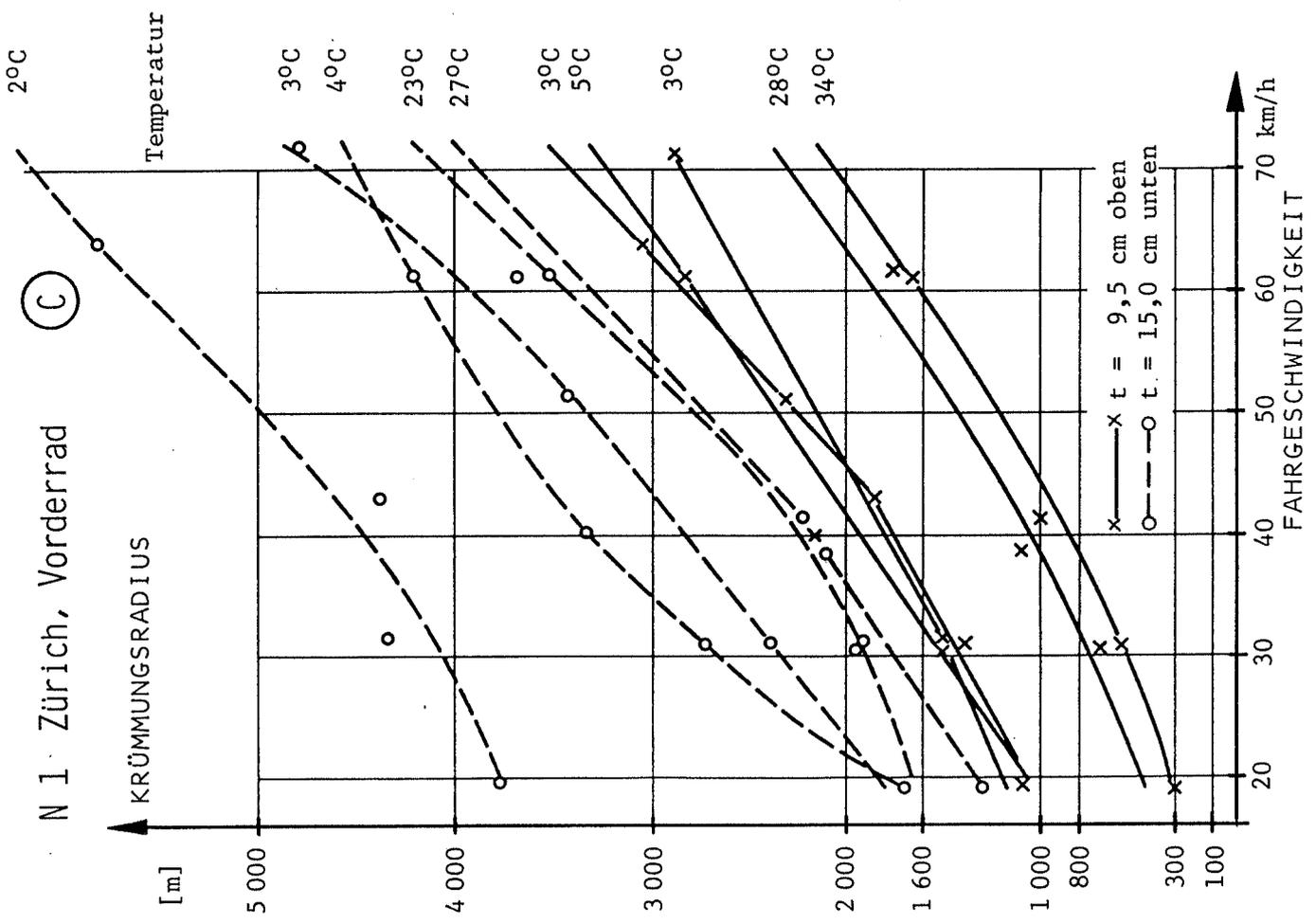


Abbildung 32 und 33:

Krümmungsradius der Verformungsmulde in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Temperatur

Auf Abbildung 34 werden die ermittelten Krümmungsradien aller vier Oberbaustrukturen bei 60 km/h und 20°C bis 24°C miteinander verglichen. Die Reihenfolge entspricht den Erwartungen:

1.  $R_{oben} \approx 2\,300\text{ m}$  bei (C)

Die 48 cm dicke Zementstabilisierung auf der N1 ist als eine ausserordentlich starre Struktur zu bewerten

2.  $R_{oben} \approx 1\,500\text{ m}$  bei (D)

Die 43 cm dicke Schicht aus "Mörtelbinder" der N7 ist bereits weniger starr.

3.  $R_{oben} \approx 700\text{ m}$  bei (A) Fahrspur der N3

10 cm HMF auf ungebundenem Kiessand.

4.  $R_{oben} \approx 500\text{ m}$  bei (B) Standstreifen der N3

ungebundene Fundamentalschicht aus Kiessand.

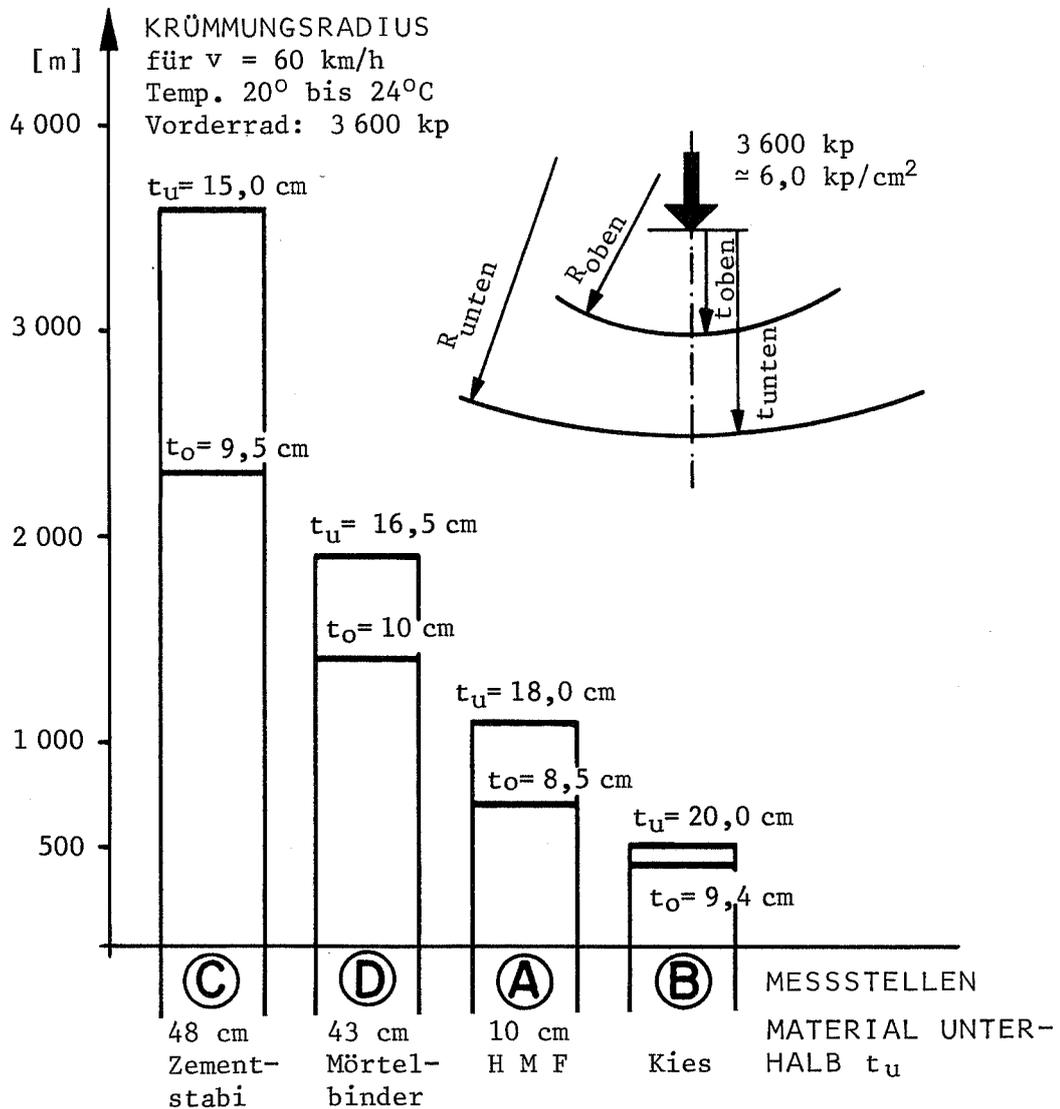


Abbildung 34: Vergleiche der auf den vier Oberbaustrukturen gemessenen Krümmungsradien

## 6.2. Druckmessung

Aus den in Kapitel 3.2. bereits dargelegten Gründen wird der Spannungszustand in einem Medium durch den Einbau von Druckmessdosen, die als Fremdkörper wirken, verändert. Ursprünglich bestand die Hoffnung, den Störeinfluss durch Korrekturfaktoren kompensieren zu können. Die Korrekturfaktoren wurden aus der Gleichgewichtsbedingung in vertikaler Richtung abgeleitet. Derzufolge muss die aus der Integration über die Spannungen der "gemessenen Druckglocke" berechnete Kraft gleich der Radlast sein:

$$R = f \cdot \int \sigma_z \, dF = f \cdot \iint \sigma_z \, dx \cdot dy$$

R = Radlast

f = Korrekturfaktor

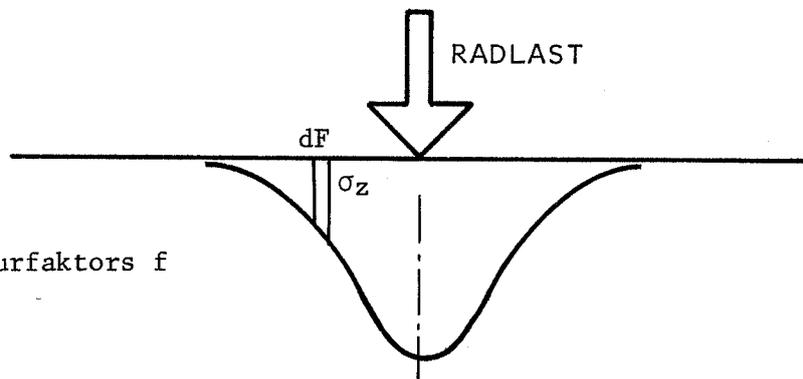


Abbildung 35:

Berechnung des Korrekturfaktors f

Der Korrekturfaktor f ist in Abhängigkeit von der Temperatur und der Fahrgeschwindigkeit auf Abbildung 37 dargestellt. Es handelt sich dabei um eine stark vereinfachte Darstellung; die Streuung der einzelnen berechneten Punkte war erheblich. In Vorversuchen wurde der Elastizitätsmodul der Druckmessdosen zu  $5\,000 \text{ kp/cm}^2$  ermittelt. Verglichen mit dem Verformungsmodul von Asphalt, der bei tieferer Gebrauchstemperatur und dynamischer Verkehrsbelastung Werte bis etwa  $100\,000 \text{ kp/cm}^2$  annehmen kann, waren die Dosen "weich", was auch die sehr hohen Werte für den Korrekturfaktor bedingt. Es stellte sich heraus, dass das Problem mit Korrekturfaktoren nicht in den Griff zu bekommen war, so dass schliesslich auf die Auswertung absoluter Messwerte verzichtet werden musste. Die Schwierigkeiten bei der Druckmessung in Asphaltsschichten können wie folgt zusammengefasst werden:

- Ausfälle nach dem Ueberbauen der Druckmessdosen mit Asphalt infolge hoher Temperaturen und mechanischer Beanspruchung
- spätere Ausfälle infolge Eindringen von Feuchtigkeit

- grosser Einfluss von Belastungsgeschwindigkeit (diese ist nicht identisch mit der Fahrgeschwindigkeit)
- grosser Einfluss der Umgebungstemperatur der Druckmessdose (die elektronische Messung der Dose selbst ist temperaturkorrigiert);
- Einfluss der Temperaturgradiente.

Somit blieb nur die qualitative Betrachtung der Messung. Ein Beispiel für den qualitativen Druckverlauf in Längsrichtung (Fahrrichtung) ist als Schnitt durch die Druckglocke auf Abbildung 36 dargestellt. Abbildung 38 zeigt die Druckverteilung in Querrichtung in 4,5 cm und 12,5 cm Tiefe unter einem 6 t Zwillingssrad. Weitere Beispiele für Druckverteilungen in Querrichtung sind im Anhang dargestellt. Auf Abbildung 39 ist ein Beispiel für die Ausdehnung der Druckglocke in Längs- und in Querrichtung dargestellt. Die relative Abnahme des Maximalwertes  $\sigma_{z \max}$  der Druckglocke unter dem Vorderrad ist für eine Fahrgeschwindigkeit von ca. 2 km/h auf der Abbildung 40 und für eine Fahrgeschwindigkeit von 40 km/h auf der Abbildung 41 dargestellt. Die Abweichungen von der theoretischen Linie für den isotropen Halbraum nach Boussinesq sind beträchtlich.

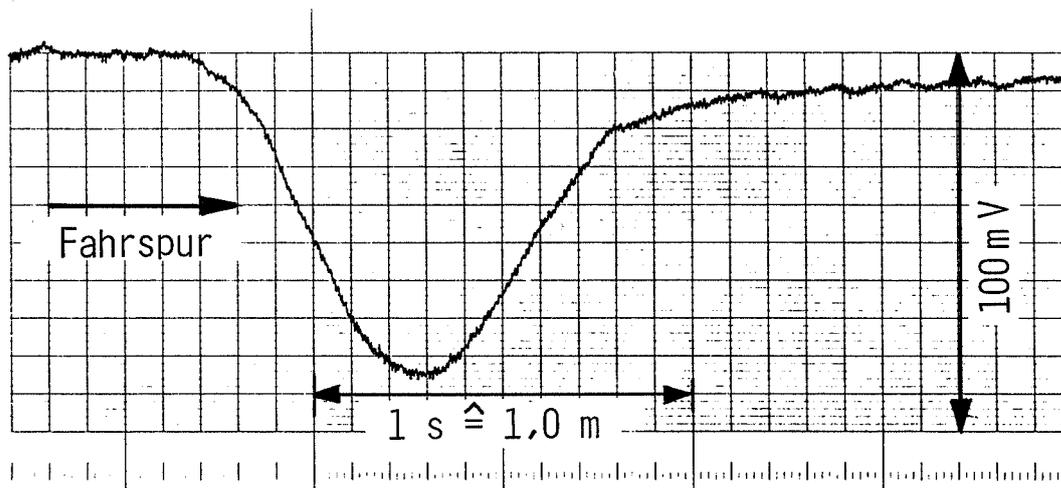


Abbildung 36: Beispiel für unsymmetrische Druckverteilung  
Messstelle (A) am 8.4.1975 (16<sup>00</sup> Uhr),  
Fahrgeschwindigkeit ca. 3 km/h  
Dose oben 8,5 cm unterhalb der Strassenoberfläche  
Temperatur T = 8°C

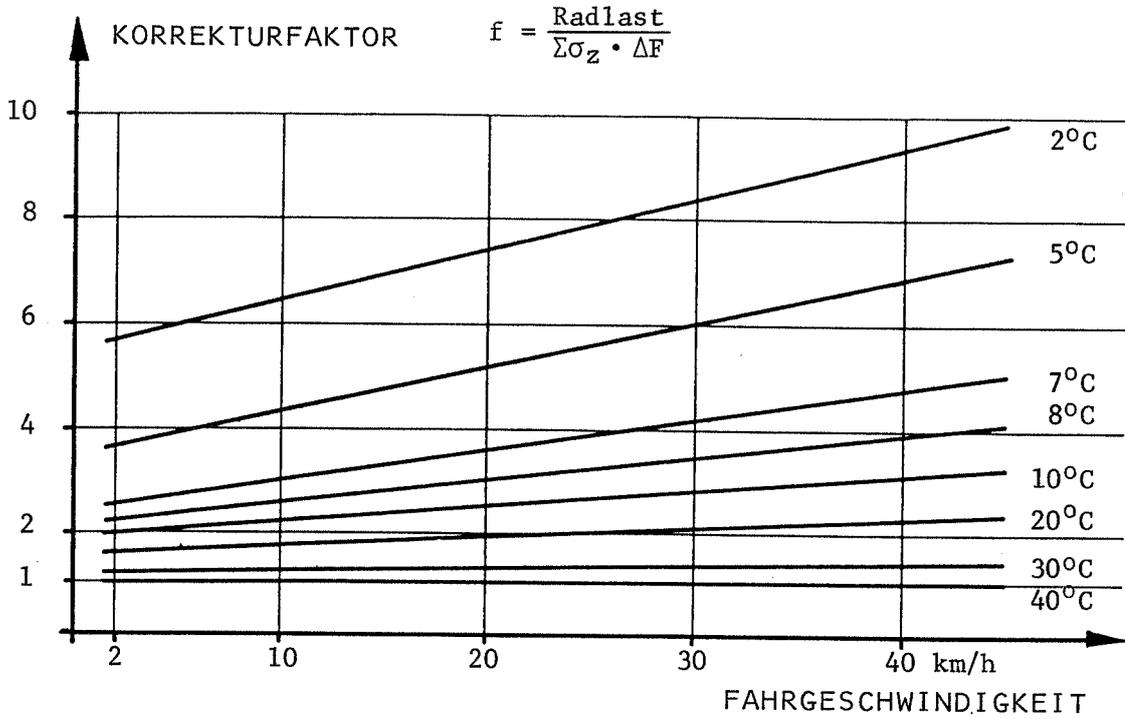


Abbildung 37: Faktor zur Korrektur der gemessenen Druckspannung in Abhängigkeit von der Temperatur und Fahrgeschwindigkeit

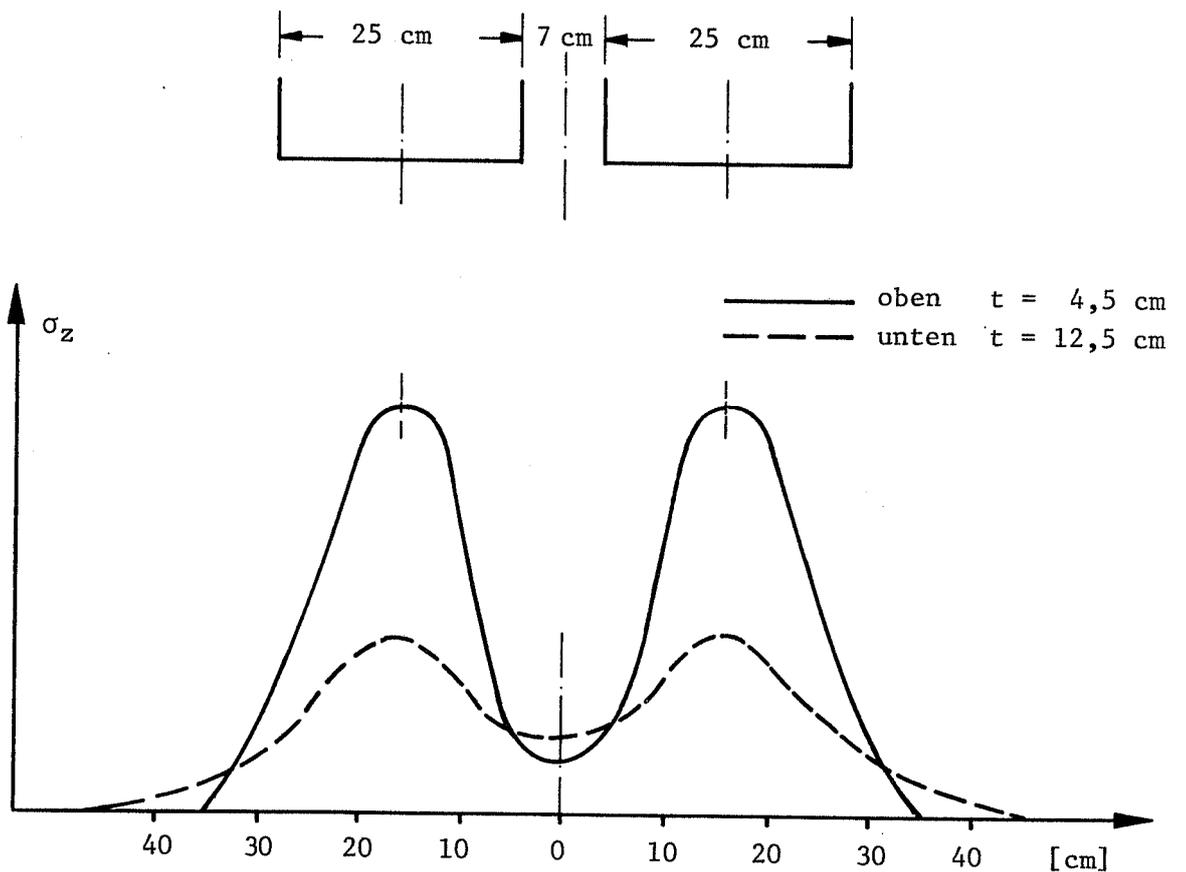


Abbildung 38: Qualitativer Verlauf der "Druckglocke" unter einem 6 t Zwillingrad: Messstelle © N1, Fahrgeschwindigkeit ca. 1 km/h, T = 20°C - 25°C

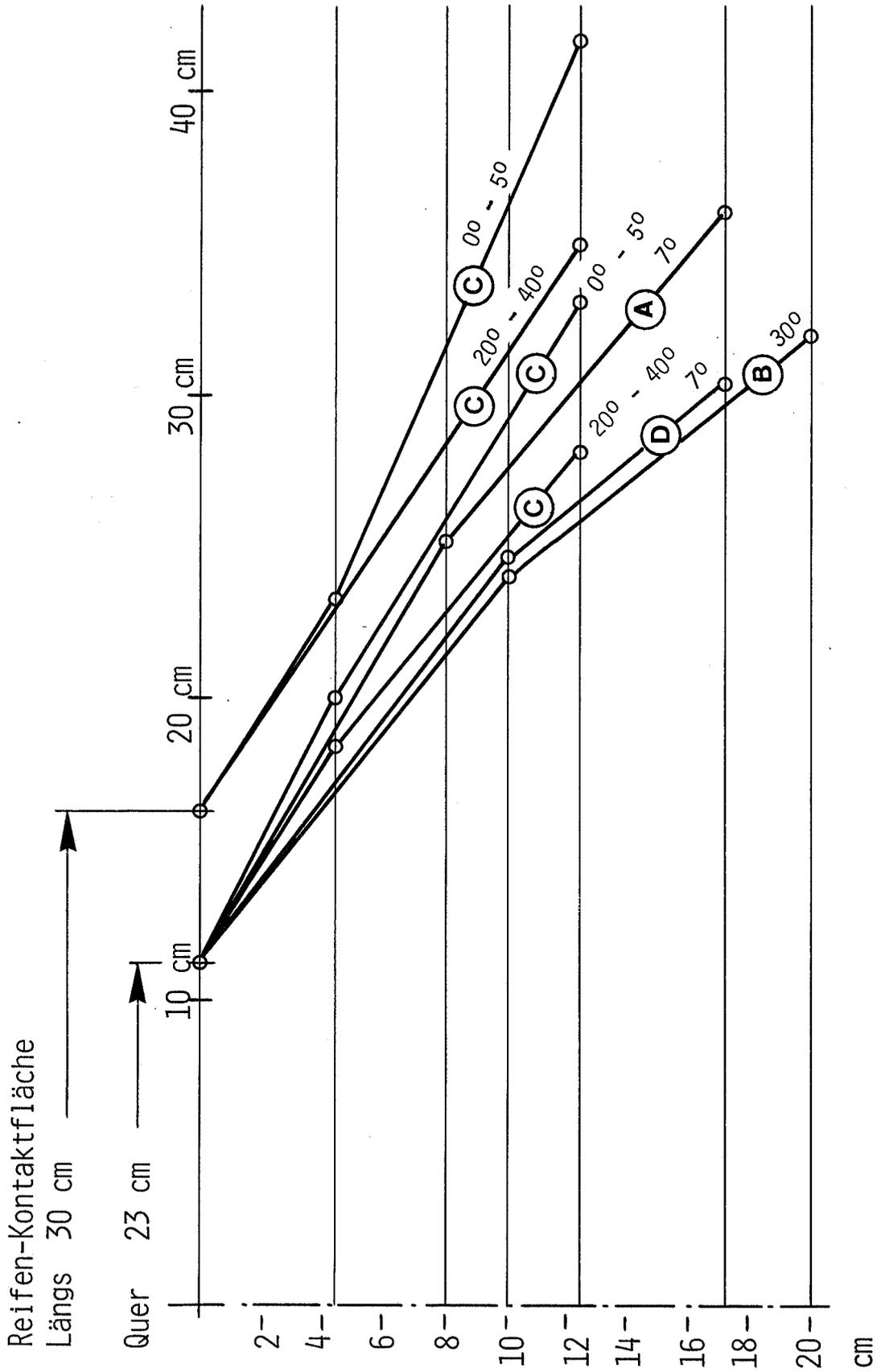


Abbildung 39: Ausdehnung der Druckglocke unter dem Vorderrad in Längs- und Querrichtung in Abhängigkeit von der Messstelle, der Temperatur und der Tiefe

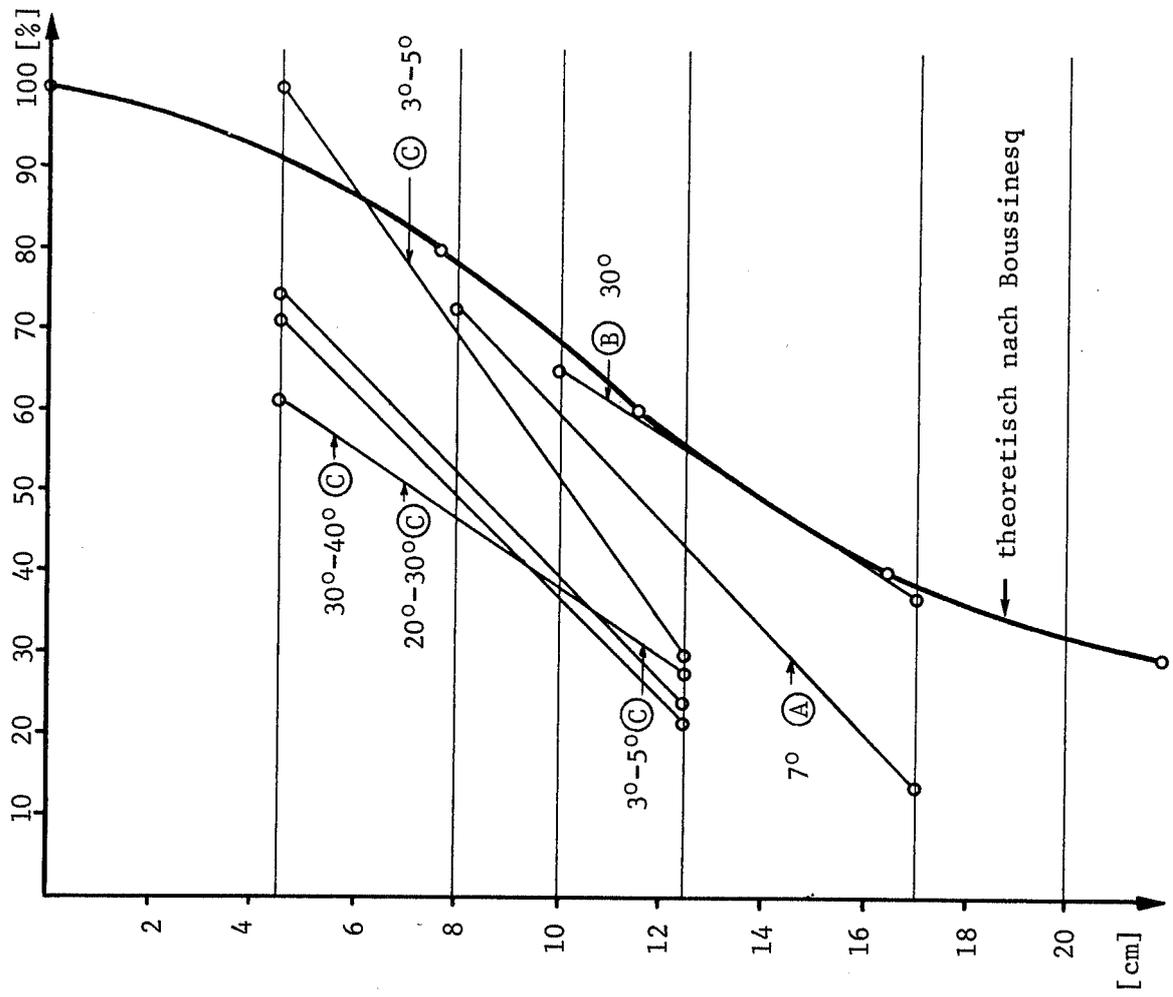


Abbildung 41: Relative Abnahme des Maximalwertes  $\sigma_{zmax}$  der Druckglocke unter dem Vorderrad; Fahrgeschwindigkeit ca. 40 km/h

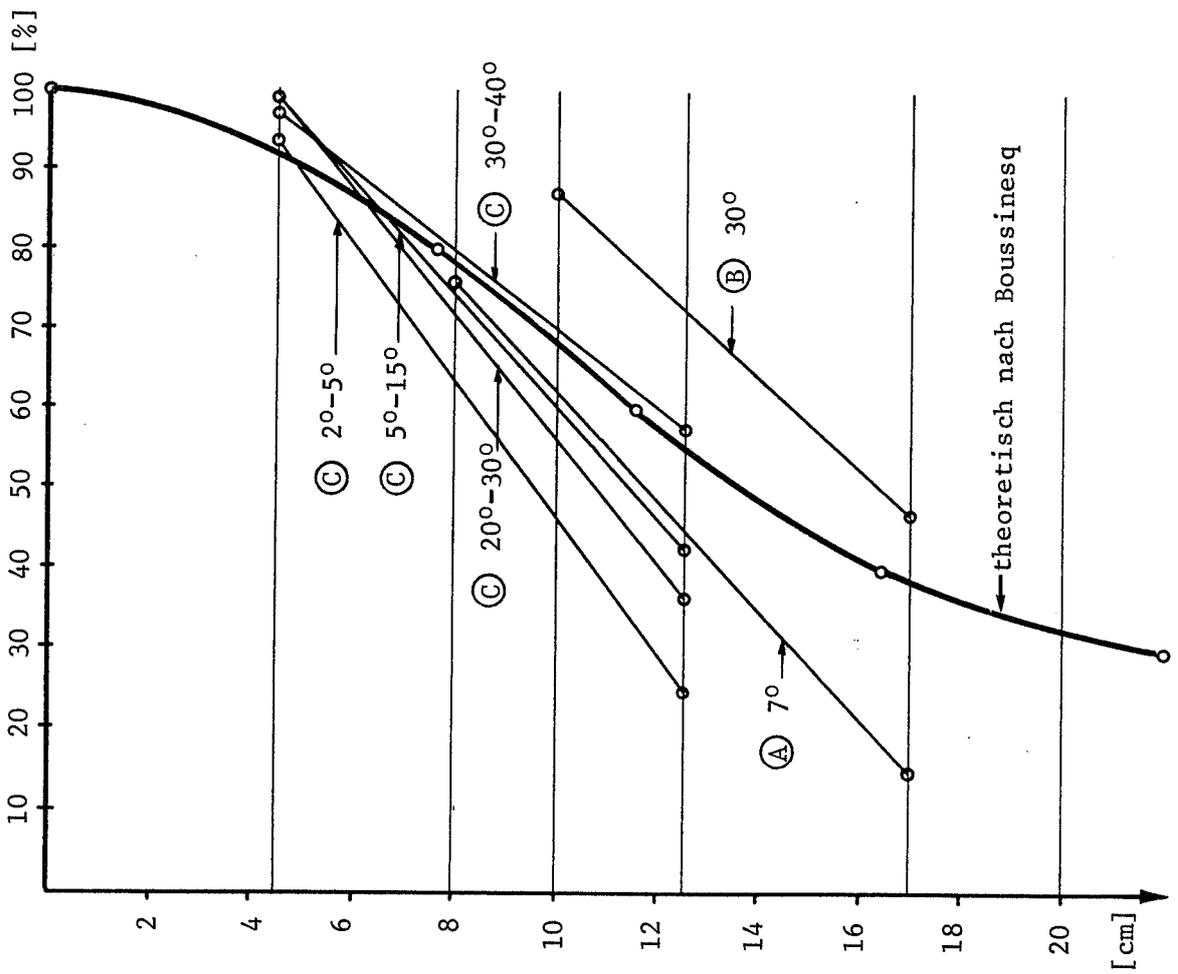


Abbildung 40: Relative Abnahme des Maximalwertes  $\sigma_{zmax}$  der Druckglocke unter dem Vorderrad; Fahrgeschwindigkeit ca. 2 km/h

### 6.3. Temperaturmessung

Mit den installierten Temperaturfühlern (siehe Abbildungen 14, 15, 16 und 17) wurden in dreierlei Hinsicht Messungen vorgenommen:

- Während der Messtage mit dem Belastungsfahrzeug wurden Temperaturen als Versuchsbedingungen gemessen. Aus den Aufzeichnungen (siehe Anhang) geht hervor, dass sich die Temperatur besonders im oberflächennahen Bereich des Oberbaues ständig ändert (es wurden in 2 cm Tiefe Aenderungsgeschwindigkeiten bis  $10^{\circ}\text{C}$  pro Stunde festgestellt), und dass in vertikaler Richtung ein ebenfalls sich ständig änderndes Temperaturgefälle vorhanden ist (es wurden Gefälle bis zu  $2^{\circ}\text{C}$  pro cm festgestellt).

- Im besonders heissen "Jahrhundertsommer" 1976 wurden auf den Messstellen **Ⓒ** und **Ⓓ** mehrtägige Temperaturmessungen durchgeführt:

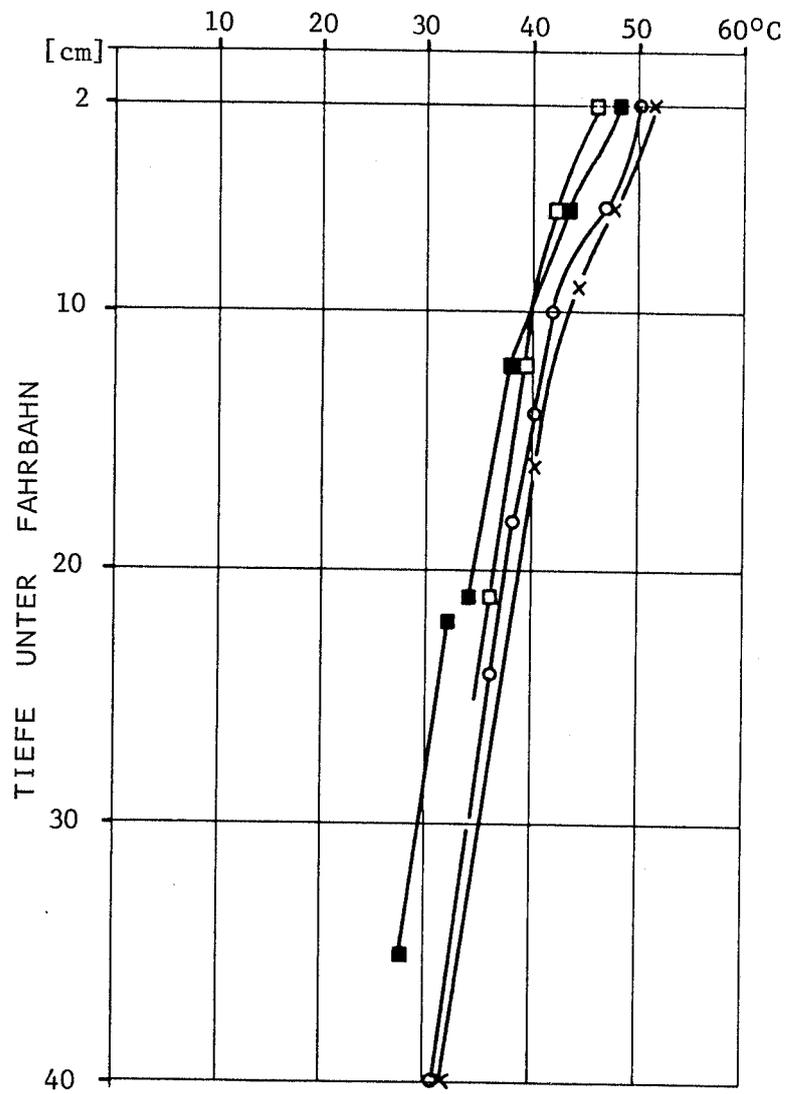
Beispiel N1, Kt. ZH: vom 24.6. bis 28.6.1976

Beispiel N7, Kt. TG: vom 29.6. bis 2.7.1976.

Auf Abbildung 42 sind die gemessenen Maximaltemperaturen in Abhängigkeit der Tiefe unter der Fahrbahnoberfläche dargestellt. Am 2.7.1976 wurde auf der N7 bei Frauenfeld gegen 15<sup>00</sup> Uhr in 2 cm Tiefe eine maximale Temperatur von  $51^{\circ}\text{C}$  gemessen. In einer Tiefe von 40 cm betrug am selben Tag die Temperatur immerhin noch  $32^{\circ}\text{C}$ .

- Des weiteren wurde mit Hilfe der eingebauten Fühler der Temperaturverlauf nach Ueberbauen mit einer heissen Asphalttschicht aufgezeichnet. Drei Beispiele sind auf den Abbildungen 43 bis 46 graphisch dargestellt.

Die Abbildung 43 zeigt eindrucksvoll, wie rasch die Temperatur einer Mitte Oktober bei windigem Wetter und  $11^{\circ}\text{C}$  Lufttemperatur eingebauten 4 cm dicken Verschleisschicht abnimmt. 30 Minuten nach dem Fertigerübergang betrug die Temperatur der frischen Schicht nur noch  $40^{\circ}\text{C}$ . Erfolgte der Einbau bei sonnigen warmen Wetter (Lufttemperatur  $24^{\circ}\text{C}$ ) so wurden nach der gleichen Dauer von 30 Minuten noch  $80^{\circ}\text{C}$  gemessen (siehe Abbildung 44). Beim Einbau von dickeren Schichten (siehe Abbildungen 45 und 46), wie zum Beispiel 10 cm HMT, sind die Temperaturverhältnisse noch wesentlich günstiger, zum Beispiel  $100^{\circ}\text{C}$  nach 30 Minuten



LEGENDE :

- Mumpf , N3, Kt. AG am 4.8.1975
- × Frauenfeld, N7, Kt. TG am 2.7.1976
- Winterthur, N1, Kt. ZH am 27.6.1976
- Winterthur, N1, Kt. ZH am 17.7.1976

Abbildung 42: Gemessene Maximaltemperaturen in Abhängigkeit von der Tiefe

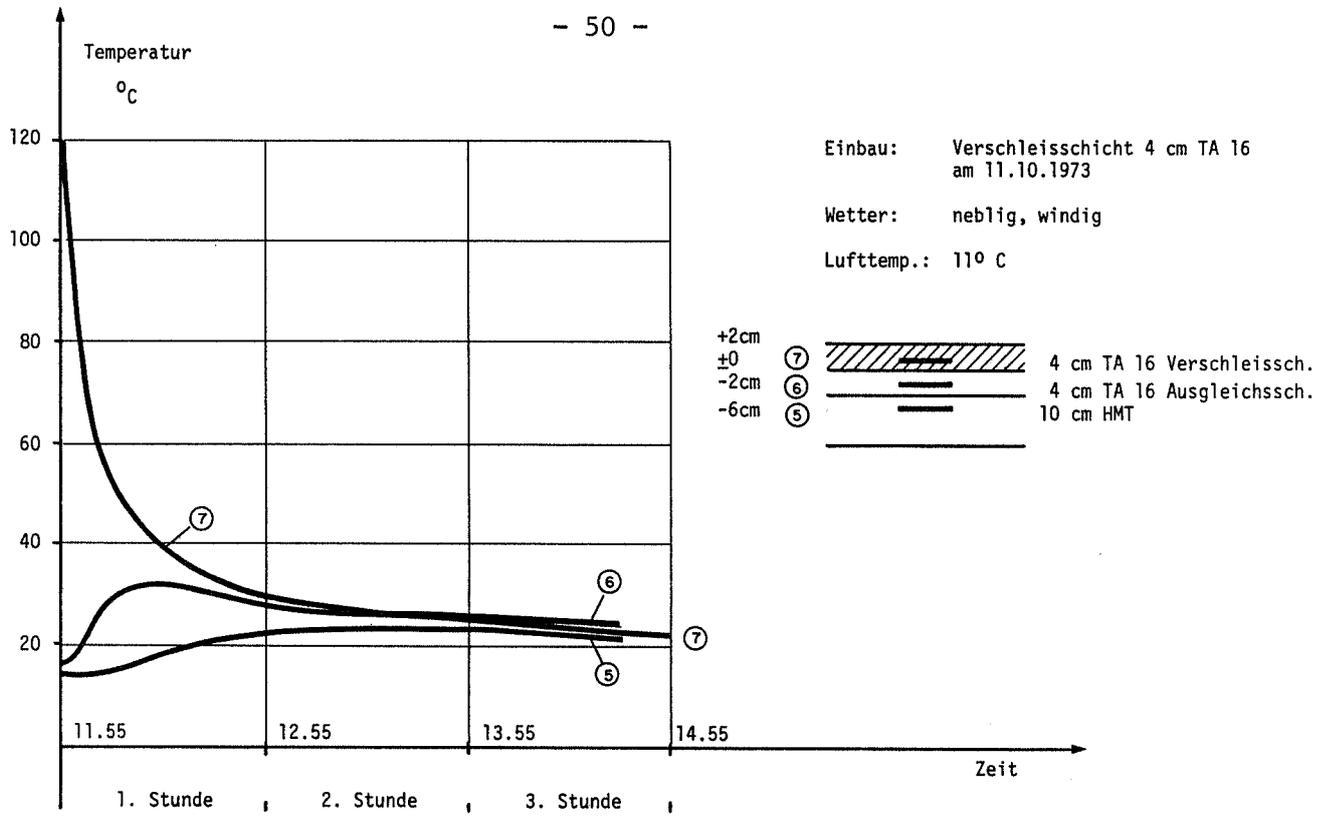


Abbildung 43: Temperaturverlauf bei Belageeinbau N3 Messstelle Mumpf (Fahrspur)

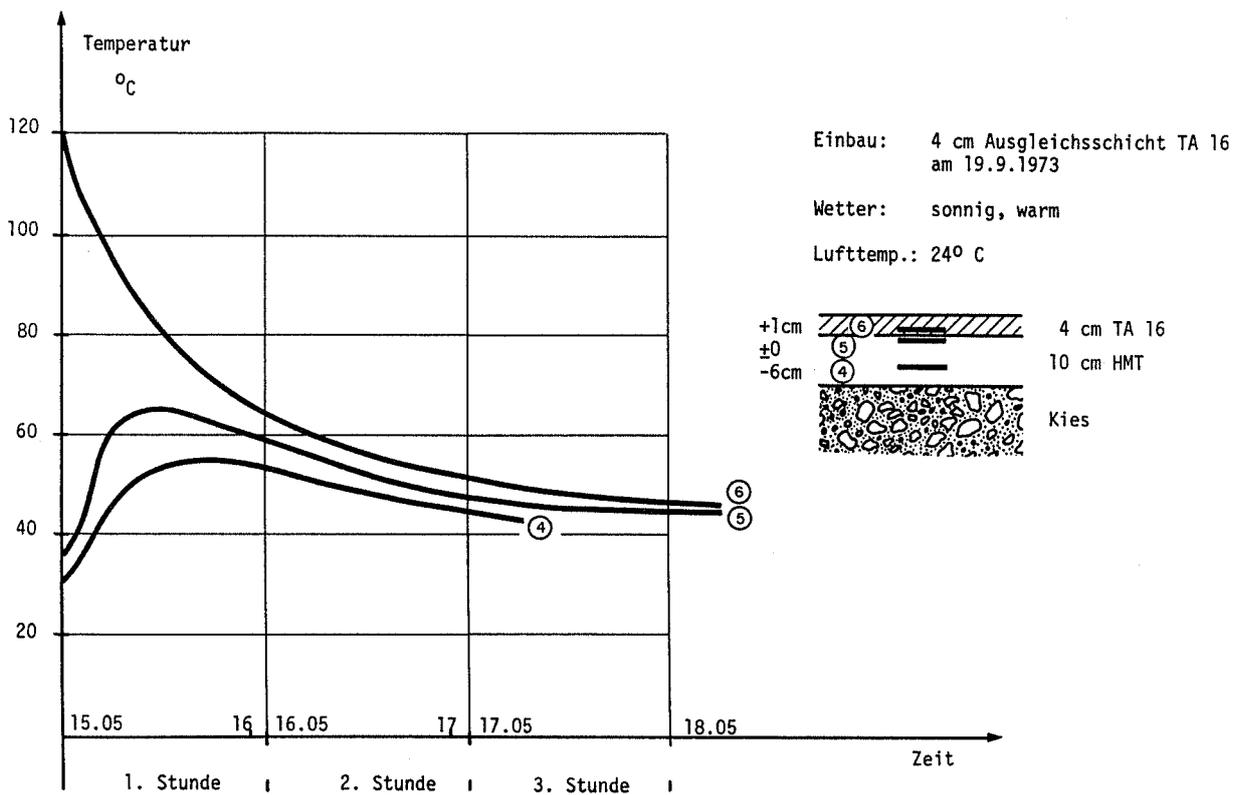


Abbildung 44: Temperaturverlauf bei Belageeinbau N3 Messstelle Mumpf (Standspur)

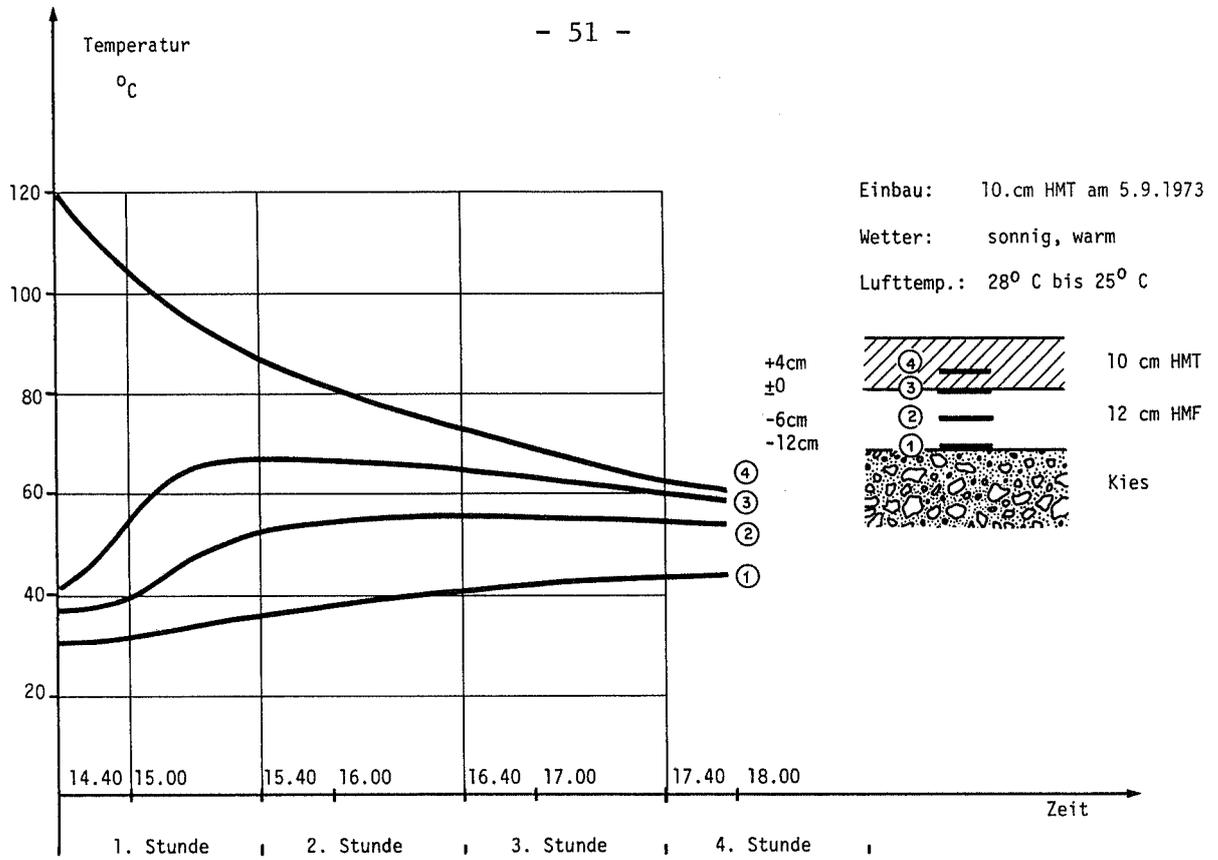


Abbildung 45: Temperaturverlauf bei Belagseinbau  
 N3 Messstelle Mumpf (Fahrspur)

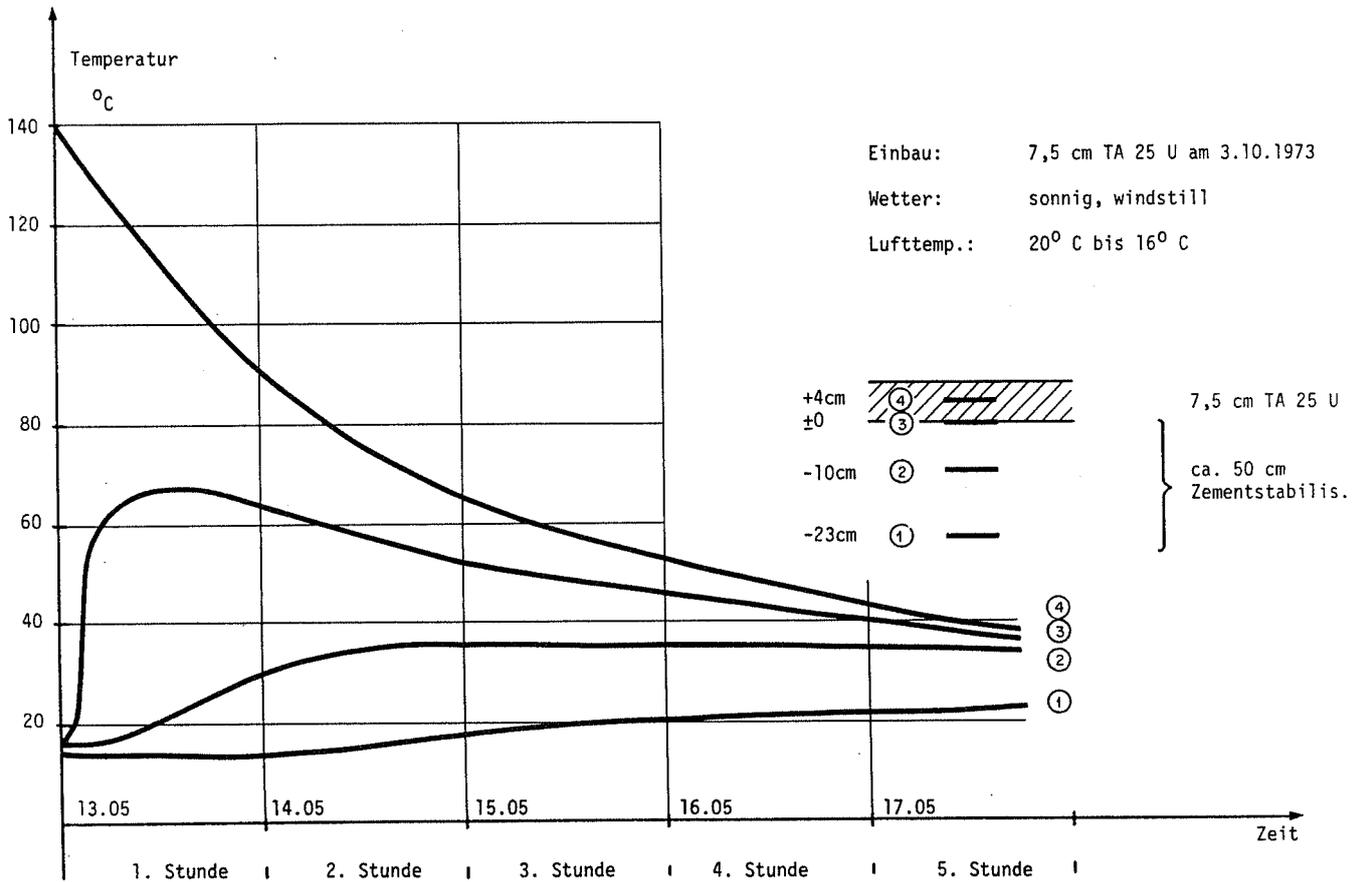


Abbildung 46: Temperaturverlauf bei Belagseinbau  
 N1 Messstelle Tagelswangen km 299.360



## 7. B E R E C H N U N G E N M I T " B I S A R "

Im Rahmen des Forschungsauftrages war auch der Vergleich der gemessenen Werte mit berechneten Werten vorgesehen. Zu diesem Zweck wurde vom ISETH 1975 das von der SHELL entwickelte BISAR Programm (Bitumen Structures Analysis in Roads) [17][18] beschafft. Diesem Rechenprogramm liegt ein elastisches Mehrschichtensystem, das auf einem isotropen Halbraum ruht, zu Grunde. Die wichtigsten Hypothesen sind:

- Belastung durch kreisförmige, konstante Flächenpressung (normal zu den Schichten, oder in der Ebene der Schichten wirkend).
- Rotationssymmetrie um die Lastachse.
- jede Schicht, wird durch den E-Modul, die Poisson-Zahl sowie ihre Dicke gekennzeichnet.
- unendliche Ausdehnung der Schichten in horizontaler Richtung.
- der Grad der Uebertragung von Schubkräften zwischen den Schichten (Haf- ten oder Gleiten) kann berücksichtigt werden.

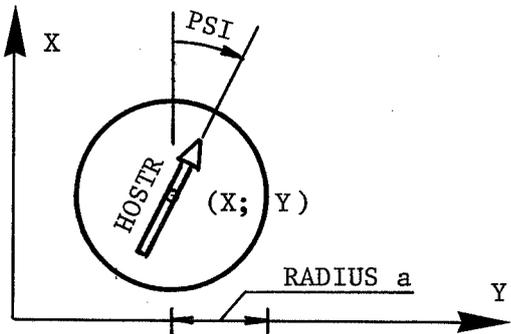
Unter diesen Hypothesen werden für jeden gewünschten Punkt des Systems die folgenden Zustandsgrössen berechnet:

- Spannungstensor (stress)  $\sigma_x$   $\sigma_y$   $\sigma_z$
- Dehnungstensor (strain)  $\epsilon_x$   $\epsilon_y$   $\epsilon_z$
- Verschiebungstensor (displacement)  $V_x$   $V_y$   $V_z$

Die Datenausgabe für e i n e n Punkt des Systems ist beispielhaft auf Abbildung 48 dargestellt.

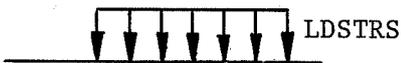
Die Dateneingabe erfolgt nach dem auf Abbildung 47 dargestellten Schema. Die Problematik aller theoretischen Berechnungen (das trifft nicht nur für das BISAR-Programm zu), liegt neben den idealisierenden Hypothesen in erster Linie bei der Wahl der Materialkennwerte sowie bei der Wahl der Schubkraftübertragung. Die Streuung der Materialkennwerte E und  $\nu$  ist in Abhängigkeit von Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit einerseits und von der Mischgutzusammensetzung, dem Verdichtungsgrad und der Bindemittel- härte andererseits ausserordentlich gross. Wenn man nicht aufwendige Ma- terialuntersuchungen im Labor auf sich nehmen will, ist man weitgehend auf Vermutungen angewiesen. Es empfiehlt sich deshalb, ein gegebenes Schichtensystem mit gegebener Belastung für variierende Materialkennzif-

BLATT NR.:	DATUM:	I S E T H
SACHBEARBEITER:		



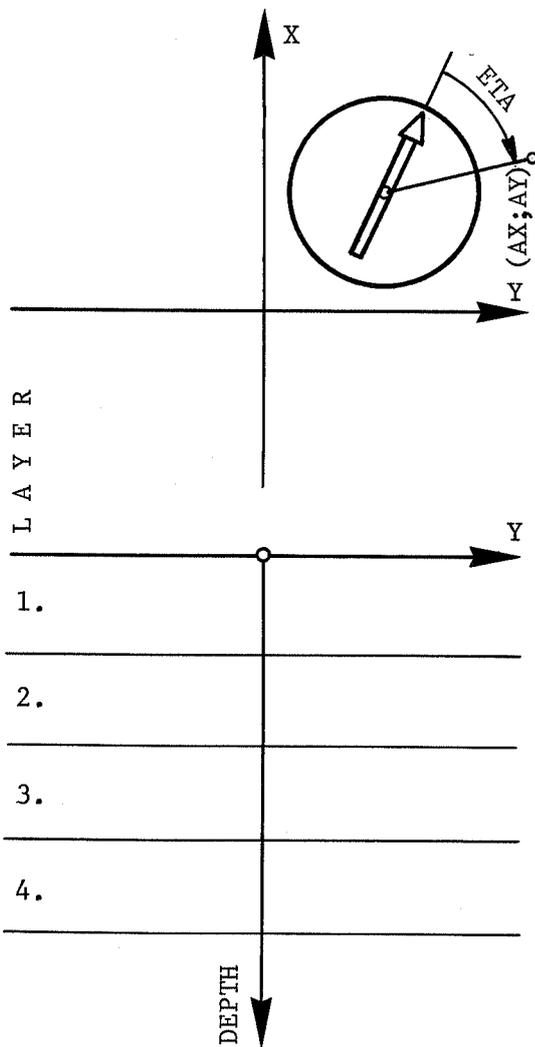
card type (g)

IDENT	
LDSTRS	kp/cm <sup>2</sup>
RADIUS	cm
X	cm
Y	cm
HOSTER	kp/cm <sup>2</sup>
PSI	Grad



card type (d)

1.		E <sub>1</sub> =	V <sub>1</sub> =	h <sub>1</sub> =
2.	AK <sub>1</sub> =	E <sub>2</sub> =	V <sub>2</sub> =	h <sub>2</sub> =
3.	AK <sub>2</sub> =	E <sub>3</sub> =	V <sub>3</sub> =	h <sub>3</sub> =
4.	AK <sub>3</sub>	E <sub>4</sub> =	V <sub>4</sub> =	h <sub>4</sub> =



card type (j)

Pos. Nr.	LAYER	A X cm	A Y cm	DEPTH cm	E T A * Grad
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					*nur bei
20					AX=AY=0

Abbildung 47: Dateneingabe

POSITION NUMBER 1P

LAYER NUMBER 1

COORDINATES

X 0. Y .1900E+02 Z .1250E+02

DISTANCE TO LOAD-AXIS ( 1 )  
.1000E+02

THETA  
.1571E+01

CISPLACEMENTS

FADIAL	VERTICAL
.1197E-03	.1666E-01
STRESSES	
FADIAL	VERTICAL
-.5483E+01	-.2868E+01
STRIANS	
PADIAL	VERTICAL
.4550E-05	-.2676E-04
TANGENTIAL	TANG.
.1197E-04	0.
TANGENTIAL	RAD./TANG.
.922E-03	0.
TANGENTIAL	RAD./VERT.
0.	-.1150E+01
TANGENTIAL	TANG./VERT.
0.	0.

TOTAL STRESS	XX	YY	ZZ	XY	UX	UY	LZ
.922E-03	-.548E+00	-.287E+01	-.115E+01	0.	0.	0.	0.
TOTAL STRAIN	.455E-05	-.268E-04	-.155E-04	0.	0.	0.	0.
TOTAL DISPLACEMENT							

FRINCIPAL VALUES AND DIRECTIONS OF TOTAL STRESSES AND STRAINS

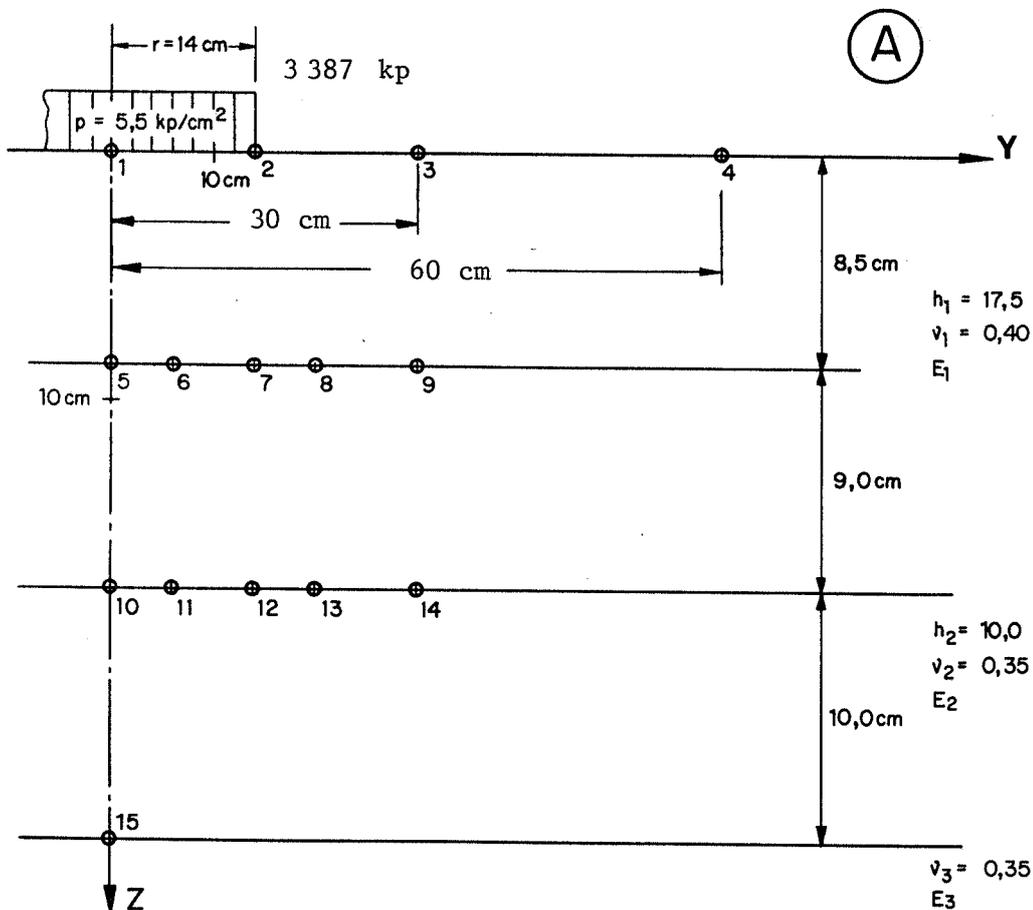
MAXIMUM	NORMAL	SHEAR	COMPONENT	COMPONENT	COMPONENT
.922E-03	STRESS	STRAIN	X	Y	Z
-.747E-01	.120E-04	.167E+01	1.000	0.000	0.000
-.334E+01	.199E-04	.163E+01	0.000	.925	-.381
-.167E+01	-.332E-04	.378E+01	0.000	.381	.925
MINIMUM			.707	-.269	-.654
-.171E+01			.707	.269	.654
-.369E-01			0.000	.385	-.923
			.707	-.654	.269
			.707	.654	-.269

STRAIN ENERGY	.5498E-04
STRAIN ENERGY OF DISTORTION	.4915E-04

Abbildung 48: Datenausgabe

fern zu berechnen. Deshalb wurde von uns ein Zusatzprogramm geschrieben, das die Eingabe einer ganzen Serie von Materialkennziffern erleichtert. Im vorliegenden Fall wurden die auf Abbildung 49, 50 und 51 dargestellten Systeme entsprechend den Messstellen (A) (B) und (C) und mit der angegebenen Serie von Materialkennziffern gerechnet. Von der gesamten Datenausgabe wurden zu Vergleichszwecken nur die Werte für den "vertikalen Druck  $\sigma_{zz}$ " und die "vertikale Verschiebung  $v_{zz}$ " berücksichtigt und in den Abbildungen 52 bis 57 graphisch dargestellt.

### SCHEMA FÜR BERECHNUNGEN MIT BISAR



13 gerechnete Systeme			
$E$ [kp/cm <sup>2</sup> ]	$E_3 = 400$	$E_3 = 800$	$E_3 = 1600$
$E_1 = 1000$ $E_2 = 500$		①	
$E_1 = E_2$ $= 1000$	⑩	②	⑪
$E_1 = 1000$ $E_2 = 2000$		③	
$E_1 = E_2$ $= 3000$		④	
$E_1 = E_2$ $= 10000$		⑤	
$E_1 = 30000$ $E_2 = 15000$		⑥	
$E_1 = E_2$ $= 30000$	⑫	⑦	⑬
$E_1 = 30000$ $E_2 = 60000$		⑧	
$E_1 = E_2$ $E_2 = 100000$		⑨	

Abbildung 49: Schema für Berechnungen mit BISAR. Messstelle A, Messstelle (A), Fahrspur N3, Mumpf

# SCHEMA FÜR BERECHNUNGEN MIT BISAR

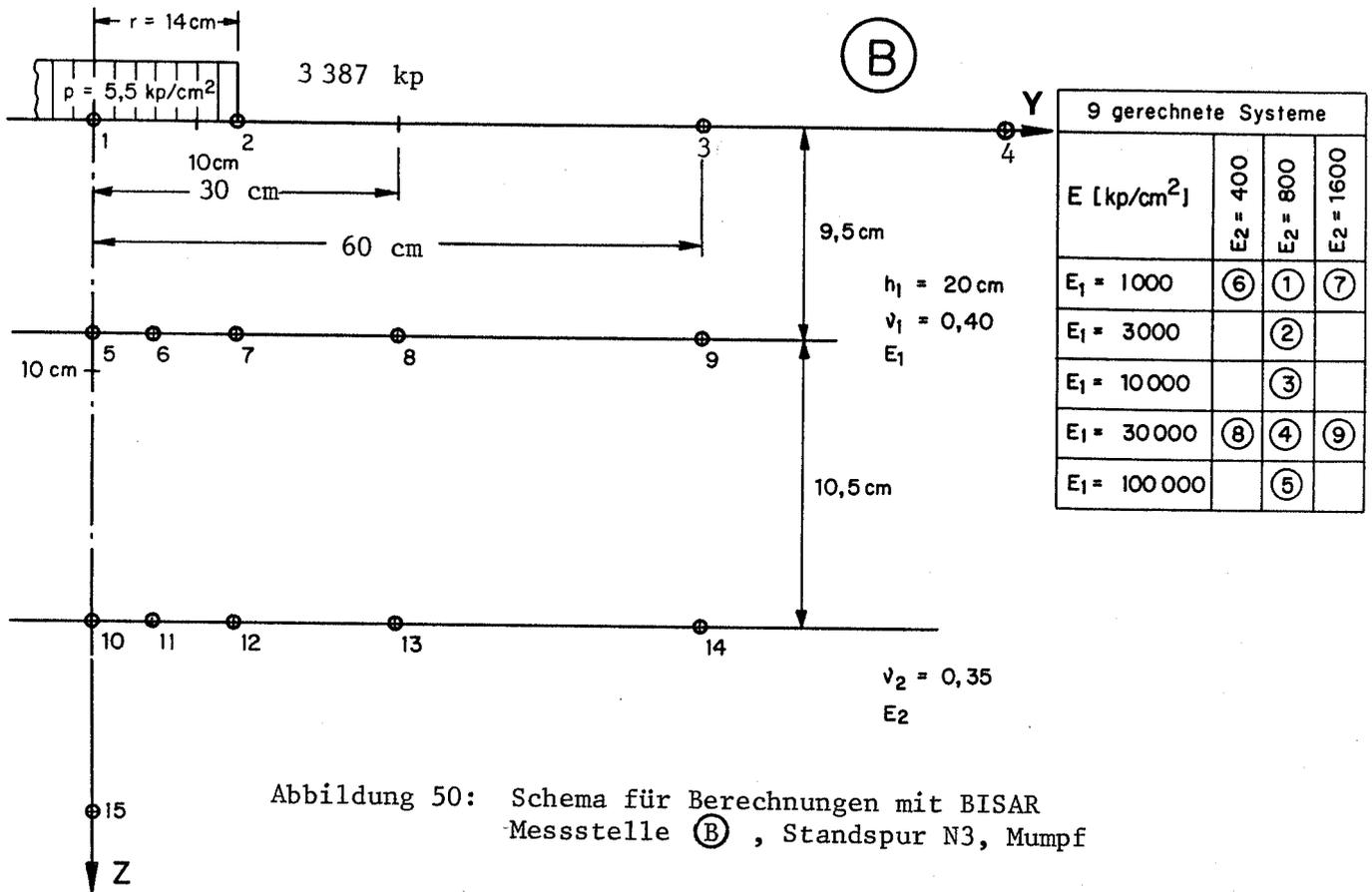


Abbildung 50: Schema für Berechnungen mit BISAR  
 Messstelle ②, Standspur N3, Mumpf

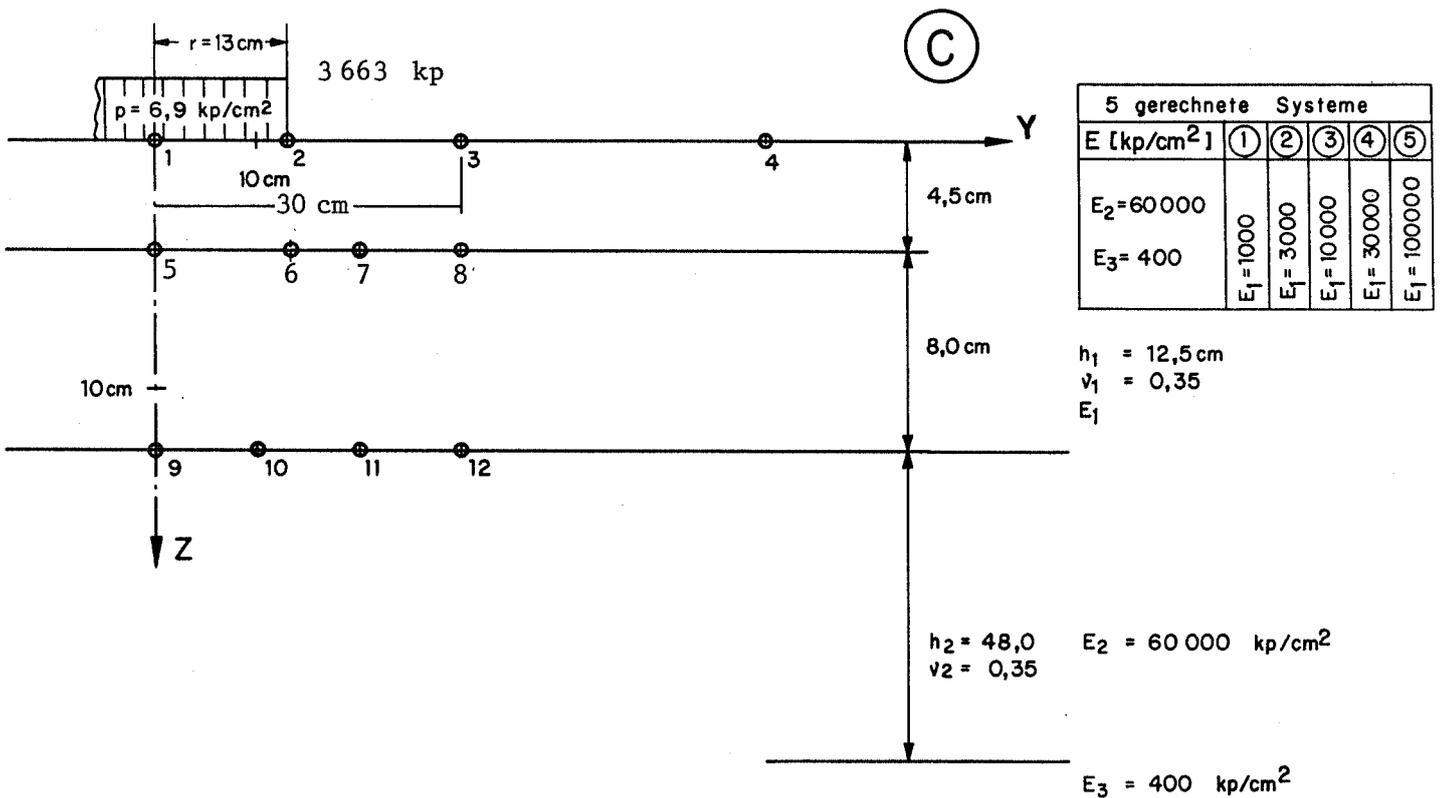


Abbildung 51: Schema für Berechnungen mit BISAR  
 Messstelle ③, N1 bei Wallisellen, Kt. ZH

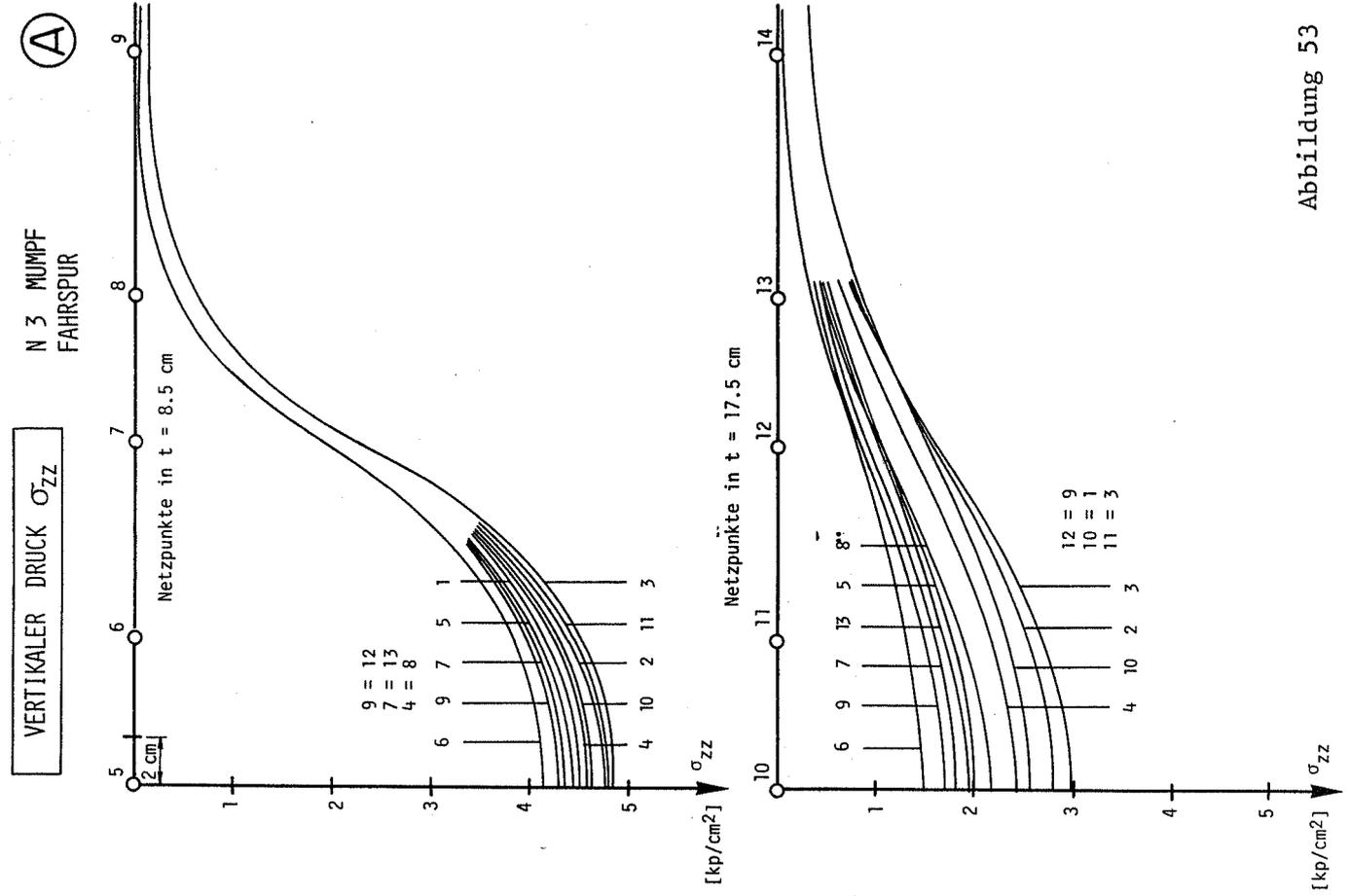


Abbildung 53

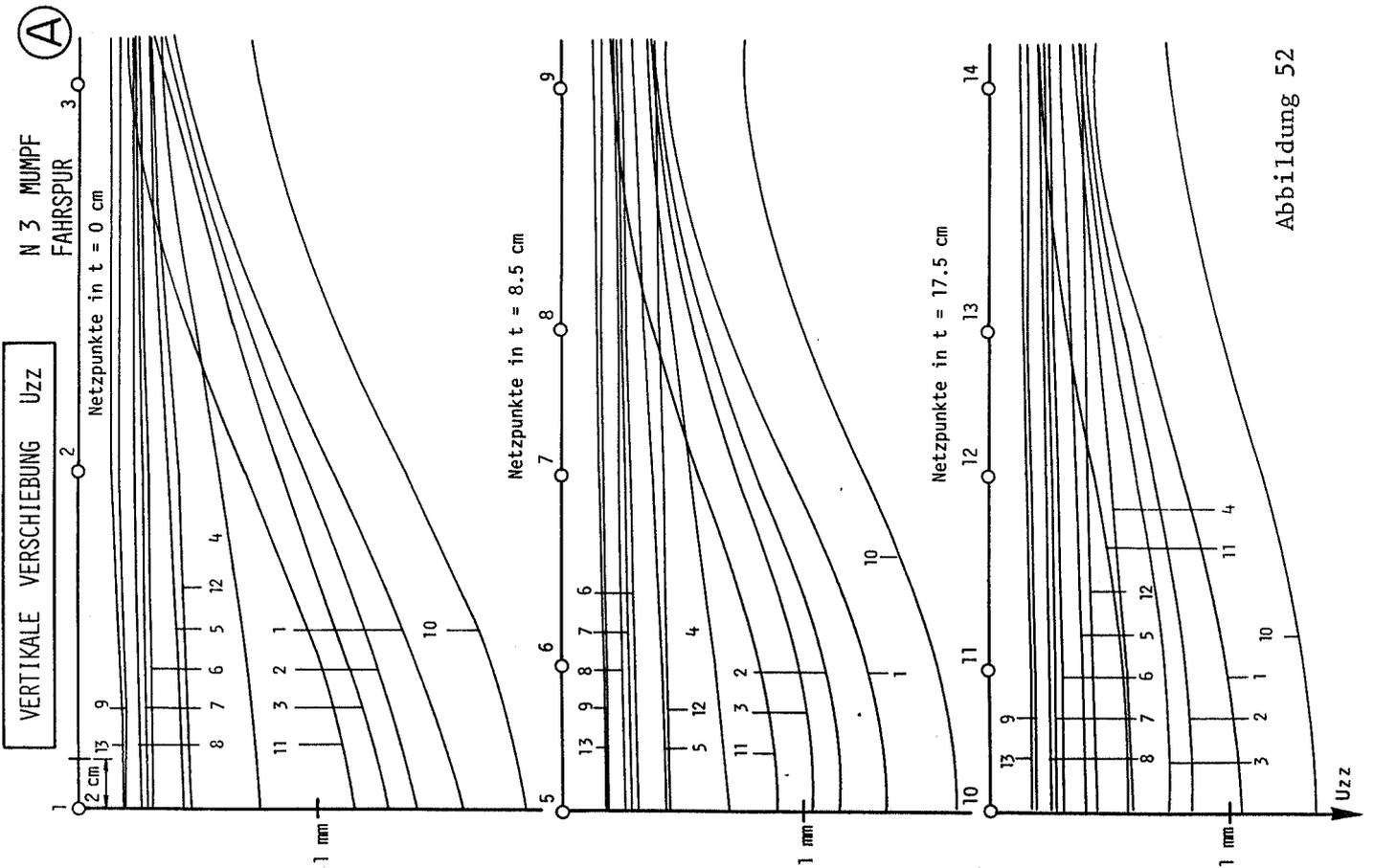


Abbildung 52

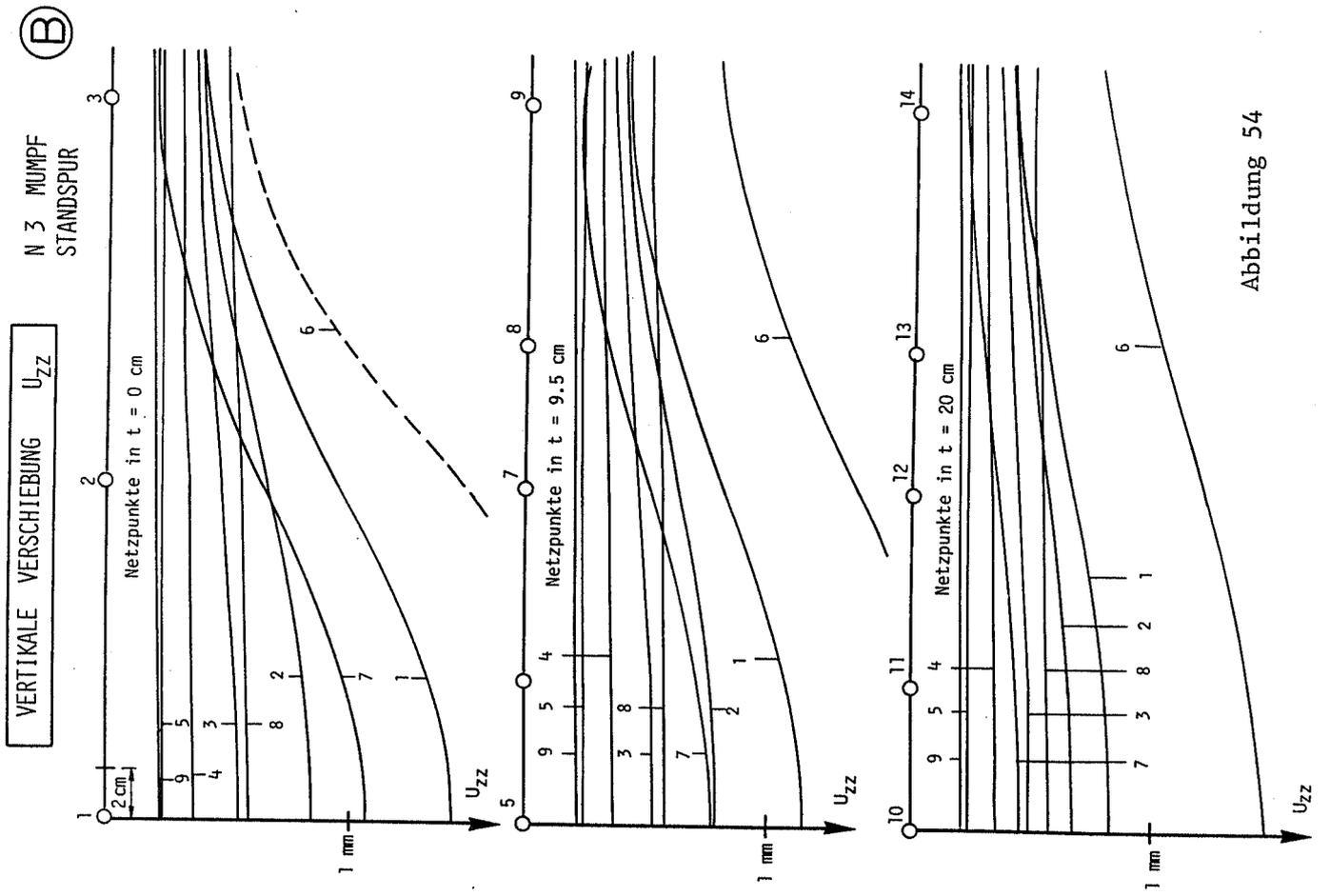


Abbildung 54

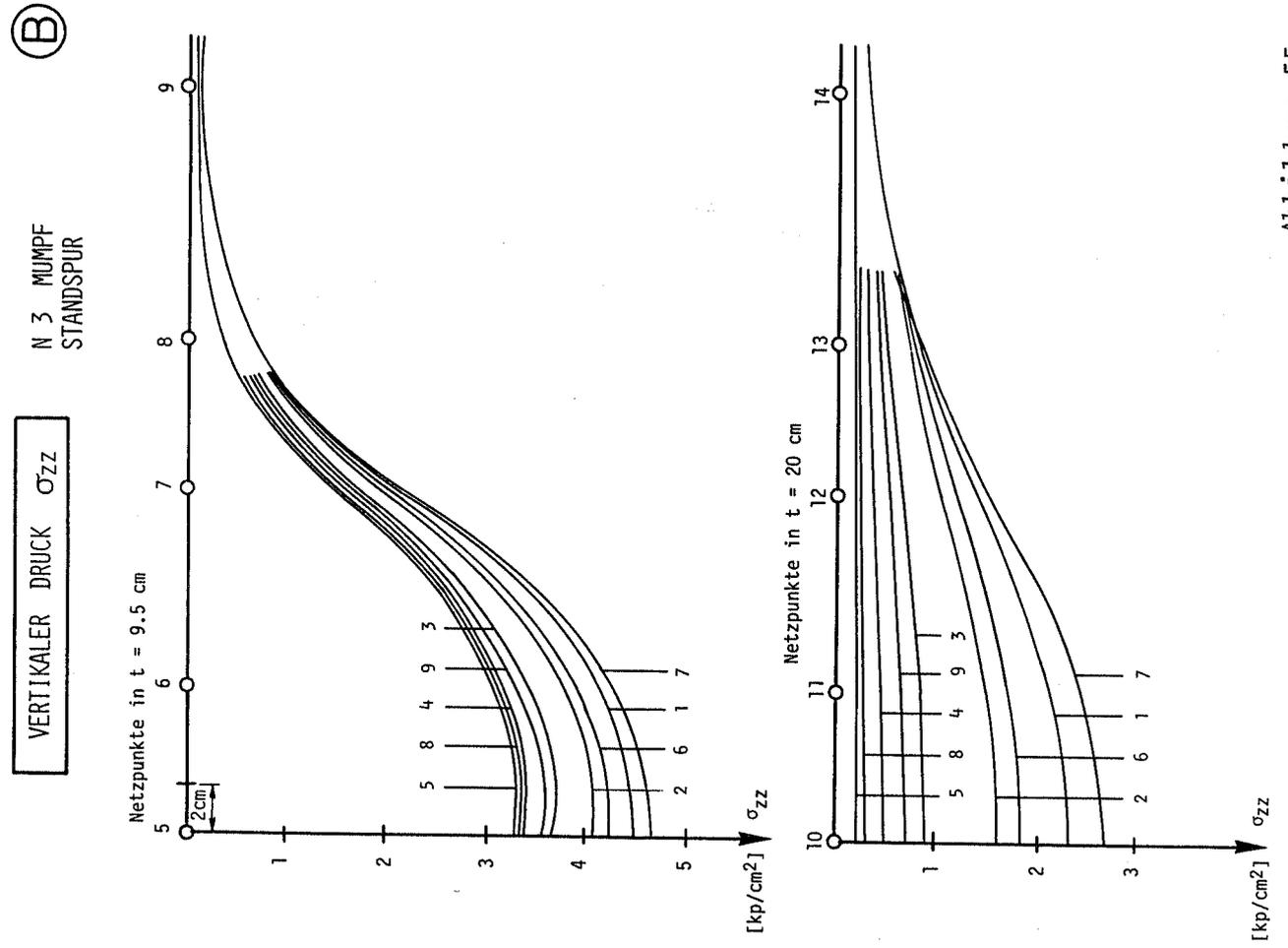


Abbildung 55

VERTIKALER DRUCK  $\sigma_{zz}$

N 1 ZÜRICH

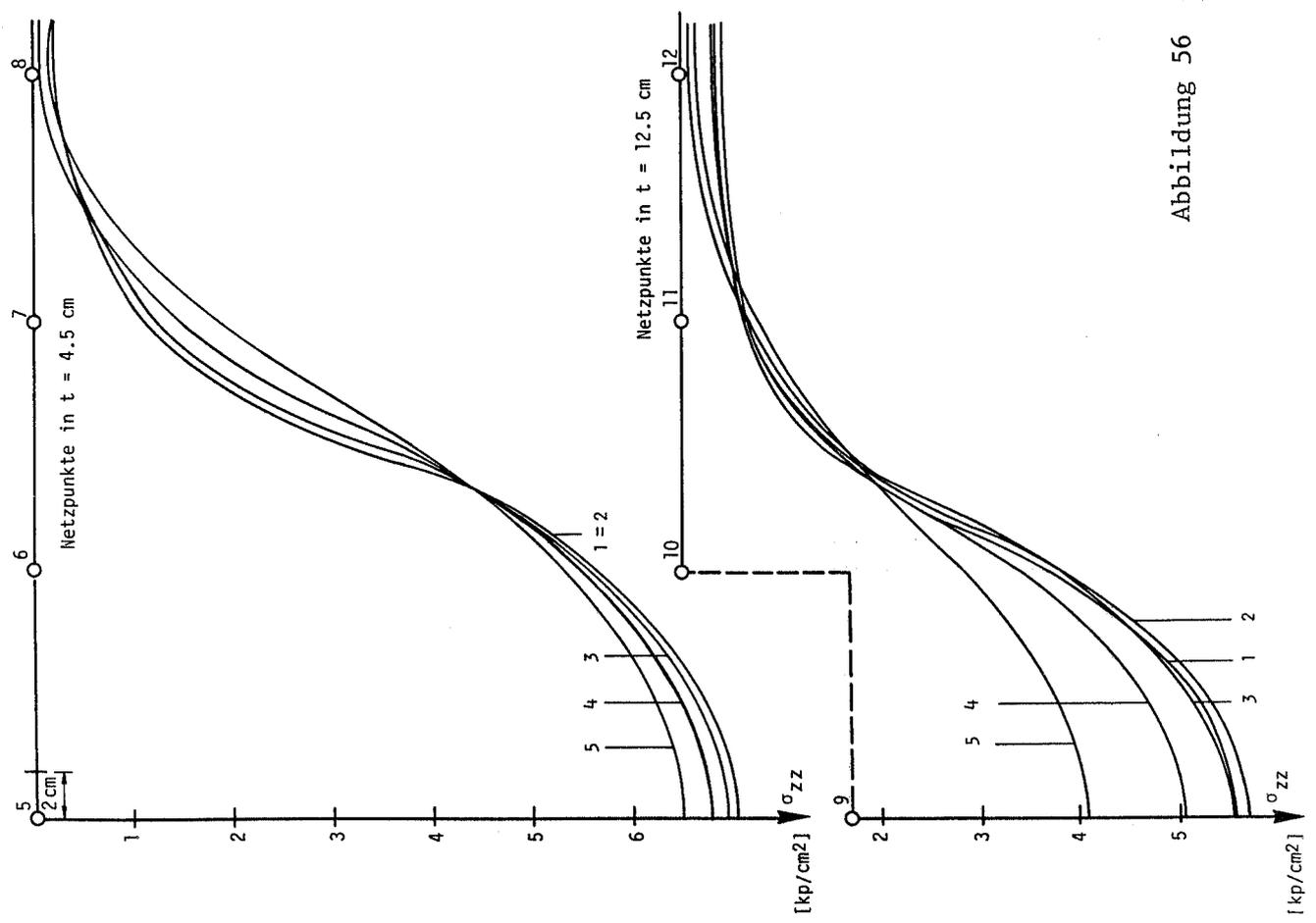


Abbildung 56

VERTIKALE VERSCHIEBUNG  $U_{zz}$

N 1 ZÜRICH

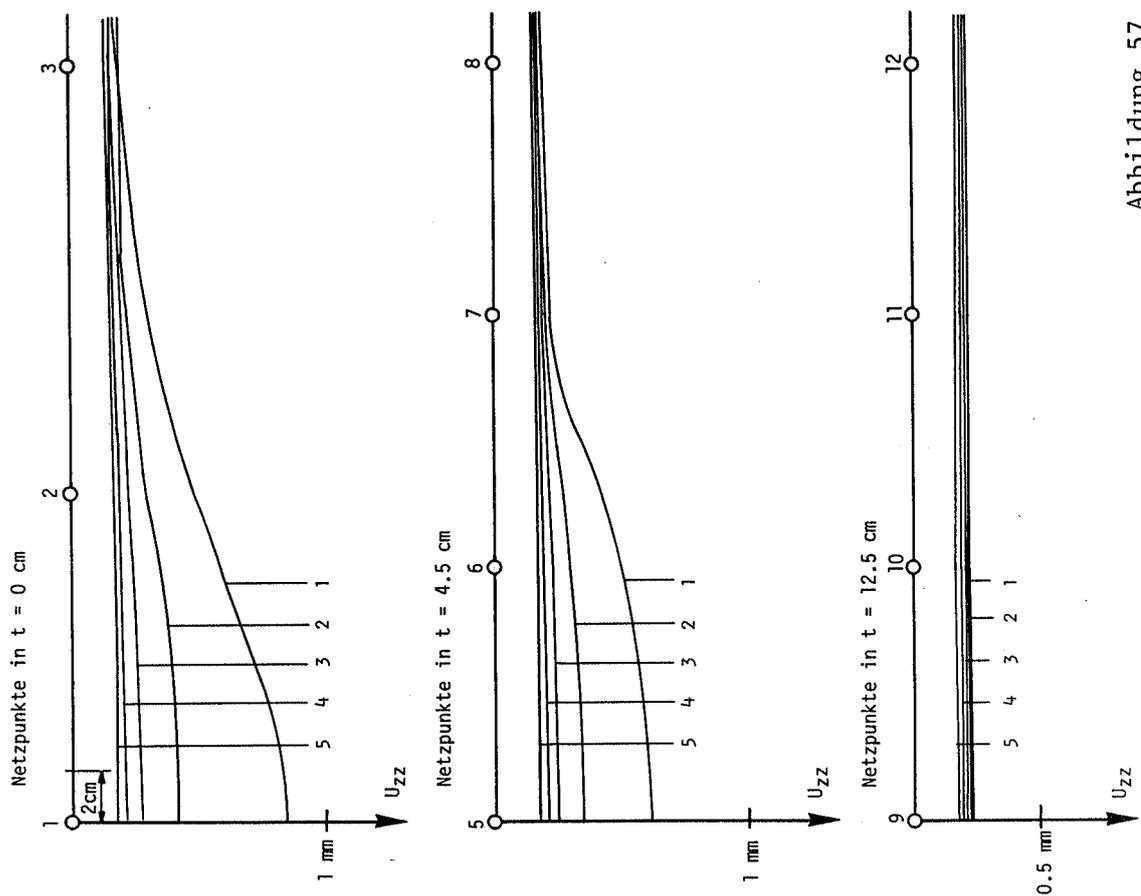


Abbildung 57

## 8. VERGLEICH VON GEMESSENEN UND GERECHNETEN WERTEN

Der Vergleich von gemessenen und gerechneten Verformungskennwerten bzw. Druckspannungen kann im Rahmen dieser Arbeit nur mit grösstem Vorbehalt durchgeführt werden. Man bedenke, dass zur groben Beschreibung der mechanischen Eigenschaften eines Strassenkörpers etwa 10 bis 20 Kenngrössen erforderlich sind. Selbstverständlich können diese Kenngrössen so gewählt werden, dass gemessene und gerechnete Werte sehr gut übereinstimmen. Dies beweist aber weder die Zuverlässigkeit der Messergebnisse, noch die Qualität des Rechensystems oder die Richtigkeit der eingegebenen Kenngrössen. Bei der Vielzahl der Variablen können sich selbst grosse Fehler durchaus kompensieren. In unserem Fall erlaubt das vorliegende Datenmaterial keinen exakten Vergleich sondern lediglich eine Gegenüberstellung der Grössenordnungen.

### 8.1. Krümmungsradien

Die Verformung unter dem rollenden Rad wird durch den Krümmungsradius der Verformungsmulde im Lastzentrum gekennzeichnet. Dieser Wert konnte einerseits durch weitere Auswertung der Beschleunigungsmessung ermittelt werden, andererseits wurde aus den mittels BISAR berechneten Verschiebungen ebenfalls der Krümmungsradius berechnet (siehe Abbildung 58). So war es möglich, gemessene und gerechnete Werte miteinander zu vergleichen. Die graphische Darstellung für die 3 Messstellen (A) (B) und (C) erfolgt auf den Abbildungen 59, 60 und 61.

(A)

Gerechnete Krümmungsradien R

$$R = \frac{x^2}{2 \cdot \Delta z} \quad x = 30 \text{ cm (Pkt.5...Pkt.9)}$$

SYSTEM	oben: t=8.5 cm		unten: t=18.0cm	
	$\Delta z$ [cm]	R [m]	$\Delta z$ [cm]	R [m]
1	0.0908	50	0.0610	75
2	0.0751	60	0.0459	100
3	0.0637	70	0.0356	125
4	0.0320	140	0.0229	200
5	0.0125	360	0.0099	455
6	0.0063	710	0.0054	830
7	0.0051	880	0.0043	1070
8	0.0041	1100	0.0033	1360
9	0.0018	2500	0.0016	2810
10	0.087	52	0.060	75
11	0.066	68	0.036	125
12	0.0057	790	0.0049	920
13	0.0045	1000	0.0037	1220

(B)

Gerechnete Krümmungsradien R

$$R = \frac{x^2}{2 \cdot \Delta z} \quad x = 30 \text{ cm (Pkt.10...Pkt.13)}$$

SYSTEM	oben: t=9.4 cm		unten: t=20.0 cm	
	$\Delta z$ [cm]	R [m]	$\Delta z$ [cm]	R [m]
1	0.0539	83	0.0272	165
2	0.0260	173	0.0173	260
3	0.0111	405	0.0084	540
4	0.0048	937	0.0038	1180
5	0.0017	2600	0.0015	3220
6	0.068	66	0.042	110
7	0.0437	103	0.0164	270
8	0.0054	830	0.0044	1020
9	0.0041	1100	0.0032	1410

(C)

Gerechnete Krümmungsradien R

$$R = \frac{x^2}{2 \cdot \Delta z} \quad x = 30 \text{ cm (Pkt.9...Pkt.12)}$$

SYSTEM	oben: t=9.5 cm		unten: t=15.0cm	
	$\Delta z$ [cm]	R [m]	$\Delta z$ [cm]	R [m]
1	0.0425	106	0.0019	2300
2	0.0152	296	0.0017	2650
3	0.0057	789	0.0016	2810
4	0.0028	1610	0.0015	3000
5	0.0015	3000	0.0012	3400

Berechnung der Krümmungsradien

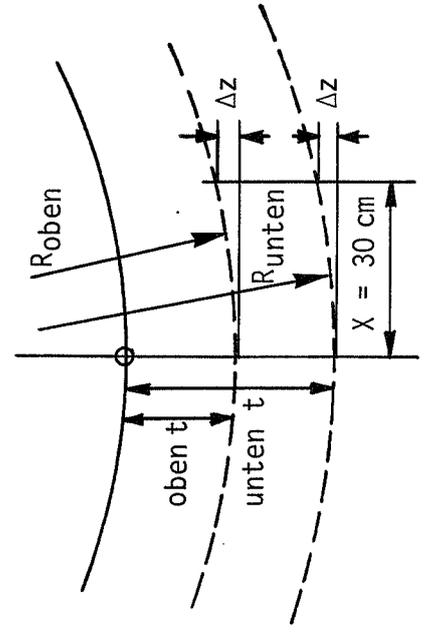


Abbildung 58:

Berechnung der Krümmungsradien R aus den Verschiebungen  $\Delta z$ . Die Verschiebungen stammen aus den Rechnungen mit dem BISAR-Programm

(A)

N 3 MUMPF  
FAHRSPUR

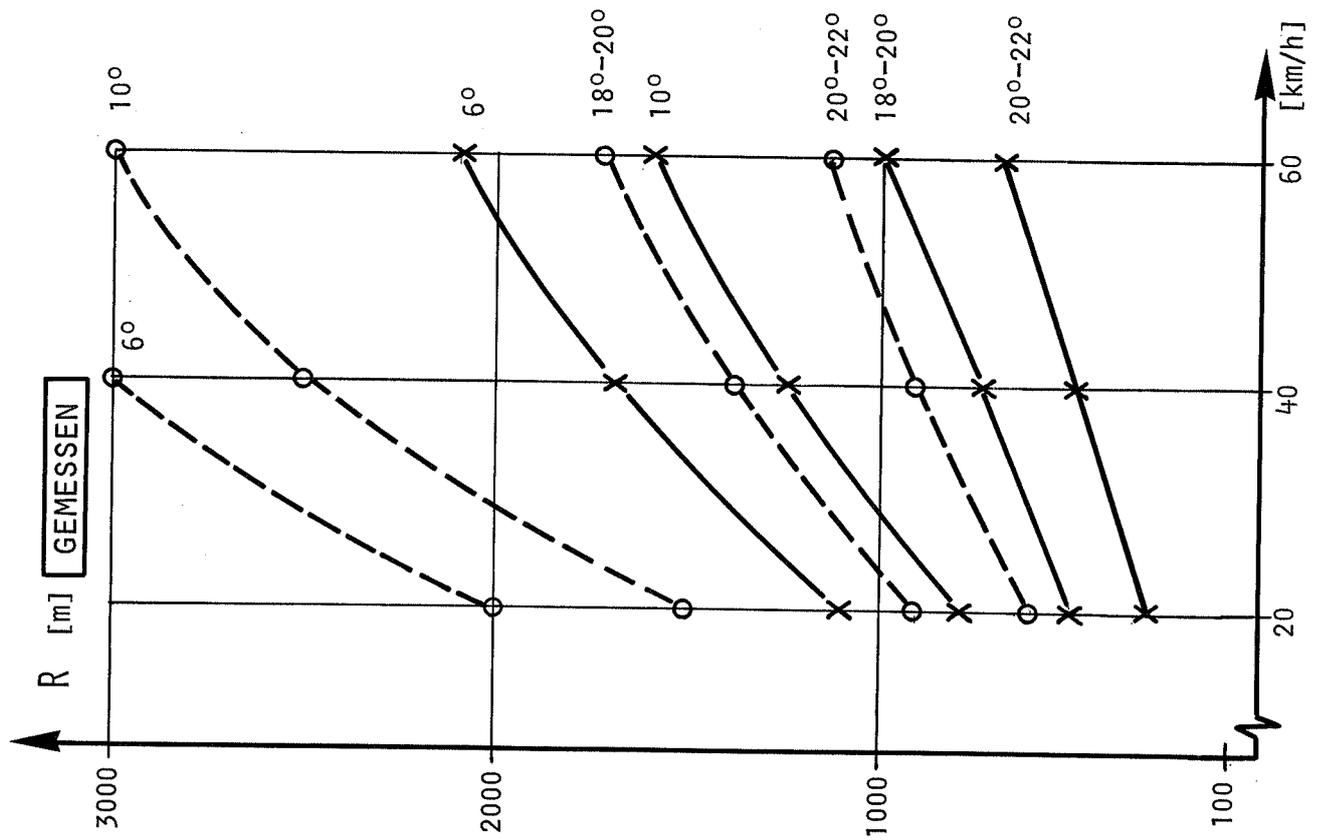
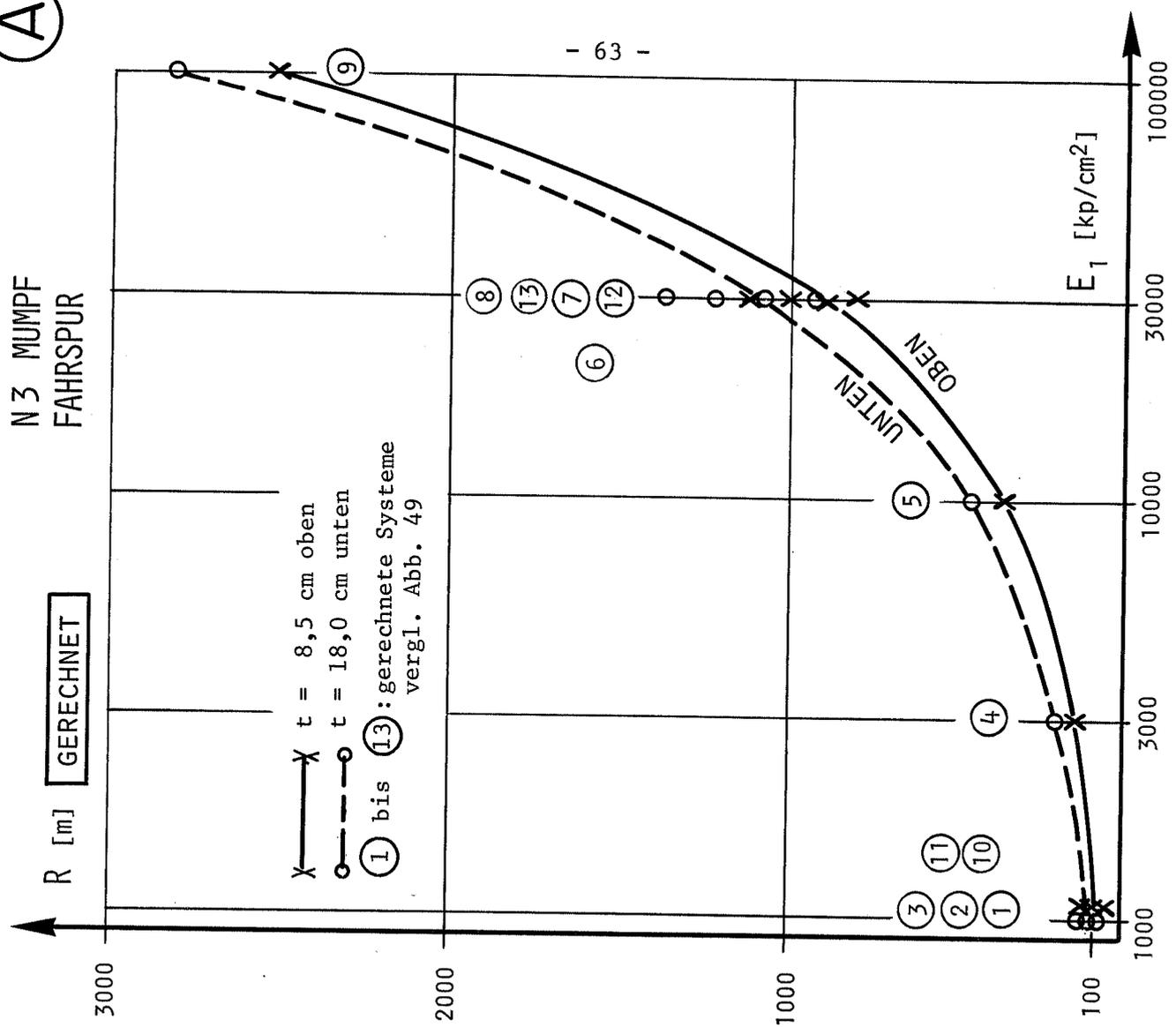


Abbildung 59: Vergleich der Krümmungsradien; gemessene und gerechnete Werte; Messstelle (A)

(B)

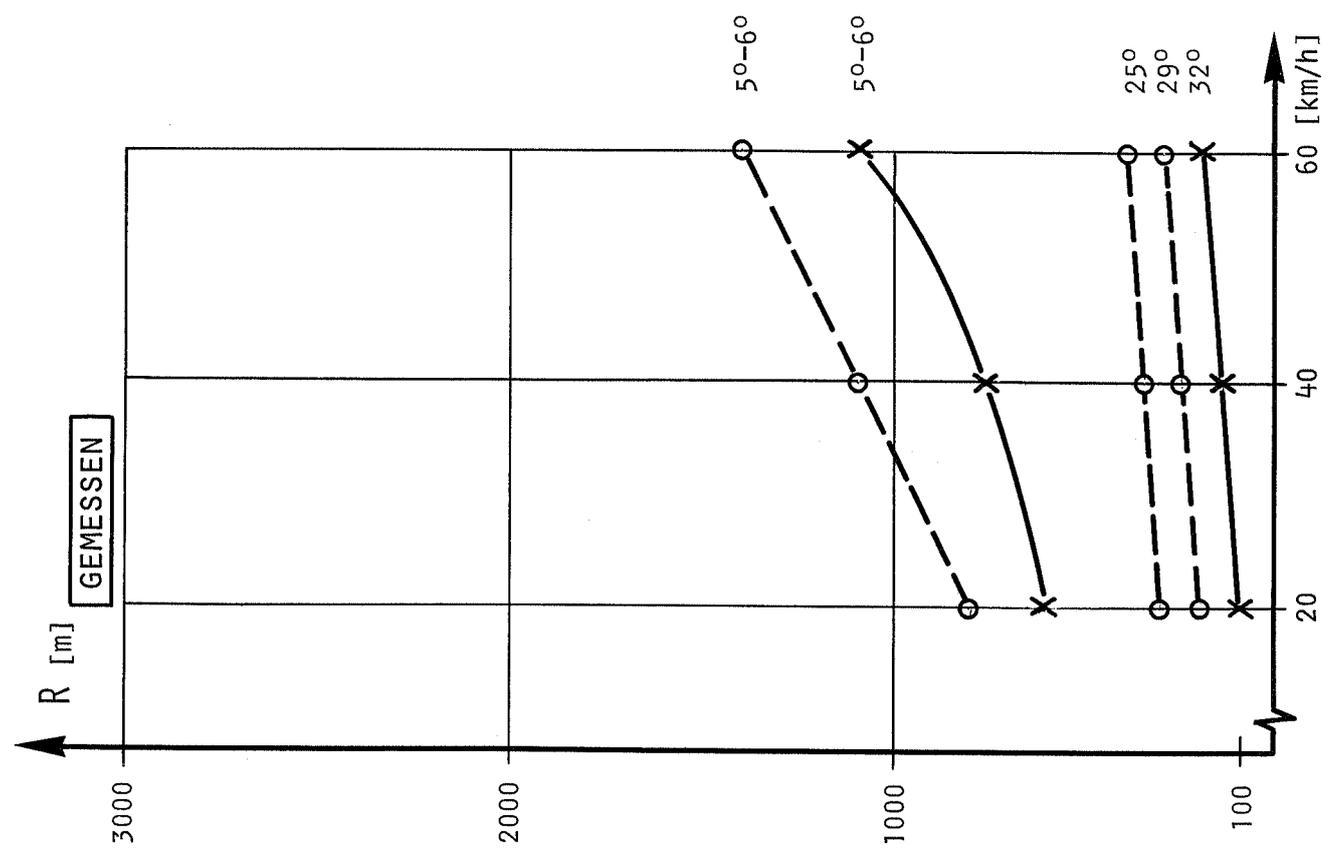
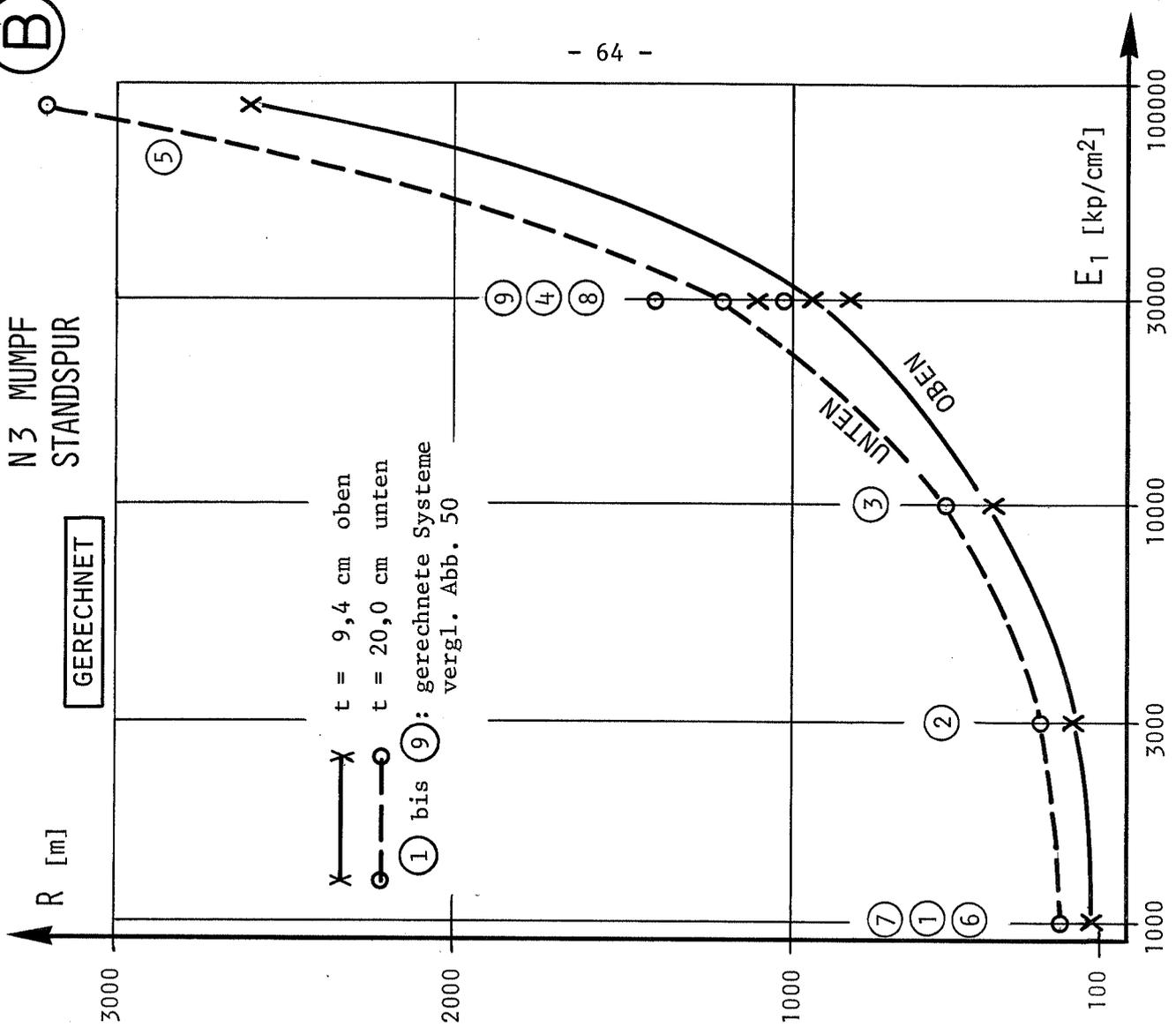


Abbildung 60: Vergleich der Krümmungsradien; gemessene und gerechnete Werte; Messstelle (B)

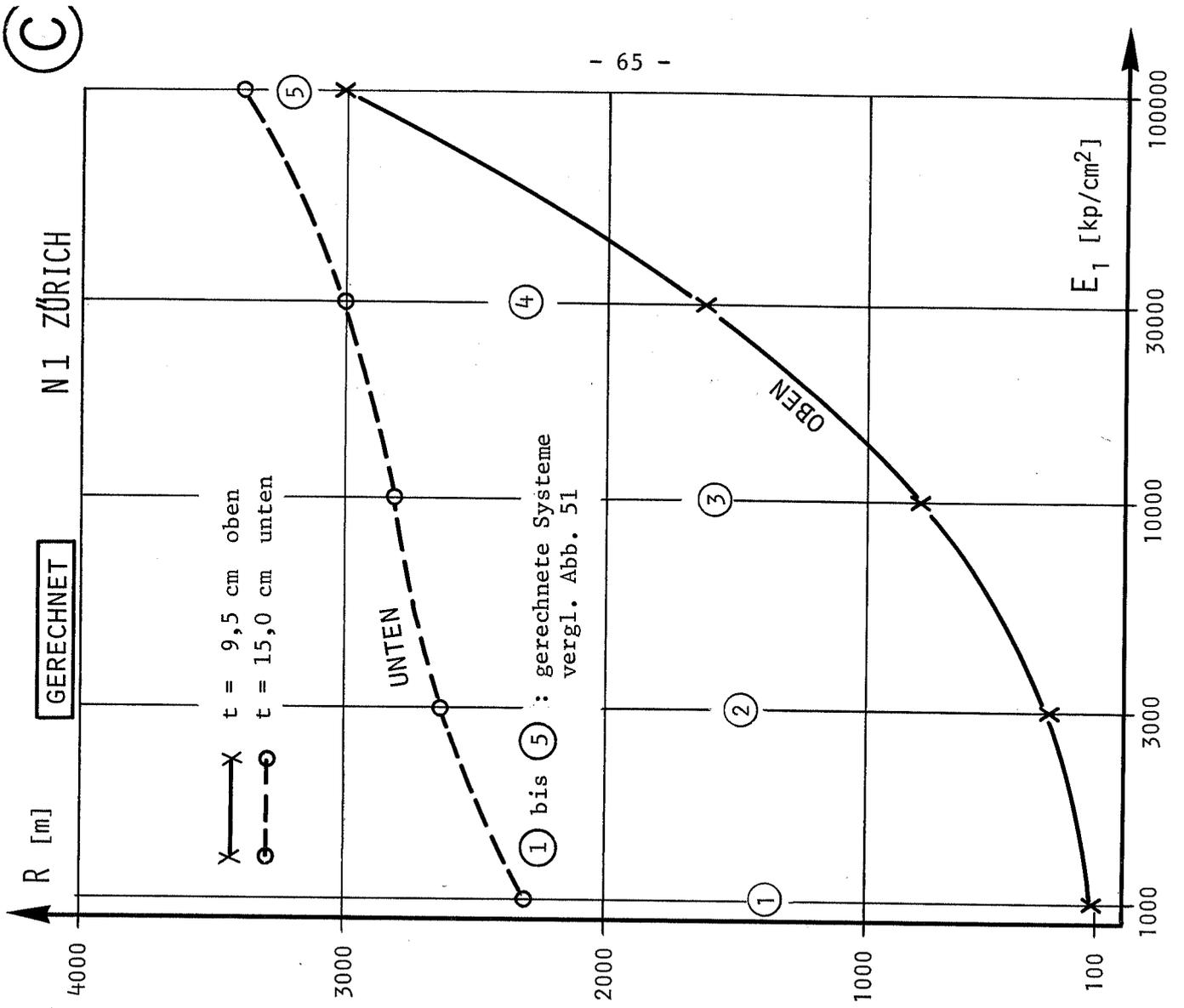
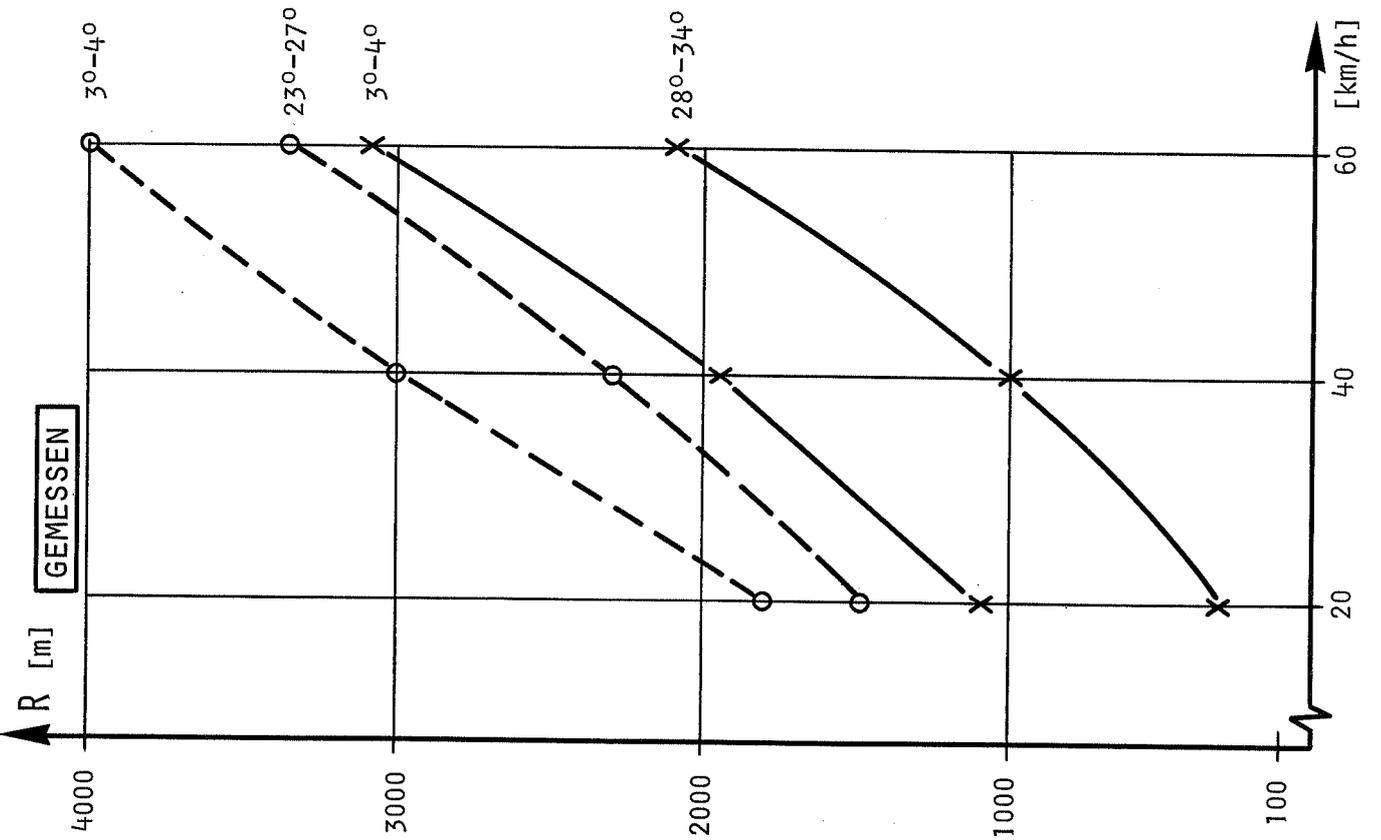


Abbildung 61: Vergleich der Krümmungsradien; gemessene und gerechnete Werte; Messstelle C

MESSSTELLE (A) :

Wird von einer Fahrgeschwindigkeit in der Grössenordnung von 60 km/h ausgegangen, so können Temperaturbereiche und Systeme wie folgt zugeordnet werden:

Temperaturbereich	System	E-Moduli [kp/cm <sup>2</sup> ]
0° - 10°	(9)	E <sub>1</sub> = E <sub>2</sub> = 100 000 E <sub>3</sub> = 800
10° - 20°	(6) (7) (8) (12) (13)	E <sub>1</sub> = 30 000 E <sub>2</sub> = 15 000 ... 60 000 E <sub>3</sub> = 400 ... 1 600
20° - 30°	(5)	E <sub>1</sub> = E <sub>2</sub> = 10 000 E <sub>3</sub> = 800

MESSSTELLE (B) :

Für eine Fahrgeschwindigkeit in der Grössenordnung von 60 km/h gilt die folgende Zuordnung:

Temperaturbereich	System	E-Moduli [kp/cm <sup>2</sup> ]
0° - 10°	(4) (9) (8)	E <sub>1</sub> = 30 000 E <sub>2</sub> = 400 ... 1 600
10° - 20°	(3)	E <sub>1</sub> = 10 000 E <sub>2</sub> = 800
20° - 30°	zwischen (2) ... (3)	E <sub>1</sub> = 3 000 ... 10 000 E <sub>2</sub> = 800
> 30°	zwischen (1) ... (2)	E <sub>1</sub> = 1 000 ... 3 000 E <sub>2</sub> = 800

MESSSTELLE (C) :

Für eine Fahrgeschwindigkeit in der Grössenordnung von 60 km/h gilt die folgende Zuordnung:

Temperaturbereich	System	E-Moduli [kp/cm <sup>2</sup> ]
0° - 10°	(5) und noch steifer	E <sub>1</sub> = 100 000 E <sub>2</sub> = 60 000 E <sub>3</sub> = 400
10° - 20°	zwischen (4)...(5)	E <sub>4</sub> = 30 000 ... 100 000 E <sub>2</sub> = 60 000 E <sub>3</sub> = 400
20° - 30°	(4)	E <sub>1</sub> = 30 000 E <sub>2</sub> = 60 000 E <sub>3</sub> = 400

8.2. Druckzustand

Aus den bereits dargelegten Gründen ist es nicht gelungen aus den Druckmessungen absolute Messwerte zu gewinnen. Der Vergleich von Messung und Rechnung erfolgte deshalb an Hand der Verhältniswerte  $\sigma_{ZO} : \sigma_{ZU}$ .  $\sigma_{ZO}$  bedeutet den mit der oberen Druckmessdose gemessenen maximalen Wert in vertikaler Richtung und  $\sigma_{ZU}$  den entsprechenden Messwert der unteren Druckmessdose. Der Vergleich von Werten aus der Messung mit Werten aus der Rechnung ist auf Abbildung 62 graphisch dargestellt. Aus dieser Abbildung ist ersichtlich, dass der Verhältniswert  $\sigma_{ZO}/\sigma_{ZU}$  von der Fahrgeschwindigkeit nur wenig beeinflusst wird. Hingegen ist eine deutliche Abhängigkeit vom strukturellen Aufbau und von der Temperatur festzustellen. Dies gilt sowohl für das Verhältnis der Messwerte, wie auch für das Verhältnis der gerechneten Werte. Auf der Messstelle (A) wurden bei einer Temperatur von 7° relativ grosse  $\sigma_{ZO}/\sigma_{ZU}$  - Werte gemessen. In diesem Fall lag eine "relativ steife" obere Schicht auf "relativ weicher" Unterlage, so dass die Druckspannungen mit zunehmender Tiefe "relativ stark" abnahmen.

Durch die berechneten Werte wird dies insofern bestätigt, als auch hier  $\sigma_{ZO}/\sigma_{ZU}$  mit zunehmendem Verhältnis  $E_1/E_2$  grösser wird.

Auch im Fall der Messstelle (C) wird mit abnehmender Temperatur der gemessene  $\sigma_{z0}/\sigma_{zu}$  - Wert grösser. Der  $\sigma_{z0}/\sigma_{zu}$  - Wert bleibt aber im Bereich von ca. 2 bis 4. Infolge der zementstabilisierten Tragschicht tritt der Fall "steife" Schicht auf "weicher" Unterlage nicht auf. Aus dem Vergleich auf Abbildung 62 ist ersichtlich, dass die gerechneten Verhältniswerte  $\sigma_{z0}/\sigma_{zu}$  niedriger liegen als die entsprechenden gemessenen Verhältniswerte. Dies trifft insbesondere für die Messstelle (C) zu. Der für die Zementstabilisierung angenommene Wert von  $E_2 = 60\ 000\ \text{kp/cm}^2$  ist demzufolge etwas zu hoch.

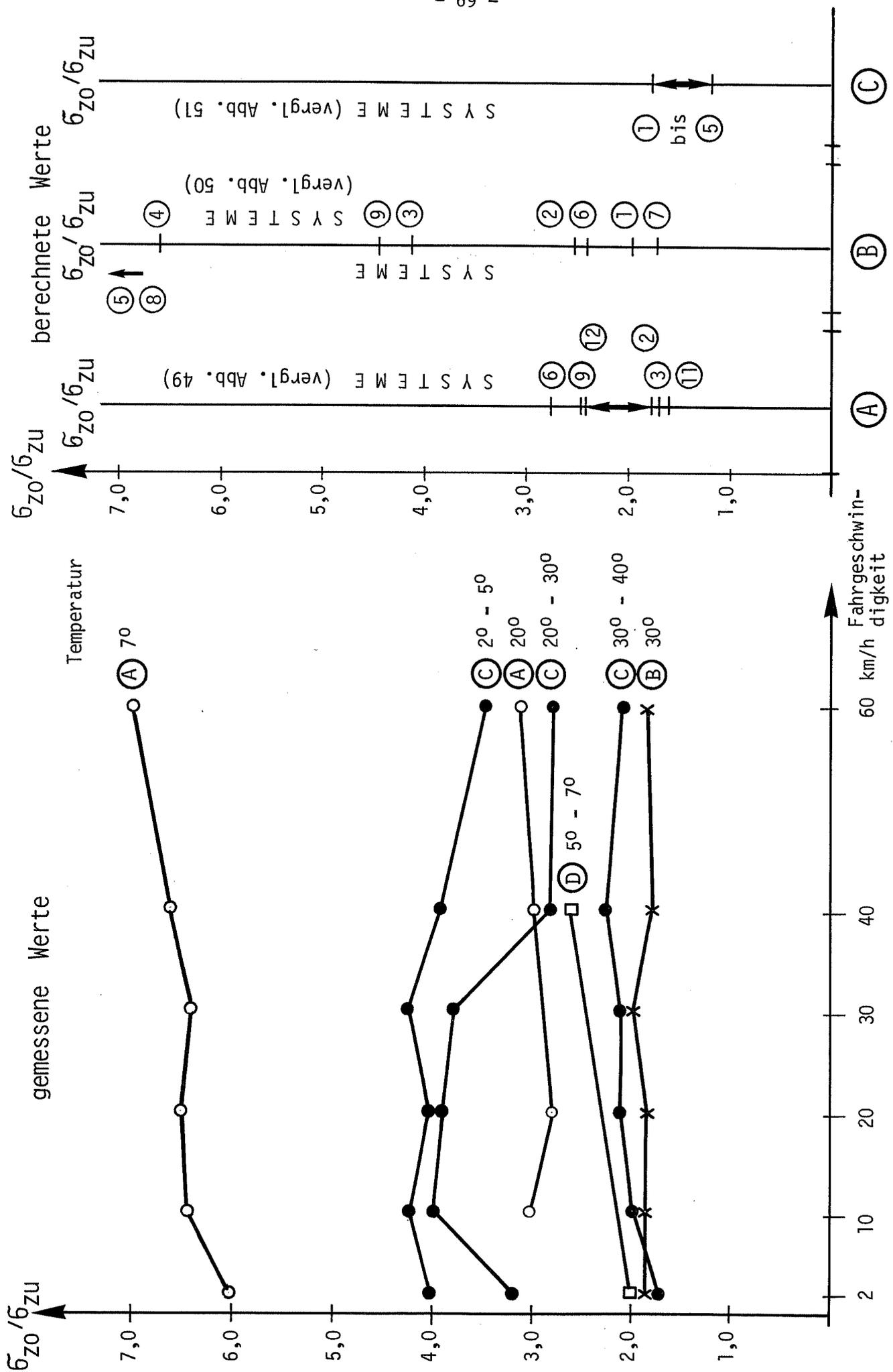


Abbildung 62: Verhältnis der maximalen Drücke in vertikaler Richtung  
 Vergleich gemessener Werte mit gerechneten Werten (BISAR)



## 9. F O L G E R U N G E N

Bei der Durchführung der Forschungsarbeiten sind messtechnische Schwierigkeiten aufgetreten, denen zufolge das Forschungsziel nicht in vollem Umfang erreicht wurde. Der gemessene Druckverlauf bei einer einzelnen Ueberfahrt sowie die aus mehreren Einzelverläufen zusammengesetzte räumliche Druckglocke können als qualitative Information akzeptiert werden. Die Bestimmung der Absolutwerte der im bituminös gebundenen Oberbau unter dynamischer Radlast auftretenden Drücke ist mit den verwendeten konventionellen Druckmessdosen jedoch nicht gelungen. Auch die Korrektur der Messwerte mit Korrekturfaktoren, die den Einfluss der Druckmessdose als "Fremdkörper" berücksichtigen, brachte nicht den gewünschten Erfolg. Die besonderen Schwierigkeiten sind darin begründet, dass bituminös gebundene Schichten ein in starkem Masse temperaturabhängiges, viskoelastisches Verformungsverhalten zeigen. Dabei ist besonders zu berücksichtigen, dass die Temperatur im Strassenoberbau keineswegs konstant ist. Die vertikale Temperaturgradienten kann bis zu  $2^{\circ}\text{C}$  pro cm und die Geschwindigkeit der zeitlichen Temperaturänderung bis zu  $10^{\circ}\text{C}$  pro Stunde betragen. Auch ist die Belastungsgeschwindigkeit eines Elementes im Oberbau bei konstanter Fahrgeschwindigkeit streng gesehen nicht konstant sondern nimmt mit abnehmender Entfernung zur bewegten Radlast zu.

Die Verschiebung eines Punktes des Strassenoberbaues unter einer dynamischen Radlast kann durch Beschleunigungsmessung ermittelt werden. Der grosse Vorteil dieser Messung liegt darin, dass keine stabile Referenz erforderlich ist. Aus der gemessenen Beschleunigung eines Punktes kann durch doppelte Integration des Messsignals die entsprechende Verschiebung ermittelt werden. Zur Zeit ist jedoch die doppelte Integration nur graphisch oder rechnerisch möglich, was mit erheblichem Aufwand verbunden ist. Die Integration im analogen Bereich ist zwar möglich, liefert aber nur im höherfrequenten Bereich (etwa  $> 10$  Hz) gute Ergebnisse. Es ist anzunehmen, dass künftig die Integration auch bei dynamischen Vorgängen mit geringerer Frequenz zufriedenstellende Ergebnisse liefern wird. Damit kann die Beschleunigungsmessung als eine elegante Methode zur Bestimmung der Verformung des Strassenoberbaues unter dynamischer Radlast empfohlen werden.

Infolge Viskoelastizität der bituminös gebundenen Schichten weisen Druckverteilung sowie Verformungsmulde der bituminös gebundenen Schichten in Bewegungsrichtung der Last, grundsätzlich einen unsymmetrischen Verlauf auf.

Dieser wird mit abnehmender Fahrgeschwindigkeit und zunehmender Temperatur immer stärker ausgeprägt. Für Fahrgeschwindigkeiten oberhalb 10 km/h und Temperaturen unterhalb 20°C können die Verhältnisse zufriedenstellend mit dem elastischen Mehrschichtenprogramm beschrieben werden. Jedenfalls können die Materialkenngrößen für das Rechenprogramm immer so gewählt werden, dass gemessene und gerechnete Werte gut übereinstimmen. Dies beweist aber weder die Zuverlässigkeit der Messergebnisse, noch die Qualität des Rechensystems oder die Richtigkeit der eingegebenen Kenngrößen. Besondere Schwierigkeiten bereiten dabei die sich ständig ändernden Temperaturverhältnisse. So ist bei einer Temperaturgradienten von 1°C/cm der obere Teil einer 10 cm dicken bituminösen Schicht um 10°C wärmer als der untere, was Steifigkeitsmoduli zur Folge haben kann, die sich um den Faktor 3 unterscheiden. Die Rechnung mit einem mittleren E-Modul führt dann zu grossen lokalen Fehlern. Aus der starken Temperaturabhängigkeit der Reaktion des bituminösen Strassenoberbaues sind zwei Folgerungen abzuleiten:

- Spannungs- oder Verformungsmessungen (z.B. routinemässige statische oder dynamische Deflektionsmessungen) ohne detaillierte Angaben über die zugehörige Temperaturverteilung sind nur von geringem Aussagewert.
- Für die Optimierung der Eigenschaften der bituminösen Schichten wie auch für die Prognose der Lebensdauer müssen nicht nur Anzahl und Grösse der Achslasten sondern auch die Temperaturen, bei der Uebergänge erfolgen, bekannt sein. Die Zuverlässigkeit einer Prognose über das künftige Verhalten einer Strasse, sei es hinsichtlich Spurrinnenbildung im Sommer oder Rissentstehung im Winter, hängt neben der zu erwartenden Verkehrsbelastung in hohem Masse von der Zuverlässigkeit der Temperaturprognose ab.

Neben der Dimensionierung des Strassenoberbaues im Sinne der Bestimmung der erforderlichen Schichtdicken kommt es insbesondere auf die mechanischen Eigenschaften dieser Schichten an. Die meisten Schadenfälle (unverhältnismässig kurze Lebensdauer) sind auf ungeeignete Materialeigenschaften und nicht auf falsche Dimensionierung zurückzuführen. Damit wird der Akzent von der Dimensionierung zur Materialtechnologie, das heisst zur Optimierung der Materialeigenschaften verschoben. Beim bituminösen Ober-

bau ist die Optimierung in erster Linie von den auftretenden Temperaturen und erst in zweiter Linie vom Verkehr abhängig. Zwischen dem Verformungsverhalten bei hoher und dem Bruchverhalten bei tiefer Gebrauchstemperatur muss ein Kompromiss gefunden werden. Es ist bekannt, dass Bergstrassen bedingt durch die Höhenlage, im Winter nicht nur tiefere Temperaturen sondern im Sommer auch höhere Temperaturen als tiefer liegende Talstrassen aufweisen. Dies wird in einem gewissen Masse auch bei der Wahl der Bindemittelsorte empirisch berücksichtigt. Leider liegen über die Temperaturverteilung im bituminösen Oberbau nur sehr wenige langfristige statische Daten vor. Es werden deshalb langfristige Temperaturmessungen vorgeschlagen um die Kenntnisse über die statische Häufigkeit maximaler und minimaler Temperaturen im Strassenoberbau zu verbessern.



L I T E R A T U R

- [ 1 ] HUSCHEK, S.: Befahrbarkeitsmessungen auf Strassen nach der Winkel-  
messmethode - Neue Untersuchungen, Mitteilung Nr. 28 des ISETH  
(1974), Forschungsauftrag Nr. 15/72
- [ 2 ] HUSCHEK, S. und BACHNER, G.: Ebenheitsmessungen auf Strassen,  
Mitteilung Nr. 38 des ISETH, Schlussbericht zu FA 15/72, Dezember  
1977
- [ 3 ] MITSCHKE, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, Springer Verlag (1972)
- [ 4 ] MITSCHKE, M.: Vertikale Strassenbeanspruchung, Zusammenhänge zwi-  
schen Strasse, Kraftfahrzeug, Fahrgeschwindigkeit; Strasse und  
Autobahn Heft 4 (1976)
- [ 5 ] EISENMANN, J.: Bewertung der Strassenbeanspruchung, Strasse und  
Autobahn, Heft 3 (1979)
- [ 6 ] MITSCHKE, M.: Strassenschonende Auslegung schwerer Nutzfahrzeuge,  
Strasse und Autobahn, Heft 3 (1979)
- [ 7 ] Mehrere Autoren: Fahrzeug und Fahrbahn, Rückblick und Ausblick  
anlässlich des 40-jährigen Bestehens der Arbeitsgruppe "Fahrzeug  
und Fahrbahn", Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen, Köln  
(1976)
- [ 8 ] EISENMANN, J.: Dynamische Radlastschwankungen - Strassenbean-  
spruchung, Strasse und Autobahn, Heft 4 (1975)
- [ 9 ] BRAUN, H.: Untersuchungen von Fahrbahnunebenheiten und Anwendung  
der Ergebnisse, Dissertation TU Braunschweig (1969)
- [ 10 ] KELLER, H.: Druckmessungen in Böden verschiedener Lagerungsdichte,  
Baumaschine und Bautechnik, Heft 9, September (1967)
- [ 11 ] KELLER, H.: Eine Vergleichsuntersuchung verschiedener Bodendruck-  
messdosen für dynamische Druckmessungen, Baumaschine und Bautech-  
nik, Heft 4 (1972)
- [ 12 ] KELLER, H.: Drücke und Bewegungen in Bodenschüttungen bei Vibra-  
tionsverdichtungen, Strassen- und Tiefbau, Hefte 9, 11 und 12  
(1973)
- [ 13 ] KELLER, H.: Vergleiche verschiedener Strassenbefestigungen bezüg-  
lich ihrer Druckfortpflanzung der Verkehrslasten, Proceedings of  
3. Road Conference, Budapest (1973)

- [ 14 ] BEHR, H. und KELLER, H.: Die Anlage einer Versuchsstrecke für Asphaltoberbau bei Böblingen, Bitumen 7, (1962)
- [ 15 ] HUSCHEK, S.: Bericht über die Messungen der dynamischen Verformung unter einem rollenden Lw-Rad, unveröffentlicht, März 1972
- [ 16 ] BAUM, G.; BEHR, H.; BUSECK, H.: Die Reaktion von Strassen bei zeitabhängiger Belastung, Heft 4, Wissenschaftliche Berichte der Bundesanstalt für Strassenbau (1965)
- [ 17 ] PEUTZ, M.G.F.; VAN KEMPTEN; JONES, A.: Layered Systems under Normal Surface Loads, HRR No. 228/1968
- [ 18 ] DE JONG, D.L.; PEUTZ, M.G.F.; KORSWAGEN, A.R.: Computer Program BISAR. Layered Systems under Normal and Tangential Surface Loads, Koninklijke/Shell, Laboratorium Amsterdam, External Report AMSR 0006,73 (1973)

A N H A N G    I

Beschleunigungen

Gemessene maximale Beschleunigung in Abhängigkeit  
des seitlichen Abstandes von der Spurachse  
des Vorderrades

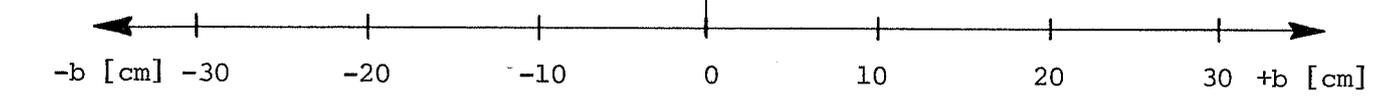
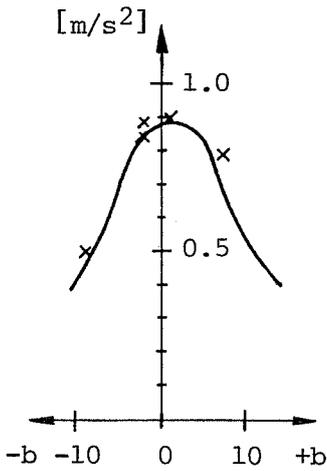


- X ——— 60 km/h
- + - - - 40 km/h
- o - · - · 30 km/h
- - - - 20 km/h

BESCHLEUNIGUNG  
[m/s<sup>2</sup>]

N3 Mumpf  
Fahrspur  
BSG oben  
Vorderrad  
4./3.7.74

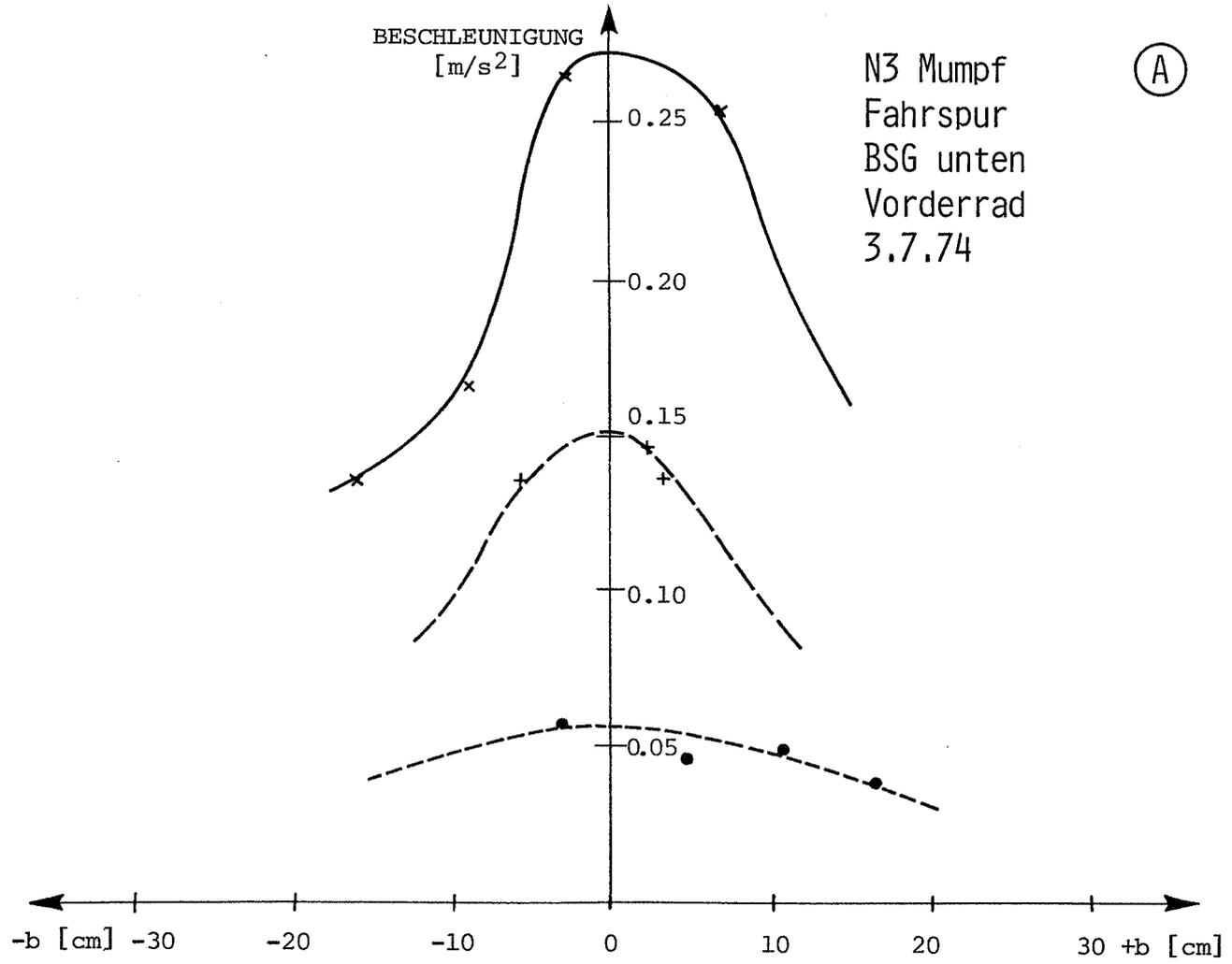
(A)



BESCHLEUNIGUNG  
[m/s<sup>2</sup>]

N3 Mumpf  
Fahrspur  
BSG unten  
Vorderrad  
3.7.74

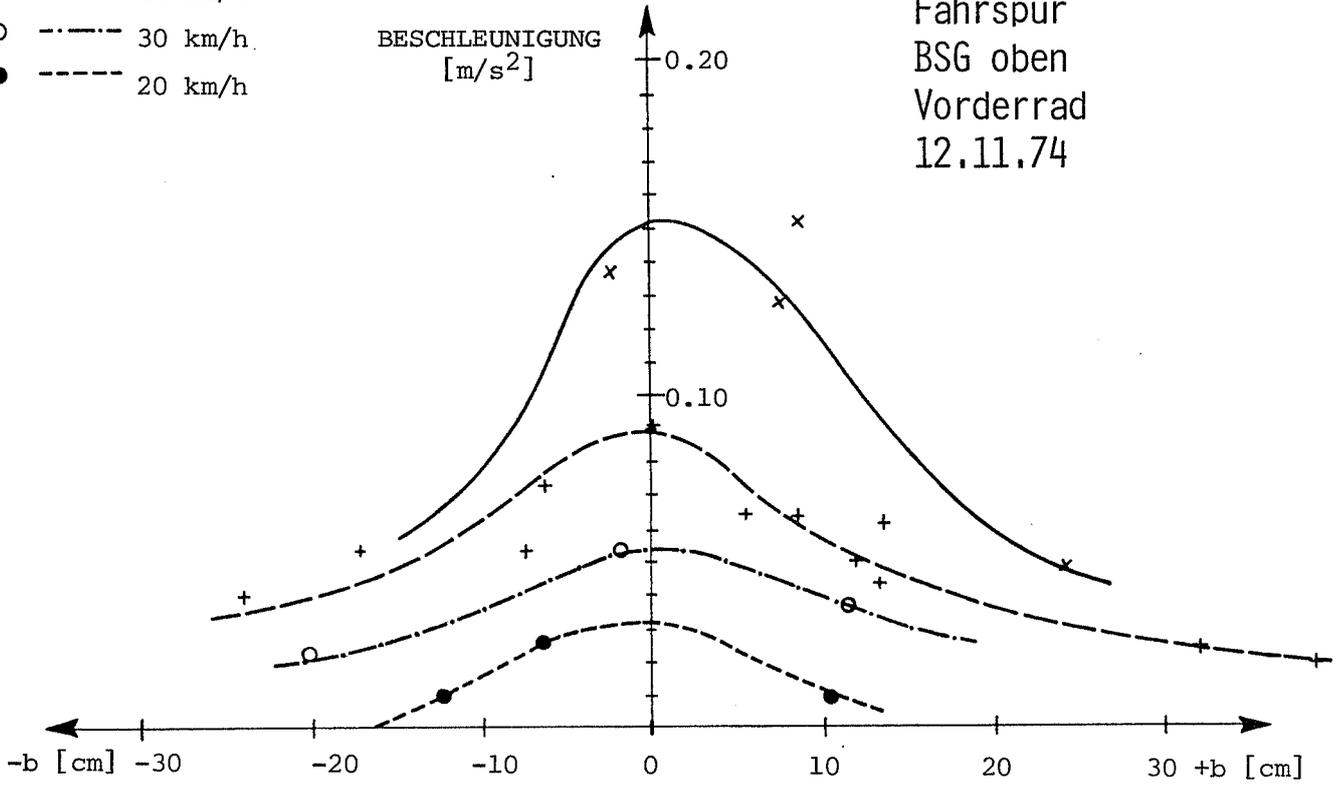
(A)



- X ——— 60 km/h
- + - - - 40 km/h
- O - · - · 30 km/h
- - - - 20 km/h

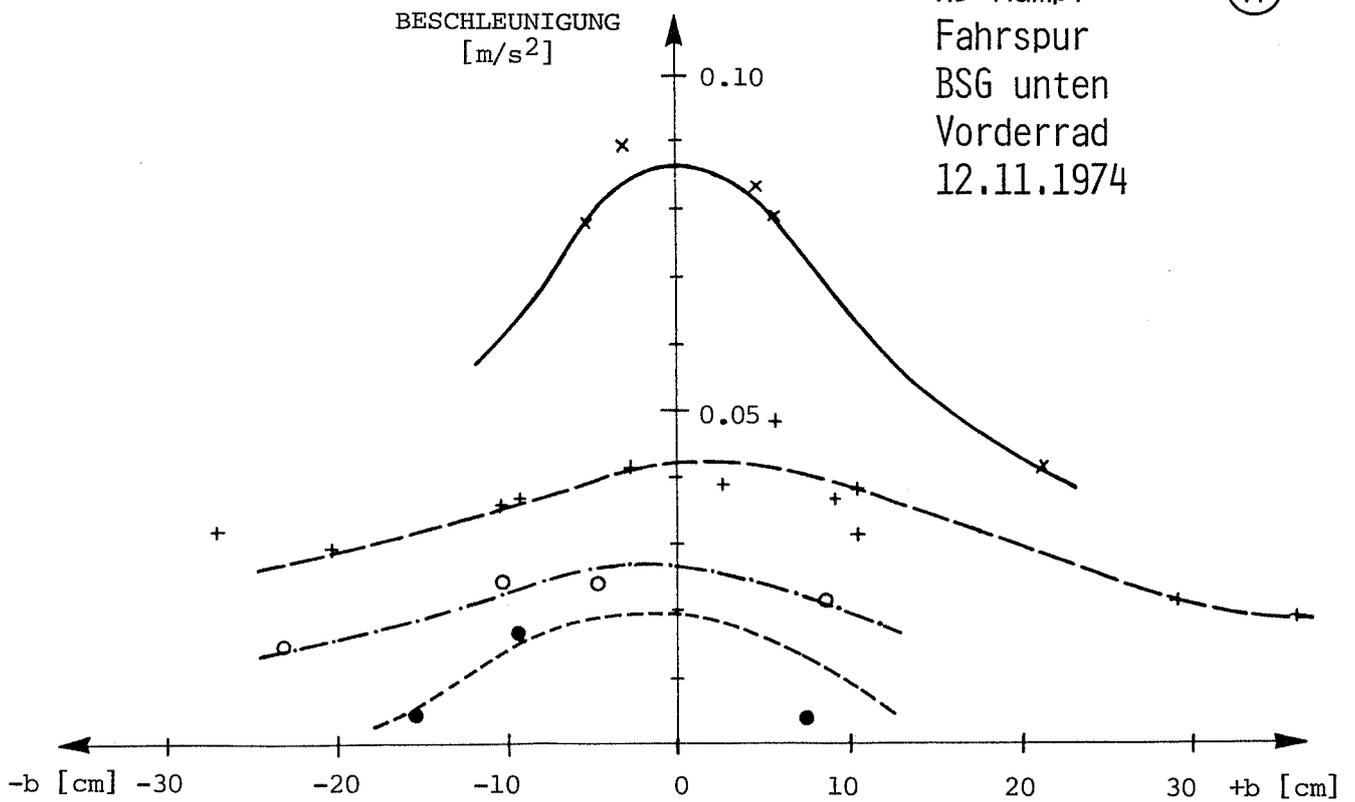
N2 Mumpf  
Fahrspur  
BSG oben  
Vorderrad  
12.11.74

(A)

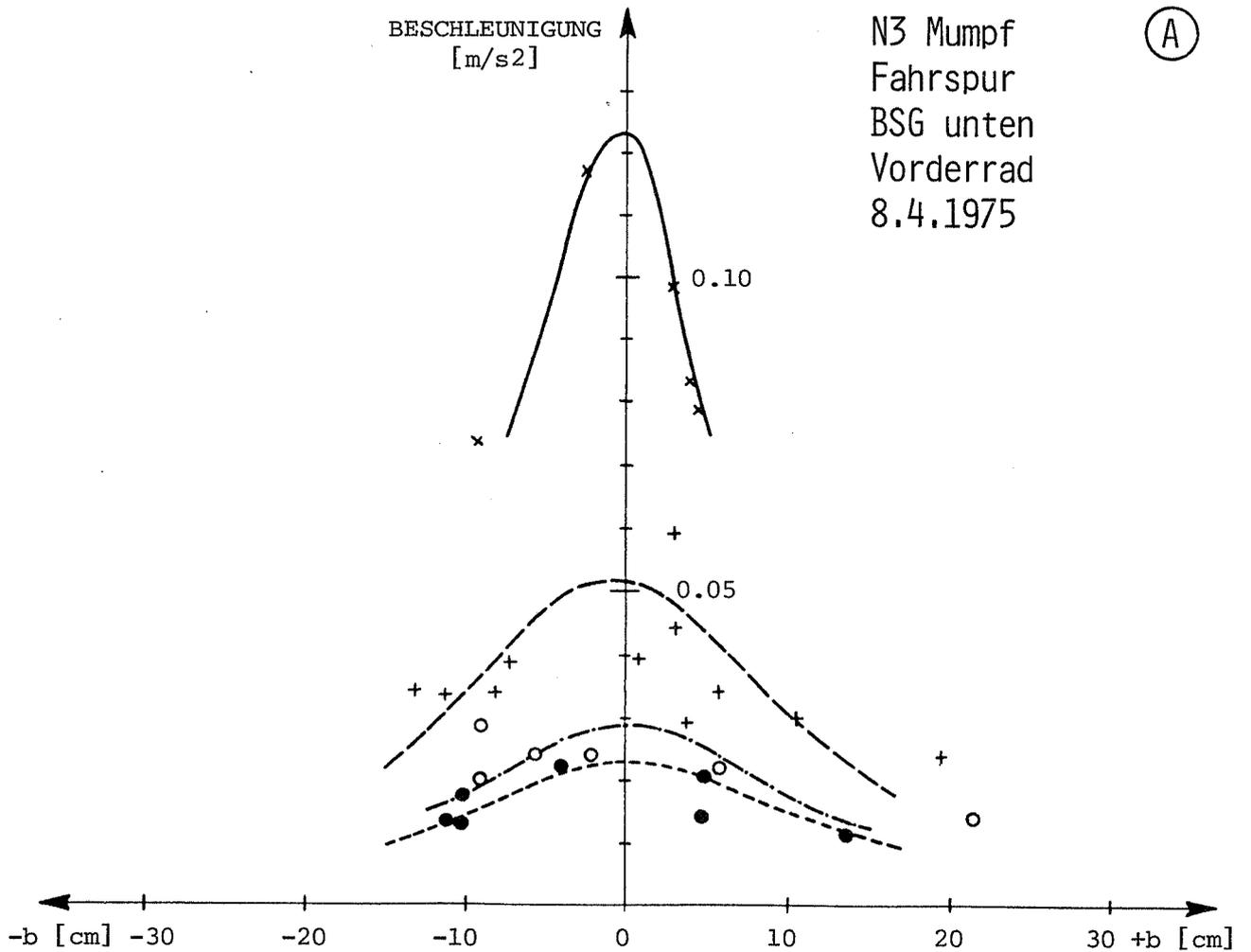
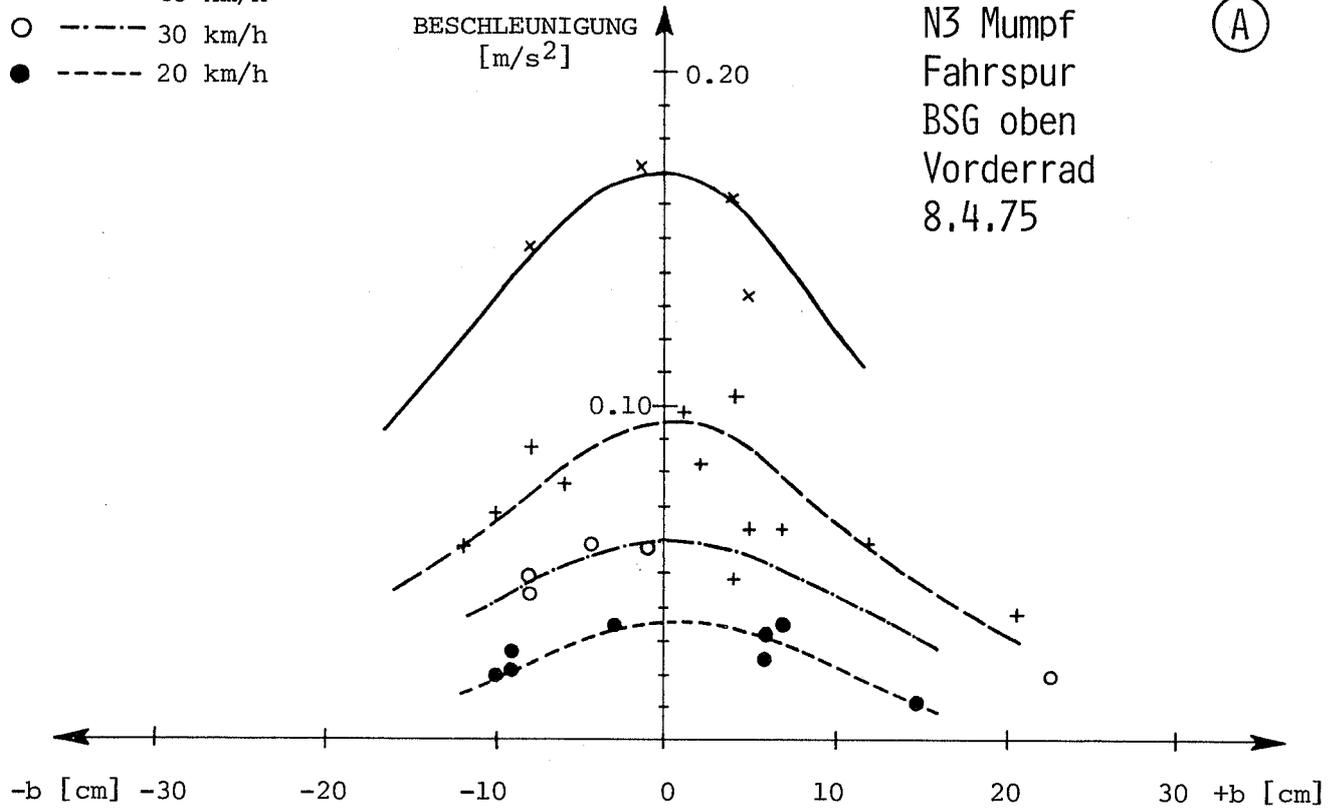


N3 Mumpf  
Fahrspur  
BSG unten  
Vorderrad  
12.11.1974

(A)



- X ——— 60 km/h
- + - - - 40 km/h
- - · - · 30 km/h
- - - - - 20 km/h

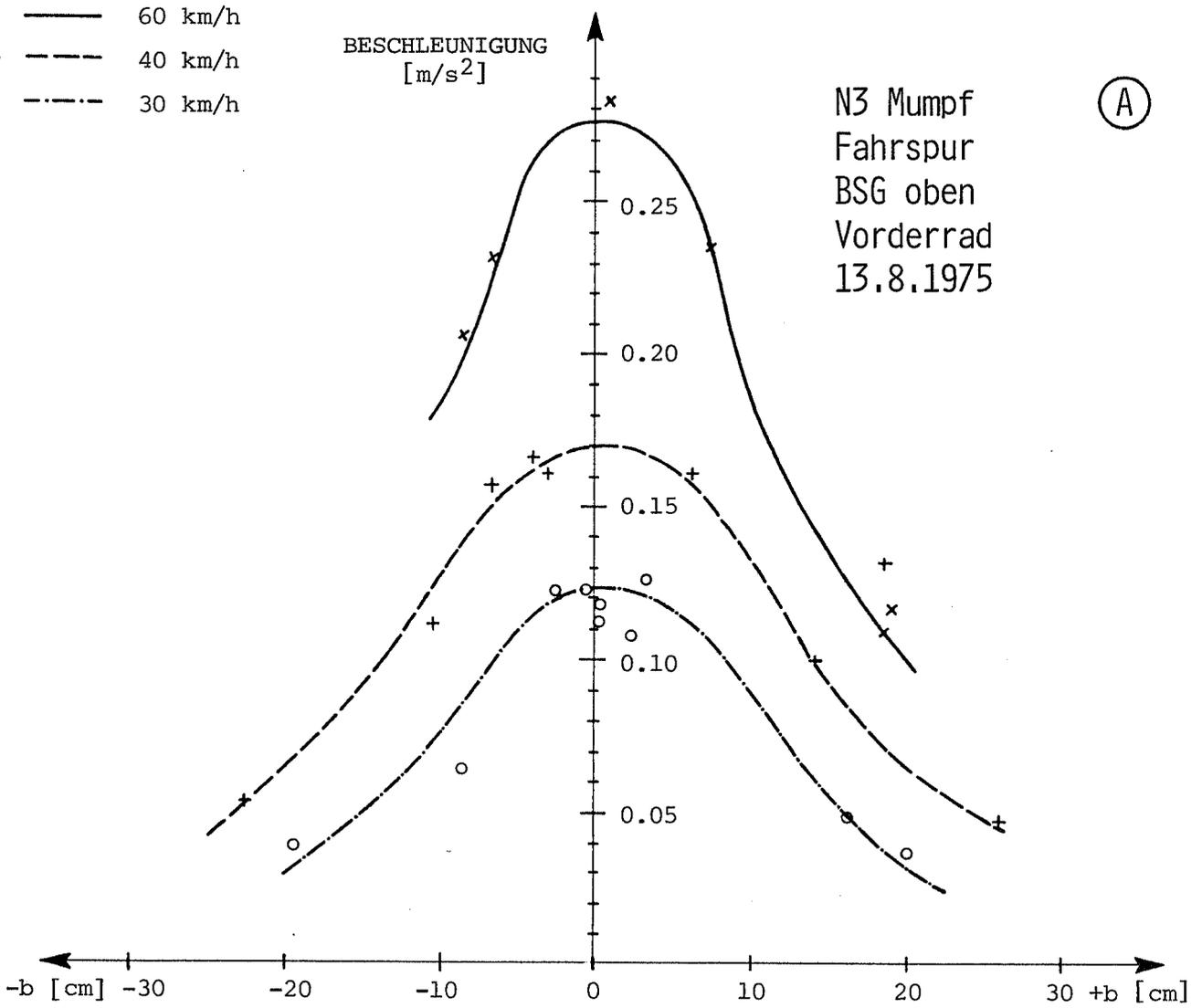


- x ——— 60 km/h
- + - - - 40 km/h
- o - · - · 30 km/h

BESCHLEUNIGUNG  
[m/s<sup>2</sup>]

N3 Mumpf  
Fahrspur  
BSG oben  
Vorderrad  
13.8.1975

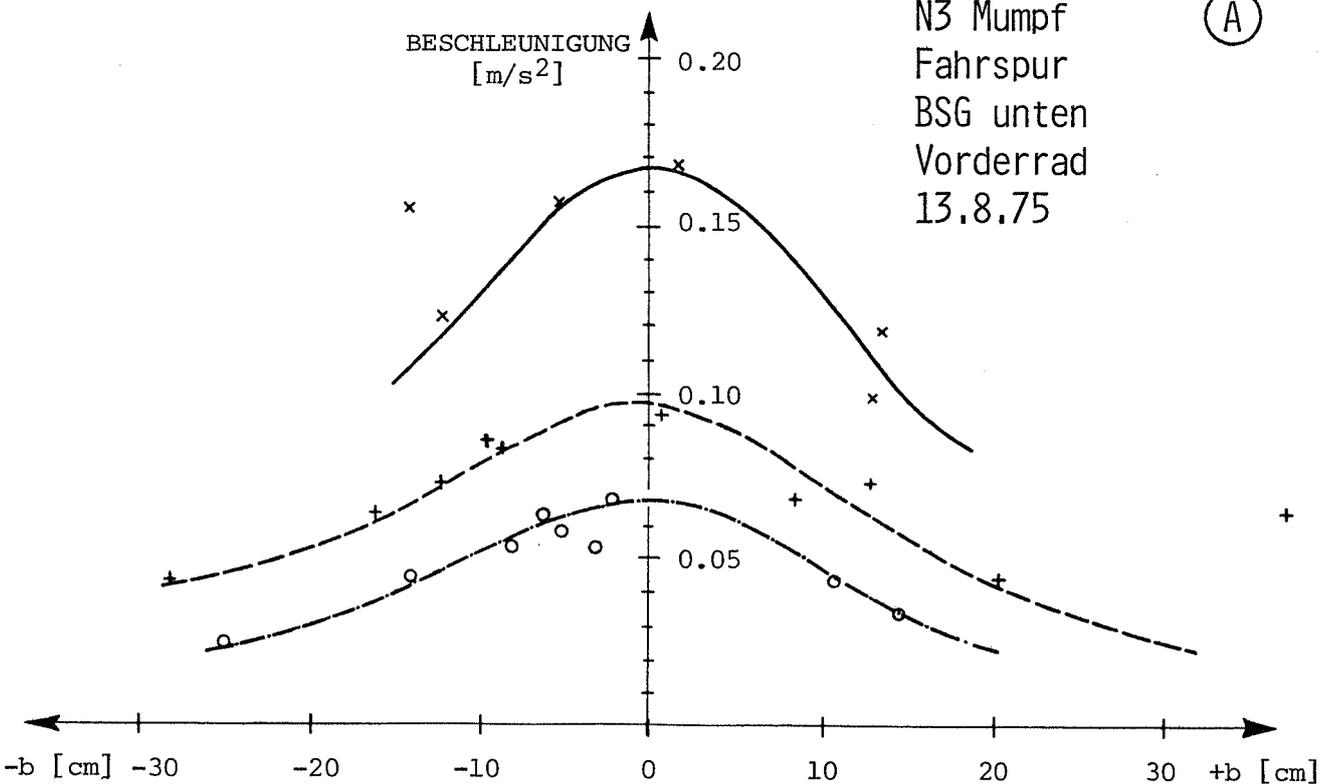
(A)



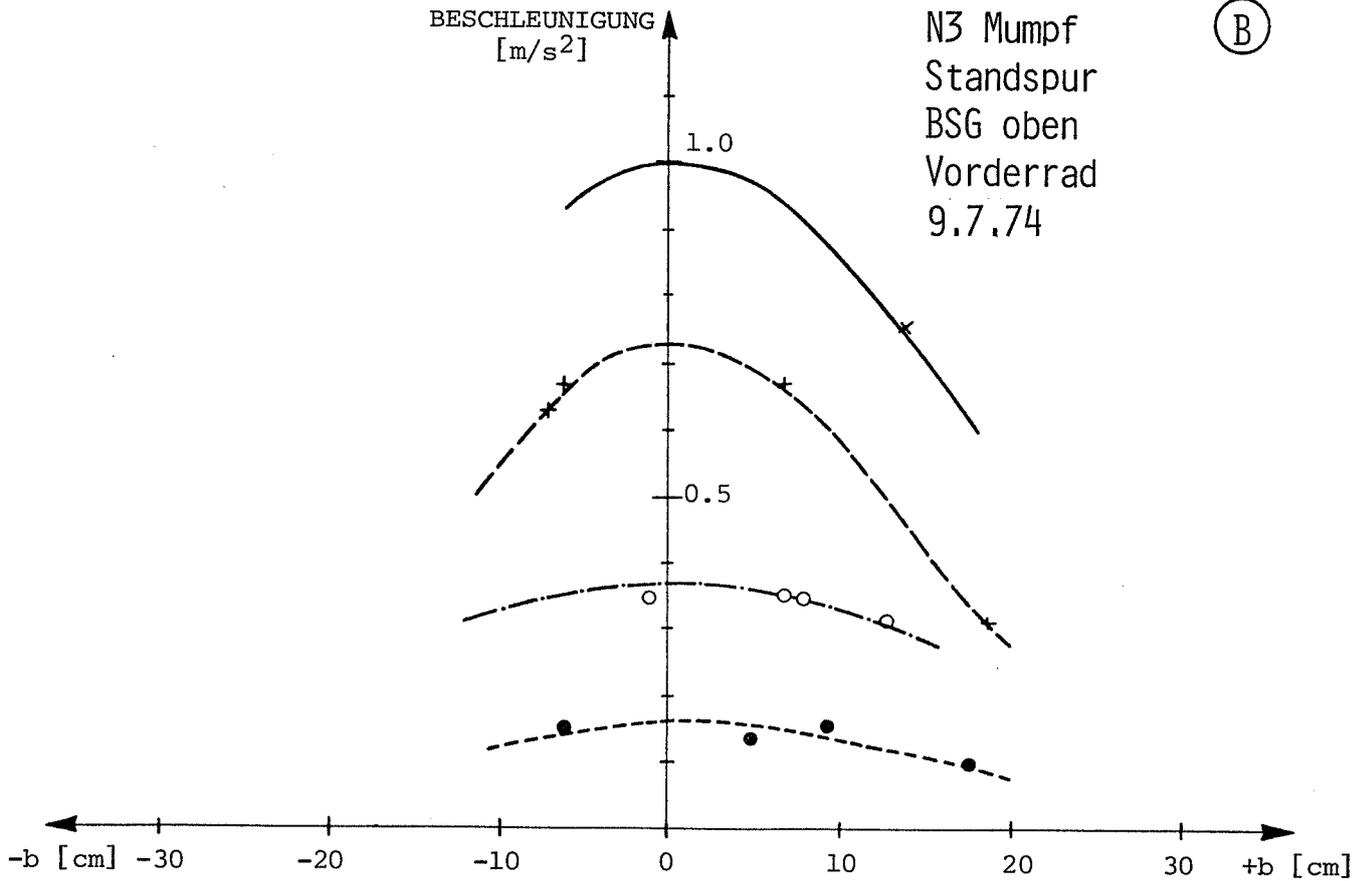
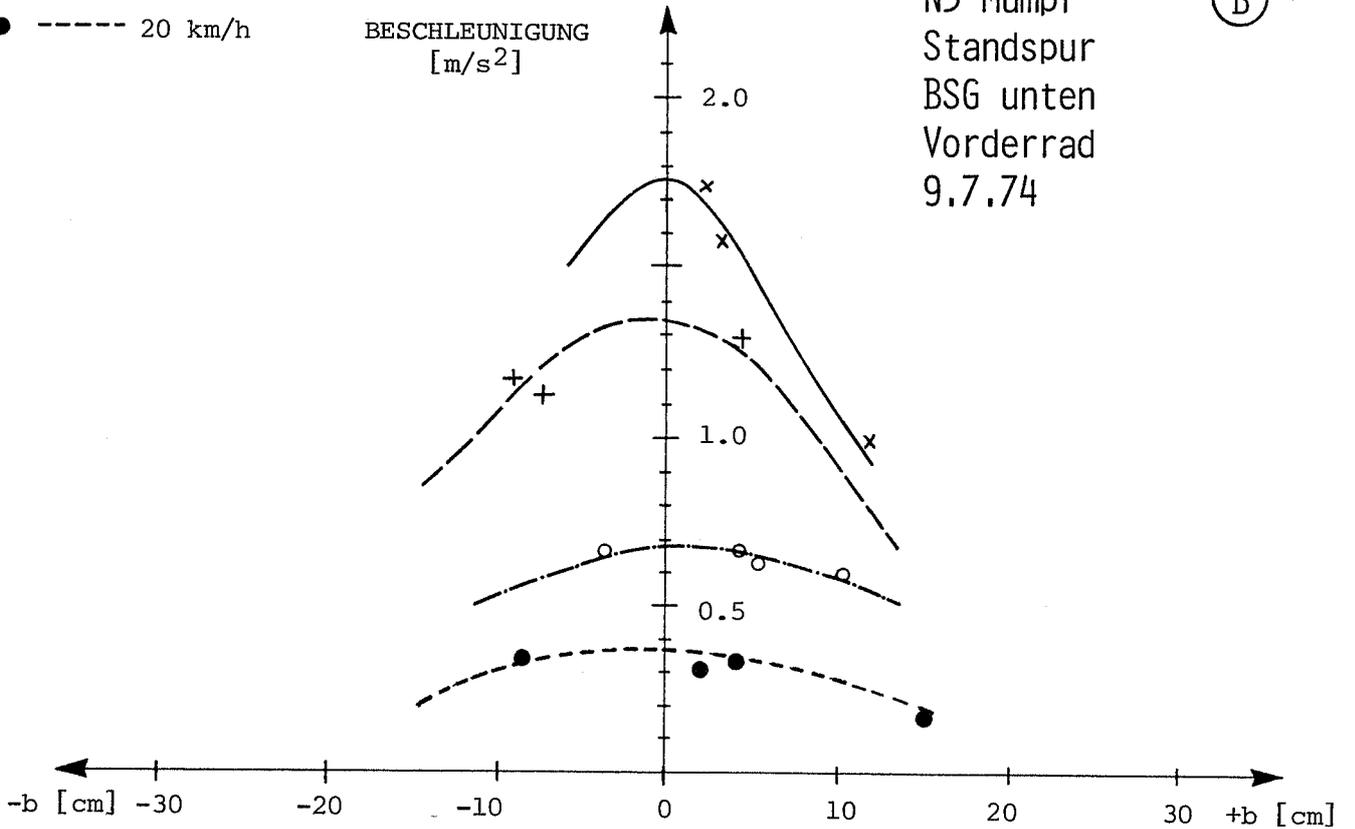
BESCHLEUNIGUNG  
[m/s<sup>2</sup>]

N3 Mumpf  
Fahrspur  
BSG unten  
Vorderrad  
13.8.75

(A)



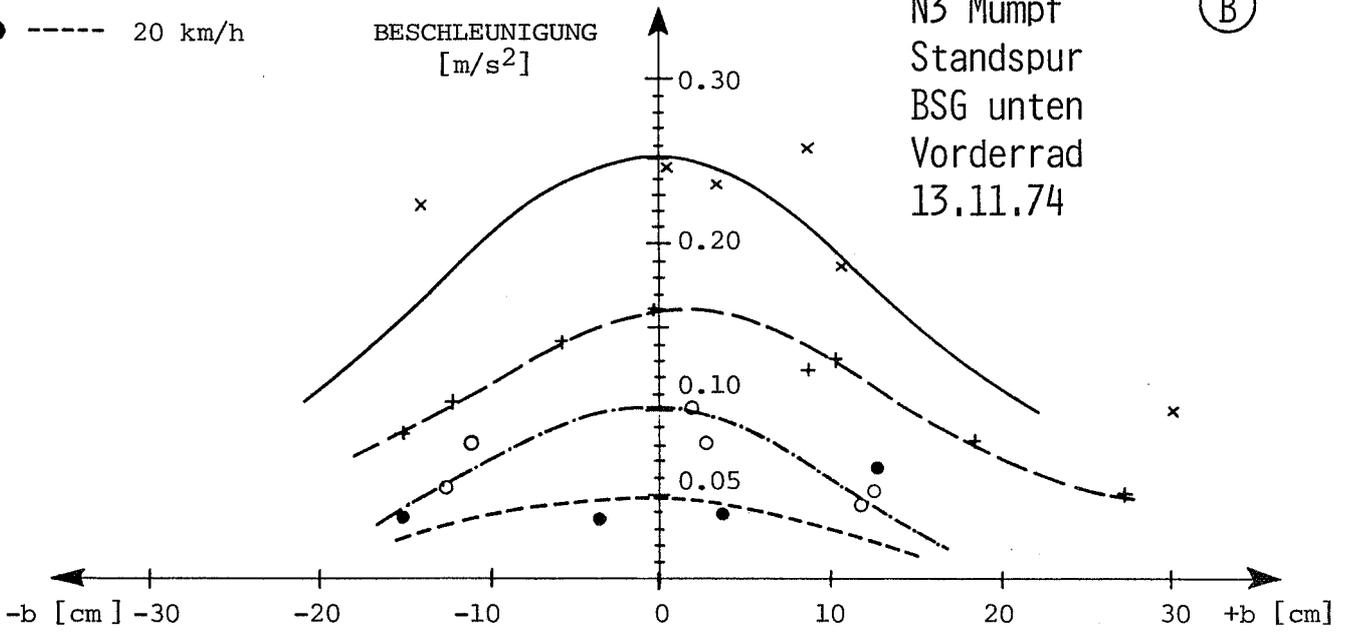
- × ——— 60 km/h
- + - - - - 40 km/h
- - · - · - 30 km/h
- - - - - 20 km/h



- X ——— 60 km/h
- + - - - - 40 km/h
- O - · - · - 30 km/h
- - - - - 20 km/h

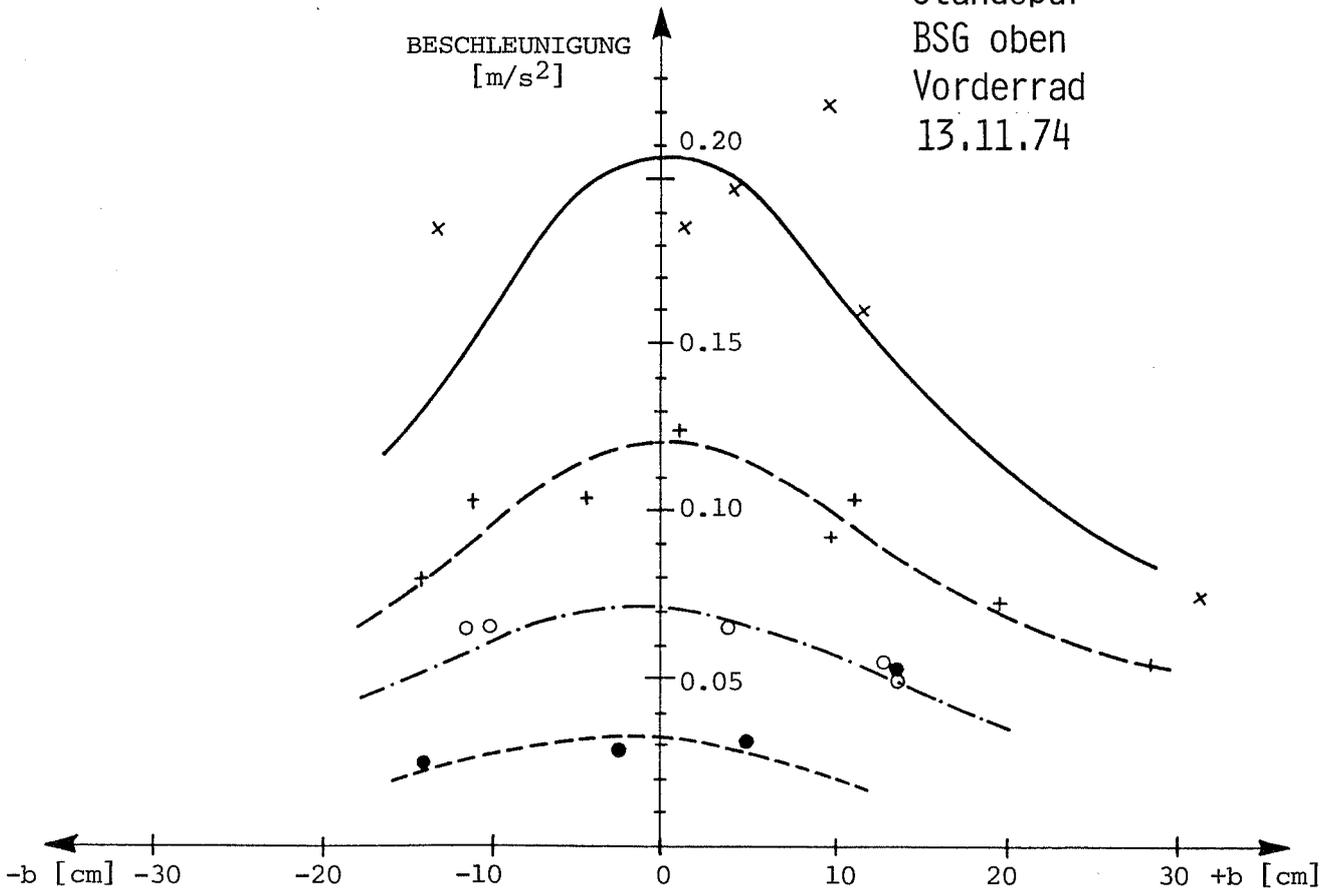
(B)

N3 Mumpf  
Standspur  
BSG unten  
Vorderrad  
13.11.74



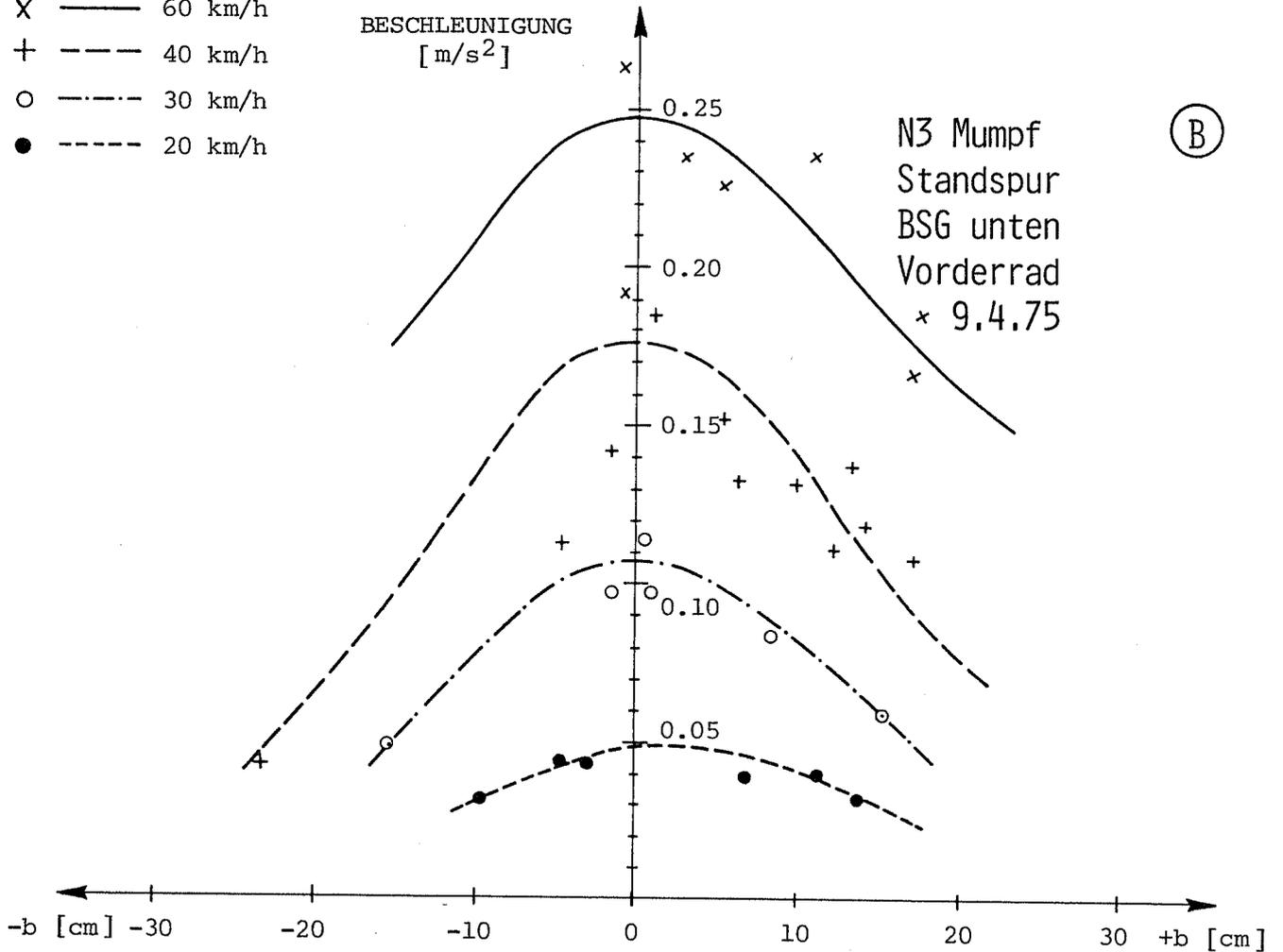
(B)

N3 Mumpf  
Standspur  
BSG oben  
Vorderrad  
13.11.74

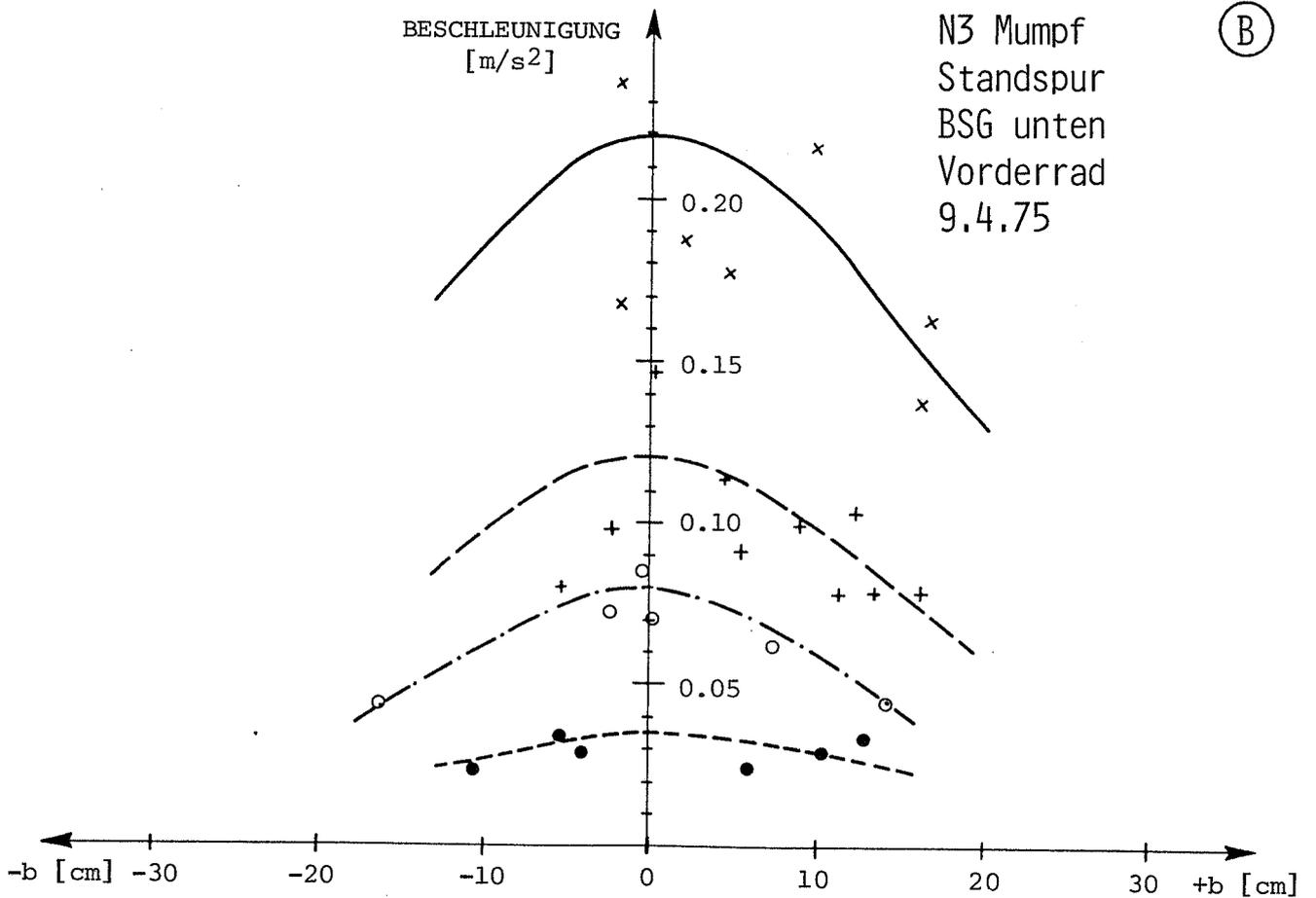


- X ——— 60 km/h
- + - - - - 40 km/h
- O - · - · - 30 km/h
- - - - - 20 km/h

BESCHLEUNIGUNG  
[m/s<sup>2</sup>]



BESCHLEUNIGUNG  
[m/s<sup>2</sup>]

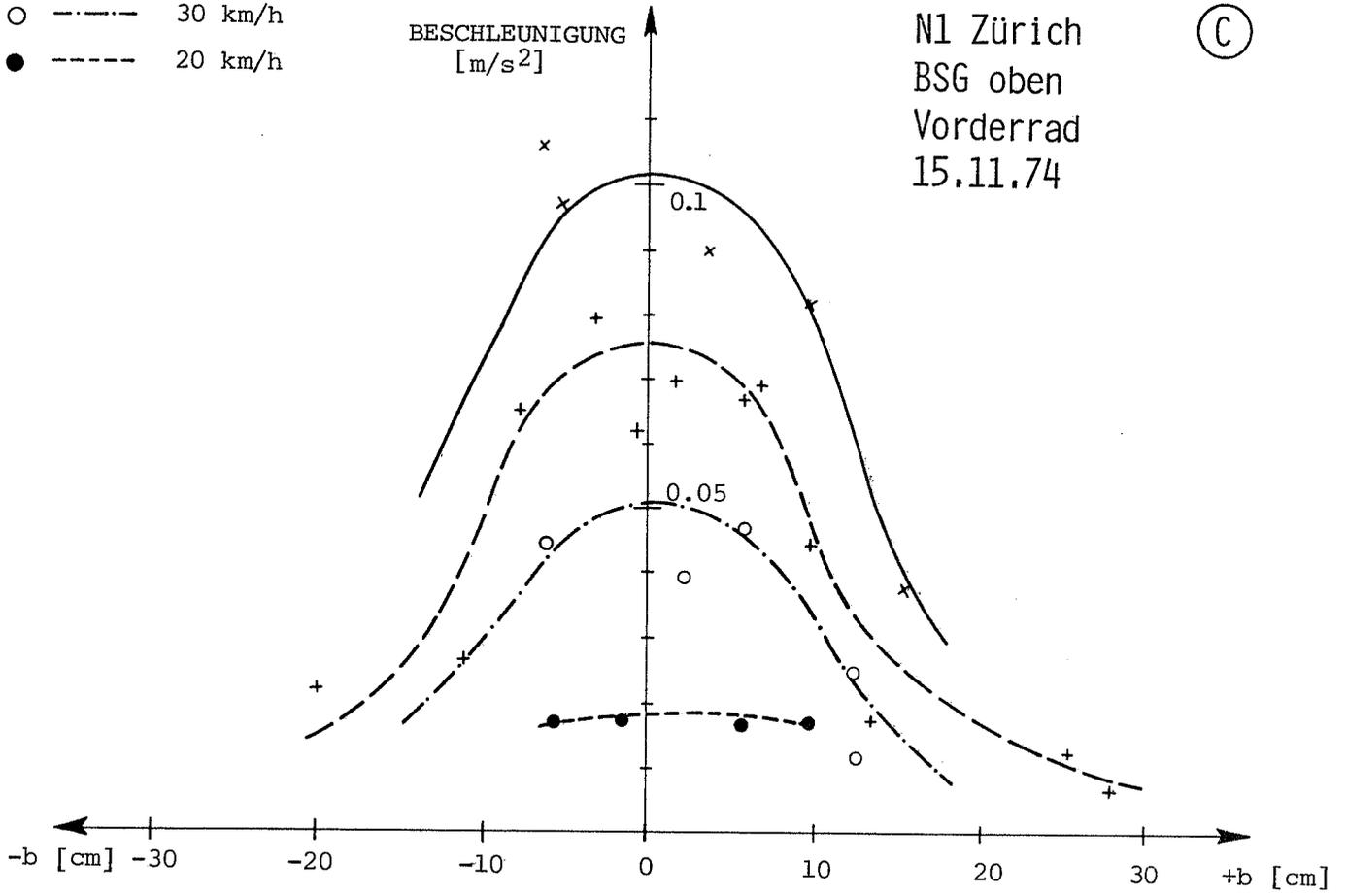


- X ——— 60 km/h
- + - - - 40 km/h
- - · - · 30 km/h
- - - - 20 km/h

BESCHLEUNIGUNG  
[m/s<sup>2</sup>]

N1 Zürich  
BSG oben  
Vorderrad  
15.11.74

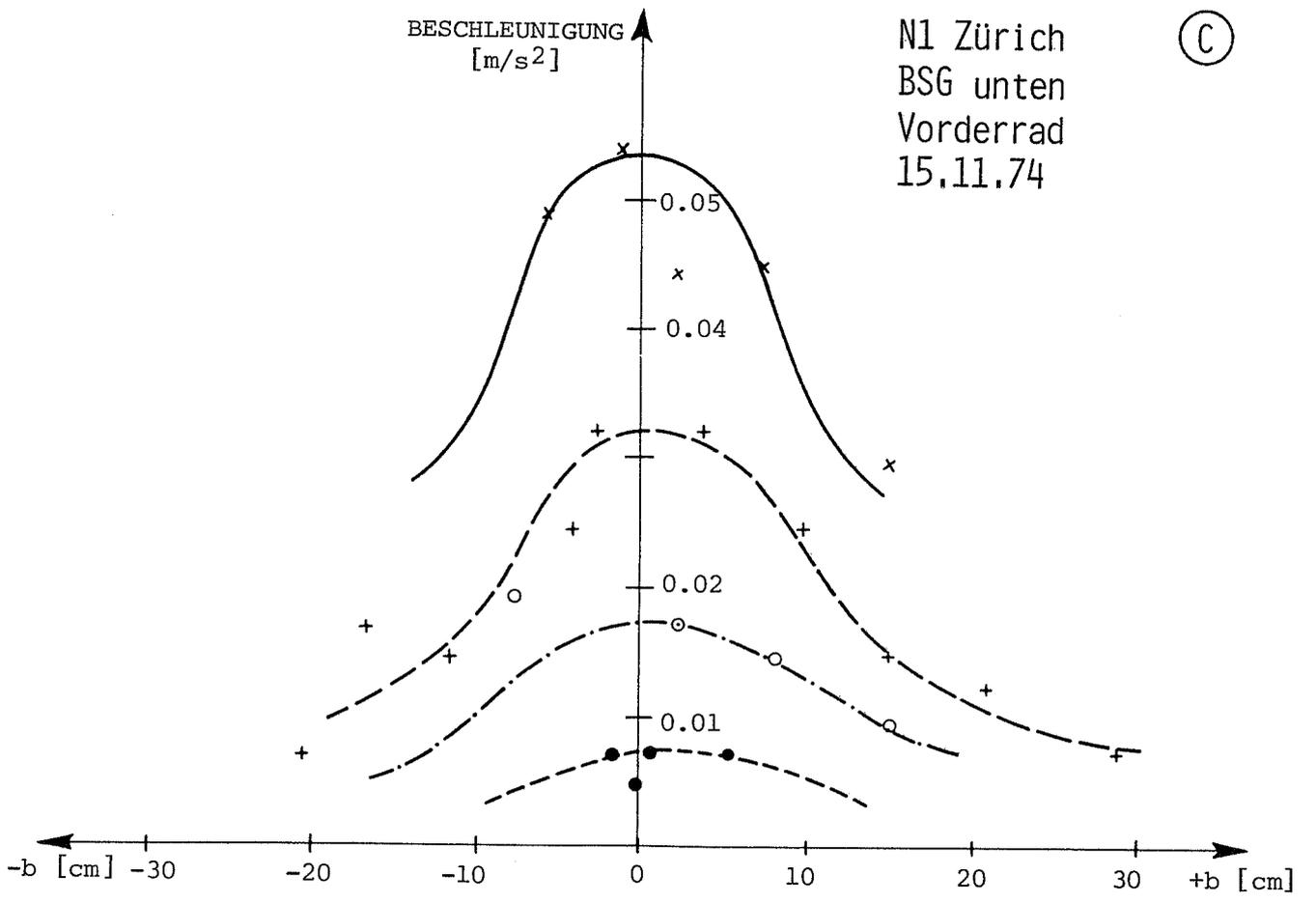
Ⓒ



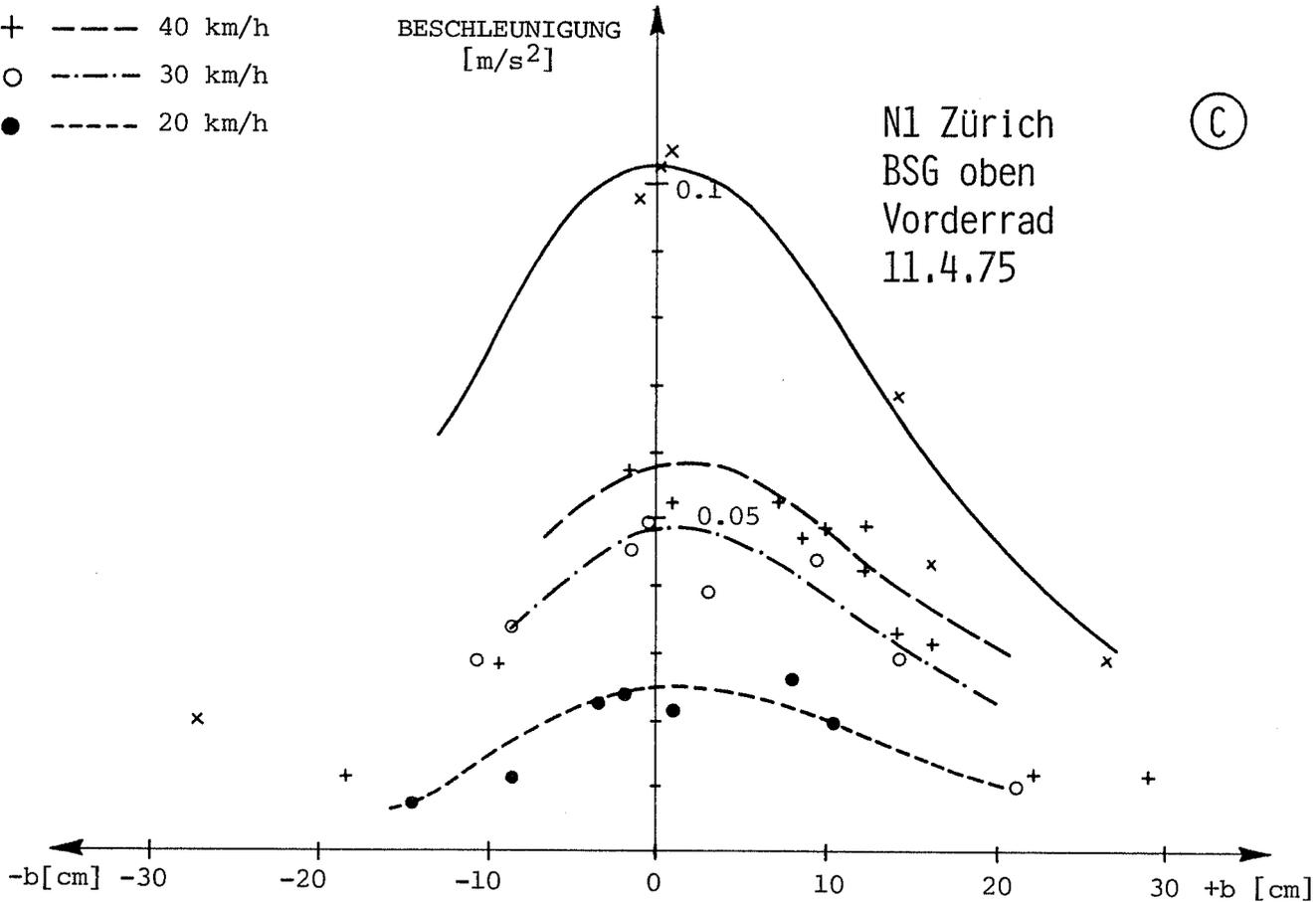
BESCHLEUNIGUNG  
[m/s<sup>2</sup>]

N1 Zürich  
BSG unten  
Vorderrad  
15.11.74

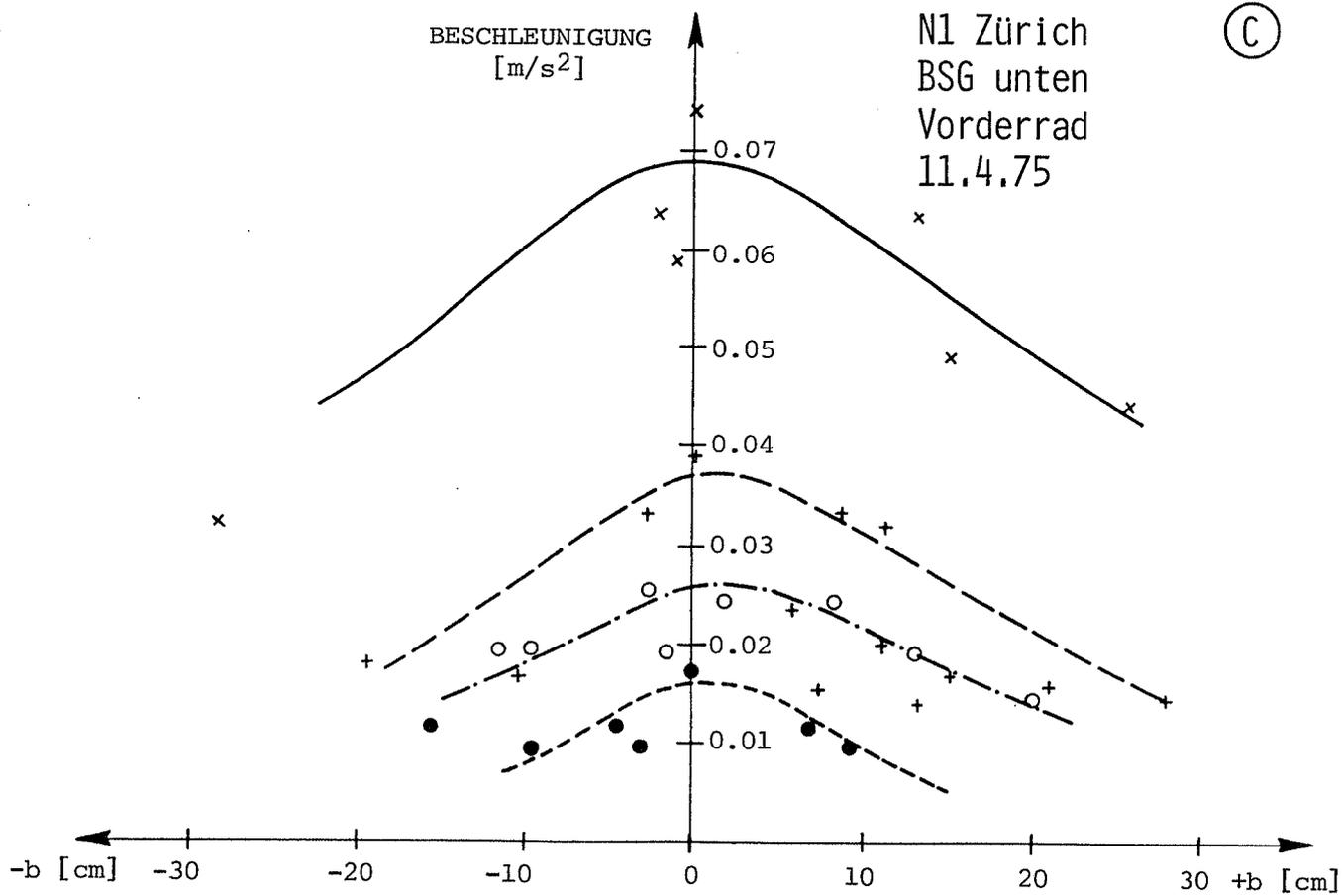
Ⓒ



- X ——— 60 km/h
- + - - - - 40 km/h
- - · - · - 30 km/h
- - - - - 20 km/h



Ⓒ



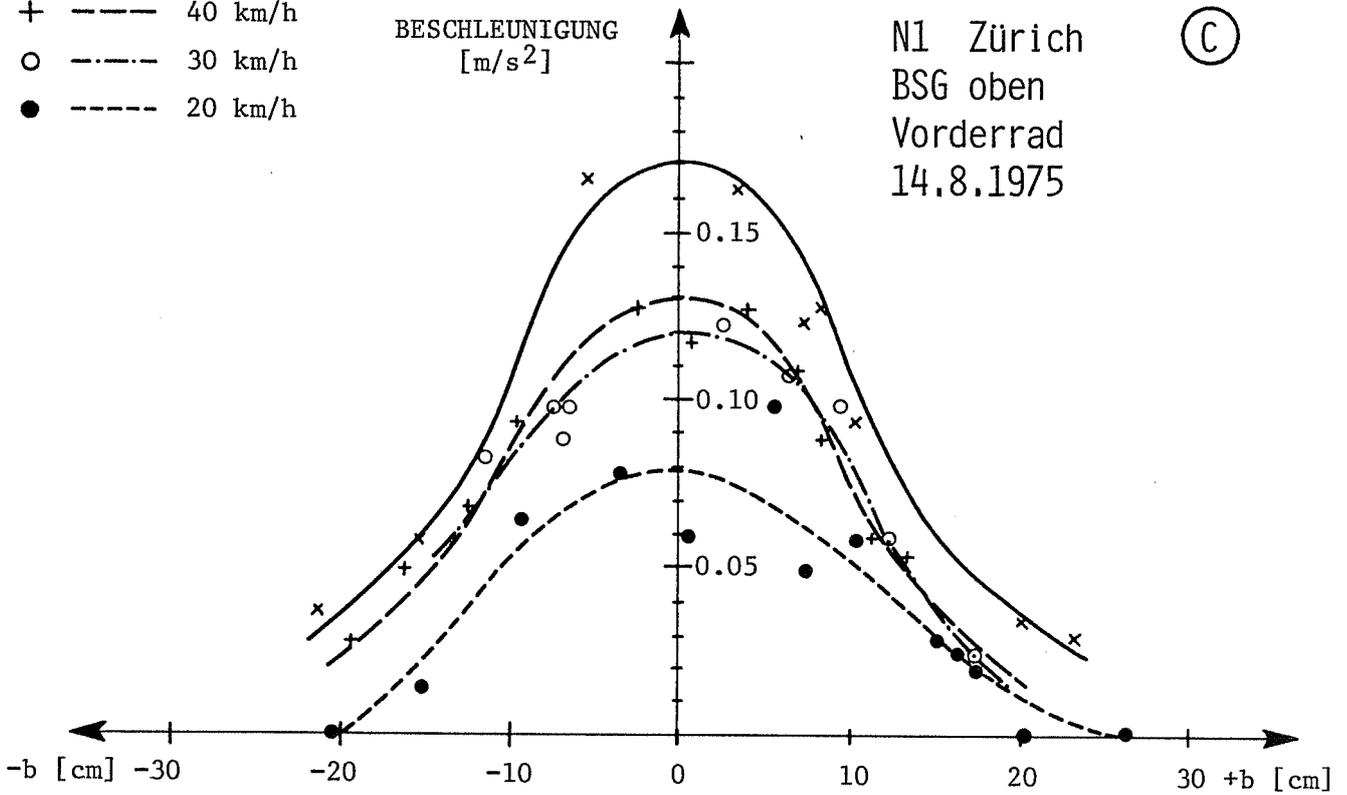
Ⓒ

- X ——— 60 km/h
- + - - - - 40 km/h
- o - · - · - 30 km/h
- - - - - 20 km/h

BESCHLEUNIGUNG  
[m/s<sup>2</sup>]

N1 Zürich  
BSG oben  
Vorderrad  
14.8.1975

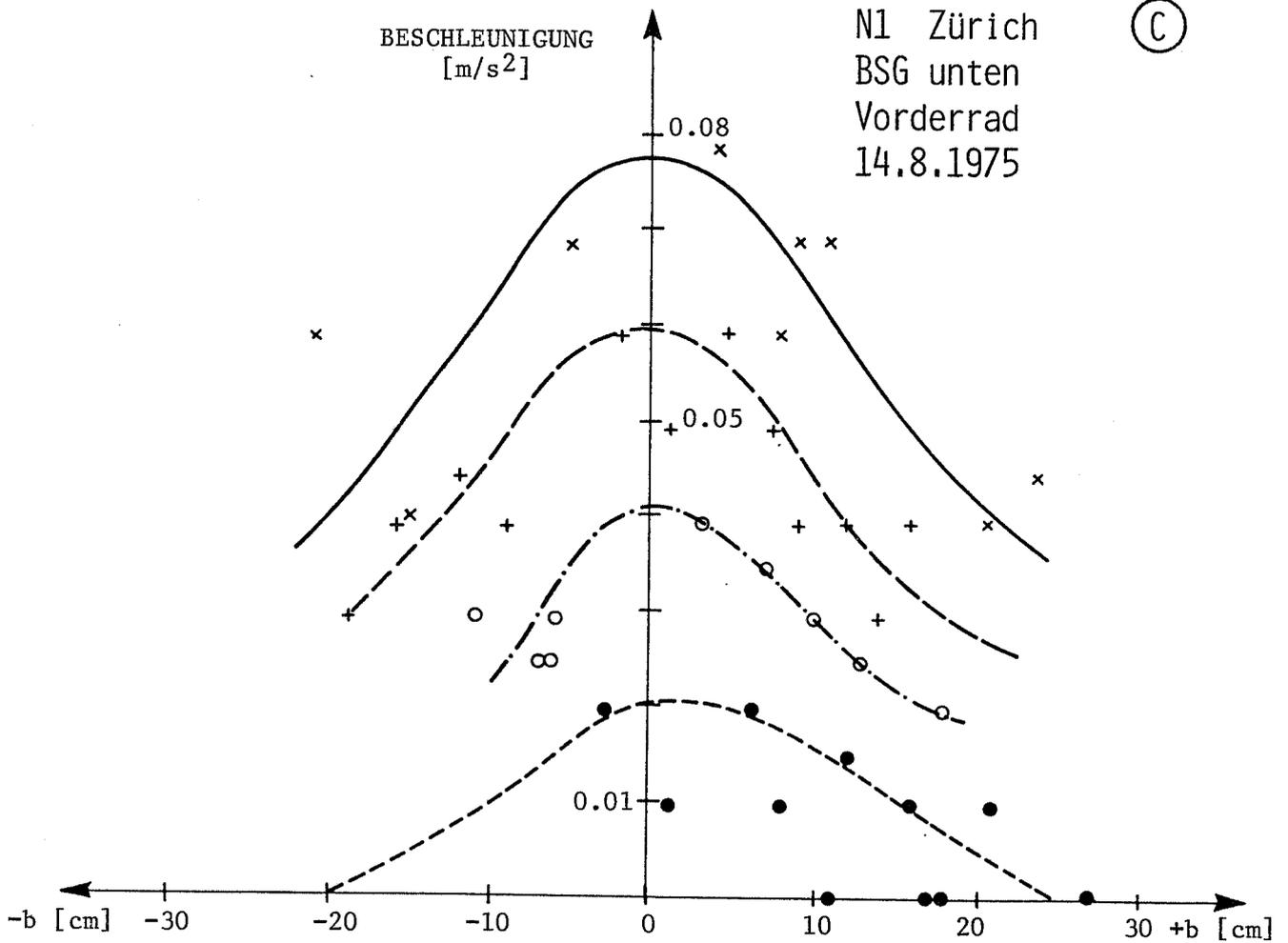
©



BESCHLEUNIGUNG  
[m/s<sup>2</sup>]

N1 Zürich  
BSG unten  
Vorderrad  
14.8.1975

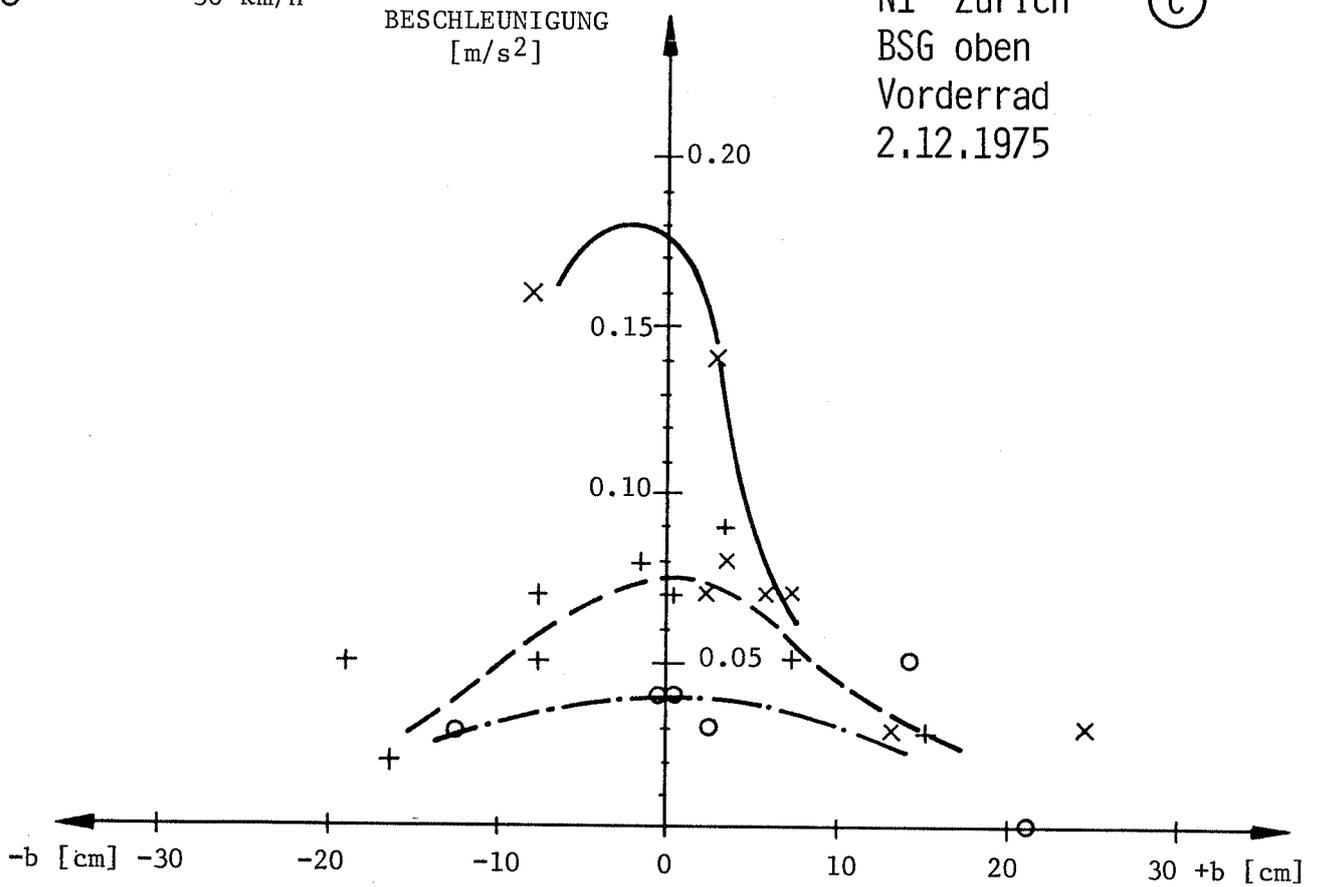
©



- x ——— 60 km/h
- + - - - - 40 km/h
- o - · - · - 30 km/h

N1 Zürich  
BSG oben  
Vorderrad  
2.12.1975

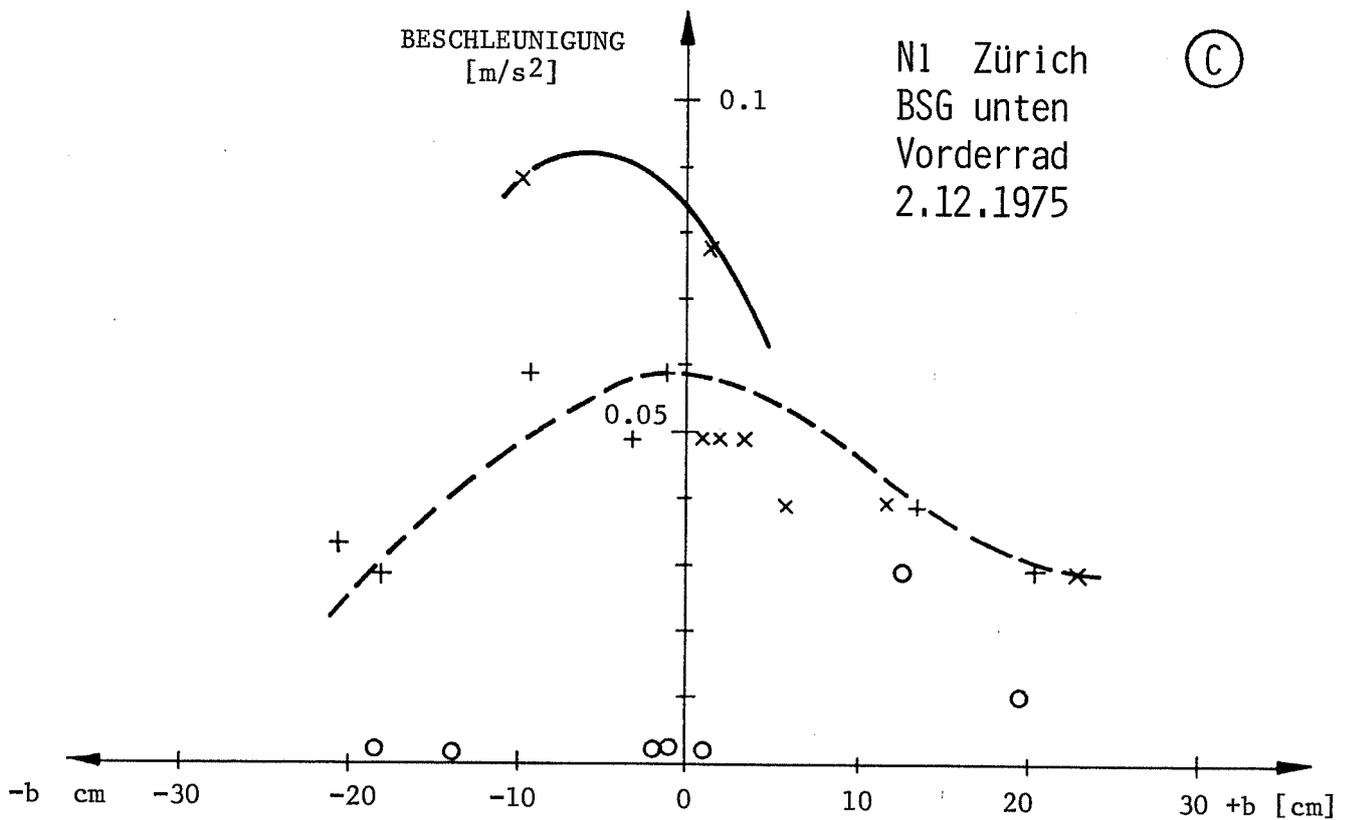
Ⓒ



BESCHLEUNIGUNG  
[m/s<sup>2</sup>]

N1 Zürich  
BSG unten  
Vorderrad  
2.12.1975

Ⓒ

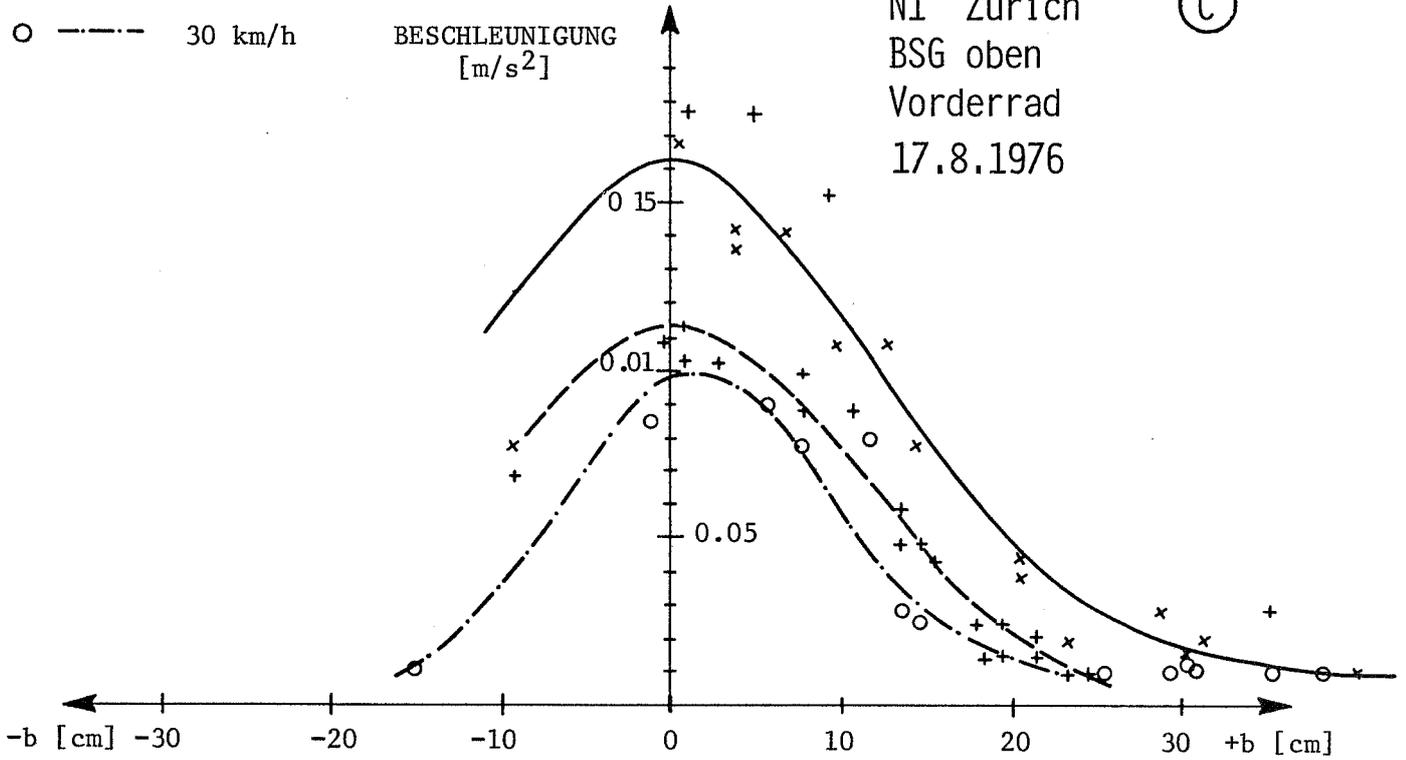


- X ——— 60 km/h
- + - - - - 40 km/h
- O - · - · 30 km/h

BESCHLEUNIGUNG  
[m/s<sup>2</sup>]

N1 Zürich  
BSG oben  
Vorderrad  
17.8.1976

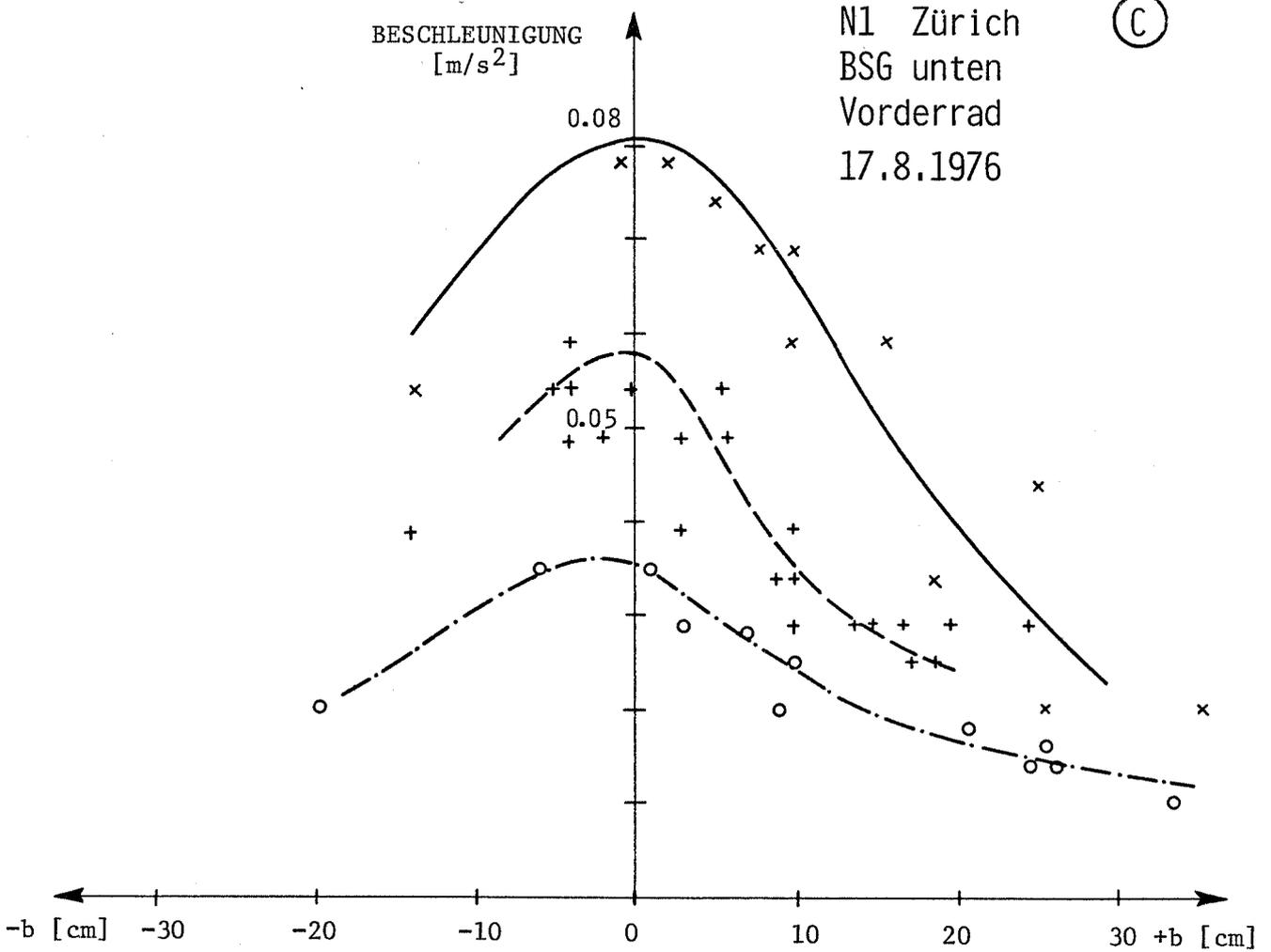
Ⓒ



BESCHLEUNIGUNG  
[m/s<sup>2</sup>]

N1 Zürich  
BSG unten  
Vorderrad  
17.8.1976

Ⓒ

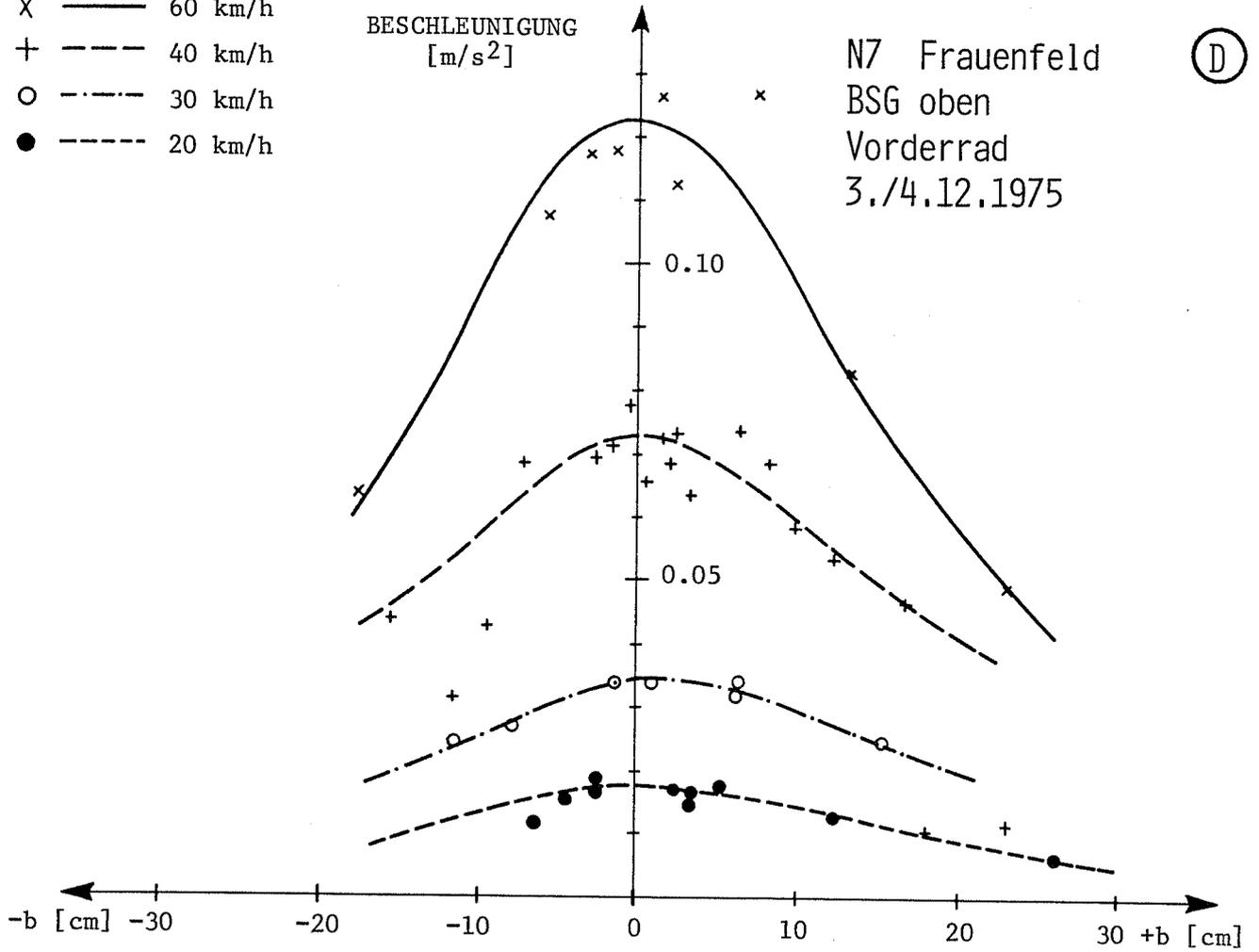


- x ——— 60 km/h
- + - - - - 40 km/h
- o - · - · - 30 km/h
- - - - - 20 km/h

BESCHLEUNIGUNG  
[m/s<sup>2</sup>]

N7 Frauenfeld  
BSG oben  
Vorderrad  
3./4.12.1975

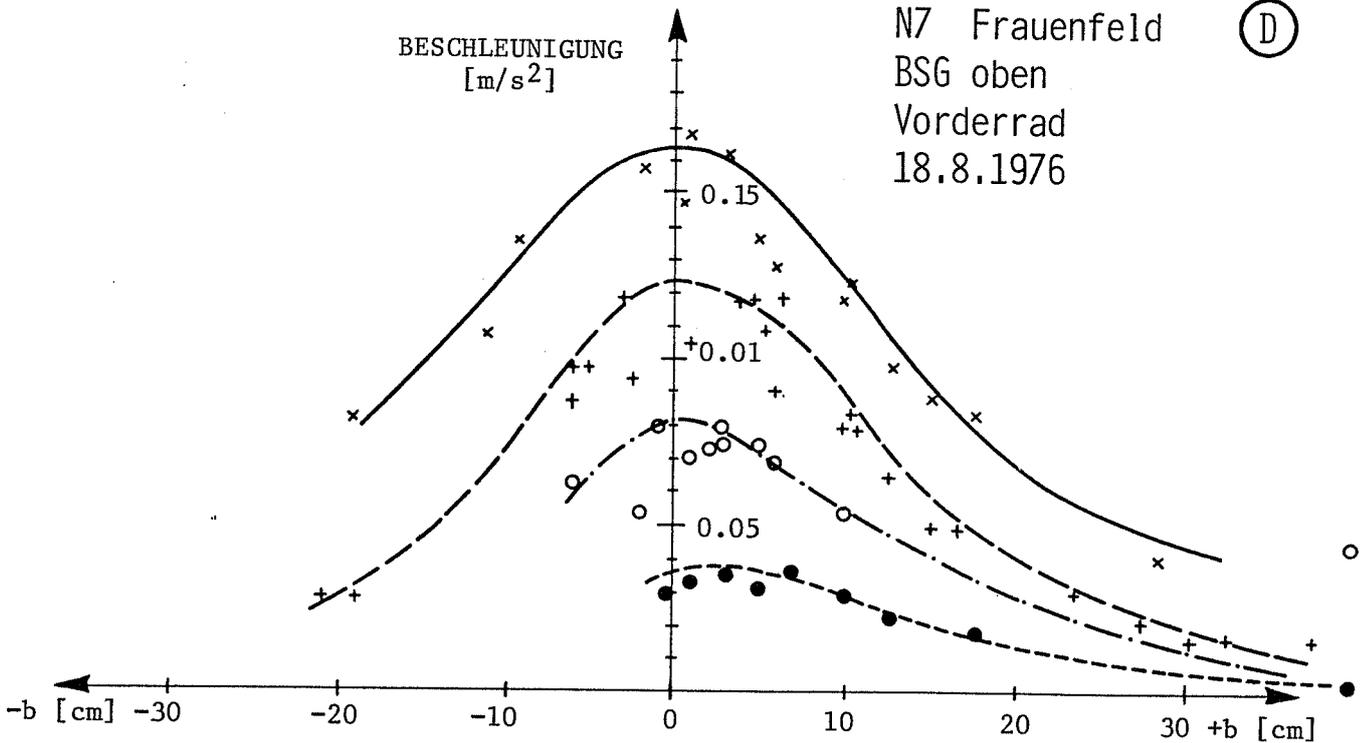
Ⓚ



BESCHLEUNIGUNG  
[m/s<sup>2</sup>]

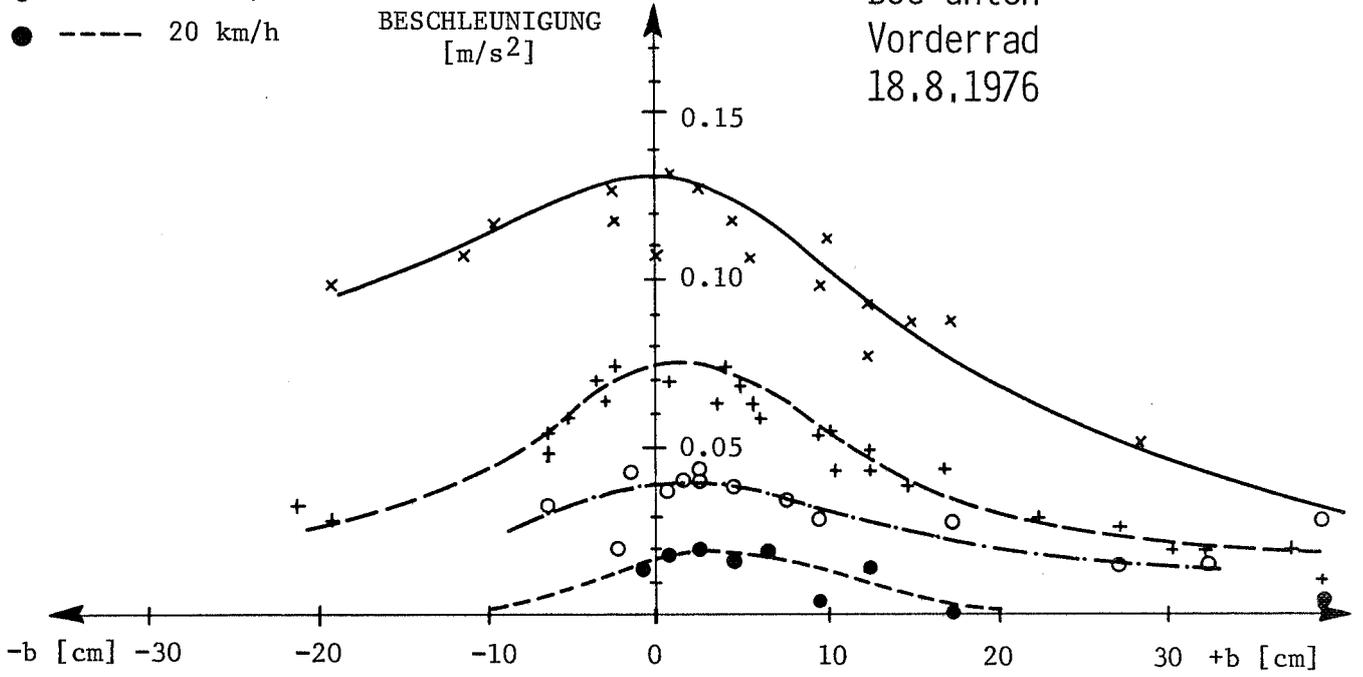
N7 Frauenfeld  
BSG oben  
Vorderrad  
18.8.1976

Ⓚ



- X ——— 60 km/h
- + - - - - 40 km/h
- - · - · 30 km/h
- - - - - 20 km/h

N7 Frauenfeld  
BSG unten  
Vorderrad  
18.8.1976

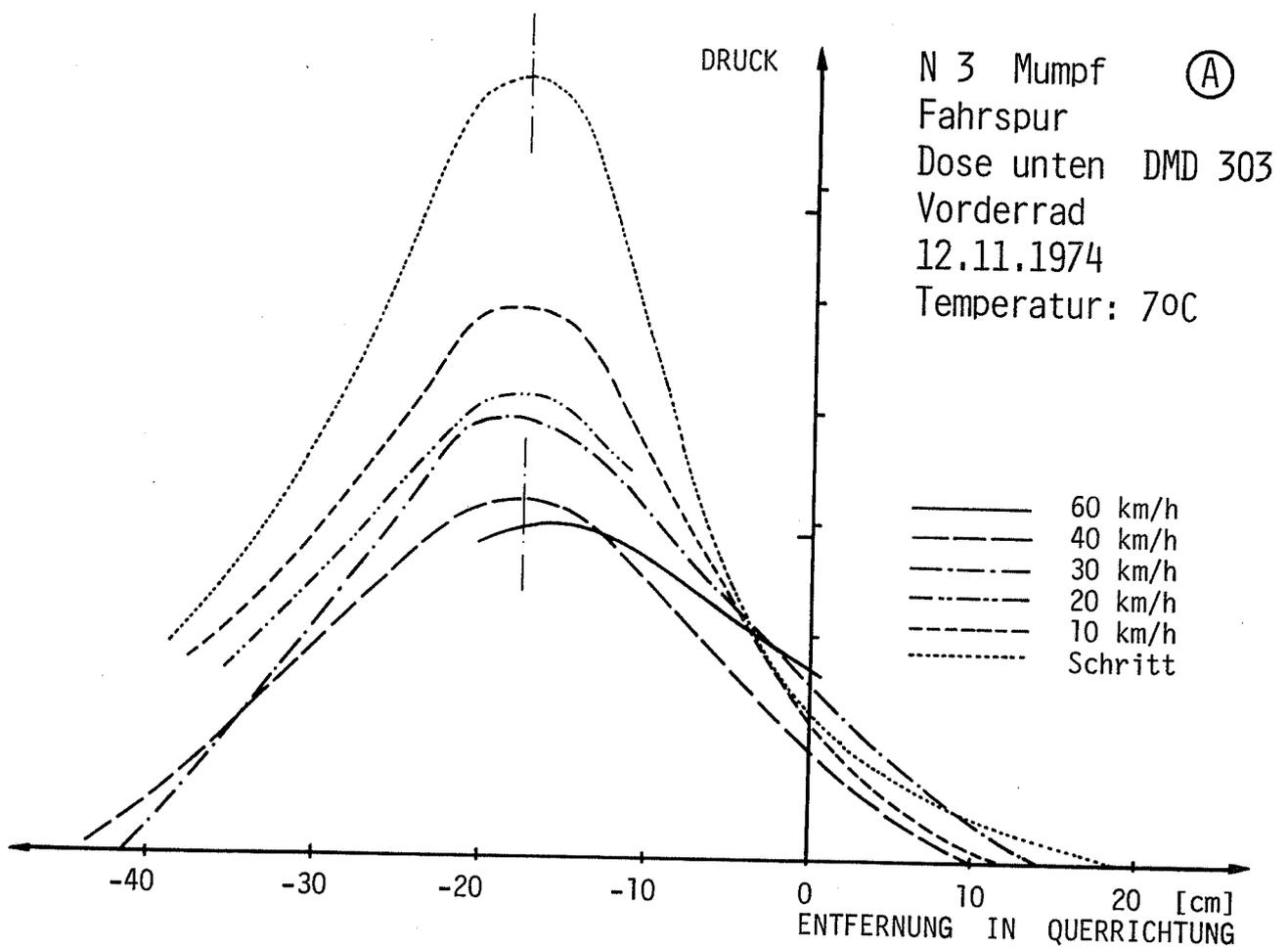
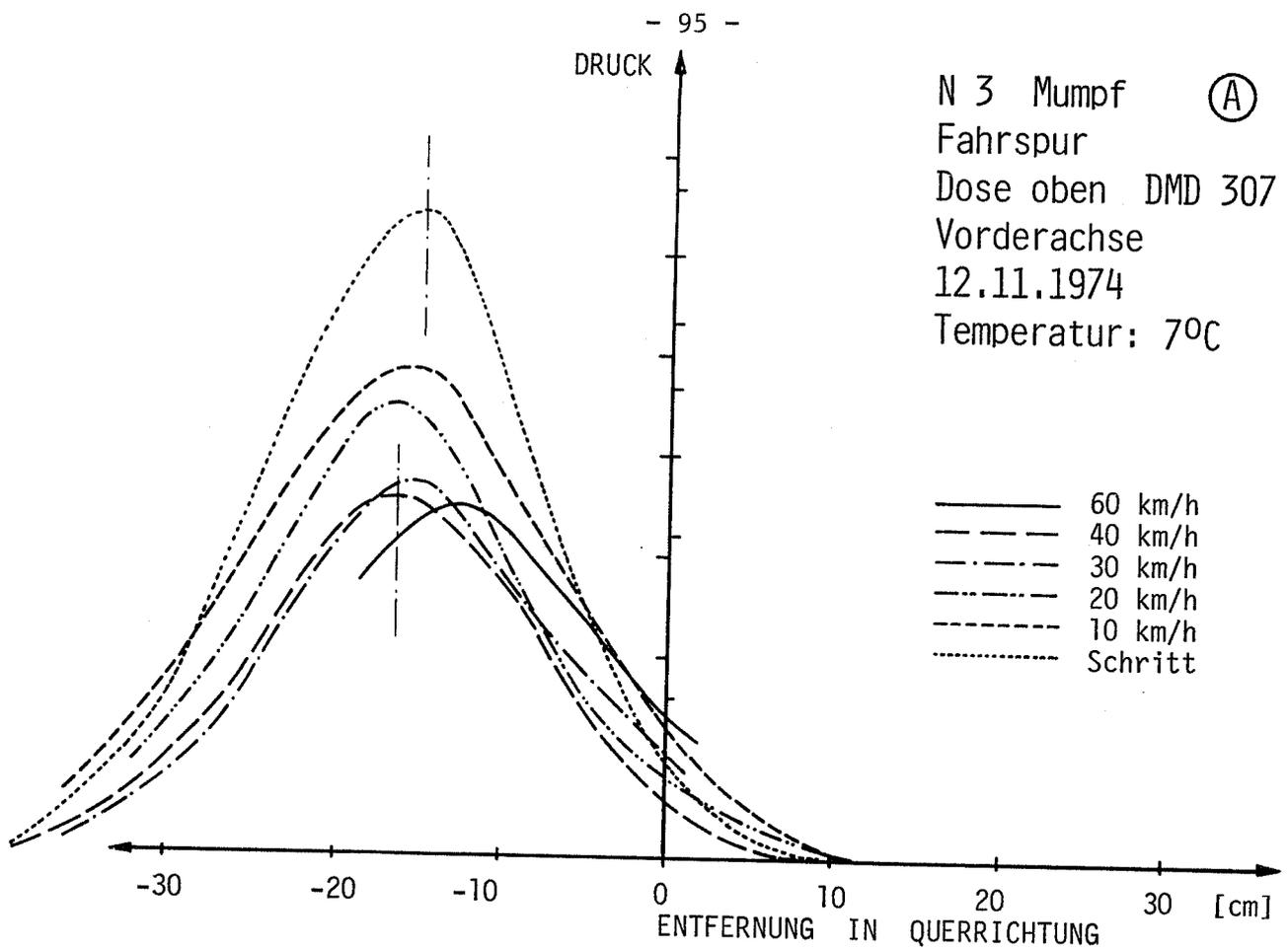


ANHANG II

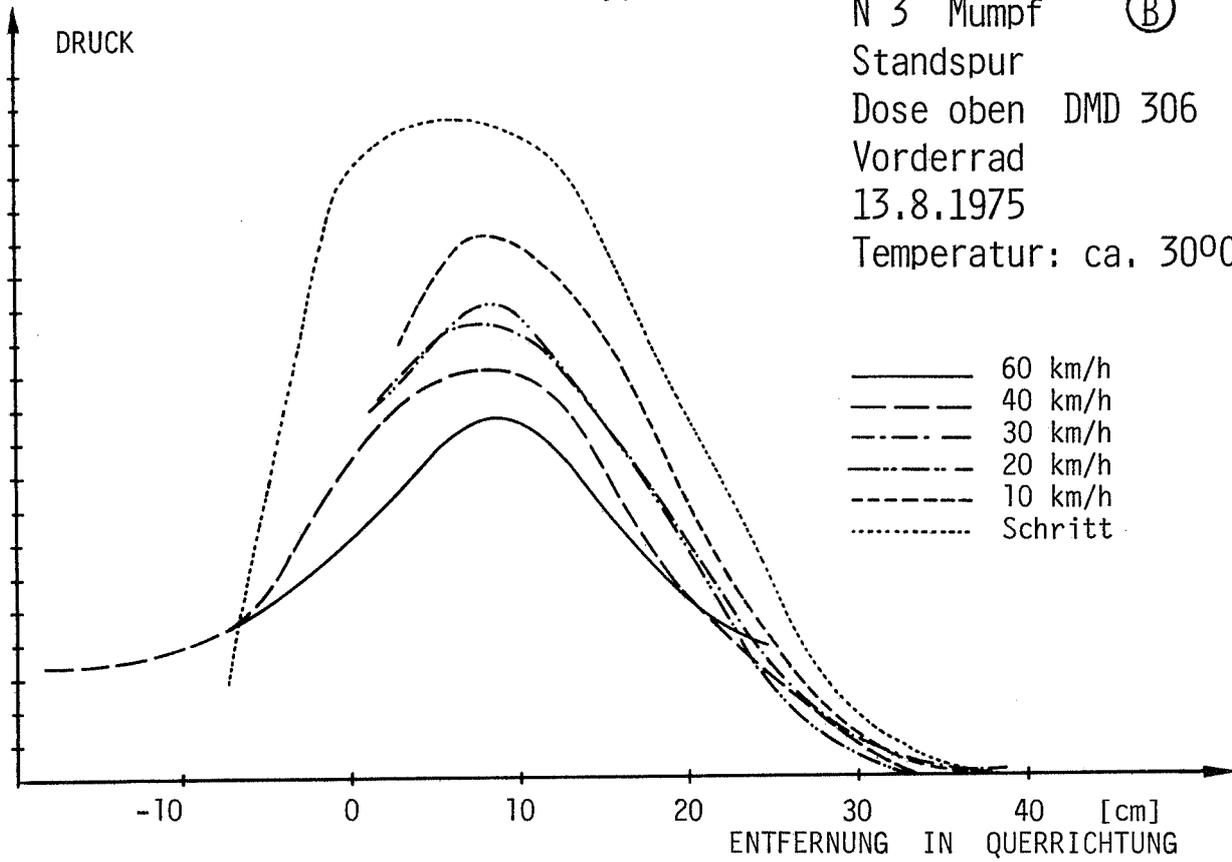
Druck

Gemessener maximaler Druck in Abhängigkeit des seitlichen Abstandes von der Spurachse des Vorderrades

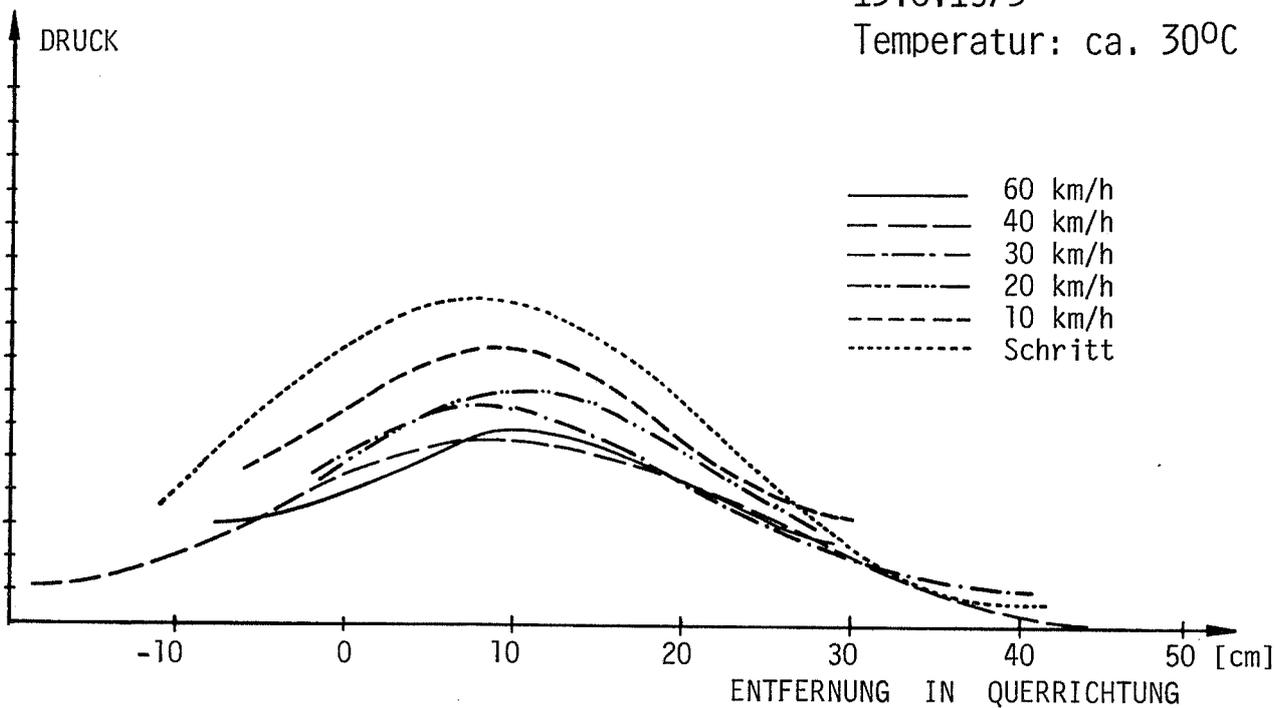




N 3 Mumpf (B)  
Standspur  
Dose oben DMD 306  
Vorderrad  
13.8.1975  
Temperatur: ca. 30°C

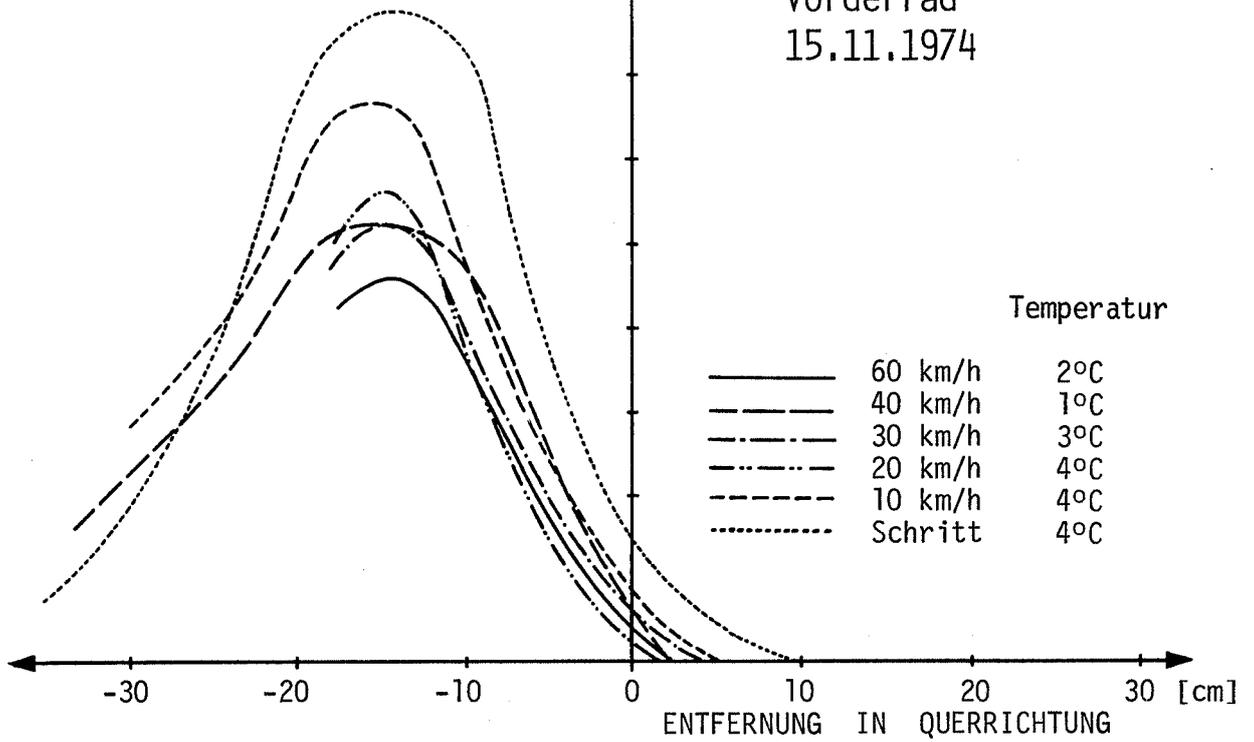


N 3 Mumpf (B)  
Standspur  
Dose unten DMD 304  
Vorderrad  
13.8.1975  
Temperatur: ca. 30°C



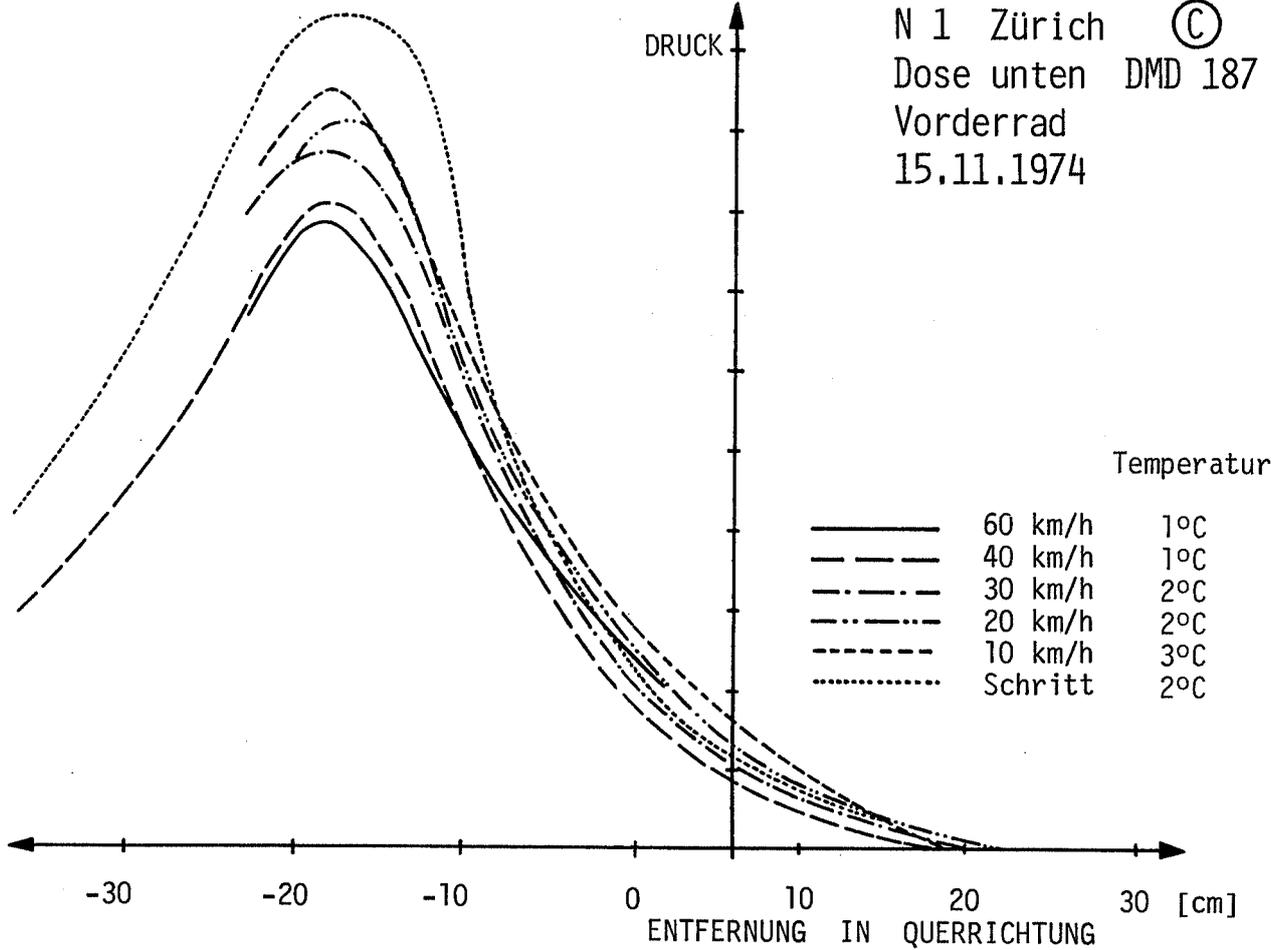
DRUCK

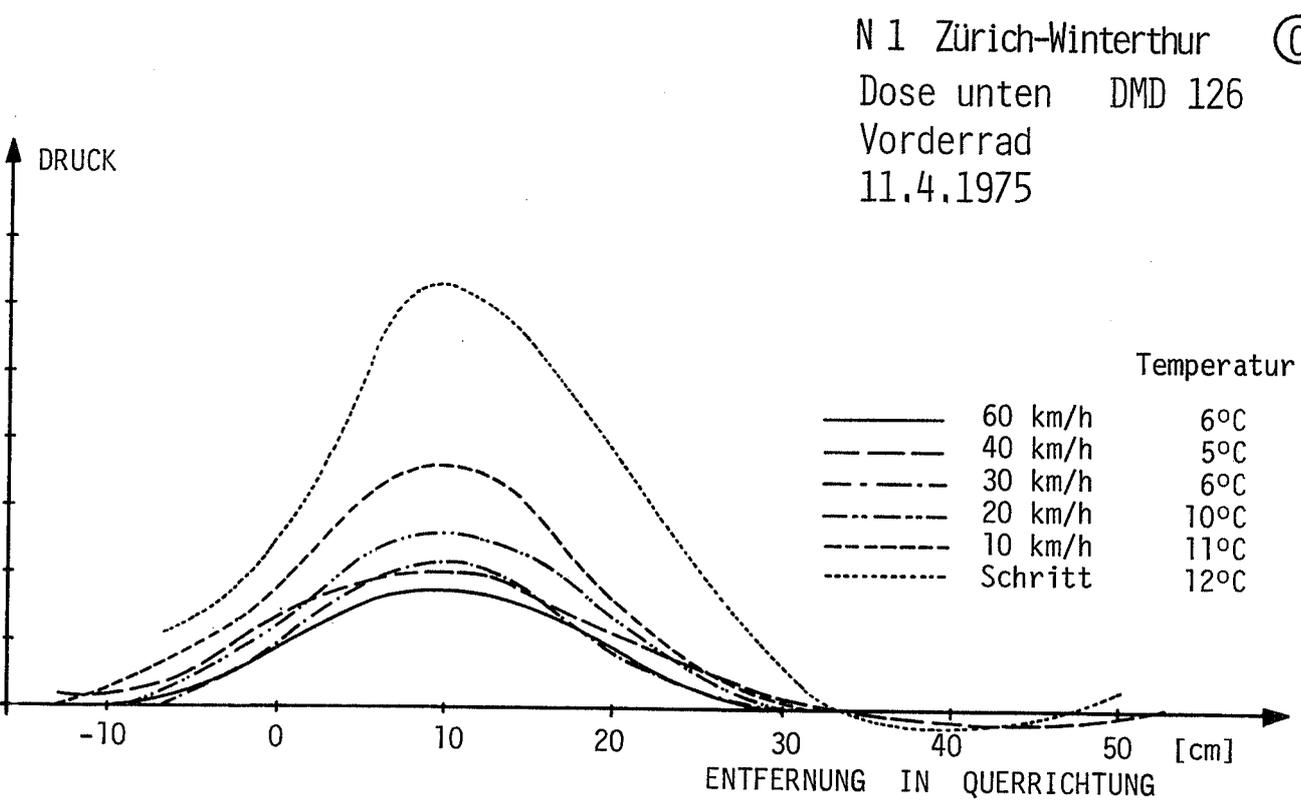
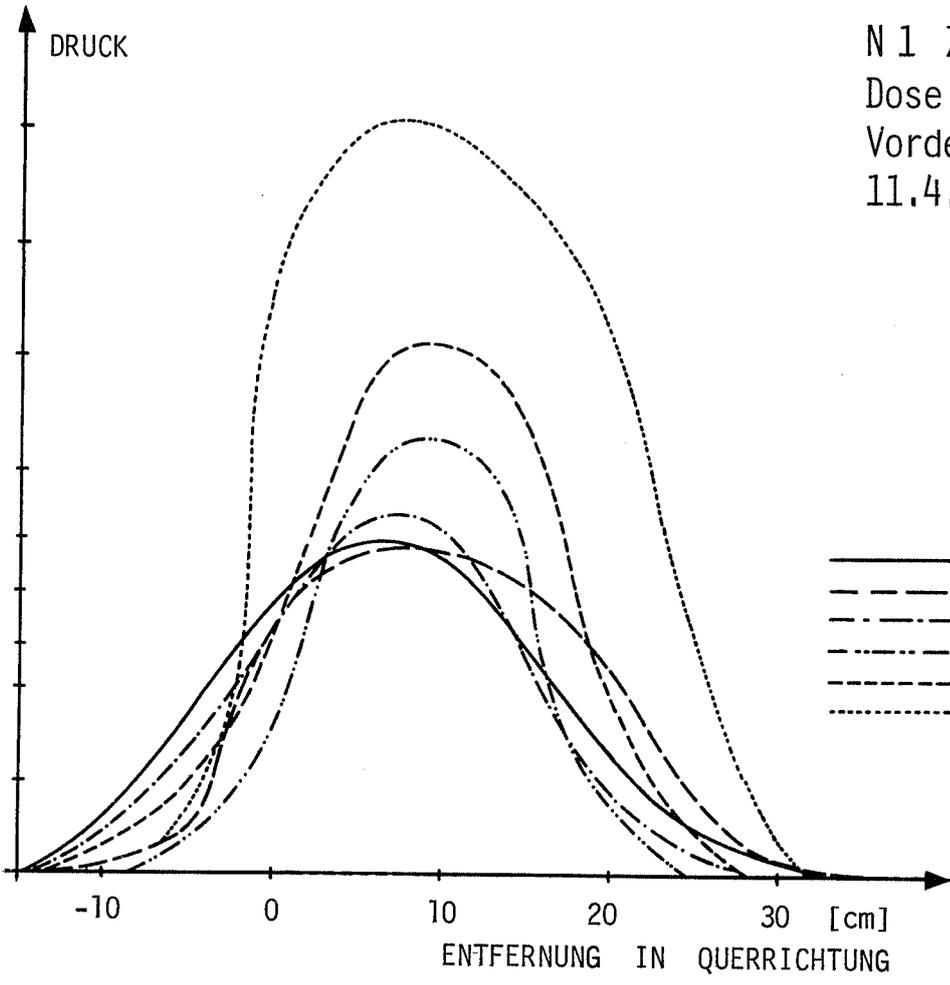
N 1 Zürich ©  
Dose oben DMD 330  
Vorderrad  
15.11.1974

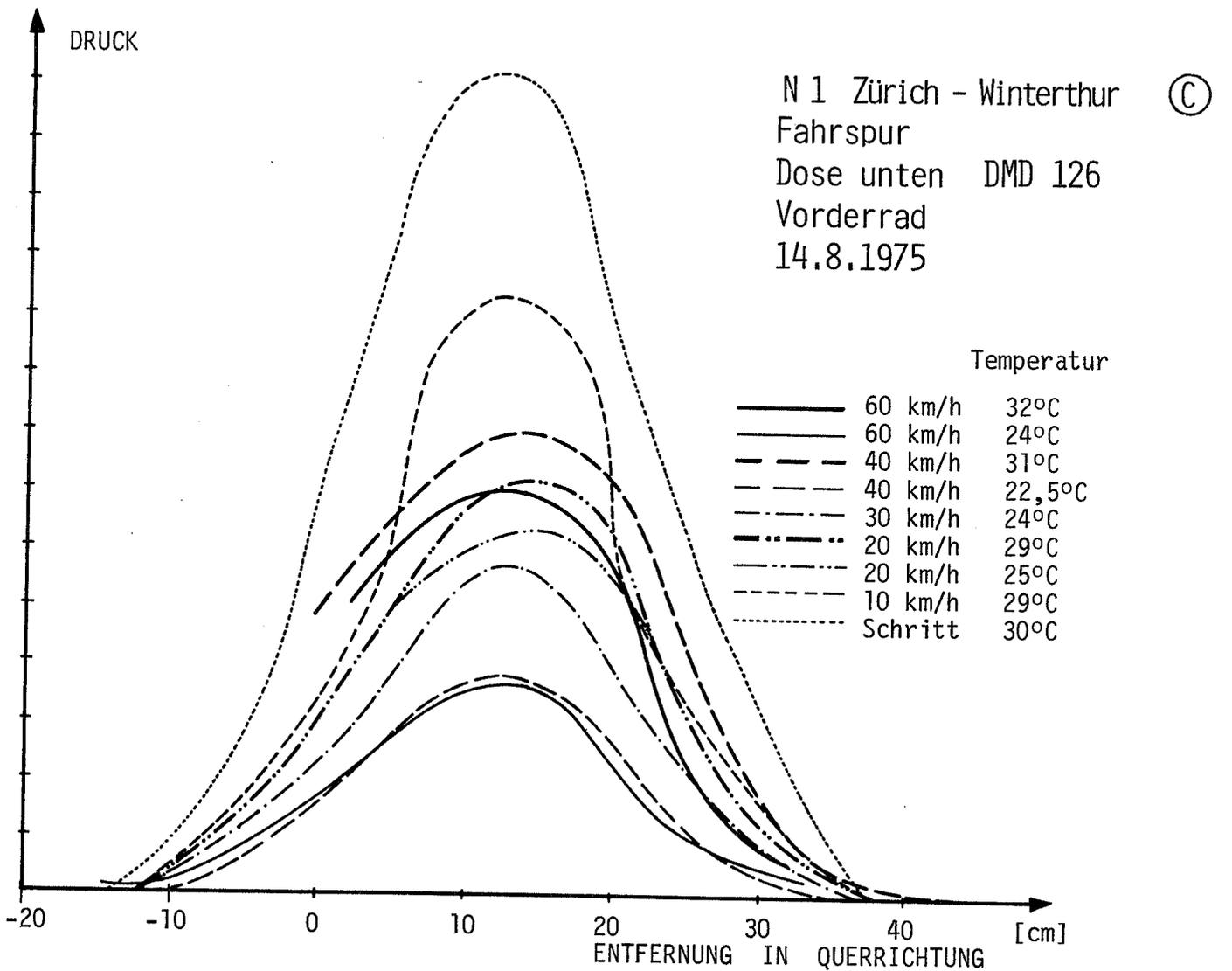
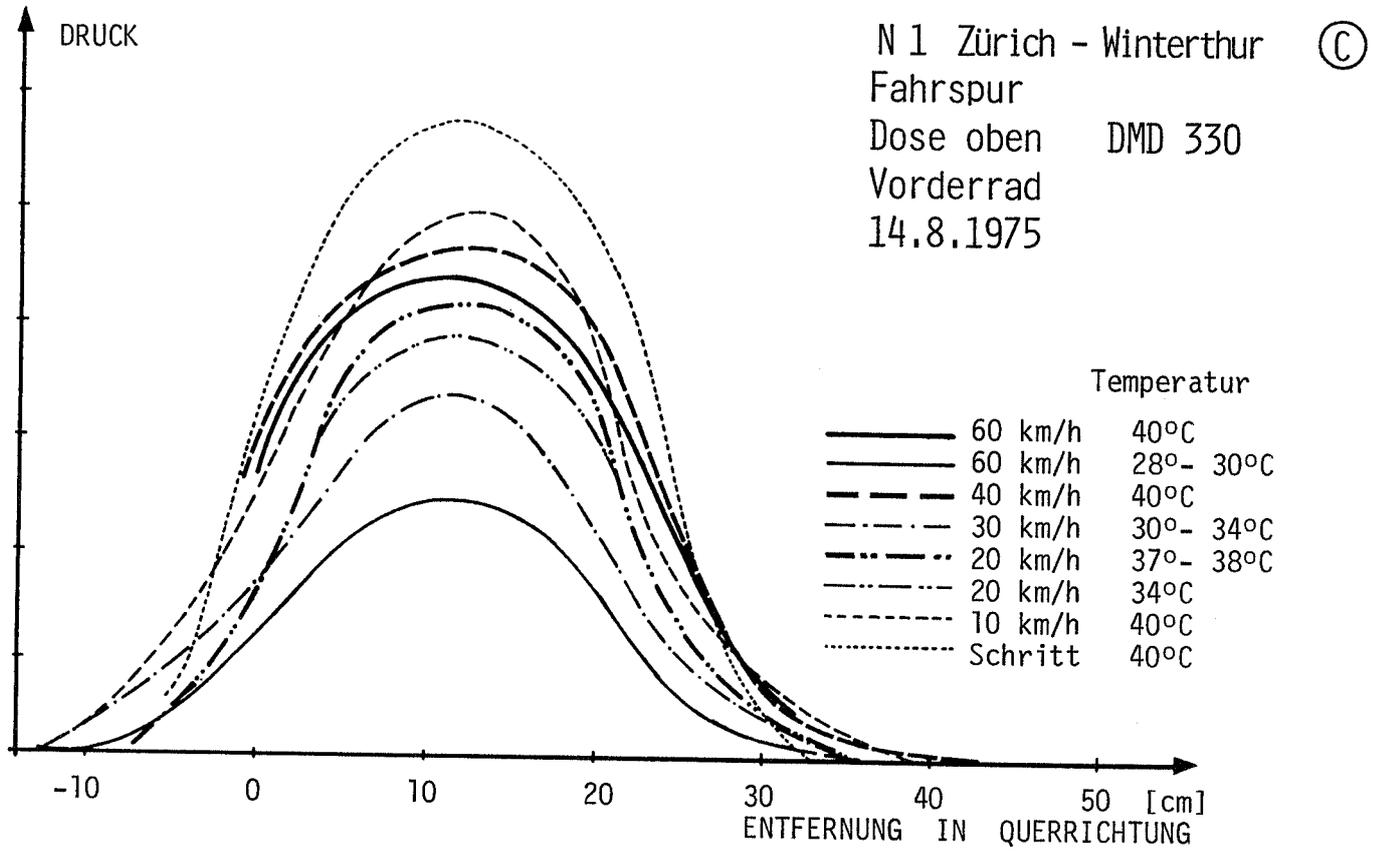


DRUCK

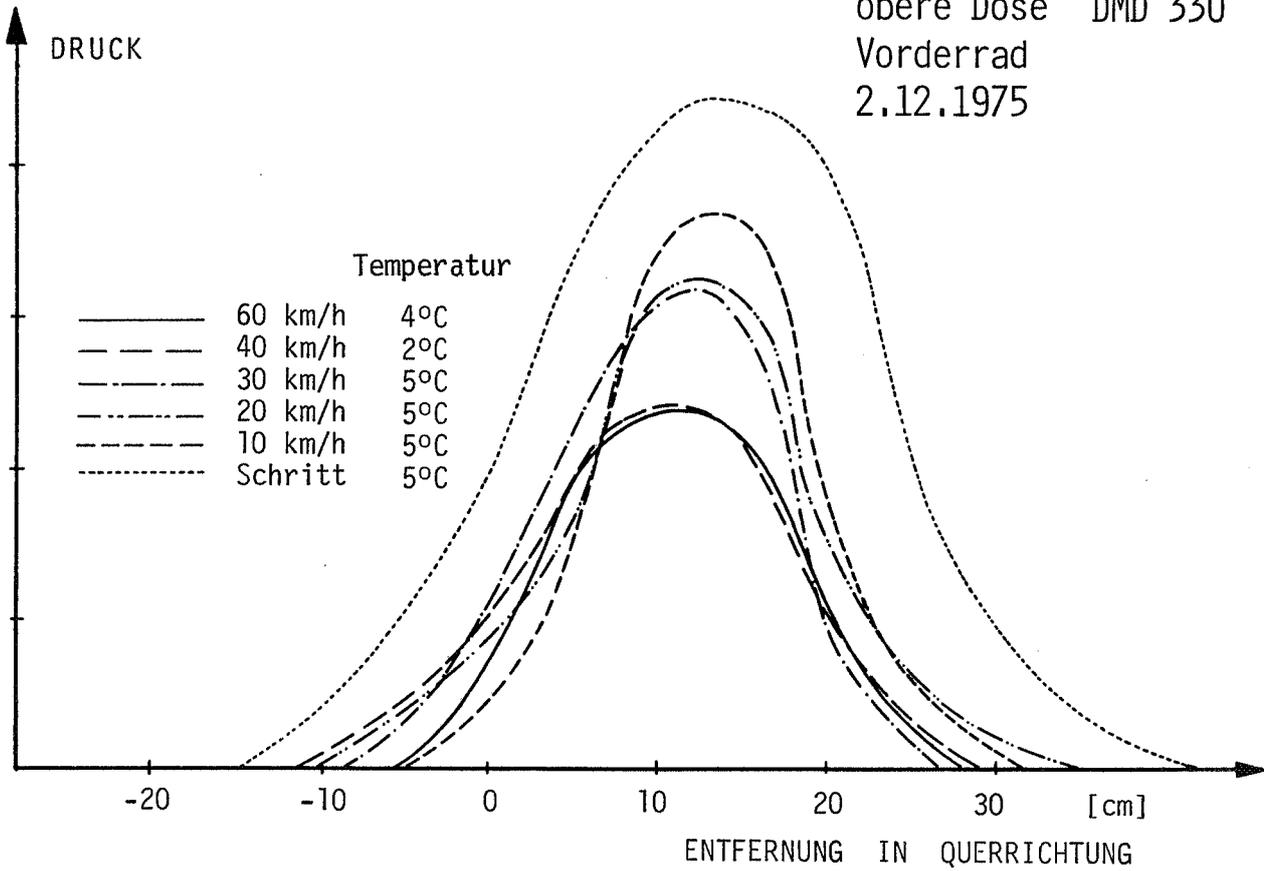
N 1 Zürich ©  
Dose unten DMD 187  
Vorderrad  
15.11.1974



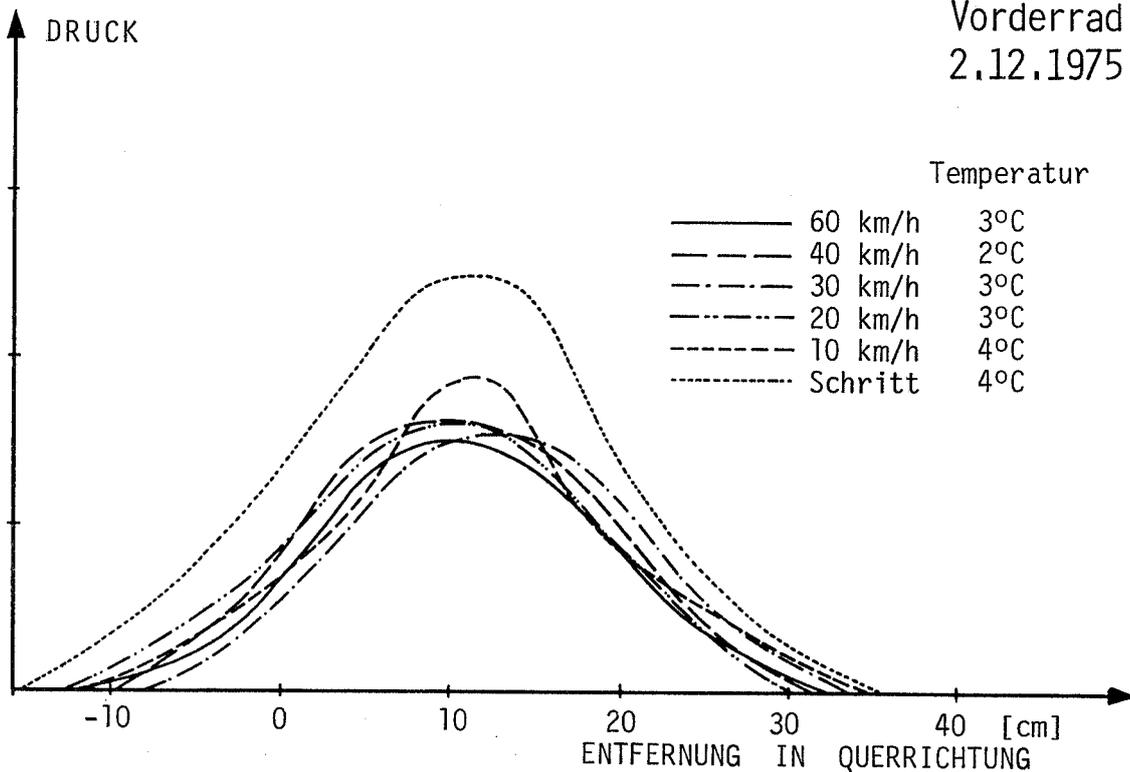




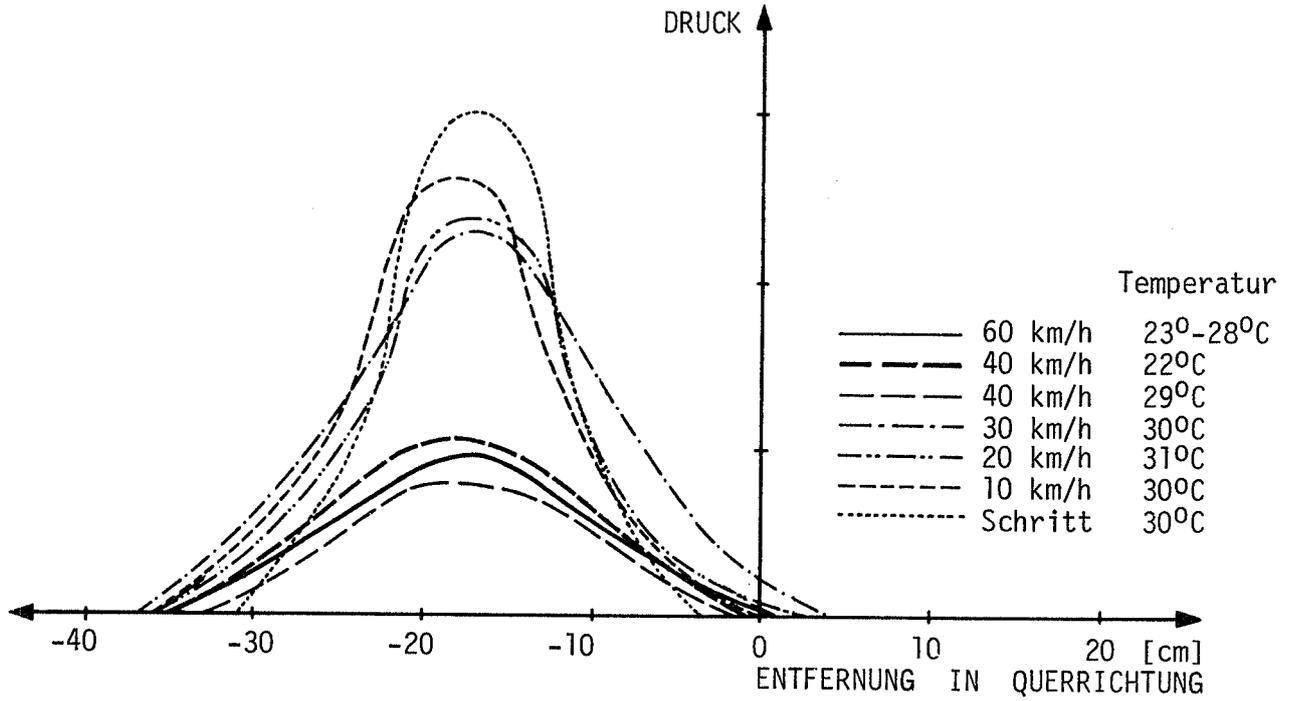
N 1 Zürich ©  
obere Dose DMD 330  
Vorderrad  
2.12.1975



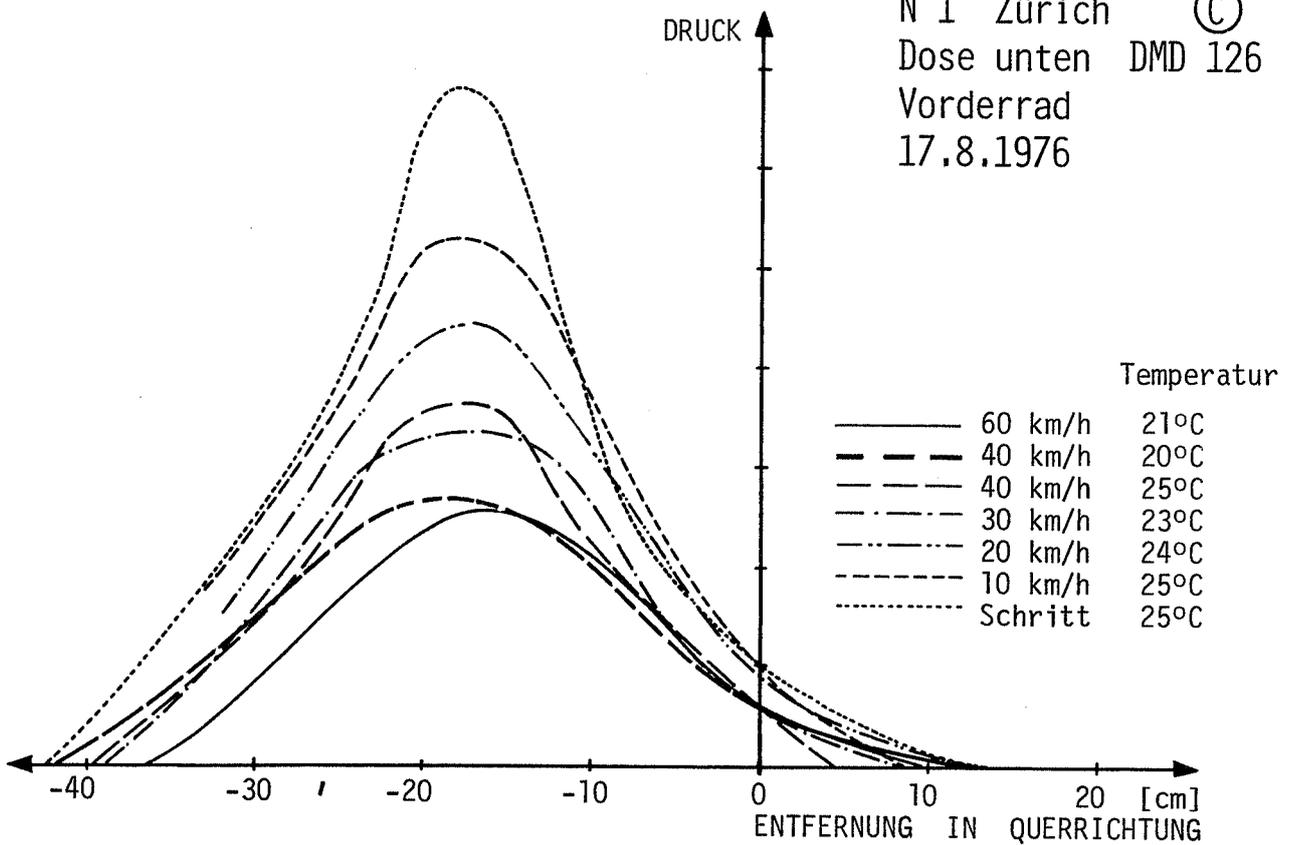
N 1 Zürich ©  
untere Dose DMD 126  
Vorderrad  
2.12.1975

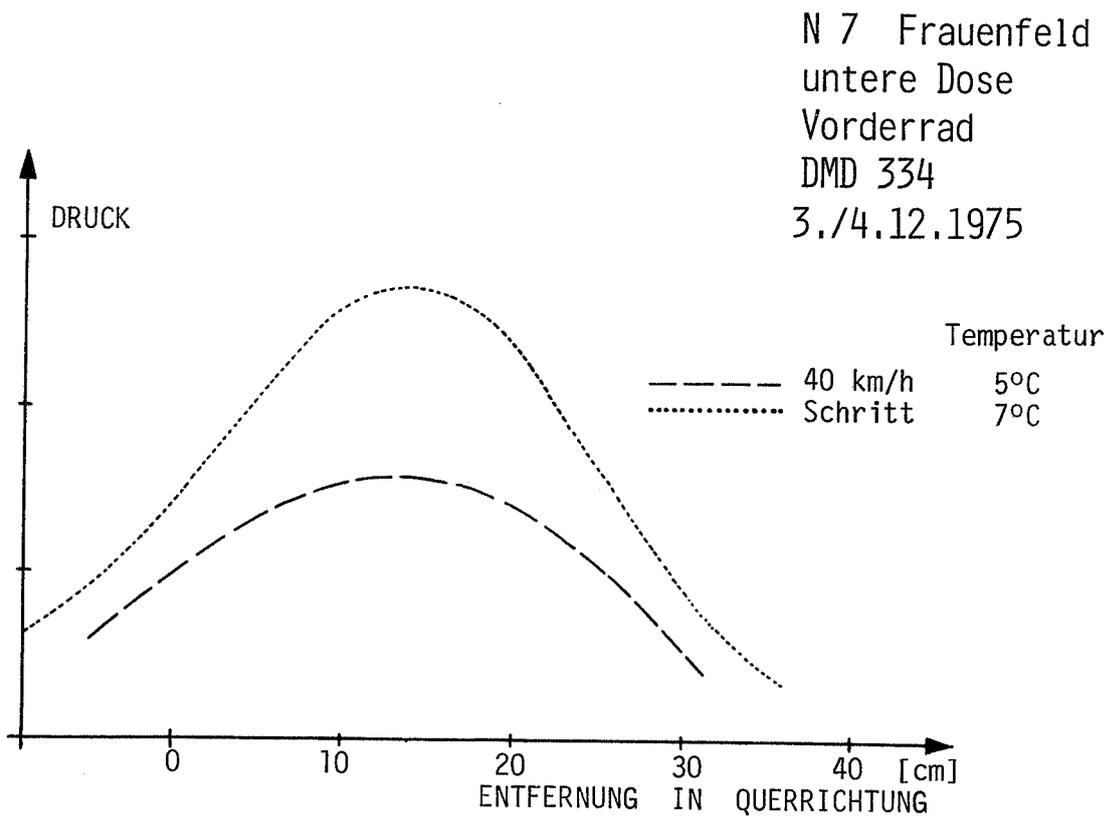
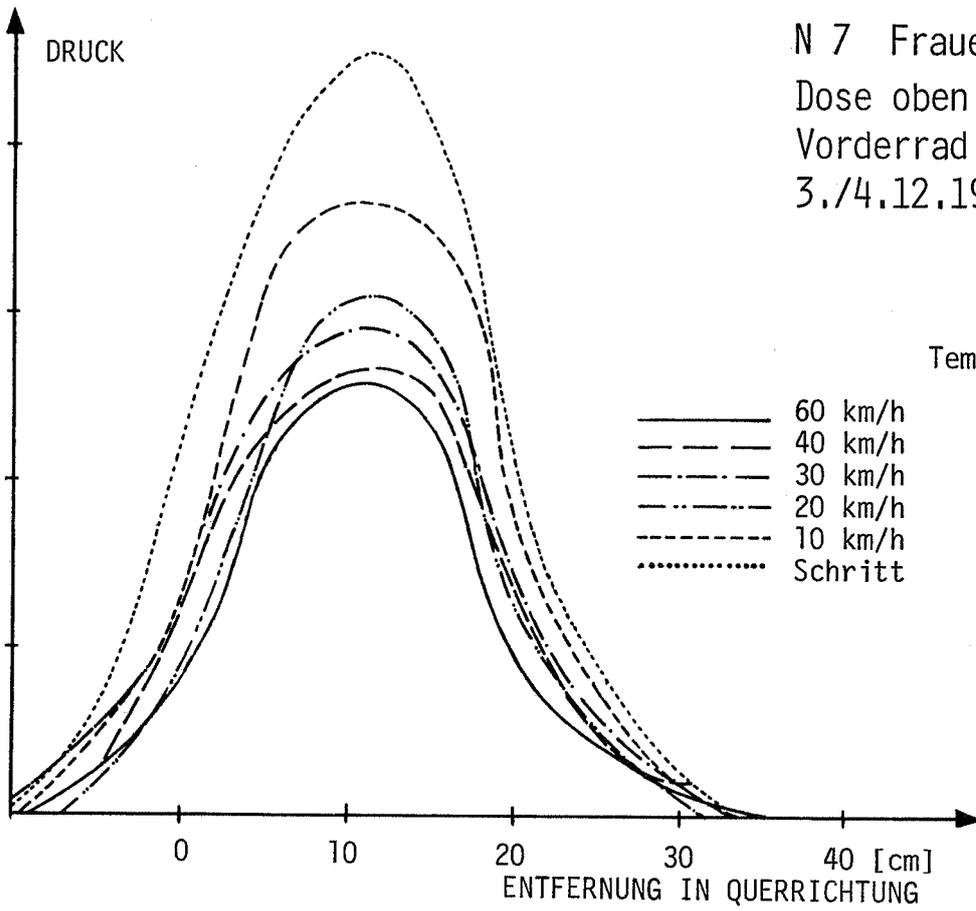


N 1 Zürich ©  
Dose oben DMD 330  
Vorderrad  
17.8.1976



N 1 Zürich ©  
Dose unten DMD 126  
Vorderrad  
17.8.1976





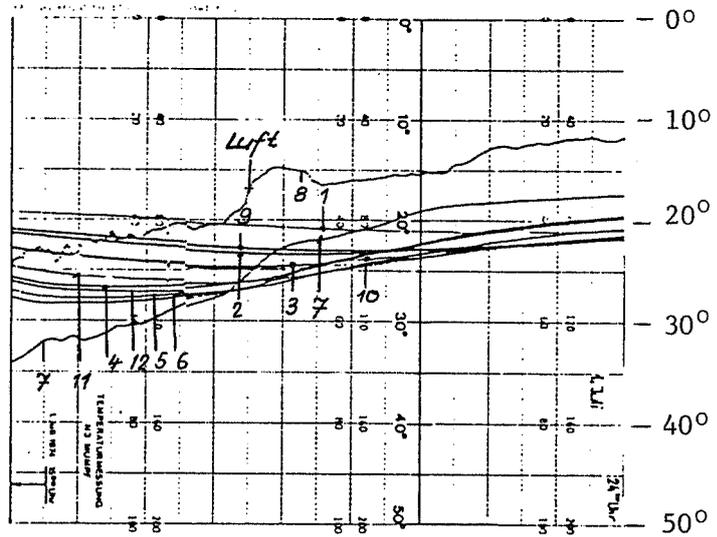
A N H A N G    I I I

TEMPERATUR

Tagesganglinien



Temperaturmessungen (A)  
N3 Mumpf  
vom 1. Juli 1974



Temperaturmessungen (A) (oben)

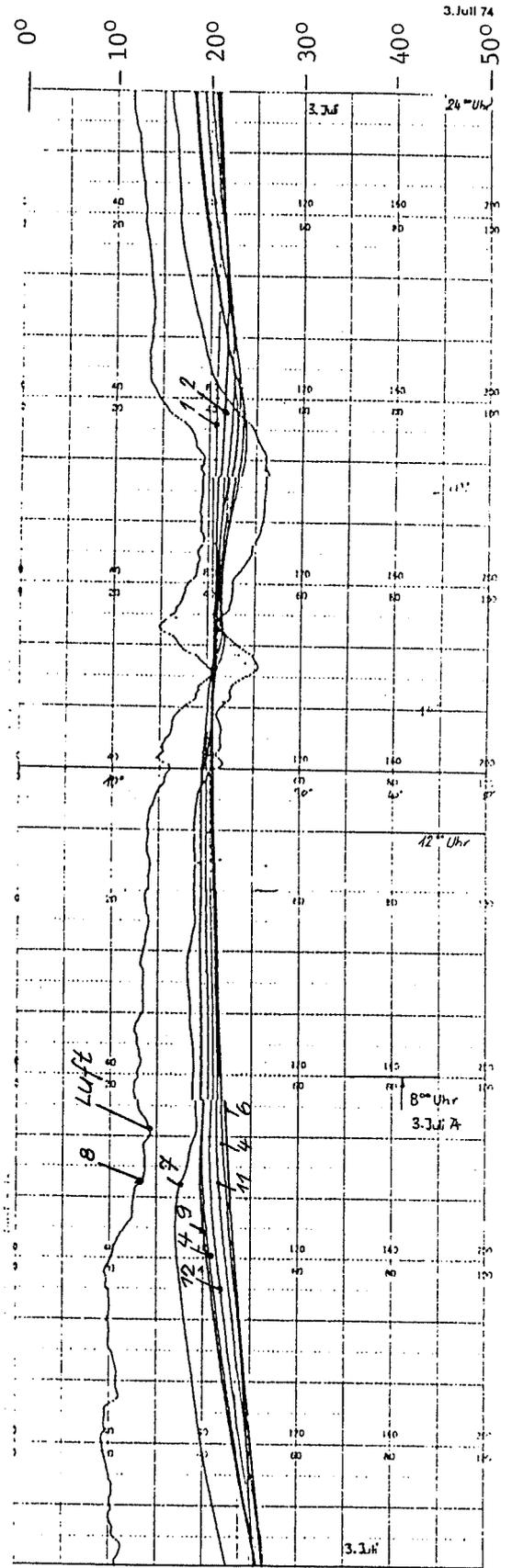
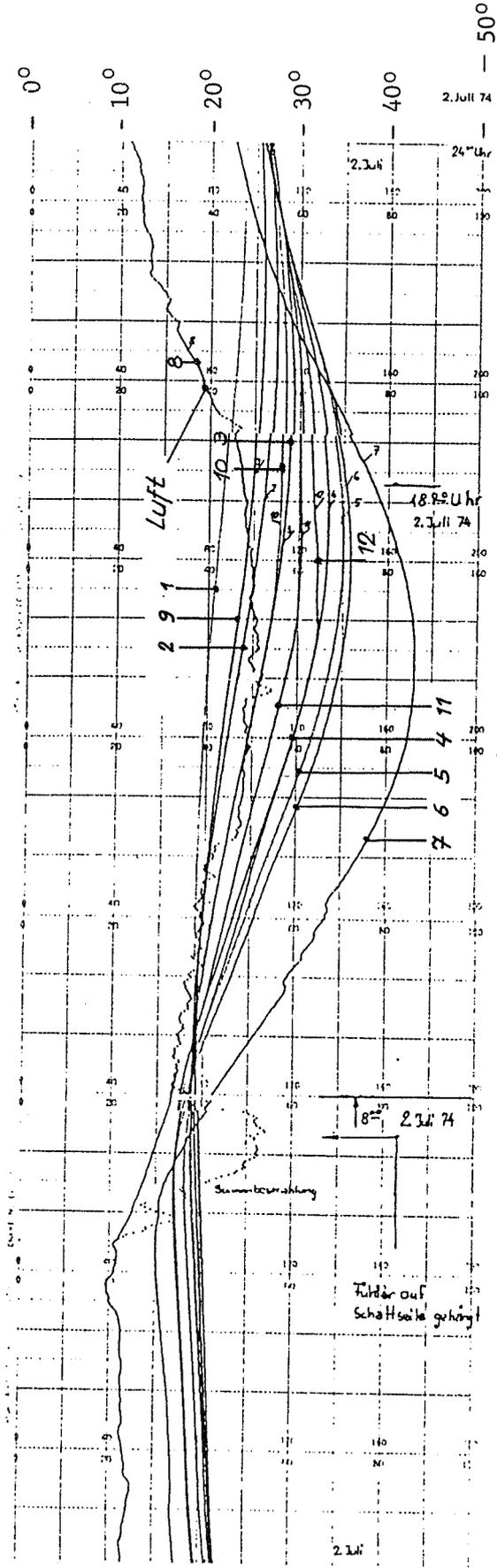
N3 Mumpf

vom 2. Juli 1974

Temperaturmessungen (A) (unten)

N3 Mumpf

vom 3. Juli 1974

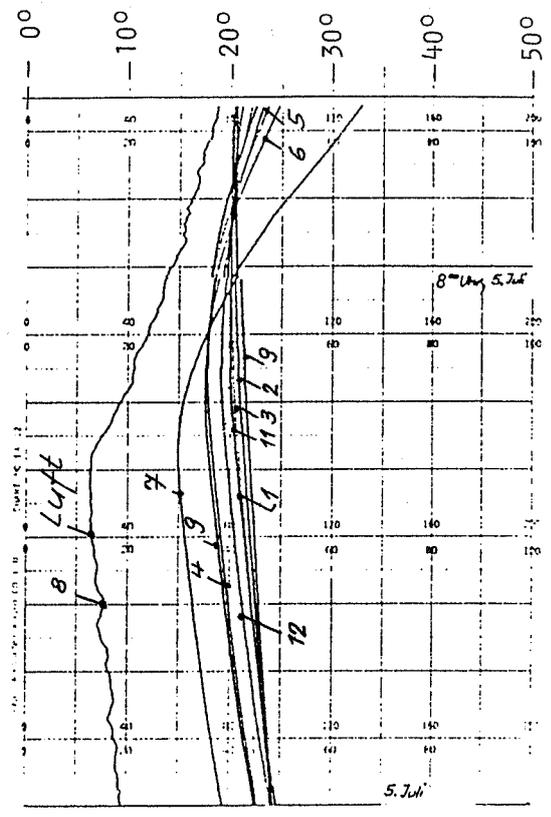
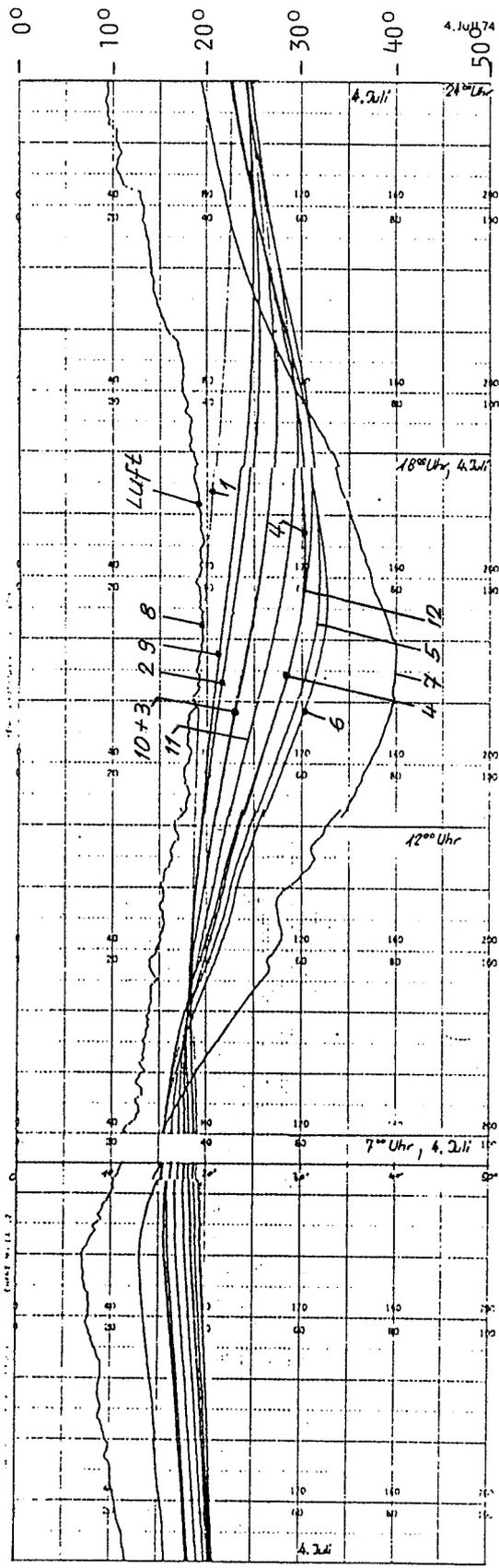


(A)

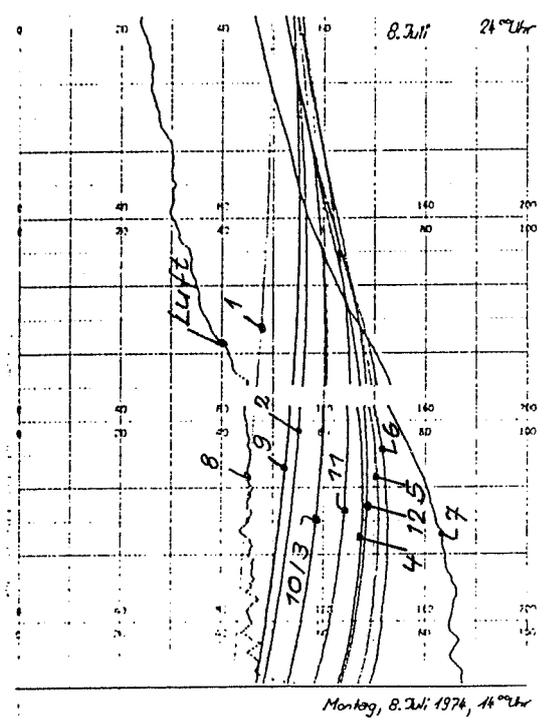
Temperaturmessungen

N3 Mumpf

vom vom 4., 5. und 8. Juli 1974

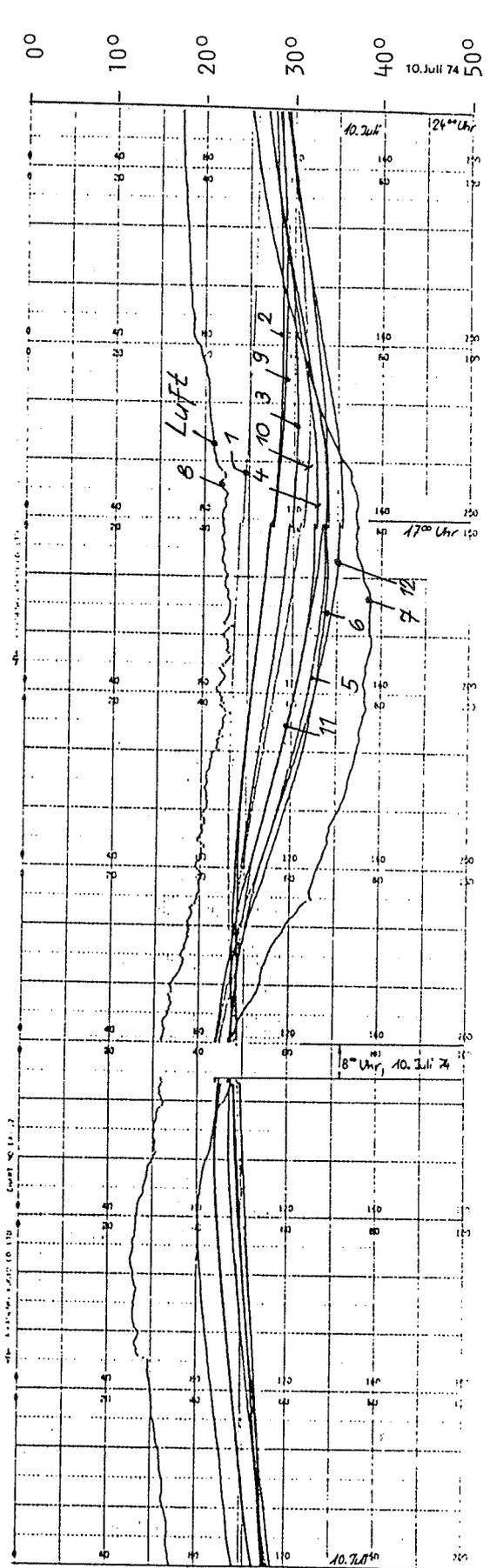
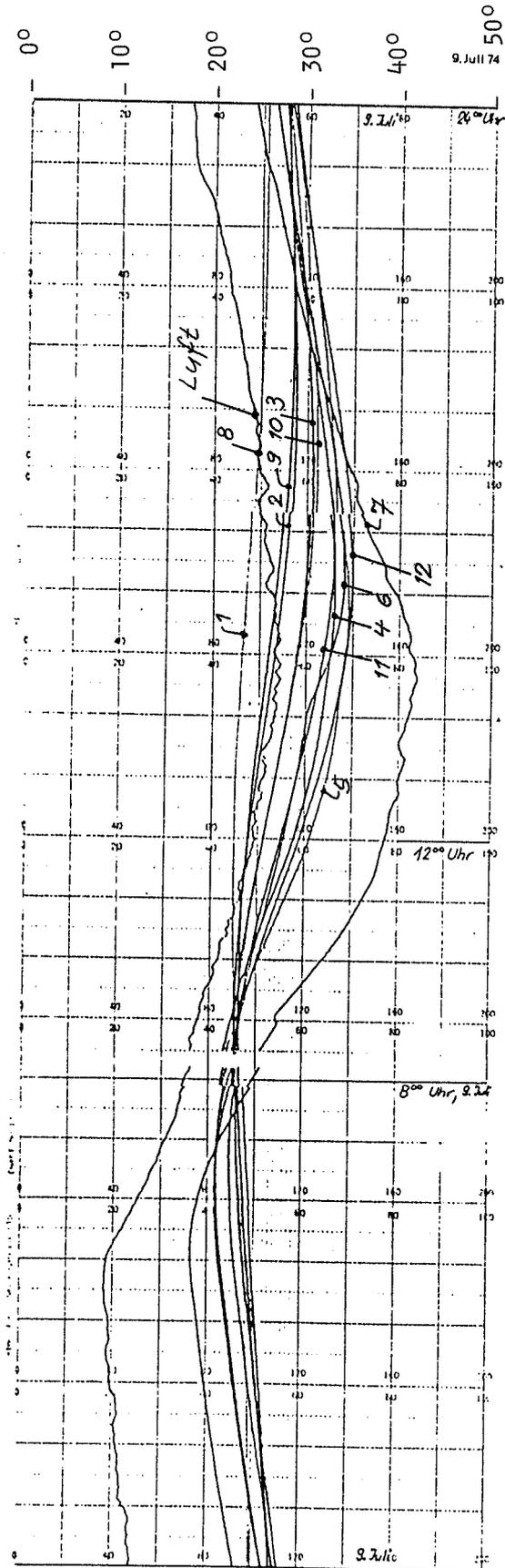


8. Juli 74



(A)

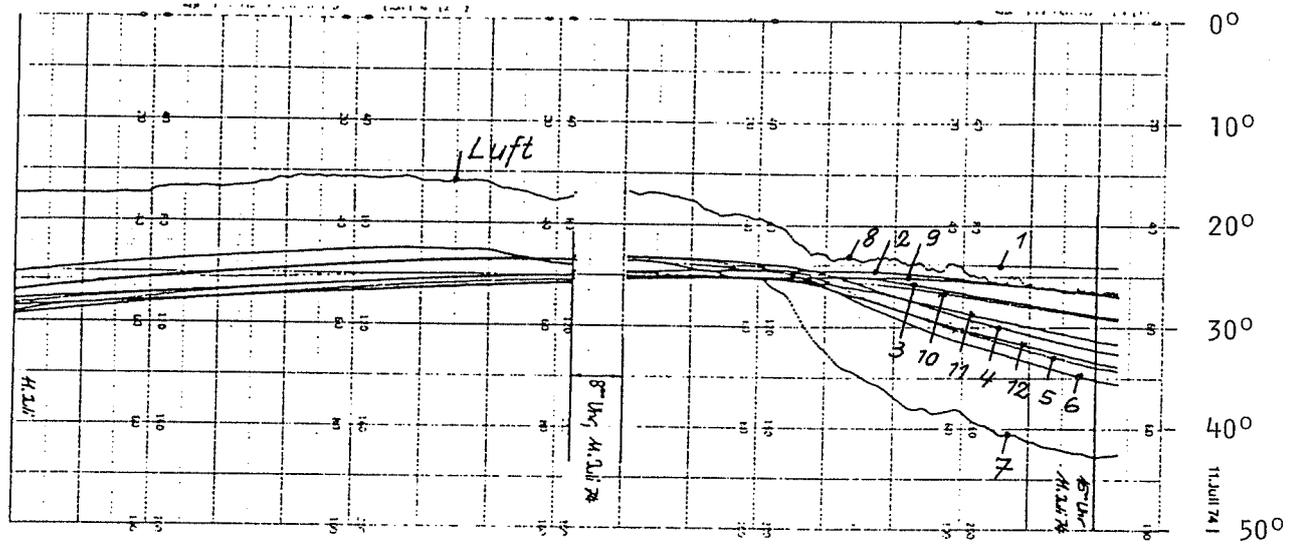
Temperaturmessungen  
N3 Mumpf  
vom 9. und 10. Juli 1974



Temperaturmessungen  
N3 Mumpf

(A)

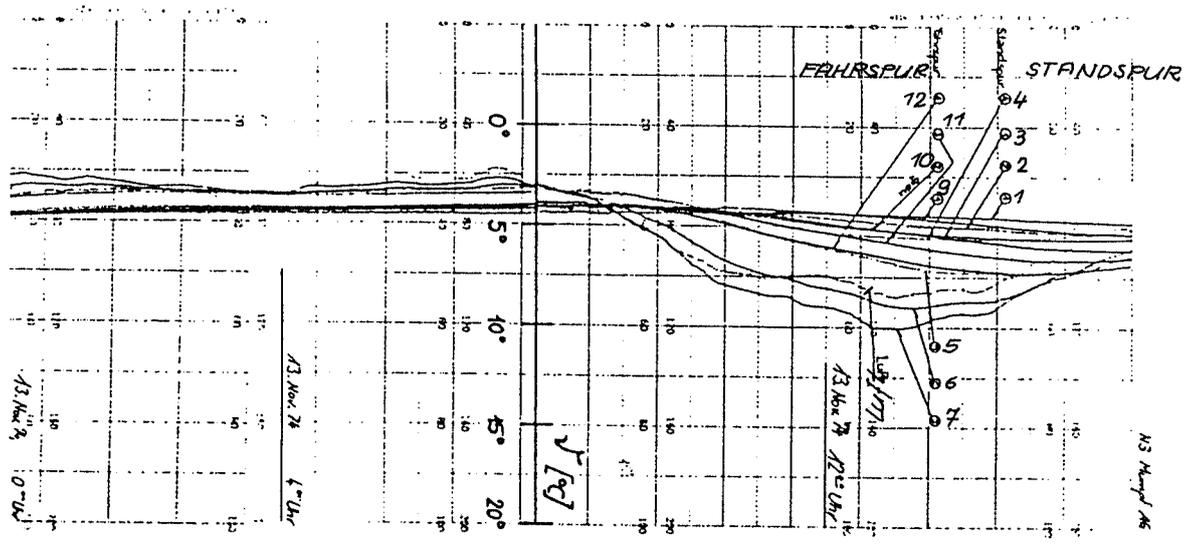
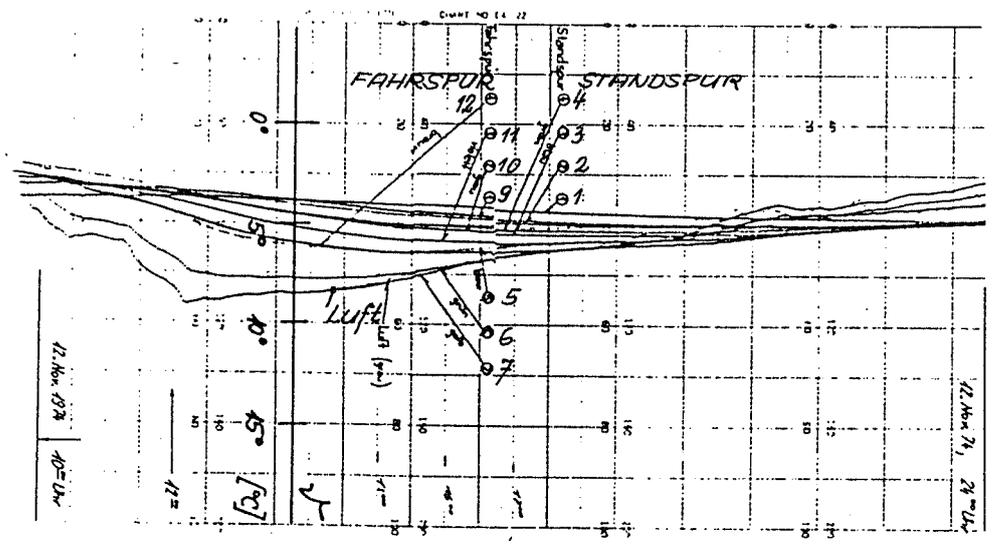
vom 11. Juli 1974



Temperaturmessungen  
N3 Mumpf

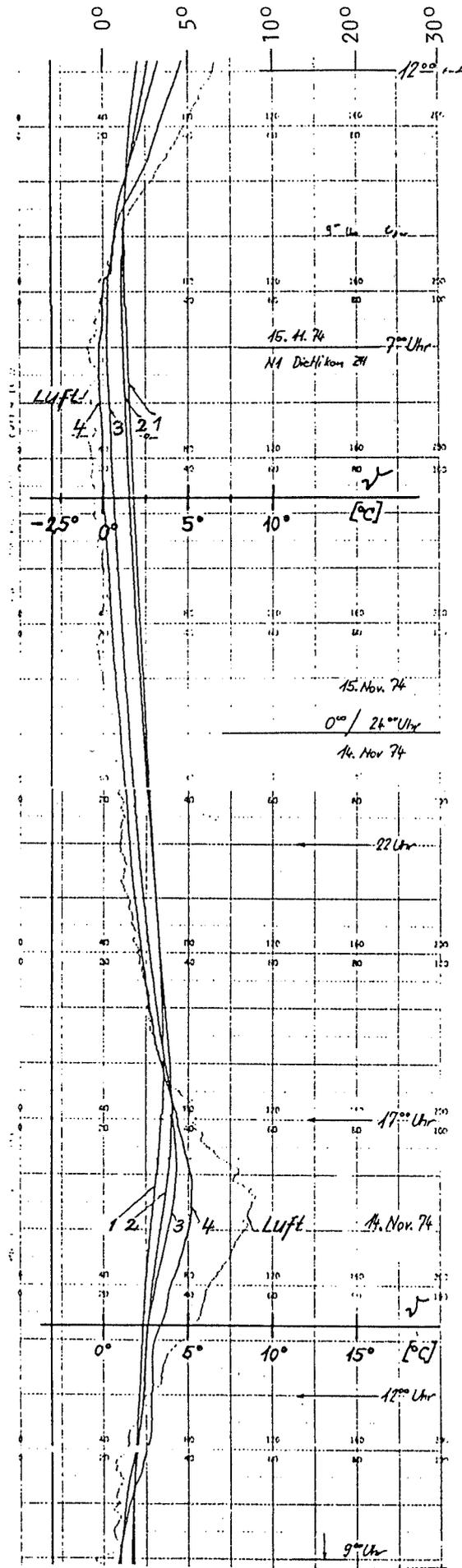
(A)

vom 12. und 13. November 1974



Temperaturmessungen  
N3 Mumpf  
vom 14. und 15. November 1974

(A)

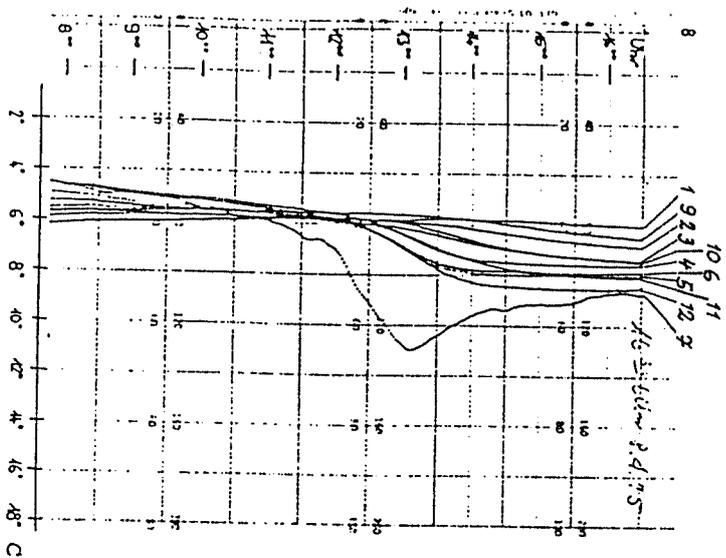


Mess-Stelle N3 Mumpf AG, Dienstag 8. April 1975

Temperaturmessung  
N3 Mumpf  
vom 8. April 1975

(A)

Kanäle 1-7 : Standspur Nr. 417  
Kanäle 8-12 : Fahrspur Nr. 114  
Kanal 8 : mit angeklebtem (von Luftfühler)



Mess-Stelle N3 Mumpf AG Mittwoch 9 April 1975

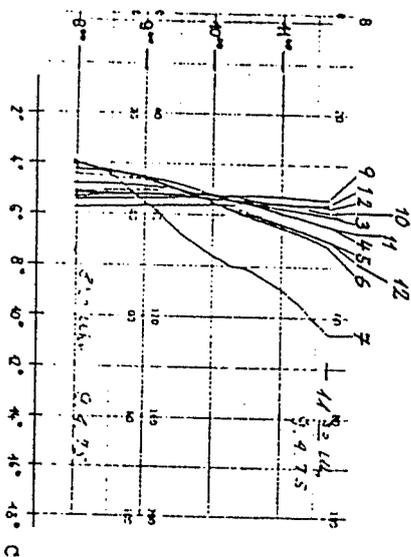
Temperaturmessung  
N3 Mumpf  
vom 9. April 1975

(A)

Fühlerlage  
-2 cm Nr. 7  
-6 cm Nr. 6  
-10 cm Nr. 5  
-14 cm Nr. 4  
-18 cm Nr. 3  
-24 cm Nr. 2  
-30 cm Nr. 1

(kein Luftfühler)

Fahr- und Standspur identischer Aufbau.  
der Fühlerlage (hier aber der Standspur)



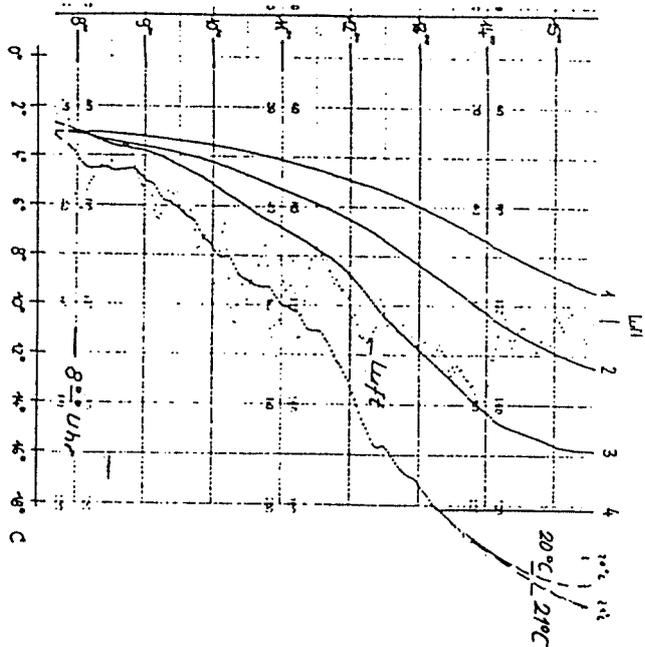
Mess-Stelle N1 Dietlikon, Freitag 11. April 1975

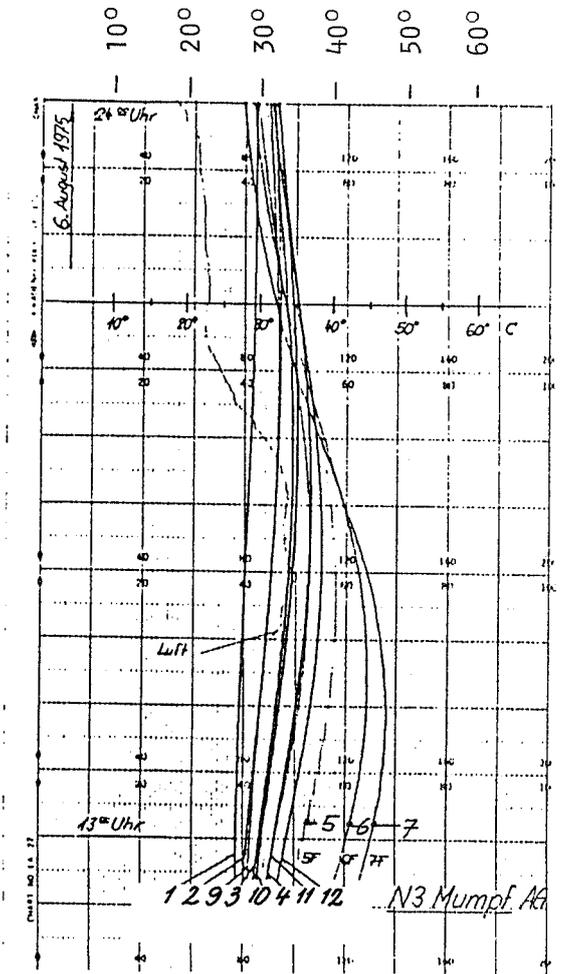
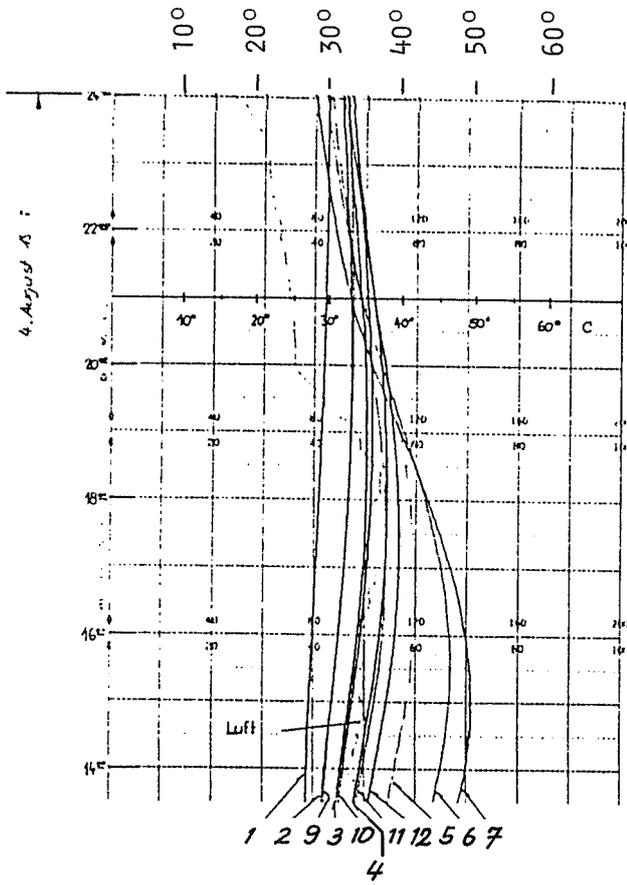
Temperaturmessung  
N1 Dietlikon  
vom 11. April 1975

(C)

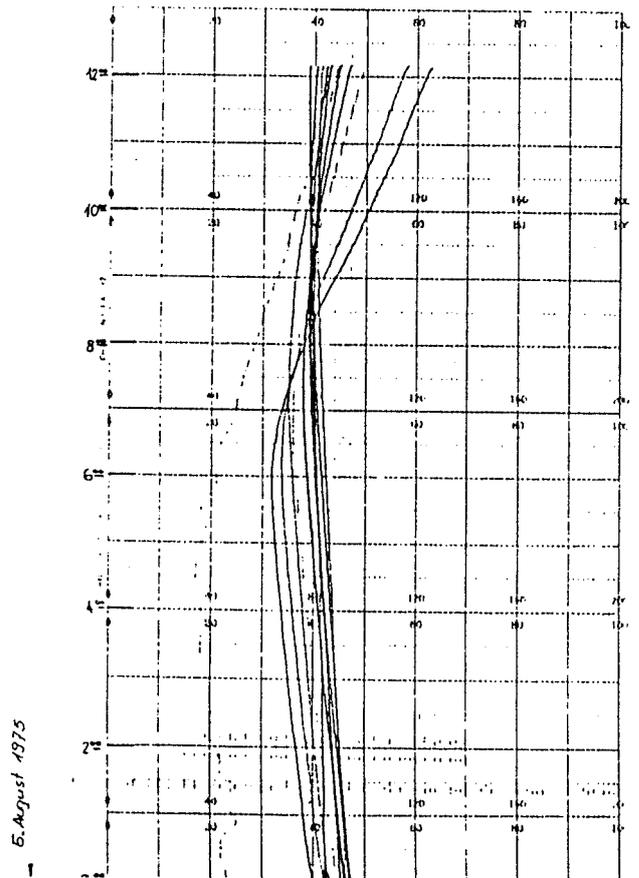
1.2 -21 cm  
2.2 -12 cm  
3.2 -6 cm  
4.2 -2 cm

ab Oberfläche gemessen

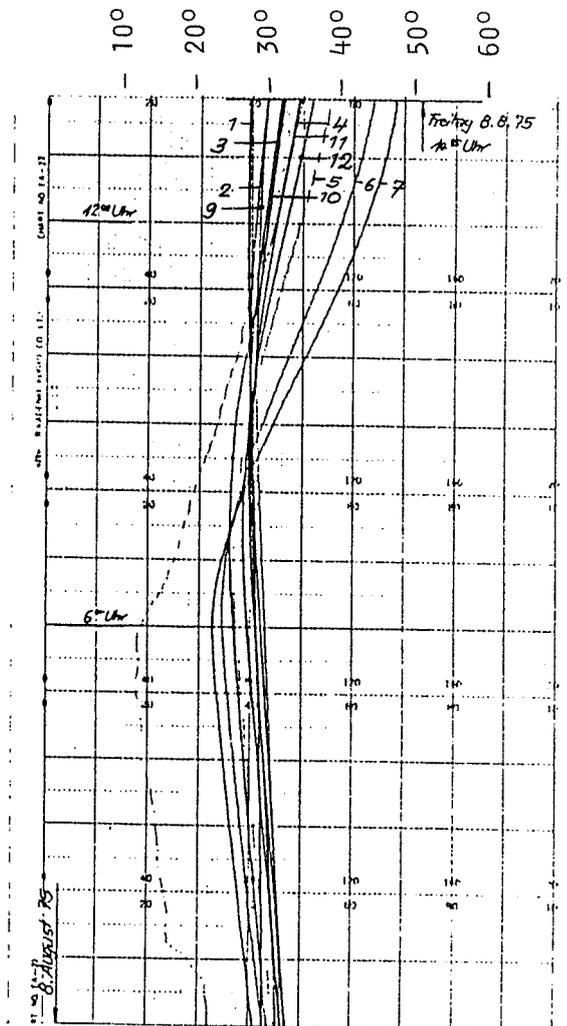
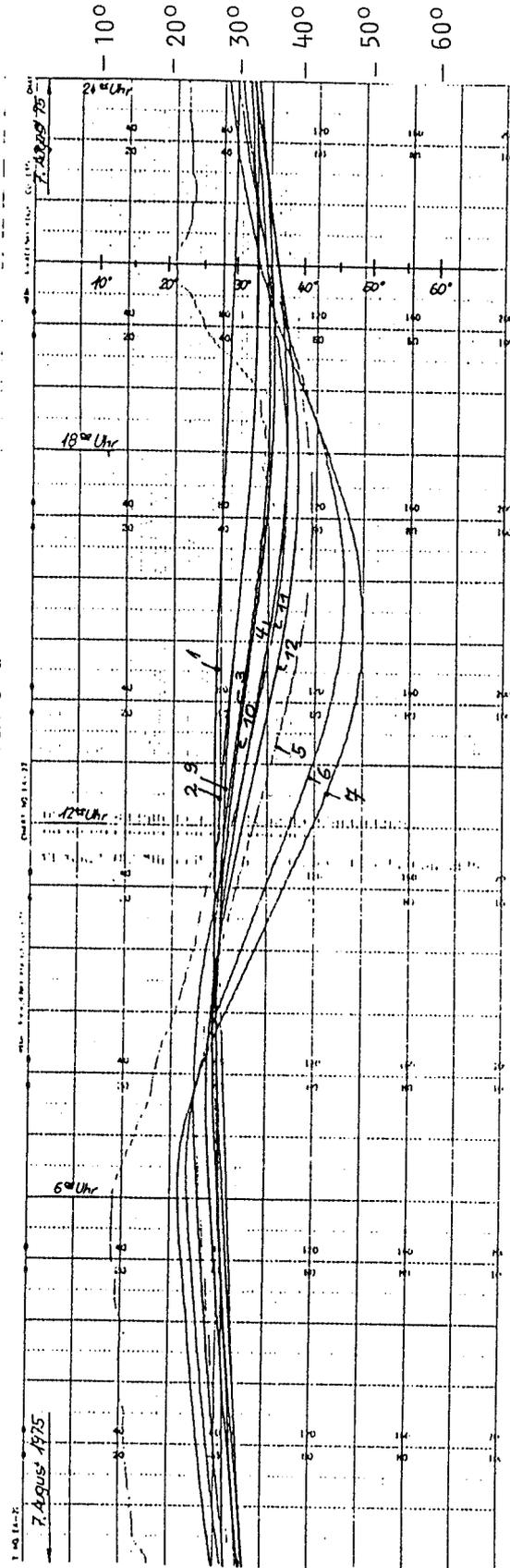




Temperaturmessungen (A)  
N3 Mumpf  
vom 4. bis 6. August 1975

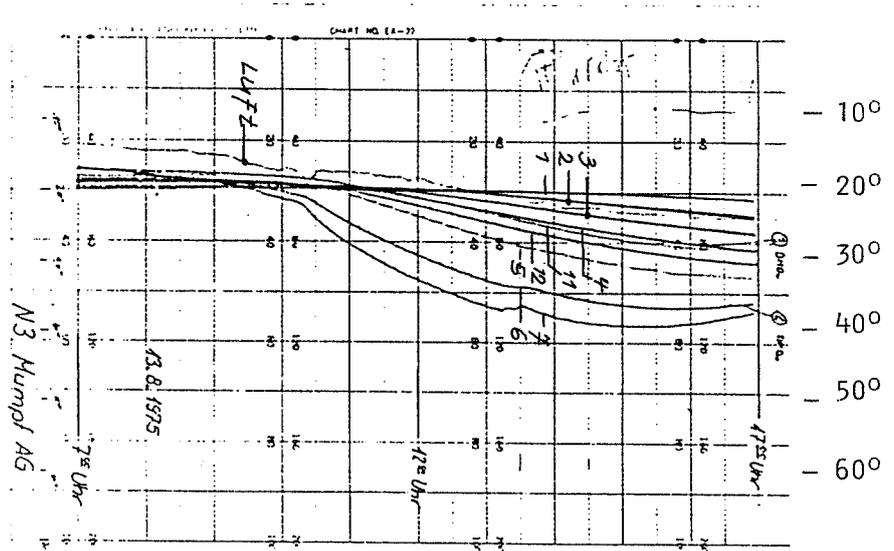
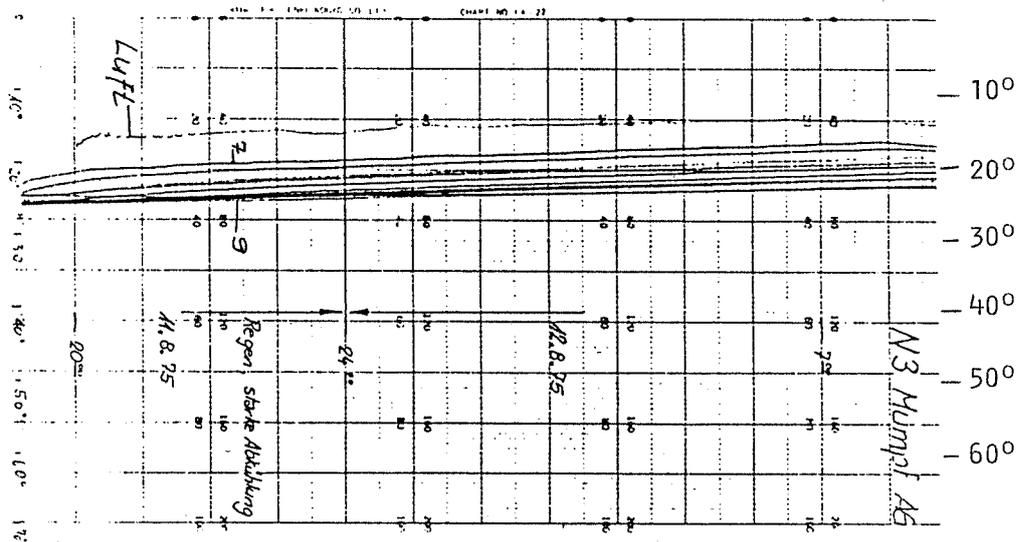


Temperaturmessungen (A)  
N3 Mumpf  
vom 7. und 8. August 1975



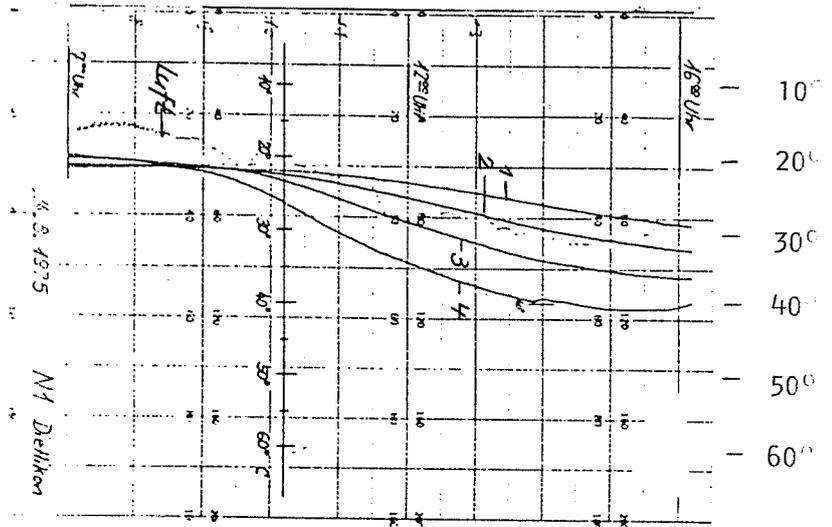
Temperaturmessungen  
N3 Mumpf  
vom 11., 12. und 13. August 1975

(A)



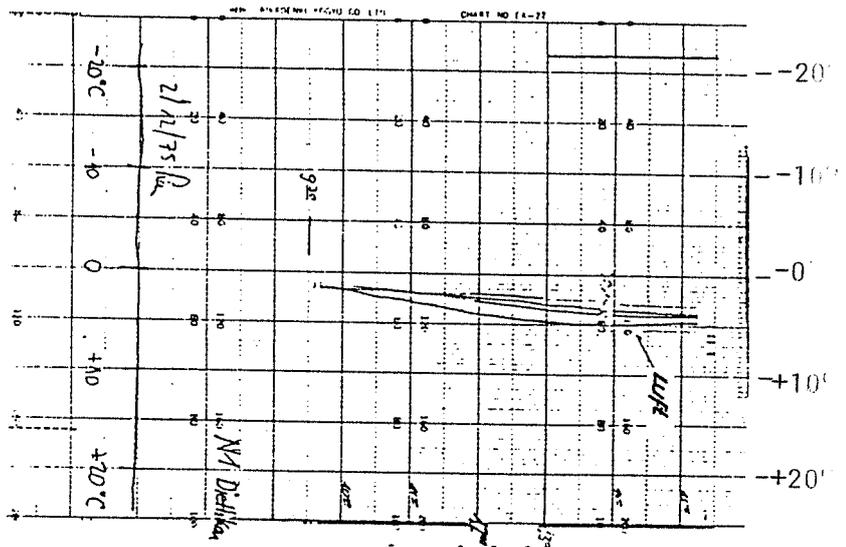
Temperaturmessungen  
N1 Dietlikon  
vom 14. August 1975

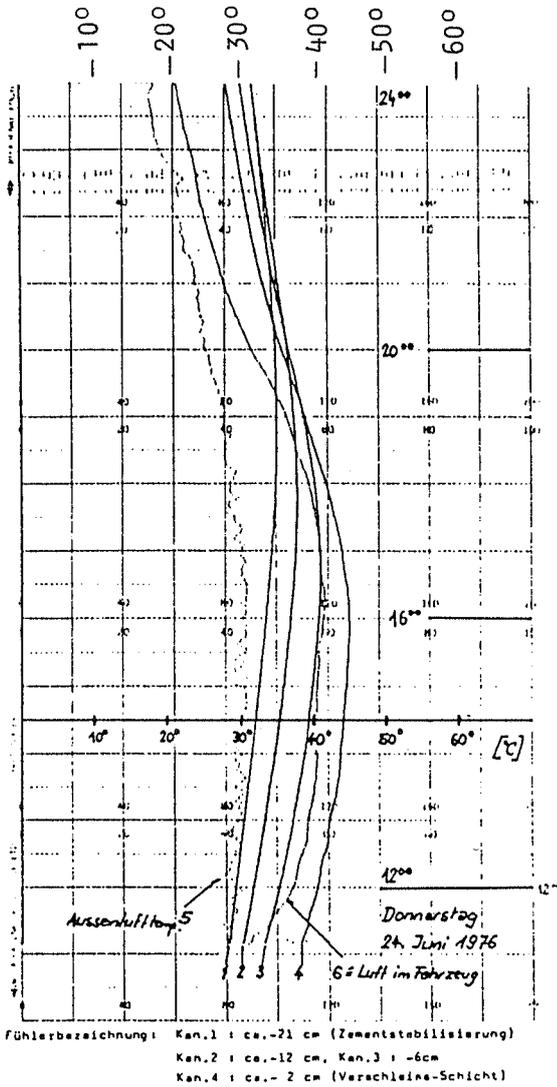
Ⓒ



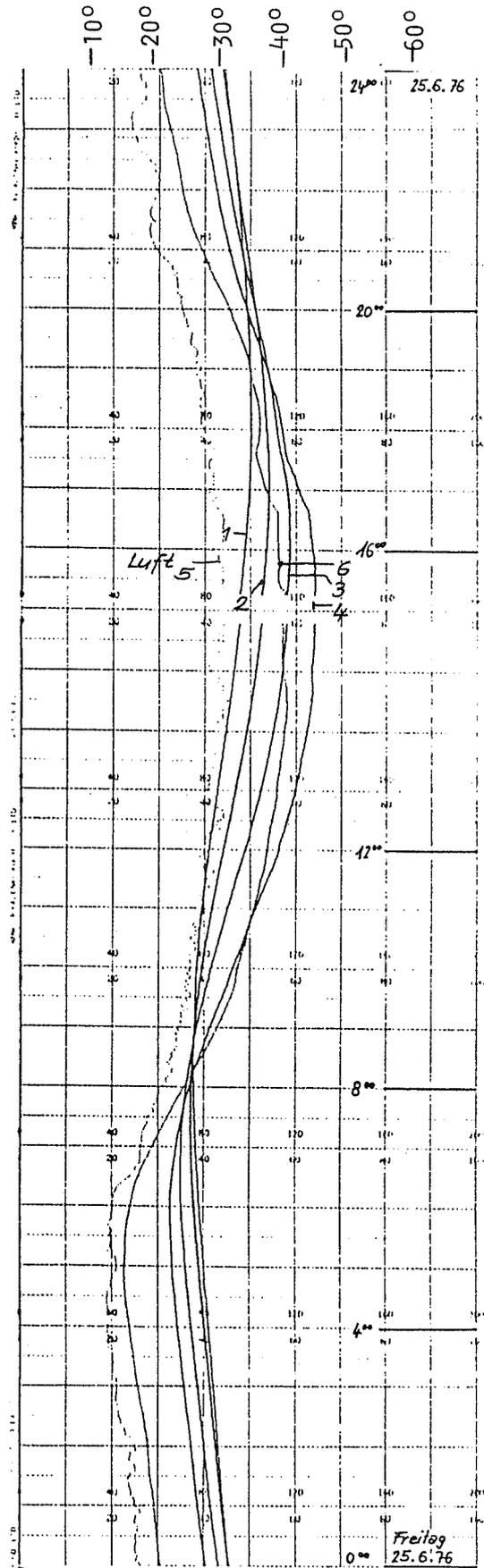
Temperaturmessungen  
N1 Dietlikon  
vom 2. Dezember 1975

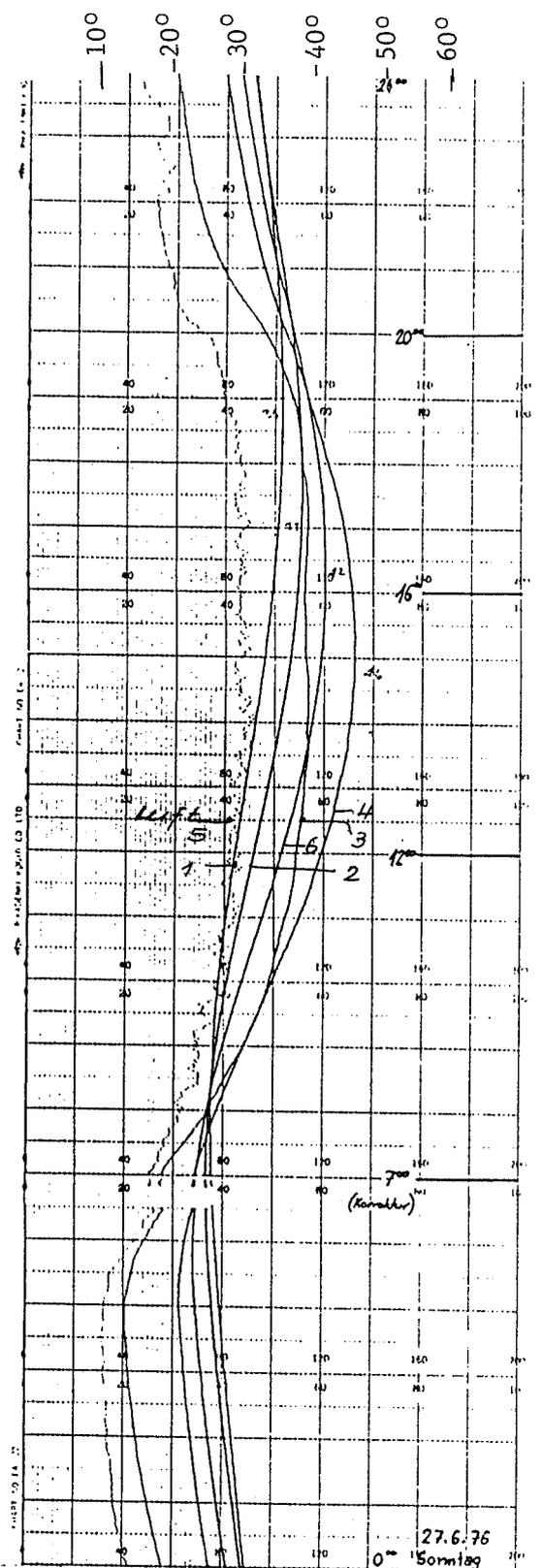
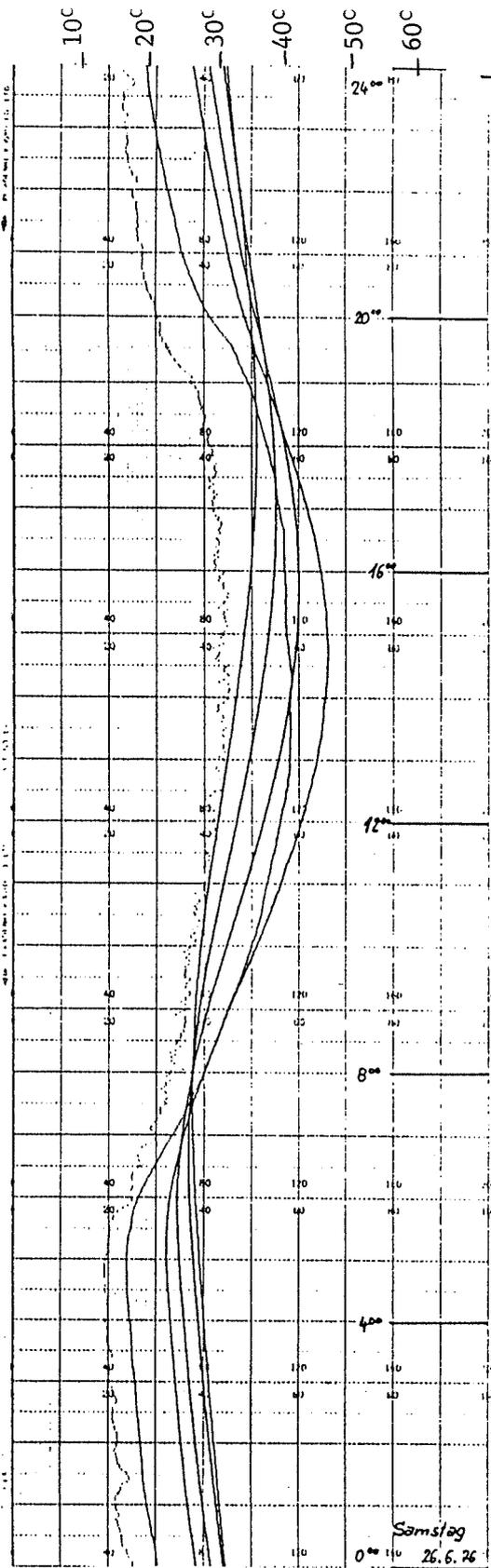
Ⓒ



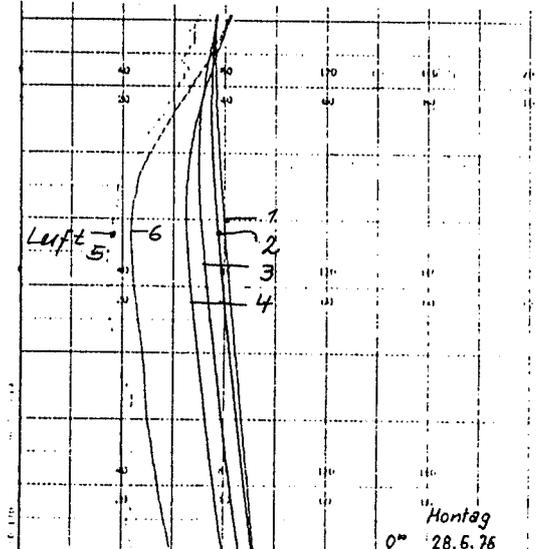


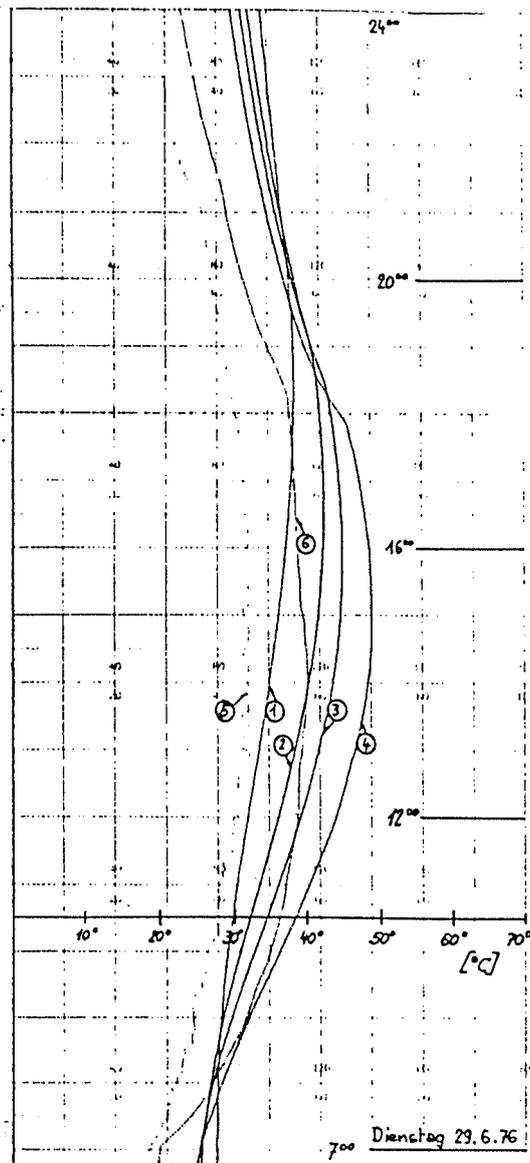
Temperaturmessungen (C)  
N1 Dietlikon  
vom 24. bis 25. Juni 1976





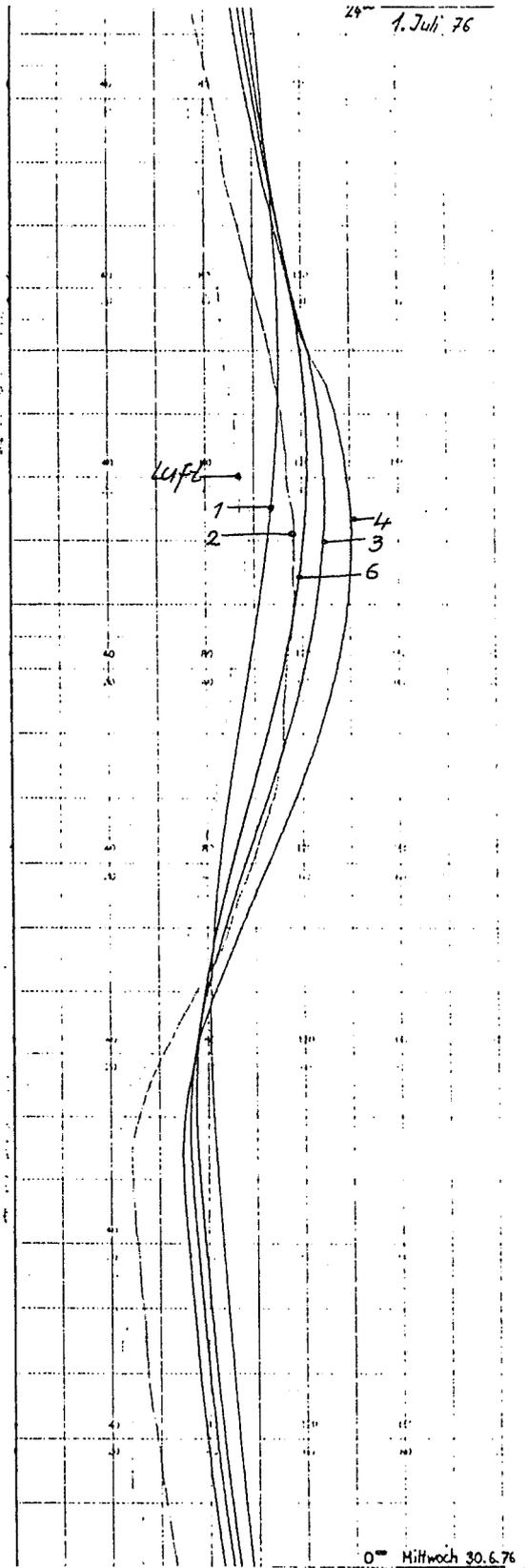
Temperaturmessungen (C)  
 N1 Dietlikon  
 vom 26. bis 28. Juni 1976

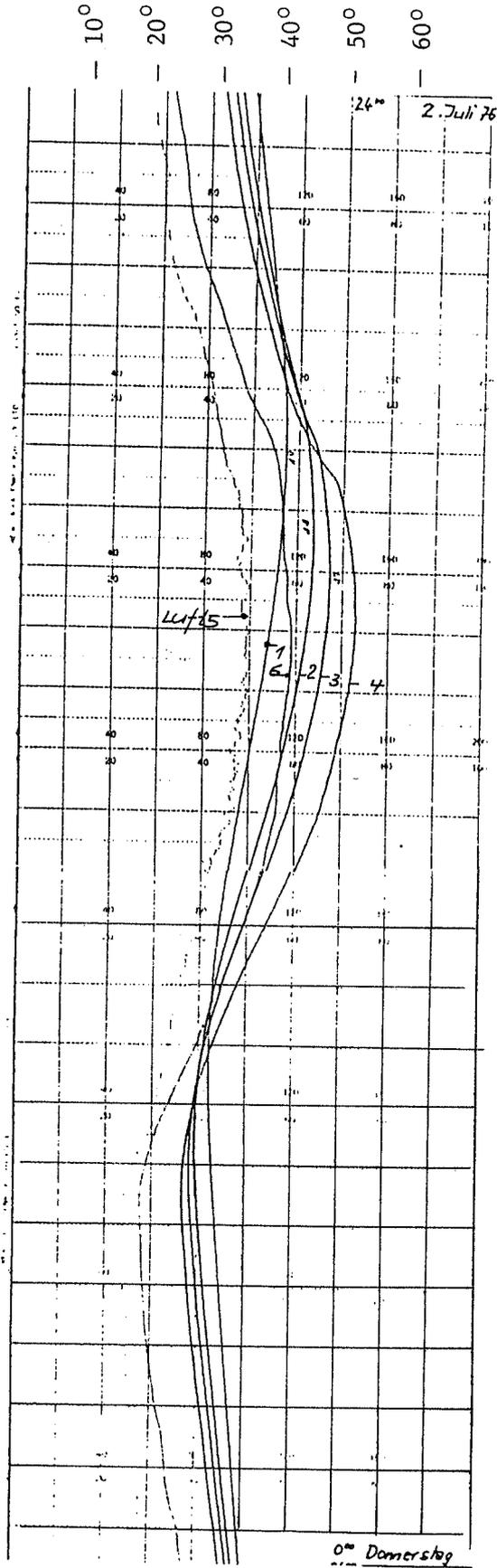




Fühleranordnung: Kan. 1: ca. -16cm  
Kan. 2: ca. - 9cm  
Kan. 3: ca. - 6cm  
Kan. 4: ca. - 2cm  
Kan. 5: Lufttemperatur im Über Boden  
Kan. 6: Temperatur im Messfahrzeug

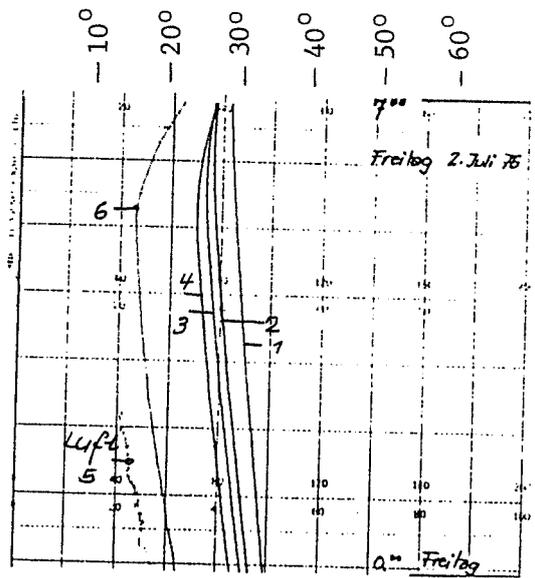
Temperaturmessungen (D)  
N7 Frauenfeld  
vom 29. Juni bis 1. Juli 1976



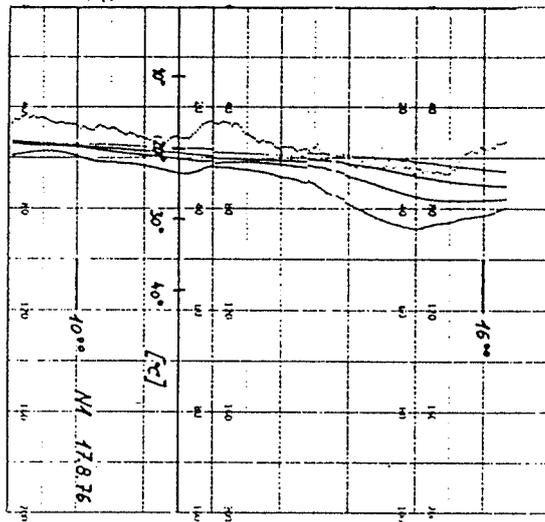


Temperaturmessungen  
N7 Frauenfeld  
vom 2. Juli 1976

Ⓚ



Temperaturmessungen (C)  
N1 Dietlikon  
vom 17. August 1976



MITTEILUNGEN AUS DEM INSTITUT FÜR STRASSEN-, EISENBAHN- UND  
FELSBAU AN DER EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

- Nr. 1 1943 W. Wirz, "Die Lüftung der Alpenstrassen-Tunnel"
- Nr. 2 1944 Dr. E. Zipkes, "Die Reibungskennziffer als Kriterium zur Beurteilung von Strassenbelägen"
- Nr. 3 1945 Prof. E. Thomann und Dr. E. Zipkes, "Beurteilung der Konstruktion, Rauigkeit und Verkehrssicherheit von Strassenbelägen unter Verwendung der Reibungskennziffer"
- Nr. 4 1947 Dr. E. Zipkes, "Beanspruchung von Strassenbelägen durch metallische Systeme"
- Nr. 5 1954 Dr. H. Rapp, "Die Leistungsfähigkeit von ungesteuerten Verkehrsknotenpunkten"
- Nr. 6 1957 M. Rotach, "Untersuchungen über die Leistungsfähigkeit von Ueberlandstrassen"
- Nr. 7 1958 M. Rotach, "Das Motorrad im Ueberlandverkehr"
- Nr. 8 1960 M. Rotach, "Geschwindigkeiten auf zweispurigen Ueberlandstrassen"
- Nr. 9 1960 M. Rotach, "Lastwagen auf Steigungen"
- Nr. 10 1960 Prof. J. Ackeret, Dr. A. Haerter und Prof. M. Stahel, "Die Lüftung der Autotunnel"
- Nr. 11 1960 M. Rotach, "Fahrräder auf Zweispurenstrassen"
- Nr. 12 1960 Prof. H. Gessner, Prof. M. Stahel, Ing. H. Bühler, P. Schärer, F. Rutishauser, "Untersuchungen über die Ventilation von Stollen"
- Nr. 13 1961 S. Bonomo, "Griffigkeitsmessungen mit dem Rugosimètre"
- Nr. 14 1961 M. Rotach, "Das Aequivalent von Motorrädern"
- Nr. 15 1961 C. Zuberbühler, "Beschleunigungen von Personenwagen"
- Nr. 16 1967 S. Sulger Büel, "Kenngrössen von Personenwagen"
- Nr. 17 1968 P. Pingoud, "Richtlinien für die Anordnung und Konstruktion von Leiteinrichtungen"
- Nr. 18 1970 P. Pingoud, "Neuere Leitschranken - Stand 1969"
- Nr. 19 1970 P. Pingoud, "N 1: Bern-Lenzburg - Unfälle an Mittelschranken, Seilzaun - Doppelplanke"
- Nr. 20 1970 Arbeitsgruppe für Lüftung im Tunnelbau, "Die Lüftung der Tunnel während dem Ausbruch"

- Nr. 21 1972 S. Huschek, "Erfahrungen mit der Ebenheitsmessung nach der Winkelmessmethode"
- Nr. 22 1970 Dr. K. Kovári, A. Tisa, E. Hasler, "Die Prüfung der mechanischen Eigenschaften von Gesteinen im dreiachsigen Spannungszustand"
- Nr. 23 1972 S. Sulger Büel, "Abnutzung von Strassenbelägen durch den Verkehr, unter besonderer Berücksichtigung von Spikesreifen"
- Nr. 24 1973 Dr. E. Zipkes und S. Sulger Büel, "Schäden durch den Gebrauch von Spikesreifen"
- Nr. 25 1973 I. Scazziga, "Der Rundlauf als Mittel der Oberbaudimensionierung - Vorstudien zu einem Forschungsprojekt"
- Nr. 26 1974 Dr. K. Kovári, A. Tisa, "Höchstfestigkeit und Restfestigkeit von Gesteinen im Triaxialversuch"
- Nr. 27 1974 S. Sulger Büel, "Haftvermögen von Spikesreifen auf eis- und schneefreier Strasse"
- Nr. 28 1974 S. Huschek, "Befahrbarkeitsmessungen auf Strassen nach der Winkelmessmethode - Neue Untersuchungen"
- Nr. 29 1974 Dr. E. Zipkes, "Strassenbau-Forschung in der Schweiz"
- Nr. 30 1975 Dr. E. Zipkes, "Der Einfluss der Rillierung von Strassenoberflächen auf die Unfallhäufigkeit"
- Nr. 31 1975 S. Huschek, "Griffigkeit und Verkehrssicherheit auf nasser Strasse"
- Nr. 32 1976 I. Scazziga, "Erhebungen über die Beanspruchung der Strasse durch schwere Motorwagen"
- Nr. 33 1976 Dr. E. Zipkes, "Geschichtliche Entwicklung der bituminösen Strassenbeläge"
- Nr. 34 1976 M. Klingler, U. Seiler, "Vergleich von Seilzaun und Doppelplanke anhand von Unfällen an Mittelschranken"
- Nr. 35 1977 E. Eichenberger, "Rollgeräusch und Strassenbelag - Fahrgeräusch, Quantitative und qualitative Analyse - Kausalität"
- Nr. 36 1977 W. Busenhardt, I. Scazziga, "Flugbetriebsflächen - Grundlagen für die Dimensionierung und die Oberflächengestaltung"
- Nr. 37 1977 Internationales Kolloquium über die plastische Verformbarkeit von Asphaltmischungen
- Nr. 38 1977 S. Huschek, G. Bachner, "Ebenheitsmessungen auf Strassen"
- Nr. 39 1978 Dr. A. Haerter, R. Burger, "Lüftung im Untertagbau"

- Nr. 40 1978 U. Graf und M. Ghielmetti, "Beleuchtung und Unfallhäufigkeit in Strassentunneln"
- Nr. 41 1979 R. Pelloli, "Griffigkeitsmessungen mit dem Skiddometer - weitere Ergebnisse"
- Nr. 42 1979 S. Huschek, P. Staub, "Die Beurteilung des Verformungswiderstandes bituminöser Mischungen durch den Kriechversuch"
- Nr. 43 1979 M. Klingler, "Anfahrversuche an Varianten der Seilleit-schranke System British Ropes"
- Nr. 44 1980 S. Huschek, Ch. Angst, "Mechanische Eigenschaften von Filler-Bitumen-Gemischen" / "Einfluss der Verdichtungsart auf die mechanischen Eigenschaften von Asphaltprüfkörpern"
- Nr. 45 1980 Dr. E. Zipkes, "Beläge mit diskontinuierlichem Kornaufbau"
- Nr. 46 1981 Ch. Angst, "Der Einfluss der Verdichtung auf die mecha-nischen Eigenschaften bituminöser Schichten"
- Nr. 47 1981 P. Fritz, "Numerische Erfassung rheologischer Probleme in der Felsmechanik"
- Nr. 48 1982 H.P. Rossner, I. Scazziga, "Verhalten des Strassenoberbaus unter wiederholter Belastung - Versuch Nr. 1 auf der ISETH-Rundlaufanlage"
- Nr. 49 1982 ISETH - Strassenbau colloquien, Wintersemester 1981/82
- Nr. 50 1982 International Colloquium - Full Scale Pavement Tests Colloque International - Essais routiers en vraie grandeur
- Nr. 51 1982 Ch. Angst, "Morphologische Beurteilung verdichteter bitu-minöser Mischungen"
- Nr. 52 1983 P. Giger, "Simulation von Eisenbahnsystemen mit RWS-1"
- Nr. 53 1983 F. Bühlmann, "Beurteilung der Griffigkeit auf Fahrbahnen"
- Nr. 54 1983 S. Huschek, "Zum Verformungsverhalten von Asphaltbeton unter Druck"
- Nr. 55 1985 F. Bühlmann, "Einfluss der Witterung auf die Griffigkeit von Fahrbahnen", ein Beitrag zur Verkehrssicherheit auf überdeckten Strecken
- Nr. 56 1984 Dr. E. Zipkes, "Griffigkeit-Bremsspur-Kraftübertragung"
- Nr. 57 1984 "Reifengeräusch und Strassenbau", Internationales Seminar Zürich, 9./10. Februar 1984
- Nr. 58 1985 S. Huschek, "Verhalten des Strassenoberbaues unter dyna-mischer Radlast"

