

Temperatur-Messungen an einem Zement-Klinker-Silo

T 1102

T 1102

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

T 1102: Temperatur-Messungen an einem Zement-Klinker-Silo

Temperatur - Messungen an einem
Zement - Klinker - Silo
V 169

Schlußbericht
vorgelegt von

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. K. Kordina
Dipl.-Ing. K. Rudolph

1982

Die Durchführung des Forschungsvorhabens wurde
durch folgende Institutionen gefördert :

- Verein Deutscher Zementwerke (VDZ), Düsseldorf
- Deutscher Ausschuß für Stahlbeton (DAfstb), Berlin
- Institut für Bautechnik (IfBt), Berlin
- Nordcement AG, Hannover

Vorbemerkung

Zementklinkersilos zählen zu jenen Bauwerken die im Gebrauchsstand planmäßig hohen Temperaturen ausgesetzt werden; genauere Angaben über die Höhe und Verteilung dieser Temperaturen im Silo und in der Silowand fehlen. Der Bau des Klinkersilos des Zementwerkes Alemannia in Höver bei Hannover bot Gelegenheit, eine Meßanlage mit einzubauen; ein entsprechender Forschungsantrag wurde 1973 an den Deutschen Ausschuß für Stahlbeton gerichtet und von diesem unter Beteiligung des Forschungsinstituts der Zementindustrie VDZ in die Finanzierung aufgenommen.

Bis zum Zeitpunkt des geplanten Abschlusses der Arbeiten im Jahre 1976 war wegen eingeschränkter, teilweise auch völlig eingestellter Zementproduktion noch keine ausreichend abgesicherte Aussage möglich. In den jährlichen Sachstandsberichten an den DAFStb wurde auf diesen Umstand hingewiesen.

Im Jahre 1977 wurde das Forschungsprogramm in einem neuen Forschungsvorhaben des Instituts für Bautechnik, Berlin (Aktenzeichen IV/1-5-123/77) thematisch aufgegriffen und erweitert. Die seinerzeit installierten Meßgeräte hatten Schaden gelitten und mußten insgesamt unter erheblichen Aufwand wieder instandgesetzt werden. In den Jahren 1978 - 81 konnte bei verstärkter Zementproduktion umfangreichere Messungen im gewünschten Temperaturbereich durchgeführt werden.

Der vorliegende Schlußbericht faßt alle in den Jahren 1973 - 1981 in diesem Zusammenhang durchgeführten Forschungsaktivitäten zusammen.

Für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten ist dem DAFStb, dem VDZ und dem IfBt für die bereitgestellten Geldmittel, der Nordciment AG für die Ermöglichung und Hilfestellung bei den Messungen am Klinkersilo des Werkes Alemannia in Höver zu danken.

Die Verfasser

Bezeichnungen

Wärmetechnische Grundgrößen

α	: Wärmeübergangszahl	[W / m ² K]
c	: spezifische Wärmekapazität	[W h / Mg K]
ρ	: Dichte	[Mg / m ³]
λ	: Wärmeleitfähigkeit	[W / m K]
k	: Wärmedurchgangszahl	[W / m ² K]
s	: Wanddicke	[m]
t	: Temperatur	[°C]
T	: Temperatur	[K]
τ	: Zeit	[h]

Indices

o	: Konvektion
s	: Strahlung
ke	: Klinker, beim Einfüllen in den Silo
k	: Klinker, Oberfläche des eingelagerten Materials
f	: freier Fall
l	: Luft
b	: Beton
w	: Siloschaft
d	: Silodach
i	: Silowand, innen
a	: Silowand, außen
m	: Silowand, Mittel-Fläche
r	: Rechenwert

Inhaltsverzeichnis

1 Allgemeines, Zweck der Untersuchungen.....	1
2 Meßeinrichtung.....	2
3 Auswertung der Meßergebnisse.....	4
3.1 Meßwerte als Funktion der Zeit.....	6
3.2 Meßwerte als Funktion des Ortes.....	9
3.3 Statistische Betrachtung der Meßergebnisse.....	13
4 Rechnerische Verfahren zur Bestimmung der Temperaturen im Silomantel bei heißen Füllgütern.....	15
5 Diskussion der Ergebnisse und Empfehlungen.....	22
6 Zusammenfassung.....	24
7 Literaturverzeichnis.....	29

1 Allgemeines, Zweck der Untersuchungen

Im Zuge der Zementherstellung ist eine Zwischenlagerung des Zementklinkers aus Gründen der Vorratshaltung erforderlich. Hierbei ist der Forderung des Gesetzgebers nach möglichst staubfreier Lagerung des Zementklinkers gerecht zu werden. Um im Rahmen der konstruktiven Möglichkeiten /1/ die Zementstaubbelastung in der Umgebung der Zementfabriken auf ein Mindestmaß zu beschränken, haben sich unter anderem Großraumsilos zur Einlagerung von Zementklinker bewährt.

Da die Temperaturen des Füllgutes bedingt durch den Produktionsablauf bis zu 300 °C betragen können, ist für den entwerfenden Ingenieur die Berücksichtigung des Lastfalles Temperatur unumgänglich /11/. Dies führte dazu, daß in den vergangenen Jahren Berechnungsverfahren veröffentlicht wurden, die es dem Bauingenieur erlauben, eine rechnerische Abschätzung der auftretenden Temperaturen innerhalb der Silo-konstruktion vorzunehmen /3,4,5,6,7,8/.

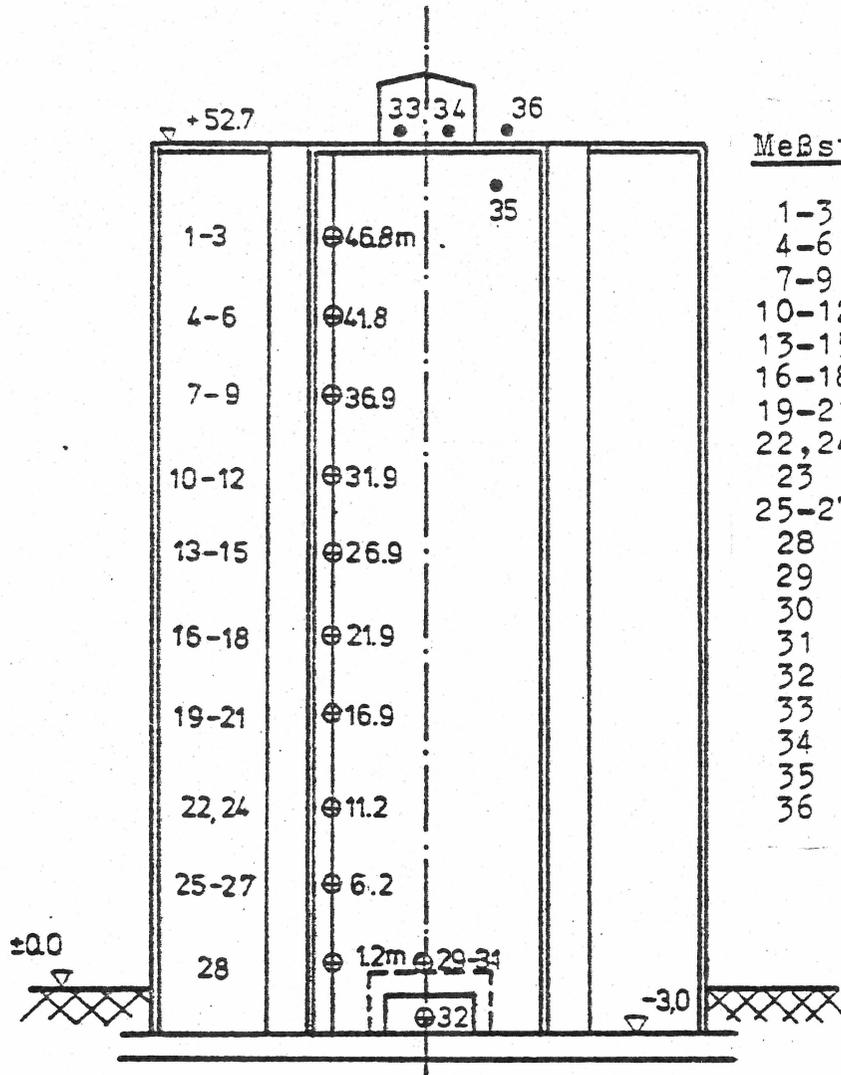
Zur Überprüfung dieser theoretisch gewonnenen Ansätze wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Langzeit-Temperaturmessungen an einem Zementklinkersilo der Firma NORDCEMENT in Höver / Hannover durchgeführt.

2 Meßeinrichtung

In Bild 1 ist die Silozelle mit der Lage der einzelnen Meßstellen dargestellt. In jeder der angegebenen Höhenlagen befinden sich drei Meßfühler in der Silowand, jeweils auf der Innen- und Außenseite und in Wandmitte (siehe Detail 'A'). Weiterhin konnten die Abzugs- und Einfülltemperaturen des Klinkers, die Außen- und Innenlufttemperaturen, die Temperatur in der Meßkabine sowie die Temperatur über dem Abzugskanal gemessen werden.

Die gemessenen Temperaturen wurden von 12-Punkt-Kompensationsmeßschreibern kontinuierlich aufgezeichnet, um so die zeitliche Veränderung der Meßwerte zu erhalten. Als Meßfühler dienten Eisen-Konstantan-Thermoelemente.

Die Meßkabine stand in unmittelbarer Nähe des Zementklinkersilos und eines Zementfreilagers, was zu gelegentlichen Ausfällen einzelner Meßschreiber durch Verstaubung führte, und die deswegen einer erhöhten Überwachung und Wiederinstandsetzung bedurften. Dennoch sind in den genannten Meßzeiträumen (vergl. Bild 2) genügend brauchbare Temperaturmeßwerte registriert worden.



Meßstellenanordnung

Meßblock	Kote	
1-3	Meßblock	+46.80
4-6	"	+41.80
7-9	"	+36.88
10-12	"	+31.88
13-15	"	+26.88
16-18	"	+21.88
19-21	"	+16.90
22, 24	"	+11.20
23	Luft im Meßraum	
25-27	Meßblock	+ 6.20
28	"	+ 1.20
29	MS auf Kanaldecke	+1.20
30	"	"
31	"	"
32	Temperatur Auslauf	
33	Einlauftrichter links	
34	" rechts	
35	Luft im Silo	
36	Temperatur Außenluft	

Ansicht

Detail, A'

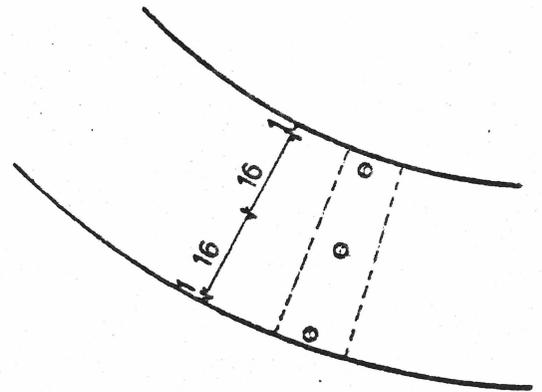
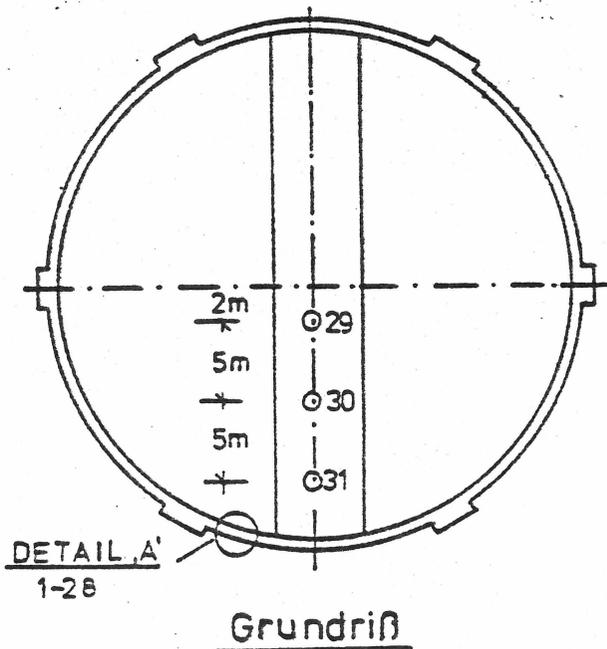


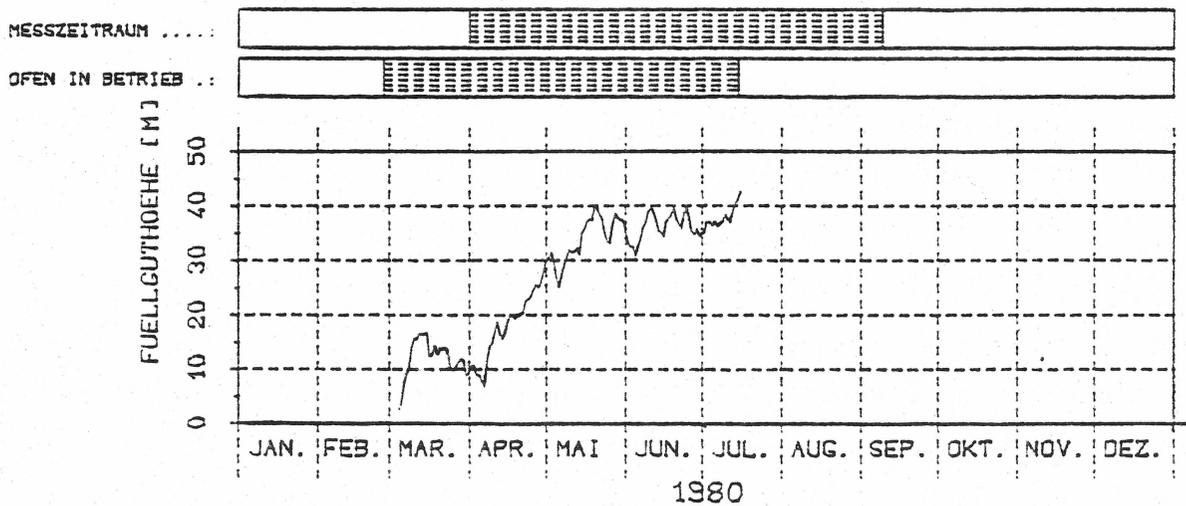
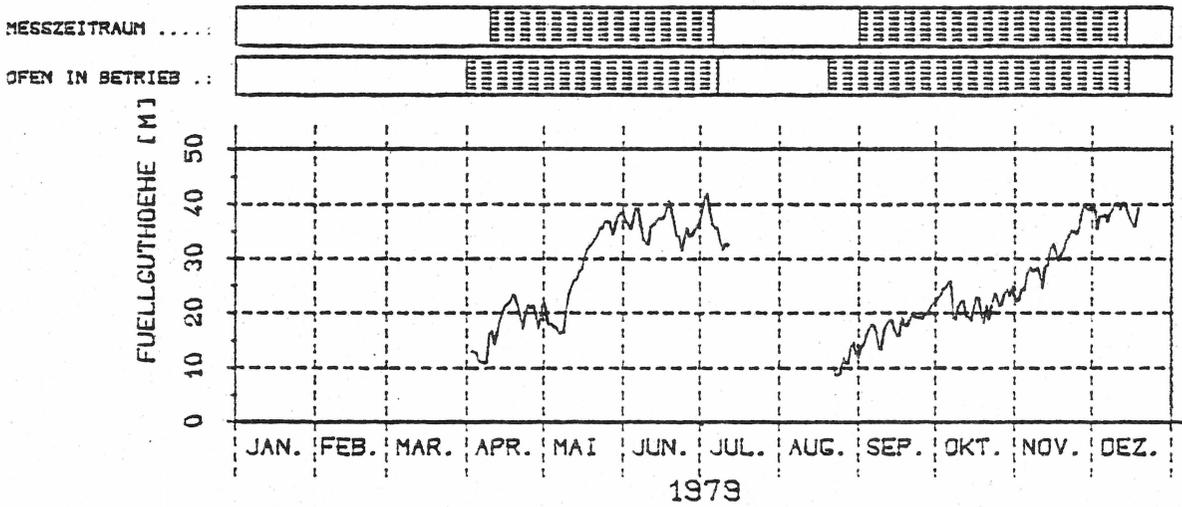
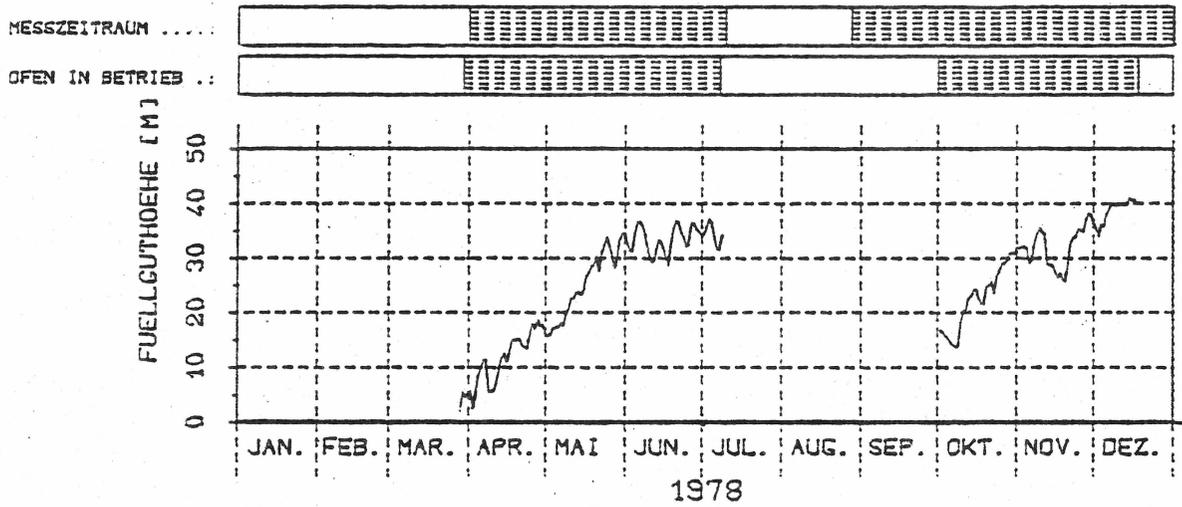
Bild 1 Lage der Temperaturmeßstellen

3 Auswertung der Meßergebnisse

Eine Übersicht der dem Forschungsvorhaben zugrunde liegenden Meßzeiträume, Ofenbetriebszeiten und Füllstände des Zementklinkers gehen aus Bild 2 hervor. Der Drehofen zu dieser Anlage war in den Jahren 1978 bis 1980 jeweils von April bis Juli und Oktober bis Dezember in Betrieb. In diesen Zeiten wurde die Klinkersilozelle gefüllt, jedoch auch zwischenzeitlich entleert. Die Zeiten der Ofenstilllegung dienten der Reparatur des Drehofens und der Produktionsanpassung an die jeweilige Marktlage. In diesen Zeiten wurde die Zelle nur entleert. Die gemessenen Innentemperaturen waren dabei sehr gering.

Zur weiteren Aufbereitung der Temperaturmeßergebnisse wurden zu jedem Meßtag für zwei Zeitpunkte (0 Uhr und 12 Uhr) die Meßwerte aus den erstellten Meßprotokollen digitalisiert, nachdem sichergestellt war, daß solcherart der mittlere tageszeitliche Temperaturverlauf repräsentiert wird. Zusätzlich wurden die im Tagesablauf maximal auftretenden Temperaturereignisse ausgewertet, um die größtmögliche Temperaturbeanspruchung der Silokonstruktion zu erfassen.

MESSZEITRAEUME, OFENBETRIEBSZEITEN UND FUELLHOEHEN DER SILOZELLE DER FA. NORDCEMENT IN HOEVER



3.1 Meßwerte als Funktion der Zeit

Die während der Ofenbetriebszeiten von April 1978 bis Juli 1980 unter regulären Produktionsbedingungen gemessenen maximalen Temperaturen an der Innenseite der Wand betragen ca. 70 °C, die maximalen Einfülltemperaturen in dieser Zeit ca. 120 °C. Die Temperaturen an der Wandaußenseite lagen im allgemeinen nur wenige Kelvin über den Außenlufttemperaturen, woraus sich eine maximale Temperaturdifferenz in der Wand von ca. 40 K ergab.

Die tageszeitlichen Temperaturschwankungen auf der Wandinnen- wie -außenseite betragen im allgemeinen nicht mehr als ca. 4 bis 5 K (max. 10 K) trotz unregelmäßiger Füllung, die monatlichen Schwankungen auf der Wandinnenseite bereits ca. 40 K und die innerhalb eines Silofüllzeitraumes von ca. drei Monaten eintretenden Temperaturschwankungen an der Wandinnenseite maximal 60 K.

Ab Oktober 1979 bis Dezember 1979 stiegen die Innentemperaturen deutlich an, was nach Werksangaben auf Schäden an den Kühlschaufeln des Kühlers des Drehofens gelegen haben soll. Die maximalen Temperaturen an der Wandinnenseite lagen während dieses Zeitraumes bei etwa 100 °C. Aus den Bildern Al/12 bis Al/16 der Anlage 1 lassen sich maximale Einfülltemperaturen über 200 °C ablesen.

Die Bilder Al/1 bis Al/5 in Anlage 1 zeigen die Temperaturen an der Innenseite der Silowand für verschiedene Höhenlagen sowie die mittlere Zellenfüllhöhe in zeitlicher Abhängigkeit. Auffallend ist der Temperaturanstieg an den Meßstellen oberhalb des Füllgutspiegels, der deutlich die Abhängigkeit der Innenwandtemperatur von der Einfüllgeschwindigkeit bzw. der Nähe des heißen Füllgutspiegels aufzeigt. Wie weiter zu ersehen ist, fallen diese Temperaturen im allgemeinen deutlich ab, sobald die Füllguthöhe die jeweilige Meßstellenhöhe überschritten hat. Dies kann als Zeichen dafür ge-

werden, daß das Füllgut nahe der Außenwand schon innerhalb von 1 bis 2 Wochen soweit abkühlt, daß die Wandtemperaturen an der Innenseite nur noch etwa 10 bis 20 K über den Außenlufttemperaturen liegen. Weiter oberhalb der Schüttgutoberfläche sind die Wandtemperaturen nahezu unabhängig von der Höhenlage der Meßstellen. Die stark schwankenden Innenlufttemperaturen sind hier meist wesentlich höher als die Temperaturen an der Wandinnenseite.

In den Bildern A1/6 bis A1/11 in Anlage 1 sind die Temperaturen an der Außenseite der Wand dargestellt. Sie werden anscheinend wesentlich von den Außenlufttemperaturen (siehe A1/17 bis A1/21) und nur wenig von den Vorgängen in der Silozelle beeinflußt. Für den Zeitraum April 1978 bis Juli 1979 lagen sie mit wenigen Ausnahmen nur ca. 0 bis 15 K und für den Zeitraum September 1979 bis Juli 1980 im allgemeinen nicht mehr als ca. 10 bis 20 K über den Außenlufttemperaturen.

Die Temperaturen in der Wand-Mittelfläche entsprechen meist ziemlich genau dem arithmetischen Mittel zwischen jenen an der Wandaußen- bzw. -innenseite.

Bei allen Wand-Meßstellen - sowohl außen wie innen - ist in der Regel ein Temperaturanstieg dann zu beobachten, wenn die Schüttgutoberfläche die jeweilige Meßstellenhöhe soeben erreicht hat; er beträgt auf der Innenseite der Silowand ca. 30 bis 40 K und auf der Wandaußenseite maximal 10 K und kann damit erklärt werden, daß das - verglichen mit der Innenlufttemperatur - wesentlich heißere Füllgut der obersten Schicht die Silowand örtlich hoch beansprucht. Die Ausdehnung der Höhe nach dieses Bereiches sehr hoher Temperaturen konnte nicht ermittelt werden, doch ist anzunehmen, daß die Höhe dieser Zone geringer ist als 5.00 m entsprechend dem Abstand zweier übereinander liegender Meßstellen; sie dürfte auch von der Einfüllgeschwindigkeit abhängig sein.

Auffallend ist weiterhin die wesentlich größere Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur der Innenluft und der Wandinnenseite gegenüber jener zwischen Wandaußenseite und Außenluft. Eine Erklärung hierfür könnte ein Belag der Wandinnenseite mit Zementstaub sein, wie er gelegentlich in solchen Silozellen anzutreffen ist. Eine instationäre Temperaturberechnung wird diesen Sachverhalt zu berücksichtigen haben, um gute Übereinstimmung mit den Meßergebnissen zu erzielen (siehe Abschnitt 4).

3.2 Meßwerte als Funktion des Ortes

Die Frage, welche Temperaturen in bestimmten Silowandhöhen auftreten, konnte durch eine entsprechende Auswertung der Meßergebnisse mit gewissen Einschränkungen, die unter anderem auch aus der Meßstellenanordnung herrühren, beantwortet werden.

In Anlage 2 Bild A2/01 bis A2/18 sind die Zusammenhänge zwischen den relevanten Temperaturrechenwerten und der Silowandhöhe zeichnerisch dargestellt.

Dabei sind als Funktion der Silowandhöhe die Größen :

Temperaturgradient

$$\Delta T_w = t_{wi} - t_{wa}$$

und

die mittlere Wandtemperatur

$$t_{wm} = (t_{wi} + t_{wa}) / 2$$

aufgetragen.

Die Ermittlung der Temperaturrechenwerte aus den vorhandenen Meßwerten in der Silowand erfolgte in Anbetracht einer nahezu linearen Verteilung der Temperaturmeßwerte über die Wanddicke rechnerisch mittels einer Ausgleichsgeraden nach dem Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate (lineare Regression). Die Innen- bzw. Außenlufttemperaturen wurden dabei nicht berücksichtigt.

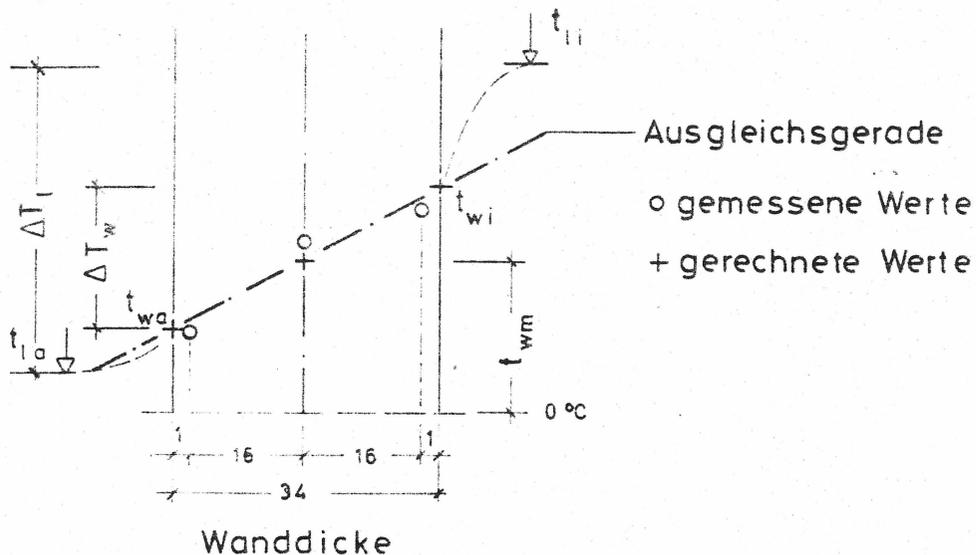


Bild 3 Annahme des Temperaturverlaufs

hierbei sind :

t_{li}	:	Temperatur der Innen-Luft
t_{la}	:	" " Außen-Luft
t_{wi}	:	" " Innen-Wand
t_{wa}	:	" " Außen-Wand
t_{wm}	:	" " Wand-Mittel-Fläche
$\Delta T_w = t_{wi} - t_{wa}$:	Temperaturgradient der Wand
$\Delta T_l = t_{li} - t_{la}$:	Lufttemperaturdifferenz

Für die Vorauswahl der Meßwerte ist

1. die Lage des Füllgutspiegels

und

2. die Lufttemperaturdifferenz ΔT_l

gewählt worden; dies bedeutet, daß für eine bestimmte Lage des Füllgutspiegels und eine Lufttemperaturdifferenz die zugehörigen Meßwerte zusammengefaßt und ausgewertet wurden.

Die in den Bildern der Anlage 2 aufgezeichneten Werte erfassen folgende Bereiche :

Bild- nummer:	Bereich	
	Füllgut- spiegelhöhe	Lufttemperatur- differenz
	/ Meter /	/ Kelvin /
A2/01	15.00 - 20.00	25.0 - 50.0
A2/02	15.00 - 20.00	50.0 - 75.0
A2/03	15.00 - 20.00	75.0 - 100.0
A2/04	20.00 - 25.00	25.0 - 50.0
A2/05	20.00 - 25.00	50.0 - 75.0
A2/06	20.00 - 25.00	75.0 - 100.0
A2/07	20.00 - 25.00	100.0 - 125.0
A2/08	25.00 - 30.00	75.0 - 100.0
A2/09	25.00 - 30.00	100.0 - 125.0
A2/10	30.00 - 35.00	25.0 - 50.0
A2/11	30.00 - 35.00	50.0 - 75.0
A2/12	30.00 - 35.00	75.0 - 100.0
A2/13	30.00 - 35.00	100.0 - 125.0
A2/14	35.00 - 40.00	25.0 - 50.0
A2/15	35.00 - 40.00	50.0 - 75.0
A2/16	35.00 - 40.00	75.0 - 100.0
A2/17	35.00 - 40.00	100.0 - 125.0
A2/18	35.00 - 40.00	125.0 - 150.0
A2/19	40.00 - 45.00	50.0 - 75.0
A2/20	40.00 - 45.00	75.0 - 100.0
A2/21	40.00 - 45.00	100.0 - 125.0

In den einzelnen Bildüberschriften der Anlage 2 sind die jeweils gewählten Bereiche ausgedruckt. Als Meßzeitpunkte wurden nur solche gezählt, die eine vollständige Auswertung der Temperaturen über die Silowandhöhe erlaubten.

Die hier gesammelten Meßergebnisse lassen bezüglich der Temperaturbelastung der Silowand drei Bereiche erkennen :

- Oberhalb der Füllgutoberfläche ist die Temperatur in der Wand weitgehend unabhängig von der Höhe des Füllgutspiegels und wird nur von der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft sowie den Wärmedurch- und Übergangsverhältnissen beeinflusst. Obwohl die Innenlufttemperatur großen tageszeitlichen Schwankungen unterworfen ist, ändern sich die Temperaturen in der Wand in diesem Bereich innerhalb eines Tages nur um wenige K.

- In Höhe der Schüttgutoberfläche entsteht beim Füllen eine Zone erhöhter Temperaturbeanspruchung, die sich in abgeschwächter Form bis auf die Außenseite der Wand bemerkbar macht und sicherlich von der jeweiligen Einfülltemperatur des Füllgutes abhängt. Die genaue jeweilige Höhe dieser Zone konnte nicht ermittelt werden, sie beträgt jedoch weniger als der lotrechte Abstand der Temperaturmeßblöcke ≈ 5.00 m.

- Unterhalb dieser Zone sinkt die Wand-Innentemperatur beim Einfüllen innerhalb einiger Tage weit ab und liegt nur geringfügig über der Außenlufttemperatur.

- Im untersten Bereich der Zelle, in der sich ständig eine wandnahe Zone ruhenden Materials befindet, fallen die Wandtemperaturen auf die der Außenluft ab, bzw. werden - abgesehen von der Erstfüllung - nur noch von diesen beeinflusst.

3.3 Statistische Betrachtung der Meßergebnisse

Um eine Aussage über die Temperaturverteilung in den einzelnen Meßstellen zu erhalten wurde die relative Häufigkeit und die Summenhäufigkeit ermittelt. Die Temperaturwerte sind dieselben wie in Abschnitt 3.2 verwendet, wobei allerdings die Gesamtheit des Meßumfangs berücksichtigt wurde.

Anlage 3 zeigt in den Bildern A3/1 bis A3/10 für die Außenlufttemperatur und einzelne charakteristische Silowandmeßstellen die diskreten Temperaturverteilungsfunktionen sowie deren Summation. Der angegebene Mittelwert der Temperatur ist als Mittelwert aller Meßwerte der jeweiligen Meßstelle zu verstehen.

Aus den Darstellungen lassen sich folgende Erkenntnisse über die Temperaturen an den einzelnen Meßstellen ablesen :

- Die Wand-Außen-Temperaturen lassen eindeutig erkennen, daß sie im wesentlichen von der Außenlufttemperatur abhängen, da ihre Verteilungsfunktionen eine gute Übereinstimmung mit der Verteilung der Außenlufttemperatur aufweisen, wobei sich die durch den Wärmetransport auftretende Abweichung aus den unterschiedlichen Mittelwerten ablesen lassen.

- Die Wand-Innen sowie die Wand-Mitten-Temperatur weisen dagegen im oberen Teil der Zellenwand einen über größere Temperaturbereiche schwankenden Verteilungsverlauf auf, was deutlich den Einfluß des Produktionsverlaufes erkennen läßt.

- Im unteren Drittel der Silozelle sind die Wandtemperaturen durch die Ausbildung einer wandnahen Zone ruhenden Materials im wesentlichen konstant und werden eindeutig nur von der Außenlufttemperatur beeinflusst.

In den Bildern A3/11 und A3/12 wurden jeweils sämtliche Meßwerte für ΔT_w und die Wand-Mitten-Temperatur t_{wm} zusammenge-

faßt; die 95% Fraktilen betragen:

$$\Delta T_w = 43.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{wm} = 49.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4 Rechnerische Verfahren zur Bestimmung der Temperaturen im Silomantel bei heißen Füllgütern

Die bisher veröffentlichten Verfahren, zur Abschätzung der Temperaturen innerhalb einer Silokonstruktion gehen allesamt auf eine stationäre Wärmebilanzrechnung zurück; auf dieser Grundlage ist eine einfache Temperaturermittlung in der Silowand bei heißem Füllgut möglich.

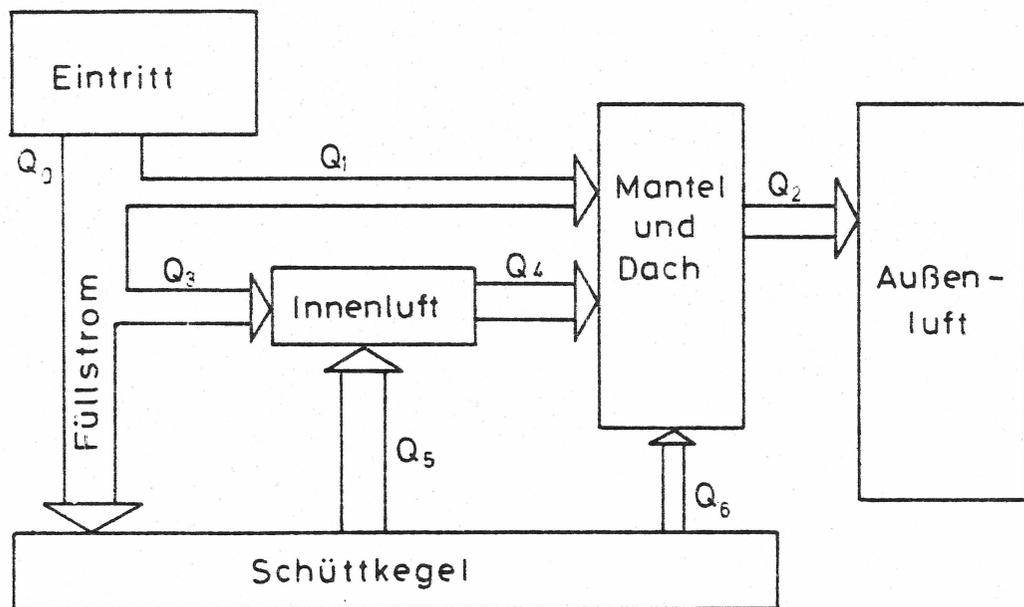


Bild 4 Wärmeabfluß in einem Silo

In diesem Bericht wurde das Rechenverfahren nach Dr.-Ing. D. Ogniwek /5/ als Vergleichsgrundlage herangezogen; es erwies sich gegenüber anderen Berechnungsvorschlägen /6,7,8/, als das in der Anwendung einfachste und dennoch mit den Meßergebnissen in guter Übereinstimmung stehende Verfahren (siehe Bild 7).

Dieses vereinfachte Rechenverfahren führt zu folgendem Gleichungssystem für die Unbekannten t_k , t_{li} , t_{ir} , t_{ar} :

$$\begin{array}{c} t_k \\ t_{li} \\ t_{ir} \\ t_{ar} \end{array} \cdot \begin{array}{cccc} (-E-C-D) & (A+C) & (B+D) & 0 \\ (-C) & (F+A+C+G) & (-F) & 0 \\ 0 & 0 & (-H) & (J+H) \\ (-D) & (-F) & (F+D+B) & (J) \end{array} = \begin{array}{c} t_{ke} \\ t_{la} \end{array} \cdot \begin{array}{cc} (-E+A+B) & 0 \\ (A) & (G) \\ 0 & (J) \\ (B) & (J) \end{array}$$

mit

$$\begin{array}{lll} A = \alpha_{of} F_f & B = \alpha_{sf} F_f & C = \alpha_{ok} F_k \\ D = \alpha_{sk} F_k & E = c_k G_k & F = \alpha_{ir} F_r \\ G = 0.5 c_l \rho_l G_l & H = \lambda_b F_r / s_r & J = \alpha_{ar} F_r \end{array}$$

wobei

$$\begin{array}{ll} t_k & : \text{Temperatur des Klinkers} \quad [^\circ\text{C}] \\ t_{ke} & : \quad " \quad " \quad " \quad \text{im freien Fall} \quad [^\circ\text{C}] \\ t_{li} & : \quad " \quad \text{der Innen - Luft} \quad [^\circ\text{C}] \\ t_{la} & : \quad " \quad \text{Außen - " } \quad [^\circ\text{C}] \\ t_{ir} & : \text{Rechenwert der Innen - Temperatur} \quad [^\circ\text{C}] \\ t_{ar} & : \quad " \quad \text{Außen - " } \quad [^\circ\text{C}] \\ F_f & : \text{Oberfläche des Füllgutstromes im} \\ & \quad \text{freien Fall} \\ & = 0.328 G_k \sqrt{h} \text{ für Zementklinker} \quad [m^2] \\ & \quad \text{Fördermenge : } G_k \quad [m^3 / h] \\ & \quad \text{Fallhöhe : } h \quad [m] \\ F_k & : \text{geometrische Oberfläche des} \\ & \quad \text{Schüttgutkegels (= Mantelfläche)} \quad [m^2] \\ F_r & : \text{Innere Wandfläche der Gesamtkon-} \\ & \quad \text{struktion oberhalb des Füllgutspiegels} \\ & = F_w + F_d \quad [m^2] \\ G_k & : \text{Fördermenge des eingefüllten Gutes} \quad [Mg / h] \\ G_l & : \text{Enstaubungsmenge} \quad [Nm^3 / h] \\ s_r & : \text{mittlere rechnerische Wanddicke der} \\ & \quad \text{Gesamtkonstruktion} \quad [m] \\ & = \lambda_b (1/k_r - 1/\alpha_{ir} - 1/\alpha_{ar}) \\ & \quad \text{äquivalente Wärmedurchgangszahl} \\ k_r & = (F_w k_w + F_d k_d) / F_r \\ & \quad \text{mit } k_j = 1/(1/\alpha_{oij} - s_j/\lambda_b - 1/\alpha_{oaj}) \text{ für } j = w, d \end{array}$$

Wärmeübergangszahlen

Wärmeübergang	Füllungsgrad des Silos %	Wärmeübergangszahlen	
		Bezeichnung	Stahlbetonsilos [W / m ² K]
Klinker - Innenluft beim freien Fall	0 - 100	α_{of}	21.0
Klinker - Silokonstruktion beim freien Fall	0 - 79	α_{sf}	5.8
	80 - 100	α_{sf}	9.3
Klinkeroberfläche - Innenluft	0 - 79	α_{ok}	8.1
	80 - 100	α_{ok}	10.5
Klinkeroberfläche - Silokonstruktion	0 - 79	α_{sk}	5.8
	80 - 100	α_{sk}	9.3
Innenluft - Siloschaft	0 - 79	α_{oiw}	4.7
	80 - 100	α_{oiw}	5.8
Innenluft - Silodach	0 - 79	α_{oid}	8.1
	80 - 100	α_{oid}	9.3
Silokonstruktion - Außenluft	0 - 79	α_{aw}	14.0
	80 - 100	α_{ad}	
Äquivalente Übergangszahlen	0 - 79	α_{ir}	8.1
	80 - 100	α_{ir}	5.8
	0 - 100	α_{ar}	14.0

Stoffwerte

		Dimensionen	Beton	Klinker	Luft
Wärmeleitfähigkeit	λ	W / m K	1.75	0.29	0.026
Schüttwinkel	ψ	grd	-	30.0	-
Dichte	ρ	Mg / m ³	2.40	1.50	0.001293
Spezifische Wärme	c	W h / Mg K	244.45	233.33	280.56

Die rechnerischen Temperaturen der einzelnen Konstruktionsteile für $j = w, d$ ergeben sich zu :

$$t_{ji} = t_{la} + \Delta T (1 - k_j / \alpha_{oij})$$

$$t_{ja} = t_{la} + \Delta T k_j / \alpha_{oaj}$$

$$\text{mit } \Delta T = (t_{ir} - t_{ar}) \lambda_b / (k_r s_r)$$

EINFUELLMENGE : 125.0 [M3/H]/ENTSTAUBUNG : 10000.0 [M3/H]

EINFUELLTEMP. : 200.0 [C]/AUSSENLUFTTEMP. : 12.5 [C]

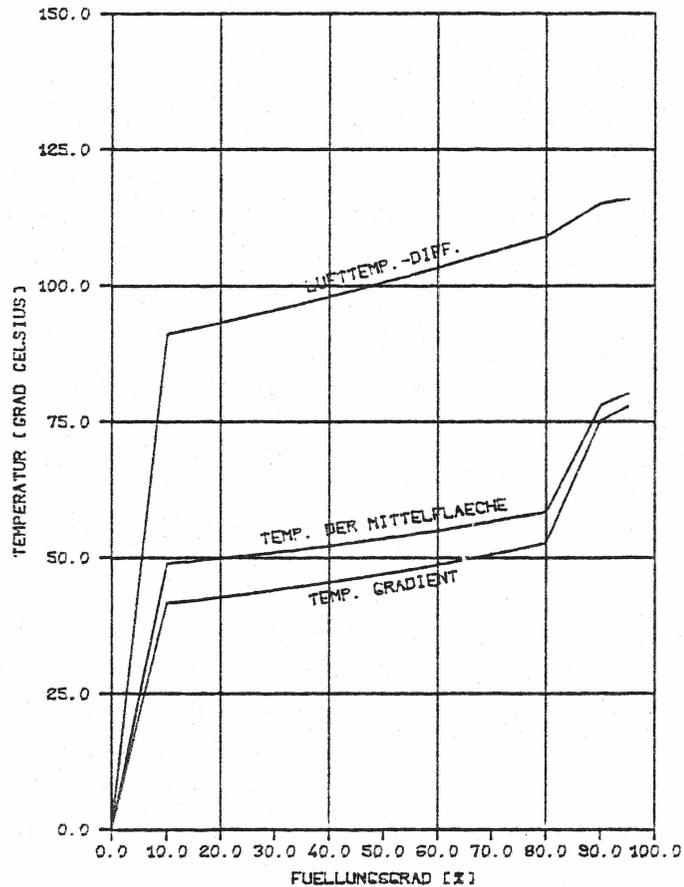


Bild 5 Rechnerisch ermittelte Temperaturen oberhalb des Füllgutspiegels

In Bild 5 sind rechnerische, für den Entwurf maßgebende Temperaturgrößen dargestellt; dabei wurden der Berechnung eine bestimmte ungünstige Einfüllmenge, Einfülltemperatur und Entstaubungsmenge nach Werksangaben zugrunde gelegt. Die Größe der Außenlufttemperatur wurde mit 12.5 °C angenommen;

dies entspricht dem Mittelwert aller ausgewerteten Außenlufttemperaturmessungen. Wärmeübergangszahlen und Stoffwerte sind den Tafeln auf Seite 17 entnommen worden. Der Vergleich mit Bild 7 (identisch mit Bild A2/07) zeigt, daß für einen Füllungsgrad von 50% Messung und Rechnung vergleichsweise gut übereinstimmen.

Das Rechenverfahren nach Ogniwiek /3,4,5/ vereinfacht die Wärmebilanzrechnung durch Annahme eines stationären Wärmezustandes. Tatsächlich liegen instationäre Vorgänge vor. Um einen Eindruck über einen instationären Temperaturverlauf in einer Silowand bei gleichbleibenden Randbedingungen zu erhalten, wurde eine Vergleichsrechnung mittels eines eigenen Rechenprogramms vorgenommen.

Die Berechnungsparameter lauteten :

spezifisches Gewicht des Betons	ρ	=	2.40	[Mg / m ³]
Wärmeleitfähigkeit	"	"	λ	= 1.75 [W / m K]
spezifische Wärmekapazität	"	"	c_b	= 244.45 [W h / Mg K]

Wärmeübergangszahlen

Innenluft - Innenwand	α_{wi}	=	4.7	[W / m ² K]
Außenluft - Außenwand	α_{wa}	=	14.0	[W / m ² K]

In Bild 6 sind die Temperaturgradienten über die Silowanddicke zu einem simulierten Aufheizvorgang aufgetragen. Dabei ist in diesem Fall nach ca. 2 Tagen der stationäre Temperaturfluß erreicht. Das Bild zeigt anschaulich den ungefähren zeitlichen Ablauf der Temperaturänderungen in einer Silowand, wenn, wie hier dargestellt, die Lufttemperaturen als konstant angenommen werden. Bei Berücksichtigung der obengenannten Eingangsparameter kann befriedigende Übereinstimmung mit den gemessenen Werten für den Zeitpunkt $\tau = 48$ Stunden (quasi stationärer Zustand) festgestellt werden.

Bei den sich häufig ändernden Innenlufttemperaturen, hervorgerufen durch die wechselnden Produktionsbedingungen, wäre

ein genaues Erfassen der zeitabhängigen Wärmeverläufe innerhalb der Wände des Zementklinkersilos eine nur mit erheblich höheren meßtechnischem Aufwand zu beantwortende Frage; sie konnte jedoch im Rahmen dieses Forschungsvorhabens mit der vorhandenen Meßeinrichtung nicht beantwortet werden. Die Nutzung der Meßwerte für die Entwurfspraxis ist dadurch nicht eingeschränkt.

INSTATIONÄRE TEMPERATURVERLAUF IN EINER STAHLBETONWAND

LEGENDE :

	TEMPERATUREN NACH [STUNDE]	AUSSENLUFT- TEMPERATUR [C]	INNENLUFT- TEMPERATUR [C]
■ =	1	12.5	175.0
● =	6	12.5	175.0
▲ =	12	12.5	175.0
⊕ =	24	12.5	175.0
× =	48	12.5	175.0

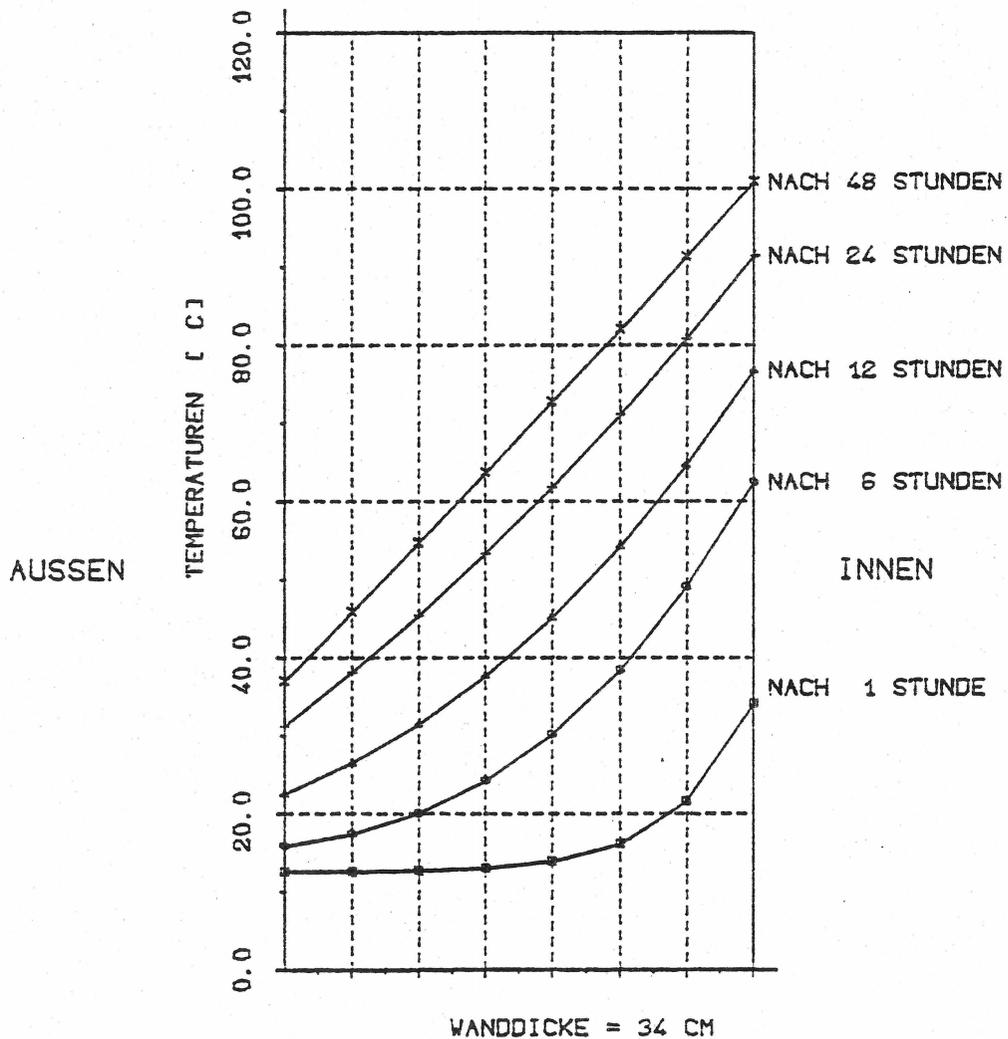


BILD 6

5 Diskussion der Ergebnisse und Empfehlungen

Oberhalb des Füllgutspiegels zeigen die gerechneten Silowand- sowie Innenlufttemperaturen (siehe Abschnitt 4) gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten.

Im Zusammenhang mit der Festlegung der Füllguttemperaturen sei auf den Meßzeitraum von Oktober bis Dezember 1979 hingewiesen, indem sich, bedingt durch betriebliche Störungen, über längere Zeit erhöhte Temperaturbeanspruchungen in der Silokonstruktion einstellten. Diese Beobachtung legt den Schluß nahe, daß bei der Festlegung der Einfülltemperaturen derartige Störfälle unbedingt zu berücksichtigen sind. Die Einfülltemperaturen stiegen in diesen Monaten auf über 200 °C an.

Unterhalb des Füllgutspiegels erscheint bei schnellem kontinuierlichen Füllen, ohne gleichzeitiges Entleeren, ein linear abfallender Verlauf der Temperaturen angebracht. Das würde im Gegensatz zu K. Koch und J. Peter /11/ einen etwas ungünstigeren Schnittgrößenzustand beinhalten, der gegebenenfalls maßgebend werden kann, wenn Entleerungs- bzw. Fülldruck und Temperaturgradient überlagert werden. Im Vergleich mit den gemessenen Temperaturen ergibt ein linear abfallender Temperaturverlauf eine geringe Überschätzung der Temperaturen knapp unterhalb des Füllgutspiegels. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, daß der den Messungen zugrunde liegende Füllvorgang keiner durchgehenden und damit ungünstigen Vollfüllung entspricht.

Bei dem hier betrachteten Zementklinkersilo wäre eine solche kontinuierliche Vollfüllung bei einer maximalen Betriebsleistung von ca. 125 m³/h nach etwa 12 Tagen möglich. Dieser Zeitraum entspricht der Zeitspanne, in der sich die Innenwandtemperaturen des unteren Silobereichs soweit abgekühlt haben, daß sie ungefähr den Außenlufttemperaturen entsprechen.

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 8
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 100.0 UND 122.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 111.0 UND 212.0 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 22.9 UND 24.9 [METER]

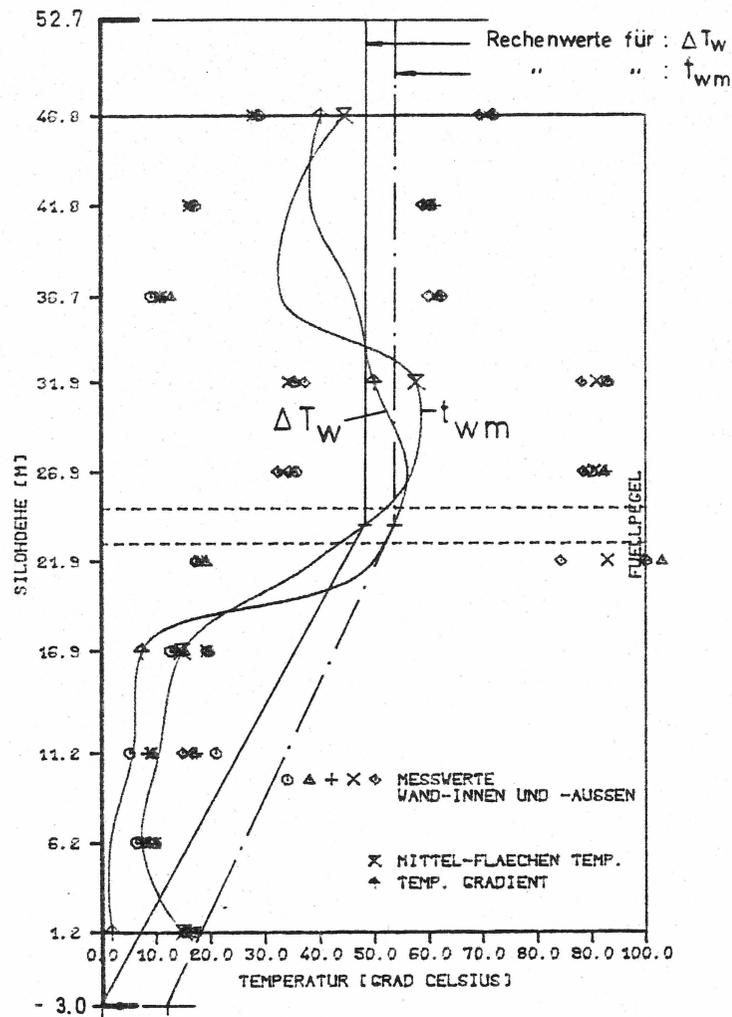


Bild 7 Rechnerisch ermittelter Temperaturverlauf gegenüber dem gemessenen Verlauf (siehe auch Bild A2/07)

Bild 7 zeigt den Vergleich zwischen den gemessenen und den gerechneten Temperaturverläufen. Die für die rechnerische Temperaturermittlung angenommene Außenluft- ($t_{la} = 12.5 \text{ }^\circ\text{C}$) sowie Einfülltemperatur ($t_{ke} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$) entspricht etwa den gemessenen Werten.

6 Zusammenfassung

Wie in Abschnitt 3 erläutert, können allgemeine Angaben über den Verlauf der Temperaturen in der Zylinderwand des Silos gemacht werden:

- oberhalb des Füllgutspiegels sind die Temperaturen weitgehend unabhängig von der Höhenlage des Füllgutspiegels
- im Bereich des Füllgutspiegels bildet sich eine Zone erhöhter Temperaturbeanspruchung aus
- unterhalb dieser Zone fallen die Temperaturen schnell ab.

Oberhalb des Füllgutspiegels kann eine Ermittlung der Temperaturen in der Silokonstruktion mit genügender Genauigkeit nach den bereits zur Verfügung stehenden Verfahren /3,4,5,6,7,8/ durchgeführt werden. Hierbei sollten Störgrößen, die die Einfülltemperaturen über längere Zeiträume beeinflussen, unbedingt berücksichtigt werden. Zur Annahme sinnvoller Außenlufttemperaturen sei auf /4/ hingewiesen.

Im Bereich des Füllgutspiegels konnte die Ausdehnung der Zone erhöhter Temperaturbeanspruchung aus messtechnischen Gründen nicht genau ermittelt werden; sie beträgt jedoch der Höhe nach weniger als 5.00 m.

Unterhalb des Füllgutspiegels ist die Annahme eines linear-abfallenden Temperaturverlaufs sinnvoll (siehe Bild 7).

Es kann somit folgender Temperaturansatz vorgeschlagen werden (siehe Bild 7) :

Oberhalb des Füllgutspiegels : konstanter Verlauf von Wand-
Mittelflächen-Temperatur und
Temperaturgradient

Unterhalb des Füllgutspiegels: linear zum Fußpunkt der
Silowand abfallende Werte
für Mittelflächen-Temperatur
und Temperaturgradient.

Außenluft-Temperatur : -15 °C
+40 °C

In den nachfolgenden Bildern 8 bis 13 wurden für ungünstige
Eingangsparameter Berechnungshilfen zusammengestellt :

EINFUELLMENCE : 125.0 [M3/H]/ENTSTAUBUNG : 10000.0 [M3/H]
 EINFUELLTEMP. : 200.0 [C]/AUSSENLUFTTEMP. : -15.0 [C]

EINFUELLMENCE : 125.0 [M3/H]/ENTSTAUBUNG : 10000.0 [M3/H]
 EINFUELLTEMP. : 200.0 [C]/AUSSENLUFTTEMP. : 40.0 [C]

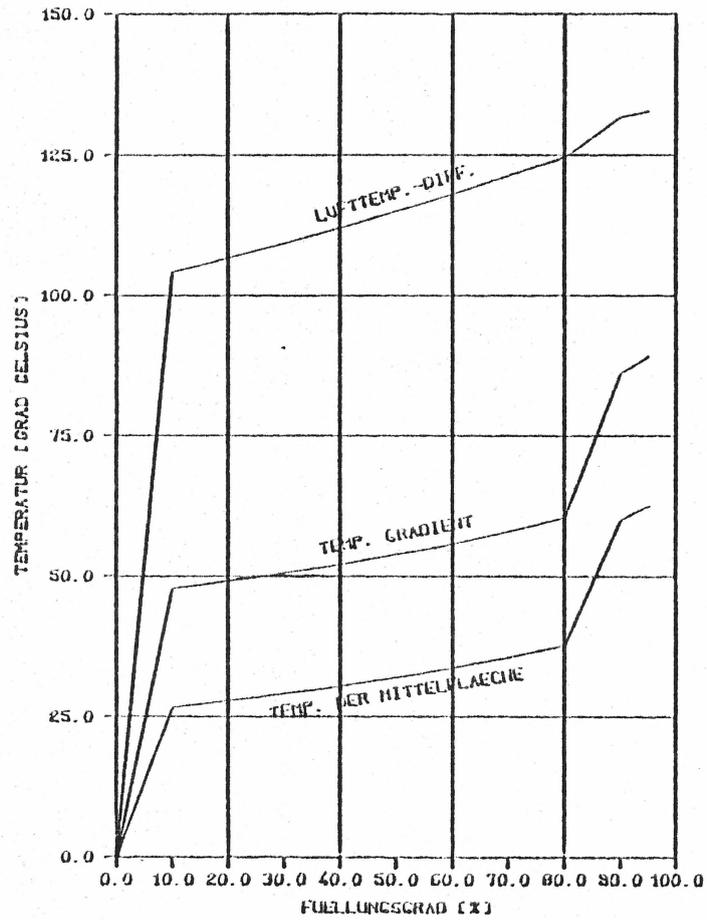


BILD 8

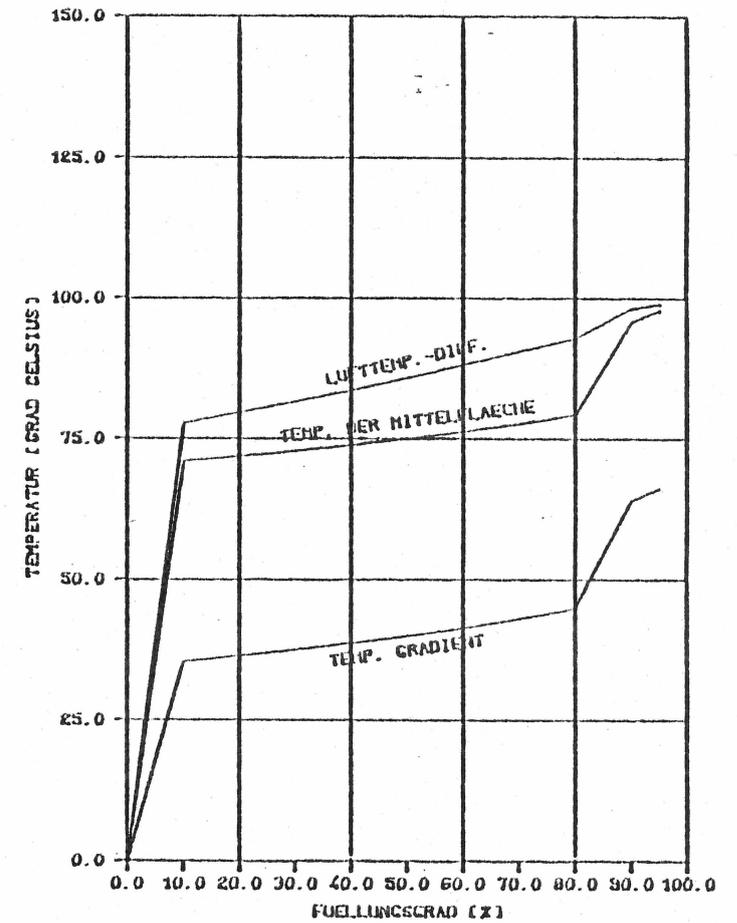


BILD 9

EINFUELLMENCE : 100.0 [M3/H]/ENTSTAUBUNG : 10000.0 [M3/H]
 EINFUELLTEMP. : 200.0 [C]/AUSSENLUFTTEMP. : -15.0 [C]

EINFUELLMENCE : 100.0 [M3/H]/ENTSTAUBUNG : 10000.0 [M3/H]
 EINFUELLTEMP. : 200.0 [C]/AUSSENLUFTTEMP. : 40.0 [C]

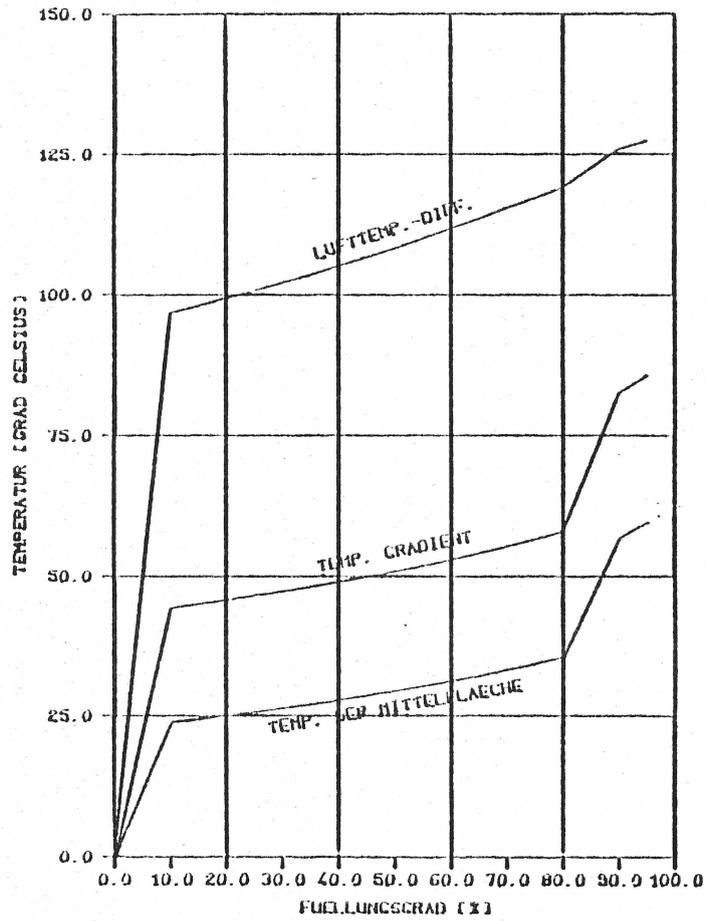


BILD 10

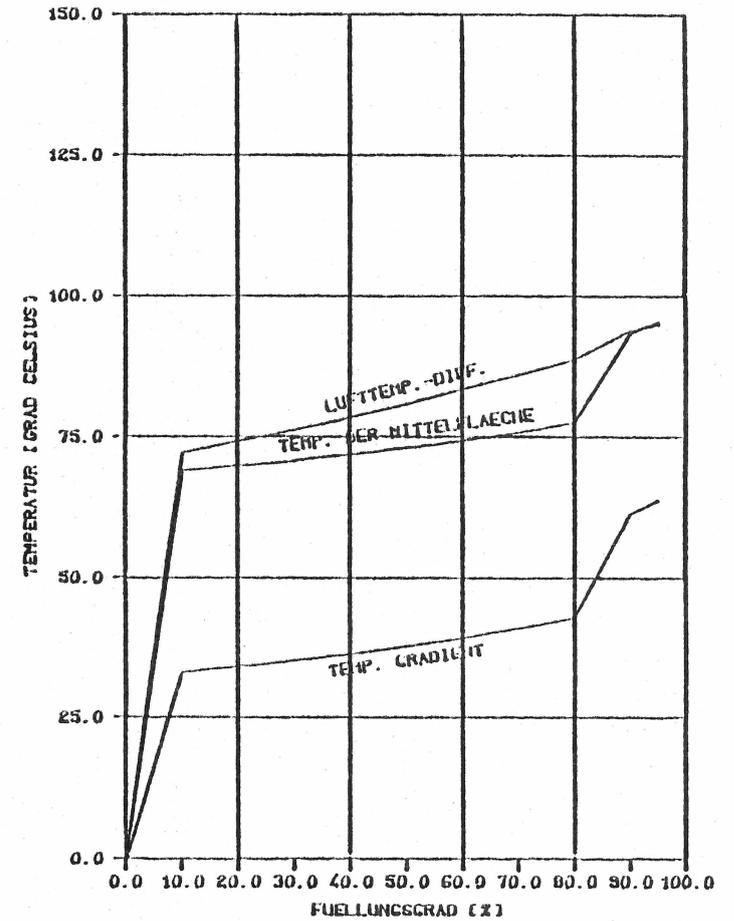


BILD 11

EINFUELLMENGE : 75.0 [M3/H]/ENTSTAUBUNG : 10000.0 [M3/H]
 EINFUELLTEMP. : 200.0 [C]/AUSSENLUFTTEMP. : -15.0 [C]

EINFUELLMENGE : 75.0 [M3/H]/ENTSTAUBUNG : 10000.0 [M3/H]
 EINFUELLTEMP. : 200.0 [C]/AUSSENLUFTTEMP. : 40.0 [C]

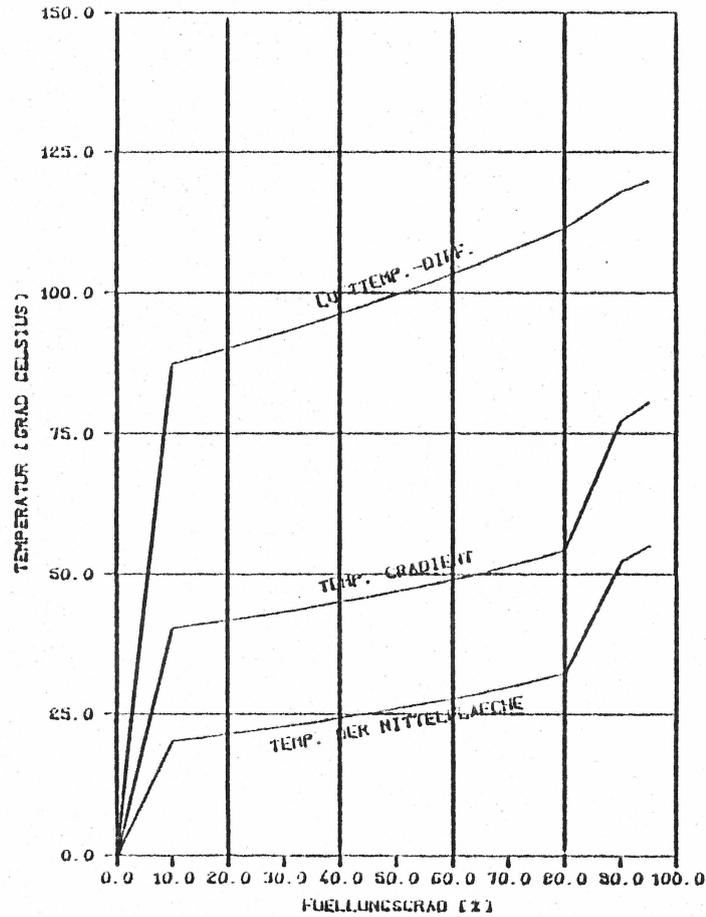


BILD 12

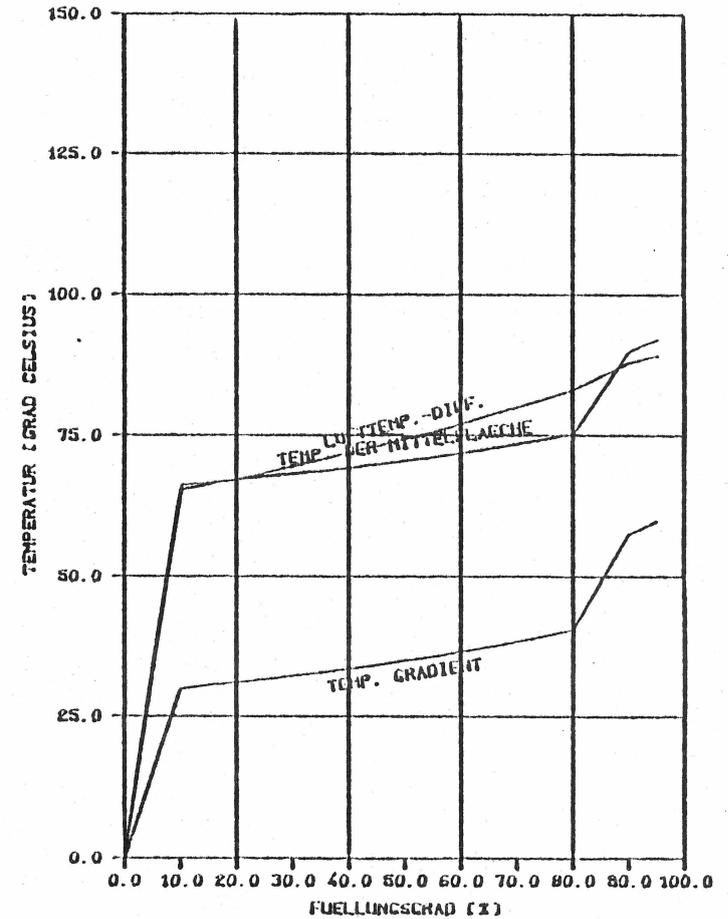


BILD 13

7 Literaturverzeichnis

- /1/ G.Funke
Die Lagerung von Zementklinker
- Ein Staubproblem ?
ZEMENT-KALK-GIPS 9/1968 S. 376 - 380
- /2/ H. Sillem
Mahlen und Lagern von Klinker und Zement
ZEMENT-KALK-GIPS 2/1977 S. 53 - 62
- /3/ D. Ogniwiek
Temperaturberechnung von Silozellen
insbesondere von Zementklinkersilos
Dissertation TU Braunschweig 1978
- /4/ D. Ogniwiek
Berechnung der Temperaturen in
Zementklinkersilos
DIE BAUTECHNIK 2/1979 S. 37 - 40
- /5/ D.Ogniwiek
Beitrag zur Ermittlung der Temperaturen
in Zement- und Zementklinkersilos aus
Stahl und Stahlbeton
BAUINGENIEUR 1/1980 S. 25 - 29
- /6/ K.Hering
Zur Berechnung der Temperaturbeanspruchung
von Klinkersilos
ZEMENT-KALK-GIPS 12/1975 S. 523 - 525
- /7/ P.Martens
Überschlägige Ermittlung der Temperaturen
in Klinkersilos
DIE BAUTECHNIK 12/1975 S. 402 - 408

- /8/ I. Kleine
Beitrag zur Ermittlung des Temperaturgefälles
in der Wand eines Klinkersilos
ZEMENT-KALK-GIPS 8/1972 S. 391 - 394
- /9/ K. Pieper und R. Wenzel
Aktuelle Fragen des Entwurfs, der Belastung,
der Berechnung und der Bauausführung von
Silozellen.
BETON- UND STAHLBETONBAU 4/1978 S. 192 - 198
- /10/ G. Timm und R. Windels
Siloprobleme aus der Sicht der Praxis
BETON- UND STAHLBETONBAU 7/1979 S. 161 - 170
- /11/ R. Koch und J. Peter
Bemessung für kombinierte Beanspruchungen aus
Lasten, Vorspannung und Temperaturzwang am
Beispiel von Silowänden.
BETON- UND STAHLBETONBAU 4/1978 S. 95 - 102
- /12/ P. Noakowsky
Praxisgerechtes Verfahren für die Bemessung von
Stahlbetonbauteilen bei Zwangsbeanspruchung.
BETON- UND STAHLBETONBAU 4/1980 S. 75 - 82
5/1980 S. 120 - 135
- /13/ H. J. Klischat
Temperaturmessungen an einem Stahlbeton-
Klinkersilo
ZEMENT-KALK-GIPS 10/1972 S. 494 - 495
- /14/ K. Kordina
Temperaturbeanspruchung in kreiszylindrischen
Stahlbetonbehältern
Revue C Tijdschrift 1964 S. 140 - 147

- /15/ K. Kordina und J. Eibl
Zur Frage der Temperaturbeanspruchung von
kreiszyklindrischen Stahlbetonsilos
BETON- UND STAHLBETONBAU 1/1964 S. 1 - 11
- /16/ J. Peter, G. Lochner
Zur Statik, Konstruktion und Ausführung eines
Klinkerrundlagers - Hinweise für die Berechnung
von Silowänden
BETON- UND STAHLBETONBAU 4/1977 S. 92 - 98
5/1977 S. 127 - 133
- /17/ W. Kühle
Ein Klinkerlager für 100000 t
ZEMENT-KALK-GIPS 6/1976 S. 278 - 282
- /18/ H. Luchner, H. Lindner
Neuartige Bauweise bei der Herstellung eines
vorgespannten Klinkersilos
BETON- UND STAHLBETONBAU 11/1977 S. 241 - 246
- /19/ K. Pieper et. al.
Silos für Zementklinker
BETON 9/1970 S. 395 - 399

ANLAGE 1

Darstellung der gemessenen Temperaturen
als Funktion der Zeit

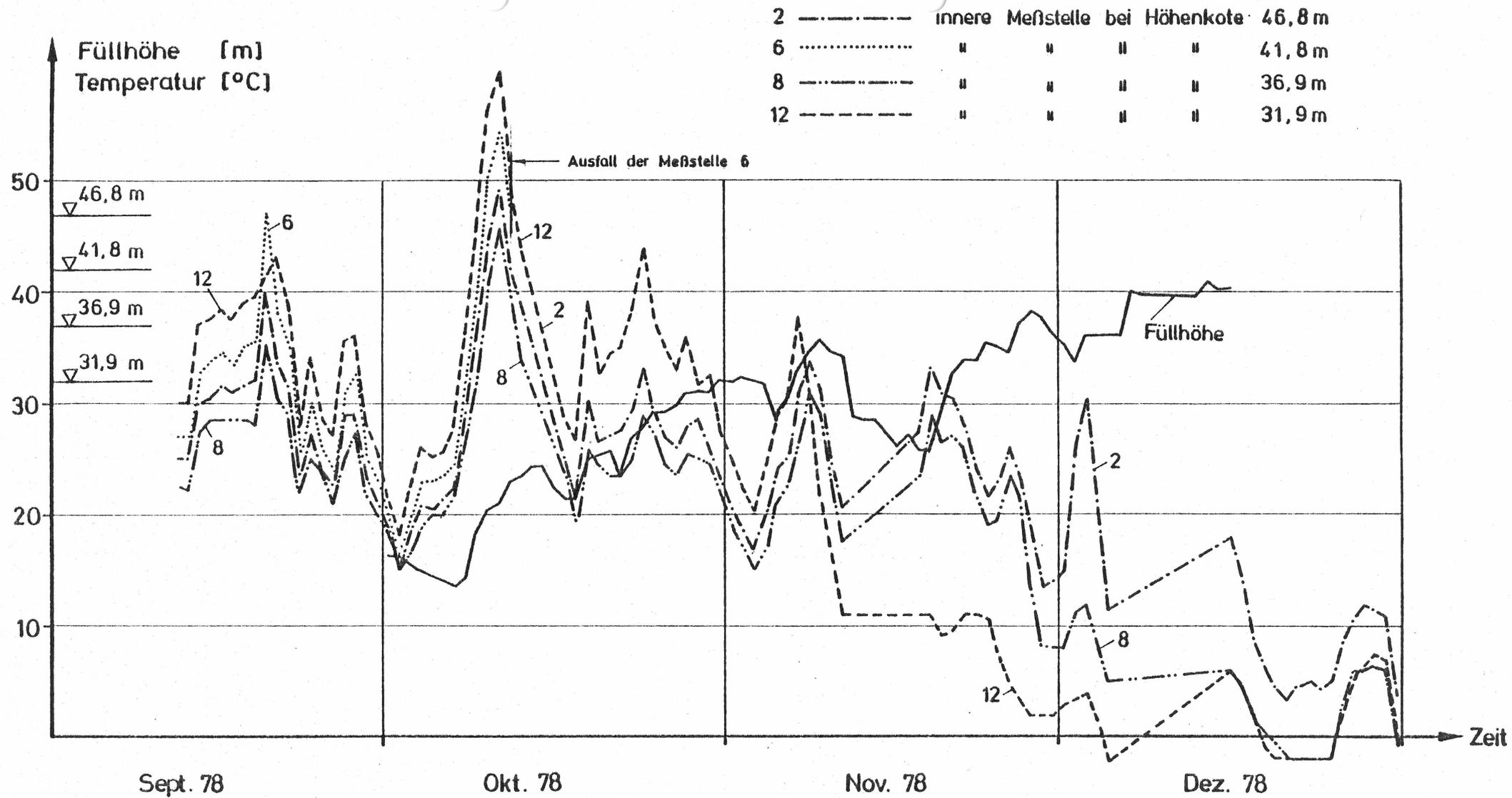
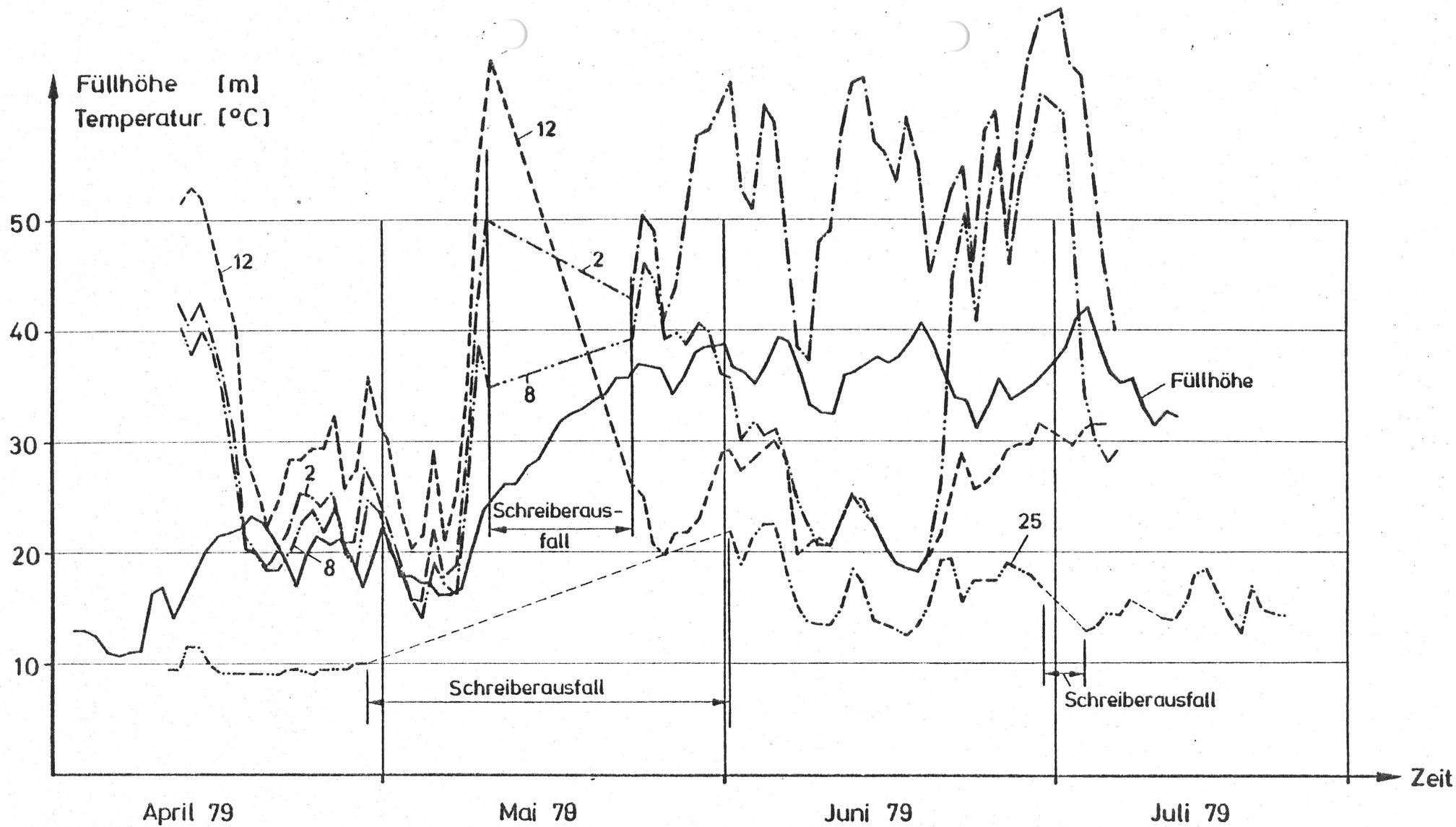


Bild A1/1 Temperaturverlauf und Zellenfüllstand für eine Füllperiode



2	—————	innere	Meßstelle	bei	Höhenkote	46,8 m
8	„	„	„	„	36,9 m
12	-----	„	„	„	„	31,9 m
25	- · - · -	„	„	„	„	6,2 m

Bild A1/2 Temperaturverlauf und Zellenfüllstand für eine Füllperiode

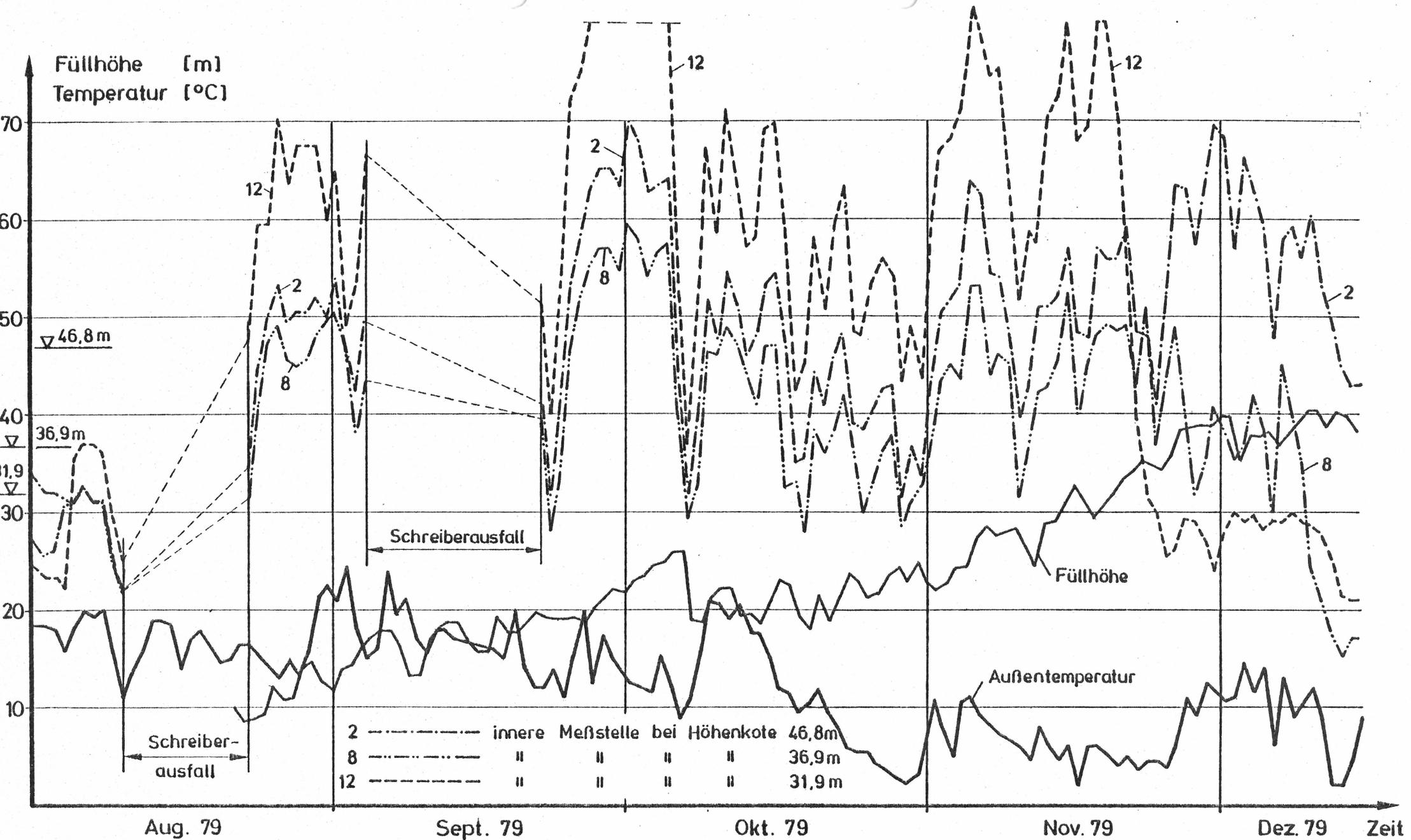


Bild A1/3

Temperaturverlauf und Zellenfüllstand für eine Füllperiode

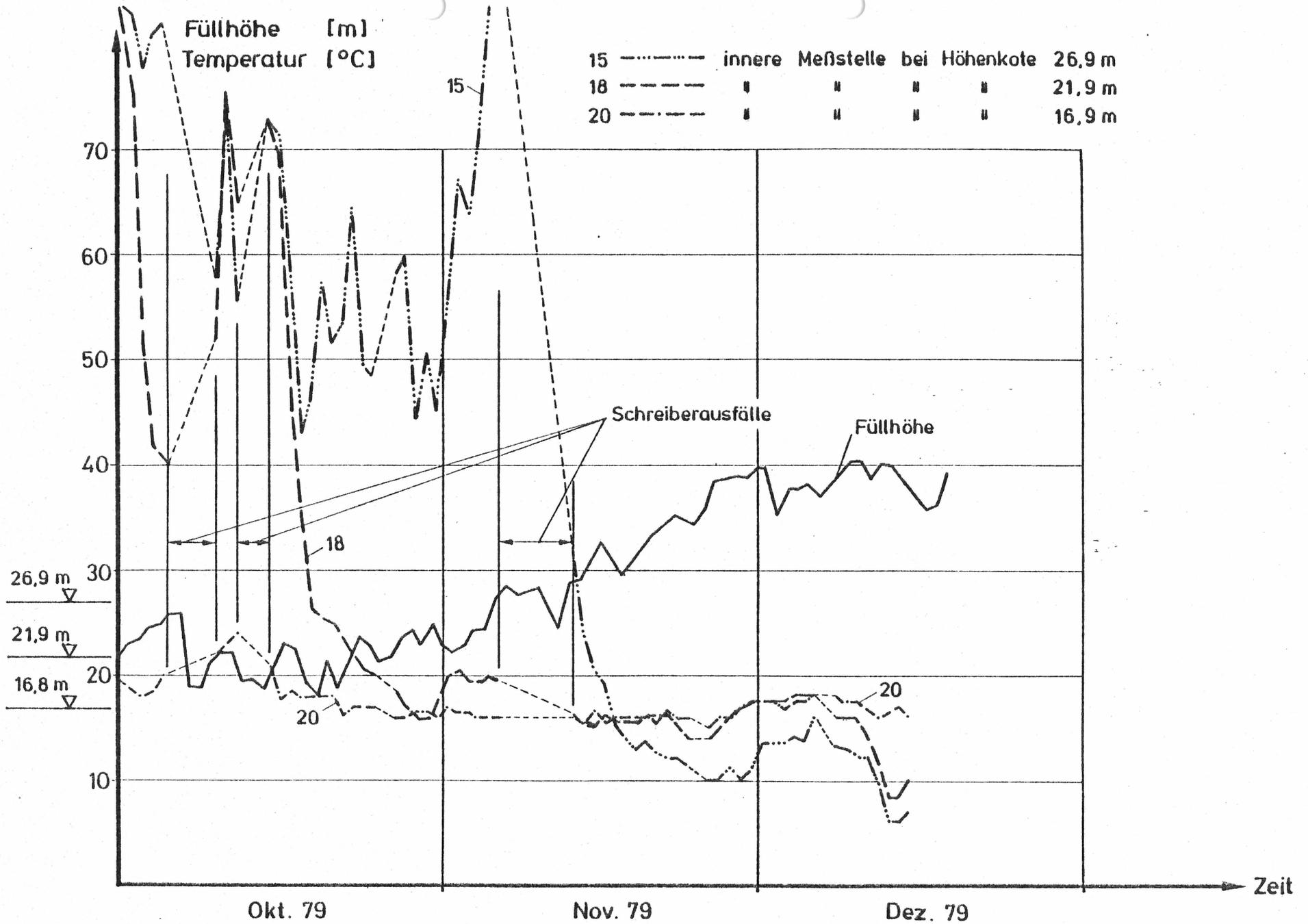


Bild A1/4 Temperaturverlauf und Zellenfüllstand für eine Füllperiode

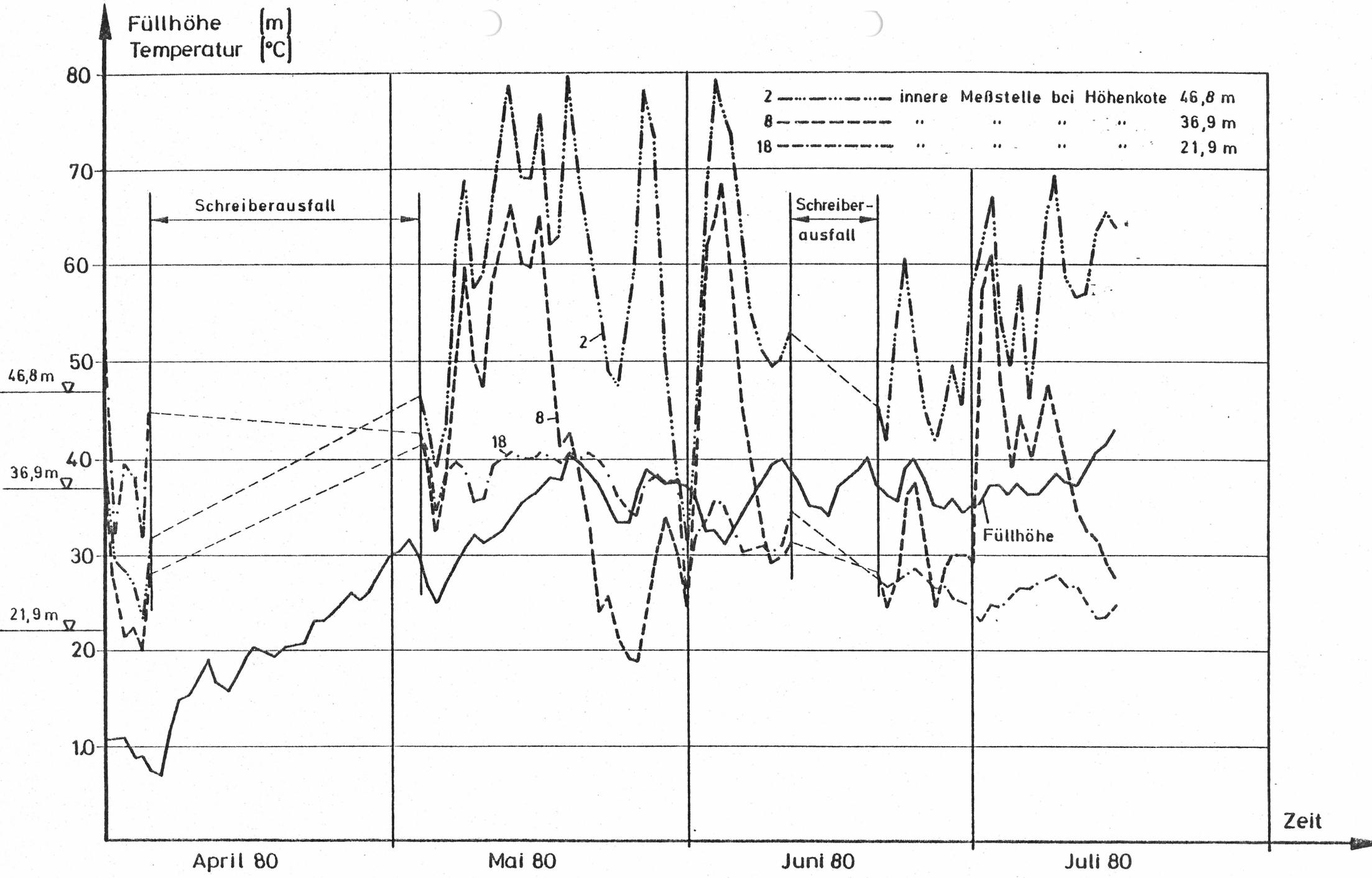


Bild A1/5 Temperaturverlauf und Zellenfüllstand für eine Füllperiode

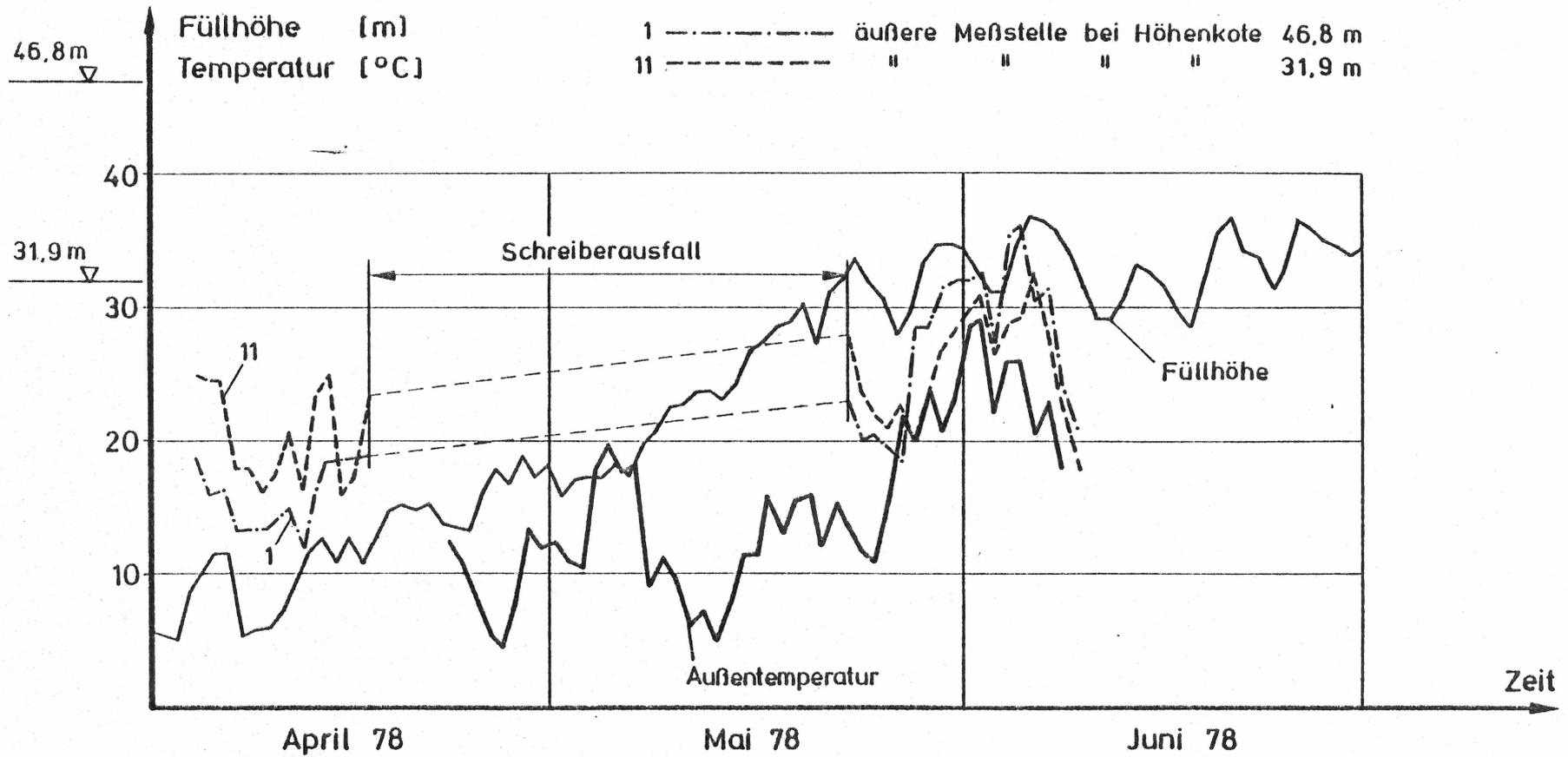


Bild A1/6 Temperaturverlauf und Zellenfüllstand für eine Füllperiode

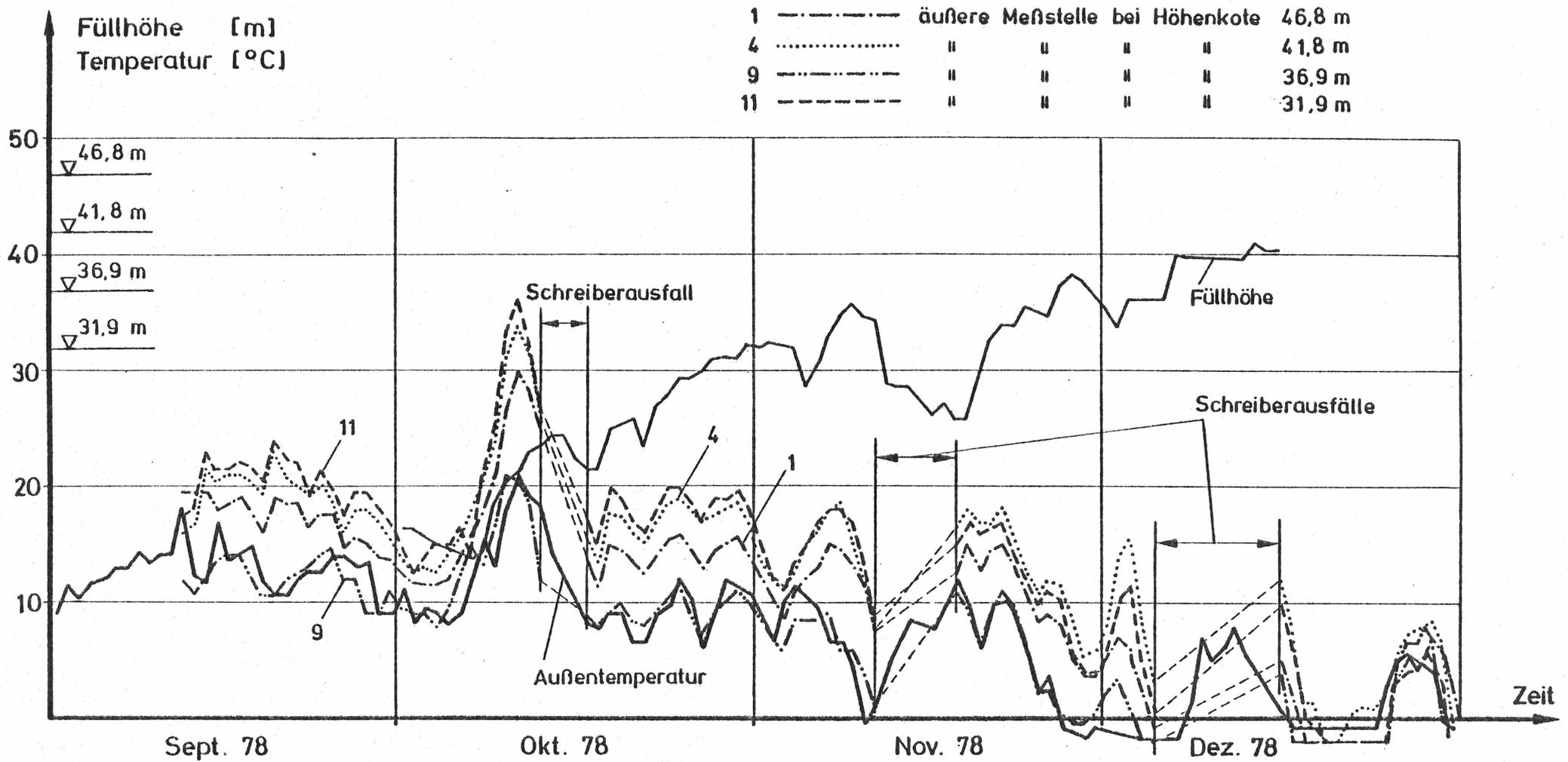


Bild A1/7

Temperaturverlauf und Zellenfüllstand für eine Füllperiode

1	-----	äußere	Meßstelle	bei	Höhenkote	46,8 m
4					41,8 m
9	-----					36,9 m
11	-----					31,9 m
27	-----					6,2 m

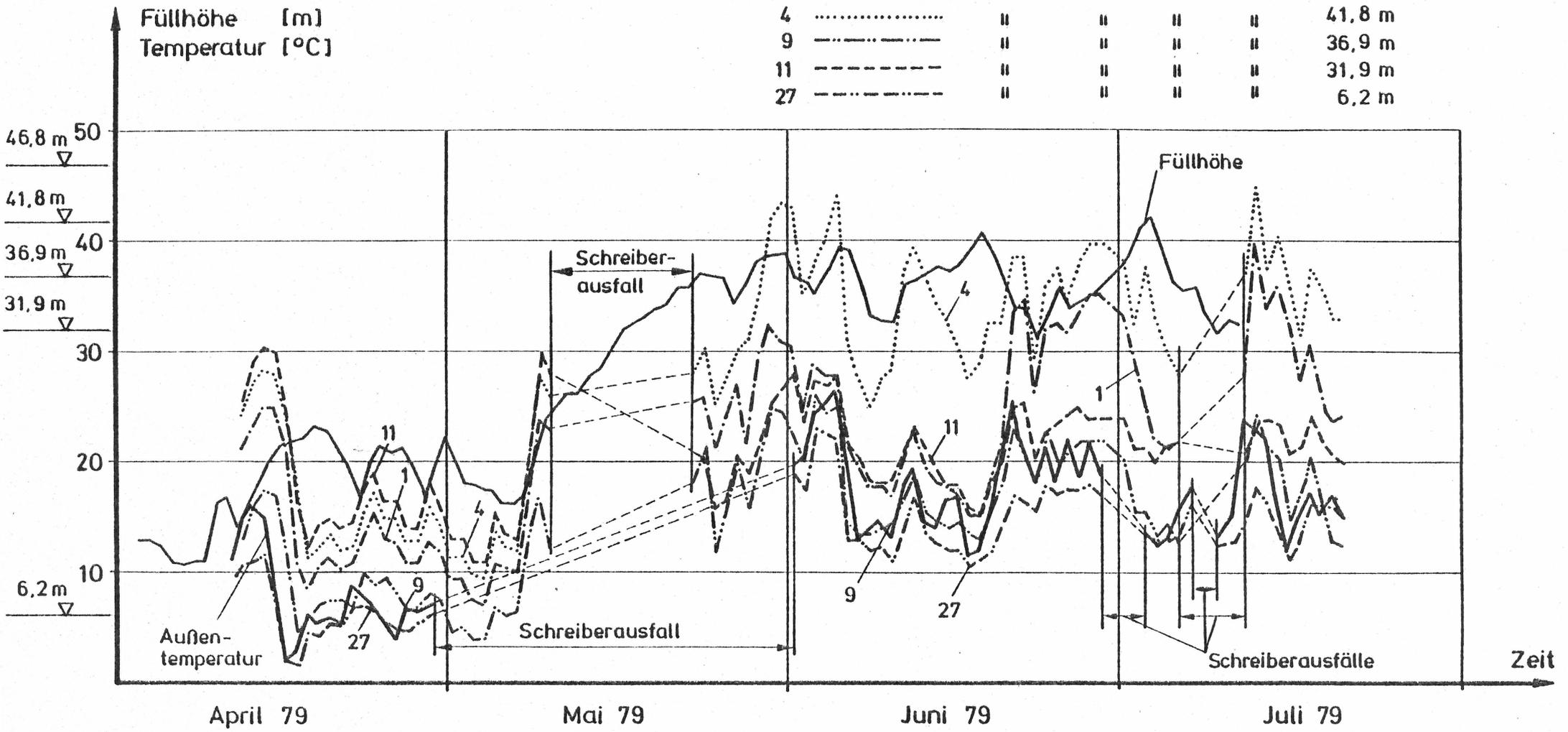


Bild A1/8 Temperaturverlauf und Zellenfüllstand für eine Füllperiode

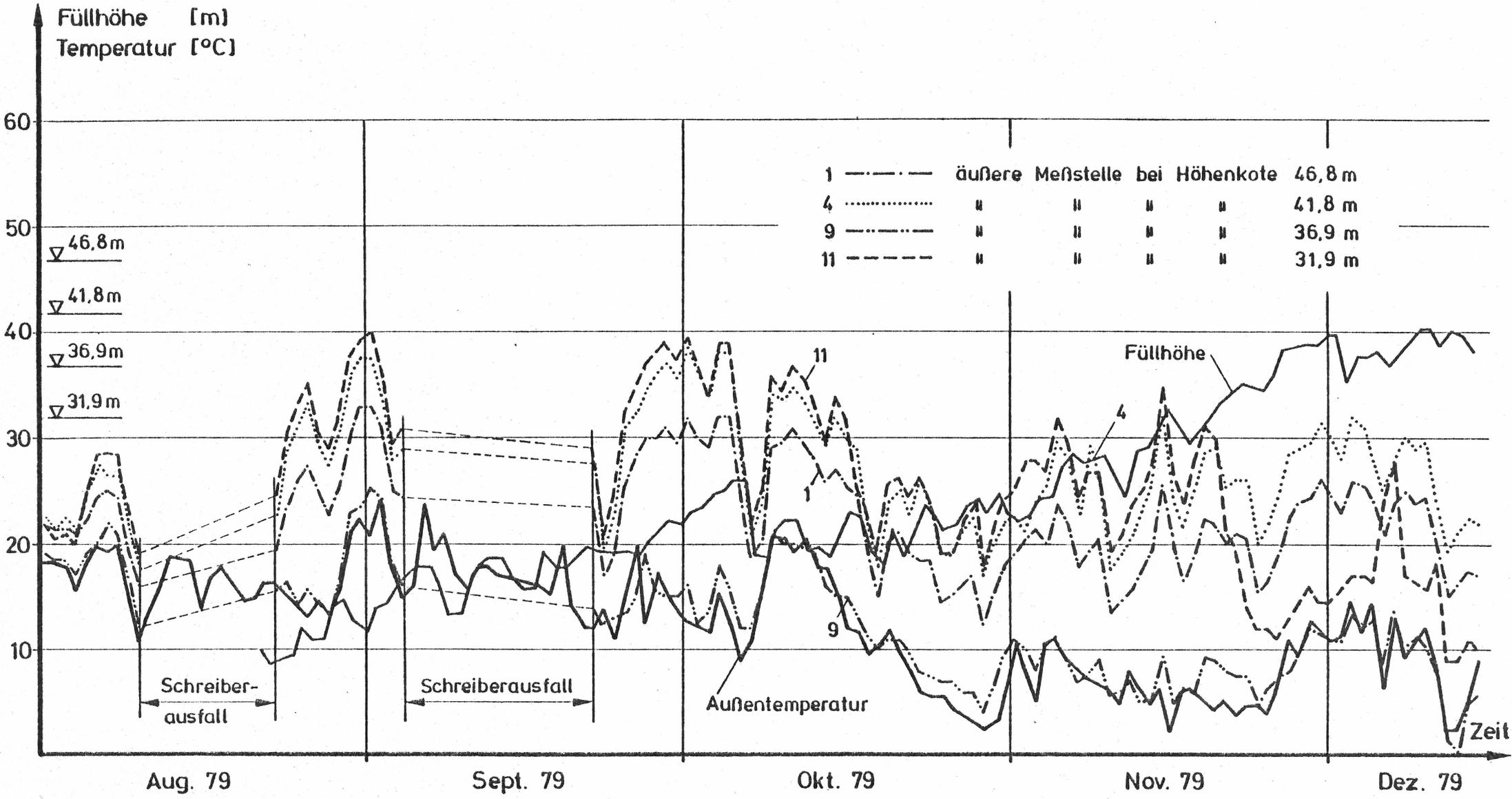


Bild A1/9 Temperaturverlauf und Zellenfüllstand für eine Füllperiode

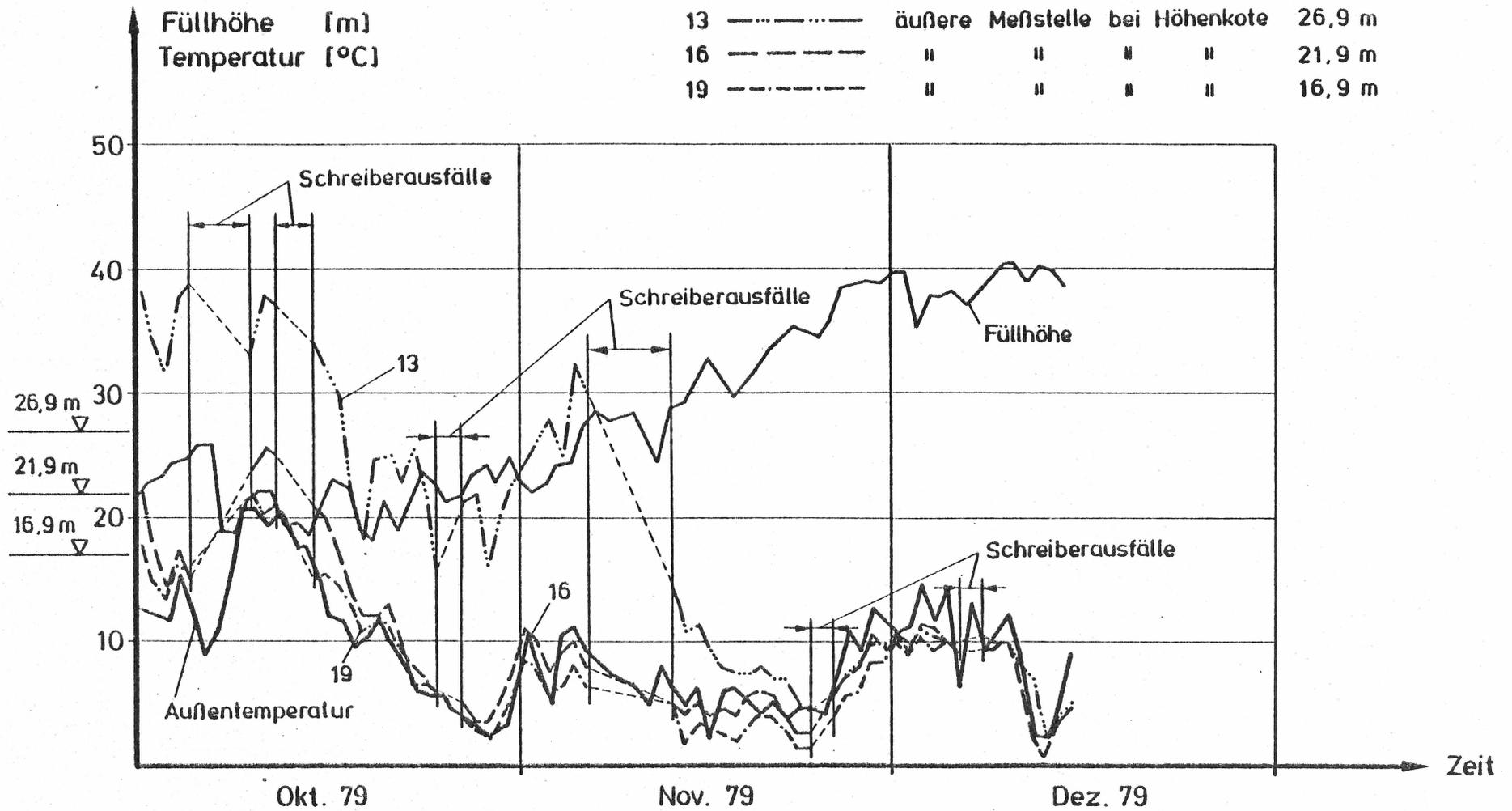


Bild A1/10 Temperaturverlauf und Zellenfüllstand für eine Füllperiode

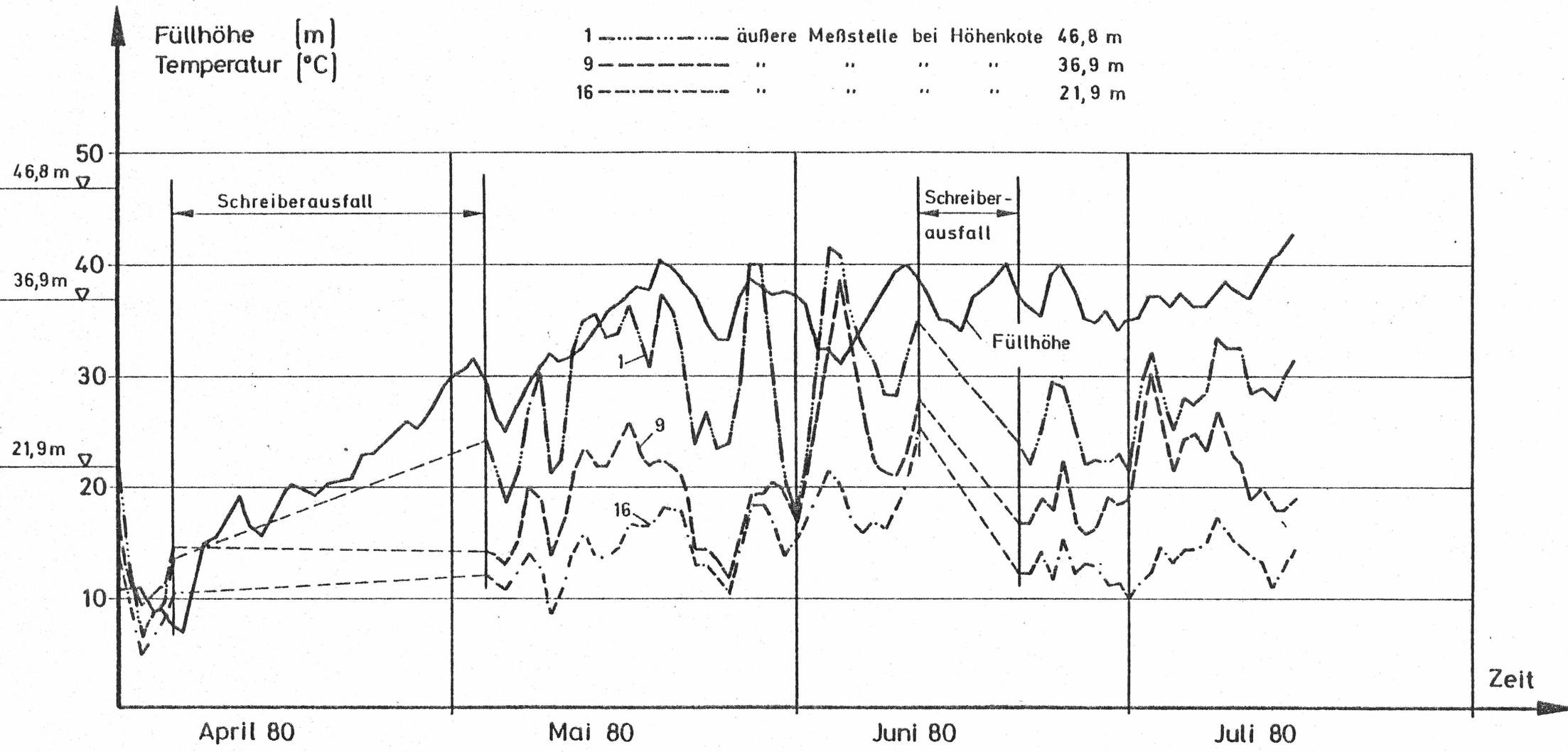


Bild A1/11 Temperaturverlauf und Zellenfüllstand für eine Füllperiode

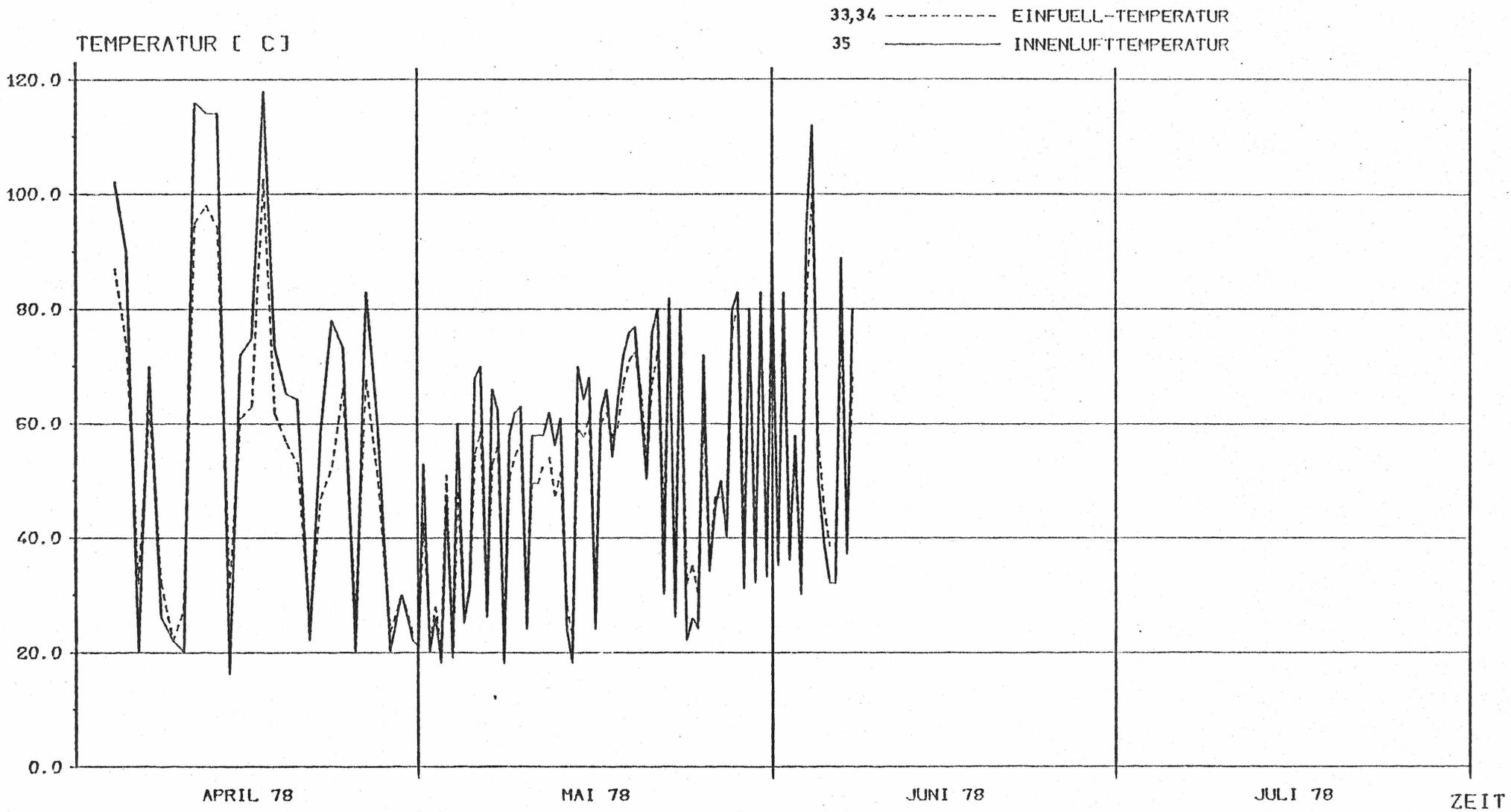


BILD A1/12 EINFUELL- UND INNENLUFT-TEMPERATUREN FUER EINE FUELLPERIODE

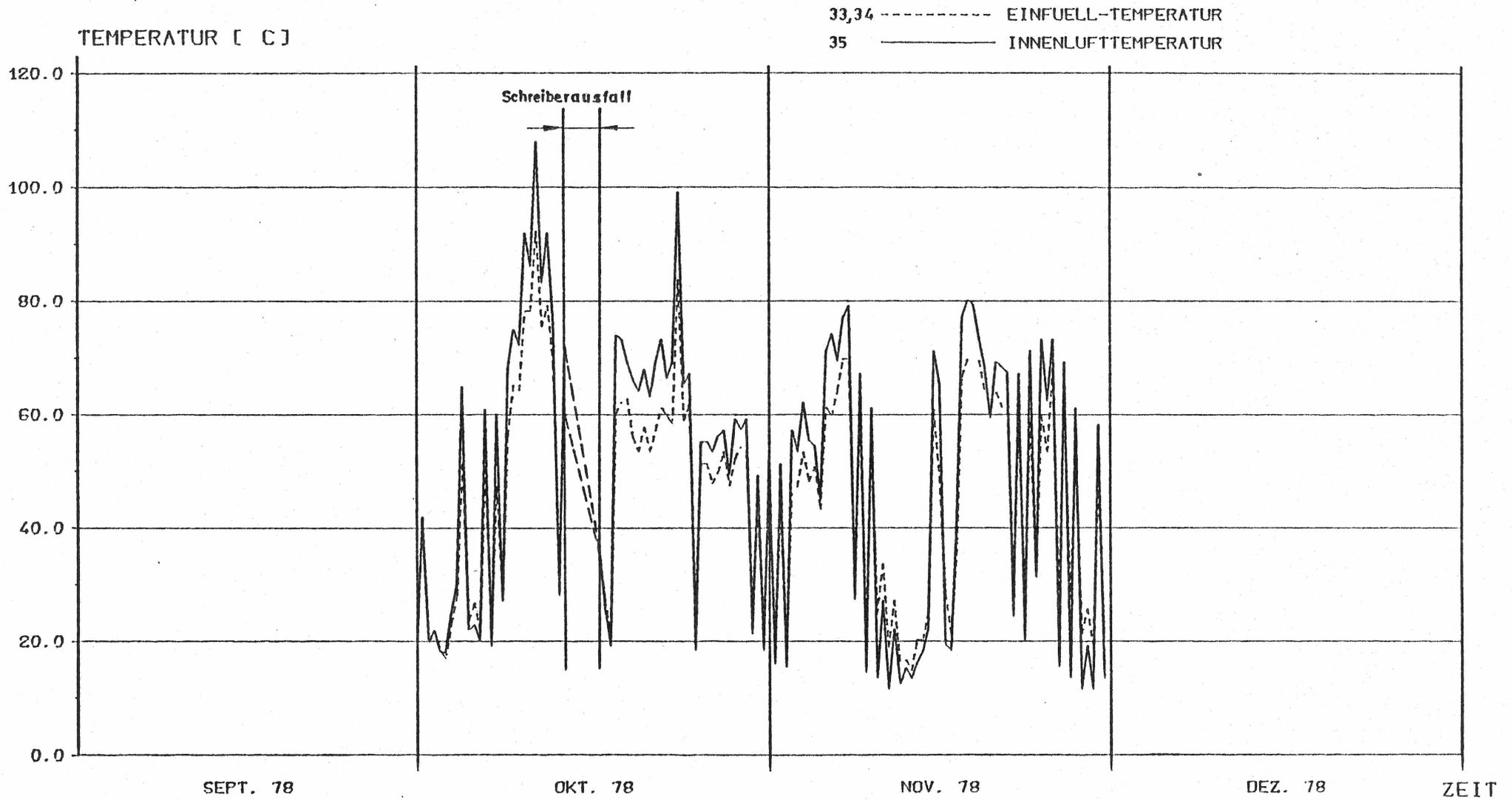


BILD A1/13

EINFUELL- UND INNENLUFT-TEMPERATUREN FUER EINE FUELLPERIODE

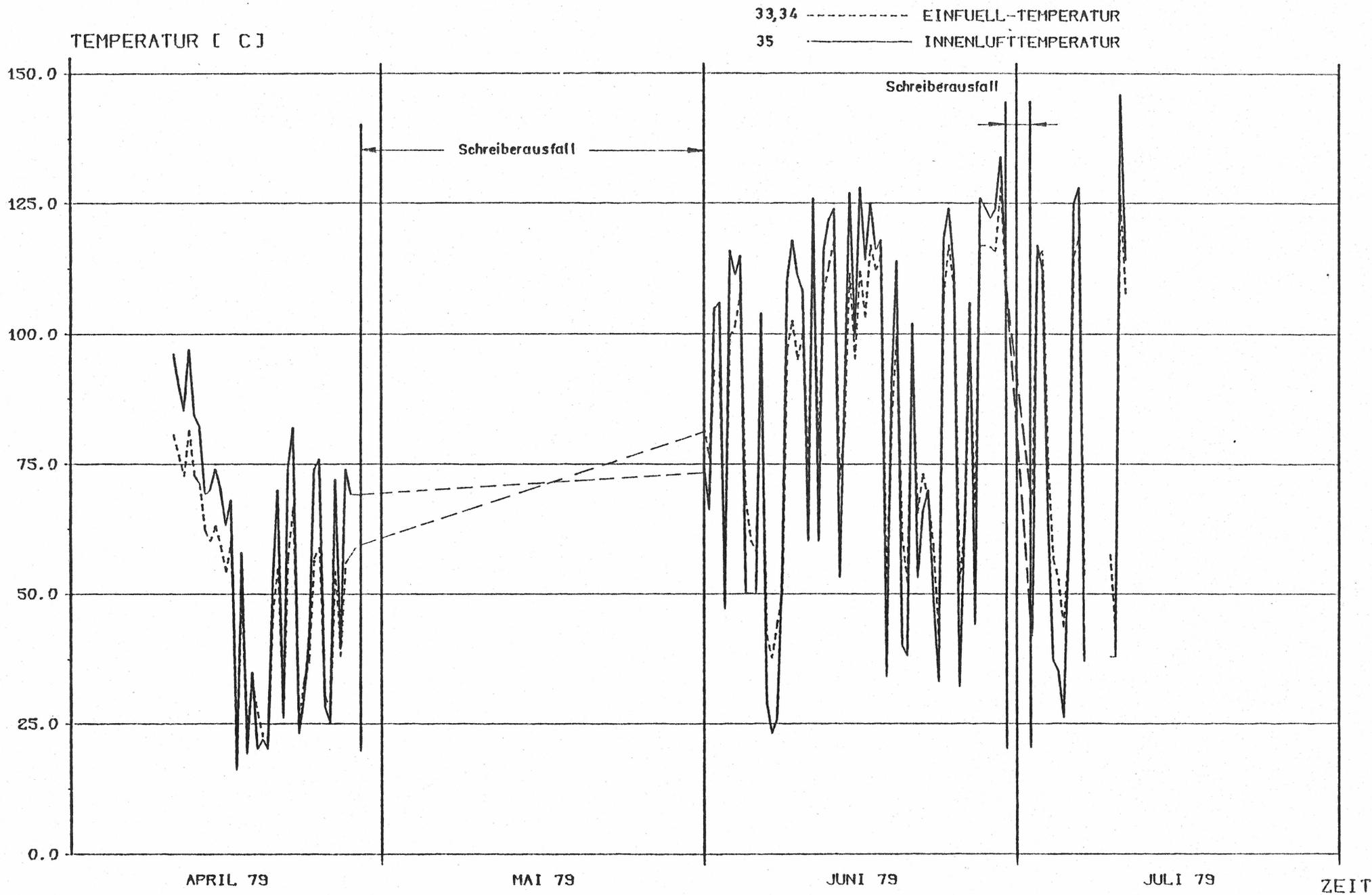


BILD A1/14

EINFUELL- UND INNENLUFT-TEMPERATUREN FUER EINE FUELLPERIODE

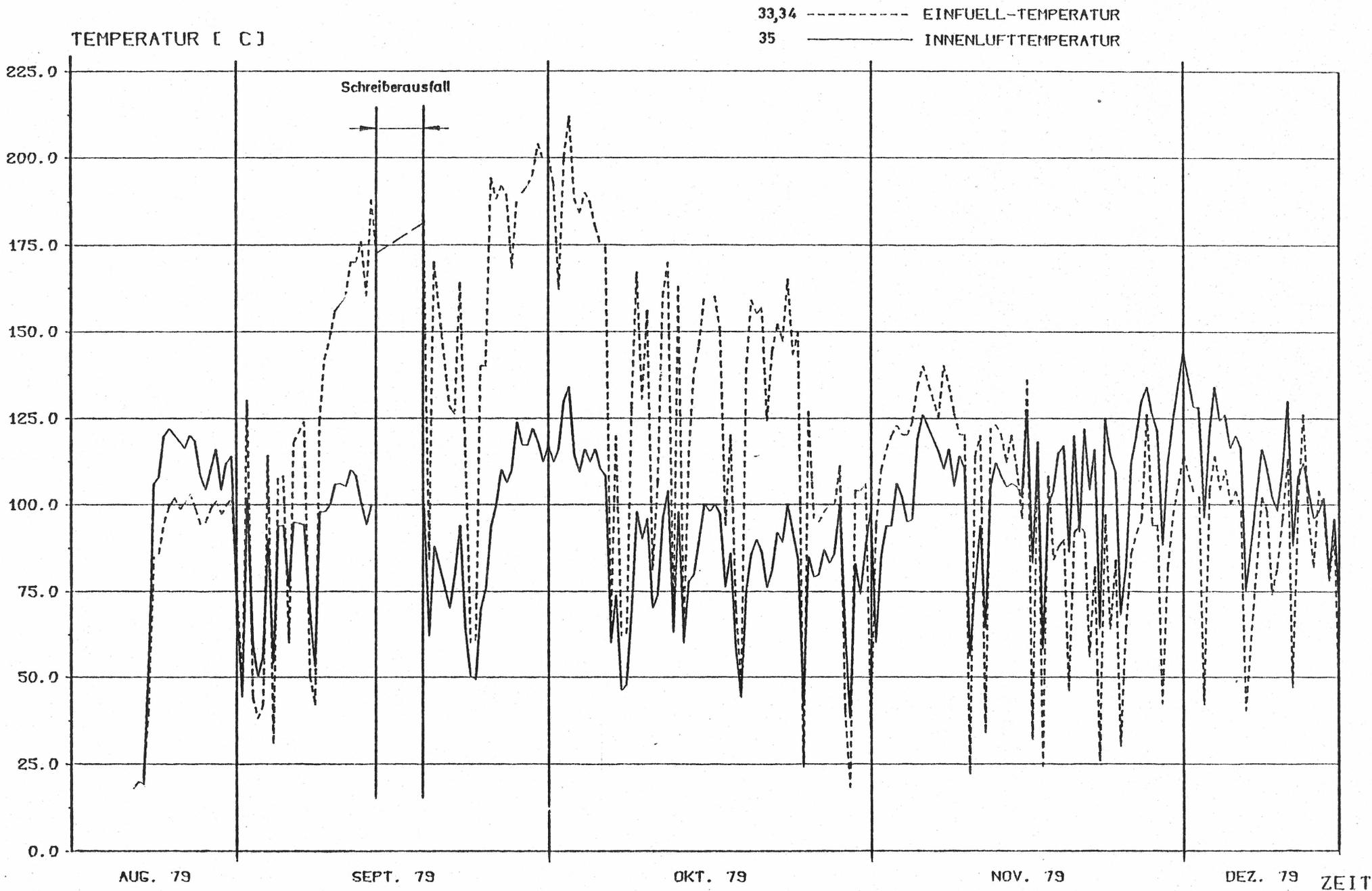


BILD A1/15

EINFUELL- UND INNENLUFT-TEMPERATUREN FUER EINE FUELLPERIODE

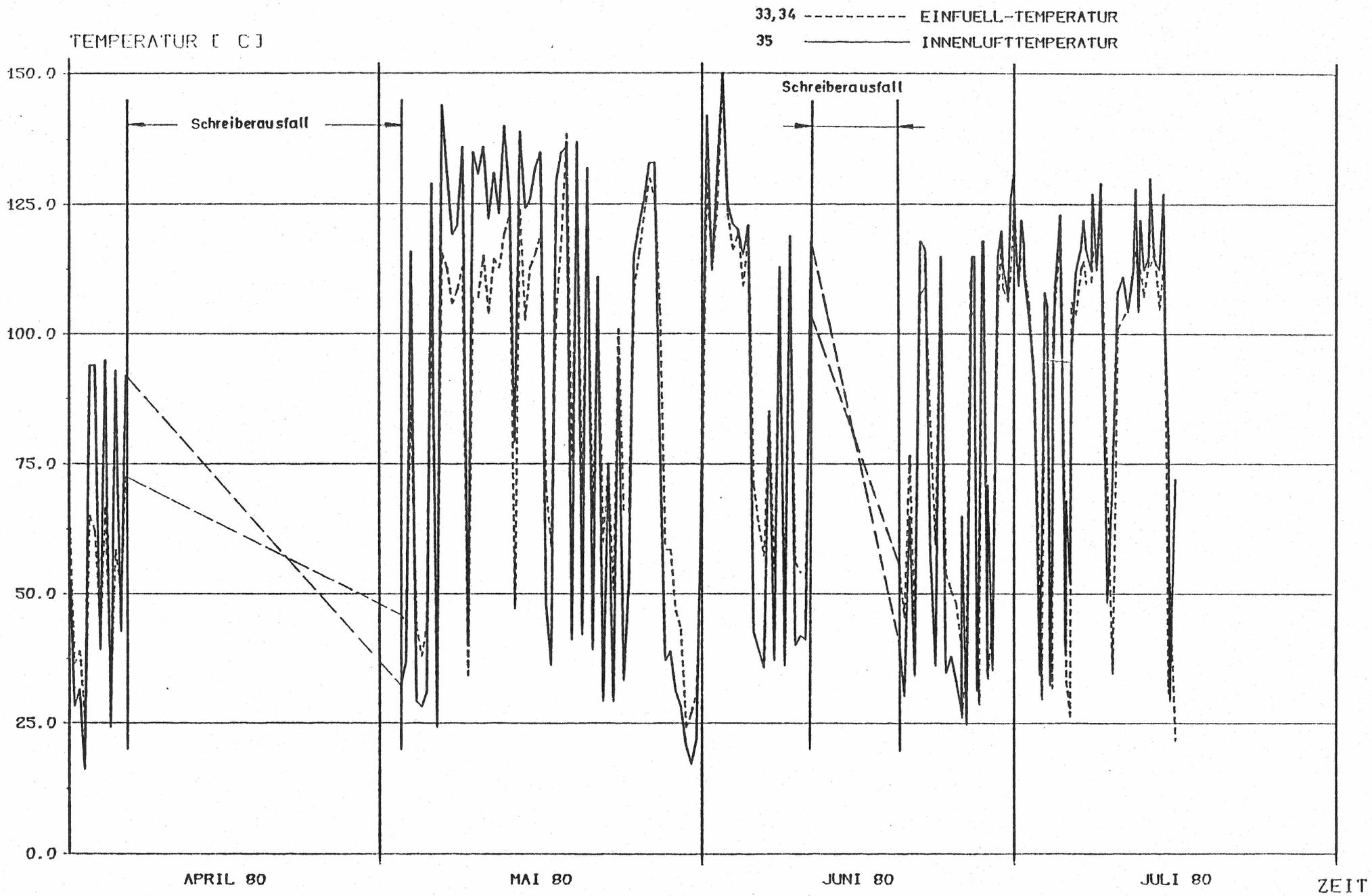


BILD A1/16 EINFUELL- UND INNENLUFT-TEMPERATUREN FUER EINE FUELLPERIODE

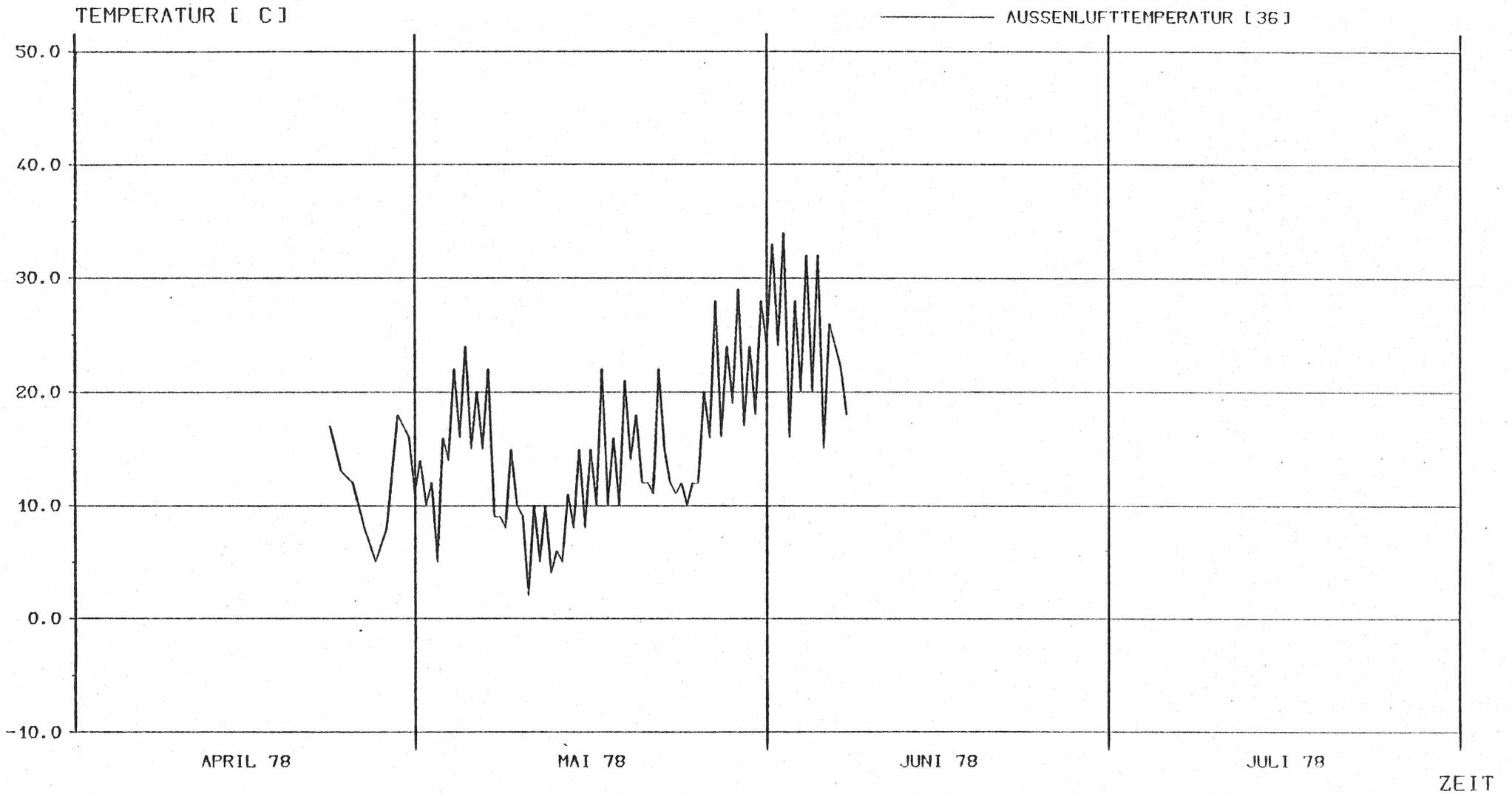
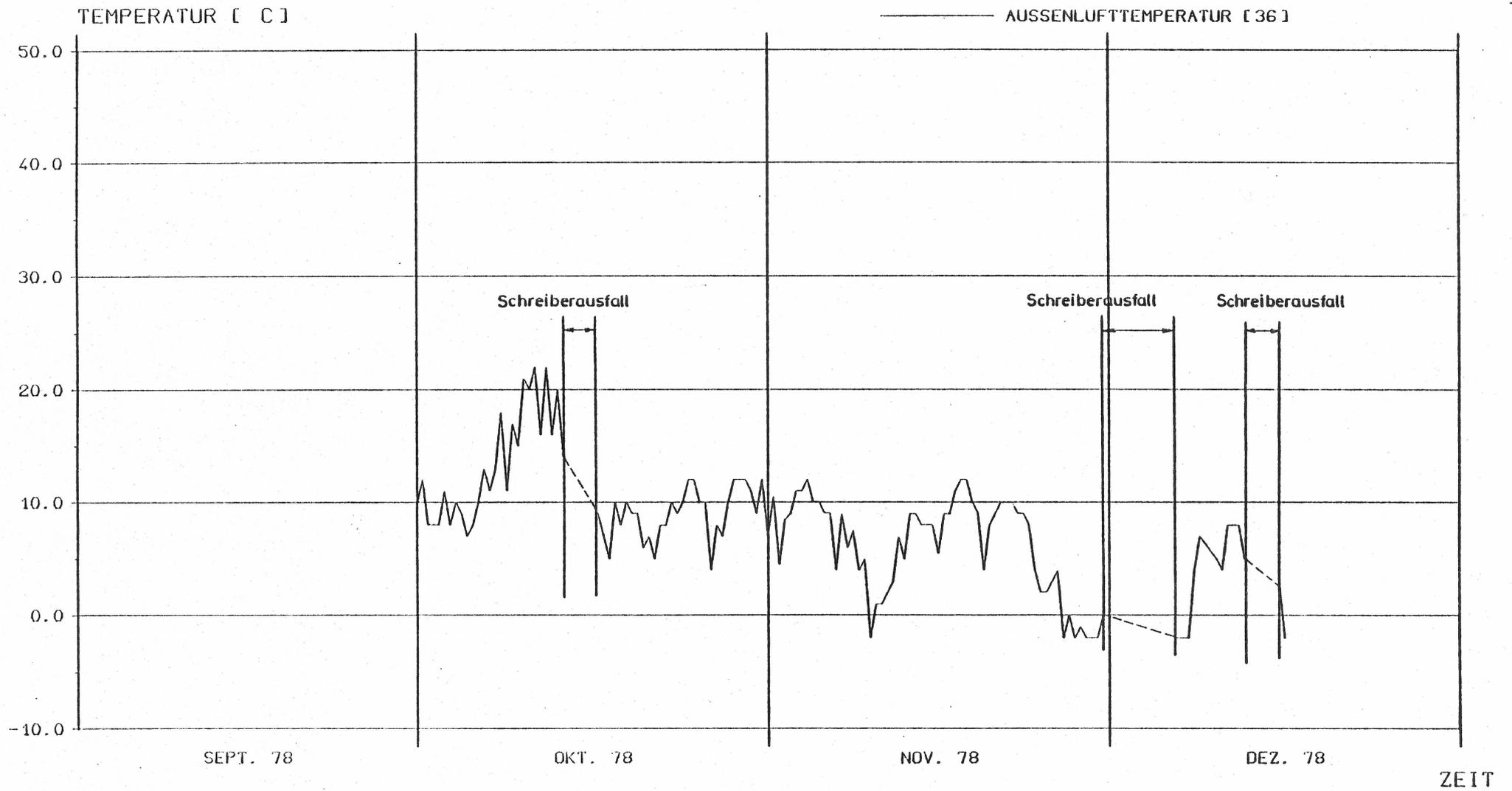
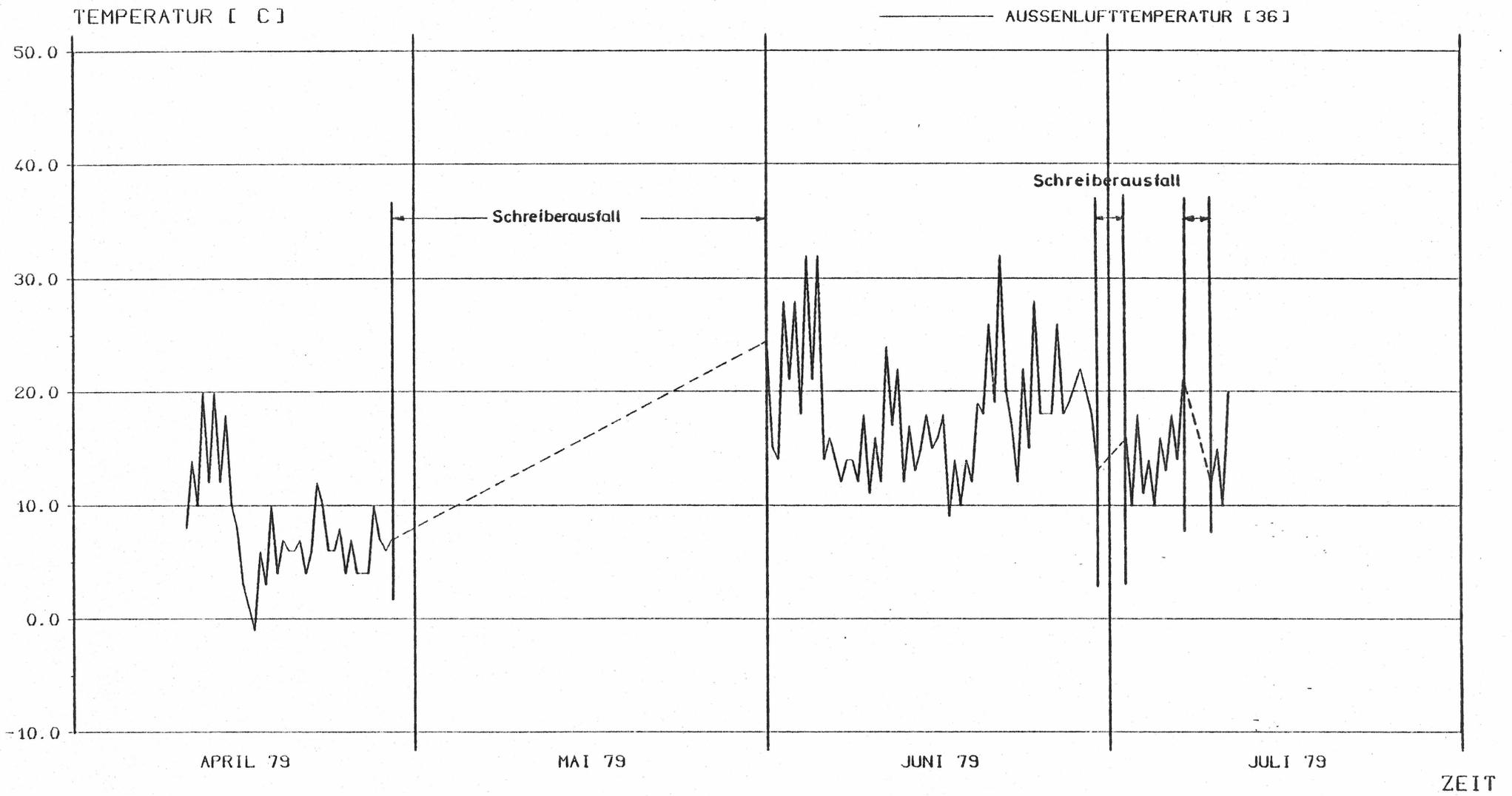
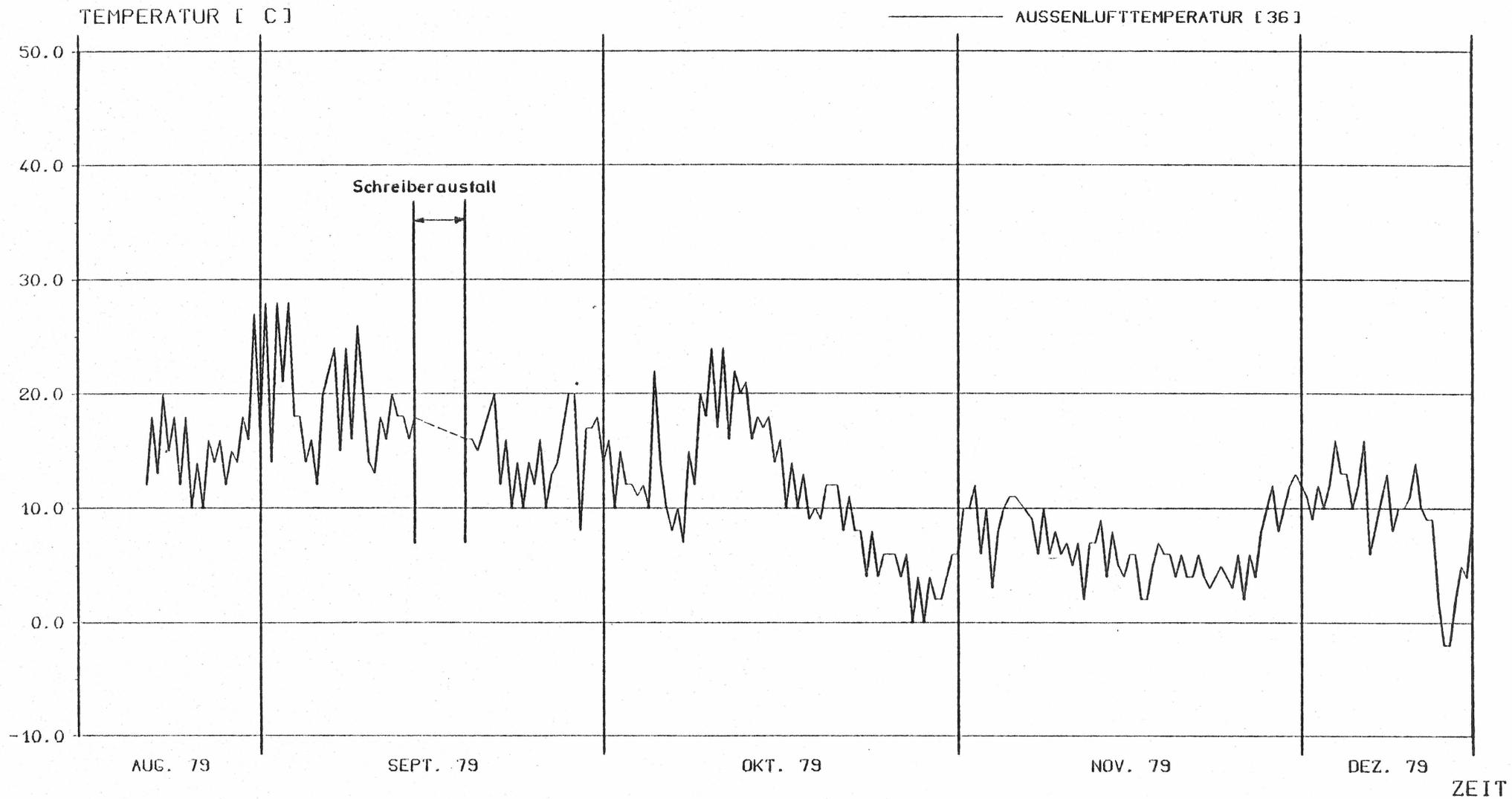


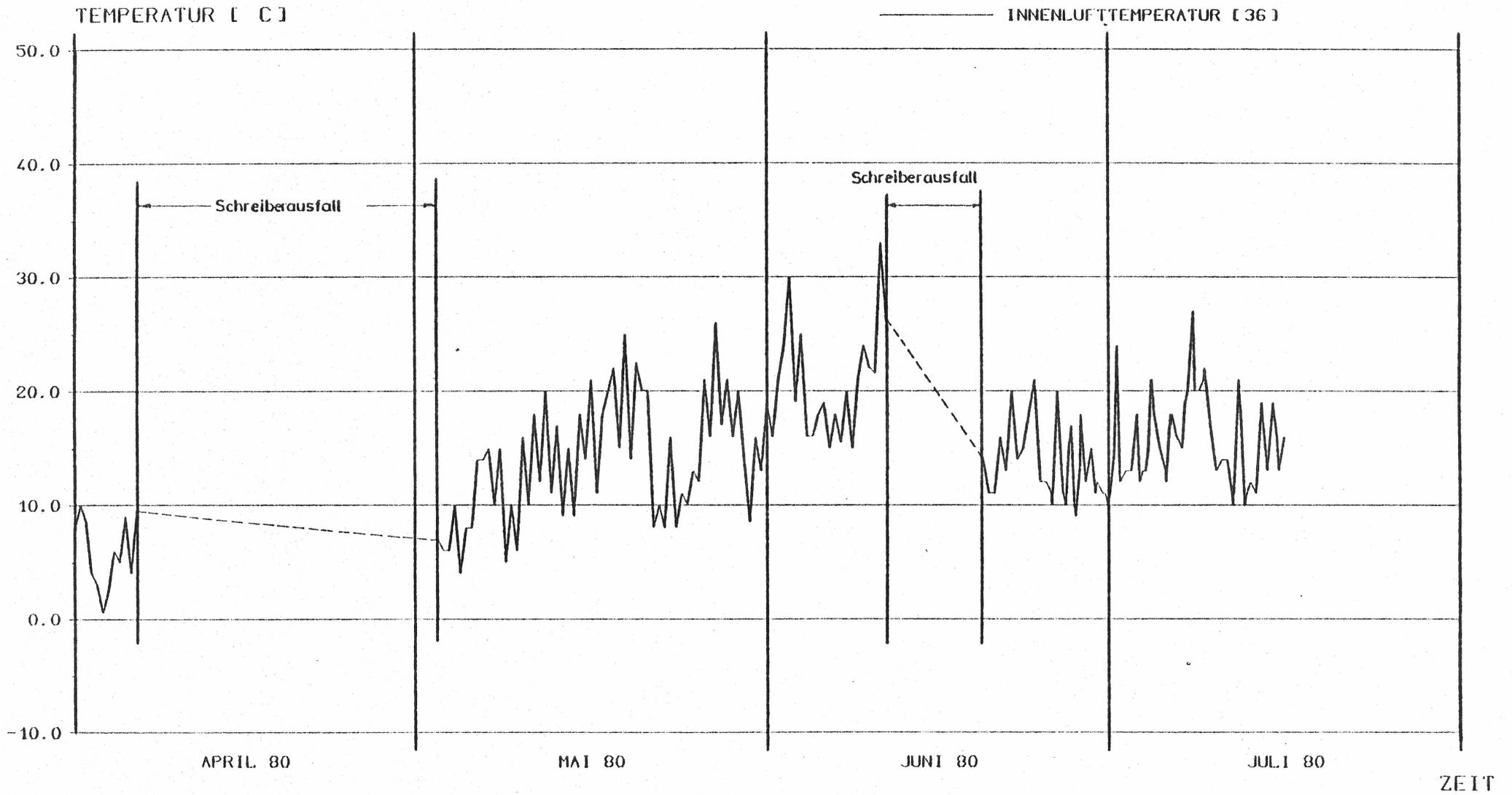
BILD A1/17

AUSSENLUFT-TEMPERATUREN FUER EINE FUELLPERIODE









ANLAGE 2

Darstellung der gemessenen Temperaturen
als Funktion des Ortes

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 3
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 34.0 UND 49.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 48.0 UND 70.0 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 19.3 UND 19.3 [METER]

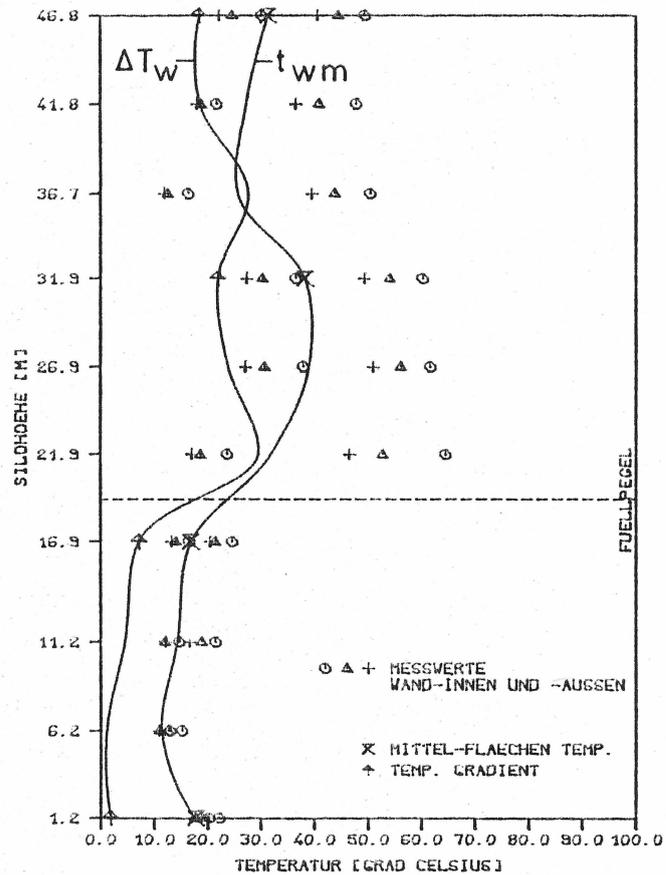


BILD A2/01

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 4
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 66.0 UND 74.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 124.0 UND 159.0 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 17.9 UND 18.7 [METER]

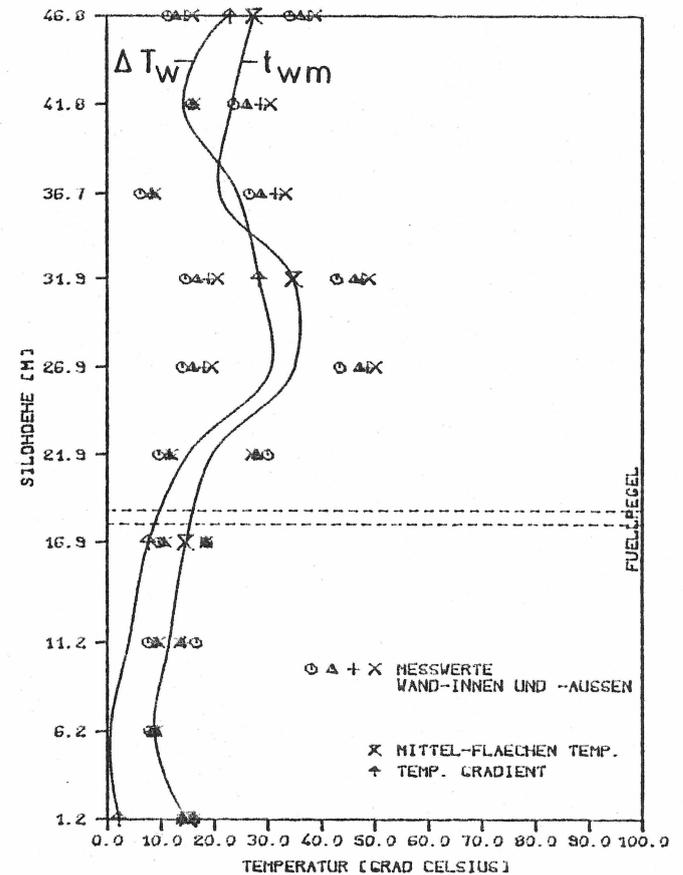


BILD A2/02

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 1
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. BETRAEGT 77.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR BETRAEGT 163.0 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL BETRAEGT 19.3 [METER]

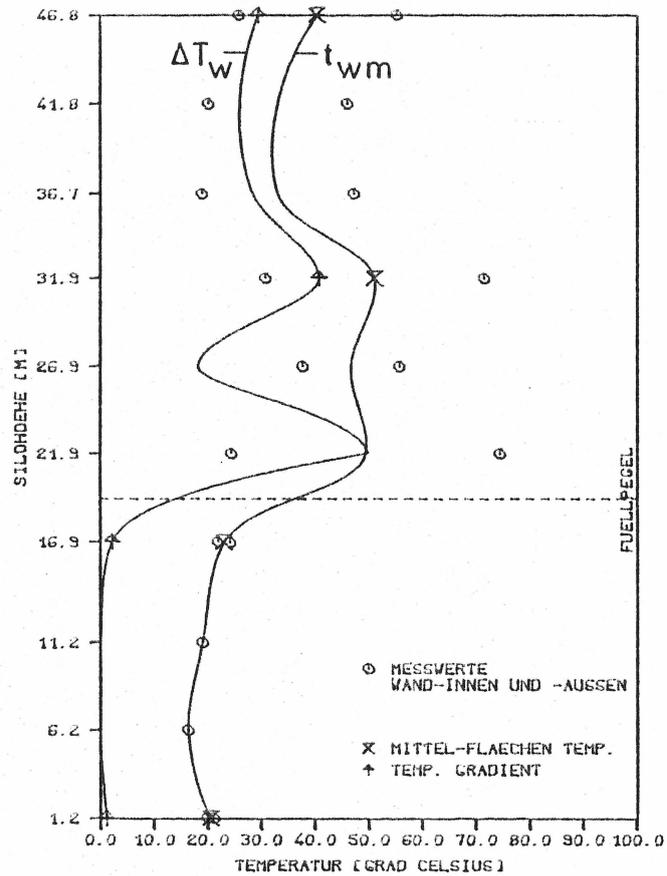


BILD A2/03

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 2
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 36.0 UND 36.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 18.0 UND 24.0 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 22.8 UND 23.0 [METER]

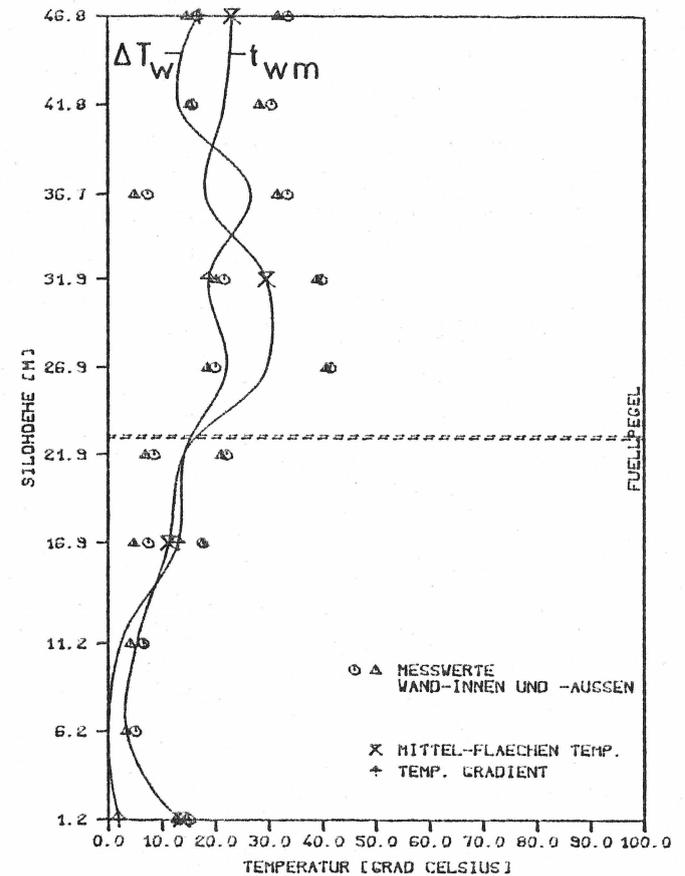


BILD A2/04

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 7
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 50.0 UND 74.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 40.0 UND 157.0 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 21.5 UND 24.9 [METER]

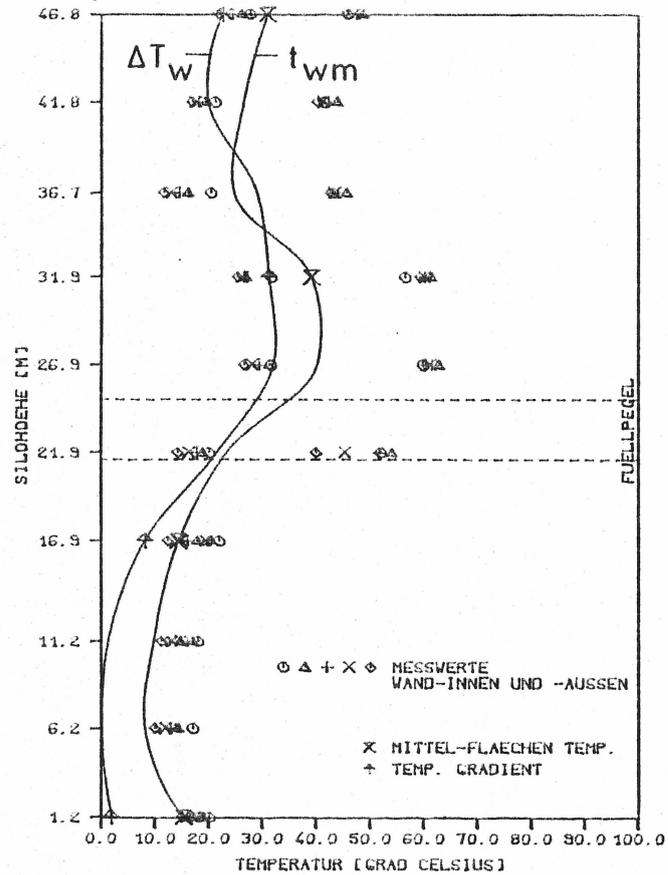


BILD A2/05

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 26
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 75.0 UND 99.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 35.0 UND 184.0 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 20.9 UND 24.9 [METER]

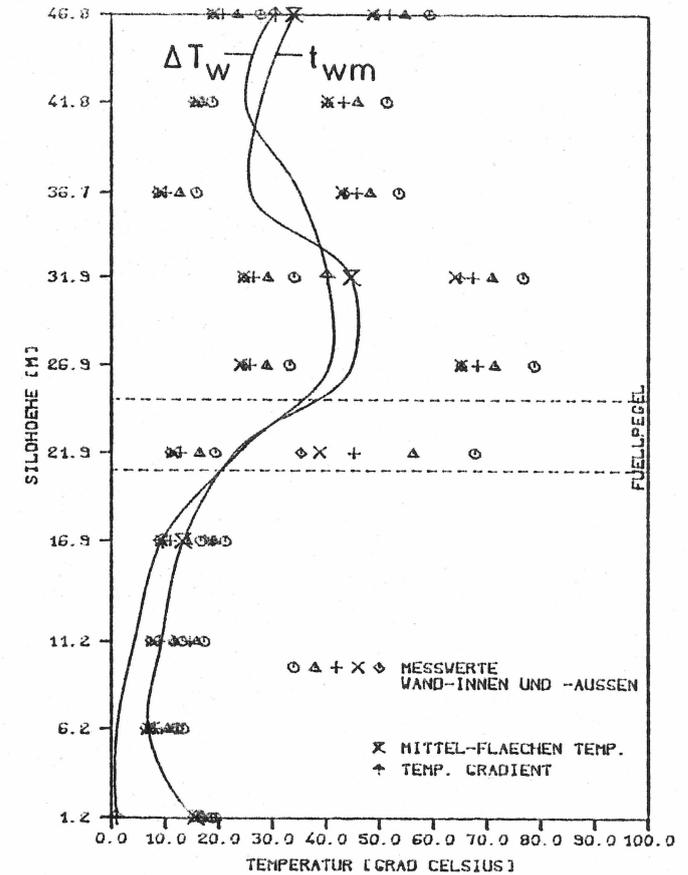


BILD A2/06

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 8
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 100.0 UND 122.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 111.0 UND 212.0 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 22.9 UND 24.9 [METER]

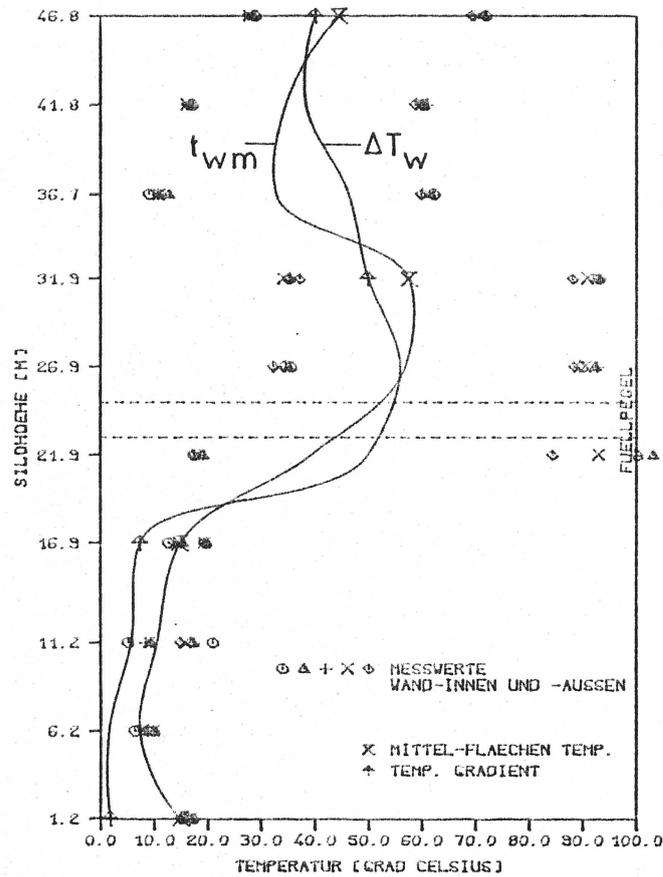


BILD A2/07

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 4
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 95.0 UND 98.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 84.0 UND 175.0 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 25.8 UND 29.4 [METER]

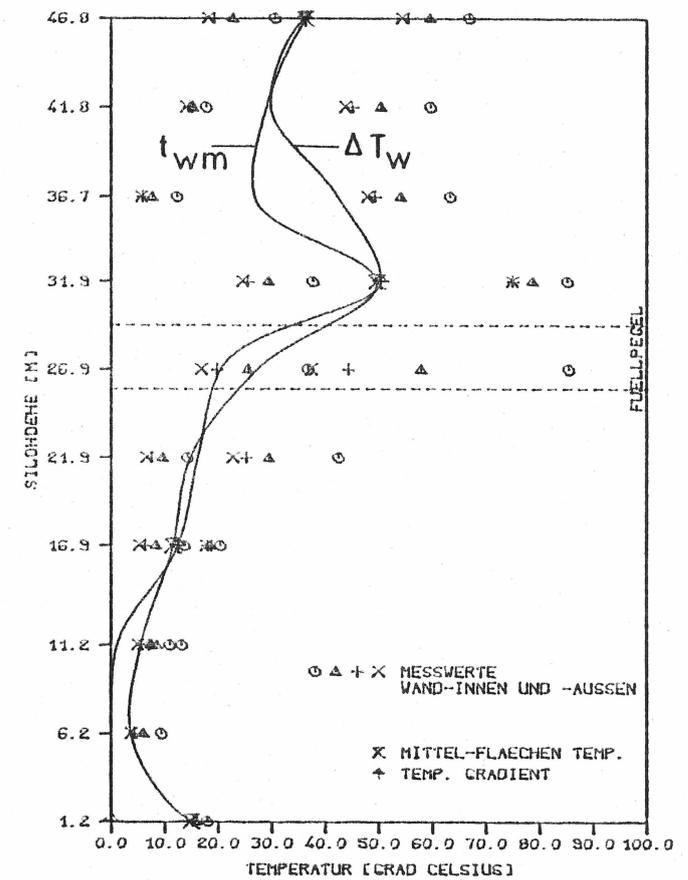


BILD A2/08

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 3
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 101.0 UND 115.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 112.0 UND 140.0 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 27.3 UND 29.0 [METER]

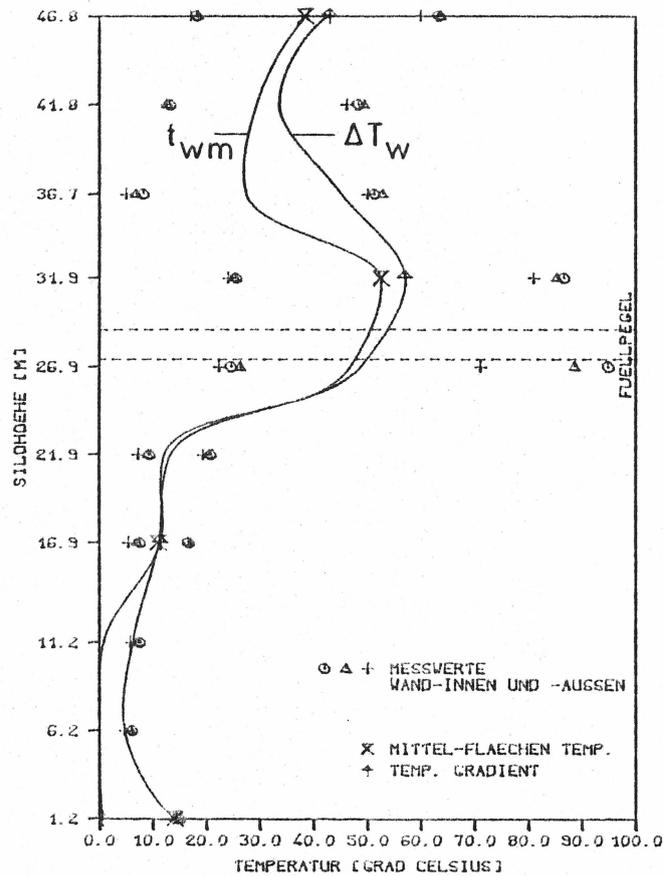


BILD A2/09

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 1
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. BETRAEGT 41.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR BETRAEGT 28.5 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL BETRAEGT 34.6 [METER]

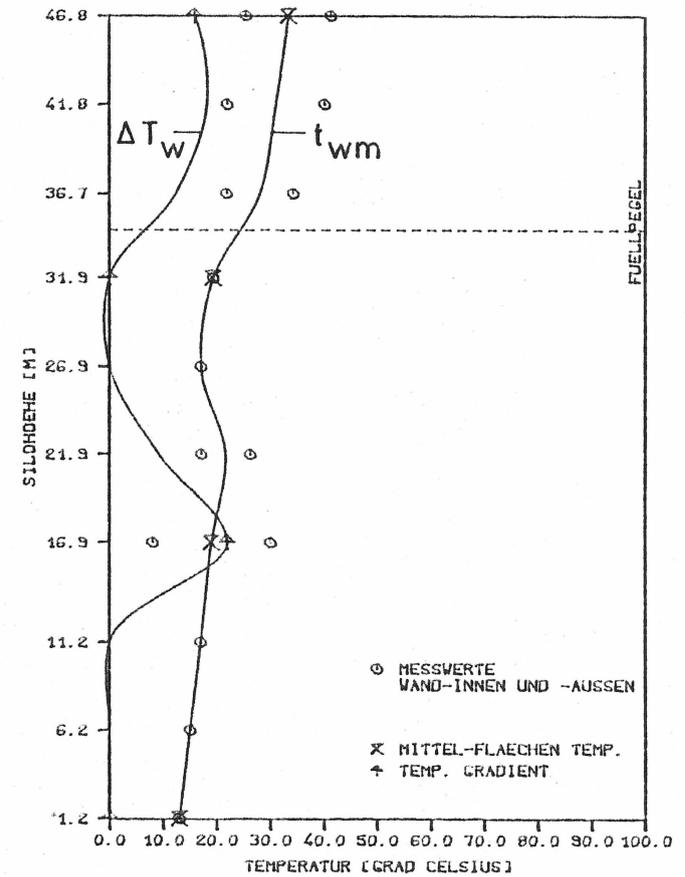


BILD A2/10

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 2
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 56.0 UND 65.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 24.0 UND 30.0 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 31.2 UND 34.4 [METER]

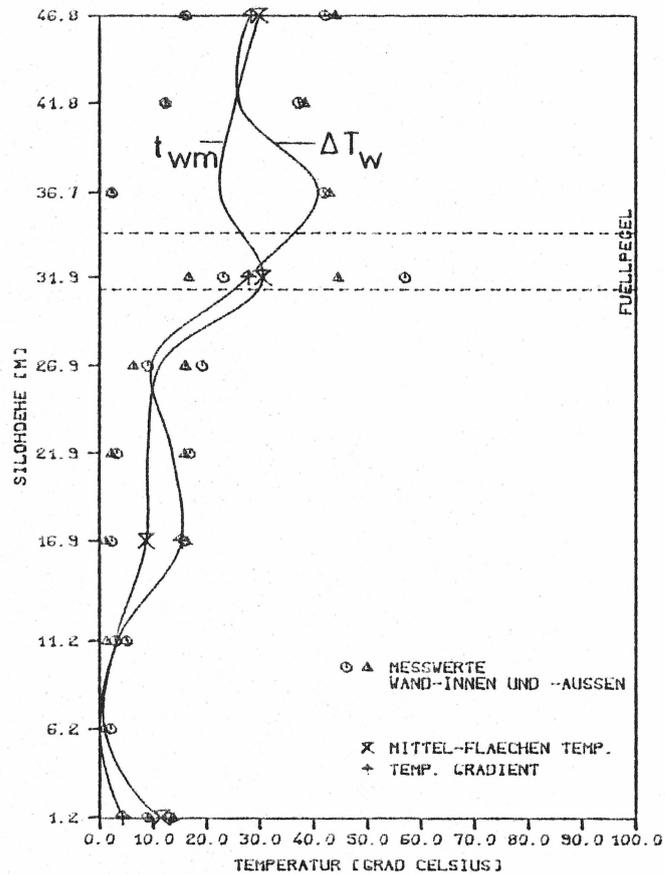


BILD A2/11

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 6
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 76.0 UND 98.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 32.0 UND 96.0 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 31.7 UND 34.4 [METER]

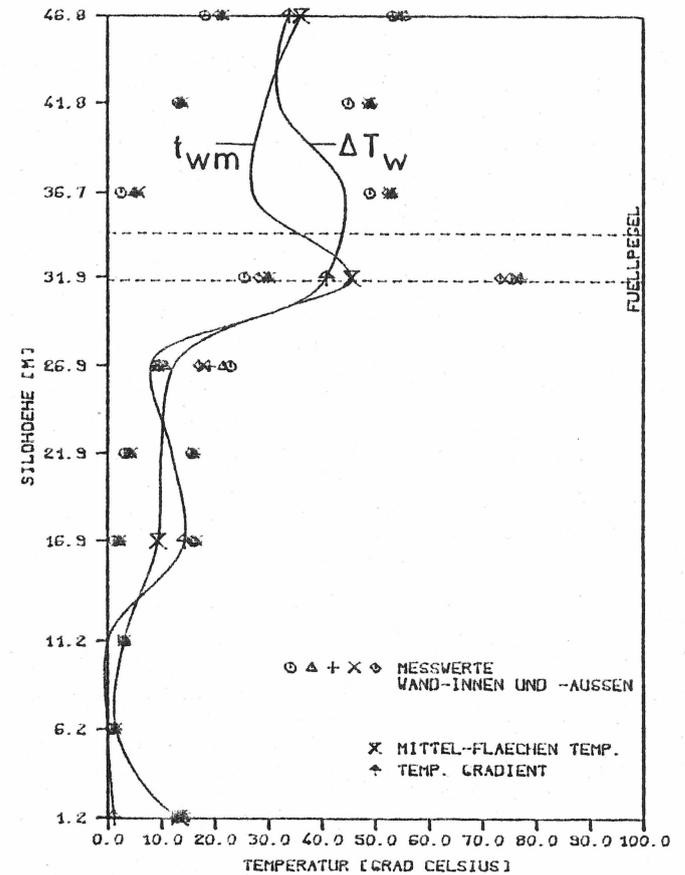


BILD A2/12

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 12
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 100.0 UND 121.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 64.0 UND 136.0 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 30.6 UND 34.9 [METER]

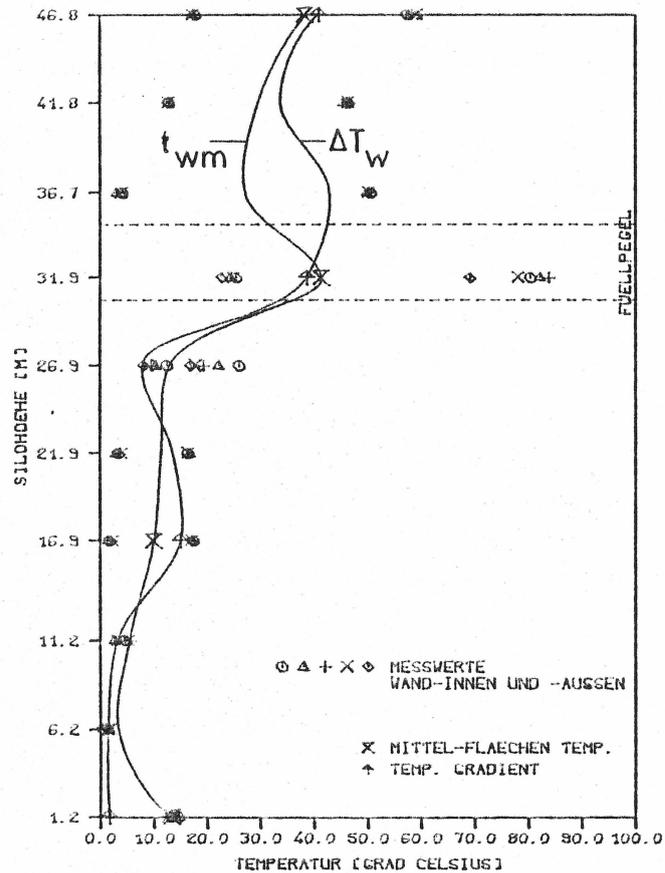


BILD A2/13

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 2
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 34.0 UND 39.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 26.0 UND 31.5 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 36.1 UND 36.3 [METER]

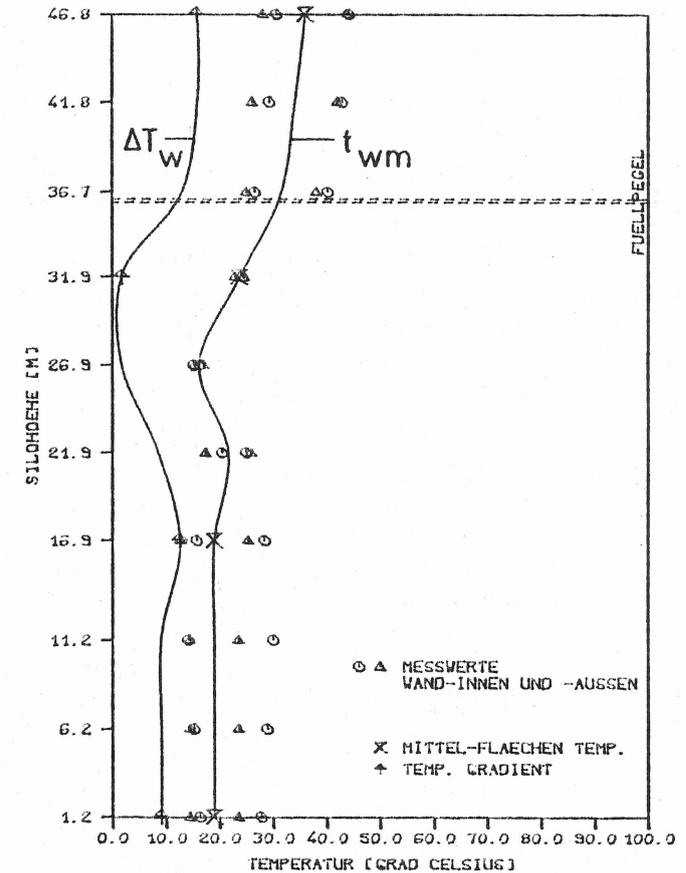


BILD A2/14

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 9

DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 50.0 UND 69.0 [GRAD CELSIUS]

DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 26.0 UND 100.5 [GRAD CELSIUS]

DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 35.0 UND 37.5 [METER]

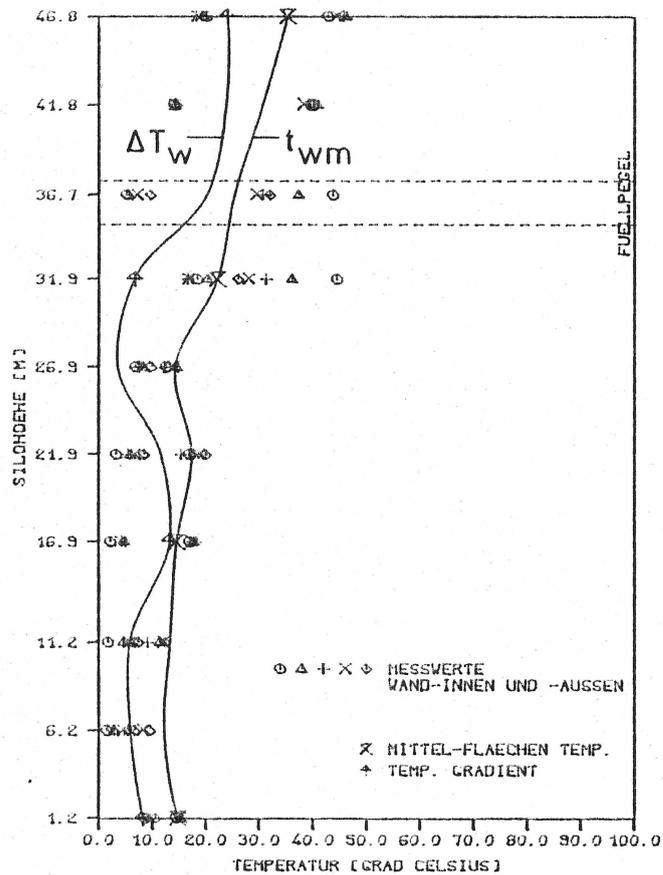


BILD A2/15

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 13

DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 75.0 UND 99.0 [GRAD CELSIUS]

DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 42.0 UND 114.5 [GRAD CELSIUS]

DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 35.0 UND 39.1 [METER]

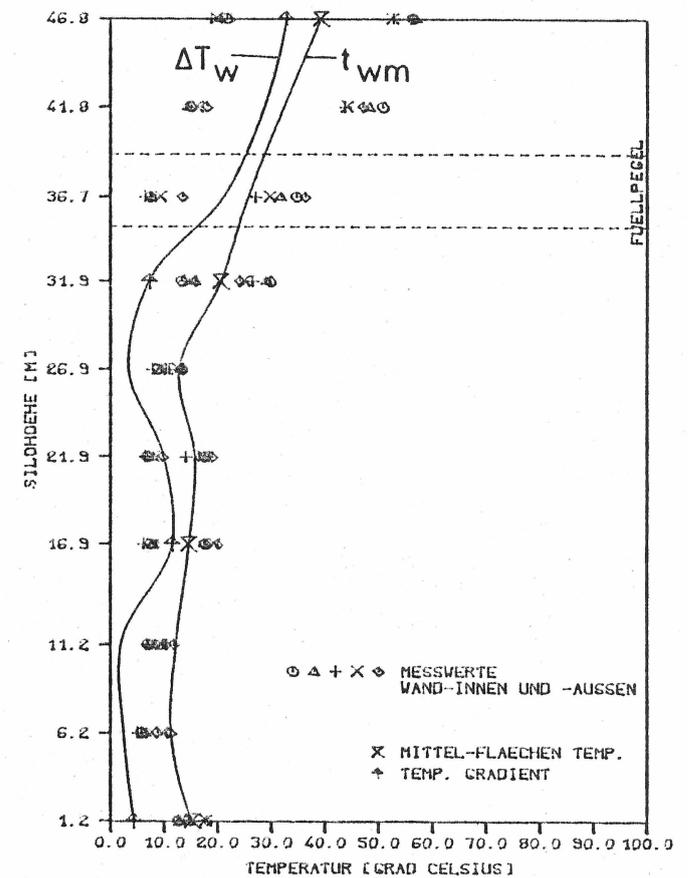


BILD A2/16

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 26
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 100.0 UND 121.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 82.0 UND 126.0 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 35.0 UND 39.8 [METER]

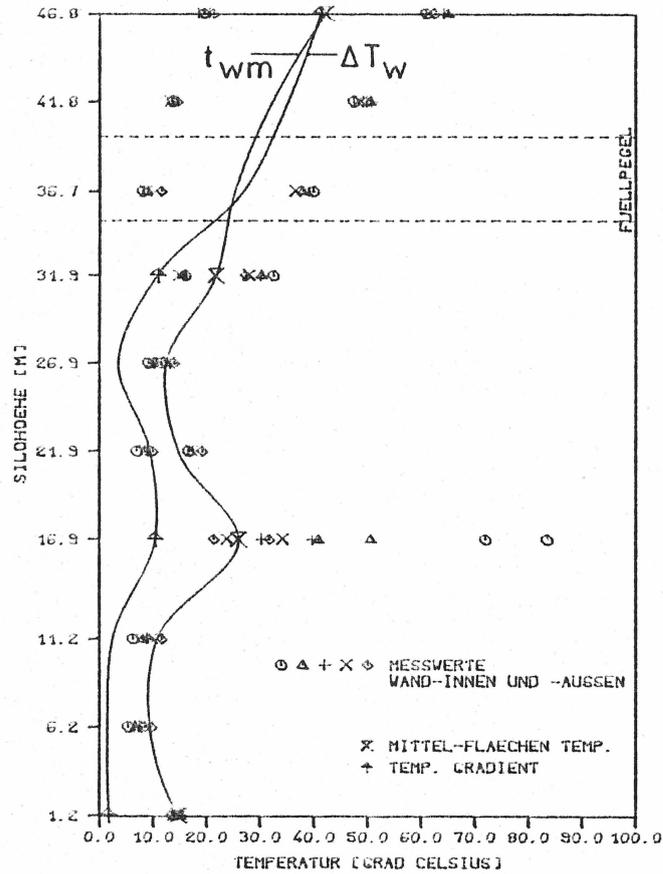


BILD A2/17

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 3
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 125.0 UND 132.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 108.0 UND 126.0 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 38.5 UND 39.9 [METER]

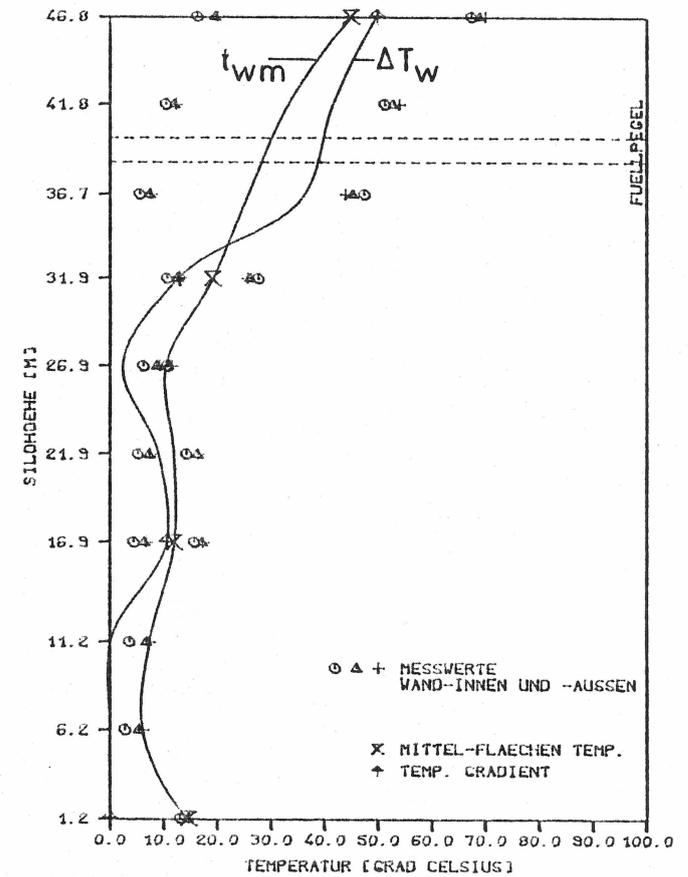


BILD A2/18

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 2
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 56.0 UND 64.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 21.5 UND 30.5 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 41.0 UND 42.7 [METER]

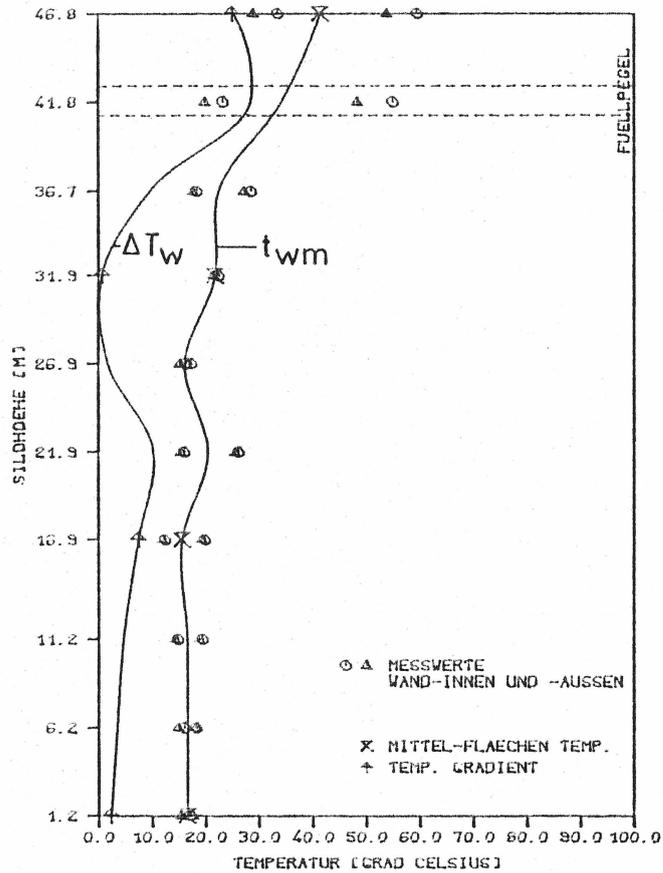


BILD A2/19

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 4
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 78.0 UND 99.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 47.0 UND 96.0 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 40.3 UND 40.4 [METER]

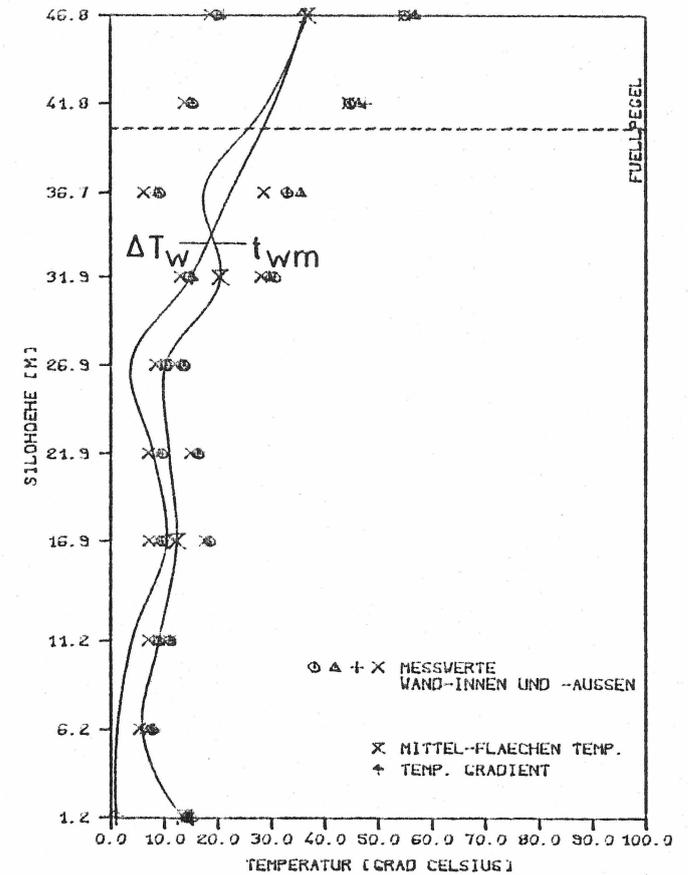


BILD A2/20

DIE ANZAHL DER MESSZEITPUNKTE BETRAEGT 7
 DIE LUFTTEMPERATURDIFF. LIEGT ZWISCHEN 102.0 UND 117.0 [GRAD CELSIUS]
 DIE EINFUELLTEMPERATUR LIEGT ZWISCHEN 94.0 UND 114.0 [GRAD CELSIUS]
 DER FUELLPEGEL LIEGT ZWISCHEN 40.1 UND 42.7 [METER]

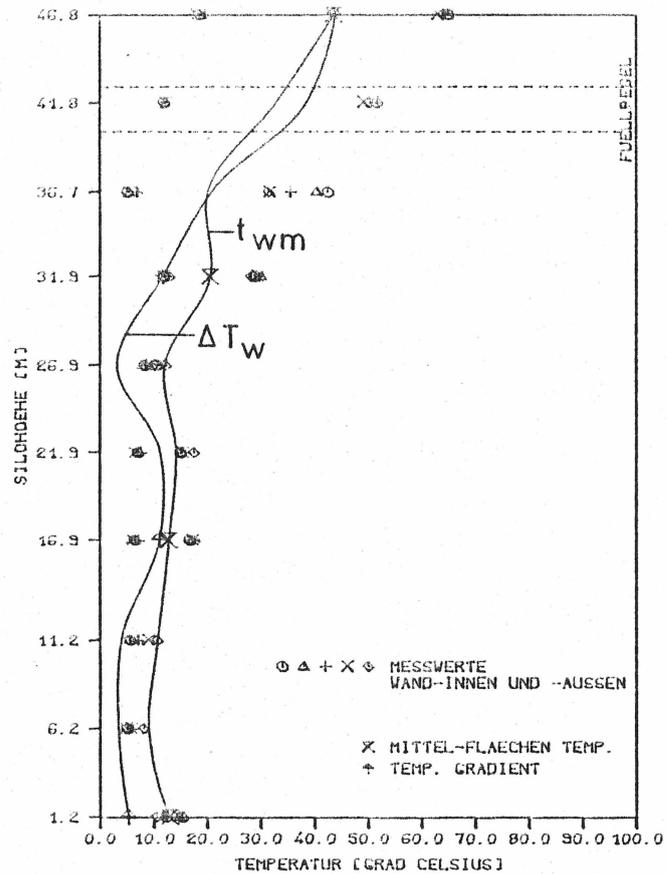
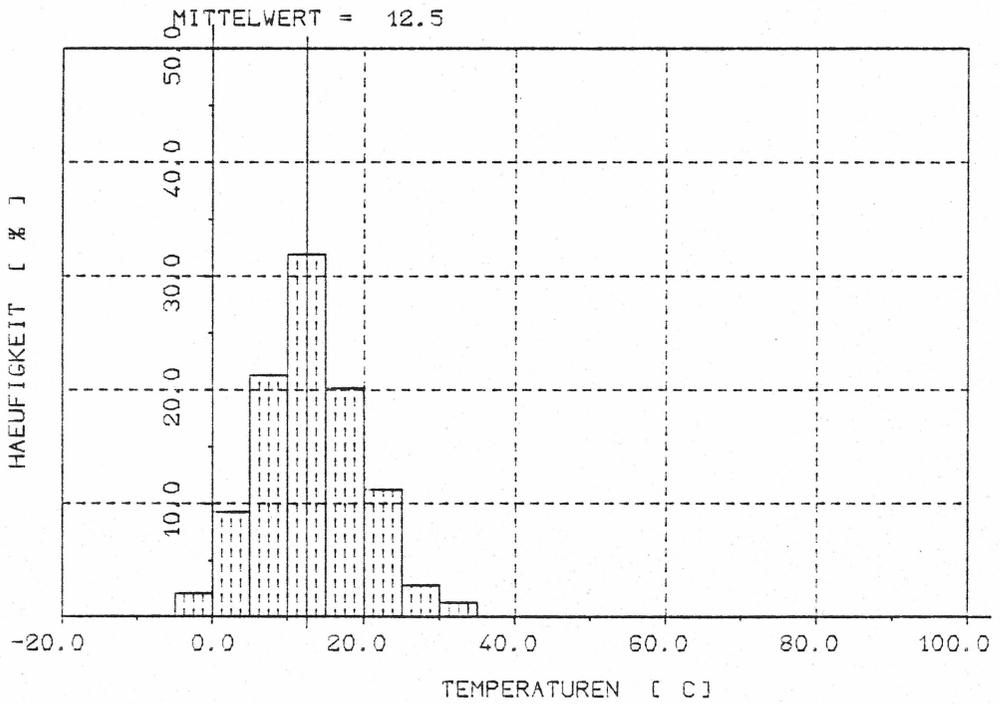
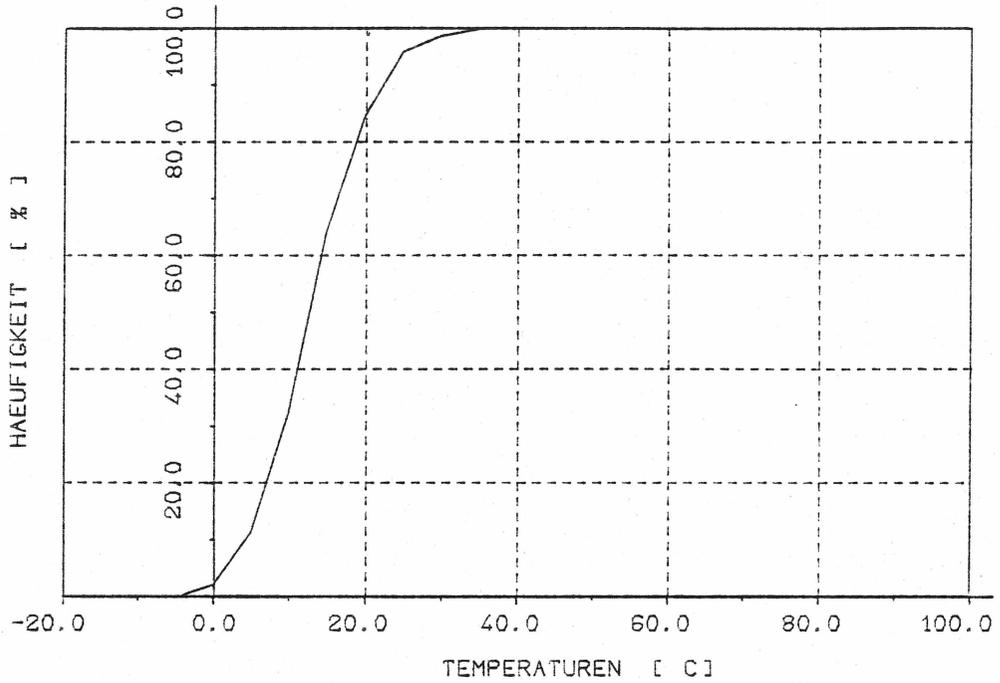


BILD A2/21

ANLAGE 3

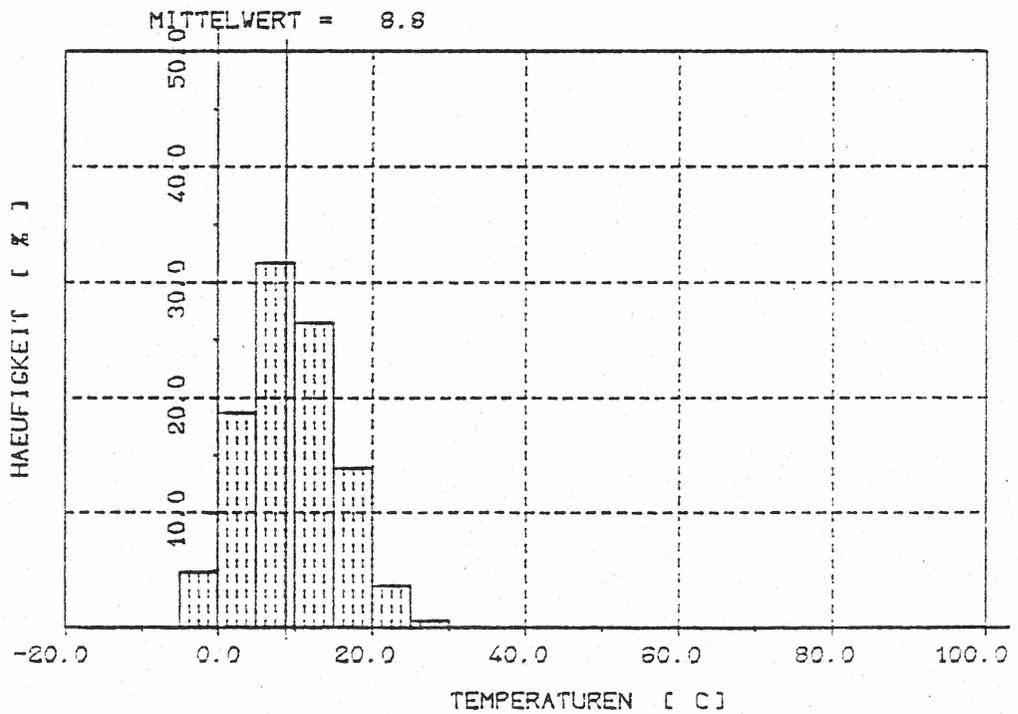
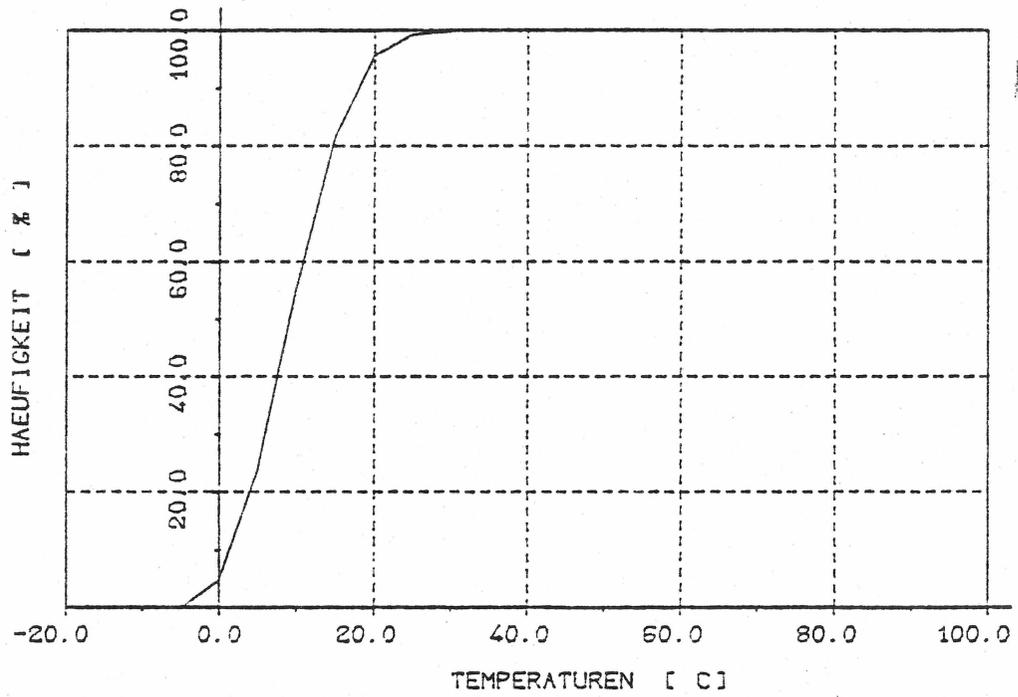
Statistische Darstellung der gemessenen
Temperaturen

MESSTELLE : AUSSENLUFTTEMPERATUR



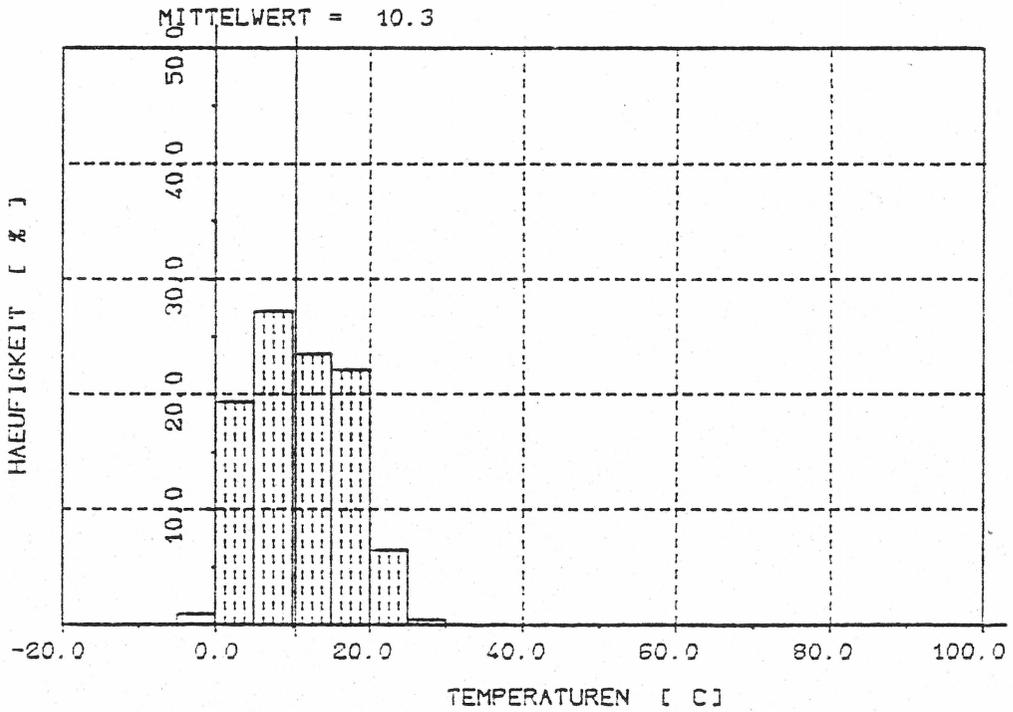
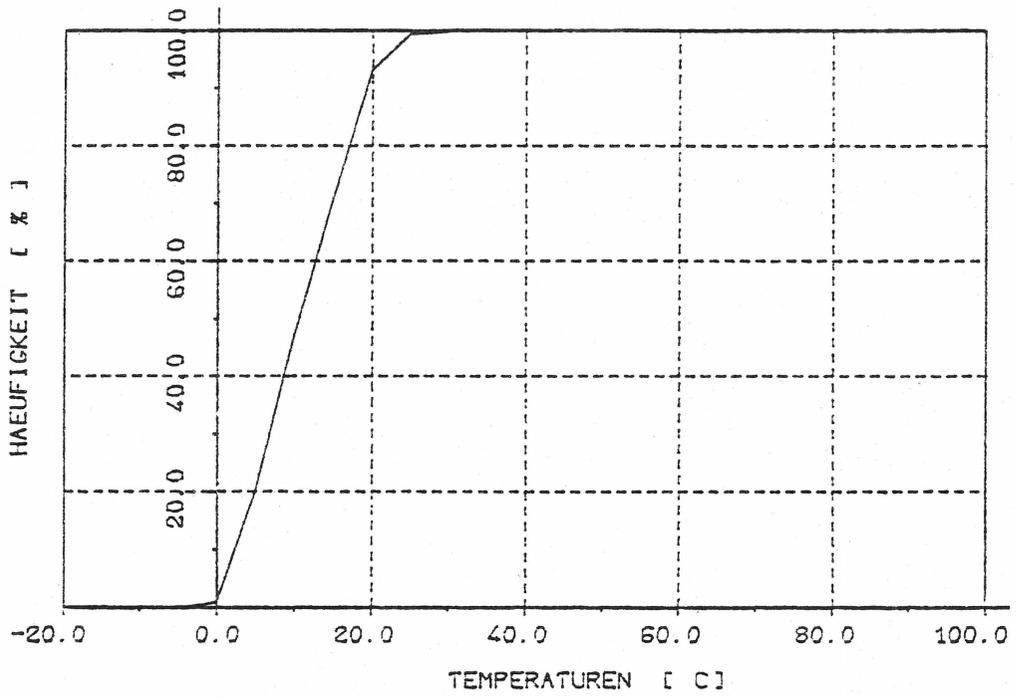
ANZAHL DER MESSWERTE : 714

MESSTELLE :
WANDTEMPERATUR - AUSSEN - HOEHE = 6.2 [M]



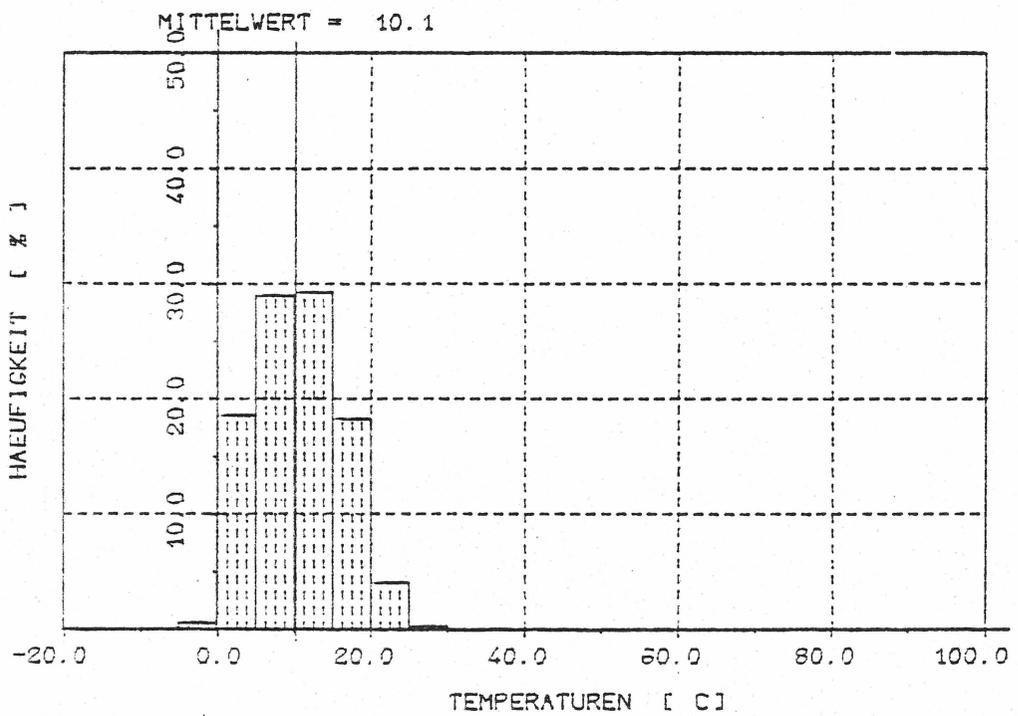
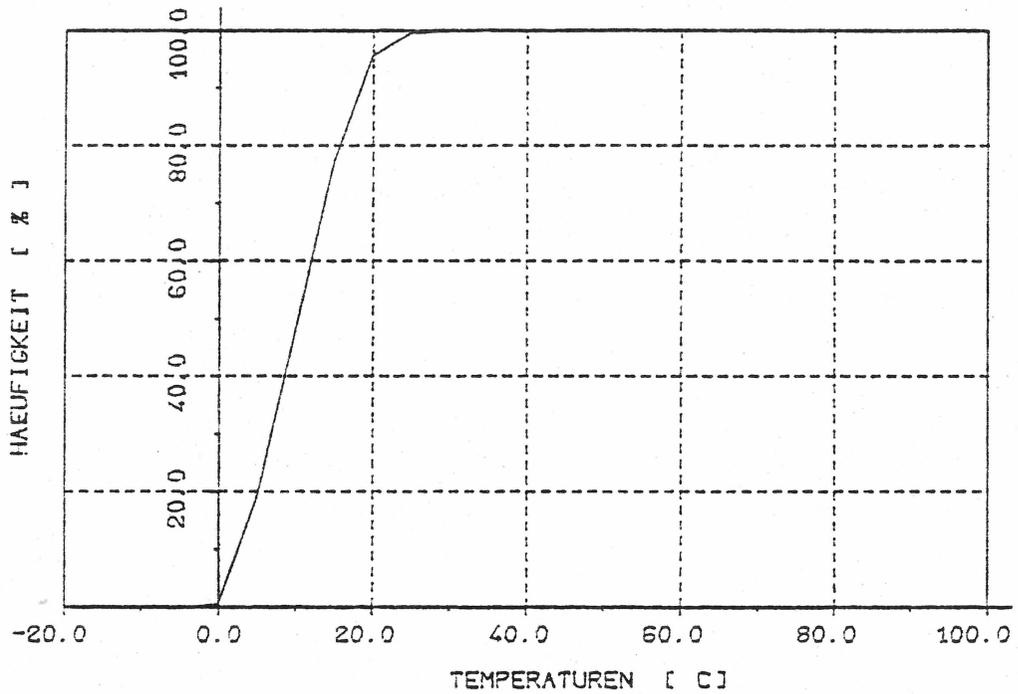
ANZAHL DER MESSWERTE : 491

MESSTELLE :
WANDTEMPERATUR - MITTE - HOEHE = 6.2 [M]



ANZAHL DER MESSWERTE : 434

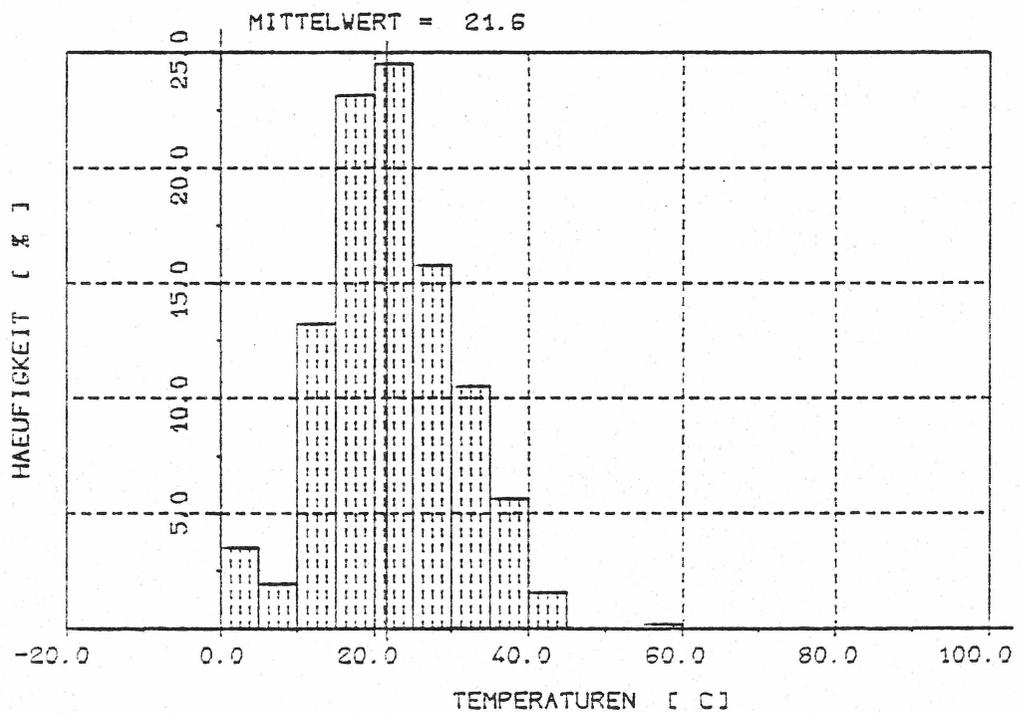
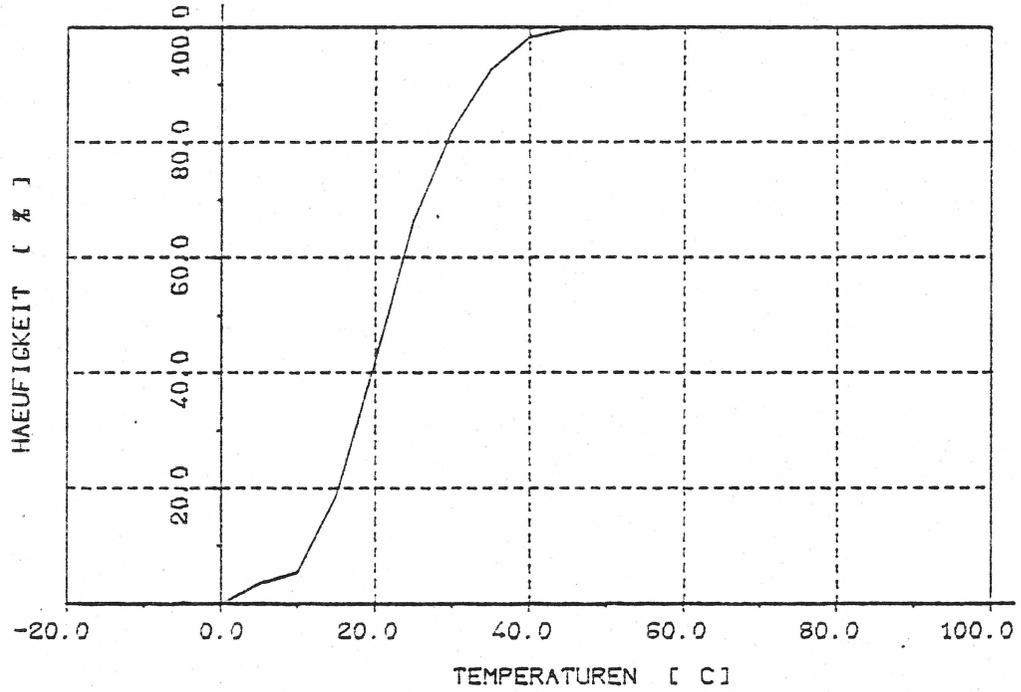
MESSTELLE :
WANDTEMPERATUR - INNEN - HOEHE = 6.2 [M]



ANZAHL DER MESSWERTE : 345

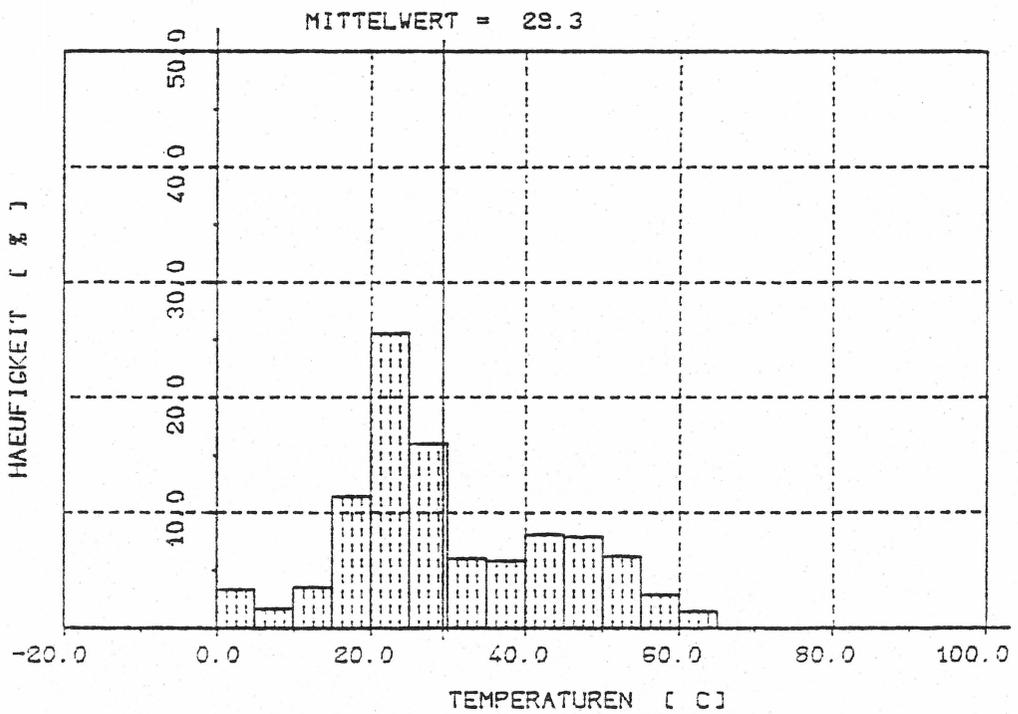
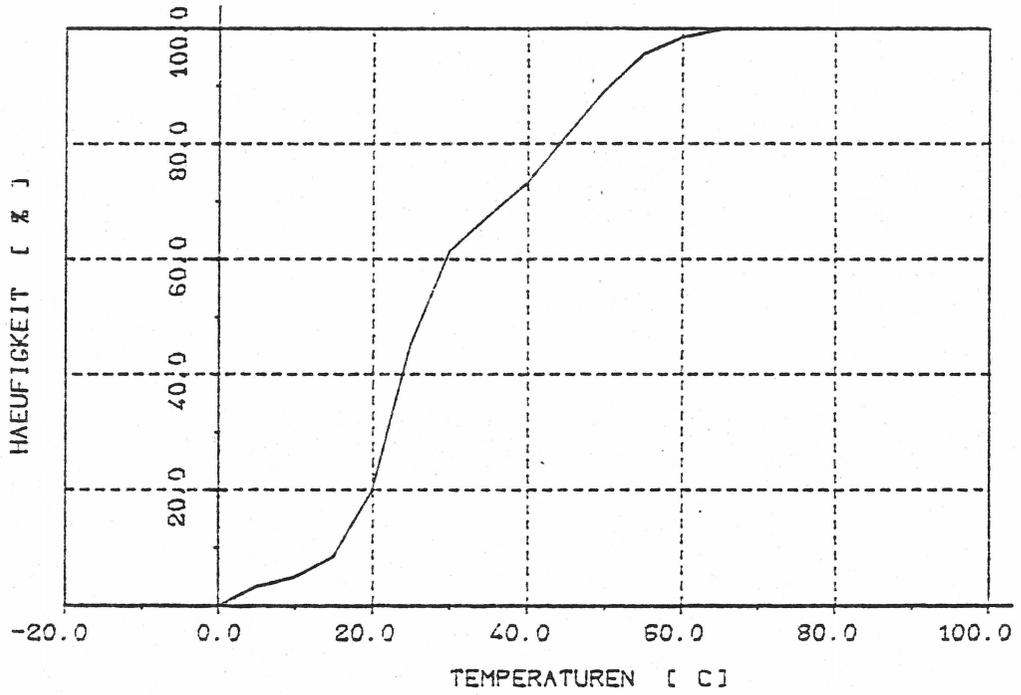
BILD A3/4

MESSTELLE :
WANDTEMPERATUR - AUSSEN - HOEHE = 31.9 [M]



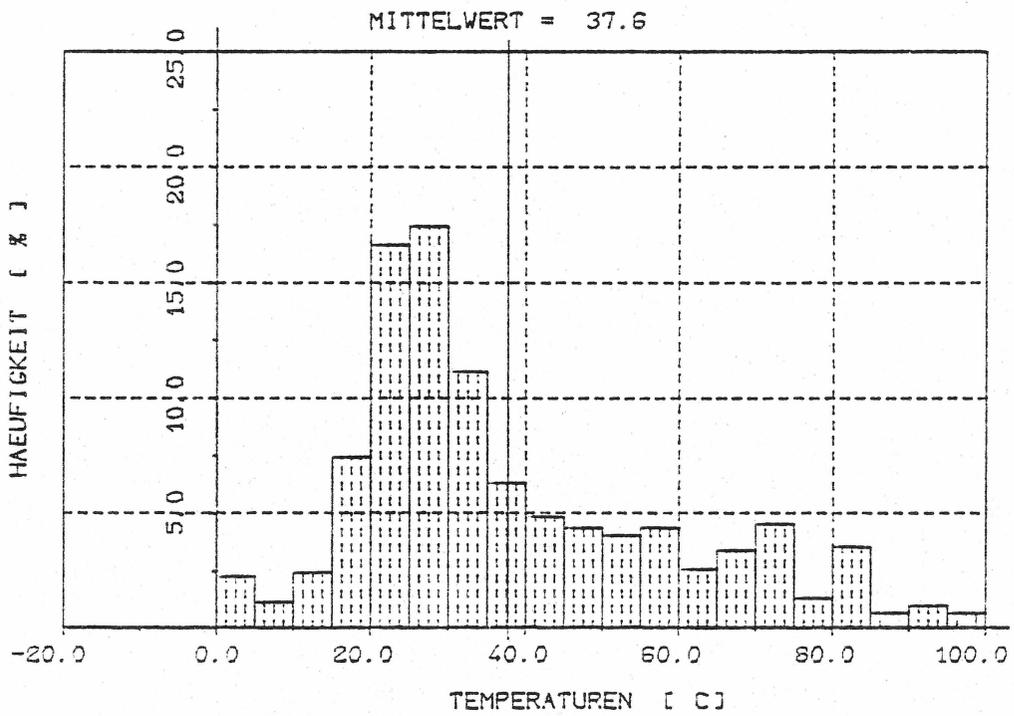
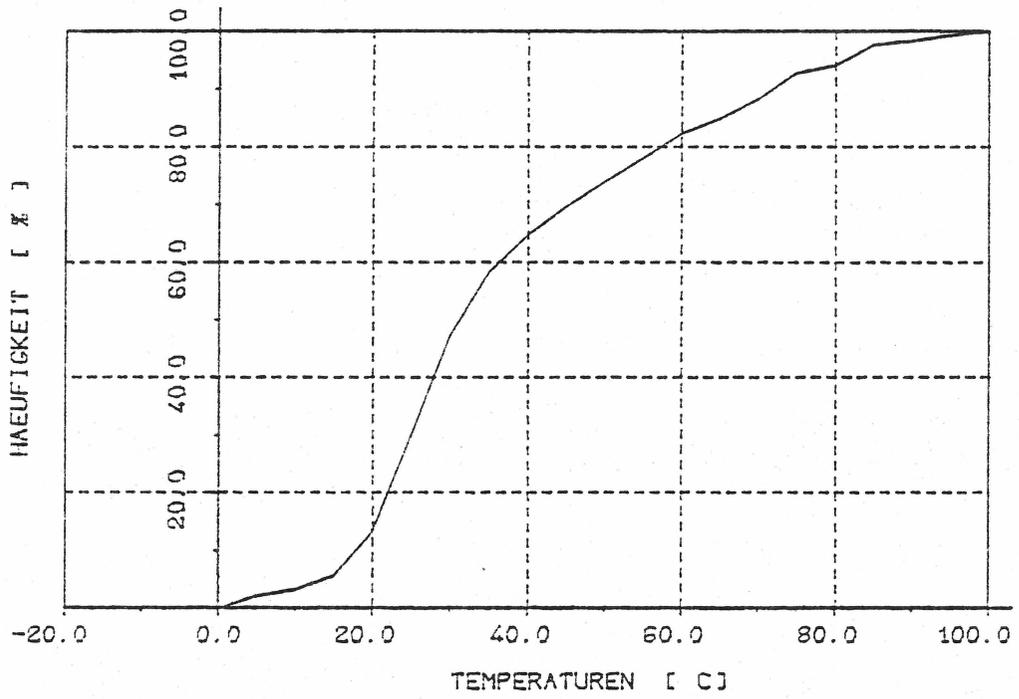
ANZAHL DER MESSWERTE : 514

MESSTELLE :
WANDTEMPERATUR - MITTE - HOEHE = 31.9 [M]



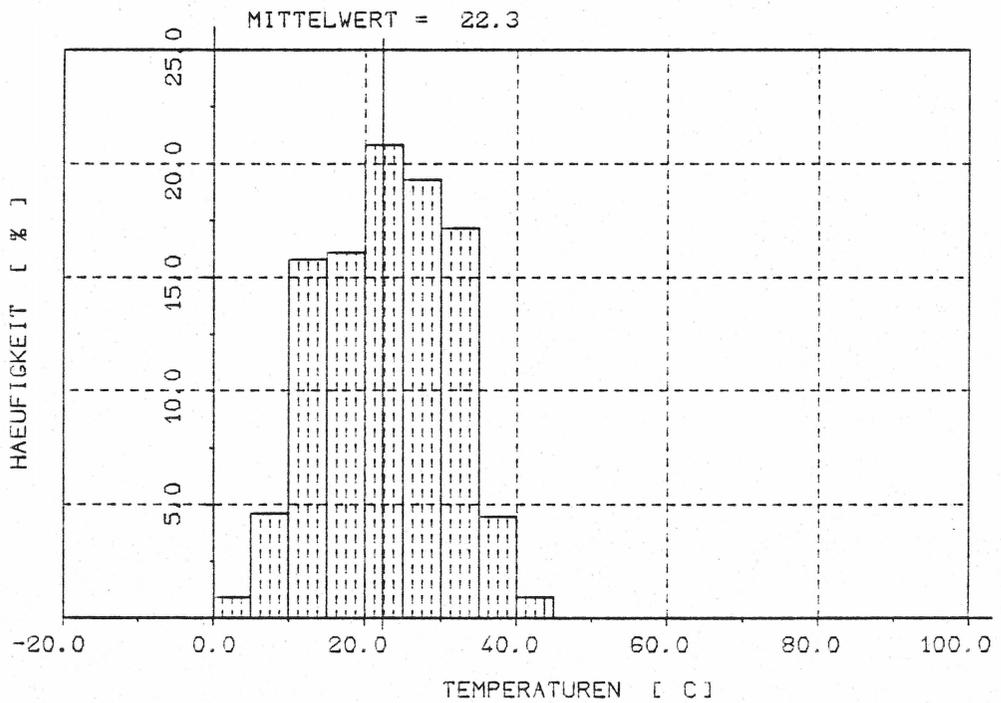
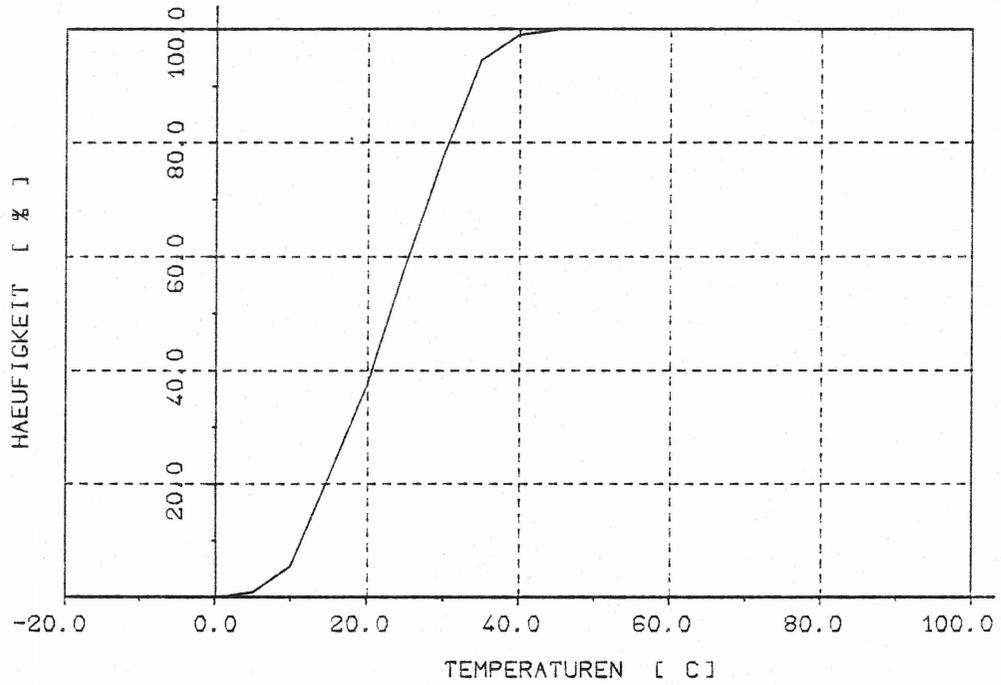
ANZAHL DER MESSWERTE : 481

MESSTELLE :
WANDTEMPERATUR - INNEN - HOEHE = 31.9 [M]



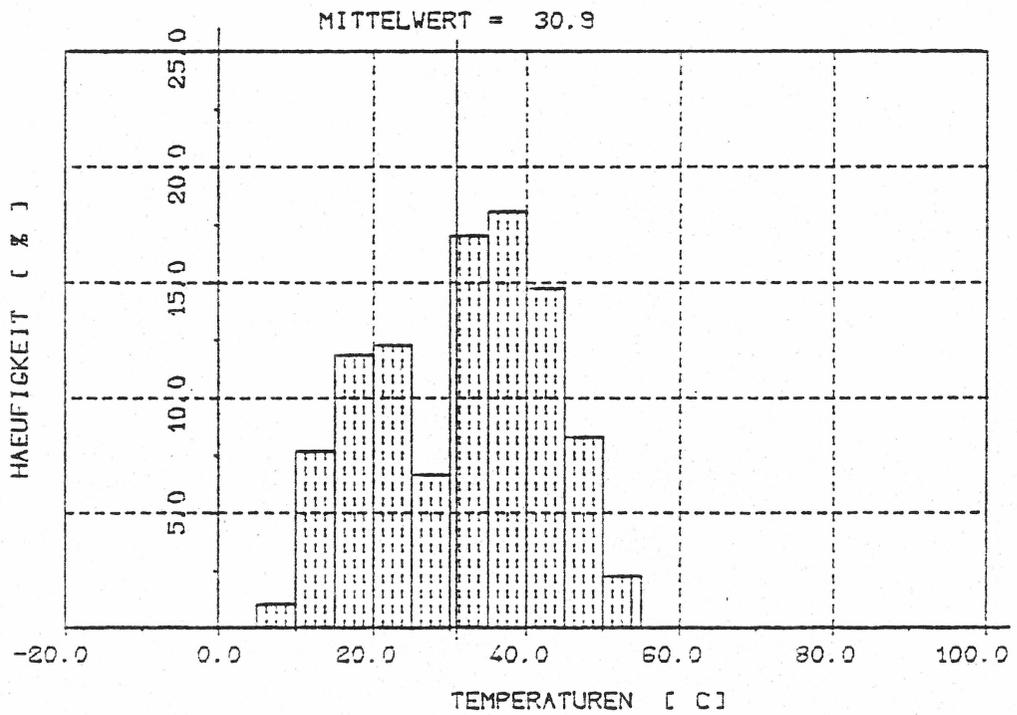
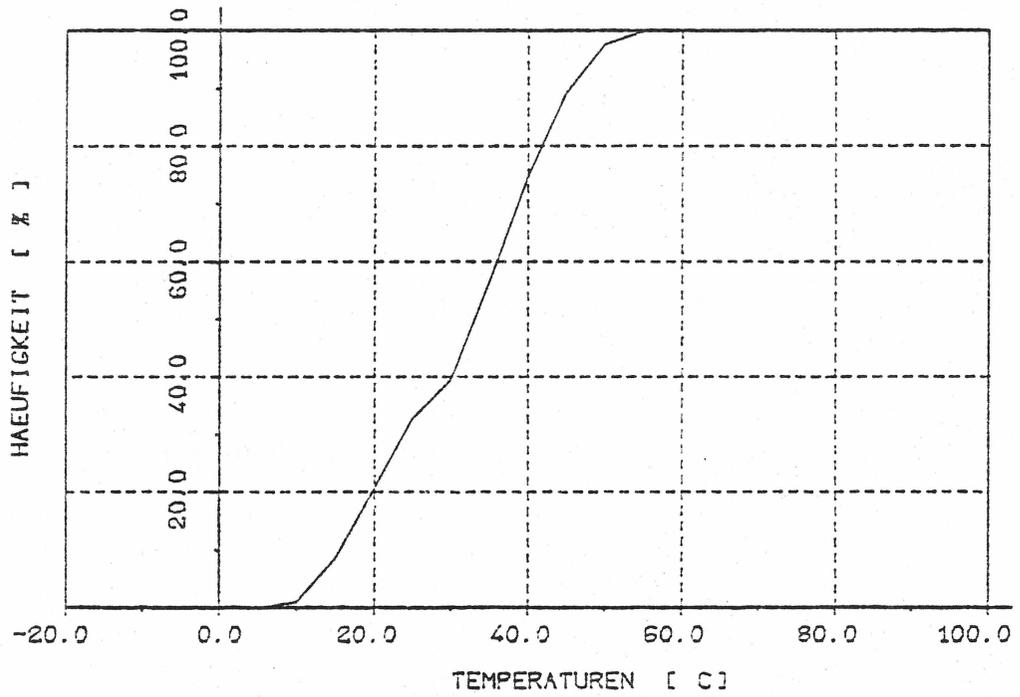
ANZAHL DER MESSWERTE : 619

MESSTELLE : WANDTEMPERATUR - AUSSEN - HOEHE = 46.8 [M]



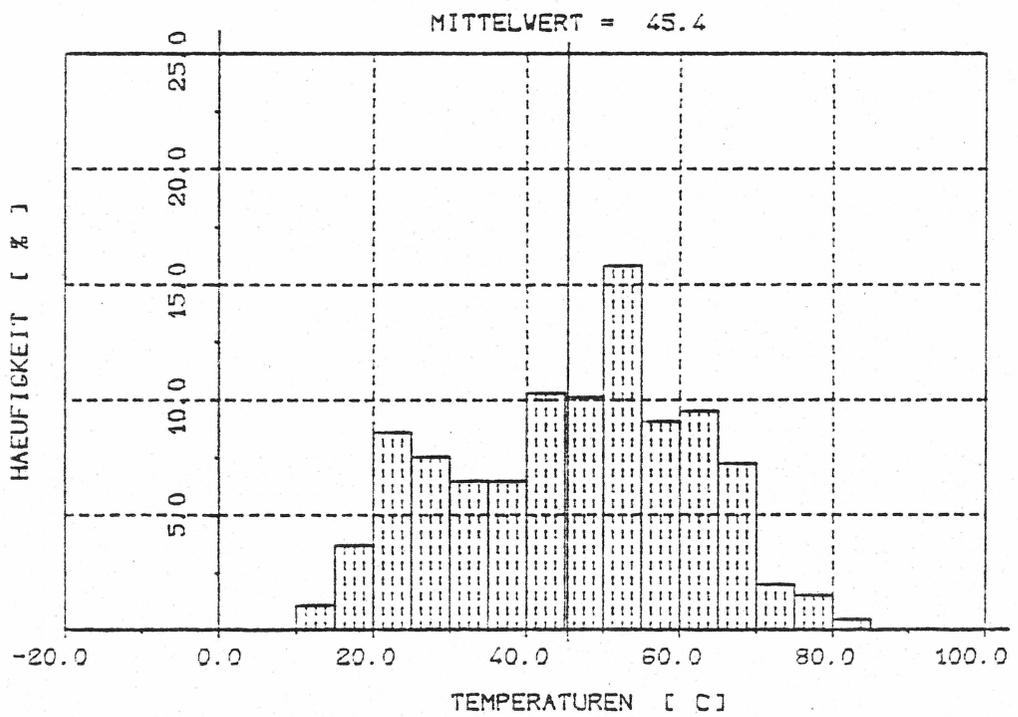
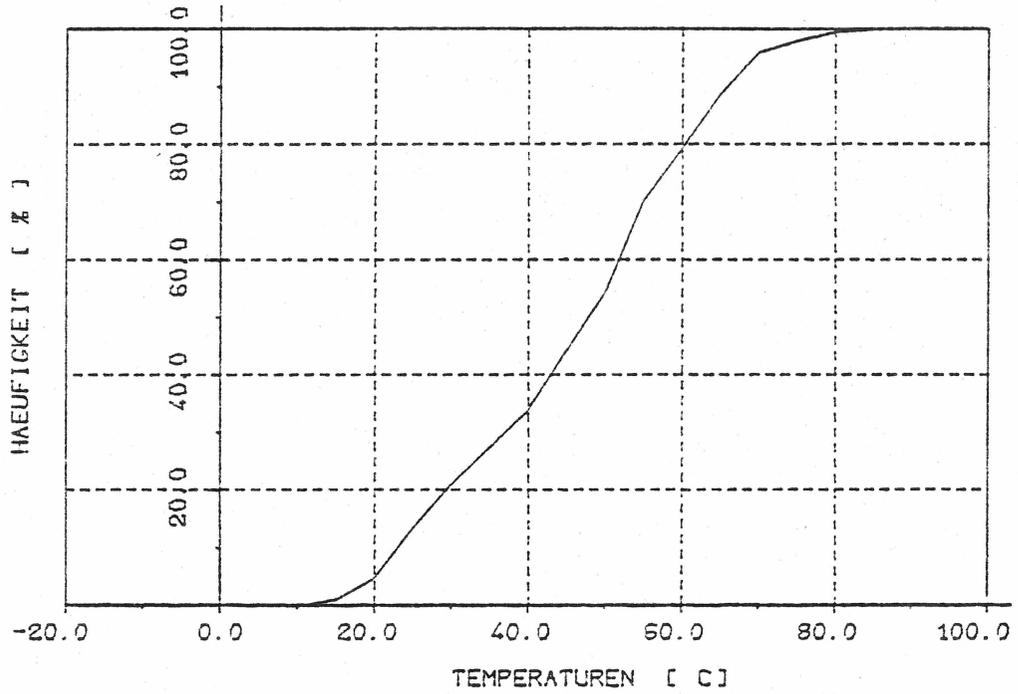
ANZAHL DER MESSWERTE : 653

MESSTELLE :
WANDTEMPERATUR - MITTE - HOEHE = 46.8 [M]



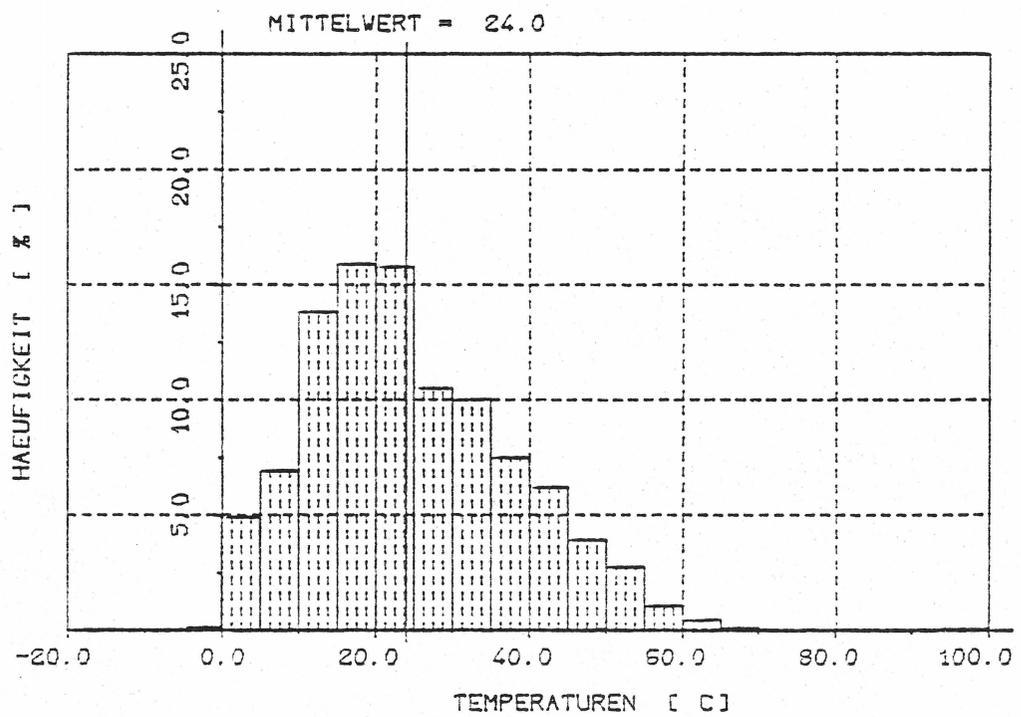
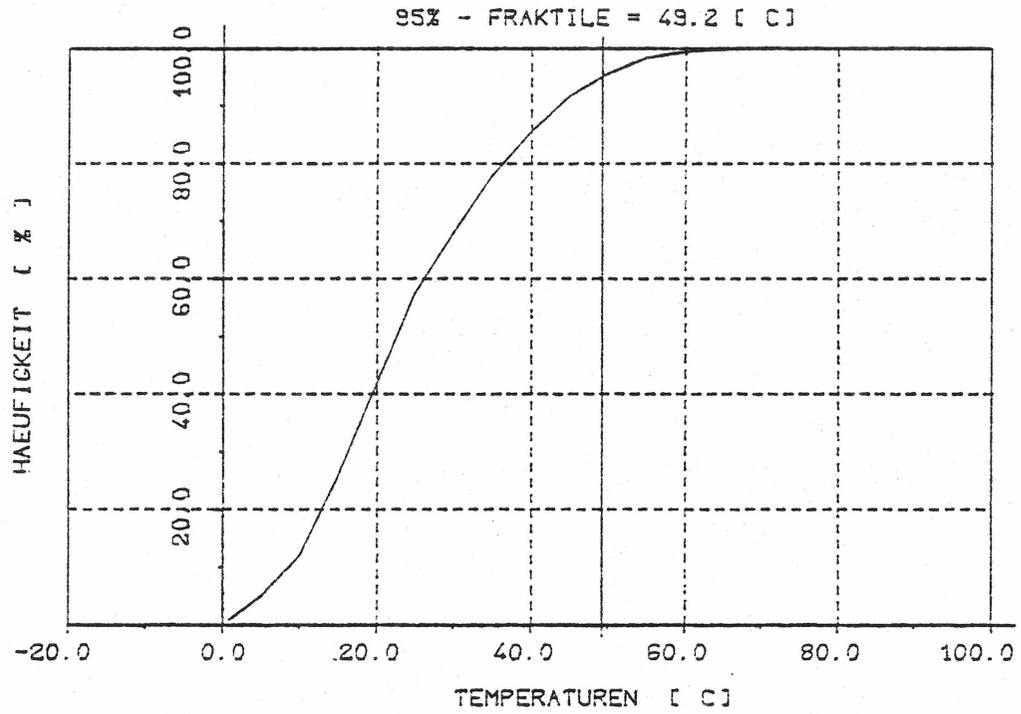
ANZAHL DER MESSWERTE : 481

MESSTELLE :
WANDTEMPERATUR - INNEN - HOEHE = 46.8 [M]



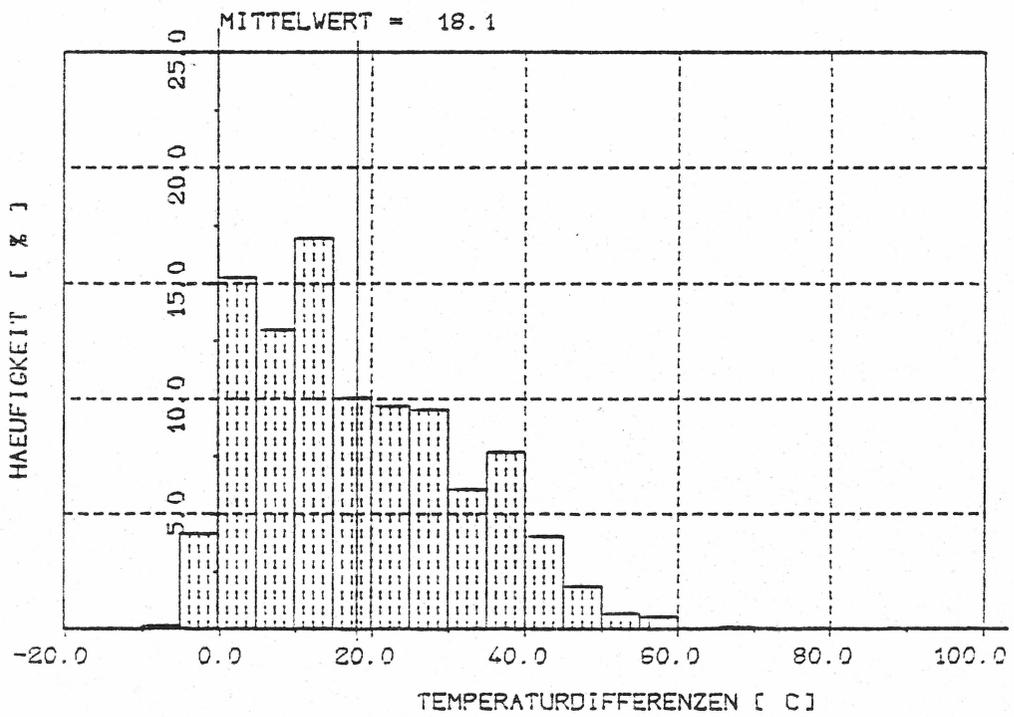
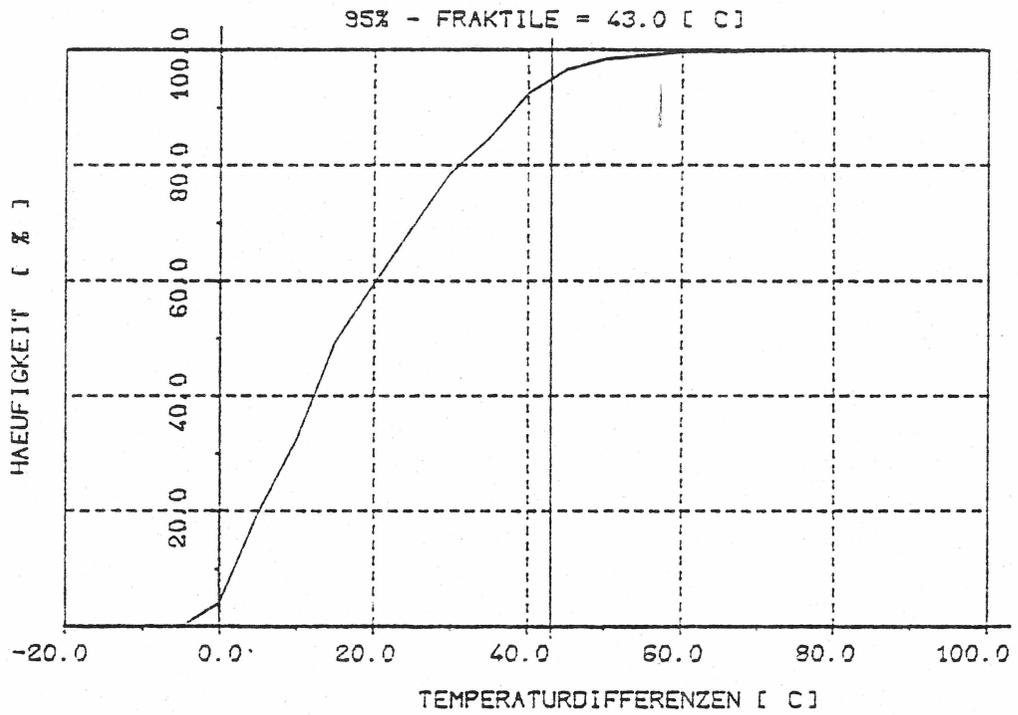
ANZAHL DER MESSWERTE : 650

MESSTELLEN :
WAND-MITTELFLAECHE-TEMPERATUREN



ANZAHL DER MESSWERTE : 2911

MESSTELLEN :
TEMPERATURGRADIENTEN



ANZAHL DER MESSWERTPAARE : 2920