

Lehrstuhl und Prüfamnt für  
Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau

## Frosthebungsverhalten von Böden infolge tief liegender Vereisungskörper

Christian Kellner

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. techn. Roman Lackner

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Vogt
2. o. Univ.-Prof. Dr. techn. Stephan Semprich,  
Universität Graz / Österreich

Die Dissertation wurde am 20.11.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 03.12.2007 angenommen.

## **Kurzzusammenfassung**

Frosthebungen können im Wesentlichen auf zwei Ursachen zurückgeführt werden: die ca. 9%ige Volumenzunahme bei der Entstehung von Eis aus Wasser und die Bildung von Eislinsen an der Grenze vom gefrorenen zum ungefrorenen Boden. Diese Effekte wurden bei drainierten Verhältnissen unter unterschiedlichen Randbedingungen – insbesondere der Variation der Auflast – im bodenmechanischen Labor versuchstechnisch untersucht. Aufbauend auf die Versuche wurde ein Rechenmodell entwickelt, welches den physikalischen Randbedingungen genügt und mit dem alle Effekte, die in den Versuchen festgestellt wurden, nachvollzogen werden können. Mit Hilfe des Modells wurde das Maß der Frosthebungen abgeschätzt, die für den mit Hilfe einer künstlichen Baugrundvereisung hergestellten Vereisungskörper bei der Baumaßnahme "Erweiterung des U-Bahnhofs U6 Marienplatz in München" zu erwarten waren.

## **Summary**

Frost heave can essentially be attributed to two causes: the increase of approximately 9% in pore water volume when it turns to ice and the growth of ice lenses at the boundary between frozen and unfrozen soil. These effects were analysed under various boundary conditions - particularly under different superimposed loads - in drained laboratory tests. Based on the test results a mathematical model was developed, which satisfies the physical boundary conditions and is able to reproduce all effects observed in the tests. Applying the model, the extent of the expected frost heave was predicted for the artificially produced frozen soil body required as tunnel construction support measures for the extension of two subway platforms at the "Marienplatz" subway station in Munich.

# Frosthebungsverhalten von Böden infolge tief liegender Vereisungskörper

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung, Problemstellung und Gliederung</b>	<b>1</b>
1.1	Einführung	1
1.2	Problemstellung und Ziele der Arbeit	2
1.3	Gliederung der Arbeit	2
<b>2</b>	<b>Literaturzusammenfassung</b>	<b>4</b>
2.1	Wärmetransport	4
2.2	Stofftransport	5
2.2.1	Indexversuche	5
2.2.2	Grundlagenorientierte Arbeiten	7
2.2.3	Ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen	10
2.3	Ausgewählte Projekte des Tunnelbaus	12
2.3.1	Milchbucktunnel in Zürich 1978/79	13
2.3.2	Unterquerung Donaukanal in Wien 2004/05	15
2.4	Einordnung und Bewertung der Literaturquellen	16
2.4.1	Hauptursachen von Frosthebungen bei tief liegenden Vereisungskörpern	16
2.4.2	Mechanismus der Eislinnenbildung	16
2.4.3	Mechanismus der volumetrischen Frosthebung	17
<b>3</b>	<b>Laborversuche</b>	<b>18</b>
3.1	Ziele und Arbeitsprogramm der Laborversuche	18
3.2	Untersuchte Böden	19
3.3	Versuchsdurchführung	20
3.3.1	Probenherstellung und -lagerung,	20
3.3.2	Lastaufbringung	22
3.3.3	Klimaschrank mit der 2-Kammer-Technik	24
3.4	Versuchsprogramm mit Ergebnissen	25
3.4.1	Versuchsprogramm	25
3.4.2	Vorversuche	26
3.4.3	Untersuchungen zur volumetrische Frosthebung	27
3.4.4	Untersuchungen zur Eislinnenbildung	33
3.4.5	Einfluss einer intermittierenden Steuerung der Gefriertemperatur	39
<b>4</b>	<b>Wärmetransport</b>	<b>49</b>
4.1	Das Thermodynamische Gleichgewicht in geschlossenen Systemen	49

4.2	Die Neumann-Lösung für die eindimensionale Frosteindringung	52
<b>5</b>	<b>Stofftransport und Frosthebungen</b>	<b>59</b>
5.1	Die Frosthebung im undrained System bei Vollsättigung	59
5.2	Die Frosthebung im drainierten System	60
5.2.1	Modellvorstellung	60
5.2.2	Rechenmodell	62
5.2.3	Grenzbetrachtungen	70
5.3	Die Eislinnenbildung	73
5.3.1	Modellvorstellung	73
5.3.2	Rechenmodell	78
5.4	Gesamtbetrachtung Volumenzunahme und Eislinnenbildung	78
<b>6</b>	<b>Parameterstudien</b>	<b>81</b>
6.1	Variation der Durchlässigkeitswerte	82
6.2	Variation der Sättigungszahl	83
6.3	Variation der Auflast	84
6.4	Variation der Frosttemperatur	85
6.5	Variation der kritischen Eindringgeschwindigkeit der Null-Grad-Isotherme	86
6.6	Variation der Hebungsgeschwindigkeit der Eislinnenbildung	87
6.7	Bewertung der Parametervariation	87
<b>7</b>	<b>Vergleich von Messungen und Berechnungen an Beispielen</b>	<b>89</b>
7.1	Gegenrechnung der Versuche T2-100-VO(-20), Nr. 1 bis 4	89
7.2	Gegenrechnung der Versuche T1-6-EL(-20/10), Nr. 1 bis 4	91
7.3	Bewertung der Gegenrechnung	92
<b>8</b>	<b>Monte Carlo Simulation der eindimensionalen Frosteindringung</b>	<b>94</b>
8.1	Allgemeines	94
8.2	Die Anwendung der Monte-Carlo-Simulation zur Prognose von Frosthebungen	96
<b>9</b>	<b>Zur Übertragbarkeit der Methode auf Baumaßnahmen</b>	<b>99</b>
<b>10</b>	<b>Die Bahnsteigerweiterung des U-Bahnhofs U6 Marienplatz unter dem Rathaus in München</b>	<b>103</b>
10.1	Vorgang	103
10.2	Bestandsbauwerke	104
10.3	Baugrund- und Grundwasserverhältnisse	104



10.4	Bauablauf	106
10.5	FE-Berechnungen	108
10.5.1	Allgemeines	108
10.5.2	Wasserdruck	108
10.5.3	Material- und Bodenkennwerte	108
10.5.4	Vortrieb der bestehenden U6 – Tunnelröhren	112
10.5.5	Vortrieb der Begleittunnel	113
10.5.6	Abschätzung der auf der Geländeoberfläche zu erwartenden Frosthebungen	113
10.5.7	Simulation des Vortriebs	117
10.6	Schlauchwaagenmessungen	118
10.6.1	Messergebnisse	120
10.6.2	Beurteilung der Messergebnisse	122
10.7	Vergleich der berechneten mit gemessenen Verformungen	123
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>125</b>
11.1	Zusammenfassung	125
11.1.1	Allgemeines	125
11.1.2	Laborversuche	125
11.1.3	Modell zur Beschreibung der Frosthebungen und Anwendungsbeispiel	126
11.2	Ausblick	128
<b>12</b>	<b>Quellenangaben</b>	<b>129</b>
12.1	Literatur	129
12.2	Internet	133
12.3	Projektspezifische Unterlagen "U6 Marienplatz", unveröffentlicht	133

## **Anlagenverzeichnis**

- Anlage 1, Blatt 1 – 8: Ergebnisse der klassifizierenden Untersuchungen
- Anlage 2, Blatt 1 – 33: Ergebnisse der Laboruntersuchungen an 125 mm hohen Proben
- Anlage 3, Blatt 1 – 7: Tastversuche zur Untersuchung des Einflusses der Probenhöhe auf das Frosthebungsverhalten und deren Bewertung
- Anlage 4, Blatt 1 – 4: Fotodokumentation des Schlauchwaagenmesssystems
- Anlage 5, Blatt 1 – 5: Ergebnisse der Schlauchwaagenmessungen

## Formelzeichen

Zeichen	Benennung	Einheit
A	Fläche	m <sup>2</sup>
B	Linien-Auflagerkraft	kN / m
C	Wärmekapazität	J / K
C <sub>m</sub>	Spezifische Wärmekapazität	J / (kg · K)
F	Kraft	kN
G	Funktion des Gaußschen Fehlerintegrals	-
H	Höhe bzw. Hebung	m
H <sub>Darcy</sub>	Höhe einer Wassersäule, die in den Boden einströmt	m
H <sub>EI</sub>	Hebung infolge Eislinsenbildung	m
H <sub>Vol</sub>	volumetrische Hebung	m
H <sub>Res</sub>	infinitesimale Hebung	m
H <sub>tot</sub>	Gesamthebung	m
P	Druck (insbesondere Druck infolge einer Auflast)	kN/m <sup>2</sup> , mWs
Q	Energie, Wärmemenge	J
SP	"Segregation Potential" nach Konrad	m <sup>2</sup> / (s · K)
S <sub>r</sub>	Sättigungszahl	-
T	Temperatur	K
V	Volumen	m <sup>3</sup>
Vol <sub>H</sub>	bezogene volumetrische Hebung	-
a	Wärmeleitfähigkeit, auch Temperaturleitfähigkeit	m <sup>2</sup> / s
b	Wärmeeindringzahl	J / (m <sup>2</sup> · s <sup>0,5</sup> · K)
d	Dicke	m
e	Exponentialfunktion	-
g	Erdbeschleunigung	m / s <sup>2</sup>
h	Abstand zwischen Wärmesenke und Drainage, im Laborversuch entspricht dies der Probenhöhe	m
k	Durchlässigkeit	m / s
m	Masse	kg
n <sub>a</sub>	Luftporenanteil	-
p	Proportionalitätskonstante der Neumann-Lösung	m · s <sup>-0,5</sup>
t	Zeit	s
v	Geschwindigkeit	m / s
v <sub>NGIT</sub>	kritische Eindringgeschwindigkeit der Null-Grad-Isotherme	m / s
v <sub>EL</sub>	Wachstumsgeschwindigkeit der Eislinse	mm / d
w	Wassergehalt	-
x, y, z	Koordinatenrichtungen	m
Δh	gemessene Frosthebung	mm
ΔP	Druckunterschied	kN/m <sup>2</sup> , mWS

$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	W / (K·m)
$\rho$	Dichte des Bodens	t / m <sup>3</sup>
$\rho_s$	Korndichte	t / m <sup>3</sup>
$\sigma$	Spannung	kN / m <sup>2</sup>
$\xi(t)$	Lage der Null-Grad-Isotherme in Abhängigkeit von der Zeit	m
$\vartheta(z, t)$	Temperaturfeld	°C
$\theta$	Temperatur, Randbedingung für Temperaturfeld	°C
$\Delta H_s$	Latente Schmelzwärme, spezifische Schmelzenthalpie	J / kg
$\Delta u$	Unterdruck im Porenwasser infolge Eislinnenbildung	kN / m <sup>2</sup>
$\eta$	Integrationsvariable, Hilfswert	-
$\pi$	Kreiszahl	-

#### Indizes

1	gefrorener Boden
2	ungefrorener Boden
d	trocken
El	Eislinse
h	horizontal
i	innen
limit	zeitlicher Grenzzustand
L	Luft
o	oben
res	resultierend, verbleibend
S	"Segregational Temperature" nach Konrad
t	Zeitpunkt
u	unten
v	vertikal
w	Wasser

#### Anmerkung:

Die angegebenen Einheiten gelten für Formeln. In Grafiken oder Beispielen werden ggf. andere Einheiten verwendet, um eine übersichtliche Darstellung zu erreichen.

## 1 Einführung, Problemstellung und Gliederung

### 1.1 Einführung

Es ist bekannt, dass sich Böden bei Gefrieren des darin befindlichen Wassers verformen. Eine Prognose der unter gegebenen Randbedingungen zu erwartenden Frosthebungen ist wünschenswert, damit z.B. die Konstruktion von Bauwerken – einschließlich Erdbauwerken – hinsichtlich ihrer Frostempfindlichkeit optimiert werden kann und Schäden möglichst ausgeschlossen werden können.

Frosthebungen können im Wesentlichen auf zwei Ursachen zurückgeführt werden: Zunächst kommt es durch die 9%ige Volumenzunahme bei der Entstehung von Eis aus Wasser zu homogenen Frosthebungen. Weiterhin bilden sich insbesondere bei feinkörnigen Böden an der Grenze vom gefrorenen zum ungefrorenen Boden aus reinen Eiskristallen wachsende Körper, die so genannten Eislinsen.

Für eine Prognose von Frosthebungen sind erforderlich:

- die Identifikation von wärmetechnischen und bodenmechanischen Parametern, die das Maß der Frosthebungen beeinflussen,
- die Quantifizierung der genannten Parameter mit Normversuchen, bzw. die Schaffung von Kenngrößen, welche mit weiterführenden Laborversuchen reproduzierbar ermittelt werden können,
- die Formulierung eines mathematischen Modells, mit dem sich der zeitliche Verlauf der Frosthebungen beschreiben lässt,
- die Anwendung des Modells und die Bewertung der damit gewonnenen Ergebnisse.

Derartige Prognosen wurden in der Vergangenheit für Prozesse mit natürlich hervorgerufener Frosteindringung, z.B. den Bau von Pipelines in Permafrostgebieten, bereits erfolgreich erstellt. Unter dem Begriff der "natürlichen" Frosteindringung soll in der vorliegenden Arbeit dabei das Gefrieren des Bodens, ausgehend von der freien Bodenoberfläche bei Umgebungstemperaturen unter Null Grad Celsius verstanden werden. Davon ist die "künstlich" hervorgerufene Frosteindringung zu unterscheiden. Unter diesem Begriff soll in der vorliegenden Arbeit die technische Baugrundvereisung mit Hilfe von Sole oder Stickstoff verstanden werden. Dabei werden insbesondere tief liegende Vereisungskörper betrachtet, wobei unter dem Begriff "tief liegend" verstanden wird, dass die bei Frostbeginn im Bereich des geplanten Vereisungskörpers wirkenden Überlagerungsspannungen deutlich höher als die Spannungen infolge Eigengewicht des Vereisungskörpers sind. Ein typisches Beispiel für einen künstlichen, tief liegenden Vereisungskörper ist eine Firstvereisung im Tunnelbau.

Die natürliche Frosteindringung unterscheidet sich von der Frosteindringung bei künstlich hergestellten und tief liegenden Vereisungskörpern vor allem in zwei Randbedingungen. Zum einen dringt der Frost bei der künstlichen Bodenvereisung aufgrund der steileren Temperaturgradienten vergleichsweise schneller in den Boden ein. Zum anderen wirkt bei der Herstellung von tief liegenden Vereisungskörpern vom Beginn der Herstellung an eine Auflast aus dem Überlagerungsdruck des umgebenden Bodens auf den Vereisungskörper.

## 1.2 Problemstellung und Ziele der Arbeit

Die infolge natürlicher Frosteindringung bei Böden hervorgerufenen Frosthebungen sind eingehend erforscht worden. Die bei der Herstellung tief liegender Vereisungskörper zu beobachtenden zusätzlichen Effekte und die ihnen zugrunde liegenden Mechanismen wurden hingegen vergleichsweise selten untersucht. Hierzu soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten.

Die Arbeit verfolgt dabei zwei Ziele. Zum einen soll der Einfluss unterschiedlich hoher Auflasten bei steilen Temperaturgradienten auf das Frosthebungsverhalten von Böden versuchs-technisch untersucht und beschrieben werden. Weiterhin soll, aufbauend auf den Versuchsergebnissen ein Modell entwickelt werden,

- mit dem sich die in den Versuchen beobachteten Phänomene erklären lassen.
- welches den physikalischen Randbedingungen genügt.
- mit welchem sich die zeitliche Entwicklung von Frosthebungen in Böden infolge tief liegender Vereisungskörper beschreiben lässt.

Typischerweise ist es bei der Formulierung einer Modellvorstellung zunächst notwendig, das globale Systemverhalten möglichst realitätsnah zu beschreiben, ehe das Modell auch um die Beschreibung von Randeinflüssen erweitert werden kann. Daher werden im vorgeschlagenen Modell nur die anfangs genannten Hauptursachen für Frosthebungen berücksichtigt.

Es wird gezeigt, dass der zeitliche Frosthebungsverlauf eine Funktion mit einer Vielzahl von Eingangsparametern ist. Da der Boden naturgemäß inhomogen ist, unterliegen die zugehörigen Bodenparameter gewissen Streubreiten. Beispielsweise variieren Wassergehalt oder Dichte im natürlich anstehenden Boden in Abhängigkeit des Ortes. Darüber hinaus sind auch die Ergebnisse von bodenmechanischen Untersuchungen selbst mit gewissen Streubreiten verbunden. Je größer die Anzahl der Eingangsparameter für ein bodenmechanisches Modell ist, desto größer sind in der Regel demnach auch die mit dem Ergebnis verbundenen Unsicherheiten. Wenn die Zusammenhänge zwischen den Eingangsparametern und dem gesuchten Ergebnis nichtlinear sind, dann kann von den Streubreiten der Eingangsparameter nicht einfach auf die Streubreiten des Ergebnisses geschlossen werden. Im vorliegenden Fall wird daher die Sensibilität des mechanischen Modells hinsichtlich der rechnerisch ermittelten Frosthebungen mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation abgeschätzt.

## 1.3 Gliederung der Arbeit

In der im nachfolgenden Kapitel 2 enthaltenen Literaturzusammenfassung wird auf den zum gegenwärtigen Zeitpunkt vorhandenen Stand von Wissenschaft, Forschung und Technik auf dem Gebiet der Frosthebungen eingegangen. Hierzu werden die zur Beschreibung von Frosthebungen notwendigen Arbeiten auf dem Gebiet des Wärmetransportes und Stofftransportes vorgestellt. Darüber hinaus wird auf zwei Tunnelbauprojekte eingegangen, in denen eine künstliche Bodenvereisung eingesetzt wurde und bei denen die entstandenen Frosthebungen umfassend dokumentiert sind. Kapitel 2 schließt mit einer Bewertung der in der Literatur gefundenen Informationen im Hinblick auf die Prognose von Frosthebungen infolge tief liegender Vereisungskörper.

In Kapitel 3 werden die im bodenmechanischen Labor durchgeführten Frosthebungsversuche beschrieben. Hierzu wird zunächst die verwendete 2-Kammer-Technik erläutert, bei der die zu untersuchende Bodenprobe eindimensional von oben gefroren wird und gleichzeitig über die Unterseite

Wasser aufnehmen kann. Bei der Versuchsdurchführung und -auswertung wird unterschieden, ob die Volumenzunahme der Bodenprobe oder die Eislinsenbildung quantifiziert werden sollen.

In Kapitel 4 werden kurz die theoretischen Grundlagen des eindimensionalen Wärmetransportes im Boden wiedergegeben. Darauf aufbauend wird in Kapitel 5 ein Rechenmodell abgeleitet, mit dem die in den Laborversuchen beobachteten Phänomene erklärt werden können. Um den Einfluss einzelner Eingangsparameter des Rechenmodells auf das Maß der Frosthebungen zu untersuchen, wird in Kapitel 6 eine Parameterstudie durchgeführt. Kapitel 7 enthält einen Vergleich von Messungen und Berechnungen einzelner Laborversuche.

In Kapitel 8 wird erläutert, wie mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation neben dem Maß der unter gegebenen Randbedingungen zu erwartenden Frosthebungen auch die Sensibilität gegenüber den Streubreiten der für das Rechenmodell verwendeten Eingangsparameter untersucht werden kann.

In den Kapiteln 3 bis 8 wird stets von eindimensionalen Wärme- und Stoffströmen ausgegangen. In Kapitel 9 wird die Übertragbarkeit der aufgestellten Beziehungen auf die in der Regel mehrdimensionalen Stoff- und Wärmeströme im Feld diskutiert.

Mit dem entwickelten Modell und mit Hilfe der gewonnenen Versuchsdaten wurden die Frosthebungen berechnet, die für die Baumaßnahme "Bahnsteigerweiterung der U-Bahnlinie U6 Marienplatz unter dem Rathaus in München" zu erwarten waren. Bei der Erweiterung handelt es sich um den Bau zweier ca. 100 m langer Tunnelröhren, welche im Schutz zweier Vereisungsschirme aufgeföhren wurden. Kapitel 10 enthält die Dokumentation der Baumaßnahme einschließlich der durchgeführten Verformungsmessungen und Berechnungen.

Die Arbeit schließt mit der in Kapitel 11 enthaltenen Zusammenfassung der gewonnenen Ergebnisse und gibt einen Ausblick auf lohnende weitere Forschungsthemen.

## 2 Literaturzusammenfassung

Das Verhalten von Böden unter Frosteinwirkung einschließlich der damit verbundenen Änderung ihrer bodenmechanischen Eigenschaften war Gegenstand vieler Untersuchungen und Forschungsvorhaben, die sich wie folgt gliedern lassen:

- Wärmetransport
- Stofftransport
- Tragfähigkeit

Mit Laborversuchen und thermodynamischen Berechnungen des **Wärmetransports** wurde der Vorgang der Frosteindringung in einen Boden untersucht und beschrieben. Damit war es möglich, die Temperaturverteilung im Boden infolge eines Gefriervorganges zu prognostizieren. Die Ergebnisse dieser Arbeiten wurden insbesondere für die Planung von künstlichen Bodenvereisungen verwendet.

Unter den Begriff **Stofftransport** fallen Untersuchungen von Frosthebungen und der ihnen zugrunde liegenden Mechanismen. Die überwiegende Zahl der Forschungsarbeiten hierzu beschäftigte sich dabei mit der natürlichen Frosteindringung in Böden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden zur Vermeidung von Frostschäden im Straßenbau oder bei Bauvorhaben in Permafrostgebieten verwendet.

Die zur Analyse der **Tragfähigkeit** von gefrorenem Boden erforderlichen Laborversuche (einaxiale Druck- und Kriechversuche, Dreiaxialversuche, Biegezugversuche) wurden im Rahmen vielfältiger Forschungsvorhaben, z.B. von ORTH (1986) entwickelt. Auf Basis der Versuchsergebnisse wurden Stoffgesetze zur Beschreibung des Spannungs-Verformungsverhaltens von gefrorenem Boden abgeleitet. Beispielsweise entwickelt CUDMANI (2006) mit den Ergebnissen von ORTH (1986) ein Stoffgesetz, mit dem das Kriechverhalten von gefrorenem Boden beschrieben werden kann. Die Ergebnisse dieser Arbeiten finden vor allem bei der Dimensionierung von künstlich hergestellten Vereisungskörpern im Grund- und Tunnelbau Anwendung. Sie sind nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit und an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

Aus den in der Literatur dokumentierten und im Folgenden vorgestellten Laborversuchen und Berechnungen geht hervor, dass die infolge des Gefrierens von Boden zu erwartenden Hebungen von der Eindringgeschwindigkeit des Frostes abhängen. Die Formulierung des Wärmetransportes bei der Frosteindringung in den Boden, gekoppelt mit den Durchlässigkeitseigenschaften bzw. Filterwiderständen des Bodens, bildet die Grundlage für die Erfassung der aus dem Massentransport resultierenden Hebungen. Die Literaturrecherche wird daher nicht chronologisch gegliedert, sondern geht zunächst auf Untersuchungen des "Leitprozesses" Wärmetransport und anschließend auf die Untersuchungen des dadurch in Gang gesetzten "Folgeprozesses" Stofftransport ein.

### 2.1 Wärmetransport

Die mathematische Formulierung der zeitabhängigen eindimensionalen Frosteindringung in einen Boden mit einer fortschreitenden Phasengrenze geht auf Neumann zurück und wurde unter anderem von GRÖBER, ERK, GRIGULL (1954) veröffentlicht. Die Lösung von Neumann, welche die Ausgangssituation des zu entwickelnden Modells darstellt und die in Abschnitt 4.2 näher vorgestellt wird, berück-



sichtigt auch das Freiwerden latenter Schmelzwärme infolge der Phasenumwandlung von Wasser zu Eis. Von STÄNDER (1967) durchgeführte Laborversuche zur Frostausbreitung zeigen eine gute Übereinstimmung mit den mathematischen Ansätzen. Die Neumann-Lösung der Frostausbreitung wurde von vielen Autoren in ihrer Anwendungsbreite erweitert. Beispielhaft seien hier die Arbeiten von NEISS (1982), MAKOWSKI (1986) und SRES (2006) genannt, in der die künstliche Bodenvereisung unter Berücksichtigung einer Grundwasserströmung mit der Finiten-Element-Methode modelliert wird. Die zur Berechnung des Wärmetransports erforderlichen thermischen Parameter wie Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität sind vielfach untersucht worden. Einen umfassenden Überblick hierzu gibt JESSBERGER (1996).

Die Beschreibung der Frostausbreitung mit einer wandernden Frostgrenze ist in die Gruppe der "moving boundary" - Probleme einzuordnen. Wenn, wie im Fall der Frostausbreitung, die Frostgrenze nicht räumlich scharf bestimmt werden kann, spricht man auch von einem "moving zone" - Problem. Derartige Phänomene werden auch in der Oberflächenphysik und -chemie, dort vor allem bei hochporösen Werkstoffen untersucht.

## 2.2 Stofftransport

Die Untersuchungen des Stofftransportes und damit des Frosthebungsverhaltens von Böden lassen sich grob drei Gruppen zuordnen, auf die nachfolgend näher eingegangen wird.

- **Indexversuche:** Indexversuche an natürlichen und künstlich hergestellten Bodenproben wurden zur vergleichenden Untersuchung ihrer Frostempfindlichkeit durchgeführt.
- **Grundlagenorientierte Arbeiten:** In diesen wird die Eislinsenbildung in porösen Medien beschrieben. Die darauf aufbauenden Modelle erklären das Phänomen der Eislinsenbildung aus physikalischer Sicht, wobei in einzelnen Theorien unterschiedliche Ursachen für die Eislinsenbildung genannt werden. Während die Mehrzahl der Autoren die Eislinsenbildung aus einem thermodynamischen Potenzial ableitet, gibt es auch Arbeiten, die ein Kapillarpotenzial zu Grunde legen. Allen Arbeiten, die sich dieser Gruppe zuordnen lassen, ist gemeinsam, dass als Eingangsgrößen Parameter benötigt werden, die –wenn überhaupt– nur mit hochpräzisen Messungen bestimmt werden können.
- **Ingenieurtechnische Untersuchungen:** Diese Untersuchungen haben ebenfalls die quantitative Bestimmung und Beschreibung des Frosthebungsverhaltens zum Ziel. Dabei wird das Frosthebungsverhalten von Bodenproben zunächst direkt versuchstechnisch bestimmt. Die in den Versuchen gewonnenen Ergebnisse werden als Eingangsgrößen für weiterführende Berechnungen und Prognosen verwendet.

### 2.2.1 Indexversuche

Die ursprüngliche Motivation zur Untersuchung von Frosthebungen infolge natürlicher Frosteindringung waren Frostschäden im Straßenbau. JELINEK, JESSBERGER, LACKINGER (1968) geben einen geschichtlichen Überblick der Frostforschung und führten umfangreiche Laboruntersuchungen am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität München durch. Bedingt durch den Schwerpunkt Straßenbau wurden die Versuche nur mit kleinen Auflasten von ca. 6 kN/m<sup>2</sup>, jedoch an einer Vielzahl von Böden durchgeführt. Auf Grundlage der Versuchsergebnisse wurden Kriterien für die Beurteilung der Frostempfindlichkeit von Böden entwickelt, die später auch Eingang in technische Regelwerke, z.B. die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen für Erdbauten - ZTVE

fanden. Eine detaillierte Beschreibung der Probenherstellung und der Versuchsdurchführung findet sich in HEITZER (1976).

Die von JELINEK, JESSBERGER, LACKINGER (1968) durchgeführten Versuche zeigten, dass die Bildung von Eislinsen, d.h. reinen Eiskristallen, eine der Hauptursachen für Frosthebungen in Böden ist. Ein Eislinsenwachstum ist nur dann möglich, wenn Wasser durch ungefrorenen Boden zur Frostgrenze strömen kann. Zur realitätsnahen Simulation von Frosthebungen muss in Laborversuchen daher ein permanentes Wasserangebot sichergestellt werden. Diese Anforderung wurde in München durch die Verwendung eines Klimaschranks mit einer 2-Kammer-Technik gelöst, die in Abb. 2-1 skizziert ist. Die zu untersuchende Bodenprobe wird dabei von oben mit  $T_L < 0 \text{ °C}$  gefroren und kann während des Gefriervorganges gleichzeitig Wasser von dem mit  $T_W > 0 \text{ °C}$  temperierten Wasserbad abgeben, bzw. von dort aufnehmen.

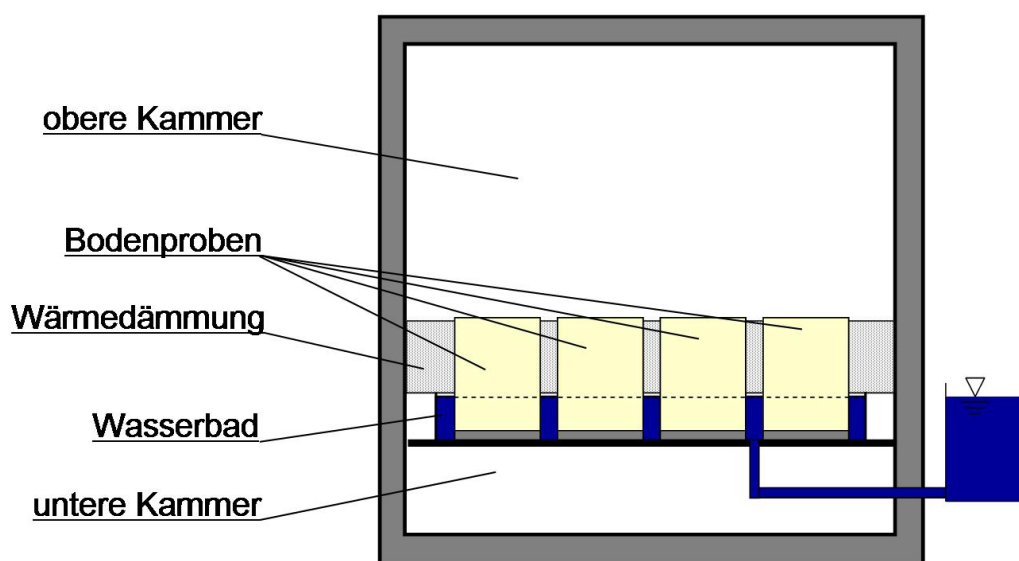


Abb. 2-1: Prinzipskizze des Klimaschranks

Im Einzelnen ergibt sich folgender Versuchsablauf. Zu Beginn eines Frosthebungsversuchs wird der Klimaschrank mit den darin befindlichen Bodenproben und dem Wasserbad auf die spätere Temperatur des Wasserbades temperiert. Dann wird die obere Kammer auf die gewünschte Gefriertemperatur eingestellt. Die Oberseite der Bodenproben gefriert und die Gefrierfront dringt in die Bodenprobe ein. Sobald die Frosteindringung ausreichend langsam ist, bilden sich Eislinsen nahe der Null-Grad-Isotherme (siehe Abb. 2-2). Mit anhaltender Frosteindringung bilden sich auf Höhe der sich fortbewegenden Gefrierfront laufend neue Eislinsen. Sobald ein annähernd stationärer Temperaturverlauf erreicht ist, bildet sich über dem ungefrorenen Teil jeder Bodenprobe eine unterste Eislinse, die dann stetig wächst. Im Folgenden wird stets diese unterste Eislinse vereinfacht als Eislinse bezeichnet. Sowohl Wärme- als auch Stofftransport sind eindimensionale Vorgänge. Die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme aus dem Wasserbad soll im Folgenden mit  $v_w$  bezeichnet werden. Die Hebungsgeschwindigkeit der Probenoberseite ergibt sich infolge der Volumenzunahme des aufgenommenen Wassers um 9% zu:

$$v_{EL} = 1,09 \cdot v_w \quad (2.1)$$

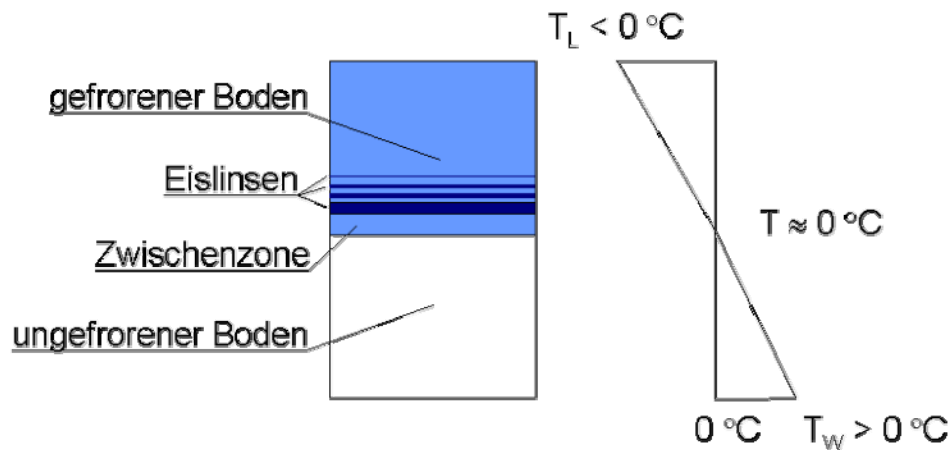


Abb. 2-2: Schematischer Schnitt durch eine Bodenprobe nach Versuchsende

Frostversuche unter höheren Auflasten sind wesentlich seltener als Versuche ohne bzw. mit geringer Auflast dokumentiert. Derartige Laborversuche wurden beispielsweise von PENNER UND UEDA (1977, 1978) zur Untersuchung von Eislinisenbildungen durchgeführt. Sie verwendeten hierzu die Versuchseinrichtung von HILL UND MORGENSTERN (1977), welche ebenfalls nach dem 2-Kammer-Prinzip arbeitet. In einer späteren Veröffentlichung leiten PENNER UND WALTON (1979) aus den Laborversuchen einen exponentiellen Zusammenhang zwischen der Hebungsgeschwindigkeit und dem Verhältnis von Auflast zu Gefriertemperatur ab:

$$dh / dt = a \cdot e^{(b \cdot P/T)} \quad (2.2)$$

wobei a und b bodenabhängige Konstanten sind und folgende Einheiten zu verwenden sind:

dh / dt:	Hebungsgeschwindigkeit	[mm/min]
h:	Hebung	[mm]
t:	Zeit	[s]
P:	Auflast	[kg/cm <sup>2</sup> ]
T:	Gefriertemperatur	[°C]

Frosthebungen wurden auch auf anderen Gebieten der Ingenieur- und Naturwissenschaften untersucht. Im Bauwesen sind Untersuchungen des Frostwiderstands von Beton zu nennen. So zeigen beispielsweise Untersuchungen von GRÜBL (1981), dass sowohl die Volumenzunahme des Wassers beim Gefrieren als auch eine Eislinisenbildung bei Betonkörpern, die dem Frost ausgesetzt sind, zu Verformungen und weiter zu Frostschäden führen können. Auch von SETZER (2001) wurden Frost-Tauuntersuchungen an Betonproben durchgeführt. In grundlegendem Unterschied zu dem in der Bodenmechanik verwendeten Versuchsprinzip der 2-Kammer-Technik findet hierbei der Frost- und Wasserangriff auf der Oberfläche einer Betonprobe statt, d.h. der gesamte Probekörper einschließlich des Wasserbades wird wechselweise gefroren und aufgetaut.

### 2.2.2 Grundlagenorientierte Arbeiten

Zur Bildung von Eislinisen in einem Boden ist ein Zustrom von Wasser an die Gefrierfront erforderlich. Um die Strömung in Gang zu setzen, ist ein Druckgefälle bzw. allgemeiner ein Potenzialgefälle im Porenwasser notwendig. Üblicherweise werden stets verschiedene Potentiale in unterschiedlichem

Maß zur Erzeugung eines Druckgefälles im Porenwasser beitragen. Der nachfolgende Überblick über relevante Potenziale orientiert sich an AIGNER (2005).

Das im Boden enthaltene Wasser wird stets vom **Gravitationspotenzial** und vom **Druckpotenzial** beeinflusst, welche beispielsweise in die Bernoulli-Gleichung als geodätische Höhe und Druckhöhe eingehen.

### Osmotisches Potenzial:

Wenn im Grundwasser Stoffe, z.B. Salze, gelöst sind, kann unter bestimmten Umständen zusätzlich ein osmotisches Potenzial aufgebaut werden. Nachfolgend soll der Vollständigkeit halber kurz auf die Wirkungsweise von im Grundwasser gelösten Stoffen eingegangen werden. Bei den in der Literatur dokumentierten Laborversuchen und Rechenmodellen zur Frosthebung wird davon ausgegangen, dass kein osmotisches Potenzial vorhanden ist. Dies gilt auch für die eigenen Laborversuche und Berechnungen.

Ist ein Stoff in einem Lösungsmittel gelöst, z.B. Salz in Wasser, dann kommt es zwischen den Molekülen des gelösten Stoffes und des Lösungsmittels zu Wechselwirkungen. Innerhalb der Lösung heben sich die Anziehungskräfte auf, da sie in alle Richtungen gleichmäßig wirken (vgl. Abbildung 2-3). Am Rand wirken diese Kräfte nur zur Seite und nach innen, die gelösten Moleküle üben auf den Rand keinen Druck aus. Ist der Rand jedoch eine halbdurchlässige (semipermeable) Membran, welche vom Lösungsmittel durchdrungen werden kann, aber nicht vom gelösten Stoff, dann entsteht in der Lösung ein Druck. Die Ursache liegt darin, dass infolge der Durchlässigkeit auch am halbdurchlässigen Rand Wechselwirkungen auftreten. Das System strebt einem Konzentrationsausgleich zu. Es strömt so lange Lösungsmittel von außen zu, bis der hydrostatische Druck im System dem osmotischen Druck entspricht. Beispielsweise erzeugt ein Mol eines in einem Liter Wasser gelösten Stoffes bei einer Temperatur von 25 °C einen osmotischen Druck von 2477 kN/m<sup>2</sup>. Die Osmose ist vor allem bei biologischen Prozessen, z.B. der Wasseraufnahme von Pflanzen, von Bedeutung. Nach STEGMÜLLER (1984) wurden bei Wüstenpflanzen osmotische Drücke von über 100 bar nachgewiesen.

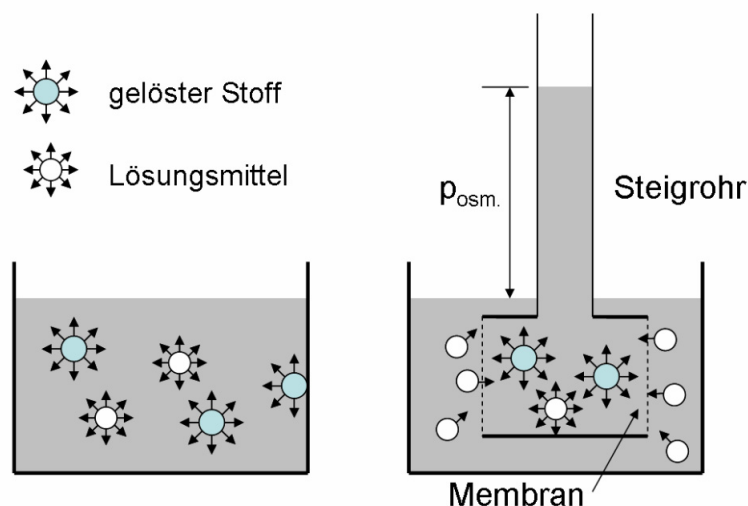


Abb. 2-3: Prinzipskizze des osmotischen Drucks

Abgesehen vom osmotischen Potenzial, das hier als Sonderfall anzusehen ist und daher nicht weiter betrachtet werden soll, sind die infolge des Gravitationspotenzials und eines Druckpotenzials vorhan-

denen Druckunterschiede im Porenwasser in der Regel vergleichsweise klein gegenüber dem Kapillarpotenzial und dem thermodynamischen Potenzial, auf die nachfolgend näher eingegangen wird.

### **Kapillarpotenzial:**

Kapillareffekte werden durch die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten selbst und der Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeiten und festen Phasen hervorgerufen. Die Grenzflächenspannung ist auf Adhäsionskräfte zurückzuführen. Taucht man beispielsweise eine Kapillare in ein Gefäß mit Wasser, dann steigt das Wasser so lange in der Kapillare auf, bis der hydrostatische Druck infolge des Gewichts der Wassersäule dem Kapillardruck entspricht. Je kleiner der Durchmesser der Kapillare, desto größer ist die Steighöhe der Flüssigkeit.

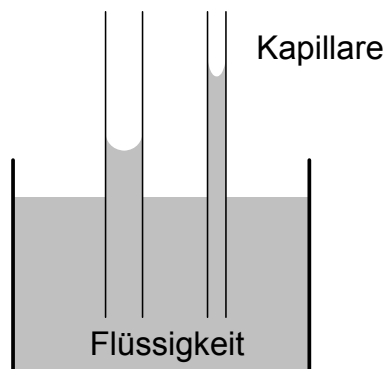


Abb. 2-4: Prinzipskizze des Kapillardrucks

### **Thermodynamisches Potenzial:**

Die Theorie des thermodynamischen Potenzials geht von der Tatsache aus, dass gefrorener Boden ein Gemisch aus Feststoff, Luft, Wasser und Eis ist. Bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt gefriert das Porenwasser nicht vollständig, sondern es verbleibt immer ein Anteil von ungefrorenem Wasser als Flüssigkeit oder Wasserdampf im Boden. Mit tieferen Gefriertemperaturen vermindert sich auch der Anteil an ungefrorenem Wasser, wobei zunächst das Porenwasser gefriert und ein adhäsiv an die Bodenkörner gebundener, dünner Wasserfilm in flüssigem Zustand verbleibt. Der Massenanteil dieses Wasserfilms an der Trockenmasse des betrachteten Bodenvolumens wird allgemein als "ungefrorener Wassergehalt" bezeichnet, siehe z.B. KONRAD (1994). Die labortechnische Bestimmung des ungefrorenen Wassergehaltes ist aufwändig und in der Literatur finden sich beispielsweise die Untersuchungen von NERSESOVA (1963), ANDERSON (1972) und FRIVIK (1982). ANDERSON (1972) gibt für einen Ton bei  $-10\text{ °C}$  den ungefrorenen Wassergehalt mit rund 18 % an, für einen schluffigen Ton liegt der Wert bei rund 2 %. Bereits WILLIAMS (1963) hat hierzu Untersuchungen durchgeführt und postuliert, dass der ungefrorene Wassergehalt unabhängig vom Wassergehalt des ungefrorenen Bodens sei.

Die Anteile des festen Aggregatzustandes Eis und des flüssigen Aggregatzustandes Wasser des gefrorenen Bodens stehen miteinander im temperaturabhängigen Gleichgewicht. Diese Gleichgewichtsbeziehung kann in geschlossenen Systemen, in denen definitionsgemäß nur Wärme und Arbeit, aber kein Stoffaustausch über die Systemgrenzen möglich ist, durch die Clausius-Clapeyron Gleichung beschrieben werden, auf die im Detail in Abschnitt 4.1 eingegangen wird. Wird nun in einem offenen System, in dem auch ein Stoffaustausch über die Systemgrenzen möglich ist, ein Temperaturgradient so in den Boden eingepreßt, dass ein Teil des im Boden enthaltenen Wassers gefriert, so verschieben sich die Mengenverhältnisse von Eis und Wasser. Das Gefrieren eines Teils des Porenwassers

bewirkt lokal einen starken Unterdruck im Wasser, das die sich bildenden Eiskristalle umgibt. Infolge dieses Unterdruckes strömt Wasser von außen so lange in das System nach, bis das thermodynamische Gleichgewicht wieder erfüllt ist. Untersuchungen von BIERMANS (1978) haben gezeigt, dass die Clausius-Clapeyron Gleichung am unteren Rand einer Eislinse bei eindimensionalem Frieren (vgl. Abb. 2-2) erfüllt ist.

MIKKOLA (2001) baut sein Modell auf den thermodynamischen Prinzipien auf. Er benötigt als Eingangsparameter die Funktionen des ungefrorenen Wassergehalts und der Durchlässigkeit eines Bodens in Abhängigkeit der Temperatur. Das Modell gilt für kleine Dehnungen und abschnittsweise linear elastische Materialien. Die großmaßstäblichen Versuche von SMITH & PATTERSON (1989) an einer Pipeline im Permafrost wurden rechnerisch nachvollzogen.

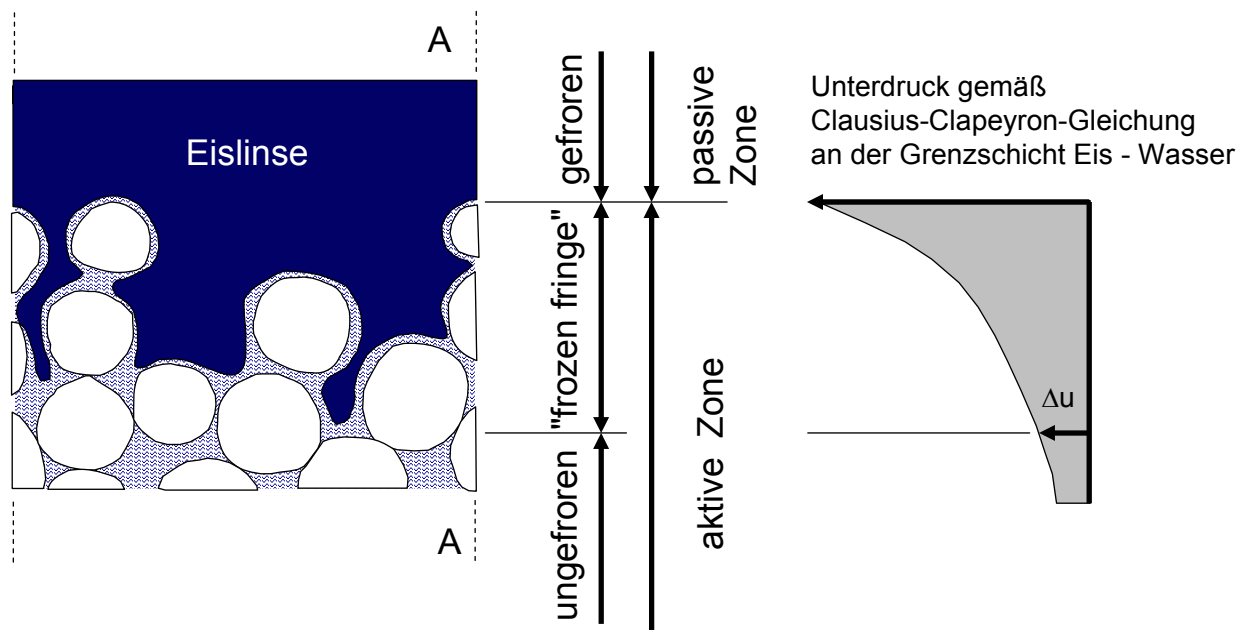
Auch das von SETZER (2001) entwickelte Modell für die Bildung von "Mikro-Eislinsen" basiert auf Betrachtungen des thermodynamischen Potenzials in den Porenräumen von porösen Materialien. Es erlaubt die Prognose des Sättigungsverhaltens der Porenräume bei Frost-Tauwechseln und wurde mit Frostversuchen an Betonproben validiert.

### 2.2.3 Ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen

Die Schwierigkeit in der Anwendung der grundlagenorientierten Modelle besteht in der Quantifizierung der Eingangswerte. Beispielsweise benötigt das auf thermodynamischen Beziehungen von MIKKOLA (2001) basierende Modell als Eingangsparameter die Funktionen des ungefrorenen Wassergehalts und der Durchlässigkeit eines Bodens in Abhängigkeit von der Temperatur. Während der ungefrorene Wassergehalt noch mit aufwändigen und hochpräzisen Messungen bestimmt werden kann, ist beim derzeitigen Stand von Wissenschaft und Forschung die direkte Bestimmung der Durchlässigkeit eines unterschiedlich stark gefrorenen Bodens noch nicht möglich. Weiterhin ist davon auszugehen, dass vor allem im Feld verschiedene Potenziale zur Eislinsenbildung beitragen, die mit rein thermodynamischen Modellen nicht erfasst werden können.

KONRAD UND MORGENSTERN (1980, 1981) schlagen daher vor, das Frosthebungsverhalten von Böden mit vergleichsweise einfachen Laboruntersuchungen nach dem 2-Kammer-Prinzip direkt zu untersuchen und die damit gewonnenen Ergebnisse als – phänomenologisch begründete – Eingangsparameter für weiterführende Berechnungen zu verwenden. Dieser ingenieurwissenschaftliche Ansatz wird von Konrad als "segregation-potential" Konzept bezeichnet und soll nachfolgend näher erläutert werden.

Das Modell nach Konrad geht von einem Bodenelement ohne Luftporen aus. Weiterhin wird vorausgesetzt, dass im Porenwasser keine Salze gelöst sind, d.h. es kein osmotisches Potenzial gibt. Das betrachtete Bodenelement besteht aus den drei Komponenten Eis, Wasser und fester Phase, wobei das Wasser als adhäsiv gebundener Wasserfilm die Bodenkörner umgibt. Die Eislinse wird als wasserundurchlässig angesehen. Als passive Zone wird der gefrorene Bodenkörper oberhalb der Unterkante der Eislinse bezeichnet. Betrachtet wird im Weiteren nur die teilweise gefrorene Bodenzone unter der sich bildenden Eislinse einschließlich des ungefrorenen Bodens, welche als aktive Zone bezeichnet wird (vgl. Abb. 2-5). Die Zwischenzone ist dadurch charakterisiert, dass an ihrem unteren Rand erste Wassermoleküle zu gefrieren beginnen und der Anteil an gefrorenem Wasser zur Eislinse hin zunimmt. Diese Zwischenzone wird auch als "frozen fringe" bezeichnet und ist in Abbildung 2-5 dargestellt.



Detailskizze

Bezeichnungen

Unterdruck im Schnitt A-A

Abb. 2-5: Detailskizze der Zwischenzone "frozen fringe"

In diesem offenen System herrscht an der Grenzschicht zwischen der Eislinse und dem ungefrorenen Wasser ein Unterdruck, infolge dessen Wasser zur Eislinse strömt und dort unter Erzeugung von Hebungen angelagert wird. Die Größe des Unterdrucks in der Grenzschicht kann durch die Clausius-Clapeyron-Gleichung beschrieben werden. Der Frosthebungsprozess ist dann ein Strömungsprozess von einem Wasserreservoir hin zur Eislinse, wobei die Strömungsmenge von der Gesamtdurchlässigkeit des aktiven Systems bestimmt wird. Die Gesamtdurchlässigkeit setzt sich aus der Durchlässigkeit des ungefrorenen Bodens und der Durchlässigkeit der Zwischenzone zusammen. Die Durchlässigkeit am unteren Rand der Zwischenzone ist gleich der – über die Höhe der ungefrorenen Bodenzone als konstant angenommenen – Durchlässigkeit des ungefrorenen Bodens. In der Zwischenzone nimmt die Durchlässigkeit mit abnehmendem ungefrorenen Wasseranteil ab, bis der Rand der praktisch wasserundurchlässigen Eislinse erreicht wird. Entsprechend der vorhandenen Durchlässigkeiten baut sich der an der Grenzfläche der Eislinse herrschende Unterdruck ab. Der am unteren Rand der Zwischenzone herrschende Unterdruck soll im Weiteren mit  $\Delta u$  bezeichnet werden.

Die Strömung durch das aktive System und die Frosthebungen halten so lange an, wie die infolge des Gefrierens freiwerdende Schmelzwärme größer ist als mechanische Energie, die nötig ist, um das Wasser zur Gefrierfront zu befördern. Konrad verdeutlicht dies mit einer Analogie, in der mit der beim Gefrieren des Wassers freiwerdenden thermischen Energie ein Motor betrieben wird, welcher seinerseits eine mechanische Pumpe antreibt. Für die späteren Betrachtungen ist die Feststellung wichtig, dass unter stationären Bedingungen gemäß der Kontinuitätsbedingung die gleiche Menge an Wasser pro Zeiteinheit aus dem ungefrorenen Boden von unten in die Zwischenzone einströmen muss, wie im oberen Bereich der Zwischenzone an die Eislinse unter Erzeugung von Hebungen angelagert wird.

KONRAD UND MORGENSTERN (1980, 1981) führen umfangreiche Laborversuche ohne Auflast durch und zeigen, dass die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme der Probe direkt proportional zum Tem-

peraturgradienten in der Zwischenzone ist. Die Proportionalitätskonstante wird als "segregation potential" SP definiert und charakterisiert das Frosthebungsverhalten eines Bodens ohne Auflast.

$$SP = v_w \cdot 1/\text{grad } T \quad (2.3)$$

mit:

SP:	Segregation Potential	$[m^2 / (s \cdot K)]$
$v_w$ :	Geschwindigkeit der Wasseraufnahme	$[m / s]$
grad T:	Temperaturgradient	$[K / m]$

Während der Versuche wurde die Wasseraufnahme bzw. -abgabe der untersuchten Probekörper aufgezeichnet. Im Vorgriff auf die in Kapitel 3 vorgestellte Konzeption der eigenen Laborversuche war die Beobachtung von Bedeutung, dass das Porenwasser kurz nach Beginn der Gefrierphase zunächst aus der Bodenprobe abströmte. Mit zunehmender Versuchsdauer wurde die Menge des abströmenden Wassers geringer, bis es schließlich zu einer Umkehr des Wassertransportes kam und die Probe bis zum Ende des Versuchs Wasser aufnahm.

In einer späteren Arbeit von KONRAD UND MORGENSTERN (1982) wurde die Theorie auch auf Frosthebungen unter Auflasten erweitert. Die durchgeführten Laborversuche zeigten wie bei PENNER UND WALTON (1979), dass die Frosthebungsgeschwindigkeiten exponentiell mit der Auflast abnehmen. Aus den an Schluffen durchgeführten Versuchen wurden maximale Frosthebungsdrücke von 1000 bis 1200 kN/m<sup>2</sup> infolge Eislinnenbildung abgeleitet. Sobald die Auflasten größer als die Hebungsdrücke sind, finden keine Hebungen mehr statt. Dieser Grenzdruck wird auch als "shutoff pressure" bezeichnet. JESSBERGER (1996) gibt ebenfalls Größenordnungen für Frostdrücke infolge Eislinnenbildung an. Danach sind beispielsweise in Grobsand keine Frosthebungsdrücke zu erwarten, bei bindigen Böden sind dagegen auch Drücke von über 200 kN/m<sup>2</sup> möglich. Die von PENNER UND WALTON (1979) angegebenen Größenordnungen werden nicht explizit bestätigt, aber auch nicht in Frage gestellt.

Das "segregation-potential" Konzept nach Konrad mit der gekoppelten thermisch – mechanischen Energieumwandlung wurde für eine langsame natürliche Frosteindringung entwickelt und berücksichtigt daher allein die Frosthebung infolge Eislinnenbildung. Basierend auf den Forschungsergebnissen wird eine Finite-Element-Formulierung für die Eislinnenbildung entwickelt und an verschiedenen Beispielen validiert. Eine zusammenfassende Darstellung ist in KONRAD (1994) enthalten.

### 2.3 Ausgewählte Projekte des Tunnelbaus

BRECKNER (1987) gibt eine Übersicht über Projekte, in denen die Bodenvereisung im Tunnelbau bzw. Grundbau eingesetzt wurde. Projekte, bei denen die aufgetretenen Frosthebungen infolge tief liegender Vereisungskörper detailliert dokumentiert wurden, sind der Bau des Milchbucktunnels 1978/79 in Zürich und die Erweiterung der Station Schottenring 2004/05 in Wien. Auf die bei diesen Projekten festgestellten Baugrundverformungen wird nachfolgend detailliert eingegangen.

#### 2.3.1 Milchbucktunnel in Zürich 1978/79

Die nachfolgend genannten Daten wurden den Veröffentlichungen von AERNI (1979), HUDER (1979) und METTIER (1979, 1983) entnommen. Die Baugrundbeschreibung wird aus AERNI (1979) zitiert.



Der Milchbucktunnel wurde 1978/79 in Zürich gebaut und unterfährt dicht bebautes Gebiet im Stadtzentrum. Der Ausbruchquerschnitt betrug ca. 145 m<sup>2</sup>, die Länge des unter Vereisung aufgefahrenen Portalabschnittes ca. 350 m. Im Portalabschnitt wurde eine Moräne durchörtert. Diese bestand aus "... nur leicht kohäsiven...", "... sandig-kiesig-siltige Lehmen ...", die oberflächennah leicht aufgelockert waren und in der Tiefenlage des Ausbruchquerschnittes in "kompakter bis sehr kompakter Lagerung" anstanden. Der natürliche Wassergehalt lag zwischen 7 % und 15 %, der Sättigungsgrad betrug 90 % bis 95 %. Die Durchlässigkeit lag zwischen 10<sup>-7</sup> und 10<sup>-9</sup> m/s. In der Moräne sind "...sandig-siltig-kiesige Einlagerungen" mit Durchlässigkeiten zwischen 10<sup>-6</sup> und 10<sup>-7</sup> m/s vorhanden. Diese Einlagerungen führen artesisch gespanntes Grundwasser mit Drücken bis zu 3 bar. Abb. 2-6 zeigt einen überhöhten Längsschnitt durch den Tunnel.

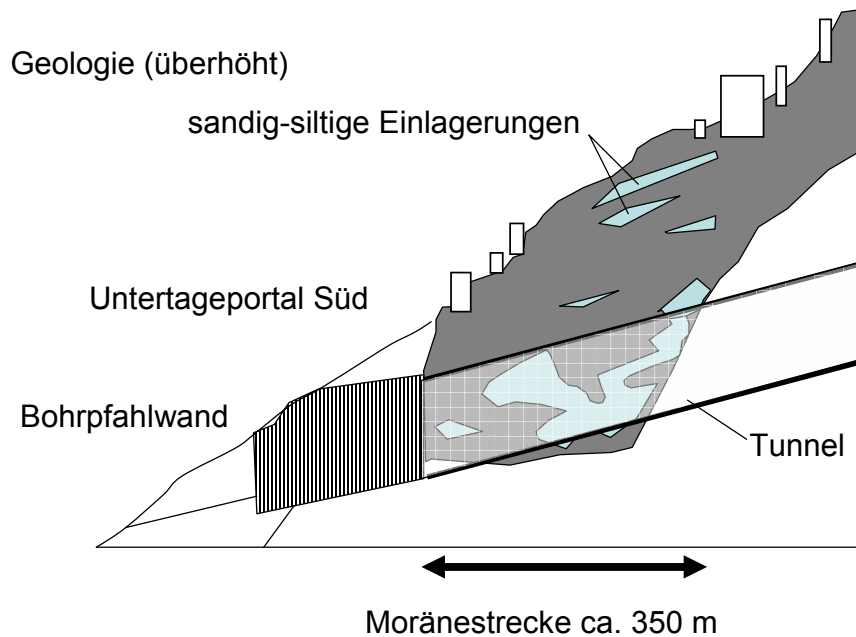


Abb. 2-6: Längsschnitt durch den Milchbucktunnel nach AERNI (1979)

Der im Schutz der Vereisung aufgefahrene ca. 350 m lange Portalbereich wurde in 11 Gefrierabschnitte unterteilt. Während der Arbeiten im ersten Gefrierabschnitt kam es im Verlauf der Vorhaltdauer des Eiskörpers zu ca. 100 mm Hebung an der Geländeoberfläche. Die Überlagerung betrug an dieser Stelle ca. 6 bis 8 m.

Die Steuerung der Vereisungsanlage wurde daraufhin auf einen intermittierenden Betrieb umgestellt. In der Aufgefrierphase (ca. 7 bis 10 Tage) wurde dem Boden kontinuierlich Wärme entzogen. Während der Haltephase wurde mit so genannten Kälteimpulsen von 24 Stunden Dauer gearbeitet, wobei aus den Quellen nicht klar hervorgeht, ob die 24 Stunden einen Gefrier – Tauzyklus oder nur einen Gefrierzyklus umfassen. Die Frosthebungen in den Folgeabschnitten waren im Vergleich zu Abschnitt I deutlich geringer. Die einzelnen Verformungsanteile können im Detail Tabelle 2-1 auf der folgenden Seite entnommen werden.

Tabellarische Übersicht über die Gefrierabschnitte

Nr.	Frost-dauer	Länge	Über-lagerung	Frostkörper-dicke	Steuerung der Gefrier-anlage	Hebung Gefrieren	Setzung infolge Vortrieb	Setzung infolge Auftauen	Dauer der Setzungs-bewegungen	Gradiente Setzungs-Mulde	Setzung Total *)
[-]	[d]	[m]	[m]	[m]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[d]	[-]	[mm]
1	100	26	6 bis 8	3,5 bis 4,0	kontinuierl.	80 bis 105	10	-125	80	1/300	40 bis 45
2	61	37	9	3,0 bis 3,6	intermittierend	20 bis 40	10 bis 15	70 bis 80	120 bis 150	1/200 bis 1/300	50 bis 60
3	41	30	6 bis 7 und 6-stöckiges Geb.	2,3 bis 2,7	intermittierend	10 bis 12	10 bis 15	20	60 bis 80	1/500 bis 1/1000	20 bis 25
4	39	30	8 bis 15 und 5-stöckiges Geb.	2,3 bis 2,7	intermittierend	4 bis 5	6 bis 8	-	50 bis 60	1/500 bis 1/700	15 bis 30
5	34	-	16 bis 17	2,0 bis 2,1	intermittierend	4 bis 5	6 bis 8	-	60 bis 90	1/400 bis 1/500	30 bis 50
6	33	-	18 bis 19	1,8 bis 2,1	intermittierend	4 bis 5	6 bis 8	-	60 bis 80	1/400 bis 1/600	40 bis 50
7	28	-	21 bis 22 und Geb.	1,9 bis 2,0	intermittierend	4 bis 5	8 bis 10	-	90 bis 120	1/400	50 bis 70
8	27	-	19 bis 23 und Geb.	2,0	intermittierend	3 bis 4	10 bis 12	-	140 bis 160	1/400	65 bis 70
9	34	-	19 bis 24 und Geb.	2,3	intermittierend	2 bis 3	10	-	150 bis 180	1/350 bis 1/450	60 bis 65
10	34	-	23 bis 25	2,5	intermittierend	1 bis 2	10	-	120 bis 150	1/400 bis 1/600	40 bis 60
11	42	-	23 bis 24	2,5 bis 2,8	intermittierend	1 bis 2	4 bis 6	-	100 bis 120	1/900 bis 1/1000	30 bis 40

Tabelle 2-1: Übersicht über die Baugrundverformungen in den einzelnen Gefrierabschnitten

\*) Anteil der Grundwasserabsenkung an der Gesamtsetzung über der Tunnelachse ca. 30 bis 60 mm

### 2.3.2 Unterquerung Donaukanal in Wien 2004/05

Die nachfolgend genannten Daten wurden den Veröffentlichungen von MARTAK (2004, 2005) entnommen.

Im Zuge der Erweiterung der U-Bahn-Linie U2 in Wien musste der Donau-Kanal auf Höhe der Kaiserbadschleuse unterquert werden. Aufgrund der geringen Überdeckung von ca. 2 m zu den Fundamentunterkanten der Wasserbauwerke kam ein kombiniertes Gefrierverfahren mit Stickstoff- und Solevereisung zum Einsatz.

Unmittelbar unter der Flusssohle standen sandige Kiese unterschiedlicher Lagerungsdichte in einer Mächtigkeit von ca. 0,5 m bis 1,5 m an. Darunter folgten tertiäre tonige Schluffe. In diese waren vereinzelt Feinsandschichten mit Mächtigkeiten zwischen wenigen Zentimetern und ca. einem Meter eingelagert.

Zunächst wurde mit dem Stickstoffverfahren jeweils ein Deckel über den beiden Tunnelröhren aufgefroren. Anschließend wurden die jeweils ca. 76 m<sup>2</sup> großen Ausbruchquerschnitte ringförmig mit dem Soleverfahren vereist. Der Vereisungsring besaß eine Wandstärke von ca. 2 m. Die geometrische Anordnung der Querschnitte und der Vereisungskörper kann der folgenden Abbildung entnommen werden.

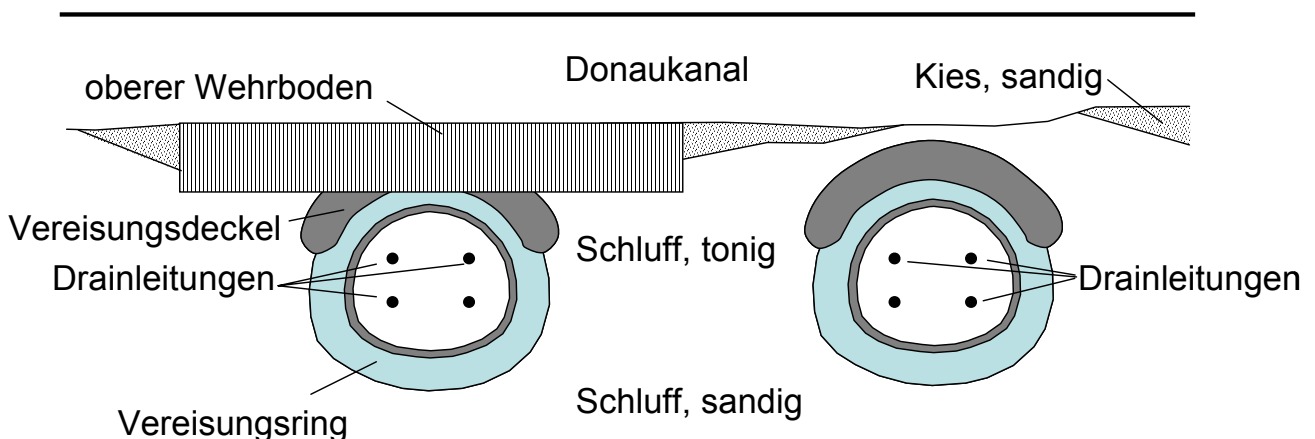


Abb. 2-7: Querschnitt durch die Tunnel der U-Bahn-Linie U2 nach Martak (2004)

Im Zentrum der Tunnelquerschnitte wurden Drainleitungen eingebaut, die parallel zu den Tunnelachsen verliefen. Diese hatten den Zweck, die Frostdrücke im Inneren der Vereisungsringe durch Ableiten des sich beim Gefrieren ausdehnenden Wassers zu minimieren. Von Bedeutung für das später in der vorliegenden Arbeit entwickelte Modell ist die Tatsache, dass nach dem Beginn der Vereisung auch tatsächlich Wasser aus dem umgebenden Boden über die Drainleitungen zu den Startschächten strömte.

Die Stickstoffvereisung wurde vom 10.01.05 bis zum 01.02.05 betrieben. In diesem Zeitraum wurden Hebungen von bis zu ca. 20 mm auf der Geländeoberfläche bzw. der Schleuseninsel festgestellt. Die Hebungen nahmen während der anschließenden Solevereisung auf Maximalwerte von ca. 65 mm zu, die im Mai 2005 erreicht wurden.

## 2.4 Einordnung und Bewertung der Literaturquellen

### 2.4.1 Hauptursachen von Frosthebungen bei tief liegenden Vereisungskörpern

Frosthebungen können im Wesentlichen auf zwei Ursachen zurückgeführt werden. Zunächst kommt es durch die 9%ige Volumenzunahme bei der Entstehung von Eis aus Wasser zu homogenen Frosthebungen. Weiterhin bilden sich insbesondere bei feinkörnigen Böden an der Grenze vom gefrorenen zum ungefrorenen Boden aus reinen Eiskristallen wachsende Körper, die so genannten Eislinsen. Die Frosthebungen besitzen demnach in der Regel einen "volumetrischen" Anteil aus der Volumenzunahme des gefrorenen Wassers. Zusätzlich lässt sich an der Grenzfläche zwischen vereistem und nicht vereistem Boden, deren Lage sich während des Gefrierens ändert, ein "flächig" wirkendes Eislinsenwachstum beobachten, sobald ein annähernd stationärer Temperaturzustand erreicht ist. Die Eislinsenbildung bewirkt ein Aufreißen des Bodens und somit eine Trennung des Korngefüges. Mechanische Modelle müssen für eine realitätsnahe Simulation diese Vorgänge beschreiben können, ansonsten sind sie insbesondere zur Beschreibung der großen Verformungen, die bei lang andauernder Eislinsenbildung in Böden eintreten, nicht geeignet.

### 2.4.2 Mechanismus der Eislinsenbildung

Der Mechanismus der Eislinsenbildung unter geringen Auflasten ist eingehend untersucht worden. Die Untersuchungen haben vor allem gezeigt, dass feinkörnige Böden höhere Hebungsgeschwindigkeiten entwickeln als grobkörnige Böden und weiterhin, dass die Hebungsgeschwindigkeiten mit steigendem Temperaturgradienten im Boden zunehmen.

Wesentliche Erkenntnisse aus den Untersuchungen der Eislinsenbildung bei höheren Auflasten sind, dass die Frosthebungsgeschwindigkeiten exponentiell mit der Auflast abnehmen. Die Drücke, die zur Verhinderung von Frosthebungen infolge Eislinsenbildung erforderlich sind, können in bindigen Böden Werte von über 1000 kN/m<sup>2</sup> erreichen. Um Frosthebungen zu vermeiden, müsste ein gleich hoher Überlagerungsdruck mobilisiert werden. Hierzu wären 50 m Überlagerungshöhe (bei Annahme einer Bodenwichte von 20 kN/m<sup>3</sup>), bzw. bei einer Wichte von 10 kN/m<sup>3</sup> 100 m Überlagerungshöhe erforderlich. Daher sind auch noch in Tieflagen von mehreren Dekametern Frosthebungen infolge Eislinsenbildung zu erwarten.

Grundsätzlich lassen sich die einzelnen Ursachen des Wassertransportes mit physikalischen Modellen, die meist in der Grundlagenforschung entwickelt wurden, erklären. Ein theoretisches Modell, mit welchem das Zusammenwirken aller bekannten Phänomene des Wassertransportes beschrieben werden kann und das ausreichend validiert wurde, ist derzeit jedoch noch nicht verfügbar. Frosthebungsprognosen auf der Grundlage thermodynamischer Modelle erfordern Eingangsparameter, welche mit aufwändigen Laborversuche bestimmt werden müssten, bzw. die mit den derzeit für Böden zur Verfügung stehenden Versuchsgeräten noch nicht ausreichend sicher ermittelt werden können.

Werden jedoch, wie von KONRAD (1981) in seinem "segregation potential" Konzept vorgeschlagen, zumindest wenige Frosthebungsversuche im Labor durchgeführt und die damit ermittelten Werte einer Hebungsprognose für das Frosthebungsverhalten im Feld zu Grunde gelegt, lassen sich auf diese Weise der zeitliche Hebungsverlauf und die Hebungsbeträge darstellen. Dieses Vorgehen wurde bei Projekten mit natürlicher Frosteindringung bereits mehrfach erfolgreich angewandt. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass zur Prognose der Frosthebung infolge Eislinsenbildung stets projektspezifische Frosthebungsversuche erforderlich sind. Dem von KONRAD vorgeschlagenem Modell wird auch in der vorliegenden Arbeit gefolgt. Einschränkend ist anzuführen, dass das zu Beginn der Versuche beo-

bachtete Phänomen des Wegströmens von Porenwasser von der Gefrierfront mit dem "segregation potential" Konzept nicht erklärt werden kann. In Abschnitt 5.2 wird deshalb eine entsprechende Erweiterung vorgeschlagen.

### **2.4.3 Mechanismus der volumetrischen Frosthebung**

Veröffentlichungen, in denen Frosthebungen infolge der Volumenzunahme des Wassers beim Gefrieren von Böden in offenen Systemen untersucht wurden, sind nicht bekannt. Für eine aussagekräftige Hebungsprognose ist jedoch die Abschätzung der Größenordnung der daraus zu erwartenden Hebungen erforderlich.

Dabei geht man davon aus, dass ungefrorener Boden ein Dreikomponentengemisch aus Porenwasser, Luft und Feststoff ist, und das Porenwasser beim Gefrieren eine Volumenvergrößerung um ca. 9 % erfährt. Die damit unter ungünstigen Randbedingungen verbundenen maximal möglichen Hebungsbeträge lassen sich rechnerisch für ein zunächst ungefrorenes Bodenelement der Kantenlänge 1 ermitteln. Einzelheiten dazu enthält das Kapitel 5.1.

Wenn in Laborversuchen oder bei Baumaßnahmen drainierte Randbedingungen vorliegen, dann kann das im Bereich eines Frostkörpers im Boden vorhandene Porenwasser während des Auffrierens teilweise in die den Frostkörper umgebenden ungefrorenen Bodenzonen abströmen. Insbesondere bei nichtbindigen Böden, mit ihrer im Vergleich zu den bindigen Böden höheren Durchlässigkeit, ist damit zu rechnen, dass das Porenwasser während des Gefrierens teilweise oder ganz abströmt und die Frosthebungen damit verringert werden oder so klein werden, dass sie sich messtechnisch nicht erfassen lassen. Bei Böden mit hohen Durchlässigkeiten kann daher davon ausgegangen werden, dass die rechnerische Obergrenze für die volumetrische Hebung nicht erreicht wird. Diese Annahme wird durch die oben erwähnte, beim Bau der Erweiterung der Station Schottenring in Wien gemachte Beobachtung des ausströmenden Porenwassers aus den Drainleitungen gestützt.

In den in Abschnitt 3.4.3 beschriebenen Laborversuchen wird deshalb auch der Einfluss von drainierten Randbedingungen und verschiedenen hohen Auflasten auf den Betrag der volumetrischen Hebung untersucht.

### 3 Laborversuche

#### 3.1 Ziele und Arbeitsprogramm der Laborversuche

Um die Frosthebungen infolge Eislinsenbildung und volumetrischer Hebung bei verschiedenen Auflasten zu untersuchen, wurden die im Folgenden erläuterten, aufgabenspezifischen Laborversuche konzipiert und durchgeführt. Ziel war es, die Hebungen infolge der zwei genannten Mechanismen in Laborversuchen unter kontrollierten Randbedingungen zu quantifizieren. Die Versuchsergebnisse sollten anschließend als Eingangsgrößen in weiterführende Berechnungen und schließlich zur Prognose von Hebungen infolge tief liegender Vereisungskörper, wie sie beispielsweise bei den im Kapitel 2.3 vorgestellten Tunnelbaumaßnahmen eingesetzt wurden, dienen.

Hierzu wurden Versuche nach der Zwei-Kammer-Technik durchgeführt. Mit dieser Versuchstechnik ließen sich die bei tief liegenden Vereisungskörpern herrschenden maßgebenden Randbedingungen simulieren. Hierzu zählen insbesondere drainierte Verhältnisse und die Aufbringung der in-situ vorhandenen Auflasten.

Die Versuche wurden sowohl mit geringen Auflasten von  $6 \text{ kN/m}^2$  als auch mit Auflasten von bis zu  $400 \text{ kN/m}^2$  durchgeführt, wobei unterschiedliche Zielstellungen verfolgt wurden. Die Versuche unter geringer Auflast dienten zur qualitativen Erfassung der beiden Effekte "homogene Volumenzunahme" und "Eislinsenbildung". Die in diesen Versuchen erzeugten, vergleichsweise großen Hebungen erlaubten insbesondere auch die visuelle Beurteilung der Eislinsenbildung. Die Versuche mit höheren Auflasten, die typisch für tief liegende Vereisungskörper beim Tunnelbau waren, dienten zur Ermittlung der an der Kontaktfläche derartiger Vereisungskörper zum ungefrorenen Boden zu erwartenden Baugrundverformungen.

Es wurde angestrebt, die Hebungsanteile aus **Eislinsenbildung** und **Volumenzunahme** getrennt zu erfassen. Vorrangiges Ziel bei den Versuchen zur Eislinsenbildung war die Einstellung und das Konstanthalten eines stationären Temperaturzustandes. Sobald dieser Zustand erreicht war, wurde aus der an der Oberseite der Proben gemessenen zeitlichen Entwicklung der Hebungen die Hebungsgeschwindigkeit ermittelt. In den Versuchen zur volumetrischen Hebung sollte geklärt werden, wie sich eine Auflast auf die Hebungsbeträge auswirken würde und ob die rechnerisch maximal möglichen Frosthebungen erreicht würden. Bei diesen Versuchen wurde durch ein möglichst rasches Eindringen des Frostes in die Probe die Vermeidung einer Eislinsenbildung angestrebt. Hierdurch sollte sichergestellt werden, dass im Gegensatz zur Eislinsenbildung ein Teil des Porenwassers von der Frostgrenze wegströmte, und die gemessenen Hebungen allein auf die Volumenzunahme des in der Probe verbleibenden Porenwassers zurückgeführt werden konnten. Bei dieser Versuchsart waren aber Mischzustände aus abnehmender Volumenzunahme und beginnender Eislinsenbildung zunächst nicht auszuschließen. Aus diesem Grund wurde nach Versuchsende die Verteilung des Wassergehaltes über die Probenhöhe schichtweise bestimmt. Wenn im gefrorenen Bodenkörper die Wassergehalte gegenüber dem Versuchsbeginn nicht zugenommen hatten, konnte eine Eislinsenbildung ausgeschlossen und die Hebungen der Volumenzunahme des Wassers beim Gefrieren zugeordnet werden. Aufgrund des während dieser Versuche instationären Wärmestromes (die freiwerdende und abzuführende Schmelzwärme ist abhängig von der Zeit) sind die Versuchsergebnisse im Vergleich zu den

weiter oben beschriebenen Versuchen zur Erfassung der Eislinsenbildung unter stationären Temperaturrandbedingungen mit größeren Unsicherheiten behaftet.

Mit den durchgeführten Versuchen konnte zunächst ein prinzipielles Verständnis für die verschiedenen Mechanismen entwickelt werden. Darüber hinaus dienten die im Labor für die Frosthebungen ermittelten Werte später als Eingangsgrößen zur überschlägigen Ermittlung der am Rand eines tief liegenden Vereisungskörpers zu erwartenden Verformungen.

### 3.2 Untersuchte Böden

Anlass zur vorliegenden Arbeit war die Erfordernis von Frost-Hebungs-Prognosen beim Bauvorhaben "Bahnsteigerweiterung der U-Bahnlinie U6" unter dem Marienplatz in München, bei dem zwei Erweiterungstunnel der U-Bahn im Schutz zweier Vereisungsschirme aufgefahren werden sollten. In den Frosthebungsversuchen wurden daher zunächst die bei der genannten Baumaßnahme vor Ort anstehenden tertiären Tone und Sande untersucht. Die Ergebnisse dieser projektspezifischen Versuche wurden anschließend für die Hebungsprognose verwendet.

Die tertiären Tone wurde hierbei als gestörtes Aushubmaterial entnommen, gegen Austrocknen geschützt und gelagert. Der tertiäre Sand wurde ebenfalls als gestörtes Material entnommen und in luftdicht verschlossenen Eimern gelagert. Weiterhin wurde während des Vortriebes Material in Form von Tonbrocken und Feinsand entnommen und dem Zentrum Geotechnik der TU München für Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Ergänzend zu den Untersuchungen an künstlich hergestellten Bodenproben wurden auch Versuche an ungestörten Bodenproben durchgeführt. Hierfür wurden Bohrkern von in unmittelbarer Nähe des U-Bahnhofs Marienplatz durchgeführten Aufschlussbohrungen verwendet (Bohrungen NS 107, NS 114 und NS 115 [U1]).

Da für die im Folgenden beschriebenen Laborversuche keine Erfahrungen hinsichtlich der zu erwartenden Streubreiten der Ergebnisse vorlagen, wurden zusätzliche Untersuchungen an einem maschinell aufbereiteten Kaolin (Aluminiumsilikathydrat  $Al_4((OH)_8 Si_4(O_{10}))$ ) durchgeführt. Der Boden wurde von den Amberger Kaolinwerken Eduard Kick GmbH & Co. KG aus dem Werk Schnaittenbach als Sackware in gemahlenem Zustand mit einem Wassergehalt von 1,5 % angeliefert. Es konnte festgestellt werden, dass die mit diesem sehr homogenen Material festgestellten Streubreiten der Versuchsergebnisse ausschließlich der Versuchsdurchführung zuzuordnen sind. Ein Vergleich mit den Streubreiten aus der Untersuchung der natürlichen tertiären Tone und Schluffe erlaubte folglich die Abschätzung des Einflusses der im Feld vorhandenen Bandbreiten der Bodenparameter (Anlage 2). Weiterhin wurden Versuche an einem gewaschenen Kies durchgeführt, die als "Nullversuche" bezeichnet werden.

Tabelle 3-1 beinhaltet wesentliche bodenmechanische Parameter und Klassifizierungsmerkmale der untersuchten Materialien. Die Ergebnisse der klassifizierenden Untersuchungen nach DIN 4022 und DIN 18196 sind in der Tabelle und in Anlage 1 angegeben.

Der Großteil der Frosthebungsversuche wurde an künstlich hergestellten Proben durchgeführt, für die ein Anfangswassergehalt von  $w = 20\%$  eingestellt wurde. Dieser Wassergehalt entsprach in etwa dem natürlichen Wassergehalt der untersuchten tertiären Tone. Die mittleren Dichten und die mittleren Durchlässigkeiten der gleichartig hergestellten, künstlichen Probekörper sind in den letzten beiden Spalten der Tabelle 3-1 angegeben. Die Durchlässigkeit der tertiären Sande wurde mit veränderlichem Druckgefälle in der Triaxialzelle nach DIN 18130 – TX – DE – ST – U0 – 2, die Durchlässigkeit der tertiären Tone mit konstanter Druckhöhe nach DIN 18130 – TX – DE – KP – U0 – 1 bestimmt.

Bezeichnung	Herkunft	DIN 4022	DIN 18196	w [%]	w <sub>p</sub> [%]	w <sub>l</sub> [%]	Dichte Probekörper [g/cm <sup>3</sup> ]	Durchlässigkeit DIN 18130 [m/s]
tertiärer Ton T1	Startschacht Weinstrasse	T, f-m s'	TM	20	14	42	2,09	*
tertiärer Ton T2	Vortrieb Weinstrasse	T, f s*	TM	20	18	47	2,09	1,5·10 <sup>-9</sup>
tertiärer Sand S	Startschacht und Vortrieb	f-m S, u	SE	20	-	-	1,97	1,0·10 <sup>-6</sup>
Kaolin K	Amberger Kaolinwerke	T, u	TA	20	28	55	1,71	3,8·10 <sup>-8</sup>
Kies G	Zentrum Geotechnik	m G	GE	-	-	-	-	7,2·10 <sup>-1**</sup>

Tabelle 3-1: Untersuchte Böden: Parameter der künstlich hergestellten Probekörper

- \*) Durchlässigkeit wurde nicht bestimmt  
 \*\*) die Durchlässigkeit des Kieses wurde nach HAZEN mit  $k = d_{10}^2$  [m/s] abgeschätzt, wobei  $d_{10}$  in [cm] einzusetzen ist

### 3.3 Versuchsdurchführung

#### 3.3.1 Probenherstellung und -lagerung,

##### Künstlich hergestellte Bodenproben

Zur Minimierung der Wandreibung während der Frosthebung wurden Proben in leicht konische "Zylinder" mit einer Höhe von 125 mm, einem Durchmesser der Oberseite von 150 mm und der Unterseite von 145 mm eingebaut (Abb. 3-1). Diese Probenbehälter wurden auch von HEITZER (1981) verwendet.

Der Wassergehalt der künstlich hergestellten Proben wurde bei den tertiären Tonen und Sanden sowie beim Kaolin einheitlich auf 20 % eingestellt. Die als einzelne Brocken gewonnenen tertiären Tone wurden hierfür vorab mechanisch zerkleinert.

Die Herstellung der Proben erfolgte in einem konischen Metallzylinder, in den das Probenmaterial in Anlehnung an den modifizierten Proctorversuch in 5 Lagen à 55 Schlägen eingebaut und verdichtet wurde. Die Proben wiesen eine nur in engen Grenzen schwankende Dichte auf (Anlage 2). Bei den tertiären Sanden wurden Feuchtdichten von im Mittel 1,97 t/m<sup>3</sup> und bei den tertiären Tonen von im Mittel 2,09 t/m<sup>3</sup> erreicht. Diese entsprechen näherungsweise den ungestörten Dichten [U1], für die Werte von ca. 2,02 bis 2,06 t/m<sup>3</sup> für den tertiären Sand S und von 1,97 t/m<sup>3</sup> für die tertiären Tone T1 und T2 ermittelt wurden.

Die Prüfkörper wurden anschließend mit einer Presse aus dem Metallzylinder ausgedrückt und in einen Kunststoffzylinder mit gleichen

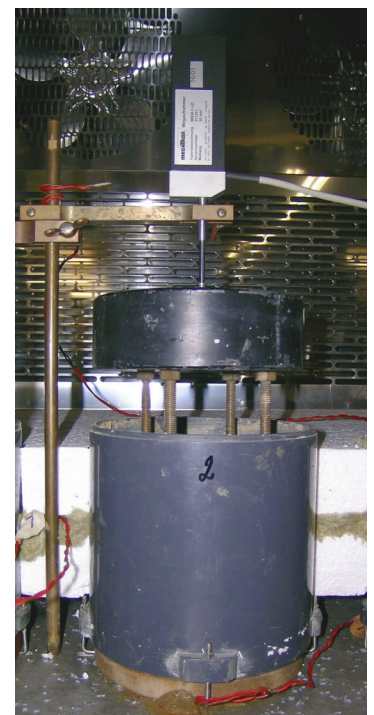


Abb. 3-1: Probe im eingebauten Zustand ohne vordere Wärmedämmung



Abmessungen umgesetzt. Die Ober- und Unterseite wurden mit Filterpapier abgedeckt. Die Unterseite der Probe wurde auf einen Filterstein aufgesetzt. Für eine Versuchsserie wurden in der Regel 5 Proben hergestellt.

Die Proben wurden in eine Belastungseinrichtung eingebaut und bei Raumtemperatur unter Wasserzugabe am Probenfuß und Auflasten entsprechend der späteren Versuchsdurchführung solange gelagert, bis die Quellhebungen bzw. Konsolidationsvorgänge abgeklungen waren. Dies war in der Regel nach ca. 4 bis 6 Tagen der Fall. Anschließend wurden 4 Proben in den Klimaschrank mit 2-Kammer-Technik eingebaut. An der verbleibenden Probe wurde die Verteilung der Wassergehalte über die Probenhöhe ermittelt, um die während der Lagerung eingetretenen Wassergehaltsänderungen quantifizieren zu können.

### **Bodenproben aus Bohrkernen und Einschlagbüchsen**

Die Stirnseiten der Bohrkern wurden planparallel abgeglichen. Anschließend wurde ein vorgefetteter Kunststoffzylinder mit einer lichten Weite von 90 mm mittels der in Abb. 3-2 dargestellten aufgesetzten passgenauen Metallschneide über die Bohrkern gepresst. Abschließend wurde der eingepresste Bohrkern auf die vorgesehene Höhe von 125 mm abgeglichen.



Abb. 3-2: Versuchsbehälter für Versuche an ungestörten Proben

### 3.3.2 Lastaufbringung

Die Proben wurden einaxial vertikal belastet, wobei zwei Arten der Lastaufbringung verwendet wurden:

Bei Versuchen mit geringer Auflast wurde die Oberseite der Probe über die in Abb. 3-1 erkennbare Aufständerung mit einem Metallgewicht belastet, welches bei einem Probendurchmesser von 150 mm einer Auflast von  $6 \text{ kN/m}^2$  entspricht.

Die Simulation von höheren Auflasten auf den Probekörper erfolgte mit Hilfe der in Abb. 3-3 dargestellten Belastungseinheit. Diese setzt sich aus folgenden Bauteilen zusammen:

- Quadratische Bodenplatte mit umlaufendem Stahlkragen zur Erhöhung der Biegesteifigkeit der Konstruktion. Der Stahlkragen besitzt Bohrungen, durch welche eine Verbindung der Probenunterseite mit dem umgebenden Wasserbad sichergestellt wird.
- Höhenverstellbares Joch, welches über zwei Gewindestangen an die Bodenplatte angeschlossen ist
- Zwei Halterungen für Wegaufnehmer in der bezüglich Biegung neutralen Achse der Belastungseinheit
- Druckstempel mit zentrisch aufgesetztem Rohrstück, in welchem die Druckluftleitung für den Balgzylinder geführt wird. Die obere Platte des Stempels dient als Auflager für den Balgzylinder und als Ansatzpunkt der Wegaufnehmer.
- Pneumatischer Balgzylinder, der mit einem Kompressor über ein Steuerpult kontrolliert mit Druckluft beaufschlagt werden kann. Durch Regulierung des Innendruckes konnten je nach Probendurchmesser Auflasten von bis zu ca.  $500 \text{ kN/m}^2$  erzeugt werden. Die zur Steuerung der Balgzylinder eingesetzten Ventile gewährleisteten dabei einen über die Versuchsdauer konstanten Innendruck. Die auf die Probe einwirkenden Kräfte ändern sich bei konstantem Innendruck im Balg geringfügig in Abhängigkeit von der Hebung oder der Setzung der Probe. Aufgrund der Membrantragwirkung des Balges führen zunehmende Hebungen bei gleich bleibendem Innendruck zu einer geringfügigen Zunahme der auf die Probe wirkenden Kräfte. Der Balgzylinder besitzt infolge dessen eine nichtlineare Federkennlinie. Dieser Zusammenhang wird in der folgenden Grafik näher erläutert.

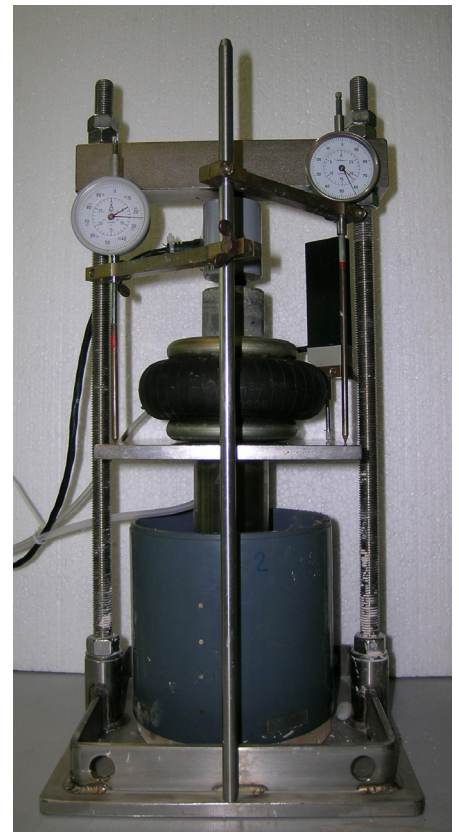


Abb. 3-3: Belastungseinrichtung mit pneumatischem Balgzylinder

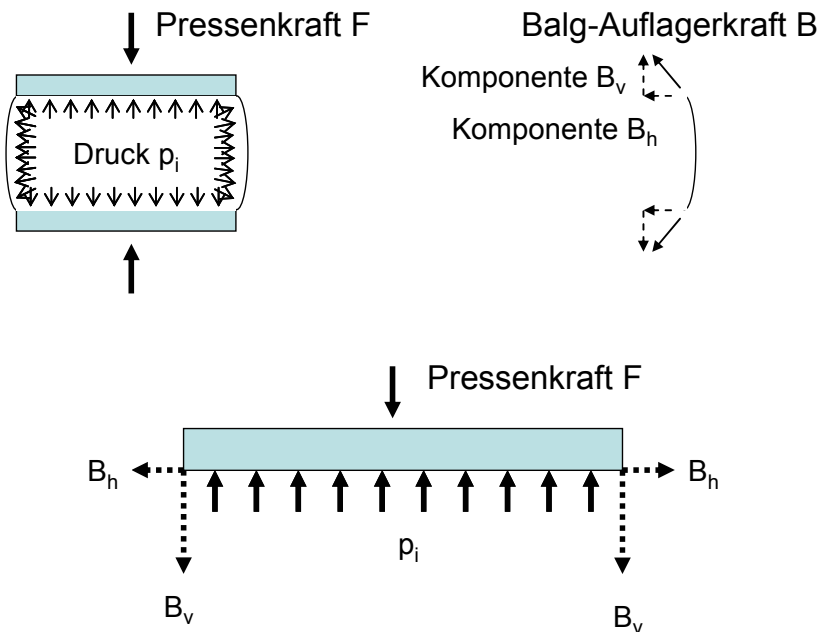


Abb. 3-4: Kräfte am Balgzylinder

Der Druck  $p_i$  wirkt sowohl auf die Pressenplatten als auch auf den Balg. Der Balg soll nun wie oben rechts dargestellt gedanklich freigeschnitten werden. Da der Balg hinsichtlich seiner Tragweise eine Membran darstellt, können an der Kontaktlinie zwischen Balg und Platte nur Kräfte übertragen werden, die tangential zur jeweiligen Balgposition gerichtet sind. Diese umlaufende Balg-Auflagerkraft  $B$  kann in ihre Horizontal- und Vertikalkomponente zerlegt werden. Um die anliegende Pressenkraft  $F$  zu ermitteln, muss das Gleichgewicht der Vertikalkräfte aufgestellt werden. Aus der unteren Skizze in Abb. 3-4 geht hervor, dass die Pressenkraft  $F$  nicht nur vom Innendruck  $p_i$  abhängt, sondern eben auch von der vertikalen Balgauflagerkraft  $B_v$ . Da diese wiederum von der jeweiligen Höhe des Balgs abhängt, besitzt der Balgzylinder eine nichtlineare Federkennlinie. Nur bei einem im Schnitt exakt halbkreisförmig verformten Balg würde die vertikale Balgauflagerkraft  $B_v$  zu Null. Daher wurden die aufgebrachten Kräfte während der Versuche mit einer eingebauten Kraftmessdose gemessen und in Abhängigkeit der sich einstellenden Verformungen ggf. geringfügig nachjustiert.

### 3.3.3 Klimaschrank mit der 2-Kammer-Technik

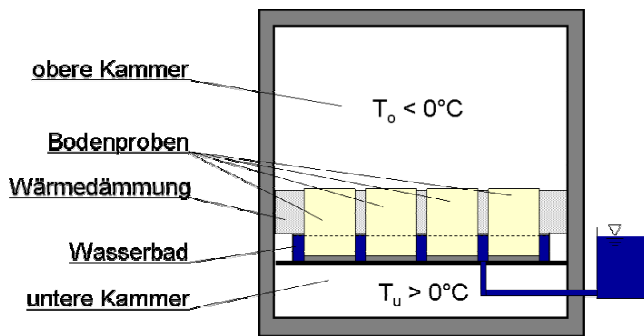


Abb. 3-5: Prinzipskizze des Klimaschranks



Abb. 3-6: Blick in den Klimaschrank

In Abb. 3-5 ist der grundlegende Versuchsaufbau des Klimaschranks mit der 2-Kammer-Technik skizziert, Abb. 3-6 stellt einen Blick in den Klimaschrank mit vier eingebauten Bodenproben dar. Die Bodenproben wurden in ein Wasserbad gestellt, so dass sie während der Versuchsdauer über einen Filterstein Wasser aufnehmen oder abgeben konnten. Das Wasserbad war mit einem Vorratsbehälter an der Außenseite des Klimaschranks verbunden. Seitlich wurden die Bodenproben mit einer Wärmemedämmung versehen, so dass zwei thermisch getrennte Kammern entstanden. In der Regel wurde die obere Kammer auf die gewünschte Gefrieretemperatur  $T_o < 0^\circ\text{C}$  eingestellt und die Temperatur des Wasserbades wurde konstant auf  $T_u > 0^\circ\text{C}$  gehalten. Sie wurde entsprechend der Temperatur des Grundwassers eingestellt. Wärme konnte somit nur in eine Richtung nach oben abströmen. Die Zuluft der oberen Kammer konnte zwischen  $-40^\circ\text{C}$  und  $+180^\circ\text{C}$  temperiert werden und wurde über zwei Ventilatoren durch die Rückwand des Prüfraumes eingeblasen.

Ein zweites Kühlaggregat, das für die Temperierung des Wasserbades verwendet wurde, arbeitete im Temperaturbereich von  $-30^\circ\text{C}$  bis  $+30^\circ\text{C}$ . Die konditionierte Zuluft der unteren Kammer wurde durch zwei Öffnungen im Boden des Prüfraums eingeblasen und umspülte die Unterseite der eingebauten Wasserwanne. Ein beweglich angeordneter Wärmefühler im Inneren der Wanne ermöglichte die Steuerung der Wassertemperatur durch entsprechende Regelung der Zuluft des zweiten Kühlaggregates auf der Wannenseite.

Der Frosthebungsverlauf wurde kontinuierlich mit Wegaufnehmern auf der Probenoberseite gemessen und aufgezeichnet. Bei der Verwendung der Balgzylinder zur Lastaufbringung ließen sich die Hebungen nicht zentrisch über der Probe messen und mussten auf der Stempeloberseite seitlich der Balgzylinder abgegriffen werden. Um ein eventuelles Verkippen der Probe messtechnisch kompensieren zu können, wurden die Hebungen mit drei Wegaufnehmern (zwei mechanischen Messuhren und einem elektronischer Wegaufnehmer) auf dem Druckstempel der Belastungseinrichtung gemessen.

Die für die Versuchsdurchführung erforderlichen Luftdruckleitungen und Kabel wurden durch zwei Kabelöffnungen in der Seitenwand des Klimaschranks geführt und an die pneumatische Steuereinheit bzw. die Messrechner angeschlossen.

### 3.4 Versuchsprogramm mit Ergebnissen

#### 3.4.1 Versuchsprogramm

Nachfolgend wird das Versuchsprogramm vorgestellt. Die Einzelversuche werden dabei gemäß folgender Konvention bezeichnet:

- Untersucher Boden:
  - **T1** tertiärer Ton T1,
  - **T2** tertiärer Ton T2,
  - **S** tertiärer Sand,
  - **K** Kaolin
- Belastung: Auflast  $P$  in  $[\text{kN/m}^2]$
- Versuchsart:
  - **EL** Untersuchung der Eislinnenbildung,
  - **VO** Untersuchung der volumetrischen Hebung,
  - **IM** Untersuchung einer intermittierenden Steuerung der Frosttemperatur  $T_o$
- Frosttemperatur obere Kammer: Temperatur  $T_o$  in  $[\text{°C}]$
- Temperatur Wasserbad: Temperatur  $T_u$  in  $[\text{°C}]$  bei EL, entfällt im Fall einer Untersuchung der volumetrischen Hebung
- Laufende Nummer: zur Kennzeichnung, dass mehrere Versuche mit denselben Parametern durchgeführt wurden.

Die Bezeichnung **K - 250 - EL (-10 / +10) - 2** steht beispielsweise für die Untersuchung einer Kaolinprobe bei einer Auflast  $P$  von  $250 \text{ kN/m}^2$  auf Eislinnenbildung bei einer Frosttemperatur  $T_o$  von  $-10 \text{ °C}$  und einer Wasserbadtemperatur  $T_u$  von  $+10 \text{ °C}$ . Es handelt sich um die zweite Probe einer Versuchsreihe. Die folgende Tabelle 3-2 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Versuche (VO und EL) an künstlichen Proben, wobei jeweils die Anzahl der Einzelversuche angegeben ist.

Boden	Auflast $P$ $[\text{kN/m}^2]$	Anzahl der Einzelversuche bei der Untersuchung:					
		Eislinnenbildung $[T_o / T_u]$				Volumetrische Hebung $[T_o]$	
		$(-10/10)$	$(-20/10)$	$(-5/5)$	$(-15/15)$	$(-20)$	$(-10)$
Ton <b>T1</b>	6	4	4	-	-	4	4
	100	1	-	-	-	1	-
	250	2	-	-	-	1	-
	400	4	-	-	-	-	-
Ton <b>T2</b>	6	1	-	-	-	-	-
	100	1	-	-	-	4	-
	250	1	-	-	-	-	-
	400	1	-	-	-	2	-
Sand <b>S</b>	6	12	4	-	-	4	4
	100	-	-	-	-	-	-
	250	1	-	-	-	1	-
	400	-	-	-	-	-	-
Kaolin <b>K</b>	6	4	1	1	1	2	-
	100	3	1	1	1	2	-
	250	3	1	1	1	2	-
	400	2	1	1	1	2	-

Tabelle 3-2: Übersicht über die durchgeführten Frosthebungsversuche

Die einzelnen Ergebnisse sind geschlossen in Anlage 2 zusammengestellt. Darüber hinaus wurden insgesamt 6 Einzelversuche mit einer so genannten intermittierenden Steuerung (IM) durchgeführt, auf die in Kapitel 3.4.5 näher eingegangen wird. Insgesamt wurden über 100 Einzelversuche durchgeführt. Der Großteil der Versuche zur Eislinnenbildung wurde bei zunächst frei gewählten Temperaturen von  $T_u / T_o = +10 \text{ °C} / -10 \text{ °C}$  durchgeführt, die überwiegende Anzahl der Versuche zur Ermittlung der volumetrischen Hebung bei einer Gefriertemperatur von  $T_o = -20 \text{ °C}$ .

### 3.4.2 Vorversuche

Im Rahmen von Vorversuchen wurde zunächst getestet, ob die gemessenen Hebungsbeträge auf die Frosteinwirkung und nicht auf anderweitige Einflüsse wie z.B. Vibrationen der Kälteaggregate oder thermische Längenänderungen der Probehälter zurückzuführen waren. Hierzu wurde ein Nullversuch mit dem enggestuften gewaschenen Kies G durchgeführt. Die Gefriertemperatur  $T_o$  wurde im 12-stündigen Wechsel zwischen  $-10 \text{ °C}$  und  $-5 \text{ °C}$  über eine Gesamtdauer von 9 Tagen variiert. Abb. 3-7 zeigt den gemessenen Hebungsverlauf auf der Probenoberseite. Zur besseren Lesbarkeit sind einzelne Wechsel der Frosttemperaturen mit gestrichelten vertikalen Hilfslinien markiert.

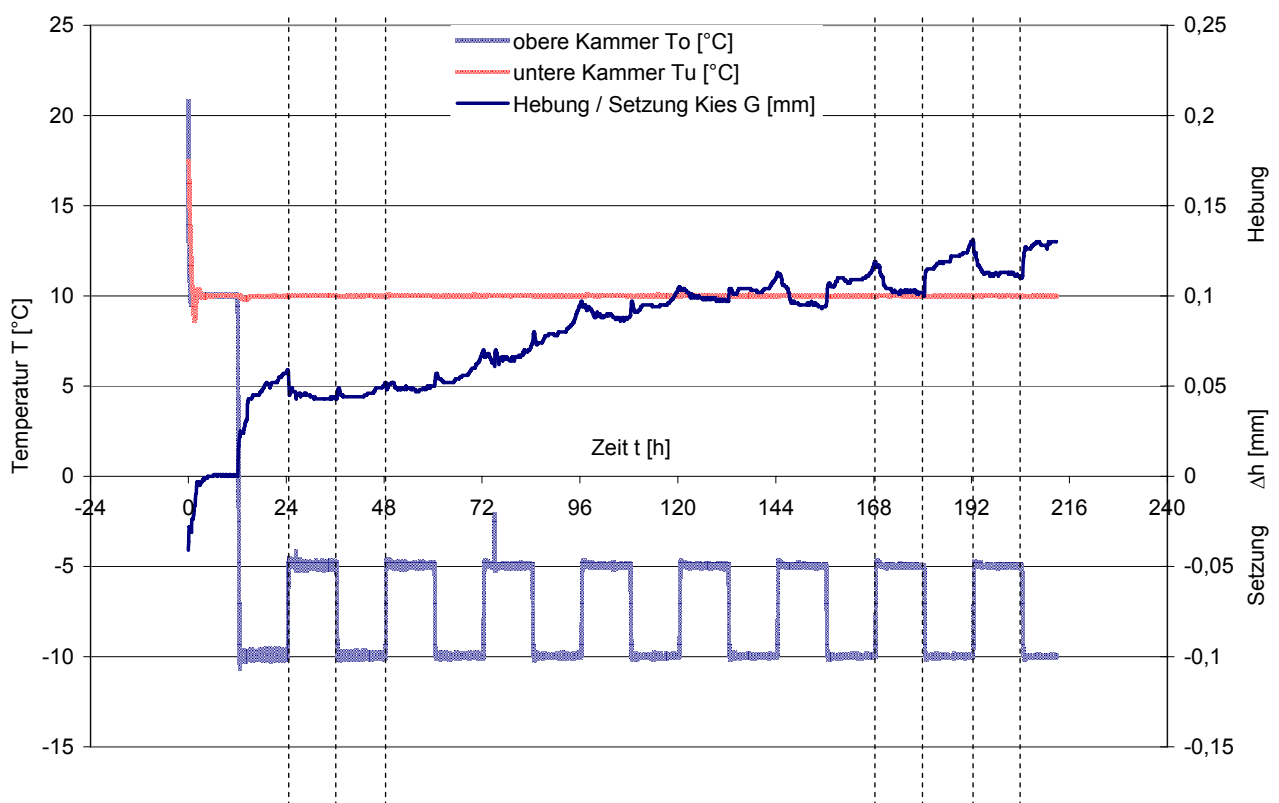


Abb. 3-7: Nullversuch am Kies G

Mit dem Einsetzen des Frostes kam es zu Hebungen von ca. 0,05 mm. Die darauf folgenden Temperaturwechsel führten jeweils zeitnah zu kleinen Ausschlägen im Hebungsverlauf auf der Probenoberseite. In den letzten Zyklen traten während der  $T_o = -5 \text{ °C}$  Phasen keine Hebungen auf, während der  $T_o = 10 \text{ °C}$  Phasen verliefen die Hebungen linear. Insgesamt lagen die gemessenen Hebungen nach einer Frostdauer von über 200 Stunden unter 0,15 mm. Abb. 3-8 und Abb. 3-9 zeigen die Probe nach dem Ausbau.





Abb. 3-8: Nullversuch mit Blick auf die Unterseite des Stempels



Abb. 3-9: Nullversuch mit Blick auf die Probenoberseite

Die kleinen Ausschläge im Hebungsverlauf beim Wechsel der Gefriertemperatur konnten auf die thermische Längenänderung der Probenbehälter und des Probenmaterials zurückgeführt werden BOSCH (2005). Die vor allem in den letzten  $T_o = -10\text{ °C}$  Zyklen gut erkennbaren, linear verlaufenden Hebungen waren vermutlich auf das Sublimieren von Wasserdampf an der kalten Unterseite der Lastplatte auf der Stempelunterseite und dort auf die Bildung von Eiskristallen zurückzuführen. Die Möglichkeit der Sublimation von Wasserdampf dürfte bei den tertiären Böden und beim Kaolin K aufgrund des im Vergleich zum Kies G geringeren Luftporenanteils wesentlich geringer als im Kies sein und wurde daher bei den nachfolgend beschriebenen Serienversuchen nicht weiter betrachtet. Die in den Versuchen an den tertiären Böden und am Kaolin gemessenen Hebungen (siehe Tabelle 2-1 und Anlage 2) lagen um ein Vielfaches höher als beim Kies und konnten damit eindeutig der Frosteinwirkung auf den Boden zugeordnet werden. Anderweitige Einflüsse, wie z.B. die thermische Längenänderung der Probenbehälter waren für die hier betrachtete Fragestellung auf Grund der Ergebnisse des Nullversuchs vernachlässigbar klein.

Weiterhin wurden mit dem Kaolin zwei voneinander unabhängige Versuchsserien mit gleichen Temperaturrandbedingungen und mit Auflasten von  $P = 6\text{ kN/m}^2$  bis  $P = 400\text{ kN/m}^2$  durchgeführt. (vgl. Serien K-EL(-10/10) und K-VO(-20), Anlage 2, Blatt 12,13 bzw. 29,30). Die unabhängig voneinander gemessenen Hebungsverläufe zeigten für die jeweilige Versuchsart und die jeweilige Laststufe zumindest für die ersten 24 Stunden nach Frostbeginn eine sehr gute Übereinstimmung, so dass mit dem gewählten Versuchsaufbau und der Versuchsdurchführung die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse bestätigt werden konnte.

### 3.4.3 Untersuchungen zur volumetrische Frosthebung

#### 3.4.3.1 Versuche mit geringen Auflasten

Nachfolgend werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Versuche zur Untersuchung der volumetrischen Frosthebung vorgestellt. Bei diesen Versuchen wurde das Wasserbad nicht temperiert und die Kühlleistung nur in der oberen Kammer abgegeben. Um Schäden am Klimaschrank infolge entstehender Frostdrücke auszuschließen wurde der Gefriervorgang abgebrochen, wenn sich das Wasserbad eine Temperatur von  $T_u = +4\text{ °C}$  abgekühlt hatte.

Abb. 3-10 zeigt den zeitlichen Verlauf des Versuchs T1-6-VO(-10) für die Erfassung der volumetrischen Hebung an vier gleichartigen Bodenproben des tertiären Tones T1 bei einer Auflast von  $P = 6 \text{ kN/m}^2$ . Die Temperaturverläufe in der oberen Kammer und im Wasserbad sind durch die hellblaue und rote Temperaturkurve dargestellt. Die Kurvenschar gibt die an den Probenoberflächen gemessenen Hebungen, bzw. Setzungen an. Die Ergebnisse aller Versuche werden in Kapitel 3.4.3.3 tabellarisch und grafisch zusammengestellt.

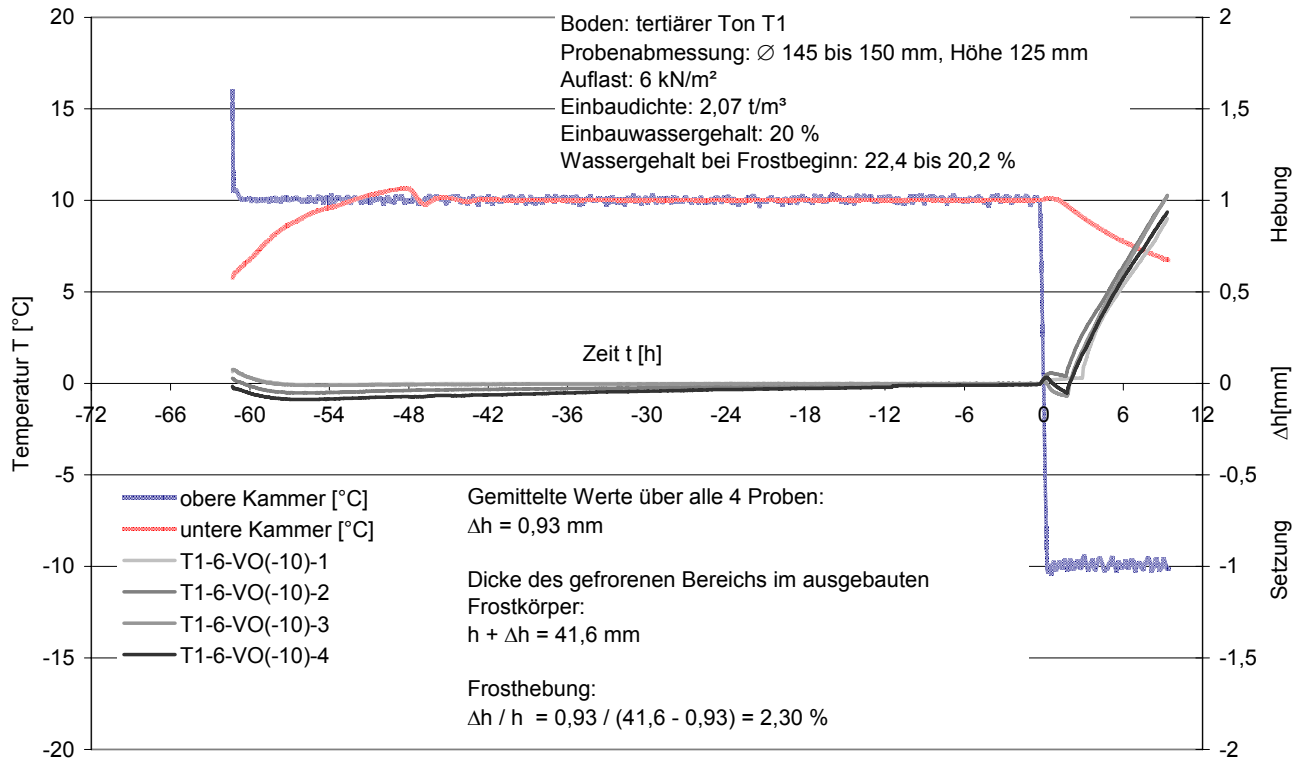


Abb. 3-10: Volumetrische Frosthebung am Ton T1 bei einer Auflast von  $6 \text{ kN/m}^2$

Die gesamte Klimakammer wurde für 48 Stunden auf  $+10 \text{ }^\circ\text{C}$  eingeregelt. Nach dem Umsetzen der Proben von der Belastungseinrichtung in den Klimaschrank kam es mit dem Aufbringen der Auflast zu geringen Setzungen der Probenoberseite, welche innerhalb von etwa 6 Stunden abklingen. Es folgten ebenfalls mit der Zeit abklingende Hebungen, welche vermutlich auf ein Quellen der Tone zurückzuführen waren. Kurz nach Beginn der Frostphase setzten Hebungen ein, wobei sich die Hebungsgeschwindigkeit bei zunehmender Versuchsdauer etwas verlangsamte. Alle vier Proben zeigten ein einheitliches Hebungsverhalten.

Da bei Versuchsende die Höhe des gefrorenen Bereichs der Proben nicht bekannt war, wurden die Proben ausgebaut, der gefrorene Bodenkörper freigelegt und seine Höhe  $h_1$  gemessen. Die gemessene Höhe des Frostkörpers setzte sich aus zwei Komponenten zusammen.

$$h_1 = (h_2 + \Delta h) \quad (3.1)$$

mit:  $h_1$ : Höhe des gefrorenen Teils der Probe  
 $h_2$ : Höhe des ungefrorenen Teils der Probe  
 $\Delta h$ : Frosthebung auf der Probenoberseite



Unter Ansatz der auf der Probenoberseite gemessenen Frosthebung  $\Delta h$  konnte die bezogene einaxiale volumetrische Frosthebung  $\Delta h / h$  berechnet werden. Im Beispiel betrug die Höhe der gefrorenen Bodenschicht nach der Frosteinwirkung von 9,0 Stunden im Mittel 42 mm.

Um die während des Versuchs eingetretenen Wassergehaltsänderungen in der Probe ermitteln zu können, wurden die Proben mit einer Steinsäge horizontal in insgesamt fünf Scheiben gleicher Dicke zerschnitten. An diesen Scheiben wurden anschließend die Wassergehalte bestimmt. (vergleiche Abb. 3-11 bis Abb. 3-14)



Abb. 3-11:  
Vermessung des Frostkörpers



Abb. 3-12: Radialschnitt durch den Frostkörper



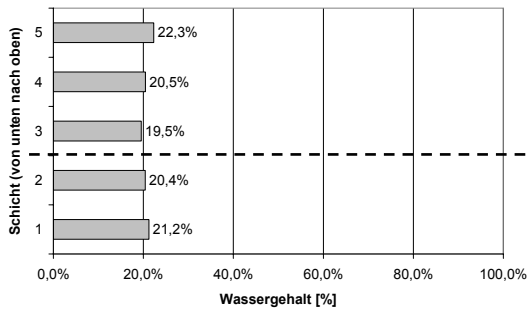
Abb. 3-13:  
Herstellung einzelner Schichten



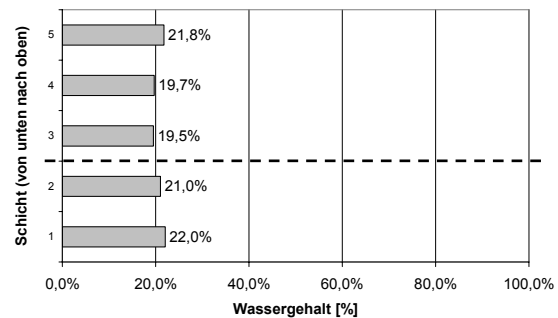
Abb. 3-14: Einzelne Schichten (Filterpapier wurde vor Bestimmung der Wassergehalte entfernt)

Abb. 3-15 zeigt die zum oben dargestellten Versuch gehörige Verteilung der Wassergehalte. Die Frostgrenze ist als gestrichelte Linie eingezeichnet und lag jeweils auf der Unterseite von Schicht Nr. 3. Alle Proben zeigten einen zur Frostgrenze hin leicht abfallenden Wassergehalt. Der in eckigen Klammern stehende Wert gibt die bezogene volumetrische Hebung  $Vol_H$  der entsprechenden Probe an.

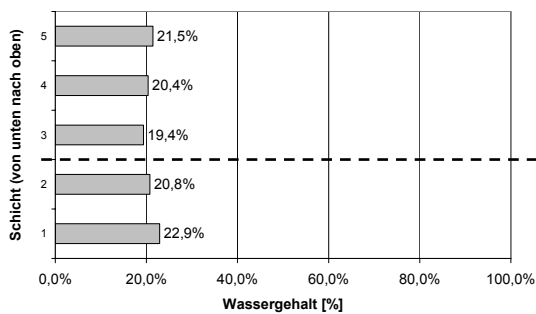
T1-6-VO(-10)- 1 [2,50 %]



T1-6-VO(-10)- 1 [2,41 %]



T1-6-VO(-10)- 1 [2,24 %]



T1-6-VO(-10)- 1 [2,05 %]

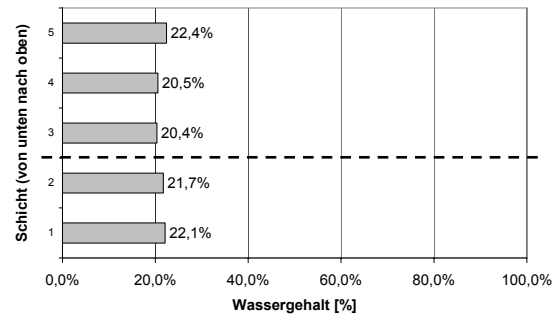


Abb. 3-15: Wassergehalte über die Probenhöhe

### 3.4.3.2 Versuche mit höheren Auflasten

Der Versuchsablauf für die Ermittlung der volumetrischen Frosthebung bei hohen Auflasten entspricht dem bereits beschriebenen Ablauf bei geringen Auflasten. Abb. 3-16 zeigt die sich auffächernden Hebungskurven für den Kaolin bei Auflasten  $P$  von  $6 \text{ kN/m}^2$  bis  $400 \text{ kN/m}^2$ . Hierbei ist anzumerken, dass sich die Wassergehalte der mit  $w = 20 \%$  hergestellten Proben während der Lagerung durch unterschiedlich starkes Quellen (bzw. Konsolidieren) entsprechend der Auflast auf  $w = 32,2 \%$  bis  $w = 36,8 \%$  erhöht hatten. Die Ursache für die in Abb. 3-16 dargestellten, auffächernden Kurven lag daher neben der Auflast zum Teil auch am unterschiedlichen Wassergehalt der Proben zu Beginn der Frostphase. Bei den untersuchten tertiären Tonen und Sanden trat dieser Effekt nicht auf. Im Vergleich zu den in Abb. 3-10 dargestellten Hebungskurven am Ton T1 mit einer Auflast von  $6 \text{ kN/m}^2$  wurden zwei Unterschiede deutlich. Zunächst fiel auf, dass im Kaolin K bei gleicher Auflast wesentlich größere Hebungen als im Ton T1 auftraten. Zum anderen wurde deutlich, dass mit steigender Auflast die Frosthebungen abnahmen. Beim Ende des Versuchs betrug die Hebung  $\Delta h$  der Probe mit einer Auflast  $P$  von  $6 \text{ kN/m}^2$   $5,8 \text{ mm}$ , wohingegen sie bei der Probe mit einer Auflast  $P$  von  $400 \text{ kN/m}^2$   $1,9 \text{ mm}$  betrug.

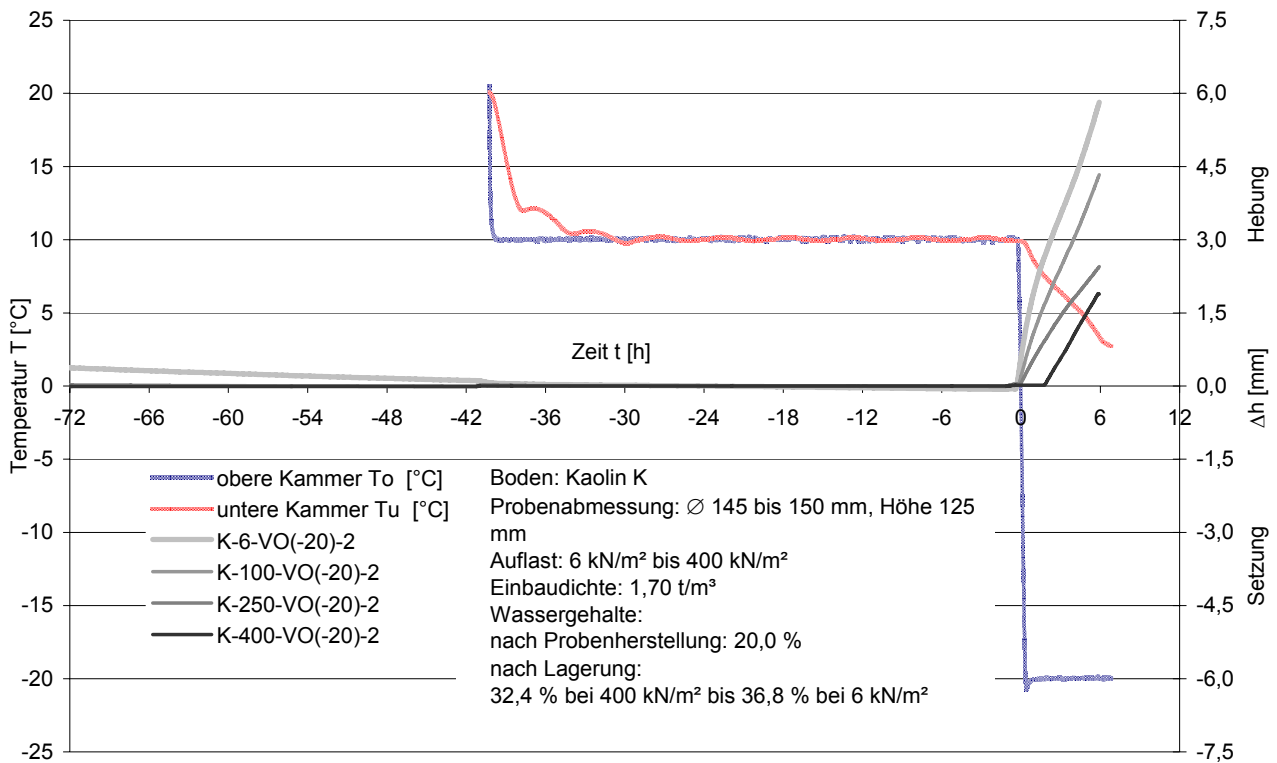


Abb. 3-16: Volumetrische Frosthebung des Kaolins K bei Auflasten  $P$  von 6 kN/m<sup>2</sup> bis 400 kN/m<sup>2</sup>

### 3.4.3.3 Ergebnisse der Frosthebungsversuche zur Untersuchung der volumetrischen Hebung

Die unten stehende Tabelle 3-3 gibt einen Gesamtüberblick über die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zur Untersuchung der volumetrischen Frosthebung bei Gefriertemperaturen von  $T_o = -20^\circ\text{C}$ , nachdem die gesamte Versuchseinrichtung zuvor auf  $+10^\circ\text{C}$  temperiert worden war. Die Tabellenwerte stellen hierbei die Mittelwerte aller mit der betreffenden Laststufe durchgeführten Versuche dar, wobei nicht für jeden Boden und jede Laststufe die gleiche Anzahl von Versuchen durchgeführt wurde. Die Tabellenwerte sind in Abb. 3-17 grafisch dargestellt.

Auflast $P$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Bezogene Volumetrische Hebung $Vol_H$ bei $-20^\circ\text{C}$			
	T1	T2	S	K
	[%]	[%]	[%]	[%]
6	1,57		1,77	(10,07)
100	1,11	0,40		(7,27)
250	0,70		0,05	(4,25)
400		0,74		(3,29)

Tabelle 3-3: Bezogene Volumetrische Hebung in Abhängigkeit von der Auflast bei  $-20^\circ\text{C}$

Es ist zu erkennen, dass die Beträge der bezogenen volumetrischen Hebung mit Ausnahme der Versuche mit dem tertiären Ton T2 mit steigender Auflast abnehmen. Bei kleinen Auflasten zeigten die tertiären Sande und Tone im Versuch in etwa gleiche Hebungsbeträge. Bei Auflasten von 250 kN/m<sup>2</sup> waren im tertiären Sand praktisch keine Hebungen mehr festzustellen, während die volumetrische Hebung der tertiären Tone noch zwischen 0,5 % und 1,0 % lag.

Beim Kaolin zeigte sich eine deutliche Abnahme der Hebungsbeträge mit zunehmender Auflast. Hier ist jedoch einschränkend anzuführen, dass zwar alle Proben mit einem Anfangswassergehalt von 20 % hergestellt worden waren, sich die Wassergehalte jedoch während der Lagerung z.T. erheblich geändert hatten. Bei allen Proben war infolge von Quellerscheinungen während der Lagerung ein starker Anstieg des Wassergehaltes zu verzeichnen. Die in Tabelle 3-3 für den Kaolin angegebenen Werte basieren daher zum Teils auch auf unterschiedlichen Wassergehalten zu Beginn der Frostphase, so dass sie untereinander nur eingeschränkt vergleichbar sind und in der Tabelle mit Klammern gekennzeichnet wurden. Die tertiären Böden zeigten dagegen keine ausgeprägten Quellerscheinungen.

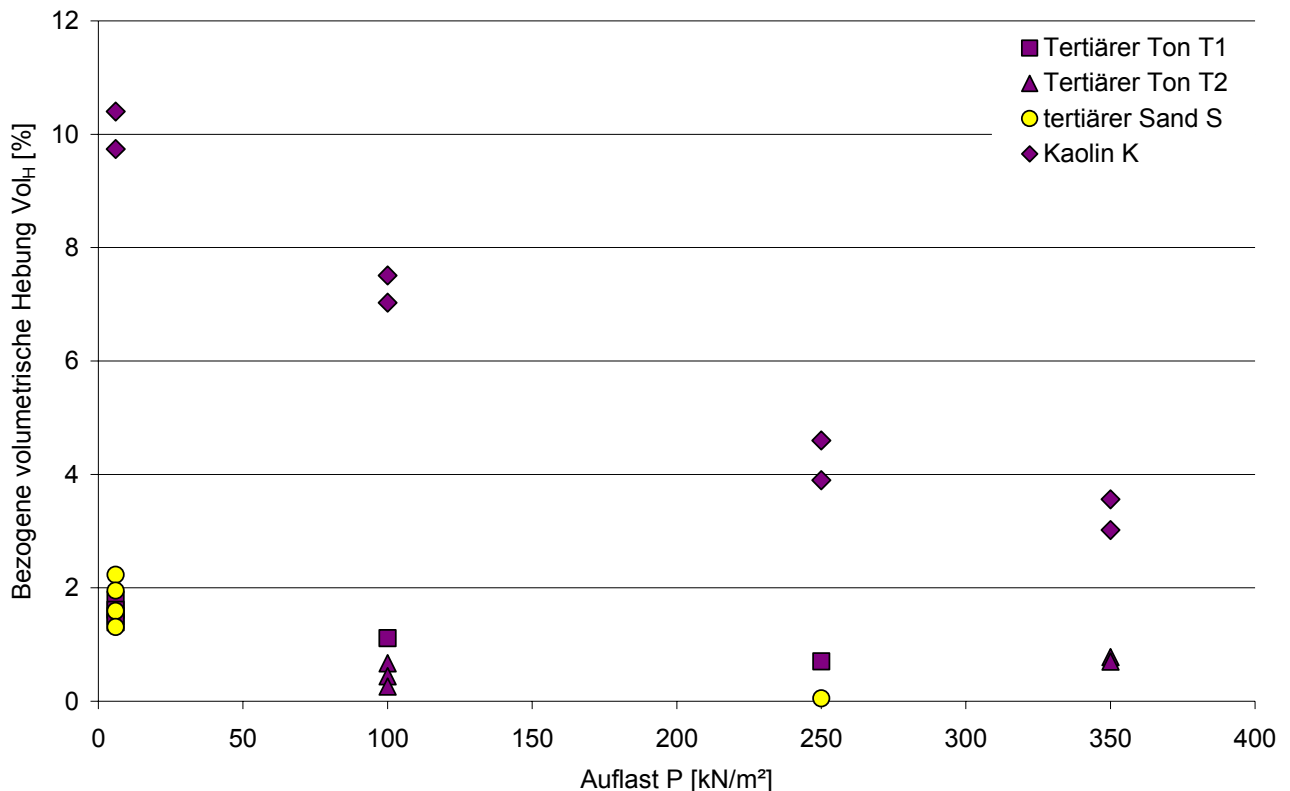


Abb. 3-17: Bezogene volumetrische Hebung in Abhängigkeit von der Auflast

#### 3.4.3.4 Beurteilung der Ergebnisse

Bei den untersuchten natürlichen Böden T1, T2 und S kam es bezogen auf die Höhe der gefrorenen Bodenzone zu maximalen bezogenen volumetrischen Frosthebungen von ca. 2 % (Abb. 3-16). Die später in Kapitel 5.1 rechnerisch abgeleitete obere Schranke für die bezogenen volumetrischen Hebungen von 3 % der gefrorenen Bodenzone wurde nicht erreicht. Weiterhin wurde festgestellt, dass sich mit steigender Auflast auf die Probe die Frosthebungen unter ansonsten gleichen Randbedingungen verringerten.

Ein mechanisches Modell, mit dem diese Beobachtungen erklärt werden können, wird in Kapitel 5.2 vorgestellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Teil des Porenwassers aus der gefrierenden Bodenzone in den ungefrorenen Boden und weiter in die Filterplatten am Probenfuß abströmen konnte. Je durchlässiger der Boden ist, desto größer ist dieses Wasservolumen und desto kleiner sind die aus dem verbleibenden Porenwasseranteil resultierenden Frosthebungen. Die auf die Probe einwir-

kende Last stellt darüber hinaus einen Widerstand gegen die Frosthebung dar. Wenn die Probe Luftporen enthält, dann kann ein Teil des Porenwassers sein Volumen beim Gefrieren zwängungsfrei in die Luftporen hinein vergrößern.

Die unter den beschriebenen Randbedingungen ermittelten Werte für die Frosthebung können nicht uneingeschränkt auf andere Situationen übertragen werden, wie nachfolgend erläutert wird. Die Frosteindringgeschwindigkeit nimmt mit der Zeit ab, wie in Kapitel 3.4.5 versuchstechnisch bestätigt wird. Das vollständige Gefrieren gleich dicker Bodenschichten dauert aufgrund der mit der Zeit und damit zur Tiefe hin abnehmenden Frosteindringgeschwindigkeit zunehmend länger. Das bedeutet, dass mit der Frosttiefe auch die Zeitspanne zunimmt, in dem das unmittelbar unter der Frostgrenze vorhandene Porenwasser in ungefrorene Bodenzonen drainieren kann. Ein Indiz für die Richtigkeit dieser Aussage ist die grafische Darstellung der Wassergehaltsverteilung über die Probenhöhe (Abb. 3-14). Die Wassergehalte nehmen von der Probenoberseite zur Frostgrenze hin ab. Letztendlich bedeutet es, dass die Größe "bezogene volumetrische Frosthebung" eine Funktion in Abhängigkeit von der Zeit ist, exakter ausgedrückt mit der Zeit abnehmen muss. Folglich stellen die vorgestellten Versuchsergebnisse also nur "Momentaufnahmen" eines an sich nichtlinearen instationären Vorganges dar.

### **3.4.4 Untersuchungen zur Eislinnenbildung**

#### **3.4.4.1 Versuche bei geringen Auflasten**

Die Versuche zur Eislinnenbildung werden weitgehend analog zu denen zur volumetrischen Frosthebung durchgeführt, wobei in diesen Versuchsserien neben der Frosttemperatur  $T_o$  auch die Wasserbadtemperatur  $T_u$  konstant gehalten wurde. Dadurch wurde nach einer instationären Anfangsphase ein stationärer Temperaturzustand in der Probe erzeugt. Dies war erforderlich, damit die in den Versuchsserien ermittelten unterschiedlichen Hebungsgeschwindigkeiten eindeutig auf die untersuchten Böden, bzw. auf die Variation der Auflast zurückgeführt werden konnten.

Die Proben wurden zunächst solange unter der jeweiligen Auflast gelagert, bis die Konsolidations- und Quellvorgänge abgeschlossen waren. Anschließend wurden sie in den Klimaschrank eingebaut. Beide Kammern, das Wasserbad und die eingebauten Prüfkörper wurden mindestens 4 Stunden auf  $T_o = T_u = +10\text{ °C}$  eingeregelt. Anschließend wurde die obere Kammer auf  $T_o = -10\text{ °C}$  abgekühlt. Der sich nach einiger Zeit einstellende stationäre Temperaturzustand in der Probe wurde gehalten. In Abb. 3-18 ist der Hebungsverlauf des tertiären Tons T1 bei einer Auflast  $P$  von  $6\text{ kN/m}^2$  dargestellt.

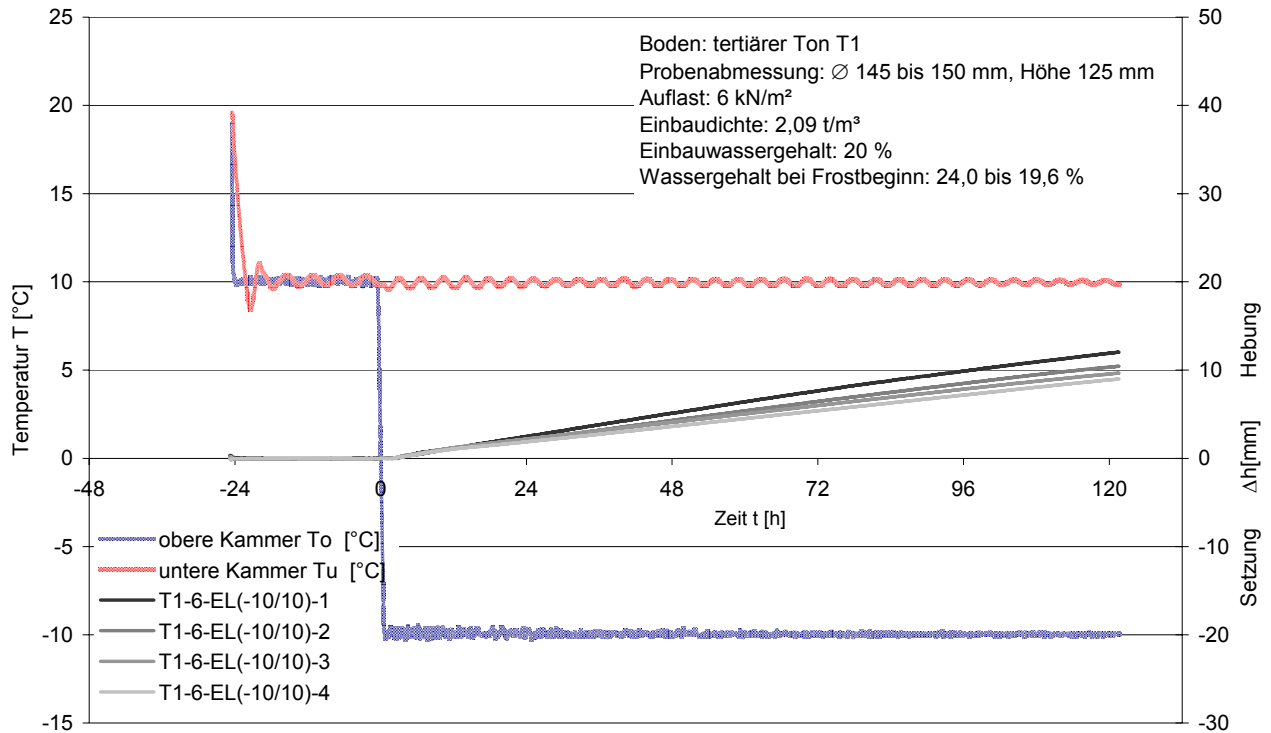


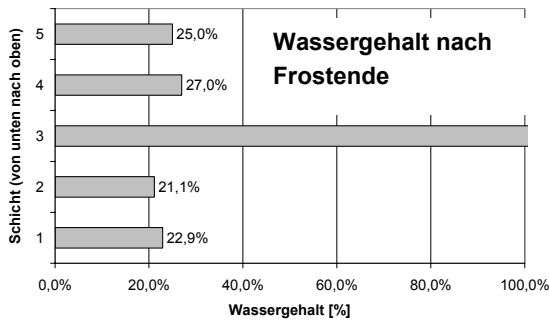
Abb. 3-18: Eislinsenbildung am tertiären Ton T1 bei einer Auflast  $P$  von 6 kN/m<sup>2</sup>

Unmittelbar nach Frostbeginn setzten zunächst annähernd linear verlaufende Hebungen ein. Die Hebungskurven flachten im Verlauf der Zeit leicht ab, ein Stillstand wurde jedoch auch nach einer Versuchsdauer von mehr als fünf Tagen noch nicht erreicht. Die Hebungsgeschwindigkeiten nahmen von im Mittel 2,07 mm/d im Zeitintervall zwischen 12 h und 24 h nach Frostbeginn auf im Mittel 1,75 mm/d für das letzte gemessene Zeitintervall zwischen 108 h und 120 h ab. Dies entspricht einer Abnahme der Hebungsgeschwindigkeit von rund 15 %.

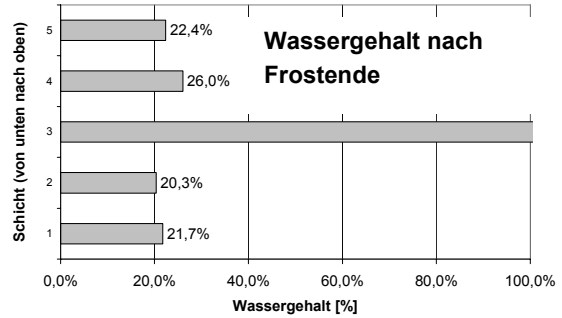
Wie bei den Versuchen zur volumetrischen Hebung wurden die Proben nach Versuchsende ausgebaut und in jeweils 5 Scheiben zerschnitten, an denen der Wassergehalt bestimmt wurde. In Abb. 3-19 ist die Verteilung der Wassergehalte der oben beschriebenen Tonproben dargestellt. Der hinter der Versuchsbezeichnung in eckigen Klammern stehende Wert gibt die Hebungsgeschwindigkeit an. Die Frostgrenze lag jeweils an der Grenze zwischen Schicht 2 und 3. Es ist zu erkennen, dass die Wassergehalte von der Probenoberseite zur Frostgrenze hin ansteigen. Der maximale Wassergehalt wurde bei jeder Probe an der Grenze vom gefrorenen zum ungefrorenen Teil des Probekörpers festgestellt.



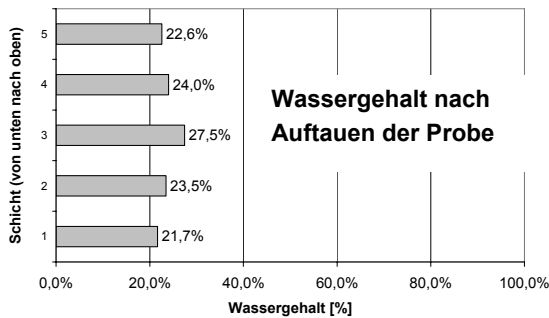
T1-6-EL(-10/10)-1 [2,65 mm/d]



T1-6-EL(-10/10)-2 [2,09 mm/d]



T1-6-EL(-10/10)-3 [1,94 mm/d]



T1-6-EL(-10/10)-4 [1,62 mm/d]

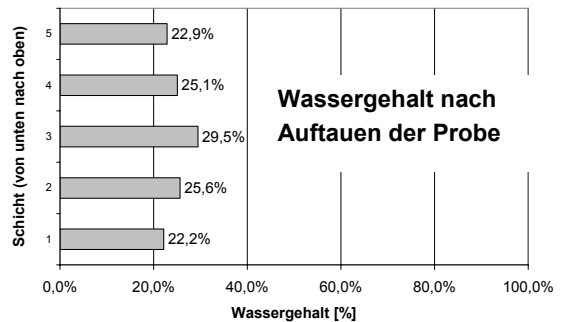


Abb. 3-19: Wassergehalte über die Probenhöhe

Viel deutlicher wurde der Effekt, wenn eine Kaolinprobe gefroren wurde. Abb. 3-20 zeigt die ursprünglich gleich hohen Proben des tertiären Sandes S und des Kaolins K nach erfolgtem Ausbau bei Versuchsende. Die unterschiedlich großen Hebungsbeträge sind deutlich zu erkennen. Abb. 3-21 zeigt einen Querschnitt durch den gefrorenen Teil der Kaolinprobe, wobei die Frostgrenze im Bild unten liegt. Es ist eine zur Frostgrenze hin stark zunehmende Eislinsenbildung zu erkennen.



Abb. 3-20: Ausgebaute Proben: tertiärer Sand S links und Kaolin K rechts.

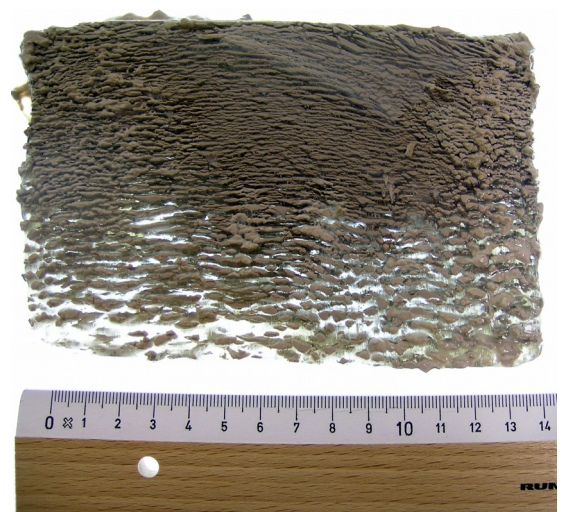


Abb. 3-21: Querschnitt durch die gefrorene Kaolinprobe

### 3.4.4.2 Versuche bei höheren Auflasten

In Abb. 3-22 sind die Hebungsverläufe für den Kaolin bei Auflasten von  $6 \text{ kN/m}^2$  bis  $400 \text{ kN/m}^2$  dargestellt. Hier ist wie bei der Untersuchung der volumetrischen Hebung (vgl. Abb. 3-16) ebenfalls ein Aufwölben der Hebungsverläufe entsprechend der auf die Probe wirkenden Auflast festzustellen. Die Temperatur des Wasserbades wurde von der automatischen Steuerung des Klimaschranks zunächst unplanmäßig oszillierend eingeregelt und musste manuell korrigiert werden. Bemerkenswert ist der Knick in allen 4 Hebungsverläufen, welcher zeitgleich mit dem Abbruch der oszillierenden Wasserbadtemperatur eintritt. Der Einfluss einer planmäßig oszillierenden Gefriertemperatur wird in Kapitel 3.4.5 näher untersucht.

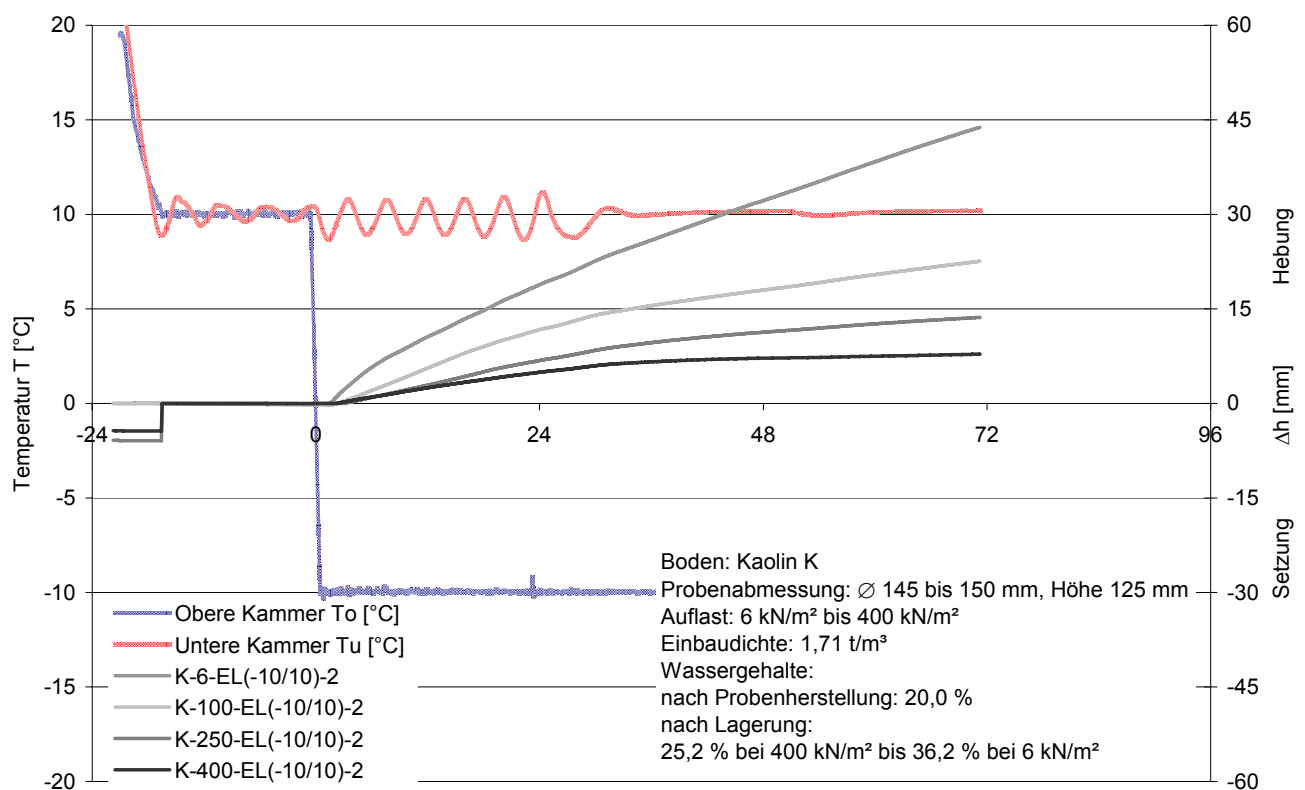


Abb. 3-22: Eislinnenbildung im Kaolin K bei Auflasten  $P$  von  $6 \text{ kN/m}^2$  bis  $400 \text{ kN/m}^2$ .

### 3.4.4.3 Einfluss unterschiedlicher Temperaturgradienten auf die Frosthebungen

Der Einfluss des Temperaturgradienten auf die Hebungsgeschwindigkeiten wurde mit Versuchsserien an Kaolinproben untersucht. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Hebungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des in die Probe eingprägten Temperaturgradienten.

Der Auswertung wurden folgende Versuche zu Grunde gelegt:

- K-(6, 100, 250, 400)-EL(-5/5)-1      Temperaturgradient  $0,8 \text{ K/cm}$
- K-(6, 100, 250, 400)-EL(-10/10)-1      Temperaturgradient  $1,6 \text{ K/cm}$
- K-(6, 100, 250, 400)-EL(-20/10)-1      Temperaturgradient  $2,4 \text{ K/cm}$

Der Temperaturgradient wurde dabei aus der Temperaturdifferenz zwischen der Probenoberseite und dem Wasserbad, bezogen auf die ursprüngliche Probenhöhe und unter Annahme eines näherungs-



weisen linearen Verlaufs über die Probenhöhe ermittelt. Es ist zu erkennen, dass die Hebungsgeschwindigkeiten mit steigendem Temperaturgradienten bei allen untersuchten Auflaststufen zunehmen.

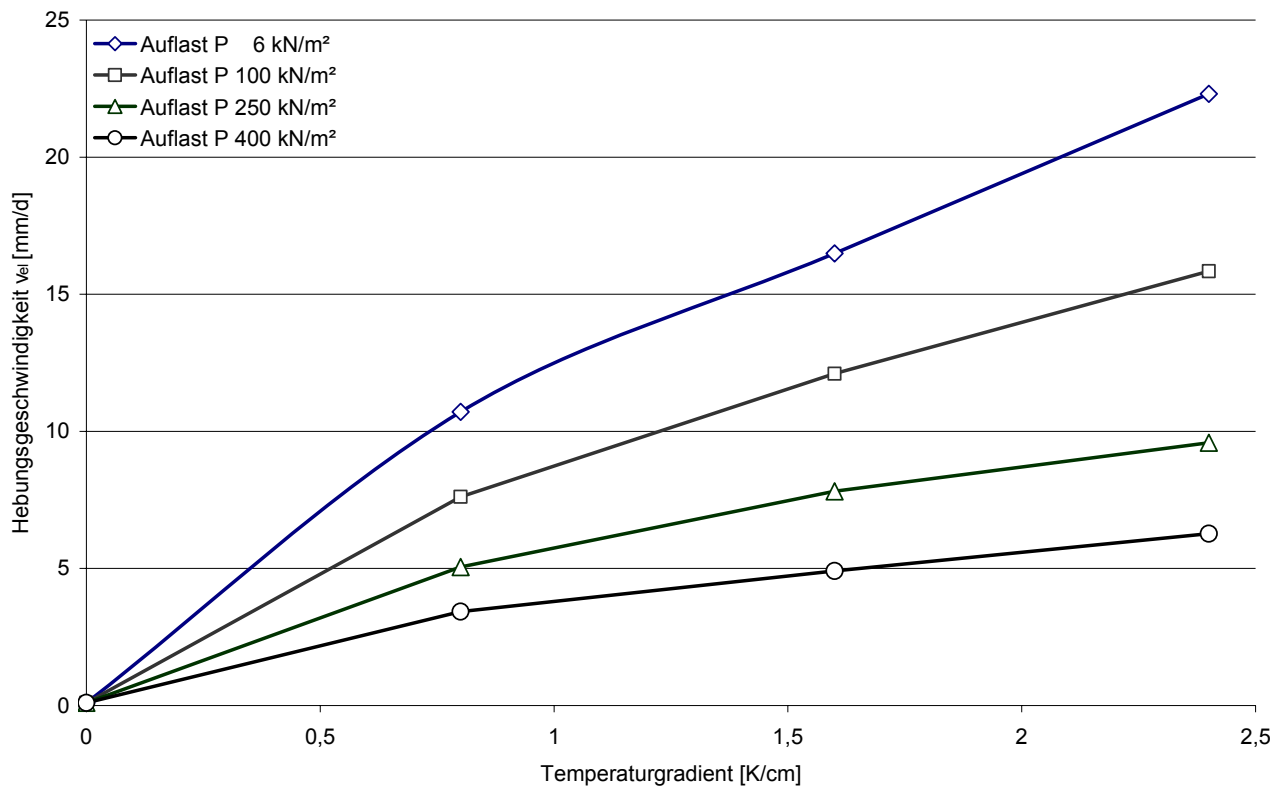


Abb. 3-23: Hebungsgeschwindigkeiten von Kaolinproben in Abhängigkeit des Temperaturgradienten

#### 3.4.4.4 Ergebnisse der Frosthebungsversuche zur Eislinsenbildung

Die in den Versuchen gemessenen Hebungsgeschwindigkeiten waren in geringem Maß abhängig von der Zeit. Für die Versuchsauswertung musste daher ein Zeitintervall mit einer mittleren Hebungsgeschwindigkeit definiert werden. Die in Tabelle 3-4 angegebenen Werte für die Geschwindigkeit des Eislinsenwachstums wurden im Zeitfenster von 12 h bis 24 h nach Frostbeginn ermittelt. Zum einen konnte davon ausgegangen werden, dass die volumetrischen Hebungen nach 12 h weitgehend abgeklungen waren. Zum anderen verlangsamte sich die Hebungsgeschwindigkeit bei der überwiegenden Anzahl der Versuche mit zunehmender Versuchsdauer geringfügig, d.h. das gewählte Zeitfenster lieferte für die spätere Abschätzung von in situ zu erwartenden Frosthebungen auf der sicheren Seite liegende Werte.

Auflast P [kN/m²]	Eislinsenwachstum (+10°C / -10°C)			
	T1 [mm/d]	T2 [mm/d]	S [mm/d]	K [mm/d]
6	2,08	3,06	1,54	15,81
100	1,93	1,56		11,22
250	0,45	0,87	0,01	7,04
400	0,07	0,56		4,93

Tabelle 3-4: Hebungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Auflast

Grundsätzlich ist festzustellen, dass mit steigender Auflast die Hebungsgeschwindigkeiten bei allen untersuchten Böden abnehmen. Weiterhin zeigten die untersuchten tertiären Tone ein stärkeres Eislinnenwachstum als die tertiären Feinsande. Die Hebungsraten des zum Vergleich untersuchten Kaolins überstiegen diejenigen des tertiären Tones um mehr als das Fünffache.

Die in Abb. 3-24 dargestellte Grafik zeigt die Ergebnisse der in Tabelle 3-4 zusammengefassten Einzelversuche bei Temperaturen von  $T_o / T_u = +10\text{ °C} / -10\text{ °C}$ .

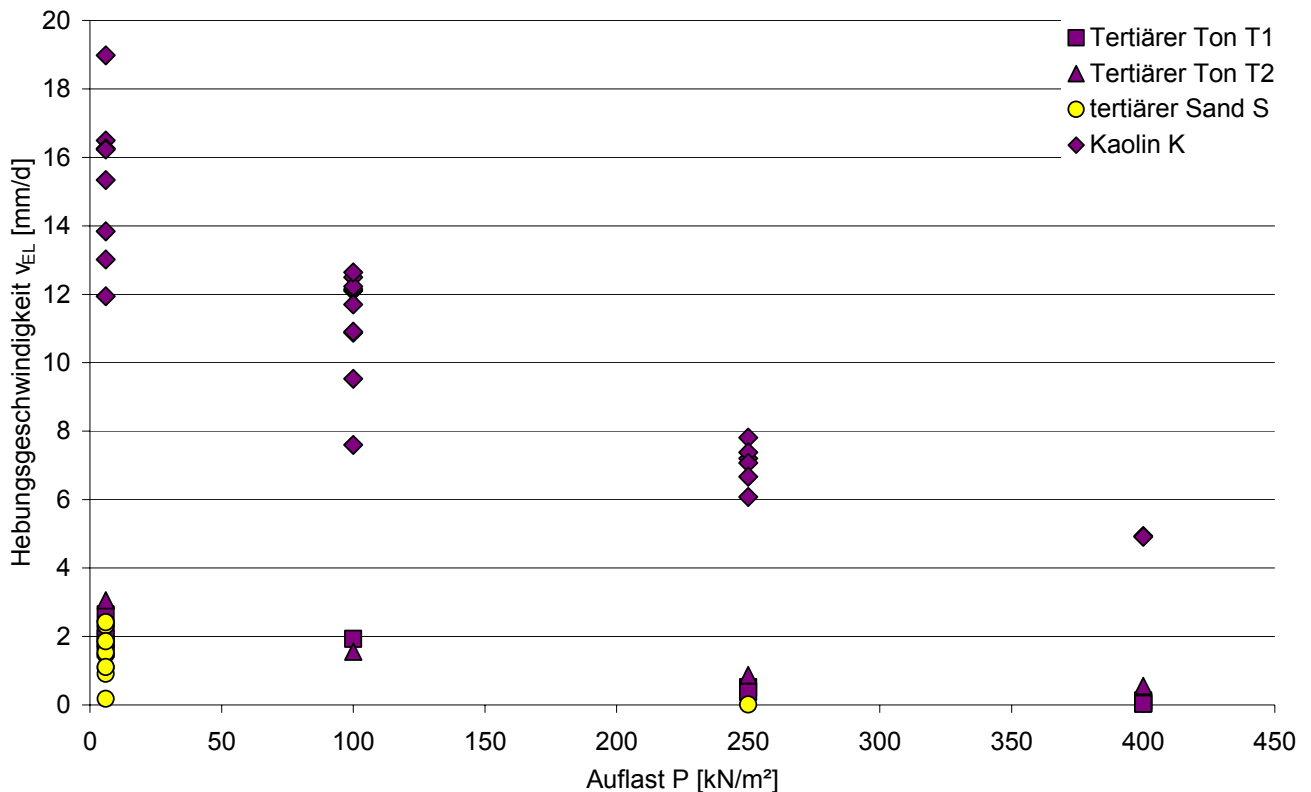


Abb. 3-24: Hebungsgeschwindigkeiten  $v_{el}$  in Abhängigkeit der Auflast P bei (+10°C / -10°C)

Im Ton kam es zu größeren Frosthebungen als im Sand. Die gemessenen Beträge zeigten weiterhin deutlich die Abhängigkeit der Hebungsbeträge von der jeweiligen Auflast. Der Temperaturgradient hatet starken Einfluss auf die Hebungsgeschwindigkeit. Die Ergebnisse aller Einzelversuche sind geschlossen in Anlage 2, Blatt 2 bis 22 dargestellt.

#### 3.4.4.5 Beurteilung der Ergebnisse

Die Versuche zeigten, dass bei den untersuchten Böden und Auflasten die Hebungsgeschwindigkeiten von wenigen Hundertstel Millimetern pro Tag bis zu ca. 20 mm/d variieren. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde durch Wiederholung von Versuchen und durch die Untersuchung gleichartig hergestellter und belasteter Proben innerhalb einer Versuchsreihe bestätigt.

Die Beobachtung, dass in den Versuchen die Tone die größten Frosthebungen zeigten, steht auf den ersten Blick im Widerspruch zu der in vielen Veröffentlichungen getroffenen Feststellung, dass in der Natur Schluffe das stärkste Eislinnenwachstum zeigen. Dies wird damit begründet, dass Schluffe ausreichend feinkörnig sind, um auf Grund der Kapillarität Wasser an die Gefrierfront zu transportieren und gleichzeitig durchlässig genug sind, um den zum Eislinnenwachstum notwendigen Wassertrans-

port zu ermöglichen. Da im Laborversuch das Wasserangebot räumlich sehr nah an der Gefrierfront liegt und gleichzeitig die Kaolinproben herstellungsbedingt eine kleinere Dichte als die tertiären Tonproben und damit letztendlich eine vergleichbare Durchlässigkeit (vergleiche Tabelle 3-1) aufwiesen, ist das gezeigte Hebevverhalten jedoch plausibel. Die in der Literatur beschriebenen exponentielle Abhängigkeit der Hebungsgeschwindigkeit von der Auflast konnte auch bei den untersuchten Böden bestätigt werden. In Kapitel 10 werden exponentielle Ausgleichsgeraden in die Versuchsergebnisse eingepasst.

Ein Vergleich der Hebungsgeschwindigkeiten von künstlich hergestellten Bodenproben und natürlichen Proben zeigt Hebungsbeträge in der gleichen Größenordnung. Beispielsweise wurden in der Versuchsserie S-250-EL(-10/10) bei den Versuchen Nr. 2 und Nr. 3 an natürlichen Sand-Bodenproben Hebungsgeschwindigkeiten von 0,09 mm/d und 0,01 mm/d gemessen. Die in Tabelle 3-4 angegebenen entsprechenden Werte für künstlich hergestellte Probenkörper liegen bei 0,01 mm/d für den Sand. In der Versuchsserie T1-250-EL(-10/10) wurden bei den Versuchen Nr. 3 und Nr. 4 an natürlichen Ton-Bodenproben Hebungsgeschwindigkeiten von 0,39 mm/d und 0,38 mm/d gemessen. Die in Tabelle 3-4 angegebenen entsprechenden Werte für künstlich hergestellte Probenkörper liegen bei 0,45 mm/d für den Ton. Der Herstellungsprozess der künstlichen Probekörper hatte demnach keine gravierenden Auswirkungen auf deren Hebevverhalten.

In Kapitel 2 wurde gezeigt, dass der Betrag der Frosthebungsgeschwindigkeit auch von dem in die Probe eingprägten Temperaturgradienten abhängig ist. Dafür hat KONRAD (1980) auf Basis von Laborversuchen einen linearen Zusammenhang zwischen Temperaturgradient und Hebungsgeschwindigkeit ermittelt. Die Mehrzahl der vorgestellten Versuche zur Erfassung der Eislinnenbildung wurde bei einem einheitlichen Temperaturgefälle von +10 °C / -10 °C durchgeführt. Für eine Prognose für die vor Ort zu erwartenden Hebungsgeschwindigkeiten hätten daher streng betrachtet die auf Basis von thermischen Berechnungen (siehe [U6]) zu erwartenden Temperaturgradienten zu Grunde gelegt werden müssen. Weiterhin wäre eine laufende Anpassung an die tatsächlich vor Ort gemessenen Temperaturprofile erforderlich gewesen. Eine derartige Adaption wurde im gegebenen Zeitrahmen jedoch als nicht realisierbar erachtet. Um für eine Hebungprognose auf der sicheren Seite liegende Werte zu erhalten, wurden die Laborversuche deshalb mit dem genannten steilen Temperaturgradienten von 20 °C auf 100 mm Probenhöhe durchgeführt. Daher konnte davon ausgegangen werden, dass die im Labor ermittelten Hebungsgeschwindigkeiten etwas höher als die vor Ort zu erwartenden Hebungsgeschwindigkeiten waren.

### 3.4.5 Einfluss einer intermittierenden Steuerung der Gefriertemperatur

#### 3.4.5.1 Allgemeines

Bei Vereisungsmaßnahmen erfolgt der Wärmeentzug aus dem Baugrund vor Ort in der Regel mittels intermittierender Steuerung der Gefrieranlage. Die nach der Aufgefrierphase des Eiskörpers für das Halten erforderliche Kälteleistung wird dabei in einzelnen Impulsen in den Untergrund eingeleitet. Um die **qualitative** Auswirkung dieser intermittierenden Steuerung auf die Eislinnenbildung zu erfassen, wurden die nachfolgend beschriebenen Laborversuche durchgeführt.

### 3.4.5.2 Versuchsreihe 1: 12 Stunden - Intervalle

In einem ersten Versuch wurde die Gefriertemperatur  $T_o$  im Klimaschrank in 12 Stunden-Zyklen zwischen  $-5\text{ °C}$  und  $-10\text{ °C}$  variiert. Der restliche Versuchsaufbau und -ablauf entsprach dem unter Punkt 3.4.4 beschriebenen Versuch zur Eislinnenbildung.

Aus dem in Abb. 3-25 dargestellten Hebungsverlauf ist mit Beginn der ersten Frostperiode eine linear verlaufende Hebung erkennbar. Sobald die Temperatur in der oberen Kammer von  $T_o = -10\text{ °C}$  auf  $-5\text{ °C}$  zurückgefahren wurde, brach die lineare Hebung ab und es war eine leichte Setzung der Probe zu erkennen. Bei erneuter Absenkung der Temperatur auf  $T_o = -10\text{ °C}$  setzte wieder ein linearer Hebungsverlauf ein. Der entsprechende Teil der Hebungskurve verlief parallel zur ersten  $-10\text{ °C}$  Phase, d.h. die Hebungsgeschwindigkeiten waren während der tieferen Gefriertemperaturen in etwa gleich groß.

In den späteren Zyklen blieb der Wechsel von Hebung und Setzung erhalten, wobei sich die Hebungsgeschwindigkeiten mit zunehmender Zyklenanzahl etwas verlangsamt. Die waagrecht verlaufende Hebung in der dritten  $T_o = -5\text{ °C}$  Phase war auf einen Messfehler zurückzuführen. Die gepunktete Linie stellt den angenommenen Hebungsverlauf während dieser Zeit dar.

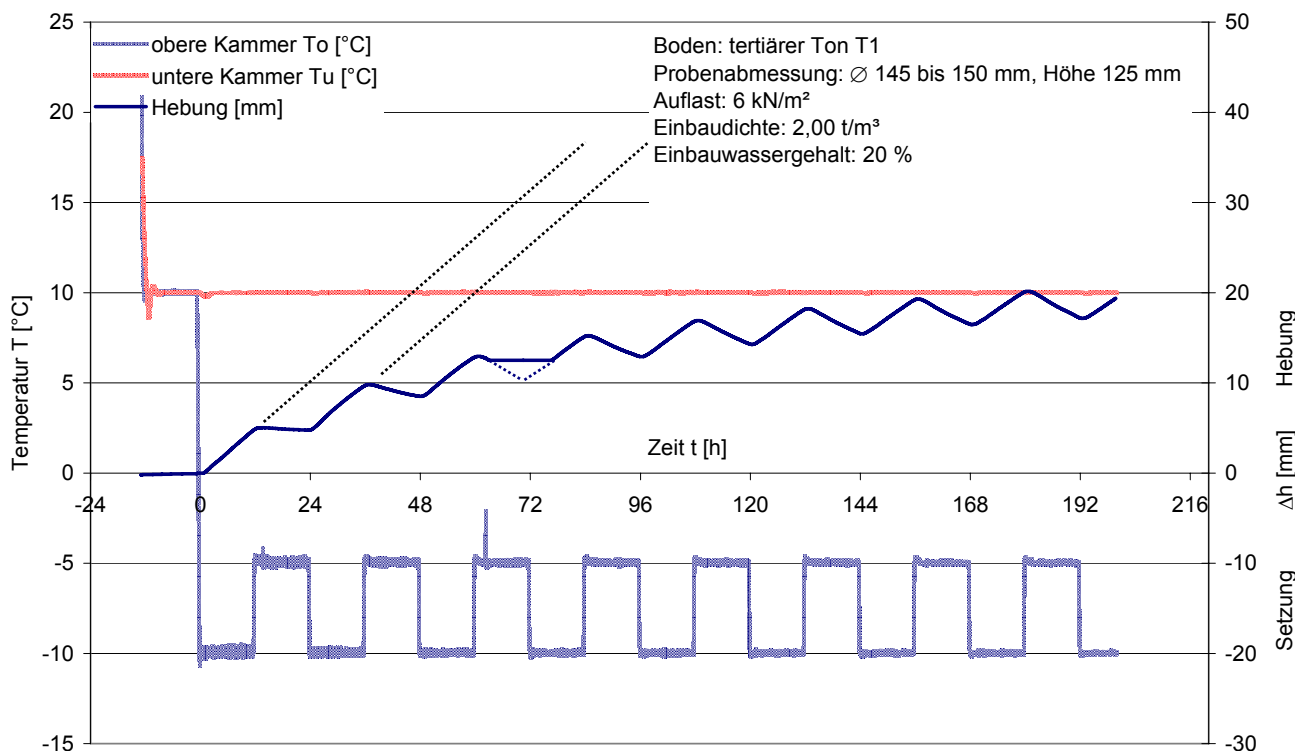


Abb. 3-25: Gemessene Hebungen im Versuch T1-6-IM (-10/-5/+10)-1

Zwei der untersuchten Proben wurden mit Temperaturfühlern instrumentiert. An jeder Probe wurden jeweils  $2 \times 5$  Temperaturfühler gleichmäßig über die Probenhöhe verteilt eingebaut. (siehe Abb. 3-26). In die während des Versuchs gemessenen Temperaturprofile wurden lineare Ausgleichsgeraden eingepasst. Die Nullpunkte dieser Geraden gaben dann näherungsweise die Lage der Null-Grad-Isotherme zum jeweiligen Zeitpunkt an. Abb. 3-27 zeigt nochmals den Hebungsverlauf des tertiären

Tones T1, ergänzt um die zeitliche Entwicklung der Null-Grad-Isotherme im tertiären Ton T1 und den Hebungsverlauf des tertiären Sandes. Der Bezugspunkt für die Lage der Null-Grad-Isotherme war die Oberkante der Filterplatte, d.h. während des Versuchs pendelte die Null-Grad-Isotherme in der Probe in einer Höhe zwischen ca. 7,5 cm und 8,5 cm, gemessen ab der Oberkante Filterplatte ab der Probenunterseite. Ergänzend ist darauf hinzuweisen, dass die mit den zwei unabhängigen Reihen von Wärmefühlern ermittelten Kurven für die Lage der Null-Grad-Isotherme deckungsgleich waren.



Abb. 3-26: Proben mit installierten Wärmefühlern nach dem Versuchsende

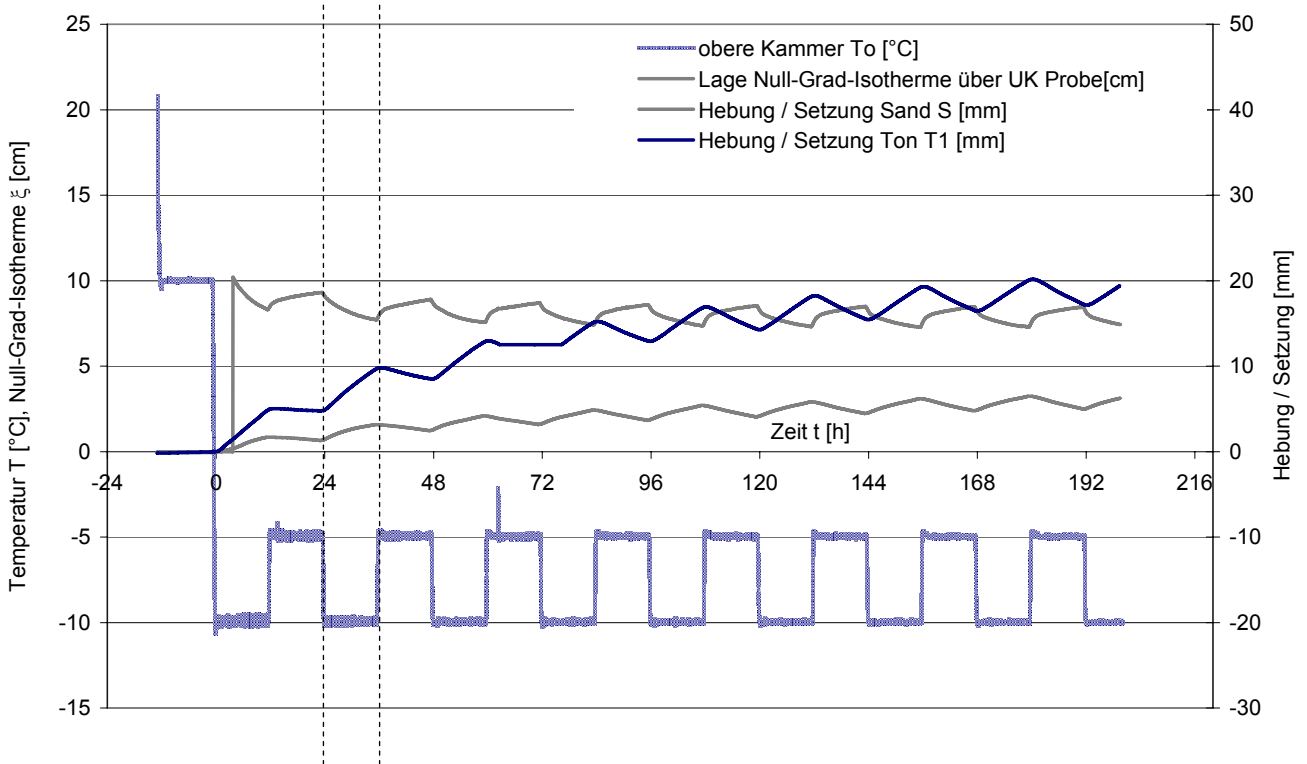


Abb. 3-27: wie Abb. 3-25, zusätzlich mit Lage der Null-Grad-Isotherme und S-6-IM (-10/-5/+10)-1



Es ist zu erkennen, dass der tertiäre Sand S qualitativ das gleiche Hebungsverhalten wie der tertiäre Ton T1 aufweist, wobei erwartungsgemäß die Hebungsbeträge im Ton größer als im Sand sind. Für den Ton wurden in den einzelnen Zyklen mit der Gefrierphase  $T_0 = -10\text{ °C}$  im Mittel  $9,1\text{ mm/d}$  gemessen. Für den Sand betrug die Hebungsgeschwindigkeit im Mittel  $1,6\text{ mm/d}$ . Zum Vergleich: Das Eislinnenwachstum des tertiären Ton T1 bei einer Auflast von  $6\text{ kN/m}^2$  betrug in den in Kapitel 3.4.3.3 vorgestellten Versuchen  $2,0\text{ mm/d}$  und das des tertiären Sandes  $1,5\text{ mm/d}$ . Während die Hebungsgeschwindigkeiten des tertiären Sandes in den Versuchen zur Eislinnenbildung und bei intermittierender Steuerung gut übereinstimmen, kam es im tertiären Ton T1 zu einer deutlichen Steigerung der Hebungsgeschwindigkeit, die nicht geklärt werden konnte. Da, wie nachfolgend gezeigt wird, bei den übrigen Versuchen die Hebungsgeschwindigkeiten bei den Versuchen zur Eislinnenbildung und bei intermittierender Steuerung zumindest grob übereinstimmen, ist zu vermuten, dass die Beschaffenheit der untersuchten Proben des tertiären Tones T1 unterschiedlich war. Dabei wird jedoch deutlich, dass bereits geringe Abweichungen in der Beschaffenheit bzw. Herstellung der Proben zu einem deutlich unterschiedlichen Hebungsverhalten führen können.

Die Null-Grad-Isotherme drang zu Beginn des Versuchs rasch in den Boden ein, wobei sich die Eindringgeschwindigkeit stetig verlangsamte. Sobald die Frosttemperatur auf  $-5\text{ °C}$  reduziert wurde, begann sich die Null-Grad-Isotherme zur Probenoberseite hin zu verschieben, wobei auch hier die Geschwindigkeit mit der Zeit abnahm. Dieses Verhalten wiederholte sich in jedem einzelnen Frostzyklus. Zur besseren Orientierung wurde in Abb. 3-27 ein Zyklus mit gestrichelten Hilfslinien markiert.

Abb. 3-28 zeigt einen Querschnitt des gefrorenen Ton-Frostkörpers nach dem Ausbau nach Versuchsende. Deutlich sind die waagrecht verlaufenden einzelnen Eislinnen zu erkennen. Es ist zu vermuten, dass durch jeden Zyklus eine eigene Eislinne erzeugt wurde.



Abb. 3-28: Detailausschnitt aus dem gefrorenen Ton-Frostkörper.

### 3.4.5.3 Versuchsreihe 2: Variation der Zeitintervalle

In einer zweiten Versuchsreihe wurden die Zeitintervalle, in denen die Gefriertemperatur zwischen  $T_0 = -5\text{ °C}$  und  $-10\text{ °C}$  wechselte, zunehmend verlängert. Es wurden jeweils zwei Wechsel der Gefriertemperatur mit Zeitintervallen von 4, 8, 12 und 16 Stunden durchgeführt. Der restliche Versuchsaufbau und -ablauf entsprach dem in Kapitel 3.4.4 beschriebenen Versuch zur Eislinnenbildung.

Die zwei untersuchten Proben zeigten ein nahezu identisches Hebungs- und Setzungsverhalten. Wie im vorangegangenen Versuch beobachtet, kam es bei jedem Wechsel der Gefriertemperatur von  $-10\text{ °C}$  auf  $-5\text{ °C}$  zu einem Abbruch der linearen Hebungsbewegungen. Die nachfolgenden Grafiken zeigen die Temperatur- und Hebungsverläufe und zusätzlich die Lage der Null-Grad-Isotherme über der Unterkante der Probe in [cm]. Im darauf folgenden Bild sind die zwei Probekörper nach dem Ausbau nach Versuchsende zu erkennen.

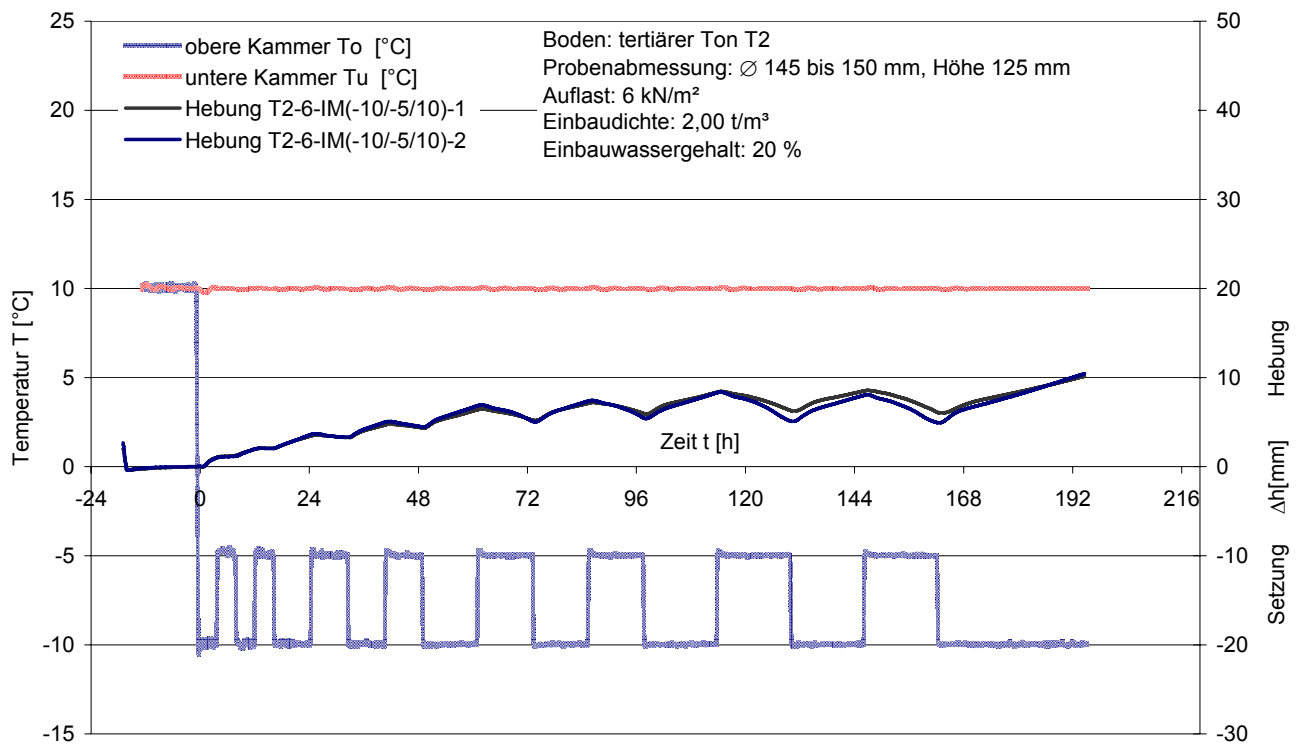


Abb. 3-29: Gemessene Hebungen in den Versuchen T2-6-IM (-10/-5/+10)-1 und -2

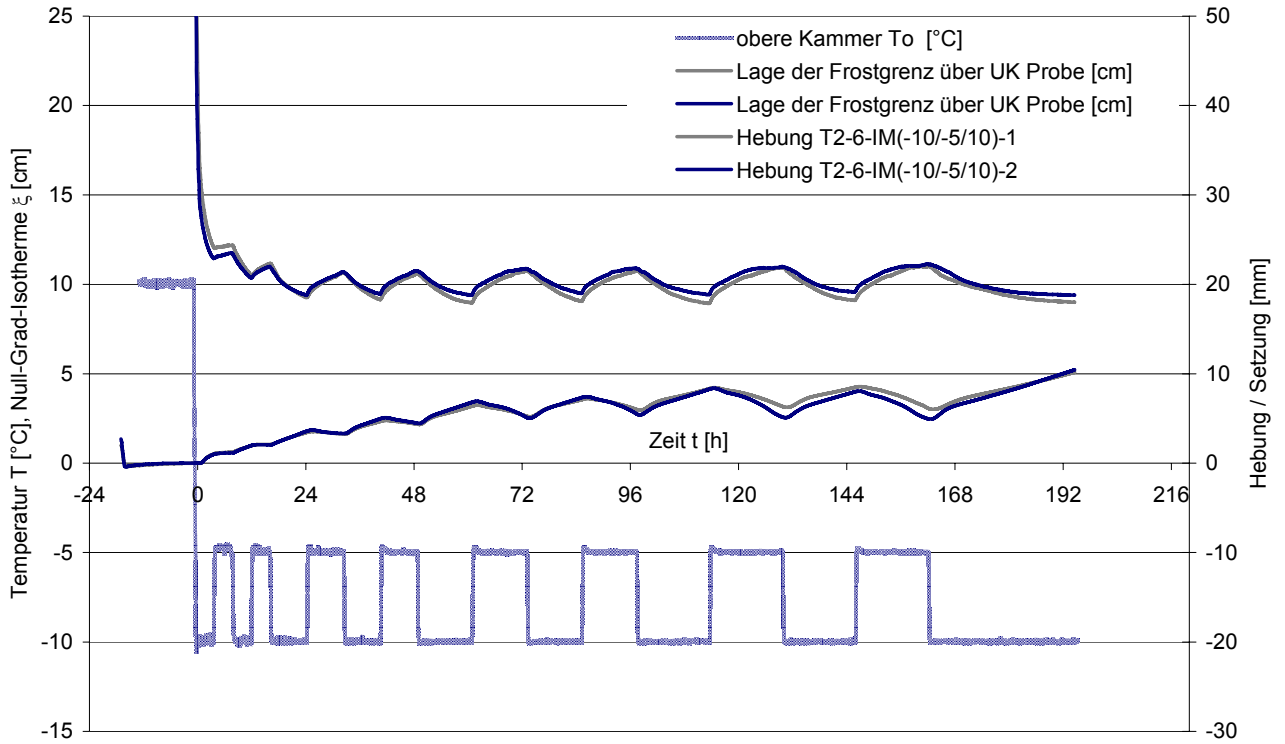


Abb. 3-30: Lage der Null-Grad-Isothermen in den Versuchen T2-6-IM (-10/-5/+10)-1 und -2



Abb. 3-31: Ansicht Probekörper 1 und Schnitt durch Probekörper 2 nach Versuchsende



Im Gegensatz zur vorangegangenen Versuchsserie bildeten sich hier keine einzelnen Eislinen, vielmehr kam es zur Ausbildung einer "Pufferzone", an deren Ober- und Unterseite jeweils eine größere Eislinse zu erkennen war. Die Pufferzone selbst zeigte im Vergleich zum vollständig gefrorenen oberen Teil des Probekörpers schuppenförmig aufgelockerte Zonen.

In der nachfolgenden Abb. 3-32 ist der Hebungsverlauf des Versuchs T2-6-IM(-10/-5/10)-2 nochmals dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in jedem Zyklus der Hebungsverlauf qualitativ gleich ist. Ausgehend von einem lokalen Minimum kommt es zunächst zu annähernd linear verlaufenden, vergleichsweise starken Hebungen. Diese wechseln dann innerhalb eines verhältnismäßig kurzen Zeitraumes von etwa einer Stunde zu ebenfalls annähernd linear verlaufenden Hebungen mit geringerer Hebungsgeschwindigkeit. In der Abbildung wurden jeweils zwei Geraden an den Hebungsverlauf in jedem Zyklus angepasst. Die Steigungen, bzw. Hebungsgeschwindigkeiten der gestrichelten Geraden betragen hierbei im Mittel 8,4 mm/d und die der gepunktet eingezeichneten Geraden 3,6 mm/d. Zum Vergleich: Das Eislinnenwachstum des tertiären Ton T2 bei einer Auflast von 6 kN/m<sup>2</sup> betrug in den in Kapitel 3.4.3.3 vorgestellten Versuchen 3,1 mm/d.

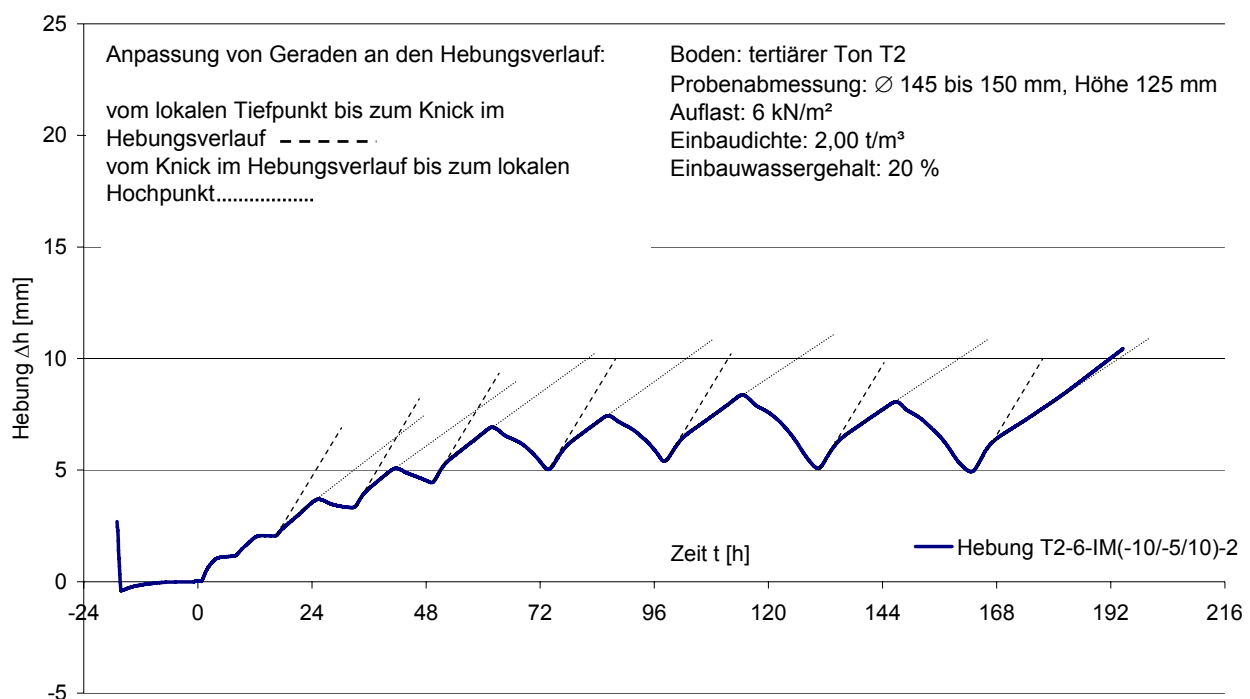


Abb. 3-32: Anpassung von Geraden an den Hebungsverlauf

### 3.4.5.4 Versuchsreihe 3: Variation der Auflast

In einer dritten Versuchsreihe wurden zwei Proben aus Kaolin K bei Auflasten von  $100 \text{ kN/m}^2$  und  $250 \text{ kN/m}^2$  gefroren. Der restliche Versuchsaufbau und -ablauf entsprach dem in Kapitel 3.4.4 beschriebenen Versuch zur Eislinsenbildung.

Die untersuchten Proben zeigten qualitativ das gleiche Hebungs- und Setzungsverhalten. Wie in den vorangegangenen Versuchen kam es bei jedem Wechsel der Gefrieretemperatur von  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  auf  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  zu einem Abbruch der linearen Hebungsbewegungen.

Die Probe mit einer Auflast von  $100 \text{ kN/m}^2$  zeigte hierbei in den einzelnen Zyklen Hebungsgeschwindigkeiten von im Mittel  $12,3 \text{ mm/d}$  und bei einer Auflast von  $250 \text{ kN/m}^2$  Hebungsgeschwindigkeiten von im Mittel  $8,2 \text{ mm/d}$ . Zum Vergleich: Das Eislinsenwachstum des Kaolin bei einer Auflast von  $100 \text{ kN/m}^2$  betrug in den in Kapitel 3.4.3.3 vorgestellten Versuchen  $12,3 \text{ mm/d}$  und bei einer Auflast von  $250 \text{ kN/m}^2$   $7,5 \text{ mm/d}$ . Die nachfolgende Abb. 3-34 zeigt zusätzlich die Lage der Null-Grad-Isotherme über der Unterkante der Probe in [cm].

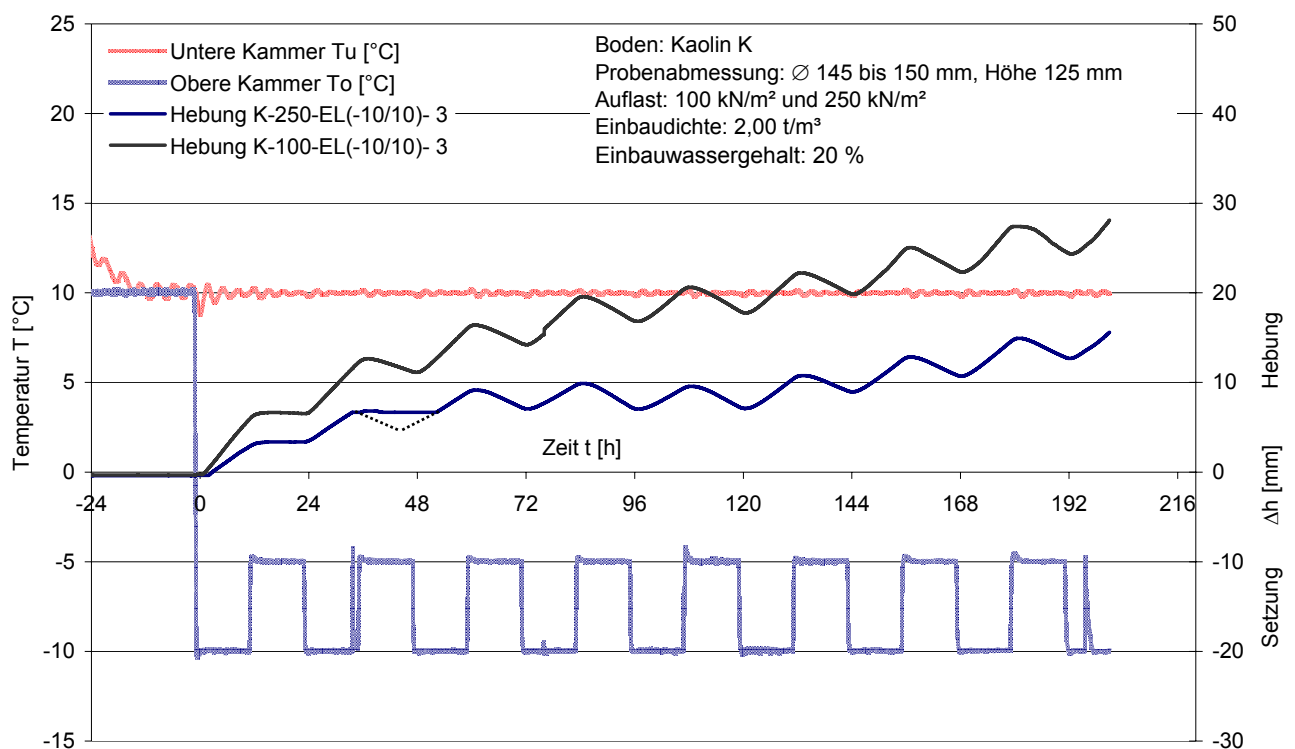


Abb. 3-33: Versuche K-100-IM (-10/-5/+10)-3 und K-250-IM (-10/-5/+10)-3

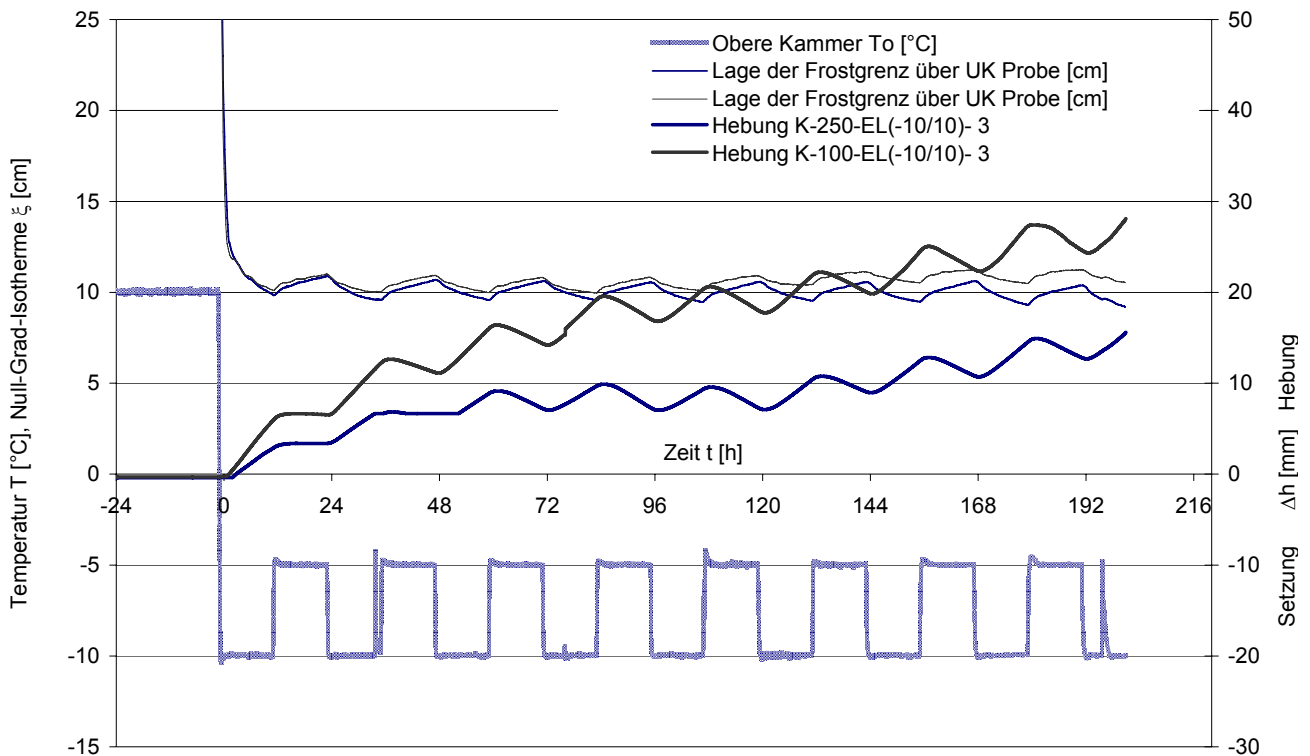


Abb. 3-34: Lage der Null-Grad-Isothermen in den Versuchen T2-6-IM (-10/-5/+10)-1 und -2

### 3.4.5.5 Beurteilung der Frosthebungsversuche mit intermittierender Steuerung

Sobald die Gefriertemperatur in den Frosthebungsversuchen intermittierend gesteuert wird, führt dies auch zu wechselnden Hebungs- bzw. Setzungsbewegungen der Probenoberseite. Erwartungsgemäß kommt es zu Hebungen, solange sich die Null-Grad-Isotherme in Richtung des ungefrorenen Bodens, bzw. der Probenunterseite bewegt und damit die Dicke der gefrorenen Bodenschicht zunimmt.

Die während dieser Phasen gemessenen Hebungsverläufe lassen sich mit einer bzw. zwei Geraden beschreiben. Die bei den 12-stündigen Zyklen mit einer Geraden, bzw. bei längeren Zyklen mit der zweiten Geraden näherungsweise ermittelten Hebungsgeschwindigkeiten zeigten bei den untersuchten natürlichen tertiären Böden Ton T2 und Sand S eine zumindest grobe und beim Kaolin K eine gute Übereinstimmung mit den Hebungsgeschwindigkeiten, wie sie in den Versuchen zur Eislinsebildung gemessen wurden und in Tabelle 3-2 angegeben sind. Die gemessenen Hebungsgeschwindigkeiten einer Probe des Tones T1 bei intermittierender Steuerung überschritten die bei stationären Temperaturverhältnissen gemessenen Geschwindigkeiten erheblich. Diese Abweichung konnte nicht geklärt werden. Es ist zu vermuten, dass Abweichungen in Zusammensetzung und/oder Herstellung der Probe zu den festgestellten Differenzen in der Hebungsgeschwindigkeit geführt haben.

Sobald die Gefriertemperatur  $T_0$  von  $-10\text{ °C}$  auf  $-5\text{ °C}$  verändert wurde, brachen die abschnittsweise linear verlaufenden Hebungen ab. Dies kann damit erklärt werden, dass für die Bildung von Eislinsen zum einen ein Wassernachschub an die Gefrierfront und zum anderen eine Wärmesenke nötig ist, welche die beim Gefrieren freiwerdende Umwandlungsenergie aufnehmen und abführen kann. Vor Ort bilden die Gefrierrohre die Wärmesenke, im Laborversuch die obere Kammer des Klimaschranks. Sobald eine der beiden Voraussetzungen nicht erfüllt ist, kann kein Eislinsewachstum stattfinden.

Diese Zusammenhänge werden im nachfolgenden Kapitel näher beschrieben. Im Versuch wurde mit der Änderung der Gefriertemperatur  $T_0$  von  $-10\text{ °C}$  auf  $-5\text{ °C}$  bewirkt, dass sich die Null-Grad-Isotherme in Richtung der Probenoberseite verschob. Solange sich die Null-Grad-Isotherme verschob, wurde dem System mehr Energie zugeführt als abgeführt. Der Energieüberschuss führte zum teilweisen Auftauen des gefrorenen Bodens. Zur Bildung von Eislinsen ist es jedoch nötig, mehr Energie aus dem System zu entnehmen als zuzuführen. Es fehlte somit eine der Voraussetzungen für die Eislinsenbildung, und in der Folge kam es zum beobachteten Abbrechen des linearen Hebungsverlaufs.

Daraus folgt, dass bei einer intermittierenden Steuerung der Gefriertemperatur das Eislinsenwachstum zeitweise unterbrochen wird, und es dadurch im Vergleich zu einer Steuerung mit stationären Temperaturverhältnissen zu geringeren Frosthebungen kommt.

## 4 Wärmetransport

### 4.1 Das Thermodynamische Gleichgewicht in geschlossenen Systemen

Jeder Stoff kann in den drei Aggregatzuständen flüssig, fest und gasförmig vorliegen. Welcher der drei möglichen Aggregatzustände zu einem bestimmten Zeitpunkt vorliegt, hängt von den Zustandsgrößen Druck  $P$ , Volumen  $V$  und Temperatur  $T$  ab, mit denen in der Thermodynamik der Zustand eines Systems beschrieben wird. Da in geschlossenen Systemen die Masse des jeweils betrachteten Stoffes konstant ist, kann anstelle des Volumens auch die Dichte des Stoffes betrachtet werden.

Der Verlauf der Grenzen zwischen den Aggregatzuständen wird in Abhängigkeit der drei Zustandsgrößen durch ein dreidimensionales Diagramm beschrieben. Projiziert man die dreidimensionalen Gebiete auf die (zweidimensionale) Ebene mit den Variablen Druck und Temperatur, so erhält man für Wasser das in Abb. 4-1 dargestellte vereinfachte Diagramm, bei dem die Volumen-Achse normal zur Blattebene steht. Hierin werden die Gleichgewichtszustände zwischen den Aggregatzuständen fest und flüssig durch die Schmelzdruckkurve beschrieben. Die Dampfdruckkurve beschreibt das Gleichgewicht zwischen den Aggregatzuständen gasförmig und flüssig und die Sublimationskurve den Übergang von fest zu gasförmig. Es gibt nur eine mögliche Kombination der drei thermischen Zustandsgrößen, in der zeitgleich alle Aggregatzustände vorliegen können. Dieser Punkt wird als Tripelpunkt bezeichnet.

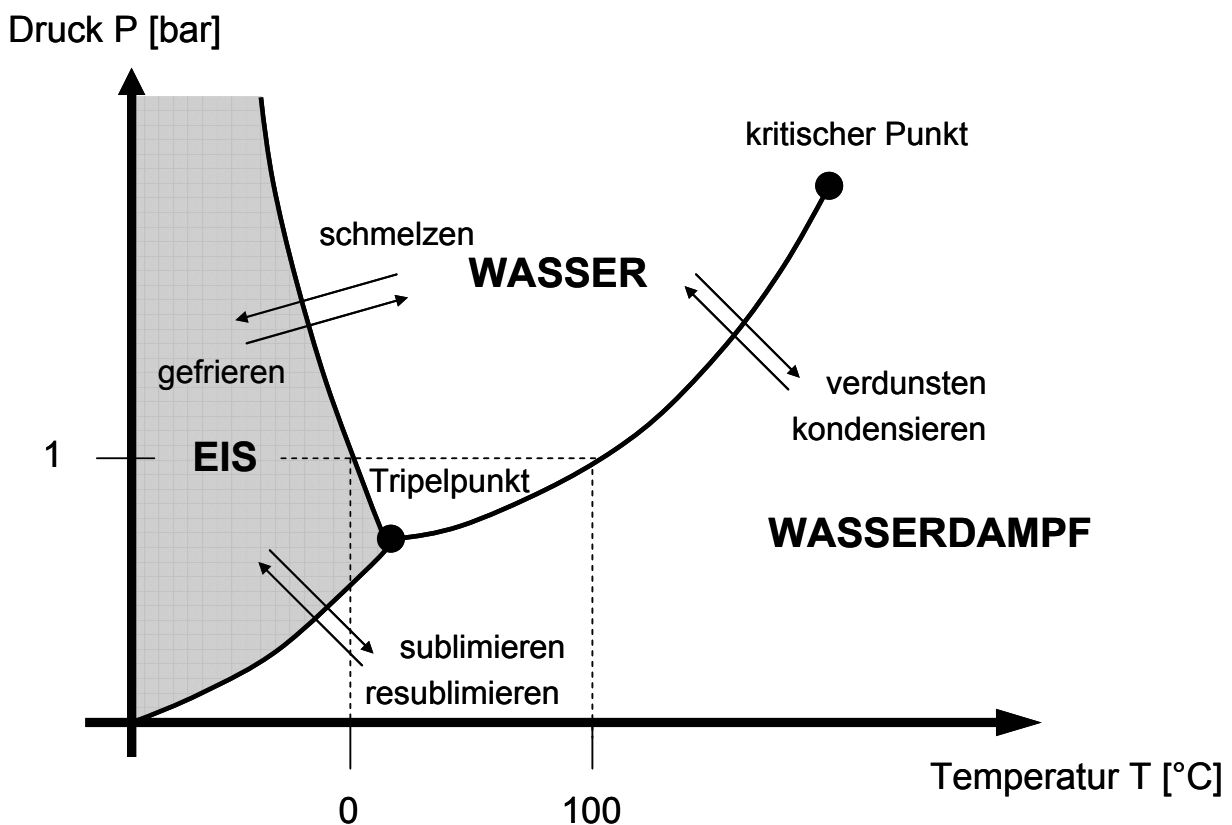


Abb. 4-1: schematisches Druck-Temperatur Phasendiagramm für Wasser

Kühlt man flüssiges Wasser unter atmosphärischen Bedingungen, also bei einem Luftdruck von 1 bar auf unter 0°C ab, so gefriert es zu Eis. Erhitzt man es auf über ca. 100 °C, dann siedet es und verdunstet zu Wasserdampf. In Abb. 4-1 ist diese Abhängigkeit durch eine waagrechte gestrichelte Linie dargestellt. Durch Temperatur- bzw. Druckänderungen lassen sich auf diese Art eine Vielzahl von Wertepaaren einstellen, die die Grenzen der Aggregatzustände bilden. Sollen nun an einer Stelle gleichzeitig sowohl Wasser als auch Eis vorliegen, so sind die möglichen Zustände durch Wertepaare erfüllt, die auf der Schmelzdruckkurve liegen. Die Temperaturabhängigkeit des Gleichgewichtsdruckes  $P(T)$  bei Phasengleichgewichten wurde durch CLAPEYRON 1834 aufgestellt und von CLAUDIUS 1850 in ihrer allgemeinen Form angegeben. Die Clausius-Clapeyron-Gleichung lautet:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H_s}{T(V_1 - V_2)} \quad (4.1)$$

Bei der Beschreibung des Phasengleichgewichtes zwischen flüssiger und fester Phase ist  $\Delta H_s$  die spezifische Schmelzenthalpie,  $dP / dT$  die Neigung der Schmelzdruckkurve und  $V_1$  bzw.  $V_2$  sind die molaren Volumina der beiden Aggregatzustände. Die Schmelzdruckkurve beginnt am Tripelpunkt des Wassers, der nach GUILDNER, JOHNSON & JONES (1976) bei  $611,657 \pm 0,010$  Pa und  $273,16$  K ( $\cong 0,01$  °C) liegt.

Unter der Voraussetzung, dass die Schmelzenthalpie  $\Delta H_s$  eine Konstante ist, kann man (4.1) integrieren, und man erhält Wertepaare von Druck und Temperatur ( $P, T$ ), bei der die beiden Phasen flüssig und fest koexistieren. In der nachfolgenden Tabelle 4-1 sind ausgewählte Wertepaare nach LIDE (1999) angegeben

Temperatur $\theta$ [°C]	Druck $P$ [MPa]
0,00	0,1
-0,06	1,0
-0,14	2,0
-0,36	5,0
-0,74	10,0
-8,80	100,0
-20,69	200,0

Tabelle 4-1: Punkte der Schmelzdruckkurve von Wasser nach LIDE (1999)

In der Realität besitzt Wasser nicht wie in Abb. 4-1 dargestellt eine einzige feste Form Eis. Der dort grau hinterlegte Bereich kann weiter unterteilt werden. Derzeit sind 18 verschiedene feste Formen von Eis bekannt: 13 kristalline und 5 amorphe. Natürliches Eis bildet hexagonale Kristalle, es sind aber auch kubische Kristalle und amorphe Strukturen ohne Kristallstruktur bekannt. Ein detailliertes Phasendiagramm findet sich beispielsweise in SYDNEY (1966). Für Gefriervorgänge bei künstlichen Bodenvereisungen und die dafür typischen Temperatur- und Druckzustände wird das in Abb. 4-1 dargestellte Diagramm jedoch für ausreichend erachtet.

Nachfolgend werden die Zusammenhänge für Wasser in dem in Abb. 4-2 dargestellten, geschlossenen einfachen System diskutiert. In einem geschlossenen Gefäß befindet sich Wasser. Dieses wird

durch einen dicht schließenden Stempel auf seiner Oberfläche belastet. Das System sei gleichzeitig wasserundurchlässig und von außen temperierbar, d.h. energiedurchlässig.

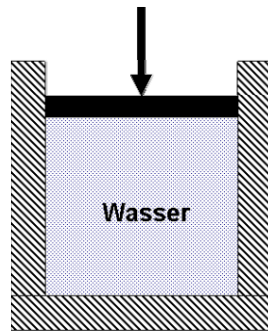


Abb. 4-2: Modellvorstellung zur Veranschaulichung von Druck und Temperatur

Kühlt man das Wasser bei einem Luftdruck von ca. 1 bar auf unter  $0^{\circ}\text{C}$  ab, so gefriert es zu Eis und der Stempel wird sich infolge der Volumenvergrößerung beim Phasenwechsel heben. Kühlt man das Wasser auf unter  $0^{\circ}\text{C}$  ab und arretiert gleichzeitig den Stempel, so dass sich keine Volumenvergrößerung einstellen kann, so werden sich in Abhängigkeit der Temperatur die in Tabelle 4-1 genannten Drücke innerhalb des Systems einstellen. In einem geschlossenen System können demnach Gefrierdrücke von mehreren hundert bar entstehen, wenn eine Volumenvergrößerung behindert wird.

In der folgenden Betrachtung wird im System von Abb. 4-2 der Druck konstant bei 1 bar gehalten und zeitgleich das im Behälter enthaltene Wasser abgekühlt und gefroren. Gedanklich fährt man die in Abb. 4-1 bei einem Druck von 1 bar gestrichelt dargestellte waagrechte Linie entlang, betrachtet aber diesmal in dem von den thermischen Zustandsgrößen Druck  $P$ , Volumen  $V$  und Temperatur  $T$  aufgespannten Raum einen Schnitt senkrecht zur  $P$  – Achse. Der Einfluss der Temperatur auf die dritte thermische Zustandsgröße, das Volumen  $V$  bzw. die Dichte  $\rho$  bei einem gleich bleibenden Druck von 1 bar ist in Abb. 4-3 nach VDI-WÄRMEATLAS (1974) und LANDOLT-BÖRNSTEIN (1972) dargestellt. Darin ist zunächst die bekannte Dichteanomalie von Wasser zu erkennen. Die höchste Dichte und damit das geringste Volumen besitzt Wasser bei einer Temperatur von  $+4^{\circ}\text{C}$ . Beim Gefrieren nimmt das Volumen um ca. 9 % zu. Der Stempel im System in Abb. 4-2 würde dabei nach oben gedrückt. Ergänzend ist anzumerken, dass Wasser unter bestimmten Randbedingungen auch unter  $0^{\circ}\text{C}$  in flüssigem Zustand vorliegen kann. Man spricht dann von unterkühltem Wasser.

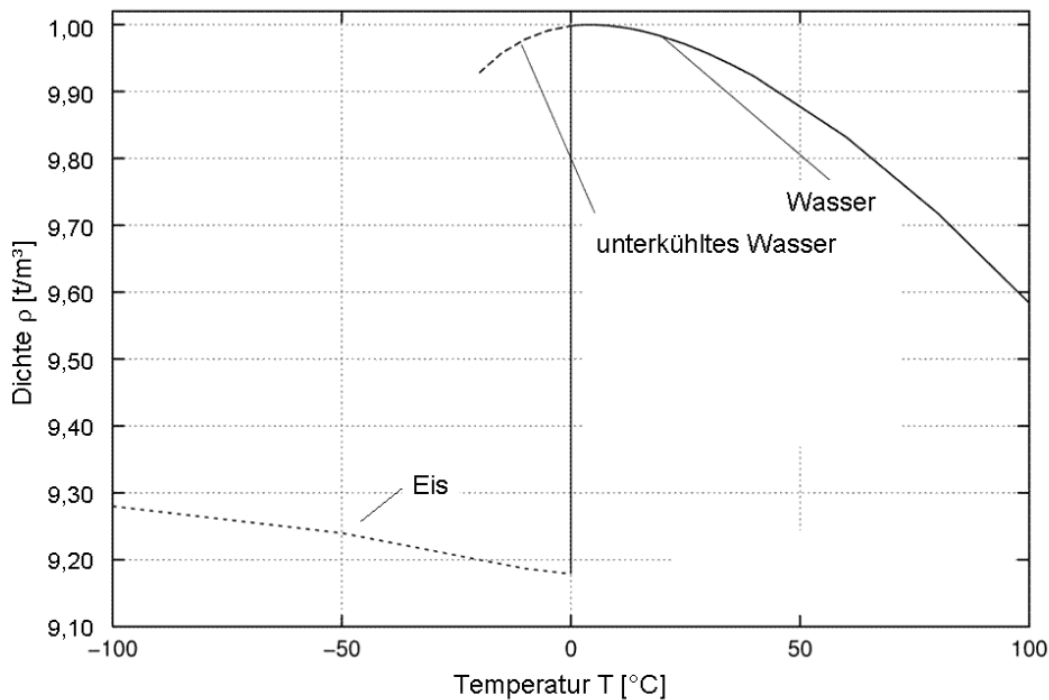


Abb. 4-3: Temperatur-Volumendiagramm für Wasser bei 1 bar nach VDI-WÄRMEATLAS (1974).

Beim Abkühlen und Gefrieren des Wassers wird Energie frei, die in Abb. 4-2 über die Behälterwandungen abgeführt werden muss. Wird ein Kilogramm Wasser um 1 Kelvin abgekühlt, so wird eine Energie von 4183 Joule frei. Beim Phasenübergang vom flüssigen in den gefrorenen Zustand wird zusätzlich Energie in Form latenter Schmelzwärme von 332.500 Joule frei. Reines Wasser besitzt die physikalischen Konstanten:

$$\text{Spezifische Wärmekapazität} \quad C_m = 4183 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

$$\text{Latente Schmelzwärme} \quad \Delta H_s = 332.500 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]$$

Die große Energiemenge, die insbesondere bei Phasenübergängen frei bzw. gebunden wird, lässt sich durch einen einfachen Vergleich verdeutlichen. Die gleiche Energiemenge, die beim Gefrieren von einem Kilogramm Wasser freigesetzt wird, würde ausreichen, diese Masse auf eine Geschwindigkeit von 815 m/s oder knapp 3000 km/h zu beschleunigen. Die gleiche Energiemenge würde auch ausreichen, um Wasser mit einer Temperatur von +0 °C auf eine Temperatur von rund 80 °C zu erwärmen.

## 4.2 Die Neumann-Lösung für die eindimensionale Frosteindringung

Bisher wurde das betrachtete Volumen nur in gefrorenem oder ungefrorenem Zustand betrachtet. In diesem Kapitel soll auch auf den Gefriervorgang selbst und die zeitliche Entwicklung der Null-Grad-Isotherme bei der eindimensionalen Frosteindringung in einen Boden eingegangen werden. Die ana-



lytische Lösung für den isotrop homogenen Halbraum ohne Konvektionsströmungen geht auf Neumann zurück. Die vollständige Herleitung ist beispielsweise in GRÖBER (1955) enthalten. Nachfolgend werden das Problem und seine Lösung in Teilen vorgestellt, soweit sie für die spätere Formulierung des Massentransportes von Belang sind.

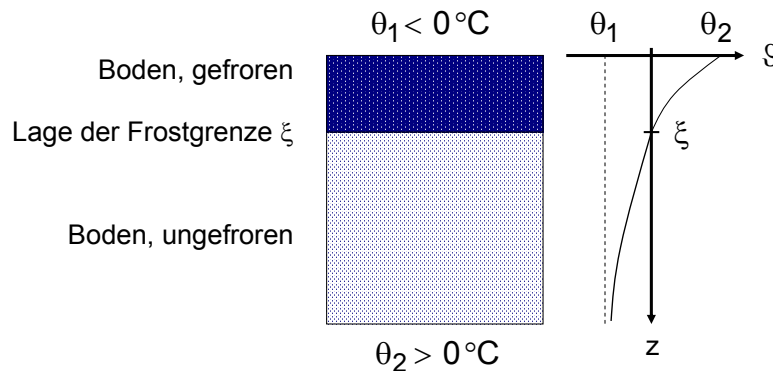


Abb. 4-4: zeitliche Entwicklung der Frosteindringung in einen Boden

Das in Abb. 4-4 dargestellte Bodenelement besitzt im Ausgangszustand eine Temperatur  $\theta_2 > 0 \text{ °C}$  und wird zum Zeitpunkt  $t = 0$  auf der Oberseite mit einer Gefriertemperatur  $\theta_1 < 0 \text{ °C}$  beaufschlagt. Die Tiefe wird mit der Koordinate  $z$  beschrieben, wobei mit  $\xi(t)$  in Übereinstimmung mit GRÖBER (1955) die Lage der Null-Grad-Isotherme zum Zeitpunkt  $t$  bezeichnet wird. Der Index 1 steht in Übereinstimmung mit der überwiegenden Zahl der Quellenangaben für den gefrorenen Boden, der Index 2 für den ungefrorenen Boden. Da die wärmetechnischen Parameter Wärmekapazität  $C_m$  und Temperaturleitzahl  $a$  bei gefrorenem und ungefrorenem Boden unterschiedlich sind, werden zwei Parametersätze verwendet, die durch Indizes unterschieden werden.

Zur Bestimmung der Lage der Null-Grad-Isotherme  $\xi(t)$  müssen die Gleichungen für den Wärmetransport und die Wärmebilanz aufgestellt und an die Rand- und Übergangsbedingungen angepasst werden.

Als Eingangsgrößen in die Berechnung dienen:

- $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ : die Wärmeleitfähigkeit des Bodens im gefrorenen und ungefrorenen Zustand; Ermittlung beispielsweise mit der Heißdrahtmethode nach EN 993-14/15 (früher: DIN 51046) oder Abschätzung aufgrund von Erfahrungswerten.
- $C_{m,1}$  und  $C_{m,2}$ : die Wärmekapazität des Bodens im gefrorenen und ungefrorenen Zustand; Ermittlung beispielsweise mit der Methode der Dynamischen Differenzkalorimetrie nach DIN 51007 oder Abschätzung aufgrund von Erfahrungswerten.
- $\rho_2$ : die Feuchtdichte des ungefrorenen Bodens; Ermittlung nach DIN 18125
- $\Delta H_s$ : die spezifische Schmelzenthalpie von Wasser (physikalische Konstante)
- $\theta_0$   $\theta_1$   $\theta_2$ : thermische Randbedingungen des Systems, wobei die Konstante  $\theta_0$  die Gefriertemperatur des betrachteten Stoffes darstellt. Aufgrund des für die nachfolgenden Betrachtungen maßgebenden, im Boden enthaltenen Porenwassers gilt hier also  $\theta_0 = 0 \text{ °C}$ .
- $t$ : zeitliche Randbedingung des Systems, Dauer der Frosteinwirkung

Aus den genannten Eingangsgrößen werden für thermodynamische Berechnungen üblicherweise die folgenden Abkürzungen abgeleitet:

- die Wärmeleitzahl  $a$ , auch Temperaturleitzahl:  $a = \lambda / (C_m \cdot \rho)$  (4.2)

– die Wärmeeindringzahl  $b$ :  $b = \sqrt{\lambda \cdot C_m \cdot \rho}$  (4.3)

### Transportgleichungen für Wärme

Das Temperaturfeld  $\vartheta(z,t)$  des betrachteten eindimensionalen Wärmetransports lässt sich durch die bekannte Fourier-Differentialgleichung beschreiben:

Für den gefrorenen Teil mit  $0 < z < \xi$  gilt:

$$\frac{\partial \vartheta_1}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 \vartheta_1}{\partial z^2} \quad (4.4)$$

Für den ungefrorenen Teil mit  $\xi < z < +\infty$  gilt:

$$\frac{\partial \vartheta_2}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 \vartheta_2}{\partial z^2} \quad (4.5)$$

Exemplarisch wird nachfolgend das den genannten Gleichungen genügende Temperaturfeld  $\vartheta(z,t)$  für ein Bodenelement der Länge 1 grafisch dargestellt. Im Ausgangszustand zum Zeitpunkt  $t = 0$  soll der Boden eine einheitliche Temperatur von  $+10^\circ\text{C}$  besitzen. Danach wird die linke Probenseite bei  $z = 1$  schlagartig auf  $-10^\circ\text{C}$  abgekühlt. Die rechte Probenseite bei  $z = 0$  wird so beheizt, dass sie auf Dauer eine Temperatur von  $+10^\circ\text{C}$  beibehält.

In Abb. 4-5 ist das Temperaturfeld in Abhängigkeit von der Zeit grafisch dargestellt. Das Temperaturprofil zu verschiedenen Zeitpunkten kann durch Schnitte senkrecht zur Zeitachse ermittelt werden. Es ist zu erkennen, dass das Probeninnere mit der Zeit abkühlt, wobei der abschnittsweise lineare Temperaturverlauf des stationären Zustandes im betrachteten Zeitraum nicht ganz erreicht wird. Zur Verdeutlichung wird in Abb. 4-6 noch einmal die Projektion in die Temperatur-Probenabmessung-Ebene dargestellt, in der die zu verschiedenen Zeitpunkten vorhandenen Temperaturprofile als einzelne Linien erkennbar sind.

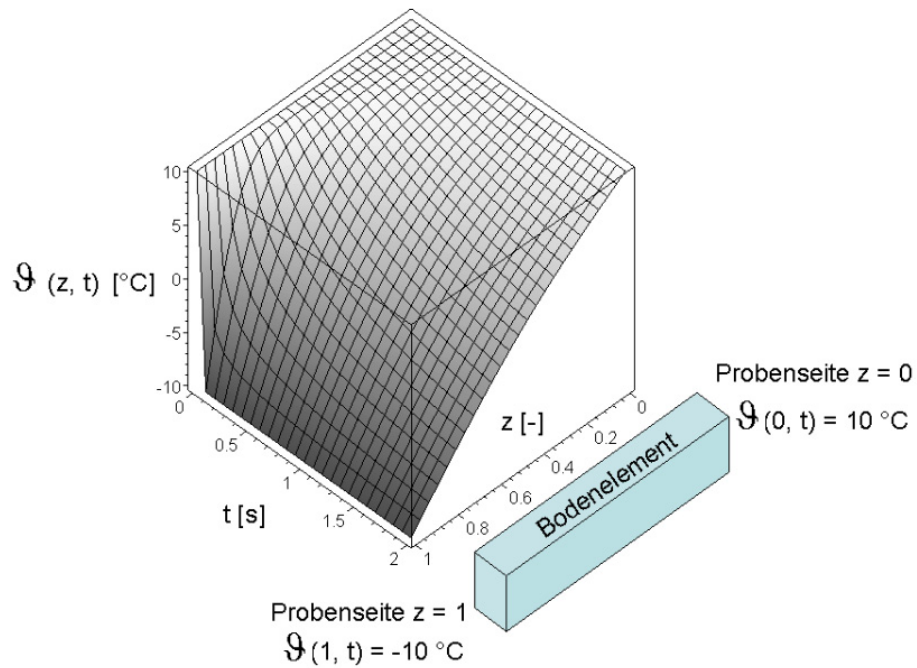


Abb. 4-5: eindimensionales Temperaturfeld

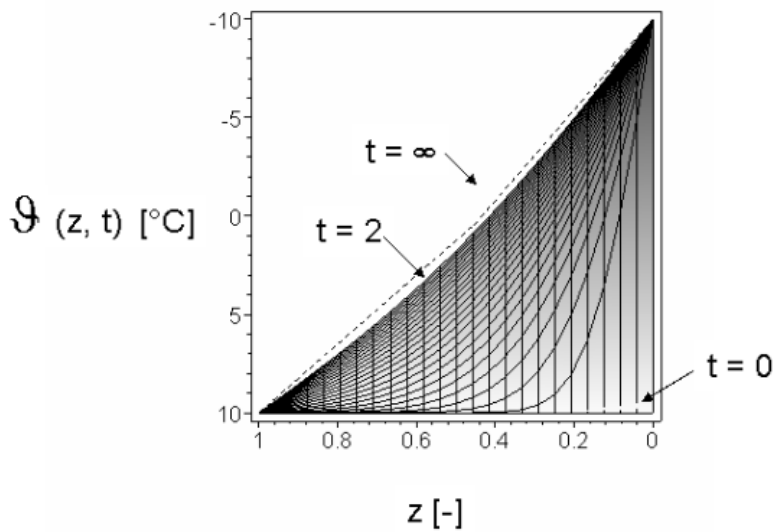


Abb. 4-6: Projektion auf die Temperatur- Proben-Ebene

Zum Zeitpunkt  $t = \infty$  stellt sich mit Erreichen eines stationären Wärmestroms ein über die Höhe des Bodenelements abschnittsweise linearer Temperaturverlauf ein. An der Frostgrenze kommt es aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit für den gefrorenen und ungefrorenen Zustand zu einem Knick.

In den Transportgleichungen (4.4) und (4.5) ist der Phasenübergang beim Gefrieren des Porenwassers noch nicht enthalten. Dieser wird über eine Bilanzierung der Wärmeströme erfasst.

**Wärmebilanz**

Der Gefriervorgang ist ein instationärer Wärmetransport, bei dem sich ein Wärmestrom von den warmen zu den kalten Bodenzonen einstellt. Die beim Abkühlen des Bodens und beim Gefriervorgang freiwerdende Wärme muss durch den gefrorenen Boden abgeleitet werden. Die Wärmebilanz wird für den Zeitraum  $dt$  aufgestellt, in dem die Null-Grad-Isotherme um den Betrag  $d\xi$  fortschreitet. Beim Gefriervorgang muss im Zeitraum  $dt$  das infinitesimale Bodenvolumen  $dA \cdot d\xi$  gefroren werden. Bei diesem Vorgang wird die Wärmemenge  $Q$  frei:

$$Q = \Delta H_s \cdot \rho_2 \cdot dA \cdot d\xi \quad (4.6)$$

Mit der zusätzlich abzuleitenden Vorkühlwärme des Bodens ergibt sich die Wärmebilanz zu:

$$\Delta H_s \cdot \rho_2 \cdot dA \cdot d\xi + \lambda_2 \cdot \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right)_{0 < z < \xi} \cdot dA \cdot dt = \lambda_1 \cdot \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right)_{\xi < z < \infty} \cdot dA \cdot dt \quad (4.7)$$

**Anfangsbedingung**

Zum Zeitpunkt  $t = 0$  ist der Boden ungefroren und das Temperaturfeld besitzt den Wert  $\theta_2$ :

$$\vartheta_2(z, 0) = \theta_2 \quad (4.8)$$

**Randbedingungen**

An der Oberfläche gilt für  $t > 0$ :

$$\vartheta_1(0, t) = \theta_1 \quad (4.9)$$

In sehr großer Tiefe gilt für  $t > 0$ :

$$\vartheta_1(\infty, t) = \theta_2 \quad (4.10)$$

Am Übergang vom gefrorenem zum ungefrorenem Boden bei  $z = \xi$  gilt:

$$\vartheta_1(\xi, t) = \vartheta_2(\xi, t) = 0^\circ\text{C} \quad (4.11)$$

**Lösung**

Neumann hat das durch die obigen sechs Gleichungen vollständig beschriebene Problem analytisch gelöst und eine Funktion für die zeitliche Lage der Null-Grad-Isotherme gefunden.

$$\xi(t) = p\sqrt{t} \quad (4.12)$$

Die Konstante  $p$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-0,5}$ ] ist hierbei durch folgende implizite Gleichung definiert, die alle wärmetechnischen Stoffparameter enthält.

$$\Delta H_s \cdot \rho_2 \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot p = b_1 \cdot (\theta_0 - \theta_1) \cdot \frac{e^{-\frac{p^2}{4 \cdot \alpha_1}}}{G\left(\frac{p}{\sqrt{4 \cdot \alpha_1}}\right)} + b_2 \cdot (\theta_2 - \theta_0) \cdot \frac{e^{-\frac{p^2}{4 \cdot \alpha_2}}}{1 - G\left(\frac{p}{\sqrt{4 \cdot \alpha_2}}\right)} \quad (4.13)$$

Die Funktion  $G$  ist das Gaußsche Fehlerintegral  $G$  und stellt eine Lösung der Differentialgleichungen (4.1) und (4.2) für den Wärmetransport dar. Es gilt  $G(0) = 0$  und  $G(\infty) = 1$ , wodurch die Lösung bei den gegebenen Randbedingungen wesentlich vereinfacht wird.

$$G(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z e^{-\eta^2} d\eta \quad (4.14)$$

Die Lösung der Gleichung (4.13) nach  $p$  kann als Schnittpunkt der Geradengleichung der linken Seite mit der transzendenten Gleichung der rechten Seite interpretiert werden. Setzt man die Gleichungen (4.2), (4.3) und (4.14) in die Gleichung (4.13) ein, verbleibt die gesuchte Proportionalitätskonstante  $p$  als einzige Unbekannte. Die Gleichung kann eindeutig gelöst werden, da sich Gerade und Kurve in genau einem Punkt schneiden. Dieser Punkt wurde früher auf graphischem Wege bestimmt. Heute kann man sich die Eindeutigkeit des Schnittpunktes dahingehend zu Nutze machen, dass man ohne großen Aufwand  $p$  auf numerisch - iterativem Weg bestimmt. Hierfür und für die Lösung der im nachfolgenden Kapitel aufgestellten Gleichung wurde auf die im Programmpaket Maple V8 [W3] enthaltenen Gleichungslöser und Integrationsalgorithmen zurückgegriffen.

#### Beispiel

Nachfolgend wird die zeitliche Entwicklung der Frosteindringung in einen tertiären Ton berechnet, wie sie mit den in Kapitel 3 beschriebenen Laborversuchen ermittelt wurde. Die für die Berechnungen nötigen Bodenparameter werden unten nochmals aufgeführt, die thermischen Bodenparameter wurden ORTH (2003) entnommen.

#### Bodenkennwerte:

- Wassergehalt:  $w = 0,20$
- Dichte:  $\rho_2 = 2,07 \text{ g/cm}^3$

#### Wärmetechnische Kennwerte:

- Wärmeleitfähigkeit, gefroren:  $\lambda_1 = 1,95 \text{ W/mK}$
- Wärmeleitfähigkeit, ungefroren:  $\lambda_2 = 1,75 \text{ W/mK}$
- Wärmekapazität, gefroren:  $C_{m,1} = 2,02e+06 \text{ J/m}^3\text{K}$
- Wärmekapazität, ungefroren:  $C_{m,2} = 2,71e+06 \text{ J/m}^3\text{K}$

#### Randbedingungen:

- Gefriertemperatur:  $\theta_0 = \pm 0,00 \text{ }^\circ\text{C}$
- Frosttemperatur:  $\theta_1 = -10,00 \text{ }^\circ\text{C}$
- Bodentemperatur:  $\theta_2 = +10,00 \text{ }^\circ\text{C}$

Mit den Gleichungen (4.2), (4.3) sowie (4.13), (4.14) berechnet sich die zeitliche Lage der Null-Grad-Isotherme mit (4.12) zu:

$$\xi(t) = 4.72 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{t}$$

Hierbei ist die Dauer der Frosteinwirkung  $t$  in [s] einzusetzen. Die Lage der Null-Grad-Isotherme besitzt die Einheit [m]. Die Grafik in Abb. 4-7 zeigt die Lage der Null-Grad-Isotherme in Abhängigkeit von der Dauer der Frosteinwirkung. Nach einer Frosteinwirkung von 5 Stunden ( $t = 18.000 \text{ s}$ ) ist der Boden bis in eine Tiefe von rund 6 cm gefroren. In Abb. 4-8 ist

ein Detailausschnitt bis eine Sekunde nach Frostbeginn dargestellt. Die gepunktete Linie stellt hierbei die Ableitung der Frosteindringung, also die Frosteindringgeschwindigkeit dar. Es ist zu erkennen, dass für den vorliegenden Fall der eindimensionalen Frosteindringung die rechnerisch ermittelte Eindringgeschwindigkeit zu Beginn unendlich groß ist und dann sehr schnell abnimmt.

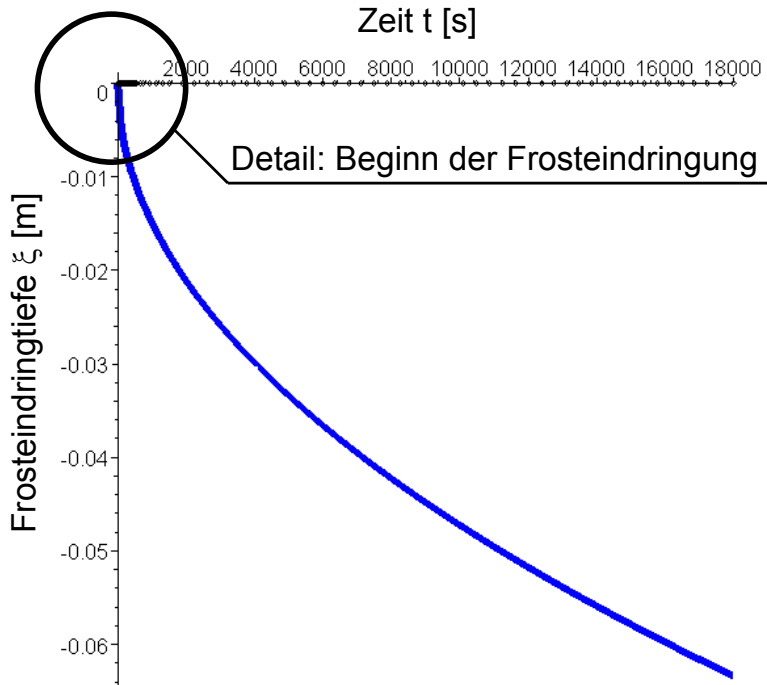


Abb. 4-7: Frosteindringung innerhalb von 5 Stunden

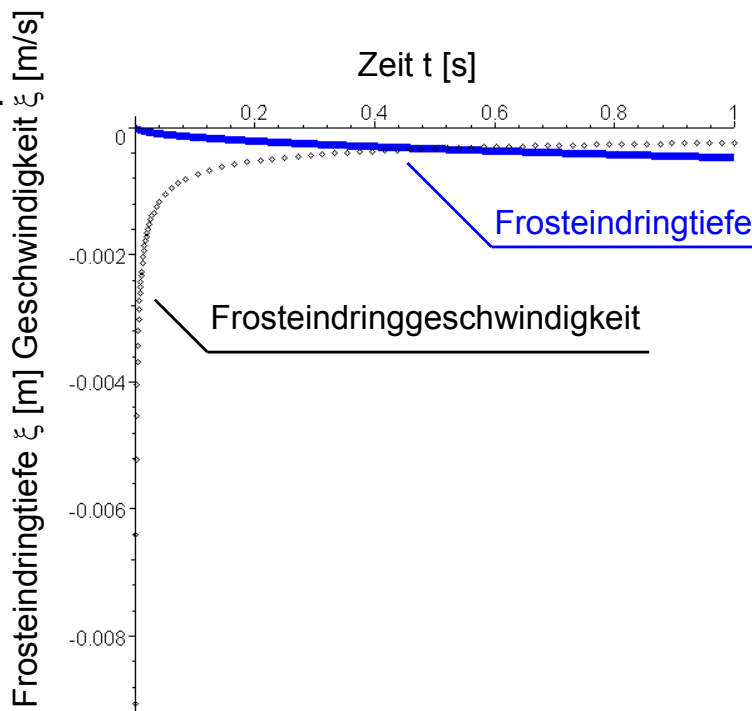


Abb. 4-8: Detail: Frosteindringung innerhalb der ersten Sekunde

## 5 Stofftransport und Frosthebungen

### 5.1 Die Frosthebung im undrÄnirten System bei VollsÄttigung

Ungefrorener Boden ist ein Dreikomponentengemisch aus Porenwasser, Luft und Feststoff. Beim Gefrieren erfÄhrt das Porenwasser eine Volumenvergrößerung um ca. 9 %. Stellt man sich in Abb. 4-2 anstelle des reinen Wassers eine vollgesÄttigte Bodenprobe vor, so lÄsst sich die Frosthebung an der Probenoberseite unter den folgenden Randbedingungen leicht abschÄtzen:

- undrÄnirte VerhÄltnisse
- vollgesÄttigter Boden ( $S_r = 1$ )
- die Frosthebungen kÖnnen nur einaxial auftreten
- das gesamte Porenwasser wird gefroren, d.h. der Anteil des tatsÄchlich vorhandenen ungefrorenen Porenwassers wird gleich Null gesetzt.

Betrachtet wird eine würfelfÖrmige Bodenprobe der KantenlÄnge 1. Der Wassergehalt ist definiert zu:

$$w = \frac{m_w}{m_d} = \frac{\rho_w \cdot V_w}{\rho_d \cdot V} \quad (5.1)$$

Mit  $\rho_w = 1,0 \text{ g/cm}^3$  und  $V = 1,0 \text{ cm}^3$  nach dem in der Bodenprobe enthaltenen Wasservolumen aufgelÖst:

$$V_w = w \cdot \rho_d \cdot \frac{V}{\rho_w} \quad (5.2)$$

Das gesuchte Wasservolumen kann anschaulich als ein Prozentsatz des Einheitsvolumens  $V = 1$ , also  $V = 100 \%$  gelesen werden. Beim Gefriervorgang wird dieses Volumen um 9 % vergrÖßert.

$$V_{w,1} = 1,09 \cdot V_w \quad (5.3)$$

Bei seitlich behinderter Dehnung föhrt die Volumenzunahme beim betrachteten Einheitselement der KantenlÄnge 1 zu einer Frosthebung von:

$$H_{Vol} = V_{w,1} - V_w = 0,09 \cdot w \cdot \rho_d \cdot \frac{V}{\rho_w \cdot A} \quad (5.4)$$

Die Hebung auf der Probenoberseite  $H_{Vol}$  ist betragsmÄßig gleich der Volumenzunahme, da die GrundflÄche  $A = 1$  zu setzen ist. Die auf diese Weise ermittelten HebungsbetrÄge stellen eine obere Schranke föh die Hebungen dar, die unter drainierten Bedingungen und / oder unter TeilsÄttigung zu erwarten sind. Nachfolgend wird zwischen der volumetrischen Frosthebung  $H_{Vol}$  mit der Einheit [m] und der **bezogenen** volumetrischen Frosthebung  $Vol_H$  mit der Einheit [%], bzw. [-] unterschieden. Die bezogene volumetrische Frosthebung  $Vol_H$  ist hierbei das VerhÄltnis der Dicke einer gefrorenen Bodenschicht zu der beim Gefrieren dieser Schicht entstandenen volumetrischen Frosthebung.

Erste Fortsetzung des Beispiels aus Kapitel 4.2:

Der betrachtete tertiäre Ton besitzt eine Feuchtdichte von  $\rho = 2,07 \text{ g/cm}^3$  und einen Wassergehalt von  $w = 20 \%$ . Im undrainierten Fall und unter Vollsättigung ergibt sich für ein Einheits-element der Kantenlänge 1 cm die folgende einaxiale volumetrische Hebung:

Zunächst wird die Trockendichte berechnet:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w} = \frac{2,07}{1+0,2} = 1,73 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Die Hebung der Probenoberfläche nach Gleichung (5.4) beträgt:

$$H_{\text{Vol}} = 0,09 \cdot w \cdot \rho_d \cdot \frac{V}{\rho_w} = 0,09 \cdot 0,20 \cdot 1,73 \cdot 1 = 0,03 \text{ cm.}$$

Bei der Betrachtung eines Einheitselementes ist der Betrag der volumetrischen Hebung  $H_{\text{Vol}}$  gleich dem Betrag der bezogenen volumetrischen Hebung  $\text{Vol}_H$ . Die bezogene volumetrische Hebung beträgt also 3,0 % der gefrorenen Bodenschicht und stellt die mit diesem Wassergehalt maximal mögliche Hebung dar.

## 5.2 Die Frosthebung im drainierten System

### 5.2.1 Modellvorstellung

In diesem Kapitel soll ein Rechenmodell für den zeitlichen Verlauf der volumetrischen Frosthebung unter drainierten Randbedingungen hergeleitet werden. In Kapitel 2 wurde ausgeführt, dass gefrorener Boden ein 4-Komponentengemisch aus Feststoff, Luft, Wasser und Eis ist, und dass bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt das Porenwasser nicht vollständig gefriert, sondern immer ein Anteil von ungefrorenem Wasser als Flüssigkeit oder Wasserdampf im Boden verbleibt. Mit tieferen Gefrier-temperaturen vermindert sich auch der Anteil an ungefrorenem Wasser. Auf die Bestimmung des ungefrorenen Wassergehaltes soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Es sind jedoch für die nachfolgenden Berechnungen der volumetrischen Hebung zwei Näherungen zu treffen:

- Für die Berechnung der volumetrischen Hebung wird die Vereinfachung getroffen, dass das Porenwasser im Boden vollständig gefriert, der ungefrorene Wassergehalt also gleich Null gesetzt. Da der ungefrorene Wassergehalt mit sinkender Temperatur abnimmt und die Temperaturen bei der hier betrachteten künstlichen Bodenvereisung in großen Teilen des Vereisungskörpers weit unter  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  liegen, wird die Näherung als zulässig erachtet. Für eine Frosthebungsprognose liegt die Annahme auf der sicheren Seite.
- Weiterhin wird angenommen, dass der gefrorene Boden wasserundurchlässig ist, auch wenn für das ungefrorene Porenwasser immer kleine Wasserwegigkeiten möglich sein werden. Diese Näherung wird als zulässig erachtet, da bei den hier betrachteten Dicken der gefrorenen Bodenschicht in Verbindung mit der sehr geringen Durchlässigkeit des gefrorenen Bodens die durchtretenden Wassermengen sehr klein werden.

Es wird zunächst eine dünne Bodenschicht in einer beliebigen Tiefe im Boden betrachtet, welche im Zeitraum  $dt$  überfrozen wird. Das in Abb. 4-4 zur Darstellung der Frosteindringung verwendete System



wird für die Herleitung des Frosthebungsverlaufs geringfügig ergänzt. Wie in Abb. 4-4 soll der Frost eindimensional von oben in die Probe eindringen. Zusätzlich jedoch soll das System auf seiner Oberseite durch den Druck  $P$  belastet werden und die Durchlässigkeit  $k$  des Bodens in der Tiefe  $h$  sprunghaft stark zunehmen. Der gefrorene Teil des Bodens wird als undurchlässig angesehen.

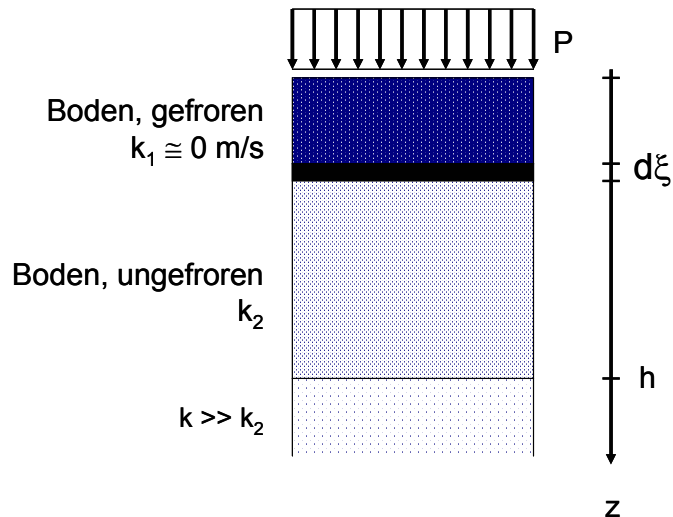


Abb. 5-1: Frosthebung im drainierten System

Betrachtet wird in einer beliebigen Tiefenlage eine dünne Bodenschicht der Dicke  $d\xi$ , die im Zeitraum  $dt$  gefriert. In Abb. 5-2 ist das System mit idealisierten Bodenkörnern dargestellt. Die einzelnen Bodenkörner sind hierbei von einer hygroskopisch gebundenen Wasserhülle umgeben. Vereinfachend wird ein vollgesättigtes System betrachtet. Die Null-Grad-Isotherme liegt zu Beginn des betrachteten Zeitraumes auf Höhe der Oberkante der Bodenschicht  $d\xi$  und erreicht nach der Zeit  $dt$  die Unterkante der Bodenschicht. In Abb. 5-3 ist der Detailausschnitt A vor und nach dem Gefrieren, also zu den Zeitpunkten  $t$  und  $t + dt$  dargestellt. Zur besseren Darstellung wurde das in der Bodenschicht  $d\xi$  vorhandene Porenwasser nicht schraffiert.

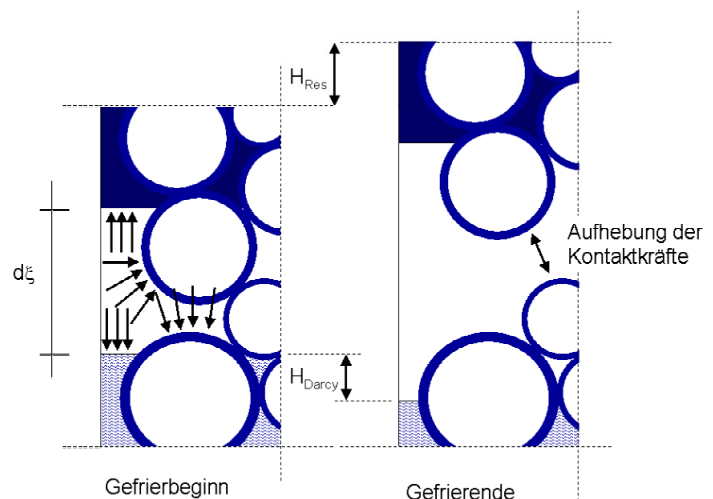
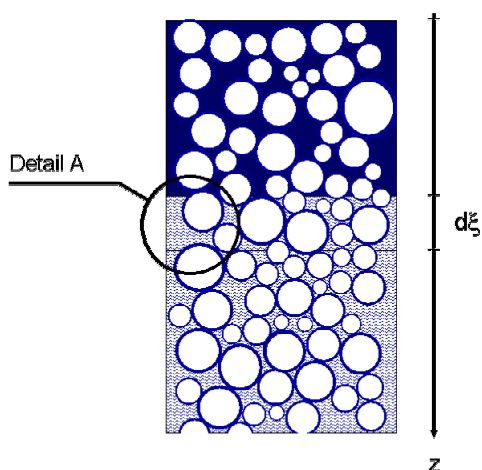


Abb. 5-2: Modellvorstellung

Abb. 5-3: Detailausschnitt A

Im linken Detailausschnitt ist die Situation beim Beginn des Gefrierens dargestellt. Einzelne Bodenkörner sind bereits von der eindringenden Eisfront erfasst und in die Eismatrix eingeschlossen. Sobald das Wasser  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht hat, baut sich im Porenwasser (siehe Tabelle 4-1) ein Teil des Frost-

sprengdrucks auf, welcher zu einem Porenwasserüberdruck führt. Der Überdruck wirkt senkrecht auf die umgebenden Flächen, d.h. auf die Eismatrix und die darin eingeschlossenen Bodenkörner auf der Oberseite der Bodenschicht und auf das Porenwasser und die ungefrorenen Bodenkörner auf der Unterseite der Bodenschicht.

Aus Tabelle 4-1 ist ersichtlich, dass der Frostsprengdruck wesentlich höher ist als alle baupraktisch denkbaren Auflasten auf die hier betrachteten tief liegenden Vereisungskörper. Sobald der Frostsprengdruck gleich der Auflast (incl. Bodeneigengewicht) ist, setzen Hebungen ein. Mit anderen Worten wird der sich mit fallender Temperatur aufbauende Frostsprengdruck durch die wirksame Auflast begrenzt. Gleichzeitig bedeutet dies, dass auch der entstehende Porenwasserüberdruck maximal gleich der Auflast sein kann. In Abb. 5-4 wird dieser Zusammenhang grafisch dargestellt. Der gemäß der Clausius-Clapeyron Gleichung maximal mögliche Druck kann sich nicht aufbauen, da der gefrorene Boden gehoben wird, sobald der mobilisierte Frostsprengdruck der Auflast entspricht.

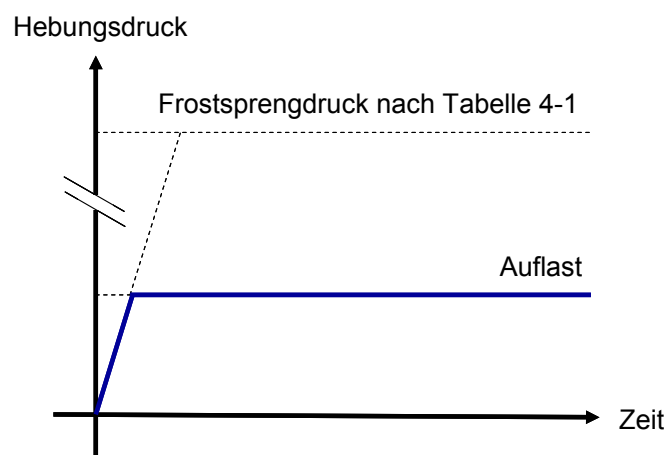


Abb. 5-4: Frosthebung im drainierten System

Der entstehende Porenwasserüberdruck kann sich während des Gefrierens, d.h. im Zeitraum  $dt$  gemäß den Gesetzen der Konsolidation abbauen.

Der rechte Teil von Abb. 5-3 zeigt die Situation, nachdem die Bodenschicht gefroren ist. Der Teil  $H_{\text{Darcy}}$  des ursprünglich in der Bodenschicht  $d\xi$  enthaltenen Porenwassers wurde durch den sich aufbauenden Gefrierdruck in den ungefrorenen Boden gedrückt. Das in der Bodenschicht verbleibende Wasser  $H_{\text{Res}}$  führte infolge der Volumenzunahme beim Gefrieren zu Frosthebungen. Infolge der Frosthebungen kam es lokal auch zu einer Aufhebung der Kontaktkräfte zwischen einzelnen Bodenkörnern. Hier erklärt sich, dass mit zunehmendem Druck die volumetrischen Frosthebungen abnehmen. Nachfolgend wird die Modellvorstellung in ein mathematisches Modell überführt.

### 5.2.2 Rechenmodell

Als Eingangsgrößen in die Berechnung dienen:

- $\rho$ : die Feuchtdichte des Bodens
- $w$ : der Wassergehalt des Bodens
- $\rho_s$ : die Korndichte des Bodens
- $k$ : die Durchlässigkeit des ungefrorenen Bodens
- $h$ : der Abstand zwischen der Probenoberseite und der Grenze, an der sich die Durchlässigkeit sprunghaft ändert.

- P: der auf der Probenoberseite wirkende Druck, bzw. die daraus resultierende Vorspannung des Bodens
- p: die Proportionalitätskonstante für die Beschreibung der Frosteindringung nach Neumann (4.12). Diese kann entweder nach Kapitel 4.2 berechnet oder versuchstechnisch bestimmt werden. Bei den Versuchen kann entweder die zeitliche Entwicklung der Temperaturprofile gemessen werden, oder nach Versuchsende wird der gefrorene Teil der Probe freigelegt und vermessen. Das Wertepaar der Versuchsdauer und der Höhe des gefrorenen Bodenkörpers bildet dann eine Stützstelle für die Formel (4.12).
- [t\_Versuchsbeginn ... t\_Versuchsende]: das Zeitintervall der Frosteinwirkung, in der Regel ist t\_Versuchsbeginn = 0 s, d.h. der Beginn der Frostenwirkung fällt mit dem Versuchsanfang zusammen.

In Kapitel 4 wurde die Eindringgeschwindigkeit der Null-Grad-Isotherme nach der Lösung von Neumann  $\xi(t)=p\sqrt{t}$  (4.12) zitiert. Die Eindringgeschwindigkeit der Null-Grad-Isotherme ist die Ableitung dieser Funktion nach der Zeit:

$$v(t) = \dot{\xi}(t) = p \frac{1}{2\sqrt{t}} \quad (5.5)$$

Die Bodenschicht  $d\xi$ , die im Zeitraum  $dt$  in einer beliebigen Tiefenlage überfrozen wird, ist:

$$d\xi = \dot{\xi}(t) \cdot dt \quad (5.6)$$

Die Neumann-Lösung  $\xi(t)=p\sqrt{t}$  (4.11) gilt für die in Kapitel 4 beschriebenen Randbedingungen. Die folgenden Betrachtungen gelten auch für beliebige andere monoton zunehmende und differenzierbare Formen. Aus diesem Grund werden nachfolgend die allgemeinen Bezeichnungen  $\xi(t)$  für die Lage der Null-Grad-Isotherme und  $\dot{\xi}(t)$  für die Ableitung nach der Zeit, also die Frosteindringgeschwindigkeit verwendet. Alle übrigen Größen werden auf die oben dargestellten Eingangsgrößen zurückgeführt.

Zunächst wird eine Massenbilanz des in der Bodenschicht der Dicke  $d\xi$  zum Zeitpunkt  $t$  enthaltenen Porenwassers aufgestellt. Das Volumen des in der Bodenschicht anfangs enthaltenen Porenwassers beträgt nach (5.2):

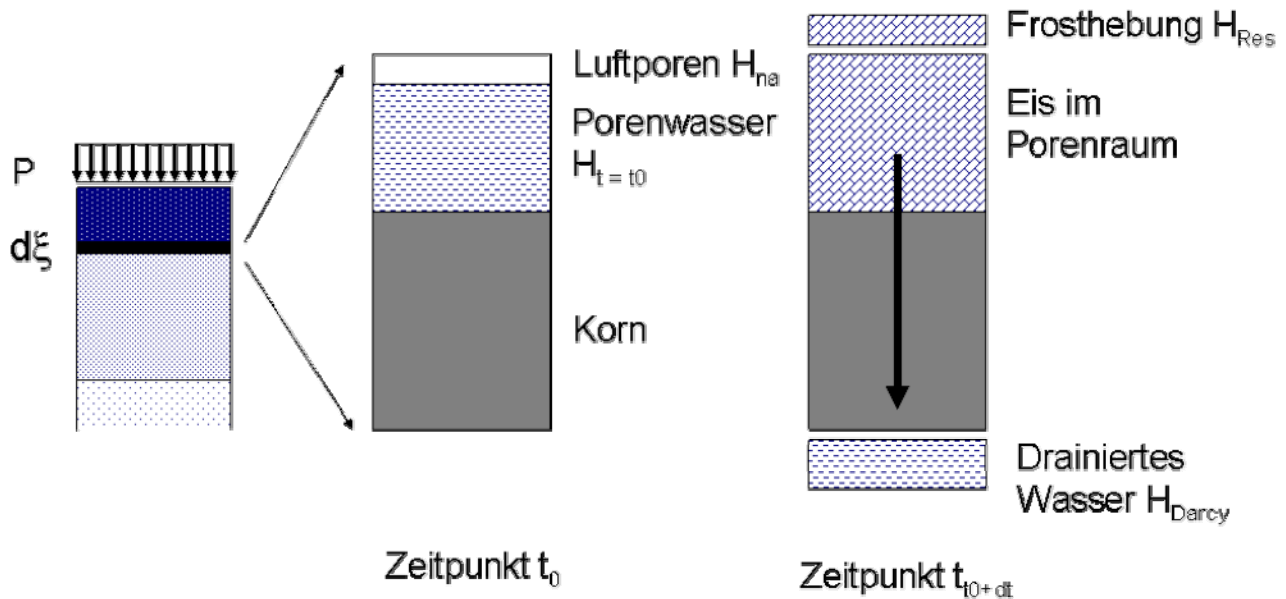
$$V_{w,t=t_0} = w \cdot \rho_d \cdot \frac{V}{\rho_w} = w \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot d\xi \cdot A \quad (5.7)$$

Da alle Betrachtungen für die eindimensionale Frosteindringung gelten sollen, kann die Fläche  $A$  beliebig klein gewählt werden. Somit braucht nicht das Volumen  $V$  des Porenwassers bilanziert werden, sondern es reicht aus, die über einer infinitesimalen Fläche  $dA$  stehende Wassersäule  $H$  zu betrachten.

$$H_{t=t_0} = w \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot d\xi = w \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot \dot{\xi}(t) \cdot dt \quad (5.8)$$

Sobald die Oberseite der Bodenschicht  $d_{\xi}$  gefriert, dehnt sich das dort befindliche Wasser um 9 % aus. Aus Abb. 4-1 ist ersichtlich, dass der Gefriervorgang und die damit verbundene Volumenvergrößerung nicht bei  $0^{\circ}\text{C}$  stattfinden können, sondern aufgrund der auf die Bodenschicht wirkenden Auflast erst bei Temperaturen von knapp unter  $0^{\circ}\text{C}$ , bei denen der entstehende Gefrierdruck der Auflast entspricht. Falls keine Luftporen mehr zur Verfügung stehen, in welche sich das Wasser zwängungsfrei ausdehnen kann, so wird es sich gegen die gefrorene Oberseite und die ungefrorene Unterseite der Bodenschicht verspannen, wobei der entstehende Druck als Porenwasserüberdruck auftritt. Der gefrorene obere – undurchlässige – Bodenabschnitt wirkt gleichsam als Widerlager dem teilmobilisierten Frostsprengdruck entgegen. Der sich mit dem Verspannen aufbauende Frostsprengdruck wird durch die auf die Oberseite der Bodenschicht wirkende Auflast beschränkt. Aus Tabelle 4-1 ist ersichtlich, dass mit abnehmender Temperatur die Frostdrücke sehr stark zunehmen. So werden bereits bei geringen Frosttemperaturen von z.B.  $-0,14^{\circ}\text{C}$  Frostdrücke von  $2\text{ MPa}$  und bei  $-0,36^{\circ}\text{C}$  von  $5\text{ MPa}$  auftreten. Diese Werte entsprechen Auflasten von  $2000\text{ kN/m}^2$  bzw.  $5000\text{ kN/m}^2$  oder einer Überdeckung von über  $100\text{ m}$ . Die Frostsprengdrücke sind um ein Vielfaches größer als die Überlagerungsdrücke bei den hier betrachteten Tieflagen von Vereisungskörpern. Sobald der entstehende Frostsprengdruck die Auflastspannungen überschreitet, kommt es zu zwei Mechanismen: Zum einen wird der gefrorene Bodenkörper gehoben und es stellen sich Frosthebungen ein. Zum anderen wird ein Porenwasserüberdruck im ungefrorenen Boden erzeugt, dessen Betrag dem Eigengewicht des gefrorenen Bodens und der darauf wirkenden Auflast entspricht. Ein Teil des Porenwassers (d.h. das in der Bodenschicht  $d_{\xi}$  vorhandene Wasservolumen bzw. bei eindimensionaler Betrachtung die vorhandene Wassersäule über der Fläche  $dA$ ) kann im zur Verfügung stehenden Zeitraum  $dt$  durch den ungefrorenen Teil des Bodens hindurch abströmen.

Da der Boden von oben nach unten friert, ist die Randbedingung eines permanenten wasserundurchlässigen Widerlagers auf die sich im Gefrieren vergrößernde Wassersäule zu jedem Zeitpunkt erfüllt. Zeitgleich gibt es eine permanente Drainage auf der Unterseite der noch ungefrorenen Bodenschicht  $d_{\xi}$ . Steht in der Tiefe  $h$  eine Schicht mit hoher Durchlässigkeit an, so kann im betrachteten Zeitraum  $dt$  ein Teil der Wassersäule  $H_{t=t_0}$  in Richtung der Drainage abströmen. Falls der Boden teilgesättigt ist, kann ein weiterer Teil der Wassersäule in die vorhandenen Luftporen ausweichen und dort gefrieren, ohne dass Frosthebungen entstehen. Die um diese beiden Beträge reduzierte, in der Schicht  $d_{\xi}$  verbleibende Wassersäule  $H_{t=t_0+dt}$  erfährt die Volumenzunahme um 9 %.

Abb. 5-5: Bilanz der Wasservolumina in einer Schicht  $d\xi$ 

Die Wassersäule, welche im Zeitraum  $dt$  aus der Bodenschicht  $d\xi$  maximal abströmen kann, berechnet sich nach dem Gesetz nach Darcy:  $H_{Darcy} = k \cdot i \cdot dt$ . Der Gradient  $i$  ist das Verhältnis der Druckdifferenz  $\Delta P$  zur durchströmten Länge.

$$i = \frac{\Delta P}{h - \xi(t)} \quad (5.9)$$

Aus dem Nenner geht hervor, dass der hydraulische Gradient  $i$  im Versuch von der aktuellen Lage der Null-Grad-Isotherme  $\xi(t)$  abhängig ist und sich somit während der Strömung ändert. Im Zähler ist die zur Druckdifferenz  $\Delta P$  korrespondierende Wassersäule, also [mWS] einzusetzen. Nimmt man an, dass der auf der Probenoberseite wirkende Druck  $P$  ausreichend groß gegenüber dem Bodeneigengewicht der gefrorenen Bodenzone ist und an der Grenze zur Drainage der atmosphärische Druck herrscht, dann entspricht die Druckdifferenz  $\Delta P$  der Auflast  $P$ . (Anmerkung: Eine Auflast  $P$  in  $[\text{kN}/\text{m}^2]$  lässt sich durch Teilen mit der Erdbeschleunigung  $g$  in die Einheit [mWS] umrechnen)

Setzt man das Wasser als inkompressibel voraus, dann besitzt die im Zeitraum  $dt$  abströmende Wassersäule die Höhe:

$$H_{Darcy} = k \cdot i \cdot dt = k \cdot \frac{\Delta P}{h - \xi(t)} \cdot dt \quad (5.10)$$

Bei dieser Betrachtungsweise wird davon ausgegangen, dass sich der Druck im Porenwasser zu Beginn der Frosteindringung sehr schnell aufbaut und während des Zeitraums  $dt$ , in dem eine beliebige Bodenschicht gefriert, gleich der Auflast und damit nahezu unverändert bleibt. Da der Gefrierprozess und das Fortschreiten der Gefrierfront in einem stetigen Prozess erfolgen und gleichzeitig nur ein geringer Teil des Gefrierdruckes mobilisiert wird, erscheint diese Annahme gerechtfertigt.

Die Wassersäule  $H_{\text{Soll}}$ , die im Zeitraum  $dt$  abströmen müsste, damit keine Frosthebungen auftreten, ist 9 % der in Gleichung (5.6) berechneten Säule, die um den Anteil reduziert wird, der praktisch zwängungsfrei im vorhandenen freien Luftporenraum gefrieren kann. Der Luftporenraum wird nachfolgend bestimmt.

Im Hinblick auf den Ansatz des Luftporenraums in den Gleichungen ist zunächst die Frage zu diskutieren, ob im Feld tatsächlich der gesamte Luftporenraum für ein zwängungsfreies Gefrieren des Porenwassers zur Verfügung steht. Damit die Luft praktisch vollständig entweichen kann und der Porenraum vollständig zufrieren kann, müssten die Poren annähernd gleich groß und gleichmäßig verteilt sein und zusätzlich miteinander in Verbindung stehen. Dieser Grenzfall ist nicht zu erwarten, da auch bei einem praktisch wassergesättigten Boden immer eine gewisse Menge an gelöster Luft vorhanden ist. Die Verteilung unterschiedlich großer Poren bei künstlich hergestellten Bodenproben wurde von VOGT (2004) untersucht. Er zeigt anhand künstlich hergestellter Kaolinproben, dass bei der Probenherstellung in Abhängigkeit des Wassergehaltes unterschiedlich große Poren entstehen. Soll – im Unterschied zur vorliegenden Arbeit – das Frosthebungsverhalten von Böden mit einem nennenswerten Luftporenanteil prognostiziert werden, sollte für eine auf der „sicheren Seite“ liegende Hebungsprognose daher der Luftporenanteil nicht, bzw. nicht voll angesetzt werden, wenn keine näheren Untersuchungen vorliegen.

Für die Bestimmung des Luftporenanteils  $n_a$  wird zunächst die Trockendichte des Bodens mit Hilfe der Eingabewerte bestimmt.

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w} \quad (5.11)$$

Der Luftporenanteil  $n_a$  berechnet sich am Einheitselement zu:

$$n_a = 1 - w \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (5.12)$$

und daraus die Wassersäule  $H_{\text{Soll}}$ :

$$H_{\text{Soll}} = 0,09 \cdot H_{t=t_0} - n_a \cdot \dot{\xi}(t) \cdot dt \quad (5.13)$$

mit der Definition von  $H_{t=t_0}$  nach (5.8) und der Definition von  $n_a$  nach (5.12) mit (5.11) folgt:

$$H_{\text{Soll}} = 0,09 \cdot w \cdot \frac{\rho}{\rho_w} \cdot \dot{\xi}(t) \cdot dt - \left( 1 - w \cdot \frac{\rho}{\rho_w} - \frac{\rho}{\rho_s} \right) \cdot \dot{\xi}(t) \cdot dt \quad (5.14)$$

Da die Frosteindringgeschwindigkeit eine mit der Zeit monoton abnehmende Funktion darstellt, muss es einen Zeitpunkt geben, ab dem keine Frosthebungen mehr auftreten, sobald dem Porenwasser ausreichend Zeit bleibt, um vollständig abzufließen. Dieser Zeitpunkt kann durch Gleichsetzen der Gleichungen (5.10) mit (5.14) errechnet werden. Löst man die implizite Gleichung nach  $t$  auf, so erhält man den gesuchten Zeitpunkt  $t_{\text{limit}}$ :

$$H_{\text{Soll}} = H_{\text{Darcy}} \quad (5.15)$$

$$0,09 \cdot w \cdot \frac{\rho}{\rho_w} \cdot \frac{1+w}{\rho_w} \cdot \dot{\xi}(t) \cdot dt - \left( 1 - w \cdot \frac{\rho}{\rho_w} - \frac{\rho}{\rho_s} \right) \cdot \dot{\xi}(t) \cdot dt = k \cdot \frac{\Delta P}{h - \xi(t)} \cdot dt$$

Für den Zeitraum vom Beginn der Frosteinwirkung bis zur Zeitgrenze  $t_{\text{limit}}$  gilt: Die in der Bodenschicht verbleibende Wassersäule gefriert und verursacht aufgrund der Volumenzunahme beim Phasenübergang Frosthebungen auf der Probenoberseite. Ab dem Zeitpunkt  $t_{\text{limit}}$  treten keine Frosthebungen mehr auf. Es ergibt sich die folgende abschnittsweise definierte Funktion für die in der Bodenschicht  $d\xi$  verbleibende Wassersäule:

$$H_{\text{Res},2} = \begin{cases} H_{\text{Soll}} - H_{\text{Darcy}} & \text{für } 0 < t < t_{\text{limit}} \\ 0 & \text{für } t \geq t_{\text{limit}} \end{cases} \quad (5.16)$$

oder eingesetzt:

$$H_{\text{Res},2} = \begin{cases} 0,09 \cdot w \cdot \frac{\rho}{\rho_w} \cdot \frac{1+w}{\rho_w} \cdot \dot{\xi}(t) \cdot dt - \left( 1 - w \cdot \frac{\rho}{\rho_w} - \frac{\rho}{\rho_s} \right) \cdot \dot{\xi}(t) \cdot dt - k \cdot \frac{\Delta P}{h - \xi(t)} \cdot dt & \text{für } 0 < t < t_{\text{limit}} \\ 0 & \text{für } t \geq t_{\text{limit}} \end{cases}$$

Die verbleibende Wassersäule gefriert und führt zu volumetrischen Frosthebungen:

$$H_{\text{Res},1} = 1,09 \cdot H_{\text{Res},2} \quad (5.17)$$

Die gesamte Frosthebung auf der Probenoberseite erhält man, indem man alle Frosthebungsanteile der einzelnen Bodenschichten  $d\xi$  über die Zeit der Frosteinwirkung aufintegriert.

$$H_{\text{vol}} = \int_{t=0}^{t=T} H_{\text{Res},1} \quad (5.18)$$

Zusammenfassend kann das Modell charakterisiert werden:

- Die Randbedingung der in Kapitel 5.2 erläuterten maximal möglichen Hebung wird erfüllt.
- Die Berechnung der Eindringgeschwindigkeit erfolgt durch Ableitung der Lage der Null-Grad-Isotherme nach der Zeit. Sie zeigt für  $t = 0$ , d.h. zu Beginn der Frosteinwirkung eine unendlich große Eindringgeschwindigkeit der Null-Grad-Isotherme (NGIT), die dann rasch abnimmt. Aus der unendlich großen Eindringgeschwindigkeit zum Frostbeginn folgt, dass in jedem System volumetrische Frosthebungen auftreten müssen. Je größer die Durchlässigkeit und die Auflast, desto kleiner sind die Frosthebungen. Im Extremfall sind sie nahezu Null, nie jedoch gleich Null.
- Sobald sich die Eindringgeschwindigkeit so verlangsamt hat, dass das Porenwasser schneller abströmt als die Null-Grad-Isotherme eindringt, kommt es zu keinen weiteren volumetrischen Frosthebungen mehr.

- Das Verhältnis von Frosthebung zur Höhe der gefrorenen Bodenschicht, das als "bezogene volumetrische Hebung"  $\text{Vol}_H$  bezeichnet wird, ist daher eine abschnittsweise definierte und in Abhängigkeit der Zeit monoton abnehmende Funktion.

Zweite Fortsetzung des Beispiels aus Kapitel 5.1 :

Es wird die volumetrische Hebung des betrachteten tertiären Tones berechnet. Die benötigten Rechenwerte sind:

Bodenkennwerte:

- Wassergehalt:  $w = 0,20$
- Dichte:  $\rho_2 = 2,07 \text{ g/cm}^3$
- Korndichte:  $\rho_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$
- Durchlässigkeit:  $k = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

Wärmetechnische Kennwerte:

- Wärmeleitfähigkeit, gefroren:  $\lambda_1 = 1,95 \text{ W/mK}$
- Wärmeleitfähigkeit, ungefroren:  $\lambda_2 = 1,75 \text{ W/mK}$
- Wärmekapazität, gefroren:  $C_{m,1} = 2,02 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$
- Wärmekapazität, ungefroren:  $C_{m,2} = 2,71 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$

Randbedingungen:

- Gefriertemperatur:  $\theta_0 = \pm 0,00 \text{ }^\circ\text{C}$
- Frosttemperatur:  $\theta_1 = -10,00 \text{ }^\circ\text{C}$
- Bodentemperatur:  $\theta_2 = +10,00 \text{ }^\circ\text{C}$
- Frosteinwirkung:  $t = 18.000 \text{ s}$
- Auflast:  $P = 6,00 \text{ kN/m}^2$
- Probenhöhe:  $h = 12,50 \text{ cm}$

Im ersten Schritt wurde die zugehörige Eindringung der Null-Grad Isotherme bereits berechnet:

$$\xi(t) = 4,72 \cdot 10^{-4} \sqrt{t} \quad \text{mit } t \text{ in [s]}$$

Die Eindringgeschwindigkeit berechnet sich zu:

$$\dot{\xi}(t) = 4,72 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{2\sqrt{t}} = 2,36 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \quad \text{mit } t \text{ in [s]}$$

Die Trockendichte wurde in der ersten Fortsetzung des Beispiels berechnet.

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w} = \frac{2,07}{1+0,2} = 1,73 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Der Prozentanteil der in einer beliebigen Bodenschicht  $d\xi$  vorhandenen Wassersäule ist:

$$H_{t=t_0} = w \cdot \rho_d \cdot \dot{\xi}(t) \cdot dt = 0,2 \cdot 1,73 \cdot 2,36 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot dt = 0,817 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot dt \quad \text{mit } t \text{ in [s]}$$

Die Wassersäule  $H_{\text{Darcy}}$ , welche im Zeitraum  $dt$  in den ungefrorenen Boden abströmen kann, berechnet sich zu:



$$H_{\text{Darcy}} = k \cdot \frac{\frac{P}{g}}{h - \xi(t)} \cdot dt = 1 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{6}{0,125 - 4,72 \cdot 10^{-4} \sqrt{t}} \cdot dt \quad \text{mit } t \text{ in [s]}$$

Im hier vorliegenden Beispiel wird  $S_r = 1$ ,  $n_a = 0$  angenommen, d.h. es soll kein Luftporenraum zur Verfügung stehen, in welchen hinein sich das gefrierende Wasser ausbreiten kann. Die Wassersäule, die abströmen muss, damit keine Frosthebungen entstehen, beträgt:

$$H_{\text{Soll}} = 0,09 \cdot H_{t=t_0} - n_a \cdot \dot{\xi}(t) = 0,09 \cdot 0,817 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot dt - 0 = 7,3 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot dt$$

Den Zeitpunkt  $t_{\text{limit}}$ , ab dem keine volumetrischen Frosthebungen mehr auftreten, erhält man durch Gleichsetzen der Beträge  $H_{\text{Darcy}}$  und  $H_{\text{Soll}}$  und auflösen nach  $t$ :

$$1 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,6}{0,125 - 4,72 \cdot 10^{-4} \sqrt{t}} \cdot dt = 7,3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot dt$$

Das Zeitinkrement  $dt$  erscheint auf beiden Seiten und kann gekürzt werden. Der verbleibende Term wird nach  $t$  aufgelöst.

$$t_{\text{limit}} \cong 9332 \text{ s.}$$

Demnach ist für dieses Beispiel mit einer 12,5 cm hohen Tonprobe zu erwarten, dass sich die Geschwindigkeit nach ungefähr 2,5 Stunden Frosteinwirkung so verlangsamt hat, dass keine volumetrischen Frosthebungen mehr zu erwarten sind. Dies verdeutlicht auch anschaulich, warum bei der Modellierung von Frosthebungen infolge natürlicher Frosteindringung auf den Ansatz der volumetrischen Hebung verzichtet werden kann. Ein Zeitraum von 2,5 Stunden ist bei den für die natürliche Frosteindringung in der Regel betrachteten Zeiträumen von mehreren Wochen zu vernachlässigen. Da weiterhin die Eindringgeschwindigkeiten im Vergleich zur künstlichen Bodenvereisung infolge der geringeren Temperaturgradienten wesentlich geringer sind, würde sich  $t_{\text{limit}}$  noch weiter verringern, so dass im Grenzfall keine volumetrische Hebung infolge einer langsamen natürlichen Frosteindringung zu erwarten ist.

Die in der Bodenschicht  $d\xi$  verbleibende Wassersäule ist demnach:

$$H_{\text{Res},2} = \begin{cases} H_{\text{Soll}} - H_{\text{Darcy}} & \text{für } 0 < t < t_{\text{limit}} \\ 0 & \text{für } t \geq t_{\text{limit}} \end{cases}$$

$$H_{\text{Res},2} = \left\{ \begin{array}{ll} \left( 7,3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot dt \right) - \left( 1 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,6}{0,125 - 4,72 \cdot 10^{-4} \sqrt{t}} \cdot dt \right) & \text{für } 0 < t < 9.332 \text{ s} \\ 0 & \text{für } t \geq 9.332 \text{ s} \end{array} \right\}$$

Die Frosthebung auf der Probenoberseite ist das Integral über die resultierenden Wassersäulen in allen Bodenschichten, die infolge des Gefrierens eine Volumenzunahme von 9 % erfahren.

$$H_{\text{Vol}} = 1,09 \cdot \int_{t=0}^{t=T} H_{\text{Re s},2}$$

Bei einer Gefrierdauer von 5 Stunden (18.000 s) wird das Zeitlimit  $t_{\text{limit}}$  von ca. 2,5 h (9.332 s) erreicht, so dass bei der oben abschnittsweise definierten Funktion nur der erste Abschnitt bis zum Zeitlimit aufzuintegrieren ist.

$$H_{\text{Vol}} = 1,09 \cdot \int_{t=0}^{t=9.332} \left( 7,3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot dt \right) - \left( 1 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{6}{0,125 - 4,72 \cdot 10^{-4} \sqrt{t}} \cdot dt \right) \cdot 4,72 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{2\sqrt{t}} \cdot dt$$

Die Auswertung des Integrals ergibt eine Hebung  $H_{\text{Vol}}$  von ca. 0,9 mm und eine bezogene volumetrische Frosthebung  $\text{Vol}_H$  von ca. 1,3 %. Zum Vergleich: Die bezogene volumetrische Hebung des undrännierten Systems lag bei ca. 3,1 % der gefrorenen Bodenschicht. In Abb. 5-6 ist der zeitliche Verlauf der Hebungen wiedergegeben. In Abb. 5-7 ist zusätzlich der Betrag der bezogenen volumetrischen Hebung, also das Verhältnis der Frosthebungen zur durchfrorenen Bodenschicht zum jeweiligen Zeitpunkt angegeben. Die y-Achse der Grafik wurde zu diesem Zweck entsprechend kalibriert. Es ist zu erkennen, dass die "bezogene volumetrische Hebung" eine mit der Zeit monoton abnehmende Funktion ist.

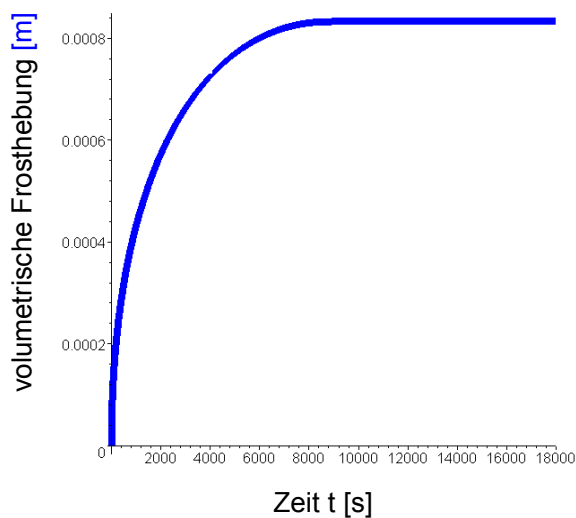


Abb. 5-6: Hebungsverlauf

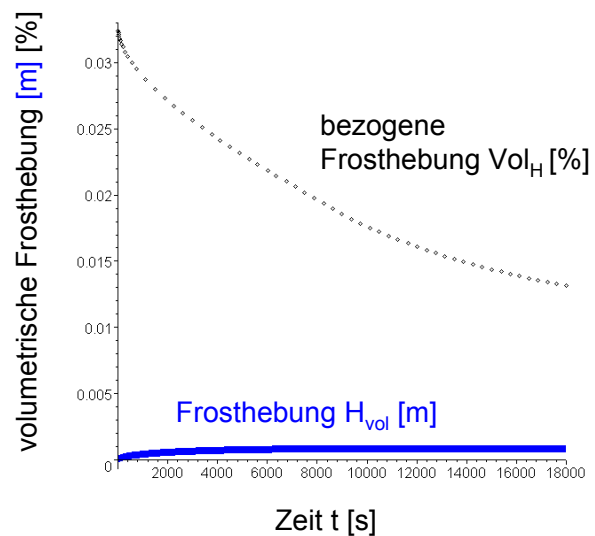


Abb. 5-7: Volumetrische Hebung

### 5.2.3 Grenzbetrachtungen

Die Gleichung (5.16) zur Berechnung der während des Gefrierens in einer Bodenschicht verbleibenden Wassersäule kann als Funktion mit den Variablen Druckunterschied  $\Delta P$ , Durchlässigkeit  $k$  und Frost-Eindringgeschwindigkeit  $\dot{\xi}(t)$  aufgefasst werden.

$$H_{\text{Res}} = 0,09 \cdot w \cdot \frac{\rho}{\rho_w} \cdot \dot{\xi}(t) \cdot dt - \left( 1 - w \cdot \frac{\rho}{\rho_w} - \frac{\rho}{\rho_s} \right) \cdot \dot{\xi}(t) \cdot dt - k \cdot \frac{\Delta P}{h - \xi(t)} \cdot dt = 0$$

Die Gleichung besitzt für verschiedene Wertekombinationen Nullstellen, welche eine gekrümmte Fläche im dreidimensionalen Raum definieren. Diese Fläche kann anschaulich als Grenzfläche interpretiert werden und ist in Abb. 5-8 dargestellt. Unter der Annahme, dass das Bodeneigengewicht hinreichend klein gegenüber dem Druck auf der Probenoberseite ist, kann anstelle des Druckunterschieds  $\Delta P$  auch nur die Auflast  $P$  angesetzt werden.

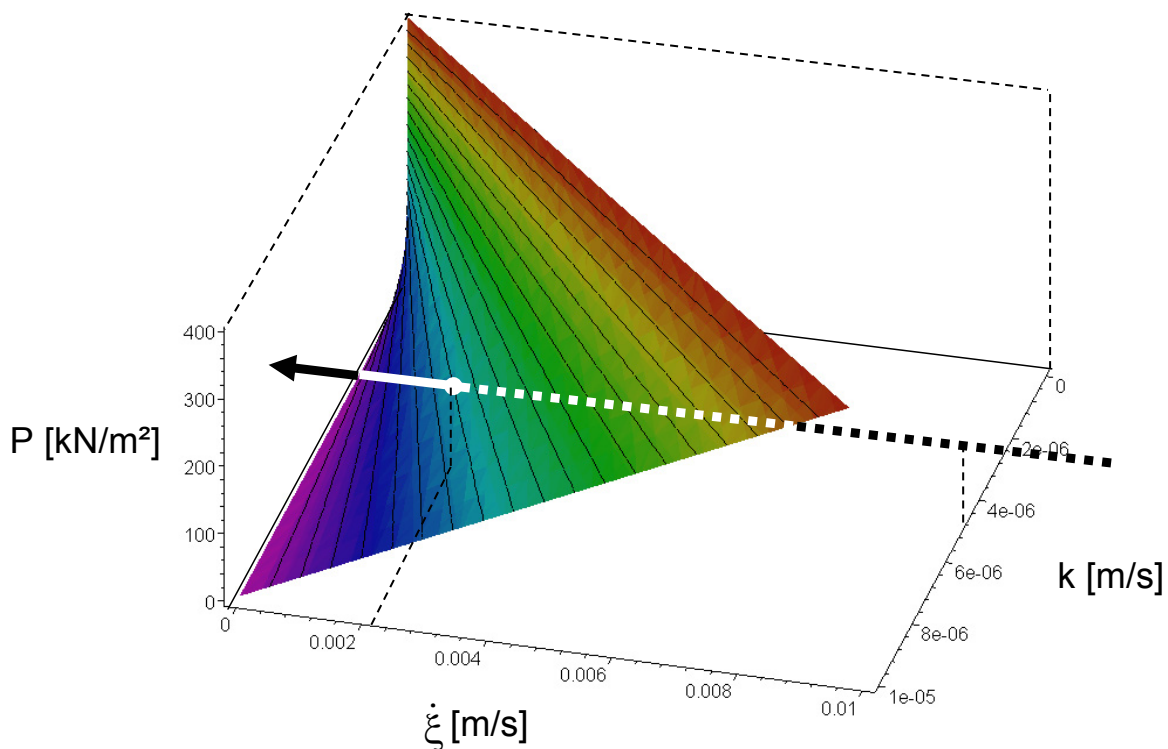


Abb. 5-8: Grenzfläche der volumetrischen Hebung

Zu jedem Zeitpunkt der Frosteinwirkung liegen definierte Werte für die drei Variablen vor. Trägt man einen durch die Variablen definierten Punkt in Abb. 5-8 ein, so kann aus der relativen Lage zur Grenzfläche ermittelt werden, ob zum betrachteten Zeitpunkt volumetrische Frosthebungen auftreten oder nicht. Liegt der Punkt über oder auf der Grenzfläche, dann treten keine Hebungen auf. Je weiter der Punkt unterhalb der Grenzfläche liegt, desto größer sind die auftretenden Hebungen. Der im Beispiel betrachtete Gefriervorgang ist eine zur Geschwindigkeitsachse parallele und von rechts nach links gerichtete Spur im dreidimensionalen Raum, welche die Grenzfläche nach der Zeit  $t_{\text{limit}}$  erreicht und durchstößt. Diese Spur kann analog zu den Spannungspfaden in Triaxialversuchen als "Geschwindigkeitspfad" interpretiert werden. Die gepunkteten Linien sind die Spurabschnitte, die unter der Grenzfläche liegen und in denen Hebungen auftreten. Die durchgezogenen Linien sind dementsprechend die Abschnitte, in welchen keine Hebungen mehr auftreten. Zur Veranschaulichung wurden die zweidimensionalen Ansichten der Grenzfläche in den nachfolgenden Abbildungen nochmals darge-

stellt. In den Bildern sind die Spuren von Versuchen eingetragen, bei denen einmal die Durchlässigkeit (linke Abbildung) und einmal die Auflast (rechte Abbildung) variiert wurde.

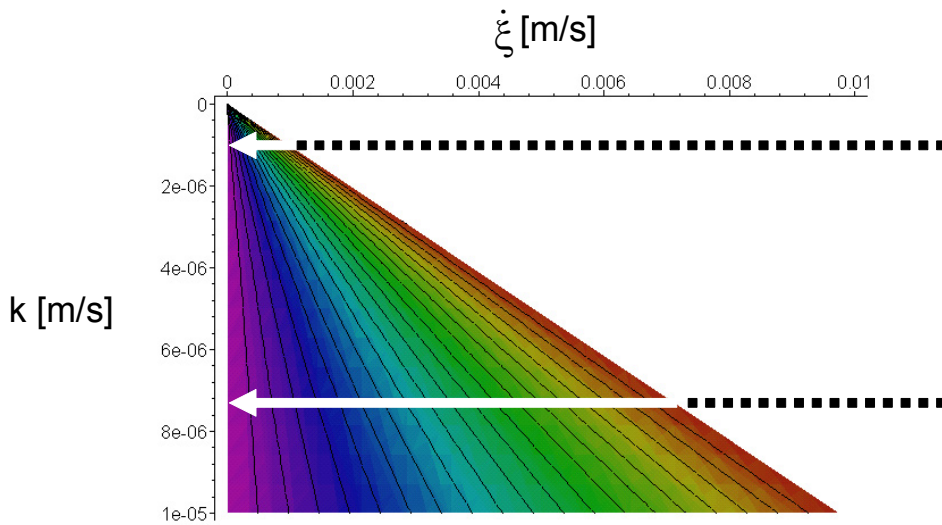


Abb. 5-9: Geschwindigkeit - Durchlässigkeit

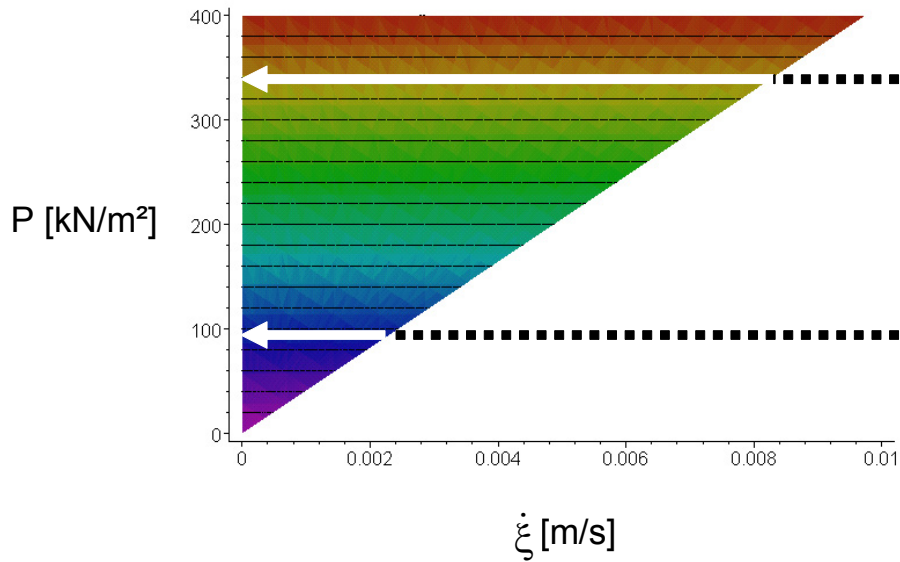


Abb. 5-10: Geschwindigkeit - Auflast

An der Länge der gepunkteten Linien ist zu erkennen, dass es mit kleiner werdender Durchlässigkeit länger dauert, bis keine volumetrischen Frosthebungen mehr auftreten. Aus der rechten Abbildung geht hervor, dass es mit kleiner werdender Auflast länger dauert, bis keine volumetrischen Frosthebungen mehr auftreten.

### 5.3 Die Eislinsenbildung

#### 5.3.1 Modellvorstellung

Im nachfolgenden Abschnitt wird die Modellvorstellung für den Mechanismus der Eislinsenbildung erläutert. Aus der Literatur geht hervor, dass die Eislinsenbildung in Böden derzeit noch nicht ohne Referenzversuche abgesichert quantifiziert werden kann. Deshalb ist zunächst die Frage zu klären, welche Messgrößen der Frosthebungsversuche zur Beschreibung der Eislinsenbildung herangezogen werden können und wie stark die zu erwartenden Streubreiten sind. Im nachfolgend beschriebenen Modell werden zwei Parameter zur Beschreibung der Eislinsenbildung verwendet: der Zeitpunkt des Einsetzens der Eislinsenbildung und die bei stationären Temperaturverhältnissen und gleichbleibender Auflast annähernd konstante Hebungsgeschwindigkeit.

#### Zeitpunkt des Einsetzens der Eislinsenbildung

Zur Bestimmung des Zeitpunktes, an dem die Eislinsenbildung einsetzt, wird ein Vergleich der in Abb. 5-7 dargestellten analytischen Lösung für den zeitlichen Verlauf der bezogenen volumetrischen Hebung mit dem in Versuchen gemessenen Verlauf verwendet. In der genannten Abbildung wurde gezeigt, dass die bezogene volumetrische Hebung, d.h. das Verhältnis aus Frosthebung zur Dicke der gefrorenen Bodenschicht im mathematischen Sinn eine monoton abnehmende Funktion ist.

Sowohl Untersuchungen von KONRAD UND MORGENSTERN (1982) als auch die in Kapitel 3.4.3 beschriebenen Wassergehaltsbestimmungen an Proben nach Versuchen zur Bestimmung der volumetrischen Hebung haben gezeigt, dass unmittelbar nach Beginn der Frosteindringung zunächst ein Teil des Porenwassers von der Gefrierfront wegströmt. Das in Kapitel 5.2.2 gewählte und beschriebene mechanische Modell zeigt dasselbe Verhalten. Damit sich eine Eislinse bilden kann, muss es zu einer Umkehr des Wassertransportes innerhalb der ungefrorenen Bodenzone kommen. Das Wasser wird dann nicht mehr von der Gefrierfront weggedrückt, sondern strömt zur Gefrierfront hin. Der Zeitpunkt der Umkehr des Wassertransportes ist also zumindest in guter Näherung mit dem Einsetzen der Eislinsenbildung gleichzusetzen. Die Zusammenhänge sind in Abb. 5-11 verdeutlicht.

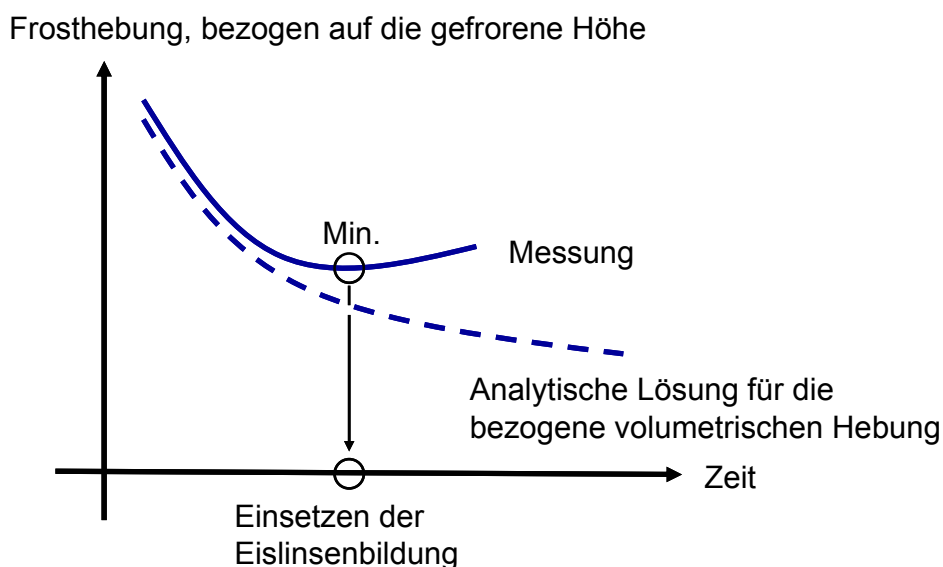


Abb. 5-11: Vergleich von Messung und analytischer Lösung für Frosthebung

Der Zeitpunkt kann im Versuch (siehe Kapitel 4) annähernd dadurch bestimmt werden, dass man das Verhältnis aus gemessener Frosthebung zur gemessenen Frosteindringung aufträgt. Zur messtechnischen Bestimmung der Lage der Null-Grad-Isotherme kann die Probe beispielsweise mit einer Serie von Wärmefühlern bestückt werden (vgl. Abbildung 3-26). Alternativ kann die zeitliche Lage der Null-Grad-Isotherme nach Kapitel 4 berechnet werden. Infolge der Umkehr des Massentransportes kann die gemessene Funktion der "bezogenen volumetrischen Hebung" nicht mehr monoton abnehmend sein. Spätestens sobald die Null-Grad-Isotherme nicht mehr in den Boden eindringt, die Frosthebungen infolge der Eislinsenbildung aber stetig zunehmen, wird die Funktion monoton steigend sein. Auf diese Weise können das versuchstechnisch bestimmte Minimum der "bezogenen volumetrischen Hebung" und die damit korrespondierende Geschwindigkeit der Null-Grad-Isotherme als Kriterien für das Einsetzen der Eislinsenbildung herangezogen werden.

Bei strenger Betrachtung muss ein früherer Zeitpunkt, zu dem sich die in Abb. 5-11 dargestellte Kurve für die Messung von der Kurve der Berechnung löst, mit dem Beginn der Eislinsenbildung gleichgesetzt werden. Dieser Zeitpunkt ließ sich in den Versuchen jedoch nicht mit hinreichender Genauigkeit bestimmen. Da aber die Eindringgeschwindigkeit des Frostes einer Wurzelfunktion gehorcht und damit bei hinreichendem Abstand zum Frostbeginn die Änderungen in der Geschwindigkeit klein werden, wird die getroffene Näherung als akzeptabel betrachtet. Nachfolgend werden die Zusammenhänge an einem konkreten Beispiel erläutert.

In Abb. 5-12 wird die zeitliche Entwicklung des Verhältnisses der Frosthebung zur Dicke der gefrorenen Schicht am Beispiel der Versuchsserie K-P-VO(-20)-1 mit Auflasten  $P$  von  $6 \text{ kN/m}^2$  bis  $400 \text{ kN/m}^2$  dargestellt.

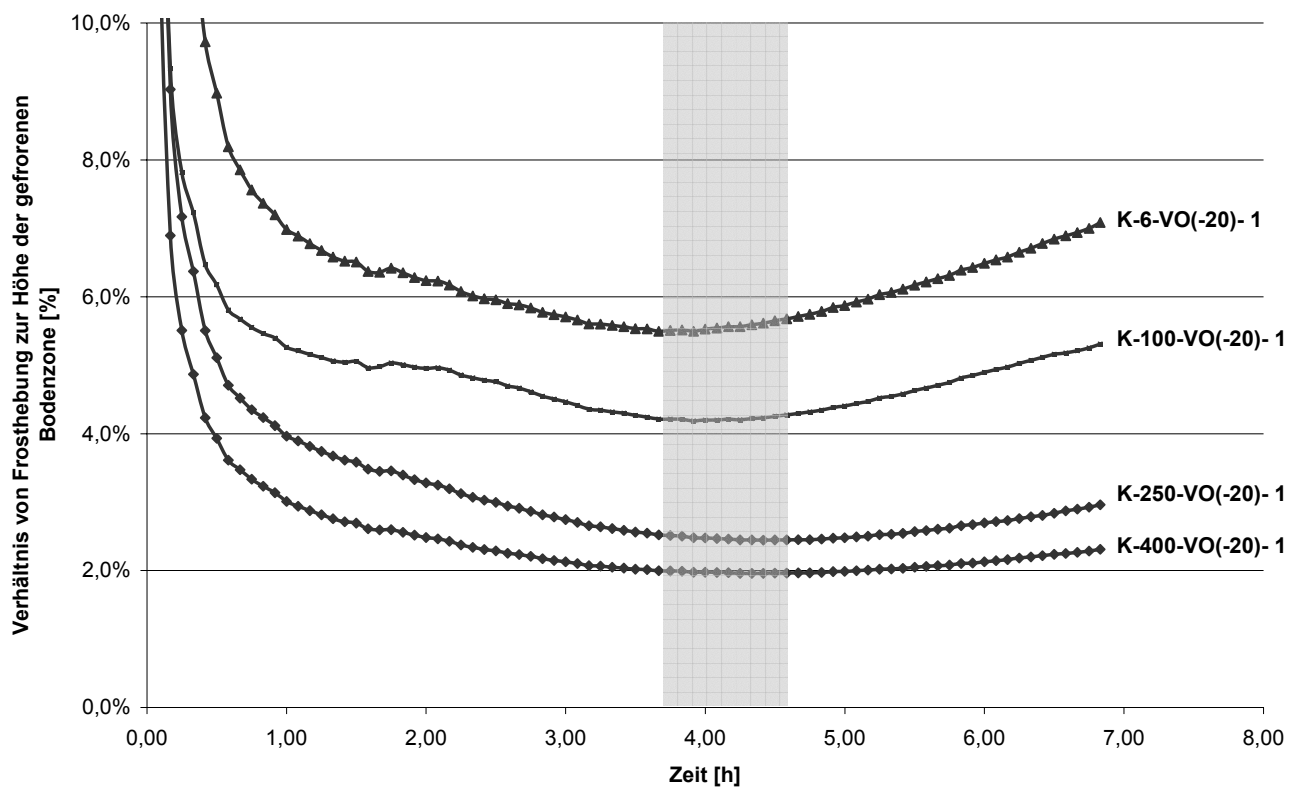


Abb. 5-12: Verhältnis der Frosthebung zur Höhe der gefrorenen Bodenzone, Versuchsserie K-...-VO(-20)-1

Die Minima der in Abb. 5-12 gezeigten Kurven wurden in einem Zeitfenster von ca. 3,7 Stunden bis ca. 4,5 Stunden nach Frostbeginn erreicht:

- K- 6-VO(-20)-1            3,67 Stunden
- K-100-VO(-20)-1        3,92 Stunden
- K-250-VO(-20)-1        4,42 Stunden
- K-400-VO(-20)-1        4,33 Stunden

Dies entspricht unter Ansatz der Proportionalitätskonstante der Neumann-Lösung mit  $p = 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-0,5}$  für die Eindringung der Null-Grad-Isotherme (vgl. Kapitel 4) einer Frosteindringgeschwindigkeit  $\dot{\xi}$  zwischen  $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  und  $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  nach Gleichung (5.5).

Die in Abb. 5-12 angezeigten Auswertungen überschreiten unmittelbar nach Frostbeginn die nach Gleichung 5-4 möglichen maximalen volumetrischen Hebungen. Dies ist auf die zu diesem Zeitpunkt (bis ca. 0,5 Stunden nach Frostbeginn) mit der verwendeten Messtechnik nicht sicher erfassbare Eindringung der Null-Grad-Isotherme zurückzuführen.

### Geschwindigkeit der Eislinsenbildung

In den Versuchen in Kapitel 3 wurde gezeigt, dass die Hebungsgeschwindigkeit annähernd konstant ist, sobald der Wärmetransport einen stationären Zustand erreicht hat. Eigene und in der Literatur dokumentierte Versuche zeigen, dass die Hebungsgeschwindigkeit von folgenden Parametern abhängt:

- dem zu frierenden Boden (unter anderem Granulometrie, Durchlässigkeit)
- dem in den Boden eingepprägten Temperaturgradienten
- der auf den Boden wirkenden Auflast

Eine Modellvorstellung, welche die genannten Abhängigkeiten erfüllt, wird anhand von Abb. 5-13 erläutert. Diese entspricht weitgehend Abb. 5-1. Es soll davon ausgegangen werden, dass durch ein Bodenelement ein stationärer Wärmestrom fließt. Das Bodenelement ist bis zur Tiefe  $\xi$  gefroren und in der Tiefe  $h$  nimmt seine Durchlässigkeit sprunghaft zu. Weiterhin ist in dieser Tiefe ein unbegrenzter Wasservorrat vorhanden.

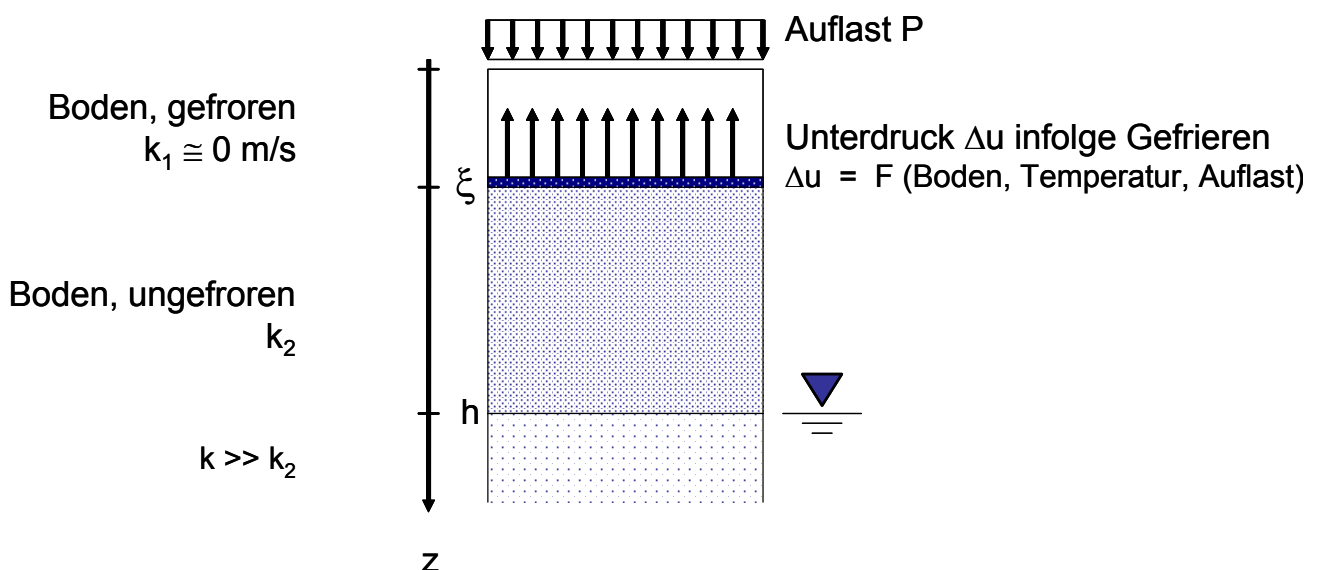


Abb. 5-13: Modellvorstellung zur Eislinsenbildung

In der Tiefe  $z = \xi$  bildet sich eine Eislinse. Hierfür ist ein Wasserzustrom aus der Tiefe  $z \geq h$  an die Gefrierfront notwendig. Die Größe des für den Wassertransport ursächlichen, thermisch induzierten Unterdrucks  $\Delta u$  hängt von den Bodeneigenschaften und dem eingepprägten Temperaturgradienten ab. Die auf der Oberseite des Bodenelements wirkende Auflast  $P$  baut den Unterdruck ab, so dass nur die Differenz als "Motor" für den Wassernachschub an die Gefrierfront zur Verfügung steht. Sobald der Wert der Auflast den der Saugspannung überschreitet, kommt es zu keinen Frosthebungen mehr. Die Geschwindigkeit des Wassernachschubs und damit die Frosthebungsgeschwindigkeit an die Gefrierfront folgt dem Gesetz nach Darcy, wobei der hydraulische Gradient durch die genannte Spannungsdifferenz und den Abstand von  $\xi$  zu  $h$  definiert wird.

Nachfolgend wird die Wirkung der genannten Einflussgrößen auf die Hebungsgeschwindigkeit qualitativ beschrieben. Darauf aufbauend wird ein Postulat formuliert, in welchem die Verwendung der in Referenzversuchen gemessenen Hebungsgeschwindigkeit als charakteristische Größe vorgeschlagen wird. Diese Vorgehensweise ist zwar nicht physikalisch-mathematisch begründbar, wird aber durch die im Folgenden genannten Beobachtungen gerechtfertigt.

**zur Rolle des Bodens** (Abhängigkeit der Saugkraft von der Kapillarität und Durchlässigkeit):

Unterschiedliche Böden zeigen in Versuchen bei ansonsten gleichen Randbedingungen (Temperaturgradient, Auflast, Saughöhe, etc) unterschiedliche Hebungsgeschwindigkeiten. Dies wird durch die in Tabelle 3-4 dokumentierten Versuche belegt. Auch aus der Literatur, z.B. JELINEK (1968) ist bekannt, dass in Schluffen die Eislinnenbildung ausgeprägter stattfindet als in Tonen und Sanden. Dies wird damit erklärt, dass Schluffe bereits feinkörnig genug, gleichzeitig aber noch ausreichend durchlässig sind, um einen kapillaren Wassernachschub an die Gefrierfront zu ermöglichen. Anschaulich und stark vereinfacht kann man sich die Empfindlichkeit eines Bodens gegenüber Eislinnenbildung als eine Verknüpfung aus Feinkornanteil bzw. kapillarer Steighöhe und Durchlässigkeit vorstellen, wie Abb. 5-14 zeigt:

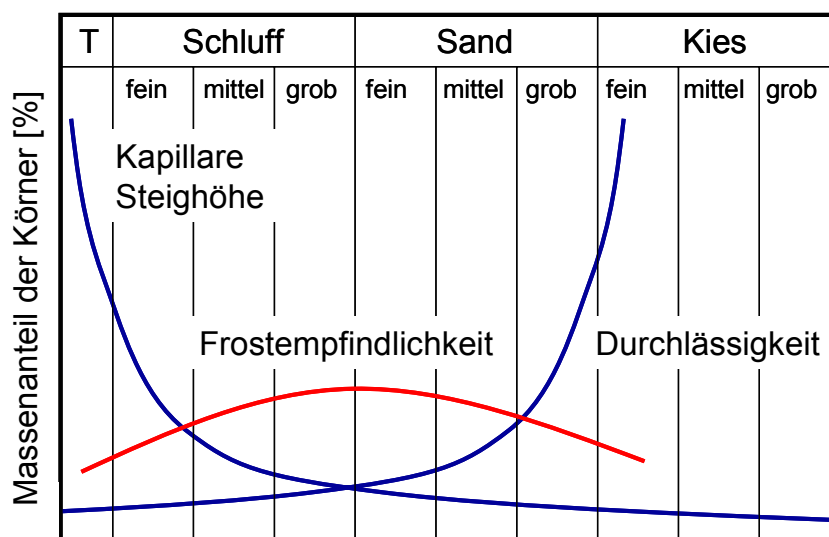


Abb. 5-14: Verknüpfung aus kapillarer Steighöhe und Durchlässigkeit

Die kapillare Steighöhe nimmt vom Ton zum Kies hin stark ab, während umgekehrt die Durchlässigkeit steigt. Verknüpft man beide Kurven, so ergibt sich ein Maximum im Bereich des Grobschluffs. Diese Aussage steht zunächst im Widerspruch zu den Ergebnissen der in Kapitel 3 beschriebenen



Laborversuche. Dort zeigte der Kaolin im Vergleich zum tertiären Ton mit vergleichsweise weniger Feinkornanteil ein sehr viel ausgeprägteres Eislinnenwachstum. Da aber im Laborversuch das Wasserangebot räumlich sehr nah an der Gefrierfront lag und gleichzeitig die Kaolinproben herstellungsbedingt eine kleinere Dichte als die tertiären Tonproben – und damit letztendlich eine vergleichbare Durchlässigkeit (vergleiche Tabelle 4-1)– aufwiesen, ist das gezeigte Hebevverhalten dennoch plausibel und steht nicht im Widerspruch zu dem an Schluffen beobachteten Verhalten.

#### **zur Rolle des thermischen Gradienten:**

Ein Boden zeigt in Versuchen bei sich ändernden Temperaturgradienten und ansonsten gleichen Randbedingungen (Auflast, Unterdruck, etc.) unterschiedliche Hebungsgeschwindigkeiten. Trivial ist der Fall, wenn der Temperaturgradient gleich Null ist. Dies ist der Fall, wenn überall im betrachteten Bodenelement dieselbe Temperatur herrscht. Der Boden ist dann entweder vollständig gefroren oder ungefroren und es kann keine Hebung infolge Eislinnenbildung stattfinden. Für Versuche mit Temperaturgradienten bis ca. 0,7 K/cm wurde von Konrad in einer Reihe von Untersuchungen, beginnend mit KONRAD (1980) ein linearer Zusammenhang zwischen dem Temperaturgradienten und der Hebungsgeschwindigkeit festgestellt. In den eigenen in Abschnitt 3.4.3.3 ausgewerteten Versuchen wurde beobachtet, dass für steilere Gradienten bis zu 2,4 K/cm die Frosthebungen nur noch unterproportional anwachsen. Aufgrund der geringen Anzahl der Versuche kann der Zusammenhang jedoch nicht ausreichend statistisch abgesichert werden.

#### **zur Rolle der Auflast:**

Mit höher werdenden Auflasten nimmt die Frosthebungsgeschwindigkeit ab. Dies wird durch die in Tabelle 3-4 aufgeführten Versuche belegt. Zusätzlich muss ein direkter Zusammenhang zwischen den Größen Auflast und Unterdruck infolge Gefrieren bestehen. Würde kein derartiger Zusammenhang bestehen, müsste nach dem obigen Modell die Frosthebungsgeschwindigkeit linear mit steigender Auflast abnehmen. Die durchgeführten Versuche zeigen jedoch eine überproportionale Abnahme, die nur durch das Vorhandensein einer direkten Beziehung zwischen Saugspannung und Auflast erklärt werden kann.

#### **Postulat:**

Aus der Summe der oben genannten Indizien lässt sich folgendes Postulat ableiten: Die für einen bestimmten Boden unter stationären thermischen und auch ansonsten konstanten geometrischen und mechanischen Randbedingungen gemessene Hebungsgeschwindigkeit reicht allein aus, um die Eislinnenbildung zu beschreiben.

### 5.3.2 Rechenmodell

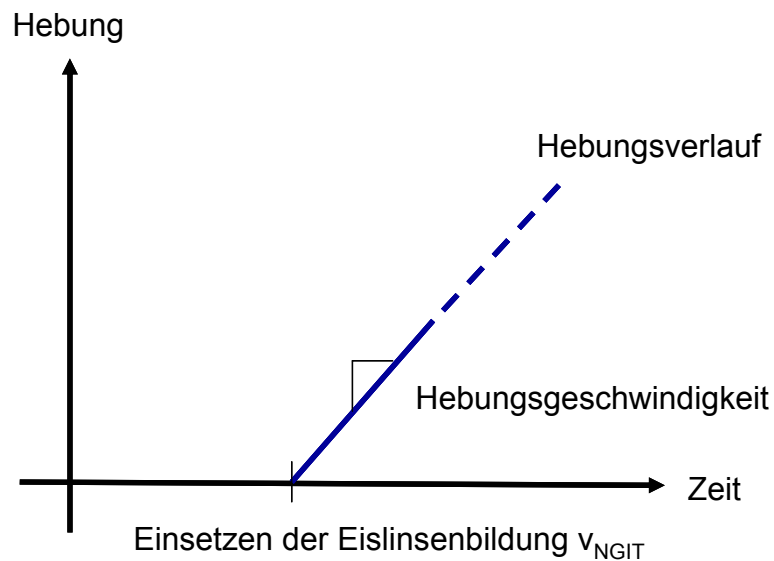


Abb. 5-15: Frosthebungen infolge Eislinsenbildung

Der geschilderte Mechanismus zur Eislinsenbildung lässt sich somit durch eine Gerade beschreiben, die ihre Nullstelle zu dem Zeitpunkt hat, an dem die Null-Grad-Isotherme die kritische Frosteindringgeschwindigkeit  $v_{NGIT}$  erreicht hat. Die kritische Frosteindringgeschwindigkeit ist dabei die Geschwindigkeit nach Gleichung (5.5) zu dem Zeitpunkt, an dem das Verhältnis der Frosthebung zur Höhe der gefrorenen Bodenzone minimal wird (vgl. Abbildung Abb. 5-12). Die Steigung der Gerade entspricht der im Referenzversuch gemessenen Hebungsgeschwindigkeit.

### 5.4 Gesamtbetrachtung Volumenzunahme und Eislinsenbildung

Der Frosthebungsverlauf kann als Summe aus der mit der Zeit abklingenden volumetrischen Hebung und der mit Erreichen der kritischen Frosteindringgeschwindigkeit einsetzenden linear verlaufenden Eislinsenbildung beschrieben werden.

#### Dritte Fortsetzung des Beispiels aus Kapitel 5.2:

Nachfolgend wird der in der zweiten Fortsetzung des Beispiels für die volumetrische Hebung berechnete Hebungsverlauf um die Eislinsenbildung ergänzt. Für die Parameter der Eislinsenbildung werden die folgenden Werte gewählt:

Parameter der Eislinsenbildung:

- Eindringgeschwindigkeit  $v_{NGIT}$   $v_{NGIT} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$
- Hebungsgeschwindigkeit  $v_{EL} = 1,00 \text{ mm/d}$

In der nachfolgenden Grafik ist die Summe aus volumetrischer Hebung und Eislinsenbildung als durchgezogene Linie dargestellt. Grau punktiert ist der zugehörige und in der zweiten Fortsetzung des Beispiels berechnete Verlauf der volumetrischen Hebung eingezeichnet.

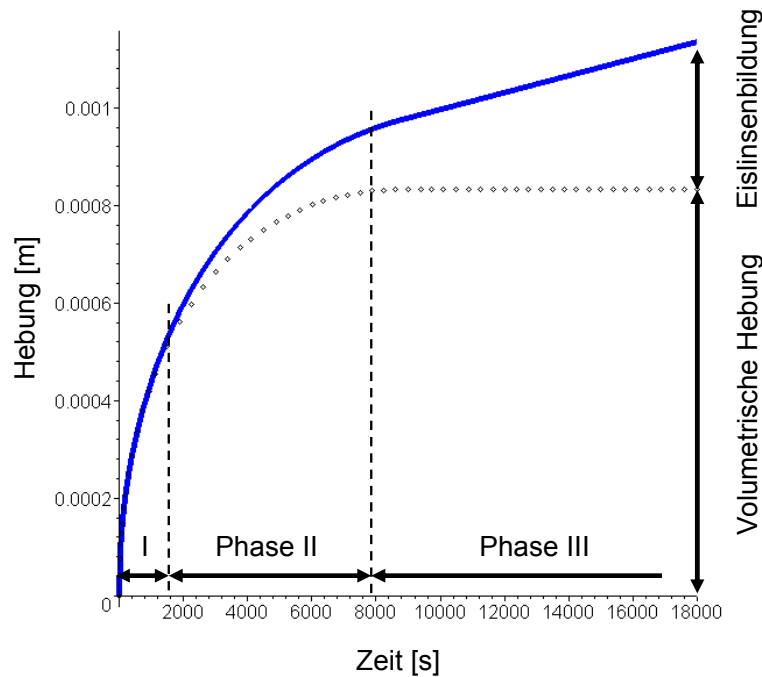


Abb. 5-16: Rechnerische Simulation der Frosthebung

Insgesamt lassen sich drei zeitliche Phasen des Hebungsverlaufs unterscheiden.

**Phase I:** Reine volumetrische Hebung

Mit Einsetzen des Frostes dringt die Null-Grad-Isotherme zunächst rasch in den Boden ein, wobei ein Teil des im Boden enthaltenen Porenwassers von der Gefrierfront weggedrückt wird und der verbleibende Teil gefriert.

**Phase II:** Mischform aus abklingender volumetrischer Hebung und Einsetzen der Eislinsenbildung

Sobald die Null-Grad-Isotherme ausreichend langsam in den Boden eindringt, kommt es zu einer Umkehr des Wassertransportes. Während das Porenwasser zu Beginn der Frostphase von der Gefrierfront weggedrückt wird, wird es mit dem Einsetzen der Eislinsenbildung zur Gefrierfront transportiert. Wenn die kritische Eindringgeschwindigkeit der Null-Grad-Isotherme für das Stoppen der Frosthebungen infolge Volumenzunahme höher ist als die kritische Eindringgeschwindigkeit für das Einsetzen der Eislinsenbildung, wird die Mischform entkoppelt.

**Phase III:** Reine Eislinsenbildung

Sobald die Eindringgeschwindigkeit der Null-Grad-Isotherme ausreichend langsam ist, kommt es zu keinen volumetrischen Hebungen mehr und es verbleibt der Mechanismus der Eislinsenbildung mit einem linearen Hebungsverlauf.

Vergleicht man den in Abb. 5-16 berechneten Verlauf einer Frosthebung qualitativ mit den in Abb. 5-17 dargestellten Ergebnissen der Versuche S-6-EL(-10/10) Nr. 9 bis 11, ist eine prinzipielle Übereinstimmung festzustellen.

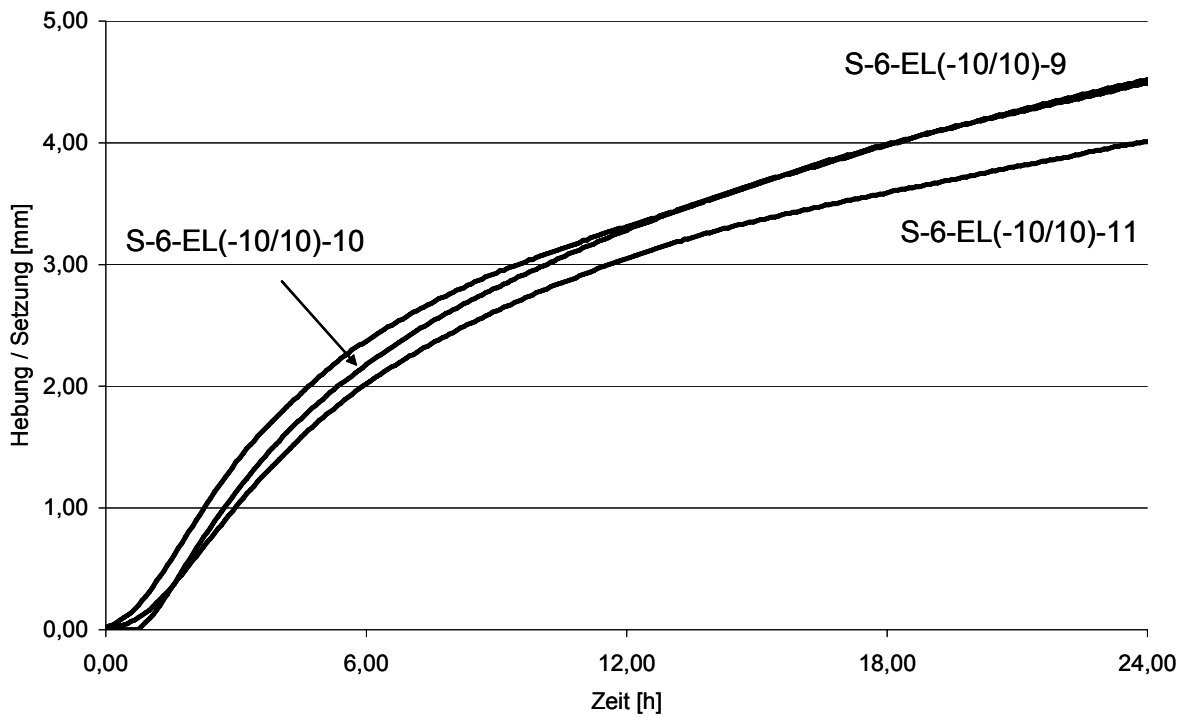


Abb. 5-17: Versuchsergebnisse S-6-EL(-10/10) Nr. 9 bis 11

Im nachfolgenden Kapitel wird der Einfluss einzelner Eingangsgrößen auf Form und Größe des rechnerisch ermittelten Hebungsverlaufs untersucht. Daran anschließend werden gemessene und berechnete Hebungsverläufe an Beispielen verglichen.

## 6 Parameterstudien

Nachfolgend wird das in Kapitel 5 vorgestellte analytische Modell hinsichtlich der Sensibilität einzelner Eingangsparameter getestet. Hierfür wird am Parametersatz des nachfolgend genannten Referenzmodells jeweils ein Parameter geändert.

Bodenkennwerte:

- Wassergehalt:  $w = 0,20$
- Durchlässigkeit:  $k = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$
- Dichte:  $\rho_2 = 2,07 \text{ g/cm}^3$
- Sättigungszahl:  $S_r = 1,00$

Wärmetechnische Kennwerte:

- Wärmeleitfähigkeit, gefroren:  $\lambda_1 = 1,95 \text{ W/mK}$
- Wärmeleitfähigkeit, ungefroren:  $\lambda_2 = 1,75 \text{ W/mK}$
- Wärmekapazität, gefroren:  $C_{m,1} = 2,02 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$
- Wärmekapazität, ungefroren:  $C_{m,2} = 2,71 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$
- Gefriertemperatur des Bodens:  $\theta_0 = \pm 0,00 \text{ }^\circ\text{C}$

Randbedingungen:

- Frosttemperatur:  $\theta_1 = -10,00 \text{ }^\circ\text{C}$
- Bodentemperatur:  $\theta_2 = +10,00 \text{ }^\circ\text{C}$
- Probenhöhe:  $h = 12,5 \text{ cm}$

Parameter der Eislinsenbildung:

- Eindringgeschwindigkeit NGIT:  $v_{\text{NGIT}} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$
- Hebungsgeschwindigkeit:  $v_{\text{EL}} = 2,00 \text{ mm/d}$

Im Einzelnen werden folgende Parameter variiert:

- Durchlässigkeit  $k$
- Auflast  $P$
- Sättigungszahl  $S_r$
- Frosttemperatur  $\theta_1$
- Eindringgeschwindigkeit der Null-Grad-Isotherme  $v_{\text{NGIT}}$
- Hebungsgeschwindigkeit  $v_{\text{EL}}$

Das Ziel der Parameterstudie ist die Darstellung der Änderung der Frosthebungen infolge Änderung eines einzelnen Parameters im Rechenmodell. In Laborversuch, bzw. im Feld werden sich in der Regel gleichzeitig mehrere Parameter ändern. Beispielsweise geht mit der Änderung der Durchlässigkeit  $k$  gleichzeitig eine Änderung der Wachstumsgeschwindigkeit der Eislinse  $v_{\text{EL}}$  einher. Diese Parameter können im Rechenmodell getrennt voneinander variiert werden. Einige der nachfolgend künstlich generierten und berechneten Hebungsverläufe sind daher in Versuchen so nicht zu erwarten.

### 6.1 Variation der Durchlässigkeitswerte

Die Variation der Durchlässigkeitswerte von  $k = 1 \cdot 10^{-9}$  m/s bis  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s ergibt für die Hebungen die unten in Abb. 6-1 grau hinterlegten Korridore.

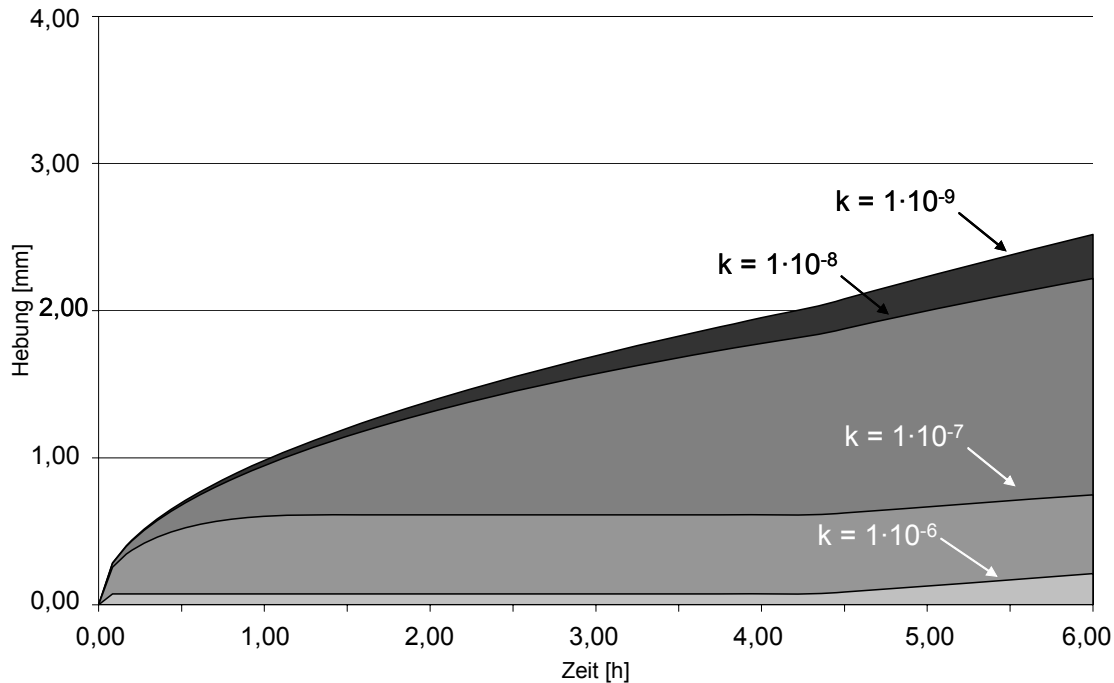


Abb. 6-1: Variation der Durchlässigkeitswerte  $k$

Der Hebungsverlauf lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Mit dem Einsetzen des Frostes kommt es zu einem sich stetig verlangsamenden Frosthebungsverlauf. Bei vergleichsweise hohen Durchlässigkeiten kommt es zwischenzeitlich zu einem Stillstand der Frosthebungen. Mit dem Einsetzen der Eislinsenbildung kommt es zu einer Zunahme der Frosthebungen mit einer konstanten Hebungsgeschwindigkeit.
- Je kleiner die Durchlässigkeit des gefrierenden Bodens, desto größer sind (unter ansonsten gleichen Rahmenbedingungen) die Hebungen. Mit dem oben beschriebenen Parametersatz sind bei einer Durchlässigkeit von  $k = 1 \cdot 10^{-9}$  m/s nach 6 Stunden Frosteinwirkung Hebungen von ca. 2,5 mm festzustellen, wohingegen bei einer Durchlässigkeit von  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s die Hebungen lediglich ca. 0,2 mm betragen.
- Je größer die Durchlässigkeit ist, desto schneller wird der Zeitpunkt erreicht, zu dem das Porenwasser vollständig abströmen kann. Ab diesem Zeitpunkt treten keine volumetrischen Hebungen mehr auf. Bei  $k = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s ist dies nach wenigen Minuten der Fall und bei  $k = 1 \cdot 10^{-7}$  m/s nach ca. einer Stunde. Bei niedrigeren Durchlässigkeiten kommen im betrachteten Zeitraum die volumetrischen Hebungen nicht vollständig zum Stillstand.
- Nach ca. 4,5 Stunden setzt die Eislinsenbildung ein. Dies führt zu einem Knick in den Hebungskurven.

## 6.2 Variation der Sättigungszahl

Die Sättigungszahl wurde zwischen  $S_r = 0,96$  und  $S_r = 1,0$  variiert. Die Ergebnisse sind in Abb. 6-2 dargestellt.

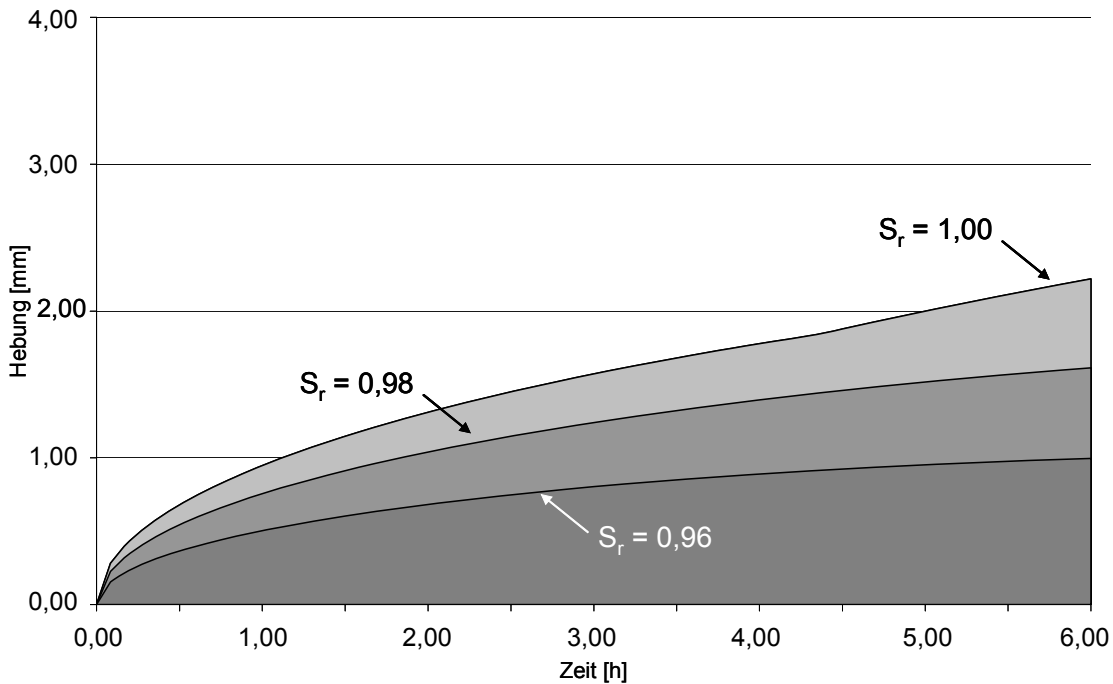


Abb. 6-2: Variation der Sättigungszahl  $S_r$

Mit zunehmendem Sättigungsgrad nehmen auch die rechnerischen Frosthebungen zu, da immer weniger Luftporenraum zur Verfügung steht, in den hinein sich das gefrierende Porenwasser zwangungsfrei ausdehnen kann. Im betrachteten Beispiel ist bei einem Sättigungsgrad von 96 % nach 6 Stunden Frosteinwirkung ca. 1 mm Hebung zu verzeichnen, wohingegen sich bei Vollsättigung über 2 mm Hebung ergeben.

### 6.3 Variation der Auflast

Die Variation der Auflast von  $P = 1 \text{ kN/m}^2$  bis  $P = 1000 \text{ kN/m}^2$  ergibt für die Hebungen die in Abb. 6-3 grau hinterlegten Korridore.

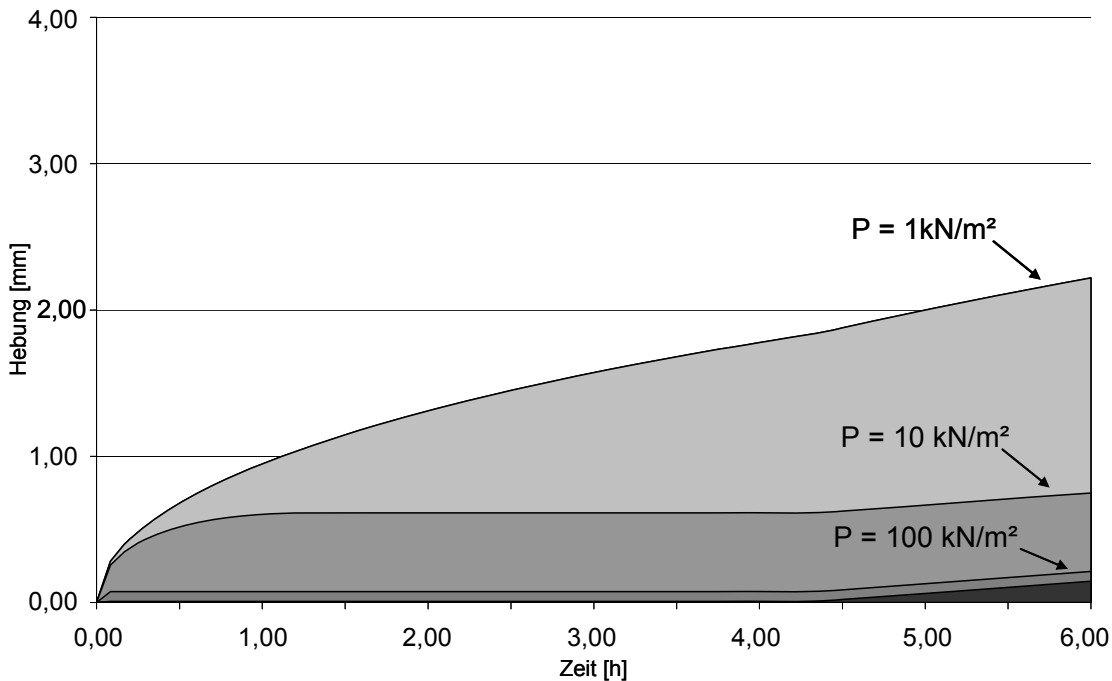


Abb. 6-3: Variation der Auflast P

Mit steigender Auflast werden die volumetrischen Hebungen kleiner, da sich mit der Auflast der an der ungefrorenen Bodenzone mobilisierbare hydraulische Gradient erhöht und somit im gleichen Zeitraum mehr Porenwasser abströmen kann.

#### Anmerkung:

In Kapitel 3 wurde gezeigt, dass sich im Versuch mit steigender Auflast auch das Eislinsenwachstum verlangsamt. Die Geschwindigkeit des Eislinsenwachstums  $v_{EL}$  wird im vorliegenden Rechenmodell und in der Parameterstudie formal als eigener unabhängiger Parameter eingeführt. Der Zusammenhang Auflast - Geschwindigkeit des Eislinsenwachstums wird formal getrennt untersucht.



#### 6.4 Variation der Frosttemperatur

Die Frosttemperatur wurde zwischen  $\theta_1 = -10\text{ °C}$  und  $\theta_1 = -100\text{ °C}$  variiert. Die Ergebnisse sind in Abb. 6-4 dargestellt.

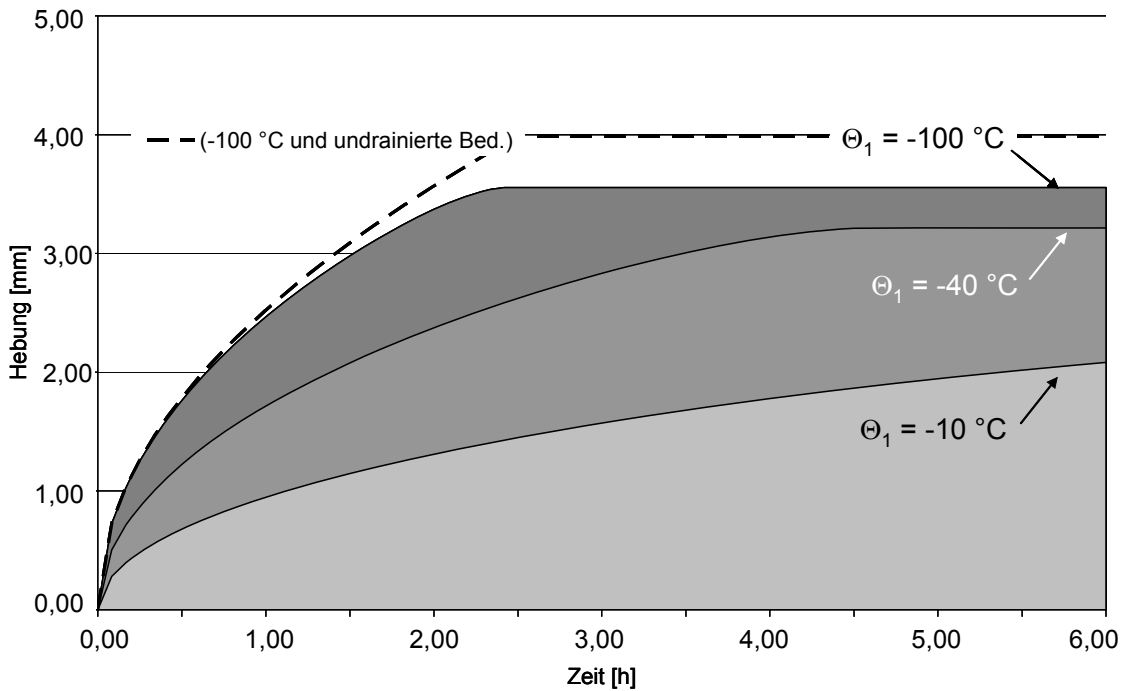


Abb. 6-4: Variation der Frosttemperatur  $\theta_1$

Es ist zu erkennen, dass sinkende Temperaturen zu größer werdenden volumetrischen Frosthebungen führen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei tieferen Temperaturen die NGIT schneller in den Boden eindringt, und somit dem Porenwasser weniger Zeit verbleibt, um in ungefrorene Bodenzonen abzufließen. Die Plateaus bei Temperaturen von  $\theta_1 = -40\text{ °C}$  und  $\theta_1 = -100\text{ °C}$  sind darauf zurückzuführen, dass der betrachtete Probekörper mit einer Höhe von 12,5 cm bei Beginn des Plateaus vollständig gefroren ist und anschließend keine weiteren Hebungen auftreten können.

### 6.5 Variation der kritischen Eindringgeschwindigkeit der Null-Grad-Isotherme

Die Variation der kritischen Eindringgeschwindigkeit der Null-Grad-Isotherme, ab deren Unterschreitung die Eislinsenbildung einsetzt, ergibt für die Hebungen die in Abb. 6-5 grau hinterlegten Korridore. Die weiße Fläche unter den Korridoren ist hierbei den Hebungen infolge Volumenvergrößerung zuzuordnen.

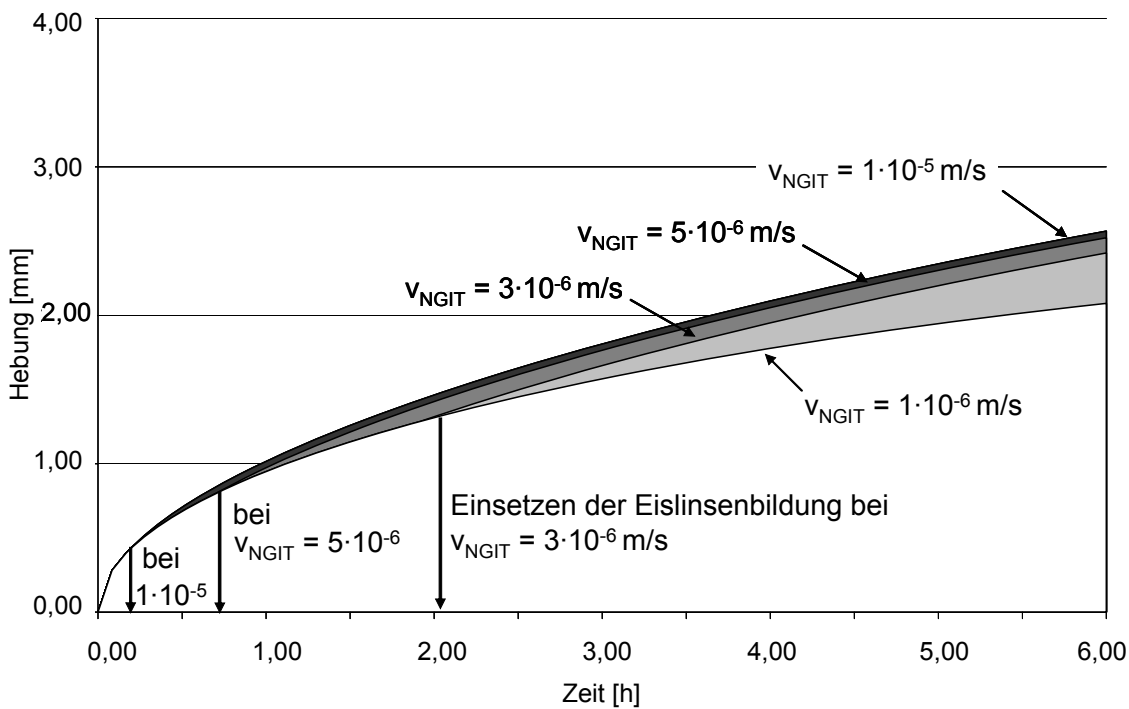


Abb. 6-5: Variation der kritischen Eindringgeschwindigkeit der NGIT  $v_{\text{NGIT}}$

Aus der Abbildung geht hervor, dass die Eislinsenbildung umso später einsetzt, je langsamer die kritische Eindringgeschwindigkeit der Null-Grad-Isotherme gewählt wird. Bei Geschwindigkeiten von  $v_{\text{NGIT}} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  setzt die Eislinsenbildung kurz nach Frostbeginn ein, während bei Geschwindigkeiten von  $v_{\text{NGIT}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  auch nach 6 Stunden Frosteinwirkung noch keine Eislinsenbildung einsetzt.

### 6.6 Variation der Hebungsgeschwindigkeit der Eislinsenbildung

Wird nicht die Geschwindigkeit der Frosteindringung und damit der Zeitpunkt des Einsetzens der Eislinsenbildung variiert, sondern die Geschwindigkeit des Eislinsenwachstums, so ergibt sich das in Abb. 6-6 dargestellte Bild.

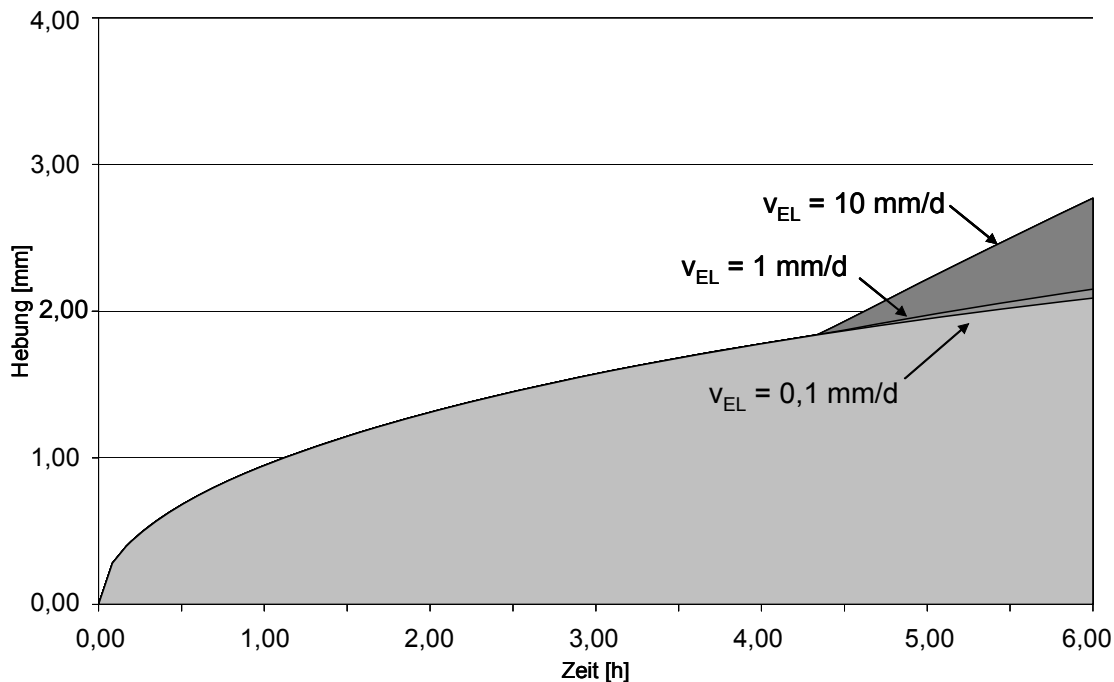


Abb. 6-6: Variation der Hebungsgeschwindigkeit der Eislinsenbildung  $v_{EL}$

Die Eislinsenbildung setzt entsprechend der Belegung des unabhängigen Parameters  $v_{NGIT}$  nach ca. 4 Stunden Frosteinwirkung ein. Die linear verlaufenden Hebungen infolge Eislinsenbildung führen bei gleicher Dauer entsprechend ihrer unterschiedlichen Hebungsgeschwindigkeiten zu Gesamthebungen von ca. 2 mm bis knapp unter 3 mm.

### 6.7 Bewertung der Parametervariation

Die Variation einzelner Parameter hat starken Einfluss auf die rechnerisch ermittelten Hebungsbeträge. Bei Variation mehrerer Parameter sind zeitgleich "gegenläufige" Entwicklungen möglich.

Dies bedeutet, dass ein bestimmter Wert für die Frosthebung bei vorgegebener Dauer der Frosteinwirkung mit unterschiedlichen Parametersätzen, d.h. auf verschiedenen Hebungspfaden erreichbar ist. So kann z.B. grundsätzlich die Kombination aus geringer volumetrischer Hebung, wie sie z.B. beim Auffrieren geringer Kubaturen auftreten wird, und hohem Eislinsenwachstum bei gleicher Dauer der Frosteinwirkung zu denselben Hebungen führen wie eine große volumetrische Hebung und geringes Eislinsenwachstum.

In besonderen Fällen können zusätzlich auch die Hebungspfade gleich sein. So kann z.B. die Kombination aus geringer Durchlässigkeit und größerem Luftporenanteil rechnerisch zum gleichen Hebungspfad führen wie eine höhere Durchlässigkeit bei geringerem Luftporenanteil.

Im Hinblick auf die später zu betrachtenden Frosthebungen infolge tief liegender Vereisungskörper kann bereits hier festgehalten werden, dass ein großer, oberflächennaher Vereisungskörper, auf den nur geringe Auflasten wirken, bei kurzer Vorhaltdauer und entsprechend wenig Zeit für ein eventuelles Eislinsenwachstum zu den gleichen Frosthebungen führen kann wie ein kleiner, tief liegender Vereisungskörper mit langer Vorhaltdauer.

Im nächsten Kapitel werden die Messergebnisse zweier Versuche mit den rechnerisch ermittelten Hebungsbeträgen verglichen.

## 7 Vergleich von Messungen und Berechnungen an Beispielen

### 7.1 Gegenrechnung der Versuche T2-100-VO(-20), Nr. 1 bis 4

In Abb. 7-1 sind die Einzelwerte der vier gemessenen Hebungsverläufe des Versuchs T2-100-VO(-20) eingezeichnet. Bei den Messungen Nr. 2 bis Nr. 4 ist nach ca. 2 Stunden Frosteinwirkung ein Plateau im Hebungsverlauf zu erkennen, welches bei Messung Nr. 4 nach ca. 4 Stunden in einen linearen Hebungsverlauf übergeht und bei den Messungen Nr. 2 und Nr. 3 nach ca. 5 Stunden. Messung Nr. 1 zeigt kein derartiges Plateau. In der aus vier Einzelproben bestehenden Versuchsserie wurden nach ca. 7 Stunden Frosteinwirkung Hebungen zwischen 0,2 mm und 0,7 mm festgestellt. Die Dicke der gefrorenen Bodenschicht betrug nach Versuchsende zwischen 68 mm und 76 mm.

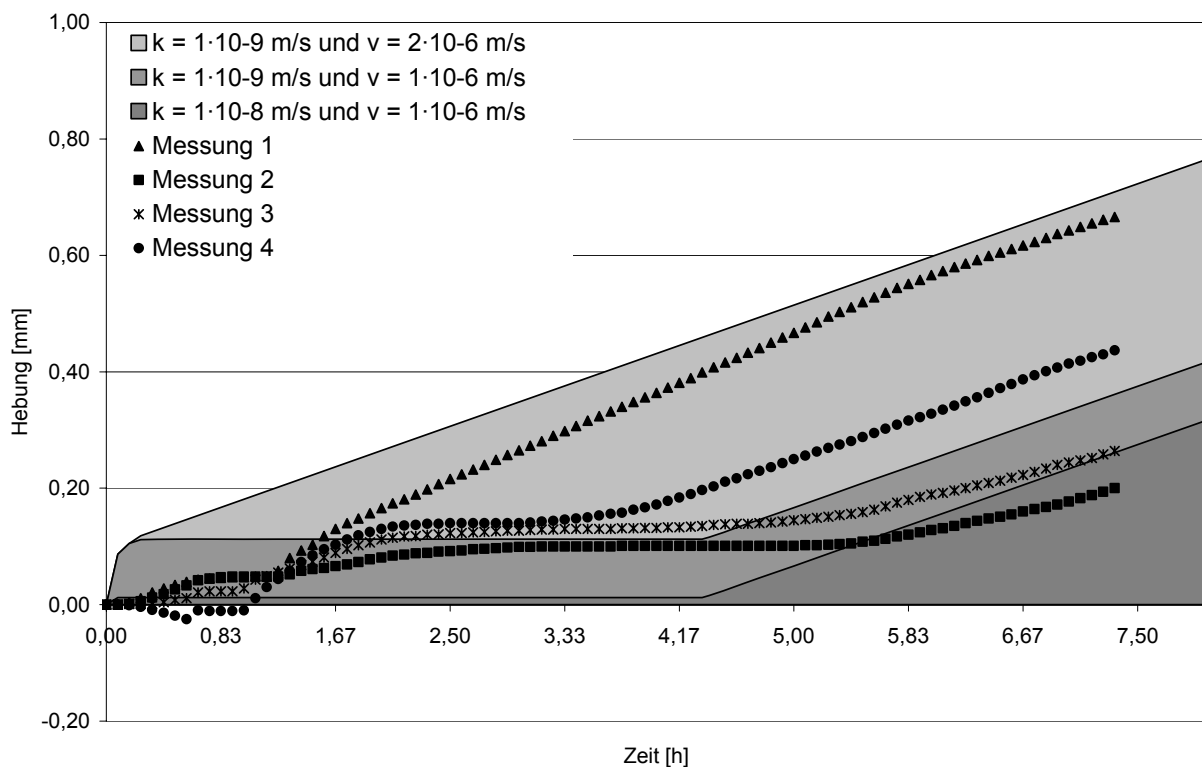


Abb. 7-1: Gemessene und berechneten Frosthebungen Versuch T2-100-VO(-20), Nr. 1-4

Die Gegenrechnung erfolgt mit dem in Kapitel 5 beschriebenen Modell. In einem ersten Schritt wird die Frosteindringung berechnet, wobei der Berechnung die nachfolgend aufgeführten Kennwerte und Randbedingungen zu Grunde gelegt werden:

Bodenkennwerte:

– Wassergehalt:

$$w = 0,20$$

– Dichte:

$$\rho_2 = 2,07 \text{ g/cm}^3$$

Wärmetechnische Kennwerte:

- Wärmeleitfähigkeit, gefroren:  $\lambda_1 = 1,95 \text{ W/mK}$
- Wärmeleitfähigkeit, ungefroren:  $\lambda_2 = 1,75 \text{ W/mK}$
- Wärmekapazität, gefroren:  $C_{m,1} = 2,02 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$
- Wärmekapazität, ungefroren:  $C_{m,2} = 2,71 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$
- Gefriertemperatur des Bodens:  $\theta_0 = \pm 0,00 \text{ }^\circ\text{C}$

Randbedingungen:

- Frosttemperatur:  $\theta_1 = -20,00 \text{ }^\circ\text{C}$
- Bodentemperatur:  $\theta_2 = +10,00 \text{ }^\circ\text{C}$

Die Proportionalitätskonstante der Neumann Lösung berechnet sich zu  $5,4 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-0,5}$ . Bei einer Frostdauer von 7 Stunden ergibt sich eine rechnerische Frosteindringtiefe von 86 mm, bei einer Frosttemperatur von  $-15 \text{ }^\circ\text{C}$  läge sie nach sieben Stunden bei 72 mm. Die rechnerische Frosteindringtiefe überschätzt somit die gemessene Eindringtiefe. Als Ursache kommt hierfür der Unterschied in der Temperaturaufbringung in Berechnung und Versuch in Frage. In der Berechnung wird die Probenoberseite zum Zeitpunkt  $t = 0 \text{ s}$  schlagartig mit der Gefriertemperatur beaufschlagt. Im Versuch wird der Zeitpunkt, an dem die Zuluft der Klimakammer  $0^\circ\text{C}$  unterschreitet, als Nullpunkt der Zeitmessung gewählt.

Der Zeitpunkt des Einsetzens der Frosteinwirkung wird mit dem Zeitpunkt gleichgesetzt, ab dem Luft mit einer Temperatur von  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  in die Prüfkammer eingeblasen wird. Dieser Zeitpunkt ist nicht mit dem Zeitpunkt gleichzusetzen, an dem diese Temperatur auch auf die Proben einwirkt, da hierzu vorab noch die Luft in der Kammer ausgetauscht werden muss, die dem Frost ausgesetzten Bauteile heruntergekühlt werden müssen und der Frost auch den Metallstempel auf der Probenoberseite durchdringen muss.

Bis in der Realität die gewünschte Gefriertemperatur an der Probenoberseite anliegt, muss also noch die gesamte obere Kammer des Klimaschranks incl. der Belastungseinrichtungen abgekühlt werden. Hierdurch verzögert sich die tatsächliche Frosteindringung, und die versuchstechnisch ermittelte Eindringtiefe muss bei dieser Vorgehensweise etwas kleiner als die rechnerisch ermittelte Eindringtiefe sein. Unter Berücksichtigung dieser Tatsachen müssten die gemessenen Kurven in der dargestellten Grafik nach links Richtung Ursprung verschoben werden, um eine bessere Vergleichbarkeit zu erzielen. Da aber der Zeitpunkt, ab dem exakt an der Probenoberseite die gewünschte Gefriertemperatur erreicht wird, nicht ermittelt werden kann (die eingesetzten Pt-100 Wärmefühler erlauben aufgrund ihrer Abmessungen keine Temperaturmessung in einer dünnen Grenzschicht), kann auch der Betrag nicht sicher ermittelt werden, um den die Kurven verschoben werden müssten. Daher wird auf ein nachträgliches Verschieben der Kurven verzichtet.

Eine Abschätzung dieses Zeitraums ist jedoch möglich. Hierzu wird der Zeitpunkt ermittelt, an dem die aus den Werten von fünf über die Probenhöhe angeordneten Wärmefühlern durch lineare Interpolation berechnete Lage der Null-Grad-Isotherme die Probenoberseite bei 12,5 cm erreicht. Im Versuch T2-6-IM (-10/-5/+10)-1 und -2 (vgl. Abb. 3-34) war dies beispielsweise nach 0,83 Stunden, bzw. 1,00 h Stunden ab dem Zeitpunkt, ab dem die Luft mit einer Temperatur von unter  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  in die obere Kammer eingeblasen wurde, der Fall.

In einem zweiten Schritt wird die volumetrische Frosthebung berechnet. Hierfür werden folgende weitere Parameter in die Berechnung eingeführt:

Bodenkennwerte:

- Korndichte:  $\rho_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$
- Durchlässigkeit:  $k = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$  bzw.  $1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$

Die im Laborversuch ermittelte Durchlässigkeit lag bei  $k = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$  und wurde in der Berechnung einmal mit  $k = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$  etwas kleiner und mit  $k = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$  deutlich größer als der im Versuch ermittelte Wert angesetzt.

In einem dritten Schritt wird die Hebung infolge Eislinnenbildung berechnet. Hierfür werden folgende weitere Parameter in die Berechnung eingeführt:

Parameter der Eislinnenbildung:

- Eindringgeschwindigkeit NGIT  $v_{\text{NGIT}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  bzw.  $2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$
- Hebungsgeschwindigkeit  $v_{\text{EL}} = 2,00 \text{ mm/d}$

Für die Berechnungen mit einer Durchlässigkeit von  $k = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$  wurde weiterhin die Eindringgeschwindigkeit der Null-Grad-Isotherme bis zum Einsetzen der Eislinnenbildung einmal mit  $v_{\text{NGIT}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  und mit  $v_{\text{NGIT}} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  angenommen. Durch die Variation der Werte für die Durchlässigkeit und der kritischen Eindringgeschwindigkeit der Null-Grad-Isotherme entstehen Korridore für die rechnerisch ermittelten Frosthebungsverläufe. Diese sind in Abb. 7-1 grau hinterlegt.

Ergebnisse:

- Der zeitliche Verlauf der gemessenen Hebungen kann qualitativ rechnerisch nachvollzogen werden.
- Die im Versuch ermittelten Hebungen von ca. 0,20 bis ca. 0,65 mm können bei Variation der Durchlässigkeit und der Frosteindringgeschwindigkeit innerhalb realistischer Bandbreiten nachvollzogen werden. Zum Vergleich: die unter gleichen Randbedingungen mit dem Kaolin gemessenen Hebungen lagen bei ca. 4 mm und unterscheiden sich deutlich von den hier betrachteten Hebungsbeträgen.
- Eine starke Abweichung der Berechnung von der Messung gibt es zu Versuchsbeginn: Die rechnerischen Hebungen setzen vergleichsweise früher ein als die gemessenen Hebungen. Eine plausible Erklärung liefert der bereits weiter oben beschriebene Vergleich der zeitlichen Nullpunkte von Berechnung und Messung. Die Größenordnung von ca. 1 Stunde, die zwischen dem rechnerischen Einsetzen der Frosthebung und dem tatsächlichen Einsetzen merklicher Frosthebungen im Versuch liegt, kann damit nachvollzogen werden (vgl. z.B. Abb. 3-34).

## 7.2 Gegenrechnung der Versuche T1-6-EL(-20/10), Nr. 1 bis 4

In Abb. 7-2 sind die Einzelwerte der vier gemessenen Hebungsverläufe des Versuchs T1-6-EL(-20/10) eingezeichnet. Die Gegenrechnung erfolgte mit dem in Kapitel 5 beschriebenen Modell und den in Kapitel 3 beschriebenen Bodenkennwerten und thermischen Randbedingungen. Wie im vorangegangenen Beispiel wurde die Durchlässigkeit in der Berechnung einmal mit  $k = 1 \cdot 10^{-9}$  kleiner und mit  $k$

=  $2 \cdot 10^{-9}$  und  $k = 1 \cdot 10^{-8}$  größer als der im Versuch ermittelte Wert angesetzt. Die dadurch entstehenden Korridore in der Berechnung sind in Abb. 7-2 grau hinterlegt.

Die betrachtete Dauer der Frosteinwirkung wurde auf 24 Stunden begrenzt, da ab diesem Zeitpunkt ausschließlich die Eislinnenbildung auftrat, welche – wie in Kapitel 5 erläutert – nicht durch das vorliegende Modell in einer Gegenrechnung ohne Laborversuch überprüft werden kann.

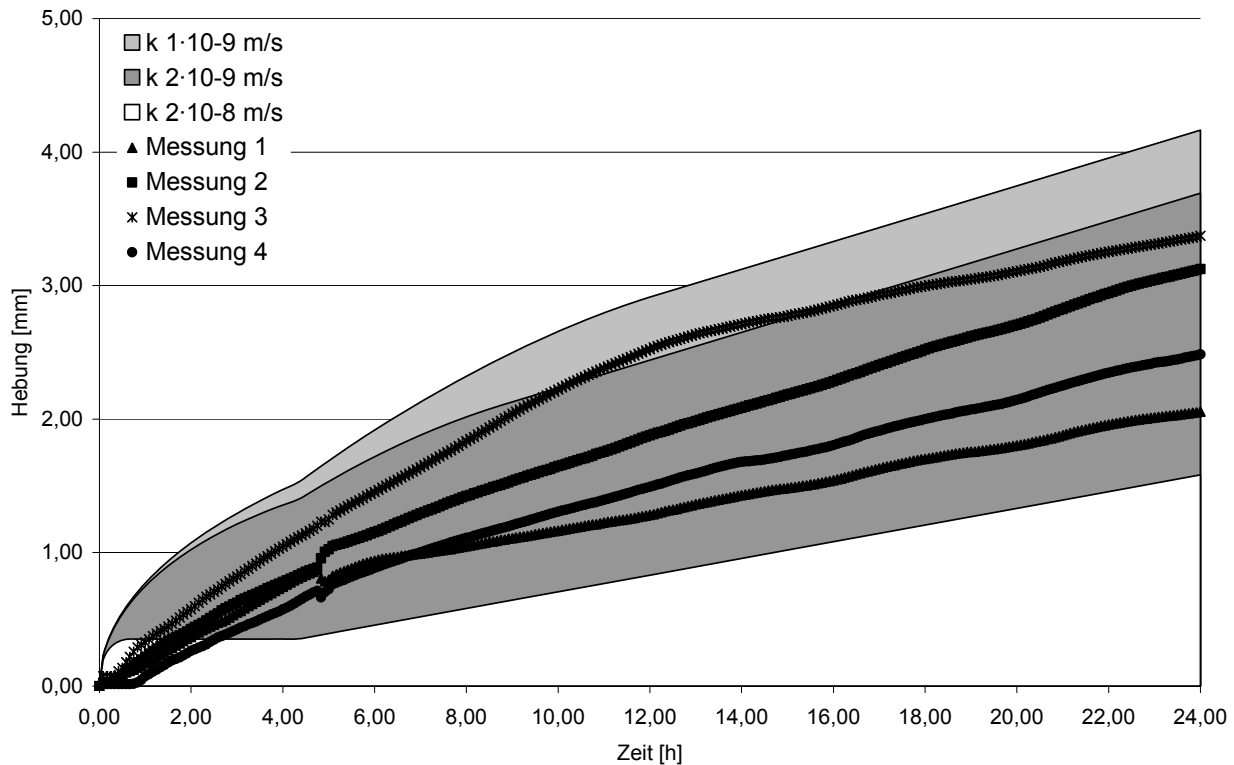


Abb. 7-2: Gemessene und berechneten Frosthebungen Versuch T1-6-EL(-20/10), Nr. 1-4

Es ist zu erkennen, dass Verlauf und erreichte Hebungsbeträge gut nachvollzogen werden können. Wie auch im vorangegangenen Beispiel werden zu Beginn der Frosteinwirkung rechnerisch höhere Hebungsbeträge, als die Messungen ergeben, ermittelt.

Zum Vergleich: Beim Kaolin lagen die Hebungsbeträge nach 24 Stunden Frosteinwirkung bei ca. 16 mm und unterschieden sich deutlich von den oben berechneten Korridoren.

### 7.3 Bewertung der Gegenrechnung

Die vorangegangenen Beispiele haben gezeigt, dass die Versuchsergebnisse nachvollzogen werden können, wenn insbesondere die Durchlässigkeit innerhalb realistischer Bandbreiten variiert wird. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass auch relativ geringe Änderungen in den Eingangsparametern zum Teil erhebliche Einflüsse auf die Hebungsbeträge besitzen können.

Im Hinblick auf eine Prognose von Frosthebungen ist die Möglichkeit des Nachvollziehens der Beispiele notwendig, aber nicht hinreichend. Für eine Prognose ist es erforderlich, die Werte der Eingangsparameter mit wahrscheinlichen Bandbreiten anzugeben und daraus ebenso eine Bandbreite



möglicher Hebungen zu erhalten. Dieser Schritt wird im nächsten Kapitel mit Hilfe einer Monte Carlo Simulation durchgeführt.

## 8 Monte Carlo Simulation der eindimensionalen Frosteindringung

### 8.1 Allgemeines

In den Kapiteln 4 und 5 wurde ein mechanisches Modell für die Beschreibung von Frosthebungen unter Auflasten, wie sie für tief liegende Vereisungskörper typisch sind, vorgestellt. Es wurde gezeigt, dass zur Beschreibung des Wärme- und Massentransportes eine Vielzahl von Parametern notwendig ist. Zusammenfassend werden benötigt:

- 4 Parameter zur Beschreibung der Bodeneigenschaften
  - Wassergehalt  $w$
  - Dichte  $\rho_2$
  - Korndichte  $\rho_s$
  - Durchlässigkeit  $k$
- 4 Parameter zur Beschreibung der thermischen Eigenschaften des Bodens
  - Wärmeleitfähigkeit, gefroren  $\lambda_1$
  - Wärmeleitfähigkeit, ungefroren:  $\lambda_2$
  - Wärmekapazität, gefroren:  $C_{m,1}$
  - Wärmekapazität, ungefroren:  $C_{m,2}$
- 3 Parameter zur Beschreibung der thermischen Randbedingungen
  - Gefriertemperatur:  $\theta_0$
  - Frosttemperatur:  $\theta_1$
  - Bodentemperatur:  $\theta_2$
- 2 Parameter zur Beschreibung der geometrischen und mechanischen Randbedingungen
  - Abstand der Wärmesenke zur Drainage  $h$
  - Auflast  $P$
- 2 Parameter zur Charakterisierung der Eislinnenbildung
  - kritische Eindringgeschwindigkeit der Null-Grad-Isotherme  $v_{NGIT}$
  - Wachstumsgeschwindigkeit der Eislinne  $v_{EL}$

Die Werte aller benötigten Parameter können mit Ausnahme der Hebungsgeschwindigkeit und der kritischen Frosteindringgeschwindigkeit bei der Eislinnenbildung in genormten bodenmechanischen oder thermodynamischen Versuchen ermittelt werden. Die Versuchsergebnisse unterliegen dabei in unterschiedlichem Maß Streuungen. Dies kann auf die im natürlichen Baustoff Boden stets vorhandenen Inhomogenitäten, aber auch auf die Versuchsdurchführung selbst zurückzuführen sein. Exemplarisch für den letzten Fall seien Durchlässigkeitsversuche an bindigen Böden genannt, die auch bei sorgfältiger Versuchsdurchführung zum Teil nicht unerheblichen Streuungen unterliegen. Insgesamt kann festgestellt werden, dass mit steigender Anzahl der Eingangsparameter für ein bodenmechanisches Modell in der Regel auch die mit dem Ergebnis – hier der Frosthebung – verbundenen Unsicherheiten anwachsen. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, diese Unsicherheiten zu quantifizieren, um eine abgesicherte Aussage über die Streubreiten der Ergebnisgröße und die Wahrscheinlichkeiten, mit denen einzelne Werte dieser Größe erreicht oder überschritten werden, zu gewinnen.

Hierfür stellt die Methode der Monte Carlo Simulation ein geeignetes Werkzeug dar. Eine Einführung in diese grundlegende Methode der numerischen Simulation ist beispielsweise in SCHUËLLER (1981) enthalten. Weiterführende Methoden, wie z.B. die gewichteten Simulationen „importance sampling“ werden bevorzugt für die Berechnung von Versagenswahrscheinlichkeiten eingesetzt.

Generell wird bei der Monte Carlo Simulation mit Hilfe künstlich generierter und zufällig ausgewählter Stichproben aus den Eingangsparametern die Verteilung und Streubreite der gesuchten Ergebnisgröße, hier der Frosthebung, ermittelt. In einem ersten Schritt ist es notwendig, die Streubreiten und Verteilungen der Eingangsgrößen zu quantifizieren. Dies geschieht dadurch, dass an die diskreten Verteilungen der Versuchsergebnisse (Histogramme) stetige Wahrscheinlichkeitsverteilungen angepasst werden. Die Schwierigkeit ergibt sich daraus, dass in der Geotechnik für eine spezifische Aufgabenstellung im Allgemeinen nur wenige Versuchsergebnisse pro zu bestimmendem Parameter vorliegen. Eine stichhaltige und mathematisch hinreichend sichere Aussage hinsichtlich der unter gegebenen Randbedingungen zu erwartenden Hebungen ist damit zunächst nicht möglich, da die Verteilung aller unter den selben Randbedingungen möglichen Versuchsergebnisse, d.h. die Grundgesamtheit nicht bekannt ist. Wenn aber durch die Analyse einer Vielzahl, z.B. eigener und in der Literatur dokumentierter Laborversuche abgesichert werden kann, dass eine Größe wie z.B. die Durchlässigkeit normalverteilt ist, so gewinnen die wenigen pro Boden durchgeführten Versuche an Bedeutung. Sie können dann zur Bestimmung der Parameter der Grundgesamtheit verwendet werden. Dies bietet den Vorteil, dass dadurch auch mit Versuchsergebnissen, deren Randbedingungen keinen unmittelbaren Zusammenhang zu einer konkreten Problemstellung aufweisen, die Zuverlässigkeit einer Prognose erhöht werden kann. Die vorhandenen Laborergebnisse werden bei der Ermittlung der Parameter der Grundgesamtheit als zufällig und unabhängig voneinander ausgewählte Stichproben aus der Grundgesamtheit betrachtet.

Die genannten Zusammenhänge sind vor allem für die Verwendung der Ergebnisse der Frosthebungsversuche von Bedeutung. Aufgrund der geringen Anzahl kann zwar vermutet, jedoch nicht abgesichert festgestellt werden, dass der Parameter Hebungsgeschwindigkeit  $v_{EL}$  normalverteilt ist. Aus diesem Grund wird später sowohl die Auswirkung einer normalverteilten als auch der einfacheren gleichverteilten Zufallsgröße "Hebungsgeschwindigkeit" untersucht.

Dabei ist zu beachten, dass durch eine numerische Simulation einzelne, aber nicht alle mit dem in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Modell zur Prognose der Frosthebungen verbundenen Unsicherheiten eingegrenzt werden können. Die mit einer Prognose verbundenen Unsicherheiten lassen sich wie folgt gruppieren:

- **Natürliche Unsicherheit:** Die Eingangsdaten sind in sich das Ergebnis von Zufallseigenschaften und besitzen gewisse Streubreiten. Hierunter fallen z.B. die auch bei sorgfältiger Probenherstellung aufgrund des natürlichen Stoffes Boden nie vermeidbaren Unterschiede der Probenkörper untereinander.
- **Statistische Unsicherheit:** Wurden die Werte für den Erwartungswert und die Varianz einer normalverteilten Zufallsgröße nur aus wenigen Laborversuchen bestimmt, dann erhält man aufgrund der beschränkten Stichprobenanzahl keinen Aufschluss darüber, ob diese Werte mit hinreichender Sicherheit den tatsächlichen Werten entsprechen.
- **Modellunsicherheit:** Hierunter fallen eventuelle Modellfehler des in Kapitel 4 und 5 hergeleiteten Modells sowie Fehler bei der Anpassung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen an die Versuchsergebnisse.

Mit Hilfe der vorgestellten Monte-Carlo-Simulation lassen sich die natürliche Unsicherheit und die statistische Unsicherheit minimieren, jedoch nicht eliminieren. Die Qualität des Modells kann dadurch allerdings nicht verbessert werden.

## 8.2 Die Anwendung der Monte-Carlo-Simulation zur Prognose von Frosthebungen

Die Werte der oben genannten Eingangsparameter unterliegen sowohl infolge der nie konstanten Eigenschaften des natürlichen Baustoffes Boden als auch infolge der Versuchsdurchführung unterschiedlich starken Streuungen. Daher erscheint es zweckmäßig, die genannten Eingangsgrößen hinsichtlich ihrer Streubreiten in quasi-deterministische und probabilistische Größen zu unterscheiden. Sie können grob unterteilt werden in schwach streuende Größen wie z.B.:

- Dichte  $\rho$
- Wassergehalt  $w$
- Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$
- Wärmekapazität  $C$

Derartige Größen werden im weiteren Verlauf der Rechnung als quasi-deterministische Größen angesehen. Dem stehen stärker streuende Werte gegenüber. Im vorliegenden Fall sind dies die nachfolgend genannten Parameter, die im weiteren Verlauf als probabilistische Größen betrachtet werden:

- **Durchlässigkeit  $k$** : Der Wert der Durchlässigkeit  $k$  hat gravierenden Einfluss auf das Frosthebungsverhalten von Böden. Insbesondere bei gering durchlässigen Böden lassen sich die Werte nur mittels komplexer Laborversuche, deren Ergebnisse im Vergleich zu einfachen Laborversuchen in der Regel stärker streuen, bestimmen.
- **Hebungsgeschwindigkeit  $v_{EL}$** : Die Hebungsgeschwindigkeit hat unmittelbaren Einfluss auf das Hebungsverhalten und lässt sich ebenfalls nur mittels komplexer Laborversuche bestimmen.
- **Abstand  $h$**  vom Wasserangebot bis zur Wärmesenke. Während der Abstand  $h$  im Laborversuch eine ebenfalls quasi-deterministische Größe ist, nämlich die Probenhöhe, entspricht dieser Wert im Feld dem Abstand der Gefrierrohre zu durchlässigen wasserführenden Schichten. Dieser Abstand ist insbesondere bei wechselhafter Geologie geometrisch nur schwer abzuschätzen.

Es wird nun untersucht, wie sich Streuungen dieser Größen auf die zu berechnenden Hebungsbeträge auswirken. Hierzu werden numerisch Experimente mit künstlich generierten Stichproben durchgeführt. Zunächst werden für die Eingangsgrößen der Simulation ( $k$ ,  $h$ ,  $v_{EL}$ ) Zufallszahlen generiert, deren Werte und Verteilung direkt der physikalischen Zufallsgröße entsprechen.

In der nachfolgenden Abb. 8-1 ist beispielhaft die aus den in Abschnitt 3 beschriebenen Versuchen abgeleitete Verteilungsfunktion für die **Hebungsgeschwindigkeit  $v_{EL}$**  des tertiären Tons T1 bei einer Auflast  $P$  von  $6 \text{ kN/m}^2$  dargestellt. Aus den im Laborversuch gemessenen Werten konnte ein Mittelwert von  $1,5 \text{ mm/d}$  und eine Standardabweichung von  $0,5 \text{ mm/d}$  ermittelt werden. Unter der Annahme, dass die Hebungsgeschwindigkeiten gauß-normalverteilt sind, wurden mit einem Zufallszahlengenerator 200 Stichproben oder Realisierungen künstlich erzeugt. Diese sind als schwarze Kreuze oberhalb der Verteilungsfunktion in Abb. 8-1 dargestellt. Nimmt man dagegen an, dass die Hebungsgeschwindigkeiten im Intervall von  $[1,0 \text{ mm} - 3,0 \text{ mm}]$  gleichverteilt sind, so erhält man die in Abb. 8-2 dargestellte Verteilung der künstlichen Stichproben.

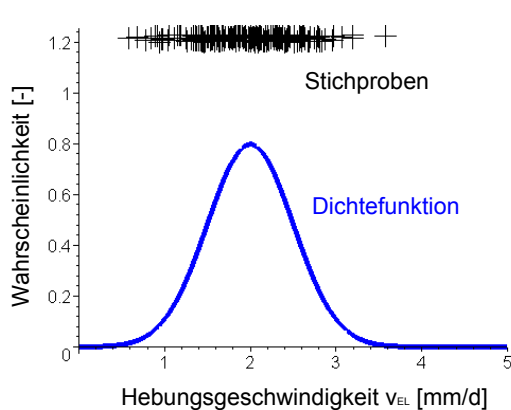


Abb. 8-1: Gauß-Verteilung und künstlich erzeugte Stichproben

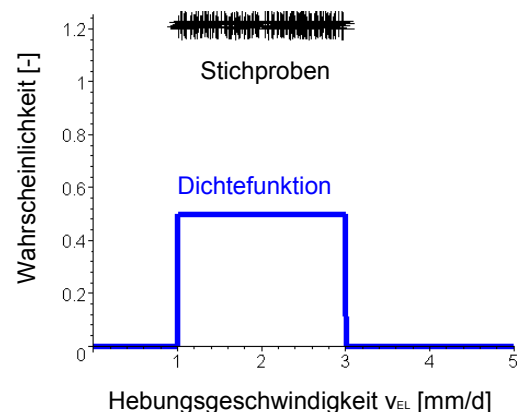


Abb. 8-2: Gleichverteilte künstlich erzeugte Stichproben

Bei den künstlichen Stichproben, denen eine Normalverteilung zu Grunde gelegt wurde, gruppieren sich die Werte um den Erwartungswert der Verteilung von 2,0 mm/d. Mit zunehmender Entfernung vom Erwartungswert nimmt auch die Anzahl der erzeugten Stichproben ab. Da die Normalverteilung zu den Seiten hin nicht begrenzt ist, können auch Stichproben mit unsinnigen negativen oder sehr hohen Werten (mit entsprechend geringer Wahrscheinlichkeit) erzeugt werden. Die gleichverteilten Stichproben in Abb. 8-2 sind auf das vorgegebene Intervall beschränkt und darin gleichmäßig verteilt. Für die Zufallsgrößen der **Durchlässigkeit k** und des **Abstandes h** wird analog die gleiche Anzahl von künstlichen Stichproben erzeugt.

Für ein künstliches Experiment werden nun jeweils aus den Listen der Zufallszahlen für alle Eingangsgrößen Werte entnommen. Mit diesen Werten wird die Hebung gemäß der Abschnitte 4 und 5 ausgerechnet. Führt man auf diese Weise mehrere Experimente durch, so können die Ergebnisse in Form eines Histogramms aufgetragen werden. Aus diesem Histogramm können nun Fraktilewerte abgelesen werden. Die 50%-Fraktile entspricht hierbei dem Erwartungswert der Versuche. Möchte man im Sinne des Teilsicherheitskonzeptes einen charakteristischen Wert für eine Frost-Hebungsprognose ableiten, so kann hierfür die 95%-Fraktile verwendet werden. Die Berechnung der Frosthebung und die beschriebene Monte Carlo Simulation wurden mit dem Programmpaket "Maple" formuliert.

#### Vierte Fortsetzung des Beispiels aus Kapitel 5.4:

In Kapitel 5.4 wurden die für einen tertiären Ton bei einer Frosteinwirkung von 5 Stunden zu erwartenden Hebungen, getrennt nach den Anteilen aus volumetrischer Hebung und Eislin-senbildung, ermittelt. Nachfolgend sollen für die Parameter Durchlässigkeit und Hebungsgeschwindigkeit realistische Streubreiten angegeben werden und die Auswirkungen auf die Hebungen mit Hilfe der Monte Carlo Simulation untersucht werden.

Für die **Hebungsgeschwindigkeit  $v_{EL}$**  wurden für den tertiären Ton T1 bei Auflasten von 6 kN/m<sup>2</sup> im Versuch Hebungsgeschwindigkeiten zwischen 1,62 mm/d und 2,65 mm/d gemessen (vgl. Versuch T1-6-(-10/10) Nr. 1-4). Es wird die in Abb. 8-1 skizzierte Gauss-Verteilung zu Grunde gelegt.

Für die **Durchlässigkeit  $k$**  wurde in der zweiten Fortsetzung des Beispiels ein Wert von  $1,0 \cdot 10^{-8}$  m/s angesetzt. Im Rahmen der Monte-Carlo Simulation wird dieser Wert als Mittelwert verwendet. Es wird eine gleichverteilte Zufallsgröße mit einer Schwankungsbreite von einer halben Größenordnung angenommen, d.h. die künstlich erzeugten Stichproben liegen im Intervall  $[5 \cdot 10^{-7} \dots 5 \cdot 10^{-8}]$ .

Der **Abstand  $h$**  entspricht im Laborversuch der Höhe des Probekörpers. Er wird als normalverteilte Zufallsgröße mit dem Mittelwert 12,5 cm und einer Standardabweichung von 0,3 cm angenommen.

Abb. 8-3 zeigt das Histogramm von 250 künstlich generierten Experimenten. Das Histogramm wurde auf eine Fläche von 1 skaliert. Die 50%-Fraktile liegt bei einem Wert von 1,21 mm Hebung und die 95%-Fraktile bei einem Wert von 1,45 mm.

Wird die Standardabweichung der Durchlässigkeit erhöht, so dass Werte im Intervall  $[1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-9}]$  erzeugt werden, so ergibt sich das in Abb. 8-4 dargestellte Histogramm. Die 50%-Fraktile liegt bei einem Wert von 1,11 mm, wohingegen die 95%-Fraktile auf einen Wert von 2,43 mm steigt. Beide Histogramme zeigen, dass einige wenige künstliche Experimente kaum zu Hebungen führen.

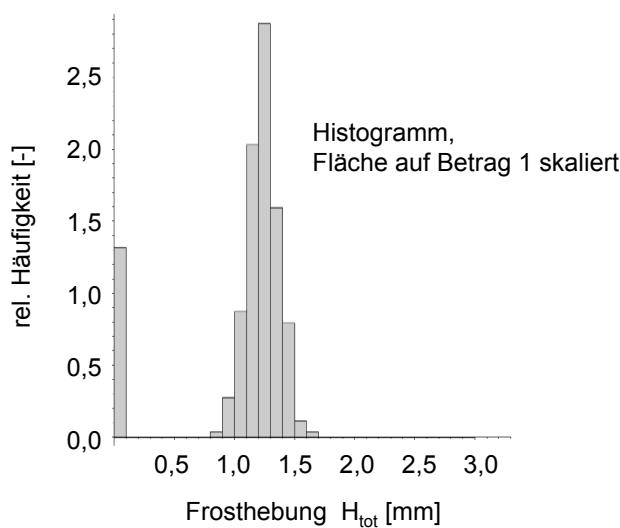


Abb. 8-3: Histogramm für normal streuende Werte der Durchlässigkeit

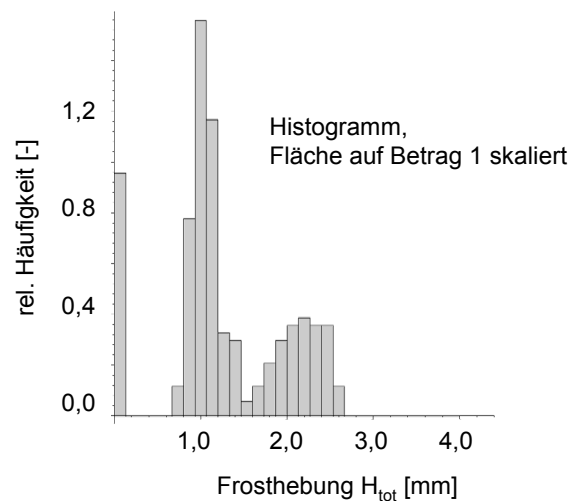


Abb. 8-4: Histogramm für stark streuende Werte der Durchlässigkeit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass für den betrachteten tertiären Ton nach 5 Stunden Frosteinwirkung ca. 1 mm Hebung zu erwarten ist. Können die Werte für die Durchlässigkeit nur sehr grob abgeschätzt werden, dann werden mit entsprechend geringerer Häufigkeit auch Werte erreicht, die mehr als das Doppelte des Erwartungswertes betragen.

## 9 Zur Übertragbarkeit der Methode auf Baumaßnahmen

Den bisher vorgestellten Laborversuchen und den analytischen Modellen liegt eine eindimensionale Betrachtungsweise zugrunde. Um eine Prognose für Frosthebungen, wie sie bei tief liegenden Vereisungskörpern zu erwarten sind, abgeben zu können, müssen die dabei gewonnenen Ergebnisse auf die in der Realität dreidimensionale Frostausbreitung übertragen werden. Ein möglicher Weg der Übertragung und die dabei zu treffenden Annahmen werden im Folgenden vorgestellt.

Eine eindimensionale Frosthebung würde bei einem (fiktiv) unendlich langen und breiten Frostkörper auftreten, wenn er sich gleichmäßig in einer bestimmten Tiefe im Boden ausbilden würde. Die nachfolgende Abb. 9-1 verdeutlicht dies.

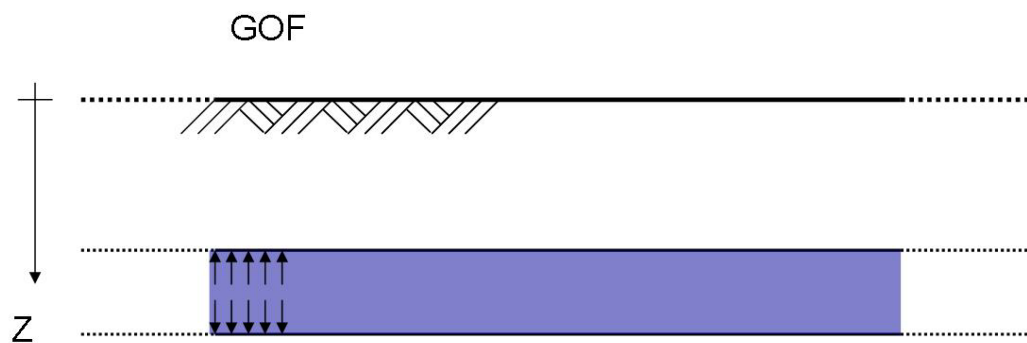


Abb. 9-1: Unendlich ausgedehnter Frostkörper

Bei einem tief liegenden Vereisungskörper ist der umgebende Boden in der Tiefe  $z$  durch den Überlagerungsdruck aus dem Bodeneigengewicht vorgespannt. Durch die fehlende freie Oberfläche über dem Frostkörper würde sich nach dem Beginn des Gefriervorganges zunächst ein Frostdruck aufbauen, welcher die Vorspannung aus Bodeneigengewicht abbauen würde. Sobald die Vorspannung komplett abgebaut wäre, würden gleichmäßige Frosthebungen entstehen. Die Hebungsgeschwindigkeit der Geländeoberfläche entspräche ab dann der Hebungsgeschwindigkeit unmittelbar am Rand des Vereisungskörpers.

In der Realität sind tief liegende Vereisungskörper seitlich begrenzt. Abb. 9-2 zeigt die qualitativen Änderungen im Hebungsverhalten gegenüber einem unendlich langen Frostkörper.

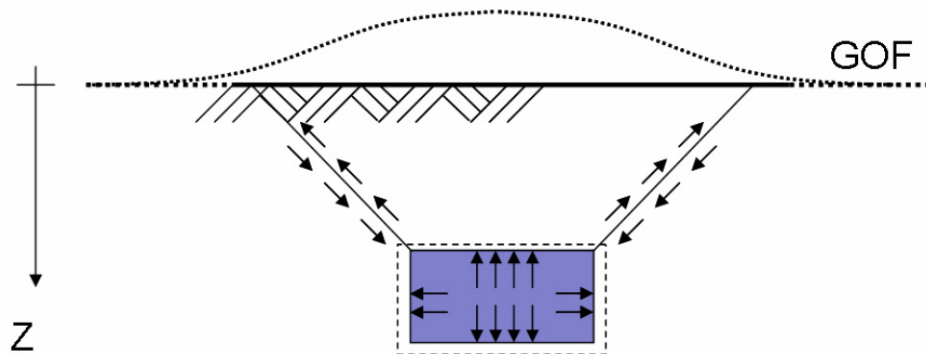


Abb. 9-2: Frosthebungen bei einem Frostkörper mit begrenzter Breite

Bei einem Frostkörper begrenzter Breite wird infolge der Volumenvergrößerung beim Gefrieren der Boden zusätzlich zum Bodeneigengewicht vorgespannt. Die Vorspannung wird in Form von zusätzlich aktivierten Schubkräften entlang der Mantelfläche eines Durchstanzkegels aufgenommen. Die Zwängung bewirkt eine Verformung des ungefrorenen Bodens. Aus Geometrie Gründen muss sich bei isotropen Körpern an der Geländeoberfläche eine Sattellage mit einem Maximum ausbilden, welches sich zentrisch über dem Frostkörper befindet.

Ein senkrechter Schnitt durch den in Abb. 9-2 dargestellten Vereisungskörper schneidet zweimal durch die Mantelfläche des Vereisungskörpers und den Körper selbst. Für die am oberen Rand des Vereisungskörpers zu erwartende Verformungen infolge Volumenzunahme und Eislinnenbildung lässt sich daher folgende Beziehung aufstellen:

$$H_{\text{Tot}} = H_{\text{Vol}} + 2 \cdot H_{\text{EL}}, \text{ bzw.} \quad (9.1)$$

$$H_{\text{Tot}} = d \cdot \text{Vol}_H + 2 \cdot v_{\text{EL}} \cdot t$$

mit:

$H_{\text{Tot}}$ : Verformung (bzw. Hebung) am Rand des Vereisungskörpers in [m]

$H_{\text{Vol}}$ : volumetrische Hebung in [m]

$H_{\text{EL}}$ : Hebung infolge Eislinnenbildung in [m]

$d$ : Dicke des Frostkörpers in [m]

$\text{Vol}_H$ : bezogene volumetrische Hebung in [%]

$v_{\text{EL}}$ : Geschwindigkeit des Eislinnenwachstums in [m/d]

$t$ : Vorhaltdauer des Vereisungskörpers in [d]

Die Werte für die volumetrische Hebung  $H_{\text{Vol}}$  können dabei mit den in Kapitel 5.2 beschriebenen Rechenverfahren abgeschätzt werden. Hierbei ist für die Höhe  $h$  der Abstand der Gefrierrohre zur nächstgelegenen höher durchlässigen Bodenschicht einzusetzen. Wenn keine derartige Schichtgrenze vorhanden ist, muss eine äquivalente Sickerweglänge abgeschätzt werden. Alternativ bzw. zur



Kontrolle kann der Wert für die bezogene volumetrische Hebung  $\text{Vol}_H$  mit Frosthebungsversuchen nach Kapitel 3.4.3 näherungsweise ermittelt werden.

Die Werte für die Hebung infolge Eislinsenwachstum  $H_{EL}$  können mit den in Kapitel 3.4.4 beschriebenen Laborversuchen abgeschätzt werden. Dabei ist der Geometrieinfluss der Probenhöhe auf die im Versuch gemessene Hebungsgeschwindigkeit zu beachten. Dieser kann rechnerisch eliminiert werden, indem man die Frosthebungsgeschwindigkeit auf den Unterdruck  $\Delta u$  infolge Eislinsenbildung (vgl. Abb. 5-13) bezieht. Konrad stellt in seinem "segregational-potential" Konzept fest, dass die Hebungsgeschwindigkeit bei konstantem Temperaturgradienten ebenfalls konstant bleibt. Die in Kapitel 3.4.4 beschriebenen Versuche haben dies weitgehend bestätigt. Der zugehörige Strömungsprozess des Wassers durch den ungefrorenen Boden lässt sich mit dem Gesetz von Darcy wie folgt beschreiben, wobei das durch den Boden geströmte Wasser sein Volumen beim Übergang zu Eis um 9 % vergrößert.

$$v_{EL} = 1,09 \cdot k \cdot \frac{\Delta u}{h - \xi(t)} \quad (9.2)$$

wobei die Werte der Größen Probenhöhe  $h$ , Durchlässigkeit  $k$  des ungefrorenen Bodens und Lage der Null-Grad-Isotherme  $\xi(t)$  bei den Versuchen zur Eislinsenbildung konstant sind. Aufgelöst nach  $\Delta u$ :

$$\Delta u = \frac{1}{1,09} \cdot v_{EL} \cdot \frac{1}{k} \cdot (h - \xi(t)) \quad (9.3)$$

Mit dem aus Versuchen rückgerechneten Unterdruck  $\Delta u$ , der an der Grenze des ungefrorenen Bodens zum teilgefrorenen Boden herrscht, liest sich Gleichung (9.1) wie folgt, wobei für  $h^*$  der Abstand des Frostkörpers zur räumlich nächsten höher durchlässigen Bodenschicht einzusetzen ist.

$$H_{Tot} = d \cdot \text{Vol}_H + 2 \cdot \left( 1,09 \cdot k \cdot \frac{\Delta u}{h^*} \right) \cdot T \quad (9.4)$$

Die in Gleichung (9.1) enthaltenen Parameter stellen keine Konstanten dar, sondern hängen ihrerseits wieder von einer Reihe von Einflussgrößen ab. Sie sind daher als Funktionen der zeitlich veränderlichen Spannungs- und Temperaturzustände zu betrachten. Hier sind zu nennen:

#### **Zeitliche Änderung der Auflast auf den Vereisungskörper:**

Der den Vereisungskörper umgebende ungefrorene Boden wird gestaucht, sobald infolge des Gefriervorganges die Volumenzunahme des vereisten Bodens einsetzt. Dadurch erhöhen sich mit zunehmender Frostdauer auch die auf den Vereisungskörper wirksamen Spannungen, d.h. der Frostkörper aktiviert mit steigendem Volumen auch zunehmend den umgebenden Boden als "Widerlager". Dies bedeutet weiterhin, dass die oben genannten und für die Verformungsberechnung notwendigen Eingangsgrößen volumetrische Hebung  $H_{Vol}$  und Eislinsenwachstum  $H_{EL}$  keine Konstanten, sondern auflastabhängige und damit letztlich zeitabhängige Größen sind.

**Zeitliche Änderung der bezogenen volumetrischen Hebung  $Vol_H$ :**

In Kapitel 5 wurde anhand von Berechnungen und der Auswertung von Laborversuchen gezeigt, dass der Wert der bezogenen volumetrischen Hebung ebenfalls zeitlich veränderlich ist. Dies ist auf die mit der Zeit abnehmende Geschwindigkeit der Frosteindringung zurückzuführen. Da das Gefrieren gleich dicker Bodenschichten mit zunehmendem Abstand von der Wärmesenke somit zunehmend länger dauert, bleibt dem Porenwasser zunehmend mehr Zeit, in den ungefrorenen Boden abzufließen. Der Parameter "bezogene volumetrische Hebung" ist daher zeitlich veränderlich (monoton abnehmend). Die Ergebnisse von Laborversuchen sind somit auch nur "Momentaufnahmen" eines an sich nichtlinearen, instationären Vorganges.

**Eislinsenwachstum:**

Die Geschwindigkeit des Eislinsenwachstums hängt vom vorhandenen Temperaturgradienten ab. Daher wäre es streng betrachtet notwendig, Frosthebungsversuche bei Temperaturgradienten durchzuführen, die repräsentativ für das jeweilige Bauvorhaben sind. Dies könnte beispielsweise durch eine Kopplung der thermischen Berechnung der Frostkörperausbreitung und/oder durch laufende Anpassung der Frosthebungsprognose an vor Ort ausgeführte Temperaturmessungen geschehen.

**Steuerung der Gefrieranlagen:**

Nachdem im Feld ein Gefrierkörper aufgebaut ist, werden die Gefrieranlagen in der Regel nicht mehr kontinuierlich, sondern intermittierend betrieben. Dies bedeutet, dass die Wärmesenke nur noch in bestimmten Zeitintervallen aktiv ist. Die damit verbundenen Effekte wurden in Kapitel 3.4.5 qualitativ untersucht.

Da eine vollständige Beschreibung der genannten Abhängigkeiten nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht möglich ist, und weiterhin davon auszugehen ist, dass noch weitere derzeit unbekanntes Zusammenhänge existieren, müssen bei der Prognose von Frosthebungen im Feld vereinfachende, "auf der sicheren Seite liegende" Annahmen getroffen werden. Diese Annahmen und die Grenzen der Übertragbarkeit der Modellvorstellung auf Vereisungskörper im Feld werden im folgenden Kapitel am Beispiel der Bahnsteigerweiterung der U6 Marienplatz in München diskutiert.

## 10 Die Bahnsteigerweiterung des U-Bahnhofs U6 Marienplatz unter dem Rathaus in München

### 10.1 Vorgang

Der U-Bahnhof "Marienplatz" ist ein zentraler Verkehrsknotenpunkt im Zentrum Münchens, an dem die zwei U-Bahnlinien U3 und U6 mit den 7 Linien der Stammstrecke der S-Bahn verknüpft sind. Die U-Bahnlinie U6 ist hierbei die einzige Verbindung zwischen dem Stadtzentrum und dem neuen Fußballstadion "Allianz-Arena" im Norden von München. Die bereits vor der Erweiterung hohen Fahrgastzahlen sind mit der Eröffnung des neuen Stadions wie erwartet nochmals gestiegen. Um die Kapazität für umsteigende Fahrgastströme zu erhöhen, war vom Baureferat der Stadt München geplant worden, im U-Bahnhof Marienplatz die Bahnsteige der U6 mit dazu parallel verlaufenden Fußgängertunneln zu verbreitern. Die Verbindung zwischen den alten und neuen Tunnelröhren wurde mit je 11 kurzen Durchbrüchen geschaffen.

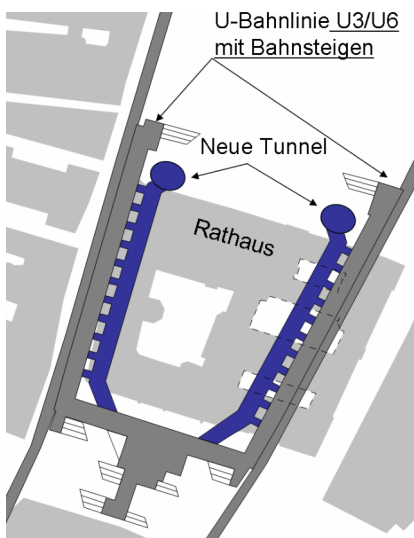


Abb. 10-1: Lageplan

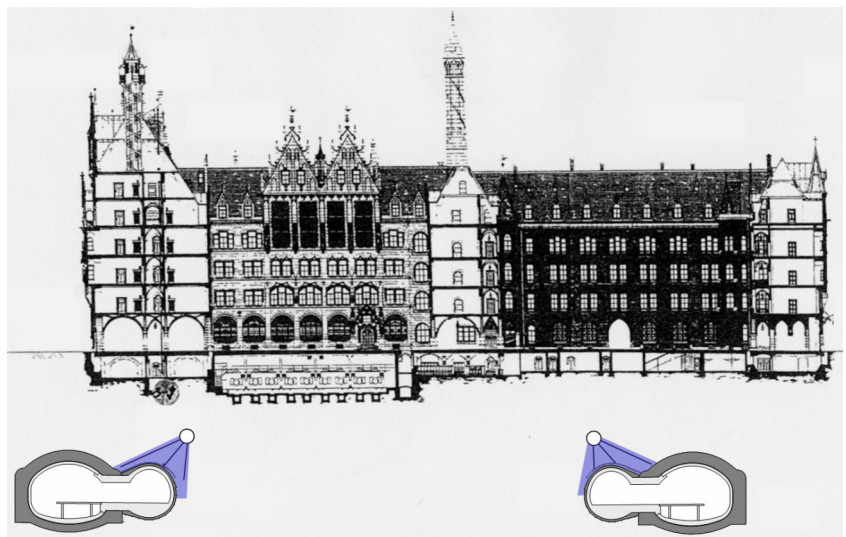


Abb. 10-2: Schnitt durch das Rathaus mit Tunnelbauwerken

Abb. 10-1 zeigt einen Lageplan mit den wesentlichen Bauwerken. Die bestehenden U-Bahnlinien und der U-Bahnhof sind mittelgrau, die neu errichteten Fußgängertunnel dunkel hinterlegt. Die Grundflächen der Bebauung sind hellgrau eingefärbt. Im Schnitt liegen die Bahnsteige unterhalb des historischen "Neuen Rathauses". Abb. 10-2 zeigt einen Schnitt durch das Rathaus mit den Tunnelbauwerken.

Um Schäden am denkmalgeschützten Rathaus zu vermeiden, mussten die infolge der aktuellen Baumaßnahme zusätzlich zu erwartenden Verformungen streng begrenzt werden, da sich bereits beim Bau der U-Bahnlinien U3 / U6 in den sechziger Jahren das Rathaus um bis zu ca. 30 mm gesetzt hatte. Der zur Ausführung gelangte Sondervorschlag der Firma Max Bögl sah vor, die Begleittunnel im Schutz eines Vereisungsschirmes (siehe Abb. 10-2) aufzufahren. Die hierfür notwendigen Vereisungslanzen wurden von Pilotstollen aus gebohrt, die vorab seitlich versetzt über den Begleit-

tunneln mittels Rohrvorpressung hergestellt wurden. Zur Wasserhaltung wurden Vertikalbrunnen von der Geländeoberkante aus eingesetzt.

## 10.2 Bestandsbauwerke

### Neues Rathaus

Das "Neue Rathaus" wurde nach DEHIO (1996) durch Georg Hauberrisser in drei Bauphasen errichtet. In den Jahren 1867-74 wurde der symmetrische Ostteil in Backsteinmauerwerk mit Sandsteingliederung erbaut und 1889-93 durch einen rückwärtig gelegenen Gebäudetrakt erweitert. Die Komplettierung durch den Westteil mit dem Turm aus Kalk- und Tuffsteinquadern erfolgte in den Jahren 1899-1909.

### Bestandstunnel der Linie U3/U6:

Die bestehenden Tunnelbauwerke der U3/U6 unter dem Rathaus wurden in den Jahren 1966 bis 1970 im Schutz einer Wasserhaltung gebaut. Dabei wurden zunächst die Ulmenstollen vorgetrieben und rückschreitend wieder vollflächig gegen einen eingestellten Wellblechverzug ausbetoniert. Die Tunnelfirste wurde anschließend im Messervortrieb aufgeföhren, wobei die bereits hergestellten Ulmen als Auflager für die Außenschale dienten. Abschließend erfolgten der Sohlvortrieb, der Einbau der Abdichtung aus Bitumenbahnen und das Betonieren der Innenschale. Abb. 10-3 wurde aus JOAS (1971) entnommen und zeigt die abschnittsweise Herstellung der Tunnel, in Abb. 10-4 ist der Wellblechverzug der Ulmenstollen zu erkennen.

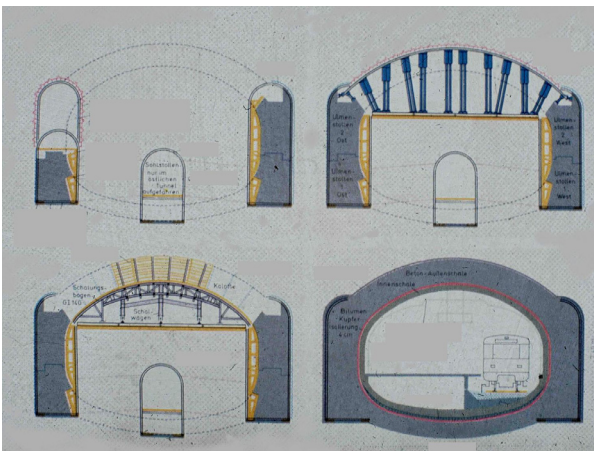


Abb. 10-3: Bauabschnitte Bestandstunnel

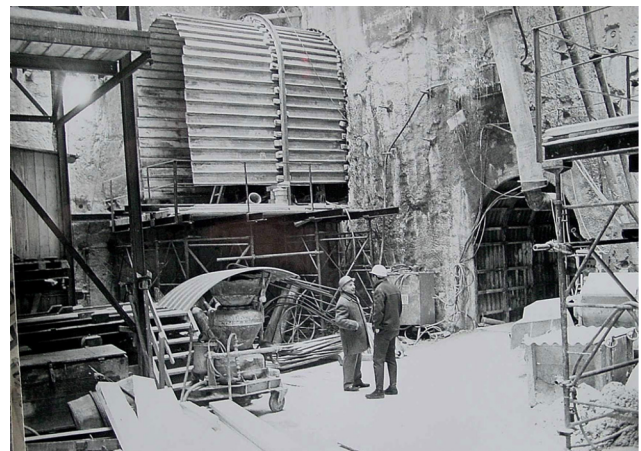


Abb. 10-4: Bau eines Ulmenstollens

## 10.3 Baugrund- und Grundwasserverhältnisse

Die Baugrundverhältnisse waren durch die projektspezifischen Erkundungen sowie durch die Ortsbrustaufnahmen beim Aufföhren der Tunnel für die U3/U6 bekannt. Sie sind in Abb. 10-5 schematisch dargestellt. Demnach folgen unter gering mächtigen Auffüllungen und quartären Kiesen die tertiären Schichten. Sie bestehen aus Wechsellagerungen überwiegend dicht gelagerter Fein- bis Mittelsande mit Tonen bzw. Schluffen in halbfester bis fester Konsistenz. Entsprechend ihrer Entstehung weisen diese Schichten engräumlich teils stark unterschiedliche Mächtigkeiten auf. Die Sand-schichten führen gespanntes Grundwasser.

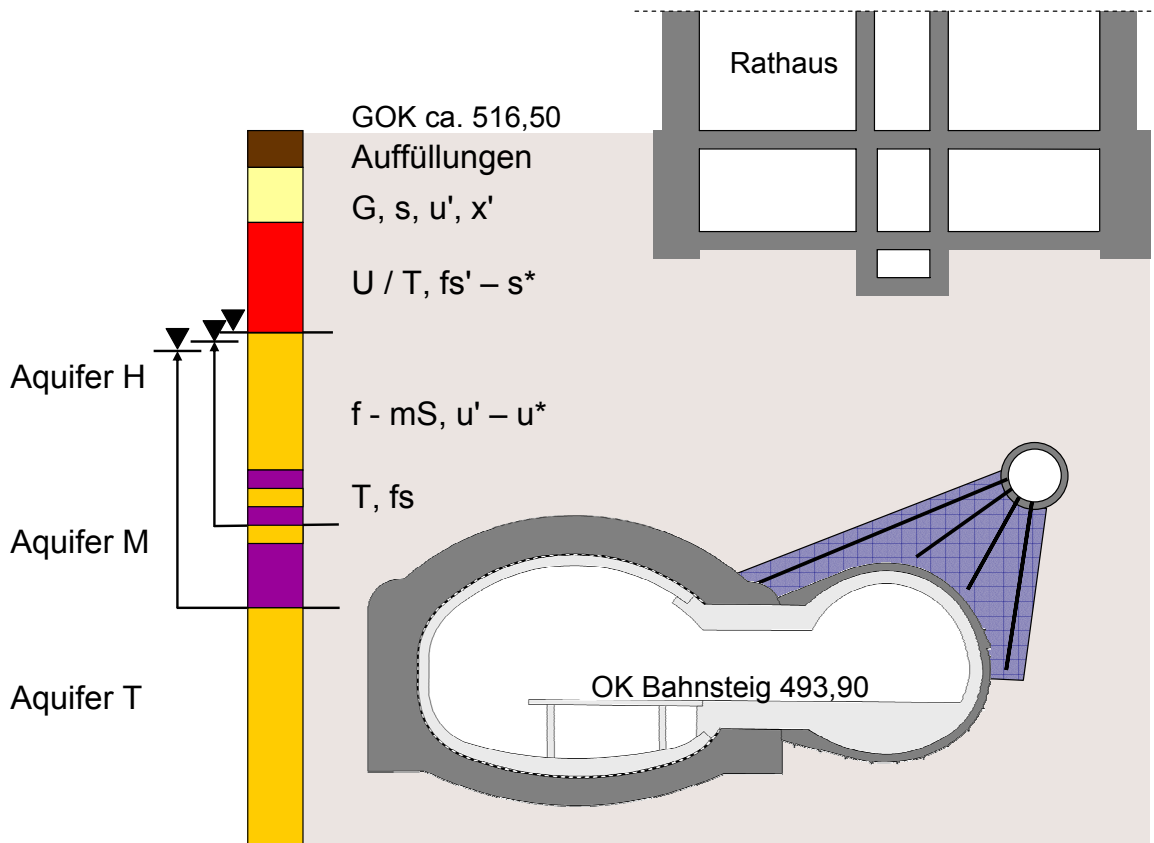


Abb. 10-5: Schematische Darstellung des Baugrunds

Da die Grundwasserverhältnisse sowohl für den Vortrieb der Erweiterungstunnel als auch für die zu erwartenden Frosthebungen von entscheidender Bedeutung waren, wurden im Vorgriff zur Baumaßnahme 8 Grundwassermessstellen und 2 Tertiärbrunnen zur Durchführung eines einmonatigen Pumpversuchs errichtet. Nach den Aufschlüssen und dem Pumpversuch können die wasserführenden Sande im Bau Feld in 3 Aquifere zusammengefasst werden. Unter der ersten feinkörnigen Deckschicht folgt der obere tertiäre Aquifer H, eine mehrere Meter mächtige Tertiärsandschicht. Zwischen etwa 14 m und 26 m unter der Geländeoberkante folgt eine zweite feinkörnige Schicht, in der häufig Sandschichten verschiedener Mächtigkeit zwischengelagert sind (Aquifer M). Im Aquifer M liegt auch die Tunnelfirste bei ca. 17 m unter der Geländeoberkante. Darunter folgt eine teils mehr als 10 m mächtige Tertiärsandschicht (Aquifer T). Die Ergebnisse der klassifizierenden Untersuchungen an Bodenproben, die aus diesen Bohrungen gewonnen wurden, sind in [U6] dokumentiert.

Zur Ermittlung der Durchlässigkeiten der einzelnen Aquifere wurde der Pumpversuch basierend auf dem Verlauf der Absenkkurven ausgewertet. Ergänzend wurden in den Grundwassermessstellen Einschwingversuche nach DIN 18130-2 / Entwurf durchgeführt. In nachfolgender Tabelle 10-1 sind die ermittelten Minimal- und Mittelwerte der Durchlässigkeitsbeiwerte  $k$  zusammengestellt.

	Minimalwert k [m/s]		Mittelwert k [m/s]	
	Aquifer H+M	Aquifer T	Aquifer H+M	Aquifer T
Einschwingversuch in der Grundwassermessstelle			$6,6 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Pumpversuch	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 10-1: Durchlässigkeitsbeiwerte k, ermittelt aus Feldversuchen

#### 10.4 Bauablauf

Die gesamte Baumaßnahme wurde unter anderem von EICHER (2004), (2005), (2006) und FILLIBECK (2005) bereits detailliert beschrieben, so dass nachfolgend nur der Bauablauf mit den für die Frosthebungen wesentlichen Aspekten vorgestellt wird. Eine vollständige Beschreibung des vom Zentrum Geotechnik ausgeführten wissenschaftlichen Begleitprogramms ist in [U3] enthalten. Die Ergebnisse der vor Ort ausgeführten DMS-Messungen können auch den Veröffentlichungen von EICHER (2006) bzw. KELLNER (2006) entnommen werden.

Die Baumaßnahme begann mit der Herstellung der überschnittenen Bohrpfahlwände für die beiden im Grundriss ovalen Startschächte. Von einem Zwischenaushubniveau der Startschächte erfolgte der jeweils ca. 100 m lange Rohrvortrieb der Pilotstollen mit einem Haubenschild unter Druckluft und hydraulischer Förderung. Da zum Zeitpunkt des Rohrvortriebs das Grundwasser in den anstehenden Sanden durch die Außenwasserhaltung nicht vollständig unter die Sohle abgesenkt war, wurde die ca. 6 m lange Arbeitskammer abhängig vom beobachteten Vernässungssaum an der Ortsbrust mit einem Luftüberdruck zwischen 0,2 bar und 0,5 bar beaufschlagt. Der Luftverlust in der Arbeitskammer betrug im Mittel 5 m<sup>3</sup>/min. Der Außendurchmesser der Pilotstollen beträgt 2,40 m, die Wandstärke 0,20 m. Der Ringspalt der Pilotstollen wurde zur Reduzierung von Reibungskräften zunächst mit einer Bentonit-Suspension geschmiert und nach Abschluss der Vortriebsarbeiten mit einem Dämmverpresst.

Aus den Pilotstollen heraus wurden je ca. 350 Vereisungsbohrungen mit einem Durchmesser von 88,9 mm und einer Gesamtlänge von ca. 3800 m gegen das Grundwasser ausgeführt. Die Vereisungsbohrungen wurden derart fächerförmig angeordnet, dass der Boden über dem Erweiterungstunnel im gefrorenen Zustand einen geschlossenen Vereisungsschirm bildete. Als Kälte-träger der Solevereisung kam eine Kalziumchlorid-Lösung zum Einsatz. Die Lösung wurde durch eine Kälteanlage mit einer Leistung von 2 x 275 kW auf -38 °C abgekühlt. Um die Vorhalte- und Betriebsdauer des Vereisungsschirmes zu minimieren, wurden die Vereisungskörper beider Tunnel in je drei Abschnitte „Nord“, „Mitte“ und „Süd“ unterteilt und getrennt betrieben. Abb. 10-6 zeigt einen Blick auf den Startschacht Weinstraße, in Abb. 10-8 ist die Rohrvorpressung vom Startschacht aus zu erkennen. Abb. 10-8 zeigt einen Blick in den Pilotstollen mit den Vereisungsleitungen und Abb. 10-9 den Tunnelvortrieb.





Abb. 10-6: Startschacht



Abb. 10-7: Rohrvorpressung



Abb. 10-8: Blick in den Pilotstollen



Abb. 10-9: Stellen eines Ausbaubogens

Der Vortrieb der Erweiterungstunnel mit ca. 50 m<sup>2</sup> Querschnittsfläche erfolgte in der Spritzbetonbauweise. Die Vortriebsgeschwindigkeit betrug im Mittel 2 m in 24 Stunden. Für die 30 cm starke Spritzbetonschale waren eine zweilagige Bewehrung und Gitterbögen in der Kalotte vorgesehen. Die Abschlagslängen betrugen 1 m in der Kalotte und 2 m in der Strosse. Die Ortsbrust der Kalotte eilte der Strosse und Sohle zwischen 2 m und 4 m voraus (Vortrieb mit "kurz vorseilender Kalotte"). Dabei wurde der gefrorene Boden in der Kalotte mit einem Fräskopf abgebaut, der auf den eingesetzten Tunnelbagger montiert werden konnte. Im Zuge der Vortriebsarbeiten musste der Erweiterungstunnel einseitig an den bestehenden Bahnsteigtunnel angeschlossen werden. Dazu wurden der alte Verbau, bestehend aus einem Wellblechverzug mit Stahlprofilen und eine ca. 13 cm starke Lage der Außenschale des bestehenden Bahnsteigtunnels abgetragen. Die Gitterbögen der Erweiterungstunnel wurden durch Dübel an die bestehenden Tunnel angeschlossen.

## 10.5 FE-Berechnungen

### 10.5.1 Allgemeines

Die Modellierung des Tunnelvortriebes erfolgte mit dem Programmpaket Sofistik mit einem Scheibenmodell im ebenen Dehnungszustand. Die in der Realität dreidimensionale Lastabtragung wurde dabei mit dem so genannten  $\alpha$  - Verfahren auf eine zweidimensionale Berechnung reduziert. Das zu Grunde liegende Prinzip wird in OSTERMEIER (1991) ausführlich erläutert.

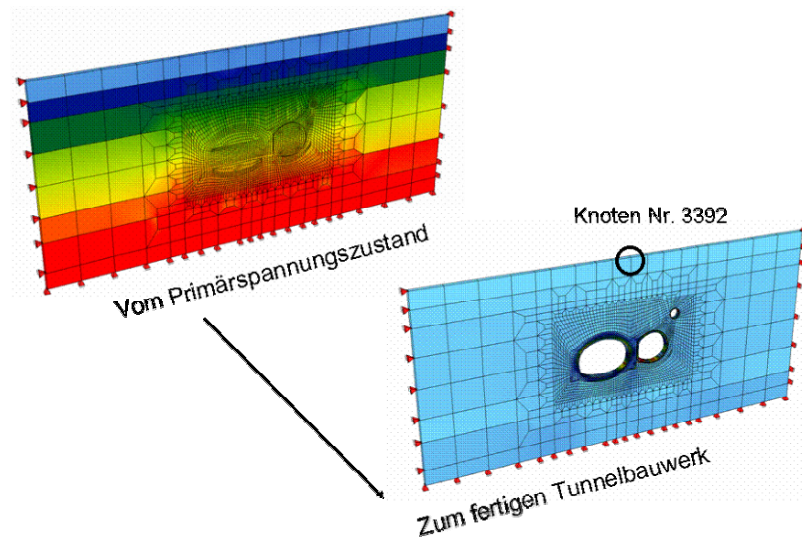


Abb. 10-10: Scheibenmodell der FE-Berechnung.

### 10.5.2 Wasserdruck

Der hydrostatische Wasserdruck äußert sich im Allgemeinen durch zwei Effekte. Zum einen wird die Wichte des Bodens durch den Auftrieb reduziert. Weiterhin wirkt der Wasserdruck senkrecht auf undurchlässige Berandungen, wie sie z.B. eine Tunnelschale oder auch eine undurchlässige Tonschicht darstellen.

Im vorliegenden Fall stand der Boden ab einer Tiefe von 7 m unter GOK unter Auftrieb. Mit dem Abschalten der Wasserhaltung nach Fertigstellung des Tunnels wirkte der volle Wasserdruck auf den Tunnelquerschnitt, der Tunnel stand unter Auftrieb. Das verwendete Programmpaket rechnete ausschließlich mit effektiven Spannungen, d.h. unterhalb des Grundwasserstandes wurde die Wichte des Bodens von der Feuchtwichte  $\gamma$  auf die Wichte unter Auftrieb  $\gamma'$  gesetzt. Wasserdrücke auf undurchlässige Schichten wurden als veränderliche Linienlast senkrecht zur Berandung aufgebracht.

### 10.5.3 Material- und Bodenkennwerte

Als Stoffgesetz wurde das Materialgesetz "Gran" verwendet. Hierbei handelt es sich um ein elastoplastisches Stoffgesetz mit Verfestigungsregel, welches die Verfestigung eines Bodens bei hydrostatischen Spannungspfaden nach Ohde und die Entfestigung bei deviatorischen Spannungspfaden nach Kondor-Zelasko beschreibt. Das spannungsabhängige Versagen unter Scherbeanspruchung, wird durch das Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb beschrieben.



Die Verfestigung nach Ohde wird durch die nachfolgend dargestellte, aus Ödometerversuchen abgeleitete exponentielle Beziehung beschrieben:

$$E_s = E_s^{\text{ref}} \cdot \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_{\text{ref}}} \right)^m$$

- $E_s$      Steifemodul
- $\sigma_1$     größte Hauptspannung (Druck)
- $E_s^{\text{ref}}$     Referenzmodul
- $\sigma_{\text{ref}}$     Referenzspannung
- $m$         Exponent für die Verfestigung

Die oben stehende Gleichung lässt sich so interpretieren, dass durch die Referenzwerte für den Steifemodul  $E_s^{\text{ref}}$  und die Referenzspannung  $\sigma_{\text{ref}}$  ein Drehpunkt für eine Kurvenschar definiert wird. Die Neigung der einzelnen Kurven wird durch den Faktor  $m$  festgelegt. Die nachfolgende Grafik zeigt die Erhöhung des Steifemoduls mit zunehmender Druckspannung exemplarisch für einen Referenzmodul von  $E_s = 100 \text{ MN/m}^2$  und Referenzspannungen von  $\sigma_{\text{ref}} = 100 \text{ kN/m}^2$  bzw.  $\sigma_{\text{ref}} = 300 \text{ kN/m}^2$ .

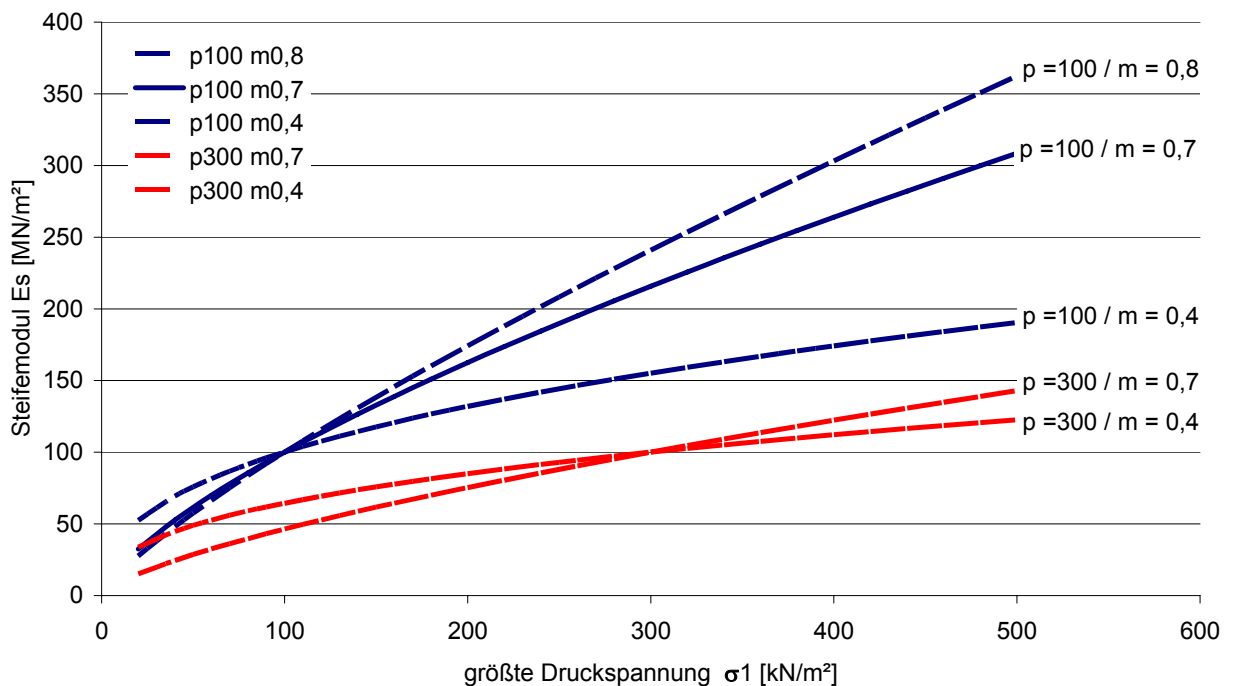


Abb. 10-11: Spannungsabhängigkeit des Steifemoduls nach Ohde

Die Steifigkeitsreduzierung bei deviatorischen Spannungspfaden wird durch eine Hyperbel nach Kondner/Zelasko angenähert, die in Abb. 10-12 dargestellt ist.

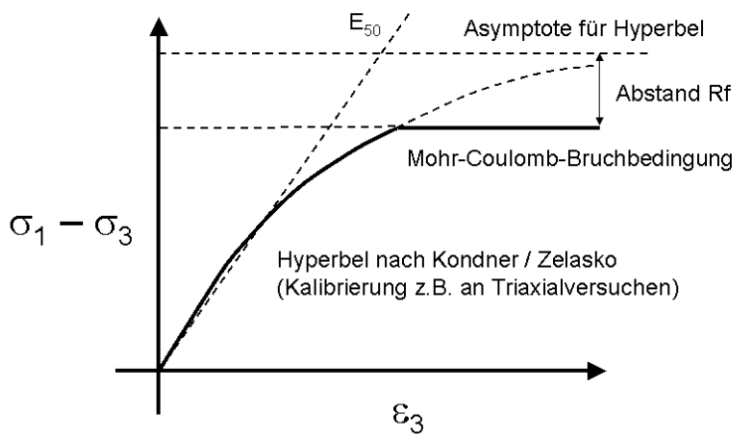


Abb. 10-12: Spannungsabhängigkeit des Steifemoduls bei Scherbeanspruchung

Die Hyperbel wird dabei indirekt durch die das Bruchkriterium, den Referenzmodul  $E_{50}$  (d.h. die Steigung der gestrichelten Gerade) und einen Kalibrierungsfaktor  $R_f$  definiert, der das Verhältnis der Festigkeit bei endlichen Dehnungen, die z.B. im Triaxialversuch gemessen werden, zur höheren asymptotischen Festigkeit, die mit der Hyperbel erreicht wird, beschreibt. Für die Berechnungen wurde der Kalibrierungsfaktor mit  $R_f = 0,9$  angesetzt.

Die angesetzten Bodenparameter können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Gran-Modell			Quartäre Kiese	Tertiäre Tone und Schluffe	Tertiäre Sande
Wichte	$\gamma / \gamma'$	[kN/m <sup>3</sup> ]	23/14	21/11	21/12
Reibungswinkel	$\varphi$	[°]	37,5	22,5	37,5
Kohäsion	c	[kN/m <sup>2</sup> ]	4 <sup>*)</sup>	30,0	4 <sup>*)</sup>
Erstbelastungsmodul	$E_s^{ref}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	120	90	120
Querdehnzahl	$\nu$	[-]	0,35	0,35	0,35
Referenzspannung	$p^{ref}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	100	100	100
Steifeexponent	m	[-]	0,7	0,7	0,7
Wiederbelastungsmodul	$E_{ur}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	180	120	180
Kalibrierungsfaktor	$R_f$	[-]	0,9	0,9	0,9
Dilatanzwinkel	$\psi$	[°]	0,0	0,0	0,0

Tabelle 10-2: Bodenparameter

<sup>\*)</sup> scheinbare Kohäsion als Rechenhilfe

Für die Tunnelschalen wurde ein Beton B25 mit einer Bewehrung BSt500S angesetzt. Die Festigkeits- und Steifigkeitsparameter des Vereisungskörpers wurden aus Literaturangaben, insbesondere JESSBERGER (1996) abgeschätzt.

gefrorener Sand:

Reibungswinkel:

$$\varphi = 32,5^\circ$$

Kohäsion:

$$c = 1400 \text{ kN/m}^2$$

Referenzmodul Erstbelastung:

$$E = 350 \text{ MN/m}^2$$

gefrorener Ton/Schluff:

Reibungswinkel:

$$\varphi = 10,0^\circ$$

Kohäsion:

$$c = 800 \text{ kN/m}^2$$

Referenzmodul Erstbelastung:

$$E = 250 \text{ MN/m}^2$$

Die Frosthebungen wurden durch einen Temperaturlastfall, der auf den Vereisungskörper aufgebracht wurde, simuliert. Dabei wurde der Bereich des Vereisungskörpers rechnerisch erwärmt, bis die dadurch entstandene rechnerische Volumenvergrößerung für einen Kontrollkörper charakteristischer Höhe der auf Basis der Laboruntersuchungen abgeschätzten Volumenvergrößerung entsprach. Die Vorgehensweise wird im Detail in Kapitel 10.5.6 erläutert.

Nachfolgend ist der maßgebende Ausschnitt des für die Berechnungen verwendeten FE-Netzes dargestellt. Das Gesamtmodell ist aus den unten bezeichneten 21 Elementgruppen zusammengestellt, wobei die Gruppen 1, 2 und 5 außerhalb des in Abb. 10-13 gewählten Netzausschnitts liegen.

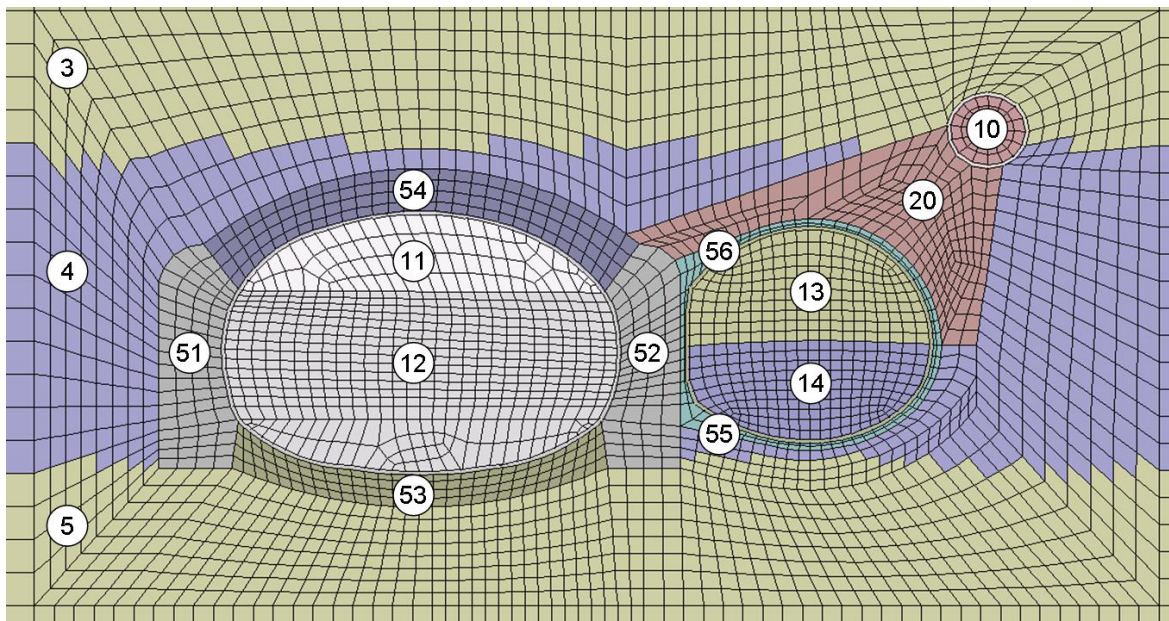


Abb. 10-13: Netzausschnitt mit Gruppeneinteilung der Finiten Elemente

- |                                      |                                     |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 quartärer Kies                     | 20 Vereisungskörper                 |
| 2 tertiäre Tone und Schluffe über GW | 31 Innenschale Pilotstollen         |
| 3 tertiärer Sand im GW               | 32 Innenschale U6                   |
| 4 tertiäre Tone und Schluffe im GW   | 33 Innenschale Begleittunnel        |
| 5 tertiärer Sand im GW               | 51 Außenschale U6 Ulme I            |
| 6 tertiäre Tone und Schluffe im GW   | 52 Außenschale U6 Ulme II           |
| 10 Pilotstollen                      | 53 Außenschale U6 Sohle             |
| 11 U6 Teilausbruch Firste            | 54 Außenschale U6 Firste            |
| 12 U6 Teilausbruch Sohle             | 55 Begleittunnel Außenschale Sohle  |
| 13 Begleittunnel voreilende Firste   | 56 Begleittunnel Außenschale Firste |
| 14 Begleittunnel Sohle               |                                     |

Für die Berechnungen war die realitätsnahe Erfassung des vor der Baumaßnahme vorhandenen Spannungszustandes im Boden erforderlich. Ausgehend vom unveritzten Gebirge wurde daher zunächst der Vortrieb der bestehenden U6 simuliert. Auf den sich einstellenden Spannungszustand wurden anschließend die Lastfälle für den Vortrieb des Begleittunnels aufgebracht. Die Berechnung gliederte sich in folgende Abschnitte:

- Berechnung des Primärspannungszustandes des ungestörten Gebirges
- Simulation des Vortriebs der bestehenden U6 – Tunnelröhre
- Vortrieb des Pilotstollens
- Vereisung des Bodens über der Tunnelfirste des Begleittunnels
- Vortrieb des Begleittunnels

**10.5.4 Vortrieb der bestehenden U6 – Tunnelröhren**

Die unten stehende Grafik zeigt die rechnerisch ermittelten Verformungen infolge des Vortriebs der bestehenden Röhren. Die Verformungen wurden auf GOK in der Mitte der beiden Tunnelröhren (Knoten Nr. 3392, vgl. Abbildung 10-10) ermittelt. Mit grauen Linien sind die während des Vortriebs in den 60er Jahren gemessenen Setzungen nach KRISCHKE (1978) dargestellt. Grau hinterlegt sind die in Folge der Wasserhaltungsmaßnahmen eingetretenen Setzungen, dazwischen sind die während des Vortriebs entstandenen Setzungen dargestellt.

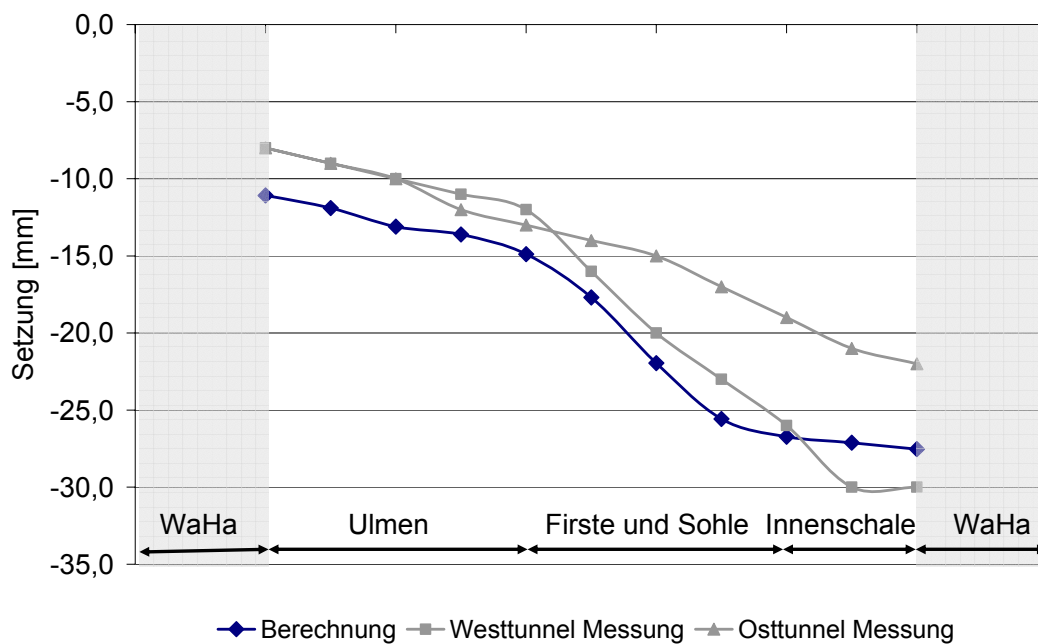


Abb. 10-14: Setzungen infolge des Vortriebs der bestehenden Tunnel

In der nachfolgenden Tabelle sind die Setzungen, aufgeteilt nach Anteilen aus der Wasserhaltung und dem Vortrieb, zusammengestellt.

	Gesamtsetzung [mm]	Wasserhaltung [mm]	Vortrieb [mm]
Rechnung	27,5	11,1	16,4
Messung Westtunnel	30,0	4,0 bis 8,0	22,0
Messung Osttunnel	22,0	4,0 bis 8,0	14,0

Tabelle 10-3: Setzungen Bestandstunnel

Die rechnerische Gesamtsetzung lag mit ca. 27 mm zwischen den gemessenen Setzungen am Westtunnel von ca. 30 mm und am Osttunnel von ca. 22 mm. Die gemessenen Setzungen aus der Wasserhaltung von bis zu 8 mm wurden in der Rechnung mit 11 mm nur geringfügig überschätzt. Insgesamt gesehen wurden somit die tatsächlich entstandenen Verformungen durch die Berechnungen gut wiedergegeben.

### 10.5.5 Vortrieb der Begleittunnel

Die Simulation des Vortriebs der Begleittunnel erfolgte weitgehend analog zu dem im vorangegangenen Kapitel beim Bestandstunnel beschriebenen Verfahren. Zusätzlich waren bei den Begleittunneln die Frosthebungen in die Berechnung einzubeziehen. Da für die Berechnung von Frosthebungen noch keine allgemeingültigen Stoffgesetze entwickelt und in Rechenprogramme implementiert wurden, konnten diese ohne zusätzliche Informationen aus Laborversuchen nicht berechnet bzw. abgeschätzt werden. Aus diesem Grund wurden zunächst die am Rand des Vereisungskörpers zu erwartenden Frosthebungen auf Basis der durchgeführten Laborversuche abgeschätzt und anschließend künstlich im FE-Modell generiert.

### 10.5.6 Abschätzung der auf der Geländeoberfläche zu erwartenden Frosthebungen

In einem ersten Schritt wurden die unmittelbar am Rand des Vereisungskörpers zu erwartenden Hebungen gemäß der in Kapitel 9 abgeleiteten Formel (9.1)

$$H_{\text{Tot}} = d \cdot \text{Vol}_H + 2 \cdot v_{\text{EL}} \cdot t$$

abgeschätzt. Aufgrund der lebhaften Wechsellagerung von tertiären Tonen und tertiären Sanden im Bereich des Vereisungskörpers wurden die im Versuch mit kurzen Dränwegen ermittelten Hebungsgeschwindigkeiten direkt verwendet und auf eine Rückrechnung des an der Unterseite der Eislinse herrschenden Unterdrucks  $\Delta u$  nach Formel (9.3) (vergleiche Abbildung 2-5) verzichtet.

Während zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Eislinnenwachstums  $v_{\text{EL}}$  Laborversuche erforderlich waren, konnte die bezogene volumetrische Hebung  $\text{Vol}_H$  entweder mit den in Kapitel 3 vorgestellten Laborversuchen oder gemäß des in Kapitel 5 entwickelten analytischen Modells näherungsweise ermittelt werden. Die Dicke des Frostkörpers  $d$  und dessen Vorhaltdauer  $t$  wurden entsprechend der Planungen mit  $d \cong 3,0$  m und  $T \cong 70$  d gewählt.

#### **Abschätzung von $\text{Vol}_H$ und $v_{\text{EL}}$ aus den Ergebnissen der Laborversuche:**

Aus den Laborversuchen ging hervor, dass sowohl die Werte für die Geschwindigkeit des Eislinnenwachstums  $v_{\text{EL}}$  als auch die Werte für die bezogene volumetrische Hebung  $\text{Vol}_H$  mit steigender Auflast kleiner wurden.

Sobald infolge des Gefriervorganges die Volumenzunahme des vereisten Bodens einsetzte, wurde der den Vereisungskörper umgebende ungefrorene Boden gestaucht. Dadurch erhöhten sich mit der Frostdauer die auf den Vereisungskörper wirksamen Spannungen, d.h. der Frostkörper mobilisierte mit steigendem Volumen auch zunehmend den umgebenden Boden als "Widerlager". Dies bedeutete weiterhin, dass die oben genannten und für die Verformungsberechnung notwendigen Eingangsgrößen "bezogene volumetrische Hebung  $\text{Vol}_H$ " und "Eislinnenwachstum  $v_{\text{EL}}$ " keine Konstanten, sondern auflastabhängige und damit letztlich zeitabhängige Größen waren. Diese Beziehungen, z.B. die Abhängigkeit Hebungsgeschwindigkeit – Auflast, wurden durch Einbeschreiben von exponentiellen Ausgleichskurven in die in Abbildungen Abb. 10-15 und Abb. 10-16 dargestellten Versuchsergebnisse mathematisch gefasst. Die Ausgleichskurven sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Die

exponentielle Form der Ausgleichskurven konnte mit den wenigen Versuchen, die für jeden Boden und jede Laststufe durchgeführt wurden, nicht mathematisch abgesichert werden. Sie wurde gewählt, da sie bei Extrapolation für hohe Auflasten im Vergleich zu einer linearen Ausgleichsgeraden die konservativeren Werte lieferte.

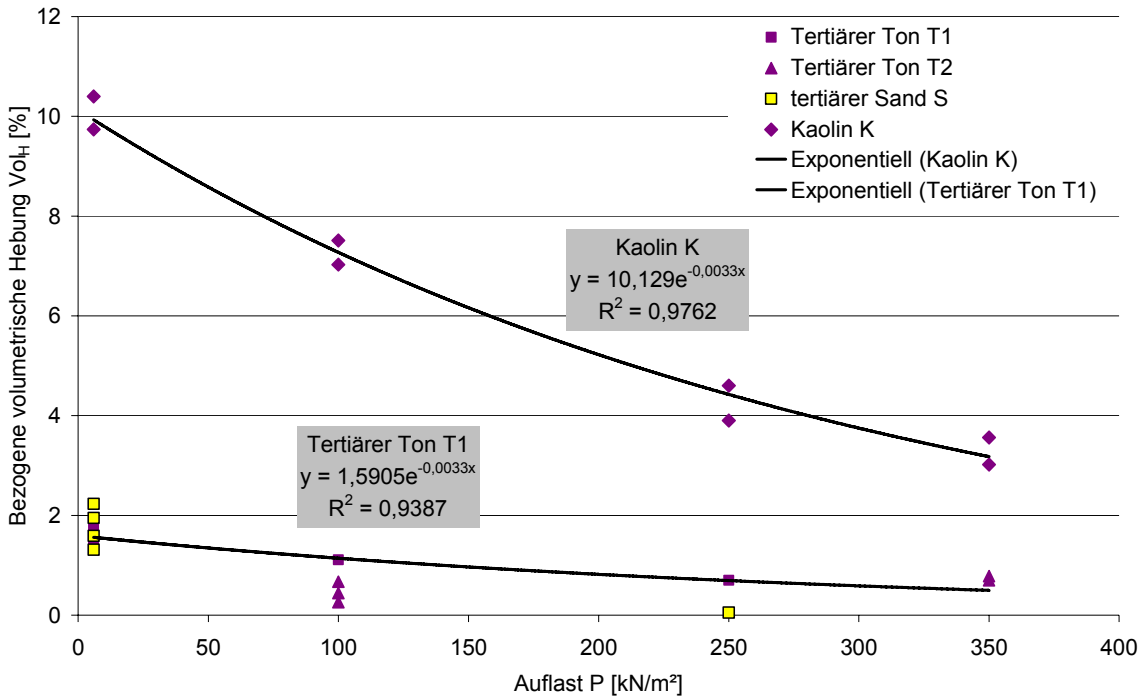


Abb. 10-15: Ausgleichskurve für die bezogene volumetrische Hebung  $Vol_H$

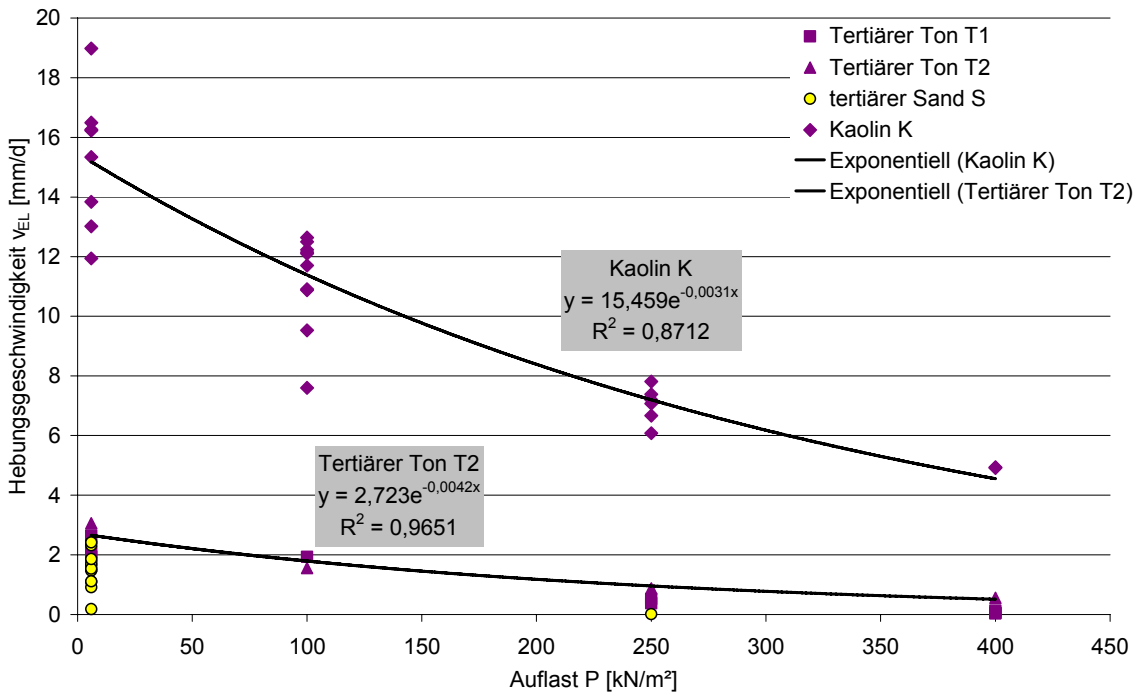


Abb. 10-16: Ausgleichskurve für Eislinnenbildung

Für die Versuche zur Eislinsenbildung und zur volumetrischen Hebung ergeben sich für den tertiären Ton die nachfolgenden Gleichungen:

#### Volumetrische Hebung:

$$\text{Vol}_H = 0,0159 \cdot e^{-0,0033 \cdot P}$$

mit: Auflast  $P$  [kN/m<sup>2</sup>]  
bezogene volumetrische Hebung  $\text{Vol}_H$  [%]

#### Eislinsenbildung:

$$v_{EL} = 2,723 \cdot e^{-0,0042 \cdot P}$$

mit: Auflast  $P$  [kN/m<sup>2</sup>]  
Hebungsgeschwindigkeit  $v_{EL}$  [mm/d]

Entsprechend der Situation vor Ort konnte vor der Vereisung eine Auflast von ca. 340 kN/m<sup>2</sup> (Bodenwichte 20 kN/m<sup>2</sup>, Tiefenlage rund 17 m) auf den späteren Vereisungskörper angenommen werden. Durch die infolge des Gefrierens und der Eislinsenbildung zusätzlich entstehenden Zwängungen würde sich die Auflast erhöhen, so dass nachfolgend die für eine mittlere Auflast von 400 kN/m<sup>2</sup> vorsichtig geschätzten Werte verwendet wurden. Weiterhin war davon auszugehen, dass vor Ort der Temperaturgradient und damit die Geschwindigkeit des Eislinsenwachstums am Rand des Vereisungskörpers nicht größer als die im Laborversuch untersuchten Temperaturgradienten und die damit ermittelten Hebungsgeschwindigkeiten sein würden. Auf eine gesonderte Kalibrierung der im Versuch ermittelten Eislinsenbildung an den vor Ort zu erwartenden Temperaturgradienten wurde daher auf der sicheren Seite liegend verzichtet. Es ergab sich folgende Verformung am Rand des Vereisungskörpers.

$$H_{\text{Tot}} = 3000 \text{ mm} \cdot 0,4 \% + 2 \cdot 0,5 \text{ mm/d} \cdot 70 \text{ d} = 82 \text{ mm.}$$

Alternativ wurde der Hebungsverlauf gem. Kapitel 4 und 5 rechnerisch ermittelt und in Abb. 10-17 dargestellt. Es ergab sich zunächst eine Gesamthebung von 72 mm am Rand des Vereisungskörpers, wovon ca. 3 mm auf die volumetrische Hebung zurückzuführen waren.

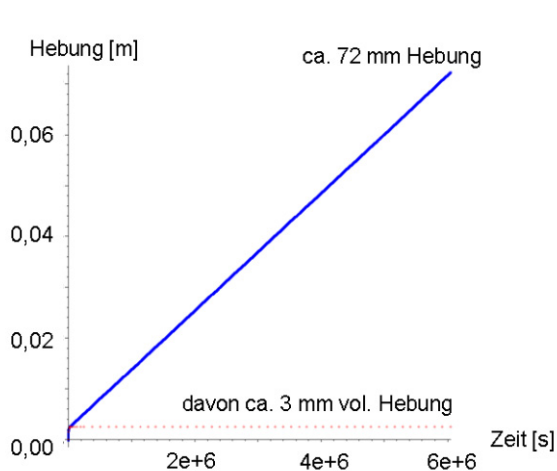


Abb. 10-17: Berechneter Hebungsverlauf

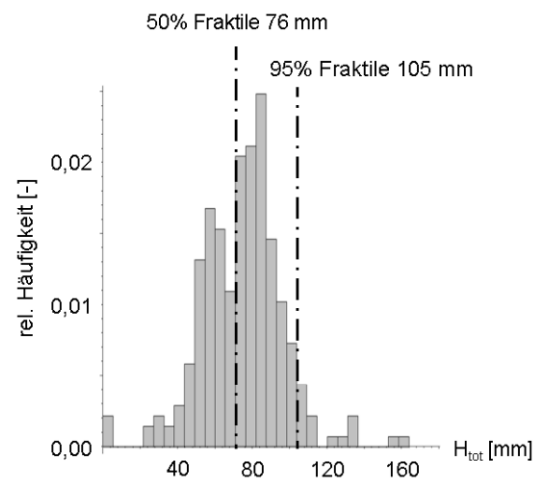


Abb. 10-18: Histogramm der Monte-Carlo-Simulation



Die Schwierigkeit bei der Berechnung der volumetrischen Hebung bestand vor allem in der Abschätzung der Länge des Dränweges, den das Porenwassers von der Frostgrenze bis zu gut durchlässigen Schichten zurücklegen muss. Während dieser Weg in den Laborversuchen mit dem Abstand der Frostgrenze zur Oberkante der Filterplatte gut definiert ist, konnte er im Feld aufgrund der uneinheitlichen Wechsellagerung von bindigen und nicht-bindigen Schichten nur grob abgeschätzt werden. Daher wurde in der anschließenden Monte-Carlo-Simulation die Bandbreite des Dränweges von 0,8 m bis 6,0 m variiert. Hierbei wurde die Annahme getroffen, dass die Länge des Dränweges normalverteilt sei. Abb. 10-18 zeigt das Histogramm für die berechneten Frosthebungen nach 250 durchgeführten Simulationen. Die 50%-Fraktile lag hierbei mit 76 mm erwartungsgemäß nahe bei der mit zunächst berechneten 72 mm Hebung. Die 95%-Fraktile lag bei 105 mm Hebung.

Die auf die verschiedenen Arten ermittelten Frosthebungen zeigten Beträge zwischen ca. 70 und 100 mm. Für die weiteren Berechnungen wurde von Hebungen von 80 mm ausgegangen.

#### **Auswirkungen an der Geländeoberfläche:**

Um die Auswirkungen der Verformungen des in ca. 15 m bis 17 m Tiefe liegenden Vereisungskörpers auf die Geländeoberfläche abzuschätzen, wurde der in Abb. 10-19 dargestellte Vereisungskörper durch einen Temperaturlastfall beaufschlagt. Die künstliche Erwärmung des Vereisungskörpers führte zu einer Ausdehnung des Körpers in alle Richtungen und damit zu einer Volumenvergrößerung. Der Körper wurde rechnerisch derart erwärmt, dass eine vertikale Ausdehnung von ca. 80 mm erreicht wurde.

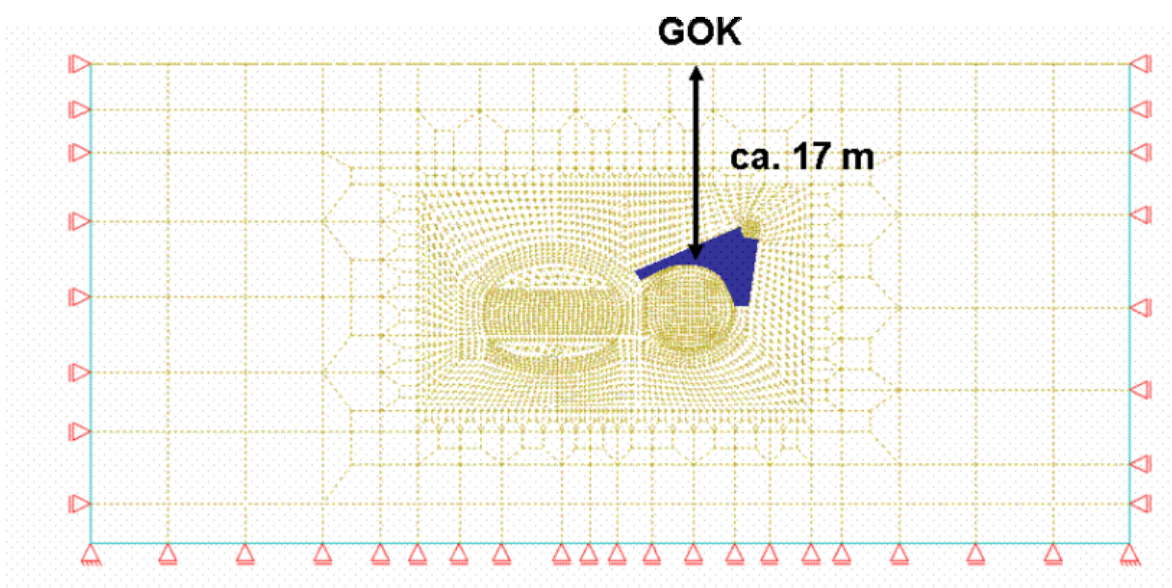


Abb. 10-19: FE-Ersatzsystem zur Abschätzung der Frosthebungen auf GOK

Abb. 10-20 zeigt den sich infolge der Ausdehnung des Vereisungskörpers auf GOK einstellenden Hebungsverlauf. Bei einem vollständig im Ton liegenden Vereisungskörper waren bei einer kontinuierlichen Kälteabgabe rechnerische Hebungen von ca. 8 mm zu erwarten.



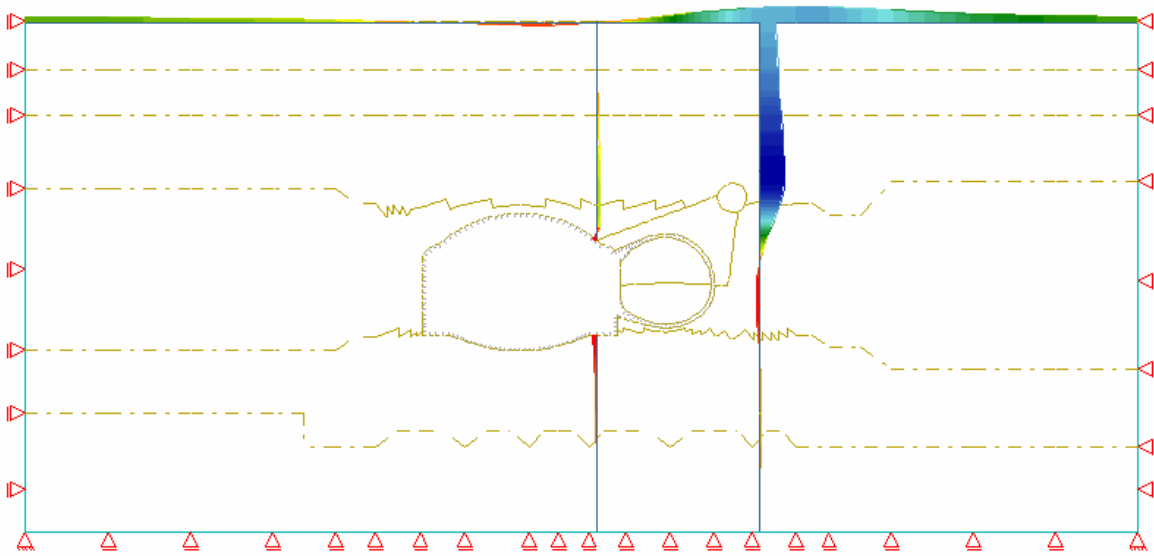


Abb. 10-20: Baugrundverformungen (qualitativ) infolge der Baugrundvereisung

Weiterhin sind in Abbildung 10-20 die Vertikalverschiebungen entlang zweier senkrechter Schnitte eingezeichnet. Es ist zu erkennen, dass sich der Vereisungskörper unter dem Pilotstollen (rechter Schnitt in Abb. 10-20) erwartungsgemäß stärker hob als auf der Bestandsseite.

Aus folgenden Gründen war zu erwarten, dass die rechnerisch prognostizierten Frosthebungen von 8 mm vor Ort nicht erreicht werden würden:

- Die rechnerische Abschätzung basierte auf der Annahme eines kontinuierlichen Wärmeabstrages aus dem Boden. In Kapitel 5.4.5 wurde gezeigt, dass die vor Ort angewandte oszillierende Steuerung die zu erwartenden Hebungen im Vergleich zum kontinuierlichen Wärmeabtrag reduziert.
- Weiterhin verlief der Tunnelvortrieb zeitlich parallel zur Haltephase des Vereisungskörpers. Die durch den Vortrieb verursachten Setzungen überlagerten sich mit den aus der Vereisung resultierenden Hebungen und glichen diese z.T. wieder aus.

Die getroffene Einschätzung wurde später durch die in Kapitel 10.6 erläuterten Messungen bestätigt. Es traten maximale Hebungen von ca. 6 mm auf.

### 10.5.7 Simulation des Vortriebs

Durch den Vereisungskörper wurde zum einen die Entspannung der Ortsbrust während des Vortriebs behindert, zum anderen kam es aufgrund der erhöhten Steifigkeit des Frostkörpers zu Lastumlagerungen von Vertikallasten zu den Rändern des Vereisungskörpers hin. Das Auffahren des Tunnels unter dem Frostkörper wurde mit einem  $\alpha$ -Faktor von 0,5 gerechnet, da davon ausgegangen werden konnte, dass durch den Frostkörper die Längstragwirkung des Gebirges in stärkerem Maß als beim herkömmlichen Spritzbetonvortrieb aktiviert wurde. In Abbildung 10-21 sind die Ergebnisse der FE-Berechnungen dargestellt. Der gestrichelte Abschnitt der Kurve stellt die Abschätzung der Frosthebungen dar, wie sie in Kapitel 10.5.6 erläutert wurde.

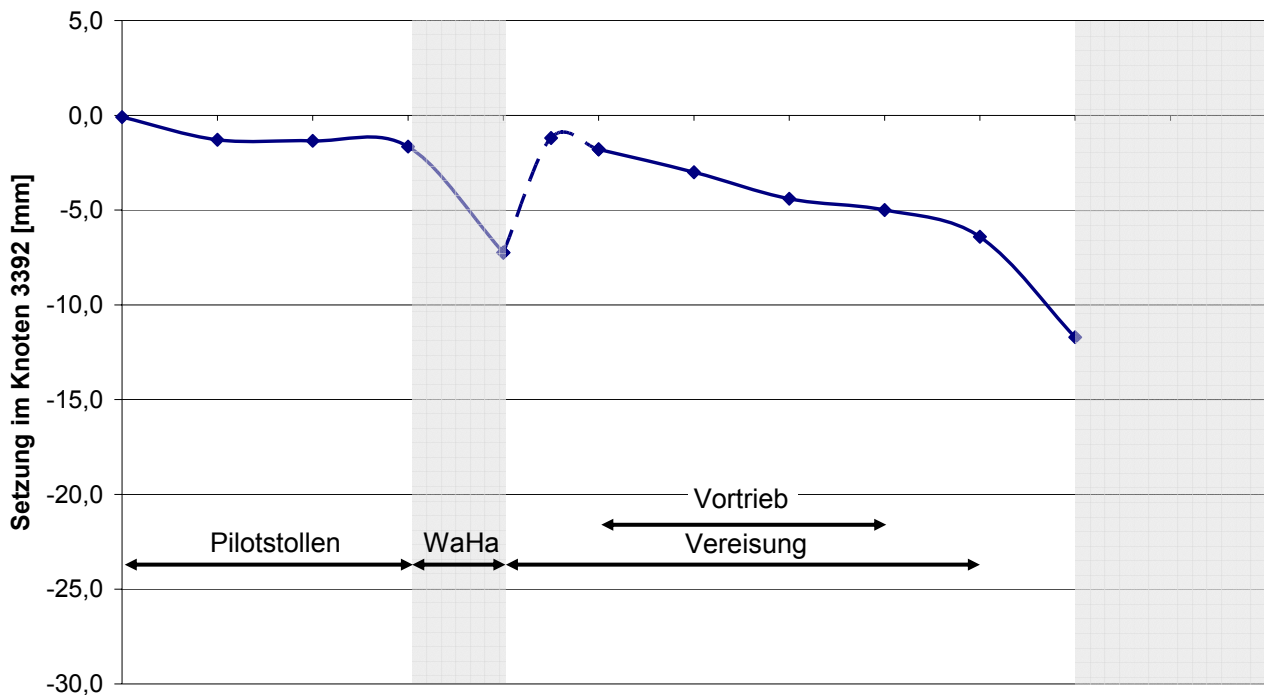


Abb. 10-21: Rechnerisch ermittelte Baugrundverformungen für den Begleittunnel

Die Ergebnisse der Berechnungen konnten wie folgt beurteilt werden:

- Infolge der Wasserhaltung waren großflächige Setzungen in einer Größenordnung von ca. 6 mm zu erwarten.
- Auf der Geländeoberfläche, bzw. in der Gründungsebene des Rathauses war mit Frosthebungen bis zu ca. 8 mm zu rechnen.
- Insgesamt waren ca. 12 mm Setzung zu erwarten.

Grundsätzlich mussten rechnerische Verformungsprognosen dahingehend eingeschränkt werden, dass einzelne Bautätigkeiten nicht oder nur schwer modellierbar waren. Hierzu zählte beispielsweise ein eventuell auftretender Bodenentzug beim Bohren der Frostlanzen gegen das drückende Wasser.

## 10.6 Schlauchwaagenmessungen

Die vor Ort auftretenden Verformungen wurden durch ein redundantes Messsystem, bestehend aus geodätischen Messungen und einer Schlauchwaagenmessung über dem Westtunnel, erfasst. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Schlauchwaagenmessungen vorgestellt. Ein Vergleich der beiden Messsysteme zeigte eine gute Übereinstimmung und ist in KELLNER (2006) enthalten.

Vor Ort verlief die Hauptachse der Messung in Nord-Süd-Richtung parallel zu Pilotstollen und Fußgängertunnel (siehe Abb. 10-22) und war mit insgesamt 7 Messstationen bestückt. Im Schnitt lag die Messachse ca. 11 m über dem Fußgängertunnel. Die zeitliche Entwicklung der Quermulde wurde mit einer senkrecht zur Hauptachse verlaufenden Nebenachse auf der Nordseite gemessen, welche 4 Messstationen umfasste. Die Aufnehmer der Querachse Süd wurden als weitere Referenzaufnehmer eingesetzt. Grundsätzlich wurde die gleichmäßige Aufteilung der Messstationen zwischen den Eck-

punkten angestrebt, musste jedoch an die durch Rohr- und Leitungsbündel lokal stark eingeschränkten Montagemöglichkeiten angepasst werden. Aufgrund der insgesamt relativ kleinräumigen Anordnung der gesamten Messkette konnten insbesondere die Setzungen infolge Grundwasserhaltung nicht erfasst werden, da alle Messaufnehmer in praktisch gleichem Umfang davon betroffen waren. In einem Lichtschacht im Innenhof des Rathauses wurde deshalb ein Messaufnehmer mit Invarstab montiert, über den die geodätische Vermessung angebunden werden konnte. Die Messwerte wurden im 15-minütigen Rhythmus erfasst und ausgelesen. Insgesamt wurden ca. 35.000 Messwerte pro Aufnehmer und Jahr dokumentiert.



Abb. 10-22: Lage der Messpunkte

Sowohl Schlauchwaagensysteme als auch geodätische Präzisionsnivellements, die dem derzeitigen Stand der Technik entsprechen, besitzen eine Auflösung der Messwerte von wenigen Hundertstelmillimetern. Temperatureinflüsse und spezifische Systemtoleranzen führen bei beiden Systemen dazu, dass die Genauigkeit von aussagekräftigen und belastbaren Messwerten deutlich unter deren Auflösung liegt.

Die Messwerte des vor Ort eingesetzten Schlauchwaagensystems zeigten tageszeitliche Schwankungen (vergleiche Abbildung 10-23), so dass belastbare Werte erst ab relativen Änderungen von etwa 0,4 mm entstanden. Die Standardabweichung moderner Präzisionsnivellements liegt in der gleichen Größenordnung. Die Auswertung des geodätischen Nivellements vor Ort erfolgte – auf der sicheren Seite liegend – mit einer Genauigkeit von 1 mm.

Bei Anbindung der Schlauchwaage an die geodätische Vermessung, führten geodätisch gemessene Änderungen zu Messwertsprüngen in der Auswertung der Schlauchwaagenmessungen. Da sich die mit der Schlauchwaage gemessenen Verformungen im Bereich weniger Millimeter bewegten, erschwerten die mit der Anbindung verbundenen Messwertsprünge die Lesbarkeit der Messkurven. Aus diesem Grund wurde in den in Abbildung Abb. 10-23 und Abbildung Abb. 10-24 dargestellten Grafiken auf die geodätische Anbindung verzichtet und die Verformungen wurden auf den Messaufnehmer Nr. 1 bezogen, welcher am weitesten vom Vortrieb entfernt war. Es konnte davon ausgegangen werden, dass der Messaufnehmer Nr. 1 zwar nicht unbeeinflusst durch das Baugeschehen bleiben würde, jedoch aufgrund der Entfernung zum Vortrieb wesentlich geringere Hebungen und Setzungen als

die übrigen Aufnehmer in den Messketten erfahren würde. Diese Einschätzung wurde durch die geodätischen Messungen bestätigt, so dass die nachfolgend genannten Auswertungen als hinreichend genau angesehen werden können.

### 10.6.1 Messergebnisse

#### Hauptachse Einzelaufnehmer

In Abb. 10-23 ist der zeitliche Verlauf der Messwerte in der Hauptachse dargestellt. Da Setzungen aus der Wasserhaltung, wie bereits erläutert, mit der Anlage nicht erfasst werden konnten und der Vortrieb des Pilotstollens im Dezember 2003 keine eindeutig zuordenbaren Hebungs- / bzw. Setzungsanteile ergab, beginnt die Zeitachse in der Grafik nach dem Vortrieb des Pilotstollens und vor der Vereisung. Ab Mitte Mai 2004 setzten erste Hebungen ein, wobei die maximalen Hebungen bei ca. 4-5 mm lagen. Ab Anfang Juli zeigten die Aufnehmer der Hauptachse Setzungen an, die zeitlich versetzt eintraten, bis Mitte August anhielten und die aufgetretenen Hebungen wieder kompensierten. Diese Setzungen verlangsamten sich stetig und zeigten die tiefsten Werte Mitte März 2005. Ab diesem Zeitpunkt traten bei allen Aufnehmern Hebungen ein, die bis Mitte Juni 2005 im Mittel ca. 1 mm erreichten.

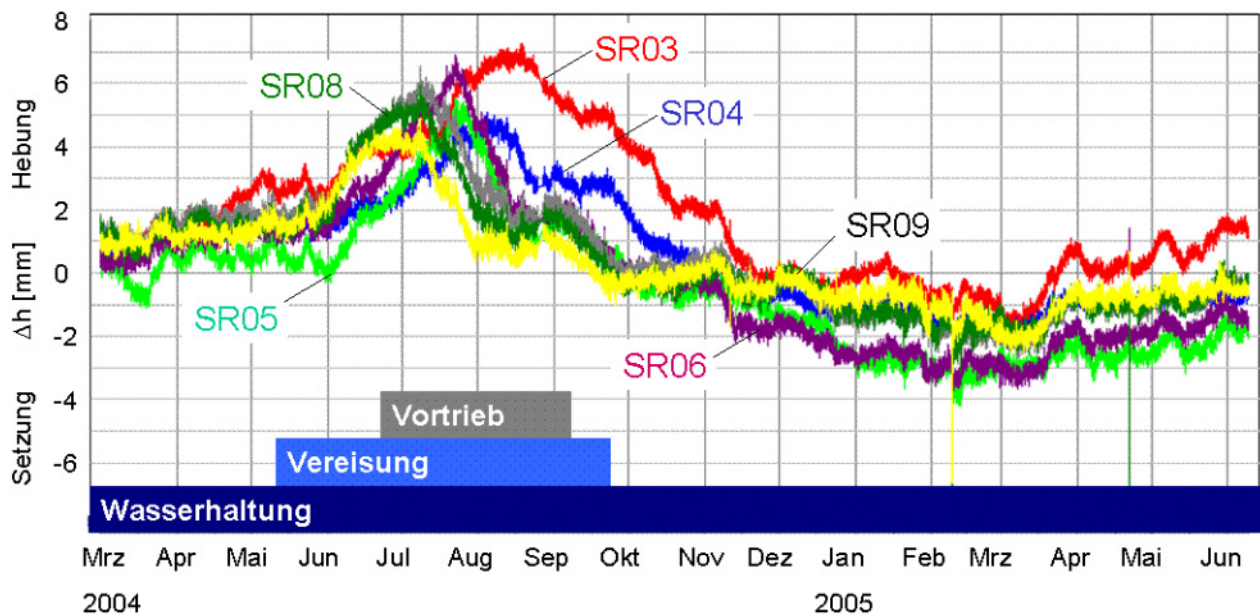


Abb. 10-23: Zeitlicher Verlauf der Vertikalverformungen in der Hauptachse

#### Hauptachse Vereisungsabschnitte

Um die mittleren Frosthebungen in den einzelnen Vereisungsabschnitten zu ermitteln, wurde die Auswertung "Hebung Vereisungskörper" vorgenommen. Hierbei wurde zunächst das arithmetische Mittel der direkt über den drei Vereisungsabschnitten liegenden Messstationen berechnet. Von den berechneten Werten wurden dann die Messwerte der am weitesten außen liegenden Messstation Nr. 1 abgezogen und zum 15. April 2004, d.h. zu einem Zeitpunkt an dem außer der Wasserhaltung keine Bautätigkeiten stattfanden, zu Null gesetzt. Die Messstationen Nr. 7 bis 12 lagen hierbei im Einflussbereich der Vereisung "Nord", die Messstationen Nr. 5 und 6 über dem Vereisungskörper "Mitte" und die Messstationen Nr. 3 und 4 über dem Vereisungskörper "Süd".

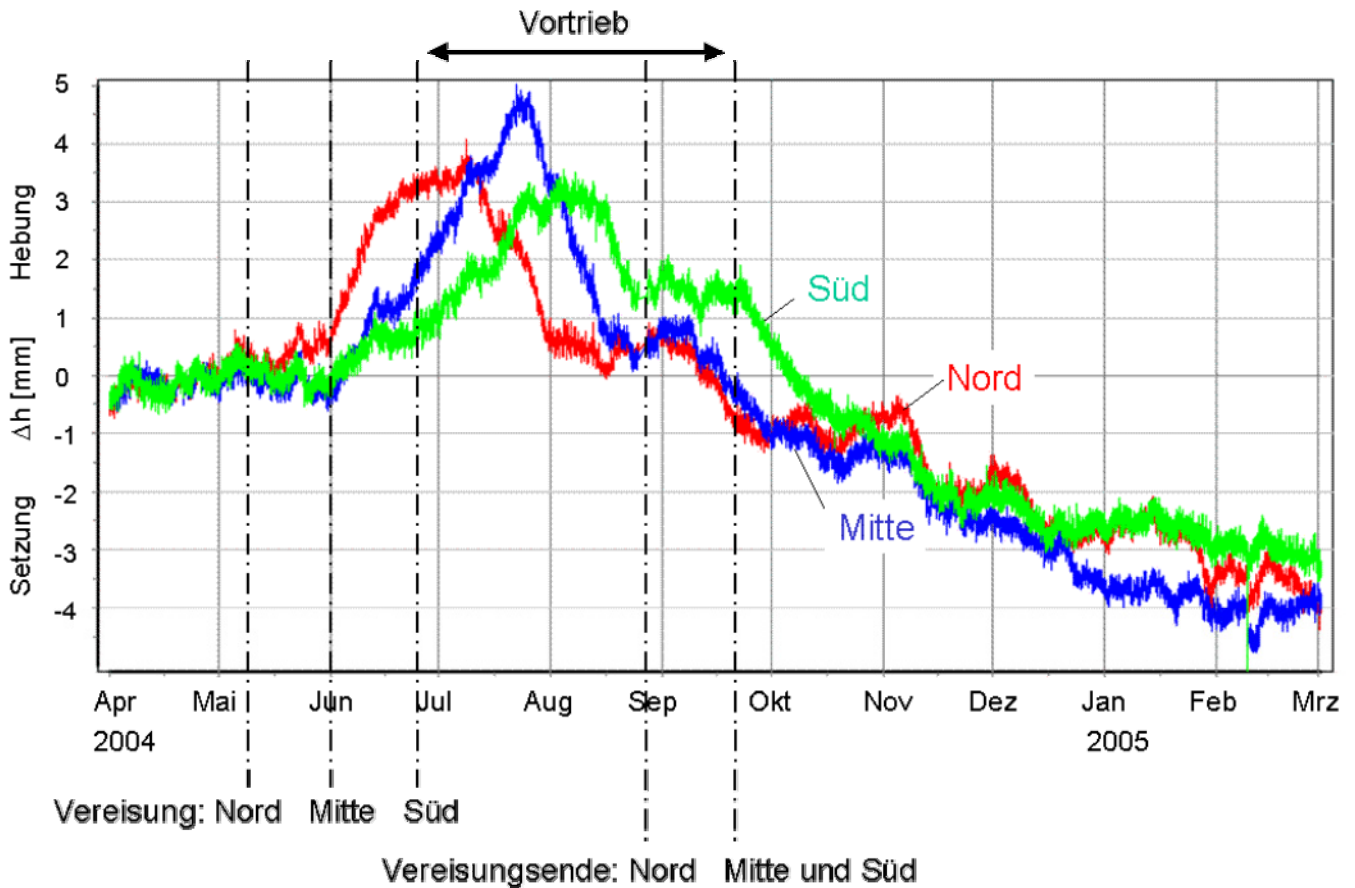


Abb. 10-24: Zeitlicher Verlauf der Verformungen in den einzelnen Vereisungsabschnitten

Die Hebungen über dem Vereisungskörper Nord setzten um den 15. Mai 2004 ein und nahmen bis Anfang Juli auf ca. 3,6 mm zu. Danach traten Setzungen auf, die Anfang August zunächst zum Stillstand kamen, wobei die aufgetretenen Hebungen ausgeglichen wurden. Ab Anfang September kam es erneut zu Setzungen, die bis Ende Februar 2005 Werte von ca. 4,5 mm erreichten.

Die Hebungen über dem Vereisungskörper Mitte setzten Anfang Juni ein, nahmen annähernd stetig zu und zeigten mit ca. 4,8 mm ein Maximum um den 25. Juli. Ab dann traten Setzungen ein, die bis Mitte August anhielten und die Hebungen annähernd kompensierten. Nach einer Ruhephase kam es Anfang September zu erneuten Setzungen, die wie beim Vereisungskörper Nord Ende Februar 2005 ca. 4,5 mm betragen.

Über dem Vereisungskörper Süd traten ab Anfang Juni zeitgleich zum Vereisungskörper Mitte erste Hebungen auf. Diese nahmen bis Mitte Juni auf ca. 0,8 mm zu, zeigten dann ein Plateau, um ab dem 23. Juni erneut bis auf einen Wert von ca. 3,2 mm anzusteigen. Ab Mitte August kam es zu einer anhaltenden Setzungsbewegung, welche sich in der letzten Septemberwoche beschleunigte.

Insgesamt ist festzustellen, dass alle drei Kurven Ende Februar 2005 mit 3 bis 5 mm Setzung im Vergleich zu April 2004 annähernd denselben Wert zeigten.



### Querachse Nord

Die Aufnehmer in der Querachse Nord zeigten weitgehend das qualitativ gleiche Hebungs- / Setzungsverhalten. Die entsprechende Auswertung ist in Abb. 10-25 dargestellt. Ab Anfang Juni zeigten alle Aufnehmer deutliche Hebungen, die Mitte Juni Werte von ca. 2 bis 3 mm erreichten. Darauf folgte ein Plateau bis Anfang Juli. Ab diesem Zeitpunkt traten bei allen Aufnehmern Setzungen ein, wobei die Setzungsbeträge von Aufnehmer Nr. SR09 bis Aufnehmer Nr. SR12 kleiner wurden. Anfang März 2005 zeigten alle Aufnehmer Setzungen an, die bis Ende März wieder auf ihr ursprüngliches Niveau von Anfang März zurückkehrten. (Anmerkung: Die Kurve des Aufnehmers SR10 zeigt vergleichsweise starke Schwankungen und wurde in Abb. 10-25 nicht mit dargestellt. Sie ist im Anhang in Anlage 5 vollständig abgedruckt.)

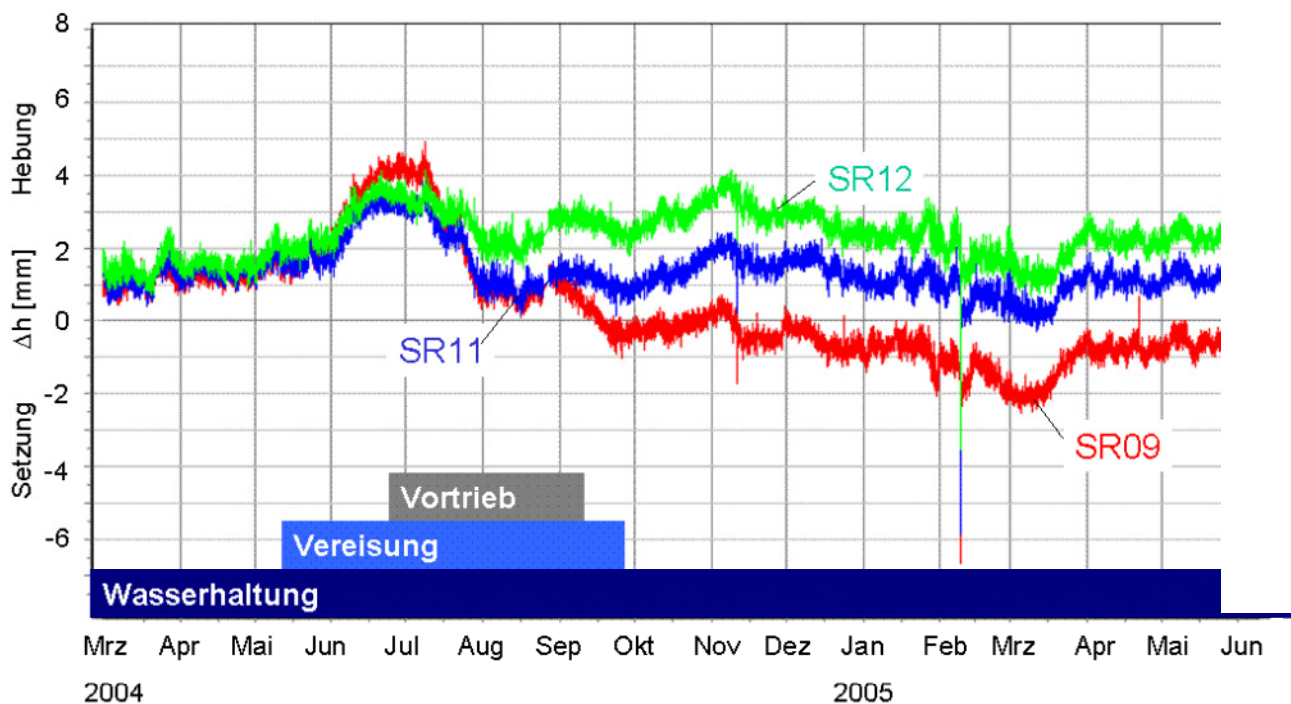


Abb. 10-25: Zeitlicher Verlauf der Messwerte in der Querachse Nord

#### 10.6.2 Beurteilung der Messergebnisse

Vergleicht man die gemessenen Vertikalverformungen mit dem Bauablauf, so sind die Ergebnisse insgesamt nachvollziehbar.

Der Vereisungsbeginn über dem Vereisungskörper "Nord" war am 10. Mai. Die Vereisung "Mitte" wurde am 01. Juni zugeschaltet, die Vereisung "Süd" am 22. Juni. Die Mitte Mai einsetzenden Hebungen konnten auf Frosthebungen infolge des Auffrierens zurückgeführt werden. Diese Hebungen brachen ab, sobald der Vortrieb den entsprechenden Aufnehmer unterfuhr.

Der Vortrieb startete Ende Juni und erreichte bei TM 103 die Schlitzwand am Bahnhof Marienplatz am 13.09.2004. Das zeitlich versetzte Unterfahren der einzelnen Aufnehmer führte zu einem eben-

falls zeitlich versetzten Auftreten der Hebungsspitzen der Aufnehmer Nr. 9 bis Nr. 3 in absteigender Reihenfolge entsprechend dem Tunnelvortrieb.

Danach trat eine kurze Ruhephase ein, bis mit dem Abschalten der Vereisung Tausetzungen eintraten, welche bis ca. März 2005 anhielten. Die Abschaltung der Vereisungskreisläufe erfolgte im Vereisungsabschnitt Nord am 25.08.2004 und in den Abschnitten Mitte und Süd um den 21.09.2004

Die in Abb. 10-25 ab Ende März 2005 erkennbaren "Hebungen" mussten nicht zwingend auf tatsächlich vor Ort auftretende Hebungen zurückzuführen sein. Neben nicht auszuschließenden Drifterscheinungen in den Messaufnehmern konnten bei der kleinräumigen Anordnung der gesamten Messkette auch Effekte aufgetreten sein, dass "Hebungen" der Einzelaufnehmer auf eine tatsächliche Setzung der Referenz zurückzuführen waren. Im Unterschied zu den im Zeitraum Mai 2004 bis September 2004 gemessenen Hebungen zeigten hier alle Aufnehmer die gleichen Hebungen / Setzungen an. Dies war ein starkes Indiz für die zu vermutende Setzung der Referenzstation.

Insgesamt betrachtet passten die gemessenen Verformungen mit dem Bauablauf, d.h. dem Beginn der Vereisung in den jeweiligen Gefrierabschnitten, dem Vortrieb und der Auftauphase nach der Abschaltung der Vereisung zusammen.

### **10.7 Vergleich der berechneten mit gemessenen Verformungen**

Die infolge der Baumaßnahme auftretenden Baugrundverformungen wurden vor Ort durch ein geodätisches Nivellement und ein Schlauchwaagensystem erfasst. Beide Systeme zeigten für den Zeitraum Vereisung – Vortrieb – Tausetzung eine gute Übereinstimmung. Zusammenfassend können die folgenden mittleren Werte für die Baugrundverformungen auf Geländeoberfläche angegeben werden:

- Gesamtsetzung auf der Geländeoberfläche ca. 12 mm
- davon entfiel en auf die Wasserhaltung ca. 4 bis 5 mm
- Betrag der Frosthebungen ca. 3 bis 4 mm

In Abbildung 10-26 sind die Beträge der vor Ort auf der Geländeoberfläche gemessenen Verformungen und die Ergebnisse der FE-Berechnungen gegenübergestellt.

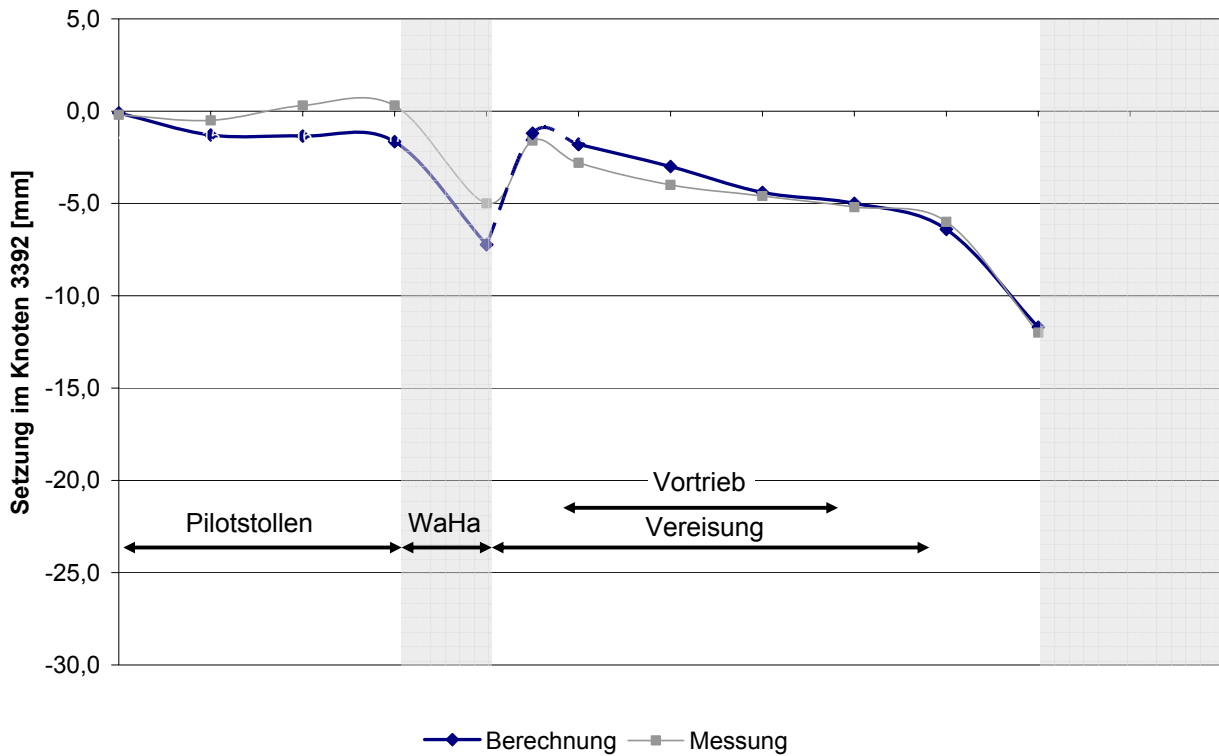


Abb. 10-26: Vergleich der prognostizierten mit den gemessenen Baugrundverformungen

Insgesamt war eine gute Übereinstimmung von Berechnung und Messung festzustellen. Die Größenordnung der zu erwartenden Frosthebungen wurde zutreffend abgeschätzt. Die zur Verformungsprognose gewählte Methode und die vor der Baumaßnahme getroffenen Rechenannahmen konnten bestätigt werden.



## 11 Zusammenfassung und Ausblick

### 11.1 Zusammenfassung

#### 11.1.1 Allgemeines

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Beschreibung von Frosthebungen infolge tief liegender Vereisungskörper. Ausgehend von Frosthebungsversuchen mit eindimensionaler Frosteindringung wird ein mechanisches Modell formuliert, mit dem alle in den Versuchen beobachteten Mechanismen beschrieben werden können. Die wärmetechnischen und bodenmechanischen Parameter, von denen das Maß der Frosthebungen abhängt und die als Eingangsgrößen in das genannte Modell dienen, können hierbei mit Normversuchen bzw. mit wenigen weiterführenden Frosthebungsversuchen ermittelt werden.

Im Hinblick auf die Praxis soll die vorliegende Arbeit auch eine Planungshilfe darstellen. Das beschriebene Vorgehen erlaubt eine Einschätzung, ob unter gegebenen Randbedingungen prinzipiell mit Frosthebungen bei künstlichen Bodenvereisungen gerechnet werden muss und weiterhin, welche der Systemparameter entscheidend für das Maß der Frosthebungen sind.

Frosthebungen können im Wesentlichen auf zwei Ursachen zurückgeführt werden: Zunächst kommt es durch die 9%ige Volumenzunahme bei der Entstehung von Eis aus Wasser zu homogenen Frosthebungen. Weiterhin bilden sich insbesondere bei feinkörnigen Böden an der Grenze vom gefrorenen zum ungefrorenen Boden aus reinen Eiskristallen wachsende Körper, so genannte Eislinien.

#### 11.1.2 Laborversuche

Das Frosthebungsverhalten verschiedener Böden wurde in einem Klimaschrank mit 2-Kammer-Technik getrennt nach Eislinienbildung und volumetrischer Hebung untersucht. Eine Gemeinsamkeit der beiden Mechanismen liegt darin, dass sowohl die volumetrische Hebung als auch die Eislinienbildung mit zunehmender Auflast auf den Frostkörper vermindert werden. Die genannten Mechanismen besitzen jedoch auch deutlich unterschiedliche Charakteristika, die nachfolgend in kurzer Form aufgeführt werden:

#### Volumenausdehnung beim Gefrieren

- Das Maß der Frosthebung hängt zunächst vom Wassergehalt des Bodens ab. Unter Annahme eines vollgesättigten Bodens und undrnierten Verhältnissen lassen sich Obergrenzen für die bezogene volumetrische Hebung  $Vol_H$  angeben.

$$Vol_H = V_{w,1} - V_w = 0,09 \cdot w \cdot \rho_d \cdot \frac{V}{\rho_w}$$

Beispielsweise sind für die im Raum München anstehenden tertiären Tone maximale bezogene volumetrische Hebungen von ca. 3 bis 4 % der Höhe der gefrorenen Bodenzone möglich.

- Die tatsächlich auftretenden Hebungsbeiträge sind i. d. R. geringer, da ein Teil des Porenwassers beim Gefriervorgang von der Gefrierfront weg- und in den ungefrorenen Boden abströmen kann. Das Maß der volumetrischen Frosthebungen hängt dabei vor allem von der Durchlässigkeit des ungefrorenen Bodens ab.
- Die Frosthebungen sind umso größer, je schneller gefroren wird und je größer die aufgefrorene Bodenkubatur ist.
- Wird die Volumenausdehnung des Wassers behindert, so entstehen gemäß den Gesetzen der Thermodynamik Frostsprengdrücke von mehreren 100 bar. Das heißt, dass volumetrische Hebungsanteile bei den hier betrachteten tief liegenden Vereisungskörpern auch bei hohen Überlagerungsdrücken nie vollständig auszuschließen sind.

### **Eislinsenbildung**

- Bei der Eislinsenbildung wird Wasser zur Gefrierfront transportiert.
- Die Frosthebungen sind umso größer, je länger die Vorhaltdauer des Vereisungskörpers ist.
- Die maximalen Frosthebungsdrücke sind hier geringer als die Frostsprengdrücke der volumetrischen Hebung (vergleiche Kapitel 5.1).
- Aus Referenzversuchen im Klimaschrank mit 2-Kammer-Technik können zwei Parameter abgeleitet werden (die kritische Eindringgeschwindigkeit der Null-Grad-Isotherme, ab der Eislinsen entstehen und die Hebungsgeschwindigkeit infolge Eislinsenbildung), mit deren Hilfe das Eislinsenwachstum beschrieben werden kann. Der Parameter der Hebungsgeschwindigkeit wird in der vorliegenden Arbeit dabei entsprechend des "segregational potential" Konzepts von Konrad verwendet.

### **Intermittierender Wärmeentzug**

Die Versuche mit intermittierender Steuerung zeigten, dass die Hebungen deutlich minimiert werden, wenn durch einen intermittierende Wärmeentzug eine ausreichend große "Pufferzone" im Boden geschaffen wird, in der die Null-Grad-Isotherme wandert.

#### **11.1.3 Modell zur Beschreibung der Frosthebungen und Anwendungsbeispiel**

Im nachfolgenden Ablaufdiagramm werden alle für eine Verformungsprognose notwendigen Arbeitsschritte nochmals veranschaulicht. Der Ablauf lässt sich grob in vier Phasen gliedern:

- Berechnung des Wärmetransportes und der Frosteindringung
- Berechnung des Massentransportes und der Frosthebung
- Monte Carlo Simulation zur Ermittlung möglicher Streubreiten der Ergebnisse
- FE-Berechnung zur Abschätzung der Auswirkung der Frosthebungen im Baugrund.

Die Laborversuche können bei der Ermittlung der Frosteindringgeschwindigkeit und der volumetrischen Hebung zur Kontrolle bzw. Kalibrierung der Ergebnisse eingesetzt werden. Sie sind nach dem derzeitigen Kenntnisstand jedoch zwingend für die Ermittlung der Hebungsgeschwindigkeit infolge Eislinsenbildung und der Bestimmung der kritischen Frosteindringgeschwindigkeit erforderlich, ab deren Unterschreitung die Eislinsenbildung einsetzt.

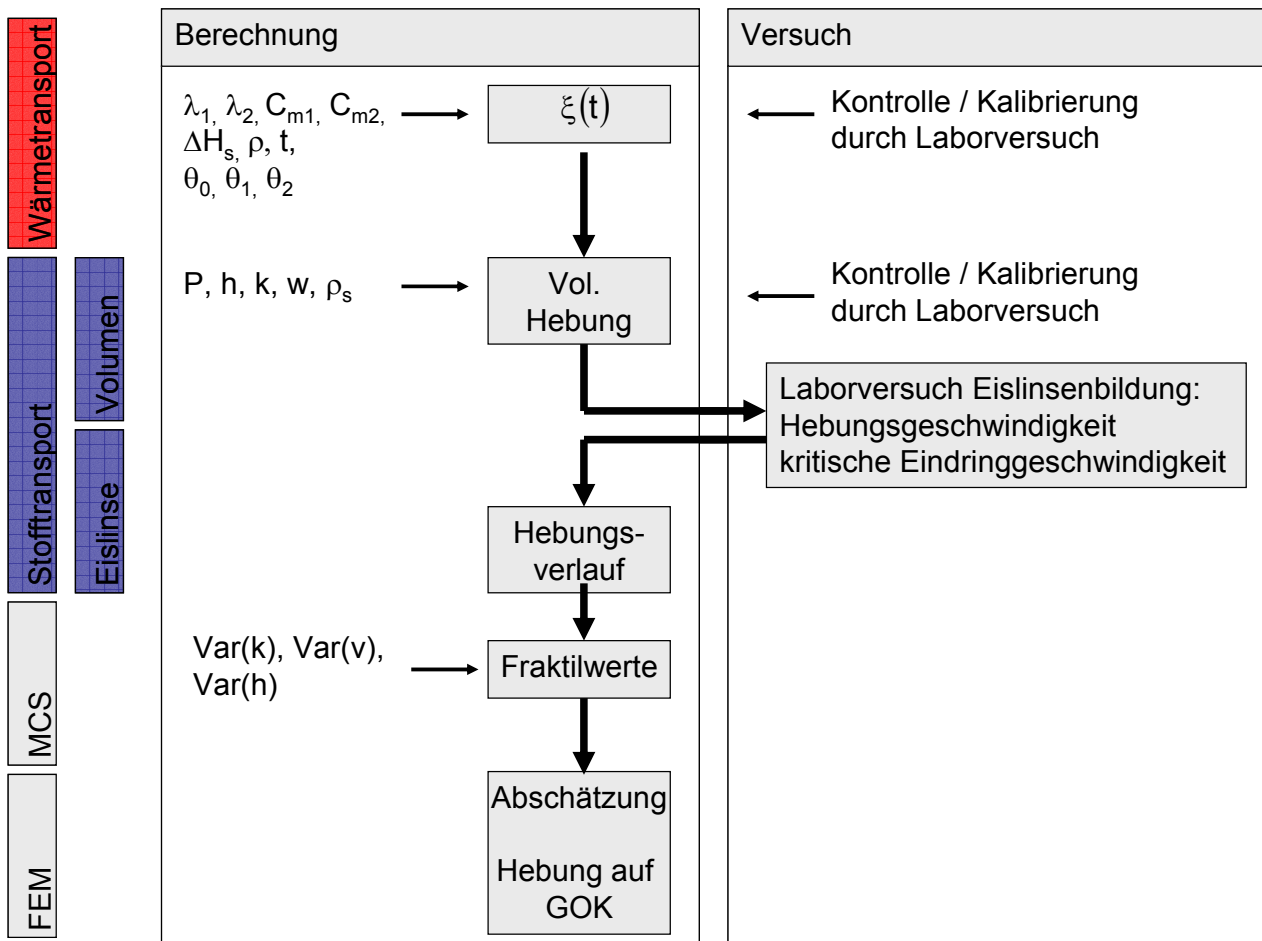


Abb. 11-1: Ablaufdiagramm

Es wurde gezeigt, dass die Frosthebungen von einer Reihe von unterschiedlich stark streuenden und sich zum Teil gegenseitig beeinflussenden Variablen abhängen. Um zu einer möglichst guten Prognose für Frosthebungen infolge tief liegender Vereisungskörper zu kommen, wurde daher eine Vorgehensweise vorgeschlagen, in welcher sowohl Ergebnisse von Laborversuchen als auch rechnerische Modellvorstellungen verwendet werden. Um den Streuungen von Eingangsparametern für die Berechnung und von Versuchsergebnissen Rechnung zu tragen, wurden die Streubreiten der zu erwartenden Frosthebungen und damit die Zuverlässigkeit einer Hebungsprognose mit Hilfe einer Monte Carlo Simulation abgeschätzt.

Das entwickelte Modell wurde zur Prognose der Frosthebungen, welche bei der Erweiterung der U6 Marienplatz in München zu erwarten waren, eingesetzt. Es zeigte sich, dass die Größenordnung der prognostizierten Frosthebungen mit den gemessenen Frosthebungen übereinstimmte.

Neben den Berechnungen und Laborversuchen zur Prognose der Frosthebungen wurden auch laufend Rückkopplungen aus den während der Baumaßnahmen durchgeführten Messungen bzw. mit Erfahrungen aus bereits abgeschlossenen eigenen und in der Literatur beschriebenen Baumaßnahmen durchgeführt.

## 11.2 Ausblick

Ziel zukünftiger Forschungsarbeiten könnte die Entwicklung optimierter Steuerungsprozesse sein, bei denen mit möglichst geringem Energieaufwand der statisch notwendige Frostkörper aufrechterhalten werden kann und gleichzeitig die damit verbundenen Frosthebungen minimiert werden können.

Hierzu wären an den Stellen der Arbeit, an denen die im Text beschriebenen Annahmen getroffen werden mussten, vertiefte Untersuchungen notwendig.

Es wäre zunächst notwendig, mit weiteren Frosthebungsversuchen das Zu- und Abströmen des Porenwassers und hier insbesondere die thermischen Randbedingungen, die zum Zeitpunkt der Umkehr des Wassertransportes bei abklingender volumetrischer Hebung und einsetzender Eislinsenbildung herrschen, näher zu untersuchen und zu beschreiben. Dafür wäre die Weiterentwicklung der Frosthebungsversuche notwendig, so dass die Menge des zu- bzw. abströmenden Wassers und der zeitliche Verlauf direkt gemessen werden können.

Darauf aufbauend könnte ein Rechenmodell entwickelt werden, mit dem das Frosthebungsverhalten bei eindimensionaler Frosteindringung, aber gleichzeitig intermittierender Gefriertemperatur beschrieben werden kann. Hierzu wäre z.B. die Finite-Volumen-Methode geeignet.

Das in der vorliegenden Arbeit zur Beschreibung von Frosthebungen vorgeschlagene und in Abbildung 11-1 veranschaulichte Verfahren basiert auf der Formulierung der eindimensionalen Frosteindringung. Bei Baumaßnahmen mit tief liegenden Vereisungskörpern wird es in der Regel zu einem räumlichen Ab- bzw. Zuströmen des Porenwassers am Rand des Vereisungskörpers kommen. In einem abschließenden Schritt könnte daher die eindimensionale Modellierung auf dreidimensionale Geometrien und Strömungsvorgänge erweitert werden.

## 12 Quellenangaben

### 12.1 Literatur

- AERNI, K. (1979): Das Gefrierverfahren aus der Sicht des projektierenden Ingenieurs, SIA Dokumentation Nr. 32, Gefrierverfahren im Bauwesen, Studententagung Zürich, S. 81-93.
- AIGNER, E. (2005): Artificial ground freezing in cohesive soils at the underground station "Schottenring" – experimental study on ice-lens formation, Master's Thesis, Institut der Mechanik für Werkstoffe und Strukturen, Technische Universität Wien.
- ANDERSON, D. M. & TICE, A. R. (1972): Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements. Highway Research Record, No. 373 pp. 12-18.
- ANG, A.H.-S. & TANG, W.H. (1975): Probability Concepts in Engineering in Planning and Design, Vol. I Basic Principles, New York, John Wiley.
- BAUMGARTNER, A. & LIEBSCHER, H.-J. (Hrsg.) (1996): Allgemeine Hydrologie - Quantitative Hydrologie. - In: Lehrbuch der Hydrologie Bd. 1, 2. Auflage, Gebr. Borntraeger, Berlin-Stuttgart.
- BJERRUM, L. (1973): Allowable settlements of structures. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo 98.
- BOSCH, B. (2005): Abgesicherte Beurteilung von Frosthebungen bei geringen Auflasten, Diplomarbeit Nr. 631, Zentrum Geotechnik, München (unveröffentlicht).
- BRECKNER, F. (Red.) (1987): Bodenvereisung im Tunnelbau, Informationszentrum Raum u. Bau d. Fraunhofer-Ges. (IRB), Nr. 1760, 1. Aufl., IRB-Verl. Stuttgart.
- BRECKNER, F. (Red.) (1987): Bodenvereisung im Grundbau, Informationszentrum Raum u. Bau d. Fraunhofer-Ges. (IRB), Nr. 1761, 1. Aufl., IRB-Verl. Stuttgart.
- CÔTE, J. & KONRAD, J. M. (2005): Thermal conductivity of base-course materials. Canadian Geotechnical Journal, vol.42, pp. 61-78.
- CUDMANI, R. (2006): An elastic-viscoplastic model for frozen soils, Numerical Simulation of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment, Ruhr University Bochum, Germany 23-24 March 2006, Balkema, pp. 177-184.
- DEHIO, G. (1996): Handbuch der deutschen Kunstdenkmäler, Bayern IV München und Oberbayern, Deutscher Kunstverlag, S. 149-150.
- EICHER, L. (2004): Bahnsteigerweiterung am U-Bahnhof Marienplatz in München, Tiefbau 12/2004, Amtliches Mitteilungsblatt der Tiefbau-Berufsgenossenschaft, S.784-789.
- EICHER, L. & BAYER, F. & VOGT, N. (2005): Baugrundvereisung zur Verfestigung und Firstsicherung beim Bahnsteig-Erweiterungstunnel U3/U6 in München, 4. Geotechnik-Tag am 18.02.2005, Schriftenreihe des Zentrum Geotechnik, Heft 37, S. 163-172.
- EICHER, L. & BAYER, F. & VOGT, N. & KELLNER, C. (2006): Erweiterung der U6 im Zentrum Münchens: Verformungsarmer Tunnelvortrieb durch Baugrundvereisung, VDI - Jahrbuch 2006/2007, S. 135-150.

- FILLIBECK, J. & KELLNER, C. & RIEKEN, W. & SCHARRER, S. (2005): Bahnsteigerweiterung der U6 unter dem neuen Rathaus in München - Spritzbetonvortrieb mit Vereisung, Bautechnik 82 (2005), Heft 7, S. 416-425.
- FRIVIK, P. E. (1980): State of the art report. Ground freezing: Thermal properties, modelling of processes in thermal design, Ground freezing 1980, Elsevier, vol. 28, pp. 111-115.
- GRÖBER & ERK & GRIGULL (1955): Die Grundgesetze der Wärmeübertragung, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg.
- GRÜBL, P. (1981): Über die Rolle des Eises im Gefüge zementgebundener Baustoffe, Beton, Jg. 31, Nr.2, S. 54-58.
- HEITZER, K. (1981): Ein neues Verfahren zur Bestimmung der Frostempfindlichkeit von Böden und Boden-Chemikal-Gemischen und deren Tragfähigkeit nach dem Auftauen, Dissertation, Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TU München.
- HILL, D. & MORGENSTERN, N. R. (1977): Influence of load and heat extraction on moisture transfer in freezing soils, Proc. Int. Symp. Frost Action in Soils, Univ. of Luleå, 1: pp. 76-91.
- HERING, E. & MARTIN, R. & STOHRER, M. (2002): Physik für Ingenieure, 8. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- HUDER, J. (1979): Geotechnische Untersuchungen, SIA Dokumentation Nr. 32, Gefrierverfahren im Bauwesen, Studentagung Zürich, S. 31-42.
- HOFFMANN, K. (1987): Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.
- JELINEK, R. & JESSBERGER, H. L., & LACKINGER, F. (1968): Frostwirkungen im Straßenbau, Donau-Europäische Konferenz Wien, S. 106-138.
- JESSBERGER, H. L. & JAGOW-KLAFF, R. (1996): Frost im Baugrund. Grundbau Taschenbuch, 5. Auflage, Teil 1, S. 497-534.
- JOAS, H. (1971): Berliner Verbau und stählerner Maulwurf, U-Bahn Bau für München, Süddeutscher Verlag München, S. 69-101.
- KELLNER, C. & FILLIBECK, J. & VOGT, N. (2006): Schlauchwaagenmessungen und DMS-Messungen bei der Erweiterung der U6-Marienplatz in München, Messen in der Geotechnik, Technische Universität Braunschweig, 23 - 24 Februar 2006.
- KELLNER, C. & VOGT, N. & ORTH, W. & KONRAD, J.M. (2006): Ground freezing: an efficient method to control the settlements of buildings, Numerical Simulation of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment, Ruhr University Bochum, Germany 23-24 March 2006, Balkema.
- KONRAD, J. M. & MORGENSTERN, N. R. (1980): A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils, Canadian Geotechnical Journal, vol.17, no.4, pp. 473-486.
- KONRAD, J. M. & MORGENSTERN, N. R. (1981): The segregation potential of a freezing soil, Canadian Geotechnical Journal, vol.18, no.4, pp. 482-491.

- KONRAD, J. M. & MORGENSTERN, N. R. (1982): Prediction of frost heave in the laboratory during transient freezing, Canadian Geotechnical Journal, vol.19, no.3, pp. 250-259.
- KONRAD, J. M. & MORGENSTERN, N. R. (1982): Effects of applied pressure on freezing soils, Canadian Geotechnical Journal, vol.19, no.4, pp. 494-505.
- KONRAD, J. M. (1993): Sixteenth Canadian Geotechnical Colloquium: Frost heave in soils: concepts and engineering, vol.31, pp. 223-245.
- KONRAD, J. M. (2005): Estimation of the segregation potential of fine-grained soils using the frost heave response of two reference soils, Canadian Geotechnical Journal, vol.42, pp. 38-50.
- KRISCHKE, A. & WEBER, J. (1978): Planung, Ausschreibung, Bewertungskriterien für die Vergabe, Steuerung der Ausführungsplanung und des Bauablaufs von U-Bahn-Baumaßnahmen, Moderner Tunnelbau bei der Münchner U-Bahn, Springer-Verlag Wien New York, S. 13-28.
- LANDOLT-BÖRNSTEIN (1972): Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York Tokio, 6. Auflage.
- LIDE, D. R. (Edt.) (1999): Handbook of Chemistry and Physics, 79th Edition 1998-1999.
- MAKOWSKI, E. (1986): Modellierung der künstlichen Bodenvereisung im grundwasserdurchströmten Untergrund mit der Methode der finiten Elemente, Schriftenreihe des Instituts für Grundbau Wasserwesen und Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 10.
- MARTAK, L. & LACKNER, R & KLOIBER, A. (2004): Gefrierversuche und Vereisungskonzeption für die Unterquerung des Donaukanals in Wien mit der Station Schottenring der U-Bahn Linie U2, Tagungsbeitrag zur Baugrundtagung in Leipzig, Herausgeber: DGGT, S. 285-293.
- MARTAK, L. & HERZFELD, TH. (2005): Kombinierte Gefrierverfahren für die Stationstunnel der U-Bahn-Linie U2 unter dem Donaukanal in Wien, Tagungsbeiträge zur 5. Österreichische Geotechniktagung, Herausgeber: ÖIAV, S. 497-516.
- MARTAK, L. & HERZFELD, TH. (2005): Vereisungsverfahren bei der Unterquerung des Donaukanals für die U-Bahn-Linie U2 in Wien, Tagungsbeitrag zum 3. Tiroler Geotechnik- und Tunneltag, Herausgeber: Institut für Geotechnik und Tunnelbau, Universität Innsbruck, S. 89-98.
- METTIER, K. (1979): Messungen und Ergebnisse bei der Anwendung des Gefrierverfahrens im Tunnelbau, Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, Heft 100, Frühjahrstagung, 1979, 15.-16. Juni, Zürich, S. 53-58.
- METTIER, K. (1983): Measurements and results of applying the ground freezing method in tunnelling, Field Measurements in Geomechanics, International Symposium in Field Measurements in Geomechanics Vol. 2, Zürich, 5.-8. September 1983, Editor: K. Kovari, S. 1103-1115.
- MIKKOLA, M. & HARTIKAINEN, J. (2001): Mathematical model of soil freezing and its numerical implementation, International Journal for numerical methods in engineering 2001, Nr. 52, S. 543-557.
- NEISS, J. (1982): Numerische Simulation des Wärme- und Feuchtetransports und der Eisbildung in Böden, Fortschrittsberichte der VDI Zeitschriften, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, Reihe 3, Nr. 73.
- NERSESOVA, Z. A. & TSYTOVICH, V. A. (1963): Unfrozen water in frozen soils, Proc. 1st Int. Conf. on Permafrost, Lafayette, pp. 230-234.

- ORTH, W. (1986): Gefrorener Sand als Werkstoff, Elementversuche und Materialmodell, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Hochschule Fridericiana in Karlsruhe, Heft 28.
- OSTERMEIER, B. (1991): Ein Beitrag zur Erfassung des Vortriebsgeschehens beim Bau von Tunneln im Lockergestein mit Spritzbetonsicherung –Ebene und räumliche Berechnungen–. Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau, Technische Universität München, Band 1/91.
- PENNER, E. & Ueda, T. (1977): The dependence of frost heaving on load application - preliminary results, Proc. Int. Symp. Frost Action in Soils, Univ. of Luleå, 1: pp. 92-101.
- PENNER, E. & Ueda, T. (1978): A soil frost-susceptibility test and a basis for interpreting heaving rates, Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Permafrost, Edmonton, Alta., pp. 721-727.
- PENNER, E. & WALTON, T. (1979): Effects of temperature and pressure on frost heaving. Engineering Geology, 13, pp. 29-39.
- SCHUËLLER, G.I. (1981): Einführung in die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken, Wilhelm Ernst & Sohn Verlag Berlin München.
- SETZER, M.J. (2001): Mechanical Stability Criterion, Triple-Phase Condition, and Pressure Differences of Matter Condensed in a Porous Matrix, Journal of Colloid and Interface Science 235, pp. 170-182.
- SETZER, M.J. (2001): Micro-Ice-Lens Formation in Porous Solid, Journal of Colloid and Interface Science 243, pp. 193-201.
- SMITH & PATTERSON (1989): Detailed observations on the nature of frost heaving at a field scale. Canadian Geotechnical Journal, vol.26, pp. 306-312.
- SRES, A. & PIMENTEL, E. & ANAGNOSTOU, G. (2006): Numerical and physical modelling of artificial ground freezing, Numerical Simulation of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment, Ruhr University Bochum, Germany 23-24 March 2006, Balkema.
- STÄNDER, W. (1967): Mathematische Ansätze zur Berechnung der Frostausbreitung in ruhendem Grundwasser im Vergleich zu Modelluntersuchungen für verschiedene Gefrierrohanordnungen im Schacht- und Grundbau, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Hochschule Fridericiana in Karlsruhe, Heft 28.
- STEGMÜLLER, A. (1984): Chemisches Rechnen, Verlag Moritz Diesterweg, Otto Salle Verlag, Verlag Sauerländer.
- SYDNEY, P. & CLARK, JR. (Edt.) (1966): Handbook of physical constants. The geological society of Amerika, inc., Yale University, New Haven, Connecticut.
- VDI-Wärmeatlas (1974): VDI-Verlag.
- WILLIAMS, P. J. (1967): Properties and Behaviour of Freezing Soils, Norwegian Geotechnical Institute, Publication Nr. 72.
- VOGT, S. (2004): Modelltechnische Untersuchung des Knickverhaltens von Kleinbohrpfählen in flüssigen/breiigen Böden, Diplomarbeit Nr. 631, Zentrum Geotechnik (unveröffentlicht).



**12.2 Internet**

[W1] <http://www.wissenschaft-online.de>

[W2] <http://www.maplesoft.com>

**12.3 Projektspezifische Unterlagen "U6 Marienplatz", unveröffentlicht**

[U1] Zentrum Geotechnik, Laboruntersuchungen Bohrungen NS 103-106, NS 111-113 und NS 120, Prüfbericht 03819-U6Rat/026 vom 02.09.2002.

[U2] Zentrum Geotechnik, Pumpversuch im Tertiär, Gutachten 03819-U6Rat/067 vom 11.09.2003.

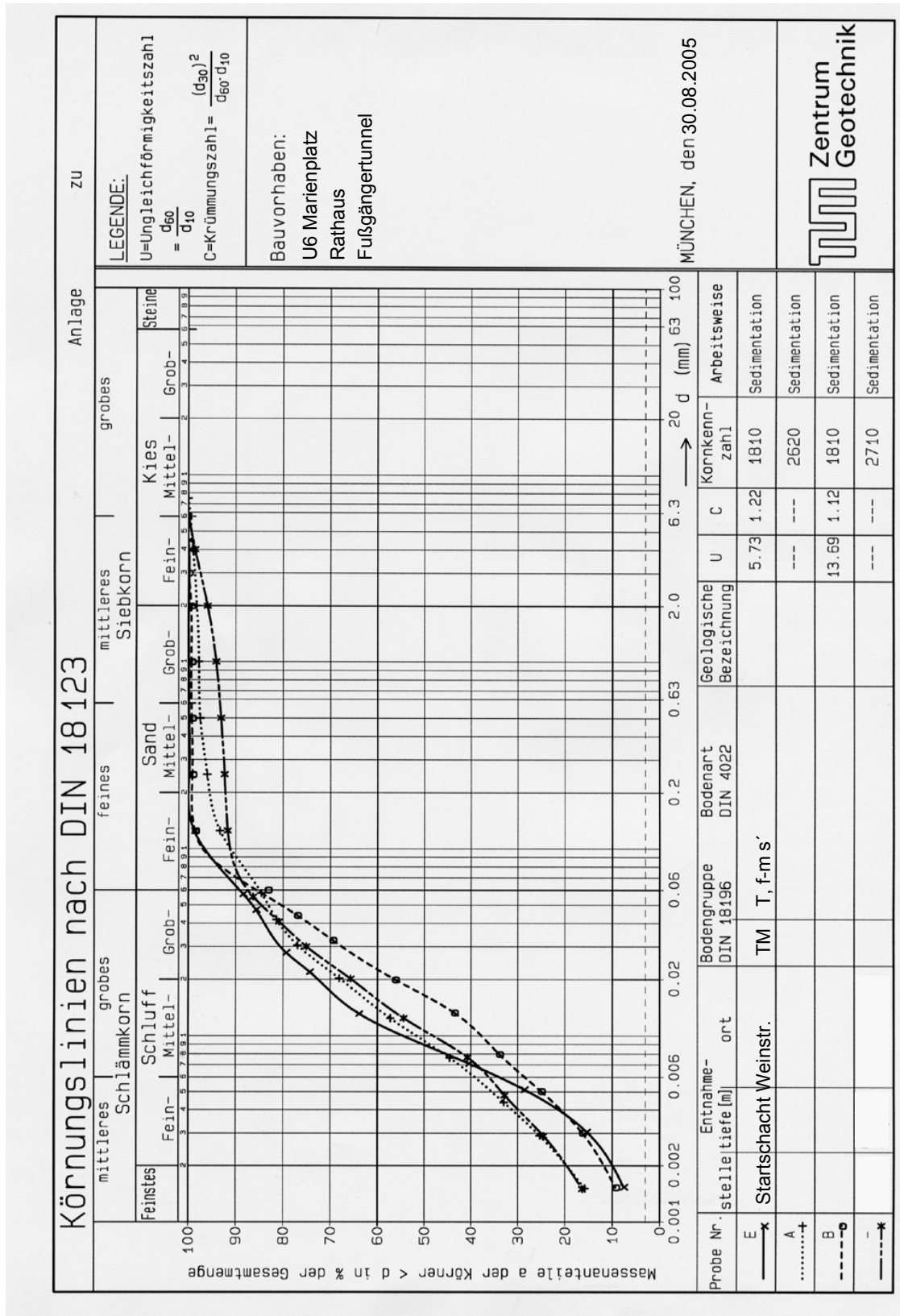
[U3] Zentrum Geotechnik, Schlussbericht zum wissenschaftlichen Begleitprogramm der Erweiterung U6 Marienplatz 03819-U6Rat/162 vom 16.01.2006.

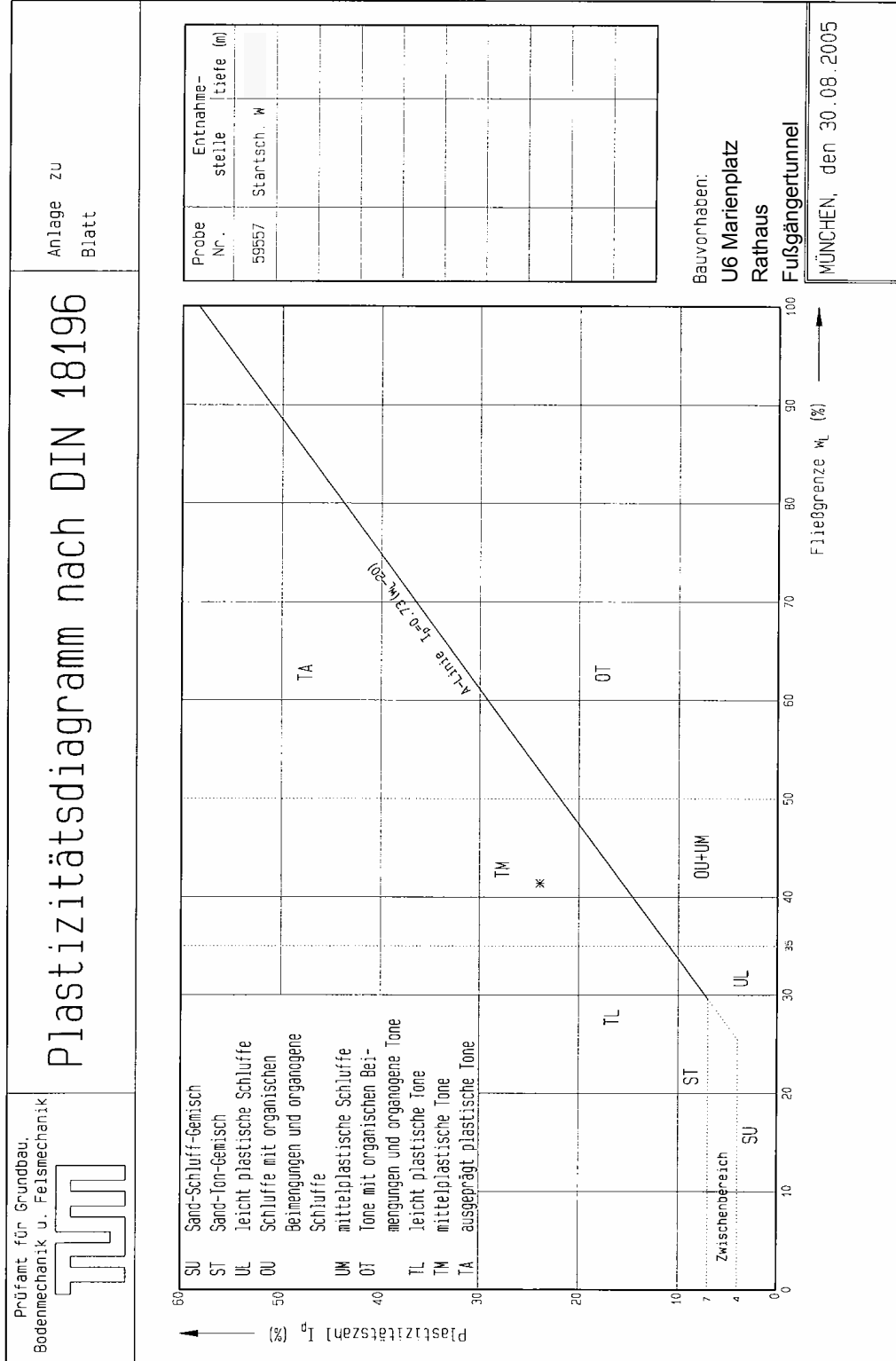
[U4] Landeshauptstadt München, Leistungsverzeichnis des Amtsvorschlages.

[U5] Schmitt Stumpf Frühauf GmbH, München, Plan Nr. 6/3-158-1/ SP 145, Stand 23.07.2003.

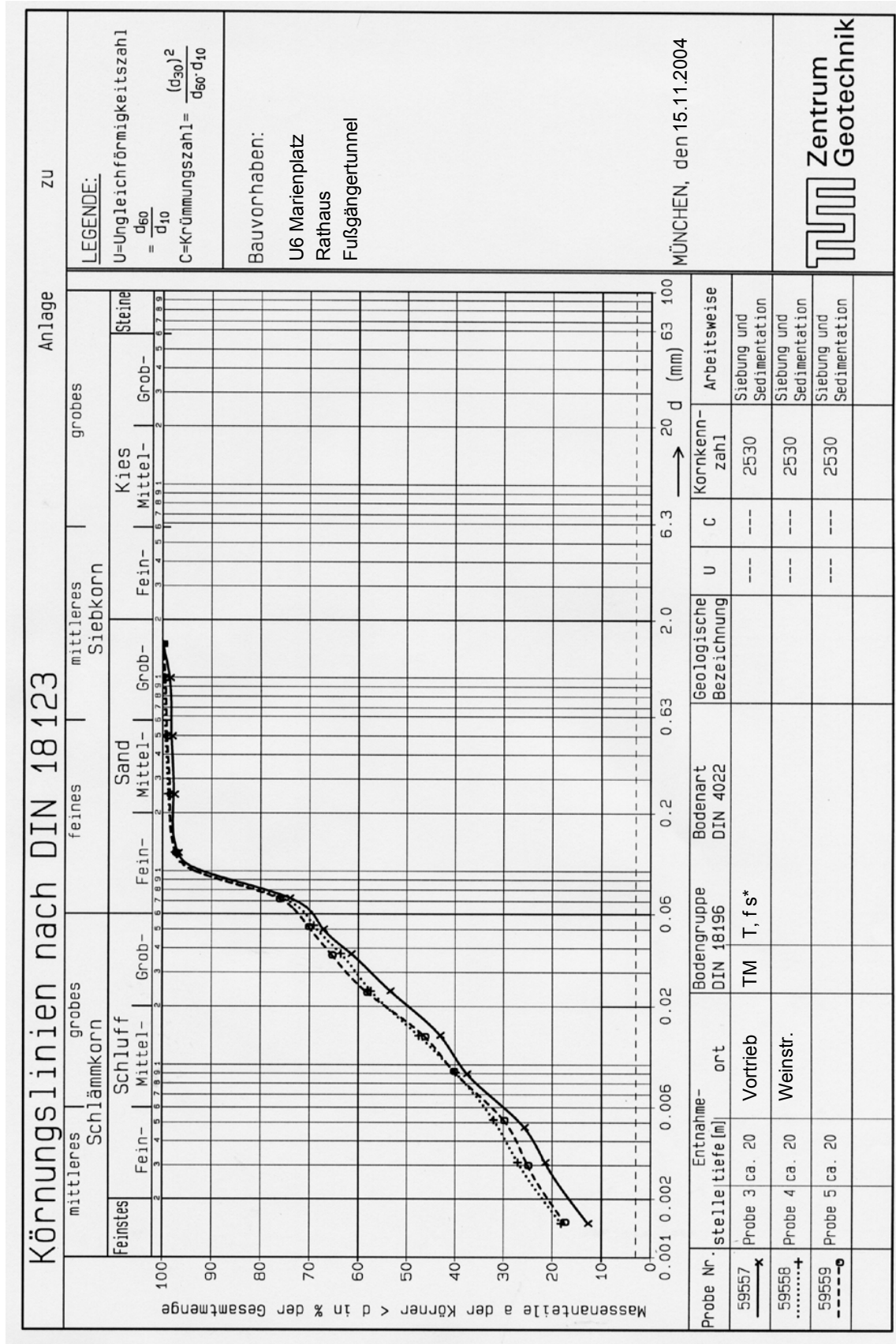
[U6] Dr.-Ing. W. Orth, Karlsruhe, Gutachten zur Bodenvereisung vom 20.11.2003.

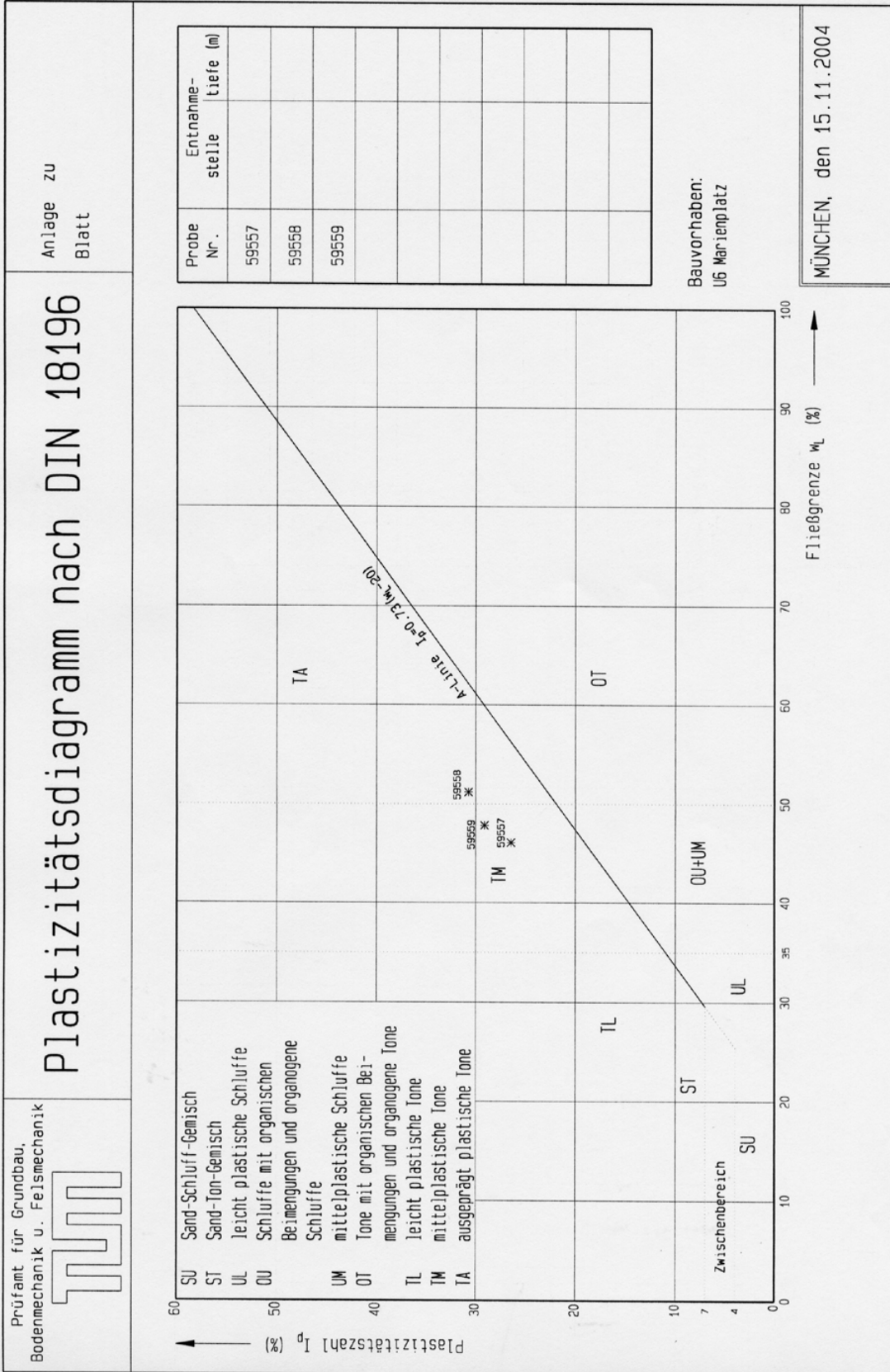
1 Tertiärer Ton T1



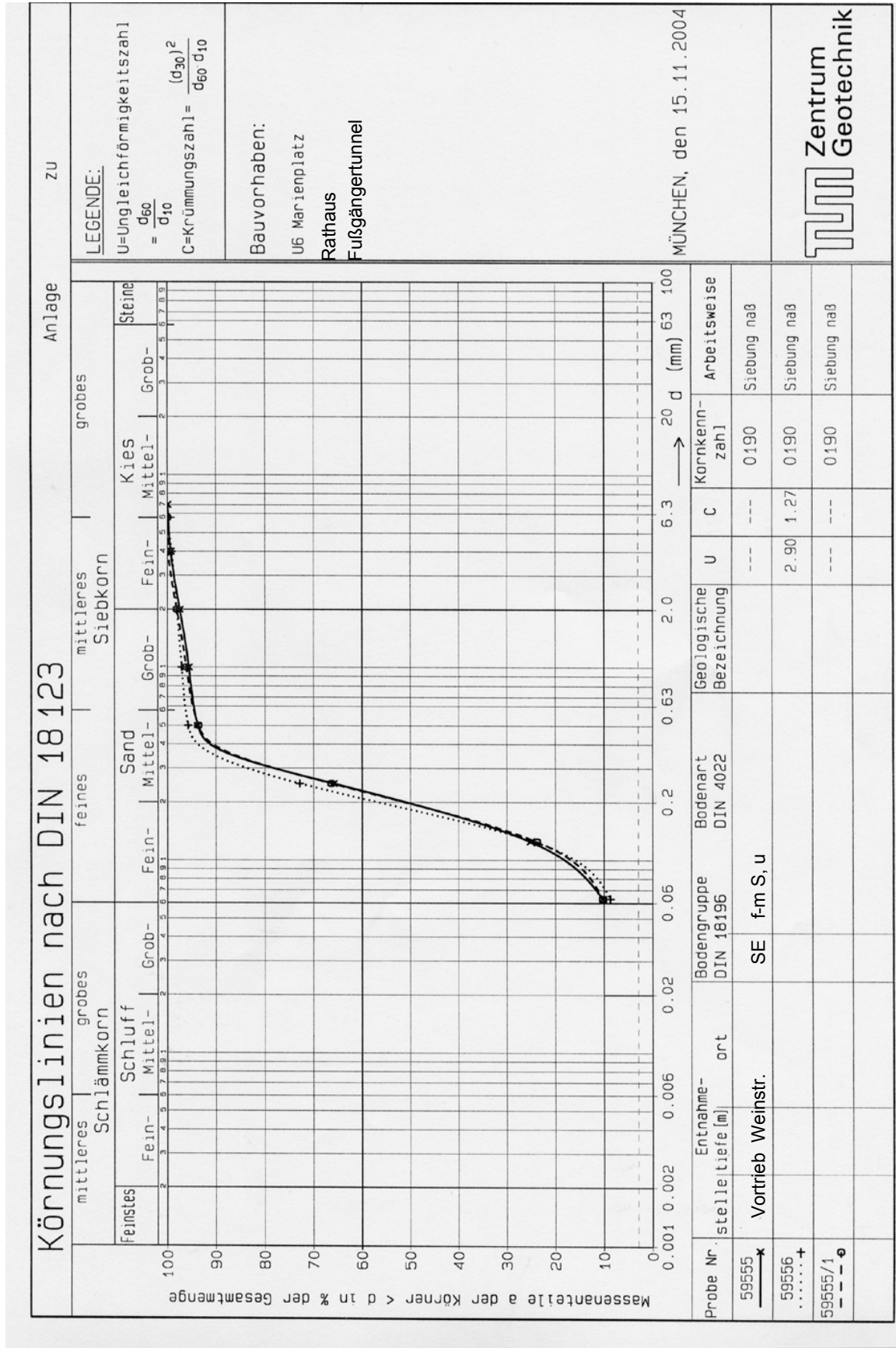


2 Tertiärer Ton T2

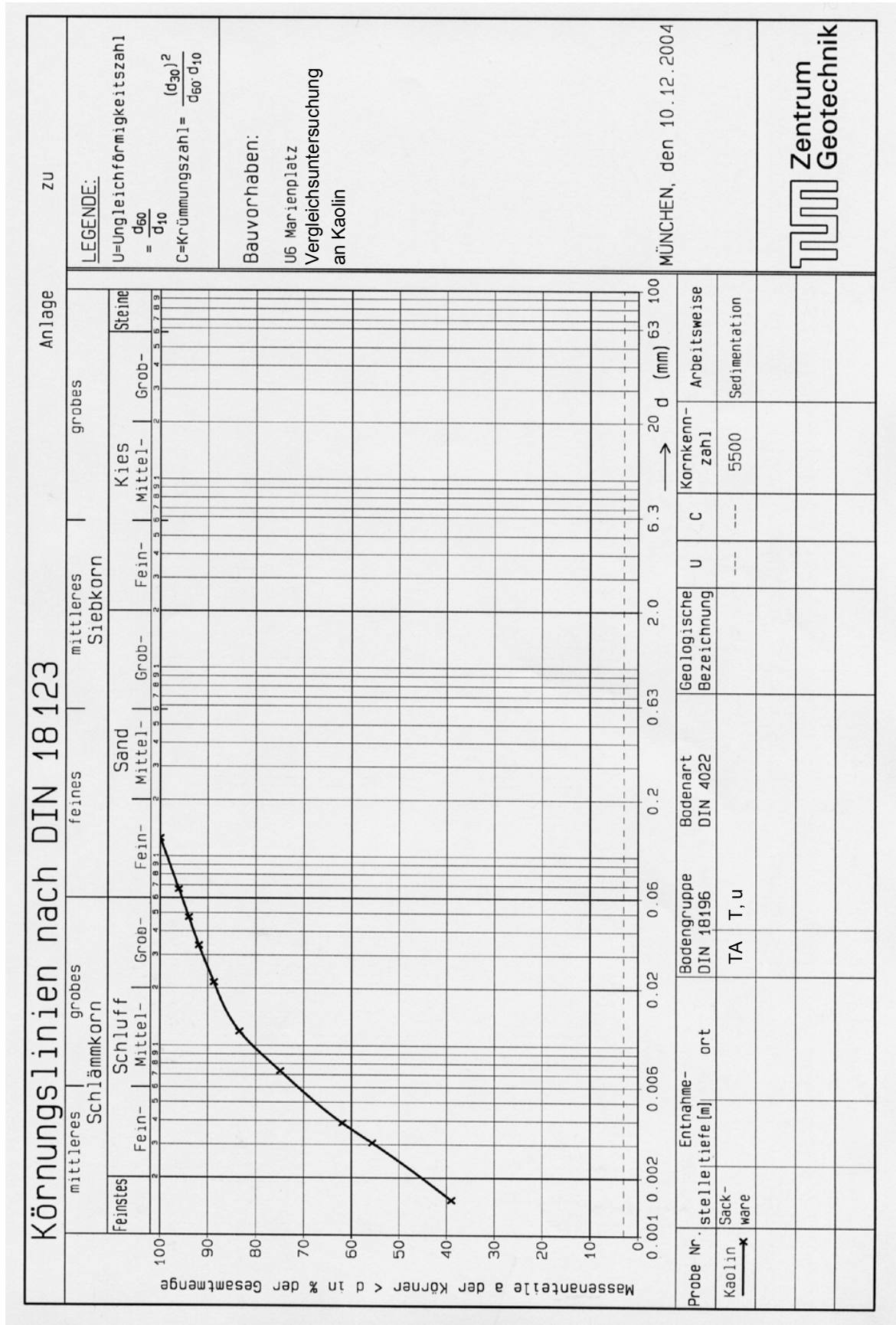




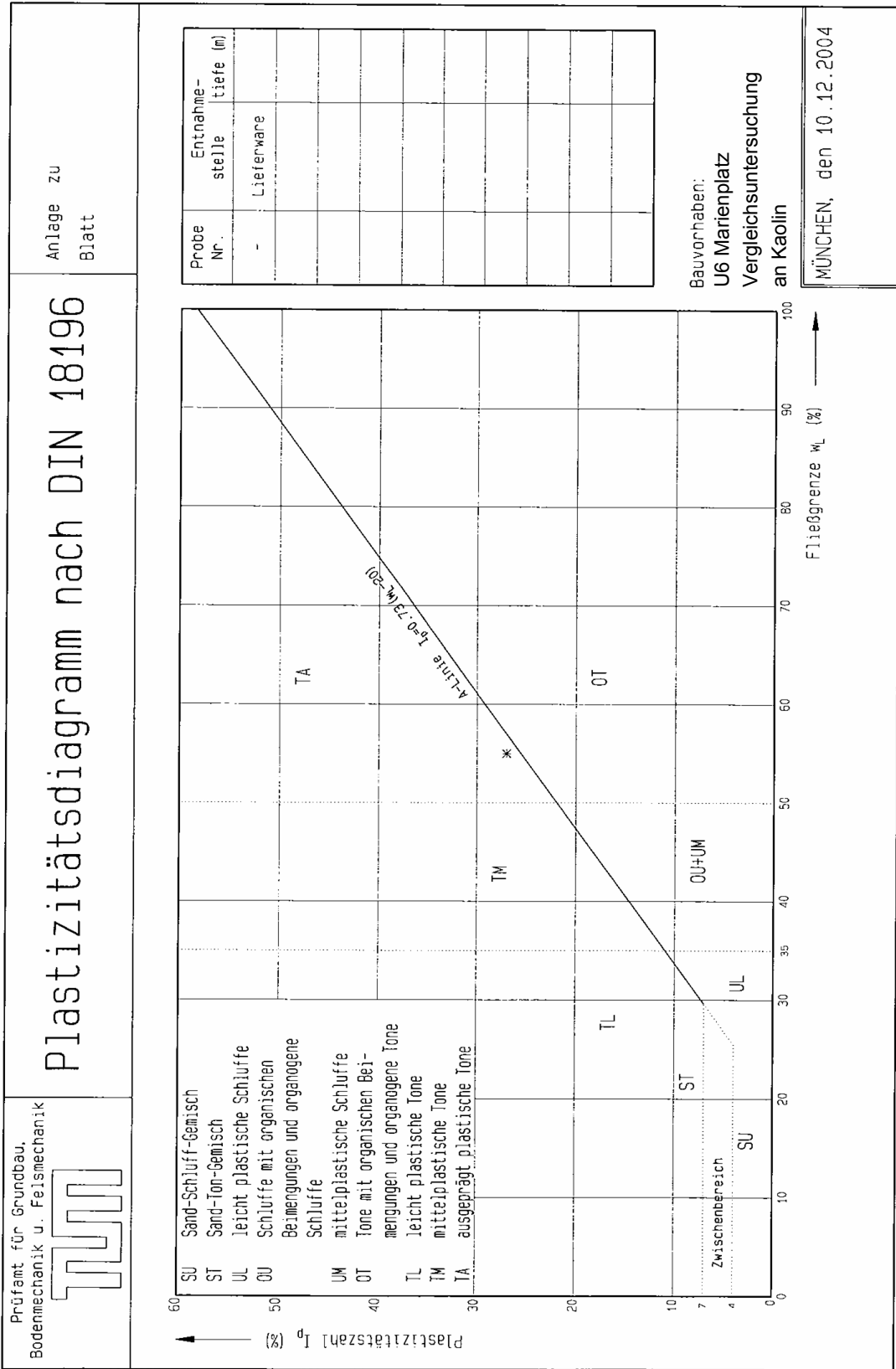
3 Tertiärer Sand S



4 Kaolin K











### Versuchsbezeichnung

Die im Folgenden dokumentierten Einzelversuche werden nach folgender Konvention bezeichnet:

- Untersucher Boden: tertiärer Ton **T1**, tertiärer Ton **T2**, tertiärer Sand **S**, Kaolin **K**, Kies **G**
- Belastung: Auflast in [kN/m<sup>2</sup>]
- Versuchsart: **EL** Eislinsenbildung, **VO** Volumetrische Hebung
- Frosttemperatur obere Kammer: Temperatur in [°C]
- Temperatur Wasserbad: Temperatur in [°C] bei EL, entfällt bei VO
- Laufende Nummer: laufende Nummer, wenn mehrere Versuche mit denselben Parametern durchgeführt wurden.

Die Bezeichnung **K - 250 - EL (-10 / +10) - 2** steht beispielsweise für die Untersuchung einer Kaolinprobe bei einer Auflast von 250 kN/m<sup>2</sup> auf Eislinsenbildung bei einer Frosttemperatur von -10 °C und einer Wasserbadtemperatur von +10 °C. Es handelt sich um die zweite Probe einer Versuchsserie.

### Gliederung der Anlage:

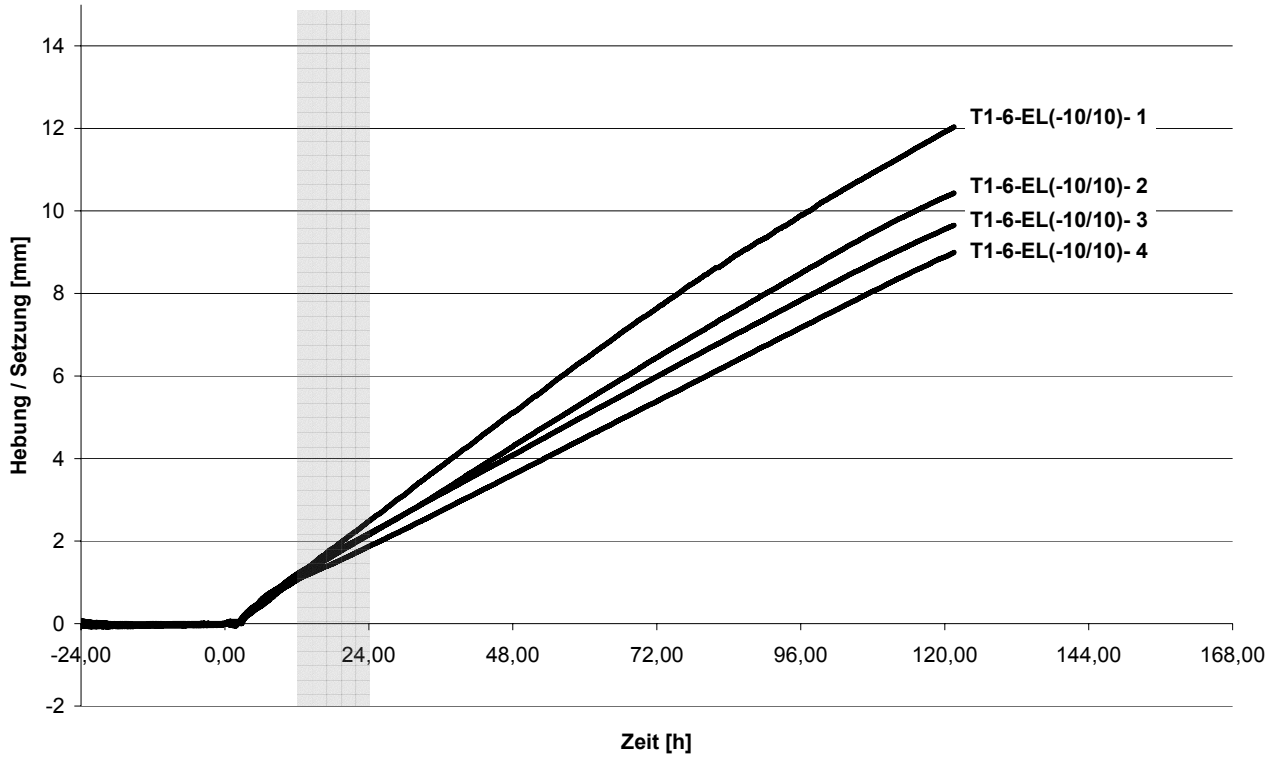
Eislinsenbildung EL (-10 / +10)	Blatt 2 bis 15
Eislinsenbildung EL (-20 / +10)	Blatt 16 bis 20
Eislinsenbildung EL (-15 / +15) und EL (-5 / +5)	Blatt 21 bis 22
Volumetrische Hebung VO (-20)	Blatt 23 bis 31
Volumetrische Hebung VO (-10)	Blatt 32 bis 33
Volumetrische Hebung VO (-5)	Blatt 34

**Eislinsenbildung (-10 / +10)**

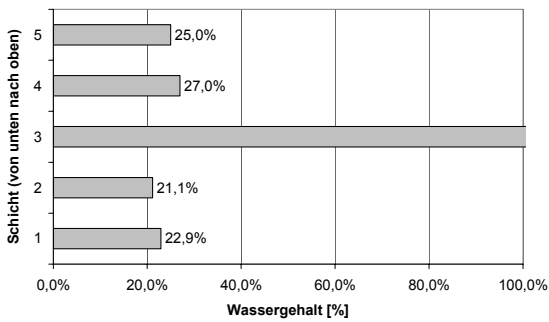
Einbaudichte: 2,08 bis 2,10 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %

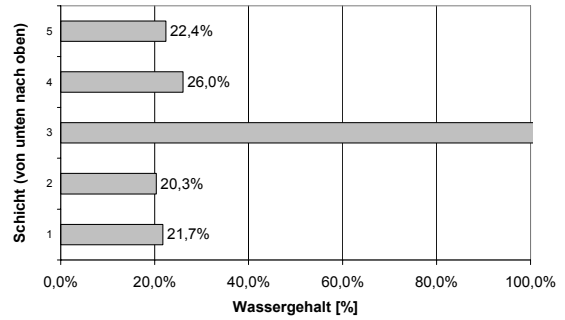
Wassergehalt bei Frostbeginn: 24,0 bis 19,6 %



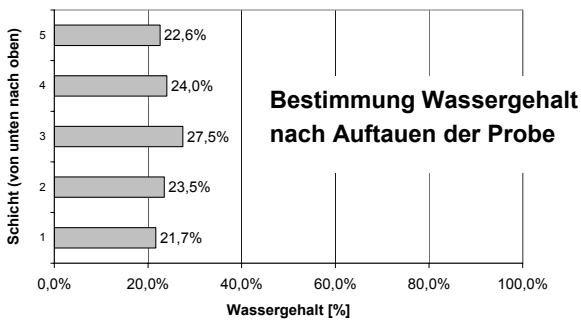
T1-6-EL(-10/10)-1 [2,65 mm/d]



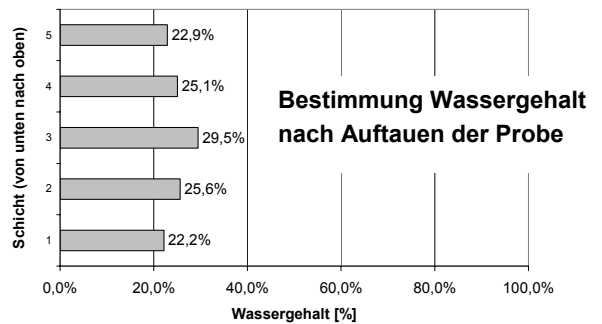
T1-6-EL(-10/10)-2 [2,09 mm/d]



T1-6-EL(-10/10)-3 [1,94 mm/d]

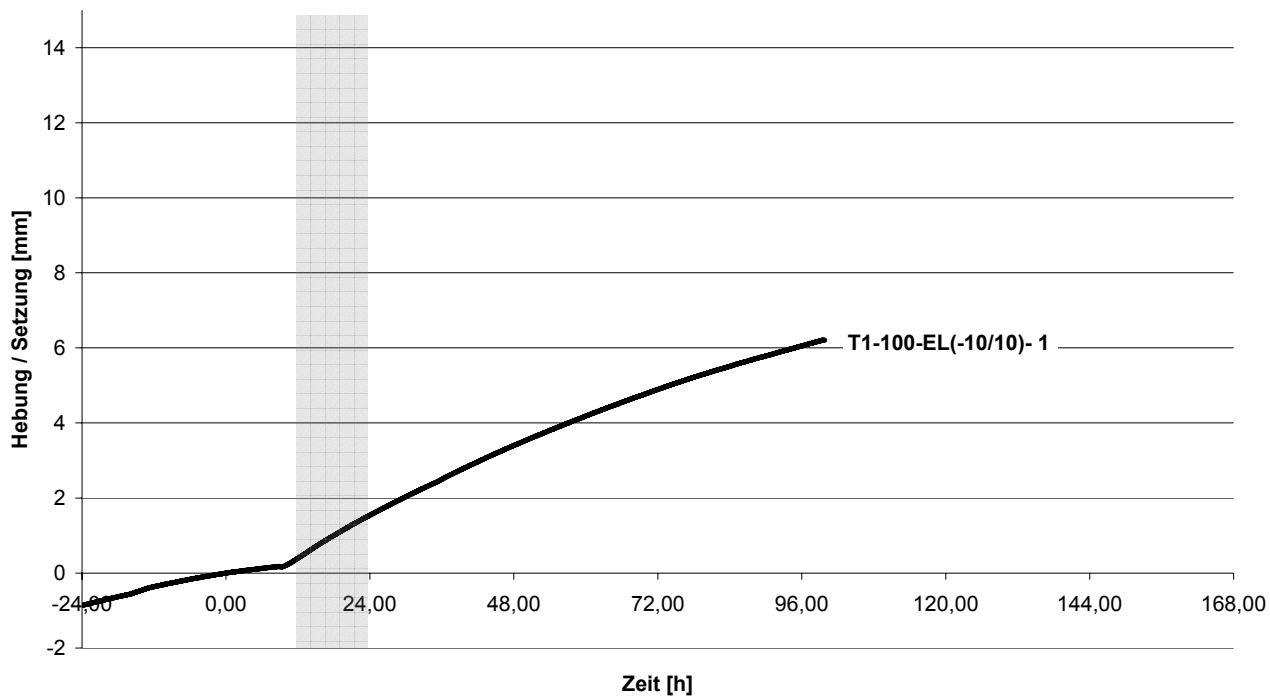


T1-6-EL(-10/10)-4 [1,62 mm/d]



**Eislinsenbildung (-10 / +10)**

Einbaudichte: 2,08 g/cm<sup>3</sup>  
Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %  
Wassergehalt bei Frostbeginn: -



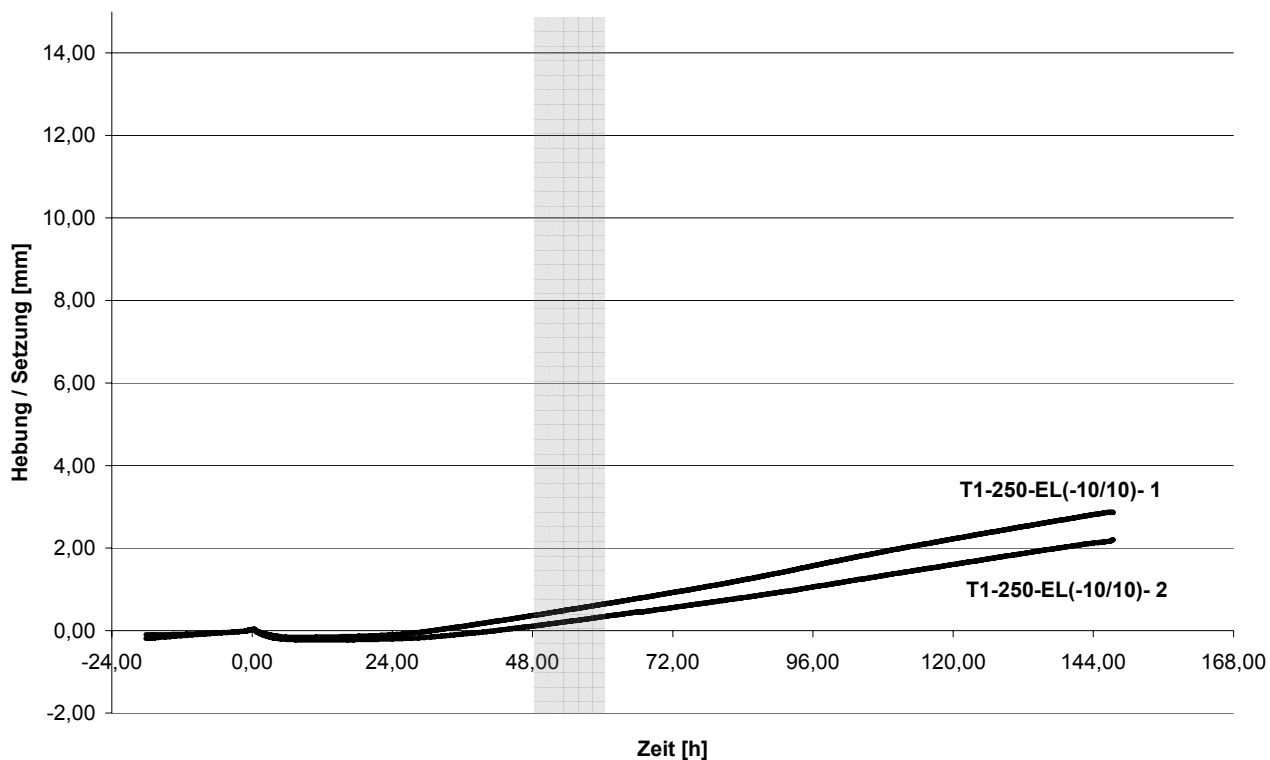
T1-100-EL(-10/10)- 1 [1,93 mm/d]

**Eislinsenbildung (-10 / +10)**

Einbaudichte: 2,07 bis 2,10 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %

Wassergehalt bei Frostbeginn: -



T1-250-EL(-10/10)- 1 [0,52 mm/d]

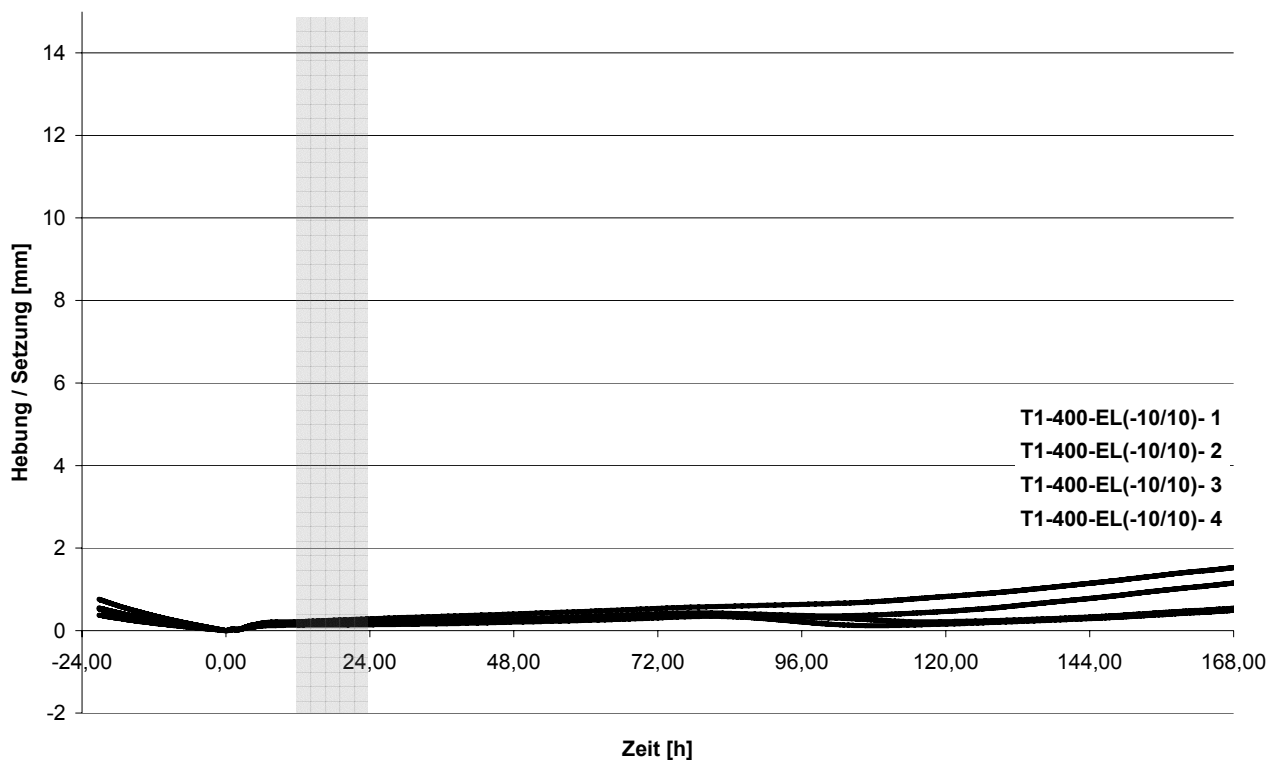
T1-250-EL(-10/10)- 2 [0,38 mm/d]

**Eislinsenbildung (-10 / +10)**

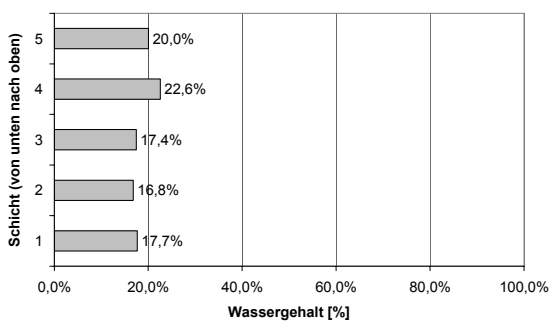
Einbaudichte: 2,04 bis 2,10 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %

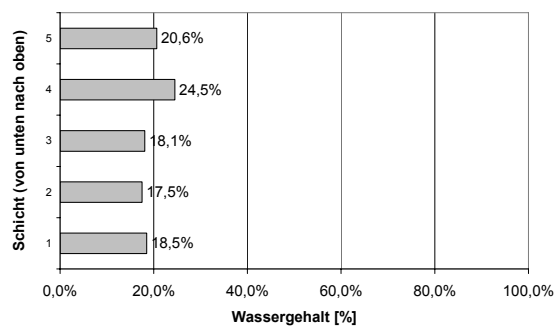
Wassergehalt bei Frostbeginn: - %



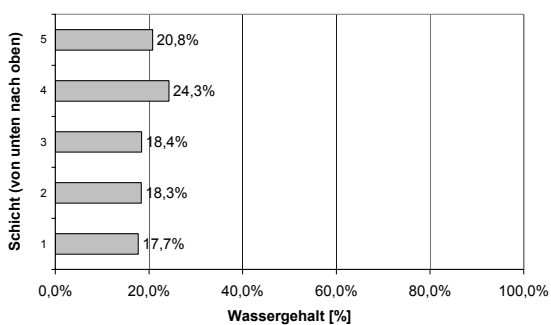
T1-400-EL(-10/10)- 1 [0,05 mm/d]



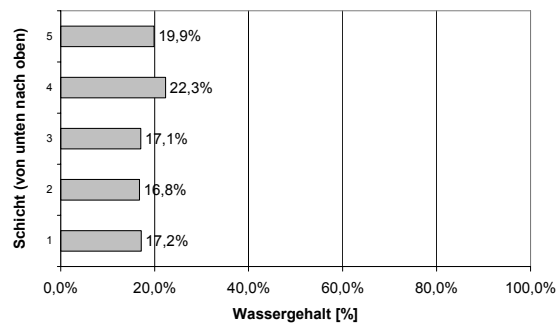
T1-400-EL(-10/10)- 2 [0,13 mm/d]



T1-400-EL(-10/10)- 3 [0,05 mm/d]



T1-400-EL(-10/10)- 4 [0,03 mm/d]

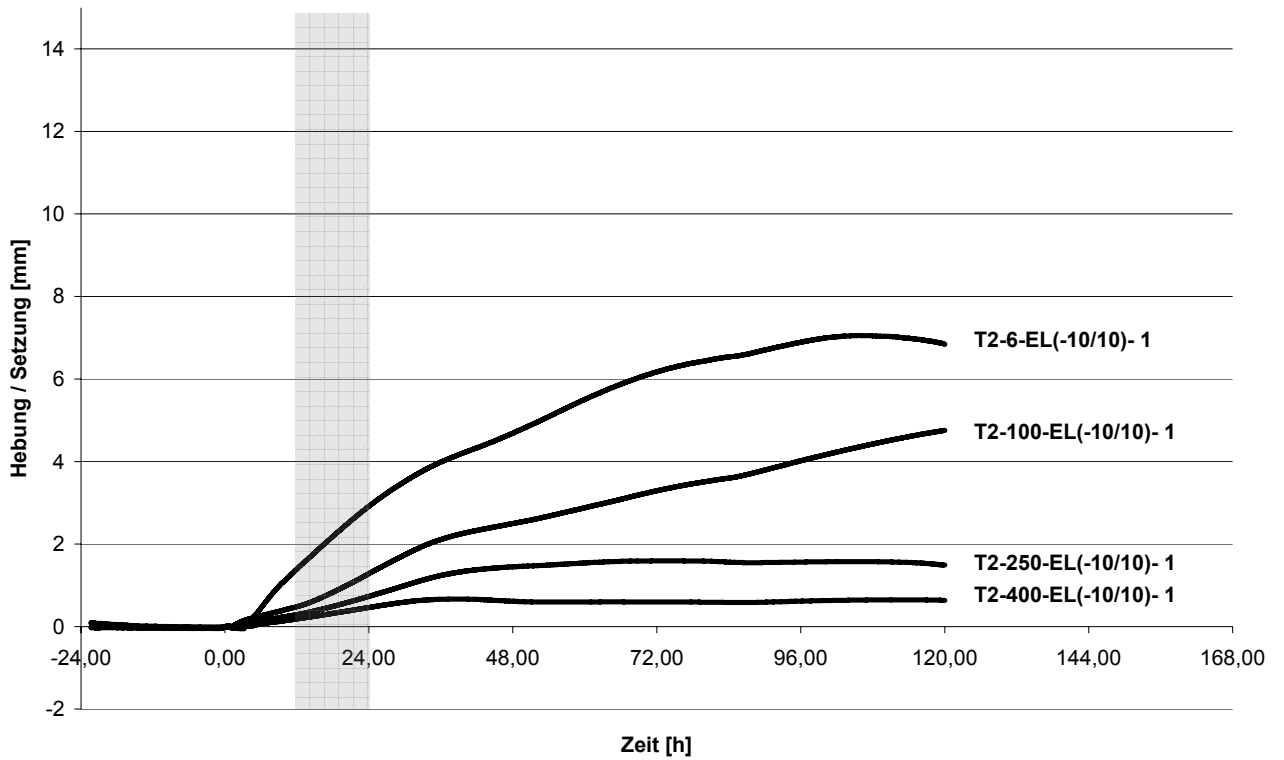


**Eislinsenbildung (-10 / +10)**

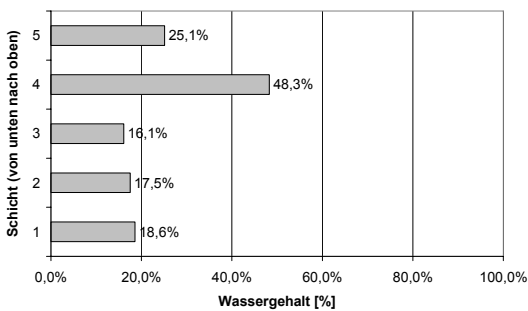
Einbaudichte: 1,98 bis 2,04 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %

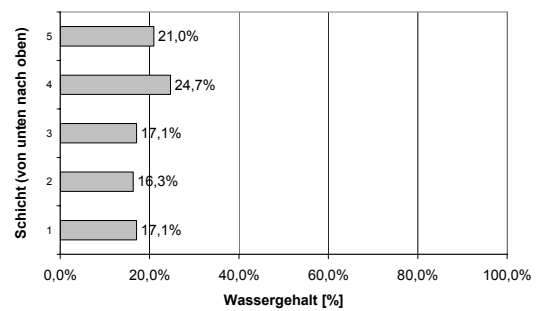
Wassergehalt bei Frostbeginn: 20,1 bis 19,2 %



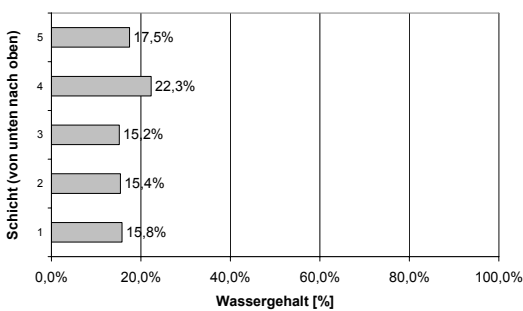
T2-6-EL(-10/10)- 1 [3,06 mm/d]



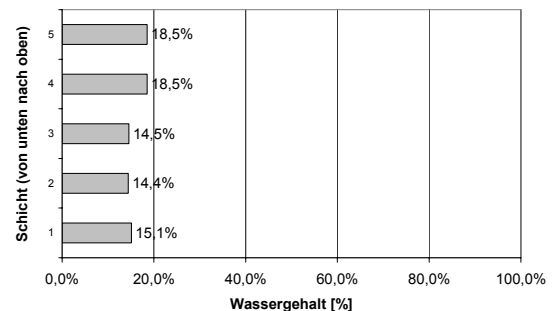
T2-100-EL(-10/10)- 1 [1,56 mm/d]



T2-250-EL(-10/10)- 1 [0,87 mm/d]



T2-400-EL(-10/10)- 1 [0,55 mm/d]

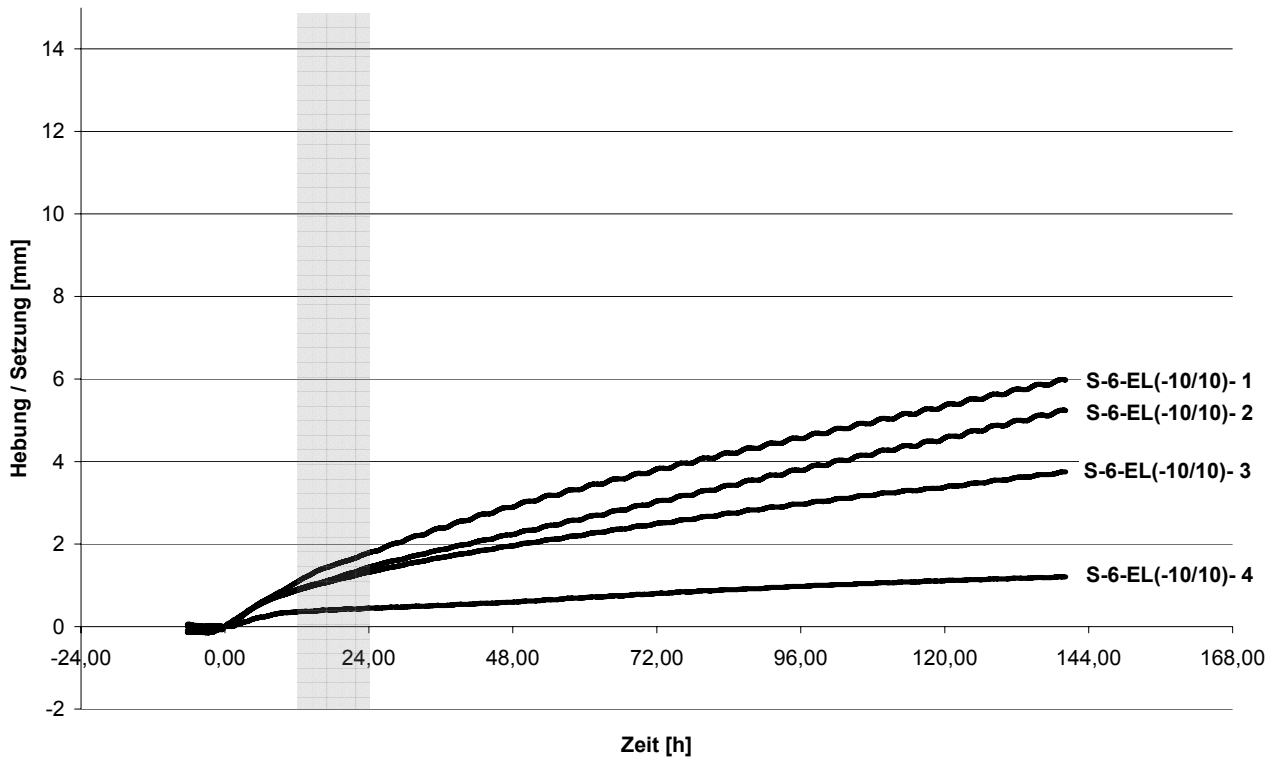


**Eislinsenbildung (-10 / +10)**

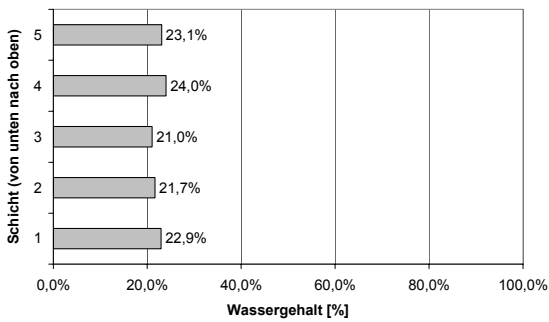
Einbaudichte: 1,67 bis 1,73 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %

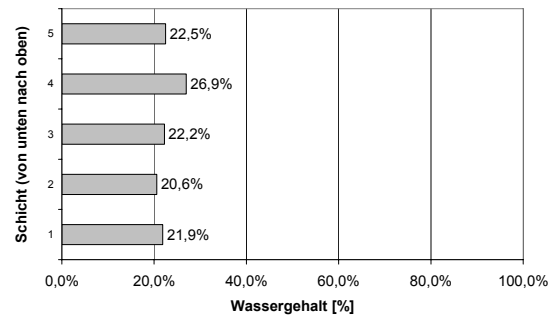
Wassergehalt bei Frostbeginn: 21,5 bis 19,8 %



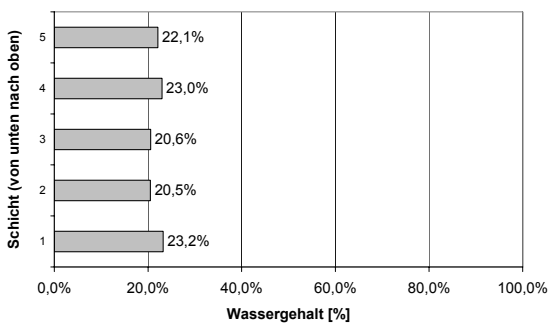
S-6-EL(-10/10)- 1 [1,47 mm/d]



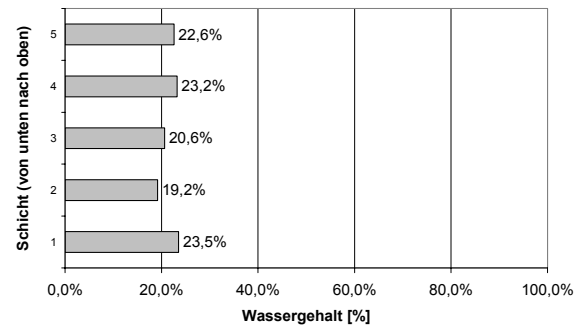
S-6-EL(-10/10)- 2 [1,09 mm/d]



S-6-EL(-10/10)- 3 [0,91 mm/d]



S-6-EL(-10/10)- 4 [0,18 mm/d]



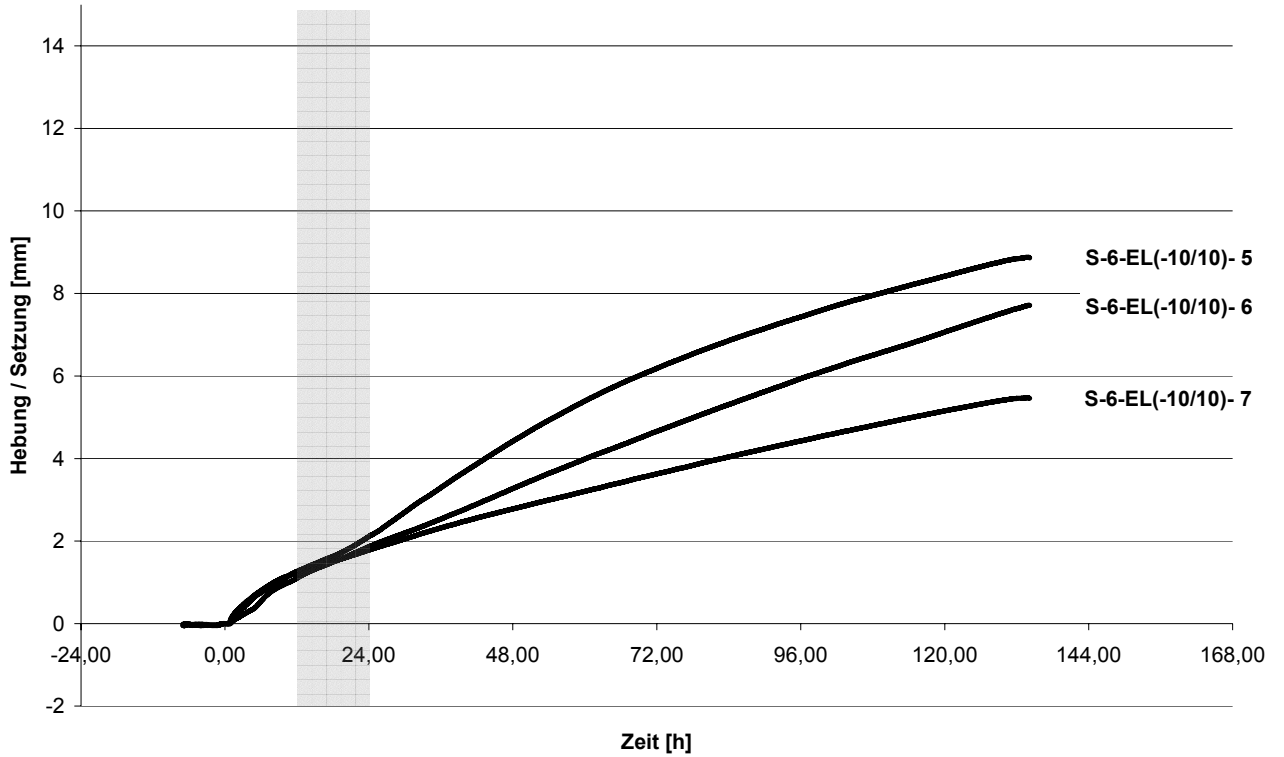


**Eislinsenbildung (-10 / +10)**

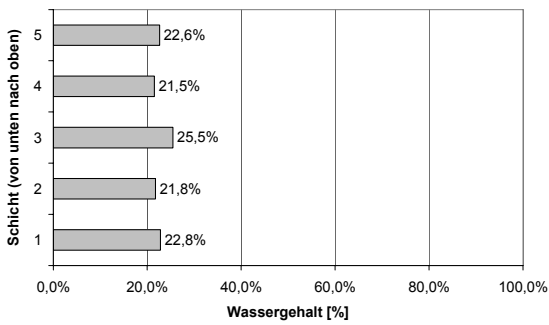
Einbaudichte: 1,71 bis 1,76 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 6,3 bis 7,5 %

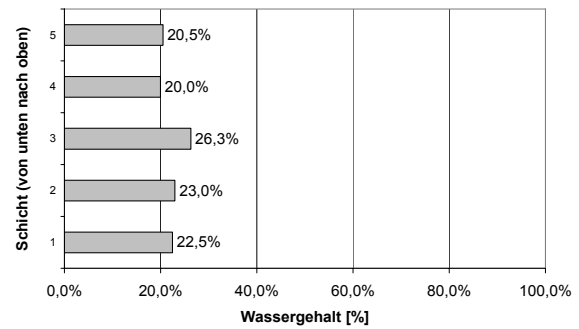
Wassergehalt bei Frostbeginn: - %



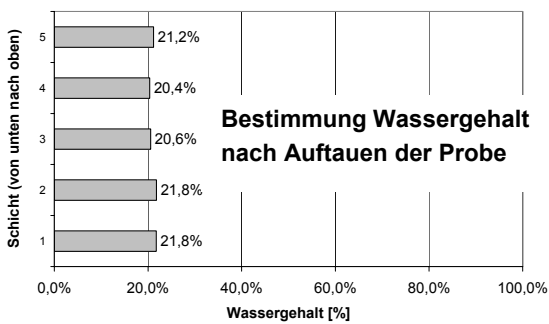
S-6-EL(-10/10)- 5 [1,68 mm/d]



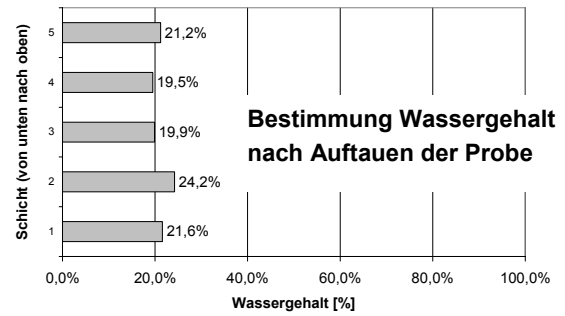
S-6-EL(-10/10)- 6 [1,53 mm/d]



S-6-EL(-10/10)- 7 [1,11 mm/d]



S-6-EL(-10/10)- 8

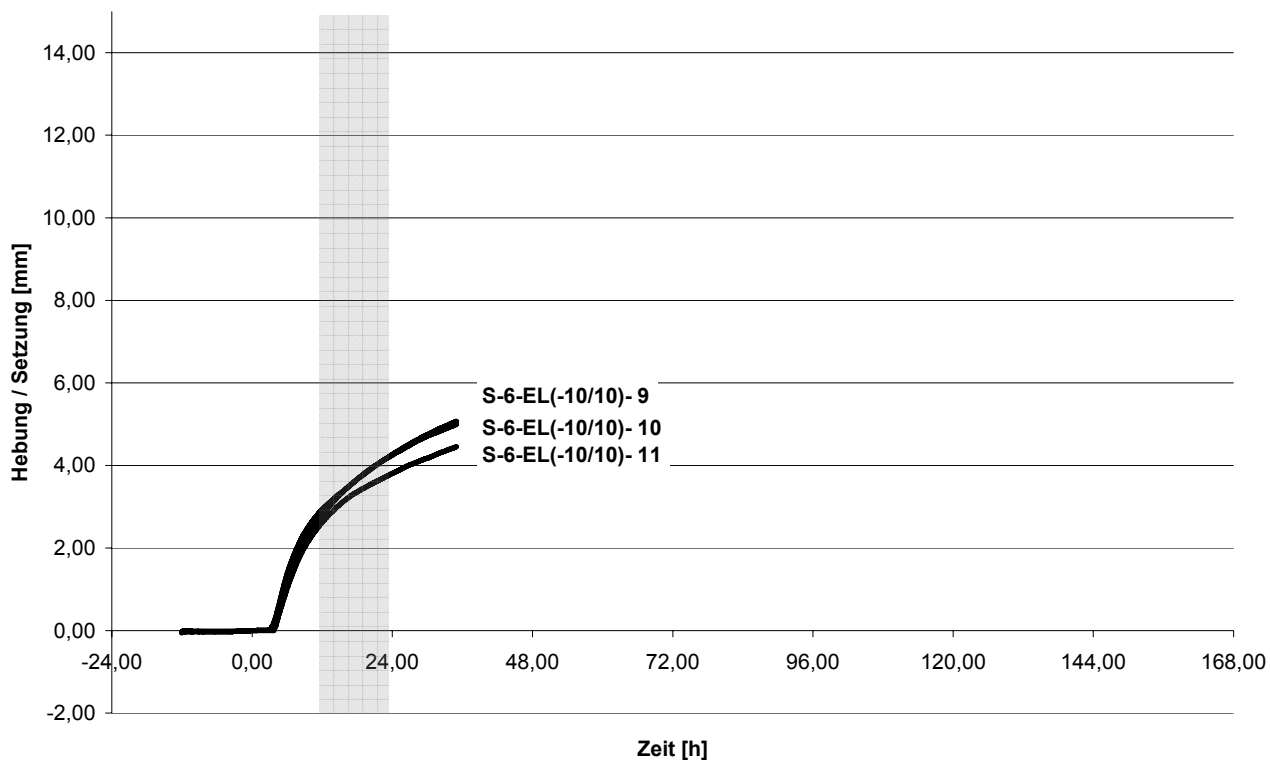


**Eislinsenbildung (-10 / +10)**

Einbaudichte: 1,71 bis 1,76 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 6,3 bis 7,5 %

Wassergehalt bei Frostbeginn: - %



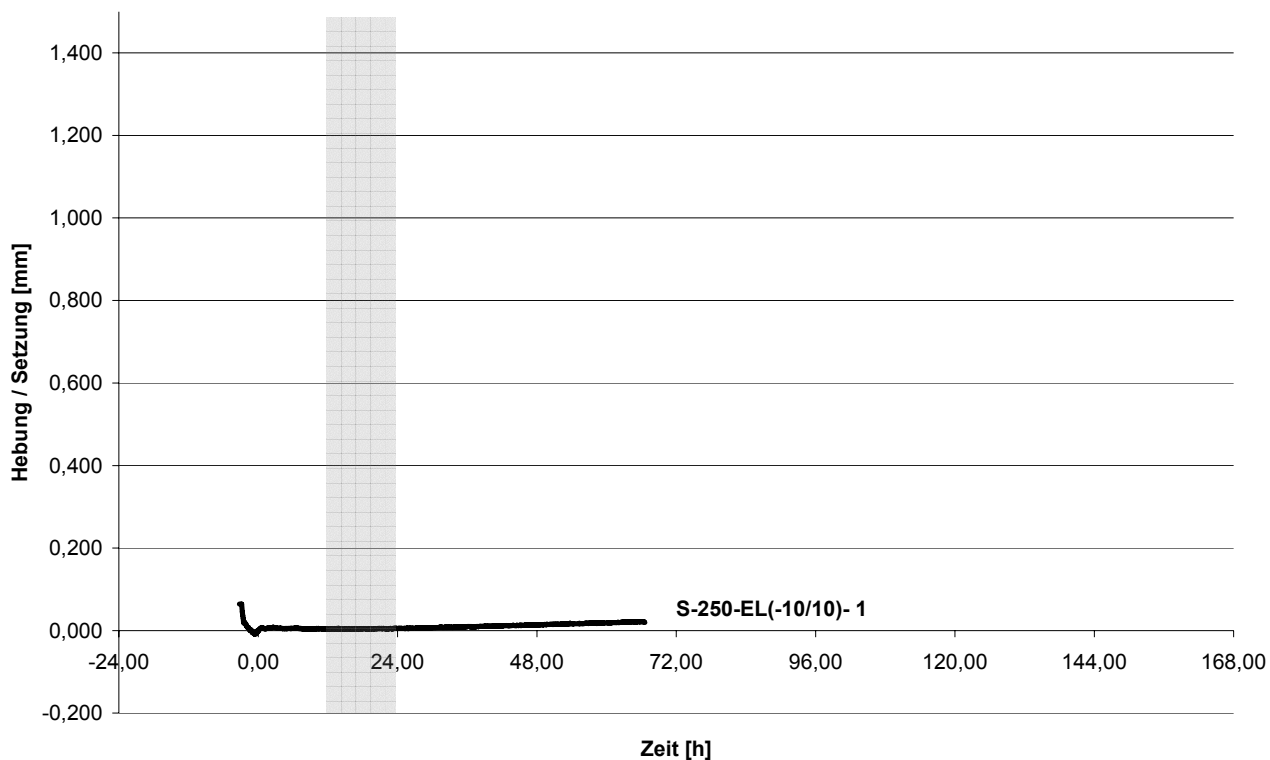
S-6-EL(-10/10)- 9 [2,42 mm/d]

S-6-EL(-10/10)- 10 [2,32 mm/d]

S-6-EL(-10/10)- 11 [1,86 mm/d]

**Eislinsenbildung (-10 / +10)**

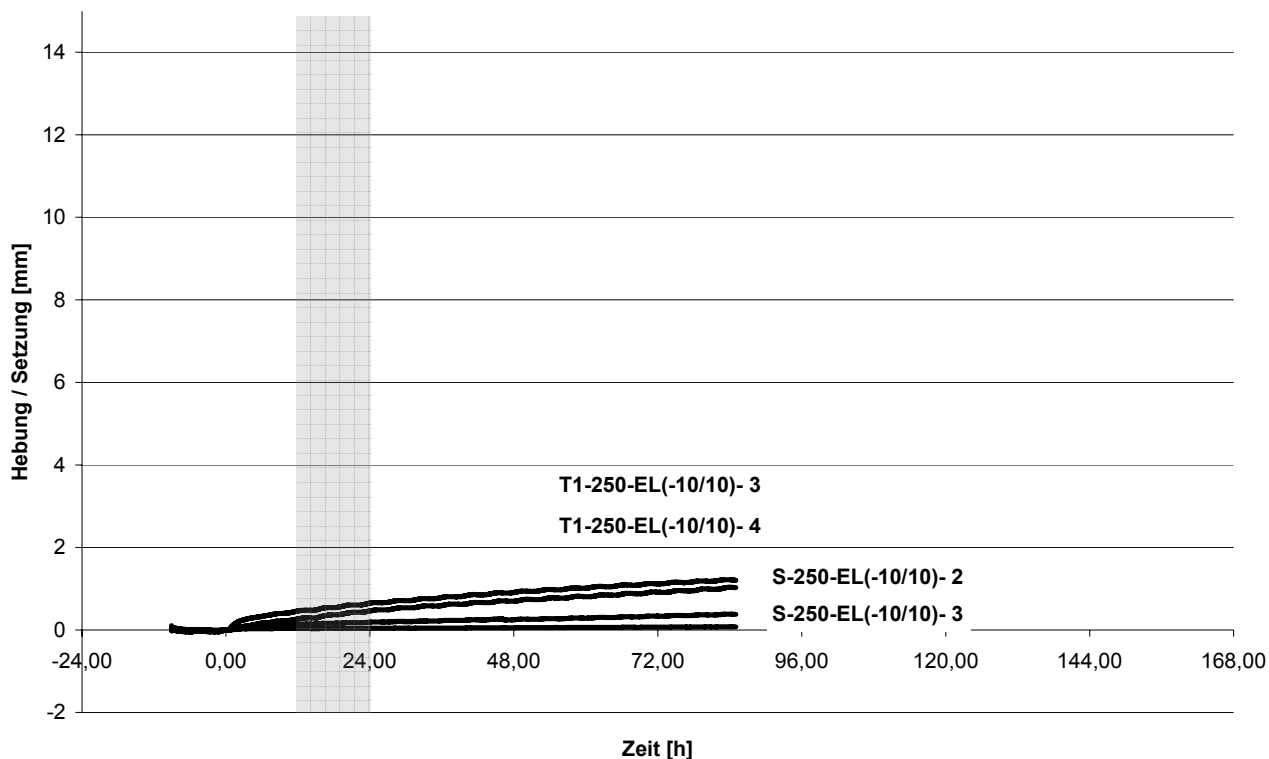
Einbaudichte: 1,77 g/cm<sup>3</sup>  
Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %  
Wassergehalt bei Frostbeginn: - %



S-250-EL(-10/10)- 1 [0,01 mm/d]

Eislinsenbildung (-10 / +10)

ungestörte Proben



S-250-EL(-10/10)- 2 [0,09 mm/d]  
 Probe Nr. 56891  
 Startschacht West ca. 9 m  
 Einschlagstutzen

S-250-EL(-10/10)- 3 [0,01 mm/d]  
 Probe Nr. 56892  
 Startschacht West ca. 9 m  
 Einschlagstutzen

T1-250-EL(-10/10)- 3 [0,39 mm/d]  
 Probe Nr. 56562  
 Bohrung NS 104  
 WK 9: 19,70 m

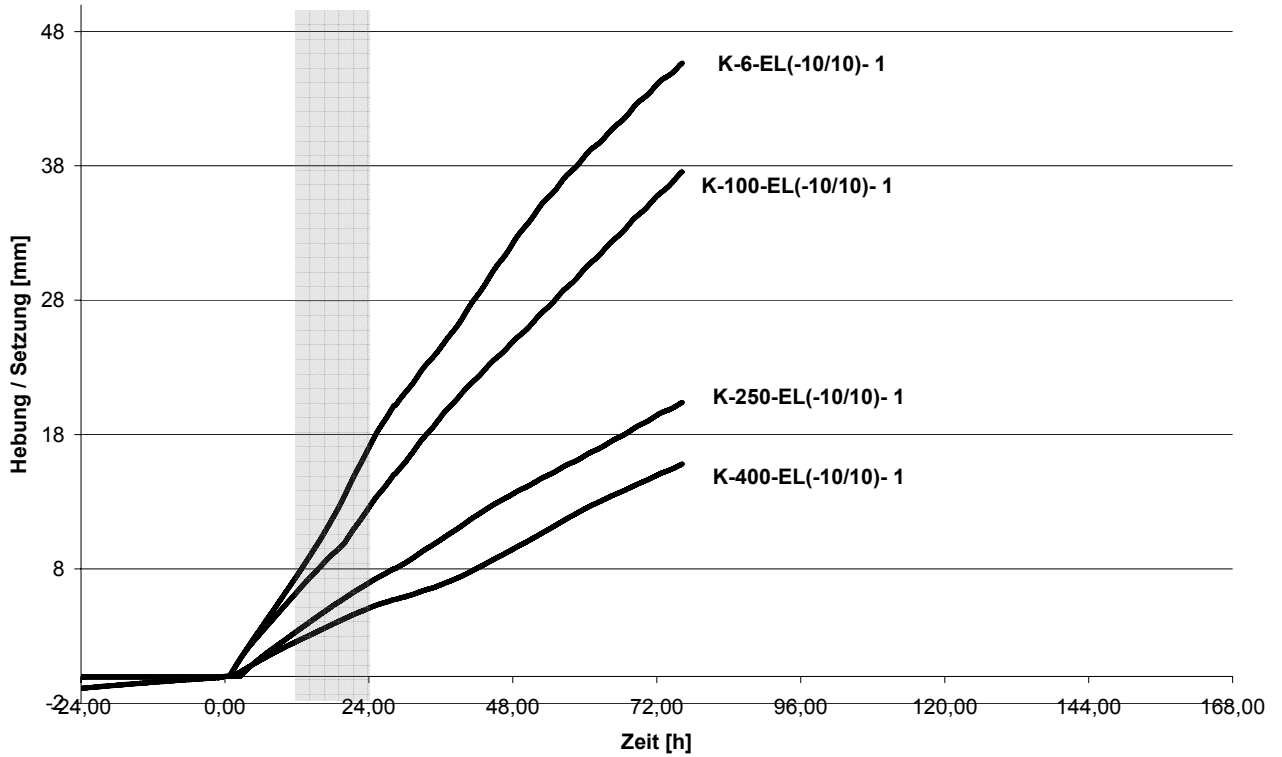
T1-250-EL(-10/10)- 4 [0,38 mm/d]  
 Probe Nr. 56563  
 Bohrung NS 104  
 WK 10: 20,6 m

**Eislinsenbildung (-10 / +10)**

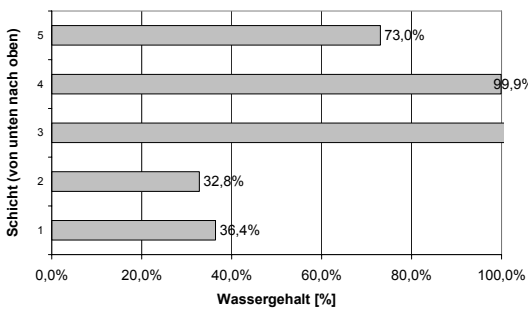
Einbaudichte: 1,70 bis 1,76 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %

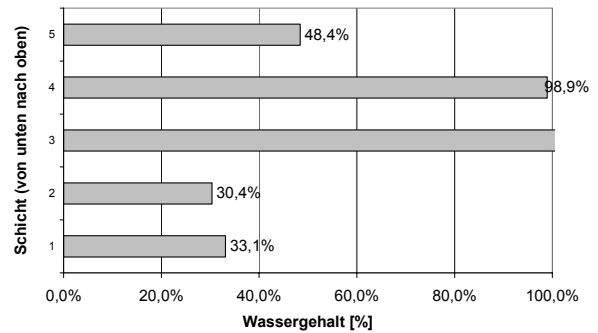
Wassergehalt bei Frostbeginn: 36,2 bis 25,0 %



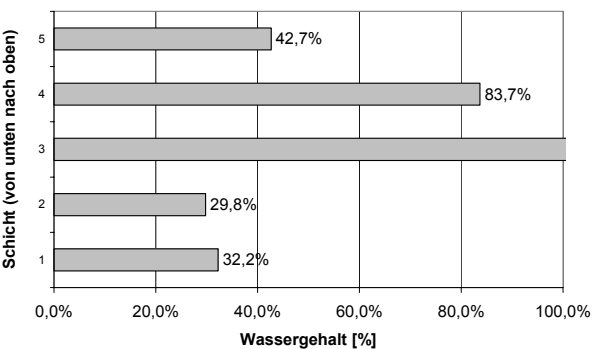
K-6-EL(-10/10)- 1 [18,98 mm/d]



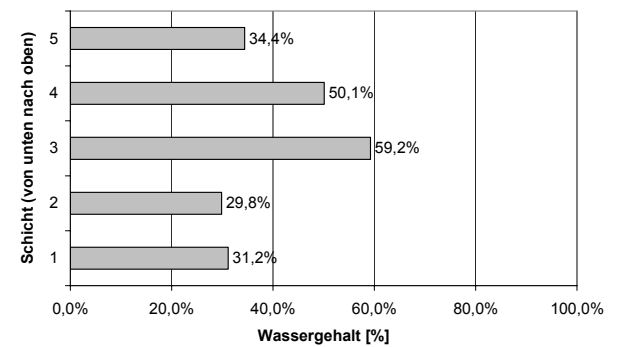
K-100-EL(-10/10)- 1 [12,50 mm/d]



K-250-EL(-10/10)- 1 [7,20 mm/d]



K-400-EL(-10/10)- 1 [4,94 mm/d]

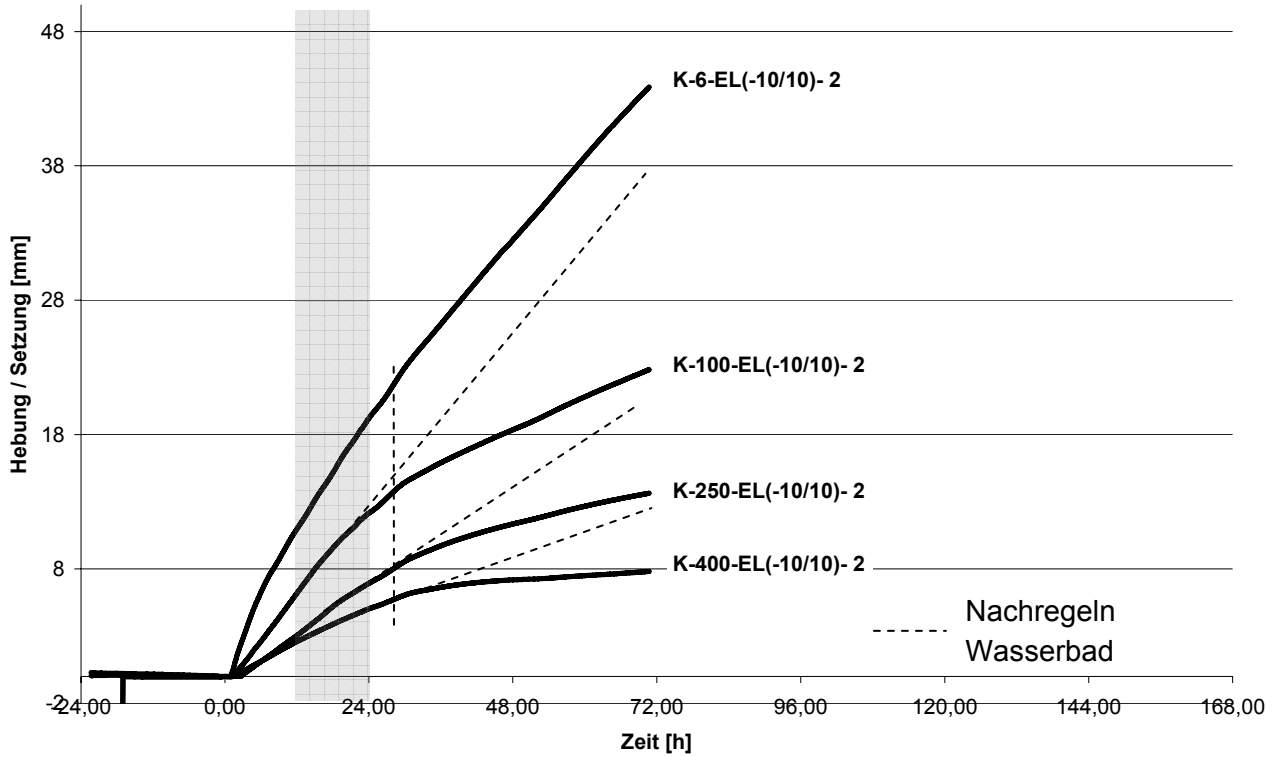


Eislinsenbildung (-10 / +10)

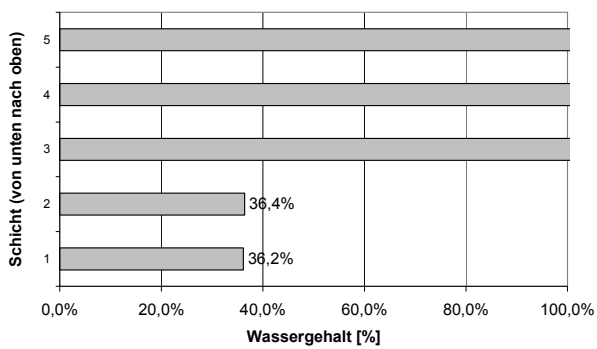
Einbaudichte: 1,71 bis 1,72 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %

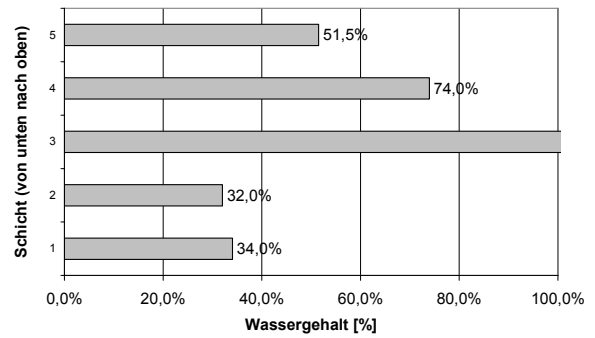
Wassergehalt bei Frostbeginn: 36,2 bis 25,2 %



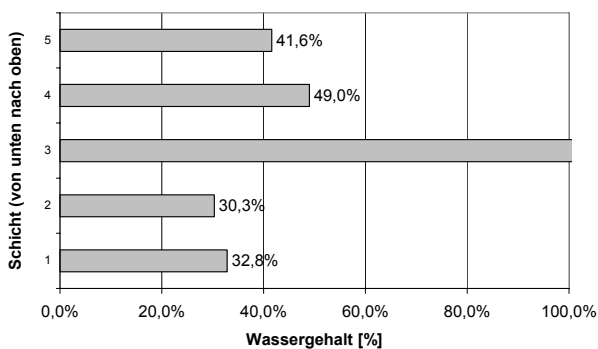
K-6-EL(-10/10)- 2 [16,49 mm/d]



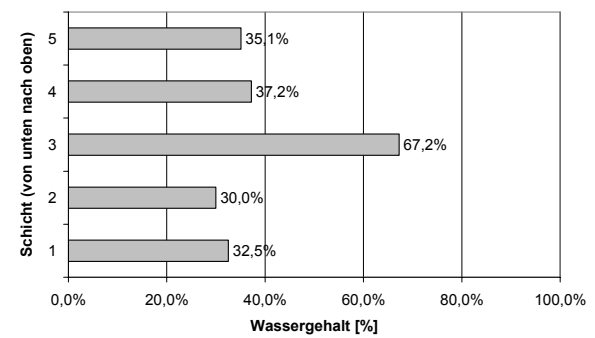
K-100-EL(-10/10)- 2 [12,10 mm/d]



K-250-EL(-10/10)- 2 [7,81 mm/d]



K-400-EL(-10/10)- 2 [4,91 mm/d]

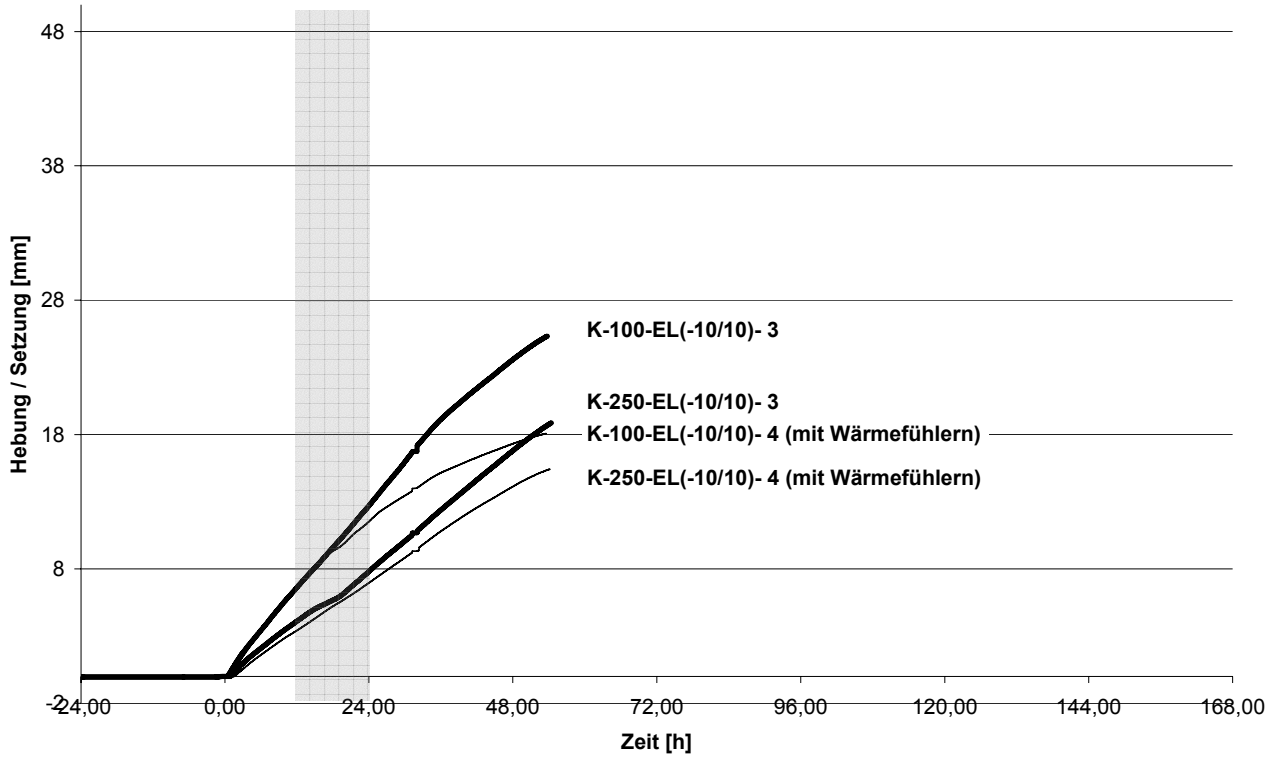


Eislinsenbildung (-20 / +10)

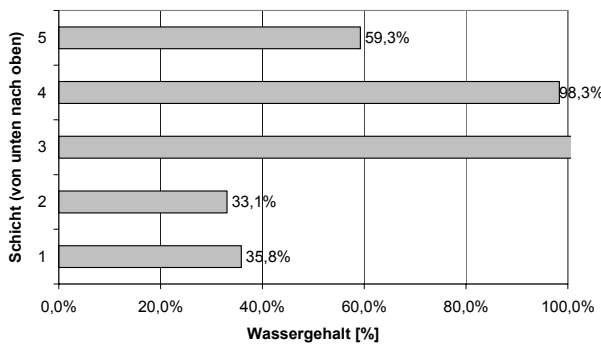
Einbaudichte: 1,73 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %

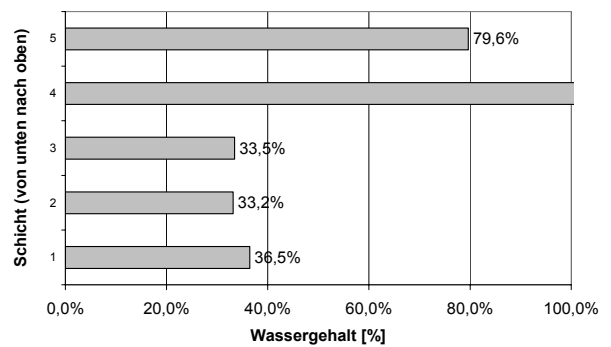
Wassergehalt bei Frostbeginn: 35,5 bis 29,5 %



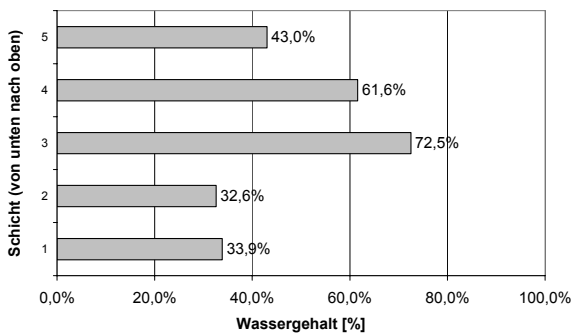
K-100-EL(-10/10)- 3 [12,15 mm/d]



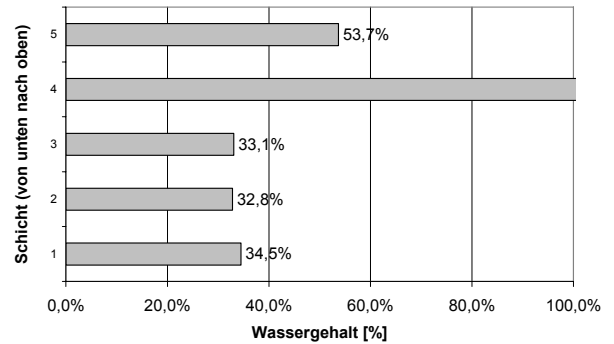
K-100-EL(-10/10)- 4 [9,53 mm/d]



K-250-EL(-10/10)- 3 [7,38 mm/d]



K-250-EL(-10/10)- 4 [7,07 mm/d]

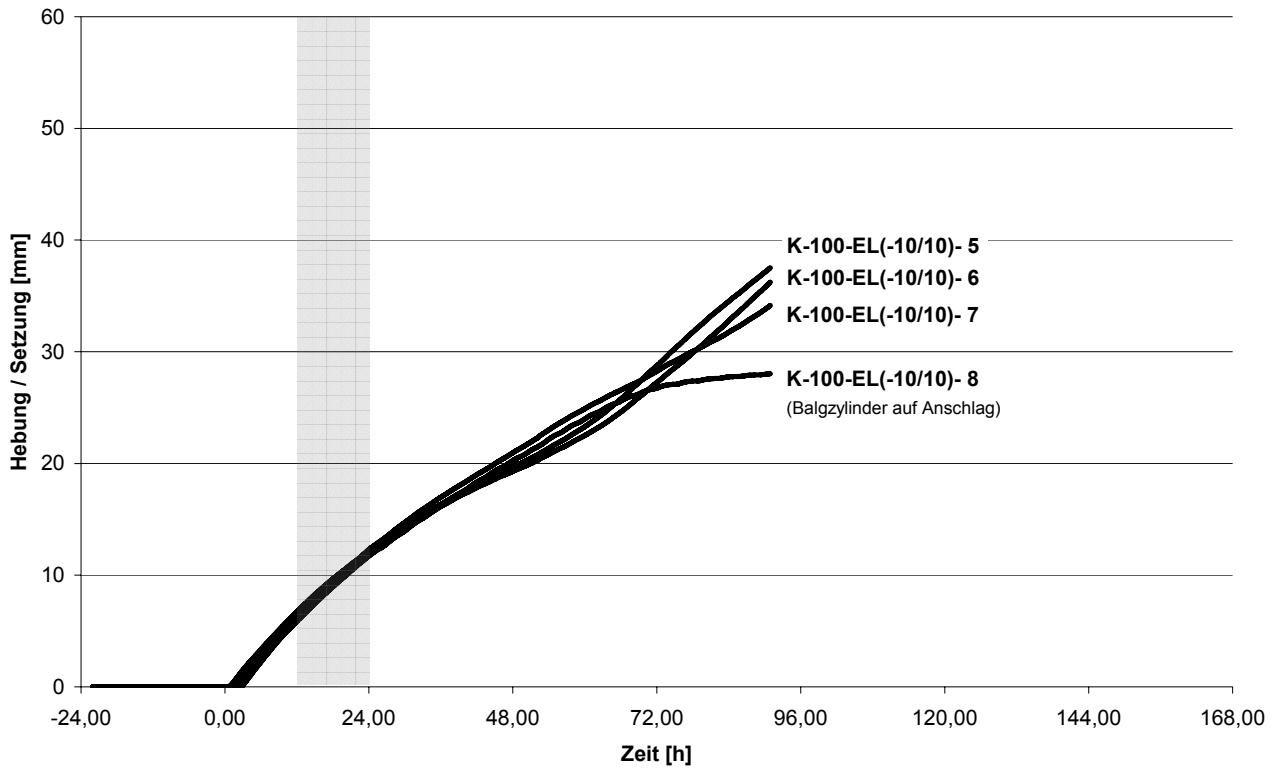


**Eislinsenbildung (-10 / +10)**

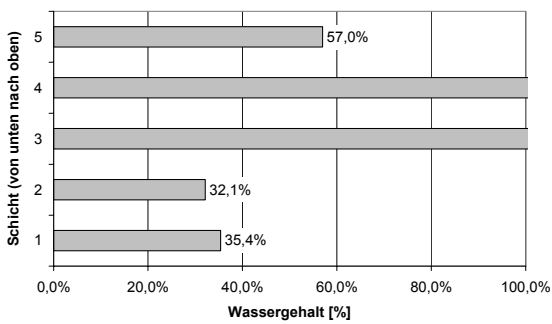
Einbaudichte: 1,71 bis 1,73 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %

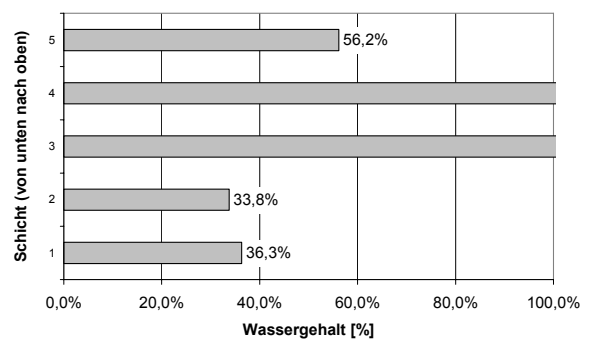
Wassergehalt bei Frostbeginn: 37,2 bis 34,8 %



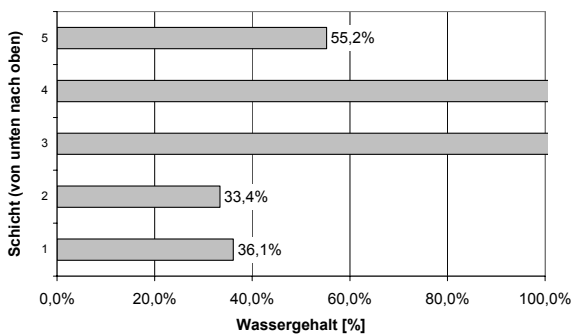
K-100-EL(-10/10)- 5 [12,64 mm/d]



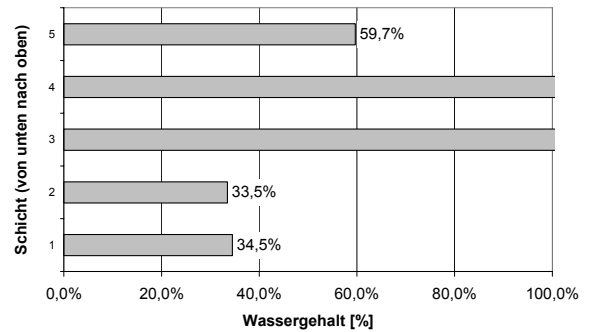
K-100-EL(-10/10)- 6 [11,70 mm/d]



K-100-EL(-10/10)- 7 [10,91 mm/d]



K-100-EL(-10/10)- 8 [10,88 mm/d]



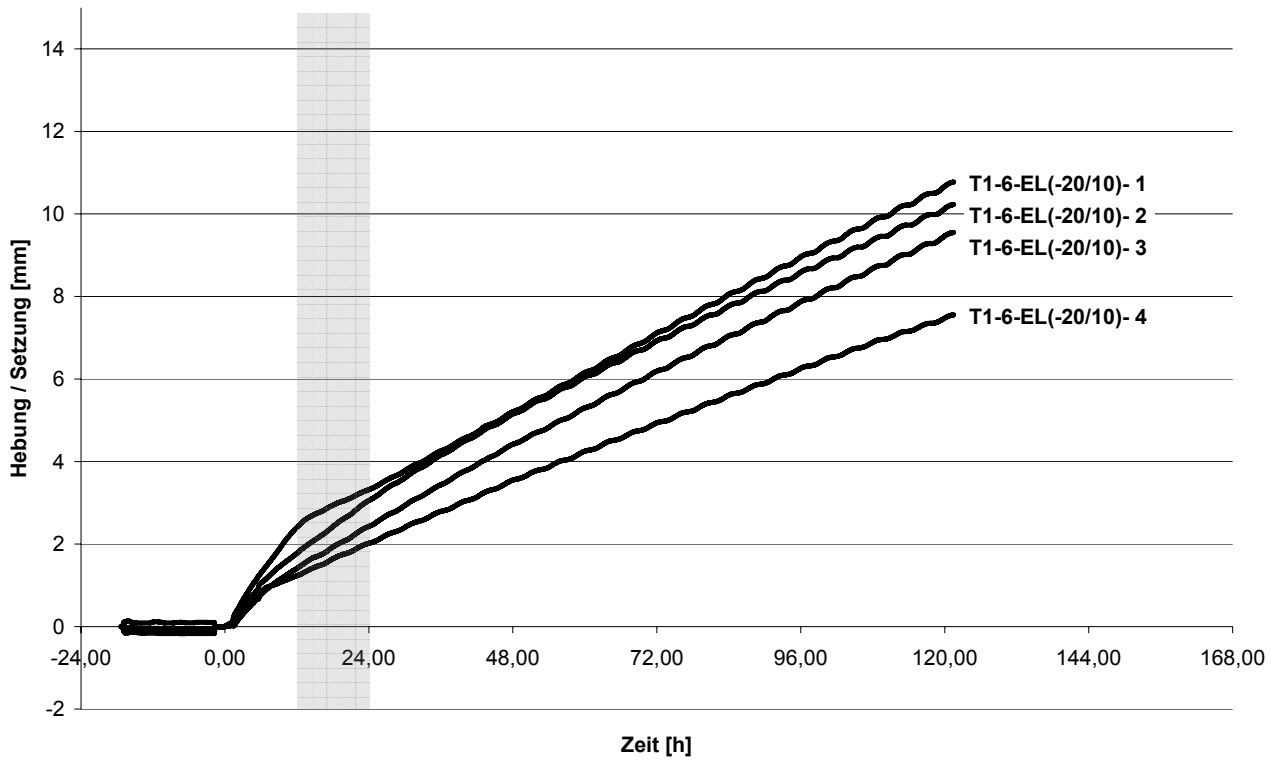


Eislinsenbildung (-20 / +10)

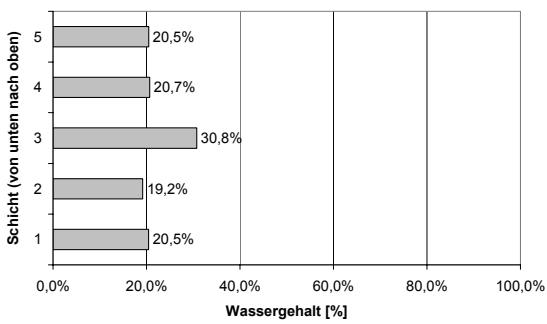
Einbaudichte: 2,09 bis 2,11 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %

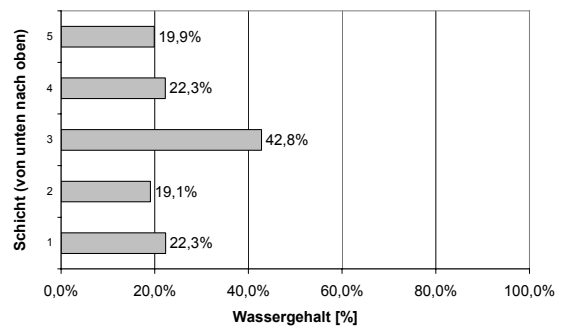
Wassergehalt bei Frostbeginn: 23,5 bis 20,5 %



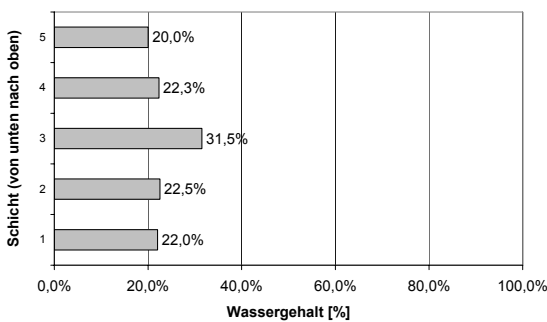
T1-6-EL(-20/10)-1 [2,52 mm/d]



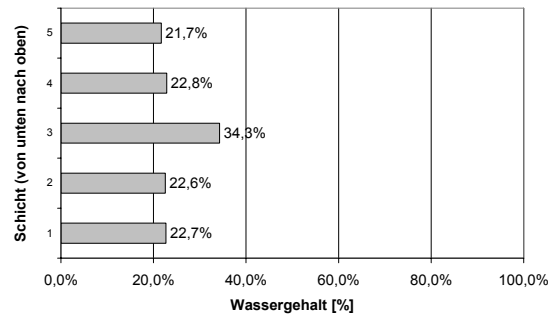
T1-6-EL(-20/10)-2 [2,00 mm/d]



T1-6-EL(-20/10)-3 [1,74 mm/d]



T1-6-EL(-20/10)-4 [1,56 mm/d]

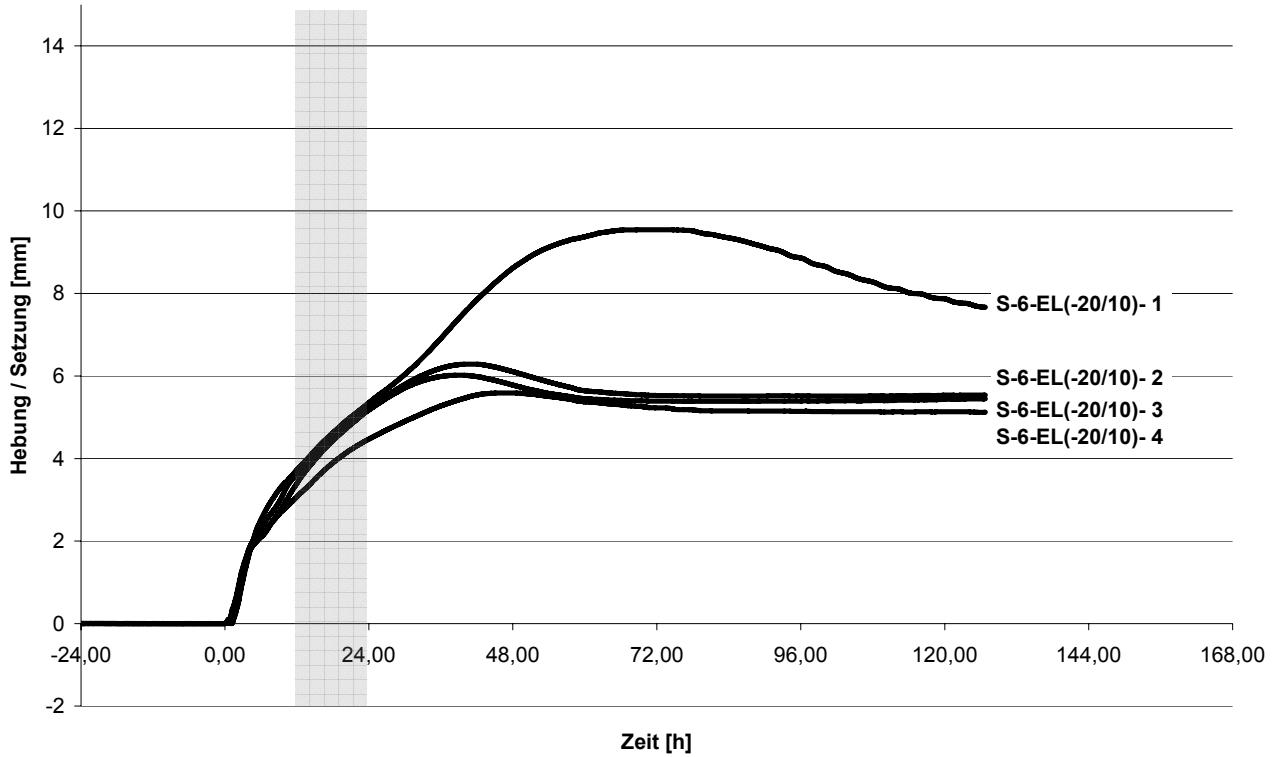


Eislinsenbildung (-20 / +10)

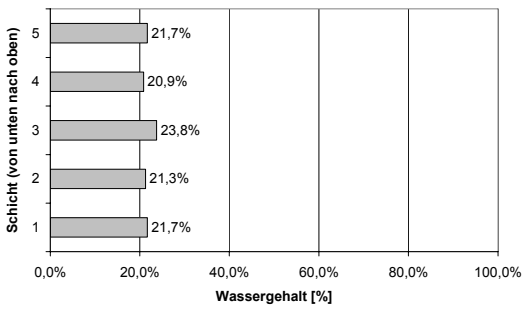
Einbaudichte: 1,99 bis 2,01 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %

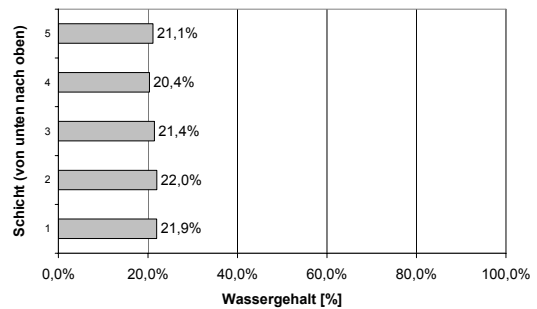
Wassergehalt bei Frostbeginn: 21,5 bis 19,8 %



S-6-EL(-20/10)-1 [3,53 mm/d]



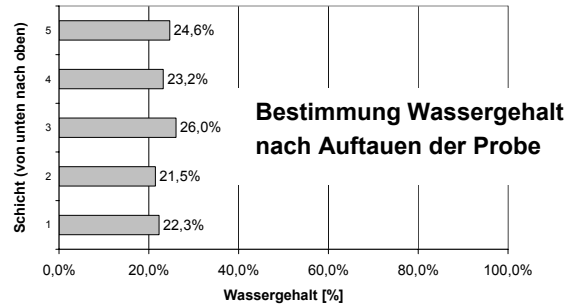
S-6-EL(-20/10)-2 [3,24 mm/d]



S-6-EL(-20/10)-1 [3,09 mm/d]

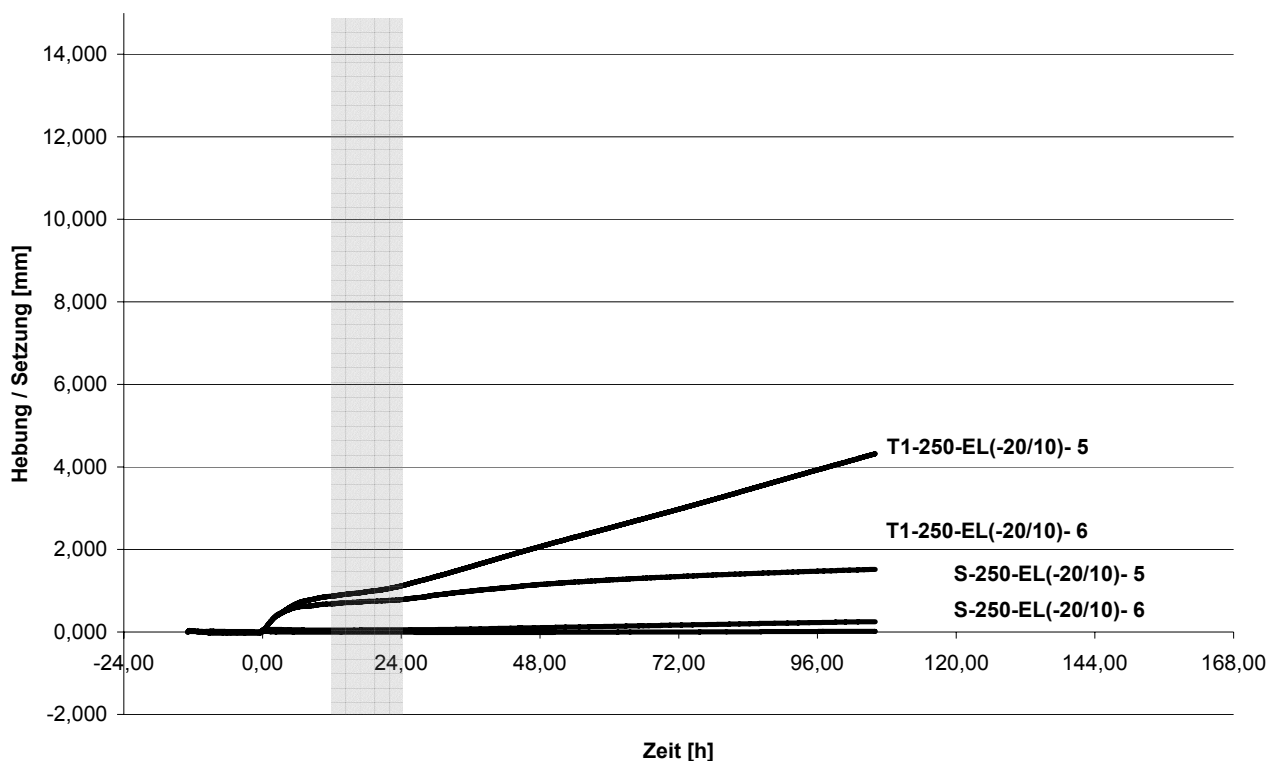


S-6-EL(-20/10)-1 [2,76 mm/d]



Eislinsenbildung (-20 / +10)

ungestörte Proben



S-250-EL(-20/10)- 5 [0,12 mm/d]  
 Probe Nr. 56888  
 Startschacht West ca. 9 m  
 Einschlagstutzen

S-250-EL(-20/10)- 6 [0,03 mm/d]  
 Probe Nr. 56890  
 Startschacht West ca. 9 m  
 Einschlagstutzen

T1-250-EL(-20/10)- 5 [1,50 mm/d]  
 Probe Nr. 56745  
 Bohrung NS 115  
 WK 7: 15,75 m bis 15,95 m

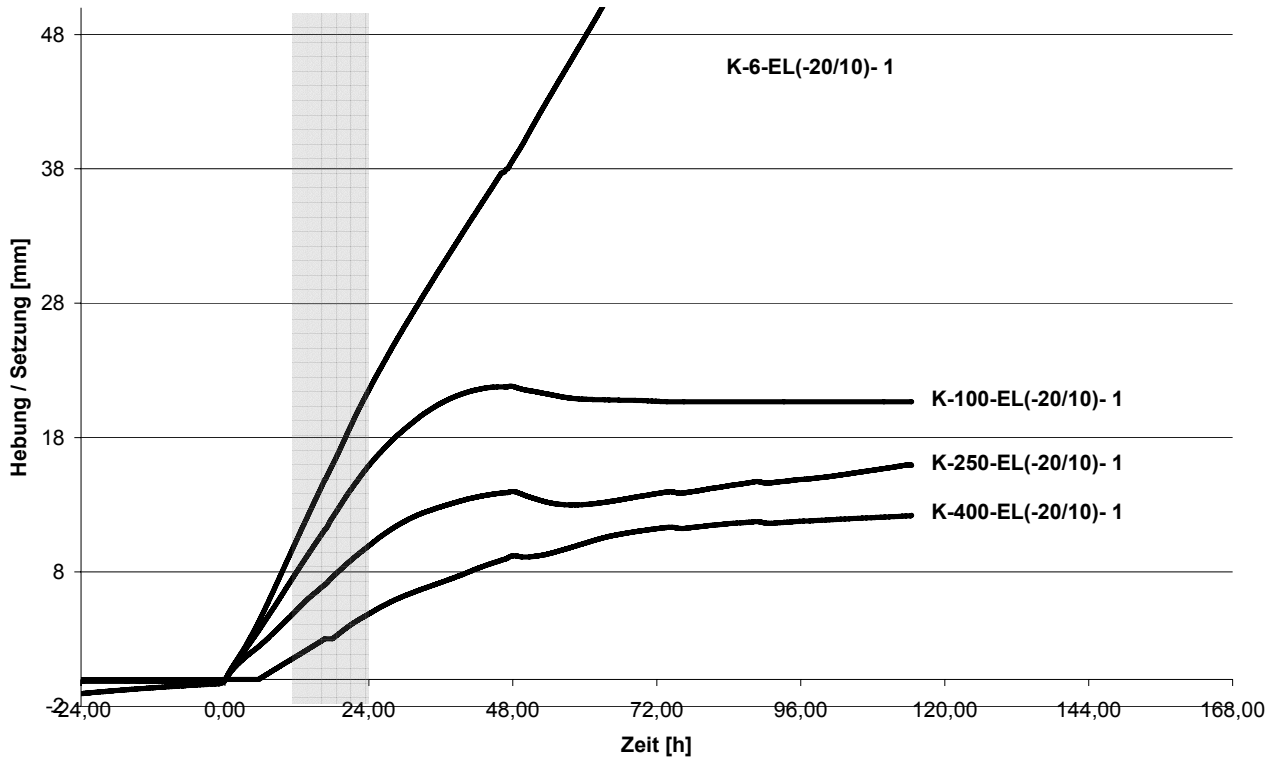
T1-250-EL(-20/10)- 6 [1,16 mm/d]  
 Probe Nr. 56748  
 Bohrung NS 115  
 WK 10: 18,5 m bis 18,7 m

**Eislinsenbildung (-20 / +10)**

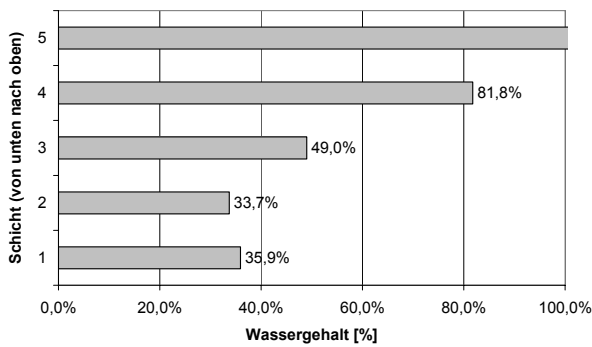
Einbaudichte: 1,71 bis 1,72 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %

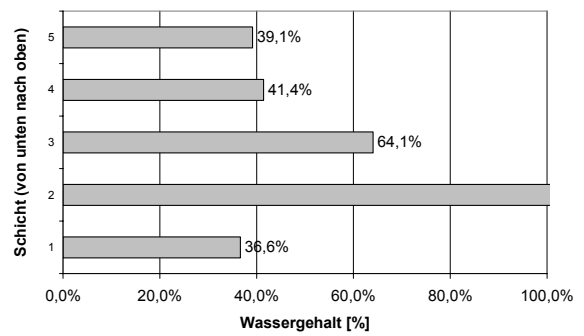
Wassergehalt bei Frostbeginn 36,5 bis 25,1 %



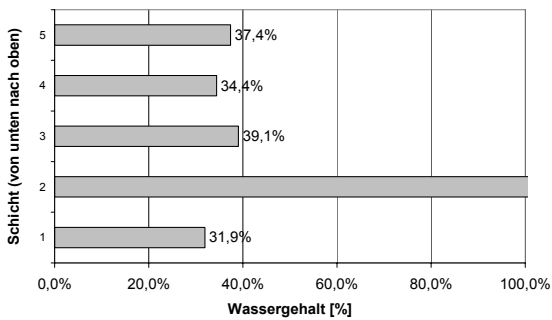
K-6-EL(-20/10)- 2 [22,31 mm/d]



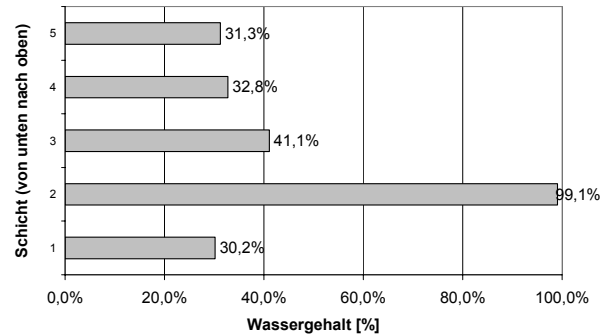
K-100-EL(-20/10)- 2 [15,84 mm/d]



K-250-EL(-20/10)- 2 [9,58 mm/d]



K-6-EL(-20/10)- 2 [6,27 mm/d]

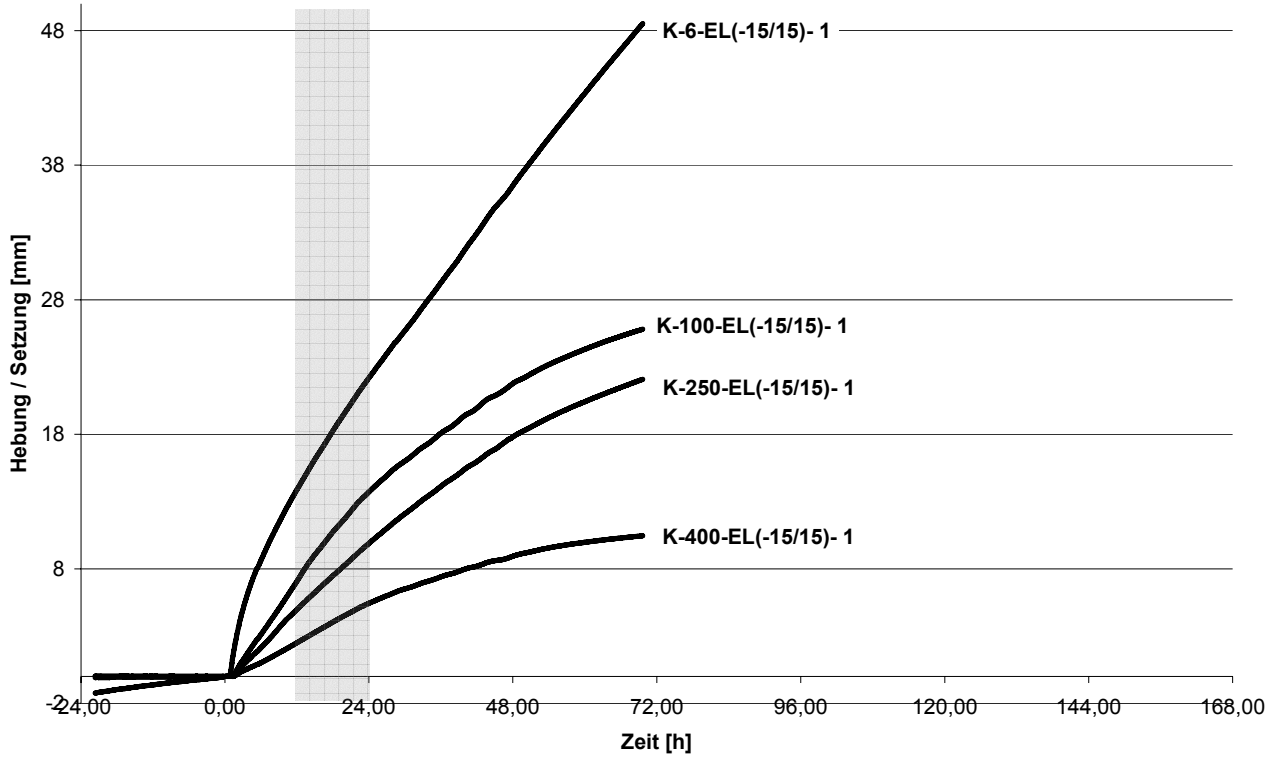


**Eislinsenbildung (-15 / +15)**

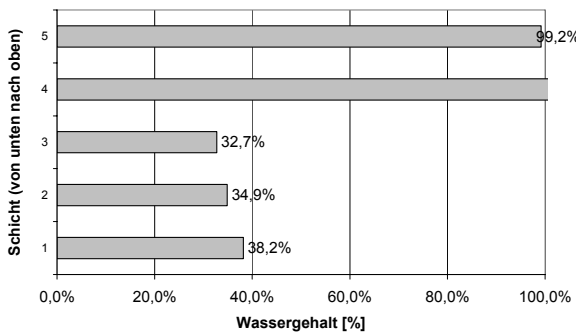
Einbaudichte: 1,71 bis 1,72 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %

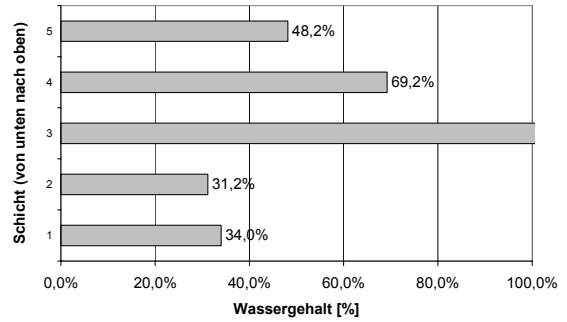
Wassergehalt bei Frostbeginn 36,5 bis 25,1 %



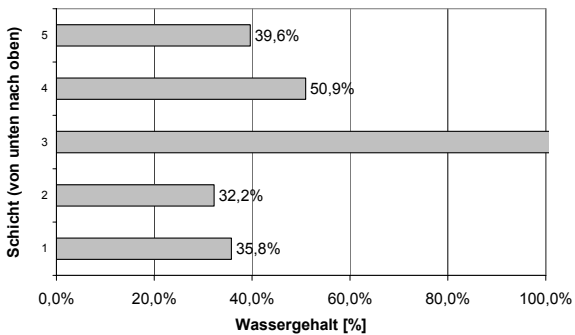
K-6-EL(-15/15)- 2 [16,63 mm/d]



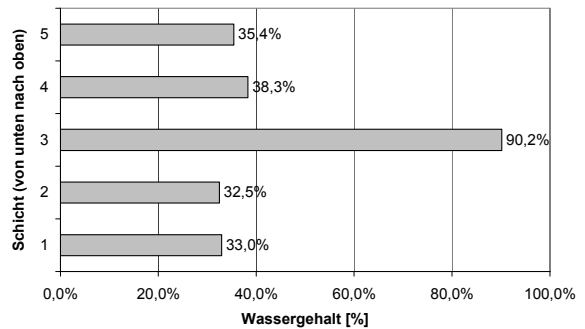
K-100-EL(-15/15)- 2 [13,32 mm/d]



K-250-EL(-15/15)- 2 [9,82 mm/d]



K-400-EL(-15/15)- 2 [5,87 mm/d]

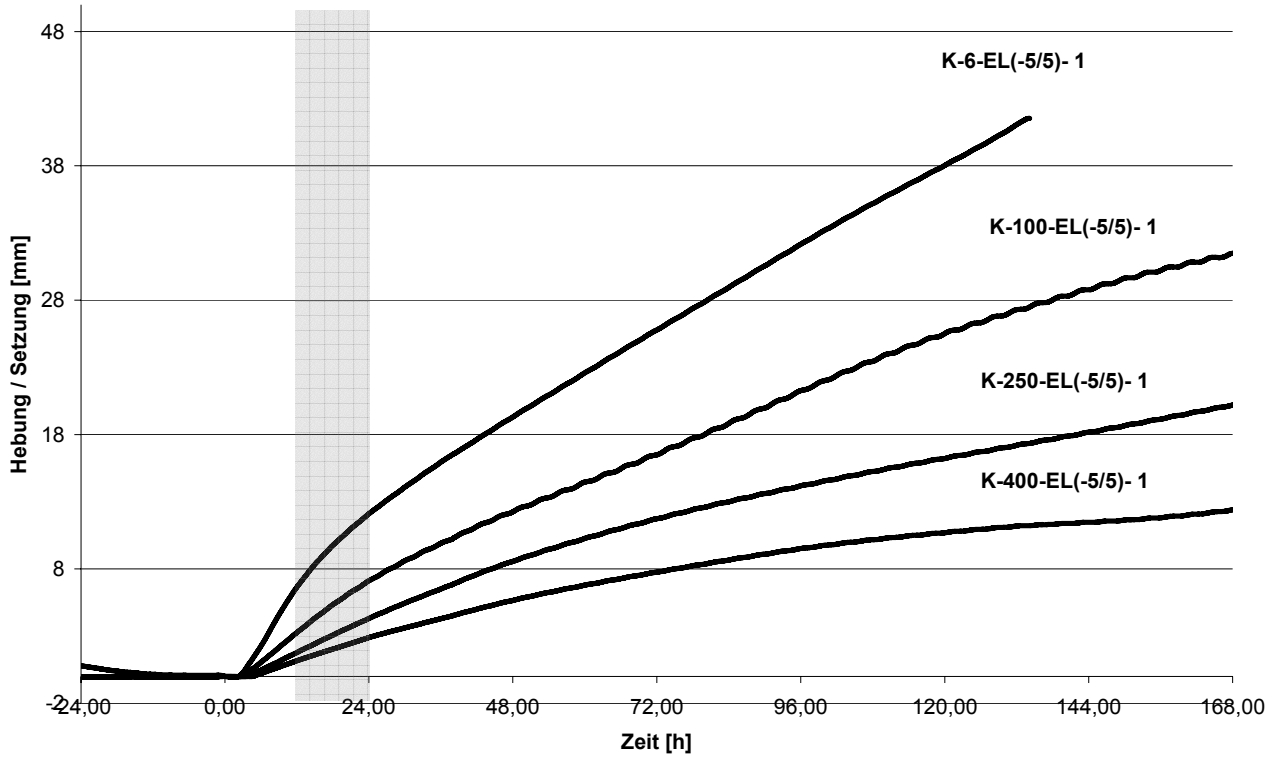


**Eislinsenbildung (-5 / +5)**

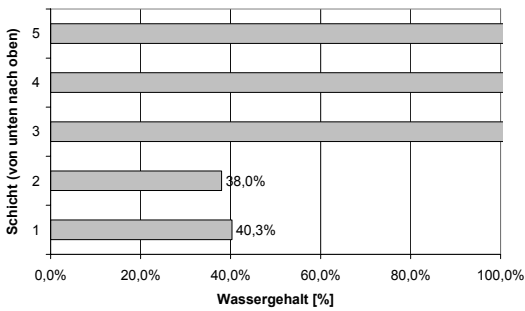
Einbaudichte: 1,71 bis 1,73 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %

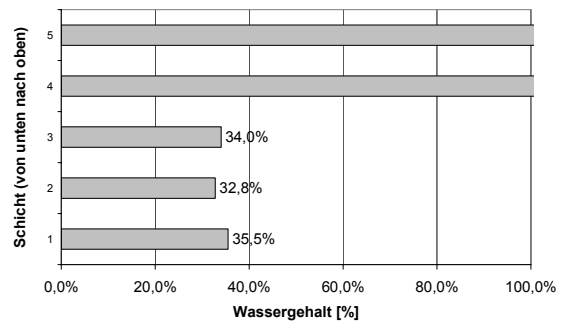
Wassergehalt bei Frostbeginn 36,2 bis 24,9 %



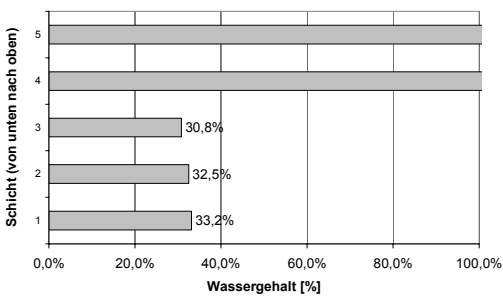
K-6-EL(-5/5)- 1 [10,71 mm/d]



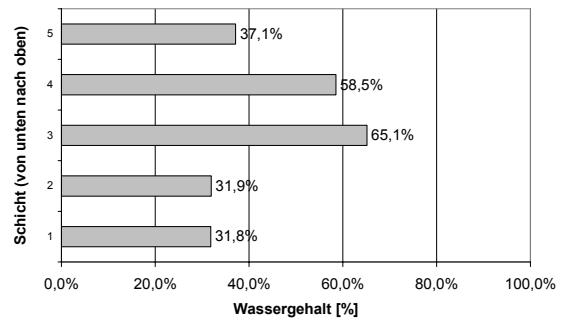
K-100-EL(-5/5)- 1 [7,61mm/d]



K-250-EL(-5/5)- 1 [5,05 mm/d]



K-400-EL(-5/5)- 1 [3,43 mm/d]

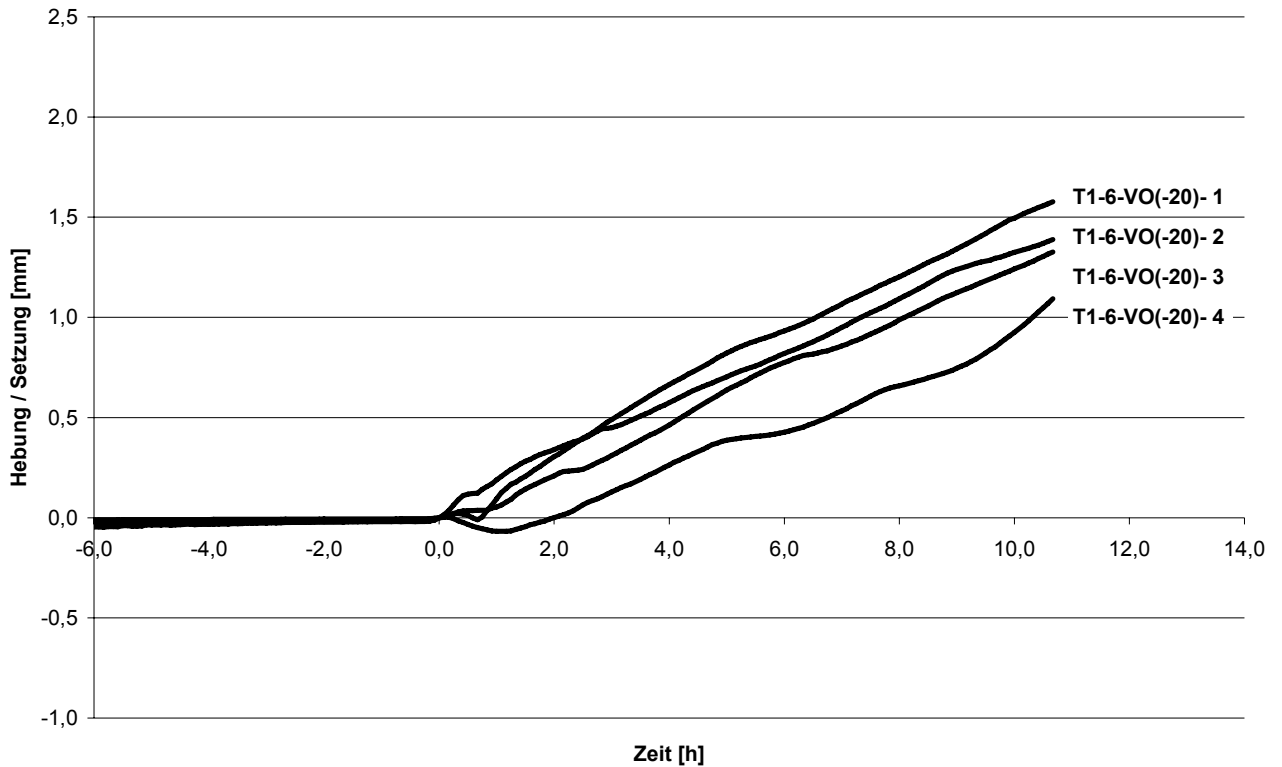


**Volumetrische Hebung (-20)**

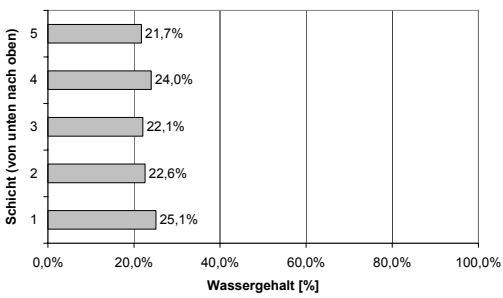
Einbaudichte: 2,07 bis 2,10 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %

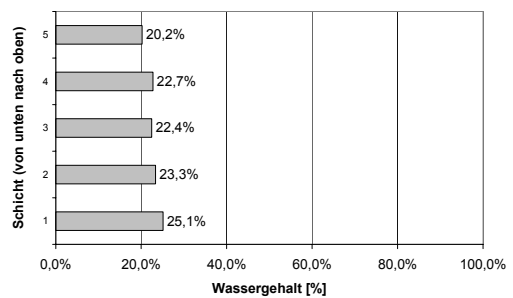
Wassergehalt bei Frostbeginn -%



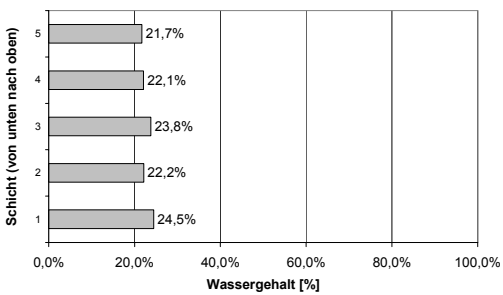
T1-6-VO(-20)- 1 [1,79 %]



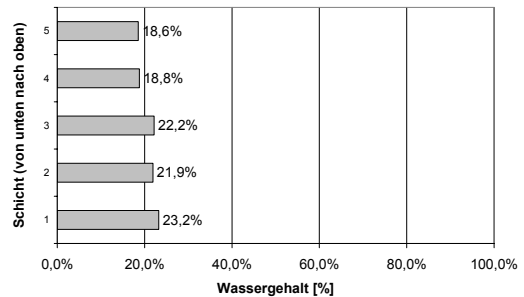
T1-6-VO(-20)- 2 [1,61 %]



T1-6-VO(-20)- 3 [1,50 %]



T1-6-VO(-20)- 4 [1,39 %]

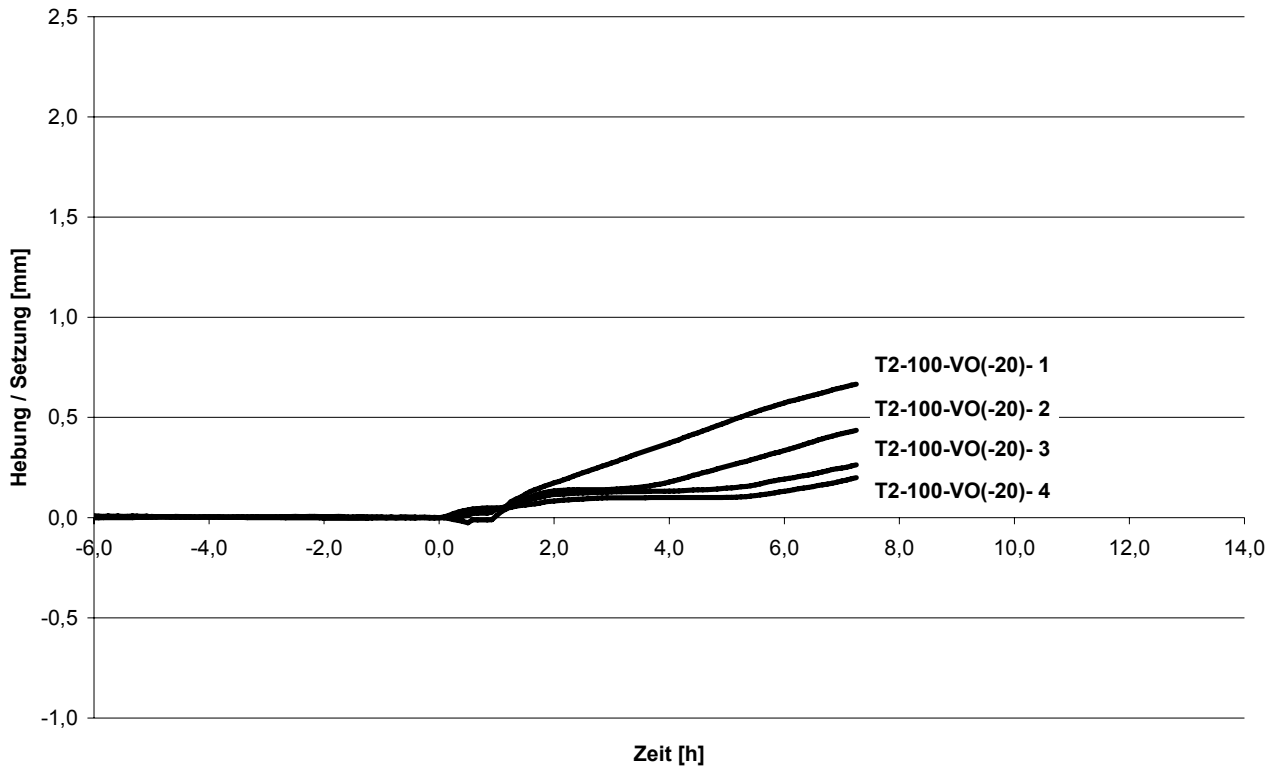


**Volumetrische Hebung (-20)**

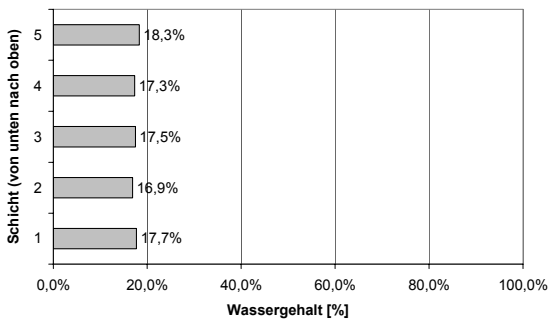
Einbaudichte: 2,07 bis 2,10 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %

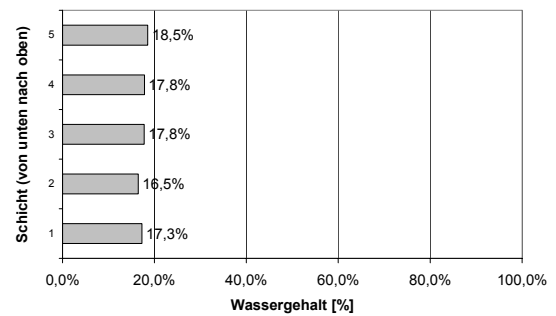
Wassergehalt bei Frostbeginn -%



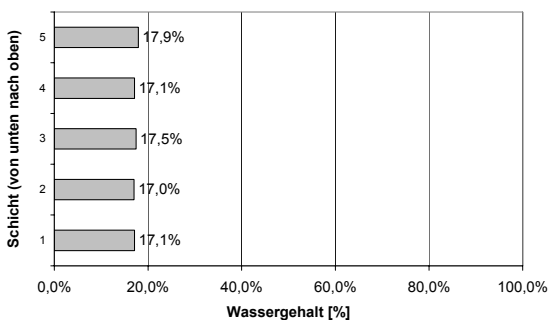
T2-100-VO(-20)- 1 [0,67 %]



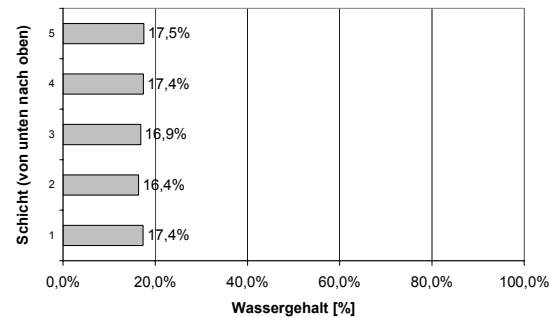
T2-100-VO(-20)- 2 [0,44 %]



T2-100-VO(-20)- 3 [0,26 %]



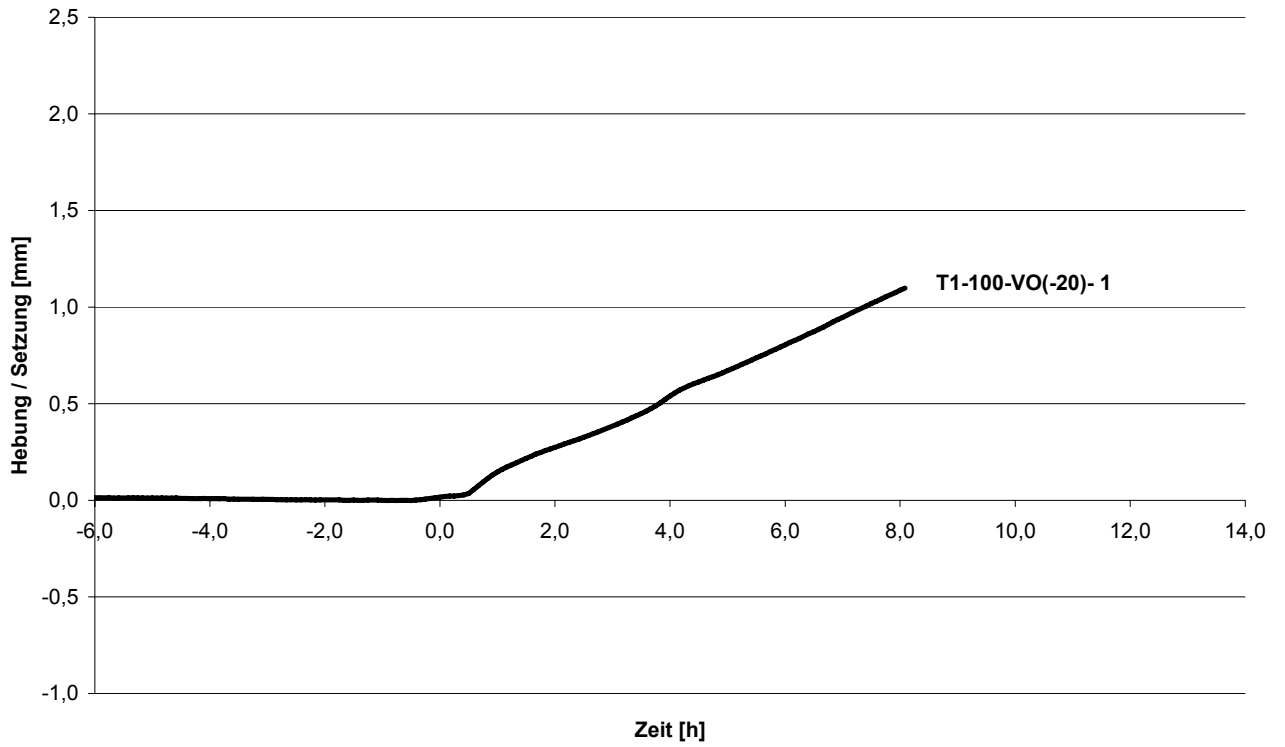
T2-100-VO(-20)- 4 [0,22 %]





**Volumetrische Hebung (-20)**

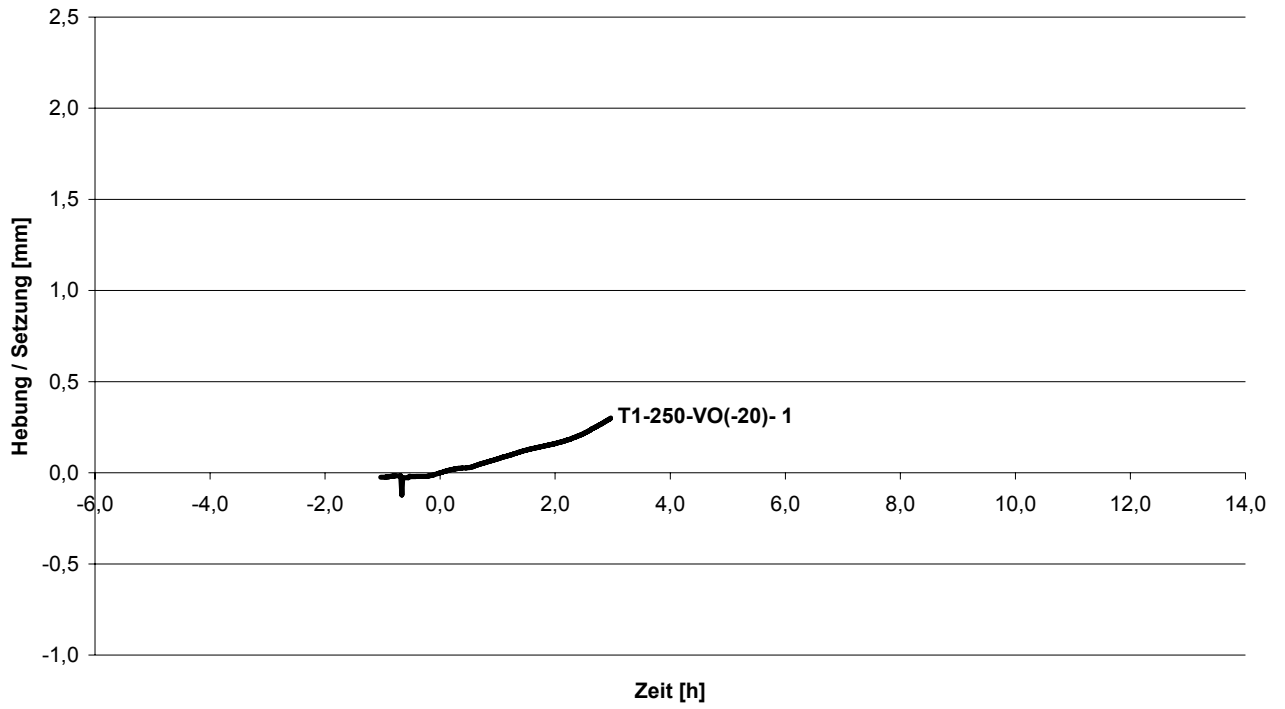
Einbaudichte: 2,07 g/cm<sup>3</sup>  
Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %  
Wassergehalt bei Frostbeginn -%



T1-100-VO(-20)- 1 [1,11 %]

**Volumetrische Hebung (-20)**

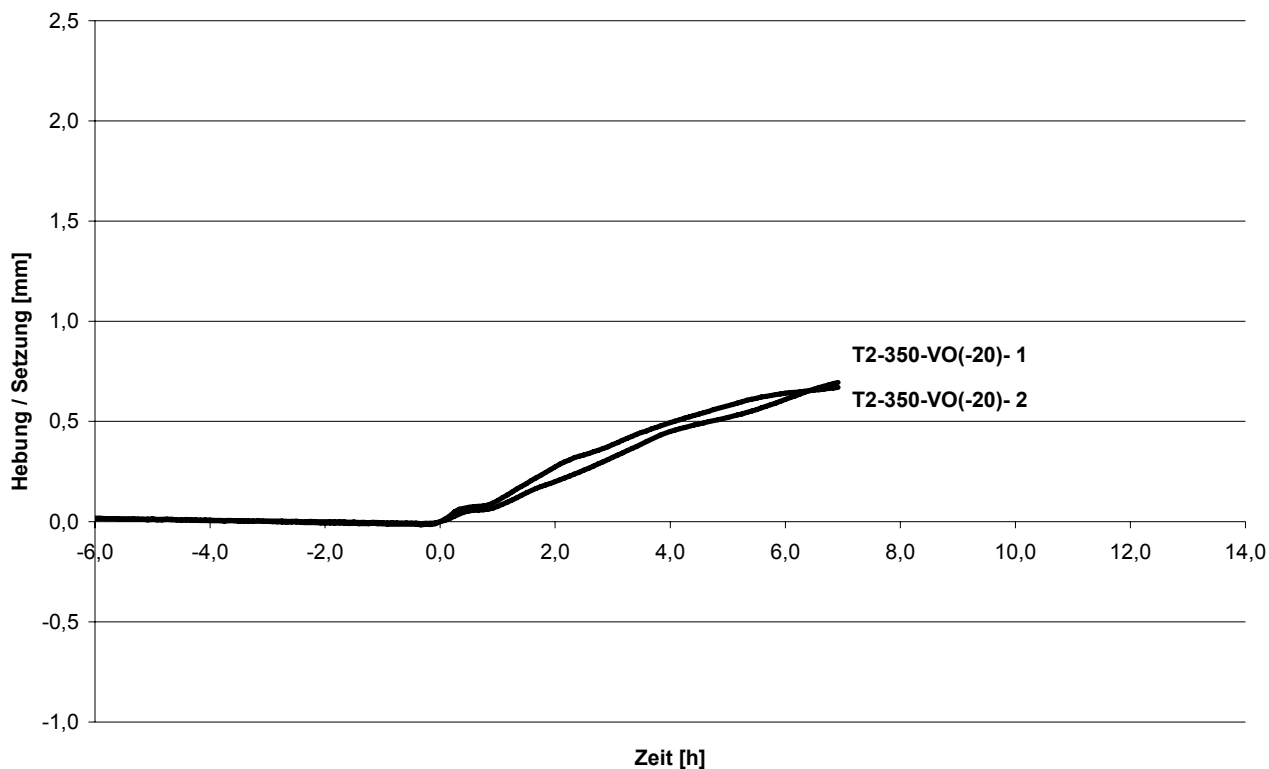
Einbaudichte: 2,08 g/cm<sup>3</sup>  
Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %  
Wassergehalt bei Frostbeginn -%



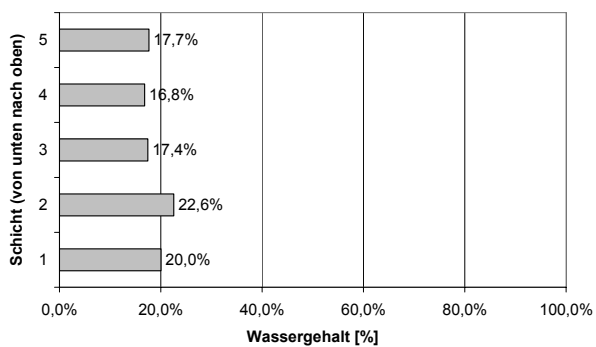
T1-250-VO(-20)- 1 [0,70 %]

**Volumetrische Hebung (-20)**

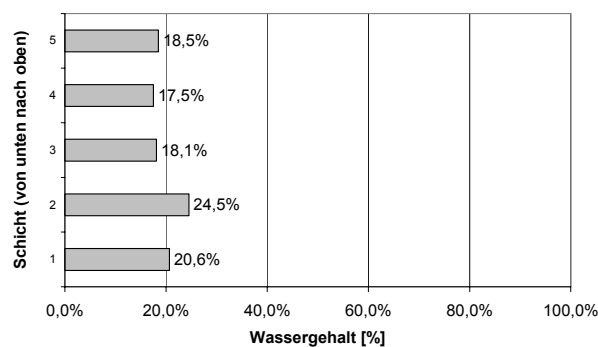
Einbaudichte: 2,04 bis 2,10 g/cm<sup>3</sup>  
 Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %  
 Wassergehalt bei Frostbeginn -%



T2-350-VO(-20)- 1 [0,78 %]



T2-350-VO(-20)- 2 [0,70 %]

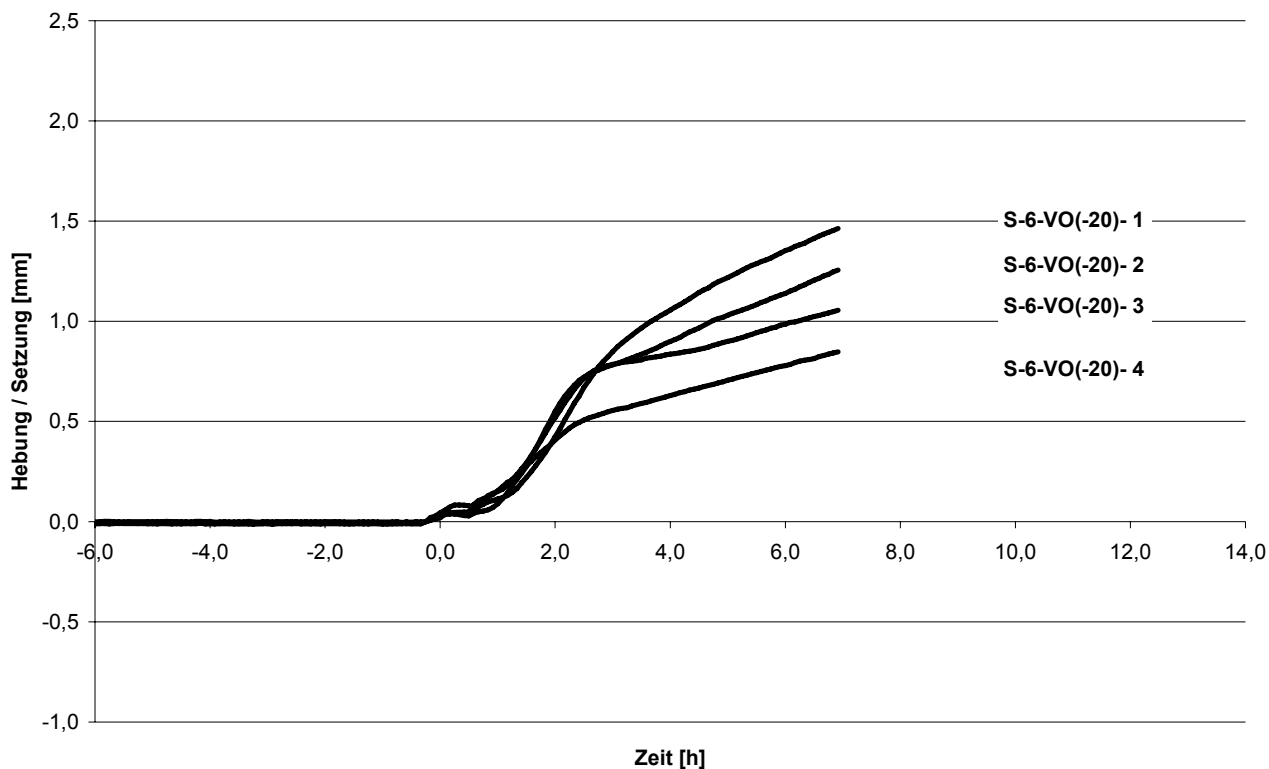


**Volumetrische Hebung (-20)**

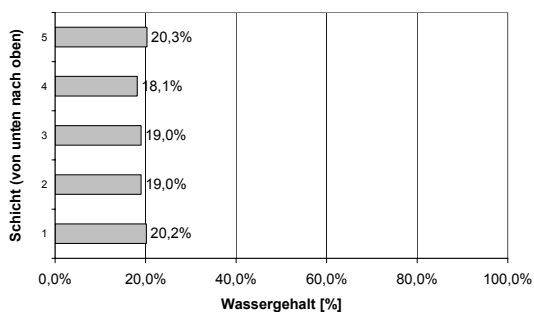
Einbaudichte: 1,94 bis 1,95 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %

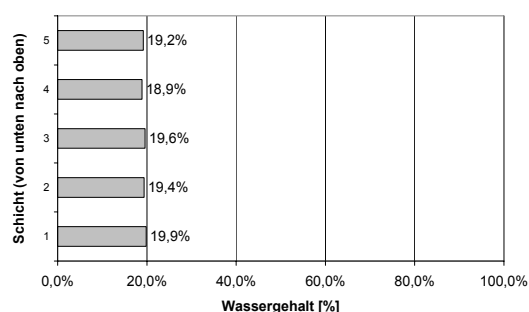
Wassergehalt bei Frostbeginn -%



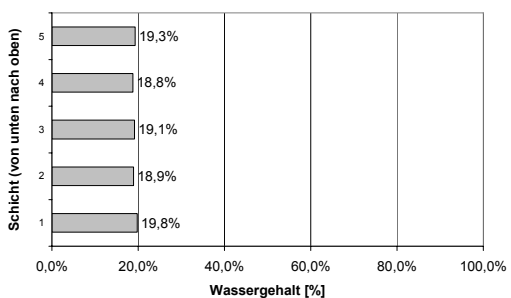
S-6-VO(-20)- 1 [2,23 %]



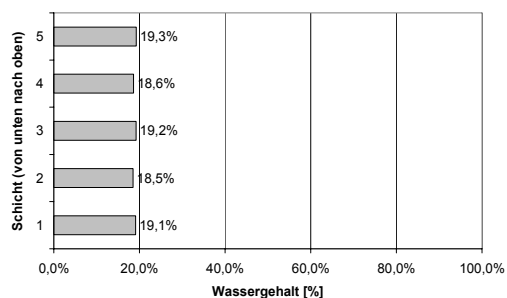
S-6-VO(-20)- 2 [1,95 %]



S-6-VO(-20)- 3 [1,59 %]

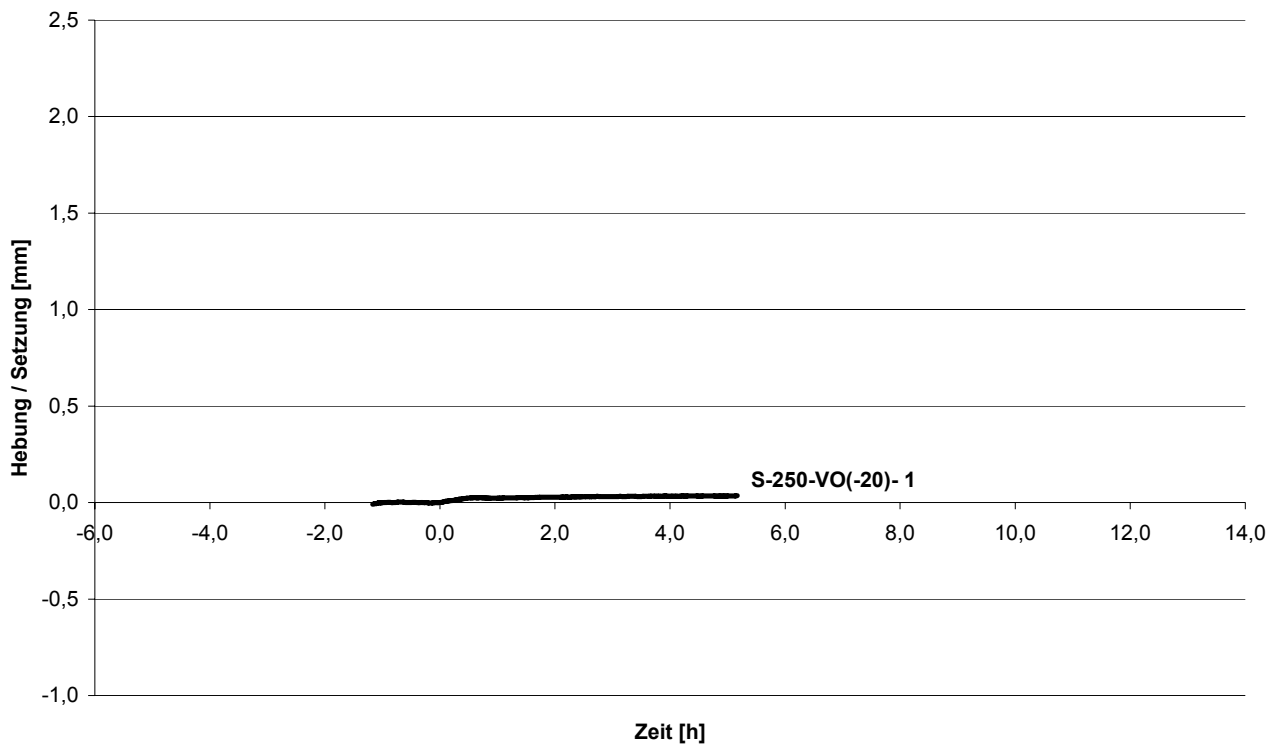


S-6-VO(-20)- 4 [1,31 %]



**Volumetrische Hebung (-20)**

Einbaudichte: 1,97 g/cm<sup>3</sup>  
Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %  
Wassergehalt bei Frostbeginn -%



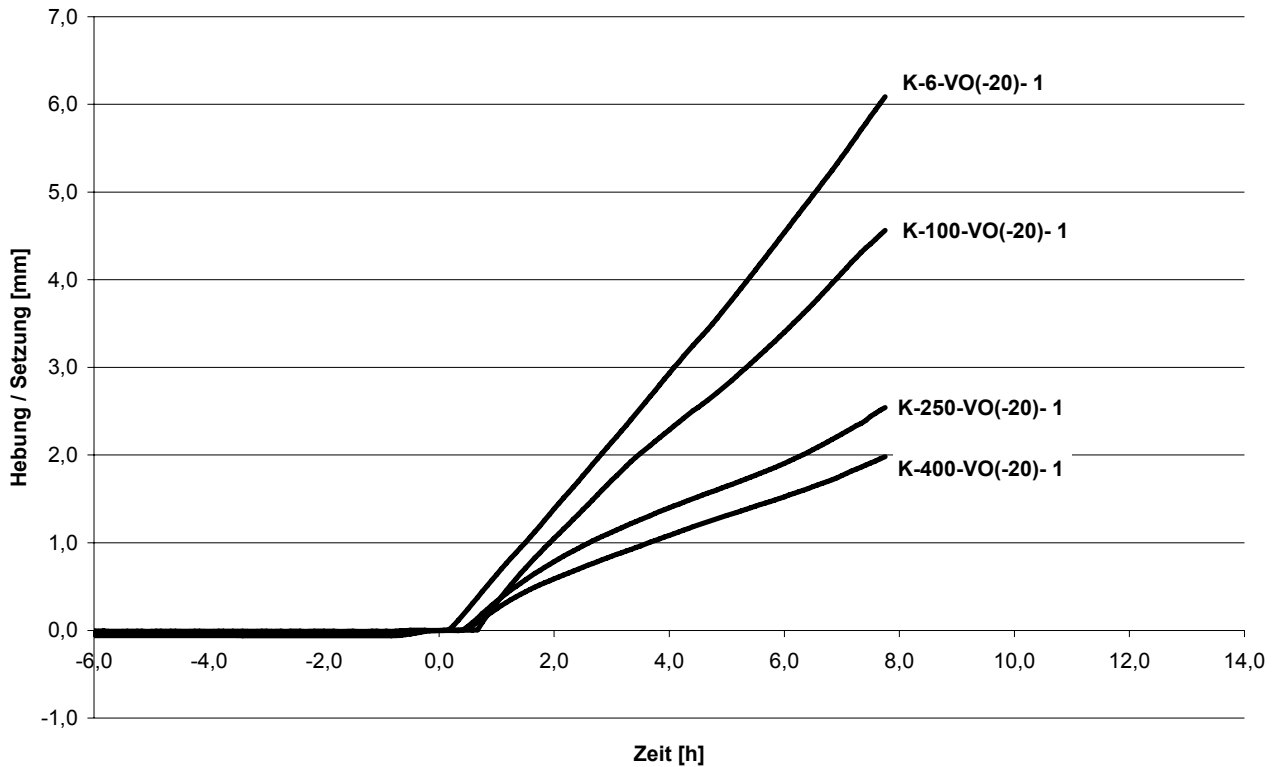
S-250-VO(-20)- 1 [0,05 %]

**Volumetrische Hebung (-20)**

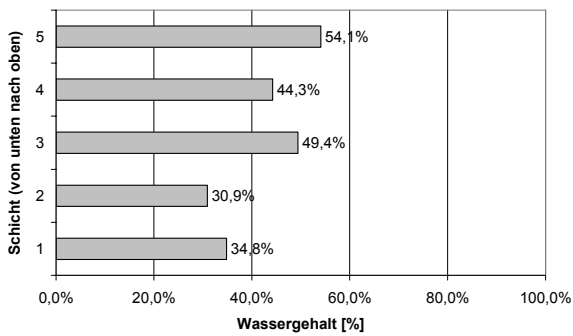
Einbaudichte: 1,70 bis 1,71 g/cm<sup>3</sup>

Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %

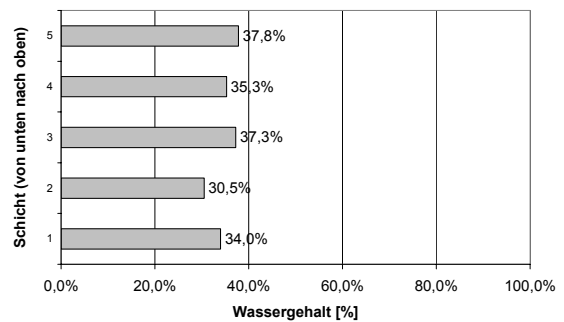
Wassergehalt bei Frostbeginn 32,0 bis 36,2 %



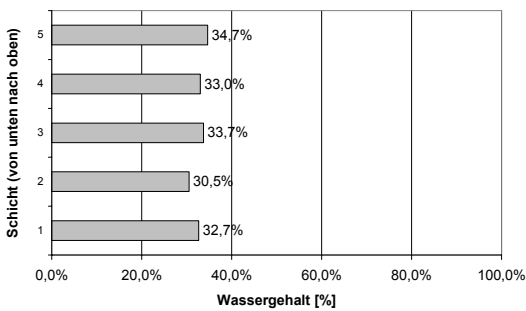
K-6-VO(-20)- 1 [9,74 %]



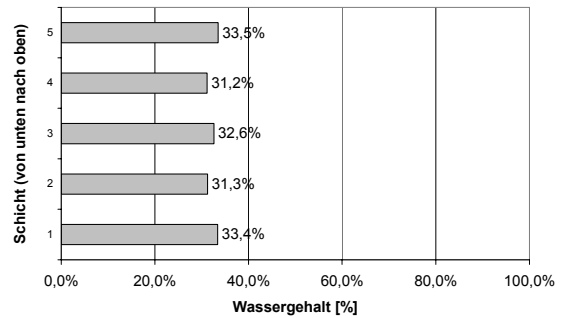
K-100-VO(-20)- 1 [7,03 %]



K-250-VO(-20)- 1 [3,90 %]

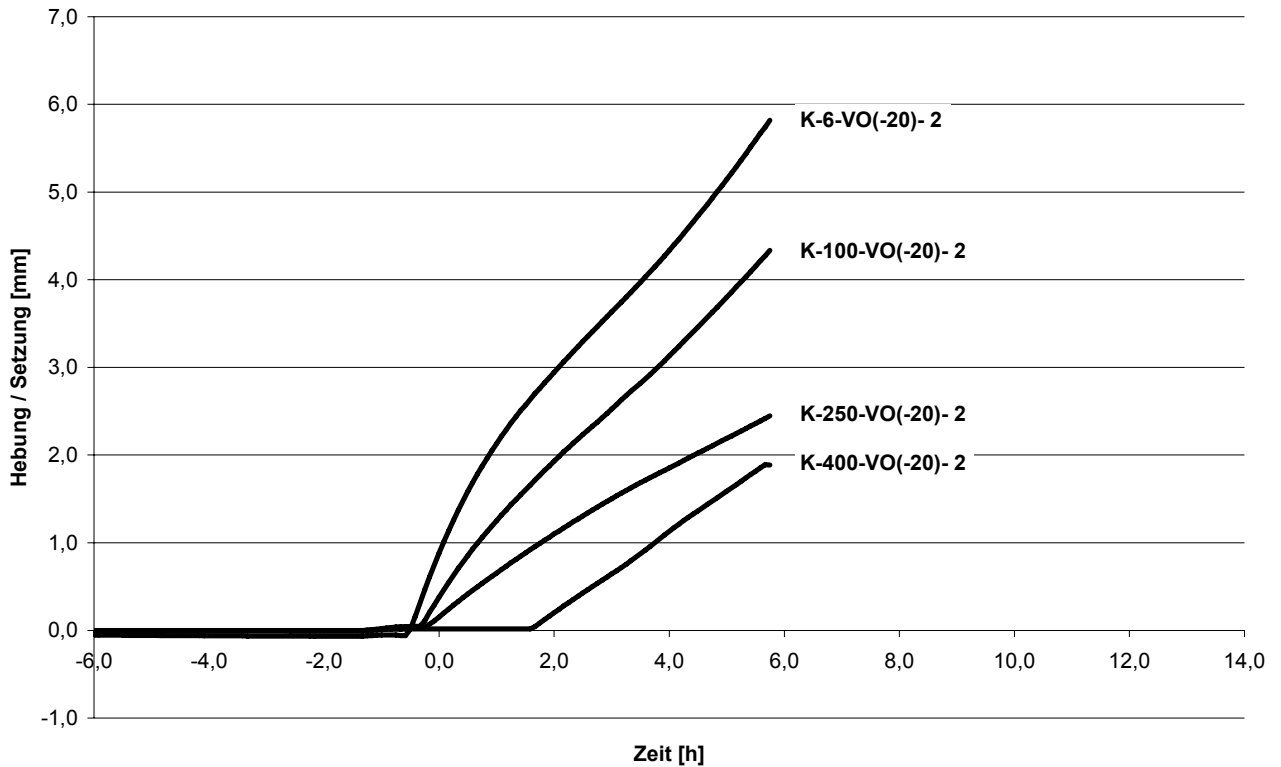


K-400-VO(-20)- 1 [3,02%]

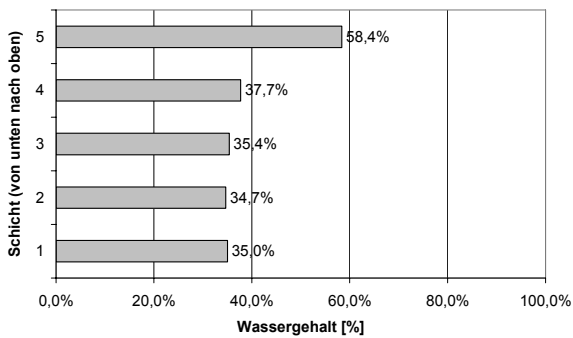


**Volumetrische Hebung (-20)**

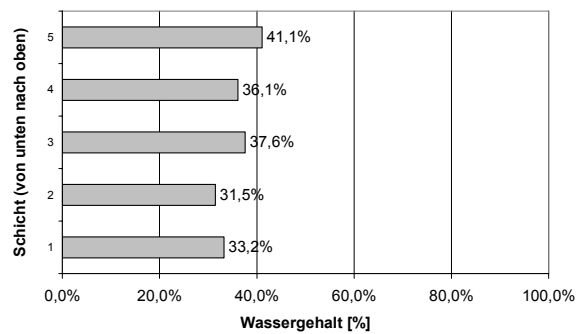
Einbaudichte: 1,69 bis 1,71 g/cm<sup>3</sup>  
 Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %  
 Wassergehalt bei Frostbeginn 32,4 bis 36,8 %



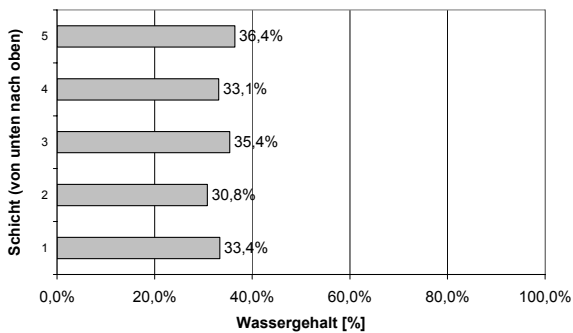
K-6-VO(-20)- 2 [10,40%]



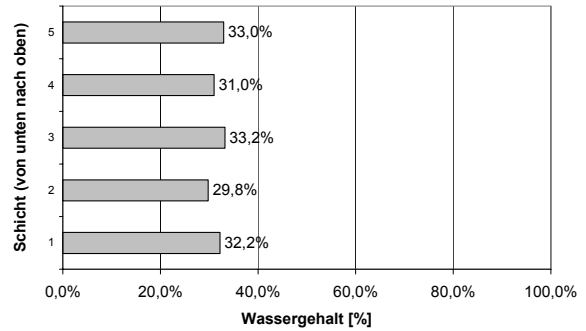
K-100-VO(-20)- 2 [7,51 %]



K-250-VO(-20)- 2 [4,60 %]

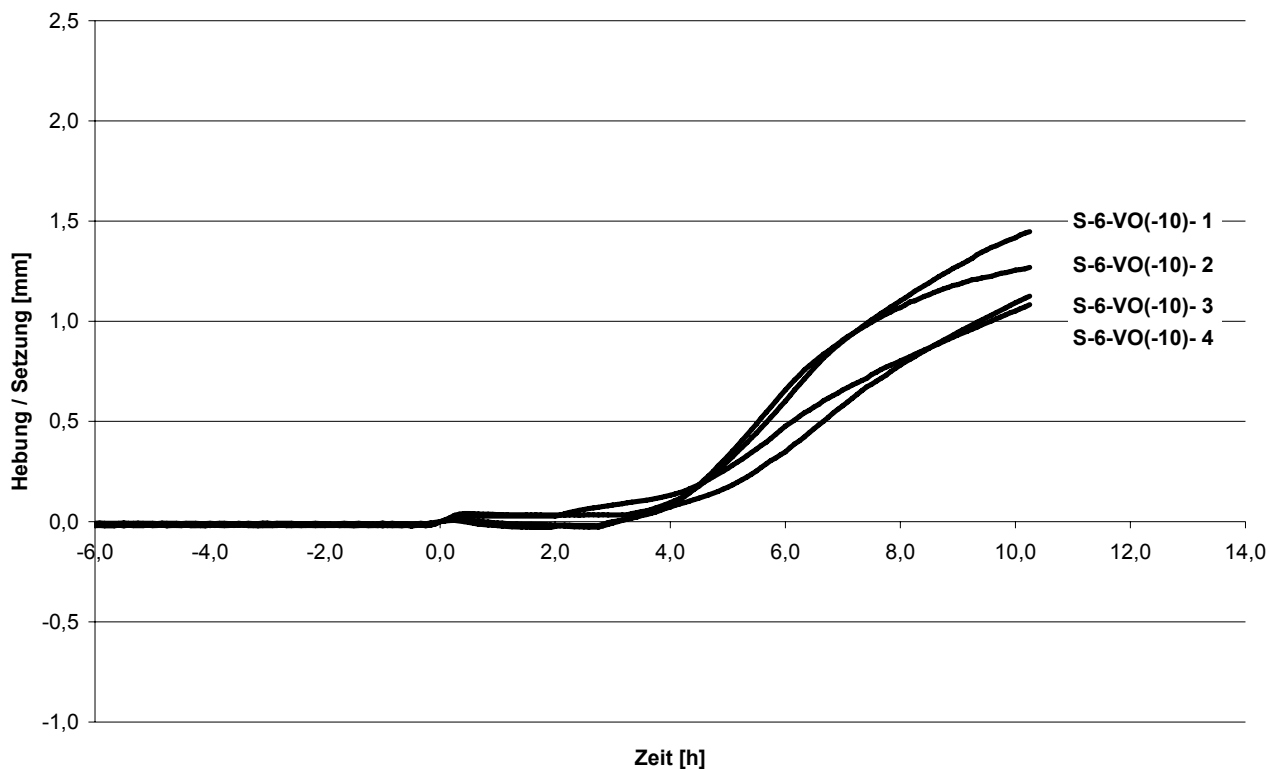


K-400-VO(-20)- 2 [3,56%]

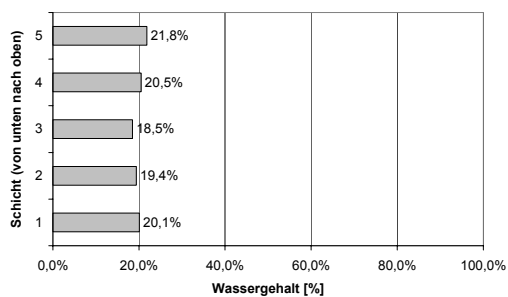


**Volumetrische Hebung (-10)**

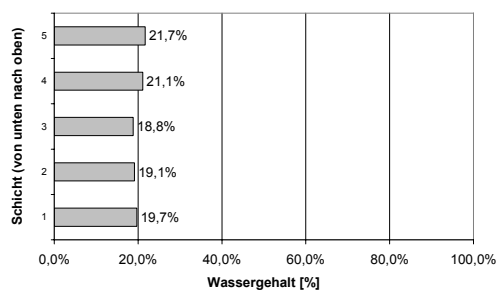
Einbaudichte: 1,94 bis 1,97 g/cm<sup>3</sup>  
 Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %  
 Wassergehalt bei Frostbeginn -%



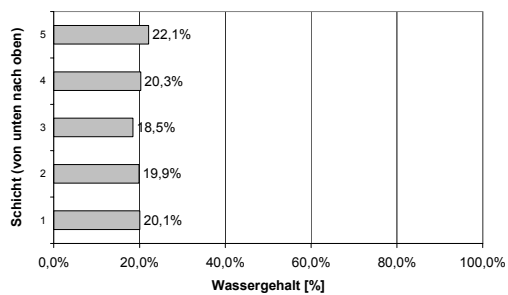
S-6-VO(-10)-1 [4,71 %]



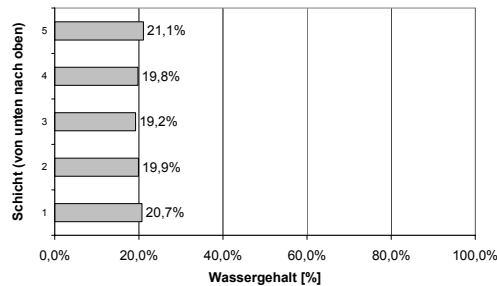
S-6-VO(-10)-2 [4,63 %]



S-6-VO(-10)-3 [4,06 %]



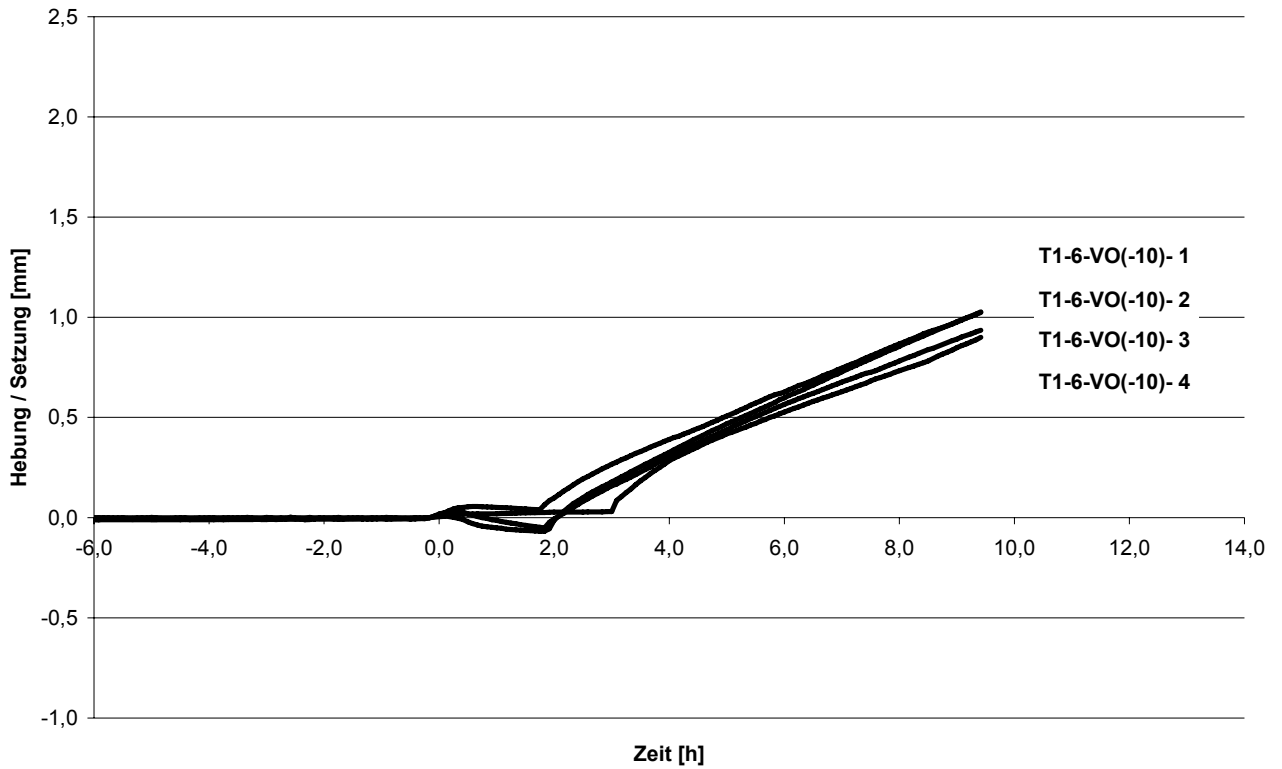
S-6-VO(-10)-4 [3,29 %]



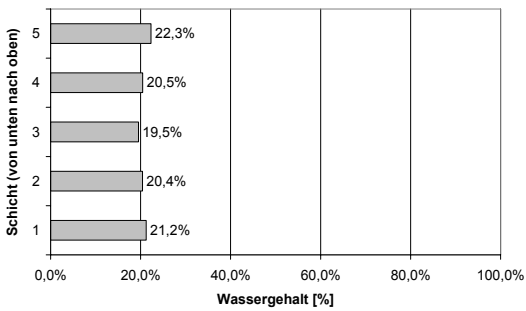


**Volumetrische Hebung (-10)**

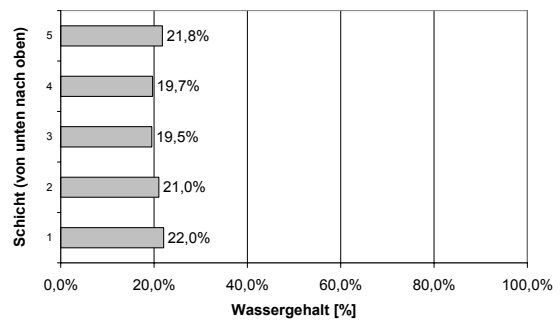
Einbaudichte: 2,06 bis 2,07 g/cm<sup>3</sup>  
 Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %  
 Wassergehalt bei Frostbeginn 22,4 bis 20,2 %



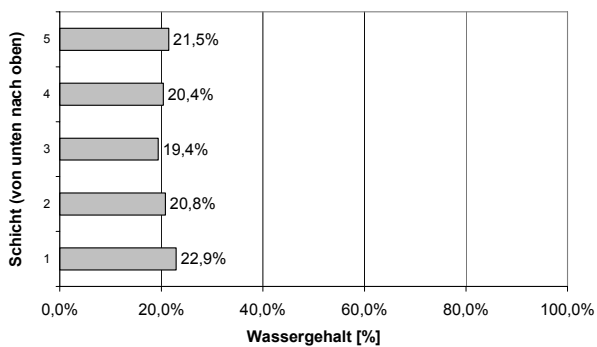
T1-6-VO(-20)- 1 [2,50 %]



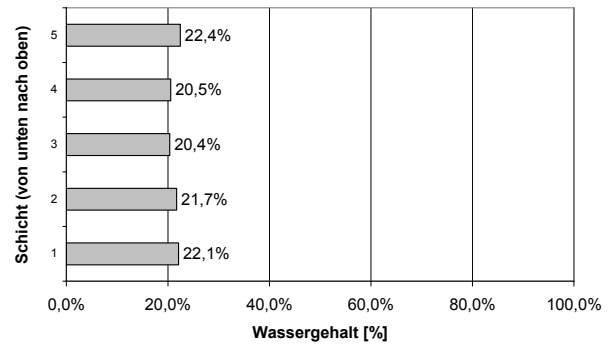
T1-6-VO(-20)- 1 [2,41 %]



T1-6-VO(-20)- 1 [2,24 %]

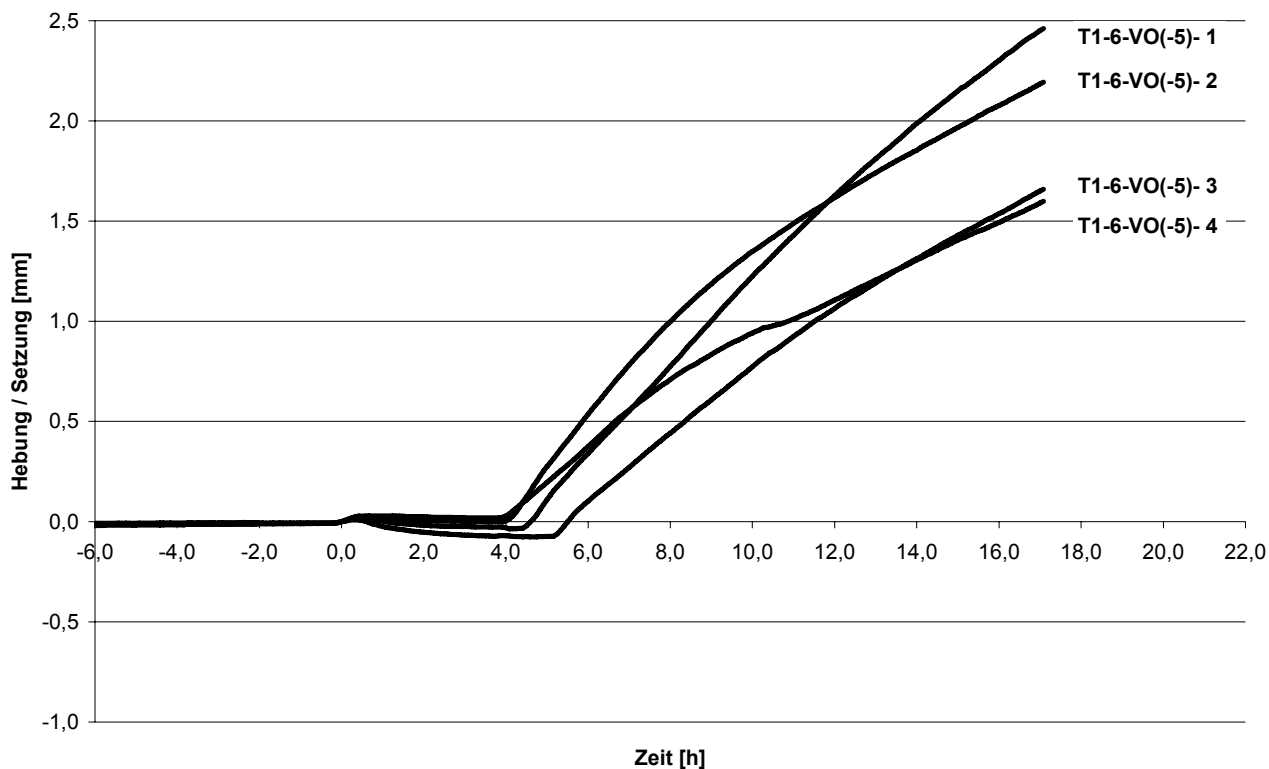


T1-6-VO(-20)- 1 [2,05 %]

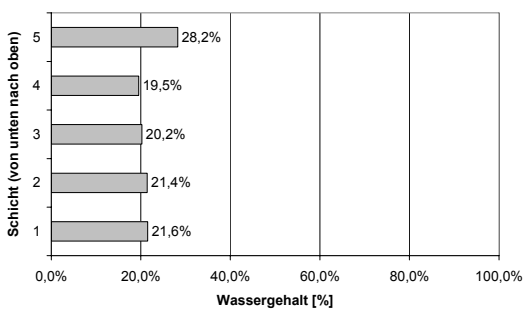


**Volumetrische Hebung (-5)**

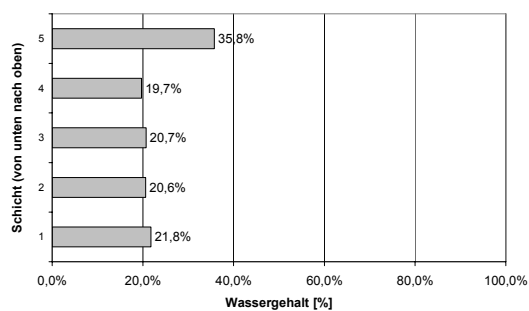
Einbaudichte: 2,03 bis 2,06 g/cm<sup>3</sup>  
 Wassergehalt nach Probenherstellung: 20 %  
 Wassergehalt bei Frostbeginn 21,3 bis 19,6 %



T1-6-VO(-20)- 1 [16,42 %]



T1-6-VO(-20)- 1 [14,98 %]



## 1 Vorgang

Ergänzend zu den Frosthebungsversuchen mit einer Probenhöhe von 12,5 cm wurden Tastversuche an 25,0 cm hohen Proben durchgeführt, um den Einfluss der Probenhöhe auf das Hebehungsverhalten zu untersuchen.

Nach den in Kapitel 5 entwickelten Modell besitzen die Durchlässigkeitseigenschaften bzw. allgemeiner die Filterwiderstände des Bodens einen maßgebenden Einfluss auf die Menge des strömenden Porenwassers und damit letztlich auf das Maß der Frosthebungen. Dabei wird davon ausgegangen, dass Strömungsvorgänge innerhalb des ungefrorenen Teils der untersuchten Bodenproben mit dem Gesetz nach Darcy beschrieben werden können.

Da bisher nur Versuche an 12,5 cm hohen Proben durchgeführt wurden, konnte der Einfluss der Probenhöhe auf die Frosthebungen, so wie er im Rechenmodell postuliert wird, noch nicht versuchstechnisch validiert werden. Daher wurden ergänzend Tastversuche an 25 cm hohen Proben durchgeführt. Die Versuchsdurchführung, die gewonnenen Ergebnisse und deren Bewertung werden nachfolgend beschrieben.

## 2 Probenherstellung und Versuchsdurchführung

Zur Probenherstellung wurde der in Abbildung A3.2-1 dargestellte Messingzylinder verwendet, dessen Außenseiten aus drei Winkelsegmenten mit  $120^\circ$  Öffnungsweite bestehen. Abbildung A3.2-1 zeigt den Probenbehälter nach der Herstellung einer Kaolinprobe und nachdem das erste Winkelsegment entfernt wurde. Wie auch bei den Versuchen mit 12,5 m hohen Proben wurde die Probe in einen vorgefetteten Kunststoffzylinder mit gleichem Durchmesser umgesetzt und in den 2-Kammer-Klimaschrank eingebaut. Damit die über die gesamte Rückseite des Klimaschranks verlaufenden Zuluft- und Abluftgitter nicht verdeckt wurden, konnten nur zwei 25 cm hohe Proben gleichzeitig getestet werden.

Es wurden zwei Versuchsreihen an einem Kaolin unter einer Auflast von  $6 \text{ kN/m}^2$  durchgeführt. In der ersten Versuchsreihe (Varia\_Vol) wurden die Proben 6 Stunden bei  $T_o = -15^\circ \text{C}$  gefroren. In der zweiten Versuchsreihe (Varia\_EI) wurden die Proben bei  $T_o = -10^\circ \text{C}$  gefroren und das Wasserbad gleichzeitig bei  $T_U = +10^\circ \text{C}$  eingeregelt.



Abb. A3.2-1: Probenherstellung mit Kaolin K

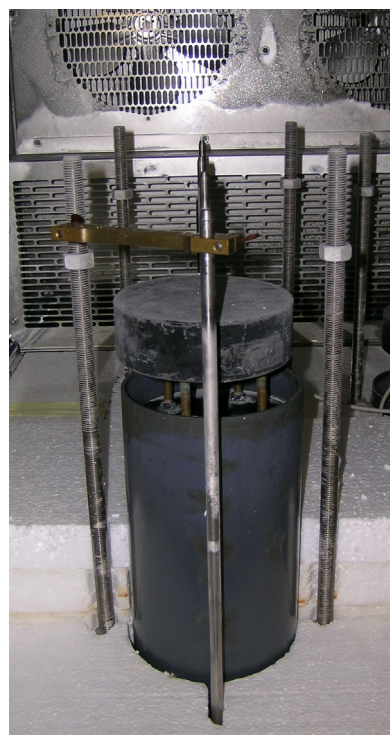


Abb. A3.2-2: Probe mit teilweise eingebauter Wärmedämmung

### 3 Versuchsergebnisse

#### 3.1 Versuchsreihe zur Untersuchung der volumetrischen Hebung

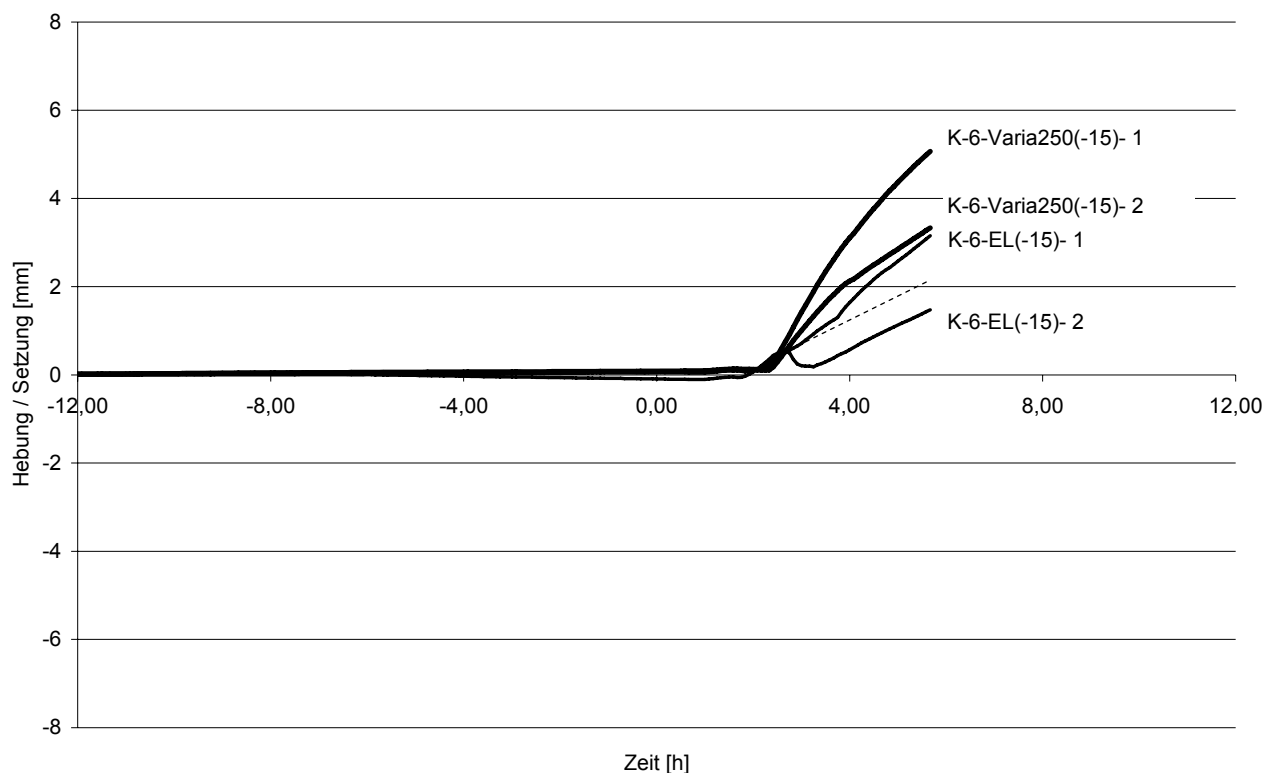


Abb. A3.3-1: Hebungsverlauf der Versuchsserie Varia\_Vol

Die Versuchsreihe zeigte, dass die 250 mm hohen Proben bei gleicher Gefriertemperatur höhere volumetrische Hebungen aufwiesen als die 125 mm hohen Proben. Eine 125 mm hohe Probe zeigte kurz nach Eintritt der ersten Frosthebungen Setzungen von ca. 0,5 mm, deren Ursache nicht abschließend geklärt werden konnte. Die zur Kontrolle befestigten mechanischen Messuhren zeigten ein Verkappen der Probenoberseite an. Die gestrichelte Linie über der Messkurve K-6-EL(-15)-2 gibt den Hebungsverlauf an, falls kein Verkappen stattgefunden hätte. Eine Quantifizierung der Hebungunterschiede wird aufgrund der wenigen Versuche für nicht zielführend erachtet.

### 3.2 Versuchsreihe zur Untersuchung der Eislinnenbildung

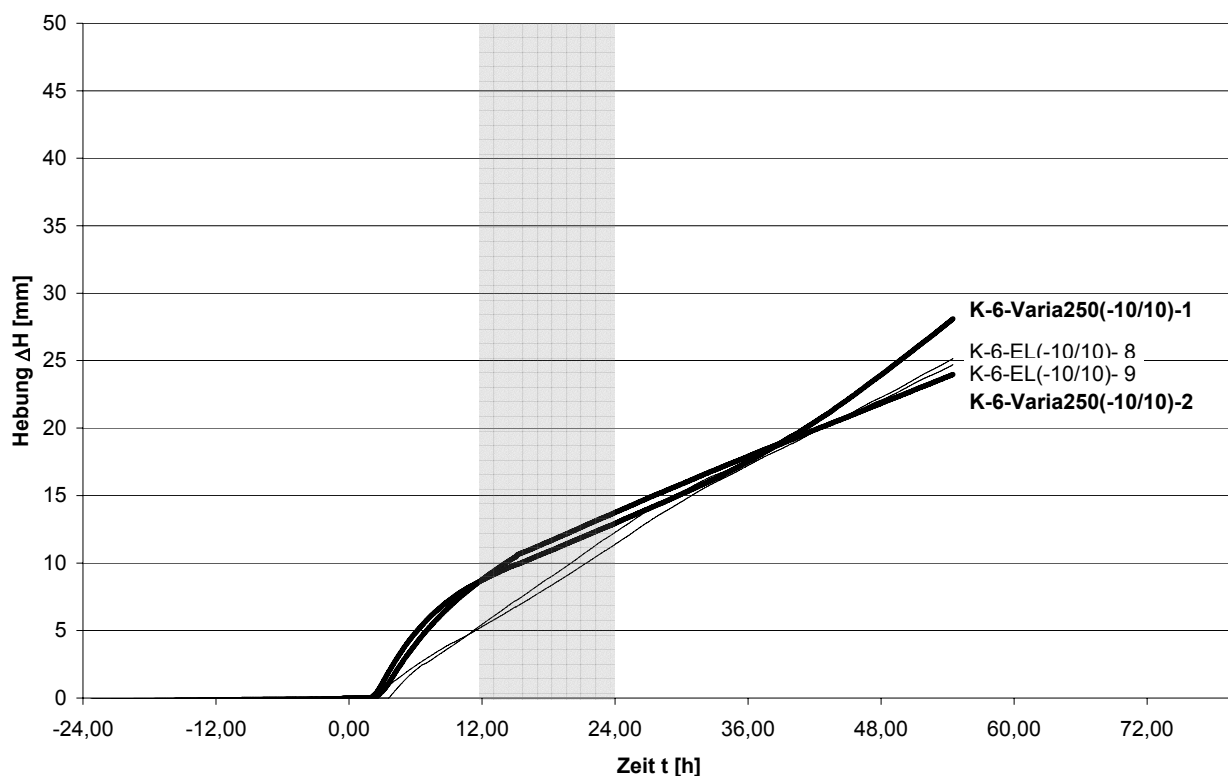


Abb. A3.3-2: Hebungsverlauf der Versuchsserie Varia\_EL

Die Eislinnenbildung der 250 mm hohen Proben war bei gleicher Gefrier- und Wasserbadtemperatur geringer ausgeprägt als bei den 125 mm hohen Proben. Im Einzelnen wurden folgende Hebungsgeschwindigkeiten gemessen:

Frostdauer	Mittelwert Hebungsgeschwindigkeit	
	Probenhöhe 250 mm	Mittelwert der Proben 125 mm
0,00 h bis 12,00 h	<b>17,4 mm/d</b>	10,7 mm/d
12,00 h bis 24,00 h	9,2 mm/d	<b>12,9 mm/d</b>

Im Versuch zeigten die 250 mm hohen Proben nach Beginn der Frosteintrittung die größeren Frosthebungen, während im Zeitintervall von 12 h bis 24 h nach Frosteintritt die 125 mm hohen Proben die höheren Hebungsgeschwindigkeiten aufwiesen.

Vergleicht man die Hebungsgeschwindigkeiten der 250 mm hohen Proben bei Versuchen mit einem Temperaturgradienten von (20 K / 250 mm) mit den Hebungsgeschwindigkeiten, die bei Versuchen an 125 mm hohen Proben bei einem gleichen Temperaturgradienten von (10 K / 125 mm) festgestellt wurden, so zeigt sich, dass die höheren Proben tendenziell geringere Hebungsgeschwindigkeiten aufwiesen.

schwindigkeiten zeigen. Diese Beobachtung kann jedoch aufgrund der wenigen Einzelversuche nicht statistisch abgesichert werden.

## 4 Rechnerische Abschätzung des Einflusses der Probenhöhe

### 4.1 Strömungsvorgänge im ungefrorenen Boden

Den nachfolgenden Betrachtungen werden an einem Bodenelement der Höhe  $h$  zu Grunde gelegt, an dessen Oberseite der Wasser mit dem Überdruck  $\Delta u$  einströmt und an dessen Unterseite drucklos ausströmen kann. Die Mantelflächen sollen wasserundurchlässig sein, so dass sich eine eindimensionale Strömung von der Oberseite der Probe zur Unterseite ausbildet. Die pro Zeiteinheit  $dt$  durch eine infinitesimal kleine Fläche  $dA$  strömende Wassermenge, bzw. -säule berechnet sich zu:

$$H_{\text{Darcy}} = k \cdot i \cdot dt = k \cdot \frac{\Delta u}{h} \cdot dt \quad \text{mit}$$

$H_{\text{Darcy}}$ :	Strömungsmenge, Höhe der Wassersäule, die pro Zeiteinheit $dt$ abströmt.
$k$ :	Durchlässigkeit des Bodens
$i$ :	hydraulischer Gradient
$dt$ :	Zeitinkrement
$h$ :	Länge des Strömungswegs, i.A. Abstand der Gefrierfront zur Drainage
$\Delta u$ :	Porenwasserüberdruck

Aus der Gleichung geht hervor, dass die Strömungsmenge proportional zum Verhältnis aus Durchlässigkeit zur Probenhöhe ist. Beispielsweise bleibt die Strömungsmenge rechnerisch konstant, wenn gleichzeitig die Probenhöhe verdoppelt und die Durchlässigkeit halbiert wird.

Im Hinblick auf die nachfolgenden Betrachtungen ist lediglich notwendig, dass durch einen Porenwasserüberdruck eine Strömung in Gang gesetzt wird. Die Ursache des Überdrucks (Frostspengdruck, Unterdruck infolge Eislinnenbildung, hydrostatischer Druck) ist dabei nicht von Bedeutung.

## 5 Strömungsvorgänge im teilgefrorenen Boden

Aus Abbildung 2-5 geht hervor, dass das Weg- / bzw. Zuströmen des Porenwassers von / zur Gefrierfront durch den ungefrorenen Boden und die teilweise gefrorene Zwischenzone erfolgen muss. Dies entspricht einer Strömung durch in Serie geschaltete hydraulische Widerstände für den ungefrorenen und den teilgefrorenen Boden. Geht man nun davon aus, dass bei einem Versuch zur Eislinnenbildung stationäre Temperaturverhältnisse und ein stationäres Hebungsverhalten vorliegen, so folgt aus der Kontinuitätsbedingung, dass auch die Menge des von der Zwischenzone in den ungefrorenen Boden und umgekehrt strömenden Wassers konstant bleibt. Man kann also den

Teilbereich des ungefrorenen Bodens für sich betrachten und annehmen, dass zwischen der Ober- und Unterseite ein Druckgefälle herrscht, durch welches die Wasserströmung bewirkt wird. Die Strömungsmenge lässt sich nach dem eingangs zitierten und unten nochmals aufgeführten Gesetz von Darcy ermitteln.

$$H_{\text{Darcy}} = k \cdot i \cdot dt = k \cdot \frac{\Delta u}{h} \cdot dt$$

Die Fließgeschwindigkeit und damit die Strömungsmenge ist direkt proportional zu Durchlässigkeit  $k$  und indirekt proportional zur Länge des Strömungsweges  $h$ .

Für die nachfolgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass der Porenwasserdruck  $\Delta u$  für den betrachteten Zeitraum stationär ist. Diese Annahme ist bei der Eislinnenbildung gerechtfertigt, sobald ein stationärer Hebungsverlauf erreicht ist. Bei der volumetrischen Hebung sind zumindest keine Anhaltspunkte bekannt, welche gegen diese Annahme sprechen.

Die Strömungsmenge bleibt rechnerisch konstant, wenn beispielsweise die Durchlässigkeit  $k$  verdoppelt und gleichzeitig die Länge des Sickerwegs  $h$  halbiert würden.

Im Versuch wurde die Probenhöhen von 12,5 cm auf 25,0 cm verdoppelt. Die Durchlässigkeiten der Kaolinproben wurden bei früheren Untersuchungen mit rund  $4 \cdot 10^{-8}$  m/s ermittelt. Um die Abhängigkeit der Strömungsmenge von der Probenhöhe abgesichert ermitteln zu können müssten Proben mit Durchlässigkeiten von  $2 \cdot 10^{-8}$  m/s abgesichert hergestellt und bestimmt werden können. Während der Herstellung der Proben kann lediglich die eingebaute Masse des mit einem bestimmten Wassergehalt eingestellten aufbereiteten Kaolins bestimmt werden. Dies erlaubt nur indirekte Rückschlüsse auf die Dichte der Bodenprobe. Hinzu kommt, dass die unteren Schichten der im Proctorgerät hergestellten Proben tendenziell höher verdichtet sind und damit eine kleinere Durchlässigkeit besitzen als die zuletzt eingebauten oberen Schichten. Es ist daher davon auszugehen, dass die Durchlässigkeit innerhalb der Probe Schwankungen unterliegt und diese Schwankungen bei unterschiedlich hohen Proben auch unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Derzeit erscheint weder die kontrollierte Herstellung von Proben mit den notwendigen geringen Toleranzen noch die abgesicherte Bestimmung ihrer Durchlässigkeit mit den zur Verfügung stehenden Geräten möglich.

Geht man davon aus, dass Abweichungen in der Durchlässigkeit von etwa einer halben Größenordnung, d.h. Faktor 5 reproduzierbar hergestellt werden könnten, dann müsste, auch die Probenhöhe verfünffacht werden, damit signifikante Änderungen der Frosthebungen zu erwarten wären. Dies würde bei einer Ausgangshöhe von 12,5 cm Probenhöhen von über 60 cm bedingen, die im vorhandenen Klimaschrank aber nicht eingebaut werden können.

## 6 Zusammenfassung

Nach derzeitigem Kenntnisstand hängt das Maß von Frosthebungen eines Bodens stark von dessen Durchlässigkeit bzw. den Filterwiderständen ab. Der Filterwiderstand wird dabei auch von der Länge des Strömungsweges und damit letztlich von der Probenhöhe bestimmt.



Um den Einfluss der Probenhöhe auf die Frosthebungen zu untersuchen, wurden ergänzend zu den bereits durchgeführten Frosthebungsversuchen an 12,5 cm hohen Proben Versuche an 25 cm hohen Proben durchgeführt. Hierfür waren Weiterentwicklungen bei der Probenherstellung und dem Probeneinbau in den Klimaschrank erforderlich.

In den durchgeführten Versuchen waren bei den 25 cm hohen Proben die volumetrischen Hebungen größer und die Hebungen infolge Eislinsenbildung kleiner als bei den 12,5 cm hohen Proben. Allerdings zeigten die Ergebnisse gleichartig hergestellter Proben auch große Abweichungen untereinander, so dass eine abgesicherte quantitative Beurteilung der Hebungen derzeit leider nicht möglich ist. Theoretische Betrachtungen kamen zu dem Ergebnis, dass mit der derzeit zur Verfügung stehenden Versuchstechnik und den möglichen Probenabmessungen wohl keine signifikanten Unterschiede herausgearbeitet werden können.



Bild 1: Flur im ersten Kellergeschoss des Rathauses





Bild 2: Blick in den Kriechgang unterhalb des ersten Kellergeschosses, Querachse Süd



Bild 3: Blick in den Kriechgang unterhalb des ersten Kellergeschosses, Hauptachse





Bild 4: Montage einer Messstation



Bild 5: Ansicht einer befüllten Messstation





Bild 6: Referenzstation mit Erweiterung zum Umwälzbetrieb

**Schlauchwaage Rathaus**  
Lage der Messpunkte im 2. Kellergeschoss

R: Referenzstation  
LS: Messaufnehmer im Lichtschacht

Querachse Nord

Querachse Süd

Hauptachse

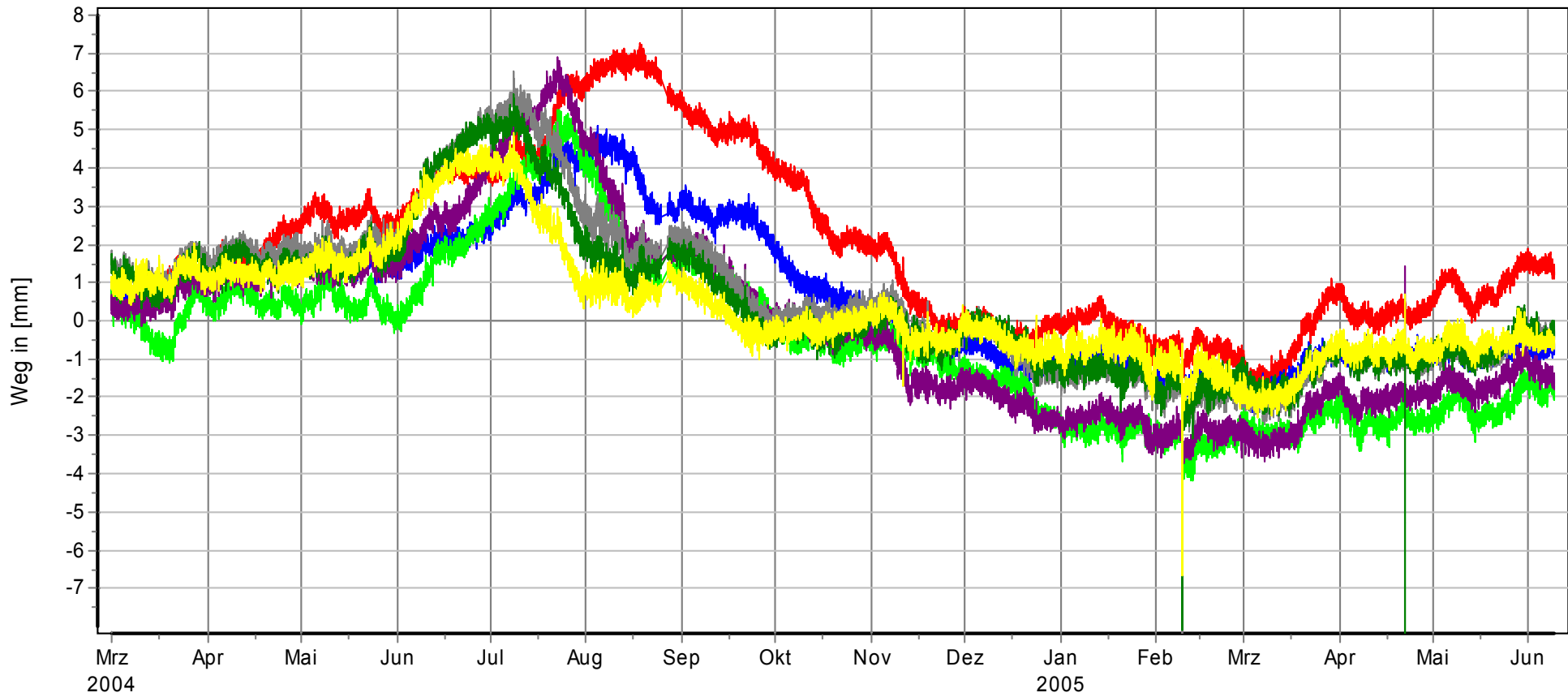




Projekt: Marienplatz

Ausw.: 1\_Zeit Hauptachse  
Stand: 22.06.05

**Hauptachse: Zeitverlauf**

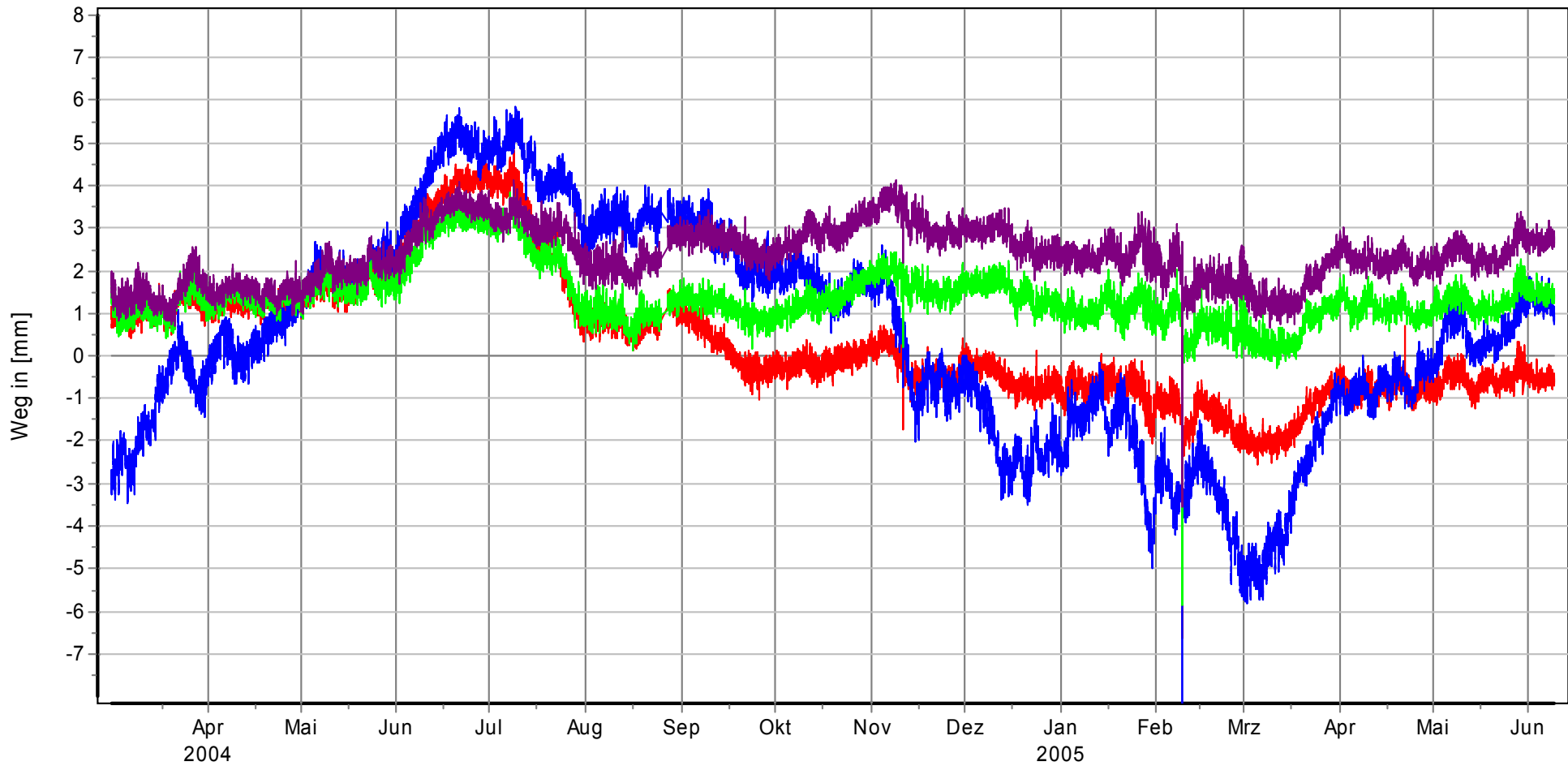


Kurve	Messstelle	Messart	MQ	Lage X	Lage Y	Höhe	Zeitraum
—	SR03					0,00 mNN	21.11.03 13:30:06 - 09.06.05 06:00:06
—	SR04					0,00 mNN	21.11.03 13:30:06 - 09.06.05 06:00:06
—	SR05					0,00 mNN	21.11.03 13:30:06 - 09.06.05 06:00:06
—	SR06					0,00 mNN	21.11.03 13:30:06 - 09.06.05 06:00:06
—	SR07					0,00 mNN	21.11.03 13:30:06 - 09.06.05 06:00:06
—	SR08					0,00 mNN	21.11.03 13:30:06 - 09.06.05 06:00:06
—	SR09					0,00 mNN	21.11.03 13:30:06 - 09.06.05 06:00:06

Projekt: Marienplatz

Ausw.: 2\_Zeit Querachse Nord  
Stand: 20.06.05

**Querachse Nord: Zeitverlauf**



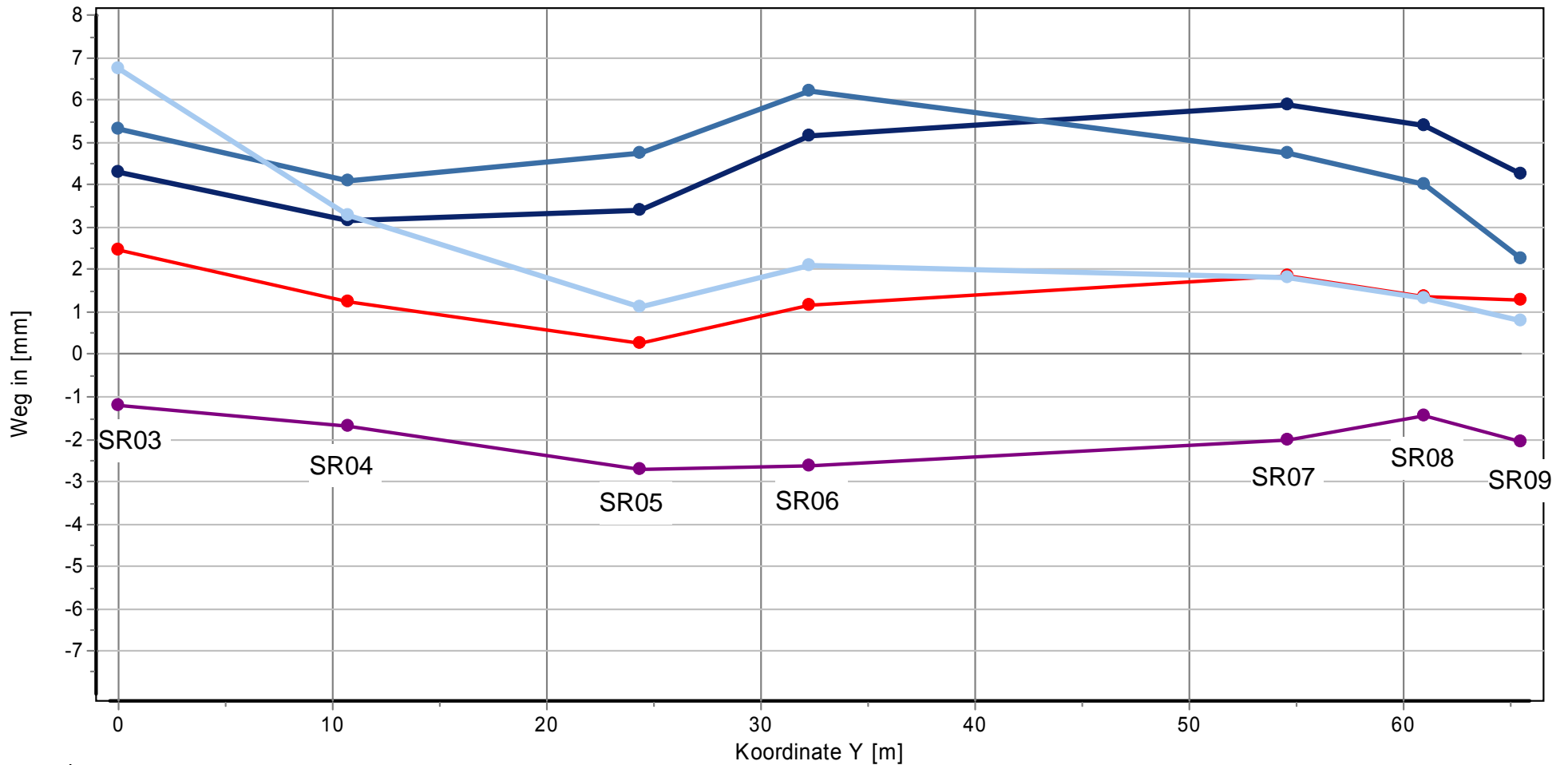
Kurve	Messstelle	Messart	MQ	Lage X	Lage Y	Höhe	Zeitraum
SR09						0,00 mNN	21.11.03 13:30:06 - 09.06.05 06:00:06
SR10						0,00 mNN	21.11.03 13:30:06 - 09.06.05 06:00:06
SR11						0,00 mNN	21.11.03 13:30:06 - 09.06.05 06:00:06
SR12						0,00 mNN	21.11.03 13:30:06 - 09.06.05 06:00:06



Projekt: Marienplatz

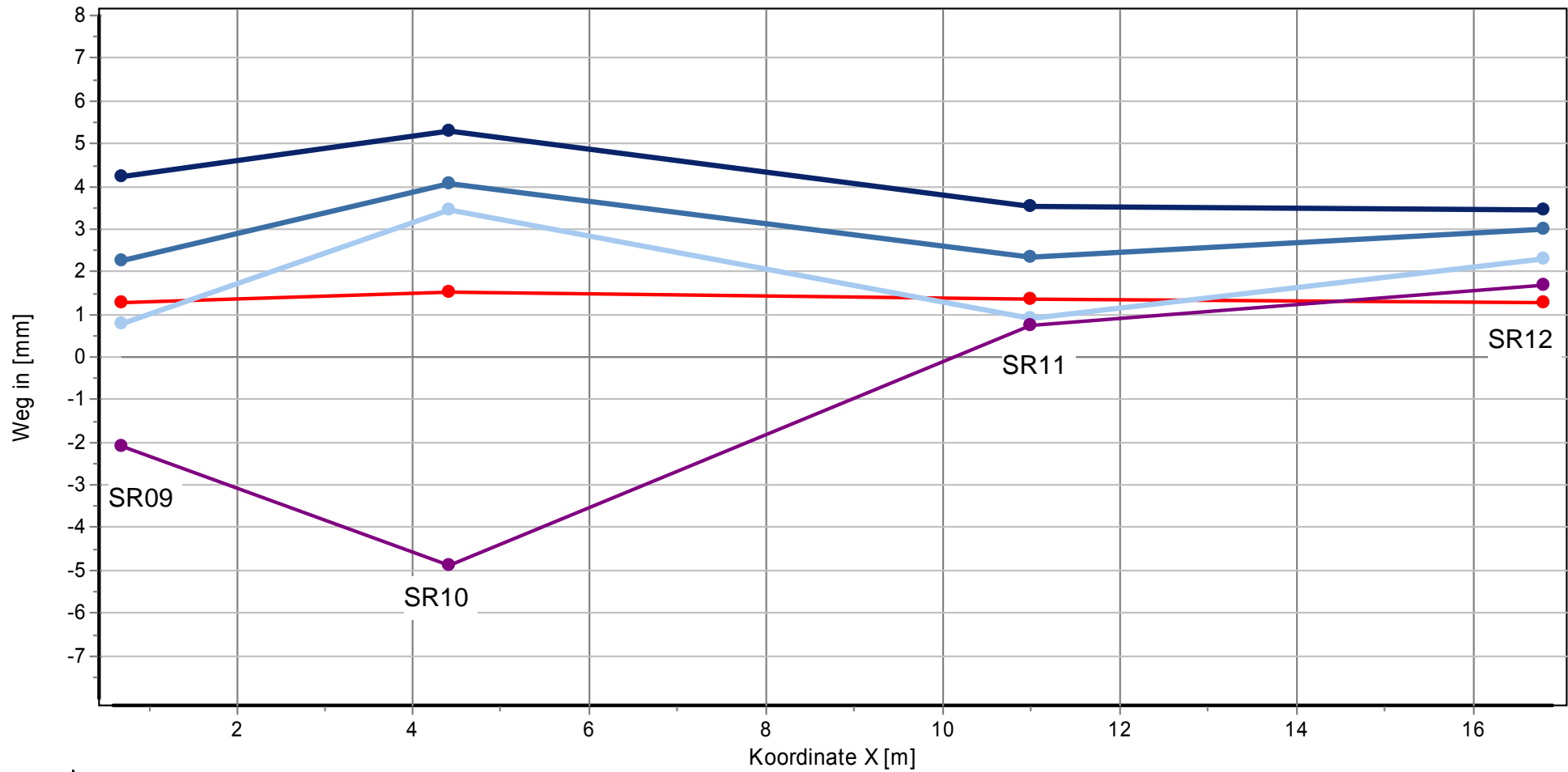
Ausw.: 4\_Lage Hauptachse  
Stand: 22.06.05

**Hauptachse: Entwicklung der Längsmulde**



Kurve	Zeitpunkt
<span style="color: red;">●</span>	01.05.2004 01:00:00
<span style="color: darkblue;">●</span>	08.07.2004 01:00:00
<span style="color: mediumslateblue;">●</span>	22.07.2004 01:00:00
<span style="color: lightblue;">●</span>	20.08.2004 01:00:00
<span style="color: purple;">●</span>	01.03.2005 01:00:00

**Querachse Nord: Entwicklung der Quermulde**



Kurve	Zeitpunkt
<span style="color: red;">●</span>	01.05.2004 01:00:00
<span style="color: darkblue;">●</span>	08.07.2004 01:00:00
<span style="color: blue;">●</span>	22.07.2004 01:00:00
<span style="color: lightblue;">●</span>	20.08.2004 01:00:00
<span style="color: purple;">●</span>	01.03.2005 01:00:00