Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 123/124 (1944)
Heft: 16

Artikel: Die Eislinsenbildung im Strassenuntergrund
Autor: Ruckli, Rob.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-54034

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

vier gleicher Einheiten. Die Gesamtpreisfaktoren für die ganze Anlage stellen sich gemäss Tabelle 3 wie folgt:

Tabelle 3

Vorschlag A, d. h. Anlage mit 1 Pumpe I, Preisfaktor 4,22
Vorschlag B, d. h. Anlage mit 2 Pumpen II, Preisfaktor 5,4
Vorschlag C, d. h. Anlage mit 4 Pumpen III, Preisfaktor 4

Bezüglich des günstigsten Wirkungsgrades über den ganzen Förderbereich der Rohrkennlinie ist der Vorschlag C, also mit vier Pumpen III am besten (siehe Abb. 8); auch hinsichtlich des Preises ist er den Vorschlägen A und B überlegen. Vorschlag A, d. h. mit nur einer Pumpe I (Abb. 9), fällt hier ohne weiteres weg. Der Preisfaktor ist zwar wesentlich günstiger als der des Vorschlages B, aber der Wirkungsgrad, bezogen auf die gegebene Rohrkennlinie, ist zu schlecht. Ergibt dagegen die Häufigkeitskurve die weitaus längste Betriebszeit mit Fördermengen zwischen etwa 155 bis 240 l/s, so entspricht der Vorschlag B, d. h. mit zwei Pumpen II hinsichtlich der Betriebskosten ungefähr dem Vorschlag A; indessen verhalten sich die Anschaffungskosten wie 5,4 : 4,22, d. h. die zwei Pumpen II sind teurer. Ergibt jedoch die Häufigkeitskurve eine weit überwiegende Betriebszeit zwischen den Fördermengen $Q = 70$ bis 155 l/s, so kann der Vorschlag B mit zwei Pumpen II am vorteilhaftesten sein (Abb. 10). Für eine Häufigkeitskurve, die den vorwiegenden Teil der Betriebszeit bei den Verbrauchsmengen $Q = 0$ bis $Q = 70$ l/s und $Q = 155$ bis $Q = 240$ l/s aufweist, ist der Vorschlag C mit vier Pumpen III am günstigsten. Allerdings muss die endgültige Wahl auf Grund einer genauen Wirtschaftlichkeitsrechnung erfolgen, bei der die Erstellungskosten, Abschreibungen, Zinsen usw. der ganzen Anlage berücksichtigt werden müssen.

Es ergibt sich also auch aus diesem Beispiel, dass bei einem Pumpwerk nicht die Höhe der Pumpenwirkungsgrade ausschlaggebend ist, sondern nur die jener Wirkungsgradwerte, die sich auf die Rohrkennlinie der Anlage, den Verlauf der verschiedenen Pumpenkennlinien, die gewählten oder möglichen Pumpenkombinationen, die Regelungsmöglichkeiten und die Häufigkeitskurven beziehen.

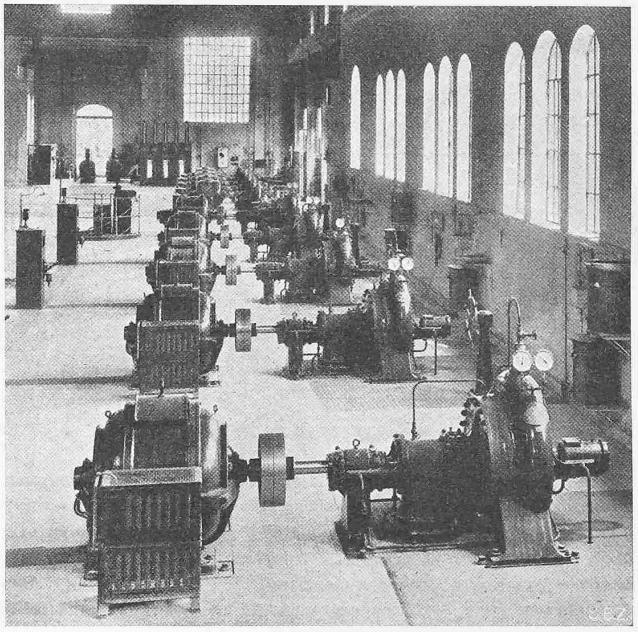

Abb. 11. Wasserversorgungsanlage einer grossen Stadt in Frankreich Im Vordergrund fünf Mitteldruck-Sulzer-Zentrifugalpumpen von je 355 l/s Fördermenge auf 62 m Förderhöhe

Die Abb. 11 zeigt eine Anlage, die mit einer grösseren Anzahl gleicher Sulzer-Pumpen ausgerüstet ist. Bei Anlagen solcher Grösse und Ausdehnung ist es wichtig, nicht nur für den ersten Ausbau eine günstige Pumpenkombination zu wählen. Massgebend ist stets eine der Anlage angepasste Gesamt-Pumpenkennlinie, die möglichst wirtschaftlich der im Lauf der Jahre weiter ansteigenden Rohrkennlinie folgt.

Die Eislinsenbildung im Strassenuntergrund

Von Dr. sc. techn. ROB. RUCKLI,
Ingenieur des Eidg. Oberbauinspektorates, Bern

I. Wesen der Frostschäden; Frostkriterien

Seit einer Reihe von Jahren kennt der Strassenbauer die schädlichen Wirkungen des Frostes, der unter gewissen Bedingungen Blähungen des Unterbaues, Rissbildung in der Strassendecke und beim nachfolgenden Auftauen sogar die vollständige Zerstörung der Fahrbahn zur Folge haben kann (1, 10 und 17)[1]. Diese Blähungen werden durch Bildung von waagrechten Eislinsen im Strassenuntergrund (Abb. 1) verursacht, deren Dicke von der Grössenordnung ein Millimeter bis viele Zentimeter sein kann (2 und 11). Mit Berücksichtigung dieser Linsen zeigt die gefrorene Zone gegenüber der ungefrorenen eine oft weit über die Fliessgrenze hinausgehende Erhöhung des Wassergehaltes (Abb. 2). Während des Gefrierens entspricht die Hebung der Strassenoberfläche der Summe der in einem Lot gemessenen Dicken der Eislinsen. Beim Auftauen verliert der Boden seine Tragfähigkeit; er bricht unter der Verkehrslast ein und wird zwischen den Fahrspuren hochgequetscht (Abb. 3).

Zur Beurteilung der Frostgefährlichkeit eines Bodens wurden von verschiedenen Forschern sog. Frostkriterien aufgestellt, die sich etwa wie folgt charakterisieren lassen:

Die Frostkriterien von Casagrande und Morton stützen sich auf die Analyse des Kornaufbaues des Bodens. Nach ihnen darf der Boden je nach dem Gleichförmigkeitsgrad nicht mehr als 3 bis 10 % Feinanteil von unter 0,02 mm Korngrösse aufweisen (5). — Beskow (2) und das sog. Freiberger Kriterium (16) berücksichtigen neben der Granulation noch den Grundwasserstand, das letztgenannte unter Zuhilfenahme der theoretischen Berechnung. — Dücker benützt zur Bestimmung des von ihm eingeführten Frostgefährlichkeitsgrades (d. i. das Verhältnis der Frosthebung zur Frosttiefe) den Gefrierversuch im Laboratorium (5). — Keil geht in seinem geologisch-petrographischen Kriterium von der Betrachtung der Gesteinsbeschaffenheit und der geologischen Umgebung aus (8). Er stellt fest, dass alle mechanisch verfestigten, d. h. leicht verwitternden Gesteine bereits im frischen Zustand frostgefährlich oder frostempfindlich sind. Die klimatischen Verhältnisse werden nur im Freiberger Kriterium in Form der Frostdauer berücksichtigt.

[1]) Die eingeklammerten Zahlen verweisen auf die entsprechenden Nummern des Literaturverzeichnisses am Schluss des Aufsatzes.

II. Die Ursache des Wassernachschubes und der Eislinsenbildung

Trotzdem über das Phänomen der Eislinsenbildung schon viel geschrieben wurde, bestehen über die Ursache des Wassernachschubes aus dem Grundwasserträger nach den Eislinsen bis heute noch folgende von einander abweichende Theorien.

A. Kapillarkrafttheorie

Sie führt die treibende Kraft auf den Kapillardruck zurück, der gleich der kapillaren Steighöhe angenommen wird. Der Nachschub kann demnach mit Hilfe des Darcy'schen Gesetzes der Grundwasserströmung berechnet werden (2). Diese Theorie nimmt jedoch keine Rücksicht auf die Tatsache, dass sich im kapillar gesättigten Boden unter den Eislinsen kein freier Meniskus bilden kann, der zur Erzeugung des sog. Kapillardruckes nötig ist. Sie befriedigt daher nicht.

B. Kristallisationskrafttheorie

Die Kristallisationstheorie sieht die Ursache des Wassernachschubes und der Hebung der Strassenoberfläche in einer hypothetischen Kristallisationskraft, auch Kristallisationsdruck genannt, die nach Casagrande angenähert eine lineare Funktion der Gefriertemperatur, d. h. der Lufttemperatur über der Oberfläche der Bodenprobe, wäre (3). Diese Auffassung scheint durch Versuche von Dücker (Abb. 4) bestätigt zu sein; er fand, dass bei sinkender Gefriertemperatur die Frosthebungsgeschwindigkeit vorerst zunimmt, dann ein Maximum erreicht, um nachher wieder etwas abzunehmen (6). Gegen die Kristallisationskrafttheorie können aber wichtige Einwände erhoben werden. Gemäss den Gesetzen der Wärmeleitung herrscht die sog. Gefriertemperatur nicht in der ganzen gefrorenen Zone; sie muss vielmehr von der Oberfläche nach innen stetig zunehmen, um in der Frostgrenze ungefähr null Grad zu erreichen. Die hypothetische Kristallisationskraft würde daher unabhängig von der Oberflächentemperatur immer bei gleichen Temperaturbedingungen wirken, sodass man sich nur schwer vorstellen kann, dass sie von der sog. Gefriertemperatur abhängen könnte. Es wäre eher denkbar, dass sie z. B. von Temperaturgradienten beeinflusst würde. Doch zeigen Dücker'sche Versuche mit kleinen Bodenproben wenigstens in den ersten Stunden des Gefriervorganges, trotz der Abnahme des Temperaturgradienten, keine Abnahme der Gefrier-

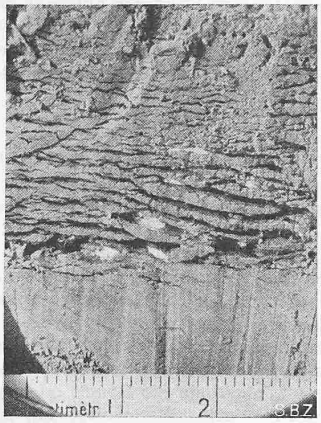

Abb. 1. Vertikalschnitt durch eine Bodenprobe nach Beendigung des Gefrierversuchs. Gut entwickelte Eislinien. (Phot. Lab. de géotechnique de l'Ecole d'Ingénieurs de Lausanne)

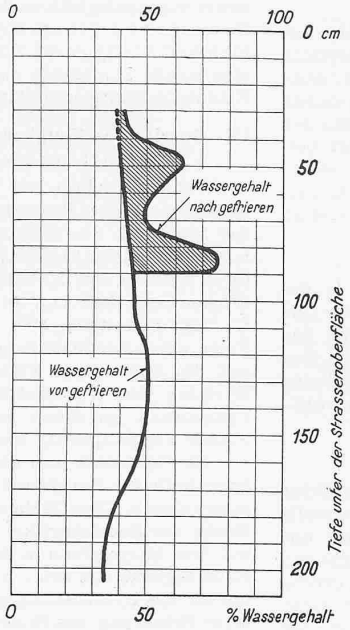

Abb. 2. Bodenwassergehalt vor und nach Gefrieren, nach Feldbeobachtungen von Beskow

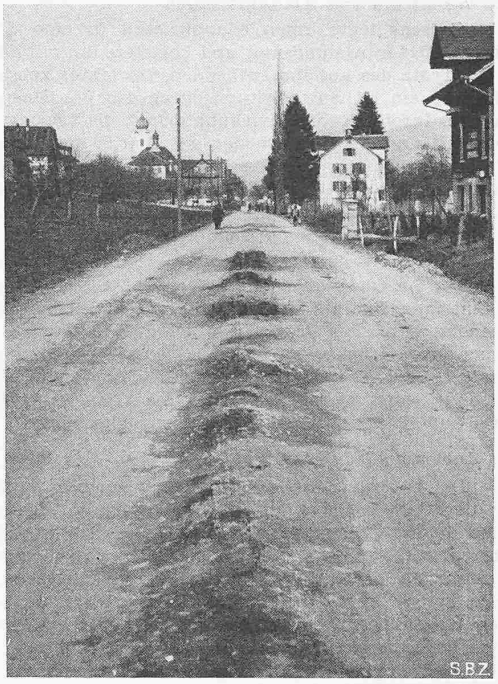

Abb. 3. Frostschäden in Bitumenoberflächenbehandlung südlich Ebikon. Fahrbahn längs den Fahrspuren eingedrückt und in der Mitte hochgequetscht. Zustand nach Eintritt von Tauwetter (Phot. Kant.-Ingenieur O. Enzmann, Luzern)

geschwindigkeit und damit der Kristallisationskraft (6). Nebenbei sei bemerkt, dass der Temperaturgradient beim Beginn der Eislinsenbildung unter der Packlage bei gleicher Gefriertemperatur etwa 100 mal kleiner sein kann als bei Laboratoriumsversuchen mit kleinen Bodenproben. Die den Wassernachschub bewirkende Kraft dürfte daher primär weder von der Gefriertemperatur noch vom Temperaturgradienten abhängen.

C. Kohäsionskrafttheorie

Wie man sieht, befriedigt weder die Kapillarkraft- noch die Kristallisationskrafttheorie. Wir können uns daher fragen, ob es nicht möglich ist, durch Analyse des Prozesses den Wassernachschub auf bekannte physikalische Vorgänge zurückzuführen, um so eine befriedigende Erklärung der Eislinsenbildung zu finden. Dies ist in der Tat möglich, ohne mit einem der Umstände, die den Vorgang charakterisieren, in Widerspruch zu kommen.

1. Analogie zwischen der Eislinsenbildung und andern Kristallisationsvorgängen

a) Das Fibereis der Bodenoberfläche

Wenn im Vorwinter die ersten scharfen Frosttage vor dem Schneefall eintreten, können wir auf der nackten Erdoberfläche von Gärten, Aeckern oder Maulwurfshaufen sonderbare Gruppen von meistens senkrecht stehenden oder leicht gekrümmten Eissäulchen beobachten. Sie sind einige Zentimeter hoch, haben einen Durchmesser von etwa 1 mm und finden sich meistens in losen Bündeln, sodass sie ein fiberartiges Aussehen haben. Zu oberst tragen sie kleine Erdklümpchen oder Steinchen (Abb. 5). Die Erdunterlage der Säulchen ist während des Wachstums der Fibern noch nicht gefroren und dient so als Lieferant des nötigen Wassers. Sobald der Frost in den Boden eindringt, hört der Zuwachs auf. Schon vor dem Gefrieren steht das gehobene Korn mit der Unterlage nicht in direkter Berührung, sondern ist von

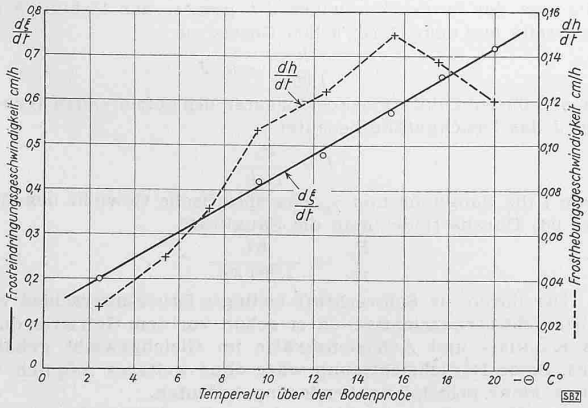

Abb. 4. Frosthebungs- und Frosteindringungs-Geschwindigkeit in Funktion der Gefriertemperatur bei einem Mo-Sand (gezeichnet nach Versuchen von Dücker)

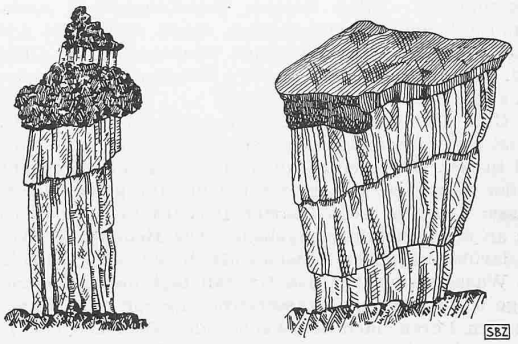

Abb. 5. Fiber- oder Säulcheneis der Bodenoberfläche

ihr durch einen Wasserfilm getrennt. Um die Auflagefläche schliesst sich ringsherum das sog. Porenwinkelwasser an, das durch die Oberflächenspannung zusammengehalten wird und die Form eines Hyperboloides hat. Bei Frosteintritt sinkt zuerst die Temperatur des Kornes unter den Nullpunkt. Damit gefriert das Porenwinkelwasser, soweit es nicht als verdichteter Adsorptionsfilm einen niedrigeren Gefrierpunkt hat. Das so gebildete Eis hat das Bestreben, weitere Wassermoleküle in sein Gefüge zu ziehen, was aber nur auf Kosten des Filmes möglich ist. Dank seiner Kohäsivkraft ist dieser im Stande, die abgegebenen Wassermoleküle der äussersten Hüllen wieder zu ergänzen. Die Eisschicht zwischen Körnchen und Unterlage wächst so zu einem Säulchen und das auf ihr ruhende Gewicht wird gehoben.

b) Bildung von Salpeterkristallen

Liesegang berichtet von folgendem Versuch (9): Trockene Gesteinsplitter wurden in einer Schale mit einer gesättigten Lösung von Kalisalpeter übergossen. Diese drang sofort durch Kapillarwirkung und Adsorption zwischen die Gesteinsplitter und den Gefässboden, sodass die Steinchen nicht mehr direkt auf dem Boden lagen, sondern von ihm durch eine Adsorptionsschicht getrennt waren. Beim Eintrocknen der Lösung ging der adsorbierte Teil in Kristallform über. Nach häufiger Wiederholung dieses Prozesses war eine zusammenhängende Schicht entstanden, die die Splitter vom Boden vollständig trennte. Die Versuche gelangen nur, wenn die Masse bis zum Grunde austrocknete. Nicht ein Wachstumsdruck, sondern die Adsorptionskräfte bewirkten die Hebung. Die Leistung war schon vollbracht, ehe die Kristalle auftraten, um die Wirkung zu stabilisieren.

c) Wachstum von Alaunkristallen

Correns legte einen Alaunkristall in eine Glasschale mit übersättigter Alaunlösung und belastete ihn mit einer Glasplatte (4). Trotz des auf ihm ruhenden Gewichtes zeigte der Kristall deutlich ein Höhenwachstum, durch das die Glasplatte gehoben wurde. Infolge Kapillarwirkung dringt die Lösung zwischen den Kristall und den Gefässboden ein. Durch die Trennung der beiden festen Körper wird Arbeit gegen die molekularen Grenzflächenkräfte geleistet. Gleichzeitig bilden sich zwei neue Grenzflächen, nämlich Boden/Mutterlauge und Mutterlauge/Kristall. Die gesamte geleistete Arbeit beträgt somit

$$A = s_{\text{Boden/Krist.}} - s_{\text{Boden/Flüss.}} - s_{\text{Flüss./Krist.}}$$

wenn s die Oberflächenenergie bedeutet. Ist A positiv, so gewinnt man Energie, die dann zur Hebung des Gewichtes verwendet wird. Zur Prüfung dieses Satzes ersetzte Correns das Glas durch Muskowit, was die Grenzflächenspannungen so verändert, dass $A = 0$ wird. Tatsächlich fand in diesem Falle keine Hebung statt. Durch das Experiment ist die Hebung einwandfrei auf die Grenzflächenenergie zurückgeführt.

2. Anwendung auf die Eislinsenbildung

Die Bildung der Eissäulchen, die Hebung der Gesteinsplitter in der Salpeterlösung und das Wachstum des Alaunkristalls sind dadurch charakterisiert, dass die Kristalle trotz des auf ihnen ruhenden Gewichtes wachsen. Die zwischen den Vorgängen bestehende Analogie kann nicht übersehen werden. Wie Correns gezeigt hat, liegt die Ursache dieser Hebungen nicht in einer sog. Kristallisationskraft, sondern in der Grenzflächenenergie der sich berührenden Substanzen. Diese Erkenntnis gestattet nun eine befriedigende Erklärung der Eislinsenbildung.

Wir setzen voraus, dass sich im kapillar wassergesättigten Boden ein Eiskristall gebildet hat. Der Kristall und die Bodenteilchen sind von einem Adsorptionsfilm umgeben, dessen Dichte an der Grenzfläche des festen Körpers am grössten ist und gegen das Poreninnere bis auf die Dichte des ungespannten Wassers abnimmt. Jedem äussern Belastungsdruck muss eine bestimmte Filmdicke entsprechen, damit dieser, die Adsorptionskräfte und die hydrostatischen Spannungen im Gleichgewicht sind. Eine Erhöhung des äussern Belastungsdruckes bewirkt eine Abnahme der Filmdicke.

Gibt der Kristall zufolge äusserer Abkühlung Wärme ab, so ist er im Stande, dem Film Wassermoleküle zu entziehen und in sein Gitter einzubauen. Um das Gleichgewicht im Film wieder herzustellen, zieht der nun zu dünn gewordene Film freies Wasser aus dem benachbarten Porenraum nach und ersetzt so das an den Kristall abgegebene. Die Hebung des Kristalls und des darüber liegenden Bodens vollzieht sich also durch Eindringen des Wassers zwischen den Kristall und das Bodenkorn. In der Folge stellt sich eine Wasserströmung von den untern, nicht gefrorenen Poren nach den wachsenden Eislinsen ein. Das so angesammelte Wasser entspricht der Hebung der Strassenoberfläche (18).

3. Bildung und Wachstum der Eiskristalle

Man darf wohl annehmen, dass die Bildung der Eiskristallkeime im dispersen System Boden-Wasser gleichen Gesetzen gehorcht wie die Kristallkeimung in übersättigten Lösungen und unterkühlten Schmelzen. Langsame Abkühlung wird im Boden eine schwache, träge Keimbildung, rasche Abkühlung dagegen eine intensive Keimbildung bewirken. Sie wird in erster Linie in den grössern Poren einsetzen, wo das Wasser nicht unter molekularer Adsorptionsspannung steht.

Hat sich in einem solchen Porenraum ein Kristallkeim gebildet, so wächst er unter Voraussetzung genügenden Temperaturgefälles auf Kosten des umgebenden Porenwassers und stösst zuletzt auf den Film, der den Raum auskleidet. Da dessen Gefrierpunkt tiefer liegt als der des ungespannten Wassers, ist er nicht gefroren. Durch Vermittlung dieses Films kann nun, wie beschrieben, das zum weitern Wachstum des Kristalls nötige Wasser nachgezogen werden. In homogenen Böden wird die Keimbildung an Orten gleicher thermischer Bedingungen gleich vor sich gehen. Der geometrische Ort gleicher Temperatur ist die Isotherme, die unter der Strasse horizontal ist. Die Keime und damit die Kristalle haben daher das Bestreben, sich in horizontalen Lagen zu bilden, aus denen durch das vertikale Wachstum ganze Schichten von Eis, die Eislinsen, entstehen. Durch die Festlegung der thermischen Bedingungen ist der Ablauf des Gefrierprozesses noch nicht eindeutig bestimmt, indem wegen des Strömungswiderstandes nicht beliebig viel Wasser zur Verfügung steht. Das Nachsaugen setzt einen Unterdruck in den Poren voraus, der u. U. sogar in eine Zugspannung übergehen kann. Der Prozess des Wassernachschubes ist ein komplexer Vorgang, der von der chemisch-petrographischen Beschaffenheit, sowie von geologisch-erdbaumechanischen Faktoren abhängt (7). Es erscheint daher am zweckmässigsten, diese Wassernachschubfähigkeit als typische Bodeneigenschaft aufzufassen. Gelingt es, eine solche Konstante nachzuweisen, so wäre das Phänomen der Eislinsenbildung vollständig geklärt.

III. Begriff der Saugkraft

A. Definition und Bestimmung der Saugkraft

Der Nachschub von Wasser aus einem Grundwasservorrat nach den darüber liegenden Eislinsen setzt nach den Grundsätzen der Mechanik die Wirkung einer Kraft voraus. Auf Grund der vorstehenden Betrachtungen kommen wir zum Schluss, dass sie ihren Sitz in der Kohäsion des die Bodenpartikel umgebenden Wasserfilms hat und in der horizontalen Gefriergrenze wirkt. Es liegt nun nahe, sich die Summe dieser Molekularkräfte in Form einer Resultierenden zusammengefasst zu denken, die etwa auf die horizontale Flächeneinheit zu beziehen wäre. Da ihre Wirkung eine Wasserströmung ist, muss sie ein Druck oder ein Unterdruck im Sinne der Hydraulik sein. Wir wollen sie mit Siedek als Saugkraft bezeichnen (15).

Es stellt sich nun die Frage, von was diese zunächst noch hypothetische Saugkraft abhängt. Da sie die Resultante von molekularen Oberflächenreaktionen ist, wird die Gesamtoberfläche der Bodenpartikel ihre Grösse beeinflussen; sie wird also mit dem Kornaufbau in Zusammenhang stehen und eine typische Bodeneigenschaft sein. Nach Versuchen von Beskow und Taber nimmt die Frosthebungsgeschwindigkeit mit zunehmender äusserer Belastung des Bodens ab. Die Saugkraft muss daher auch vom Belastungsdruck abhängen (2, 19). Versuche von Dücker ergaben auch eine Abhängigkeit des Wassernachschubes von der sogenannten Gefriertemperatur. Die Saugkraft müsste also auch von dieser abhängen, was mit unserer gewonnenen Vorstellung über sie nicht vereinbar wäre. Betrachten wir aber den Gefriervorgang namentlich im Anfangstadium etwas näher, so finden wir eine befriedigende Erklärung des scheinbaren Widerspruches.

Wie erwähnt, ist die Kristallkeimbildung bei langsamer Abkühlung schwach. Es bildet sich somit, bezogen auf die horizontale Flächeneinheit, eine geringe Zahl von wasseranziehenden Stellen, weshalb auch die pro Flächeneinheit geförderte Wassermenge klein ist. Bei tieferer Gefriertemperatur wird die Keimbildung reger, die Besetzung des horizontalen Querschnittes mit Keimen dichter und die geförderte Wassermenge nimmt ebenfalls zu. Im optimalen Falle schliessen sich alle Einzellinschen zu einer durchgehenden Linse zusammen und die Aktivität der Saugkraft kommt über dem ganzen Querschnitt zur Auswirkung. Der Wassernachschub erreicht den Grösstwert. Bei noch tieferer Temperatur geht die Abkühlung so rasch vor sich, dass sich wohl noch mehr Keime bilden, aber ohne dass genügend Zeit zum Nachströmen des Wassers zur Verfügung stünde. Der Nachschub und die Hebung gehen zurück. Die Temperatur würde also nicht, wie nach der Kristallisationskrafttheorie, die Saugkraft an sich beeinflussen, sondern nur die Grösse der Flächen, auf denen diese zur Auswirkung kommt.

Die Gefrierversuche zur Bestimmung der Frostgefährlichkeit von Böden wurden von den verschiedenen Forschern meistens in der Weise durchgeführt, dass die Hebung kleiner Bodenproben bestimmt wurde, die unten in ein Wassergefäss eintauchten, aus dem das Wasser nach den sich im obern Teil bildenden Eislinsen strömen konnte. Ist die Durchlässigkeit k_D bekannt, so kann nun die hypothetische Saugkraft P_s aus der geförderten Wassermenge berechnet werden. Die Filtergeschwindigkeit v ergibt sich einerseits aus der in der Versuchszeit t gemessenen Hebung h und anderseits aus dem Darcy'schen Gesetz zu:

$$v = \frac{h}{1{,}09\,t} = k_D\,J \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (1)$$

wobei 1,09 den Dilatationskoeffizienten des gefrierenden Wassers und J das Druckgefälle bedeutet.

$$J = \frac{P_s}{\gamma_w\,l}$$

wenn l die Saughöhe und γ_w das spezifische Gewicht des Wassers ist. Daraus findet man die Saugkraft

$$\frac{P_s}{\gamma_w} = \frac{h\,l}{1{,}09\,t\,k_D} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (2)$$

Der durch die Schwerkraft bedingte Druckunterschied wird dabei nicht berücksichtigt, da er schon vor dem Gefrieren durch die Kapillar- und Adhäsionskräfte im Gleichgewicht gehalten wird. Seine Berücksichtigung wäre ohne weiteres möglich und würde keine prinzipielle Aenderung bedeuten.

Mit Hilfe dieser Gleichung kann die Saugkraft P_s in einfacher Weise aus den Frosthebungen von Gefrierversuchen berechnet werden. Trägt man die Ergebnisse in logarithmischen

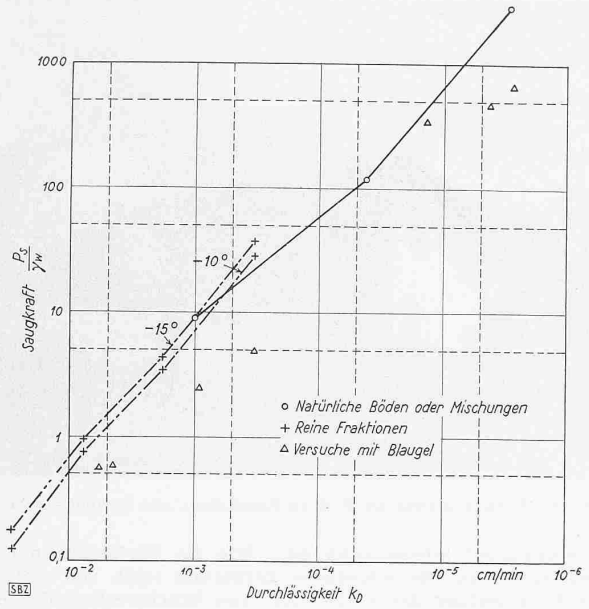

Abb. 6. Bestimmung der Saugkraft $\frac{P_s}{\gamma_w}$ (in Zentimetern) nach Versuchen von Dücker

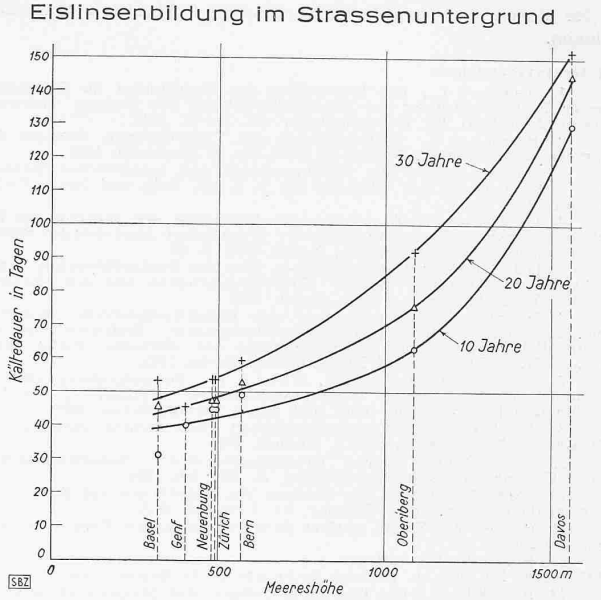

Abb. 7. Abhängigkeit der Kältedauer verschiedener Häufigkeit von der Meereshöhe

Masstab in Funktion der Durchlässigkeit k_D auf, so liegen die Punkte ungefähr auf einer Geraden (Abb. 6).

Dieses Verfahren zur Bestimmung der Saugkraft ist rein phänomenologisch und macht an sich über ihre Natur keinerlei weitere Aussagen. Falls sie wirklich als bodenphysikalische Konstante existiert, so muss sie von der Saughöhe unabhängig sein. Die bis heute zur Verfügung stehende Apparatur gestattete leider eine exakte, kritische Ueberprüfung der Hypothese nicht. Mit Rücksicht auf die grosse praktische Bedeutung des Bodenfrostes im Strassenbau ist es erwünscht, dass weitere Versuche mit einer allen Anforderungen entsprechenden Gefrierapparatur durchgeführt werden, um das Problem einer endgültigen Klärung entgegenzuführen[2]). Ist die entwickelte Hypothese richtig, so muss es grundsätzlich auch möglich sein, die den Filmen innewohnende Saugkraft durch andere Substanzen als Eis zu aktivieren. Die in Lausanne in dieser Richtung angestellten Versuche führten bis jetzt zu keinen bestimmten Ergebnissen (12). Grundsätzlich handelt es sich um die gleiche Kraft, die im Oedometer bei Entlastung das Schwellen der Tone bewirkt.

B. Die Saugkraft als Frostkriterium

Die Grenze zwischen frostgefährlichen und nicht-frostgefährlichen Böden ist nicht genau definiert. Wir bezeichnen daher einen Boden als nicht-frostgefährlich, wenn die Hebung eine bestimmte Grenze h_a nicht überschreitet. Diese hängt von der Belagsart und von der Regelmässigkeit des Untergrundes ab. Man kann an einen als frostsicher zu betrachtenden Untergrund etwa die Bedingung stellen, dass die höchst zulässige Hebung während eines bestimmten Zeitintervalls, z. B. der Lebensdauer L des Belages, nur einmal eintritt.

Ist dieses Intervall angenommen, so kann auf statistischem Wege die Dauer der Kälteperiode gefunden werden, die in dieser Zeit wahrscheinlich einmal erreicht oder überschritten wird. Als Kälteperiode wird eine Folge von Tagen definiert, deren Temperaturmittel unter 0° liegt, und die höchstens durch zwei aufeinander folgende Tauwettertage unterbrochen sein darf. Die wahrscheinliche Kältedauer T (Abb. 7) hängt von der Meereshöhe und vom angenommenen Zeitintervall ab (14). Diejenige, die alle 30 Jahre einmal eintritt, ist länger als die, die sich im Mittel alle 20 oder schon alle 10 Jahre wiederholt.

Eine genauere theoretische Berechnung der Frosthebung ist nur für den Idealfall möglich und zudem kompliziert, sodass sie nur zur Abklärung besonderer Fälle in Frage kommt (12, 13). Die Praxis bedarf aber einfacher Kriterien, um die Ergebnisse von Laboratoriumsversuchen rasch auswerten zu können.

Mit Rücksicht auf die Unregelmässigkeiten des Bodens hätte es keinen Sinn, von einem praktischen Frostkriterium exakte Ergebnisse zu erwarten. Man kann sich daher auch mit groben Näherungsverfahren begnügen, wenn sie nur den Vorteil der einfachen Handhabung besitzen. Die Saugkraft stellt nun ein solches Kriterium dar. Wir machen die in Wirklichkeit nicht zutreffende Annahme, dass die Frostgrenze auf der Höhe von Unterkant Packlage verharre. Die Veränderungen des Wassernachschubes und der Hebungsgeschwindigkeit während der Kältedauer werden damit vernachlässigt.

Gleichung (2) kann geschrieben werden:

$$\frac{P_s}{\gamma_w h_a} = \frac{l}{1{,}09\, T\, k_D} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (3)$$

Wir bezeichnen $\frac{P_s}{\gamma_w h_a}$ als die reduzierte Saugkraft, das ist die Kraft, die die Hebung 1 cm bewirkt. Bei gegebener Durchlässigkeit und gegebener Kältedauer ist sie proportional der Saughöhe l. Betrachtet man k_D als Parameter, so stellt die Gleichung (3) ein Strahlenbündel dar, das im logarithmischen Masstab zu einer Schar paralleler Geraden degeneriert (Abb. 8). Dabei entspricht nach Abb. 7 jeder Meereshöhe und jeder Lebensdauer des Belages eine bestimmte Kältedauer T. Zur praktischen Anfertigung der Diagramme wählt man T am besten in Stufen von zehn zu zehn Tagen und zwar von 40 bis zu 120 Tagen. Das Diagramm dient wie folgt als geotechnisch-klimatologisches Frostkriterium.

Im Laboratorium bestimmt man k_D und $\frac{P_s}{\gamma_w}$; daraus ergibt sich unter freier Wahl von h_a die reduzierte Saugkraft $\frac{P_s}{\gamma_w \cdot h_a}$.

Im Diagramm, das der zu berücksichtigenden Kältedauer T entspricht, findet man auf der k_D-Linie die der reduzierten Saugkraft zugeordnete minimale Saughöhe l. Ist der Grundwasserstand in Wirklichkeit tiefer, so besteht keine Frostgefahr. Liegt er über der zulässigen Kote, so besteht Frostgefahr; in diesem Falle sind die nötigen Massnahmen zu treffen, um den Grundwasserspiegel zu sen-

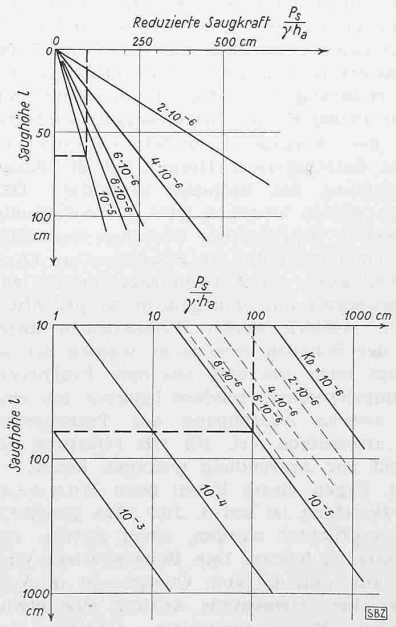

Abb. 8. Beziehung reduzierter Saugkraft und Saughöhe bei verschiedener Durchlässigkeit und gegebener Kältedauer

[2]) Das Erdbaulaboratorium der Ecole d'Ingénieurs de l'Université de Lausanne hat die weitere Erforschung des Frostproblems in sein Arbeitsprogramm aufgenommen und ist im Begriffe, die nötigen Apparaturen anzuschaffen.

ken oder um den Aufstieg des Wassers durch eine isolierende oder durch eine kapillaritätsbrechende Schicht zu verunmöglichen.

Literaturverzeichnis

1. Bendel L.: Die Beurteilung des Baugrundes im Strassenbau unter Berücksichtigung der Frostgefährlichkeit des Bodens. Schweizerische Zeitschrift für Strassenwesen. H. 14—19, 1935.
2. Beskow G.: Tjälbildningen och Tjällyftningen. Sveriges Geologiska Undersökning. Arsbok 26, 1932, Nr. 3, Stockholm 1935.
3. Casagrande A.: Bodenmechanik und neuzeitlicher Strassenbau. Schriftenreihe der «Strasse» Nr. 3, S. 95, Volk und Reich Verlag, Berlin 1936.
4. Correns C. W.: Ueber die Erklärung der sogenannten Kristallisationskraft. Sitzungsberichte der preussischen Akademie der Wissenschaften. Physikalische Klasse, Berlin 1926, S. 81.
5. Dücker A.: Untersuchungen über die frostgefährlichen Eigenschaften nicht-bindiger Böden. Forschungsarbeiten aus dem Strassenwesen. Volk und Reich Verlag, Berlin 1939.
6. Dücker A.: Bemerkungen zum Bodenfrostproblem. Beziehungen zwischen Frosthebung und Gefriertemperatur. Bodenmechanik und neuzeitlicher Strassenbau. Schriftenreihe der «Strasse», dritte Folge, Bd. XVII, S. 70. Volk und Reich Verlag, Berlin 1939.
7. Endell K., Loos W., Breth H.: Zusammenhang zwischen kolloidchemischen sowie bodenphysikalischen Kennziffern bindiger Böden und Frostwirkung. Volk und Reich Verlag, Berlin 1939.
8. Keil K.: Die Frostgefährlichkeit geschichteter Gesteine. Die Strasse, 4. Jahrgang, Nr. 10, 2. Maiheft, 1937.
9. Liesegang R. E.: Kristallisationskraft. Naturwissenschaftliche Umschau der Chemiker-Zeitung, S. 182—185, 1913.
10. von Moos A.: Der Einfluss des Unterbaues auf Schäden im Strassenbau. Strasse und Verkehr, Nr. 1 und 2, 1943.
11. Peter A.: Traité général de la route moderne. Vogt-Schild S.A., Soleure 1937.
12. Ruckli R.: Gélivité des sols et fondation des routes. Thèse EIL, 1943. Ed. soc. d. Bulletin technique de la Suisse romande.
13. Ruckli R.: Die Frostgefährlichkeit des Strassenuntergrundes. Strasse und Verkehr, Heft Nr. 19 ff., 1943.
14. Ruckli R.: La force d'aspiration comme critère de gélivité. Bulletin technique de la Suisse romande, numéro du 2 septembre 1944.
15. Siedek P.: Bodenmechanik und neuzeitlicher Strassenbau. Schriftenreihe der «Strasse» Nr. 3, S. 11. Volk und Reich Verlag, Berlin 1936.
16. Stucky A., Bonnard D.: Procédés modernes d'étude des sols de fondation des chaussées. Gélivité des sols. Bulletin technique de la Suisse romande, numéro du 26 mars 1938.
17. Sutter A.: Frostschäden an Strassen. Strasse und Verkehr, Nr. 12, 1940.
18. Taber St.: Frostheaving. The Journal of Geology, Volume XXXVIII, Number 5, July-August 1929.
19. Taber St.: The Mechanics of Frost Heaving. The Journal of Geology, May-June 1930, Number 4, Volume XXXVIII. The University of Chicago Press, Chicago, Illinois.

Die Haftung für Hilfspersonen bei Transporten

Während des Verladens von Fournierballen beim Transport von einem Lagerhaus in Zürich nach der Bahnstation Wollishofen ereignete sich ein Unfall, bei dem die Frage der Haftung für Hilfspersonen eine wichtige Rolle spielte, und zur gerichtlichen Austragung führte. Gemäss Vereinbarung hatte nämlich ein Autotransporteur St. es übernommen, vom Lagerhaus der Holzhandlung R. den etwa 300 kg schweren Ballen (1,1 m lang, 1,25 m breit und 20 cm dick) mit seinem Lastwagen zur Bahn zu führen. Beim Verlad vom Magazin auf den Autocamion half der Autotransporteur mit und zog sich dabei einen doppelten Bruch seines linken Wadenbeins zu. Der Verlad wurde von einem Vorarbeiter L. vorbereitet und geleitet, der selbst mit Hand anlegte; daneben half auch ein Hilfsarbeiter E. des Holzhändlers R. mit. Der Autotransporteur St. machte daraufhin den Holzhändler R. für die Schadenfolgen verantwortlich, indem er 18 000 Fr. als Schadenersatz forderte, während der Beklagte den Anspruch grundsätzlich und der Höhe nach bestritt. Das Bezirksgericht Horgen hat die Klage unter teilweiser Herabsetzung des Betrages geschützt. Das Obergericht des Kantons Zürich hingegen wies sie vollständig ab, vorab mit nachfolgender Begründung: Zwischen dem Kläger und dem Beklagten habe zweifellos ein Frachtvertrag (Art. 440 OR) bestanden. Weil aber der Autotransporteur die zur Durchführung des Verladeaktes ihm obliegenden Verpflichtungen nicht selbst erfüllt, sondern seinen Hilfspersonen überlassen habe, durch die der Schaden verursacht worden sei, so handle es sich überhaupt nicht um eine aus dem Frachtvertrag erwachsene Erfüllungshandlung, sondern lediglich um eine Vorbereitungshandlung zwecks Ausführung des Transportes, sodaß der vom Kläger angerufene Art. 101 OR (Haftung für Hülfspersonen) gar nicht zur Anwendung gelangen könne.

Die vom Kläger St. gegen dieses Urteil beim Bundesgericht eingereichte Berufung ist am 4. Juil 1944 geschützt und der Beklagte R. verpflichtet worden, einen Betrag von 6000 Fr. als Schadenersatz zu leisten. Das Bundesgericht ging in der Beratung davon aus, daß die vom Obergericht in Ausfüllung einer «Gesetzeslücke» verfochtene Ansicht eine etwas weit hergeholte juristische Betrachtungsweise darstelle und umsomehr Bedenken errege, als sie die an sich schon weitgehende Haftpflicht, die Art. 101 OR festlege, über den Gesetzeswortlaut hinaus ausdehne. Wie die Vorinstanz nämlich feststellte, und die allgemeine Erfahrung lehrt, hat sich für die Entscheidung der Frage, wer beim Frachtvertrag das Auf- oder Abladen zu besorgen habe, keine feste Regel herausgebildet, und das Gesetz gibt darüber keine Auskunft. Die Durchführung des Verlades wird daher auch nach ihrer rechtlichen Seite von Fall zu Fall verschieden behandelt und weitgehend vom Frachtgut und von den Umständen, insbesondere den Verlademöglichkeiten, abhängig sein. Darnach ist es bald der Frachtführer, bald der Versender, der den Verlad besorgt und dem er rechtlich obliegt. Es sind aber auch Zwischenlösungen denkbar und gebräuchlich in der Art, dass beide zusammenwirken, wobei die Rollen der Tätigkeit je nach den vorhandenen menschlichen und technischen Mitteln verteilt werden. Ein solcher Fall lag hier vor. Der Kläger hatte schon wiederholt Holztransporte für den Beklagten ausgeführt. Dabei hatte er jeweils von sich aus beim Auf- oder Abladen mitgeholfen, sodass sich eine Art Uebung herausgebildet hat und diese Mitwirkung, wenn auch nicht unbedingt notwendig, so doch dienlich und erwünscht war. Diese Dienste wurden stillschweigend angenommen, indem man offenbar mit ihnen rechnete. Denn der Abladevorgang zeigte, dass die Zusammenarbeit von mindestens drei Mann tunlich war. Dieses Mitwirken beim Verladeakt über die Pflichten des Autotransporteurs St. hinaus erscheint als gemeinsame Erfüllungshandlung, ohne welche die Erreichung des Vertragszweckes unmöglich gewesen wäre. Damit fällt das Abladegeschäft in den Rahmen des bestehenden Frachtvertrages, und das Vorliegen eines Schuldverhältnisses, als Voraussetzung für Art. 101 OR, ist erfüllt.

Abb. 1. Wohnhaus Prof. Dr. E. S. in Rüschlikon, aus Norden gesehen

Somit ergab sich noch die Frage, ob die weiteren Voraussetzungen des Art. 101 OR erfüllt seien, nämlich ob beim Verlad Hilfspersonen mitgewirkt hätten (was für die Eigenschaften des Vorarbeiters L. und des Arbeiters E. unzweifelhaft zutraf) und ob diese Hilfspersonen bei Ausübung ihrer Verrichtungen den Schaden beim Kläger St. verursacht haben, und endlich, ob zwischen ihrer Handlungsweise und dem Schadeneintritt ein rechtlich relevanter Kausalzusammenhang bestehe. Dazu musste sich der Richter den Vorgang des Verlades, wie ihn die vorinstanzliche Beweisführung samt Augenschein verbindlich festhält, vor Augen halten, auf den hier näher einzugehen viel zu weit führen würde. Zum vornherein musste das Verhalten des Hilfsarbeiters E. als Mitursache des Unfalles ausscheiden. Blieben somit die Vorwürfe gegenüber dem Vorarbeiter L. Zusammengefasst bestanden sie im Vorhalt der Nichtvorkehr von Schutzmassnahmen, Nichtheranziehung eines weitern Arbeiters, ungenügender Instruktion an die Mitwirkenden — doch alles das lehnte das Bundesgericht auf Grund des Abladevorganges ab. Blieb noch der Vorwurf, die Ausführung seiner Weisung während der entscheidenden letzten Phase des Verlades nicht überwacht zu haben, als der Kläger St., auf der Ladebrücke stehend, das Ballenende gegen sich ziehen wollte und dabei durch eine plötzliche Bewegung des Ballens vom Lastwagen gestossen wurde. Der Hilfsarbeiter L., als erklärter Leiter des Verlades, hätte die Gefährlichkeit der Handlungsweise des Klägers erkennen müssen, ihn durch abmahnenden Zuruf warnen sollen. Das aber unterliess er, indem er selber zugab, «hätte ich das beobachtet, so hätte ich ihn durch einen Zuruf daran zu hindern gesucht». Diese Unterlassung erachtete