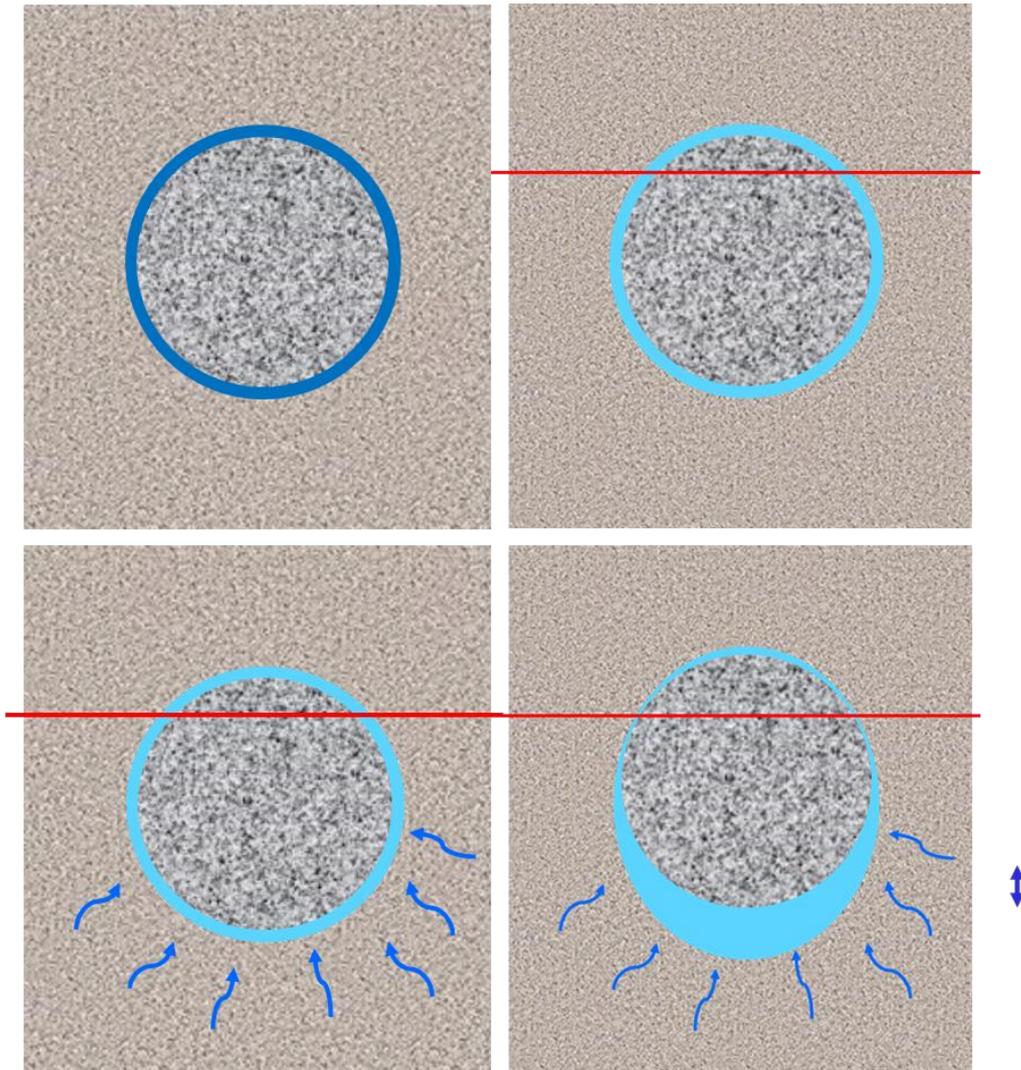


Abschätzung der Möglichkeit des Auffrierens von Kampfmitteln in unterschiedlichen Böden verschiedener Regionen Deutschlands

Halle (Saale), September 2019



Dr. agr. Jens Hagenau
Ingenieurdienstleistungen
Krokusweg 29
06118 Halle (Saale)

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlegendes zur Aufwärtsbewegung von Bodenbestandteilen	1
2 Bedeutung der Frosthebung	4
2.1 Bedeutung in der Forschung	4
2.2 Bedeutung in der Praxis	5
2.3 Erfahrung von Praktikern	5
3 Mechanismen bei der Frosthebung	7
3.1 Die treibenden Kräfte	7
3.2 Beschreibungen der Prozesse	8
3.2.1 Hebung des gesamten Bodenkörpers.....	8
3.2.2 Hebung einzelner Bodenbestandteile innerhalb des Bodenkörpers	11
3.2.3 Absenken des gesamten Bodens sowie einzelner Bodenbestandteile beim Prozess des Auftauens.	13
4 Angaben zu Frosthebung in der Literatur.....	14
4.1 Frosthebung von ganzen Bodenkörpern	14
4.2 Frosthebung von einzelnen Bodenbestandteilen.....	15
4.3 Übersicht der Ergebnisse der Literaturrecherche	17
5 Modell zur Abschätzung der Frosthebung	18
6 Zusammenfassung	19
Quellen.....	20

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1:** Verdichtung und Entmischung von verschiedenen Korngrößen bei einem landwirtschaftlichen Weg. Dabei Hervortreten der groben Bestandteile des Materials an die Oberfläche. Foto: Jens Hagenau..... 2
- Abbildung 2:** Formen der Suffosion. Quelle: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 1997. . 3
- Abbildung 3:** Frosthebung eines Bodenkörpers durch die Bildung von Eislinsen (dicke hellblaue waagerechte Linien) in mehreren Schritten. Eigene Darstellung..... 9
- Abbildung 4:** Mögliche Lageänderungen einzelner großer Bodenbestandteileosthebung in einem Bodenkörper durch Frosthebung und anschließender Absenkung bei einer Durchfrostung bis in 50 cm Tiefe. Eigene Darstellung.10
- Abbildung 5:** Darstellung des Frosthubes für einen einzelnen Stein. Der blaue Doppelpfeil unten rechts zeigt die Strecke des Frosthubes. Eigene Darstellung.12
- Abbildung 6:** Darstellung der Teilchenbewegungen beim Prozess des Auftauens.13
- Abbildung 7:** Heben und Senken von Boden (Ground) und Munition (UXO) in der Frostperiode von Ende November 2003 bis Ende April 2004. Quelle: Henry und Danyluk, 2004.16

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: Wärmeleitfähigkeiten. Alle Angaben in Watt pro Meter pro Kelvin (W/m/K)..... 7
- Tabelle 2: Zusammengefasste Angaben über maximale Strecken von Frosthebungen.17

1 Grundlegendes zur Aufwärtsbewegung von Bodenbestandteilen

Es gibt zahlreiche unterschiedliche Prozesse, die dafür verantwortlich sind, dass sich Bestandteile des Bodens in *tendenziell vertikaler Richtung* nach oben bewegen, um dann perspektivisch an die Bodenoberfläche zu gelangen. Diese Aufwärtsbewegungen sollen hier als *tendenziell* bezeichnet werden, weil sie oft im Wechselspiel aus Aufwärtsbewegungen (Hebungen) und Abwärtsbewegungen (Senkungen) der betroffenen Bestandteile geschehen. Die Aufwärtsbewegungen der Bestandteile, die hier im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen, gehen zudem stets einher mit Abwärtsbewegungen anderer, meist kleinerer - auch feinkörnigerer - Bodenbestandteile, die sich dann direkt unter den größeren Bodenbestandteilen platzieren.

Weiterhin soll der Begriff *tendenziell* verdeutlichen, dass neben der Aufwärtsbewegung auch horizontale Bewegungen mit im Spiel sind, die dafür sorgen, dass die Hebung nicht im Winkel von 90 Grad zur Erdoberfläche erfolgt, sondern vielmehr schräg aufsteigend. Somit ist es möglich, dass ein Bodenbestandteil oder ein Körper, wie bspw. ein Munitionsteil, den Bodenkörper nach etlichen Jahren bzw. Jahrzehnten mehrere Meter neben seiner Eintrittsstelle wieder verlässt. Der Begriff *Bodenbestandteil* soll im Folgenden synonym sowohl für größere Steine als auch für Kampfmittel verwendet werden.

Die angesprochenen Prozesse werden entweder von natürlichen Bedingungen, wie dem Wechsel der Witterungsverhältnisse, getrieben oder sind anthropogen verursacht. Zu diesen letztgenannten Ursachen zählen alle baulichen oder landwirtschaftlichen Maßnahmen sowie die reine Befahrung eines Bodens. Der betroffene Bodenbestandteil muss dabei nicht selbst bewegt oder gar von einem anderen, externen Gegenstand berührt oder geführt werden. Wie die Abbildung 1 zeigt, gibt es auch Vorgänge, die sich aufgrund einer Kombination von natürlichen und anthropogenen Prozessen vollziehen. In der Abbildung 1 ist kein klassischer Boden im Sinne wissenschaftlicher Definitionen zu sehen, sondern eine andere Form des Untergrundes: ein Feldweg am Rande einer Kleingartenanlage, der nicht nur von Landtechnik, sondern auch von PKW und anderen Fahrzeugen häufig befahren wird.

Das Entmischen des Materials, was zum Offenlegen bzw. An-die-Oberfläche-Treten der größten Anteile des Korngrößen-Gemischs führt, vollzieht sich durch den Vorgang der Suffosion, bei dem es zu einem Absinken von feinkörnigen Teilchen - in Verbindung mit einer Verdichtung - kommt. Die treibende Kraft ist dabei das Niederschlagswasser. Der Prozess der Suffosion vollzieht sich, gemäß den Definitionen aus der Bodenkunde, oft über sehr lange Zeiträume und wird meist als rein natürlicher Prozess beschrieben. Dennoch kann im hier gezeigten Beispiel von einer Kombination aus der Wirkung von Niederschlagsereignissen und der Befahrung durch PKW und andere Fahrzeuge gesprochen werden. Nach den gleichen Prinzipien - also der Einwirkung von Niederschlag sowie der Befahrung durch KFZ - könnte es

somit auch geschehen, dass Kampfmittel und Kampfmittelreste an die Oberfläche geraten, ohne dass Frost unmittelbar im Spiel ist.



Abbildung 1: Verdichtung und Entmischung von verschiedenen Korngrößen bei einem landwirtschaftlichen Weg. Dabei Hervortreten der groben Bestandteile des Materials an die Oberfläche. Foto: Jens Hagenau.

Für die Bewegung von Steinen und Kampfmitteln innerhalb von natürlich entwickelten aber auch geschütteten - und zum Teil verdichteten - Standorten und Untergründen können insgesamt folgende Prozesse verantwortlich gemacht werden:

Bodenbearbeitung. Hierzu zählen sowohl landwirtschaftliche Tätigkeiten als auch Maßnahmen der Bauvorbereitung und des Straßen- und Tiefbaus. Die Bodenbearbeitung durch landwirtschaftliche Maschinen kann zu der oben angesprochenen Bewegung von Kampfmitteln und Steinen führen, die sowohl vertikal als auch horizontal erfolgt. Die Gesamtrichtung des Aufstieges ist dann diagonal und die Bewegungen können sich in zahlreichen Arbeitsschritten über Jahre vollziehen, bis es zu einem Hervortreten an die Oberfläche kommt. Häufig ist es hier die Kombination mit Frosthebungen, die dazu führt, dass eine kontinuierliche Nachlieferung erfolgt.

Befahrung. Befahrung wirkt ähnlich wie die rein natürlich verursachte Suffosion und kann sich in Verbindung mit Niederschlägen noch stärker auswirken. Oft verstärkt die Befahrung auch die Form der Bodenentmischung, die durch Frosteinwirkung verursacht wird. So werden Bodenbestandteile, die durch Frost vom Bodenkörper abgesprengt sind, durch Befahrung in ihrer Position verändert. Sie müssen sich dafür jedoch bereits an der Oberfläche befinden.

Suffosion. Bodenteilchen im Korngrößenbereich des Feinkorns werden durch Wasser bewegt und dauerhaft umgelagert. Dabei kann die Umlagerung mit einem Absinken und dadurch mit einer Verdichtung, aber auch mit einem Aufschwemmen verbunden sein. Suffosion spielt dann eine größere Rolle, wenn der Untergrund nicht bindig und vor allem sehr ungleichförmig in seiner Korngrößenverteilung ist. Suffosion hängt dabei häufig zusammen mit Prozessen wie Erosion und Kolmation, worunter das Verstopfen von Bodenporen verstanden wird. Abbildung 2 zeigt drei verschiedene Formen der Suffosion.

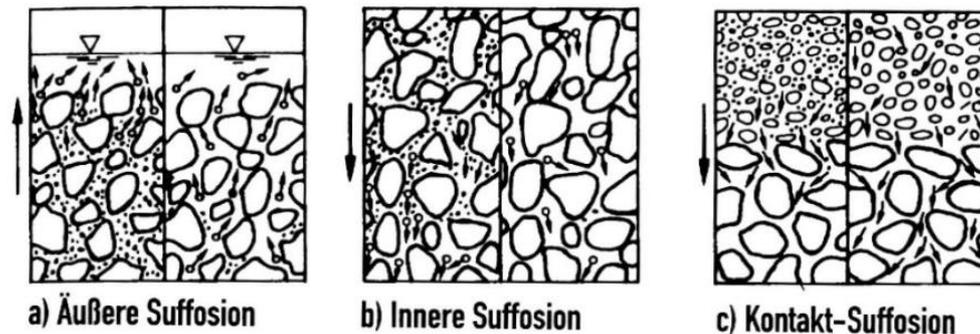


Abbildung 2: Formen der Suffosion. Quelle: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 1997.

Frosthebung. Das ist der Prozess, der in der folgenden Abhandlung im Mittelpunkt stehen soll. Dabei ist das Auffrieren von Steinen aus dem Untergrund in Gebieten mit regelmäßigem und starkem Bodenfrost ein weit verbreitetes und Phänomen. Vor allem in der Geomorphologie wird die Frosthebung als landschaftsformender Prozess seit langem und auf verschiedenen Skalen untersucht. Der Bezug zur Geomorphologie lässt jedoch bereits erahnen, dass hier Prozesse beschrieben werden, die sich innerhalb von sehr langen Zeiträumen vollziehen. Die Anwendung auf Bodenbestandteile, die sich in der Regel erst seit mehreren Jahrzehnten im Bodenkörper befinden, ist deshalb nur begrenzt möglich. Die Mechanismen dieser Prozesse sind, sofern sie einzelne oberflächennahe Objekte wie Steine oder Kampfmittel betreffen, jedoch gut verstanden und können als Grundlagen dienen.

Die EPA, die US-amerikanische Bundesbehörde für den Umweltschutz, nimmt im Zusammenhang mit der Handhabung von Kampfmitteln eine Unterteilung in ähnliche Prozesse vor, wie sie vorstehend vorgenommen wurde. Hier werden noch *Überflutung und Erosion* sowie *Freizeitaktivitäten* (ohne nähere Ausführungen) als maßgebliche natürliche und anthropogene Faktoren genannt, die dazu führen können, dass Munitionsteile an die Oberfläche geraten.

2 Bedeutung der Frosthebung

2.1 Bedeutung in der Forschung

In Deutschland tritt - in starker regionaler Unterschiedlichkeit - regelmäßig Bodenfrost auf, weswegen sich die Frage stellt, inwiefern ein Auffrieren von Steinen und anderen Objekten möglich und bedeutsam ist. Aus den Geowissenschaften sowie den angewandten Wissenschaften wie den Ingenieur- und Agrarwissenschaften liegen keine empirischen Studien vor, die den Zusammenhang zwischen Witterungs- und Standortverhältnissen und den daraus resultierenden Mengen an aufgefrorenem Material zum Inhalt haben.

Es ist überdies auch ungewiss, ob das Auffrieren als rezenter Prozess in der Natur unserer Breiten vielleicht deshalb noch nicht ausgiebig und umfänglich untersucht wurde, weil es nicht in nennenswertem und somit für die Wissenschaft wichtigem Umfang existiert. Die Beschreibungen in der Geomorphologie legen meist periglaziale Bedingungen für die Prozesse, die das Auffrieren begünstigen, zu Grunde. Fakt ist jedoch, dass auch beim nicht Vorhandensein von periglazialen Bedingungen häufige bzw. jährliche Frostwechsel ausreichen, um Steine und auch größere Objekte im Lauf der Zeit vom Untergrund an die Oberfläche zu bewegen.

Die Wissenschaft im Bereich von Geowissenschaften und Landwirtschaft hat die Grundlagen dafür gelegt, dass Böden klassifiziert werden und bringt dabei auch immer wieder neue Erkenntnisse ein, die Prozesse der sogenannten Genese, also der Entstehung und Umwandlung von Böden, beinhalten. Dabei wird in zahlreichen Möglichkeiten der Klassifizierung mit einbezogen, inwieweit ein bestimmter Boden oder Standort durch das Vorhandensein von Steinen bestimmter Größen und Formen charakterisiert sein kann (vgl. United States Department of Agriculture, 2017; Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, 2010; Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005). Dabei wird neben der Korngröße der betrachteten Bodenbestandteile auch auf das Ausgangsgestein abgezielt, jedoch findet sich nirgendwo ein Vermerk darüber, inwieweit das vorhandene Material zur Oberfläche des Bodens strebt oder streben könnte.

Die Forschungsarbeiten in den Agrarwissenschaften und dabei speziell im Bereich der Agrartechnik sowie der Landeskultur haben sich in den letzten Jahren eher dem Prozess des Entfernens der vorhandenen Steine im landwirtschaftlichen Bereich gewidmet (vgl. Wolf, 1990) oder zielten darauf ab, die negativen Wirkungen von hohem Steinbesatz zu beschreiben.

2.2 Bedeutung in der Praxis

Eine Schnittstelle zwischen Forschung und Praxis bieten die Entwicklungen in der Branche der Landtechnik. Hier werden meist Ergebnisse von wissenschaftlichen Forschungen mit Erfahrungen und vor allem Bedürfnissen aus der landwirtschaftlichen Produktion zur Entwicklung neuartiger Geräte vereint. Diese neuen Geräte und Verfahren dienen dann der Verbesserung der Abläufe sowie letztlich der Erträge. Dies geht einher mit dem allgemeinen Trend zur Mechanisierung der agrarischen Produktion.

In der Praxis spielt der Frosthub von Steinen eine große Rolle, besonders in Regionen des Hügellandes und der Mittelgebirge. Böden mit hohem Skelettanteil weisen ebenso viele große Steine auf, wie Böden, die sich auf eiszeitlich geformtem Untergrund mit einem hohen Anteil an sogenanntem Geschiebe befinden. In den Zeiten, in denen die Technisierung in der Landwirtschaft noch nicht so weit fortgeschritten war, waren Steine ein noch größeres Problem, weil sie bei der damaligen Technik noch mehr Schaden anrichtete als bei heutigen Geräten.

Die Steine werden mit Hilfe neuartiger Technik entweder rein oberflächlich abgesammelt oder aber aus Tiefen von einigen Zentimetern heraufgeholt. Es gibt mittlerweile Geräte, die als Zugmaschinen nur Schlepper mit mittlerer Motorisierung und Leistungsstärke benötigen (vgl. Peltuote, 2019), die Sammel-Leistungen werden bei Arbeitsbreiten von sechs Meter mit teils mehr als einer Tonne pro Minute angegeben, wenn der Steinbesatz entsprechend hoch ist (ebd.).

Weiterhin werden von Praktikern Möglichkeiten der Zerkleinerung von grobem Bodenmaterial genutzt. Sogenannte Steinfräsen zerkleinern dabei nach Herstellerangaben Steine von bis zu 40 cm Durchmesser und bringen die Steinreste unmittelbar nach dem Brechvorgang wieder in die Erde ein (vgl. Blunk, 2019). Über den Sinn und Nutzen wird teilweise kontrovers diskutiert, denn der Vorgang ist ein starker Eingriff in den Boden mit seinen chemischen und biologischen Parametern und Prozessen.

2.3 Erfahrung von Praktikern

Für die Anfertigung der Arbeit wurden Gespräche mit Landwirten geführt, außerdem erfolgte auch die Auswertung von Mitteilungen aus Fach- und Verbandszeitschriften, sowie sonstiger Pressemitteilungen zum Thema. So wird auch noch in der heutigen Zeit berichtet, dass gerade in kleinbäuerlichen Betrieben noch regelmäßig die Steine manuell abgelesen werden müssen. Dies ist nicht nur in den angesprochenen hügeligen und gebirgigen Regionen erforderlich, sondern ebenso im Flachland in Norddeutschland (vgl. Eckernförder Zeitung, 2014; Bergedorfer Zeitung, 2014). Dabei wird deutlich, dass das Ablesen immer dann erfolgt, wenn es zeitlich und von den Arbeitsläufen her gerade passt, oder wenn eine bestimmte Kultur im Frühjahr auf

dem Acker steht, so wie bspw. bei Sommergetreide im April. Die betroffenen Landwirte liefern auch Erklärungsversuche für die immer wieder hervortretenden Steine, die nicht ganz korrekt im Sinne von Kapitel 3 sind, aber auch nicht ganz falsch:

Und warum findet man immer wieder Steine, obwohl die Koppeln jedes Jahr abgesammelt werden? Eine Frage, die sich schon alle Bauernkinder über Generationen hinweg immer wieder gestellt haben. Auch Klaus-Jürgen Wichmann. Aber jetzt hat er zumindest eine einleuchtende Erklärung parat: „Wenn man den Stein wegnimmt, sackt an dieser Stelle die Erde ab, und es gelangt ein neuer Stein von unten nach oben an die Erdoberfläche.“ (Eckernförder Zeitung, 2014).

Ob es das Auffrieren von weiteren Steinen bremsen würde, wenn die bisher aufgefrorenen Steinen liegen gelassen würden, kann hier nicht endgültig beantwortet werden, die Ausführungen zu den Prozessen des Frosthubes im folgenden Kapitel 3, können hier jedoch einen Beitrag leisten.

Die befragten Landwirte, zwei aus der Leipziger Tieflandbucht und einer aus dem Erzgebirge konnten mit der Schilderung ihrer Erfahrungen die bisherigen Vermutungen bestätigen:

- die Steine werden dann abgelesen, wenn es sich hinsichtlich der Betriebsaufläufe anbietet und wenn es bei einem bestimmten Schlag gerade nötig und möglich erscheint;
- es gibt keine Systematik, die garantiert, dass jeder Schlag nach einer bestimmten Anzahl von Jahren wieder abgelesen wird;
- die Anzahl bzw. Masse der Steine wird nicht erfasst, i. d. R. werden sie auf dem Betriebsgelände abgekippt und je nach Wert selbst als Baumaterial genutzt oder verkauft;
- alle drei Befragten konnten sich nur auf hartnäckiges Nachfragen daran erinnern, dass nach strengeren Wintern offensichtlich mehr Steine „oben liegen“ und nach milden Wintern weniger.

Die Versuche, eine Möglichkeit zu finden, mit einer gewissen Empirie nachvollziehen zu können, wie sich die Witterungsverläufe auf die Menge der auffrierenden Steine auswirkt, scheiterten somit an wirtschaftlichen Zwängen sowie am Pragmatismus der Landwirte. Eine Aussage eines der Landwirte bringt dies auf den Punkt:

Sie werden kaum einen Bauern finden, der über seine abgelesenen Steine pro Schlag Protokoll führt!

3 Mechanismen bei der Frosthebung

3.1 Die treibenden Kräfte

Für das Auffrieren von Bodenbestandteilen sind anhaltende Temperaturen von weniger als 0°C nötig, die zu einem Gefrieren des Bodens führen. Nach einer gewissen zeitlichen Spanne mit der Einwirkung dieser Temperaturen kommt es zum Auftauen, bei dem sich weitere Prozesse abspielen, welche für den Gesamtprozess der Frosthebung eine wichtige Rolle spielen. Als weitere unabdingbare Voraussetzung für den Gesamtprozess muss die Anomalie des Wassers genannt werden, denn nur dadurch wird ermöglicht, dass es eine teilweise enorme Volumenzunahme bei der Vereisung gibt.

Als weitere grundlegende Voraussetzungen für die Wirkungen des Frostes können die Wassergehalte im Boden, die einerseits den Wärmetransport im Boden bestimmen und andererseits erst das Potential für eine mögliche Frosthebung liefern. Mit anderen Worten lässt sich sagen, dass das Vorhandensein von Wasser in den entsprechenden Mengen eine nötige Bedingung für das Auffrieren ist.

Zuletzt sollen noch die Unterschiede in der Wärmeleitfähigkeit zwischen den Kampfmitteln bzw. den großen Steinen einerseits und dem umgebenden Boden andererseits genannt werden. Diese Unterschiede sorgen dafür, dass der Frost nicht geradlinig in den Bodenkörper eindringt und ebenso wenig der Auftauprozess in vertikaler Richtung gleichförmig geschieht. Zusätzlich zur Wärmeleitfähigkeit spielt noch die Wärmekapazität der verschiedenen Materialien eine Rolle bei den Prozessen und als Quotient dieser beiden Größen, die Temperaturleitfähigkeit. Die Wärmeleitfähigkeiten für verschiedene relevante Materialeien sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Wärmeleitfähigkeiten. Alle Angaben in Watt pro Meter pro Kelvin (W/m/K).

Material	Wert
Eisen	80
Bodenminerale (auch Steine)	1 bis 9
Boden (als Gemisch)	ca. 0,5 bis 1
Eis	ca. 2
Wasser, flüssig	0,6
Luft	0,025

Die Angaben in Tabelle 1 variieren noch in Abhängigkeit von der Temperatur, worauf hier nicht näher eingegangen werden soll. Hier sind die Werte bei 0°C angegeben. Allein der Unterschied von Wasser in fester und Flüssiger Form zeigt, dass einige der Werte prozessabhängig stark schwanken und die Schwankungsbreite der verschiedenen Bodenminerale macht deutlich, dass eine genaue Angabe nur schwer möglich ist. Zwei Dinge werden jedoch bei genauer Betrachtung von Tabelle 1 offensichtlich:

- die Wärmeleitfähigkeit des Bodens als ein Gemisch verschiedener Materialien ist immer abhängig von seiner Zusammensetzung hinsichtlich der Anteile an Mineralien, Wasser und Luft;
- wenn das Auffrieren von Steinen durch den Gradienten der Wärmeleitfähigkeit zum umliegenden Boden getrieben wird, dann muss dieser Effekt bei Kampfmitteln noch grösser sein, weil hier ein noch viel größerer Unterschied in den Parametern des Wärmehaushaltes besteht.

Bei der folgenden Beschreibung der beiden maßgeblichen Prozesse, die zum Auffrieren führen, wird deutlich, dass nur einer dieser Prozesse entscheidend von den Unterschieden in der Wärmeleitfähigkeit getrieben wird.

3.2 Beschreibungen der Prozesse

3.2.1 Hebung des gesamten Bodenkörpers

Im Gegensatz zur Geomorphologie, bei der es um die Beschreibung der Entstehung von Landschaften über längere Zeiträume geht, sind die angewandten Ingenieurwissenschaften mit Prozessen betraut, die sich in relativer Schnelligkeit abspielen und somit zu unverzüglich wahrnehmbaren Erscheinungen führen. Im Bauwesen sind in Verbindung mit Frosthebung meist Schäden an baulichen Einrichtungen zu erwarten, die es zu verhindern gilt. Deshalb betreffen die Betrachtungen und wissenschaftlichen Arbeiten im Bauwesen stets die gesamten Flächen, auf denen sich Bauwerke befinden bzw. die Flächen, welche die entsprechenden Bauwerke umgeben und somit einen Einfluss auf deren Stabilität ausüben.

So sind es häufig Arbeiten im Erdbau, Straßenbau und Tunnelbau, bei denen die Frage im Mittelpunkt steht, welche Hubstrecken durch Frost erzielt werden können und mit welchen Maßnahmen sich die zu erwartenden Frostschäden am besten vermeiden lassen (Kellner, 2008; Unold, 2006). Da Frosthebungen dort am meisten auftreten, wo die meteorologischen Gegebenheiten lange und strenge Frostperioden mit sich bringen, finden sich hier zahlreiche Arbeiten in Nordamerika, genauer Kanada und Alaska (bspw. Pewe & Page, 1959) oder in Skandinavien (Stenberg 1979).

Unold beschreibt in seiner Arbeit, wie sich das Ausdehnen des gesamten Bodenkörpers durch die Bildung von Eislinsen vollzieht (2006, S. 42ff. und S. 55ff.). Beim Durchfrieren des Bodens kann Wasser kurz vor dem Gefrieren zunächst in tiefere Schichten abfließen und sich somit ohne Volumenzunahme ausdehnen, bis es zu dem Punkt des Prozesses kommt, an dem die hygroskopische Wirkung des Eises zu einem sogenannten *Frostsog* führt.

Durch die Wirkung des Frostsogs kann kein Wasser mehr nach unten abfließen, im Gegenteil dazu wird ein Wasserpotential erzeugt, was dazu führt, dass zusätzliches Wasser nach oben geführt wird und hier in den festen Zustand übergeht. Eine Volumenzunahme des Bodenkörpers durch die Ausdehnung des angereicherten Wassers während des Gefriervorganges ist nun nicht mehr zu vermeiden. Es bildet sich eine sogenannte Eislinse, die den Bodenkörper horizontal durchzieht und anhebt.

Mit zunehmender Frostdurchdringung des Bodens kann sich dieser Prozess in mehreren Phasen vollziehen, so wie es zusammengefasst mit der Abbildung 2 dargestellt ist. Die tatsächliche Höhe des Frosthubes ist in der Abbildung stark überhöht. In der Realität durchziehen die Eislinsen nicht den gesamten Bodenkörper, sondern treten örtlich begrenzt auf. Sie erreichen dabei Größen von bis zu mehreren Quadratmetern. Die Abstände der Eislinsen zueinander in vertikaler Richtung variieren dabei in Abhängigkeit von zahlreichen Parametern, die bei Unold beschrieben sind (2006, S. 44).

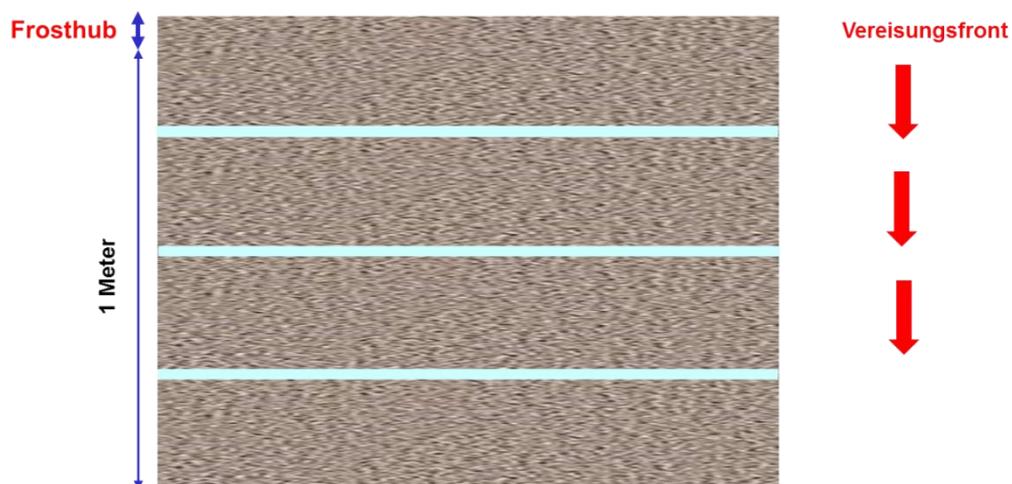


Abbildung 3: Frosthebung eines Bodenkörpers durch die Bildung von Eislinsen (dicke hellblaue waagerechte Linien) in mehreren Schritten. Eigene Darstellung.

Bei der Ausdehnung und Hebung von ganzen Bodenkörpern spielen somit die einzelnen Bodenbestandteile und ihre Anordnung im Einzelnen eine untergeordnete Rolle und werden somit in den zitierten Arbeiten nicht betrachtet. Nach dem Abtauen des Bodenkörpers werden sich jedoch unweigerlich Veränderungen im Gefüge bzw. in der Schichtung einstellen, die

dazu führen, dass bestimmte Teile im Boden höher oder niedriger liegen als zuvor, so wie im nächsten Teilkapitel beschrieben. Wie Abbildung 4 zeigt, haben auch die Hebung und Senkung eines ganzen Bodenkörpers in ihrer Gesamtheit einen Einfluss auf die spätere Lage der relevanten Teile wie große Steine und Kampfmittel, Tendenziell führen die Prozesse zu einer Hebung, die sich in einer definierbaren Schwankungsbreite vollziehen kann.

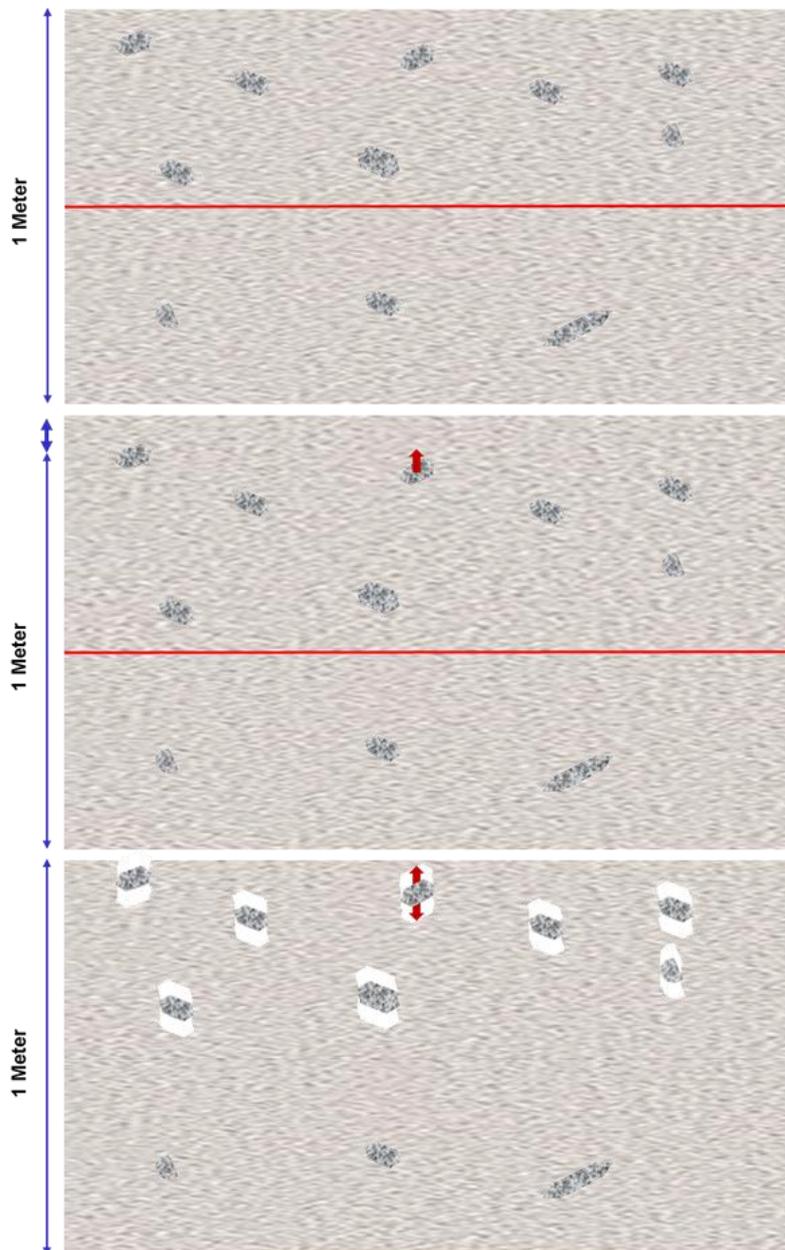


Abbildung 4: Mögliche Lageänderungen einzelner großer Bodenbestandteile in einem Bodenkörper durch Frosthebung und anschließender Absenkung bei einer Durchfrostung bis in 50 cm Tiefe. Eigene Darstellung.

Das obere Bild in Abbildung 4 zeigt den Zustand zu Beginn eines Frostereignisses, welches bis in 50 cm Tiefe reicht. Alle Bodenbestandteile sind (noch) in ihrer Ausgangslage. Nach der Frostdurchdringung bis in die beschriebene Tiefe, ergibt sich die Situation, welche überhöht im mittleren Bild dargestellt ist. Die Strecke des Frosthubes ist mit dem kleinen blauen Doppelpfeil dargestellt, die Strecke, die ein einzelner Stein zurücklegen kann wird von dem roten Pfeil symbolisiert.

Das untere Bild schließlich zeigt die Situation nach dem Auftauen. Es wird deutlich, dass es für jeden einzelnen Stein einen Bereich gibt, in dem er am Ende des Prozesses und somit nach dem Absinken liegen kann. Der Stein kann an seiner höchsten Position liegen bleiben, er könnte aber auch wieder annähernd die Ausgangsposition einnehmen, die er vor dem Frostereignis hatte. Die Prozesse, die den Stein in einer höheren Position verbleiben lassen, wurden bereits unter dem Begriff Suffosion beschrieben und kommen im nachfolgenden Teilkapitel 3.2.3 nochmals zur Sprache.

3.2.2 Hebung einzelner Bodenbestandteile innerhalb des Bodenkörpers

Im Gegensatz zur Hebung des gesamten Bodenkörpers werden beim nun geschilderten Prozess einzelne Bestandteile des Bodens, also große Steine und Kampfmittel direkt gegenüber ihrem Umfeld vertikal bewegt. Dies geschieht meist gleichzeitig mit dem oben genannten Prozess, wobei die Strecke der möglichen Aufwärtsbewegung der betrachteten Teile dann insgesamt verstärkt wird. Die treibenden Kräfte sind hier grundsätzlich die gleichen wie bei der Hebung des gesamten Bodenkörpers, wobei hier die Wirkung des Gradienten der Wärmeleitfähigkeit eine besondere Rolle spielt.

Der Prozess des Auffrierens von Objekten wurde bereits 1930 von Beskow dargestellt und in zahlreichen Werken der Bodenkunde ausführlich geschildert. Mitscherlich merkte an, dass durch die Prozesse rund um das Frieren genau die Strukturen des Bodens aufgebrochen werden, die eigentlich besonders fest sind und deshalb bei der Bodenbearbeitung üblicherweise nicht zerstört werden. Zur Frosthebung führt er aus: „... , daß infolge der besonders guten Wärmeleitung des Steins zunächst beim Gefrieren das Wasser um den Stein herum gefriert. Dasselbe zieht beim Auskristallisieren weiteres Wasser aus dem ihm umgebenden Boden an sich, wobei die festen Bodenteilchen naturgemäß zurückgedrängt werden, und das Auffrieren gerade um den Stein herum ein besonders starkes sein muß, der damit besonders gehoben wird.“ (1950, S. 50). Mitscherlich beschreibt weiter, dass beim Auftauprozess feines Substrat in die Hohlräume gelangt, welche durch die Entstehung und das Abtauen der kleinen Eislinse unterhalb des Steins entstanden sind (vgl. ebd.).

In Abbildung 5 ist in vier Schritten dargestellt, wie sich das Auffrieren eines Steins im gefrierenden Boden vollzieht. Zunächst hat noch keine Frostdurchdringung stattgefunden, der Stein

ist im Bodenkörper von Wasser in Flüssiger Form umgeben, was durch den dunkelblauen Ring symbolisiert werden soll (Abb. 5, oben links). Im nächsten Schritt findet eine Frostdurchdringung des gesamten Bodens bis zu der Tiefe statt, die durch die rote Linie dargestellt ist. Dabei friert nicht nur das Wasser oberhalb der Linie, sondern aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit auch um den gesamten Stein, was durch die hellblaue Farbe des Ringes zum Ausdruck gebracht wird (oben rechts). Im Bild unten links ist nun zu sehen, dass weiteres, noch flüssiges, Wasser an die bereits bestehende Eislinse herangeführt wird, um diese dann zu verstärken (unten links). Dadurch wird der Stein entsprechend gehoben. Der Prozesse endet, wenn die Zufuhr flüssigen Wassers endet. Dies kann entweder geschehen, weil die Wassermenge weniger wird oder aber weil die Frostlinie weiter nach unten wandert. Die dann anschließenden Vorgänge beim Auftauen sind im folgenden Teilkapitel dargestellt.

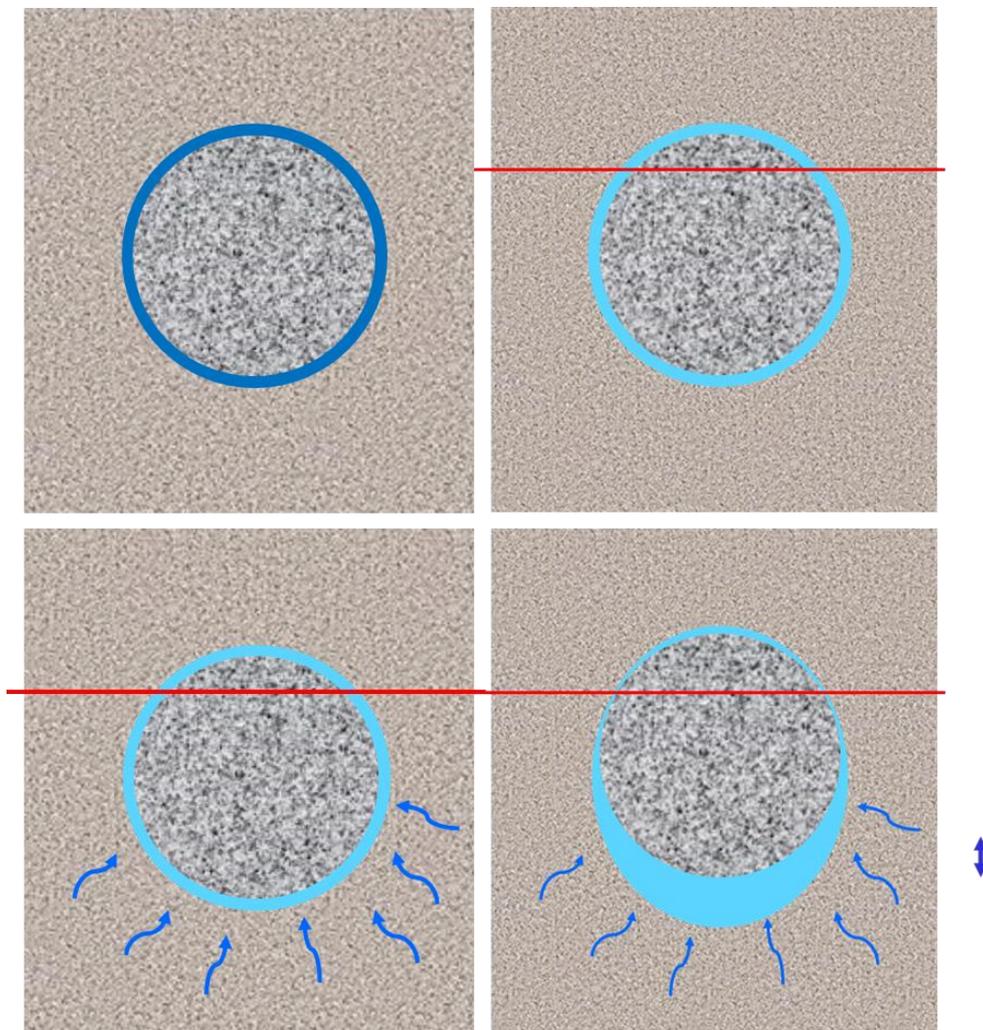


Abbildung 5: Darstellung des Frosthubes für einen einzelnen Stein. Der blaue Doppelpfeil unten rechts zeigt die Strecke des Frosthubes. Eigene Darstellung.

3.2.3 Absenken des gesamten Bodens sowie einzelner Bodenbestandteile beim Prozess des Auftauens.

Mitscherlich beschreibt, dass beim Auftauprozess feines Substrat in die Hohlräume gelangt, welches durch die Entstehung und das Abtauen der kleinen Eislinse unterhalb des Steins entstanden ist (1950, S. 50). Die Vorgänge beim Auftauen sind ähnlich denen, die bei der Suffosion stattfinden und bereits mit Abbildung 2 anschaulich dargestellt sind. Dennoch soll Abbildung 6 helfen, das Verständnis für die Bewegungen im Boden beim Tauprozess noch zu verbessern.

Die linke Darstellung in Abbildung 6 zeigt den Zustand eines durch Frosthebung ausgedehnten Bodenkörpers, in dem sich ein Stein befindet, der seinerseits ebenso angehoben wurde. Die Strecke der Hebung wird durch den kurzen blauen Doppelpfeil zwischen den Bildern gezeigt. Durch das Auftauen, findet tendenziell eine Senkungsbewegung des gesamten Bodens statt, die mit dem roten Pfeil symbolisiert ist.

Am Ende des Auftauprozesses kann sich der Bodenkörper wieder bis auf jene Mächtigkeit verdichtet haben, die er vor dem Gefrieren hatte und die durch den langen blauen Doppelpfeil gekennzeichnet ist. Die Verdichtung vollzieht dabei so, dass Raum, der unter dem Stein frei wird, durch nachrutschendes Sediment (im rechten Bild die gelben Teilchen) aufgefüllt wird. Der Stein bleibt in seiner Position und rutscht nicht nach unten. Dies kann bspw. auch daran liegen, dass er durch Frost gehalten wird, der oberhalb noch wirkt.

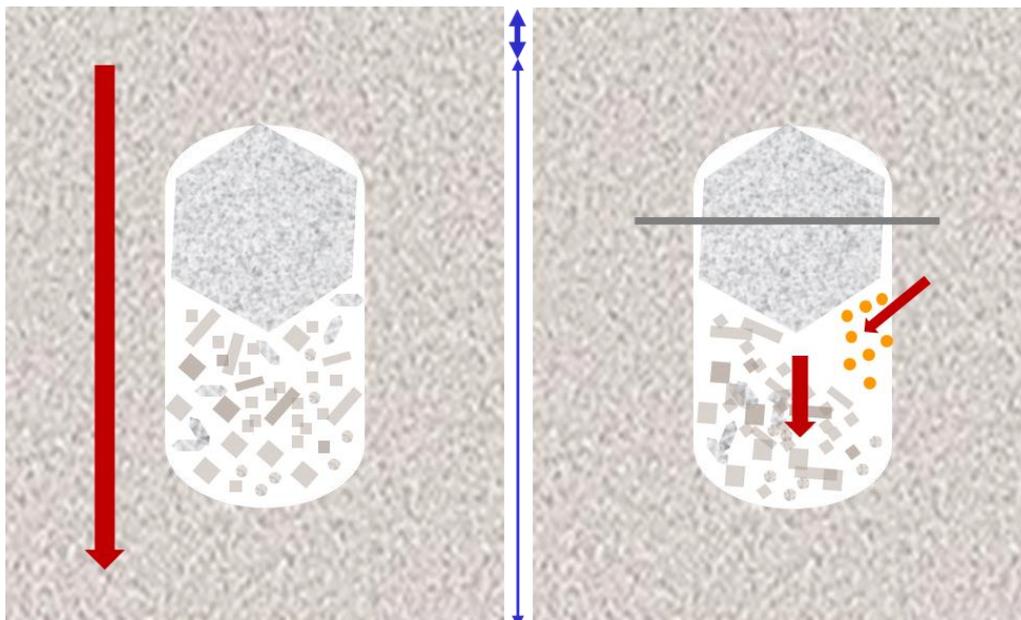


Abbildung 6: Darstellung der Teilchenbewegungen beim Prozess des Auftauens.

4 Angaben zu Frosthebung in der Literatur

4.1 Frosthebung von ganzen Bodenkörpern

Die Prozesse, die zur Vereisung von Bodenkörpern und damit verbunden zu deren Hebung führen, sind hinreichend beschrieben und in zahlreichen Arbeiten hervorragend zusammengefasst (vgl. Kellner, 2008; Unold 2006). Schwierig ist es dennoch, die genauen Dimensionen zu beschreiben bzw. die Ausmaße der sich tatsächlich vollziehenden Frosthebung abzuschätzen. Dies liegt vor allem daran, dass es nur mit sehr großen Ungenauigkeiten möglich ist, die relevanten Bodenparameter zu bestimmen, die bei der Frostwirkung eine wichtige Rolle spielen. Dies beginnt bei der Korngrößenverteilung und setzt sich bei der Dichte fort. Daraus folgt dann, dass auch die Erfassung der entsprechenden Wasserparameter nicht in hinreichender Genauigkeit erfolgen kann. Selbst wenn für ausgewählte Proben relativ genaue Werte existieren, dann tut die Heterogenität von Böden im Hinblick auf Ungenauigkeiten ihr übriges.

Bei der Bewertung von Frosthebung geht es oft um Potentiale oder mögliche Wirkungen, so dass in der Praxis maximal die Angabe von Spannen erfolgt, innerhalb derer sich ein Ereignis vollziehen wird bzw. kann. Es wird sich niemand darauf festlegen, zu sagen: *Hier wird sich der Boden um genau 8 Millimeter heben*. Was mit physikalisch-mathematischen Methoden noch schwerer oder gar nicht zu beschreiben ist, ist die genaue Abfolge der einzelnen Teilprozesse sowie vor allem die Lage der einzelnen Bodenbestandteile, die diese nach dem Abtauen und der damit verbundenen Rückverdichtung des Bodenkörpers einnehmen. Bereits die Abschätzung der Tausetzung auf der Basis der Frosthebung wird von Unold als problematisch angesehen, da die Größe der Frosthebung stark von der Geschwindigkeit der Eindringung des Frostes abhängig ist (2006, S. 59).

Es gibt jedoch einige Arbeiten, in denen auf empirische Weise versucht wurde, bestimmten Böden unter bestimmten Bedingungen konkrete Hubstrecken zuzuordnen. Dies geschah dann meist in Freiland- oder in Laborversuchen, wobei es aus technischen und organisatorischen Gründen leider bei keiner der bekannten Versuchsreihen möglich war, sämtliche relevante Parameter zu variieren. So wurde oft mit sehr ähnlichen Böden gearbeitet und bei Freilandversuchen können die Witterungsbedingungen nicht geändert werden. Für die Freilandversuche werden Zylinder verwendet, die meist einen Durchmesser von etwa einem Meter aufweisen und je nach möglicher Frosttiefe bis zu zwei Meter tief sind.

Stenberg wertete Freiluftversuche mit Zylindern von 1,80 Meter Tiefe aus (1972). Da die Versuche im Norden Schwedens stattfanden, konnten hier Frosttiefen von etwa 1,60 Meter erreicht werden. Vier Zylinder wurden verwendet, die alle mit schluffigen Böden gefüllt waren, somit ergaben sich nur wenige Unterschiede bei der Frosttiefe, der Frostdurchdringung nach Zeit sowie der letztlich erzielten Strecke des Frosthubes (Stenberg, 1979. S. 16). Die Versuche

wurden über 4 Jahre angelegt und zeigten auch von Jahr zu Jahr wenig Unterschiede, was mit den stabilen Witterungsbedingungen erklärbar ist. Es werden maximale Hubstrecken von knapp 10 cm erreicht.

Die Arbeiten zur Frosthebung unter Aspekten des Ingenieurbaus beinhalten oft Versuche, bei denen mit Auflasten gearbeitet wird, um die Situation der Bebauung zu simulieren (Kellner, 2008; Unold, 2006). Dennoch werden hier teilweise nennenswerte Hubstrecken von einigen Millimetern erreicht. Dies ist deshalb besonders bemerkenswert, weil hier meist nur mit Zylindern von wenigen Dezimetern Tiefe gearbeitet wird.

Auch Blume beschreibt Versuche zur Frosthebung unter Laborbedingungen, die zur Abschätzung der Frostempfindlichkeit unterschiedlicher Materialien durchgeführt wurden (2010). Der Frosthub wird hier in Promille (‰) angegeben, so dass jeweils der Bezug zur entsprechenden Säulenlänge besteht. Die korrekte Säulenlänge muss dann also nicht bekannt sein, um die Werte aus verschiedenen Versuchen miteinander vergleichen zu können. Dabei wies der Lößlehm mit einer maximalen Hebung von mehr als 35‰ und einer Resthebung von mehr als 7,5‰ erwartungsgemäß die höchsten Werte auf. Auch bei den von Blume beschriebenen Versuchen wurde mit Auflasten gearbeitet (vgl. ebd.).

Andererseits muss angemerkt werden, dass solche Versuche für das Auffrieren von Munition wenig repräsentativ sind, weil einerseits mit enormen Temperaturunterschieden in kurzen Zeiten gearbeitet wird, die andererseits dazu dienen, Extremsituationen zu simulieren, die so in der Realität nicht vorkommen. Außerdem stehen bei ingenieurtechnischen Arbeiten häufig nicht die möglichen Hubstrecken im Mittelpunkt, sondern die Kräfte, die durch den Frost wirken (Pewe & Paige, 1959).

Jedoch sollten auch Extrembeispiele generell nicht unterschätzt werden, so wie sie bspw. von Manz berichtet werden (2011, S. 19). Hier werden Fälle aufgezählt, bei denen die Hebung von Straßen durch Frostereignisse teilweise mehrere Dezimeter betrifft. Solche Hebungen können in der Natur nicht vorkommen, sind jedoch immer dort möglich, wo landwirtschaftlicher oder forstlicher Wegebau stattgefunden hat. Wenn sich ein Munitionsteil dann direkt unter dem Weg befindet, kann es ebenso angehoben und somit an die Oberfläche gebracht werden.

4.2 Frosthebung von einzelnen Bodenbestandteilen

Nur wenige Forschungsarbeiten beinhalten die Ermittlung der Strecke, die Kampfmittel beim Auffrieren im Verhältnis zum umliegenden Boden zurücklegen. Henry und Danyluk verfolgten diesen Ansatz, als sie im Feldversuch mit vergrabener Munition einerseits die Hebung und Senkung des gesamten Bodenkörpers und andererseits die Lage der vergrabenen Teile selbst maßen und gegenüberstellten (2004). Diese Gegenüberstellung mündete in Darstellungen von

hoher Aussagekraft, so wie mit Abbildung 7 wiedergegeben. So wird deutlich erkennbar, zu welchem Zeitpunkt die Munition an die Oberfläche tritt: beim Überschneiden der beiden Linien für Munition (UXO) sowie den Bodenkörper (Ground).

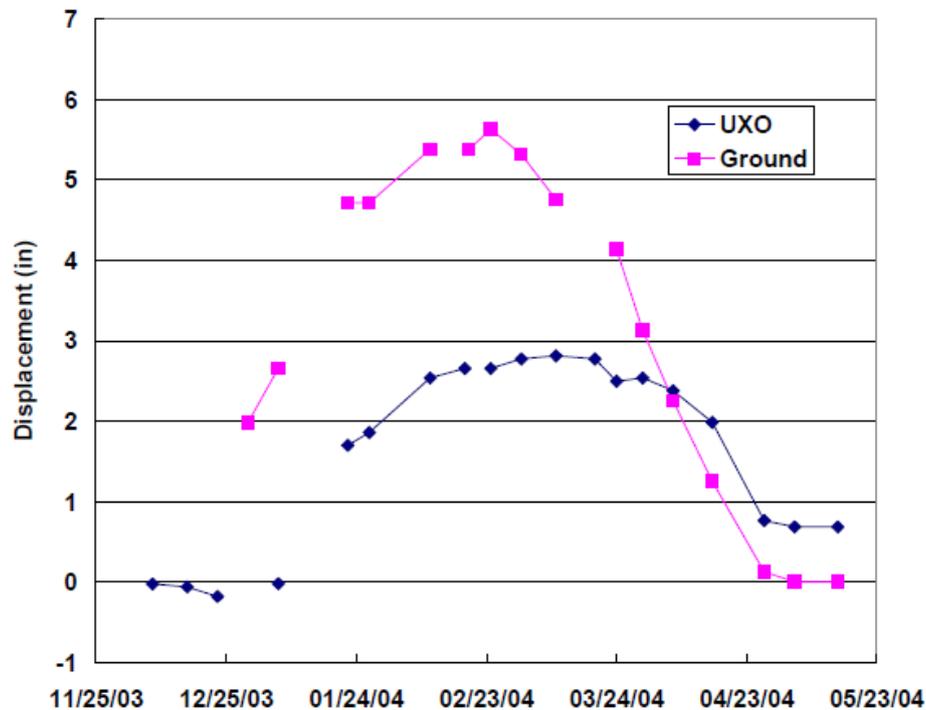


Abbildung 7: Heben und Senken von Boden (Ground) und Munition (UXO) in der Frostperiode von Ende November 2003 bis Ende April 2004. Quelle: Henry und Danyluk, 2004.

Weiterhin wurde von Henry und Danyluk festgestellt, dass sich die Kampfmittel in Abhängigkeit ihrer eigenen Ausmaße unterschiedlich bewegten. Dabei wurde eine Aufwärtsbewegung von maximal 8,1 cm während einer Saison registriert. Die Ergebnisse zeigten aber auch eine sehr große Variabilität. Bei drei Objekten erfolgte keine Hebung bzw. sogar eine geringfügige Tieferlegung. Im Durchschnitt war die Nettohebung von größeren Objekten in größerer Einbautiefe (61 - 91 cm) stärker als die von kleineren Objekten in geringerer Tiefe (10 - 30 cm). Die größten Kampfmittel wurden dabei gar nicht bewegt, was die Autoren darauf zurückführen, dass es bei der Frosthebung eine Art physikalische Grenze im Hinblick auf die Masse gibt. Die Versuche fanden in sehr frostempfindlichem Lößboden statt, die Bedingungen im US-Bundesstaat New Hampshire lassen überdies erwarten, dass mit solch hohen Werten in Deutschland nicht zu rechnen ist.

Stenström berichtet ohne die genaue Angabe der Herkunft der Daten von Hubstrecken pro Jahr, die bei der Aufwärtsbewegung von Kampfmitteln zurückgelegt werden können, die zwischen 0,5 und 2,5 cm liegen (2004). Hier werden jedoch die meteorologischen Bedingungen

in Nord-Schweden zu Grunde gelegt, weswegen in Deutschland generell ein geringeres Potential besteht. Zusammenfassend lässt sich an dieser Stelle sagen, dass ausgewertete Versuche zur Frosthebung einzelner Bodenbestandteile in Deutschland zum jetzigen Zeitpunkt nicht vorliegen. Die Tendenzen, die in den zitierten Versuchen zu erkennen sind, lassen jedoch klar erkennen, dass das Potential zur Frosthebung auch hierzulande vorhanden ist, wenn auch geringfügigere Ausprägungen zu erwarten sind.

4.3 Übersicht der Ergebnisse der Literaturrecherche

Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die maximal möglichen Strecken, die durch Frosthub erreicht werden. Dabei sind zunächst die Arbeiten aufgeführt, bei denen der gesamte Bodenkörper betrachtet wurde, in den letzten beiden Zeilen stehen die Werte, die sich bei der Betrachtung einzelner Munitionsteile ergeben hatten. Der Wert des Frosthubes bezieht sich dabei stets auf den Zustand nach der Abtauphase.

Tabelle 2: Zusammengefasste Angaben über maximale Strecken von Frosthebungen.

Arbeit	Wert des Frosthubes	Besonderheit
Kellner, 2008	mehrere mm	Bodenkörper unter Auflast
Stenberg, 1979	bis 10 cm bei Frost bis 1,60 Meter Tiefe	Bodenkörper ohne Auflast; lang anhaltende Frostperiode; frostempfindlicher Boden
Blume, 2010	mehr als 3,5 cm pro Meter Boden	relativ frostempfindlicher Boden
Stenström, 2004	bis 2,5 cm	Kampfmittel ohne nähere Angaben
Henry & Danyluk, 2004	8,1 cm	langanhaltende Frostperiode; frostempfindlicher Boden

5 Ausblick auf ein Modell zur Abschätzung der Frosthebung

In einem weiteren Teil dieser Arbeit soll die Konzipierung und Erstellung eines Modells erfolgen, mit dem die Abschätzung der Gefahr von Frosthebung von Kampfmitteln in Abhängigkeit der Witterungs- und Standortbedingungen vorgenommen werden kann. Als Eingabeparameter dienen lediglich drei verschiedene Größen:

- Die *Temperaturverteilung* innerhalb des Bodens *bei Beginn der Frostperiode*. Hier kann vom Nutzer des Programms in Abhängigkeit von der Region und damit der klimatologischen Verhältnisse eine von verschiedenen Ausgangssituationen gewählt werden.
- Die *Temperaturverläufe in der Frostperiode*. Als Daten-Input ist die tägliche Minimal- und Maximaltemperatur erforderlich. Die Eingabe kann manuell oder als Eingabe einer Datei erfolgen.
- Die *Frostempfindlichkeit des Bodens*. Es erfolgt die Eingabe des entsprechenden Koeffizienten, der von Bodenart und Ausgangs-Wassergehalt abhängig ist. Die Klassifizierung erfolgt in Anlehnung an Standards aus der Bodenkunde oder dem Ingenieurbau. Die entsprechenden Parameter sind verfügbar in bodenphysikalischen Standardwerken (Campbell & Norman, 1998; Hillel, 1998).

Mit Hilfe der genannten Eingabegrößen sowie der bodenabhängigen Parameter erfolgt die Berechnung der *Tiefe des Frostes im Bodenkörper*. Am Ende der Berechnungen stehen in jedem Falle maximale Tiefen, in die der Frost in der vorgegebenen Frostperiode eindringen kann und die somit von einer Hebung des Bodenkörpers betroffen sein können. Absolute Werte für den Frosthub und damit für mögliche Hebestrecken einzelner Kampfmittel können nicht ermittelt werden, deshalb hat das Modell auch nur qualitativen Charakter.

Es ist vorstellbar, dass es in einer verfeinerten Variante des Programms auch möglich sein kann, die Position und Größe einzelner Kampfmittel einzugeben, für die dann die Lageveränderung abgeschätzt wird.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde zunächst geschildert, welche Einflüsse auf einen Bodenkörper einwirken müssen, damit es zu einer Aufwärtsbewegung von darin befindlichen Bestandteilen kommen kann. Diese Einflüsse können natürlicher oder anthropogener Ursache sein. Als wichtigster Einflussfaktor zur Hebung von Material wurde die Frostwirkung identifiziert. Im Mittelpunkt der Betrachtung stehen beim daraus resultierenden Frosthubb bzw. dem Auffrieren die Bestandteile, die sich vor allem durch ihre Größe von den übrigen Bodenteilchen unterscheiden. Es wurde anhand von naturwissenschaftlich begründeten Zusammenhängen geschildert und anschaulich dargestellt, wie sich die genannte Aufwärtsbewegung vollzieht und wie sich die Lage der großen Bodenteile nach dem Abtauen und der damit verbundenen Abwärtsbewegung geändert haben kann.

Es wurde deutlich, dass es prinzipiell keine Unterschiede dahingehend gibt, ob es sich bei den Bodenbestandteilen um Steine oder um Kampfmittel handelt. Die Prozesse, die sich hier abspielen, werden von physikalischen Kräften getrieben, die generell gleich und gleichgerichtet wirken. Die unmittelbare Wirkung kann bei Kampfmitteln gegenüber Steinen sogar noch stärker sein, weil sie aufgrund der Materialeigenschaften eine bessere Wärmeleitung aufweisen. Dieser physikalische Parameter spielt bei den Teilprozessen der Frosthebung eine wichtige Rolle.

In der vorliegenden Arbeit erfolgte weiterhin die Auseinandersetzung mit Fachliteratur aus den vergangenen Jahrzehnten, in denen die Beschäftigung mit den Wirkungen von Frostdurchdringung auf ganze Bodenkörper sowie auf einzelne Bestandteile erfolgt war. So konnte gezeigt werden, dass sich Böden immer nach oben ausdehnen, wenn sie Frost ausgesetzt sind und zwei weitere Eigenschaften erfüllen:

- sie müssen generell frostempfindlich sein; dies ist eine Eigenschaft, die mit zunehmender Feinkörnigkeit und Ungleichförmigkeit zunimmt;
- es muss ausreichend Wasser im Bodenkörper vorhanden sein, denn hauptsächlich die Ausdehnung von Wasser bewirkt den Frosthubb.

Weiterhin wurde anhand einer relativ aktuellen Arbeit gezeigt, wie stark die Aufwärtsbewegung von Munition sein kann, die im Feldversuch gemessen wurde. Dabei wurde jedoch eine enorme Varianz festgestellt. Aus dieser Varianz folgt, dass Abschätzungen bzw. Prognosen des Auffrierens immer nur zum Ziel haben können, gewisse Spannen für einen möglichen Frosthubb anzugeben. Das Potential für das Auffrieren weiterer Munitionsteile ist auch in Deutschland vorhanden, wenn auch die Tiefen und die Intensität wesentlich geringer sind als in Teilen Nordamerikas oder in Skandinavien.

Quellen

Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005). Bodenkundliche Kartieranleitung KA 5, 5. Auflage; Hannover.

Bergedorfer Zeitung (2014). Warum auf unseren Feldern Steine "wachsen". Abgerufen am 24. April 2019 unter:

<https://www.bergedorfer-zeitung.de/archiv/schwarzenbek/article127411511/Warum-auf-unseren-Feldern-Steine-wachsen.html>.

Blume, U. (2010). Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten.- Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau, Heft S 63.

Blunk (2019). Seppi M. Steinbrecherfräse SUPERSOIL - Fendt Vario 936. Abgerufen am 24. April 2019 unter: <https://www.blunk-gmbh.de/portfolio-item/seppi-supersoil-fraese-fendt-936-vario/>.

Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz (2010). KLASSIFIKATION DER BÖDEN DER SCHWEIZ. Bodenprofiluntersuchung, Klassifikationssystem, Definitionen der Begriffe, Anwendungsbeispiele.

Abgerufen am 24. April 2019 unter: https://www.bodensystematik.de/klass_03_2010.pdf.

Campbell, G. S. & Norman, J. M. (1998). An Introduction to Environmental Biophysics. New York u. a.: Springer.

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (1997). Erosion- und Suffosionsbeständigkeit von mineralischen Abdichtungsmaterialien.

Abgerufen am 24. April 2019 unter: <https://www.gdaonline.de/pdf/E3-07.pdf>.

Eckernförder Zeitung (2014). Stein sammeln wie vor 40 Jahren. Abgerufen am 24. April 2019 unter: <https://www.shz.de/lokales/eckernfoerder-zeitung/steinesammeln-wie-vor-40-jahren-id5936491.html>.

EPA - United States Environmental Protection Agency (2002). Cleanups at Federal Facilities - Handbook on the Management of Ordnance and Explosives at Closed, Transferring, and Transferred Ranges and Other Sites. Abgerufen am 24. April 2019 unter:

<https://www.epa.gov/fedfac/handbook-management-ordnance-and-explosives-closed-transferring-and-transferred-ranges-and>.

Henry, K. S. & Danyluk, A. L. (2004). Field Tests of Frost Jacking of Unexploded Ordnance. Report - U.S. Army Engineering Research and Development Center. Cold Regions Research and Engineering Laboratory Hanover, NH 03755-1290.

Hillel, D. (1998). Environmental Soil Physics. San Diego u. a.: Academic Press.

- Kellner, C. (2008). Frosthebungsversuche von Böden infolge tief liegender Vereisungskörper. Dissertation. Heft 42 der Schriftenreihe des Lehrstuhls und Prüfamtes für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau. München: Technische Universität.
- Manz, L. (2011). Frost Heave. Geo News July 2011.
- Mitscherlich, E. A. (1950). Bodenkunde für Landwirte, Forstwirte und Gärtner. Halle: Max Niemeyer Verlag.
- Pewe, T. L. & Paige, R. A. (1959). Frost Heaving of Piles with an Example from Fairbanks, Alaska. New York: Geological Survey.
- Peltuote (2019). Kivi-Pekka Steinsammler. Abgerufen am 24. April 2019 unter: <http://pel-tuote.fi/de/tuotteet/kivenkerayskone/>.
- Stenberg, L. (1979). Full Scale Frost Heave Tests. Dissertation. Uppsala: Societas Upsalensis pro Geologica Quarternia.
- Stenström, M., Westrin, P. & Ritchey, T. (2004). Living with UXO - Using Morphological Analysis for Decision Support in Phasing out Military Firing Ranges - Adapted from a Report to the Swedish Armed Forces UXO Program.
- United States Department of Agriculture (2017). Soil Survey Manual. Handbook Nr. 18. New York. Abgerufen unter: <https://www.iec.cat/mapasols/DoculInteres/PDF/Llibre50.pdf>.
- Unold, F. (2006). Der Gefriersog bei der Bodenfrostdung und das Kompressionsverhalten des wieder aufgetauten Bodens. Dissertation. München: Universität der Bundeswehr.
- Wolff, P. (1990). Ödland- und Ackerbodenentsteinung - eine Möglichkeit zur Steigerung der Agrarproduktion in den Subtropen. Der Tropenlandwirt, Zeitschrift für Landwirtschaft in den Tropen und Subtropen, 91. Jg., S. 85-90.