

Niedersächsisches Landesamt



für Bau und Liegenschaften

**Leitstelle des Bundes
für Boden- und Grundwasserschutz / Kampfmittelräumung**

30169 Hannover
Dienstgebäude Waterloostr. 4
Telefon 0511 / 101 2337
Telefax 0511 / 101 2499

**10. Sitzung des Arbeitskreises
Arbeitshilfen Kampfmittelräumung**

**TOP 5
Mögliche Frosthebung von
Kampfmitteln in Deutschland**

**Fragen zum möglichen Auffrieren von
Kampfmitteln in Deutschland -
Ausarbeitung in Bezug auf die
Diskussion des Themas in der 10.
Sitzung des AK AH KMR**

Hannover, 25.10.2018

Dr. Holger Preetz



Inhalt

Seite

1.	Geomorphologie	1
2.	Literatur zum Auffrieren von Munition	1
3.	Grundlagen zum Prozess des Auffrierens	4
4.	Ingenieurgeologie	5
5.	Klassifikation der Frostepfindlichkeit von Böden	7
6.	Klimatische Faktoren	9
7.	Empfehlungen zum weiteren Vorgehen	10
8.	Literatur	11

Anlage

1. Bodengruppen nach DIN 18196
2. Karte der Frostzonen der BAST



1. Geomorphologie

Das Auffrieren von Steinen aus dem Untergrund ist in Gebieten mit regelmäßigem und starkem Bodenfrost ein verbreitetes und gut erforschtes Phänomen. Vor allem in der Geomorphologie wird die Frosthebung als landschaftsformender Prozess seit langem und auf verschiedenen Skalen untersucht. Hierbei werden einzelne Prozesse wie Frosthebung und Frostzug unterschieden und ausführlich in den Lehrbüchern der Geomorphologie beschrieben. Ein wichtiger Faktor ist dabei das Wasser bzw. dessen ausreichende Nachlieferung, um diese Prozesse in Gang zu bringen.¹ Zu den ausgedehnteren Formen, die hierbei auftreten gehören Pingos und Palsas in Permafrostgebieten. Kleinteiligere und sehr häufige Formen sind die Frostmusterböden, die in verschiedenen Ausprägungen wie bspw. Steinring- oder Steinstreifenböden vorkommen (z.B. Manz 2011² oder alle Lehrbücher der Geomorphologie). Ein gemeinsames Merkmal dieser Formen der Frosthebung ist, dass sie ausschließlich in Periglazialgebieten beschrieben werden und in unseren Breiten nur als fossile Formen vorkommen. Die Mechanismen dieser Prozesse sind, sofern sie einzelne oberflächennahe Objekte wie Steine oder Kampfmittel betreffen, gut verstanden.

Da jedoch auch in Deutschland, regional unterschiedlich, regelmäßig Bodenfrost auftritt, stellt sich die Frage, inwiefern auch hier ein Auffrieren von Steinen und anderen Objekten möglich ist. Aus den Geowissenschaften bzw. der Geomorphologie liegen uns derzeit keine Studien vor und es ist ungewiss, ob das Auffrieren als rezenter Prozess in der Natur unserer Breiten überhaupt untersucht wurde und in nennenswertem Umfang existiert. Es wäre hierzu eine ausführliche Literaturrecherche, jenseits des Angebots im Internet, nötig. Allein ein Blick in Google Scholar zeigt schon, dass zum Stichwort „frost heave in soils“ eine Vielzahl internationaler Publikationen existiert, die sich oftmals, ganz zeitgemäß, über Modellansätze dem Thema widmen. Generell wird aber, bspw. in der Vorlesung zur Geomorphologie der FU Berlin, gesagt, dass zum Auffrieren von Steinen nicht zwangsläufig periglaziale Bedingungen herrschen müssten. Es würden häufige bzw. jährliche Frostwechsel ausreichen um Steine und auch größere Objekte im Lauf der Zeit vom Untergrund an die Oberfläche zu bewegen³ Die gleiche Auffassung wird im Lexikon der Geowissenschaften vertreten mit der Einschränkung, dass die Prozesse eine geringere Wirksamkeit als im Periglazialgebiet aufweisen.

2. Literatur zum Auffrieren von Munition

Unabhängig von etwaigen Untersuchungen gibt es aber zahlreiche Aussagen, die vom Auffrieren von Steinen auf Ackerböden oder von Munition auf Truppenübungsplätzen berichten. Dabei handelt es sich aber nicht um Studien oder anderweitige Untersuchungen, sondern nur

¹ vgl. Lexikon der Geowissenschaften: <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/frosthub/5282>

² Manz, L. 2011: Frost Heave.- Geo News July 2011, 24 S.

³ FU Berlin, Fachbereich Geowissenschaften, PG-Net. Das Lernportal zur Einführung in die Physische Geographie: http://www.geo.fu-berlin.de/v/pg-net/geomorphologie/periglazialmorphologie/Periglaziale_Prozesse/Frosthub/index.html



um subjektive Beobachtungen oder deren mündliche Weitergabe. Daten liegen hierzu nicht vor. Diese Aussagen sind kritisch zu bewerten, da das Auftauchen von Objekten aus dem Untergrund an der Bodenoberfläche auch durch Bodenerosion oder durch Veränderung der Pflugtiefe hervorgerufen werden kann und das Auftreten der Objekte dann einer vermeintlichen Frostwirkung zugeschrieben wird.

Es liegt jedoch auch leicht zugängige Literatur vor, in der das Auffrieren von Munition in gemäßigten Breiten thematisiert oder als ein Faktor genannt wird:

So erwähnt Lewis 2010 in einem Übersichtsartikel, dass Landwirte in der Umgebung von Verdun es erleben würden, dass auch nach einer Räumung des oberflächennahen Untergrunds von Kampfmitteln, diese immer wieder durch Frosthebung an die Oberfläche gelangen würden.⁴ Quellen oder Daten hierzu werden aber nicht genannt. Der Autor räumt aber ein, dass es auch nach erfolgter Räumung aus technischen Gründen generell keine 100-prozentige Sicherheit einer Kampfmittelfreiheit gäbe. Vielleicht erklärt sich allein hieraus das „Aufwachsen“ von Munition in der Gegend von Verdun.

Auch Kuznyetsov 2008 führt die Frosthebung, gemeinsam mit Bodenerosion, als einen generellen Prozess an, durch den tiefer liegende Kampfmittel an die Oberfläche gelangen.⁵ Als Konsequenz sollte die Kampfmittelräumung bis zur maximalen Eindringtiefe des Bodenfrosts durchgeführt werden. Die Empfehlungen sind auch nur allgemeiner Art und nicht durch Literatur oder Daten abgestützt.

In den USA existiert ebenfalls eine Arbeitshilfe für die Kampfmittelräumung, herausgegeben von der EPA, der Bundesbehörde für den Umweltschutz.⁶ Darin wird Frosthebung als eine der Umweltbedingungen genannt, die eine Rolle bei der Bewertung potentieller Kampfmittelbelastungen spielen. Hiernach steht die Frosthebung mit natürlichen und anthropogenen Faktoren, welche die Exposition der Kampfmittel gegenüber dem Menschen vergrößern können, in der folgenden Reihe:

- Überflutung und Bodenerosion
- Frosthebung
- Ackerbauliche Nutzung
- Bautätigkeit
- Freizeitnutzung (die den Zugang zu Kampfmitteln ermöglicht)

⁴ Lewis, M. 2010: Unexploded Ordnance and the Environment– A Legacy of past Practises.- Canadian Military Journal, Vol. 10, No. 4, Autumn 2010.

⁵ Kuznyetsov, V. 2008: Some Aspects of Environmental Interactions Related to UXO. Proc. NATO ASI.- <http://www.nato-us.org/uxo2008/papers/kuznyetsov-jb.pdf>

⁶ 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.- <https://www.epa.gov/fedfac/handbook-management-ordnance-and-explosives-closed-transferring-and-transferred-ranges-and>



Dementsprechend gehört zumindest in Teilen der USA die Frosteindringungstiefe zu den Standortdaten, die bei der Festlegung der Tiefe der Kampfmittelräumung zu berücksichtigen sind.

Analog zur EPA wird auch von Lambert 2003 in einer Handreichung für amerikanische Kommunen mit Kampfmittelproblemen die Frosthebung als ein Faktor genannt, der bei der Räumung zu berücksichtigen ist.⁷

Einen speziellen Ansatz verfolgen MacDonald et al. 2009 mit einer Risikoanalyse für die Exposition von Zivilpersonen gegenüber UXO und der Gefahr von Detonationen. Damit sollen die von militärischen Übungsplätzen in den USA ausgehenden Gefahren quantifiziert werden. Im Zuge des Vergleichs verschiedener Berechnungsansätze wird als eine Eingangsgröße das Migrationspotential von Kampfmitteln diskutiert, welches sich auf die Frosthebung von Munition bezieht.⁸

Im Bericht von Stenström et al. 2004 wird das Problem von UXO auf schwedischen Übungsplätzen ausgeführt. Die Frosthebung wird als wichtiger Faktor bei der Aufwärtsbewegung von Steinen oder UXO genannt. Der Betrag soll in weiten Teilen Schwedens zwischen 0,5 und 2,5 cm pro Jahr liegen.⁹ Eine Quelle für diese Angabe wird in dem Bericht nicht zitiert.

Konkrete Daten zur Frosthebung werden dagegen von Henry & Danyluk 2004 geliefert, die einen Feldversuch zum Auffrieren von Munition in Hanover, New Hampshire durchgeführt haben.¹⁰ Es wurden 18 Kampfmittel unterschiedlichen Kalibers in einen stark frostempfindlichen Boden eingebaut, um eine mögliche Frosthebung zu untersuchen. 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). Inwieweit sich das Ergebnis auf Deutschland übertragen ließe bleibt unklar, da die klimatischen Bedingungen in Hanover (NH) doch anders sind als bspw. die in Hannover (NI). So herrscht dort eine mittlere Jahrestemperatur von 7,2 °C und Frost tritt von Oktober bis Mai auf. Die durchschnittlichen Frosttiefen variieren von 10 bis 20 cm, abhängig von verschiedenen Standortfaktoren und Schneebedeckung. Der Testboden war ein sandiger Schluff, ein stark frostempfindliches Substrat.

⁷ Lambert, M. 2003: Unexploded Ordnance: a Reference Guide for the Citizen.- Environmental Science and Technology Briefs for Citizens. 2001. <http://www.engg.ksu.edu/HSRC/Tosc/uxo.pdf>.

⁸ MacDonald, J.A., Small, M.J. & Morgan, M.G. 2009: Quantifying the Risks of Unexploded Ordnance at Closed Military Bases.- Environmental Science and Technology, 43: 259 – 265.

⁹ 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.- Downloaded from the Swedish Morphological Society at: www.swemorph.com

¹⁰ Henry, K.S. & A.L. Danyluk 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.



Der Blick in die Literatur gibt Hinweise darauf, dass ein Auffrieren von Munition in den gemäßigten Breiten vorkommen kann. Es stellt sich damit die Frage, wie man sich diesem potentiellen Problem in Deutschland annähern kann.

3. Grundlagen zum Prozess des Auffrierens

Der Auffrierprozess von Objekten kann anschaulich an Hand der folgenden, heute noch als Standard verwendeten, Abbildung von Beskow 1930 dargestellt werden, die auch im Lexikon der Geowissenschaften verwendet wird.

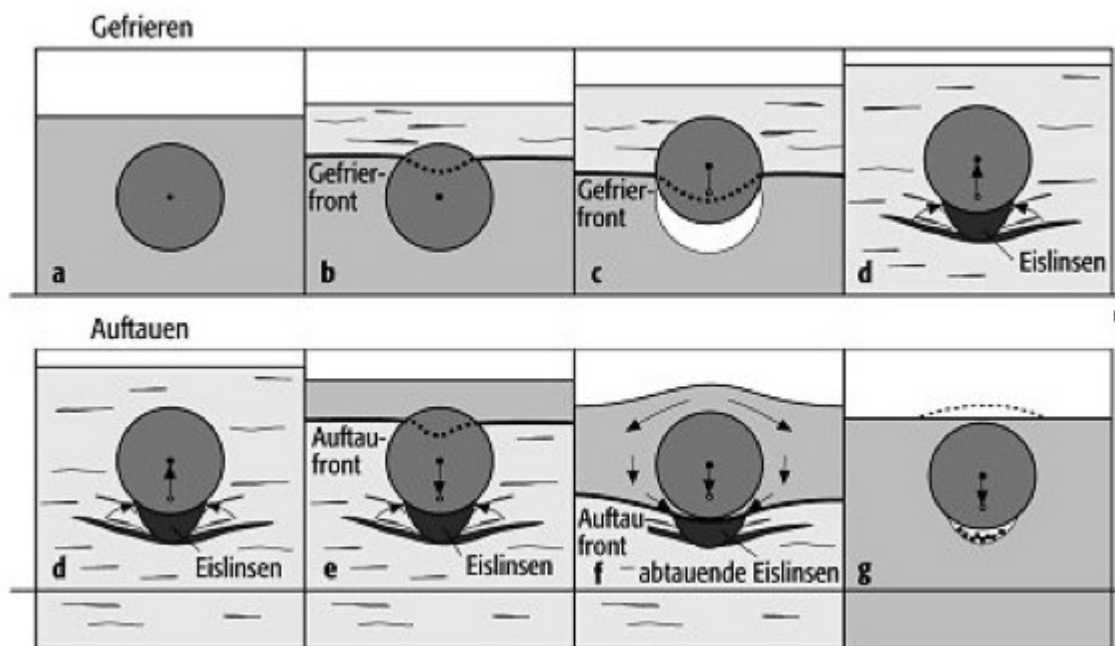


Abb. 1: Darstellung des Auffrierprozesses von Steinen nach Beskow 1935.

Die Bilder a – d in Abb. 1 zeigen die nach unten vorrückende Gefrierfront, die im Stein auf Grund seiner höheren Wärmeleitfähigkeit schneller vordringt als im angrenzenden Boden. Der Stein unterliegt mit der Volumenzunahme des gefrierenden feuchten Bodens einer Hebung woraufhin an seiner Unterseite ein Hohlraum entsteht, in den sich ungefrorenes Bodenmaterial einlagern kann (Abb. 1 c). Wegen der schnelleren Abkühlung des Steins mit der Tiefe kann sich an dessen Basis eine hygroskopisch wirkende Eislinse bilden. Die Eislinse wächst durch den Zuzug von Bodenwasser (Pfeile) an und hebt den Stein um den in Abb. 1 d dargestellten Betrag an. Mit dem von der Oberfläche kommenden Auftauprozess sackt das umgebende, aufgetaute Feinmaterial zusammen während der Stein an der Unterseite noch festgefroren ist. Schließlich taut in Abb. 1 f auch die Eislinse auf und angrenzendes Bodenmaterial dringt in diesen Bereich ein (Pfeile). Dadurch fällt der Stein letztlich um einen geringeren Betrag nach unten zurück als er zuvor herausgehoben wurde (Abb. 1 g).



Das dargestellte Prinzip des Auffrierens von Steinen muss auch bei Munition wirksam bzw. noch ausgeprägter sein, da eine Metallhülle, bspw. aus Eisen, eine ca. 30-mal größere Wärmeleitfähigkeit als ein Granit aufweist (vgl. Wikipedia: Wärmeleitfähigkeit¹¹).

4. Ingenieurgeologie

Wie zuvor schon angedeutet findet sich zunächst keine Literatur, die Daten zum Aufdringen von Steinen oder Munition hierzulande liefert. Eine große Bedeutung hat in Deutschland die Frostempfindlichkeit von Böden aber aus dem Blickwinkel der Ingenieurgeologie, besonders im Hinblick auf den Straßenbau. Die Charakterisierung der Frostempfindlichkeit von Böden orientiert sich dabei am Frosthebungsverhalten. Die Parameter, die bei diesen Prozessen wirken, sind gut bekannt und in zahlreichen Publikationen beschrieben. In Blume 2010 werden die drei grundlegenden Merkmale genannt, die erfüllt sein müssen, damit eine Frosthebung stattfinden kann:¹²

- Der anstehende Boden gefriert,
- der gefrierende Boden ist frostempfindlich und
- in der Frostzone steht Wasser zur Verfügung bzw. Wasser kann nachgesaugt werden.

In der Dokumentation des DWD zum Thema Bodenfrost wird zum ersten Punkt ausgeführt, dass die Frosteindringtiefe bei gleichen äußeren Rahmenbedingungen sehr unterschiedlich sein kann. Neben der Bodenart (siehe unten) spielen die Art des Bewuchses sowie die Schneedecke eine entscheidende Rolle. Durch eine Schneedecke wird der Energieaustausch mit dem Boden sehr stark reduziert. Sie wirkt wie eine "Wärmedecke" und verhindert damit große Frosteindringtiefen. Der Bewuchs hat prinzipiell die gleiche Wirkungsweise wie eine Schneedecke, jedoch in abgeschwächter Form. Bei einem bewachsenen Boden sind geringere Frosteindringtiefen zu erwarten als bei einer Brachfläche (gleiche Bodenart vorausgesetzt).¹³

Als frostempfindlich, bzw. anfällig für Frosthebungen, sind vor allem Böden anzusehen, die über einen kontinuierlichen Zuzug von Wasser aus tieferen Schichten verfügen, das zu Eislinien akkumuliert. Zu einem geringeren Ausmaß trägt auch das Gefrieren des bereits im Boden vorhandenen Porenwassers und dessen Volumenzunahme um 9 % bei („in-situ-freezing“). Die Eindringung des Bodenfrosts und die Frosthebung werden durch die Wechselwirkungen zwischen Wärme- und Porenwasserfluss bestimmt. Dabei sind nach Blume 2010 folgende Parameter wirksam:

¹¹ Wikipedia: Wärmeleitfähigkeit.- <https://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmeleitf%C3%A4higkeit>

¹² Blume, U. 2010: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten.- Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau, Heft S 63; 68 S.

¹³ DWD – Deutscher Wetterdienst: Dokumentation Bodenfrost.- <https://www.dwd.de/DE/leistungen/bodenfrost/bodenfrost.html>



- der Wärmefluss vom ungefrorenen zum gefrorenen Boden
- die Wärmeenergie, die vom gefrierenden Porenwasser freigesetzt wird
- die Wärmeenergie, die bei der Bildung von Eislinsen freigesetzt wird

In der Dokumentation des DWD zum Bodenfrost wird die bei den Gefriervorgängen auftretende Wärmekompensation stark vereinfacht wie folgt beschrieben: „Böden mit hohem Wassergehalt haben geringere Frosteindringtiefen, da das Gefrieren des Wassers einen Teil der zugeführten "Kälte" schluckt. Dieses hat allerdings auch zur Folge, dass solch ein Boden langsamer auftaut als ein trockener Boden, in dem nicht so viel "Kälteenergie" im Wasser gespeichert ist.“

Für den entscheidenden Faktor des Zuflusses von Porenwasser existieren zwei Erklärungsansätze. Hierbei scheint die bei der Abkühlung des Wasserfilms in den Poren auftretende Kristallisationskraft des Eises der entscheidende Faktor zu sein. Dadurch übt das wachsende Eiskristall auf das mit ihm in Verbindung stehende Porenwasser eine Saugspannung aus, die zu einer Wanderung der Wassermoleküle über die Hydrathülle der Bodenteilchen zum Gefrierbereich führt. Daneben existiert noch ein so genannter kapillarer Ansatz, der die Differenz des Druckpotenzials zwischen dem Eiskristall und dem ungefrorenen Porenwasser als Ursache des Druckgefälles ansieht, durch welches das Porenwasser zum Eiskristall fließt. Beide Erklärungen führen im Ergebnis zur Porenwasserbewegung und dem Wachsen von Eislinsen (Blume 2010, Herrmann 2016¹⁴).

Die Frostempfindlichkeit des Bodens wird durch eine Porenraumverteilung gefördert, die einen kapillaren Wasserfluss begünstigt. Daher sind Substrate aus vorwiegend schluffigen und lehmigen Bodenarten mit einer großen kapillaren Steighöhe in der Regel frostempfindliche Böden. Gering frostempfindlich sind im hiesigen Klima dahingegen dichter gelagerte, stark tonige Böden, die wegen sehr geringer hydraulischer Leitfähigkeit den Wasserzufluss behindern oder allgemein sandige oder kiesige Substrate, mit geringem Feinkornanteil, in deren vorwiegend groben Poren kein kapillarer Wassernachfluss stattfindet.

Die bekannten Mechanismen der Frosthebung können in den Lehrbüchern oder den öffentlich zugängigen Vorlesungen zur Geotechnik nachgelesen werden. Folgende Kenndaten und Klassifikationen lassen sich der Vorlesung von Herrmann 2016 und Blume 2010 entnehmen:

Ein bei der Frosthebung bedeutender Faktor ist der Gefrierdruck bzw. Frosthebungsdruck, der auf den Kristallisationsprozess in den Bodenporen zurückgeht. Die Größe der Poren bestimmt die Größe der Eiskristalle und ein Gefrierdruck durch Kristallisationskraft entsteht, wenn der Boden beim Gefrieren an der Ausdehnung des Volumens gehindert wird. Der Einfluss des Gefrierdrucks hängt von der Porengrößenverteilung ab, die maßgeblich von der Bodenart bestimmt wird (Herrmann 2016). Dieser Zusammenhang drückt sich in der folgenden Tabelle 1 in den Werten für die Feinbodenarten aus:

¹⁴ Herrmann, R.A., Univ.-Prof Dr. 2016: Vorlesung Erdbau.- Institut für Geotechnik, Grundbauinstitut, Universität Siegen.

**Tab. 1: Angaben zum Frosthebungsdruck nach Herrmann 2016**

Bodenart	Δp [kN/m ²]
grober Sand	0
Mittel- bis Feinsand o. grober schluffiger Sand	0 – 7,5
Mittelsand mit geringem Anteil < 0,0063 mm	7,5 – 15,0
Feinschluff	15 – 50
schluffiger Ton	50 – 200
Ton	> 200

5. Klassifikation der Frostempfindlichkeit von Böden

Es gibt zahlreiche Konzepte zur Klassifikation der Frostempfindlichkeit von Böden. Die meisten orientieren sich dabei am Frosthebungsverhalten. In Deutschland ist die Einstufung von Böden in drei Klassen gemäß der ZTV E-StB sehr verbreitet:¹⁵

F1 nicht frostempfindlich

F2 gering bis mittel frostempfindlich

F3 sehr frostempfindliche Böden.

Die Frostempfindlichkeit wird dabei nach der Korngrößenverteilung und den plastischen Eigenschaften der Böden entsprechend der Einteilung in die Bodengruppen nach DIN 18196 vorgenommen.¹⁶

Die Einstufung der Frostempfindlichkeit kann in einem ersten Schritt über die Zuordnung der Bodenart des Untergrunds zu den Bodengruppen in Tab. 2 und der entsprechenden Frostempfindlichkeitsklasse vorgenommen werden.

Die Definitionen der Kurzzeichen der Bodengruppen in Tab. 2 sind in Anlage 1 aufgelistet.

¹⁵ ZTV E-StB: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau, Ausgabe 2009, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, FGSV-Nr. 599, 2009

¹⁶ DIN 18196: Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, Juni 2006

**Tab. 2: Frostempfindlichkeitsklassen nach ZTV E-StB.**

	Frostempfindlichkeit	Bodengruppen (DIN 18196)
F 1	nicht frostempfindlich	GW, GI, GE SW, SI, SE
F 2	gering bis mittel frostempfindlich	TA OT, OH, OK ST ¹⁾ , GT ¹⁾ SU ¹⁾ , GU ¹⁾
F 3	sehr frostempfindlich	TL, TM UL, UM, UA OU ST*, GT*, SU*, GU*
1) zu F 1 gehörig bei einem Anteil an Korn unter 0,063 mm von 5,0 M.-% bei $C_U \geq 15,0$ oder 15,0 M.-% bei $C_U \leq 6,0$. Im Bereich $6,0 < C_U < 15,0$ kann der für eine Zuordnung zu F 1 zulässige Anteil an Korn unter 0,063 mm linear interpoliert werden		

Bei gemischtkörnigen Böden der Bodengruppen ST, GT, SU und GU in Tab. 2 wird auch die Ungleichförmigkeit der Kornsummenkurve berücksichtigt, wodurch diese von der Frostempfindlichkeitsklasse F 2 in die Klasse F 1 wechseln können (Abb. 2, vgl. Blume 2010). Für die Anwendung des verfeinerten Schemas in Abb. 2 muss aber das Laborergebnis einer Korngrößenbestimmung des Bodens vorliegen, an dem die Ungleichförmigkeit der Kornsummenkurve bestimmt werden kann.

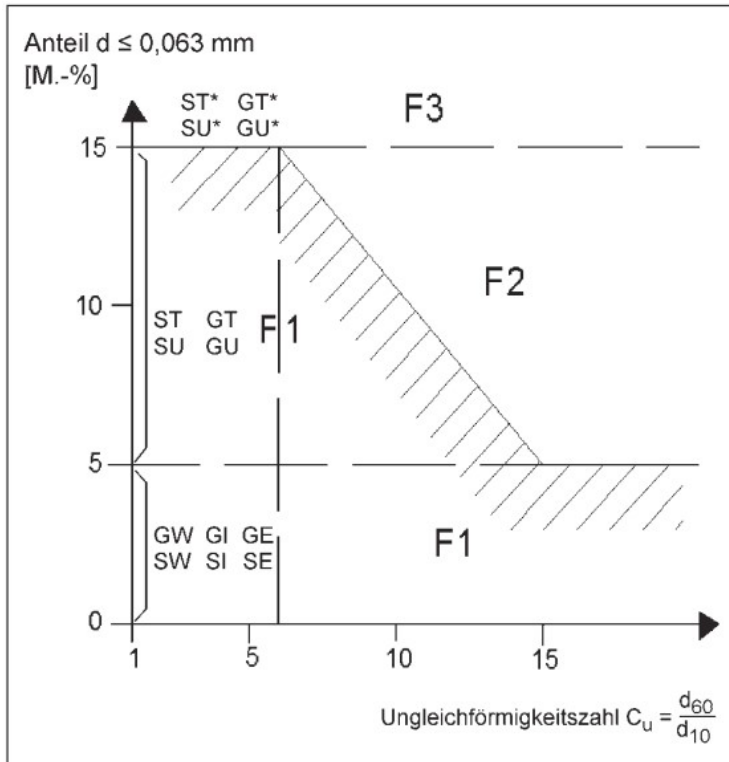


Abb. 2: Frostempfindlichkeitsklassen nach ZTV E-StB.

6. Klimatische Faktoren

Um den klimatischen Faktor bei der Entstehung von Bodenfrost zu bewerten kann auf eine Karte mit Frosteinwirkungszonen, veröffentlicht von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) zurückgegriffen werden.¹⁷ Darin werden im Hinblick auf die Dimensionierung des Oberbaus von Straßen, damit sie den Winter schadlos überstehen, die klimatischen Bedingungen in Deutschland berücksichtigt und in drei Frosteinwirkungszonen unterschieden. Für die neu entwickelte Karte der Frosteinwirkungszonen wurden die langjährigen Wiederkehrwerte der maximalen Frostindizes durch den DWD ermittelt. Die Temperaturverteilung ist mit einem Auswertungszeitraum von 50 Jahren und 221 repräsentativen Wetterstationen statistisch gut abgesichert. Entsprechend der drei Frosteinwirkungszonen wird im Straßenbau die Dicke des frostsicheren Straßenbaus geplant.

Darüber hinaus können auf der Webseite des DWD auch aktuelle Daten zur Tiefe des Bodenfrosts an zahlreichen Stationen in Deutschland abgerufen werden.¹⁸ Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Daten dort für unbewachsene Böden angegeben werden und die Frosteindringtiefe im Wald geringer ist.

¹⁷ BASt - Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.) 2013: Jahresbericht 2011 / 2012.- Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Allgemeines Heft A 35.

¹⁸ DWD – Deutscher Wetterdienst: Dokumentation Bodenfrost.- <https://www.dwd.de/DE/leistungen/bodenfrost/bodenfrost.html>



7. Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Um den Unsicherheiten und Besorgnissen hinsichtlich des potentiellen Auffrierens von Kampfmitteln zu begegnen wird folgendes Vorgehen empfohlen:

Wie oben ausgeführt, kann mit dieser Stellungnahme nur ein kleiner Ausschnitt der Literatur zum Thema des Auffrierens von Objekten in gemäßigten Breiten ausgewertet werden. Dieser Ausschnitt ist unvollständig. Daher wäre es sinnvoll, eine systematische Literaturrecherche (über das Internet hinaus!) durchzuführen (vgl. Kap. 1).

Unabhängig von einer etwaigen Literaturrecherche kann mit den für den Auffrierprozess wichtigsten Bodenparametern, der Bodenart und dem Bodenwasserhaushalt, schon eine Abschätzung des Potentials zum Auffrieren vorgenommen werden. Die Angaben zur Bodenart können der Bodenkarte entnommen und den Frostempfindlichkeitsklassen in Tab. 2 zugeordnet werden. Hierzu bedarf es einer Übersetzung der in der Bodenkarte angegebenen Bodenarten nach KA 5¹⁹ in die Bodenarten nach DIN 18196. Das ist problemlos möglich. Angaben zum Bodenwasserhaushalt sind den Bodentypen in der Bodenkarte zu entnehmen. Hierbei wären grundwasser- und stauwasserbeeinflusste Böden, Gleye und Pseudogleye und ihre Übergangsformen zu anderen Bodentypen, zu berücksichtigen. Um den für die Frosthebung essentiellen Zuzug von Porenwasser abzuschätzen, sollten die Tabellen der Bodenkundlichen Kartieranleitung mit den Angaben zu den kapillaren Aufstiegsraten der einzelnen Bodenarten zu Rate gezogen werden.

Für den Fall dass keine Bodenkarte der Staatlichen Geologischen Dienste vorliegt sollte auf die Ergebnisse der Forstlichen Standortkartierung zurückgegriffen werden, die auch die wesentlichen Angaben zu den Böden enthalten müssten.

Die Ergebnisse wären dann noch mit der Karte der Frosteinwirkungszonen der BAST (Anlage 2) oder, falls verfügbar, mit den Angaben der Tiefe des Bodenfrosts des DWD in Beziehung zu setzen.

Mit dem geschilderten Vorgehen ist zumindest eine qualitative Abschätzung des Potentials zum Auffrieren von Munition möglich.

Über die Ableitung von Bodendaten hinaus stand auch noch die Durchführung eines Versuchs zur Frosthebung bzw. dem Auffrierprozess in der Diskussion. Es wird empfohlen, einen derartigen Versuch nicht in Erwägung zu ziehen. Derartige Versuche sind aufwendig und mit methodischen Problemen behaftet und erfüllen ihren Sinn im Rahmen der Ingenieurgeologie bzw. der Geotechnik, in der mit homogenen Substraten gearbeitet wird. Es lassen sich für dieses Arbeitsgebiet sinnvolle Daten gewinnen (vgl. Blume 2010). Im Kontext der Kampfmittelräumung wäre der Aufwand jedoch unverhältnismäßig, vor allem würde sich angesichts der Heterogenität der Böden und Standortbedingungen in der Natur die Frage der Repräsentati-

¹⁹ Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung KA 5, 5. Aufl. 438 S.; Hannover.



vität eines solchen Tests und damit der Aussagekraft für die unterschiedlichen kampfmittelverdächtigen Flächen stellen.

Zuletzt soll noch auf die Möglichkeit der Vereinfachung im Umgang mit der Fragestellung hingewiesen werden. Falls die unbestimmte Sorge besteht, dass Kampfmittel an einem Standort auffrieren könnten, kann die Räumtiefe bis in die maximale Eindringtiefe des Bodenfrosts erweitert werden (vgl. EPA 2002). Hierzu kann wiederum die Karte der Frosteinwirkungszonen der BAST dann als qualitatives Kriterium herangezogen werden um Gebiete mit größerer und geringerer Gefahr von Bodenfrost zu unterscheiden.

8. Literatur

Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung KA 5, 5. Aufl. 438 S.; Hannover.

BAST - Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.) 2013: Jahresbericht 2011 / 2012.- Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Allgemeines Heft A 35.

Blume, U. 2010: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten.- Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau, Heft S 63; 68 S.

DIN 18196: Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, Juni 2006

DWD – Deutscher Wetterdienst: Dokumentation Bodenfrost.-
<https://www.dwd.de/DE/leistungen/bodenfrost/bodenfrost.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.- <https://www.epa.gov/fedfac/handbook-management-ordnance-and-explosives-closed-transferring-and-transferred-ranges-and>

FU Berlin, Fachbereich Geowissenschaften, PG-Net. Das Lernportal zur Einführung in die Physische Geographie: http://www.geo.fu-berlin.de/v/pg-net/geomorphologie/periglazialmorphologie/Periglaziale_Prozesse/Frosthub/index.html

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

Herrmann, R.A., Univ.-Prof Dr. 2016: Vorlesung Erdbau.- Institut für Geotechnik, Grundbauinstitut, Universität Siegen.



Kuznyetsov, V. 2008: Some Aspects of Environmental Interactions Related to UXO. Proc. NATO ASI.- <http://www.nato-us.org/uxo2008/papers/kuznyetsov-jb.pdf>

Lambert, M. 2003: Unexploded Ordnance: a Reference Guide for the Citizen.- Environmental Science and Technology Briefs for Citizens. 2001. <http://www.engg.ksu.edu/HSRC/Tosc/uxo.pdf>.

Lewis, M. 2010: Unexploded Ordnance and the Environment– A Legacy of past Practises.- Canadian Military Journal, Vol. 10, No. 4, Autumn 2010.

Lexikon der Geowissenschaften:

<https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/frosthub/5282>

MacDonald, J.A., Small, M.J. & Morgan, M.G. 2009: Quantifying the Risks of Unexploded Ordnance at Closed Military Bases.- Environmental Science and Technology, 43: 259 – 265.

Manz, L. 2011: Frost Heave.- Geo News July 2011, 24 S.

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.- Downloaded from the Swedish Morphological Society at: www.swemorph.com

Wikipedia: Wärmeleitfähigkeit.-

<https://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmeleitf%C3%A4higkeit>

ZTV E-StB: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau, Ausgabe 2009, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, FGSV-Nr. 599, 2009



Anlage 1

Bodengruppen nach DIN 18196



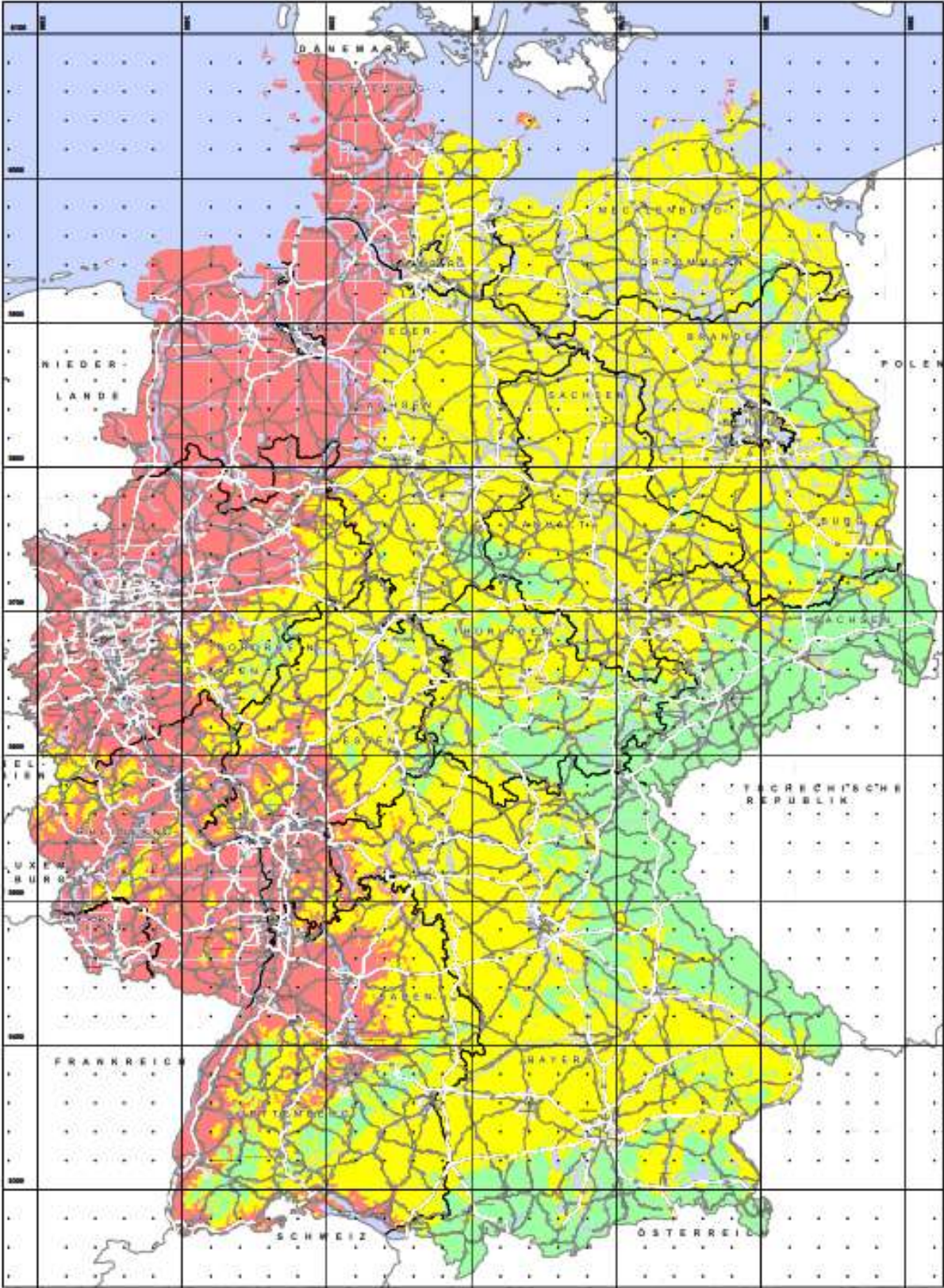
Bodengruppe

enggestufte Kiese	GE
weitgestufte Kies-Sand-Gemische	GW
intermittierend gestufte Kies-Sand-Gemische	GI
enggestufte Sande	SE
weitgestufte Sand-Kies-Gemische	SW
intermittierend gestufte Sand-Kies-Gemische	SI
Kies-Schluff-Gemische	GU bzw. $\overline{GU}^{(*)}$
Kies-Ton-Gemische	GT bzw. $\overline{GT}^{(*)}$
Sand-Schluff-Gemische	SU bzw. $\overline{SU}^{(*)}$
Sand-Ton-Gemische	ST bzw. $\overline{ST}^{(*)}$
Sand-Schluff-Gemische ohne Plastizität	\overline{SU}_{0P}
Für Querbalken gilt auch *- Symbol z.B. \overline{SU} = SU*	
leicht plastische Schluffe	UL
mittelpastische Schluffe	UM
ausgeprägt plastische Schluffe	UA
leicht plastische Tone	TL
mittelpastische Tone	TM
ausgeprägt plastische Tone	TA
Schluffe mit organischen Beimengungen	OU
Tone mit organischen Beimengungen	OT
grob- bis gemischtkörnige Böden mit Beimengungen humoser Art	OH
grob- bis gemischtkörnige Böden mit kalkigen/ kieseligen Bildungen	OK
nicht bis mäßig zersetzte Torfe (Humus)	HN
zersetzte Torfe	HZ
Schlamme als Sammelbegriff	F
Auffüllungen aus natürlichen Böden	[]
Auffüllungen aus Fremdstoffen	A



Anlage 2












Karte der Frostzonen der BAST





Anlage 2 fortgesetzt

Legende für die Karte der Frosteinwirkungszonen in Deutschland

	Frosteinwirkungszone I
	Frosteinwirkungszone II
	Frosteinwirkungszone III
	Autobahn
	Autobahn (in Bau/geplant)
	Bundesstraße
	Bundesstraße (in Bau/geplant)/ Netzergänzung im nachgeordneten Netz
	Bundesländergrenzen
	Gewässer
	Orte über 100.000 Einwohner
	Orte 50.000 - 100.000 Einwohner
5300	Gauß-Krüger-Koordinaten in km (3. Meridianstreifen)
Maßstab 1:750.000	Frostzonendaten: 