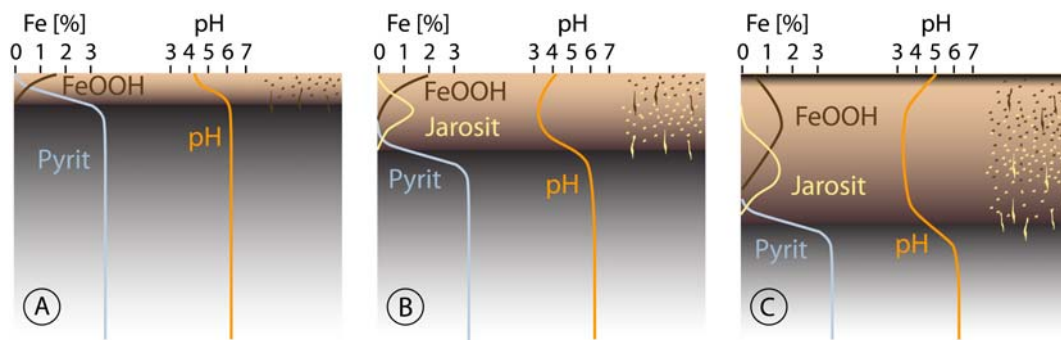


Sulfatsaure Böden

Versauerungsgefährdeter Bodenaushub im Land Bremen



Im Auftrag des Senators für Umwelt, Bau, Verkehr und Europa (SUBVE)

Impressum

Bremen, 21.12.2010

Geologischer Dienst für Bremen
Leobener Str. marum
28359 Bremen

J. Gröger
Dr. J. Blankenburg



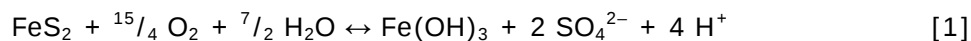
1 Darstellung der Problematik im Land Bremen

1.1 Die Problematik sulfatsaurer Böden

In Norddeutschland treten in den Niederungs- und Küstengebieten weiträumig holozäne Sedimente und Torfe auf. Im wassergesättigten Untergrund enthalten diese Ablagerungen häufig beträchtliche Mengen an Eisensulfiden (vor allem Pyrit (FeS_2)), die sich auf natürlich Weise in den letzten Jahrtausenden dort unter reduzierenden Bedingungen gebildet haben. Unter diesen anoxischen Bedingungen vorliegend, geht von dem Material keinerlei Gefahr für die Umwelt aus.

Da diese holozänen Ablagerungen nur eine geringe Tragfähigkeit aufweisen, werden sie im Rahmen von Baumaßnahmen häufig ausgetauscht. Dadurch setzen eine Belüftung der sulfidreichen Ablagerungen und damit die Oxidation der Eisensulfide ein, und **Sulfat, Säure und Metalle werden freigesetzt**. Eine Belüftung des Untergrunds kann allerdings z.B. auch durch eine Absenkung des Grundwasserspiegels erfolgen.

Die Oxidation von Eisensulfiden ist in Gleichung [1] beispielhaft an der Pyritoxidation dargestellt. Bei der Oxidation von Pyrit (FeS_2) werden pro Mol Pyrit 4 Mol Säure freigesetzt:



Übersteigt das Säurebildungspotential durch Eisensulfide die Säureneutralisationskapazität des Bodens, spricht man von einem potenziell sulfatsauren Boden. Durch Oxidation kann es auf diese Weise zu einer starken Versauerung ($\text{pH} < 4$) des Bodens kommen. Ein potentiell sulfatsaurer Boden wird auf diese Weise zu einem effektiv (oder aktuell) sulfatsauren Boden. Neben diesen anorganischen reduzierten Schwefelverbindungen, treten auch organische Schwefelverbindungen auf. Deren Säurebildungspotential gilt aber in sulfidreichen Böden als vernachlässigbar (Ahern et al., 2004).

1.2 Prozesse und Folgeerscheinungen

Bei der Oxidation eines potentiell sulfatsauren Bodens kommt es in Folge der Säurefreisetzung durch die Pyritoxidation zu einem deutlichen Abfall des pH-Werts. Im Zuge der Versauerung werden häufig pH-Werte zwischen pH 2-4 erreicht. In diesem pH-Bereich tritt eine deutliche erhöhte **Mobilität von Schwermetallen und Aluminium** auf. Aus diesem Grund dient der pH-Wert 4 als diagnostische Grenze für sulfatsaure Böden. Bei der Pyritoxidation werden zudem große Mengen **Sulfat** freigesetzt, so dass im Sickerwasser Sulfat-

Für die Bildung von Eisensulfiden, die später bei der Belüftung die Versauerung verursachen, sind grundsätzlich folgende Dinge erforderlich:

- eine Sulfatquelle (z.B. Meerwasser oder aufsteigendes Wasser im Bereich von Salzstöcken),
- eine Eisenquelle (z.B. reduzierbare Eisen-(hydr)oxide),
- organische Substanz (z.B. Pflanzenreste, Torf).

Unter wassergesättigten Bedingungen kann sich ein reduzierendes Milieu einstellen. Organisches Material wird durch Sulfat oxidiert. Dieses wird dabei zu Sulfid reduziert und kann mit Eisen(II) zu Eisensulfiden reagieren und in der Folge weiter zu Pyritumgeformt werden.

Durch die Bedeutung dieser Komponenten ergibt sich, dass Schwerpunkte der Anreicherung von Eisensulfiden in Bereichen liegen, in denen eine laterale oder vertikale Verzahnung von organischen und klastischen Ablagerungen auftritt. Eine typische Erscheinungsform ist deshalb zum Beispiel die schwefelreiche Organomarsch, wie sie verbreitet in den norddeutschen Niederungen auftritt.

1.4 Auftreten im Land Bremen

Die Stadt Bremen liegt relativ küstenfern. Deshalb sind hier bisher keine jungen (holozänen) marinen oder brackischen Ablagerungen bekannt. In Stadtgebiet von Bremen treten potentiell sulfatsaure Böden deshalb in erster Linie als Unter- und/oder Überlagerungen von Torfen und klastischen Sedimenten auf. Typische Erscheinungsformen, wie die schwefelreiche Brackmarsch, können hier nicht beobachtet werden. Das Sulfat, das zur Bildung der Eisensulfide benötigt wird, muss hier wahrscheinlich aus anderen Quellen als dem Meerwasser entstammen. Bekannte Sulfatquellen im Stadtgebiet von Bremen sind Salzstocklaugungswässer. Durch die Ablaugung im Untergrund vorliegender Salzstöcke treten hohe Chlorid- und Sulfatkonzentrationen im Grundwasserleiter auf (Abb.2). Das Sulfat kann zu Sulfid reduziert und so, wie beschrieben, zusammen mit Eisen in Eisensulfiden gebunden werden. Zum Teil tritt salzhaltiges Grundwasser sogar an der Oberfläche als Salzlake aus (z.B. Panlake im Hollerland).

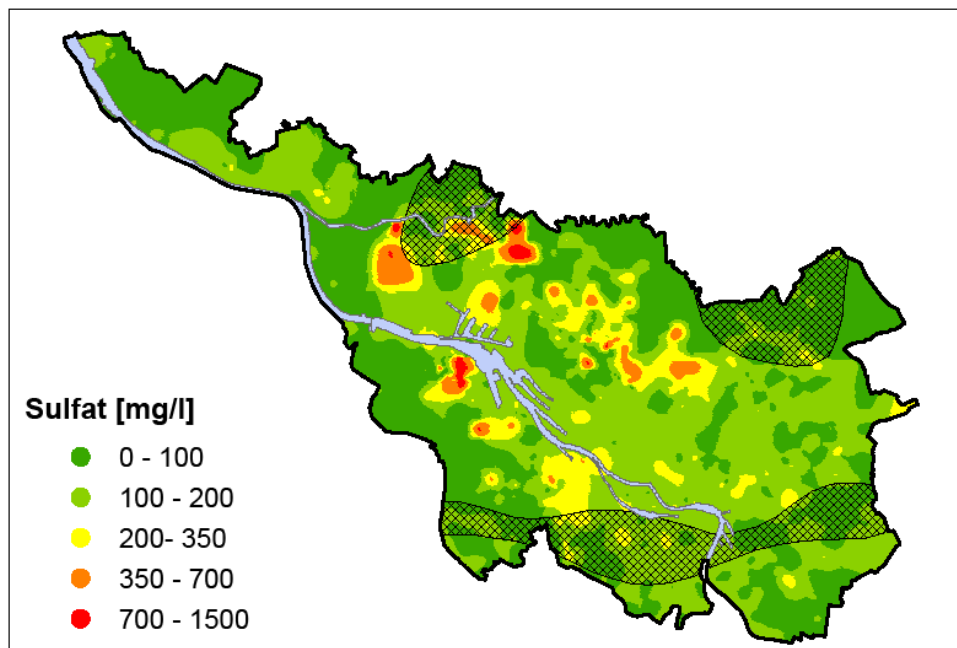


Abb. 2: Karte aus der geochemischen Grundwasserkartierung (verändert nach Ortlam und Sauer 1993), Sulfat im Grundwasser. Schwarze Schraffuren zeigen die Lage von Salzstöcken im Untergrund.

Betroffen sind vor allem die Gebiete nördlich der Weser, z.T. aber auch die südlich gelegenen Gebiete. Es ist davon auszugehen, dass diese Salzstocklaugungswässer eine primäre Sulfatquelle für die Bildung von Eisensulfiden darstellen.

In **Bremerhaven** hingegen treten brackische und marine Ablagerungen, in denen die Bildungsbedingungen für sulfatsaure Böden gegeben sind, mit bedeutenden Flächenanteilen auf. Hier ist als Sulfatquelle, im Gegensatz zum Stadtgebiet von Bremen, vor allem das Meer von Bedeutung.

In Bremerhaven ist ein Auftreten bekannt im Stadtteil Wulsdorf. Potentiell sulfatsaure Böden treten hier als Organomarsch über Niedermoortorfen auf, in die Schlicklagen eingeschaltet sind.

Sowohl aus dem **Stadtgebiet von Bremen**, als auch aus **Bremerhaven** sind effektiv sulfatsaure Böden nicht bekannt.

2 Kartenwerke über die Verbreitung von (potenziell) sulfatsauren Böden

Die für das Land Bremen vorliegenden Kartenwerke „sulfatsaure Böden 0-2 m“ und „sulfatsaure Böden des tieferen Untergrundes (2-15 m, bzw. Holozänbasis)“ wurden auf Basis vorhandener Karten und einer Auswertung der Bohrdatenbank des Geologischen Dienstes für Bremen erstellt.

2.1 Zugrundeliegende Kartenwerke und Daten

Als Grundlage für die vorliegenden Karten dienten die Karten „Sulfatsaure Böden in niedersächsischen Küstengebieten (SSB50)“ des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) für 0-2 m und jene für den tieferen Untergrund bis zur Holozänbasis (Schäfer et al. 2010a). Des Weiteren, wurden die Verbreitung von Verzahnungen von Schluff, Ton und Torf aus der Bohrdatenbank des GDfB, die Geologische Stadtkarte von Bremerhaven, 1:10000 sowie für Abgrenzungen z.T. die Geologische Karte von Bremen 1:25000 genutzt. Für den tieferen Untergrund von Bremen liegen vom LBEG nur Daten für einen kleinen Teil im Südwesten des Bremer Stadtgebiets vor, da die Auswertungskarte für den tieferen Untergrund auf der Profiltypenkarte des Küstenholozäns basiert (Schäfer et al. 2010a) und diese Bremen nicht abdeckt. Die Bewertung des tieferen Untergrundes des Stadtgebietes von Bremen erfolgte deshalb ausschließlich anhand der Daten aus der Bohrdatenbank. Begründet durch die begrenzte Datenlage zu dieser Problematik, konnte hier nur die Einheit GR2.3 ausgewiesen werden. Relevante Flächenanteile von Einheiten einer höheren Gefährdungsklasse sind in diesem geologischen Rahmen allerdings auch nicht zu erwarten.

2.2 Legendeneinheiten und Bodengruppen

Die Legendeneinheiten die hier aufgeführt sind entstammen der Karte „Sulfatsaure Böden in niedersächsischen Küstengebieten (SSB50)“ des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) des Landes Niedersachsen (Schäfer et al. 2010a). Die Beschreibungen der Einheiten wurden zum Teil geringfügig auf die auftretenden Ablagerungen im Bremer Raum angepasst. Eine Übersicht über alle Legendeneinheiten und die zugehörigen Gefährdungsklassen ist in Tabelle 1 dargestellt. Im Stadtgebiet von Bremen dominieren die Einheiten GR2.3 und GR2.6, wohingegen in Bremerhaven auch die Klassen GR2.1, GR 2.2, GR 2.4 und GR 2.5 mit relevanten Flächenanteilen auftreten.

Tabelle1: Legendeneinheiten und Erkundungsmaßnahmen (modifiziert aus Schäfer et al. 2010a)

Farbe	Kürzel	Beschreibung	Einstufung des Gefährdungspotentials	Maßnahmen für Kartierung
	GR1	Effektiv (aktuell) sulfatsaure Böden. Stark saure Böden, häufig mit Auftreten von Maibolt	sehr hoch	• Flächige Erkundung mit engem Raster, ggf. bis zur Holozänbasis • Prüfung mit H₂O₂ und HCl (Kalknachweis)
	GR2.1	Potentiell sulfatsaure Böden, carbonatfrei. Hohes Potential für ausgeprägte Versauerung	sehr hoch	
	GR2.2	Potentiell sulfatsaure Böden, carbonatfrei bis mittel carbonathaltig. Mittleres Potential für Versauerung	mittel-hoch	
	GR2.3	Über- und Unterlagerungen von Torf und Ton. Mittleres bis z.T. hohes Potential für ausgeprägte Versauerung	mittel-hoch	• Erkundung bei begründeten Hinweisen • Prüfung mit H₂O₂ und HCl (Kalknachweis)
	GR2.4	Carbonatfreie, tonig-brackische Sedimente. Stetiges Auftreten von sulfatsauren Böden mit geringem Flächenanteil	mittel	
	GR2.5	Carbonathaltige, tonig-brackische Sedimente. Auftreten von sulfatsauren Böden mit mittlerem bis gerigem Versauerungspotential mit geringem Flächenanteil	gering	
	GR2.6	Marinogene / fluviatile Substrate ohne sulfatsaure Böden	gering	
		Niedermoor. Geringer Flächenanteil potentiell sulfatsaurer Böden	gering, örtlich mittel-hoch	Erkundungsmaßnahmen nur in begründeten Ausnahmen
		Hochmoore. Keine Bildungsbedingungen für sulfatsaure Böden.	nicht vorhanden	

Einheit GR1 – Effektiv (aktuell) sulfatsaure Böden

Effektiv sulfatsaure Böden (pH<4 durch Sulfidoxidation) treten im Land Bremen nicht auf.

Gefährdungspotential: sehr hoch

Einheit GR2.1 – Potentiell sulfatsaure Böden, carbonatfrei

Carbonatfreie Ablagerungen mit ausgeprägtem Versauerungspotential. Im Falle einer Belüftung ist folgende Entwicklung zu beobachten:

- kritische Versauerung pH < 4,
- hohe Sulfat-Austräge,
- erhöhte Schwermetalllöslichkeit, d. h. erhöhte Schwermetallverfügbarkeit und erhöhte Schwermetallausträge,
- Pflanzenschädigung (Al-Toxizität).

Gefährdungspotential: sehr hoch.

Einheit GR2.2 - Potentiell sulfatsaure Böden, carbonatfrei bis mittel carbonathaltig

Ablagerungen häufig mit freiem Carbonat ($1-7\% \text{ CaCO}_3$) und dann nur schwache bis mäßige Bodenversauerung. Entwicklungen bei Oxidation:

- Entkalkung, ggf. mäßige bis starkes Versauerung, die Versauerung kann teilweise oder vollständig durch Carbonate gepuffert werden.
- hohe SO_4 -Austräge,
- eventuell erhöhte Schwermetallmobilität (bei starker Versauerung),

Gefährdungspotential: mittel-hoch (abhängig vom Carbonatgehalt).

Einheit GR2.3 – Über- und Unterlagerungen von Torf und Ton

Grenzbereich zwischen (marinen) Sedimenten und Mooren (Über- oder Unterlagerung oder Wechsellagerung mit Torf). In diesen Verzahnungsbereichen von klastischen Sedimenten und Torfen sind häufig die Bildungsbedingungen für sulfatsaure Böden gegeben.

Gefährdungspotential: mittel-hoch.

Einheit GR2.4 – carbonatfreie tonige brackische Sedimente

Diese Einheit umfasst die brackischen tonigen Sedimente des Sietlandes mit nur geringen Anteilen organische Substanz. Lokal treten jedoch Ablagerungen mit höheren Organikgehalten und z.T. effektiv sulfatsaure Böden mit Maibolt auf.

Gefährdungspotential: mittel.

Einheit GR2.5 – carbonathaltige tonige brackische Sedimente

Wie auch bei Einheit GR2.4 handelt es sich hier um brackische Sedimente, die jedoch Carbonat enthalten. Der Anteil organischer Substanz ist im Allgemeinen gering. Effektiv sulfatsaure Böden treten nur äußerst selten auf.

Gefährdungspotential: gering.

Einheit GR2.6 – Marinogene / fluviatile Substrate ohne sulfatsaure Böden

Diese Einheit umfasst die junge marine Marsch und die Flussmarschen. Sulfatsaure Böden treten in diesen Gebieten kaum auf.

Gefährdungspotential: gering.

Einheit Niedermoore

Reine Niedermoore ohne klastische Beimengungen enthalten eher selten bedeutende Mengen an Eisensulfiden. Im Falle von Schlick-Beimengungen können sich jedoch sulfatsaure Böden entwickeln.

Gefährdungspotential: gering, örtlich mittel-hoch.

Einheit Hochmoore

Hochmoore stellen generell keine Bildungsräume für sulfatsaure Böden dar. Es treten in Hochmooren trotzdem sehr niedrige pH-Werte auf, die durch organische Säuren bedingt sind.

Gefährdungspotential: nicht vorhanden.

Andere Flächen

Weiß ausgehaltene Flächen umfassen vor allem Sande, Geestgebiete, Auffüllungen u.a., in denen ein Auftreten von sulfatsauren Böden unwahrscheinlich ist.

3 Vorerkundung, Probenahme, Bewertung und Analytik

Im Folgenden wird eine Übersicht über die Vorgehensweise zur Standortbewertung gegeben und zwar zur Vorerkundung, Probenahme, Bewertung und Analytik. Detaillierte Ausführungen hierzu sind der Handlungsempfehlung (Gröger et al., 2009) und den Geofakten 24 und 25 (Schäfer et al. 2010a, 2010b) zu entnehmen.

3.1 Vorerkundung

Für die Vorerkundung steht mit diesem Werk ein neues Instrument zur Verfügung. Die hier vorgestellten Karten des Gefährdungspotentials durch sulfatsaure Böden für das Land Bremen gliedern sich in Karten für 0-2 m Tiefe und 2-15 m Tiefe (bzw. bis zur Holozänbasis). Je nach Art und Tiefe des Eingriffs sollten die jeweiligen Kartenwerke konsultiert werden. Des Weiteren sollte versucht werden zu ergründen, ob aus dem betroffenen Bereich Probleme mit sulfatsaurem Bodenaushub bekannt sind. Die bisher bekannten Flächen, bei denen Probleme auftraten sind in Tabelle 2 vermerkt. Im Ortsteil Hohweg sind Flächen zu finden, wo im Untergrund Torfe mit Gehalten an Sulfidschwefel von bis zu 8% auftreten. Weitere Problembereiche sind aus dem Gebiet des Bürgerparks bekannt. Beide Flächen liegen im Bereich der Legendeneinheit GR2.3, Über- und Unterlagerungen von Ton und Torf.

Tabelle 2: Bekanntes Auftreten potentiell sulfatsauren Bodenaushubs in Bremen und Bremerhaven.

Ort	Art des Materials	Legenden-einheit
Bremen, Ortsteil Hohweg (2 untersuchte Flächen)	sulfidhaltige Niedermoortorfe, unter sulfidfreiem Klei	GR2.3
Bremen, Bürgerpark	sulfidhaltige Niedermoortorfe, unter sulfidfreiem Klei	GR2.3
Bremerhaven, Ortsteil Wulsdorf	sulfidhaltige Niedermoortorfe, verzahnt mit sulfidhaltigem Schlick	GR2.3

3.2 Probenahme

Bei der Erkundung muss eine **tiefenorientierte Probenahme** durchgeführt werden. Die Untersuchung von Mischproben ist nicht zielführend. Die Beprobung und Auswertung sollte durch einen Sachverständigen ausgeführt wer-

den. Dieser kann anhand des Bohrbefundes und visuellen Redox-Merkmalen oder –Messungen eine Vorauswahl treffen, so dass das zu untersuchende Probenaufkommen gegenüber fest vorgegebenen Entnahmetiefen verringert wird. Bei allen Beprobungen ist eine Profilaufnahme durchzuführen. Eine detaillierte Beschreibung der durchzuführenden Arbeiten ist in der Handlungsempfehlung zu finden (Gröger et al., 2009). Die entnommenen Proben müssen umgehend untersucht oder bis zur Analyse eingefroren werden.

3.3 Analytik

Die chemische Analytik sollte nach Handlungsempfehlung (Gröger et al., 2009) und/oder Geofakten 25 erfolgen. Mit Hilfe der Analytik werden die relevanten Säurebildungspotentiale des Bodematerials und die Säureneutralisationskapazität bestimmt. Hierbei ist zu beachten, dass carbonatfreie Ablagerungen auch über eine beträchtliche Säureneutralisationskapazität verfügen können. Somit ist die alleinige Kalkbestimmung nicht ausreichend für die Ermittlung der Säureneutralisationskapazität in kalkarmen oder –freien Ablagerungen.

Organische Ablagerungen sind mit Einschränkungen behaftet, was die in den Geofakten 25 beschriebene Analytik betrifft (siehe Schäfer et al., 2010b). Verfahren in der „Handlungsempfehlung zur Bewertung des Versauerungspotentials von Aushubmaterial durch reduzierte anorganische Schwefelverbindungen“ hingegen sind ohne Einschränkung für die Analyse organischer Ablagerungen, wie sie vielfach im Bremer Stadtgebiet auftreten, geeignet.

Für bereits stark versauerte Torfmaterialien gibt es zurzeit keine Methoden, die auch das Säurebildungspotential aus Oxidationsprodukten (z.B. Maibolt) erfassen. Jedoch treten im Land Bremen derartige effektiv sulfatsaure Böden nicht auf.

3.4 Bewertungsgrundlagen

Die Bewertung erfolgt nach dem Prinzip der Säure-Base-Bilanzierung. Das bedeutet, dass die Säurebildungspotentiale mit der zur Verfügung stehenden Säureneutralisationskapazität (SNK) des Materials bilanziert werden.

Die Bilanz kann als Netto-SNK angegeben werden. Diese setzt sich aus der SNK des Bodens abzüglich der Säurebildungspotentiale zusammen.

Ist die Netto-SNK negativ, so ist eine kritische Versauerung auf pH-Werte < 4 zu erwarten und bei dem untersuchten Material handelt es sich um einen potentiell sulfatsauren Boden.

4 Umgang mit Bodenaushub

Im Umgang mit sulfatsaurem Bodenaushub gilt es drei Kernstrategien zu verfolgen (in hierarchischer Reihenfolge):

- 1) Vermeidung oder Minimierung des Eingriffs,
- 2) On-site Management,
- 3) Umlagerung/Ablagerung.

Bei anfallendem Bodenaushub muss immer **zwischen effektiv (aktuell) sulfatsaurem, potenziell sulfatsaurem und nicht sulfatsaurem** Material unterschieden werden. Grundsätzlich sollten diese Materialien **nicht vermisch**t werden, um eine unnötige Umlagerung/Entsorgung von Material zu verhindern. Alle Maßnahmen des Management sulfatsaurer Böden betreffend sollten von einem Sachverständigen begleitet werden.

4.1 *Potenziell sulfatsaurer Bodenaushub*

Anfallender potenziell sulfatsaurer Bodenaushub sollte schnellstmöglich wieder in ein reduzierendes Milieu verbracht werden. Auf keinen Fall sollte das Material entwässert werden, das so schnell die Oxidation der enthaltenen Sulfide einsetzen kann.

4.1.1 **Grundlegende Strategien: Vermeidung**

Die effektivste und kostengünstigste Strategie im Umgang mit potentiell sulfatsauren Böden ist die **Vermeidung** einer Belüftung. Unter natürlichen Bedingungen, im wassergesättigten Milieu, stellen diese Ablagerungen keine Gefahr dar. Um eine unnötige Belüftung von derartigen Ablagerungen zu verhindern, sollte bereits bei der **Erstellung von Bebauungsplänen und der Ausweisung von Gewerbegebieten** darauf geachtet werden möglichst nicht in Gefährdungsgebieten zu bauen. Diese lassen sich durch die nun für Bremen vorliegenden Kartenwerke hinreichend genau erfassen. Die Kartenwerke können jedoch keine alleinige Grundlage für eine Bewertung sein. Sie liefern nur eine Abschätzung des Gefährdungspotentials. Kleinräumig sind hier jedoch Abweichungen möglich.

Wenn die Struktur der Gebiete und die Flächenverfügbarkeit es zulassen, sollte eine Alternativfläche für die geplante Maßnahme bestimmt werden. Für den Fall, dass der Eingriff auf einer bestimmten Fläche nicht zu vermeiden ist, sollte überprüft werden, ob sich eine Belüftung pyritreichen Materials vermeiden oder reduzieren lässt. Hierzu kann z.B. die **Lage der Eingriffe auf der Zielfläche** (damit also in den meisten Fällen die Lage der Bebauung) angepasst

werden, so dass möglichst wenig potentiell sulfatsaures Bodenmaterial betroffen ist. Eine weitere Option ist es die Art der benötigten Fundamente anzupassen. Hierbei könnte z.B. der Einsatz von **Punktfundamenten** hilfreich sein. Ebenso sollte geprüft werden, ob sich der Austausch von nicht-tragfähigem Material durch **Auflastverdichtung** vermeiden lässt.

In jedem Fall sollte beim Vorliegen potentiell sulfatsaurer Böden eine Grundwasserabsenkung vermieden werden, da das Material sonst auch im ungestörten Schichtverband oxidieren kann.

4.1.2 Grundlegende Strategien: Aushub und Umlagerung

Ist ein Aushub potentiell sulfatsaurer Böden unumgänglich, so sollte das Material möglichst nicht weit transportiert werden und umgehend in eine sichere Ablagerungsform überführt werden. Die **Umlagerungsziele** hierbei sind:

- Vollständige Umlagerung des potentiell sulfatsauren Bodenaushubs,
- Langzeitsichere Ablagerung des Materials,
- Vermeidung einer Beeinträchtigung von Schutzgütern.

Eine Umlagerung kann an Ort und Stelle (**on-site**) erfolgen oder an einem anderen Ort, an den das Material transportiert wird (**off-site**). Eine typische Möglichkeit für das on-site Management von sulfatsauren Böden ist z.B. der Leitungsbau. Beim off-site management bieten sich drei Möglichkeiten

- **Subaquatische Ablagerung** (Vollständige Vermeidung der Sulfidoxidation)
- **Semiterrestrische Ablagerung** (Beschränkung der Sulfidoxidation auf den Oberboden und Neutralisation durch Kalkung)
- **Terrestrische Ablagerung** (vollständige Sulfidoxidation mit Neutralisation der Säure durch Kalkung)

Für die beschriebenen Ablagerungsformen müssen allerdings die rechtlichen Rahmenbedingungen geprüft werden. Hier kann nur eine fachliche Darstellung erfolgen.

4.1.2.1 On-site-Management

Die ortsnahe Verbringung von potentiell sulfatsaurem Bodenaushub hat höchste Priorität. Beim Anfall von Aushubmassen sollte geprüft werden, ob sich das Material auf der betroffenen Fläche im reduzierten Untergrund verbringen lässt. Die Unterbringung von Aushubmaterial auf der Fläche ist allerdings nur möglich, wenn nicht auf der gesamten Fläche ein Bodenaustausch erforderlich

ist (Gröger et al., 2009). Aufgrund technischer Aspekt und des Aufwandes ist dies jedoch häufig nicht möglich.

4.1.2.2 On-site-Management: Leitungsbau

Im Falle des Leitungsbaus muss nach Einbringen der Leitung ein umgehender schichtkonformer Wiedereinbau des Materials erfolgen. Auf diese Weise lassen sich negative Folgeerscheinungen weitgehend vermeiden. Hierzu muss in der Regel eine Aufteilung des Aushubs nach Tiefenlage in drei Komponenten erfolgen:

- humoser Oberboden
- oxidiertes Material
- reduziertes Material

Das Material muss anschließend in umgekehrter Reihenfolge wieder eingebracht werden. Im Zuge dieser Maßnahmen müssen lange Zwischenlagerungszeiten vermieden werden.

4.1.2.3 Off-site-Management: Subaquatische Ablagerung

Die subaquatische Ablagerung von potentiell sulfatsaurem Bodenaushub dient der vollständigen Vermeidung einer Oxidation der im Bodenmaterial enthaltenen Sulfide. Dadurch wird neben der Säurefreisetzung auch eine Schwermetallmobilisation verhindert. Die Verbringung des Aushubs muss hierbei unterhalb des mittleren Grundwassertiefenstandes erfolgen, um dauerhaft reduzierende Bedingungen im Aushubmaterial zu gewährleisten (Abb. 3). In erster Linie sollte hierbei die Verfüllung von existierenden Vertiefungen vorgenommen werden. Diese könnten stehende Gewässer oder Gruben (z.B. durch Gewinnung von Klei entstanden) sein. Das umgebende Material sollte jedoch möglichst geringe Durchlässigkeiten aufweisen und es muss ein reduzierendes Milieu vorherrschen. Ein Einbau in einen Grundwasserleiter sollte vermieden werden.

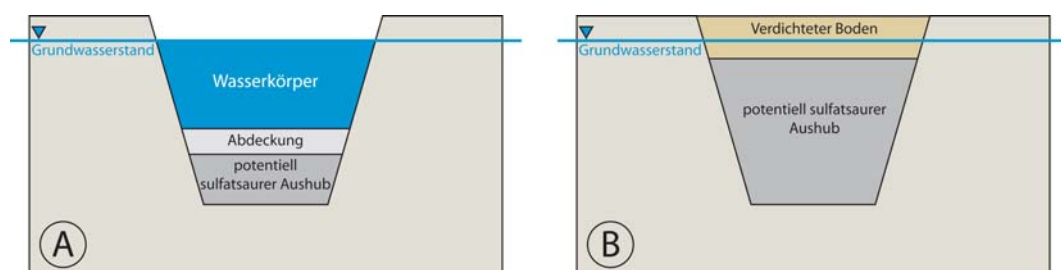


Abb. 3: Subaquatische Ablagerung von potentiell sulfatsaurem Bodenaushub (Ansicht im Querschnitt). A: am Boden eines stehenden Gewässers oder B: Unterhalb des Grundwasserspiegels. (verändert nach Dear et al., 2002)

4.1.2.4 Off-site-Management: Semiterrestrische Ablagerung

Eine Möglichkeit die, neben vielen anderen Faktoren, auch einen Mangel an Ablagerungsmöglichkeiten (Vertiefungen, Gruben, verfüllbare Gewässer) berücksichtigt, ist die semiterrestrische Ablagerung (Schäfer et al, 2010b). Bei der semiterrestrischen Ablagerung wird ein abflussloser Polder an einem grundwassernahen Standort (im Bereich des Küstenholozäns, z.B. im Sietland) errichtet (Abb. 4). Im Untergrund müssen hier Ablagerungen mit geringer Durchlässigkeit und Beimengungen organischer Substanz vorliegen, in denen ein reduzierendes Milieu vorherrscht. Die Verwallung aus dem vor Ort anstehenden Material sorgt für den Einstau von Regenwasser. Auf diese Weise stellt sich ein Stauwasserstand im Polder ein, der über dem Grundwasserspiegel liegt. Dadurch sind im unteren Bereich der Ablagerung reduzierende Bedingungen gewährleistet.

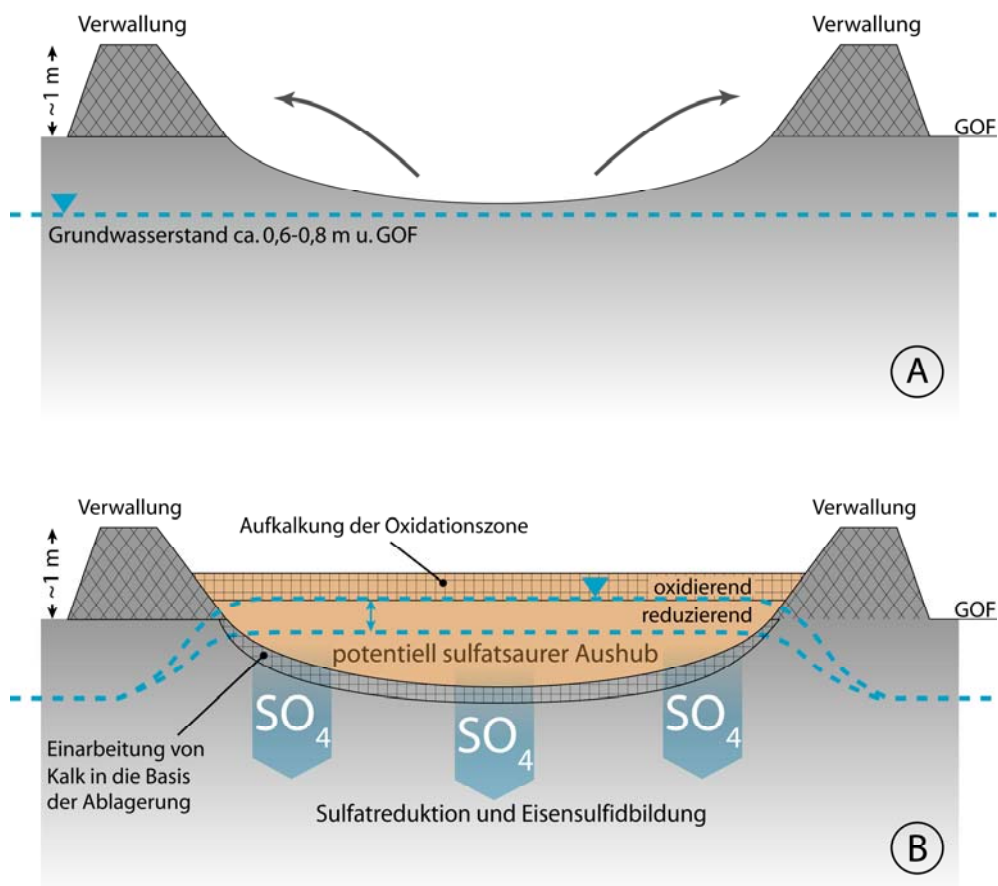


Abb. 4: Semiterrestrische Ablagerung von potentiell sulfatsaurem Bodenaushub (Ansicht im Querschnitt). (verändert nach Schäfer et al., 2010b) A: Anlage eines abflusslosen Polders. B: Ablagerung von potentiell sulfatsaurem Bodenaushub mit zusätzlicher „Kalkfalle“ an der Basis.

Die im oxischen Oberboden durch Sulfidoxidation freigesetzte Säure sollte durch Kalkung der oxischen Zone neutralisiert werden. Zusätzlich sollten in die oberen 0,5 m der Polderbasis Kalk eingearbeitet werden, um eventuell freigesetzte Säure zu neutralisieren und Schwermetalle zu immobilisieren. Die Kalkmengen richten sich nach dem Säurebildungspotential des Materials (siehe Schäfer et al., 2010a,b und Gröger et al., 2009). Das Sulfat, das mit dem Sickerwasser in den Untergrund eingetragen wird, wird mit organischer Substanz zu Sulfid umgesetzt und kann dann in Form von Eisensulfiden festgelegt werden.

Ob dies Verfahren im Stadtgebiet von Bremen oder Bremerhaven zu realisieren ist bleibt fraglich. Gegebenenfalls müssen derartige Ablagerungsmaßnahmen außerhalb der Landesgrenzen ausgeführt werden.

4.1.2.5 Off-site-Management: Terrestrische Ablagerung

Die terrestrische Ablagerung von sulfatsauren Böden, bei der das Material oxidiert, kann in speziell eingerichteten Ablagerungsflächen mit Neutralisation der entstehende/entstandene Säure erfolgen. Sulfatsaurer Bodenaushub sollte **nicht auf reguläre Deponien** verbracht werden, da das Material große Mengen organischer Substanz enthalten kann und chemisch instabil ist, bedingt durch die Prozesse der Pyritoxidation. Zudem sollte das Material nicht mit Fremdstoffen vermischt werden, außer zur Neutralisation der Säure (z.B. Kalk). Eine mögliche Form der Ablagerung ist in Abbildung 5 dargestellt. Der (potentiell) sulfatsaure Bodenaushub wird mit einer Kalkmenge durchmischt, die ausreichend ist die entstehende/entstandene Säure abzapuffern. Trotzdem treten hohe Sulfatfrachten bedingt durch die Oxidation der Sulfide auf, so dass das Sickerwasser behandelt oder kontrolliert abgeführt werden muss.

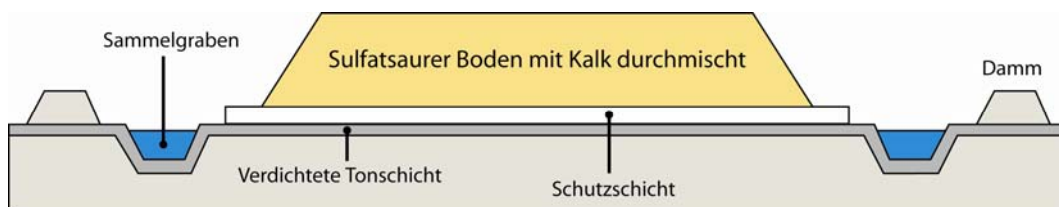


Abb. 5: Terrestrische Ablagerung von (potentiell) sulfatsaurem Bodenaushub (verändert nach Dear et al., 2002)

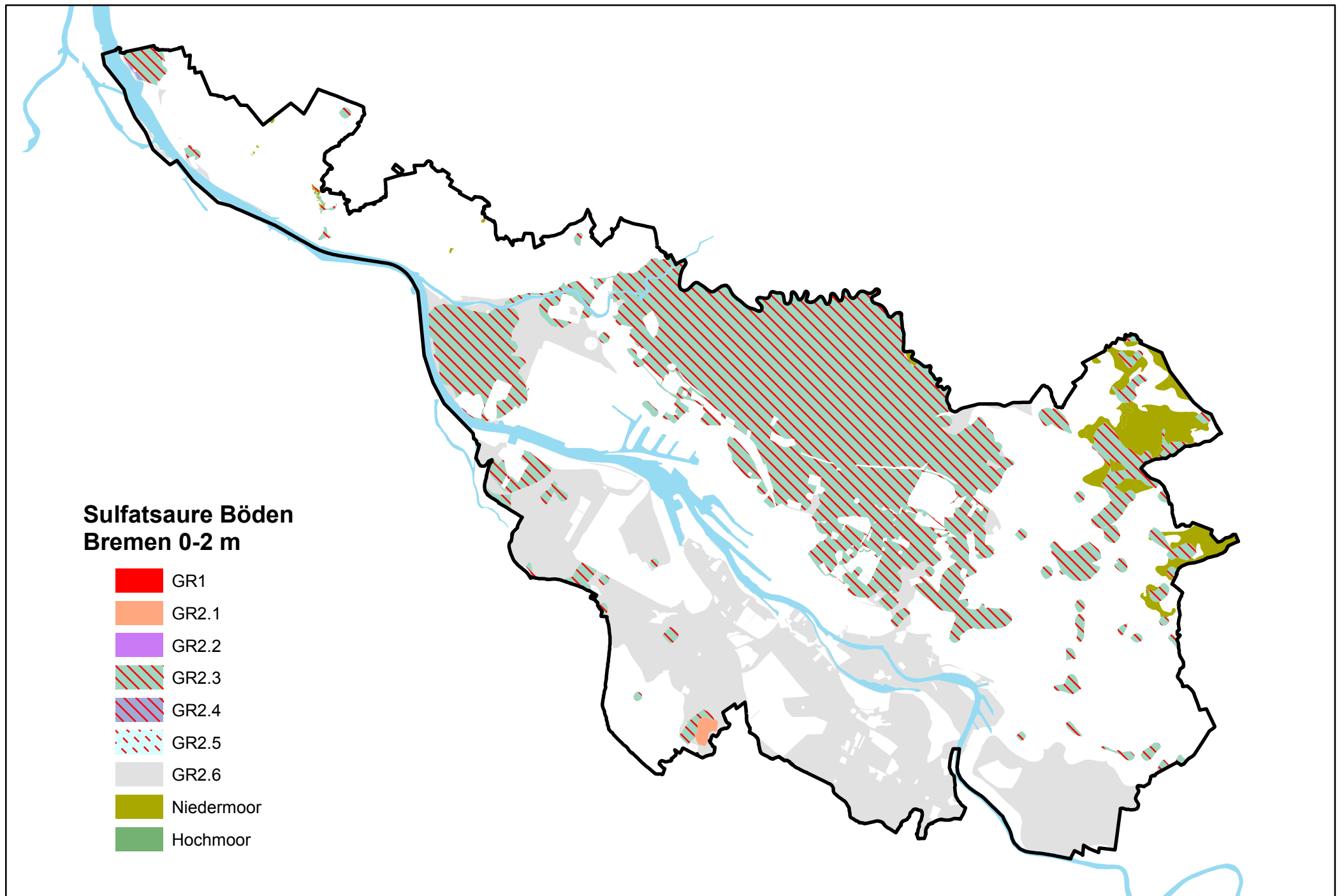
4.2 Effektiv sulfatsaurer Bodenaushub

Effektiv sulfatsaurer Bodenaushub stellt eine Quelle für Säure, Sulfat, Schwermetalle und Metall-Acidität (z.B. Eisen(II)) dar, die auch z.T. in intermediären Verbindungen gebunden sind, wie Maibolt (vor allem aus Jarosit bestehend), die sich langsam zersetzen. Derartiges Material darf nicht unter Wasserbedeckung gelagert werden. Es muss verhindert werden, dass sich in dem oxidierten Material wieder ein reduzierendes Milieu einstellt, da die reduktiven Prozesse zu einer ausgeprägten Mobilisation von Eisen und Arsen führen können. Auch im Falle einer Auflastverdichtung, kann das effektive sulfatsaure Material nicht im Boden verbleiben, da es durch Kompaktion in den Einflussbereich des Grundwassers gelangen kann. Das bedingt, dass in der Regel nur eine terrestrische Ablagerung des Materials in Frage kommt.

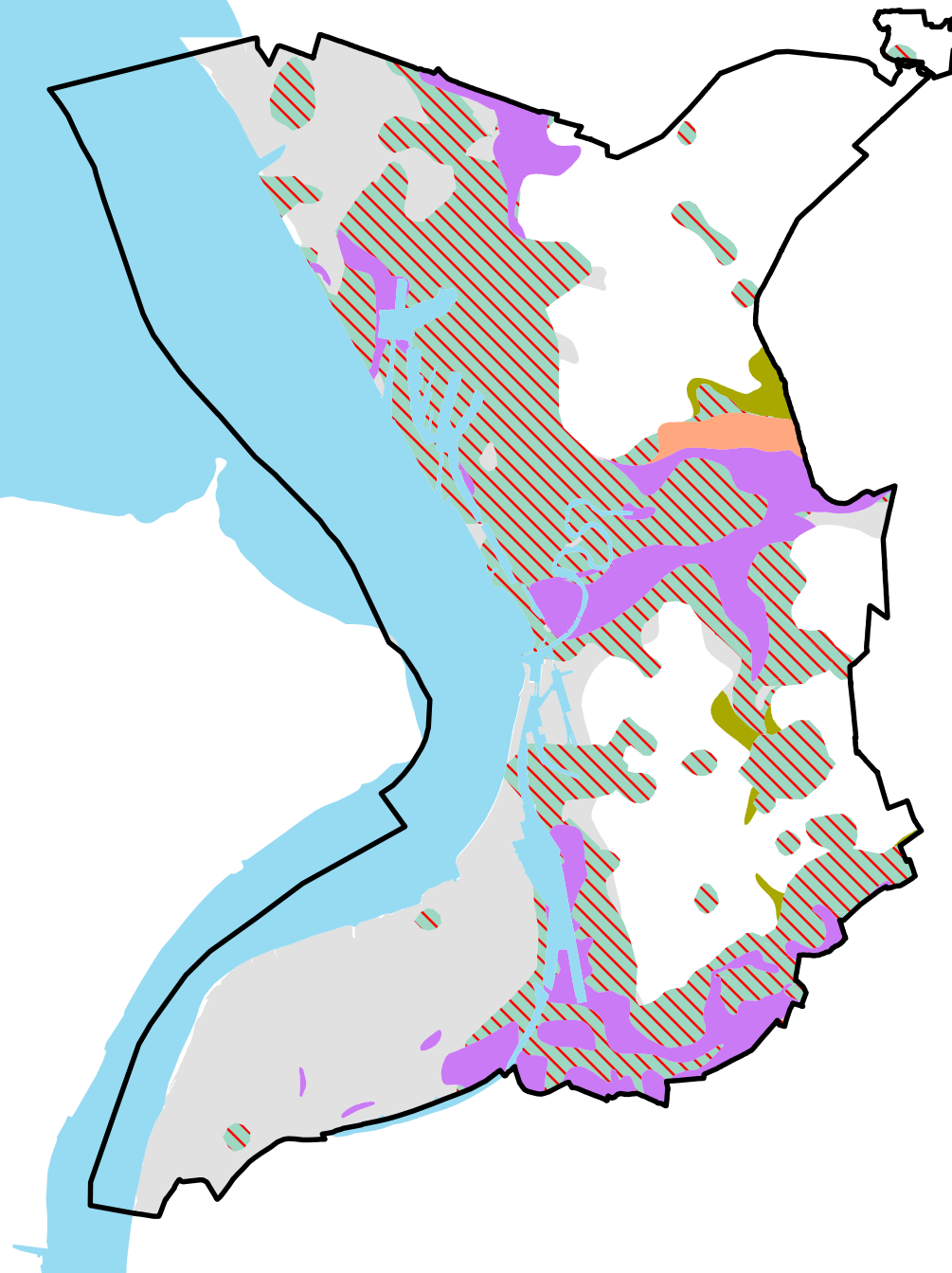
Literatur

- Ahern, C.R., McElnea, A.E., Sullivan, L.A. (2004) Acid Sulfate Soils - Laboratory Methods Guidelines. Department of Natural Resources, Mines and Energy, Indooroopilly, Queensland.
- Dear, S.E., Moore, N.G., Dobos, S.K., Watling, K.M., Ahern, C.R. (2002) Queensland acid sulfate soil technical manual - Soil Management Guidelines. Department of Natural Resources and Mines, Indooroopilly, Queensland, Australia.
- Gröger, J., Hamer, K., Blankenburg, J. (2009): Handlungsempfehlung zur Bewertung des Versauerungspotentials von Aushubmaterial durch reduzierte anorganische Schwefelverbindungen. (Nov. 2009). Bericht. Universität Bremen.
[http://www.geochemie.uni-bremen.de/images/geochem/jgroeger/handlungsempfehlung_version1.1_e.pdf]
- Ortlam, D. und M. Sauer (1993): Geochemische Grundwasser-Kartierung Bremen : Darstellung der Grundwasserbeschaffenheit und deren Beeinflussung durch Altlasten in der Stadtgemeinde Bremen. Bremer Entsorgungsbetriebe, 1993. - 28 S., 60 Bl. in 1 Ordner, Bremen.
- Schäfer, W., Gehrt, E., Müller, U., Blankenburg, J. & Gröger, J. (2010a): Geofakten 24 - Sulfatsaure Böden in niedersächsischen Küstengebieten. - 9 S., 4 Abb., 1 Tab.; Landesamt für Bergbau Energie und Geologie (LBEG), Hannover.
- Schäfer, W., Pluquet, E., Weustink, A., Blankenburg, J. & Gröger, J. (2010b): Geofakten 25 - Handlungsempfehlungen zur Bewertung und zum Umgang mit Bodenaushub aus (potenziell) sulfatsauren Sedimenten.

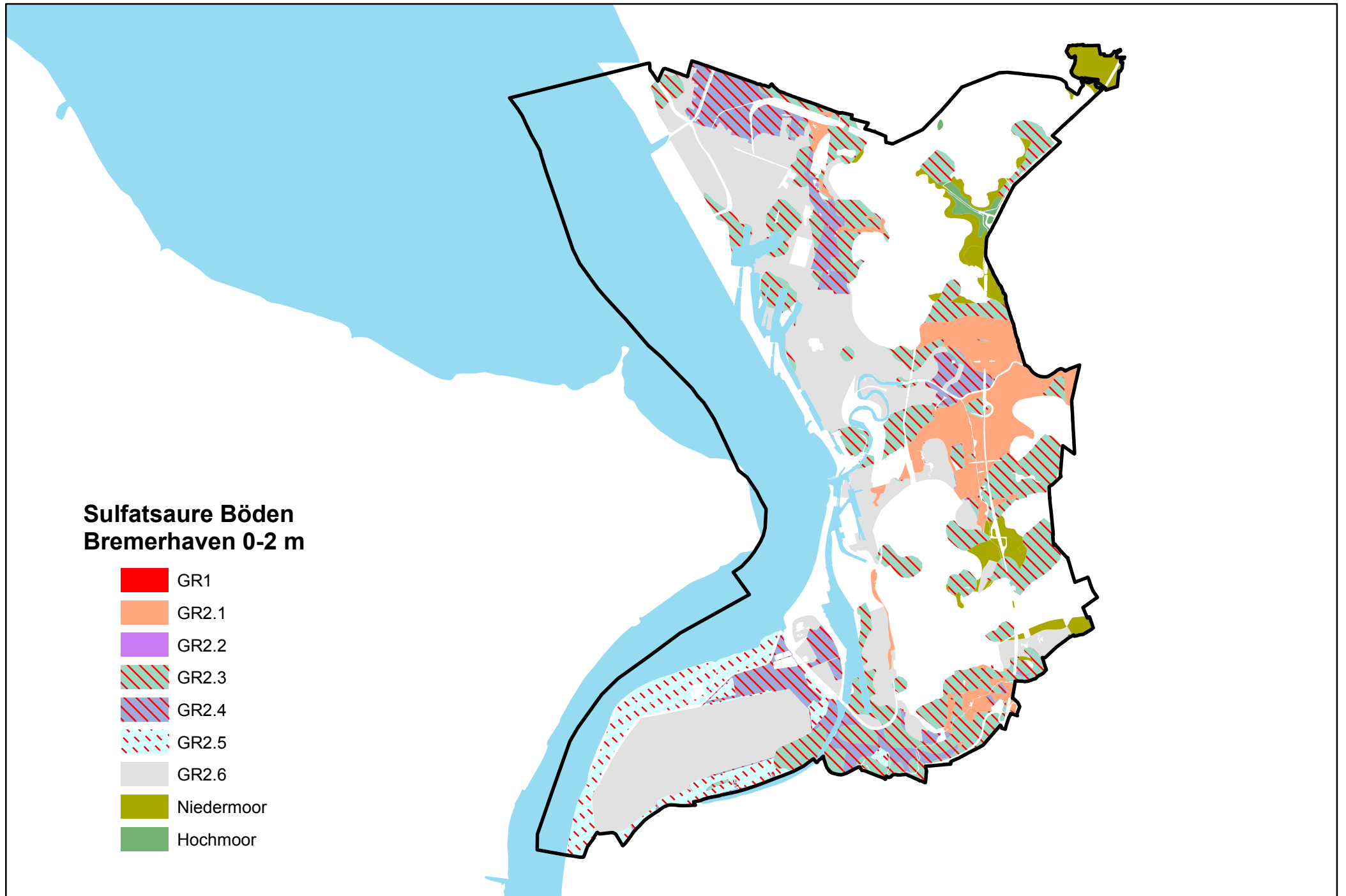
**Sulfatsaure Böden
Bremen 0-2 m**



**Sulfatsaure Böden
Bremerhaven 2-15 m**



**Sulfatsaure Böden
Bremerhaven 0-2 m**



**Sulfatsaure Böden
Bremen 2-15 m**

