



# Chemische Immobilisierung anorganischer Schadstoffe in Böden: Verfahren und Bewertungsinstrumente

## 1 Anwendungsbereich und Begriffe

Technische Lösungen zur Minderung der Schadstoffmobilität in kontaminierten Böden können mit Einschränkungen in physikalische bzw. chemische Verfahren unterteilt werden. Dieses Informationsblatt befasst sich ausschließlich mit Verfahren, die als chemische Immobilisierung zu bezeichnen sind und zur Sicherung von anorganischen Schadstoffbelastungen im ungesättigten Bereich diskutiert werden. Physikalische Behandlungsverfahren werden nicht betrachtet.

## 2 Einleitung

Die Immobilisierung von Schadstoffen zielt auf eine Minderung der Emissionen über das Sickerwasser ab. Durch eine definierte Zugabe von Reaktionspartnern wird die Überführung der Schadstoffe in auslaugbeständigere Bindungsformen angestrebt. Ein möglicher Einsatzbereich derartiger Verfahren liegt in der Sicherung von Bodenkontaminationen.

Der Nachweis einer dauerhaft geminderten Auslaugfähigkeit erfordert häufig aufwändige Vor- bzw. Nachuntersuchungen. Der durch die Zuschlagstoffe hervorgerufene Eingriff in das physikalisch-chemische Milieu kann unterschiedlichste direkte / indirekte Folgereaktionen hervorrufen, die einzelfallspezifisch zu betrachten sind. Dabei sind neben der Immobilisierung der jeweiligen Hauptkontaminanten auch Nebeneffekte zu prüfen.

## 3 Verfahrensgrundlagen

Eine ganzheitliche, vollzugsseitige Bewertung von Immobilisierungsverfahren wird durch die Vielzahl unterschiedlicher Rezepturen und Behandlungskonzepte erschwert. Obwohl sich die für eine Minderung der Auslaugfähigkeit wirksamen Mechanismen kaum klar voneinander abgrenzen lassen und teilweise synergistisch wirken, ist in erster Näherung zwischen Fällungs-, Redox- und Sorptionsverfahren zu unterscheiden.

### 3.1 Fällung

Das Wirkprinzip der Schadstoffimmobilisierung durch Fällung beruht auf dem Eintrag von Ionen, die mit den jeweiligen Kontaminanten schwerlösliche Niederschläge bilden (Wechsel der Löslichkeitskontrollierenden Festphasen). Dazu eignen sich Salze, die zum Schadstoff komplementäre Gegenionen in ausreichender Menge freisetzen. Kationische (positiv geladene) Schadstoffe werden mittels geeigneter Anionen gefällt, für anionische (negativ geladene) Schadstoffe sind Kationen bereitzustellen.

### 3.2 Redoxchemische Verfahren

Teilweise gehen der Schadstofffällung und Einbindung in neu gebildete Mineralphasen Redoxreaktionen voraus. Neben der Minderung der Löslichkeit kann dabei substanz- und verfahrensabhängig auch eine gezielte Toxizitätsminderung bzw. unbeabsichtigte Toxizitätserhöhung erfolgen (vgl. 6.3). Entscheidend für eine dauerhafte redoxchemische Umwandlung sind die Milieubedingungen, denen das behandelte Material ausgesetzt wird.

### 3.3 Sorption

Das Wirkprinzip sorptiver Verfahren zur Schadstoffimmobilisierung beruht auf dem Eintrag von Partikeln hoher spezifischer Oberfläche und Ladungsdichte. Je nach Affinität zu diesen Materialien und deren Sorptionskapazität reichern sich die Schadstoffe durch Ionenaustausch bzw. Oberflächenkomplexierung an. Entsprechend sinkt die Gleichgewichtskonzentration und der Austrag mit dem Sickerwasser nimmt ab. Für kationische Schadstoffe kommen v. a. Tonminerale aufgrund ihrer permanenten negativen Überschussladung als Sorptionsmittel in Frage. Für anionische Schadstoffe sind Eisen(III)- und Aluminium(III)-(Hydr)-oxide wichtige Sorbenten, da diese (pH-abhängig) eine positive Ladung aufweisen.

## 4 Rechtsrahmen

Für den Einsatz von Immobilisierungsverfahren bei der Altlastensanierung sind das BBodSchG, die BBodSchV sowie die für den bayerischen Vollzug eingeführten Regelwerke und Arbeitshilfen einschlägig. Gemäß BBodSchG kann die Erhöhung des Schadstoffrückhaltevermögens kontaminierter Böden durch Immobilisierungsverfahren dann als Sicherungs- bzw. Sanierungsmaßnahme eingestuft werden, wenn belegt wird, dass von den im Boden verbleibenden Schadstoffen dauerhaft weder Gefahren, erhebliche Nachteile noch erhebliche Belästigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit ausgehen. Bei der Festlegung des Sanierungsziels sind einzelfallbezogen die Standortbedingungen sowie weitere Aspekte zu beachten, u. a. die Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen und dabei insbesondere deren technische Machbarkeit in Bezug auf das Schadensausmaß.

## 5 Verfahrensumsetzung

Der Umsetzung von Immobilisierungsverfahren in den Vollmaßstab gehen i. d. R. umfangreiche Machbarkeits- und Variantenstudien voraus. Dabei ist zunächst zu prüfen, ob (i) das Behandlungsverfahren für die vorliegende Kontamination prinzipiell geeignet, (ii) die Wirksamkeit auch bei größeren Chargen mit heterogenerem Stoffbestand gegeben ist und (iii) mit welchen „Werkzeugen“ eine erfolgreiche Behandlung technisch realisiert werden kann. Für eine fachlich fundierte Beurteilung sind das jeweilige Verfahren gegenüber den zuständigen Behörden vollständig offen zu legen und die genannten Nachweise zu erbringen. Dies beinhaltet insbesondere die Herkunft, Qualität und Quantität der eingesetzten Reagenzien in Bezug auf die Masse des zu behandelnden Materials sowie eine Darlegung der zugrundeliegenden Reaktionsmechanismen (vgl. Checkliste).

### 5.1 Rezeptur

Die Überführung von Schadstoffen in auslaugbeständige Bindungsformen erfordert i. d. R. einen Phasenwechsel. So benötigen Fällungsverfahren die Zugabe von Wasser, um die Reaktionspartner (Schadstoff plus eingebrachtes Gegenion) verfügbar zu machen. Auch bei Sorptionsverfahren erfordert die Schadstofffestlegung an reaktiven Oberflächen zunächst dessen Übertritt aus gut verfügbaren Bindungsformen in die Flüssigphase. Prinzipiell kann die Wasserzugabe direkt (Anmachwasser bzw. Flüssigadditiv) oder indirekt (Niederschlagswasser nach erfolgtem Materialeinbau) erfolgen.

### 5.1.1 Additive

Kontaminierte Materialien sind i. d. R. Mehrstoffsysteme, die auf eingetragene Additive unterschiedlich reagieren. Daher sind die Zuschlagsstoffe stets einzelfallspezifisch zu prüfen. Neben der Wirksamkeit für die vorliegende Boden-Schadstoff-Kombination sind folgende Mindestanforderungen an die Additive zu stellen:

- Vermeidung von Sekundärkontaminationen des Feststoffs
- Eignung für die sich einstellenden Milieubedingungen am Einsatzort
- Chargenbezogene Qualitätssicherungsnachweise

### 5.1.2 Scale-up

Für eine Bewertung der Wirksamkeit des Verfahrens sind die Ergebnisse aus Labormaßstabsuntersuchungen vielfach unzureichend. Daher ist der Wirksamkeitsnachweis zusätzlich in einem Maßstab zu erbringen, der die reale Behandlung möglichst umfassend abbildet {Probetrieb bzw. Technikumsuntersuchungen (Mg-Maßstab)}. Die Betriebsbedingungen (Verweilzeiten, Durchmischungsparameter, eingesetzte „Werkzeuge“) sind dabei so einzustellen, dass sie die Behandlung im Vollmaßstab bestmöglich widerspiegeln. Das Behandlungsergebnis ist u. a. durch die Schwankungsbreite von Eluteigenschaften des erzeugten Produkts zu beurteilen.

## 5.2 Mischtechnik

### 5.2.1 Off- und On-Site-Behandlung

Für die Off- und On-Site Immobilisierung kontaminierter Materialien existieren eine Vielzahl unterschiedlicher „Werkzeuge“ (z. B. Zwangs-, Trommelmischer), die sowohl Bestandteil stationärer als auch mobiler Behandlungsanlagen sein können. Verfahrensanbieter werden die einzusetzende Mischtechnik typischerweise auf die Stoffeigenschaften der Matrix (z. B. Körnung) und das Materialverhalten abstellen. Entscheidend ist, dass beim Skalenübergang Labor- / Technikums- / Vollmaßstab konsistente Verfahren zum Einsatz kommen, um Fehlbeurteilungen bez. der Behandlungsqualität zu vermeiden.

### 5.2.2 In-Situ-Behandlung

Verfahren zur In-Situ-Behandlung werden bislang vor allem bei der Bodenverbesserung durch Verfestigung mit hydraulischen Bindemitteln eingesetzt (sog. Baumischverfahren). Dabei wird der anstehende Boden durch Bohrungen mit Additivsuspensionen vermischt oder es erfolgt eine flächenhafte Einarbeitung mittels Bodenfräsen, ggf. mit nachfolgender Befeuchtung. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist die In-Situ-Behandlung zur Immobilisierung verfahrensbedingt mit Unwägbarkeiten verbunden. Im Rahmen des Wirksamkeitsnachweises ist nachvollziehbar darzulegen, dass die Additivbeaufschlagung In-Situ homogen und vollständig gelingt und die mögliche lokale Variabilität der Milieubedingungen insbesondere bei der Qualitätssicherung Berücksichtigung findet.

## 6 Spezifische Wirksamkeitsnachweise

Die Bewertung von Immobilisierungsverfahren im Vollzug erfolgt auf Grundlage einer wässrigen Elution sowie anhand von Belegen für den Nachweis einer langfristigen Beständigkeit des Immobilisats. Eine Zusammenschau von Ergebnissen weiterer Testverfahren {z. B. Eluat-Toxizität gegenüber biologischen Systemen, Schadstoffspeziation (Oxidationsstufe, Ladung)} kann die Belastbarkeit des Nachweises erhöhen.

### 6.1 Elutionstests

Elutionstests geben Aufschluss über die sich zwischen Feststoffoberfläche und flüssigem Medium einstellenden Schadstoffkonzentrationen in der Flüssigphase. Untersuchungen unter Gleichgewichtsbedingungen sind zentraler Baustein der vollzugsseitigen Bewertung von Immobilisierungsverfahren.

### 6.1.1 Schüttelversuch

Im Schüttelversuch stellt sich die Eluatkonzentration nach 24stündigem Kontakt zwischen Feststoff und Lösung ein und wird nach Phasentrennung bestimmt. Sie gibt die Auslaugfähigkeit des behandelten Materials unter den genannten Bedingungen wieder, erlaubt jedoch keine Aussagen zur Dauerhaftigkeit des Behandlungserfolgs. Für die Beurteilung der derzeitigen Wirksamkeit der Immobilisierung als Sicherungsmaßnahme bei anorganischen Bodenkontaminationen ist nachzeitigem Stand die Elution nach DIN 38414-S4 (DEV S4) einschlägig (Auslaugung bei einem Feststoff / Lösungs-Verhältnis von 1:10).

### 6.1.2 Säulenversuch

Im Unterschied zum Schüttelversuch erfolgt bei der Säulenelution eine ständige Erneuerung des Elutionsmittels. Säulenversuche besitzen den Vorteil eines realitätsnahen Boden / Lösungs-Verhältnisses und einer geringeren mechanischen Beanspruchung der Partikel(oberflächen) durch Scherkräfte. Daneben kann die Infiltrationshöhe auf die Niederschlagsituation am Standort bezogen und damit das Versuchsergebnis in einen zeitlichen Zusammenhang gestellt werden (simulierte Echtzeit). Praktische Hinweise zur Versuchsdurchführung gibt DIN 19528 [1].

### 6.1.3 pHstat-Elution

Die pHstat-Elution bildet das Auslaugverhalten unter Einwirkung von Säure bzw. Lauge ab. Dabei sind in einer Boden-Wasser-Suspension (Verhältnis 1:10) die pH-Werte 4 bzw. 11 durch automatische Titration von Säure (1 N HNO<sub>3</sub>) bzw. Lauge (1 N NaOH) innerhalb von 30 min einzustellen und über 24 h konstant zu halten. Die Auslaugbedingungen des pHstat-Versuchs simulieren Versauerungseffekte bzw. den Einfluss alkalischen Sickerwassers. Die simulierte Echtzeit der sauren Elution kann gem. [2] anhand des HNO<sub>3</sub>-Verbrauchs abgeschätzt werden. Details zur Versuchsdurchführung enthält die LAGA-Richtlinie EW 98 p [3].

## 6.2 Feststoffuntersuchungen

Eluatuntersuchungen zielen auf den Wirkungspfad Boden-Grundwasser ab; zusätzliche Feststoffuntersuchungen liefern wichtige Hinweise zum Immobilisierungsmechanismus und damit zur Langzeitbeständigkeit der Schadstofffixierung.

### 6.2.1 Sequenzielle Extraktion

Methoden zur sequenziellen Extraktion unterteilen den Gesamtschadstoffgehalt in Fraktionen, die mit unterschiedlichen Feststoffbestandteilen assoziiert und mit unterschiedlichen Extraktionsmitteln freisetzbar sind. Die Extraktion erfolgt schrittweise mit (methodenspezifisch unterschiedlichen) Reagenzien zunehmender „Aggressivität“. Die eindeutige Zuordnung von Schadstoff-Bindungsformen kann bei mangelnder Selektivität der Extraktionsmittel erschwert sein. Dennoch liefert eine Verschiebung des Elutionsmusters vor und nach der Behandlung Hinweise darauf, ob eine Überführung der Schadstoffe in auslaugbeständigere Bindungsformen durch die Additivbehandlung tatsächlich stattgefunden hat.

### 6.2.2 Röntgendiffraktometrie

Die Röntgendiffraktometrie ist ein phasenanalytisches Verfahren zur Kennzeichnung der mineralogischen Zusammensetzung von Feststoffen. Günstigenfalls lassen sich damit bei Fällungsverfahren behandlungsbedingte Schadstoffsenken (sog. Speicherminerale) eindeutig identifizieren und die resultierenden Restlöslichkeiten theoretisch belegen. Die Beschränkung auf kristalline Komponenten der Matrix und die vergleichsweise geringe Nachweisstärke limitieren den Einsatz dieses Verfahrens bei der Bewertung von Immobilisaten.

### 6.2.3 Röntgenabsorptionsspektroskopie

Spektroskopische Verfahren wie XANES (x-ray absorption near-edge structure) oder EXAFS (extended x-ray absorption fine structure) erlauben es, die Wertigkeit einzelner Atome bzw. deren Abstand zu benachbarten Atomen zu bestimmen. Sie liefern einen Nachweis, ob und inwieweit eine Schad-

stoffumwandlung (z. B. Reduktion) tatsächlich durch die Behandlung stattgefunden hat. Die Interpretation der erhaltenen Spektren ist aufwändig und die verfügbaren Analysekapazitäten sind begrenzt. Aus Kostengründen sind diese Verfahren für eine routinemäßige Bewertung von Immobilisierungsverfahren nur bedingt geeignet.

### 6.3 Toxizitätstests

Biologische Testsysteme (z. B. Leuchtbakterien-, Wasserlinsen-, Kresstest etc.) bilden im Unterschied zur chemischen Analyse die Wirkung eines Stoffes / Stoffgemisches integral ab. Typische Zielgrößen sind Wachstumsparameter der Testorganismenpopulation wie Biomassezuwachs oder Mortalitätsraten. Weil die Reaktion der Testorganismen auf das zu untersuchende Medium nicht nur von der Schadstoffkonzentration, sondern auch von weiteren materialspezifischen Milieuparametern abhängt (z. B. Nährelementkonzentrationen), eignen sich die Verfahren vorwiegend für Relativvergleiche vor / nach Behandlung.

## 7 Qualitätssicherung

Bei der vollmaßstäblichen Umsetzung von Immobilisierungsverfahren sind qualitätssichernde Maßnahmen sowohl vor als auch nach der Behandlung vorzusehen.

Diese beinhalten die

- Kennzeichnung des zu behandelnden Materials und der eingesetzten Additive
- Untersuchung des Immobilisats entsprechend der einschlägigen Methoden.

Daneben ist bei Sicherungsmaßnahmen ein Probebetrieb bzw. sind Testfelduntersuchungen inkl. Monitoring des Stoffaustrags aus dem Behandlungsgut unter den konkreten Einbaubedingungen erforderlich.

### 7.1 Einsatzstoffe

Um den Behandlungserfolg sicherzustellen, sind sämtliche Einsatzstoffe chargenweise auf umweltrelevante Inhaltsstoffe zu untersuchen.

### 7.2 Behandeltes Material – Qualitätskriterien

#### 7.2.1 Feststoff

Der Verbleib der Zuschlagsstoffe im behandelten Material ist zu bilanzieren, um (i) die Konsistenz der Behandlung im Vollmaßstab mit den Ergebnissen der Wirksamkeitsuntersuchung sicherzustellen und (ii) etwaige Rezepturmodifikationen in Abhängigkeit von der Schadstoffkonzentration im Input nachvollziehen zu können. Dazu kann beispielsweise die Wiederfindung ausgewählter, additivbürtiger Feststoffparameter in Relation zu deren Masse im Input der Behandlung herangezogen werden.

#### 7.2.2 Eluat

Bei der Auswahl der Untersuchungsparameter ist zu beachten, dass insbesondere bei Verfahren, die auf Fällung bzw. Redoxreaktionen beruhen, antagonistische Wirkungen auftreten können: Die Minderung der Auslaugfähigkeit einer Hauptkontaminante geht dabei möglicherweise mit einer erhöhten Eluierbarkeit von Bestandteilen einher, die im Eluat des unbehandelten Materials unauffällig sind. Aus diesem Grund sind die Eluate des behandelten Materials auf mindestens die Parameter zu untersuchen, für die ein Prüfwert oder vorläufiger Prüfwert festgelegt ist. Liegen Hinweise auf Schadstoffe ohne festgelegten Prüfwert vor, so sind diese in die Untersuchung einzubeziehen.

Eine Zusammenschau der Ergebnisse kann beispielsweise anhand der Kenngröße „Wirkungsgrad“ gem. LfU-LfW-Informationsblatt ‚Elutionsverfahren im Rahmen der Prüfung von immobilisiertem Bodenmaterial‘ [4] erfolgen. Bei Parametern, die im Vergleich zwischen unbehandeltem und behandel-

tem Material negative „Wirkungsgrade“ aufweisen, ist von antagonistischen Effekten auszugehen. Diese sind bei der Höhe der Additivdosierung bzw. bei der Beurteilung der Verfahrenseignung zu berücksichtigen.

### **7.3 Monitoring**

Materialuntersuchungen können das langfristige Auslaugverhalten von Immobilisaten unter natürlichen Bedingungen nur bedingt wiedergeben. Daher sind vollmaßstäbliche Behandlungsmaßnahmen durch ein Monitoring dauerhaft zu begleiten, z. B. im Grundwasserabstrom. Dabei ist zu beachten, dass ein Schadstoffdurchbruch (bei Versagen der Maßnahme) in Abhängigkeit von der Fließstrecke erst mit einer gewissen Totzeit zu erkennen ist. Für eine möglichst frühzeitige Diagnose kann ein Verfolgen der Poren- / Sickerwasserkonzentration zweckmäßig sein. Geeignete Systeme wie Saugkerzen oder -platten sind Stand der Technik und in unterschiedlichen Ausführungen am Markt verfügbar. Die Eignung für den konkreten Anwendungsfall, insbesondere der Ausschluss von Sorptionseffekten am Probenahmesystem, ist in Vorversuchen sicherzustellen.

## 8 Erstbewertung von Immobilisierungsverfahren

Die nachstehende Checkliste dient einer Erstbewertung von Immobilisierungsverfahren. Sie enthält Mindestangaben zur Verfahrensbeschreibung, zur Rezeptur, für den Wirksamkeitsnachweis und für die Eignungsfeststellung am konkreten Standort unter Berücksichtigung des Langzeitverhaltens.

### Verfahrenskarakterisierung

<b>Mechanismus:</b>		
<input type="checkbox"/> dargelegt	<input type="checkbox"/> nicht dargelegt	
<b>Wirkprinzip:</b>		
<input type="checkbox"/> Fällung	<input type="checkbox"/> Sorption	<input type="checkbox"/> sonstiges: .....
<b>bei Fällungsreaktionen, Produkt benannt:</b>		
<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	
wenn ja, welches:		
<b>Produkt / Sorptionskomplex plausibel:</b>		
<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	

### Rezeptur

<b>Eingesetzte Additive:</b>			
<input type="checkbox"/> benannt	<input type="checkbox"/> nicht benannt		
wenn benannt, welche:			
<b>Dosierungshöhe:</b>			
Massenanteil Additiv bez. auf Trockenmasse Boden:			
Anmachwasser bez. auf Trockenmasse Boden:			
<b>Transparenz der Bezeichnung:</b>			
<input type="checkbox"/> interne Bezeichnung	<input type="checkbox"/> Trivialname	<input type="checkbox"/> chem. Bezeichnung	
<b>Herkunft:</b>			
<input type="checkbox"/> angegeben	<input type="checkbox"/> nicht angegeben		
Wenn angegeben, welche:			
<b>Qualität der Additive:</b>			
<input type="checkbox"/> reinst	<input type="checkbox"/> rein	<input type="checkbox"/> technisch	<input type="checkbox"/> keine Angabe
<b>Sekundärkontaminationen möglich:</b>			
<input type="checkbox"/> nein	<input type="checkbox"/> ja		

### Wirksamkeitsnachweise

<b>Belege:</b>			
<input type="checkbox"/> liegen vor		<input type="checkbox"/> liegen nicht vor	
<b>Art:</b>			
<input type="checkbox"/> analytisch	<input type="checkbox"/> Referenzprojekt	<input type="checkbox"/> Analogieschluss	<input type="checkbox"/> sonstiges:.....
<b>Medium:</b>			
<input type="checkbox"/> Feststoff		<input type="checkbox"/> Eluat	
<b>Untersuchungsverfahren–Feststoff:</b>			
<input type="checkbox"/> Bindungsformen	<input type="checkbox"/> Mineralogie	<input type="checkbox"/> Spektroskopie	<input type="checkbox"/> sonstiges: .....
<b>Bilanz des Additivverbleibs:</b>			
<input type="checkbox"/> erbracht		<input type="checkbox"/> nicht erbracht	
<b>Untersuchungsverfahren–Eluat:</b>			
<input type="checkbox"/> S4-Elution	<input type="checkbox"/> pH <sub>stat</sub> -Test	<input type="checkbox"/> Säulenversuch	<input type="checkbox"/> sonstiges: .....
<b>Untersuchungsumfang:</b>			
<input type="checkbox"/> Zielsubstanzen	<input type="checkbox"/> + Leitparameter	<input type="checkbox"/> Vollanalyse	<input type="checkbox"/> weitere: .....
<b>Prüfwerte eingehalten:</b>			
<input type="checkbox"/> ja		<input type="checkbox"/> nein	

### Eignung für Einsatzbereich

<b>Belastungssituation (Schadstoffspektrum und -konzentration):</b>			
<b>Größe des Schadensbereichs, Tiefe unter GOK:</b>			
<b>Nutzung:</b>			
<b>Lage bezüglich Grundwasser, -nutzung:</b>			
<input type="checkbox"/> ungesättigte Zone	<input type="checkbox"/> gesättigte Zone	<input type="checkbox"/> Wasserschutzgebiet oder Einzugsgebiet höherwertiger Wassernutzung	
<b>Milieuparameter:</b>			
pH-Bereich		Redoxbereich	
<input type="checkbox"/> sauer	<input type="checkbox"/> alkalisch	<input type="checkbox"/> oxidierend	<input type="checkbox"/> reduzierend
<b>Geochemischer Stabilitätsbereich Immobilisat:</b>			
pH-Bereich		Redoxbereich	
<input type="checkbox"/> sauer	<input type="checkbox"/> alkalisch	<input type="checkbox"/> oxidierend	<input type="checkbox"/> reduzierend
<b>Stabilitätsbereich konsistent mit Milieubedingungen:</b>			
<input type="checkbox"/> ja		<input type="checkbox"/> nein	



## Langzeitverhalten

<b>Langzeitverhalten berücksichtigt:</b>		
<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein	
wenn ja, betrachtete Zeitskala:		
<input type="checkbox"/> bis 10 a	<input type="checkbox"/> bis 100 a	<input type="checkbox"/> größer 100 a
<b>Methodik:</b>		
<input type="checkbox"/> experimentell	<input type="checkbox"/> Referenzobjekt	
<b>Monitoringkonzept:</b>		
<input type="checkbox"/> vorgelegt	<input type="checkbox"/> nicht vorgelegt	
<b>Gefahrenabwehrkonzept für den Versagensfall :</b>		
<input type="checkbox"/> vorgelegt	<input type="checkbox"/> nicht vorgelegt	

## 8.1 Erläuterungen zur Checkliste

### 8.1.1 Verfahrenscharakterisierung

Für eine belastbare Einschätzung der prinzipiellen Tauglichkeit eines Immobilisierungsverfahrens ist eine Charakterisierung des zu Grunde liegenden Wirkmechanismus unverzichtbar. Als Mindestanforderung ist der Prozess, der zu einer Minderung des eluierbaren Schadstoffpotenzials führt, zu benennen. In erster Näherung sind hier Fällungsverfahren von sorptiven Verfahren zu unterscheiden. Bei Fällungsverfahren ist das Reaktionsprodukt anzugeben.

**Bewertung.** Eine Immobilisierung ist abzulehnen, wenn (i) das Verfahren nicht charakterisiert wird oder (ii) der benannte Mechanismus nicht plausibel ist (z. B. Fällung von Mineralphasen, die sich nur bei hohen Temperaturen bilden), außer der Bildungsnachweis wird erbracht.

### 8.1.2 Rezeptur

Für die Beurteilung einer Immobilisierung ist die Benennung von Art, Menge (Masse) und Qualität der Zuschlagstoffe erforderlich. Ebenso ist die Herkunft der Additive zu belegen, um einschätzen zu können, ob es sich um qualitätsgesicherte Produkte handelt.

**Bewertung.** Eine Immobilisierung ist abzulehnen, wenn (i) keine Benennung der Additive erfolgt, (ii) diese lediglich in Form firmeninterner Bezeichnungen geschieht oder (iii) die Qualität und Quantität der Zuschlagstoffe Sekundärkontaminationen erwarten lässt, es sei denn, es wird ein analytischer Nachweis erbracht, dass dies nicht zu besorgen ist.

### 8.1.3 Wirksamkeitsnachweise

Die Verfahrenstauglichkeit ist transparent und fallspezifisch nachzuweisen. Dazu sind vergleichende Untersuchungen mit behandeltem Originalmaterial des Standorts und einer unbehandelten Kontrolle vorzulegen. Eluatuntersuchungen gem. DIN DEV S4 müssen in den Wirksamkeitsnachweis eingebunden sein (weitere Tests, s. Abschnitt 6). Der Umfang muss mindestens die Parameter beinhalten, für die ein Prüfwert oder ein vorläufiger Prüfwert festgelegt ist, um unerwünschte Nebeneffekte erkennen zu können. Liegen Hinweise auf Schadstoffe ohne festgelegten Prüfwert vor, so sind diese in die Untersuchung einzubeziehen. Ergeben sich aus der Herkunft und Qualität der Zuschlagstoffe Hinweise auf mögliche Sekundärkontaminationen, ist der Untersuchungsumfang entsprechend zu erweitern.

**Bewertung.** Eine Immobilisierung ist abzulehnen, wenn (i) keine standortbezogenen analytischen Wirksamkeitsnachweise vorgelegt werden, (ii) diese bez. des Parameterumfangs unvollständig oder (iii) die Prüfwerte überschritten sind.

#### 8.1.4 Eignung für Einsatzbereich

Immobilisierungsverfahren sind im gesättigten Bereich, in Wasserschutzgebieten und im Einzugsgebiet höherwertiger Wassernutzung als Sicherungsmaßnahmen nicht anzuwenden. Für die Beurteilung, ob das Behandlungsverfahren den Bedingungen an anderen Standorten genügt, ist die Charakterisierung des Einsatzbereichs wesentlich. Art, Lage und Ausmaß des Schadens erlauben es, die technischen Erfordernisse der Maßnahme abzuschätzen und mit den vorgesehenen Einbringungsverfahren abzugleichen. Der pH-Wert und das Redoxpotenzial geben Rückschlüsse auf die Stabilität des Immobilisats. Sie können hilfsweise aus dem Ausgangsmaterial (geol. Karte, evtl. vorhandene künstliche Auffüllungen) bzw. Hydromorphiemerkmalen im Bodenprofil (Rostflecken, Bleichung etc.) abgeleitet werden. Aus der Verfahrenscharakterisierung und den eingesetzten Additiven ist der geochemische Stabilitätsbereich des Immobilisats abzuleiten und mit den (prognostizierten) Milieubedingungen am Einsatzort zu vergleichen. Die Milieubedingungen sind beim Nachweis der Wirksamkeit sowie der Langzeitstabilität wissenschaftlich fundiert abzubilden.

**Bewertung.** Eine Immobilisierung ist abzulehnen, wenn (i) das Immobilisat im gesättigten Bereich, einem Wasserschutzgebiet oder einem Einzugsgebiet höherwertiger Wassernutzung verbleibt, (ii) in Abhängigkeit von Schadensausmaß und Dosierungshöhe / Qualität des Zuschlagsstoffs eine schädliche Bodenveränderung zu erwarten ist oder (iii) der Stabilitätsbereich des Fällungsprodukts / des Sorptionskomplexes im Widerspruch zu den Milieubedingungen am Einsatzort stehen, es sei denn, die Langzeitbeständigkeit wird unter diesen Milieubedingungen nachgewiesen.

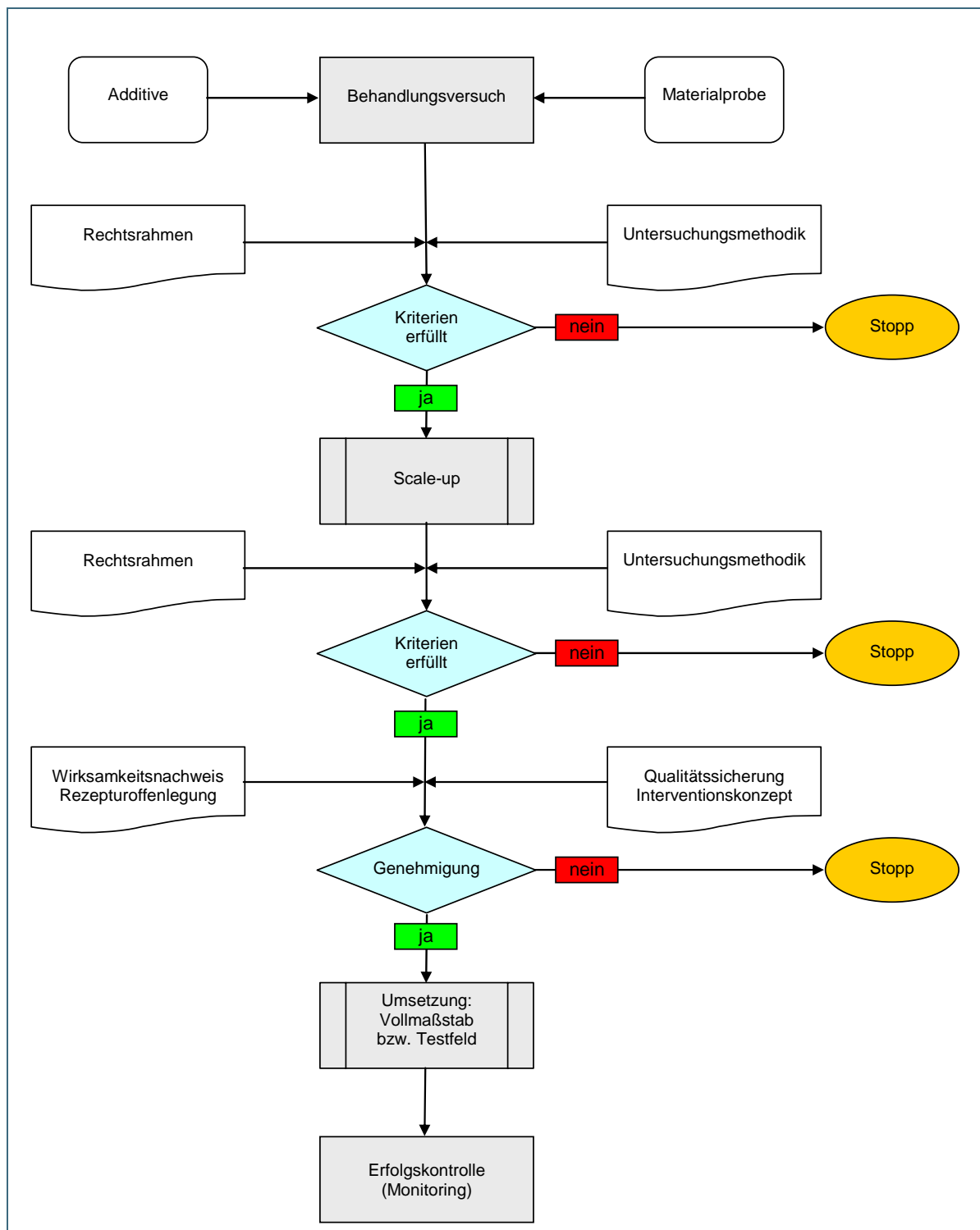
#### 8.1.5 Berücksichtigung des Langzeitverhaltens

Bislang liegen zum Langzeitverhalten von immobilisierten Bodenkontaminationen kaum belastbare Erkenntnisse vor. Daher kommt der Erbringung geeigneter Belege im Rahmen der Wirksamkeitsnachweise eine herausragende Bedeutung zu. Referenzobjekte können zudem zur Bewertung der Langzeitstabilität herangezogen werden. Weiterhin sind Monitoring- und Gefahrenabwehrkonzepte für den Versagensfall notwendig.

**Bewertung.** Die Behandlung durch Immobilisierung ist abzulehnen, wenn (i) das Langzeitverhalten des Behandlungsguts nicht berücksichtigt wird, (ii) die vorgelegten Nachweise nicht geeignet sind, das Verhalten auf der angegebenen Zeitskala abzubilden, (iii) die Wirksamkeit des Verfahrens langfristig nicht nachgewiesen werden kann, (iv) die genannten Referenzobjekte weder stichhaltig noch übertragbar sind, (v) kein Monitoringkonzept zur dauerhaften Überwachung der Wirksamkeit oder (vi) für den Versagensfall kein Gefahrenabwehrkonzept zur Wiederherstellung der Sicherungswirkung oder Anwendung anderer Gefahrenabwehrmaßnahmen vorgelegt wird.

## 9 Fließschema

Eine Hilfestellung für die vollzugsseitige Begleitung von Immobilisierungsmaßnahmen zu Behandlung anorganischer Bodenkontaminationen gibt folgendes Schema.



## 10 Weiterführende Literatur

### Grundlagen:

- Sparks, D.L. [Hrsg.]:  
Soil physical chemistry. CRC Press, Boca Raton, USA, 1999, 409 S.
- Pöllmann, H.:  
Immobilisierung von Schadstoffen durch Speichermineralbildung. Shaker Verlag, Aachen, 2007, 428 S.

### Übersichtsbeiträge, konkrete Anwendungen

- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.]:  
Chemische Immobilisierung anorganischer Schadstoffe in kontaminierten Böden – Verfahren und Bewertungsinstrumente. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2009, 93 S.
- Vragonsveld, J.; Cunningham, S.D. [Hrsg.]:  
Metal-contaminated soils. In Situ inactivation and phytoremediation. Springer-Verlag, Berlin, 1998, 265 S.
- Al-Tabbaa, A.; Stegemann, J.:  
Stabilisation/solidification, treatment and remediation. Advances in S/S for waste and contaminated land. Taylor & Francis Group, London, UK, 2005, 487 S.

### Leitfaden

- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz:  
Schreiben zur Leitlinie „Bewertung der Stabilisierung, Teilstabilisierung und Verfestigung von Abfällen“. Az.: 81 U8751.0-2005/4-2 vom 17.11.2005.  
München 2005, 4 S.
- Environment Agency [Hrsg.]:  
Guidance on the use of stabilisation/solidification for the treatment of contaminated soil.  
R&D technical report P5-064/TR/1, Bristol, UK, 2004, 342 S.

## 11 Quellen

- [1] Normenausschuss Wasserwesen:  
DIN 19528 Elution von Feststoffen - Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen.  
Beuth Verlag Berlin, 2009, 24 S.
- [2] Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.]:  
Chemische Immobilisierung anorganischer Schadstoffe in kontaminierten Böden – Verfahren und Bewertungsinstrumente. Abschlussbericht.  
Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2009, 93 S.
- [3] Anonym:  
Bestimmung der Eluierbarkeit mit wässrigen Medien bei konstantem pH-Wert, EW 98p. In: Länderarbeitsgemeinschaft Abfall [Hrsg.], Richtlinie für das Vorgehen bei physikalisch und chemischen Untersuchungen von Abfällen, verunreinigten Böden und Materialien aus dem Altlastenbereich. Herstellung und Untersuchung von wässrigen Eluaten (Kurzbezeichnung EW 98), S. 20 – 32.
- [4] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft [Hrsg.]:  
LfU-LfW-Informationsblatt Elutionsverfahren im Rahmen der Prüfung von immobilisiertem Bodenmaterial. Darstellung von praktischen Ergebnissen.  
Augsburg und München, 2002, 25 S.

---

### Impressum:

Herausgeber:  
Bayerisches Landesamt für Umwelt  
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
86179 Augsburg

Postanschrift:  
Bayerisches Landesamt für Umwelt  
86177 Augsburg

Bildnachweis:  
LfU

Telefon: (08 21) 90 71-0  
Telefax: (08 21) 90 71-55 56  
E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)  
Internet: <http://www.lfu.bayern.de>

Bearbeitung:  
Ref. 33 / Ref. 95  
Stand:  
März 2009