

## **Technische Grundlagen**

# **Immobilisierung von Schadstoffen an kontaminierten Standorten**

### **Anwendung innovativer Verfahren**

erstellt von der Arbeitsgruppe „Immobilisierung“  
des Arbeitskreises „Technische Arbeitshilfen“  
des österreichischen Vereins für Altlastenmanagement



Oktober 2012

**Technische Grundlagen**

# Immobilisierung von Schadstoffen an kontaminierten Standorten

Leitung: Wolfgang Friesl-Hanl

Autoren (in alphabetischer Reihenfolge): Franz Aschauer, Wolfgang Friesl-Hanl, Karl Glatz, Günther Gretzmacher, Helmut Längert-Mühlegger

Kurzinhalt:

Es werden ausgewählte Verfahren zur Immobilisierung von Schadstoffen im Boden sowie im Untergrund vorgestellt und technische Grundlagen und Erfahrungen aus der Praxis mit einbezogen.

## Vorwort

Die hier vorliegenden technischen Grundlagen wurden von der Arbeitsgruppe „Immobilisierung“ des Arbeitskreises „Technische Leitfäden“ des österreichischen Vereins für Altlastenmanagement (ÖVA) erstellt. Ziel des Vereines ist es, integrative Lösungen zur Behandlung und Wiedernutzbarmachung kontaminierter Flächen, so genannter "Altlasten", zu fördern und die auf diesem Gebiet tätigen Fachleute zusammenzuführen. Hiermit soll ein Beitrag zur Etablierung der Methoden als „Stand der Technik“ geleistet werden. Die Grundlagen richten sich daher vor allem an Amtssachverständige und Zivilingenieure.

Das vorliegende Schriftstück setzt sich aus 2 Teilen zusammen. Im ersten Teil wird die Immobilisierung mittels mineralischer Hilfsstoffe (IMH) dargestellt. Im zweiten Teil werden Verfahren des Spezialtiefbaus näher erläutert.

In beiden Teilen werden „Einsatzbereiche und Einsatzrandbedingungen (ERB)“ sowie „Erforderliche Vorkenntnisse und empfohlene Vorversuche“ dargestellt. Weiters werden Informationen zu Kontrolluntersuchungen bzw. Monitoring dargestellt. Schlussendlich werden als Entscheidungshilfe Informationen zum „Entwicklungsstand“ und zu „Vor- und Nachteilen“ gegeben. Da die Wirkung der Immobilisierung primär darauf abzielt die Ausbreitung von umweltgefährdenden Schadstoffen auf ein tolerierbares Ausmaß zu reduzieren, kann das vorliegende Dokument insbesondere bei der Planung von Maßnahmen an historisch kontaminierten Standorten zur Anwendung kommen. Zusätzliche Möglichkeiten einer Anwendung bei neuen Schadensfällen bzw. Untergrundverunreinigungen müssen im Einzelfall in Zusammenhang mit geltenden umweltrechtlichen Bestimmungen geprüft werden. Dabei kann es notwendig werden, dass ein Vergleich mit der Anwendung anderer Verfahren in Hinsicht auf die Gesichtspunkte wie technische Machbarkeit, Angemessenheit und Nachhaltigkeit durchgeführt wird.“

Die Empfehlungen der technischen Grundlagen basieren grundsätzlich auf fachlichen Überlegungen und bisher bekannten Erfahrungen aus praktischen Einsätzen. Die geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen werden grundsätzlich berücksichtigt, im Sinne von sinnvoller zukünftiger Anwendung der Verfahren werden aber auch fachliche Empfehlungen gegeben, die von den derzeit gültigen Rechtsgrundlagen nicht vollständig gedeckt sind.

## Inhaltsverzeichnis

Begriffsbestimmungen	5
Ausgangssituation und Zielsetzung	6
1 Grundlagen von Immobilisierungsverfahren	7
2 Verfahren	8
2.1 IMH - Immobilisierung mittels mineralischer Hilfsstoffe	8
2.1.1 Wirkungsweise IMH und Verfahrensziel	8
2.1.2 Vorbehandlung von Aushubmaterial	9
2.1.3 Vorversuche	10
2.1.4 Anwendungsbereiche IMH	11
2.1.5 Einsatzrandbedingungen (ERB)	12
2.1.6 Stand der Technik	13
2.1.7 Stand der Wissenschaft	15
2.2 Verfahren des Spezialtiefbaus	16
2.2.1 Düsenstrahlverfahren (DSV)	17
2.2.2 Bodenmischverfahren	20
3 Nutzung und/ oder Nachnutzung von immobilisierten Standorten	25
4 Literatur	26

## A BEGRIFFSBESTIMMUNGEN

**Immobilisierung** im Sinne dieser Grundlagen ist, durch Behandlung (z. B. Zugabe von mineralischen Hilfsstoffen, hydraulischen Bindemitteln, etc.) die Mobilität der Schadstoffe im Untergrund bzw. im ausgehobenen Material soweit zu verringern, dass langfristig unter spezifischen Standortbedingungen keine erheblichen Umweltauswirkungen mehr bestehen.

**On site:** (in Anlehnung an ÖN S2089) Behandlung von Materialien am Standort (vor Ort) im unmittelbaren Bereich des kontaminierten Standorts

**In situ:** (in Anlehnung an ÖN S2089) Behandlung von Materialien in kontaminierten Standorten ohne deren räumliche Lageveränderung (On site – Verfahren).

**Ex situ:** (in Anlehnung an ÖN S2089) Behandlung von Materialien aus kontaminierten Standorten nach Aushub.

**Off Site:** (in Anlehnung an ÖN S2089) Behandlung von Materialien aus kontaminierten Standorten nach Aushub an einem anderen Ort.

**Altstandort** (ÖN S 2086): Standort einer aufgelassenen Anlage einschließlich allfällig darauf befindlicher Bauteile, auf dem mit umweltgefährdenden Stoffen umgegangen wurde

**Altablagerung** (ÖN S 2086): Ablagerung von Abfällen, die befugt oder unbefugt durchgeführt wurde

**Sanierung** (ÖN S 2089): Überbegriff für Dekontamination bzw. Sicherung

**Dekontamination** (ÖN S 2089): Beseitigung der Ursache der Gefährdung sowie Beseitigung der Auswirkungen der Gefährdung im kontaminierten Umfeld. Bei Dekontaminationsmaßnahmen werden die Schadstoffe entweder entfernt oder in eine unschädliche Form übergeführt.

**Sicherung** (S2089): Verhinderung der Ausbreitung möglicher Emissionen von gesundheits- und/oder umweltgefährdenden Schadstoffen. Sicherungsmaßnahmen beseitigen die Kontaminationsquelle nicht.

**Konzeptives Standortmodell** (in Anlehnung an ÖN S 2089): dreidimensionale Beschreibung des Standortes einer Altablagerung oder eines Altstandortes, in der (a) die Oberflächenbeschaffenheit und die baulichen Gegebenheiten, (b) der Untergundaufbau, (c) die räumliche Verteilung belasteter Untergrundbereiche, (d) die Ausbreitungswege für Schadstoffe, (e) die gefährdeten Schutzgüter erfasst werden. Das Standortmodell weist entsprechend den vorhandenen Informationen einen unterschiedlichen Vollständigkeits- und Genauigkeitsgrad auf und ist mit Fortschritt der Untersuchungen zu ergänzen und zu überarbeiten. Nähere Hinweise, welche Elemente zur Beschreibung der Standortverhältnisse wesentlich sind, werden in den ÖNORMEN S 2088-1 bis -3 gegeben.

**Boden** (ÖN S 2088-1): oberster Bereich des Untergrundes, der durch Verwitterung, Um- und Neubildung (natürlich oder anthropogen verändert) entstanden ist und aufgrund der jeweiligen aktuellen Nutzung weiter verändert wird. Boden besteht aus festen anorganischen (Mineralanteil) und organischen Teilen (Humus und Lebewesen) sowie aus Wasser und den darin gelösten Stoffen oder mit Luft gefüllten Hohlräumen. Er steht in Wechselwirkung mit der belebten Umwelt.

**Untergrund** (ÖN S 2088-1): oberste Schicht der Erdkruste, die unterhalb der natürlichen, geschütteten oder befestigten Geländeoberkante ansteht. Der Untergrund umfasst sowohl Boden als auch Locker- und Festgesteine.

**Schadstoffe:** (ONR192130) Stoff, der entweder selbst oder im Zusammenwirken mit anderen Stoffen oder durch seine Abbauprodukte oder Emissionen Mensch und Umwelt schädigen oder beeinträchtigen oder zu einer Wertverminderung bzw. Nutzungseinschränkung von Bauwerken führen kann.

**Kontamination, Verunreinigung** (ÖN S 2093): anthropogene Veränderung der natürlichen Zusammensetzung des Untergrundes oder von Bauwerken/Baulichkeiten, des Wassers oder der Luft durch Materialien oder Stoffe, die mittelbar oder unmittelbar schädliche Auswirkungen auf den Menschen oder die Umwelt haben können (und zu erhöhten Aufwendungen, Haftungen oder Risiken des Eigentümers oder Nutzers führen). Die anthropogenen Veränderungen können zB durch chemische Stoffe mit gefährlichen Eigenschaften im Sinne des ChemG 1996, §2 (1) und §3 (1) oder durch radioaktive Stoffe bedingt sein. Unter Kontamination sind nicht zu verstehen: Lagerungen von Stoffen in Gebinden, Tanks und Ablagerungen, die noch keine untrennbare Verbindung mit dem Boden eingegangen sind, sowie Blindgänger bzw. Kriegsmaterialien.

**Kontamination entsprechend Leitbild ALM 2010 (Leitbild Altlastenmanagement 2010):** Eine Kontamination ist eine mehr als geringfügige Verunreinigung. Als Abstufung des Umweltzustandes von „sehr gut“ bis „schlecht“ werden folgende Begriffe verwendet: natürlich – geringfügig verunreinigt – kontaminiert – erheblich kontaminiert.

**Verunreinigung** im Sinne der vorliegenden Grundlagen: Der Begriff „Verunreinigung“ wird entsprechend der Definition gem. ÖNORM S 2093, jedoch ohne Berücksichtigung radioaktiver Stoffe; verwendet. Der Begriff Kontamination wird entsprechend dem Leitbild ALM 2010 als wertende Kategorie für Verunreinigung angewandt.

**Risiko** im Sinne der vorliegenden Grundlagen: Beschreibung kurz- bis langfristiger Wirkungen in Bezug der Eintrittswahrscheinlichkeit und Intensität.

# Verfahren zur Immobilisierung von Schadstoffen an kontaminierten Standorten

## Ausgangssituation und Zielsetzung

Altablagerungen bzw. kontaminierter Untergrund an Altstandorten können entsprechend der standortspezifischen und nutzungsbezogenen Randbedingungen ein nicht tolerierbares Risiko für die Gesundheit des Menschen oder die ökologische Funktionsfähigkeit der Umwelt darstellen. Es können daher Maßnahmen zur Minimierung des Risikos auf ein tolerierbares Ausmaß notwendig sein. Gemäß derzeitiger Praxis in der Altlastenbearbeitung wird bei Sanierungsmaßnahmen häufig das „Vorsorgeprinzip“ zu Grunde gelegt. Dadurch kommt es mitunter zu Maßnahmen, die über das notwendige Maß zur Risikominimierung hinausgehen und das Prinzip der Verhältnismäßigkeit nicht immer in ausreichendem Maß berücksichtigen. Im Sinne eines effizienteren Ressourceneinsatzes ist es zukünftig unumgänglich, Sanierungsziele standortspezifisch unter differenzierter Berücksichtigung der jeweiligen Standortbedingungen zu definieren.

Entsprechend dem Leitbild Altlastenmanagement wird dieses in den beiden Leitsätzen 4 und 5 folgendermaßen definiert:

- Die Auswahl von Maßnahmen kann standortspezifisch und nutzungsbezogen erfolgen, wobei nicht tolerierbare Risiken für die menschliche Gesundheit oder die Umwelt ausgeschlossen werden müssen
- Sanierungsmaßnahmen (Dekontamination, Sicherung) sollen nachhaltig sein und den Umweltzustand dauerhaft verbessern.

Als Ausgangspunkt der Auswahl von Maßnahmen (Dekontamination, Sicherung, Beobachtung, Nutzungseinschränkungen) werden die mit den Maßnahmen zu erreichenden Ziele standort- und nutzungsbezogen definiert. Die Maßnahmen können damit auf „einzelfallspezifische“ Gegebenheiten abgestimmt werden. Dem Leitbild folgend können daher beispielsweise Restbelastungen in jenem Ausmaß toleriert werden, bei dem die standortspezifischen und nutzungsbezogenen Funktionen von Boden, Grundwasser und Gewässern im Naturhaushalt langfristig gewährleistet bleiben. Eine länger als kurzfristig auftretende erhöhte Mobilisierung oder signifikante Ausbreitung von Verunreinigungen ist dabei aber keinesfalls zulässig. Es kann zweckmäßig sein, Verunreinigungen des Untergrundes unter Abwägung des Aufwandes und des Nutzens von Maßnahmen über längere Zeiträume (z. B. innerhalb einer Generation) zu reduzieren. Als Voraussetzung bzw. Mindestbedingung für Maßnahmen ist jedenfalls zu gewährleisten, dass nicht tolerierbare Risiken für die menschliche Gesundheit oder die Umwelt ausgeschlossen sind.

Als Prämisse gilt, dass mit der Auswahl und Anwendung von Sanierungsmaßnahmen dem Hauptziel der Altlastensanierung – der nachhaltigen Verbesserung des Umweltzustandes – Genüge getan werden muss. Dieses Hauptziel ist prinzipiell mit technisch geeigneten Mitteln sowie unter Abwägung von Aufwand und Nutzen anzustreben. Die Forderung Sanierungsmaßnahmen nachhaltig zu gestalten, zielt auf die Miteinbeziehung der drei Säulen der Nachhaltigkeit – Ökologie, Ökonomie und Soziales – in die Abwägung zur Auswahl von Sanierungsmaßnahmen ab.

Unter geeigneten Randbedingungen können Immobilisierungsverfahren eine effiziente Variante zur Sanierung von kontaminierten Standorten bzw. Teilbereichen sein. Ziel der Grundlagen ist es, mögliche Einsatzbereiche von Immobilisierungsverfahren bei der Sanierung kontaminierter Standorte aufzuzeigen.

# 1 GRUNDLAGEN VON IMMOBILISIERUNGSVERFAHREN

Bei Immobilisierungsverfahren werden die Mobilität und somit auch die Bioverfügbarkeit der Schadstoffe durch das Einbringen bzw. Einmischen von Substanzen mit sorbierenden Oberflächen, wie zB Eisenoxiden oder Tonmineralen wesentlich eingeschränkt bzw. verhindert. Grundsätzlich sind diese Verfahren bei anthropogen verursachten Verunreinigungen durch anorganische (z. B. Schwermetalle) als auch organische Schadstoffe (z. B. MKW) geeignet.

Schwermetalle liegen im Untergrund stets in unterschiedlichen Bindungsformen vor: Neben schwerlöslichen Verbindungen (Sulfide, Oxide, Carbonate etc.) in mineralischen Bestandteilen liegen mehr oder weniger große Anteile an den Oberflächen von Sorptionsträgern gebunden vor, diese umfassen vor allem Tonminerale, organische Substanz (Huminstoffe) und pedogene Oxide (vorwiegend des Eisens, aber auch des Mangans und Aluminiums).

Ein meist nur geringer Anteil der im Untergrund befindlichen Schwermetalle ist mobil und befindet sich in Form löslicher Komplexe oder als hydratisierte Ionen in der Bodenlösung bzw. im Sickerwasser (labiler Pool). Diese Fraktion ist bioverfügbar und schwankt stets innerhalb bestimmter Grenzen, die durch chemische Faktoren, welche auch dem Einfluss biologischer Vorgänge unterliegen, bestimmt werden. Der mobile Anteil der Schwermetalle wird aus einem relativ leicht mobilisierbaren, austauschbar adsorbierten Anteil nachgeliefert. Der immobile Pool umfasst jene Metalle, die in festen Bindungen an diversen Oberflächen vorliegen (z. B. von Tonmineralen, Fe-, Mn-, Al-Oxiden sowie Huminstoffen).

Organische Schadstoffe kommen in der Umwelt nicht zuletzt aufgrund anthropogener Aktivitäten in sehr großem Formenreichtum vor. Neben Mineralölkohlenwasserstoffen (MKW), chlorierten Kohlenwasserstoffen (CKW) und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) sind auch Verunreinigungen mit weiteren hoch toxischen Substanzen wie z. B. polychlorierten Biphenylen (PCB), Dioxinen und Furanen (PCDD/F) und anderen persistenten organischen Schadstoffen (POPs) möglich. Die Immobilisierung von organischen Schadstoffen basiert auf zwei unterschiedlichen Mechanismen, die im Wesentlichen durch den Gehalt an organischer Substanz (Humus) bestimmt werden. Einerseits die chemische Fixierung, die durch Reaktionen an der Oberfläche zu kovalenten Bindungen führt und nicht mehr reversibel ist und andererseits die Adsorption von gelösten Substanzen an Oberflächen eines Bodenbestandteiles, die unter bestimmten Umständen wieder rückgängig verlaufen kann. Aufgrund der Vielfalt der Substanzen sowie deren unterschiedliche Eigenschaften kann die Immobilisierbarkeit organischer Schadstoffe nur nach positiven Vorversuchen empfohlen werden. Der überwiegende Effekt der Immobilisierung bei organischen Schadstoffen beruht jedoch auf der Verringerung der Durchlässigkeit des immobilisierten Untergrundes (weitestgehende Unterbindung der Durchströmung und dadurch bedingt die Verhinderung weiterer Schadstofffreisetzung). In Tabelle 1 werden Kriterien dargestellt, die eine Entscheidung für ein Verfahren empfehlen.

**Tabelle 1:** Entscheidungshilfe zur technischen Verfahrensauswahl (IMH = Immobilisierung mittels mineralischer Hilfsstoffe, DVS = Düsenstrahlverfahren, MIP = Mixed in place, DSM = Deep soil mixing)

Entscheidungshilfe	(IMH) on-site	(DSV) In-situ	(MIP, DSM) in-situ
Anorganische Schadstoffe	√	√	√
Organische Schadstoffe	(√)	(√)	(√)
Ausbreitungstiefe (< 2m)	√	(√)	√
Ausbreitungstiefe (2-10 m)	√	√	√
Ausbreitungstiefe (>10 m)	(√)	(√)	(√)
Inhomogene Bereiche	√	(√)	(√)
Grundwasserbeeinflusst	≠	(√)	(√)
Geringe Tragfähigkeit des Untergrundes	(√)	(√)	(√)
Schwer zugängige Bereiche(verbaute Bereiche)	≠	(√)	≠
Instabile Bereiche (Böschungen)	(√)	√	(√)
Unterhalb von Bebauung	≠	(√)	(√)

√ ... Verfahren grundsätzlich geeignet; (√) ... Verfahren bedingt geeignet; ≠ ... Verfahren in der Regel nicht geeignet

Immobilisierungsmaßnahmen werden in der Regel bei Gefährdungen des Schutzgutes Grundwasser durchgeführt, zur Überprüfung der Wirksamkeit (Effektivität) sind daher meist Kontrolluntersuchungen des Grundwassers notwendig. In Abhängigkeit von Art und Ausmaß der immobilisierten Kontaminationen sind periodische Grundwasseruntersuchungen im Abstrom des immobilisierten Bereichs notwendig.

Um die erzielte Wirkung zu beschreiben und zu quantifizieren können grundsätzlich alle Kriterien herangezogen werden, die für die Beschreibung der Schadstofffahne sowie zur Definition von Sanierungszielen und -zielwerten berücksichtigt wurden (z.B. erzielte Reduktion der Schadstofffracht sowie der maximalen Schadstoffkonzentration). Mittels der Kontrolluntersuchungen ist nachzuweisen, dass die Ausbreitung von Schadstoffen unter Berücksichtigung der Standortverhältnisse im vorgesehenen Ausmaß begrenzt bleibt. In der Regel werden zu Beginn die Kontrolluntersuchungen in kürzeren Intervallen ausgeführt, mit fortschreitender Dauer und besserer Kenntnis des Schadstoffverlaufs können die Intervalle ausgeweitet werden.

Unabhängig von Kontrolluntersuchungen nach Abschluss der Sanierungsmaßnahmen, sind unmittelbar nach der Sanierung und ggf. auch nach einer längeren Zeitspanne Eignungstests des Immobilisats bzw. immobilisierten Bereichs durchzuführen.

## **2 VERFAHREN**

### **2.1 IMH - Immobilisierung mittels mineralischer Hilfsstoffe**

#### **2.1.1 Wirkungsweise IMH und Verfahrensziel**

Die Wirkung von IMH beruht im Wesentlichen auf folgenden Barrieren (Wirkungsmechanismen):

- Die hydraulische Barriere durch weitestgehende Minimierung der Durchlässigkeit
- Die tonmineralogische Barriere durch die Möglichkeit der Schadstoffbindung an die mineralischen Feinteile (Kationenaustauschvermögen)
- Die chemische Barriere durch Fällung von Schwermetallen an Karbonaten und ähnlichen Verbindungen, sodass sie dann in schwer- bis unlöslicher Form vorliegen.

Die Auswahl der beizumengenden mineralischen Feinteile erfolgt abgestimmt auf die Zusammensetzung und die Eigenschaften des Untergrundes. Dadurch erfolgt zusätzlich eine chemische Stabilisierung der Schadstoffe. Das Prinzip folgt der Natur, in der ebenfalls „Schadstoffe“ angereichert sind, z.B. Schwermetalle in Erzlagerstätten und organische Stoffe als Kohlenflöze. Infolge ihrer Einbindung in den ungestörten Gesteinsverbund stellen diese Stoffe kein Risiko für die Umwelt dar.

#### Wirkungsweise der Immobilisierung mit mineralischen Hilfsstoffen (IMH):

IMH ist ein Verfahren für die Sanierung kontaminierter Standorte und basiert auf der gezielten intensiven Vermengung von kontaminiertem Aushub mit speziell ausgesuchten silikatisch - karbonatischen mineralischen Feinteilen (Tonminerale und Kalk). Dabei wird das Aushubmaterial mit den silikatisch - karbonatischen Feinteilen so innig vermischt und anschließend verdichtet, dass ein gleichmäßig dichter Körper entsteht, in den kein Wasser eindringen kann und somit auch keine Schadstoffe austreten können.

Alternativ können anstatt mineralischer Feinteile auch Abfallstoffe aus Produktionsprozessen, wie z.B. Schlämme aus der Kieswäsche eingesetzt werden. Aus dem so behandelten Material wird unter lageweisem Einbau ein hoch verdichteter Körper aus immobilisiertem Material hergestellt. Der so errichtete immobilisierte Körper unterscheidet sich grundsätzlich von den übrigen, derzeit in Anwendung befindlichen Abfallbeseitigungsverfahren, wie der konventionellen Deponierung und der Deponierung von thermisch oder mechanisch-biologisch vorbehandeltem Müll (MBA).

Nach einem Einbau des immobilisierten Materials setzt folgender Reaktionsmechanismus ein:

Es werden die Rahmenbedingungen für einen Inkohlungsprozess geschaffen, d.h. der schwer abbaubaren organischen Substanz wird die Möglichkeit gegeben, über sehr lange Zeiträume durch Abspaltung von Sauerstoff und Wasserstoff immer kohlenstoffreicher zu werden, während bei den anderen Methoden der Deponierung eine Aufoxidation zum Kohlendioxid, gegebenenfalls über den Umweg des Methans, stattfindet. Erreicht wird dieser völlig andere Mechanismus durch die extreme Verlangsamung der Reaktionen im immobilisierten Material hin zu langfristigen Mechanismen.

Dies geschieht einerseits durch die Reduktion der Fließgeschwindigkeiten des Sickerwassers im immobilisierten Material um bis zu fünf Zehnerpotenzen gegenüber konventionellen Ablagerungen und damit die praktische Vermeidung eines Fluid- und Gas-Austausches mit der Umgebung und andererseits durch die Verringerung der Porengröße in mindestens derselben Größenordnung.

Die eingebrachten Tonminerale haben zudem die Eigenschaft, Schadstoffe zu adsorbieren, die Karbonate das Milieu abzupuffern und Schwermetalle mittels Fällungsreaktionen in nahezu unlösliche Verbindungen überzuführen.

Verfahrensziel der IMH ist die Verringerung der Durchlässigkeit des Immobilisats sowie die chemisch-physikalische Einbindung von Schadstoffen (v.a. Schwermetalle, ev. auch organische Schadstoffe). Mittels IMH erfolgt der Schritt von den äußeren zu den inneren Barrieren, die dafür sorgen, dass umweltgefährliche Fluide und Gase erst gar nicht entstehen.

### 2.1.2 Vorbehandlung von Aushubmaterial

IMH ist für eine große Bandbreite an Ablagerungen und kontaminiertem Untergrund geeignet. Bestimmte Materialien erfordern jedoch aufgrund ihrer Eigenschaften eine Vorbehandlung vor der Immobilisierung.

Im Folgenden werden – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – Eigenschaften genannt, die in Abhängigkeit von Sanierungsziel und Verfahrensziel eine Vorbehandlung erfordern können.

**Tabelle 2:** Übersicht über Erfordernisse zur Vorbehandlung von Materialien

<b>Kontamination/ Ablagerung</b>	<b>Eigenschaft</b>	<b>Vorbehandlung</b>	<b>Anlagen/Methoden zur Vorbehandlung</b>
verunreinigte Böden, Aushubmaterial, Material aus kommunalen Altablagerungen	Inhomogenitäten: Grobkornanteile > 100 mm, grobes Stückgut im Aushub etc.	Siebung, Sortierung, organoleptische Trennung während des Aushubs	Siebanlagen, Sortieranlagen,
Verbrennungsrück- stände (z. B. Schlacken)	Inhomogenität durch Stückigkeit (Metalle)	Metallabscheidung Siebung	Metallabscheider Siebung
Schlämme, pastöse Materialien, Material aus dem gesättigten Untergrund	hoher Wassergehalt, geringe Standsicherheit, Neigung zum Fließen;	Entwässerung	Ausbreiten der Materialien; Nutzung der Gravitation zur Entwässerung; Abtrocknung mittels Luftzufuhr (z.B. Wind) und Wärmezufuhr (z.B. Sonne)
Trockene, feinkörnige Materialien	Staubend	Staubvermeidung bei Manipulation, Befeuchtung	Staubabsauganlagen geschlossene Bauweise; Bewässerung,

### 2.1.3 Vorversuche

#### Versuchsbeschreibung

Die Untersuchungen gliedern sich in folgende Aufgabenbereiche:

- Untersuchung und stoffliche Charakterisierung des Rohmaterials
- Untersuchung und stoffliche Charakterisierung der mineralischen Hilfsstoffe
- Herstellung ausgewählter Mischungen und von Prüfkörpern nach geotechnischen Gesichtspunkten aus Rohmaterial und mineralischen Hilfsstoffen
- Geotechnische Prüfung der Dichtigkeit der immobilisierten Produkte
- Herstellung und chemische Untersuchung von Umspüluelsen und evtl. von Perkolaten

Eine Abweichung davon kann erfolgen, wenn das hergestellte Immobilisat nicht auf eine Deponie verbracht wird, sondern einer anderen Verwendung zugänglich gemacht wird (z.B. Wiedereinbau vor Ort). In diesem Fall sind die für den Verwendungszweck relevante Gesetzgebung sowie allfällige behördliche Auflagen maßgeblich.

Falls das Immobilisat auf eine Deponie verbracht werden soll, sind die Bestimmungen der DVO 2008, Anhang 5 „Immobilisierung mit mineralischen Hilfsstoffen“ anzuwenden.

#### Versuchsparameter

Rohmaterial:

- Gesamtgehalte
- Eluatgehalte

Mineralische Hilfsstoffe:

- Tonmineralbestandteile
- Karbonatgehalt
- Gehalt an Schichtsilikaten
- Korngrößenverteilung, etc.

Immobilisat (Rohmaterial-Ton-Mischung): Die Untersuchungen erfolgen beim Immobilisat an einem zylindrischen Prüfkörper auf folgende Parameter:

- Umspüluelsen am Prüfkörper
- Evtl. Perkolat am Prüfkörper.

Weiters werden an den verschiedenen Materialmischungen mindestens folgende geotechnische Bestimmungen durchgeführt:

- Proctorwerte: Proctorwassergehalt und Proctordichte
- Durchlässigkeit ( $k_f$ -Wert)

## Eingesetzte Materialien

Je nach Anforderung an das herzustellende Immobilisat (Dichtigkeit, Druckfestigkeit, pH-Wert Pufferungsvermögen, etc.) werden verschiedene mineralische Hilfsstoffe eingesetzt, wie z. B.

- Feinkörniges Material (auch kontaminiert)
- natürlich gewachsene Tonminerale
- Kieswaschschlämme
- Tonmehl
- Bentonit
- Steinmehl
- Kalk

## Versuchsdauer

Untersuchungen Rohmaterial: Untersuchungen sind kurzfristig möglich, sofern repräsentative Materialproben vorhanden sind.

Untersuchungen der mineralischen Hilfsstoffe: Untersuchungen sind kurzfristig möglich, sofern ausreichende Mengen an Tonmineralen zur Verfügung stehen.

Eluatuntersuchungen: kurzfristig möglich

Perkolate: Die Versuchsdauer orientiert sich an der Zeitspanne die benötigt wird, bis die Versuchsbedingungen einen konstanten Verlauf der Durchlässigkeit zeigen (Konsolidierungsphase, Dauer ca. 1 Woche).

Je geringer die Durchlässigkeit des Immobilisates, umso mehr Zeit wird beansprucht bis eine ausreichende Menge Perkolat für eine Analytik gewonnen werden kann. Dieser Versuchsabschnitt kann mehrere Wochen in Anspruch nehmen.

Tendenzielle Aussagen sind innerhalb von 1 bis 2 Wochen nach Herstellung des Immobilisates möglich.

### 2.1.4 Anwendungsbereiche IMH

In der nachfolgenden Tabelle werden die wesentlichen Anwendungsfälle dargestellt.

**Tabelle 3:** Anwendungsfälle für das Verfahren der Immobilisierung mittels mineralischer Hilfsstoffe

Art der Sanierung	Endlagerung der immobilisierten Materialien
<b>Aushub, Immobilisierung und Wiedereinbau</b> der immobilisierten kontaminierten Materialien (ex-situ):	<b>Totalimmobilisierung:</b> <u>Wiedereinbau</u> der immobilisierten Materialien als <u>monolithischer Körper</u>  <b>Teilimmobilisierung:</b> <u>Abdichtung oder Einkapselung</u> der Oberfläche mit immobilisierten Materialien (Wiedereinbau der immobilisierten Materialien entsprechend den erteilten Auflagen);
<b>Alternative: Aushub, Immobilisierung und anschließende Deponierung</b> des Immobilisates	Einbringen des Immobilisates in eine Deponie nach dem Stand der Technik (es gelten die Bestimmungen der DVO)

## Art der Kontamination

Die jeweilige Eignung der IMH ist im Einzelfall zu beurteilen. In der folgenden Tabelle werden einige typische Anwendungsbereiche genannt:

**Tabelle 4:** Anwendungsbeispiele und Effekte der Immobilisierung

Anwendungsbeispiele	Effekt der Immobilisierung
Materialien mit erhöhten mobilen Schadstoffgehalten	Verringerung der Eluierbarkeit und Durchlässigkeit durch Immobilisierung;
Material mit erhöhten Schwermetallgehalten	Verringerung der Eluierbarkeit und Durchlässigkeit durch Immobilisierung; Adsorption der Schwermetalle an sorptionsfähigen Oberflächen (z. B. Tonminerale, Oxide)
Schlämme mit Standsicherheitsproblemen	Beseitigung der Standsicherheitsprobleme durch Herstellung eines Immobilisats mit standsicheren Eigenschaften (Einhaltung des Proctorwassergehaltes)
Staubemissionen durch Windverfrachtung	Elimination der Emissionen durch Einbindung der Stäube in sorptionsfähige Materialien.
Geruchsemissionen	Elimination der Geruchsprobleme durch Einbindung in sorptionsfähige Materialien

### 2.1.5 Einsatzrandbedingungen (ERB)

#### Kontaminationsprofil

Grundsätzlich ist bei allen Materialien, deren Schadstoffe an die Tonminerale gebunden werden können (z.B. Kationen) der Einsatz von IMH vorteilhaft. Ungeeignet erscheinen Materialien deren Schadstoffe leicht in Lösung gehen bzw. nicht an die Tonminerale gebunden werden können (z.B. bestimmte Anionen). Aufgrund des Vorliegens von meist gemischten Schadstoffzusammensetzungen ist jedenfalls eine Eignungsprüfung der allgemeinen Zuordnung (für die Eignung oder Nicht-Eignung) vorzusehen.

#### Naturwissenschaftliche ERB

Bei der IMH werden keine besonderen Anforderungen an Geomorphologie oder Klima gestellt. Ein Einbau von Immobilisat im Grundwasser oder im Grundwasserschwankungsbereich ist zu vermeiden.

IMH stellt keine besonderen Anforderungen an die Bodenchemie. Durch die Behandlung mit IMH erfolgt eine Steuerung und Stabilisierung des pH-Wertes im Immobilisat. Die Schadstoffe werden an die Tonminerale gebunden (ausgenommen leicht lösliche Schadstoffe).

Für den Einsatz von IMH sind jedenfalls Tonvorkommen in der Nähe des Sanierungsstandortes von Vorteil. Zur Verbesserung der geforderten Eigenschaften ist eine Vergütung dieser Tonminerale durch Zugabe von speziellen feinteilhaltigen Zusätzen wie z.B.: Tonmehl, Bentonit, Kalk, Steinmehl möglich.

IMH ist nicht geeignet bei Schadstoffen, die nicht adsorptionsfähig sind oder leicht in Lösung gehen (z.B. Selenat, Borat) sowie bei leicht flüchtigen Schadstoffen (z. B. CKW).

## Wirtschaftlichkeitsfaktoren

Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens hängt von folgenden Faktoren ab (beispielhafte Aufzählung):

Kontaminationsgrad und Menge der erforderlichen mineralischen Hilfsstoffe: die Menge an mineralischen Hilfsstoffen bedingt einen höheren maschinellen Einsatz. Die Wirtschaftlichkeit sinkt mit zunehmendem Anteil an Hilfsstoffen.

Verfügbarkeit der mineralischen Hilfsstoffe: hier sind vor allem die Transporte zum Behandlungsort ausschlaggebend.

Materialqualität: bei Inhomogenität und bei großen Störstofffraktionen ist eine vorherige Siebung erforderlich

Materialfeuchte: zu feuchte (z.B. Material aus dem gesättigten Untergrund) sowie sehr trockene Materialien erfordern eine Vorbehandlung

Kontaminationsverteilung: Ausdehnungen der Kontamination in die Tiefe sowie heterogene Verteilung erschweren den Zugriff auf das kontaminierte Material

### 2.1.6 Stand der Technik

IMH ist ein anerkanntes Verfahren zur Altlastensanierung, das bereits mehrmals in den letzten 10 Jahren erfolgreich angewandt wurde. Zur Umsetzung stehen großtechnisch folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

Mobile Mischaggregate: Elektro- oder dieselbetriebene Mischeinheiten mit Doppelwellenschneckenaggregaten.

Vorteile: flexibel bei Standortwechsel, rasch verfügbar, Einsatz mehrerer Anlagen bei verschiedenen Materialien oder bei kurzfristig großen Verarbeitungsmengen

Nachteile: Emissionskontrolle während der Behandlung schwer beherrschbar bei Material mit staubigem oder flüssigem Charakter, Automatisierung nur in geringem Ausmaß sinnvoll;

Stationäre Mischanlagen: Meist elektrobetriebene Einheiten, die aus verschiedenen Modulen bestehen können: Aufgabeeinheit, Dosiereinheiten, Mischeinheiten, Austragsförderbänder, Einkapselung der Anlage bei Erfordernis, Entlüftungseinheiten etc.

Vorteile: stationäre Mischanlagen können sehr gezielt auf die Behandlung spezieller Materialien abgestimmt werden; diese Anlagen erweisen sich als sehr leistungsfähig bei großen Mengen; weitere Vorteile bestehen gegenüber mobilen Einheiten bei Maßnahmen zur Emissionsreduzierung (z.B.: Einkapselung der Anlage bei staubigen Materialien), hoher Automatisierungsgrad möglich

Nachteile: teurer als mobile Anlagen

Beispiel: Einfräsen der Tonminerale und anschließende Verdichtung bei sehr flachgründigen Kontaminationen

Vorteile: mit geringeren Kosten umsetzbar

Nachteile: Reichweite in der Tiefe begrenzt

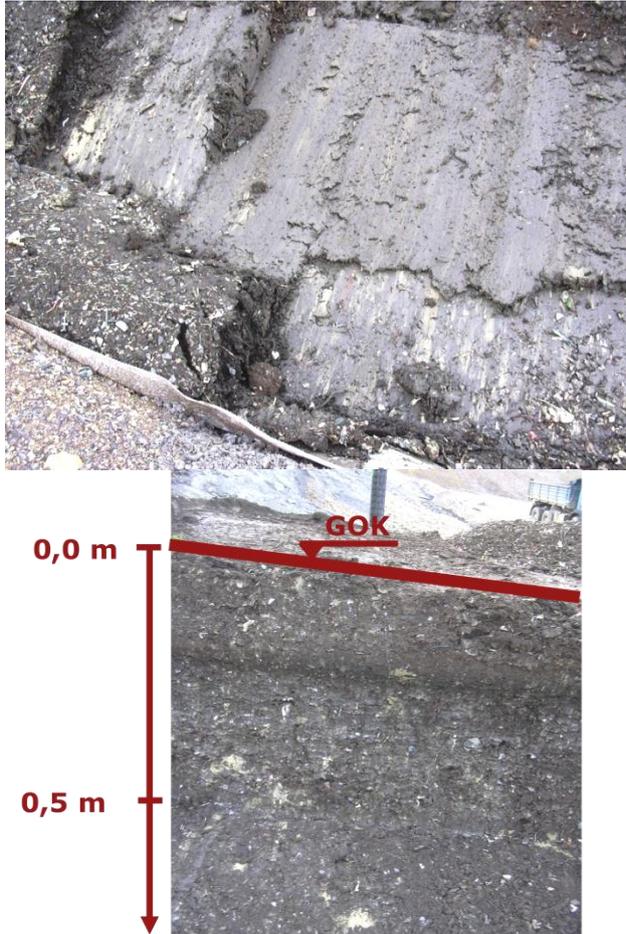
## Anwendungsbeispiele für IMH



**Abbildung 1:** mobiler Immobilisierungszug bestehend aus Schredder, Trommelsieb und Mischanlage für die Immobilisierung; im Hintergrund unbehandelte Altabfälle;



**Abbildung 2:** Einbau der immobilisierten Abfälle in ein Versuchsfeld auf einer Deponie



**Abbildung 3:** Immobilisierte Abfälle im verdichteten Zustand

### 2.1.7 Stand der Wissenschaft

Die Entwicklung des Verfahrens IMH wurde über einen Zeitraum von mehr als 10 Jahren wissenschaftlich begleitet und davon abgeleitet liegen bisher positive Ergebnisse aus dem Einsatz in der Praxis und aus dem Labor bei folgenden Materialarten vor:

- Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfälle
- Ablagerungsmaterial aus der Lederindustrie
- MBA Materialien
- Verunreinigter Untergrund
- Ölschlamm
- Säureteerharze
- Gasreinigungsrückstände
- Aschen aus thermischen Prozessen (Abfallverbrennung)
- Verunreinigte Böden mit unterschiedlichen Kontaminationen

Folgende Materialarten erscheinen für die IMH geeignet, wurden aber noch nicht getestet:

- Rückstände aus der physikalischen und chemischen Behandlung von Rohstoffen
- Rückstände aus anorganischen, chemischen Prozessen
- Rückstände aus der Eisen, Stahl und Metallveredelung
- Rückstände aus der chemischen Oberflächenbehandlung von Metallen
- Rückstände aus der Oberflächenveredelung

Folgende Materialien erscheinen aus heutiger Sicht kritisch für eine Immobilisierung

- Materialien mit hohen löslichen Anteilen wie z.B. Chlorid, Nitrit, Sulfat, Fluorid. Diese können allein durch die Immobilisierung nicht immer ausreichend gebunden werden.
- Materialien mit leichtflüchtigen Schadstoffen: Durch den Vermengungsprozess entweichen die leichtflüchtigen Komponenten bereits vor der Immobilisierung.

Folgende Anwendungen sind aus heutiger Sicht noch zu untersuchen

- Immobilisierung und Austestung von repräsentativen kontaminierten Materialien die ein breites Spektrum beim Schadstoffgehalt aufweisen. Dadurch können Grundlagen geschaffen werden, die eine erste Beurteilung hinsichtlich der technischen Beherrschbarkeit der im kontaminierten Material enthaltenen Schadstoffe ermöglichen.
- Einsatz von immobilisierten Materialien als Baustoff z.B. im Deponiebau, Dammbau
- Voraussetzungen für die Erlangung der Produkteigenschaft des Immobilisats

## 2.2 Verfahren des Spezialtiefbaus

In diesem Teil der Grundlagen werden folgende bewährte Verfahren des Spezialtiefbaus, mit denen eine Herstellung eines homogenen Bodenkörpers zur Immobilisierung von Schadstoffen in möglich wird, behandelt:

- Düsenstrahlverfahren (DSV)
- Bodenmischverfahren
  - Mixed in Place (MIP)
  - Deep Soil Mixing (DSM)

Diese Verfahren sind hauptsächlich für statische Anforderungen – teilweise in Verbindung mit Abdichtungsmaßnahmen – entwickelt worden, folglich stellt Zement bei den dabei eingesetzten Suspensionen einen wesentlichen Bestandteil dar. Mit Zement verfestigte Bodenkörper haben allerdings den Nachteil, dass ev. auftretende Setzungen zu Rissen durch den verbesserten Bodenkörper führen können, außerdem wird eine chemisch physikalische Einlagerung von Schadstoffen in diese Zementmatrix schwer möglich sein.

Durch den Verzicht auf eine Zementbeimengung und einen vermehrten Ersatz durch Tonminerale (natürlicher Ton, Tonmehl, Bentonit, Kieswaschschlamm, o.ä.) wird es möglich, einen setzungsunempfindlichen entsprechend flexiblen Homogenkörper herzustellen und eine Immobilisierung von Schadstoffen zu erzielen. Allerdings sei angemerkt, dass diese Verfahren für Immobilisierungen noch nicht großtechnisch erprobt sind.

Eine ökonomisch sinnvolle Anwendung der angeführten Verfahren zur Immobilisierung ist vor allem dann gegeben, wenn bei Anwendung konventioneller Verfahren umfangreiche Spezialtiefbauarbeiten notwendig wären oder die Anwendung anderer in situ Sanierungsmaßnahmen nicht sinnvoll ist.

Die chemische Wirkungsweise der im Folgenden genannten Verfahren ähnelt dem Verfahren Immobilisierung mittels mineralischer Hilfsstoffe (IMH), nämlich dem Aufbau einer hydraulischen Barriere durch Verringerung der Durchlässigkeit, eines Aufbaus einer adsorbierenden tonmineralischen Barriere und einer chemischen Bindung von Schwermetallen.

In jedem Falle sind unabhängig vom verwendeten Verfahren vor Baustellenbeginn Eignungsprüfungen durchzuführen, um die einzumischenden Feinteile auf die Kontamination abzustimmen. Dazu werden Untergrundproben in-situ entnommen und mit verschiedenen Suspensionsrezepturen aufgemischt. Ergebnis dieser Eignungsprüfung ist neben der optimalen Suspensionsrezeptur auch die Angabe der erforderlichen Einbaumenge pro m<sup>3</sup> gemischter Untergrund (Vgl. Kap.2.3. (Vorversuche bei IMH)).

Bei den Einsatzrandbedingungen gilt es grundsätzlich die Faktoren wie bei IMH zu beachten (Verweis auf Kap.2.5). Allerdings sind bei den Bodenmischverfahren wirtschaftliche Belange sowie aufgrund der schweren

Trägergeräte höhere Ansprüche an das Arbeitsplanums zu berücksichtigen. Limitierend für den Einsatz der o.g. Verfahren des Spezialtiefbaus sind Standorte mit großem Stückgut (> 100 bis > 200 mm), wenn dieses nicht „aufgeschnitten“ (DSV- Verfahren) bzw. bei den Bodenmischverfahren nicht eingemischt, eingekapselt bzw. nicht durchfräst werden kann.

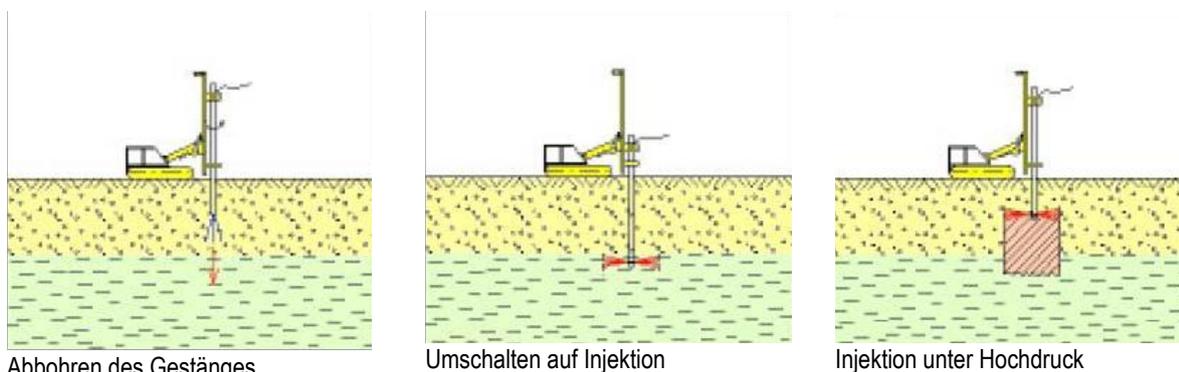
## 2.2.1 Düsenstrahlverfahren (DSV)

### Stand der Technik

Düsenstrahlverfahren sind unter den verschiedensten Bezeichnungen bekannt. Die international übliche, englische Bezeichnung lautet „Jet-Grouting“ und bedeutet übersetzt etwa „Mörtelvermittlung durch Düsenstrahl“. In Österreich wird daher die Bezeichnung „Hochdruckbodenvermörtelung (HBDV)“ verwendet. In der Schweiz der Begriff „Jetten“ oder „Jetting“ und in Deutschland allgemein die Bezeichnung „Hochdruckinjektion“. Hinzu kommt, dass die auf dem Gebiet des Düsenstrahlverfahrens führenden Firmen eigene, z. T. geschützte Bezeichnungen eingeführt haben. So verwenden die Fa. BAUER und die Fa. BILFINGER BERGER den Begriff „HDI-Verfahren“, die Fa. KELLER bezeichnet es als „SOILCRETE-Verfahren (S, D, T)“, die Fa. RODIO führt es unter der Bezeichnung „RODINJET (-1, -2, -3)“ und die Firma INSOND vermerkt es unter „SOILJET“. Bei diesen Düsenstrahlverfahren wird mittels eines oder mehrerer energiereicher Flüssigkeitsstrahlen der anstehende Boden in seiner Struktur aufgelöst und in Suspension gebracht.

Der wesentliche Vorteil dieses Verfahrens besteht auch darin, dass verhältnismäßig kleine Trägergeräte mit einem relativ kleinen Bohrgestänge (Bohrdurchmesser ca. 15 cm) im Boden größere Verfestigungskörper hergestellt werden können.

### Arbeitsablauf



**Abbildung 4:** Herstellen einer DSV Säule

Mit einem Bohrgerät wird ein spezielles Gestänge in den Boden abgeteuft. Am unteren Ende des Gestänges ist seitlich eine bzw. zwei Düsen angebracht. Mit Hochdruck wird eine Flüssigkeit (Wasser und/oder Suspension, je nach Verfahren) durch die Düse gepresst. Dabei entsteht ein sehr energiereicher „Schneidstrahl“, der den Boden aus seiner natürlichen Lagerung löst und mit Bindemittel versetzt.

Durch Drehen und gleichzeitiges Ziehen des Gestänges durchfährt der Schneidstrahl im Boden eine enge Spirale mit dem Ergebnis, dass ein säulenartiger Hohlraum entsteht, der mit Bindemittelsuspension und Boden gefüllt ist. Je nach unterschiedlichen Böden und Lagerungsdichten wurden unterschiedliche Verfahren entwickelt:

- Einphasenverfahren
- Zweiphasenverfahren (mit Luft ummantelter Suspensionsstrahl)
- Dreiphasenverfahren (Suspensionsstrahl und zusätzlich Wasser-Luftstrahl)

Das Düsenstrahlverfahren ist durch folgende Parameter charakterisiert:

- Hochdruckpumpe 100 - 600 bar
- Düsenanzahl 1 – 2
- Düsendurchmesser 2 – 7 mm
- Ziehzeit des Gestänges 1 – 12 min/m
- Luftunterstützung 4 – 12 bar
- Drehzahl des Gestänges 2 – 15 U/min
- Bindemittelsuspensions W/B Wert 0,5 – 1,5
- Verfüllmenge 100 – 400 l/min
- Verfülldruck 3 – 10 bar

### Anwendungsbereiche DSV

Bereits bisher häufig angewendet wurde das Verfahren mit Zementsuspensionen im Zuge von Umschließungen in sensiblen Teilbereichen (z.B. Querungen von Leitungstrassen) oder zur Sicherung von Gebäuden bei Aushubmaßnahmen (Unterfangung), wobei statische Gesichtspunkte im Vordergrund standen.

Grundsätzlich ist das Verfahren sinnvoll zur Sanierung lokaler, aufgrund der örtlichen Gegebenheiten schlecht zugänglichen, Bereiche als Ergänzung zu konventionellem Aushub. Dies kann vor allem im innerstädtischen Bereich bspw. bei statischer Beeinflussung der Kontamination durch Über- bzw. Nachbarbebauung oder sonstiger Infrastruktureinrichtungen bzw. auch bei lokalen Kontaminationen außerhalb einer Umschließung der Fall sein. Anwendung kann das Verfahren auch bei kleinräumigen tief liegenden Kontaminationen finden. Denkbar wäre auch eine Anwendung in Ergänzung zu biologischen Verfahren in lokal geringer durchlässigen Kontaminationsbereichen. Aufgrund ökonomischer Aspekte dürfte die Anwendung des Verfahrens auf kleinräumige Bereiche beschränkt bleiben, großflächige Sanierungen sind vermutlich unwirtschaftlich.

### Einsatzrandbedingungen

Das Düsenstrahlverfahren ist in nahezu allen Bodenarten anwendbar. Es wird im Gegensatz zu herkömmlichen Bodenverfestigungsmaßnahmen in allen Lockergesteinen bis hin zum Ton erfolgreich ausgeführt. Der maximale Säulendurchmesser variiert in Abhängigkeit vom Untergrund, es gelten folgende Faustregeln:

<b>Bodenart</b>	<b>max. Säulendurchmesser</b>
Kies	2,5 m
Sand	2,3 m
Bindige Böden	1,8 m

Je größer das Trägergerät desto größere Tiefen können ausgeführt werden. Mittels Trägergeräten mit 35 (20) Tonnen Eigengewicht können standardmäßig Tiefen von 25 (15) Meter erreicht werden. Die Abweichung von der Vertikalen kann mit ca. 1 % angegeben werden.

Durchschnittlich lassen sich pro Arbeitstag ca. 30 – 40 lfm Säulen pro Arbeitsgerät herstellen, wodurch Tagesleistungen von ca. 80 – 200 m<sup>3</sup> resultieren.

Für den Einsatz für Immobilisierungszwecke wird empfohlen, die Säulen „frisch“ auf „frisch“ herzustellen, damit ein homogener Bodenkörper ohne Fugen erzielt wird. Als ökonomische Anwendungsgrenzen des Verfahrens können derzeit 15 % bis 20 % Tonanteil in der Bodenschicht angesehen werden.

### **Nachteil:**

Am Bohrlochmund fällt ständiger Suspensionsrücklauf an, der ungefähr die Menge des zu behandelnden Bodenvolumens beträgt. Da der Suspensionsrücklauf mit Boden- bzw. kontaminierten Material vermischt ist, ist dieser zu entsorgen. Eine Aufbereitung des Rücklaufes zur nochmaligen Verwendung ist in aller Regel nicht möglich.

Bisher wurden noch keine größeren Partikel als Zement in den Boden einpresst. Das Einbringen von Kiesschlamm ist nur mit einer entsprechenden Vorbehandlung denkbar. Im Wesentlichen hängt dies von der Mahlfineinheit der einzelnen Partikel ab, sollte aber in der Größenordnung von fein aufgemahlten Zementen liegen. Kritisch könnte eventuell der Verschleiß an Pumpen, Rohrleitungen bzw. Werkzeug werden (in Abhängigkeit von der Kornform der aufgemahlten Partikel).

### Monitoring

Die Anwendung eines entsprechenden Qualitätsmanagementsystems bildet die Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung des DSV Verfahrens. Zum einen gilt es die Säulendurchmesser nachzuweisen, zum anderen die räumliche Lage des Bohrloches, von dem aus die Bodensäule hergestellt wird, nachzuweisen.

### Überprüfung des Säulendurchmessers

#### **Direkte Methoden**

Diese direkten Verfahren sind kostenaufwändig und erfordern oft zusätzliche Probesäulen bzw. -felder.

- vertikale oder schräge Kernbohrungen oder Vollkronenbohrungen: Anhand der Kernproben kann die Homogenität der Mischung, das Verformungsverhalten sowie die Durchlässigkeit bestimmt werden.
- Durchmesser-Sonde (-Messgerät): Unmittelbar nach Fertigstellung einer Säule wird in die noch flüssige Düsenstrahlsäule ein coaxial eingebautes Messgestänge eingeführt, das den Übergangsbereich zwischen DSV Körper und Boden ertasten kann. Diese Messgestänge lassen sich in der DSV Säule aufspannen und aus dem Öffnungswinkel der bspw. drei Messarme wird es möglich, über die gesamte Höhe der Säule den Durchmesser zu erfassen.
- Pegelrohre und Pegelstangen: Vor der Herstellung der rasterförmig angeordneten DSV Säulen werden mittels Inklinometer vermessene Bohrungen abgeteuft, in die lackierte bzw. perforierte Rohre eingestellt werden. Anhand der Abrasion des Lacküberzuges der Pegelstangen bzw. Austritt des Rückflusses von Suspensionsmaterial an der Oberfläche der Durchmesser der DSV Säulen nachgewiesen werden.

#### **Indirekte Methoden**

- Georadar, Ultraschall-Echosensoren, Schwingungssensoren: Diese Überprüfungen erfordern für unterschiedliche Böden umfangreiche Vergleichsversuche, wodurch die Interpretation der Säulendurchmesser äußerst schwierig wird.
- Eine Berechnung des Säulendurchmessers anhand des Rückflussmaterials ist i.d.R. nicht möglich, kann im Einzelfall aber bei bekannten Randbedingungen als Näherung herangezogen werden: Durch Analyse des während des Düsenvorgang anfallenden Rückflussmaterials (Bodenaustauschgrad, Rückflussdichte,...) im Vergleich zur eingebrachten Suspension ist es möglich, den Säulendurchmesser laufend zu dokumentieren.

### Überprüfung des Bohrlochverlaufes

Für die Herstellung eines homogenen Bodenkörpers ist die genaue Kenntnis der Ist-Lage der Bohrlocher aller DSV Säulen erforderlich. Folgende zwei Verfahren werden unterschieden:

- Bohrinklinometer: Im unteren Bereich des Bohrgestänges ist ein Vertikalinklinometer angeordnet, der nach dem Herstellen der DSV Säule ausgelesen werden kann.
- Separate Inklinometermessung: Nach Erreichen der Säulenendtiefe wird in das Düsenstrahlgestänge ein kleinkalibriges Inklinometer abgelassen und die Abweichung vermessen.

## 2.2.2 Bodenmischverfahren

Die Bodenmischverfahren finden im Spezialtiefbau eine breite Anwendung und werden hauptsächlich zur Herstellung von Baugrubensicherungen oder Dichtwänden eingesetzt. Flächendeckende Homogenkörper sind ebenfalls herstellbar, sind aber noch nicht großtechnisch erprobt worden.

Das Lösen des Bodens erfolgt während des Abteufens durch rotierende mechanische Mischwerkzeuge, die sich um eine vertikale Achse drehen – also bohrend arbeiten – oder sich um eine horizontale Achse drehen (Fräse). Die vorhandenen Porenräume im Bodengerüst werden dabei mit dem Bindemittel verfüllt.

Grundsätzlich gilt es bei Bodenmischverfahren Trocken- und Nassmischverfahren zu unterscheiden, je nach dem ob bei der mechanischen Zerlegung des Bodens eine Vermischung mit Bindemitteln bzw. Zusatzmitteln in Pulverform mittels Druckluft erfolgt oder eine zähflüssige Suspension bestehend aus Wasser, Bindemittel und Zusatzmitteln vermischt wird. Diese Vermischung kann während des Abbohrvorganges und/oder des Rückziehens mit dem Boden erfolgen. Die Umdrehungsgeschwindigkeit des rotierenden Mischwerkzeuges sowie die Bohr- und Rückziehggeschwindigkeit müssen so abgestimmt sein, dass ein ausreichend homogen behandelter Boden entsteht.

Das Vorhandensein von Findlingen, Blöcken, Hohlräumen oder verfestigten Schichten können bei der Ausführung Probleme verursachen oder spezielle Methoden oder Werkzeuge erforderlich machen.

Die Entwicklung der Bodenmischverfahren begann in den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts. Grundsätzlich lassen sich in der Gerätetechnik Einzel-/Mehrfachmischwellen in Kombination mit Mischflügeln/Rührpaddel und durchgehende Schnecken unterscheiden. Die verwendeten Systeme reichen von Verfahren mit einem Mischpaddel bis zu Systemen, bei denen fünf parallel angeordnete Mischstangen eingesetzt werden. Durch die Verwendung von Mehrfachwerkzeugen können längere Wandelemente hergestellt werden. Neuere Entwicklungen stellen Hybridtechniken dar, wo bspw. das Bodenmischverfahren mit dem Düsenstrahlverfahren kombiniert ist. Einen Überblick über die unterschiedlichen Gerätetypen und Arbeitsweisen liefert folgende Abbildung 5.

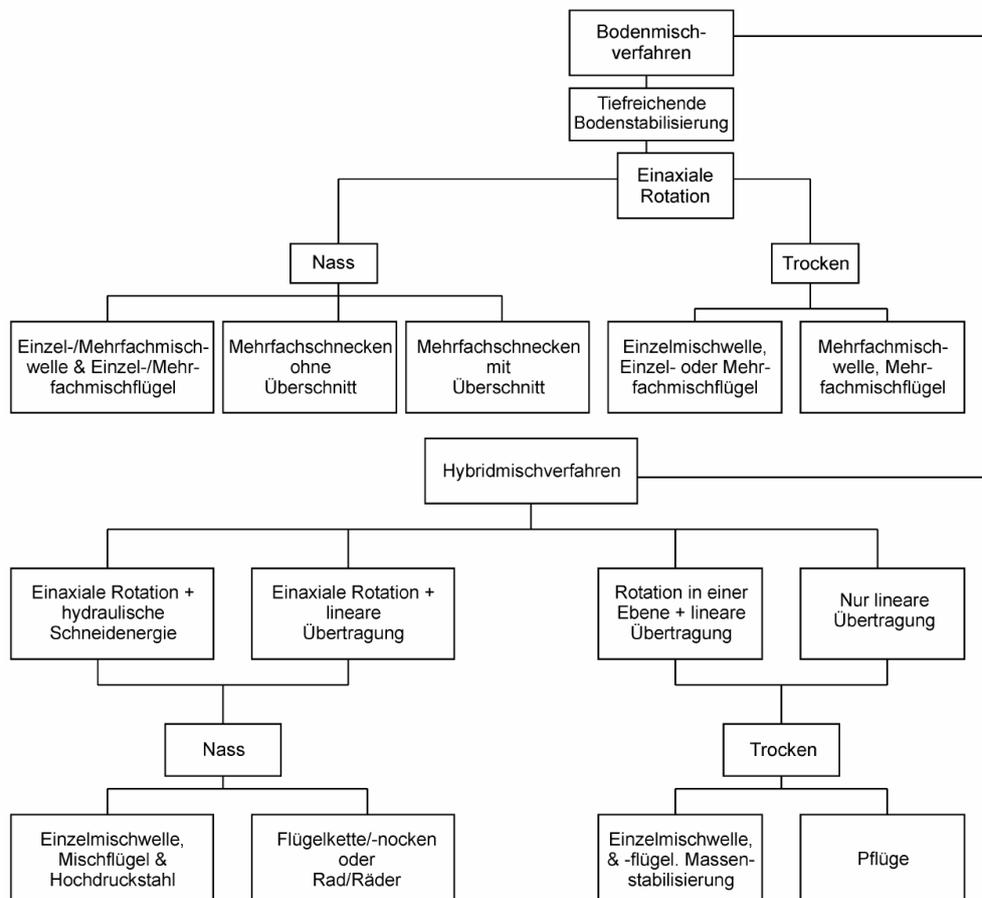


Abbildung 5: Gerätetypen und Arbeitsweisen bei den Bodenmischverfahren [EN 14679]

## Trockenmischverfahren

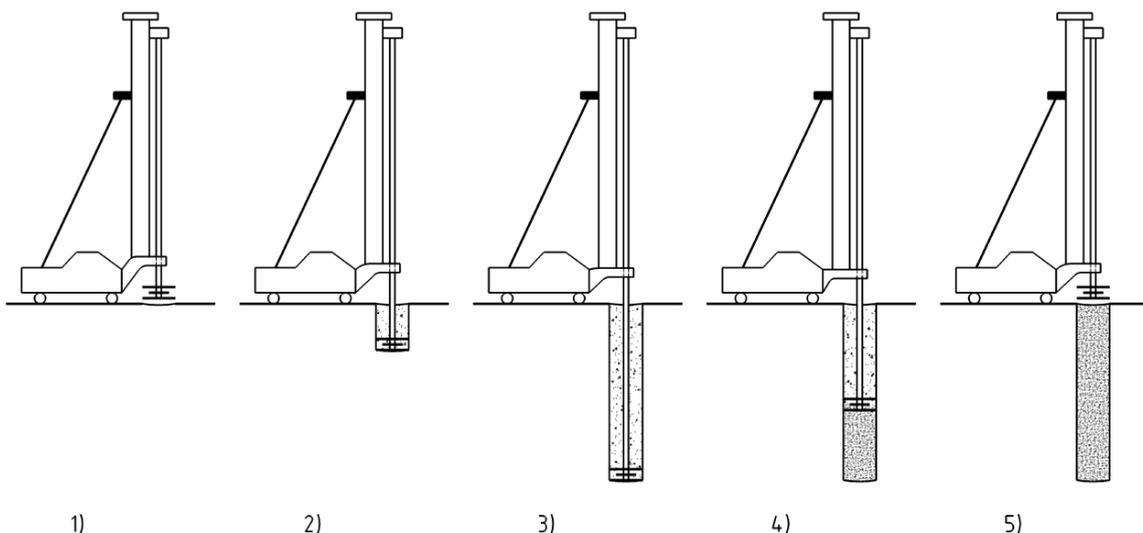
Trockenmischverfahren werden hauptsächlich bei weichen bindigen Böden eingesetzt. Das Bindemittel wird in trockener Form mit Hilfe von Druckluft eingebracht. Das für den Abbindeprozess erforderliche Wasser wird dem umgebenden Boden entzogen. Die Form der Mischwerkzeuge richtet sich nach dem zu mischenden Untergrund, Abb. 6 zeigt unterschiedliche Ausprägungen.



**Abbildung 6:** Formen des Mischwerkzeuges in Abhängigkeit des Bodens

Ein Ablaufschema zeigt Abb. 7 [EN 14679]:

1. Positionierung des Mischwerkzeuges
2. Abteufen der Mischswelle auf die vorgesehene Tiefe, dabei erfolgt ein gleichzeitiges Zerlegen des Bodens
3. Zurückziehen der Mischswelle und gleichzeitiges Einbringen von Bindemittel in pulvriger Form
4. Vermischen des Bodens mit dem Bindemittel durch Rotation des Mischwerkzeuges um die horizontale Ebene
5. Fertiggestellte Säule



**Abbildung 7:** Reihenfolge des Einbaus [EN 14679]

Beim Trockenmischverfahren werden die nordische und die japanische Technik unterschieden, einen Überblick gibt Tab. 5 genaue Details finden sich u.a. in der EN 14679.

**Tabelle 5:** Vergleich der nordischen und der japanischen Trockenmischtechnik

Ausrüstung	Details	Nordische Technik	Japanische Technik
Mischgerät	Anzahl der Mischwellen	1	1-2
	Durchmesser des Mischwerkzeuges	0,4 m bis 1,0 m	0,8 m bis 1,3 m
	maximale Behandlungstiefe	25 m	33 m
	Lage der Bindemittelauslässe	oberes Paar der Flügel	am Wellenende und/oder an den Flügeln (einzeln oder mehrfach)
	Injektionsdruck	variabel von 200 kPa bis 800 kPa	maximal 300 kPa
eingebrachte Bindemittelmenge		100 kg/m <sup>3</sup> bis 250 kg/m <sup>3</sup>	100 kg/m <sup>3</sup> bis 300 kg/m <sup>3</sup>
Ziehrate/Abbohrrate		10 mm/U bis 30 mm/U	10 mm/U bis 35 mm/U
Injektionsphase		meist während des Rückziehens	Abbohren und/oder Rückziehen

### Nassmischverfahren

Bei den Nassmischverfahren wird die Suspension in einer mörtelähnlichen Mischung eingebracht, was eine homogenere hydraulische Abbindung bewirkt. Die Rezeptur der Mischung und die Pumpmenge richten sich nach der Bodenart (Kornverteilung, Feinkornanteil, organische Substanzen) und dem Grundwasserstand.

Bei nichtbindigen Böden werden vor allem Schnecken eingesetzt, bei feinkörnigen Böden und hohen Steifigkeiten werden aufwendigere Mischwerkzeuge mit Schneid- und Mischflügeln in unterschiedlicher Form und Anordnung erforderlich.

Beim Nassmischverfahren werden wiederum nordische und die japanische Techniken unterschieden, einen Überblick gibt Tab. 1.2, genaue Details finden sich u.a. in der EN 14679.

**Tabelle 6:** Vergleich der nordischen und der japanischen Nassmischtechnik

Ausrüstung	Details	Europa	Japan
Mischgerät	Anzahl der Mischwellen	1 bis 3	1 bis 4
	Durchmesser des Mischwerkzeuges	0,4 m bis 0,9 m	1,0 m bis 1,6 m
	maximale Behandlungstiefe	25 m	48 m
	Lage des Bindemittelauslasses	am Gestänge	am Gestänge und Mischflügel
	Injektionsdruck	500 kPa bis 1000 kPa	300 kPa bis 600 kPa
eingebrachte Bindemittelmenge		80 kg/m <sup>3</sup> bis 450 kg/m <sup>3</sup>	70 kg/m <sup>3</sup> bis 300 kg/m <sup>3</sup>
Injektionsphase		Abbohren und/oder Rückziehen	Abbohren und/oder Rückziehen

### Häufig eingesetzte Bodenmischverfahren

Folgende Verfahren können den Bodenmischverfahren zugeordnet werden und finden im europäischen Raum breite Verwendung:

- Mixed-in-Place (MIP)
- Deep-Soil-Mixing (DSM)

## Mixed in Place (MIP)

### Arbeitsablauf (siehe Abb. 8)

Zur Herstellung des MIP-Schlitzes wird bspw. eine Dreifachschnecke auf Solltiefe abgebohrt. Während des Abbohrens und Ziehens der Schnecke wird der anstehende Boden aufgemischt und durch das hohe Seelenrohr der Schnecke die Bindemittelsuspension eingebracht. Durch den Einsatz einer durchgehenden Endlosschnecke wird die hergestellte Bodenlamelle über die gesamte Höhe gemischt und homogenisiert.

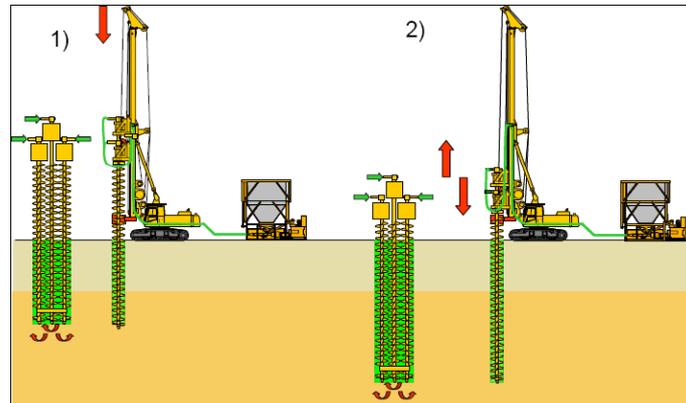


Abbildung 8: Herstellung einer MIP Wand

Die Herstellung der MIP-Lamellen erfolgt im so genannten "doppelten Pilgerschrittverfahren". (Abb. 9). Hierbei werden die Überschneidungsbereiche von Primär- und Sekundärlamelle nochmals überbohrt. Das Ergebnis ist ein aufgrund der Schneckenengeometrie definierter verfestigter Bodenkörper.

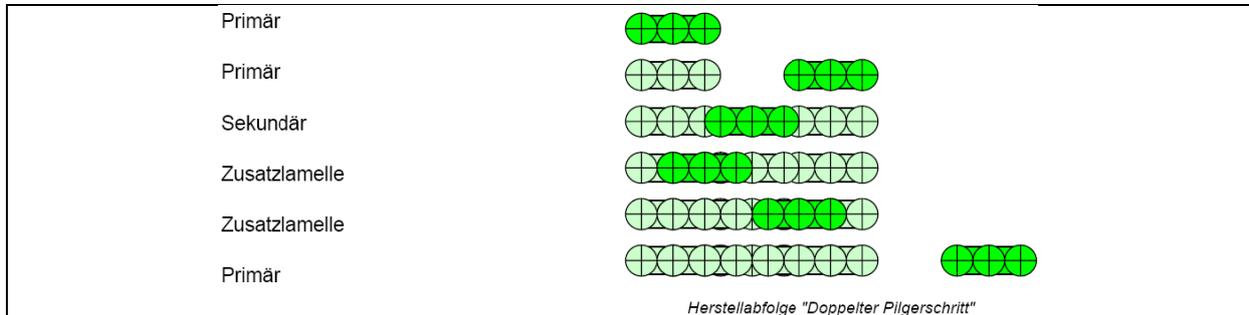


Abbildung 9: Herstellung einer MIP Wand im doppelten Pilgerschrittverfahren

### Einsatzrandbedingungen

Die Standarddurchmesser der einzelnen Bohrschnecken betragen 37 bzw. 55 cm. Mit erstgenanntem Durchmesser können Wandtiefen bis ca. 13 m erreicht werden, mit Letzterem ca. 16 m. Die erreichbaren Maximaltiefen sind im Vergleich zum Düsenstrahlverfahren Verfahren etwas geringer.

Die Tagesleistungen variieren von 100 – 140 m<sup>3</sup>. Maximale Tagesleistungen bis zu 200 m<sup>3</sup> sind technisch möglich. Gegenüber dem Düsenstrahlverfahren liegt der Vorteil des MIP, dass nur wenig Rücklauf suspension anfällt, es ist von ca. 10 % Rücklauf (inkl. Bindemittel) auszugehen.

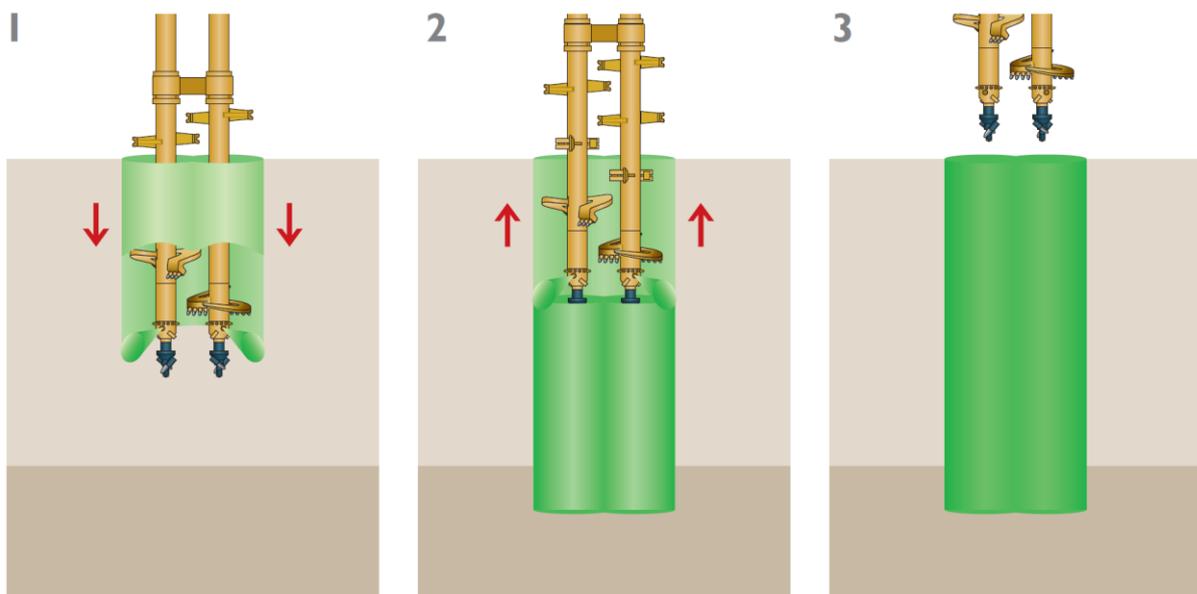
### Nachteil:

Nachteilig erweisen sich die großen Trägergeräte, deren Tonnagen den zwei- bis dreifachen dessen der DSV Geräte entsprechen und damit einen höheren Anspruch an das Arbeitsplanum erfordern.

## Deep Soil Mixing (DSM)

### **Arbeitsablauf (Abb. 10)**

Der anstehende Boden wird durch ein mäklergeführtes Bohrwerkzeug gelöst und mit der speziellen Suspension zu einer homogenen Masse vermischt. Die Suspensionszugabe erfolgt an den Spitzen des rotierenden Bohrwerkzeuges (in der Regel bis zu 3), wobei der Abstand der Bohrwerkzeuge variabel gestaltet werden kann. Der Mischvorgang erfolgt über um die vertikale Achse drehende Werkzeuge horizontal in die jeweilige Bodenschicht. Durch Einfahren entsteht eine durchgehende Säule, welche beim Ziehvorgang der Mischwerkzeuge nochmals intensiv durchmischt wird (Abb. 10). Diese Durchmischung wird durch gegenläufig arbeitende Paddel über dem Bohrwerkzeug verbessert. Die Suspensionszugabe erfolgt an der Spitze des Mischwerkzeuges über Hochdruckspülköpfe.



**Abbildung 10:** Vorgangweise bei der Herstellung eines DSM-Elements

### **Einsatzrandbedingungen**

Es werden hauptsächlich Mischwerkzeuge mit Mischstäben (Paddel) mit Durchmessern zwischen 60 und 120 cm eingesetzt. Die Standarteinsatz Tiefen liegen je nach eingesetztem Trägergerät bei 16 m, maximal erreichbar sind ca. 24 m. Die Tagesleistungen bis 140 m<sup>3</sup> sind üblich, maximale Tagesleistungen bis zu 200 m<sup>3</sup> möglich.

### **Nachteil:**

Nachteilig erweisen sich die großen Trägergeräte, deren Tonnagen (inkl. Mäklern) bis zu 85 Tonnen betragen können.

### Monitoring

Bei der Planung und Aufteilung der Säulen zur Herstellung von durchgehenden homogenen Bodenkörpern müssen die Winkelabweichung sowie die Lageabweichungen der rotierenden Mischwerkzeuge Berücksichtigung finden. Vor der Herstellung der Bodensäulen muss die Lage des Kopfpunktes jeder einzelnen Säule vermessen und vermarktet werden. Während des Herstellungsprozesses jedes einzelnen Elementes werden mit elektronischer Neigungs- und Tiefenkontrolle die Vertikalität und Tiefe vom Gerätefahrer kontrolliert und aufgezeichnet.

Folgende Herstellungsparameter sind während der Herstellung zumindest in Tiefenabständen von 0,5 m kontinuierlich aufzuzeichnen (Tab. 7, EN 14679):

**Tabelle 7:** Herstellungsparameter

Trockenmischverfahren	Nassmischverfahren
Druck im Luftbehälter	Suspensionsdruck; Luftdruck (wenn vorhanden)
Bohr- und Ziehrate	Bohr- und Ziehrate
Umdrehungsgeschwindigkeit (Umdrehungen/Minute während des Abbohrens)	Umdrehungsgeschwindigkeit (Umdrehungen/Minute während des Abbohrens)
Menge von Bindemittel je Tiefenmeter während des Abbohrens und Ziehens	Menge von Suspension je Tiefenmeter während des Abbohrens und Ziehens

Analog zur Qualitätssicherung beim DSV Verfahren kann die lückenlose Herstellung von homogenen Bodenkörpern durch vertikale oder schräge Kernbohrungen oder Vollkronenbohrungen überprüft werden. Bei der Herstellung der Bodensäulen ist bei jedem Element neben der Lage die Neigung mittels in den Mischwerkzeugen integrierten Inklinometern zu dokumentieren.

### 3 NUTZUNG UND/ ODER NACHNUTZUNG VON IMMOBILISIERTEN STANDORTEN

Bei der Nutzung bzw. Nachnutzung immobilisierter Standorte bzw. Teilbereichen von Standorten sind grundsätzlich folgende Einschränkungen zu berücksichtigen:

- Die Durchströmung bzw. Durchsickerung von immobilisierten Bereichen darf durch Nutzungen (z.B: konzentrierte Versickerung von Oberflächenwässern) nicht erhöht werden.
- Eine Erhöhung der Durchlässigkeit muss auch langfristig ausgeschlossen werden. In diesem Sinne dürfen keine mechanischen (z.B: durch zu hohe statische Belastungen) und/oder chemische Schädigungen (z.B: durch betonaggressive Milieubedingungen) bei bestehenden oder zukünftigen Nutzungen verursacht werden.
- Bei Aushubarbeiten ist neben den mechanischen Erschwernissen damit zu rechnen, dass Aushubmaterial aus immobilisierten Bereichen zu erhöhten Aufwendungen bei der Entsorgung führen kann.
- Bei oberflächennahen Immobilisierungsbereichen kann es zu einer Beeinträchtigung von Pflanzenwachstum (insbesondere bei tief wurzelnden Pflanzen) kommen.
- Bei land- und forstwirtschaftlicher Nachnutzung immobilisierter Standorte (insbesondere bei oberflächennahen Immobilisierungsbereichen) ist einerseits die mögliche Schadstoffaufnahme der Pflanzen sowie andererseits mögliche Schädigungen des immobilisierten Bodenkörpers durch die Pflanzenwurzeln zu prüfen. Gegebenenfalls sind entsprechend geänderte Pflanzungen durchzuführen oder auf die land- bzw. forstwirtschaftliche Nutzung gänzlich zu verzichten.
- Bei der Bebauung immobilisierter Standorte ist die abweichende Standfestigkeit des Untergrundes zu berücksichtigen, es können deutliche Mehraufwendungen bei der Gründung von Bauten entstehen.

Darüber hinaus können immobilisierte Standorte in der Regel uneingeschränkt genutzt werden und in den Wirtschaftskreislauf wieder eingegliedert werden.

## 4 LITERATUR

- BM für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft. 2009. Leitbild Altlastenmanagement – Sechs Leitsätze zur Neuausrichtung der Beurteilung und Sanierung von kontaminierten Standorten. S
- BM für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft. 2007. Altlastensanierung in Österreich – Effekte und Ausblick. S 193.
- Entenmann, W. und Riehl-Herwisch G. (1998) mit Beiträgen von Carniel P., Hackenberg M.: Barbara-Gespräche, Payerbach.
- Friesl W., Horak O. and Wenzel W., (2004). Immobilization of heavy metals in soils by the application of bauxite residues: pot experiments under field conditions. J. Plant Nutr. Soil Sci. 167, (1) 54-59.
- Friesl, W., E. Lombi, O. Horak, and W. W. Wenzel (2003). Immobilization of heavy metals in soils using inorganic amendments in a greenhouse study. J. Plant Nutr. Soil Sci. 166, 191-196.
- Glatz K. und Ringhofer J (2004). Eco-landfill: Innovatives Verfahren zur nachhaltigen Immobilisierung von Abfällen und zur Altlastensanierung. Lorber K.E., Staber W., Novak J. Prochaska M., Maier J. und Kastl I. (Hrsg.) Depo-Tech 2004 – Abfall- und Deponietechnik, Altlasten, Abfallwirtschaft. 45-50.
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1994). Immobilisierung von Schadstoffen in Altlasten. Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle, 1. Auflage Karlsruhe 1994
- Dipl. Ing. Josef Ringhofer, Dipl. Ing. Karl Glatz: Patent AT 504 701 B1 2009-06-15 Oberflächenabdichtung für Abfalldeponien
- Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (1996), Materialien zur Altlastenbearbeitung 1/96; Immobilisierung von Schadstoffen in Altlasten
- Scheffer F. und P. Schachtschabel (2002). Lehrbuch der Bodenkunde, 15. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg-Berlin S 593.
- Studienarbeit In-situ Bodensicherungsverfahren durch Zugabe externer Stoffe (Immobilisierung) – Anwendungen, Möglichkeiten und Grenzen, von cand.-Ing. A. Fröhlich, Wuppertal 2008
- US EPA (1992), Silicate Technology Corporation's Solidification / Stabilization Technology for Organic and Inorganic Contaminants in Soils
- US EPA (2000); Solification / Stabilization Use at Superfund Sites