

TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Tiefreichende Bodenstabilisierung – Mixed in Place

Deep Mixing – Mixed in Place

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs unter
der Leitung von

Univ.Prof. DI Dr.techn. Hans Georg Jodl

und als verantwortlich mitwirkenden Assistenten

WMA DI Gernot Altinger

am

Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Michael Kern

610 / 9708534

Puchsbaumgasse 54

A – 1100 Wien

Wien, im Juni 2007

.....
(Michael Kern)

Kurzfassung

Der Spezialtiefbau, insbesondere die Baugrundverbesserung beziehungsweise Baugrundverfestigung bezogen auf die tiefreichende Bodenstabilisierung, hat in den letzten Jahren bei der Gründung von Gebäuden, der Sicherung von Baugruben sowie bei der Sanierungen von Altlasten erheblich an Bedeutung gewonnen. Dabei haben diese Techniken wesentlich zur wirtschaftlichen Gestaltung von Gründungs- und Sicherungskonzepten beigetragen. Die Auswahl des geeigneten Verfahrens setzt vertiefte Kenntnisse des Zusammenwirkens vom erzeugten Objekt und Baugrund voraus.

Im Zuge dieser Diplomarbeit werden nach einem kurzen geschichtlichen Rückblick auf die Entwicklung der tiefreichenden Bodenstabilisierung, die bodenmechanischen sowie die bautechnischen Grundlagen dieser Systeme erläutert. Anhand ihrer verfahrenstechnischen Eigenschaften werden die in Österreich und in den angrenzenden Ländern am Bauplatz präsenten Methoden ausführlich behandelt. Dabei werden diese Techniken mit dem patentierten „Mixed in Place-Verfahren“ eines deutschen Spezialtiefbauunternehmens gegenübergestellt und anhand ihrer Eigenschaften verglichen. Durch das wachsende Aufgabenspektrum und dem großen Erfahrungsreichtum aus traditionellen Gründungs- und Sicherungsmethoden wie der Schlitzwandtechnik oder des Düsenstrahlverfahrens, haben sich aus diesen Verfahren in Kombination mit der tiefreichenden Bodenstabilisierung sogenannte „Hybridtechniken“ abgeleitet. Ferner werden die Vor- und Nachteile der behandelten Verfahren aufgezeigt und auf ihre Anwendbarkeit in unterschiedlichen Böden verglichen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die hergestellten Erzeugnisse mit dem anstehenden Boden als Baustoff sich als kostengünstige aber auch ökologische Alternative zu traditionellen Techniken erweisen und in Zukunft sicherlich vermehrt auf Österreichs Baustellen anzutreffen sein werden.

Abstract

Special geotechnical work, especially ground improvement or ground stabilization concerning deep soil mixing, has gained considerable significance over the last years with founding buildings, protecting excavations and renovating scrap. These methods have been vital for the economic structuring of foundation and protection concepts. Selecting the right method requires extended knowledge of how the created building object and the building ground act in combination.

After a short historical review of the development of deep soil mixing, this master thesis explains the basis of these systems concerning soil mechanics and structurals. The focus lies on the process engineering features of the methods which exist on the Austrian building market and that of its neighbouring countries. The discussed methods are compared to the patented mixed-in-place method of a German special foundation engineering company. The spectrum of tasks is growing and there exists wide experience from traditional foundation and protection methods like the diaphragm wall method or the jet grouting technique. Combined with the deep soil mixing so-called "hybrid methods" have come into existence. This dissertation also shows the advantages and disadvantages of the discussed methods and compares them according to how they can be used with different soil conditions.

In conclusion it can be maintained, that the created products together with the available soil as building material are cheaper but also more ecological than traditional methods. Most likely, in the future they will be used increasingly on Austrian building sites.

Vorwort

Zuerst möchte ich mich bei Herrn o. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hans Georg Jodl und bei Herrn WMA DI Gernot Altinger für die ausgezeichnete Unterstützung und Begleitung während meiner gesamten Diplomandentätigkeit bedanken.

Mein Dank gilt auch Herrn Ing. Stefan Koisser von der Bauer Spezialtiefbau Ges.m.b.H. für die rasche und unkomplizierte Bereitstellung von Daten und Informationen.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei meinem Vater, Franz Kern sowie meinen Großeltern Ernestine und Josef Schachner, die mich zu jeder Zeit gefördert haben und mir eine unbeschwerte Ausbildung ermöglichten.

Ein großer Dank gilt auch meiner liebevollen Partnerin Claudia, die mir während des Studiums stets bemüht zur Seite stand und mir in allen Lebenslagen die nötige Unterstützung und Motivation gibt.

Abschließend widme ich einen ganz besonderen Dank meiner Mutter, Ernestine Kern. Wie sehr würde ich mir wünschen, dass du diese Augenblicke an meiner Seite miterleben könntest. Dein Vertrauen hat mich bis hierher geführt und wird stets mein Begleiter sein – Danke!

Abkürzungsverzeichnis		VIII
1	Grundlagen	1
1.1	Baugrund.....	1
1.2	Baugrunduntersuchung.....	2
1.2.1	Allgemeines	2
1.2.2	Bodenparameter.....	5
1.3	Mechanische Bodenverbesserung	8
1.3.1	Verdichtung durch Walzenzug.....	8
1.3.2	Rütteldruckverfahren	9
1.3.3	Rüttelstopfverfahren	9
1.3.4	Dynamische Intensivverdichtung.....	10
1.4	Bodenverbesserung mit Bindemitteln.....	11
1.4.1	STS - Stabilisierungssäulen	12
1.4.2	Bodenverbesserung, qualifizierte Bodenverbesserung bzw. Bodenverfestigung im Erd- und Straßenbau	12
1.4.3	Hydrozementationsverfahren	12
1.4.4	Düsenstrahlverfahren	13
1.4.5	Niederdruckinjektion	13
1.4.6	Kluftinjektion	14
1.4.7	Bodenaufsprenginjektion	14
2	Tiefreichende Bodenstabilisierung.....	15
2.1	Einleitung	15
2.2	Trockenmischverfahren.....	18
2.2.1	Nordische Technik.....	18
2.2.2	Japanische Technik.....	19
2.2.3	Zusammenfassung	20
2.3	Nassmischverfahren	24
2.3.1	Europäische Techniken	25
2.3.2	Japanische Techniken.....	25
2.3.3	Zusammenfassung	26
2.4	Mischtechnik.....	29
2.4.1	Allgemeines	29
2.4.2	Bindemittleintrag bei der Trockenmischtechnik	29
2.4.3	Suspensionseintrag bei der Nassmischtechniken	33
2.4.4	Chemische Grundlagen.....	34
3	Spezielle Verfahren	41
3.1	Mixed in Place – Verfahren	41
3.1.1	Einführung	41
3.1.2	Verfahrensprinzip	42
3.1.3	Anwendung.....	44
3.1.4	Gerätetechnik	49
3.1.5	Baustelleneinrichtung	53
3.1.6	Qualitätssicherung.....	55
3.1.7	Zusammenfassung	56
3.2	Soil Mixing Wall-Verfahren	58
3.2.1	Einführung	58
3.2.2	Verfahrensprinzip	58
3.2.3	Anwendung.....	59
3.2.4	Gerätetechnik	59
3.2.5	Baustelleneinrichtung	60
3.2.6	Qualitätssicherung.....	60
3.2.7	Zusammenfassung	61

3.3	Wet Speed Mixing	62
3.3.1	Einführung	62
3.3.2	Verfahrensprinzip	62
3.3.3	Anwendung.....	63
3.3.4	Gerätetechnik	63
3.3.5	Baustelleneinrichtung	66
3.3.6	Qualitätssicherung.....	67
3.3.7	Zusammenfassung	67
3.4	Trockeneinmischtechnik	68
3.4.1	Einführung	68
3.4.2	Verfahrensprinzip	69
3.4.3	Anwendung.....	70
3.4.4	Gerätetechnik	72
3.4.5	Baustelleeinrichtung	74
3.4.6	Qualitätssicherung.....	75
3.4.7	Zusammenfassung	75
4	Hybridtechniken	76
4.1	Allgemeines	76
4.2	Cutter Soil Mixing-Verfahren	76
4.2.1	Einführung	76
4.2.2	Verfahrensprinzip	77
4.2.3	Anwendung.....	78
4.2.4	Gerätetechnik	79
4.2.5	Baustelleneinrichtung	81
4.2.6	Qualitätssicherung.....	82
4.2.7	Zusammenfassung	83
4.3	Fräsmischinjektionsverfahren	84
4.3.1	Einführung	84
4.3.2	Verfahrensprinzip	84
4.3.3	Anwendung.....	85
4.3.4	Gerätetechnik	86
4.3.5	Baustelleneinrichtung	87
4.3.6	Qualitätssicherung.....	87
4.3.7	Zusammenfassung	87
4.4	Massenstabilisierung	88
4.4.1	Einführung	88
4.4.2	Verfahrensprinzip	88
4.4.3	Anwendung.....	90
4.4.4	Gerätetechnik	90
4.4.5	Baustelleneinrichtung	91
4.4.6	Qualitätssicherung.....	92
4.4.7	Zusammenfassung	92
4.5	Sonstige Verfahren	93
4.5.1	Tubular Soil Mix-Verfahren.....	93
4.5.2	CDM-LODIC-Verfahren	95
5	Bemessung und Prüfung	97
5.1	Allgemeines	97
5.2	Bemessung	98
5.2.1	Bemessungsgrundsätze	98
5.2.2	Setzungsverhalten.....	98
5.2.3	Einbauraster	100
5.3	Qualitätsüberwachung	103
5.3.1	Dokumentation	103

5.3.2	Prüfung der Festigkeitsentwicklung.....	105
5.6	Pfahlprüfungen.....	106
5.6.1	Allgemeines.....	106
5.6.3	Äußere Pfahlprüfung.....	107
5.6.4	Integritätsprüfung.....	109
5.7	Schadenspotential.....	110
6	Mischverfahren im Straßenbau.....	111
6.6	Einführung.....	111
6.7	Mit Bindemittel stabilisierte Tragschichten.....	111
6.7.1	Baumischverfahren (mixed-in-place).....	111
6.7.2	Zentralmischverfahren (mixed-in-plant).....	112
6.7.3	Prüfungen.....	112
6.7.4	Anwendung.....	112
6.8	Wiederverwendung bituminöser Strassenbaustoffe.....	113
6.8.1	Einführung.....	113
6.8.2	Recycling In Place.....	113
6.8.3	Recycling In Plant.....	114
7	Kalkulationsbeispiel.....	115
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	119
8.1	Zusammenfassung.....	119
8.2	Ausblick.....	122
Anhang.....		123
Kalkulationsblätter.....		124
Abbildungsverzeichnis.....		133
Tabellenverzeichnis.....		135
Quellenverzeichnis.....		136

Abkürzungsverzeichnis

CDM	Cement Deep Mixing
CDM-LODIC	Cement Deep Mixing - Low Displacement and Control
CMI	Cut Mix Injection
CSM	Cutter Soil Mixing
CSV	Combined soil Stabilization with Vertical columns
CVS	Combined Vertical columns for soil Stabilization
DMM	Deep Mixing Method
DJM	Dry Jet Mixing
DSM	Deep Soil Mixing
DSV	Düsenstrahlverfahren
FMI	Fräs Misch Injektion
MIP	Mixed In Place
MIP	Mixed In Plant
SCM	Surface Compact Mixing
SMM	Shallow Mixing Method
SMW	Soil Mix Wall
TET	Trockeneinmischtechnik
TSM	Tubular Soil Mix
WJM	Wet Jet Mixing
WSM	Wet Speed Mixing

1 Grundlagen

1.1 Baugrund

Der Baugrund ist die Grundlage aller baulichen Tätigkeiten. Alle Baukonstruktionen, die auf der Erde errichtet werden, stehen in ständigem Kontakt und in Wechselwirkung mit ihrem Grund. Nur was der Baugrund zu tragen im Stande ist, kann auf, oder in ihm auch errichtet werden. Die frühzeitige Untersuchung des Baugrunds durch geeignete Feld- und Labormethoden ermöglicht eine zweckmäßige Planung von Entwurf und Ausführung der Bauarbeiten, verhindert Bauverzögerungen und spart meist Zeit und Geld.

Der Baugrund, hat die Lasten des Bauwerks aufzunehmen. Als letztes Glied der lastabtragenden Bauteile kann er daher als Tragwerk angesehen werden [2]. Grundsätzlich kann der Untergrund auf dem ein Bauwerk errichtet wird, nicht so stark beansprucht werden wie das Material der Konstruktion. Um die vertikalen und horizontalen Lasten vom Fundament des Bauwerks in den Untergrund weiterzuleiten, muss der Baugrund dementsprechend tragfähig sein. Weist sich der Boden als nicht tragfähig aus und kann die Lasten nicht übernehmen, so sind Maßnahmen zu treffen. Zum einen besteht die Möglichkeit, Gründungselemente zu schaffen, welche die Bauwerkslasten auf eine größere Fläche des Baugrundes verteilen oder in tiefere tragfähige Schichten ableiten, oder es sind die vorherrschenden ungünstigen Bodeneigenschaften zu verbessern.

Die natürlichen Eigenschaften eines Bodens kann man unter mechanischen und hydraulischen bzw. hydrologischen Gesichtspunkten zusammenfassen. Tragfähigkeit, Zusammendrückbarkeit, Frostsicherheit und Witterungsbeständigkeit beschreiben die mechanischen Eigenschaften eines Bodens, Wasserdurchlässigkeit zum Beispiel die hydraulischen Eigenschaften. Verfahren die diese Eigenschaften verändern, gehören in den Bereich Bodenverfestigung und Bodenverbesserung [1].

Der Begriff der Bodenverfestigung umfasst Verfahren, die die Widerstandsfähigkeit von Böden erhöhen.

Verfahren die durch Zugabe eines Bindemittels überwiegend die Einbaufähigkeit sowie die Verdichtbarkeit verändern, lassen sich mit dem Begriff der Bodenverbesserungen beschreiben.

Mitunter werden Verfahren, die zur Stabilisierung, kontrollierter Verformung sowie zur Beeinflussung von Konsolidierungsvorgängen führen, den Verfahren der Bodenverbesserungen zugeschrieben [32].

1.2 Baugrunduntersuchung

1.2.1 Allgemeines

Wird der anstehende Boden als Zuschlagstoff herangezogen, wie es bei tiefreichenden Bodenstabilisierungsmaßnahmen üblich ist, so setzt dies eine genaue Kenntnis der Zusammensetzung des Baugrundes voraus. Um die wesentlichen Eigenschaften des Bodens ableiten zu können, stehen verschiedene Klassen (vergleiche Tabelle 2) und Methoden zu Verfügung. Generell lässt sich festhalten, dass Böden der Klassen 3 und 4 (vergleiche Tabelle 1) hauptsächlich mit dem Verfahren der tiefreichenden Bodenstabilisierung behandelt werden können. In Ausnahmefällen werden Böden der Klasse 5 bzw. 6 mittels besonderer Hybridtechniken (vergleiche Kapitel 4), z.B. Cutter Soil Mixing-Verfahren, verbessert bzw. verfestigt.

Klasse	Bezeichnung	Kenneichen
1	Mutterboden	Humus, belebter Boden
	Zwischenboden	intensiv gefärbter (z.B. dunkelgrau) Boden zwischen Oberboden (Mutterboden) und Unterboden (Mineralboden)
2	Wasserhaltiger Boden	hoher Wassergehalt, von breiiger bis fließender Beschaffenheit z.B. Schlamm
3	Leichter Boden	besteht aus nichtbindigen Sanden und Kiesen mit Korngrößen bis zu 70 mm
4	Mittelschwerer Boden	aus mittelbindigen Böden zufolge des mäßigen Tonanteils z.B. stark lehmige Sande und Kiese
5	Schwerer Boden	aus Bodenarten mit festem Zusammenhalt und zäher Beschaffenheit z.B. fetter steifer Ton, ausgetrocknete Böden der Klasse 4 mit Geschieben und Steinen über 200 mm
6	Leichter Fels, Schrämboden	locker gelagerte Gestein, das stark klüftig, bröckelig oder verwittert ist z.B. Mergelschichten mit Steinen über 200 mm
7	Schwerer Fels	besteht aus festgelagertem Gestein der Bodenklasse 6 z.B. Gesteinstrümmer über 0,1 m ³ , Findlinge

Tabelle 1: Bodenklassen nach ÖNORM B 2205 [56]

Zur Beurteilung des Baugrundes stehen verschiedene Methoden und Techniken zur Verfügung. Als Voruntersuchung dienen Schürfe, Sondierungen und Bohrungen. Schürfe werden bei geringen Erkundungstiefen wie z.B. im Strassen- und Eisenbahnbau bei oberflächennahen Schichten verwendet. Hingegen werden Sondierungen und Bohrungen zur Bestimmung von tiefliegenden Bodenschichten angewendet. Neben Untersuchungen von Bodenproben und Schichtaufbau wird unter anderem die Lage des Grundwasserspiegels

festgestellt. Mit Hilfe von Rammsondierungen kann auf die Lagerungsdichte und die Konsistenz des Bodens bzw. der Schichten geschlossen werden. Neben den bereits erwähnten Feldversuchen stehen eine Reihe von Laborversuchen zu Verfügung, um Bodenparameter zu bestimmen. Nachfolgendes Kapitel beschreibt die für die Anwendung der tiefreichenden Bodenstabilisierung notwendigen wichtigsten Bodenparameter, sowie deren Bestimmung. Diese geben Aufschluss über das anzuwendende Verfahren bzw. erste Anhaltspunkte über die Rezeptur des Bindemittels oder der Bindemittelsuspension.

Hauptgruppen	Gruppen	Kurzzeichen	Beispiele	
grobkörnige Böden	Kies	enggestufte Kiese	GE	Hangschutt, Schwemmschutt
		weitgestufte Kies-Sand-Gemische	GW	Flusskies, Flussschotter
		intermittierende gestufte Kies-Sand-Gemische	GI	
	Sand	enggestufte Sande	SE	Dünen- und Flugsand
		weitgestufte Kies-Sand-Gemische	SW	Flusssand, Strandsand
		intermittierende gestufte Kies-Sand-Gemische	SI	Grus
gemischtkörnige Böden	Kies-Schluff-Gemische	5 bis 15 Massenanteile in % $\leq 0,06$ mm	GU	Lehmiger Hangschutt, Grundmoräne,
		5 bis 40 Massenanteile in % $\leq 0,06$ mm	GU*	Pechschotter, Murenschutt
	Kies-Ton-Gemische	5 bis 15 Massenanteile in % $\leq 0,06$ mm	GT	Grundmoräne
		5 bis 40 Massenanteile in % $\leq 0,06$ mm	GT*	
	Sand-Schluff-Gemische	5 bis 15 Massenanteile in % $\leq 0,06$ mm	SU	Aulehm, Gehängelehm, Grundmoräne, Bänderschuffe, Flinz
		5 bis 40 Massenanteile in % $\leq 0,06$ mm	SU*	
	Sand-Ton-Gemische	5 bis 15 Massenanteile in % $\leq 0,06$ mm	ST	Gehängelehm, Grundmoräne, Flinz
		5 bis 40 Massenanteile in % $\leq 0,06$ mm	ST*	
feinkörnige Böden	Schluff	gering plastische Schluffe	UL	Löß, Aulehm, Stauseeschluff
		mittelplastische Schluffe	UM	Staublehm, Tegel Schlier
	Ton	gering plastische Tone	TL	Seeton, Bänder-ton
		mittelplastische Tone	TM	Schieferton, Mylonit
		ausgeprägt plastische Tone	TA	Fetter Ton, Schieferton
organogene und Böden mit organischen Beimengungen	nicht brenn- oder schwellbar	Schluffe mit organ. Beimengungen und organogene Tone	OU	Seekreide, Mutterboden
		Tone mit organ. Beimengungen und organogene Tone	OT	Schlick
		grob- bis gemischtkörnig mit Beimengungen humoser Art	OH	Mutterboden
		grob- bis gemischtkörnig mit kalkigen, kieseligen Bildungen	OK	Kalktuff, Kieselgur
organische Böden	brenn- oder schwellbar	nicht bis mäßig zersetzte Torfe	HN	Torfboden
		zersetzte Torfe	HZ	
		Faulschlamme	F	
Auffüllungen	aus natürlichen Böden (Gruppensymbol in eckigen Klammern)	[]	Müll, Bauschutt	
	aus Fremdstoffen	A		

Tabelle 2: Bodenklassifikation nach ON B 4400 [55]

1.2.2 Bodenparameter

Korngrößenverteilung

Teilchen unterschiedlicher Korngrößen bilden den Boden. Die Korngrößenverteilung gibt die prozentuellen Anteile von Ton, Schluff, Sand, Kies und Steinen in einem Boden an [50]. Einzelne Kornfraktionen werden durch Siebung und Sedimentation getrennt und in einer Sieblinie bildlich dargestellt. Aus dem Verlauf der Körnungslinie kann auf unterschiedlichste Bodeneigenschaften geschlossen werden wie z.B.

- Wasser- und Frostempfindlichkeit
- Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften
- Wasserdurchlässigkeit, Drainagefähigkeit
- Wasserhaltefähigkeit, Wasserspeicherkapazität
- Kapillare Steighöhe von Wasser

Zur Ermittlung der Korngrößenverteilung kommen im Allgemeinen zwei Verfahren zu Anwendung. Für Bodenkörner mit einem Durchmesser $> 0,125$ mm wird die Siebanalyse verwendet. Für Bodenteilchen, die einen Durchmesser $< 0,125$ mm aufweisen, ist eine Siebung nicht sinnvoll, daher wird die Schlämmanalyse angewendet [16]. Die Korngrößenverteilung gibt unter anderem Aufschluss über das anzuwendende Bindemittel sowie deren Menge, die in Abhängigkeit der Anforderungen an die Stabilisierungsmaßnahme eingebracht werden muss.

Wassergehalt

Der Wassergehalt einer Bodenprobe ist das Verhältnis der Masse des Wassers in der Bodenprobe zur Masse der trockenen Bodenprobe [50]. Mit Hilfe des ermittelten Wassergehaltes ist es möglich, ein Lockergestein bezüglich seiner Zustandsformen allgemein zu charakterisieren. Durch die Zustandsformen des Materials kann man auf die Verdichtbarkeit eines Baugrundes schließen. Der Wassergehalt spielt auch eine große Rolle bei der Tragfähigkeit bindiger Böden, da diese mit dem Wassergehalt korreliert und unter anderem das Bindemittel auf den vorherrschenden Wassergehalt abgestimmt werden muss. Bei bindigen Böden lässt sich Wasser jedoch nur sehr schwer aus den Bodenporen pressen, was dazu führt, dass sich der Boden praktisch nicht verdichten lässt. Bei wassergesättigten Böden findet eine Verdichtung bzw. eine Verfestigung nur durch Konsolidation statt [50]. Viele Stabilisierungsmaßnahmen weisen auch eine Drainagewirkung auf, so dass die Konsolidation damit beschleunigt werden kann.

Zustandsformen – Zustandsgrenzen nach Atterberg

Die Zustandsgrenzen ändern sich bei bindigen Böden mit dem Wassergehalt. Sie sind bei hohem Wassergehalt breiig und gehen mit abnehmendem Wassergehalt in plastische und schließlich in halbfeste Zustandsformen über. Die Zustandsgrenzen sind ein Maß für die Plastizität des Bodens und die Plastizitätszahl ist ein Maß für seine Empfindlichkeit gegenüber Änderungen des Wassergehaltes [50]. Feinkörnige Lockergesteine zeigen bei Änderungen des Wassergehaltes starke Änderungen der Konsistenz. Trockene, folglich feste und halbfeste Lockergesteine weisen einen starken inneren Zusammenhalt auf. Die innere Festigkeit nimmt aber mit steigendem Wassergehalt ab und geht dann in den plastischen Bereich über. Bei sehr hohem Wassergehalt kann im Korngemisch die innere Festigkeit völlig verloren gehen und das Bodenmaterial verhält sich dann ähnlich einer Flüssigkeit. Die Fließgrenze ist der Wassergehalt am definierten Übergang von der flüssigen zur bildsamen Zustandsform. An der Ausrollgrenze geht der bildsame Boden in den halbfesten Zustand und schließlich an der Schrumpfgrenze in die feste Zustandsform über [50]. Diese Zustandsgrenzen dienen wie bereits erwähnt, als Grundlage zur Festlegung der Bindemittelrezeptur.

Wasserdurchlässigkeit

Der Durchlässigkeitsbeiwert beschreibt das Verhalten eines Bodens bezüglich seiner Wasserdurchlässigkeit. Das ist die Geschwindigkeit, mit der das Wasser den Boden durchsickert [50].

Im Laborversuch mit fallender Druckhöhe sickert das Wasser aus einem wassergefüllten Standrohr durch die Bodenprobe, die sich in einem Versuchszylinder befindet. Aus dem Absinken des Wasserspiegels im Standrohr und der dazu benötigten Zeit wird der Durchlässigkeitsbeiwert bestimmt [50]. Bedeutend ist die Wasserdurchlässigkeit z.B. bei der Wasserhaltung, Wassergewinnung, Konsolidierung und bei Zeitsetzungsfragen.

Glühverlust

Als letzter im Labor nachzuweisenden Parameter wird der Glühverlust eines Bodens kurz beschrieben. Dieser Parameter stellt einen Massenverlust, den der Boden erfährt, wenn er bis zum Glühen erhitzt wird, dar. Im Laborversuch wird die Probe im Muffelofen bei 550 °C bis zur Massenkonzanz geglüht. Die Massendifferenz zwischen der getrockneten Probe und der geglühten Probe gibt den Glühverlust an [16].

Der Glühverlust ist deshalb bedeutend, da dieser annähernd dem Anteil organischer Substanzen entspricht. Da organische Substanzen eine sehr hohe Wasseraufnahmefähigkeit haben, wirken sich schon geringe Beimengungen deutlich auf das mechanische Verhalten aus, besonders bei bindigen Böden. Ab organischen Beimengungen größer als 20 Gew.% handelt es sich um hochorganische Böden, die für Gründungszwecke meist ungeeignet sind [50].

1.3 Mechanische Bodenverbesserung

Verfahren, die auf mechanischem Weg die Eigenschaften des Bodens verbessern, lassen sich nach den heute üblichen Techniken in der unten anstehenden Abbildung (siehe Abbildung 1) zusammenfassen.

Bei der mechanischen Bodenverbesserung werden natürliche Parameter des Bodens, wie Scherwinkel φ und Kohäsion c , erhöht. Dabei wird bei grobkörnigen Böden die Scherfestigkeit durch Erhöhung der Lagerungsdichte erreicht. In gemischt oder feinkörnigen Böden ist für die Anhebung der Scherfestigkeit zur Erhöhung der Lagerungsdichte der Einbau von Stützkörnern notwendig.

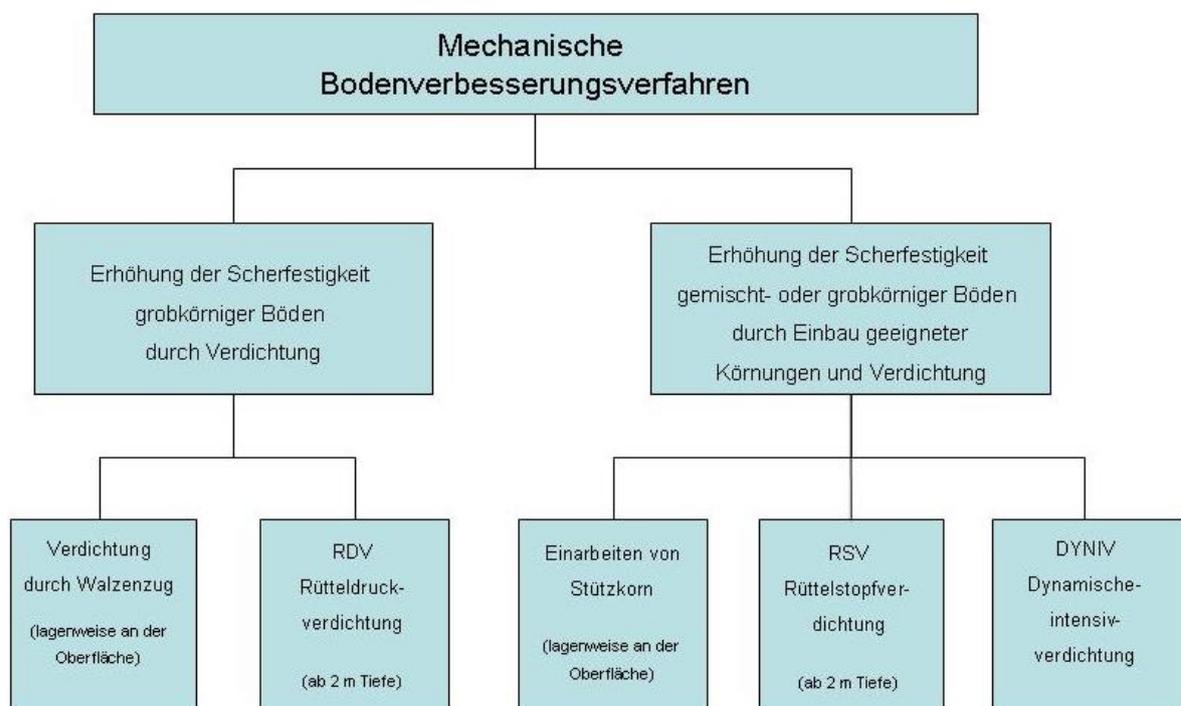


Abbildung 1: Übersicht der mechanischen Bodenverbesserungsverfahren [32]

1.3.1 Verdichtung durch Walzenzug

Als Verdichten bezeichnet man eine Verringerung des Porengehalts des Korngerüsts. Dies führt zu einem Anstieg der Scherfestigkeit und damit des Reibungswinkels, sowie zur Zunahme des Steifemoduls.

Bei der Oberflächenverdichtung erfolgt die Bodenverdichtung beginnend an der Oberfläche zum Beispiel Flachrüttlern, Vibrationswalzen, Explosionsstampfern, oder Fallplatten. Die Tiefenwirkung ist gering, sodass diese Art der Verdichtung hauptsächlich im Erd- und Straßenbau für lagenweise eingebaute Schüttungen Anwendung findet.

Die Wirkung dieser Verdichtungsgeräte kann in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- Statisch wirkende Druckverdichtungsgeräte und
- Dynamisch wirkende Impuls- und Vibrationsverdichtungsgeräte

Bei statisch wirkenden Verdichtungsgeräten erfolgt die Verdichtung ruhender Lasten, also eine Druckverdichtung. Eine Verdichtung verringert den Wasser- und Luftgehalt des Porenraumes eines Bodens. Die dadurch entstehende dichtere und stabilere Lagerung des Korngerüsts erhöht, wie bereits oben erwähnt, die Scherfestigkeit des Bodens. Die Verdichtbarkeit hängt von einigen Faktoren ab, wie der Bodenart, des Wassergehalts sowie von der Verformbarkeit des Bodens [6].

Dynamisch wirkende Verdichtungsgeräte belasten den zu behandelnden Boden durch eine bewegte Masse stoß- und impulsartig. Dadurch wird der Untergrund in Schwingung versetzt und es kommt im Korngefüge zu einer dichteren Lagerung der Körner.

Durch die Verbindung von statischer und dynamischer Verdichtung können solche Walzenzüge nahezu für alle Bodenarten eingesetzt werden [6].

1.3.2 Rütteldruckverfahren

Durch Vibrationen eines Tiefenrüttlers wird das Porenvolumen des anstehenden Bodens verringert. Der Rüttler wird unter Wasserzugabe an seiner Spitze bis in die gewünschte Tiefe abgetaucht. Danach erfolgt ein stufenweises Ziehen des Rüttlers. Eine damit verbundene Verdichtung des umliegenden Bodens lässt dabei eine zylindrische Bodensäule entstehen.

Die Tragfähigkeit des anstehenden Baugrundes hängt vom Bodenaufbau ab und kann durch die Geometrie der Rüttelsäulen beeinflusst werden.

Die Reichweite der Verdichtung beträgt 1,5 m bis 3 m, sodass Flächen bis zu 9 m² je Ansatzpunkt verdichtet werden können [7], [8].

1.3.3 Rüttelstopfverfahren

Die Grenzen des Rütteldruckverfahrens sind erreicht, wenn der Boden einen Feinkornanteil von mehr als 10% bis 15% aufweist. Wegen der Kohäsion kann durch Schwingungsimpulse keine Umlagerung mehr stattfinden. Bei solchen bodenmechanischen Gegebenheiten wird dann das Rüttelstopfverfahren angewendet. Dabei taucht der Rüttler bis in die vorgesehene Tiefe ab und der dabei entstehende Hohlraum im Boden wird beim Ziehvorgang mit Schotter und Kiesmaterial verfüllt und gleichzeitig verdichtet. Die erzeugten

Schottersäulen verringern die Zusammendrückbarkeit des Bodens bei gleichzeitiger Anhebung der Scherfestigkeit.

Hervorzuheben ist, dass bei bindigen Böden durch den Einbau von Schottersäulen eine Drainagewirkung erzielt wird, die ein rascheres Setzungsverhalten forciert [7], [8].

1.3.4 Dynamische Intensivverdichtung

Bei der dynamischen Intensivverdichtung wird über einen Spezialkran ein Fallgewicht mit einer Masse von 10 bis 40 Tonnen aus einer Höhe von 10 bis 40 m frei fallengelassen. Die durch den Aufschlag auf den Boden erzeugten Schockwellen erreichen hohe Eindringtiefen (10 bis 30 m) und führen zu einer intensiven Verdichtung des Bodens.

Hierbei ist es erforderlich, zwischen bindigen und rolligen Böden zu unterscheiden.

Wie bei allen Verdichtungsverfahren ist der Wassergehalt des Bodens ein wesentlicher Aspekt, wie der Proctorversuch beweist.

Im Gegensatz zu bindigen Böden tritt der Verdichtungseffekt bei rolligen Böden sofort nach dem Auftreffen des Fallgewichts auf den Boden ein. Dies bewirkt eine Erhöhung der Tragfähigkeit und des Steifemoduls.

Bei bindigen Böden steigt nach dem Auftreffen des Gewichts der Porenwasserdruck im Boden bis hin zur Bodenverflüssigung an. Der dabei resultierende hydrostatische Spannungszustand geht mit einer Entfestigung der Bodenstruktur einher.

Durch die im Boden entstandenen Risse kann nun das Porenwasser abströmen, und der Porenwasserdruck nimmt ab. Die Tragfähigkeit des Bodens nimmt erst nach einer gewissen Zeit zu, da erst nach dem Abströmen des Wassers der Konsolidierungsvorgang abgeschlossen ist [7], [8].

1.4 Bodenverbesserung mit Bindemitteln

Techniken der Bodenverbesserungen mit Bindemitteln können nach folgender schematischer Einteilung (siehe Abbildung 2) je nach Art der Einbringung unterschieden werden.

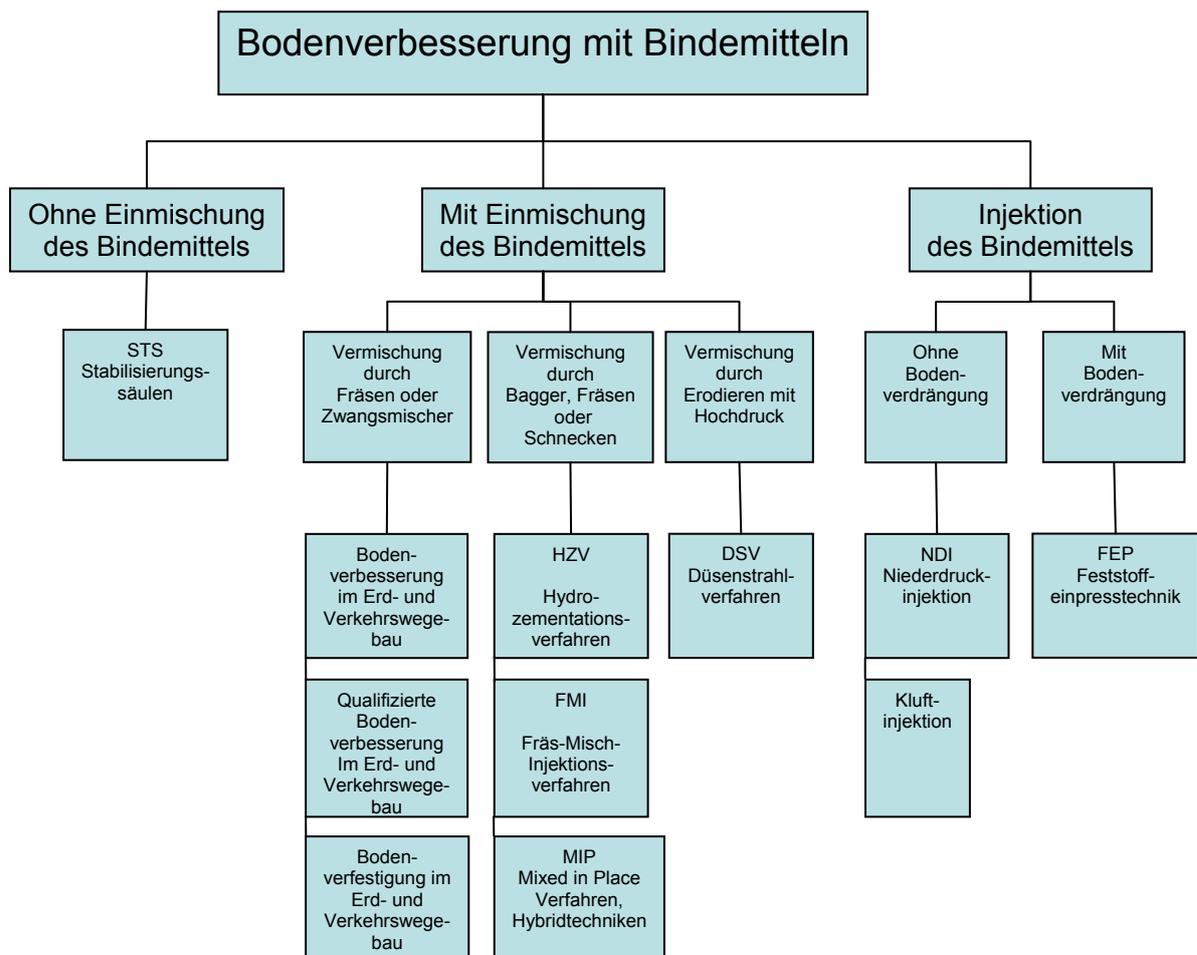


Abbildung 2: Übersicht der Bodenverbesserungsverfahren mit Bindemitteln [32]

In den folgenden Kapiteln werden die in Abbildung 2 dargestellten Verfahren kurz erläutert. Verfahren wie das Mixed in Place-Verfahren (siehe Kapitel 3.1), Hybridtechniken (siehe Kapitel 4) sowie Fräsmischinjektionsverfahren werden später gesondert und detailliert in dieser Arbeit vorgestellt und analysiert.

1.4.1 STS - Stabilisierungssäulen

Stabilisierungssäulen werden im Verdrängungsverfahren in den Untergrund eingebracht. Man unterscheidet zwei Typen von STS-Säulen. STS Typ A sind Pfähle aus einem Trockengemisch von Weißkalk und Sand. STS Typ B werden aus Zement und Sand hergestellt. Typische Säulendurchmesser liegen bei 0,1 m bis 0,2 m und werden ca. 7 m bis 11 m tief in den Boden eingebaut. Dieses Verfahren eignet sich bei bindigen Böden mit gemischten bis feinkörnigen Anteilen. Für die Anwendung bei organischen Böden sowie dünnen Sandschichten ist dieses Verfahren nur bedingt geeignet. Grobkörnige, nicht bindige Böden sowie veränderliche Festgesteine oder Fels eignen sich für diese Technik nicht [7], [8].

1.4.2 Bodenverbesserung, qualifizierte Bodenverbesserung bzw. Bodenverfestigung im Erd- und Straßenbau

Siehe Kapitel 6

1.4.3 Hydrozementationsverfahren

Mittels eines Baggers wird ein Schürf ausgehoben. In diesen Schürf wird eine Zementsuspension eingelassen. Gleichzeitig wird das zuvor ausgehobene Material wieder in den Schürf zurückgeschaufelt und mit der Zementsuspension vermischt.

Die Tiefe der Schürfe ist vom Ausleger des eingesetzten Baggers abhängig. Im Allgemeinen kann man von Schürftiefen bis zu 7 m ausgehen. Die Breite des Schlitzes variiert nach den Anforderungen, wird aber bis zu 2 m ausgeführt. Diese Technik findet bei der Herstellung von Stützkörpern und Stabilisierung von rutschgefährdeten Böschungen sowie zur Errichtung von Schwergewichtsmauern Anwendung.

Das Verfahren ist bei nahezu allen bindigen sowie nicht bindigen Böden anwendbar, bei mächtigen organischen Schichten z.B. Torf kann diese Technik nicht eingesetzt werden [33].

1.4.4 Düsenstrahlverfahren

Dieses Verdrängungsverfahren löst mit einem Schneidstrahl das Gefüge des anstehenden Bodens und durchmischt ihn mit einer Zementsuspension. Mit einem Spezialgestänge wird zunächst durch ein sogenanntes Spühlbohrverfahren abgebohrt. Nach dem Erreichen der Endtiefe wird vom Spühlbohrbetrieb zum Injektionsbetrieb umgeschaltet und das Gestänge langsam gezogen ($v=5$ cm/min bis 50 cm/min) [43].

Am Ende des Bohrgestänges befindet sich der Monitor, der als Schneidwerkzeug dient und mit Öffnungsventilen ausgestattet ist. Durch diese Öffnungsventile tritt der Schneidstrahl mit hoher Geschwindigkeit, ca. 200 m/s, aus [43]. Dadurch wird beim Abbohren der Boden gelöst und mit Zementsuspension durchmischt. Eine gleichmäßige Drehbewegung beim Ziehvorgang erzeugt einen homogenen Säulenkörper aus einem Gemisch von Zementsuspension und Boden.

Anwendung findet dieses Verfahren zum Beispiel bei der Herstellung von Dichtwänden, Sohlenabdichtung, Baugrubensicherung. DSV-Körper können in fast allen Böden hergestellt werden, lediglich bei hohen Anteilen von organischem Material sowie Fels stößt diese Technik an ihre Grenzen.

1.4.5 Niederdruckinjektion

Unter Niederdruckinjektion versteht man das Verfüllen von Hohlräumen (Poren, Rissen, Spalten...) im Baugrund mit wässrigen Mischungen oder Harzen. Ein Injektionsrohr wird zunächst durch Bohren oder Rütteln in den Boden eingebracht. Durch eine Sperrflüssigkeit (Mantelmischung) wird die Bohremulsion verdrängt [42]. Nach dem Einstellen der Ventilrohre und dem Aushärten des Sperrmittels werden die Packer gesetzt. Nun wird von unten nach oben angefahren und das Injektionsgut mit bestimmtem Druck und bestimmter Menge in den anstehenden Boden eingepresst. Zum Anwendungsbereich zählen Dichtungssohlen für Baugruben sowie Baugrundverbesserungen in rolligen Böden.

Gut geeignet für diese Technik sind gewachsene grobkörnige bis feinsandige Böden. Hingegen eignen sich Festgesteine beziehungsweise Fels oder organische Böden für dieses Verfahren nicht [7], [8].

1.4.6 Kluftinjektion

Dieses System dient zur Vergütung von Klüften, Fugen und Spalten im Festgestein. Nach dem Abteufen eines Bohrloches wird über einem vorher festgelegten Bereich, der über Packer getrennt wird, Injektionsgut mit einem bestimmten Druck in den Boden eingepresst. Der entstehende Injektionskörper ist von der Form des Hohlraums, der vergütet werden soll, abhängig. Ungeeignet sind Böden mit ausgeprägten Verwitterungszonen [7], [8].

1.4.7 Bodenaufsprenginjektion

Bei diesem Verfahren werden unter Druck Fließwege im Boden geöffnet, sogenannte „Frac“s. Über Manschettenrohre mit Ventilen kann das Bindemittel in den umliegenden Boden eindringen und erhärten. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt und das Bindemittel wird über Ventile an gleicher Stelle eingepresst. Damit wird der Boden vorgepresst, verbessert oder Hebungen werden erzwungen.

Zum Einsatz kommt diese Technik zum Beispiel im Tunnelbau zu Herstellung von horizontalen Injektionsschirmen. Das Verfahren kann bei nahezu allen gewachsenen bis hin zu grobkiesigen Böden eingesetzt werden [7], [8].

2 Tiefreichende Bodenstabilisierung

2.1 Einleitung

Der Zweck einer tiefreichenden Bodenstabilisierung besteht darin, die Bodeneigenschaften wie Scherfestigkeit, Zusammendrückbarkeit beziehungsweise die Durchlässigkeit des Baugrunds zu verbessern. Positive Erfahrungen, besonders in Hinblick auf Rentabilität der verschiedenen Systeme sowie die wissenschaftliche Erforschung der chemischen Reaktionen im Boden forcieren eine laufende Verbesserung der Verfahren. Die Schwierigkeit einer in-situ Behandlung des Bodens besteht darin, dass diese eine permanente Überwachung des Mischprozesses im Boden bedarf. Weiters gestaltet es sich durch unterschiedliche geologische Eigenschaften des Baugrundes schwierig, eine Vorhersage über die Rheologie der Bindemittel-Boden-Mischung zu treffen. Aufwendig ist die Qualitätsprüfung der Mischverfahren. So kann aus vorangegangenen Tests und Prüfungen (vergleiche Kapitel 5) der Festigkeit und Deformierbarkeit von Probekörpern im Labor, nicht eindeutig auf die im Feld erzeugten Mischkörper geschlossen werden. Aus diesem Grund sind zusätzliche Prüfungen und Tests wie zum Beispiel Kernbohrungen, Sondierungen, Ankerausziehversuche, geophysikalische Tests usw. notwendig.

Die Verbesserung der Bodeneigenschaften beruht auf Ionenaustauschvorgängen an der Oberfläche von Tonmineralen durch Bindung von Bodenbestandteilen und/oder durch Ausfüllen von Hohlräumen mit den Produkten chemischer Reaktionen.

Die Entwicklung der tiefreichenden Bodenstabilisierung lässt sich bis in die 50er Jahre des 20. Jahrhunderts zurückverfolgen. In den USA wurde mittels Bohrschnecke und beigemengtem Bindemittel erstmals versucht, Böden zu verbessern. Bis 1970 wurde diese Art von Verfahren in den USA langsam weiterentwickelt. Dennoch ist festzuhalten, dass derartige Verfahren der Bodenstabilisierung, wie sie heute zu Anwendung kommen, ihren Ursprung in Japan und Schweden finden.

Mitte der siebziger Jahre wurden auf einem Kongress zwei Publikationen, die sich unabhängig voneinander mit der Deep Mixing Method beschäftigten, vorgestellt. Diese Publikationen befassten sich damit, ungelöschten Kalk in Böden einzumischen, um die Setzungseigenschaften von weichem plastischen Ton zu verbessern, dem sogenannten Trockenmischverfahren „Dry Mixing Method“ oder Trockeneinmischtechnik (vergleiche Kapitel 2.2). Diese Trockenmischverfahren entwickelten sich in diesen Ländern autark weiter und werden in der Literatur als japanische und nordische Technik unterschieden. Gleich-

zeitig begann man in Japan mit der Anwendung des Nassmischverfahrens „Wet Mixing Method“ (vergleiche Kapitel 2.3). Im Mittelpunkt des Entscheidungsprozesses stand dabei, unter Verwendung von Zementsuspensionen Meeresböden zu verbessern [15]. Von Japan und Skandinavien ausgehend erobern derzeit unterschiedlichste Stabilisierungsverfahren die Bauindustrie. Neben laufender Optimierung der Verfahrenstechnik werden auch die Eigenschaften der Bindemittel erweitert und verbessert. So finden sich in jüngerer Zeit Kalk, Gips, Schlacke und Flugasche in Kombination mit Zement im Bindemittel. Dadurch erfolgt eine stetige Erweiterung des Anwendungsspektrums (siehe Abbildung 3) der Tiefreichenden Bodenstabilisierung von Sanierungen und Abdichtungen bis hin zur Sicherung von kontaminierten Bereichen. Diese Techniken genießen auch die Aufmerksamkeit der Bauwirtschaft, da der anstehende Boden großteils als Baustoff genutzt wird. Damit werden die Kosten beim Zement reduziert und kostspielige Entsorgungskosten und Aufbereitungskosten verringert. Unter Berücksichtigung dieser Argumente gewinnen diese Verfahren auch aus ökologischer Sicht immer mehr an Bedeutung.

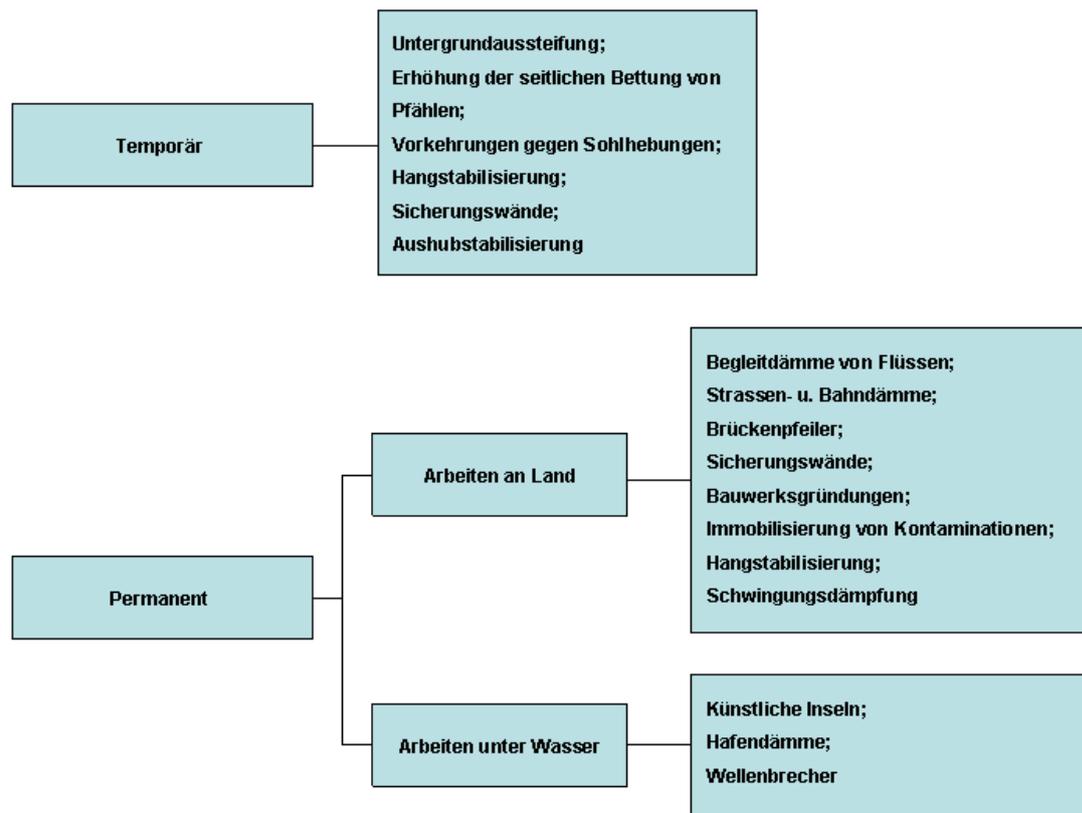


Abbildung 3: Anwendungsmöglichkeiten der tiefreichenden Bodenstabilisierung [3]

In den letzten Jahren wurden von führenden Spezialtiefbauunternehmen verschiedene Verfahren (siehe Abbildung 4) mit der Tiefreichenden Bodenstabilisierung kombiniert, wie z.B. das Düsenstrahlverfahren und Systeme aus der Schlitzwandtechnik. Diese Kombinationen werden unter dem Begriff Hybridtechniken (vergleiche Kapitel 4) zusammengefasst.

Im Februar 2000 wurde eine Expertengruppe aus neun europäischen Ländern mit der Arbeit beauftragt, eine Norm zu den neu verwendeten Verfahren zu erstellen. Daraus entstand die heute anzuwendende Fachnorm EN 14679 „Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Tiefreichende Bodenstabilisierung“.

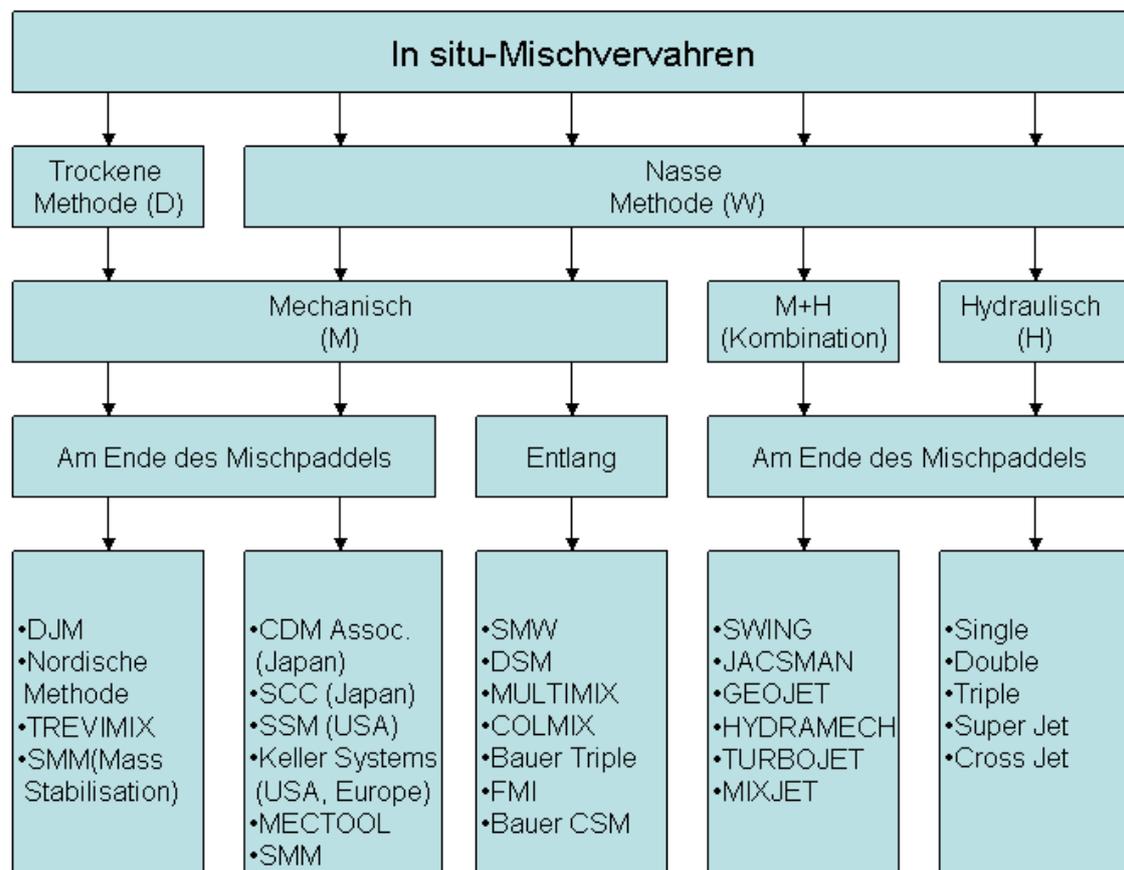


Abbildung 4: Überblick über die heute verwendeten In-situ-Mischverfahren [27]

2.2 Trockenmischverfahren

Beim Trockenmischverfahren wird ein Bindemittel, meist eine Kombination aus Zement, ungelöschtem Kalk und je nach Anforderung auch Gips, Hochofenschlacke und pulverisierter Flugasche (PFA) verwendet. Mithilfe von Druckluft wird das Bindemittel eingeblasen und durch das Mischwerkzeug mit dem Boden „verrührt“. Die Bodenfeuchtigkeit sollte hier mindestens 20% betragen [3].

Besonders gut eignet sich dieses Verfahren bei bindigen Böden. Es findet bei schwach bindigen Böden, oder bei nicht bindigen Böden zur Vorbeugung von Bodenverflüssigung Anwendung. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, unterscheidet man beim Trockenmischverfahren die nordische und die japanische Technik. Die prinzipielle Ausführung eines Trockenmischverfahrens „Dry Method“ ist in Abbildung 5 zusammenfassend dargestellt.

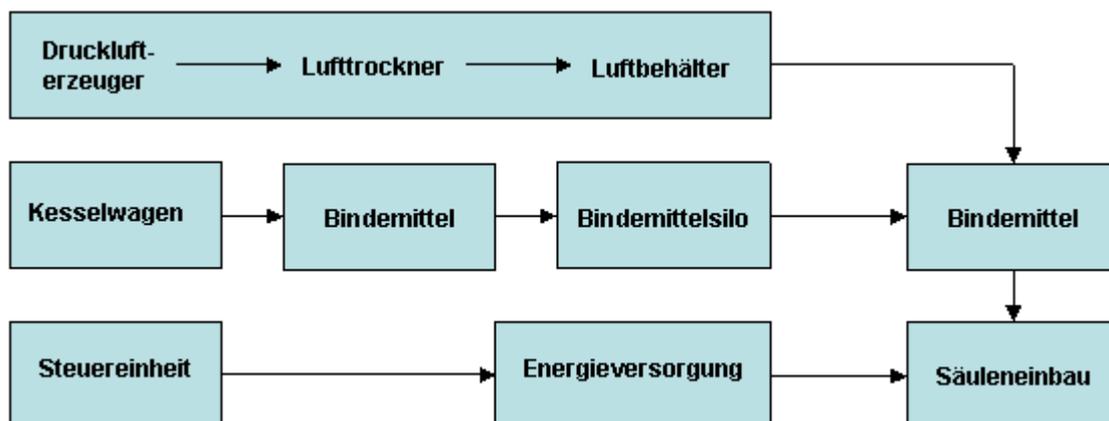


Abbildung 5: Flussdiagramm für die Ausführung der Trockenmischverfahren [3]

2.2.1 Nordische Technik

Mit der Ausrüstung der nordischen Technik ist es möglich, Säulen mit einem Durchmesser zwischen 60 cm bis 100 cm bis zu einer Tiefe von ca. 25 m herzustellen. Dabei können die Säulen bis zu einer Neigung von 70° gegen die Vertikale abgebohrt werden [3].

Typisch für die nordische Technik ist neben dem Verfahren das Mischwerkzeug. Abbildung 6 zeigt drei charakteristische Beispiele für nordische Mischwerkzeuge. Kennzeichnend ist die Lage der Öffnung für das Bindemittel. Diese Öffnung befindet sich meist ca. 40 cm oberhalb der Bohrer Spitze. Durch diese Öffnung wird das Bindemittel unter Druck-

luft in den Boden eingeblasen. Zum Unterschied zur japanischen Methode wird bei der nordischen Technik das Bindemittel erst beim Ziehvorgang in den anstehenden Boden abgegeben. Grund dafür ist, dass bindige nordische Böden meist eine hohe Wassersättigung aufweisen, sodass beim Einbringen des Bindemittels beim Abbohrvorgang bereits eine chemische Reaktion stattfindet und das Ziehen des Mixers mit hohem Energieaufwand und der damit verbunden nötigen Geräteleistung einhergehen würde.

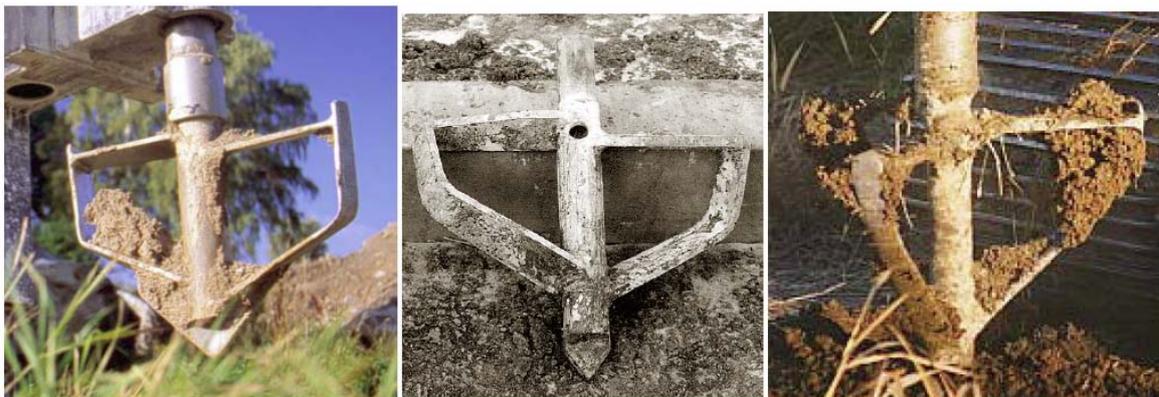


Abbildung 6: Drei Beispiele üblicher nordischer Mischwerkzeuge [24]

2.2.2 Japanische Technik

Die japanische Trockenmischtechnik kommt in mehreren Variationen vor. So kann beispielsweise die Mischwelle einfach oder doppelt ausgeführt sein. Abbildung 7 zeigt exemplarisch ein japanisches Mischwerkzeug, einfach ausgeführt. Im Gegensatz zur nordischen Technik wird hier das Bindemittel über und unter den Mischflügeln ausgestoßen. Durch diese Anordnung der Öffnungen für das Bindemittel ist es im Gegensatz zur nordischen Technik möglich, dass sowohl beim Abbohren als auch beim Ziehvorgang Bindemittel in den anstehenden Boden eingeblasen werden kann. Zusätzlich weisen japanische Mischwerkzeuge starre Flügel (*anti rotating blades*) auf, die ein Mitrotieren des an den Mischerpaddeln oft haftenden Bodens verhindern sollen, um die Qualität des Mischkörpers nicht negativ zu beeinflussen [14]. Diese Besonderheit der nicht rotierenden Paddel wurde auch in Mitteleuropa aufgegriffen und findet bei annähernd allen Mischwerkzeugen Anwendung.



Abbildung 7: Japanisches Standardmischwerkzeug [24]

2.2.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich beide Techniken nahezu unabhängig von einander entwickelt haben. Die Geometrie des Mischwerkzeuges wurde noch nicht ausreichend erforscht, dennoch lässt sich sagen, dass die Geometrie einen wesentlichen Teil zur erfolgreichen Bodenstabilisierung beiträgt [14]. Einzelne Unternehmen entwickeln mit Erfahrungswerten laufend ihre Mischwerkzeuge weiter.

Wie aus Tabelle 3 zu entnehmen ist, lassen derzeit japanische Techniken höhere Behandlungstiefen zu, das ist einerseits auf die Größe der Bohrgeräte zurückzuführen, andererseits auf die Notwendigkeit der Abbohrtiefe. In Skandinavien reicht es meist aus, bis 25 m abzu bohren, um auf tragfähige Schichten zu stoßen. Der Unterschied bezüglich des Injektionsdrucks beruht auf der Tatsache, dass es die geologischen Eigenschaften in nordischen Ländern erfordern, mit Drücken bis zu 800 kPa zu arbeiten um den Boden pneumatisch aufzulockern. Jedoch können zu hohe Injektionsdrücke einen pneumatischen Bruch außerhalb der Säule verursachen. Weiters unterscheidet sich die nordische von der japanischen Technik darin, dass bei nordischen Trockenmischverfahren das Bindemittel erst beim Ziehvorgang in den aufgelockerten Boden eingeblasen wird. Es wird damit verhindert, dass eine chemische Reaktion schon während des Abbohrvorgangs eingeleitet wird und beim Ziehen eine ausreichende Homogenität nicht gewährleistet werden kann sowie mit hohem Energieaufwand verbunden ist.

Ausrüstung	Details	Nordische Technik	Japanische Technik
Mischgerät	Anzahl der Mischwellen	1	1 bis 2
	Durchmesser des Mischwerkzeugs	0,4 m bis 1,0 m	0,8 m bis 1,3 m
	maximale Behandlungstiefe	ca. 25 m	ca. 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
Dosieranlage	Einbringungsleistung	50 kg/min bis 300 kg/min	50 kg/min bis 200 kg/min

Tabelle 3: Vergleich nordischer und japanischer Trockenmischtechnik [3]

Mischgerät	Nordische Technik	Japanische Technik
Abbohrgeschwindigkeit der Mischwelle	2,0 m/min bis 6,0 m/min	1,0 m/min bis 2,0 m/min
Ziehgeschwindigkeit der Mischwelle	1,5 m/min bis 6,0 m/min	0,7 m/min bis 0,9 m/min
Umdrehungsgeschwindigkeit der Mischflügel	100 U/min bis 200 U/min	24 U/min bis 64 U/min
Umdrehungsindex der Mischflügel	150 je m bis 500 je m	≥ 274 je m
eingebraachte Bindemittelmenge	100 kg/m ³ bis 250 kg/m ³	100 kg/m ³ bis 300 kg/m ³
Ziehrate/Abbohrrate	10 mm/U bis 30 mm/U	10 mm/U bis 35mm/U
Injektionsphase	meist während des Rückziehens	Abbohren und/oder Rückziehen

Tabelle 4: Typische Ausführungsparameter der nordischen und der japanischen Trockenmischtechnik [3]

In vielen theoretischen und praktischen Studien wurde versucht, eine Beziehung zwischen den typischen Mischparametern und der Qualität des stabilisierten Bodens aufzustellen. Der Grad der Vermischung und das Bindemittel beschreiben mitunter die wichtigsten Parameter bei der Bodenstabilisierung. Eine Studie in Japan untersuchte den Zusammenhang zwischen Anzahl der Mischflügel auf der Mischwelle, Abbohr- und Ziehgeschwindigkeit, sowie die Umdrehungszahl der Mischwelle [15]. Diese leicht erfassbaren Parameter wurden zum Umdrehungsindex zusammengefasst. Unter dem Umdrehungsindex (Gl. 1) der Mischflügel versteht man die Gesamtanzahl der Mischflügeldurchgänge, die während einer Wellenbewegung über 1 m stattfinden [3].

$$T = \sum M \times \left(\frac{N_d}{V_d} + \frac{N_u}{V_u} \right) \quad [\text{Gl. 1}]$$

T Umdrehungsindex [1]

$\sum M$ Gesamtanzahl der Mischflügel [1]

N_d Umdrehungsgeschwindigkeit der Flügel während des Abbohrens [U/min]

V_d Bohrgeschwindigkeit der Mischflügel [m/min]

N_u Umdrehungsgeschwindigkeit der Flügel während des Rückziehens [U/min]

V_u Geschwindigkeit der Mischflügel beim Rückziehen [m/min]

Wird beim Abbohren kein Bindemittel in den Boden eingebracht, so wird $N_d = 0$ gesetzt.

Es versteht sich, dass Gl. 1 nur bei Nass- oder Trockenmischwerkzeugen mit rotierenden Mischflügeln verwendbar ist und der Umdrehungsindex für Schneckenbohrer daraus nicht abgeleitet werden kann. Aus dem Umdrehungsindex kann so die Qualität des Mischungsergebnisses berechnet werden. Dieser Parameter ist abhängig von der Bodenbeschaffenheit, daher kann der Umdrehungsindex von nordischen und japanischen Techniken nur bei ähnlichen Bodenverhältnissen verglichen werden. Nordische Techniken arbeiten mit höheren Umdrehungs- und Ziehgeschwindigkeiten, japanische Verfahren arbeiten mit geringeren Umdrehungsgeschwindigkeiten, dafür aber auch mit geringerer Ziehgeschwindigkeit. Aus diesem Zusammenhang kann man schließen, dass bei ähnlichen Bodenverhältnissen und Anwendung analoger Mischwerkzeuge auf gleichartige Umdrehungsindizes geschlossen werden kann. In Tabelle 4 sind typische Umdrehungsindizes der jeweiligen Methoden angeführt. Je nach Wahl des Bindemittels stellt sich so ein optimaler Verbesserungseffekt des stabilisierten Bodenkörpers ein.

Bindemittel werden je nach vorkommenden Bodenverhältnissen gewählt. Tabelle 5 zeigt grundsätzliche Anwendungsmöglichkeiten von Bindemitteln sowie Bindemittelkombinationen nach Bodenarten. Es ist jedoch festzuhalten, dass vor jeder Stabilisierungsmaßnahme eine gesonderte Eignungsprüfung der verwendeten Bindemittel beziehungsweise deren Kombinationen zur Qualitätssicherung nötig ist. Die Wirkungsweise und Zusammensetzung verschiedener Bindemittel bzw. Bindemittelsuspensionen werden im Kapitel 2.4.4 näher erläutert.

Bodenart	Geeignetes Bindemittel
Ton	Kalk oder Kalk/Zement
Quickton	Kalk oder Kalk/Zement
Organischer Ton und Mudde ¹	Kalk/Zement oder Zement/körnige Hochofenschlacke oder Kalk/Gips
Torf	Zement oder Zement/körnige Hochofenschlacke oder Kalk/Gips/Zement
Sulfatböden	Zement oder Zement/körnige Hochofenschlacke
Schluff	Kalk/Zement oder Zement

Tabelle 5: Für das Trockenmischverfahren üblicherweise verwendete Bindemittel [3]

¹ Sedimente, die in Seen abgelagert werden und einen Anteil an organischen Bestandteilen von mehr als 5% aufweisen. Sie werden oft als Seeschlamm bezeichnet [62].

2.3 Nassmischverfahren

Beim Nassmischverfahren wird üblicherweise eine Zementsuspension mit Füllern wie z.B. Sand verwendet. Die praktische Ausführung der Nassmischtechnik ist strukturell in Abbildung 10 veranschaulicht. Im Gegensatz zur Trockenmischtechnik sind Nassmischtechniken bezüglich ihrer Ausführung und Baustelleneinrichtung aufwendiger, da die Größe der eingesetzten Maschinen und die Anzahl der Komponenten der Mischanlage größer sind. Mischwerkzeuge, die als Schnecken ausgeführt sind, werden überwiegend bei nicht bindigen bzw. rolligen Böden eingesetzt. Bei bindigen Böden mit feinen Kornanteilen ist der Mischer meist mit Paddeln oder Flügeln ausgeführt, um die Bodenmatrix besser aufbrechen zu können. Beim Nassmischverfahren entsteht eine mörtelähnliche Mischung, deren Festigkeit und Durchlässigkeit von Bodenverhältnissen und Suspensionsmittel bzw. Suspensionszugabe abhängt.

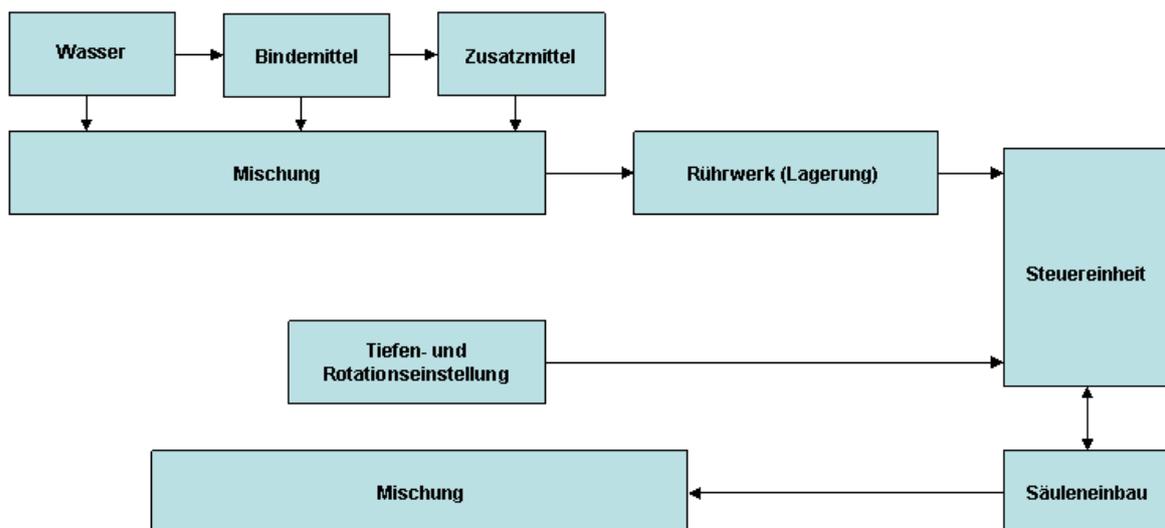


Abbildung 8: Flussdiagramm für die Ausführung von Nassmischverfahren [3]

Unter bestimmten Bedingungen ist es möglich, den Mischvorgang bei Nassmischverfahren zu unterbrechen und später fortzusetzen. Zum einen schreibt die EN 14679 vor, dass der bereits behandelte Boden noch nicht vollständig ausgehärtet sein darf, und zum anderen muss beim Fortsetzen das Mischwerkzeug mindestens 0,5 m innerhalb des bereits stabilisierten Erdkörpers mit dem Mischen wieder begonnen werden [3].

2.3.1 Europäische Techniken

Nassmischtechniken werden in Europa immer öfter als Alternative zu Schlitzwänden, Dichtwänden und Pfählen als Gründungselemente angewendet. Je nach vorkommenden Bodenverhältnissen werden verschiedene Rezepturen für Bindemittelsuspensionen herangezogen. Als Mischwerkzeug werden meist fortlaufende Bohrschnecken oder Mischpaddel (siehe Abbildung 9) verwendet, die einzeln für Mischpfähle oder in Gruppen für Wandkonstruktionenselemente, welche auch mit statischer Wirkung hergestellt werden, zum Einsatz kommen. Zur Ausführung von statisch wirkenden Elementen besteht die Möglichkeit des Einbaus von Bewehrungskörben, wie sie aus der Pfahlbautechnik bekannt sind, oder das Versenken eines Stahlprofils in den fertigen Säulenkörper. Dabei ist es meist notwendig, für den Einbauprozess einen Rüttler zu verwenden. Zusätzlich werden hohe Ansprüche an die Viskosität des homogenisierten Bodenmörtels gestellt.



Abbildung 9: Dreifachschnecke *links*; Bohrstange mit Mischpaddel [24] *rechts*

2.3.2 Japanische Techniken

In Japan angewendete Techniken gewinnen in Europa immer mehr an Einfluss. Zum Teil werden in Japan Mischgeräte mit bis zu 4 rotierenden Mischwellen verwendet. Im maritimen Bereich setzt man sogar bis zu 8 Mischwellen (Abbildung 10) ein, mit denen, in einem Abbohrvorgang stabilisierte Querschnitte mit bis zu 6,9 m² hergestellt werden kön-

nen. Aufgrund der tonigen bzw. schluffigen Böden in Japan werden überwiegend Mischwerkzeuge mit Flügeln eingesetzt [3].



Abbildung 10: DM-Maschine mit vier Mischwellen (*links*) [24]; DM-Maschine für maritime Arbeiten mit acht Mischwellen (*rechts*) [24]

2.3.3 Zusammenfassung

Eine Gegenüberstellung der europäischen und japanischen Techniken der Nassmischverfahren ist in Tabelle 6 und 7 dargestellt. Im Unterschied zu europäischen Techniken kommen in Japan größere und schwere, Maschinen zum Einsatz. Dies hat den Vorteil, dass einerseits mehrere Mischwellen gleichzeitig in den Boden eingetrieben werden und andererseits durch die Mächtigkeit und Leistung der Maschinen die notwendigen höheren Bohrtiefen erreicht werden können.

Ausrüstung	Details	An Land/Europa	An Land/Asien	Unter Wasser/Japan
Mischgerät	Anzahl der Mischwellen	1 bis 3	1 bis 4	2 bis 8
	Durchmesser des Mischwerkzeugs	0,4 m bis 0,9 m	1,0 m bis 1,6 m	0,8 m bis 1,3 m
	maximale Behandlungstiefe	25 m	48 m	70 m unter dem Meeresspiegel
	Lage des Bindemittelauslasses	am Gestänge	an Gestänge und Mischflügel	an Gestänge und Mischflügel
	Injektionsdruck	500 kPa bis 1000 kPa	300 kPa bis 600 kPa	300 kPa bis 800 kPa
Dosieranlage	Vorgehaltene Suspensionsmenge	3 m ³ bis 6 m ³	3 m ³	3 m ³ bis 20 m ³
	Einbringungsleistung	0,08 m ³ /min bis 0,25 m ³ /min	0,25 m ³ /min bis 1 m ³ /min	0,5 m ³ /min bis 2 m ³ /min
Bindemittellager-silo	maximales Fassungsvermögen		30 t	50 t bis 1600 t

Tabelle 6: Wesentliche Leistungs- und Ausführungsmerkmale der europäischen und der japanischen Nassmischtechnik [3]

Mischgerät	An Land/Europa	An Land/Asien	Unter Wasser/Japan
Abbohrgeschwindigkeit der Mischwelle	5,0 m/min bis 1,5 m/min	1,0 m/min	1,0 m/min
Ziehgeschwindigkeit der Mischwelle	3,0 m/min bis 5,0 m/min	0,7 m/min bis 1,0 m/min	1,0 m/min
Umdrehungsgeschwindigkeit der Mischflügel	25 U/min bis 50 U/min	20 U/min bis 40 U/min	20 U/min bis 60 U/min
Umdrehungsindex der Mischflügel	meist fortlaufende Bohrschnecke	350 je m	350 je m
Eingebrachte Bindemittelmenge	80 kg/m ³ bis 450 kg/m ³	70 kg/m ³ bis 300 kg/m ³	70 kg/m ³ bis 300 kg/m ³
Injektionsphase	Abbohren und/oder Rückziehen	Abbohren und/oder Rückziehen	Abbohren und/oder Rückziehen

Tabelle 7: Typische Ausführungsparameter der europäischen und der japanischen Nassmischtechnik [3]

2.4 Mischtechnik

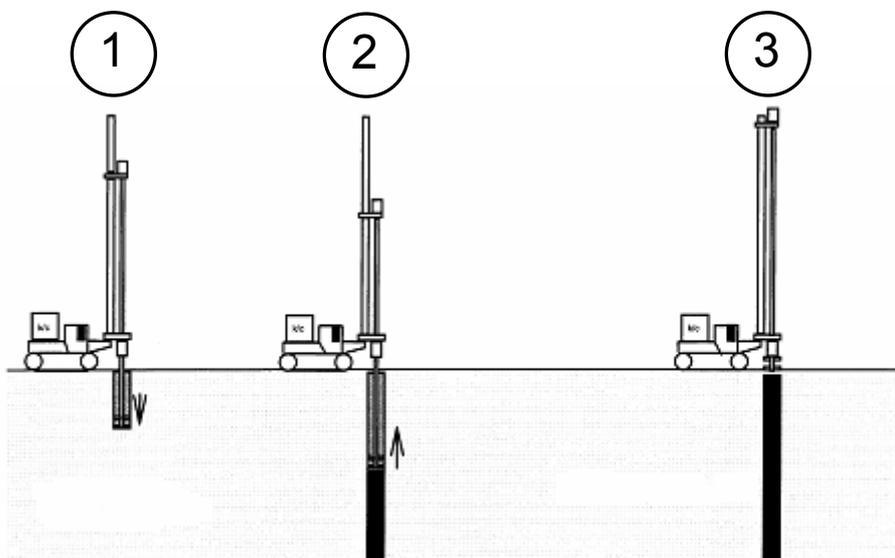
2.4.1 Allgemeines

Hauptziel des Mischvorgangs ist es, das Bindemittel so im Boden zu verteilen, dass eine optimale chemische Reaktion gewährleistet und das vorhandene Porenvolumen verringert wird. Diese Aufteilung des Bindemittels muss gleichförmig im gesamten Querschnitt der Säule erfolgen, damit annähernd gleichmäßige Festigkeits- und Verformungseigenschaften der Säulen garantiert werden können.

Der Mischprozess im Boden ist ein komplexer Vorgang. Um diesen genauer beschreiben zu können, ist es einfacher, diesen Prozess in Phasen einzuteilen.

2.4.2 Bindemittelintrag bei der Trockenmischtechnik

Die Herstellung einer Säule wird chronologisch und nachfolgend exemplarisch für die nordische Trockenmischtechnik in 3 Phasen (siehe Abbildung 11) eingeteilt, kann aber weitgehend auch für Nassmischtechniken übernommen werden.



- 1) Absenken der Mischvorrichtung in die geforderte Tiefe
- 2) Ziehen des Mixers mit gleichzeitigem Ausstoßen des Bindemittels
- 3) Verfestigung in der Säule

Abbildung 11: Phasen der Herstellung einer Trockenmischsäule [14]

zu 1) Absenken der Mischvorrichtung

In der ersten Phase der Herstellung der Säule wird das rotierende Mischwerkzeug in die gewünschte Tiefe abgesenkt. Bei diesem Vorgang wird die natürliche Bodenmatrix zerstört, um den Boden auf die nachfolgende Phase, in der das Bindemittel eingebracht wird, vorzubereiten.

Es ist nicht immer sinnvoll, die gesamte Bodenstruktur zu zerstören, um eine hohe Festigkeit zu erreichen, weil eine komplette Auflösung der Bodenstruktur kombiniert mit ungenügender Mischeffizienz zur Abnahme der Scherfestigkeit und zur Strang- oder Klumpenbildung führen kann.

In den letzten Jahren wurden große Anstrengungen unternommen, ein optimales Mischergebnis unter geringem Energieaufwand zu erreichen. Dazu werden heute für bindige Böden Mischwerkzeuge mit Paddeln ausgestattet, die eine geringe Neigung zur Horizontalen aufweisen. Diese geringe Neigung hat zur Folge, dass nur wenig Energie benötigt wird, um das Mischwerkzeug durch den Boden zu treiben. Jedoch muss immer jene Energie aufgewendet werden, damit die Scherfestigkeit des Bodens überwunden wird, um diesen dabei aufzulockern. Neigt man jedoch die Propeller zu stark, so besteht die Gefahr, dass zu große axiale und tangential Momente am Mischer entstehen, welche wiederum mit hohem Energieaufwand am Getriebe einhergehen [24].

Die Rotationsgeschwindigkeit des Mischwerkzeugs spielt weiters eine große Rolle. Eine hohe Umdrehungsgeschwindigkeit forciert die Auflockerung des Bodengefüges.

Unklarheit besteht darüber, ob es förderlich ist, mit großen Drehzahlen gewaltig den Boden zu „mischen“, denn mit der Drehzahl steigen auch der Widerstand und die Scherkraft und damit die aufzuwendende Energie. Derzeit laufen Forschungen, ob dieser Mehraufwand an Energie wirtschaftlich mit der Leistung in Verbindung gebracht werden kann [33].

zu 2) Ziehen des Mixers mit gleichzeitigem Ausstoßen des Bindemittels

In dieser Phase wird das Bindemittel über eine Öffnung am Mischwerkzeug an den anstehenden Boden abgegeben. Dieser Prozess wird nach PARVITT & BARNES in vier Stufen eingeteilt [33]:

- Ausbreiten des Bindemittels
- Strukturelle Wasseranlagerung
- Koagulation
- Verteilung

In der Praxis verlaufen diese Stufen natürlich fließend ineinander, aber für einen verständlichen Ablaufprozess empfiehlt es sich, diese getrennt voneinander zu behandeln.

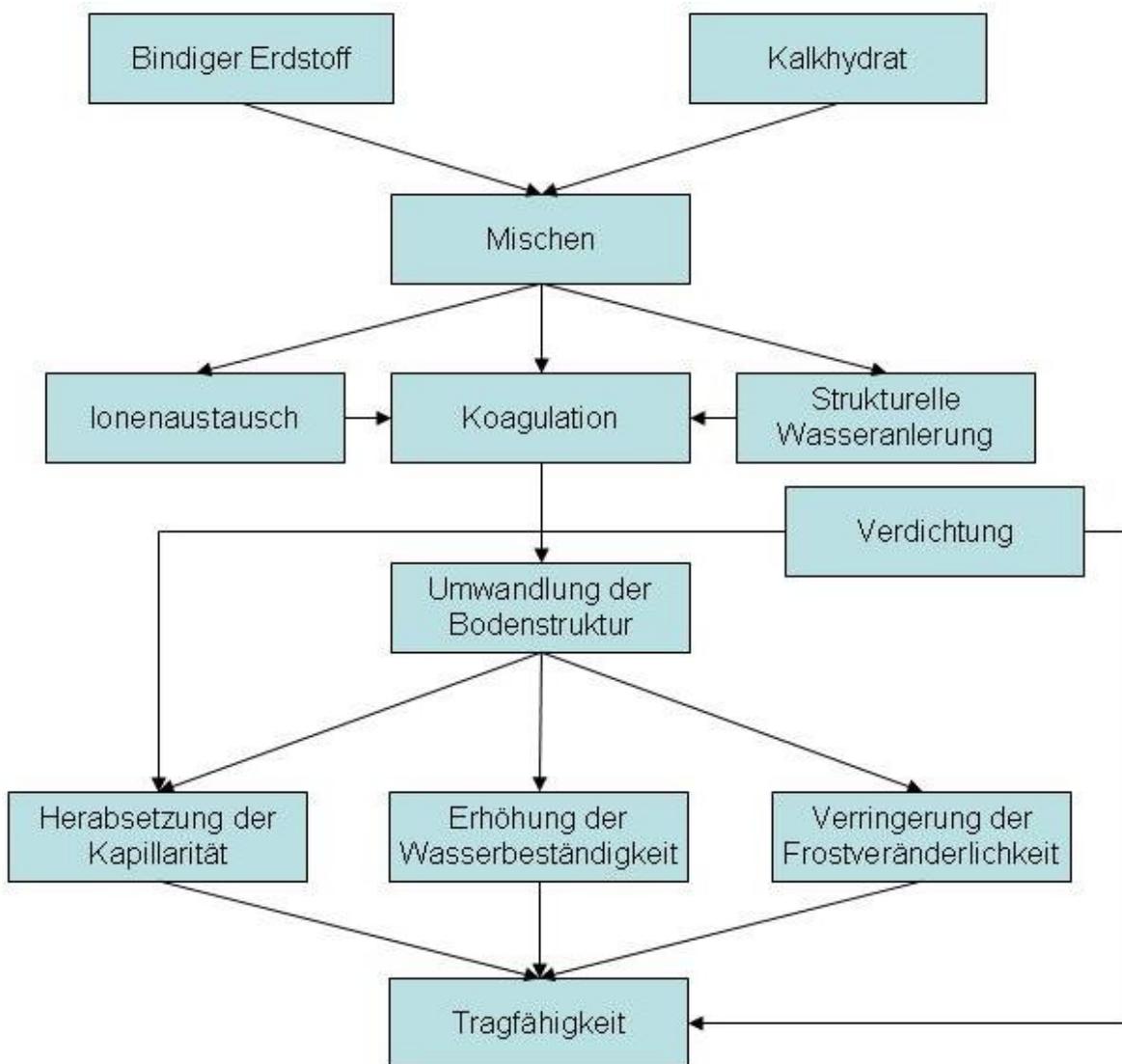


Abbildung 12: Wirkungsweise von Bodenverbesserungen mit Kalk [53]

Nach dem Einmischen des Kalks erfolgt an den Kontaktflächen der Tonminerale der Ionenaustausch. Durch freigesetzte Alkaliionen und angelagertes Calcium ändert sich die Oberflächenladungsverteilung. Das hat zur Folge, dass sich die Tonteilchen stärker anziehen und sich die Bodenstruktur ändert. Es kommt zu einer „Verkrümelung“ bzw. „Verklumpung“ des Boden-Bindemittelgemisches [53].

Ausbreiten des Bindemittels

Es ist besonders auf die Dimensionierung des Mischwerkzeuges zu achten, da dieses den Weg für das Bindemittel in jedem Querschnitt der Säule bereitet. Dabei kommt es darauf an, dass keine ungleichmäßigen Bindemittelkonzentrationen auftreten.

Beim Trockenmischverfahren (vergleiche Kapitel 2.2) wird das Bindemittel in Pulverform eingebracht, wobei Druckluft als Transportmedium für das Bindemittel verwendet wird.

Am Mischwerkzeug befinden sich zwischen den Propellern bzw. Paddeln die Öffnungen, aus denen das Bindemittel in den Boden geblasen wird. Dabei setzt sich das Bindemittel in die vom Mischer erzeugten Hohlräume ab. Dieser Hohlraum ist von Faktoren wie der Geometrie des Mixers, dem Luftdruck und der Rheologie des Bodens bzw. des Bindemittels abhängig [24].

Strukturelle Wasseranlagerung

Nachdem das Bindemittel in den Boden eingeblasen wird, enthalten diese Bindemittelklumpen Luft. Um eine chemische Reaktion mit der umgebenden Feuchtigkeit des Bodens zu starten, muss diese Luft durch Feuchtigkeit ersetzt werden. Das Aufbrechen dieser Bindemittel-Luft-Klumpen wird durch die mechanische Energie des Mixers gewährleistet. In Abbildung 13 wird dieser Vorgang veranschaulicht und erklärt.

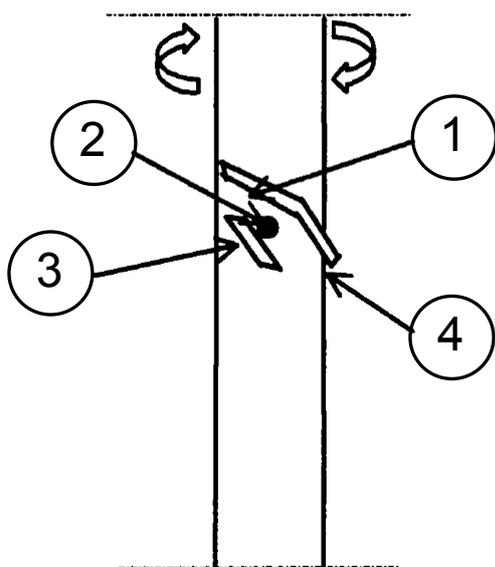


Abbildung 13: Bindemittelleintrag am Mischwerkzeug

- 1) Propellerpaddel bildet eine Aushöhlung für das nachfolgende Bindemittel.
- 2) An der Öffnung im Schaft erfolgt der Austritt des Bindemittels.
- 3) Boden wird an der Innenseite des Propellers mit dem Bindemittel zusammengepresst.
- 4) Hohe Scherspannungen am unteren Ende des Paddels, dadurch wird die Luft aus den Bindemittelklumpen gepresst, und durch Wasser ersetzt.

Koagulation

Sobald die Luft aus den Klumpen durch Feuchtigkeit ersetzt wurde, sollte das Bindemittel verteilt werden, bevor es zu einer chemischen Reaktion kommt. Ansonsten führen ungleichmäßige Bindemittelkonzentrationen im Querschnitt zu unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften in der Säule. Dabei übernehmen Paddel am Mischwerkzeug eine rührende Wirkung, Schrauben und Schnecken hingegen eine knetende. Die Drehzahl des Mischwerkzeugs spielt dabei auch eine bedeutende Rolle. So kann eine zu geringe Drehzahl dazu führen, dass die gebildeten Konglomerate nicht aufgebrochen, sondern lediglich verschoben werden.

Verteilung

Der letzte Vorgang bei der Fertigstellung beschreibt die endgültige Verteilung des Bindemittels in der neuen aufgelösten Bodenstruktur. Dieser Vorgang geht mit den Vorangegangenen einher. Ist eine ungenügende Verteilung des Bindemittels aus in-situ-Versuchen feststellbar, so muss der Vorgang durch mehrmaliges Ziehen und Abbohren des Mischwerkzeuges wiederholt werden.

2.4.3 Suspensionseintrag bei der Nassmischtechniken

Im Unterschied zur Trockenmischmethode, wo Pressluft als Trägermedium für das Bindemittel dient, ist der mechanische Schritt des Auspressens von Luft bei der Nassmischtechnik nicht erforderlich. Dadurch, dass die Suspension schon beim Einfahren in den Boden durch Öffnungen an der Spitze des Mischwerkzeugs bzw. an Auslässen die am Schaft oder an den Mischpaddeln angebracht sind, eingebracht wird, kann eine ausreichende Homogenisierung gewährleistet werden. Die Verteilung und Vermischung der Suspension im Boden hängt im Wesentlichen von der Geometrie des Mixers und dem w/b-Wert der Suspension ab. Bei Nassmischverfahren schwankt je nach Anwendung und

Boden der w/b-Wert der Suspension bei Zementmengen von 100 bis 700 kg/m³ zwischen 0,5 und über 1,0. Die Wirkungsweisen unterschiedlicher Mischwerkzeuge werden jeweils im Kapitel 3 Spezielle Verfahren – Gerätetechnik näher behandelt.

2.4.4 Chemische Grundlagen

Einführung

In der Praxis wird der Begriff „Stabilisierung“ als Synonym für die Verbesserung der Widerstandsfähigkeit und Tragfähigkeit von Böden verwendet.

Als Bindemittel dienen zur flächigen Stabilisierung Branntkalk, Kalkhydrat, Zement und Mischbinder. Die Industrie stellt eine Vielfalt von Bindemitteln und Rezepturen zu Verfügung. Dadurch ist es möglich, je nach Eigenschaften des Bodens und den Anforderungen an das Bauwerk, eine optimale Mischung der Bindemittel zur Stabilisierung zu erhalten.

Hauptkriterien zur Wahl des Bindemittels sind meist die Korngrößenverteilung und der Wassergehalt des Bodens.

Die einzelnen Grenzen der Bindemittel in ihrer Anwendung sind in Abbildung 14 dargestellt.

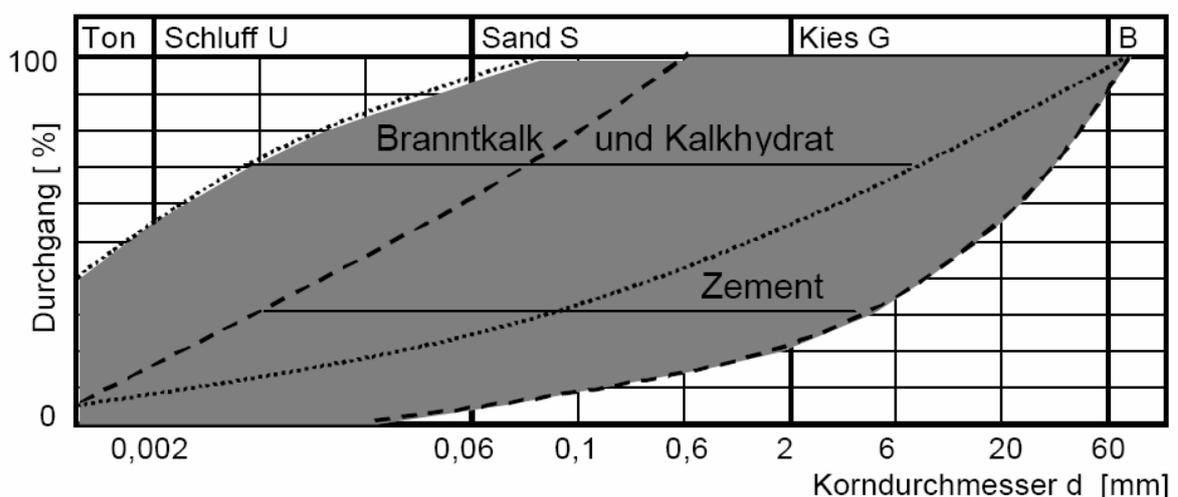


Abbildung 14: Empirische Anwendungsgrenzen von Bindemitteln [4]

Aus der Struktur und Mineralogie des Bodens, sowie aus dessen chemischer und physikalischer Zusammensetzung lässt sich die Verwendung des jeweiligen Bindemittels ableiten. Bei der Auswahl des Bindemittels ist darauf zu achten, dass die mechanischen Eigenschaften des zu behandelnden Bodens wie Scherfestigkeit, Steifigkeit, Quell- oder Schrumpfeigenschaften zu Beginn festgelegt werden. Das Ausgangsmaterial wird da-

durch charakterisiert und anhand der erhaltenen Parameter ein geeignetes wirtschaftliches Bindemittel bestimmt [4].

Feststoffteilchen, Porenwasser und Porenluft bilden das Drei-Phasengemisch von Böden. Die mechanischen Eigenschaften werden durch bodenphysikalische Werte, wie Korngrößenverteilung, Kornform, Lagerungsdichte, sowie der Porosität, vom Wassergehalt und der Saugspannung bestimmt.

Attraktiv für Stabilisierungsverfahren mit Bindemitteln beim Trockenmischverfahren (vergleiche Kapitel 2.2), sowie im Straßenbau (vergleiche Kapitel 6) sind Böden, die eine dominante Schluff- und Tonfraktion aufweisen.

Je nach Abfolge unterscheidet man Zweischicht- und Dreischichttonminerale, die sich durch ihre chemisch-physikalischen Eigenschaften voneinander unterscheiden.

Diese Eigenschaften lassen sich auf die Bindungskräfte zwischen den Schichten und Partikeln gleich den Van der Waalskräften, Wasserstoffbrückenkräften und Dipol-Wechselwirkungen zurückführen. Die spezifische Oberfläche wirkt stark auf den Wasserhaushalt und auf das mechanische Verhalten ein. Diese nimmt zur zweiten Potenz mit abnehmender Korngröße zu [4].

Wird nun z.B. durch das Bindemittel der Chemismus des Porenwassers verändert, können Austauschvorgänge der Zwischenschicht-Kationen stattfinden. Diese Austauschvorgänge beeinflussen die Wasserbindekapazität und weiters die plastischen Eigenschaften des Bodens.

Die Wasserbindekapazität ist ausschlaggebend für das Quell- und Schrumpfverhalten von Tonmineralien. Somit verändert man im ungesättigten Boden die Saugspannung, die wiederum die Scherfestigkeit und die Steifigkeit des Bodens beeinflusst.

Boden – Zement – Stabilisierung

Hier werden vorwiegend Portlandzemente verwendet, die unter Umständen auch zur Steuerung des Reaktionszeitpunktes hydrophobiert werden können.

Trikalziumsilikat (C_3S), Dikalziumsilikat (C_2S), Trikalziumaluminat (C_3A) und Tetrakalziumaluminoferrit (C_4A) sind die Hauptkomponenten des Zements. Tritt nun dieser Zement mit dem Porenwasser in Kontakt, kommt es zur Hydratation dieser Elemente. Damit entstehen hydratisierte Kalziumsilikate, Kalziumaluminat und als Nebenprodukt Kalziumhydrat. Kalziumsilikate sowie Kalziumaluminat fixieren die Bodenpartikel und verhindern ihre Bewegung durch Bildung von Zementstein im Porenraum. Wie bekannt, steigt während der Hydratation der pH-Wert des Porenwassers stark an. Weiters lösen sich Silikate und

Aluminate aus den tonigen Partikeln des Bodens. Andere Prozesse, die zur Erhärtung und zur Strukturbildung beitragen, werden als puzzolanische Reaktionen zusammengefasst [9]. Diese puzzolanischen Reaktionen laufen langsam ab und haben wenig Einfluss auf die Deformierbarkeit. Zusammenfassend lässt sich ausdrücken, dass die primäre Reaktion eine rasche Strukturbildung mit rascher Festigkeitszunahme bewirkt. Sekundäre Prozesse, die eine stabilisierende und verkittende Wirkung haben, wirken sich stark auf den Wasserhaushalt aus. Durch Variation der Zementmenge sowie durch das zu Verfügung stehende Porenwasser lässt sich der erste Prozess beeinflussen. Hingegen bestimmen die mineralogischen Zusammensetzungen des Bodens die sekundären Prozesse [4].

Wie aus der ÖNORM EN 14679 Pkt. 7.4 zu entnehmen ist, müssen bodenmechanische Kennwerte aus Versuchsreihen abgeleitet werden.

Verwendet werden folgende Standardzemente CEM I 42,5 und CEM II 42,5 nach EN 197.

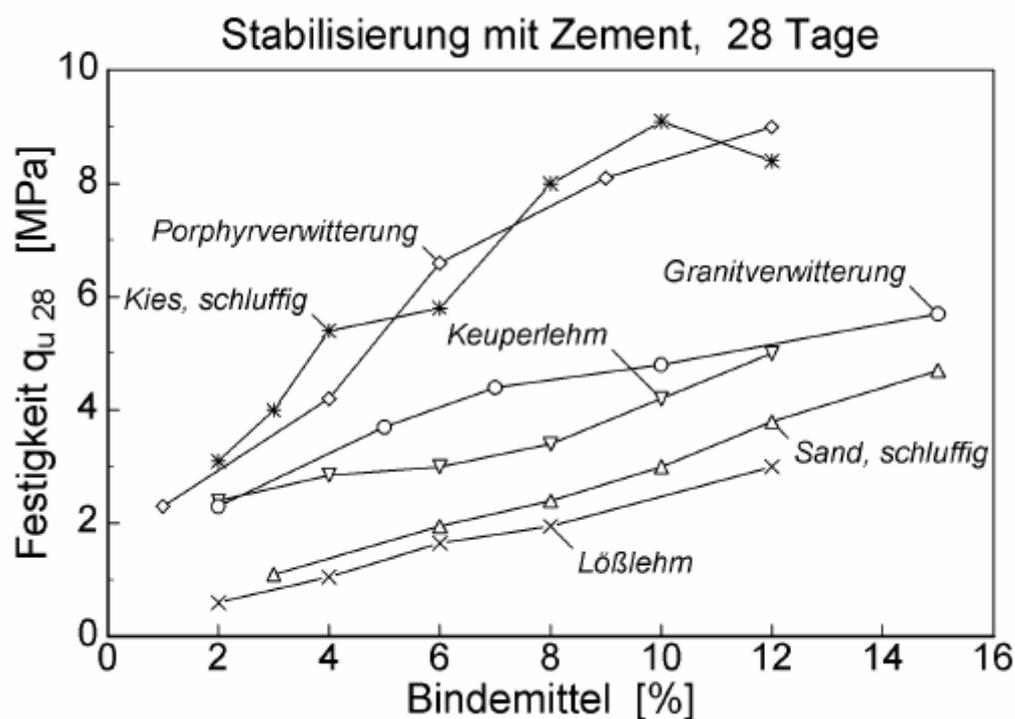


Abbildung 15: Festigkeitsentwicklung von unterschiedlichen Böden [4]

Bei allen Böden zeigt sich, dass die Druckfestigkeit mit der zugegebenen Menge an Bindemittel ansteigt (siehe Abbildung 15). Neben der Druckfestigkeit nehmen mit der Erstarung der Steifemodul sowie die Kohäsion rasch zu und wachsen dann mit der Zeit weiter an.

Eine Auswertung zahlreicher Scherversuche aus verschiedenen Eignungsuntersuchungen zeigt, dass der Reibungswinkel bei nichtbindigen bzw. rolligen Böden nahezu unver-

ändert bleibt, während er bei bindigen Anteilen nach längerer Liegezeit infolge Strukturänderung um wenige Grade ansteigen kann [4].

Boden-Kalk-Stabilisierung

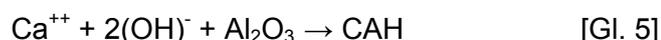
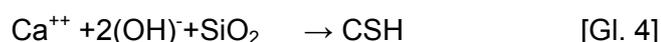
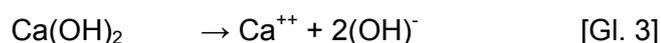
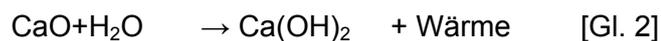
Wird ungelöschter Kalk in feinkörnige Böden eingemischt, sind als Stabilisierungseffekte eine Sofortreaktion und in der Regel eine langfristig wirkende Verfestigung feststellbar. Entwässerung des Bodens, Aggregatbildung bindiger Bodenpartikel, Ionenaustausch und Puzzolanreaktion stehen im Vordergrund. Als Langzeitwirkung lässt sich eine Karbonatisierung feststellen [4].

Kalk-Stabilisierungen werden immer dann eingesetzt, wenn eine zusätzliche Entwässerung des Bodens gefordert wird. So werden beim Löschen von einem kg Kalk ca. 300 g Porenwasser gebunden. Jedoch hat das verdunstende Porenwasser (durch die freierwerdende Reaktionswärme und das Belüften durch das Einmischen) einen stärkeren Einfluss.

Als Faustformel kann davon ausgegangen werden, dass der Wassergehalt eines Bodens beim Einmischen des Branntkalkes um das gleiche prozentuelle Maß abnimmt [4].

Anhand der nachfolgenden Reaktionsgleichungen, soll das Löschen des Kalkes, die Dissoziation und die puzzolanische Reaktion erläutert werden.

Das beim Löschen (Gl. 2) entstandene Kalziumhydroxid bzw. das direkt eingemischte Kalkhydrat dissoziiert im Wasser (Gl. 3), erhöht die Elektrolytkonzentration und den pH-Wert des Porenwassers, sodass sich SiO_2 und Al_2O_3 aus den Tonpartikeln und aus den Materialien der amorphen Oberfläche lösen. Die Effekte sind demnach Ionentausch, Bildung von Wasserstoffbrücken und puzzolanische Reaktion (Gl. 4 und Gl. 5). Makroskopisch führt dies zu der gewünschten Verbesserung der bodenmechanischen Eigenschaften.



Die oben beschriebene Sofortreaktion lässt sich anhand des Wassergehalts und durch die Anhebung der Saugspannung und der Krümelbildung erklären.

Ionenaustausch und die Änderung der Partikelbindung führen zu einer Strukturänderung. Dabei aggregieren Ton- und Schluffpartikel zu größeren Konglomeraten. Bodenmechanisch kann man daraus ableiten, dass die Ausrollgrenze w_L angehoben und die Plastizität I_p reduziert und somit die Konsistenz erhöht wird [10].

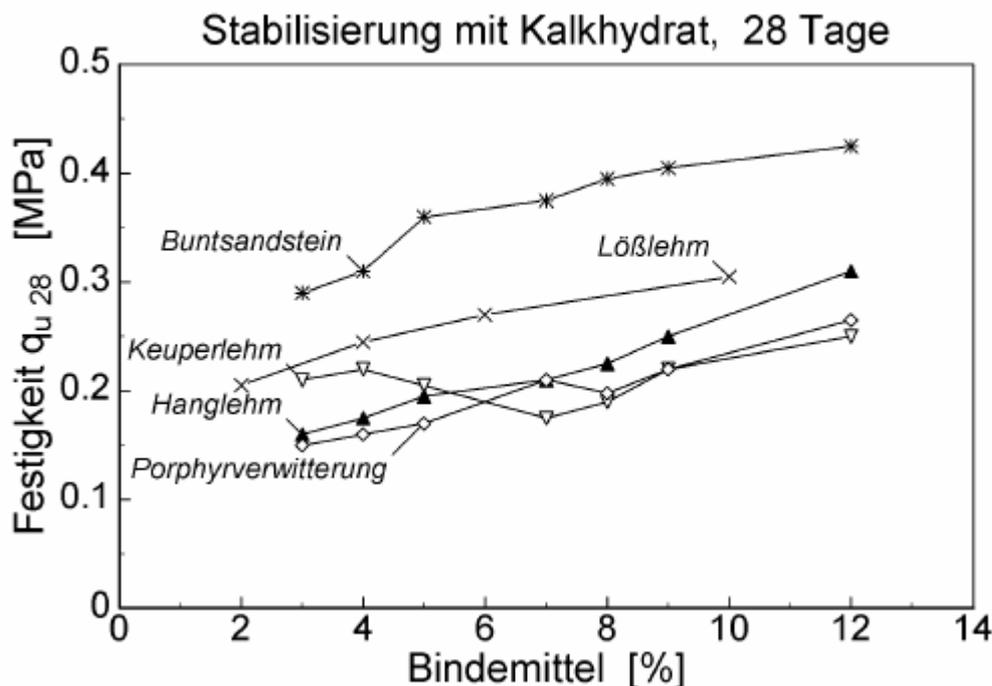


Abbildung 16: Zusammenhang Kalkmenge und Druckfestigkeit [4]

Diese Prozesse sind hinsichtlich ihres Einflusses auf die Verfestigung, neben der Menge der Bindemittelzugabe, insgesamt umso bedeutender, je größer der Anteil der Tonfraktion im Boden ist (siehe Abbildung 16).

Mechanisch wirksam ist die durch den „Stopfeffekt“ erzielte Verdichtung des Bodens. Kurz- bis mittelfristig wirkt der Austausch von Ionen an den Tonmineralteilchen, langfristig die Zementierung und im Falle von Luftkontakt die Karbonatisierung. Die chemischen, physikalischen und mineralogischen Prozesse sind weitestgehend bekannt, jedoch fehlt eine zuverlässige Methode zur quantitativen Prognose des Erfolges einschließlich des zeitlichen Verlaufes [4]. Daher ist es zur Prognose der Festigkeitsentwicklung erforderlich, auf die Ergebnisse von Labor- oder Feldversuchen zurückzugreifen [3].

Zur Anwendung kommen Standardkalke wie CL 80 und CL 90 als Vertreter der ungelöschten Kalke nach EN 459-1.

Boden-Zement-Kalk-Stabilisierung

Bindemittel, die aus einer Kombination von Zement und Kalk zusammengesetzt sind, werden Mischbinder genannt. Man versucht die Vorteile der unterschiedlichen Reaktions-eigenschaften von Kalk und Zement zu koppeln, um ein möglichst wirtschaftliches Binde-mittel zu schaffen.

So nutzt man die schnelle und hohe Verfestigung des Zementes, um die Druckfestigkeit zu erhöhen. Damit wird ein starkes Tragskelett im Porenraum geschaffen. Kalk reduziert gleichzeitig die Plastizität unter Krümelbildung.

Abbildung 19 zeigt die synergetische Wirkung von Kalk und Zement in einem Bodengefüge.

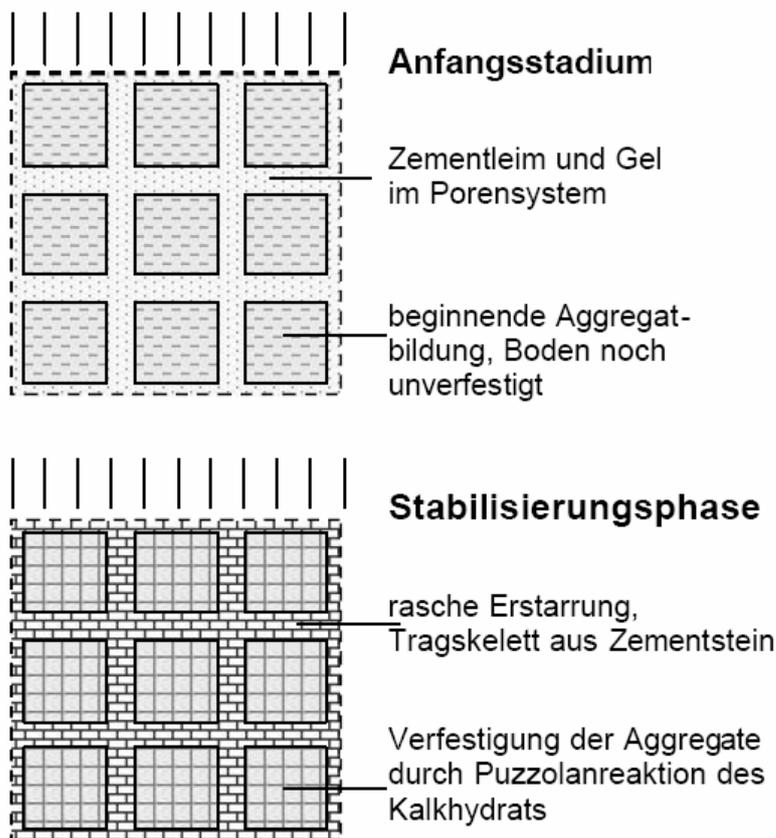


Abbildung 17: Modell zur synergetischen Wirkungsweise von Mischbindern [4]

Es ist eine Verbundwirkung aus dem, von Zement entstandenem Tragskelett und dem aus Kalk gewonnen Bodenaggregat zu erkennen, demzufolge wird auch mit geringerem Bindemittelbedarf eine adäquate Stabilisierung erreicht.

Ein mit Zement stabilisierter Boden weist natürlich eine höhere Druckfestigkeit auf als ein kalkstabilisierter Boden. Auch bei den Parametern Kohäsion und Steifigkeit ist Zement

dem Kalk überlegen. Jedoch ist es nicht die primäre Aufgabe von Bindemitteln, die Bodenparameter in einem zu so hohen Grad zu verändern. Vielmehr besteht die Aufgabe darin, eine Bindemittelrezeptur herzustellen, welche die Anforderungen an den Baugrund hinsichtlich Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit erfüllt.

Zusatzstoffe

Hochofenschlacke (HS)

Hochofenschlacke wird bei Hochleistungszementen verwendet. Sie dient als Kühlmittel, um die Wärmeentwicklung bei der Hydratation zu steuern. Weiters sind Hochofenschlacke und Flugasche ein billiges Substitutionsmittel für Portlandzement. Um Hochofenschlacke verwenden zu können, ist es notwendig, diese fein zu mahlen, um eine große Reaktionsoberfläche zu erzielen [28].

Flugasche (FA)

Flugasche ist ein feinkörniger Verbrennungsrückstand von Kohlenstaub in Kraftwerken, der als Zusatzstoff für Zement und Beton Verwendung findet. Die Zusammensetzung hängt von Art und Herkunft der Kohle und den Verbrennungsbedingungen ab. Flugasche wird zur Verbesserung der puzzolanischen Eigenschaften verwendet [28].

Calciumsulfat

Calciumsulfat (CaSO_4) wird zur Steuerung der Aushärtungszeit dem Zement zugefügt [9].

3 Spezielle Verfahren

3.1 Mixed in Place – Verfahren

3.1.1 Einführung

„Unter dem Begriff „Mixed-In-Place“ versteht man eine Vermischung von Bindemitteln und Boden an Ort und Stelle. Die vorhandenen Porenräume im Bodengerüst werden dabei mit der Bindemittelsuspension verfüllt. Das Ergebnis ist ein aufgrund der Bohrschnecken-geometrie definierter, verfestigter Bodenkörper“. [31]

Das Mixed in Place-Verfahren, eigentlich aus dem Straßen- und Wegebau bekannt, wird seit einigen Jahren auch in Österreich zur Herstellung verfestigter Bodenkörper verwendet. Das MIP-Verfahren ist ein patentrechtlich geschütztes System der Firma Bauer Spezialtiefbau GmbH, welches sich aus der Bohrpfahltechnik entwickelte. Man zählt dieses Verfahren der Bodenverbesserung zu den verdrängungsfreien Nassmischverfahren. Beim MIP-Verfahren wird der anstehende Boden mechanisch mit einer Bindemittelsuspension an Ort und Stelle mittels Einfach- oder Dreifachschnelle vermischt. Es sprechen viele Gründe für seine Anwendung, nicht zuletzt der, dass der anstehende Boden als Baustoff genutzt wird und damit ein kostengünstigeres sowie ressourcenschonendes, ökologischeres Bauen möglich ist. Viele andere Aspekte, die im Laufe des Kapitels vorgestellt werden, lassen die Mixed in Place-Technik immer mehr zu einer wirtschaftlich attraktiven Alternativmethode zu anderen Verfahren avancieren.



Abbildung 18: MIP-Dreifachschnelle zum Arbeiten zwischen den Ketten parallel zur Fahrtrichtung [31]

3.1.2 Verfahrensprinzip

Das Trägergerät wird auf einem vorher geschaffenen Arbeitsplanum an Bohrpunkten positioniert. Schon beim Abbohren wird eine Zementsuspension in den gewachsenen Boden eingebracht. Dabei dient die Suspension neben dem eigentlichen Effekt der Verfestigung auch zur Verringerung der Reibung zwischen Boden und Bohrschnecken. Die beiden äußeren Schnecken sind gegenläufig montiert und werden während des Abbohrvorganges in unterschiedliche Drehrichtungen versetzt. Dies erhöht zum einen die Effizienz des Mischvorganges, und gewährleistet zum anderen die Vertikalität der herzustellenden Lamelle. Bei rolligen Böden wird Anfangs bis in die Endtiefe abgeteuft und dann mit dem Prozess des Homogenisierens begonnen (siehe Abbildung 20). Bei Böden mit bindigen Anteilen ist es notwendig, bereits beim Vorgang des Abbohrens immer wieder das Mischwerkzeug vor- und zurückzuziehen. Tonige Anteile erschweren den Lösevorgang und schränken die Qualität der Lamelle ein. Je nach vorhandenem Boden wiederholt der Geräteführer diesen Zyklus des Abbohrens und Zurückziehens.

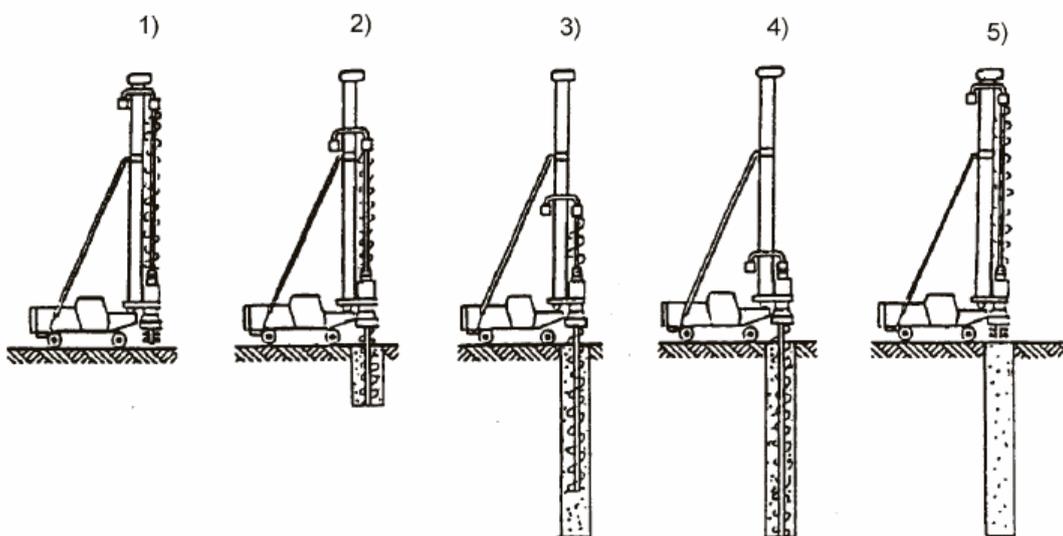


Abbildung 19: Herstellungszyklus einer MIP-Lamelle [31]

- 1) Einrichten des Bohrgerätes am Bohransatzpunkt
- 2) Abbohren der Endlosschnecke unter Suspensionszugabe
- 3) + 4) Mischen und Homogenisieren des Schlitzes durch Variieren der Schneckendrehrichtung und Auf- und Absenken des Anbauschlittens
- 5) Fertigstellter MIP-Schlitz

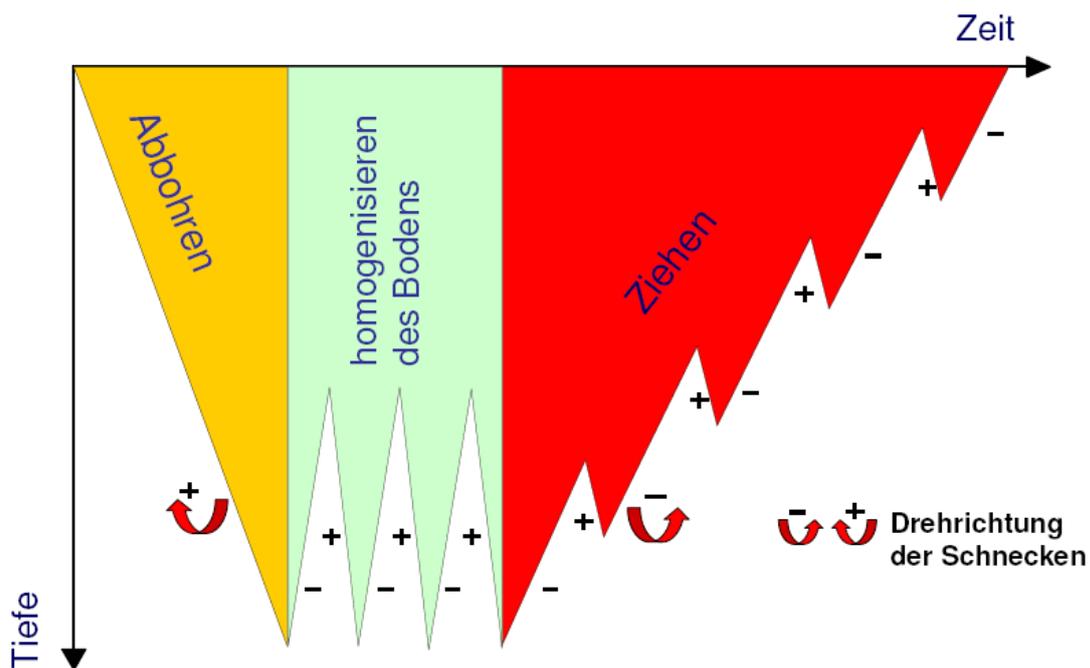


Abbildung 20: Herstellungszyklus einer Lamelle mit Darstellung der Drehrichtung [44]

Bohrschnecken sind nicht für die Zermahlung bzw. Zerstörung größerer Steine oder Blöcke mit einem Durchmesser ab ca. 10 cm ausgebildet. Falls sich bei Arbeiten herausstellt, dass der zu behandelnde Baugrund vermehrt große Steinfraktionen oder Blöcke aufweist, kann man mittels eines vorlaufenden Bohrgerätes den Boden „präparieren“. Die zu Hilfe-nahme von solchen Bohrgeräten stellt sicherlich nicht den Regelfall dar, sondern ist viel-mehr eine kostenaufwendige Sofortmaßnahme bei der Herstellung von Dicht- und Ver-bauwänden. In den meisten Fällen aber übergeht man das Element und setzt den Misch-vorgang bei der drauffolgenden Säule fort, sofern es das Bauvorhaben, zum Beispiel bei Gründungselementen, zulässt.

Um aus den einzelnen Elementen einen durchgängigen Bodenkörper zu erhalten, bedient man sich bei der Herstellung des bekannten Prinzips des „Pilgerschrittverfahrens“ nach Abbildung 21. Dabei beträgt die Überschneidung der Elemente etwa 50 cm, kann aber je nach vorgegebener Toleranz variieren.

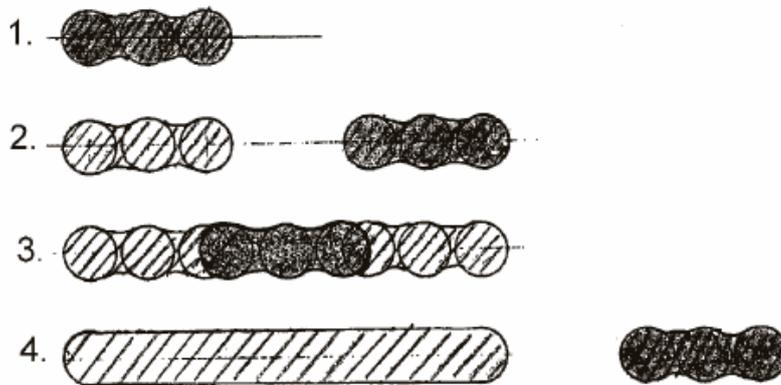


Abbildung 21: Arbeitsfolge für das Pilgerschrittverfahren [31]

Fertiggestellte MIP-Wände weisen nach dem Herstellungsprozess bedingt durch die Schneckengeometrie keine plane Oberfläche auf. Als Abhilfe, um eine ebene Wandfläche zu erhalten, werden manchmal die Konturen abgefräst (siehe Abbildung 22).



Abbildung 22: Abfräsen einer fertigen MIP-Wand [31]

3.1.3 Anwendung

Das Mixed in Place-Verfahren bietet ein mannigfaltiges Anwendungsspektrum. Mixed in Place Bodenkörper können für Dichtwände bzw. Dichtungsschichten im Deichbau ausgeführt werden, aber auch Gründungskörper mit statistischer Wirkung lassen sich in Kombination mit eingerüttelter Bewehrung (siehe Abbildung 24) oder eingestellten I-Profilen (siehe Abbildung 25) fertigen. Ein weiterer immer mehr an Aufmerksamkeit gewinnender Anwendungsbereich der tiefreichenden Bodenvermörtelung findet sich in der in-situ Immobilisierung von kontaminierten Böden.

Je nach verwendeter Geräteeinheit können Böden bis in eine Tiefe von 25 m bearbeitet werden. Lamellenbreiten variieren nach Mischwerkzeug von 37 cm bis 88 cm.

Das vorgestellte Verfahren eignet sich für die meisten Mischböden. Ungeeignet sind Böden mit Kornanteilen > 100 mm und Festgesteinen.

Bedingt geeignet sind bindige Böden. In Abbildung 23 sind die Anwendungsgrenzen des MIP-Verfahrens dargestellt. Gut ersichtlich ist dabei, dass Dichtwände und Elemente zur Sanierung von Dämmen und Deichen dennoch problemlos in einen Grundwasserstauer wie z.B. Tonschichten eingebunden werden können.

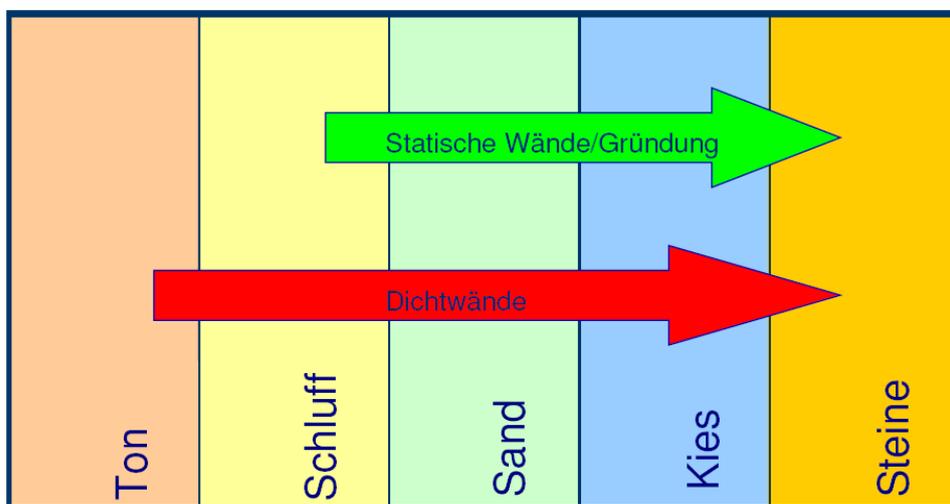


Abbildung 23: Anwendungsgrenzen MIP-Verfahren [44]

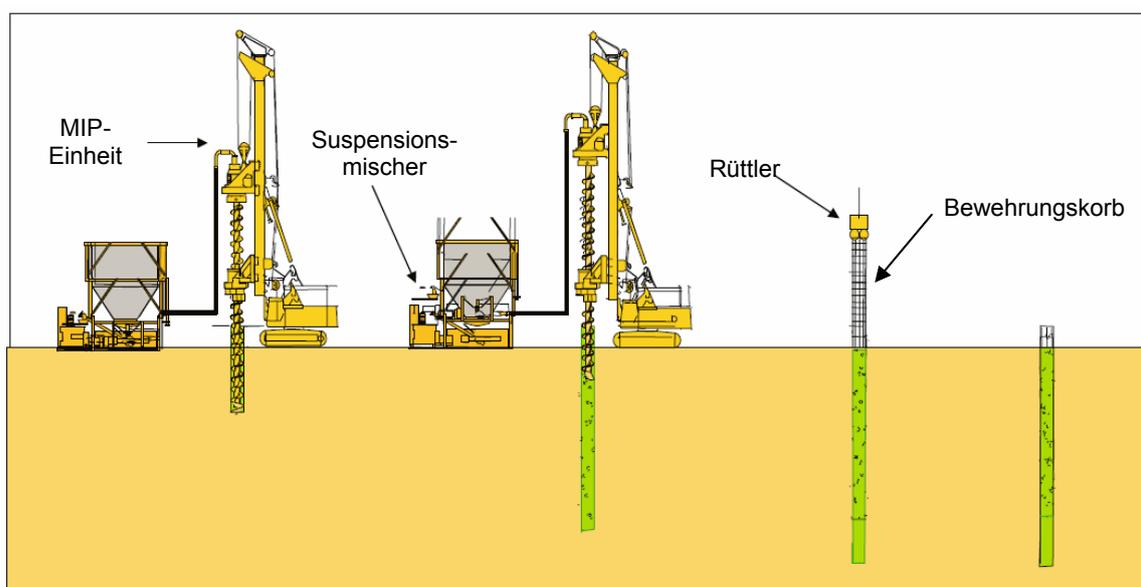


Abbildung 24: Herstellung einer bewehrten MIP-Säule mit Bewehrungskorb [57]

Bei der Herstellung von MIP-Elementen mit eingerütteltem Bewehrungskorb (siehe Abbildung 24) ist die Viskosität des Boden-Zementsuspensionsgemisches ein wichtiger Parameter. Die frisch erstellte MIP-Säule muss eine dementsprechende Viskosität aufweisen, um den Bewehrungskorb mittels eines aufgesetzten Rüttlers in das Bodengemisch versenken zu können.

Werden MIP-Elemente mittels eines Stahlprofils (siehe Abbildung 25) bewehrt, so wird das Profil nach der Fertigstellung der Säule oder Lamme in das noch frische Boden-Suspensionsgemisch versenkt. Es bedarf wiederum einer hinreichenden Viskosität, damit das Stahlprofil in das MIP-Element eingerüttelt werden kann.

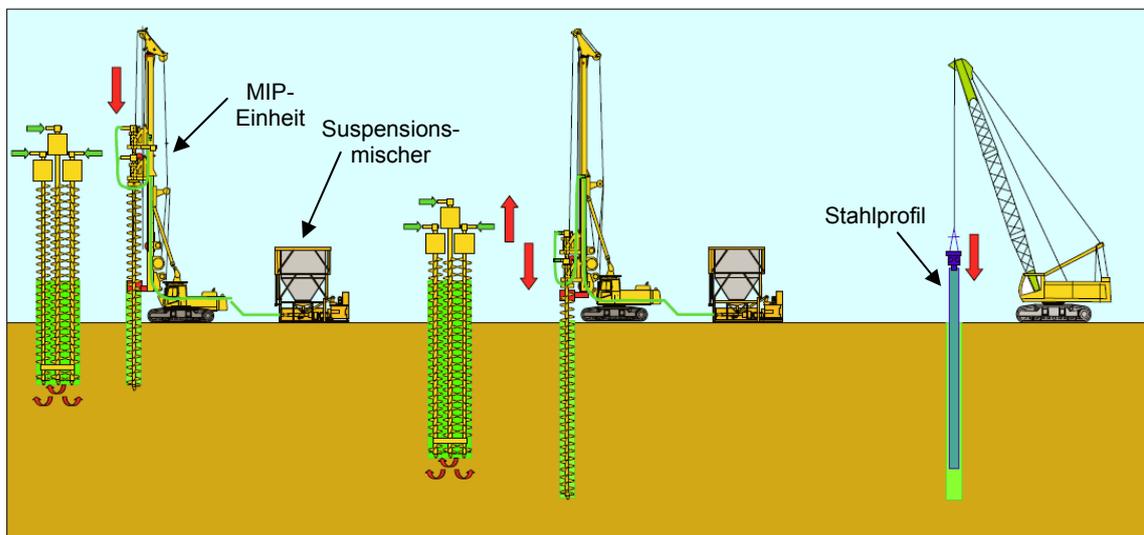


Abbildung 25: Herstellung eines bewehrten MIP-Element mit Stahlprofilen [57]

Bei kombinierten Pfahlplattenkonstruktionen wird nach der Herstellung des MIP-Elements der oberste Rand des noch nicht erhärteten Boden-Suspensionsgemisches mittels Bagger abgegraben. Danach werden zur kraftschlüssigen Verbindung von MIP-Element und Platte Stahlstäbe in die Säulen- bzw. Lamellenkörper eingedrückt.

Damm- und Deichsanierung

Neben den oben bereits erwähnten Einsatzmöglichkeiten als Baugrubensicherung und Gründungselement hat sich das Mixed in Place Verfahren auch bei Sanierungen im Damm- und Deichbau als Alternative zu anderen Verfahren wie der Produktion von Schmalwänden oder Spundwänden bewährt. Abbildung 26 zeigt eine nachträgliche Dammabdichtung mittels MIP. Hierbei wird nachträglich der Dammkern mittels MIP-Technik abgedichtet.

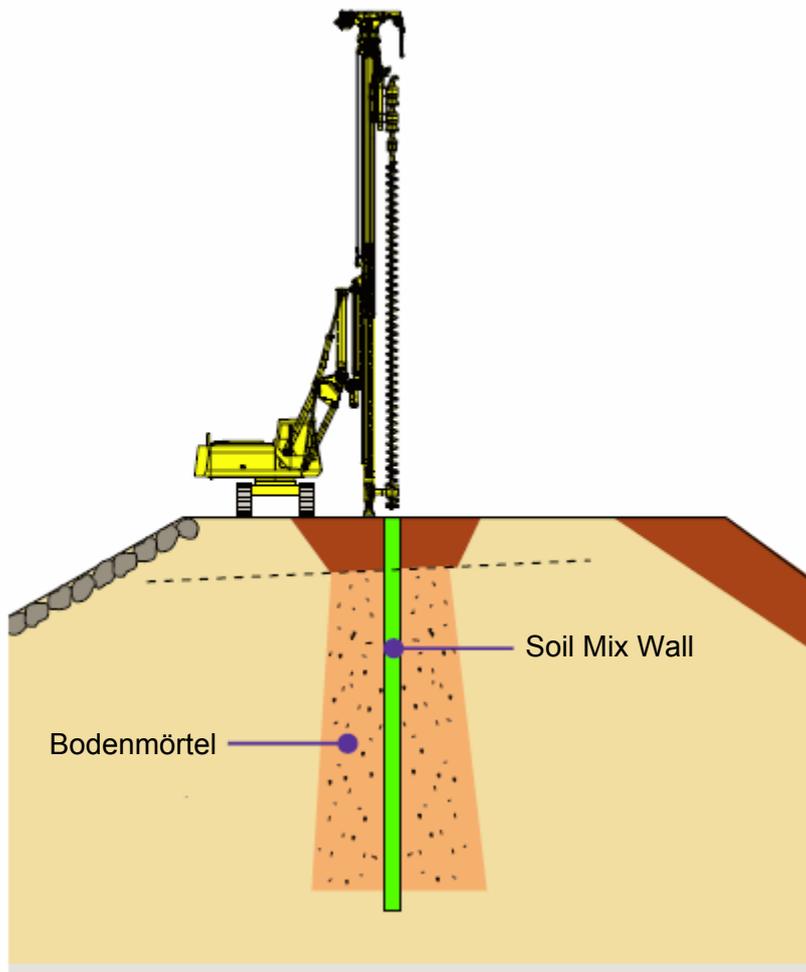


Abbildung 26: Dammabdichtung mittels MIP-Verfahren [57]

Immobilisierung von kontaminierten Bereichen

Ein weiteres Anwendungsgebiet ist das Arbeiten in kontaminierten Böden. Die Problematik bei kontaminierten Böden ist, dass es oft nicht im Sinne des Auftraggebers ist, den kontaminierten Bereich komplett zu entfernen, zu entsorgen und wiederzubefüllen. Auch kann es bei herkömmlichen Methoden nicht verdrängungsfreier Sicherungsmaßnahmen wie z.B. Bohrpfahlwänden, Schlitzwänden, bei der Öffnung des kontaminierten Bodens zu gefährlichen Schadstoffaustritten kommen. Auch sind die erheblichen Kosten für die Entsorgung des anfallenden Bohrguts zu berücksichtigen. Der große Vorteil des MIP-Verfahrens in kontaminierten Bereichen liegt darin, dass der Anfall an Bohrgut relativ gering ist und der verunreinigte anstehende Boden als Zuschlagstoff dient. Durch ein schonendes Bearbeiten des Bodens mittels Schnecken kann ein direkter Kontakt des verunreinigten Bodens mit umgebender Umwelt und der Arbeitnehmer vor Ort gering gehalten werden.

Vor Beginn der Arbeiten ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei kontaminierten Böden und Böden mit hohem Anteil an organischen Bestandteilen, eine gesonderte Eignungsprüfung der Bindemittelsuspension vorzunehmen ist. Bei verunreinigten Böden ist einer der wichtigsten Bemessungsaspekte die Dauerbeständigkeit des behandelten Bodens, besonders, wenn Abfallprodukte einen hohen Säuregehalt aufweisen [3].

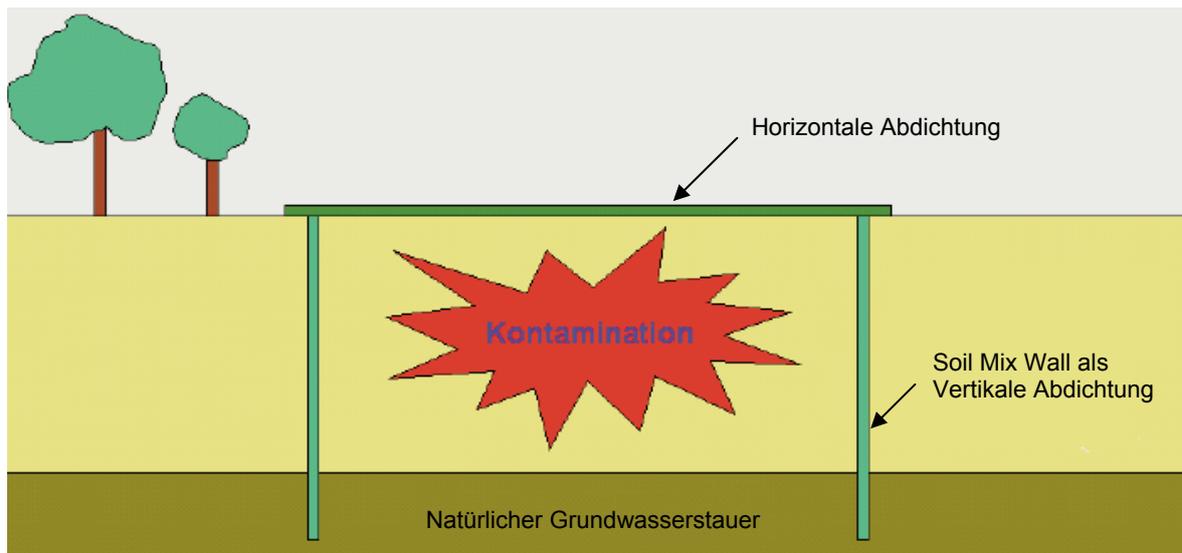


Abbildung 27: Einkapselung mittels MIP-Verfahren [17]

Bei der Herstellung einer Einkapselung werden die MIP-Dichtwände in einen natürlichen Grundwasserstauer eingebunden. Eine ausreichende Dichtigkeit ist zu erreichen, die im Bereich eines k_f -Wertes zwischen 10^{-8} m/s und 10^{-9} m/s liegen soll. Aus Sicherheitsgründen ist bei solchen Einkapselungen mit dem sogenannten doppelten Pilgerschrittverfahren nach Abbildung 28 vorzugehen [61].

Die ersten Lamellen werden nach dem einfachen Pilgerschrittverfahren hergestellt. Eine zweite Aufmischwelle verbessert die Homogenität der Dichtwand und verringert das Risiko von Leckstellen. Auch wird dadurch eine ausreichende Sicherstellung gegen undichte Stellen im Bereich der Überschneidungsfugen gewährleistet. Außerdem sollten im Fugenbereich entsprechende Toleranzen berücksichtigt werden.

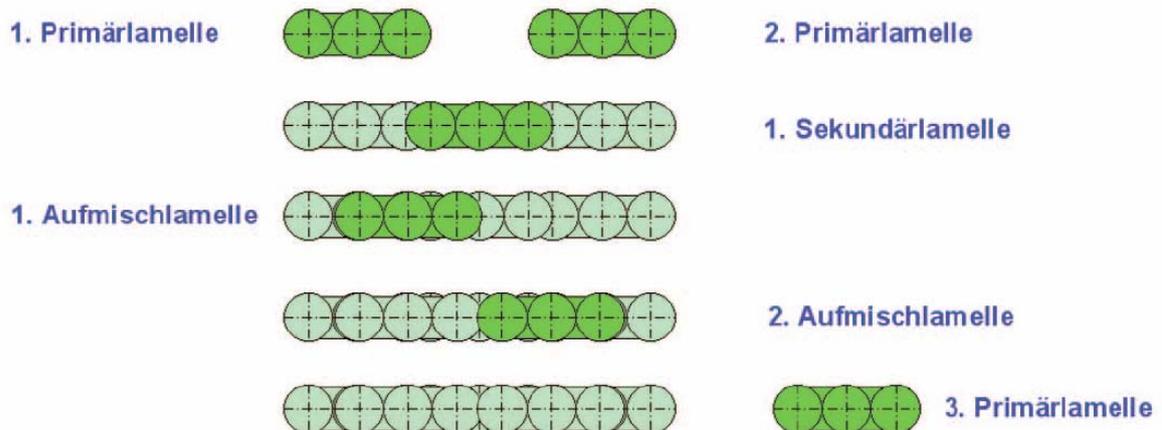


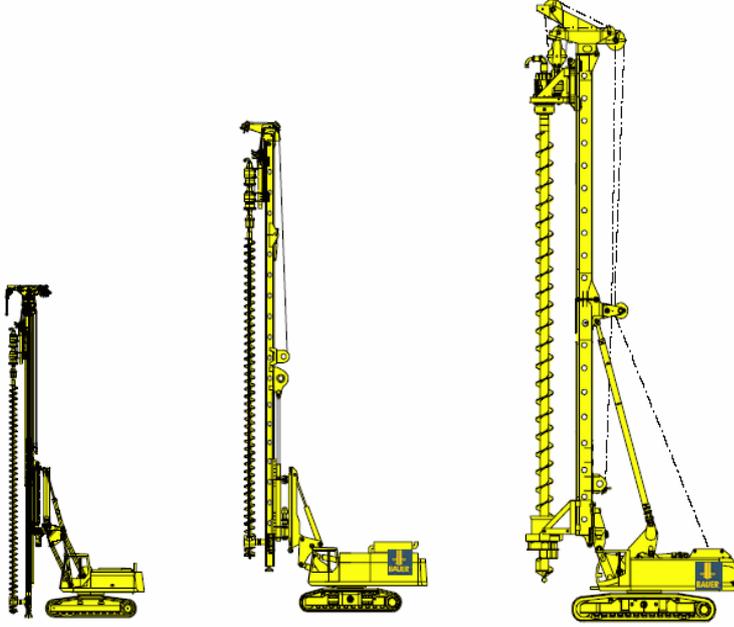
Abbildung 28: Arbeitsfolge für das doppelte Pilgerschrittverfahren [17]

Zusätzlich empfiehlt es sich, der Zementsuspension Bentonit beizumengen, um die Dichtigkeit zu erhöhen. Als sekundären Effekt erzielt man dabei eine verbesserte Schmierfunktion während des Bohrvorganges.

3.1.4 Gerätetechnik

Trägergerät, Anbaumäkler und Drehantrieb

Als Grundgerät dient eine Tragraupe mit Anbaumäkler. An den Mäkler ist über eine Aufnahmeplatte die hydraulische Dreifachdrehbohrereinheit, wie in Abbildung 30 dargestellt, montiert. Über den hydraulischen Drehbohrantrieb werden die drei MIP-Schnecken angetrieben.



	RG 15/18 T	RG 20	BG 40
Bohrtiefe	9,50 m	16,50 m	25,00 m
Bohrdurchmesser	3 x 370 mm	3 x 550 mm	3 x 880 mm
Fahrwerksbreite	3,00 m	4,50 m	5,00 m
Einsatzgewicht	50 t	85 t	140 t
Höhe	13,80 m	21,70 m	31,10 m
Leistung	170 kW	210 kW	433 kW

Abbildung 29: Übersicht der heute verwendeten Geräteeinheiten [31]

Die Wahl des Trägergerätes hängt von der Behandlungstiefe und der Zusammensetzung des Bodens ab. Bei geringen Bohrtiefen und schwach bindigen bzw. rolligen Böden reichen kleinere Trägergeräte aus. Bei Arbeiten, die mit großen Tiefen und/oder schwer zu lösenden Böden verbunden sind, ist es notwendig, auf schwerere und leistungsfähigere Geräte zurückzugreifen. Abbildung 29 veranschaulicht die Wahl der dafür notwendigen Bohreinheiten nach Bohrtiefen. Weiters sind bei Böden mit dominanten bindigen Anteilen auch leistungsfähigere Drehantriebe notwendig.

Von wesentlicher Bedeutung für den wirtschaftlichen Einsatz eines Spezialtiefbaugerätes ist die Einfachheit des Transports von und zur Baustelle, sowie der Aufwand zum Montieren bzw. Demontieren des Gerätes für den Transport. Ohne Demontage des Gerätes, indem der Mast zum Transport hydraulisch nach hinten geklappt wird, erreicht man eine optimal schnelle Mobilisierung bzw. Demobilisierung. Das Transportgewicht und die Transportabmessungen bleiben aber relativ hoch.

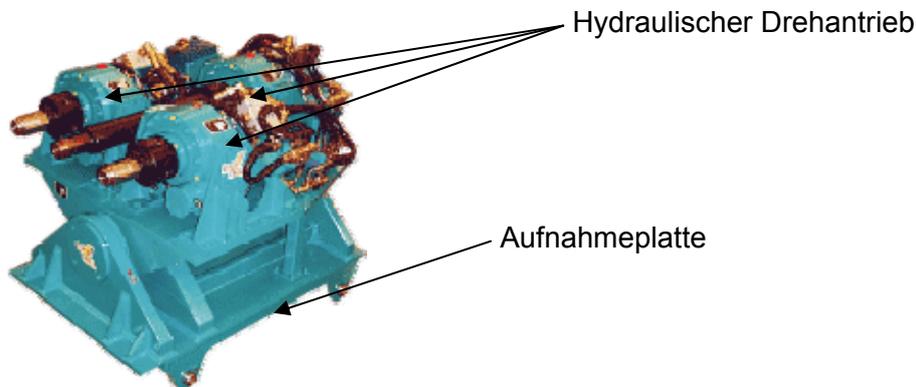


Abbildung 30: Hydraulischer Drehantrieb [29]

Der oben dargestellte hydraulische Drehantrieb ist eine Sonderanfertigung. Der Antrieb besteht aus drei einzelnen hydraulischen Drehantrieben RH 1000 (siehe Tabelle 8). Der Achsabstand der Getriebeeinheiten beträgt 370 mm. Im Betrieb kann dieser Drehantrieb des Motortyps 29 eine Leistung von über 2000 daNm erbringen.

Drehantrieb / rotary mechanism RH 1000						
Alle technischen Daten bei / all technical data at : Q = 150 l/min & p = 200 bar						
Motor Typ / motor type	29		30		31	
Gang / gear	1	2	1	2	1	2
Drehzahl / rotation n (min-1)	132	66	96	48	68	34
Drehmoment / torque M (daNm)	360	720	500	1000	705	1410
Zusätzl. Drehzahl + Drehmoment - Varianten sind mit DRICON-System oder neuen HOCHDRUCK-MOTOREN (bis 320 bar) möglich! Siehe Zusatzdatenblätter (Zubehör)						
Additional speed and torque ranges are feasible with DRICON or the new HIGH-PRESSURE MOTORS (up to 320 bar)! See additional data sheets (accessory)						

Tabelle 8: Technische Daten Drehantrieb RH 1000 [30]

Mischwerkzeug

Dem Mixed in Place-Verfahren stehen zwei verschiedene Mischwerkzeuge zu Verfügung (Abbildung 31), die je nach vorhandenem Boden und dem herzustellenden Element zum Einsatz kommen. Zur Herstellung von MIP-Elementen werden Einfach- bzw. Dreifachendlosschnecken verwendet.

Bei beiden Mischwerkzeugen wird beim Abbohren und Ziehen die Bodenmatrix zerstört und für den Bindemittelintrag vorbereitet. Dabei wird die Bindemittelsuspension kontinuierlich durch eine hohle Seele in der Endlosschnecke bis zum Mischer geleitet. Über mehrere Öffnungen rund um die Piloten wird diese Suspension eingetragen und mit dem Boden vermischt.



Abbildung 31: MIP Dreifach Endlosschnecke (*links*); MIP Einfachschnecke (*rechts*) [31]

Die Piloten an der Spitze dienen zum Aufreißen fester Bodenstrukturen. Nachlaufende Schnecken transportieren das Bodenmaterial weg, um den Prozess des Lösens nicht zu behindern. Zusätzlich ist nach den Bohrspitzen eine horizontale Verbindung zwischen den Endlosschnecken angebracht, um ein Ausweichen aus der vorgesehenen Richtung zu verhindern. Die drei Schnecken sind so angeordnet, dass ein Überschneiden der einzelnen Flügel unmöglich ist. Nur ein kleiner Abstand zwischen den Schnecken erlaubt es dem Boden, sich an den Schnecken hindurch zu drücken. Wie schon am Beginn kurz erwähnt, sind die beiden äußeren Schnecken gegenläufig angeordnet. Beim Abbohren drehen sich beide Bohrer der gleichen Schneckenanordnung in die entgegengesetzte Richtung der dritten Schnecke. Erst dadurch wird ein gewisses Maß der Durchmischung ohne Heben und Senken des Anbauschlittens möglich gemacht. Ferner wird durch dieses Anordnungsprinzip eine bessere Vertikalität erreicht. Der Aufbau eines Dreifachschneckenbohrers und dessen Freiheitsgrade sind in Abbildung 32 dargestellt.

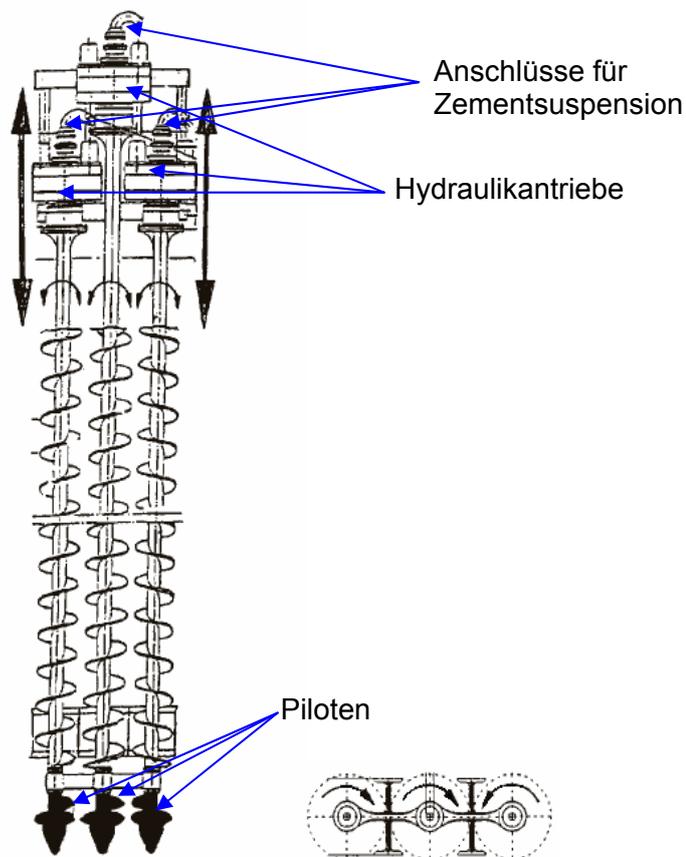


Abbildung 32: Aufbau eines Dreifachschnellenbohrers mit Darstellung der Drehrichtungen [31]

3.1.5 Baustelleneinrichtung

Zusätzlich zur Drehbohrgeräteeinheit zum Herstellen der Lamellen bzw. Säulen ist eine Mischanlage, wie in Abbildung 33 dargestellt, notwendig. Diese Anlage setzt sich aus Silos für Bindemittel, Füller und Zuschlagstoffen, sowie eines Wassertanks, Förderschnecken, Mischer, Vorratsbehälter und einer Pumpe zusammen.

Je nach Umfang des notwendigen Bindemittelseintrages bzw. der unterschiedlichen Zusatzstoffe variieren die Komponenten der Mischanlage in Anzahl und Dimension.

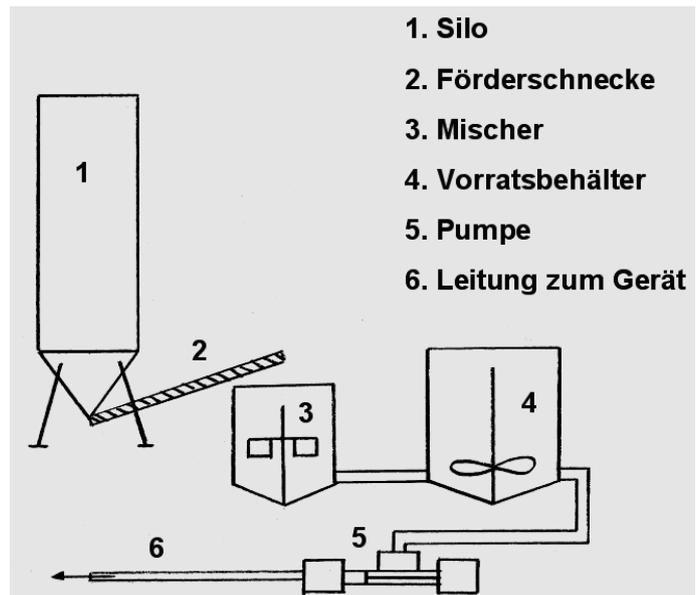


Abbildung 33: MIP Mischanlage [31]

Die Mischanlage dient zum Herstellen und zur Versorgung des Drehbohrgeräts mit der notwendigen Bindemittelsuspension. Die in den Silos gelagerten Bindemittel und Zusatzstoffe werden, je nach Rezeptur, über Förderschnecken in den Mischer geführt. Im Mischer wird unter Zugabe von Wasser die fertige Bindemittelsuspension zusammengestellt und weiter in einen Vorratsbehälter gepumpt. Dieser Vorratsbehälter ist unerlässlich, um eine kontinuierliche Versorgung der Geräteeinheit mit Suspension zu gewährleisten. Über eine Pumpe wird das Bindemittel durch eine Schlauchleitung an das MIP-Gerät geführt. Im Regelfall werden bis zu 200 m Versorgungsleitungen verlegt. An der Drehbohrereinheit befinden sich fix montierte Versorgungsleitungen, die die Suspension weiter zum Mäklärer leiten. Spezielle Kupplungen ermöglichen es, dass das Bindemittel in die hohlen Seelen der Endlosschnecken gelangt. Von dort kann es aus Öffnungen am Mischwerkzeug in den Boden eindringen. Der dabei unerlässliche Druck wird von der Pumpe an der Mischanlage über den Geräteführer gesteuert. Wie bei allen Bauaufgaben sind in der Planungsphase mehrere Parameter zu berücksichtigen. So ist darauf zu achten, dass genügend Platz (ca. 30 m²) für die Errichtung der Mischanlage vorhanden ist. Weiters sollte man bei der Platzwahl berücksichtigen, dass ein neuerlicher Ab- und Aufbau der Mischanlage im Rahmen der Baumaßnahme nicht notwendig sein sollte. Auf ausreichende Versorgung mit Wasser und Strom, sowie Zufahrtsmöglichkeiten für Silofahrzeuge, ist Bedacht zu nehmen.

Zum Betrieb einer MIP-Baustelle sind mindestens drei Personen notwendig. So sind zum Betrieb der Drehbohrereinheit ein Geräteführer, sowie ein Bohrhelfer erforderlich. Ein Maschinist ist zur Führung der Mischanlage abzustellen.

3.1.6 Qualitätssicherung

Wie bereits beschrieben, muss die Herstellung eines Bauvorhabens nach dem Mixed in Place-Verfahren den Anforderungen der ÖNORM EN 14679 genügen. Die vor Beginn der Bautätigkeiten eruierten Baugrundverhältnisse liefern das Anforderungsprofil für die Rezeptur der Bindemittelsuspension sowie Erkenntnisse über das anzuwendende Verfahren. Alle Elemente der Mischanlage verfügen über Sensoren und Abnahmeeinrichtungen, die es ermöglichen, die vorprogrammierte Rezeptur der Bindemittelmischung herzustellen. Am Drehbohrgerät befindet sich eine weitere Steuereinheit, das sogenannte MEDEF (siehe Abbildung 34). Dieses Bedienelement erlaubt dem Geräteführer, alle momentanen Bohrparameter wie Bohrtiefe, Bindemittelzugabe, Umdrehungszahl, Öldruck der Getriebeeinheit und Vertikalität zu überwachen und gegebenenfalls zu verändern. Alle diese Herstellungsparameter werden in einem Bohrprotokoll, wie in Abbildung 35 dargestellt, für jede einzelne Lamelle aufgezeichnet. Diese Aufzeichnungen lassen Rückschlüsse auf die Art und Lage der Bodenschichten zu, und es ist gegebenenfalls möglich, die Rezeptur und den Mischzyklus anzupassen. Die Bohrprotokolle werden elektronisch gespeichert und stellen einen wesentlichen Teil der Qualitätssicherung dar.

Weitere Aspekte und Umfang von Qualitätssicherungsmaßnahmen werden in Kapitel 5, „Bemessung und Prüfung“ erläutert.



Abbildung 34: MEDEF Bedienpult im Fahrerhaus [31]

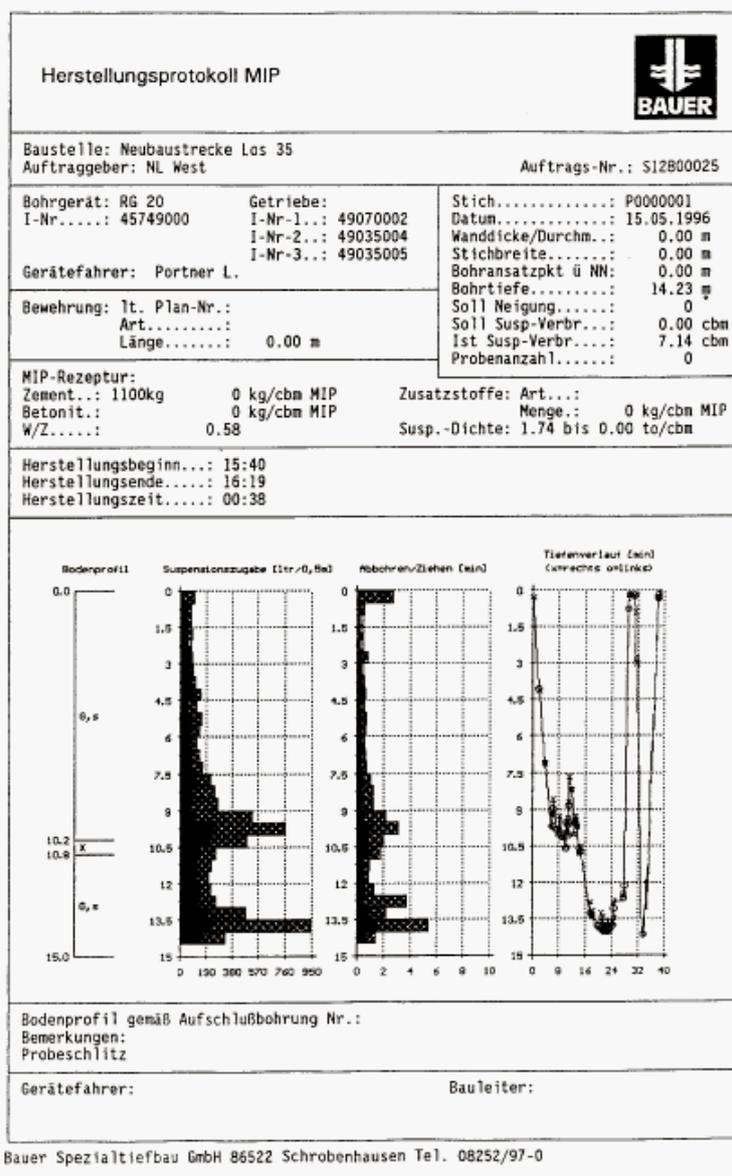


Abbildung 35: MIP Herstellingsprotokoll [31]

3.1.7 Zusammenfassung

Vorteile

Das Mixed in Place-Verfahren besticht durch seine hohe Produktivität und erweist sich gerade bei großen Projekten als wirtschaftlich. Die große Variabilität und einfache Anordnung der Säulenraster erlaubt eine gute Anpassungsfähigkeit auch in schwierigen Geländesituationen. Intensive Bodenerkunden und Prüfungen geben gute Rückschlüsse auf die zu erwartende Eigenschaften der Säule und den verbesserten Boden. Durch das beinahe bodenverdrängungsfreie Arbeiten sind die zu erwartenden horizontalen bzw. vertikalen Spannungen im Boden, die zu etwaigen Schäden an bestehenden Bauwerken führen

können, nahezu vernachlässigbar. Ein weiterer Vorteil dieser Technik im innerstädtischen Bereich ist, dass Erschütterungen während der Herstellung ausgeschlossen werden können und der Lärmpegel sich auf die Schallemission des Grundgeräts reduziert. Durch den relativ geringen Anfall an Bohrgut von ca. 10% bis 20% des behandelten Bodens reduzieren sich LKW-Fahrten einerseits bei der Entsorgung, und andererseits bei der Wiederbefüllung. Lediglich Transporte für das Bindemittel fallen an. Im Gegensatz zu Spundwand-, Bohrpfahlherstellung usw. nach traditionellen Methoden, lassen sich beim MIP-Verfahren, durch die nur wenigen manuellen Eingriffe seitens der Bohrhelfer Arbeitsunfälle beim Hantieren mit schweren Stahlprofilen auf ein Mindestmaß reduzieren.

Nachteile

Als Nachteil erweist sich bei MIP-Arbeiten die derzeit begrenzte Bohrtiefe von ca. 25 m. Nur durch großen maschinellen Aufwand ist es technisch möglich, größere Tiefen abzutiefen. Aufgrund der Anforderungen an die Vertikalität der Bohrschnecken sprengt man jedoch oft den wirtschaftlichen Rahmen von Projekten. Nur im asiatischen, amerikanischen und maritimen Bereich kommen so große Geräteinheiten zum Einsatz. Säulen mit einer Neigung zur Vertikalen, wie sie mit dem Düsenstrahlverfahren einfach herzustellen sind, lassen sich nur bedingt realisieren. Bei oft wechselnden Bodenschichten ist die Herstellung einer homogenen Struktur und damit die Qualität von MIP-Elementen stark schwankend und führt zu längeren Herstellungszeiten sowie zu einer aufwendigeren Prüfung. Durch die Verwendung des anstehenden Bodens als Zuschlagstoff ist die Qualität des Produkts vom Wassergehalt abhängig, und die Bindemittelsuspension auf die vorherrschenden Verhältnisse immer wieder abzustimmen. Problematisch gestaltet sich das gezielte Behandeln von Schichten oder Tiefenbereichen im Boden, das mit dem MIP-Verfahren nur eingeschränkt möglich.

3.2 Soil Mixing Wall-Verfahren

3.2.1 Einführung

In Japan ist die Technik der Soil Mixing Wall (SMW) bereits ein Verfahren, das alltäglich seine Anwendung findet. Viele Unternehmen nutzen diese Technik als Alternative zur herkömmlichen Produktion von Schlitzwänden, Dichtwänden und Gründungselementen. In Europa wurde in den letzten Jahren versucht, das bisher sehr erfolgreich eingesetzte MIP-Verfahren laufend zu verbessern und auch dessen Einsatzbereich zu erweitern. Gerade in bindigen Böden erweist sich das SMW-Verfahren als schnelles und effektives Verfahren. Im Unterschied zum MIP-Verfahren, bei dem mit schweren Dreifachendlosschnecken gearbeitet wird, erfolgt der Vorgang des Lösens und Mischens hier, nur in den ersten 2 bis 3 m des Bohrers. Die dadurch verringerte Reibung zwischen Mischwerkzeug und Boden und die Verwendung des leichteren Mischers mit Paddeln, lässt einerseits das Arbeiten mit Geräten geringeren Einsatzgewichtes und andererseits das Erreichen größerer Bohrtiefen zu.



Abbildung 36: SMW Dreifachbohrer mit Mischpaddel [31]

3.2.2 Verfahrensprinzip

Vergleiche Kapitel 3.1.2

3.2.3 Anwendung

Das SMW-Verfahren wird hauptsächlich für Dichtwände eingesetzt und in Kombination mit Bohrpfahlwänden zur Baugrubensicherung. Mitunter besteht die Möglichkeit, im Zuge der Herstellung zusätzlich Spundwände in die frische Dichtwand einzustellen.

Mit den in Europa eingesetzten Mischwerkzeugen werden derzeit Tiefen bis 15 m bei Durchmessern zwischen 3x330 mm bis 3x550 mm behandelt. In der Praxis sind zum Herstellen eines 10 m Tiefen SMW-Elementes etwa 10 Minuten (1 m/min) erforderlich.

3.2.4 Gerätetechnik

Trägergerät, Anbaumäkler und Drehantrieb

Das Trägergerät mit Anbaumäkler und der verwendete hydraulische Dreifachantrieb können in Anlehnung an das MIP-Verfahren aus Kapitel 3.1.4 übernommen werden.

Mischwerkzeug

Ein wichtiger Punkt dabei ist, dass dabei ist, dass durch Trennung der Funktionen Lösen, Fördern, Mischen und Verlängern der Führungsstangen eine möglichst geringe Reibung des Gestänges mit dem Boden-Suspensionsgemisch bzw. dem umgebenden Boden

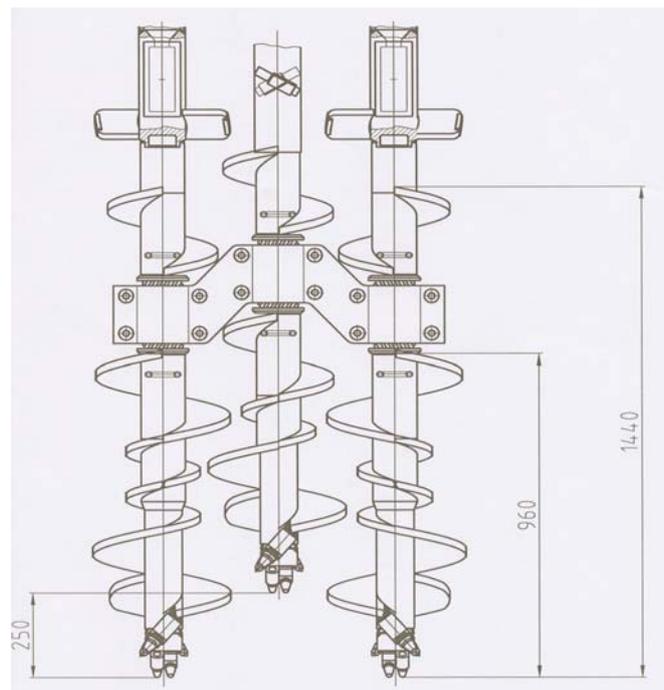


Abbildung 37: Neuentwicklung - SMW-Dreifachbohrwerkzeug [35]

entsteht. Damit soll ermöglicht werden, auch mit Geräten geringer Leistung ein homogenes Mischungsergebnis zu erreichen, um die Qualität der Wand zu gewährleisten. Gelöst wird der Boden bei jeder der drei Schnecken durch zwei Schneiden mit tangential schneidenden Flachzähnen und einen mittig angeordneten Piloten. Die beiden äußeren Gestänge schneiden in entgegengesetzter Richtung drehend vor, die mittlere Schnecke läuft etwas oben versetzt nach (vergleiche Abbildung 37). Während des Schneideprozesses wird dem gelösten Boden ständig aus radial vom Zentrum weg verlaufenden Düsen Suspension zugeführt, um ihn zu verflüssigen, zu stabilisieren, und später zu binden. Über den einzelnen Piloten sind kurze Schnecken angeordnet, die den bereits vermischten Boden von den Schneiden wegfördern, und damit eine Beeinträchtigung des Löseprozesses verhindern [35].

Um die Überschneidung der drei Gestänge zu gewährleisten, ohne dass die Schnecken miteinander kollidieren, verjüngen sich die äußeren Schnecken im Bereich des Anfangs der mittleren Schnecke. Die Lagerung der drei Schnecken gegeneinander erfolgt im Anfangsbereich so, dass der Materialfluss immer gewährleistet bleibt. Über den Schnecken befindet sich die dritte Sektion, der Mischbereich. Durch ineinander greifende Mischpaddel wird eine relativ homogene Mischung über die ganze Breite des Schlitzes erreicht. Die Gestänge schließen mit einer einfachen Bohrverlängerung ab. Dadurch kann die erforderliche Tiefe des Schlitzes gewährleistet werden, ohne dass auf der gesamten Länge Reibung entsteht. Zusätzlich ermöglicht dieser paddellose Bereich während des Abteufens eine gleitende Führung der drei Gestänge gegeneinander, damit beim Abbohren eine möglichst gute Vertikalität gegeben ist. Zur Überwachung befinden sich, wie an den Endlosschnecken, an den äußeren Gestängen Inklinometermesseinrichtungen.

Durch die Überlappung der Schnecken wird eine relativ gleichmäßige Schlitzdicke erreicht. Hingegen wird bei anderen Verfahren diese Gleichmäßigkeit erst durch den Einsatz von starren Nachschneideplatten erzielt. Diese Nachschneideplatten haben natürlich wieder durch eine potentiell hohe Reibung Einfluss auf den Verfahrensfortschritt [35].

3.2.5 Baustelleneinrichtung

Vergleiche Kapitel 3.1.5

3.2.6 Qualitätssicherung

Vergleiche dazu Kapitel 3.1.5 bzw. Kapitel 5

3.2.7 Zusammenfassung

Durch die drei kurzen Schneckenstummel, die einfach über Bohrstangen verlängert werden können, verringert sich das Gewicht des Mixers. Damit ist auch ein Arbeiten mit kleineren und damit leichteren Maschinen möglich. Beim MIP-Verfahren tritt Reibung zwischen Boden und Schnecken über die gesamte Länge der Mischwelle auf. Hingegen ist beim SMW-Verfahren die Reibung nur auf die kurzen Schneckenstummel beschränkt. Diese reduzierte Reibung ermöglicht es mit Geräten geringern Einsatzgewichts, in Böden mit hohen bindigen Anteilen verfestigte Bodenkörper herzustellen. Die dadurch verringerte Reibung zwischen Mischwerkzeug und Boden und die Verwendung des leichteren Mixers mit Paddeln, lässt einerseits das Arbeiten mit Geräten geringeren Einsatzgewichtes und andererseits das Erreichen größerer Bohrtiefen zu.

3.3 Wet Speed Mixing

3.3.1 Einführung

Das Wet Speed Mixing (WSM)-Verfahren ist ein weiterer Vertreter der verdrängungsfreien Techniken zur Pfahlherstellung, bei der der Boden als Zuschlagstoff verwendet wird. Dieses Nassmischverfahren wird mit einem, in Ausnahmefällen mit zwei Mixchern, ausgeführt. In Österreich werden jedoch bis dato nur Drehbohrereinheiten mit einem Mischer eingesetzt. Wie die zuvor erwähnten Techniken ist auch das Wet Speed Mixing-System eine Alternative zu Spundwänden, zum Düsenstrahlverfahren und anderen Verbau- und Gründungselementen.

3.3.2 Verfahrensprinzip

Zu Beginn der Arbeiten ist ein Arbeitsplanum zu errichten. Nach dem Ausrichten der Bohreinheit über dem zuvor festgelegten Bohrpunkt beginnt der eigentliche Prozess. Das Mischwerkzeug wird in den Boden eingedreht und unter ständiger Suspensionszufuhr, bis in die gewünschte Tiefe abgebohrt. Am Schaft der Mischwelle angebrachte Düsen bringen die Bindemittelsuspension unter hohem Druck in den Boden ein. Dabei ist festzuhalten, dass nicht wie beim Düsenstrahlverfahren, Schneiddüsen zur Vergrößerung des Querschnitts dienen. Vielmehr unterstützen die in einem spitzen Winkel austretenden Schneidstrahlen den Löseprozess. Nach dem Erreichen der Endtiefe wird der Mischer unter Beibehaltung der Drehrichtung wieder zurückgezogen. Das schon mit Suspension vermengte Bodengemisch wird nochmals, unter ständiger Suspensionszugabe, mit dem Mischwerkzeug durchfahren und der Pfahl bzw. die Säule fertig gestellt. Bei bindigen Böden und Böden mit Hohlräumen ist auch ein stetiges Vor- und Zurückziehen des Mixchers zur vollständigen Homogenisierung notwendig. Abbildung 38 stellt den Herstellungszyklus einer WSM-Säule dar.

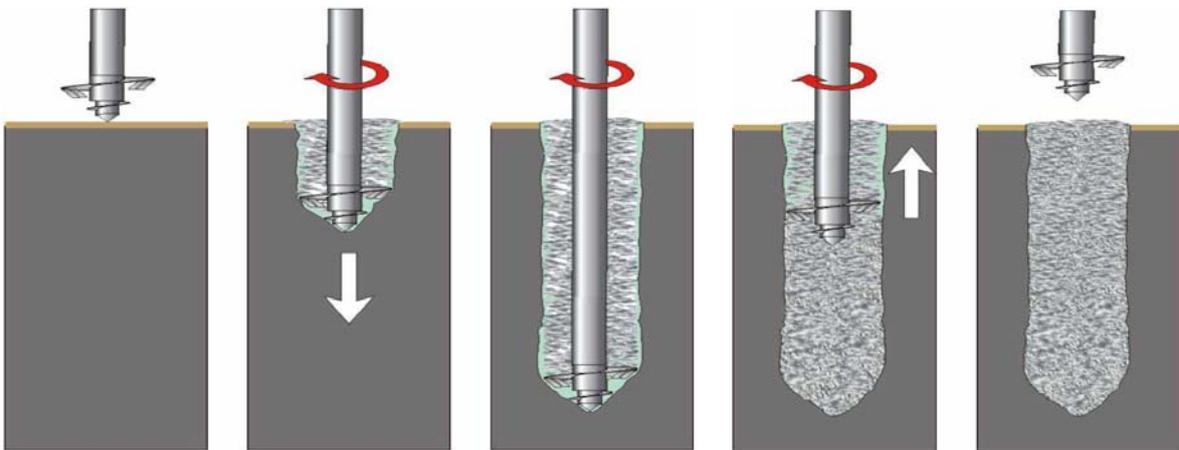


Abbildung 38: Herstellungszyklus einer WSM Säule [58]

3.3.3 Anwendung

Das WSM-Verfahren ist in bindigen sowie in rolligen Böden mit ausreichendem Porenvolumen einsetzbar. Aufgrund der Masse und Geometrie des Mischwerkzeuges ist es mit diesem Mischer möglich, auch größere Steine und Blöcke zu durchhörern. Mit den angebotenen Mischwerkzeugen können Säulen mit einem Durchmesser bis 0,6 m hergestellt werden. Die maximale Länge der Säulen liegt derzeit in einem Bereich von 26 m.

3.3.4 Gerätetechnik

Trägergerät , Anbaumäkler und Antriebseinheit

Als Trägergerät wird wieder eine Tragraupe wie in Abbildung 39 eingesetzt. Ein Teleskopmäkler dient zur Führung der Bohrstangen und zur Montage der hydraulischen Antriebseinheit. Die Trägergeräte sind meist vielseitig einsetzbar. Mit überschaubaren Handgriffen kann das Traggerät mit Teleskopmäkler relativ rasch z.B. zum einem DSV-Gerät umgebaut werden. Durch Auswechslung der hydraulischen Antriebseinheit eröffnen sich weitere Einsatzmöglichkeiten, wie zum Beispiel als Drehbohrgerät für SOB-Pfähle, oder als Rammgerät für Spundwände.

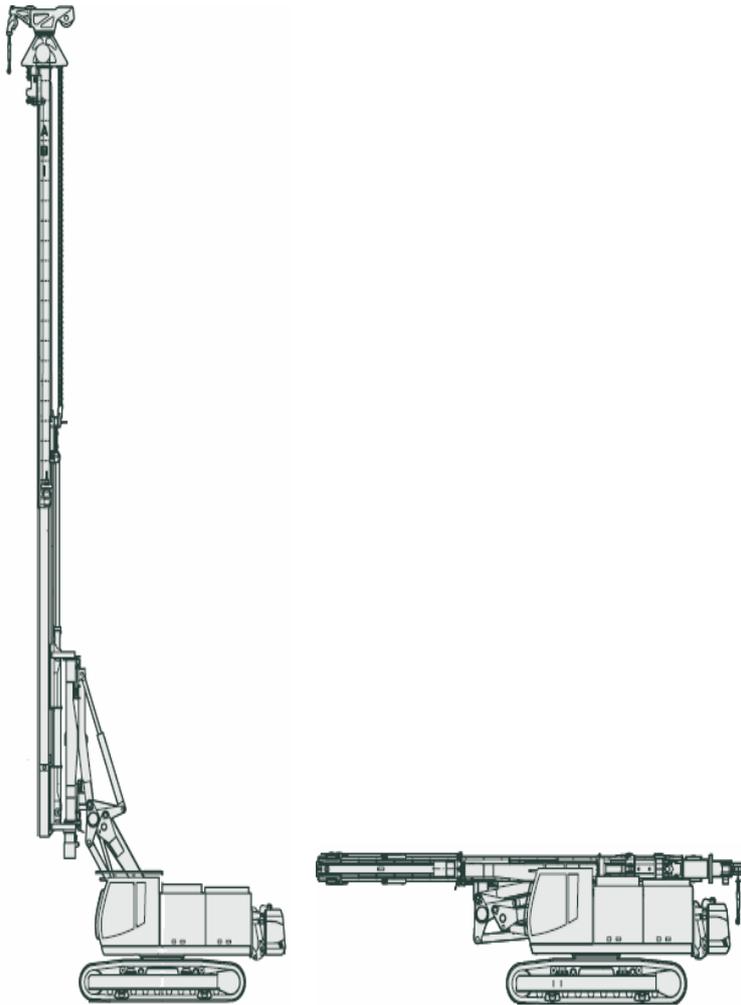


Abbildung 39: Trägergerät mit Teleskopmäkler TM 16/20 [59]

Bohrtiefe	22 m
Bohrdurchmesser	400 bis 1200 mm
Fahrwerksbreite	2,30 bis 3,80 m
Einsatzgewicht	60 bis 65 to
Höhe	25 m
Leistung	400 bis 470 kW

Transportdaten:

Breite	3,0 m
Höhe	3,5 m
Länge	12,8 m

Der Antrieb, der am Telekosmäkler montiert ist, wird mit besonderen Kupplungen ausgestattet, die es erlauben, die Zementsuspension durch den Antrieb in die hohlen Seelen der Bohrstangen weiterzuleiten. Die in Abbildung 40 dargestellten Antriebe sind getriebelos ausgeführt und mindern damit den Geräuschpegel.



Abbildung 40: Bohrantriebe MDBA (links), TMBA (rechts) [59]

Drehmoment	3000 daNm	
max Drehzahl	190 min ⁻¹	
hydr. Eckleistung	280 kW	
Arbeitsdruck	32 Mpa	
Gewicht (inkl. Kardanwelle)	1580 kg	
Betonierdurchführung	DN 100	
H	2050 mm	
B	910 mm	

Tabelle 9: Technische Daten Bohrantrieb MDBA 3000 [59]

Mischwerkzeug

Der Mischer ist mächtiger ausgeprägt als die in den MIP- bzw. SMW-Verfahren verwendeten. Das Mischwerkzeug mit ca. 2 m Länge ist in vier Sektionen unterteilt. Die erste Sektion an der Spitze des Mixers ist mit auswechselbaren Piloten zum Aufreißen der Bodenstruktur versehen. Am hohlen Schaft des Werkzeuges befinden sich Öffnungen für die Schneidstrahlen, die im spitzen Winkel und unter hohem Druck austreten. Diese Suspensionsstrahlen unterstützen das Lösen der Bodenstruktur und vermischen diese gleichzeitig mit Suspension. Die zweite und dritte Sektion bilden zwei in Drehrichtung geneigte Schaufeln, die wiederum mit Piloten versehen sind. Spiralförmig um die Schaufel legt sich

eine Noppenpanzerung, die den Verschleiß begrenzen soll. Noppenpanzerung und Außenrand der Schaufeln bilden den endgültigen Durchmesser des WSM-Körpers. Im Zentrum der Schneidschaufel sind Ausnehmungen, durch die das gelöste und mit Suspension vermengte Bodengemisch nach oben gefördert wird. Am Ende des Mixers der vierten Sektion befinden sich vier horizontale Mischpaddel, die im Winkel von 90° gegeneinander angeordnet sind. Die verkreuzten Mischpaddel haben eine knetende und mischende Wirkung. Zu erwähnen sei noch, dass Unternehmen, die sich für das WSM-System entscheiden, Adaptierungen am Mischwerkzeug vornehmen, um es optimal auf Böden im Einsatzgebiet anzupassen. Dabei wird mit zusätzlichen Bohrungen am Schaft, aber auch mit verschiedenen Piloten experimentiert.



Abbildung 41: Wet Speed Mixing Mischerwerkzeug [58]

3.3.5 Baustelleneinrichtung

Die Einrichtung der Baustelle gleicht im Allgemeinen der einer MIP- bzw. SMW-Mischanlage. Neben Silos, Wiege- und Messeinrichtung, sowie Wassertank und Rührwerk mit Vorratsbehälter wird eine zusätzliche Hochdruckpumpe verwendet. Die Pumpe, mit der das Drehbohrgerät mit Zementsuspension versorgt wird, ist leistungsfähiger und für höhere Drücke ausgelegt als jene Pumpen, die bei MIP-Systemen eingesetzt werden. Der notwendige höhere Druck resultiert daraus, dass wie anfangs beschrieben, die Suspension auch zum Schneiden bzw. Lösen des Bodens genutzt wird. Zur Bedienung einer

gesamten Wet Speed Mixing-Einheit sind Geräteführer, ein Bohrhelfer und ein Maschinist für die Mischanlage notwendig. Die Versorgung mit Zementsuspension erfolgt über eine Hochdruckschlauchleitung und man kann im Allgemeinen von einer Reichweite bis ca. 200 m ausgehen.

3.3.6 Qualitätssicherung

Monitoring und Qualitätssicherung auf der Baustelle gleichen allen zuvor beschriebenen Verfahren. Relevante Daten werden über Messeinrichtungen elektronisch dokumentiert. Feldversuche an frischen und an bereits ausgehärteten Säulen, sowie aus Abschöpfproben gewonnene Prüfkörper liefern im Labor Werte zur Festigkeitsentwicklung sowie Modulsteifigkeiten. Eine nähere Beschreibung dieser Methoden erfolgt im Kapitel 5 – Bemessung und Prüfung.

3.3.7 Zusammenfassung

Im Wesentlichen unterscheiden sich die zuvor beschriebenen Vorteile beim MIP-Verfahren nicht von denen des WSM-Verfahren. Anzumerken wäre jedoch, dass durch die massive Ausführung des Mischwerkzeugs größere Hindernisse im Boden durchdrungen werden können und der Schneidstrahl den Vorgang des Lösens und Mischens unterstützt. Aufgrund der Ausführung eines nur einzigen Mischwerkzeugs liegt die Tagesleistung jedoch hinter der der Dreifachschnecken des MIP- bzw. SMW-Verfahrens.

3.4 Trockeneinmischtechnik

3.4.1 Einführung

Die Trockeneinmischtechnik wird im Allgemeinen in den skandinavischen Ländern am häufigsten verwendet. Nordische Länder wie Schweden, Finnland, Norwegen und Teile Großbritanniens zeichnen sich durch ihre weichen Ton- und Torfböden aus. Es gestaltet sich daher schwierig, auf diesen Untergründen eine ausreichende Tragfähigkeit für Bauwerke zu erreichen. Solche Böden weisen hohe Feuchtigkeitswerte auf, daher ist es nicht sinnvoll, Suspensionen als Bindemittel einzusetzen, um den Boden noch weiter zu wässern. Trockene pulverförmige Bindemittel aus Kalk und Zement erweisen sich bei diesen Böden als weitaus vorteilhafter. Überdies wird das Risiko vermindert, dass bei tiefen Temperaturen, wie sie naturgemäß in einigen der oben genannten Ländern vorkommen, ein Gefrieren der Bindemittelsuspension eintritt.



Abbildung 42: Keller Grundbau Trockenmischeinheit [35]

3.4.2 Verfahrensprinzip

Bevor der eigentliche Mischvorgang beginnen kann, ist ein Arbeitsplanum zu errichten, damit man einen rascheren Arbeitsfortschritt ermöglicht. Das Trägergerät wird danach an den vorher festgelegten Bohrpunkten positioniert. Das eigentliche Mischverfahren erfolgt dann nach der nordischen Methode (vergleiche Kapitel 2.2.1). Dabei wird das Mischwerkzeug bis in die geforderte Tiefe abgebohrt. Der Mischer mit seinen Misch- und Schneidblättern lockert beim Bohren die Bodenmatrix auf und bereitet sie für den Bindemittelntrag vor. Nachdem die planmäßige Tiefe erreicht wurde, beginnt das Ziehen des Mischwerkzeuges. Dabei wird die Drehrichtung geändert und das Bindemittel gleichzeitig durch eine Düse oberhalb des Mischwerkzeugs ausgestoßen (siehe Abbildung 44). Zur technischen und wirtschaftlichen Optimierung der Säule wird Pressluft als Trägermedium für das trockene Bindemittel herangezogen. Dadurch ist es möglich, Säulen mit einem größeren Durchmesser als ihn das Mischwerkzeug selbst aufweist, zu erzeugen. Zusätzlich wird eine gute Verteilung des Bindemittels und damit die gewünschte Homogenität der Mischung in der Säule gewährleistet. Dem Geräteführer ist es möglich, Drehzahl und Druck, sowie die Menge des Bindemittels zu verändern. Auf diese Weise kann zu jeder Zeit des Mischvorganges auf die vorherrschenden Bodeneigenschaften reagiert werden. Weiters sichert ein zyklisches Vor- und Zurückziehen des Mixers, dass der Querschnitt der Säule gleichmäßig mit Bindemittel versetzt wird.

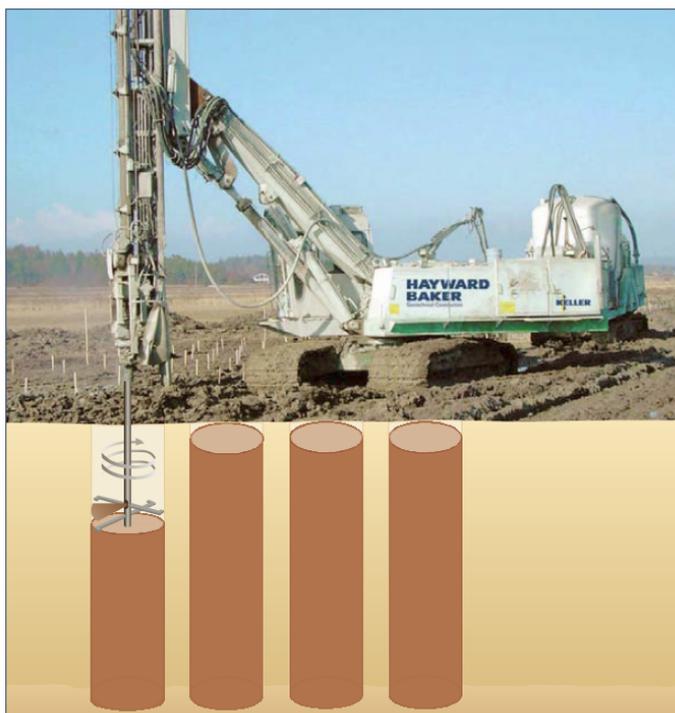


Abbildung 43: Trockenmischgerät [60]

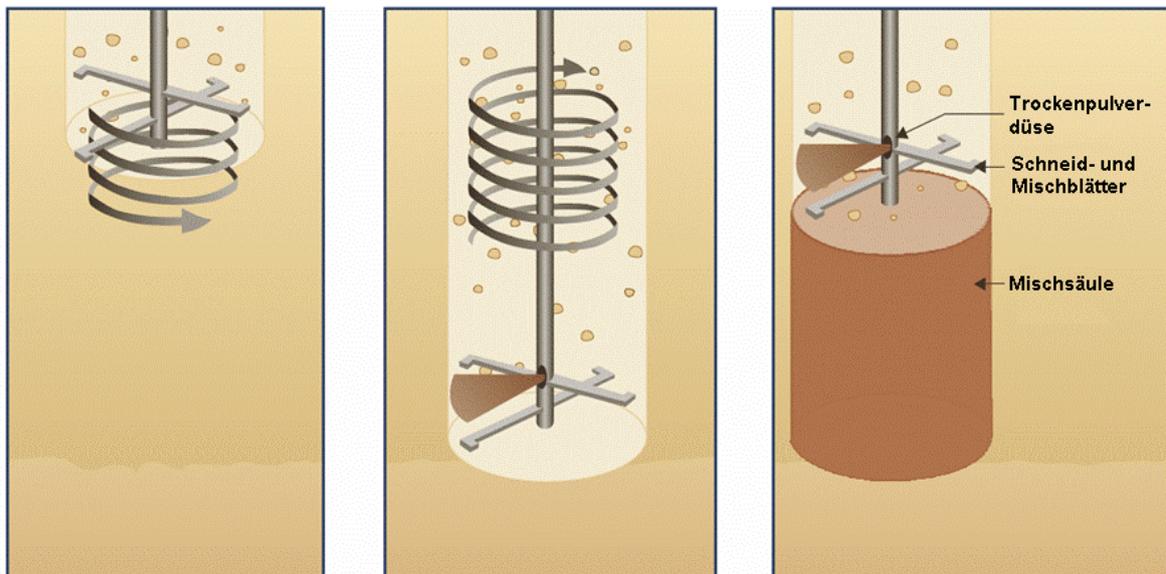


Abbildung 44: Verfahrensschritte zur Herstellung einer Trockenmischsäule [60]



Abbildung 45: Fertigestellte Trockenmischsäulen mit einem Durchmesser von 60 cm [35]

3.4.3 Anwendung

Dieses Verfahren eignet sich besonders gut für schluffige, tonige Böden mit einem Wassergehalt von $> 60\%$, mitunter sogar für Böden mit hohen organischen Anteilen. Dabei kann eine merkliche Festigkeitszunahme bereits nach wenigen Stunden festgestellt werden. Nach drei Wochen sind bereits 90% der zu erwartenden Festigkeit erreicht. Die Verbesserungswirkung beruht jedoch nicht nur auf der Tragfähigkeit einer einzelnen Säule, sondern auch auf die Tragfähigkeit von Säulen, die in einem flächig angeordneten Säulenraster zusammenwirken [35].

Während zu Beginn der achtziger Jahre Zement allein zur Anwendung kam, wird heute eine Kalk-Zement-Mischung eingesetzt. Abbildung 46 stellt die Scherfestigkeit in Abhängigkeit der Bodenart und des Anteils an Kalk/Zement-Bindemittel dar. Das Diagramm zeigt, dass die Scherfestigkeit mit der Menge des eingebrachten Bindemittels und der

Reaktionszeit steigt. Gut zu erkennen ist, dass bei dominierenden Tonfraktionen die Scherfestigkeit zunimmt und mit steigenden organischen Anteilen abnimmt.

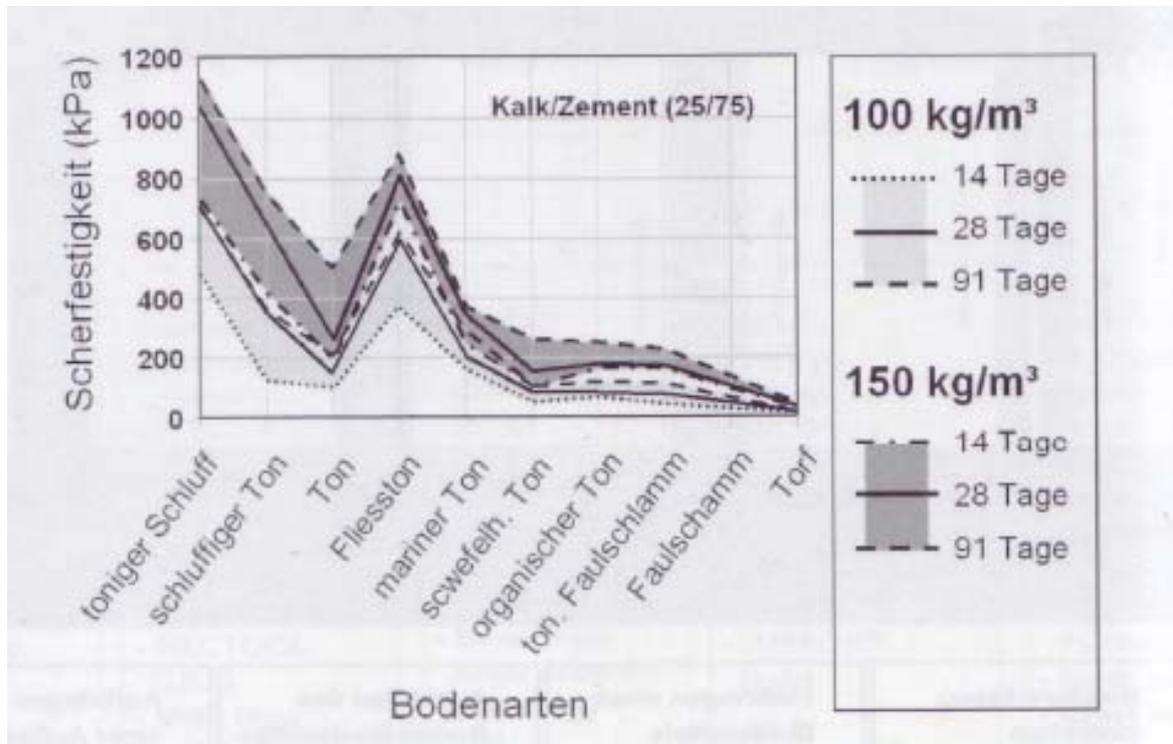


Abbildung 46: Mit dem Trockenmischverfahren erreichte Scherfestigkeit bei verschiedenen Böden [38]

Mit dem eben vorgestellten Verfahren werden heute Säulen mit einem Durchmesser von 60 cm produziert. Die durchschnittliche Umdrehungsgeschwindigkeit des Mischwerkzeuges liegt bei ca. 200 U/min. Trockenmischsäulen können bis zu einer Tiefe von 24 m gefertigt werden. Anwendung findet dieses Verfahren neben den Herstellung herkömmlichen Säulen für Pfahlgründungen, die bis in tragfähige Bodenschichten eingebunden werden, auch bei großflächigen Stabilisierungen, wie z.B. bei Böden mit hohen organischen Bestandteilen. Erfolgreich wird das Verfahren auch in Kombination mit Massenstabilisierungen eingesetzt (siehe Abbildung 47).

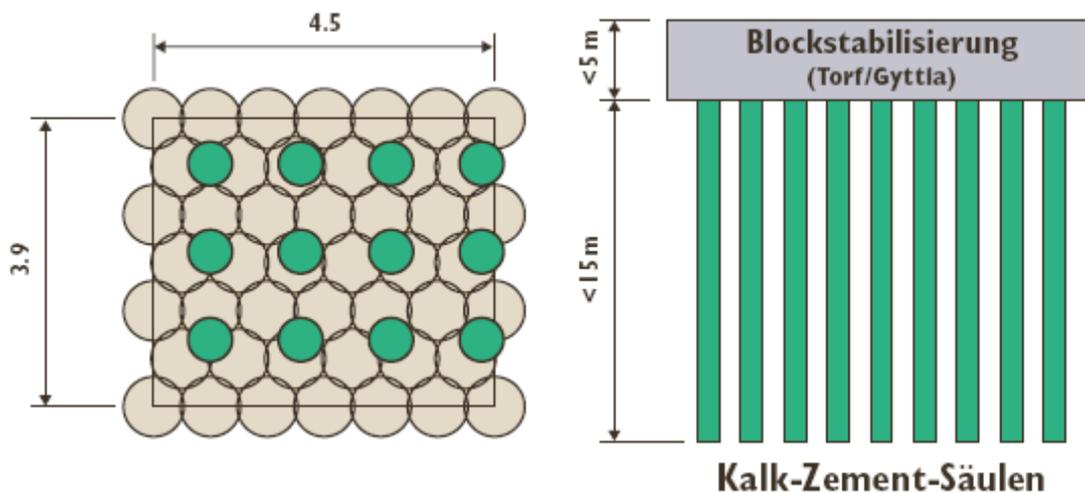


Abbildung 47: Kombinierte Säulen-Block Stabilisierung [35]

3.4.4 Gerätetechnik

Trägergerät ,Mäkler und fahrbare Mischanlage

Die hier vorgestellte Trockeneinmischtechnik nach Keller Grundbau besteht aus einer Tragraupe mit einer an einem Teleskopmäkler geführten Bohrstange. Das Grundgerät mit Mäkler und Mischeinheit weist ein geringes Gewicht (ca. 35 to) bei einem sehr tief liegenden Schwerpunkt auf. Der Mischer (siehe Abbildung 49), der verlängert am Bohrrrohr montiert ist, wird über einen hydraulischen Antrieb in Rotation versetzt. Am Bohrgestänge sind Inklinometer zu Überwachung der Vertikalität sowie Druckaufnehmer installiert. Durch eine Hydraulik kann der Mäkler vor, zurück bzw. zur Seite gekippt werden um, Säulen auch in einem gewissen Winkel abteufen zu können.

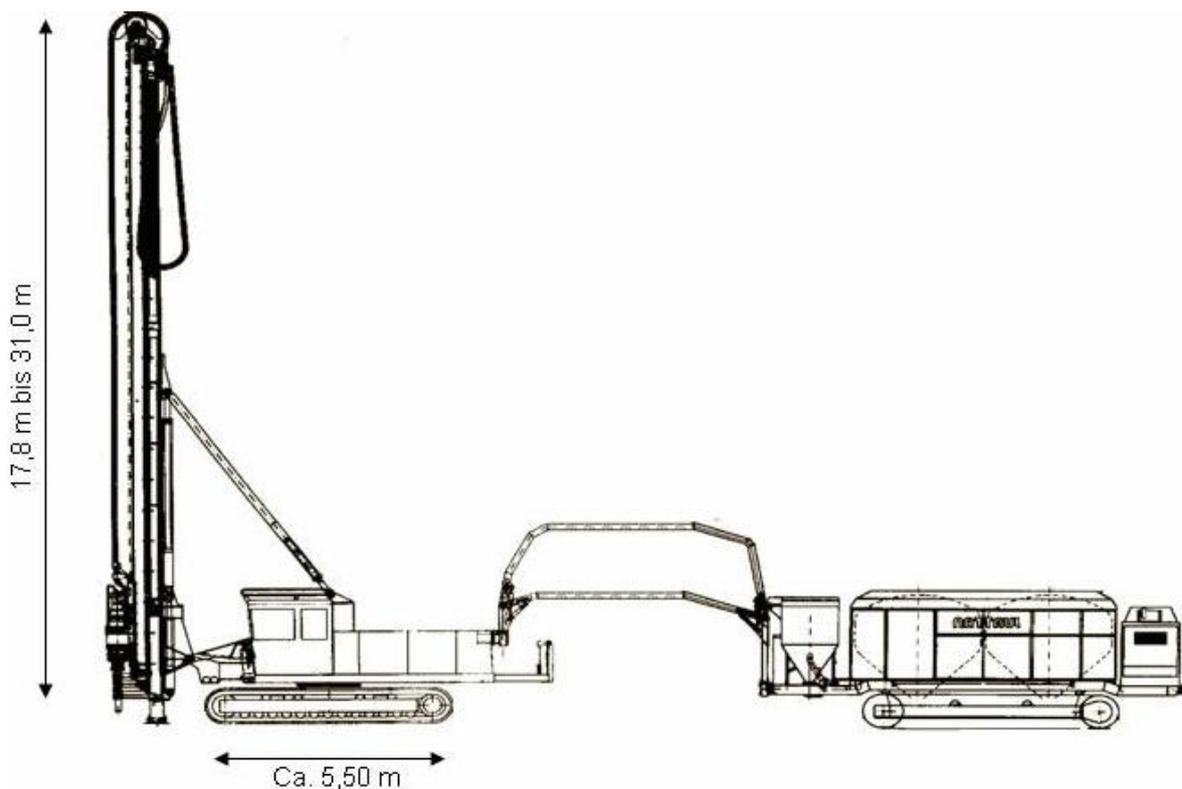


Abbildung 48: Trockenmischeinheit mit nachlaufender mobiler Mischanlage [37]

Die Hauptabmessungen des Trägergerätes betragen für den Transport zur und von der Baustelle:

Länge:	24,0 m
Breite:	3,25 m
Höhe:	3,75 m
Gewicht:	35 to

Mischerkzeug

Das in Abbildung 49 dargestellte Mischwerkzeug wird an der Bohrstange montiert. Wie aus der Abbildung zu entnehmen ist, sind Mischer für die Trockenmischtechnik im Aufbau einfacher und leichter ausgeführt, als jene der in der Nassmischtechnik eingesetzten. Die drei Mischflügelpaare sind zueinander im Winkel von 90° angeordnet, wobei die Mischflügel eines Paares gegen einander geneigt sind. Am oberen Drittel, am Schaft des Mischwerkzeugs, befindet sich die Öffnung, aus der das Bindemittel ausgeblasen wird.



Abbildung 49: Mischwerkzeug "PINNBORR" [35]

Über Schlaucheinheiten wird das zubereitete Bindemittel an das Trägergerät geführt und zur Bohrstange geleitet. Über eine Hohlseele im Bohrgestänge gelangt das mit Pressluft vermischte Trockenpulver zur Auslassdüse des Mixers.

3.4.5 Baustelleeinrichtung

Die Mischanlage, auch als Shuttle (siehe Abbildung 50) bezeichnet, ist mit einer eigenen Antriebseinheit sowie mit Silos für die verschiedenen Bindemittel ausgerüstet. Das Kalk-Zement-Gemisch kann direkt in der mobilen Anlage hergestellt oder in einer stationären Anlage gemischt und in das Shuttle gepumpt werden. Weiters befinden sich auf dieser Anlage Messeinheiten und Aggregate für die Strom- bzw. Druckluftversorgung.



Abbildung 50: Mobiler LC-PREMIER [35]

Aufgrund der nachlaufenden Mischanlage erübrigt sich oft die Installierung einer stationären Mischanlage. Die Tanks der mobilen Mischanlage können direkt von Transportfahr-

zeugen befüllt werden. Andernfalls beschränkt sich die Einrichtung der Mischanlage auf das Aufstellen von Vorratssilos.

3.4.6 Qualitätssicherung

Je nach Boden muss zuerst im Labor festgestellt werden, welche Bindemittelrezeptur den erwünschten Effekt bei der Stabilisierungsmaßnahme herbeiführt. Bei Böden mit organischen Bestandteilen sind besondere Prüfungen notwendig zum Beispiel ist auf die Aggressivität von Huminsäure im Zusammenhang mit Zement zu achten.

Wie bei den bereits erläuterten Verfahren der tiefreichenden Bodenstabilisierung lehnt sich die Qualitätssicherung der Trockenmischtechnik an diese Verfahren an. Deswegen wird an dieser Stelle auf weitere Ausführungen verzichtet und auf das Kapitel 5 „Bemessung und Prüfung“ verwiesen.

3.4.7 Zusammenfassung

Vorteile

Die Vorteile der soeben beschriebenen Technik liegen in ihrer einfachen Handhabung. Durch Einsatz von trockenen Bindemitteln erübrigt es sich, ein Auffangbecken für die überschüssige Suspension zu errichten und weiters die Entsorgung dieser zu bewerkstelligen. Die verwendeten Geräteeinheiten sind leichter, als jene der Nassmischverfahren. Auch die Mischer sind einfacher und schlanker ausgeführt. Durch den Betrieb einer mobilen Mischanlage ist die Trockenmischeinheit wesentlich flexibler auf der Baustelle einzusetzen als bei anderen Verfahren. Positiv wirkt sich die Einsparung einer umfangreichen Mischanlage natürlich auch auf die Kosten aus.

Nachteile

Größter Nachteil der Trockenmischeinheit ist sicherlich das eingeschränkte Anwendungsspektrum der zu stabilisierenden Böden. Böden, wie sie großteils in Österreich anzutreffen sind, eignen sich nicht für diese Technik. Auch die begrenzte Bohrtiefe, abhängig von den „kleinen“ Geräteeinheiten, erweist sich oft als Nachteil.

4 Hybridtechniken

4.1 Allgemeines

Das Wort "Hybrid" kommt ursprünglich aus dem Griechischen und bedeutet "gemischt, von zweierlei Herkunft" [62].

Einige Verfahren nutzen Techniken die der tiefreichenden Bodenstabilisierung ähnlich sind. Diese Techniken, Hybridtechniken genannt, verwenden neben der mechanischen Bodenstabilisierung mit Bindemitteln oft noch eine hydraulische Komponente, wie z.B. das Düsenstrahlverfahren. Hybridtechniken werden kontinuierlich weiterentwickelt, um sie auf besondere Boden- bzw. Gründungsverhältnisse anzupassen [3]. Folgend werden auf den nächsten Seiten einige dieser Hybridtechniken vorgestellt.

4.2 Cutter Soil Mixing-Verfahren

4.2.1 Einführung

Das Cutter Soil Mixing (CSM)-Verfahren wurde 2003 von der Bauer Maschinen GmbH in Kooperation mit Soletanche Bachy und A. Wöhrl Spezialtiefbau vorgestellt. Die eigentliche Intention, die zur Entwicklung des Verfahrens führte, lag darin, dass man versuchte, den großen Erfahrungsreichtum aus der Schlitzwandfrästechnik anzuwenden und gleichzeitig den anstehenden Boden als Baustoff zu nutzen.

Das CSM – Verfahren unterscheidet sich von den typischen Mischverfahren dadurch, dass sich hier Fräsräder um die horizontale Achse drehen, hingegen rotieren beim Mixed in Place Verfahren (vergleiche Kapitel 3.2) die Mischwerkzeuge um die vertikale Achse. Wie bei anderen Verfahren wird der gelockerte Boden mit einer selbsterhärtenden Bindemittelsuspension versetzt und gleichzeitig durchmischt.

Zur Anwendung kann diese Technik als Alternative zu dichten Schlitzwänden, Bohrpfahlwänden oder Spundwänden kommen. Durch Einbau einer Bewehrung (Stahlprofile, Bewehrungskorb) ist auch die Herstellung von Gründungselementen möglich.

4.2.2 Verfahrensprinzip

Vor Beginn der eigentlichen Stabilisierungsarbeiten ist ein Arbeitsplanum für die Tragraupe zu errichten, sowie ein ausreichend dimensionierter Vorlaufgraben, damit die anfallende Überschusssuspension abfließen kann. Nach dem Positionieren des CSM-Gerätes wird der Fräskopf unter ständiger Zugabe von Bentonitsuspension bis zur geforderten Tiefe abgeteuft. Die Suspension dient neben den Fräszähnen zur Auflockerung und Verflüssigung des Bodens. Die Pumpmenge der Suspension erfolgt dabei in Abstimmung mit dem Fräsfortschritt. Nach dem Erreichen der Endtiefe beginnt der Ziehvorgang. Beim Ziehen des Fräskopfes stellt der Geräteführer von Bentonit- auf Zementsuspension zur endgültigen Herstellung des Wandelementes um. Eine homogene Mischung des Bodens mit Zementsuspension wird durch gegensinnige Drehrichtung der Fräsräder erreicht. Alternativ kann, je nach vorhandenen Bodenverhältnissen, bereits beim Einfahren in den Boden mit Zementsuspension gearbeitet werden. Bei der Herstellung der Wandelemente wird nach dem bekannten Pilgerschrittverfahren nach Abbildung 51 vorgegangen. Das im Vorlaufgraben aufgefangene Boden-Bentonit-Gemisch wird in einer Entsandungsanlage separiert und wieder in den Kreislauf eingespeist. Das anfallende überschüssige Material wird getrocknet und anschließend entsorgt.

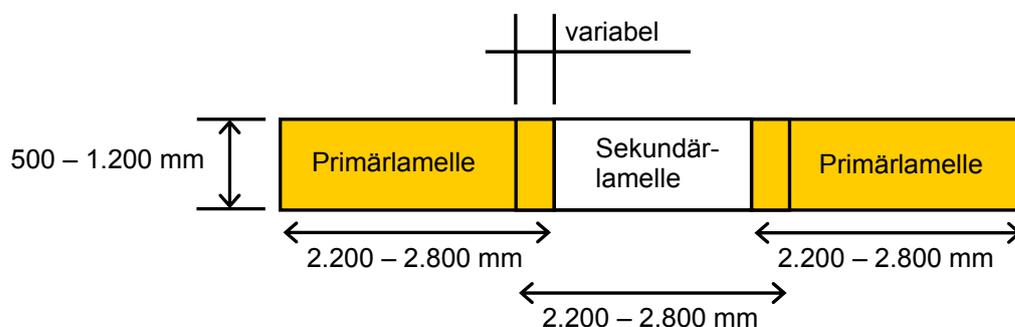


Abbildung 51: Pilgerschrittverfahren bei der Herstellung einer CSM-Wand

Das CSM-Verfahren bietet hier die Möglichkeit, an benachbarte Elemente „frisch-in-frisch“ oder an bereits ausgehärteten Soil Mix Wall-Körper „fest-in-fest“ anzuschließen. Dadurch ist eine aufwendige Fugenabdichtung bei längeren Arbeitsunterbrechungen, wie bei der Produktion von Schlitzwänden, nicht notwendig.

Im Gegensatz zu Soil-Mixing-Verfahren mit Mehrfachschnellen-Systemen zur Erstellung von Baugruben- oder Dichtwänden, bei denen die Lösebewegung immer in einer Drehung um eine vertikale Achse besteht, erhält man beim CSM-Verfahren mit sich um horizontale Achsen drehenden Fräsrädern einen Fräskörper mit rechteckiger Kontur. Die volle Breite der Fräselemente entspricht daher der effektiven Wanddicke.

Beim Einsatz eines Zweiphasensystems besteht die Möglichkeit, während des Abteufens den Vorgang zu stoppen und später weiterzuarbeiten. Lediglich nachdem schon mit der Injektion der Zementsuspension begonnen wurde, empfiehlt es sich, das Wandelement in einem Vorgang fertig zustellen.

4.2.3 Anwendung

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, wird das CSM-Verfahren als Alternative zu Bohrpfehlwänden, Schlitzwänden für Dichtwände und für statisch tragende Verbauwände, durch Einstellen von Stahlprofilen, verwendet. Das CSM-Verfahren hat sich erfolgreich in sandigen, kiesigen Böden durchgesetzt, aber auch in schluffigen wassergesättigten Sanden können erfolgreich Wandelemente erstellt werden. Derzeit laufende Forschungen peilen auch den Einsatz dieser Technik in bindigen Böden an, um das Anwendungsspektrum weiter auszudehnen [20]. Durch das vibrations- und lärmarme Verfahren ist eine Installation von CSM-Körpern an angrenzenden Gebäuden oder Bauwerken, ohne größere Setzungen erwarten zu müssen, durchführbar.

Durch die Flexibilität des Fräskopfes lassen sich komplexe Raster für CSM-Elemente erzeugen. Die gezielte Unterschneidung von kreuzenden Leitungen mit dem Fräskopf (siehe Abbildung 52) erlaubt es, auch in verbauten Gründen CSM-Wandelemente herzustellen. Hierbei wird zuerst der Fräskopf bis zur Solltiefe abgelassen und danach versetzt, bis knapp zur Unterkante der Leitung, bei permanenter Suspensionszufuhr, gezogen. Danach wird die Fräse an der gegenüberliegenden Seite wieder versenkt, versetzt, und mit dem vorangegangenen Element überschritten und wieder bis zur Unterkante der kreuzenden Leitung angehoben. Somit kann ein durchgehender Bodenkörper entstehen. Es versteht sich, dass diese Anwendung nicht für Dichtwände in Frage kommt.

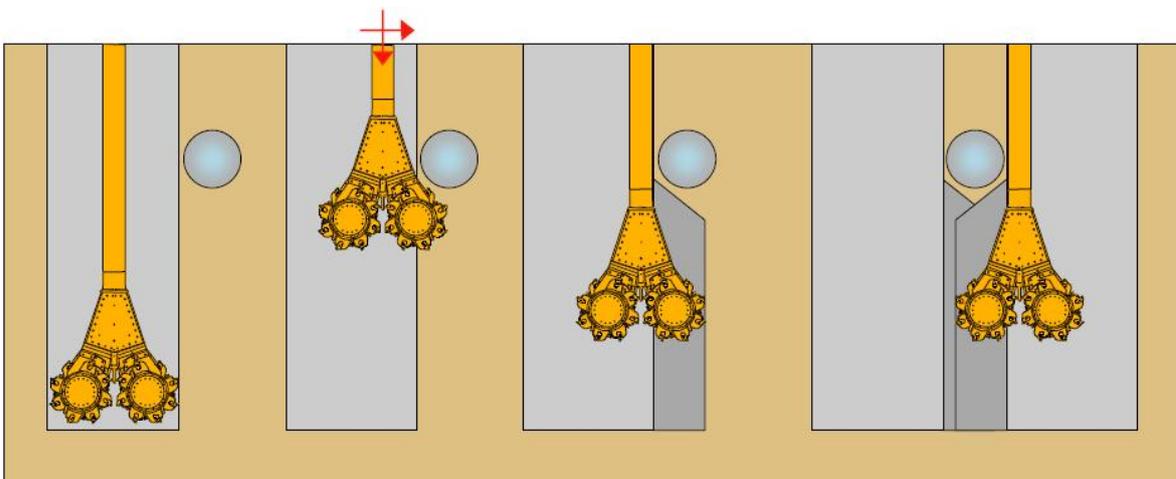


Abbildung 52: Unterschneidung von kreuzenden Leitungen mit dem Fräskopf [21]

Großes Einsatzpotential bietet dieses Verfahren auch bei den bereits im Kapitel 3.1.4 erwähnten Dammbabdichtungen sowie bei der Einkapselung von kontaminierten Böden.



Abbildung 53: Zu Testzwecken ausgegrabenes CSM-Wandelement mit gut erkennbaren Negativabdruck des Fräswerkzeugs [20]

4.2.4 Gerätetechnik

Trägergerät

Als Grundgerät dient eine Tragraupe. Der Fräskopf, das eigentliche Herzstück der Geräteeinheit, kann entweder „stangengeführt“ oder „seilgeführt“ (siehe Abbildung 54) mit dem Trägergerät verbunden werden. Den Regelfall stellt die „stangengeführte“ CSM-Einheit dar, mit der Tiefen bis 35 m ausgeführt werden können. Das dafür notwendige Trägergerät weist dabei ein Einsatzgewicht von 70 bis 90 to bei einer installierten Leistung bis 300 kW auf. Für größere Tiefen ist hingegen die „seilgeführte“ CSM-Einheit ausgelegt, mit der bereits Tiefen bis zu 55 m erreicht wurden.



Abbildung 54: "stangengeführte"- (links) und "seilgeführte"- (rechts) -CSM-Einheit [19]

Fräskopf

Mit den derzeit angebotenen Fräsmischköpfen (BCM 5, BCM 10) können Elemente mit Stichlängen von 2,2 bis 2,8 m, bei einer Wandstärke von 0,5 bis 1,0 m hergestellt werden. Der ca. 15 Tonnen schwere Fräskopf (siehe Abbildung 55) besteht aus einem wasserdichten Kasten, der die hydraulischen Antriebe für die Mischräder beinhaltet. Die Mischräder sind mit wechselbaren Zähnen ausgestattet, die den Bodenverhältnissen angepasst werden können. Der Boden wird beim Fräsen verflüssigt und seitlich an der Mischeinheit hochgedrückt.

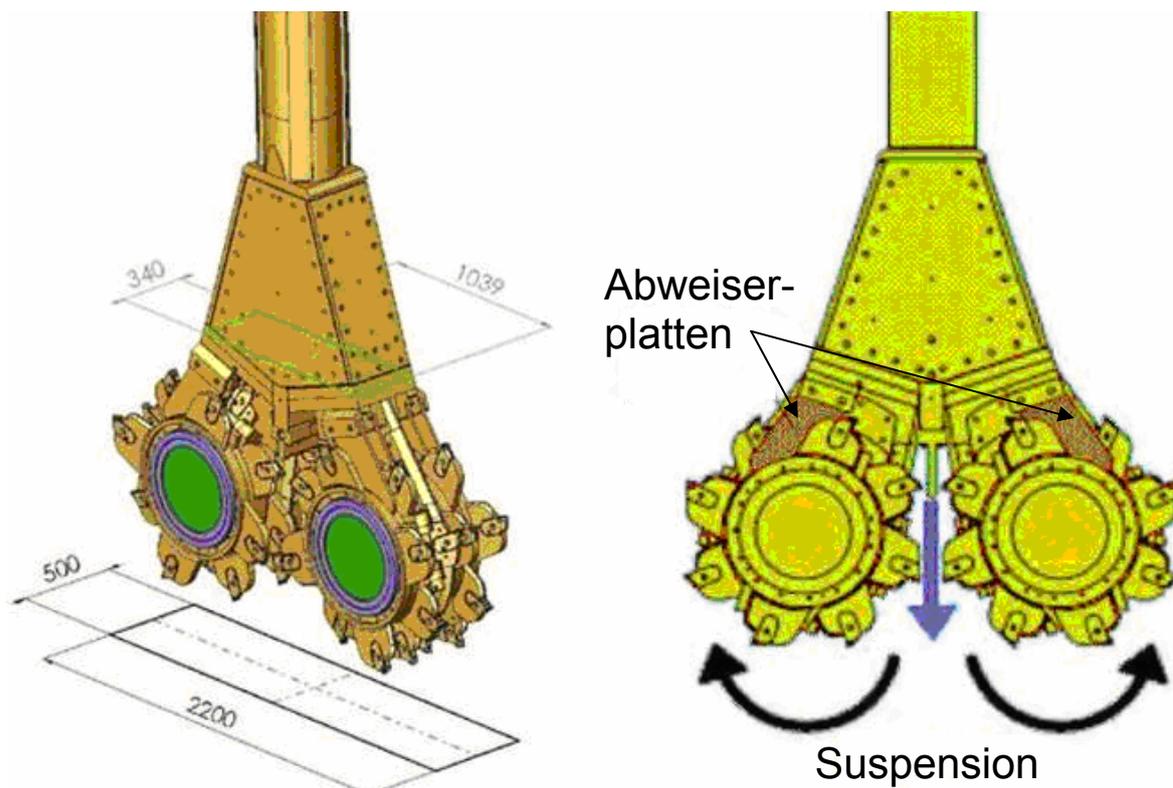


Abbildung 55: Fräskopf BCM 5 [20]

Ein optimales Gesamtergebnis wird erreicht, wenn die Werkzeuge (Räder) in der Lage sind, den Boden gut zu lösen und anschließend die Suspension homogen mit dem gelösten Boden zu vermischen. Um diese Anforderungen in Böden mit verschiedener Kornverteilung und verschiedener Festigkeit erfüllen zu können, werden verschiedene Radtypen verwendet. Die Wahl des richtigen Rades und Zahnbesatzes ist eine Grundvoraussetzung für einen wirtschaftlichen Arbeitsfortschritt, einen minimierten Verschleiß und die Erzielung einer homogenen Mischung. Die Suspensionszugabe erfolgt unmittelbar zwischen den Mischrädern. Die drehenden Mischräder und vertikal angeordneten Abweiserplatten wirken während der Herstellung wie ein Zwangsmischer. Die Abweiserplatten streifen das an den Rädern haftende Bodenmaterial ab und verhindern damit, dass sich der Fräskopf „verstopft“.

4.2.5 Baustelleneinrichtung

Die Baustelleneinrichtung eines CSM-System kann je nach Umfang der Arbeiten variieren. Wird mit einem Zweiphasensystem gearbeitet, also mit einer Bentonitsuspension als Stützflüssigkeit, so ist eine zusätzliche Separationsanlage erforderlich. Auch die Menge an Suspension steigt durch die erforderliche höhere Leistung an und ist in der Dimensio-

nierung der Misch- und Pumpanlagen zu berücksichtigen. Daneben entspricht der grundsätzliche Aufbau der einer MIP- bzw. SMW-Baustelleneinrichtung.

4.2.6 Qualitätssicherung

Die Rezeptur der Zement-Bentonitsuspension und die Pumpmenge orientieren sich an der Bodenart (Kornverteilung, Feinkornanteil, organische Substanzen), dem Grundwasserstand und dem Zweck der Ausführung, wie Dichtwand, statisch tragende Verbauwand. Vor dem Beginn eines Projektes werden Eignungsversuche an Suspensionsrezepturen durchgeführt, um die richtige Mischung festlegen zu können. Die erforderliche Suspensionsmenge, die notwendig ist, um den Boden ausreichend zu verflüssigen, hängt stark von der Zusammensetzung, dem Aufbau des Bodens und vom Grundwasserstand ab und wird in der Regel bei den ersten Stichen optimiert. Bei der Herstellung werden über Mess- und Regeleinrichtungen Tiefe, Suspensionsmenge und –druck aufgezeichnet (siehe Abbildung 56 und 57).

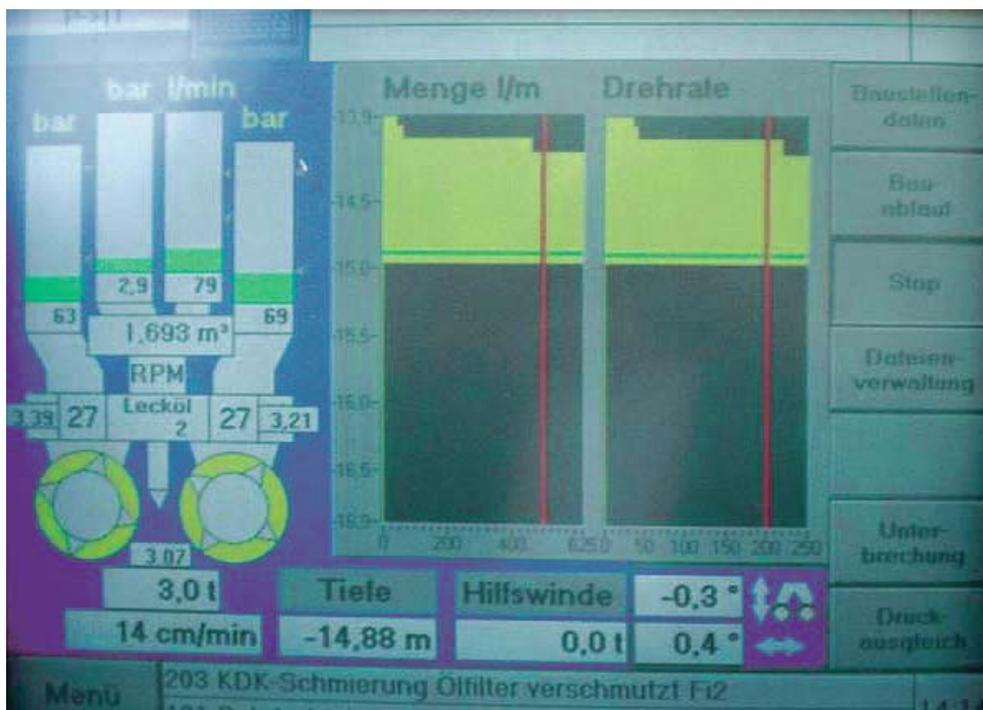


Abbildung 56: Arbeitsbildschirm CSM-Steuereinheit [20]

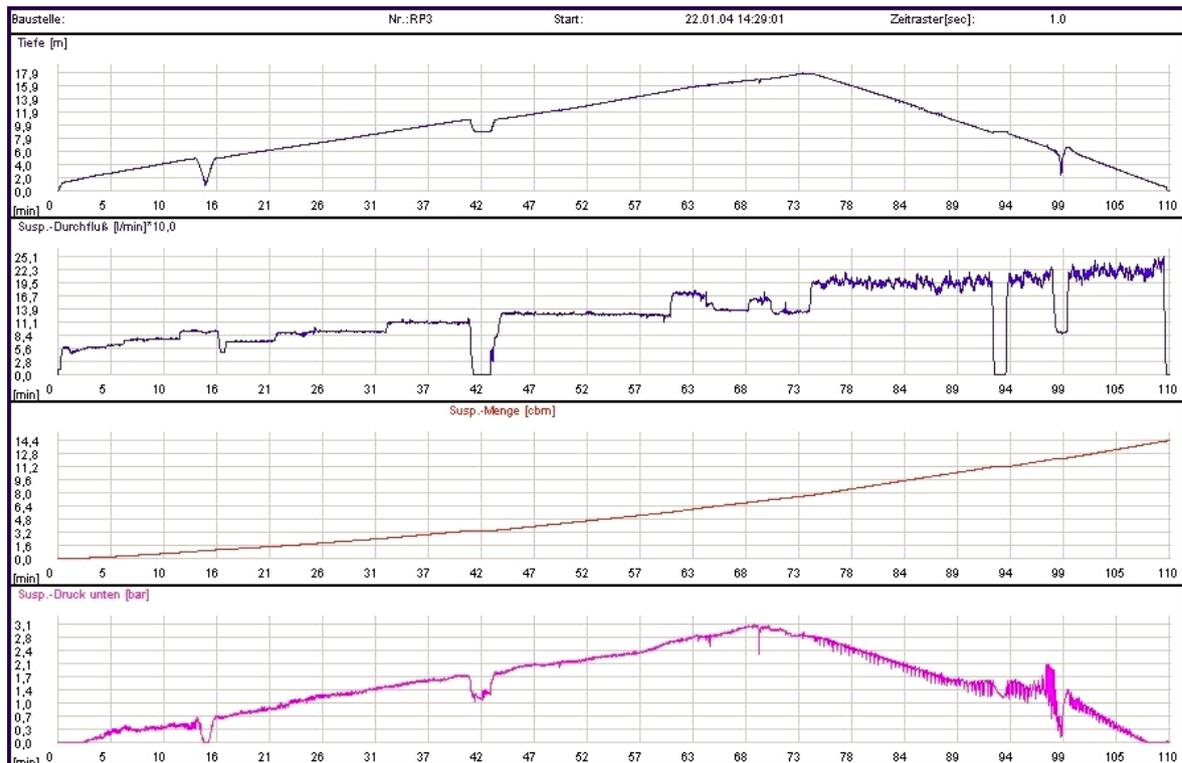


Abbildung 57: CSM-Protokoll; vertikale Achsen: Tiefenverlauf, Pumpmenge pro Zeiteinheit, Pumpmenge aufsummiert, Suspensionsdruck; horizontale Achse: Zeit [20]

4.2.7 Zusammenfassung

Vorteil

Der anstehende Boden wird auch bei diesem Verfahren als Baustoff genutzt. Dadurch können relativ hohe Tagesleistungen mit bis zu 200 m² Wandfläche erzielt werden. Es fällt nur wenig Fräsgut an, welches im Falle des Zweiphasensystems separiert, getrocknet und entsorgt wird. Durch die gegenläufig drehenden Fräsräder lassen sich Elemente mit hoher Vertikalität erzeugen. Aufwendige Fugenausbildungen wie bei Schlitzwänden erübrigen sich, da Elemente „frisch-in-frisch“ bzw. „hart-in-hart“ hergestellt werden können. Das System genießt auch die Vorteile anderer Nass- bzw. Trockenmischtechniken, indem ein nahezu vibrationsfreies Arbeiten möglich ist. Der Cutter kann leicht größere Steine und Blöcke durchdringen. Damit ist im Gegensatz zu den zuvor erläuterten Verfahren die Präsenz von Findlingen oder Resten von Bauwerken kein Problem. Mit dem rechteckförmigen Querschnitt des Cutters lassen sich nahezu glatte und plane Wandelemente erstellen und das Nachbearbeiten der Wandfläche mit Fräsen erübrigt sich.

Nachteil

Als Nachteil erweisen sich die hohen Anschaffungskosten eines Cutter Soil-Mixers von bis zu 900.000,00 €. Die Baustelleneinrichtung ist bei der Anwendung des Zweiphasensystems, durch die Installation einer Separationsanlage, umfangreicher und aufwändiger als jene bei den herkömmlichen Nassmischtechniken. Bei Einsatzstiefen bis 5 m erweist sich das CSM-Verfahren als unproduktiv.

4.3 Fräsmischinjektionsverfahren

4.3.1 Einführung

Ein weiteres Verfahren der Fräsmischinjektion oder Cut-Mix-Injection (CMI) wurde von Sidla-Schönberger entwickelt. Hierbei wird mittels einer Bodenfräse der nichttragfähige Boden aufgelockert, mit Bindemittelsuspension versetzt und homogenisiert. Es entsteht ein wasserundurchlässiger und frostsicherer Erdbeton. Dieses Verfahren eignet sich für nahezu alle Böden, die zum Fräsen geeignet sind. Auch künstlich aufgeschüttete Böden und Böden mit organischen Bestandteilen bis 30% des Gesamtvolumens können mit dem Fräsmischinjektionsverfahren (FMI-Verfahren) stabilisiert werden. Durch Einbringen von Stahlprofilen ist es auch möglich, statisch wirksame Bodenkörper herzustellen.

4.3.2 Verfahrensprinzip

Je nach örtlichen Gegebenheiten ist ein Arbeitsplanum mit mindestens 4 m Breite einzurichten. Eventuell sind vor Arbeitsbeginn auch Gräben für die überflüssige Suspension herzustellen. Der Fräsbaum taucht mit einem Winkel, von bis zu 80° in den zu stabilisierenden Bodenkörper ein. Die Messer an der Fräskette sind so angeordnet, dass das Bodenmaterial nicht ausgeworfen, sondern gelockert wird. Am tiefsten Punkt des Schwerts befinden sich die Auslassventile für die Bindemittelsuspension. Bindemittelsuspension und Boden werden vermischt und homogenisiert. Je nach Anforderung können verschiedene Fräsbäume am Trägergerät montiert werden. So stehen Fräsbäume mit den Längen 4 m, 6 m und 9 m zur Verfügung. Durch Variation des Winkels mit der das Schwert in den Boden eindringt, kann die Frästiefe zusätzlich justiert werden. Mit den heute zur Verfügung stehenden Geräten können Frästiefen bis 9,5 m erreicht werden. Weiters kann die Breite des Frässchlitzes zwischen 0,35 m und 1,0 m eingestellt werden.

Der Wasser/Bindemittel-Wert liegt im Allgemeinen bei 1,0. Der Zementgehalt der Suspension variiert je nach geologischen Anforderungen und kann bis zu 20 Massenprozent betragen. Der Baufortschritt variiert nach örtlichen Gegebenheiten, dennoch kann man mit einer täglichen Einbauleistung zwischen 600 und 800 m²/Tag rechnen [39].



Abbildung 58: Fräsbaum mit einer Breite von 1,0 m (*links*) bzw. 0,35 m (*rechts*) [39]

4.3.3 Anwendung

Zu den Anwendungsbereichen dieser Verfahren zählen Bodenstabilisierung, Abdichtung von Erdbauwerken und Immobilisierung von Schadstoffen. Mit dem FMI-Verfahren können sowohl großformatige Erdbetonkörper in einem Arbeitsgang hergestellt werden, wie z. B. die Stabilisierung eines kompletten Straßen- bzw. Bahndammes, als auch schmale Stützkörper, z.B. die Stabilisierung von Böschungsschultern oder Dichtwände (siehe Abbildung 59). Das FMI-Verfahren erlaubt es, Schichtfolgen von unterschiedlichen Bodenarten in einen Arbeitsgang mit einem Arbeitsgerät zu fräsen, zu durchmischen und mit Zementsuspension zu injizieren. Bei Arbeitsunterbrechungen kann die bestehende Dichtwand wieder angefräst werden („fest-in-fest“). Dadurch ist ein nahtloses Weiterabreiten ohne Fugenausbildung möglich.

Typische, mit dem FMI-Verfahren stabilisierte Bodenparameter [39]:

- Einaxiale Druckfestigkeit 0,5 MN/m² bis 4,0 MN/m²
- Reibungswinkel 40° bis 45 °
- Kohäsion 250 KN/m² bis 600 KN/m²

- Durchlässigkeit k_f 10^{-8} bis 10^{-9} m/s
- Elastizitätsmodul E 40 MN/m²; bis 200 MN/m²

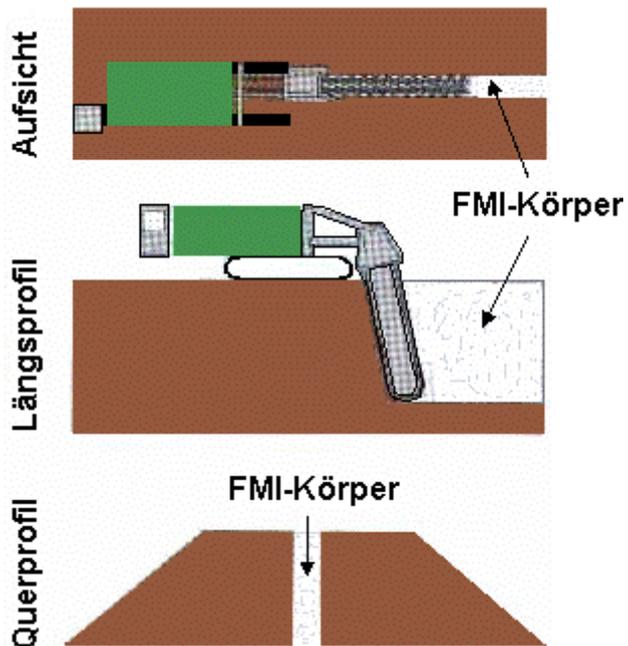


Abbildung 59: Einbau einer Dichtwand in einem Hochwasserschutzdamm [33]

4.3.4 Gerätetechnik

Als Grundgerät für die Bodenfräse dient ein Raupenfahrzeug (1). Herzstück des Gerätes ist der Fräsbaum (2) mit seiner umlaufenden Fräskette (3). Am Ende des Fräsbaumes befinden sich die Auslassventile (4) für die Bindemittelsuspension.



- 1 Raupenfahrzeug
- 2 Fräsbaum
- 3 Fräskette
- 4 Auslassventile

Abbildung 60: Bodenfräse [35]

4.3.5 Baustelleneinrichtung

Zur Versorgung der Bodenfräse mit Suspension ist eine externe Mischanlage notwendig. Diese Mischanlage besteht aus Vorratssilos für die jeweiligen Bestandteile der Rezeptur, einer Wasserversorgung, Mischern, Vorratsbehältern zur kontinuierlichen Versorgung des FMI-Gerätes mit Suspension und einer Pumpeinheit. Mit den derzeit zu Verfügung stehenden Pumpeinheiten können Distanzen bis zu 1500 m zwischen Bodenfräse und Mischanlage überbrückt werden [35].

4.3.6 Qualitätssicherung

Vor Beginn der Arbeiten sind anhand von Bodenuntersuchungen entsprechende Eignungsprüfungen von Suspensionsrezepturen durchzuführen. Während der Arbeiten sind Proben des Bodenmörtels abzuschöpfen und entsprechende Prüfungen zum Beispiel die der Druckfestigkeit an Probewürfeln vorzunehmen. Nach Fertigstellung können, falls erforderlich, Bohrkernentnommen und untersucht werden. Im Falle einer Anwendung als Dichtwand ist eine Prüfung auf Durchlässigkeit vorzunehmen.

4.3.7 Zusammenfassung

Das Fräs-Misch-Injektions-Verfahren zeichnet sich durch seine große Flexibilität bezüglich der Einsetzbarkeit bei unterschiedlichsten Böden aus. Durch das geländegängige Raupenfahrzeug ist eine Herstellung von Baustraßen nicht notwendig, was sich wiederum positiv auf die Kosten niederschlägt. Dadurch dass keine offenen Baugruben entstehen, sind Arbeiten zur Baugrubensicherung nicht notwendig. Im Falle von Stabilisierungen von kontaminierten Böden fallen Entsorgungskosten von Aushubmaterialien weg.

Für geringe statische Anforderungen kann die Dichtwand als Schwergewichtsmauer bemessen werden. Bei größeren statischen Beanspruchungen besteht die Möglichkeit, Stahlprofile in den noch breiigen Dichtwandschlitz einzubauen.

4.4 Massenstabilisierung

4.4.1 Einführung

Das Verfahren der Massenstabilisierung wird dort eingesetzt, wo außergewöhnlich schlechte Bodenverhältnisse wie Torf, Mudde, organische Tone und weiche Tonablagerungen vorkommen. Üblicherweise können mit dieser Technik Bodenschichten mit einer Mächtigkeit von bis zu 5 m behandelt werden. Das Bindemittel kann in trockener und in nasser Form eingemischt werden. Zusätzlich ist es möglich, Zusatzstoffe wie Flugasche beizumengen.

Das Verfahren der Massenstabilisierung wird oft in Kombination mit Pfählen oder Säulenstabilisierung verwendet.

4.4.2 Verfahrensprinzip

Je nach Vorgehensweise unterscheidet man 3 Arten der Massenstabilisierung:

- Stabilisierung von einzelnen Bodenschichten
- Blockstabilisierung
- Stabilisierung im kontaminierten Bereich

Stabilisierung von einzelnen Bodenschichten

Einzelne Bodenschichten werden, mit einem an einem herkömmlichen Hydraulikbagger montierten Mischer, unter Zugabe von Bindemitteln vermischt. Die Zugabe des Bindemittels erfolgt an speziellen Auslassventilen am Mischwerkzeug. Nachdem der Boden in Reichweite des Baggerstiels stabilisiert ist, fährt das Raupenfahrzeug auf den frisch erstellten Bodenkörper, übt auf den gerade behandelten Boden zusätzlich eine Vorbelastung aus und beschleunigt den Konsolidationsvorgang.

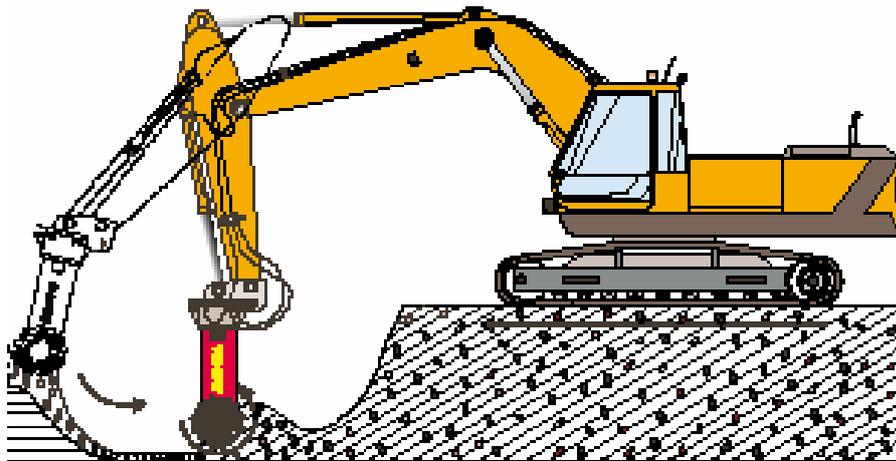


Abbildung 61: Auffräsen und Stabilisieren einzelner Bodenschichten [40]

Blockstabilisierung

Das Verfahren der Blockstabilisierung wird vor allem bei sehr nassen Böden wie Torf, Mudde und weichen Tonen angewendet. Die zu stabilisierende Fläche wird zunächst in Blöcke eingeteilt. Üblicherweise beträgt eine Feldgröße 8 m x 10 m. Das Bindemittel wird über Auslassventile am rotierenden Mischwerkzeug, das an einem Hydraulikbagger montiert ist, unter Druck in den Boden eingeblasen. Das Mischwerkzeug selbst wird vom Geräteführer dabei horizontal und vertikal bewegt, um den Boden möglichst gut zu homogenisieren.



Abbildung 62: Blockstabilisierung [40]

Stabilisierung von kontaminiertem Material

Hier wird das kontaminierte Bodenmaterial in eigens dafür vorgesehene Container geladen und mit dem Mischwerkzeug unter Zugabe von speziellen Bindemittelrezepturen durchmischt. Bei der Bindemittelrezeptur ist eine Eignungsprüfung notwendig. Es entsteht ein inertes, gut einbaufähiges Bodenmaterial. Dieses Verfahren ist eine kostengünstige Alternative zur Deponierung von schadstoffbelasteten Böden auf Sonderdeponien.

4.4.3 Anwendung

Hauptanwendungsgebiet der Massenstabilisierung ist der Straßen-, Bahn- und Dammbau. Durch die begrenzte Arbeitstiefe bis 5 m wird dieses Verfahren meist in Kombination mit anderen tiefreichenden Bodenstabilisierungsverfahren (Trockeneinmischtechnik) verwendet. Mit Hilfe der Massenstabilisierung lassen sich Scher- bzw. Druckfestigkeit, Steifigkeit sowie die Deformationseigenschaften des Bodens verbessern.

4.4.4 Gerätetechnik

Die Geräte der Massenstabilisierung unterscheiden sich wesentlich von den Maschinen aus den vorangegangenen Kapitel, die für die Herstellung von Säulen verwendet werden. Bei der Massenstabilisierung wird das zu stabilisierende Material an den rotierenden Mischkopf gefördert, mit Bindemitteln versetzt und schließlich horizontal und vertikal verteilt. Das Mischwerkzeug wird im Allgemeinen an einen konventionellen Hydraulikbagger angebaut. Abbildung 63 zeigt ein um die vertikale Achse drehendes Mischwerkzeug, Abbildung 64 veranschaulicht ein Verfahren, bei dem das Mischwerkzeug um die horizontale Achse rotiert.

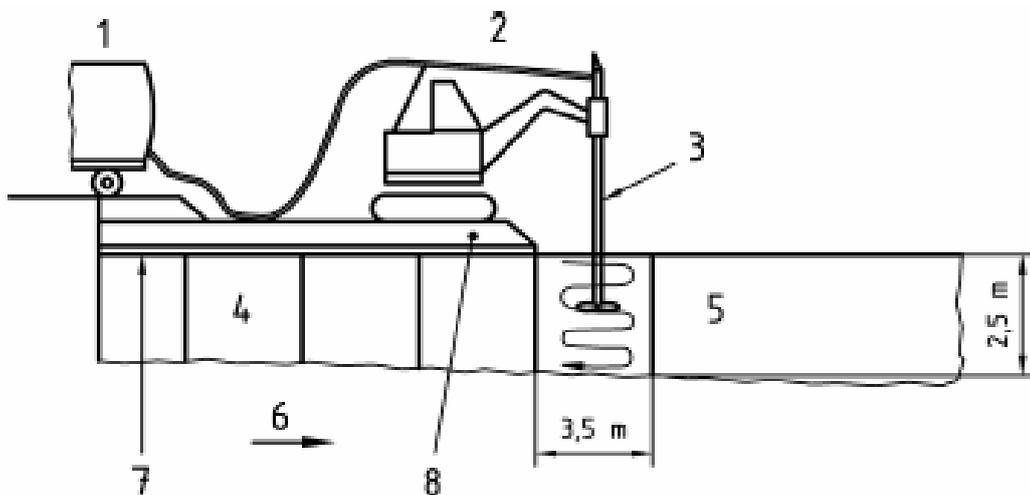


Abbildung 63: Massenstabilisierung mit einem um die vertikale Achse rotierenden Mischwerkzeug [3]

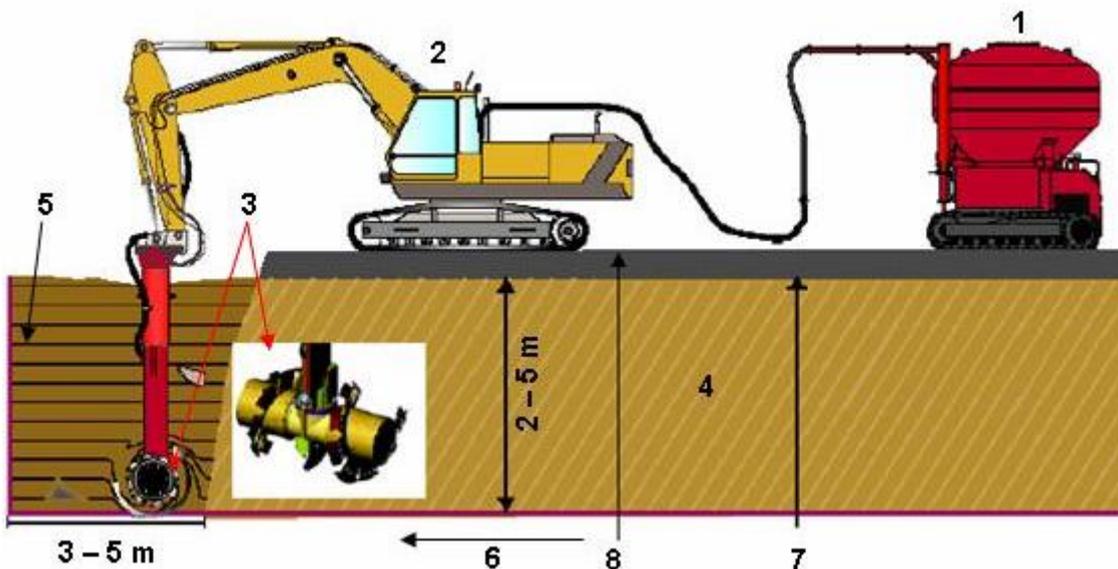


Abbildung 64: Massenstabilisierung mit einem um die horizontale Achse rotierenden Mischwerkzeug [40]

- 1 Stabilisatorsilo und Waagen
- 2 Bagger
- 3 Mischwerkzeug
- 4 Massenstabilisierte(r) Torf, Mudde oder weicher Ton
- 5 Torf, Mudde, weicher Ton
- 6 Richtung der Massenstabilisierung
- 7 Geotextile - Bewehrung
- 8 Vorbelastung des Damms

Grundgerät	Eigengewicht	Mischwerkzeug	Behandlungstiefe
PM 200	20 - 30 to	1900 kg (+ Adapter 200 kg)	2 m
PM 300	25 - 35 to	2360 kg (+ Adapter 200 kg)	3 m
PM 500	30 - 40 to	4200 kg (+ Adapter 200 kg)	5 m

Tabelle 10: ALLU PM Geräte zur Massenstabilisierung für verschiedene Behandlungstiefen [40]

4.4.5 Baustelleneinrichtung

Zur Einrichtung einer Baustelle nach dem Verfahren der Massenstabilisierung sind ein für das Bindemittel mobiler Vorratstank auf Raupen sowie ein digitales Aufzeichnungsgerät zur Qualitätssicherung notwendig. Die in Abbildung 65 dargestellten Silos weisen je ein Fassungsvermögen von 7 m³ auf. Der am nachlaufenden Shuttle befindliche Kompressor kann das Bindemittel mit ca. 8 bar an das Mischwerkzeug pumpen und ermöglicht einen

Bindemitteltransport von ca. 5 m³/min. Ein Filter an der Mischanlage verhindert unangenehme Staubentwicklungen durch das Bindemittel. Im Normalfall sind solche Baustellen mit zwei Personen, Geräteführer und Helfer, zu betreiben [40].



Abbildung 65: Mobile Vorratsilos PF 7+7 (*links*) und digitaler Messschreiber zur Qualitätssicherung (*rechts*) [40]

4.4.6 Qualitätssicherung

Wie bei den vorangegangenen Verfahren sind zur Qualitätssicherung Eignungs- sowie produktionsbegleitende Prüfungen am Bindemittel vorzunehmen. Drehzahl, Behandlungsdauer sowie die Menge des eingefrästen Bindemittels sind über einen elektronischen Schreiber zu dokumentieren. Des Weiteren ist laufend die Festigkeitsentwicklung von bereits behandelten Bodenkörpern zu untersuchen.

4.4.7 Zusammenfassung

Das Verfahren eignet sich zur großflächigen Stabilisierung von weichen und bindigen Bodenschichten, ist jedoch durch die begrenzte Behandlungstiefe mit derzeit maximal 5 m nur bei oberflächennahen Bodenschichten einsetzbar. Durch den Betrieb einer mobilen Mischanlage, die nachlaufend am Grundgerät geführt wird, ist dieses Verfahren sehr flexibel einsetzbar. Die Kombinationen von verschiedenen Bindemitteln erlaubt es, auch kontaminierte Böden zu behandeln. Die kleinen Gerätegrößen und der minimale Aufwand zur Installation der Baustelle macht diese Technik zu einer kostengünstigen Alternative im Vergleich zum Bodenaustauschverfahren.

4.5 Sonstige Verfahren

4.5.1 Tubular Soil Mix-Verfahren

Verfahren

Dieses Verfahren wurde 2006 von Keller Grundbau GmbH vorgestellt. Es kombiniert das mechanische Mischen des Deep Soil Mixing DSM-Verfahrens mit dem hydraulischen Mischen des Düsenstrahlverfahrens. Auch hier steht im Vordergrund, dass man versucht, die Vorteile der in-situ Mischverfahren mit Bindemittelintrag zu nutzen. Der Mischkopf (siehe Abbildung 66) weist hier besondere Düsenreihen (2) auf. Bis zu acht Düsen werden angeordnet, zeigen teilweise in Abbohrrichtung und sind auch nach oben geneigt. Jene Düsen, die in Abbohrrichtung zeigen, unterstützen den Bohrkopf beim Schneiden und Lösen des Bodens. Düsen, die in Richtung Oberfläche geneigt sind, dienen neben der eigentlichen Schnecke der besseren Durchmischung des Bodens mit der Bindemittelsuspension. Im Gegensatz zu den reinen DSM-Verfahren erfolgt hier die Mischung des Bodenmörtels innerhalb einer Verrohrung (1).

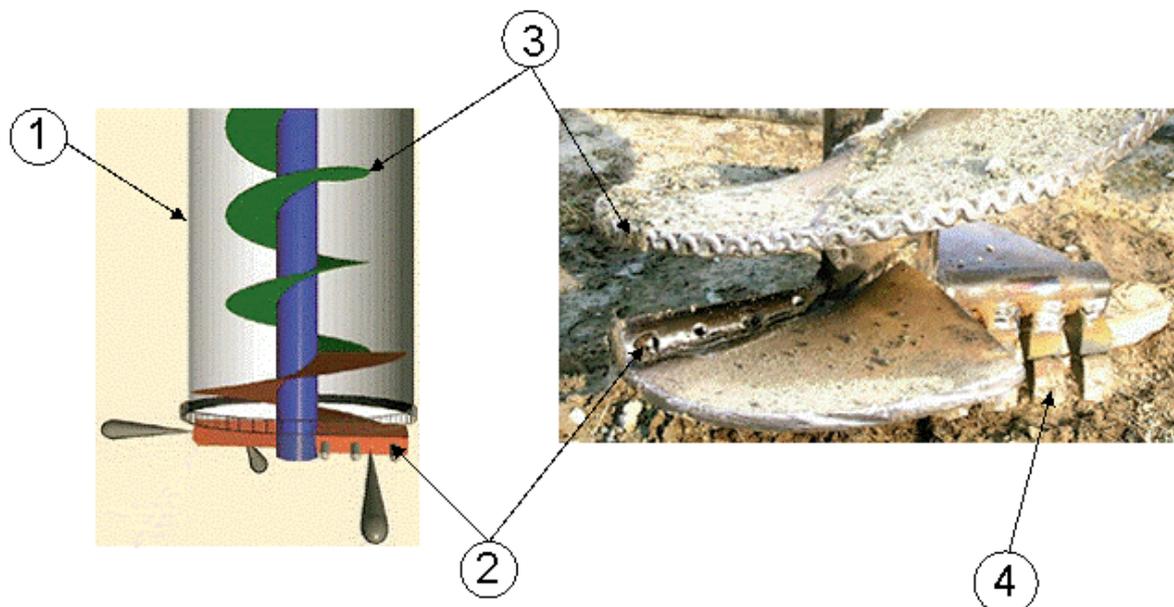


Abbildung 66: Bohrwerkzeug TSM [22]

- 1 Verrohrung
- 2 Düsenreihe
- 3 Mischschnecke
- 4 Schneidzähne

Bevor TSM-Säulen hergestellt werden können, ist wie bei vielen anderen Bohrverfahren die Errichtung einer genauen Schablone notwendig. Der Herstellungsprozess kann in drei Phasen eingeteilt werden. Zu Beginn wird der Bohrkopf bis in die gewünschte Tiefe abgeteuft. Dabei unterstützen die nach unten gerichteten Düsen mit ihrem Schneidstrahl durch Suspension das Lösen des Bodens. Danach erfolgt das Ziehen des Mischwerkzeugs unter Zugabe des Bindemittels aus den Düsenreihen bei gleichzeitiger Mischung durch die Schnecke. Dies fördert die vertikale Durchmischung des Boden-Bindemittelgemenges. Als dritte Phase kann optional, je nach Vorgabe, eine Bewehrung eingebaut werden. Neben einem Trägergerät ist zusätzlich eine Misch- und Pumpstation für den Betrieb einer auf dem TSM-System basierenden Baustelle nötig.

Anwendung

TSM-Säulen können unbewehrt zur Herstellung von Dichtwänden verwendet werden. Durch Einrütteln einer Bewehrung sind auch statische Gründungselemente möglich. Derzeit werden von Keller Grundbau GmbH TSM-Säulen mit einem Durchmesser von 40 und 80 cm bei einer maximalen Bohrtiefe von ca. 14 m angeboten. Die am Bohrkopf auswechselbaren Schneidzähne ermöglichen das Durchbohren von Mauerwerk und Beton.

Zusammenfassung

Das TSM-Verfahren genießt einen besonderen Vorteil gegenüber herkömmlichen DSM-Methoden durch die Verrohrung des Mischkopfes. Dank dieser kann eine homogene Säule mit glatter Oberfläche, vergleichbar mit der eines Bohrpfahls, hergestellt werden. Aufgrund der Verrohrung wird eine exakte Vertikalität beim Bohren gewährleistet, was durch kurze Ausführungszeiten eine kostengünstige Alternative zu Pfählen darstellt. Das System übernimmt auch den Vorteil aller DMMs, da der Boden als Zuschlag genutzt wird und die Kosten bei Beton erheblich gesenkt werden können. Zusätzlich werden auch die Rückflussmengen reduziert, welche damit wiederum die hohen Entsorgungskosten sinken lassen.

4.5.2 CDM-LODIC-Verfahren

Das in Japan gebräuchliche CDM-LODIC (Cement Deep Mixing - Low Displacement and Control)-Verfahren wurde erstmals 1985 vorgestellt. Hintergrund zur Entwicklung dieses Verfahrens war, dass man seitliche Verdrängungen an Bauwerken oder dem umgebenden Boden beim Herstellen einer CDM-Säule zu minimieren versuchte [25].

Dazu wird in etwa die gleiche Menge Boden aus dem Bohrloch gefördert wie Bindemittelsuspension eingetragen. Dies wird durch eine an der Mischswelle oberhalb des Mischwerkzeugs angebrachte Schnecke realisiert, die den überschüssigen Boden an die Oberfläche befördert. Dieses Verfahren eignet sich zur Herstellung von Säulen mit großen Durchmessern (bis zu 1,3 m) unter geringer seitlicher Verdrängungswirkung. Abbildung 67 vergleicht eine herkömmliche CDM-Einheit und eine CDM-LODIC-Einheit mit jeweils einer Schnecke an den Führungsstangen [26].

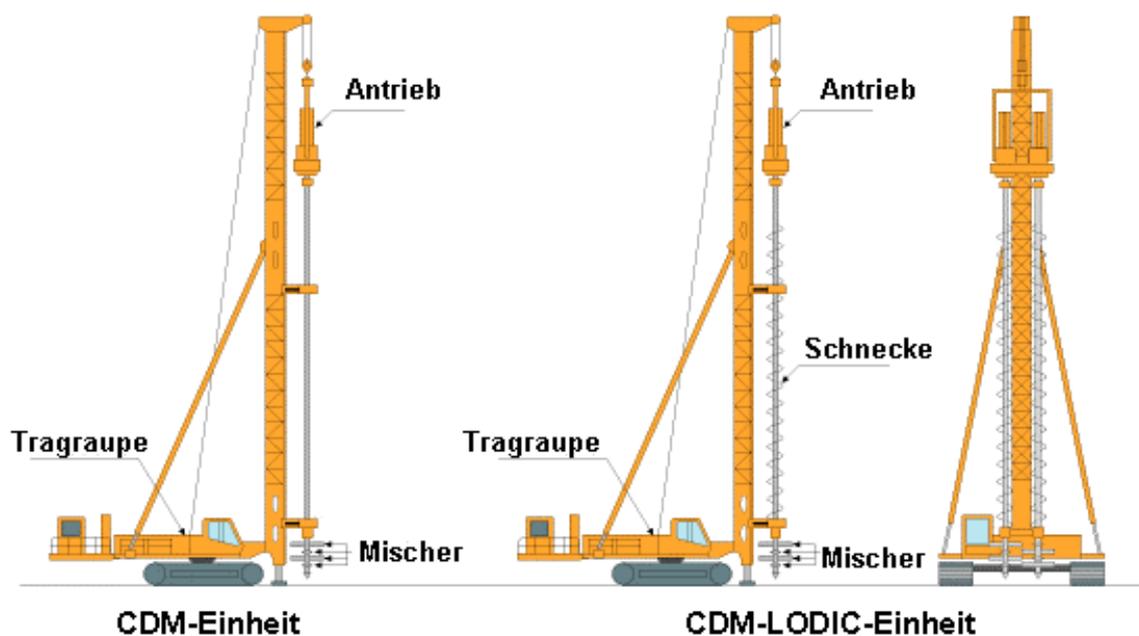


Abbildung 67: Vergleich CDM (*links*), CDM-Lodic (*rechts*) [26]

Das Mischwerkzeug ist bei beiden Systemen folgendermaßen ausgebildet: Die Mischeinheit besteht aus rotierenden Schneidwerkzeugen und starren Leitschaufeln. Diese Leitschaufeln, auch „anti-rotation vans“ genannt, sind etwas länger ausgebildet als die rotierenden Mischblätter. Dadurch wird ein zusätzlicher Widerstand im Boden erzeugt, sodass sich der Boden nicht um das Mischwerkzeug mitdreht. Auf diese Weise wird verhindert, dass die in den gelockerten Boden eingebrachte Bindemittelsuspension verklumpt, unterschiedliche Mischungskonzentrationen in der Säule auftreten und keine ausreichende Festigkeit gewährleistet werden kann. Die Schnecken sind gegeneinander geneigt und

drehen in entgegengesetzte Richtung, so fördern diese beim Abbohren überschüssiges Material an den Tag. Beim Ziehen wird die Bindemittelsuspension über Öffnungen am Mischwerkzeug in den aufgelockerten Boden eingebracht.

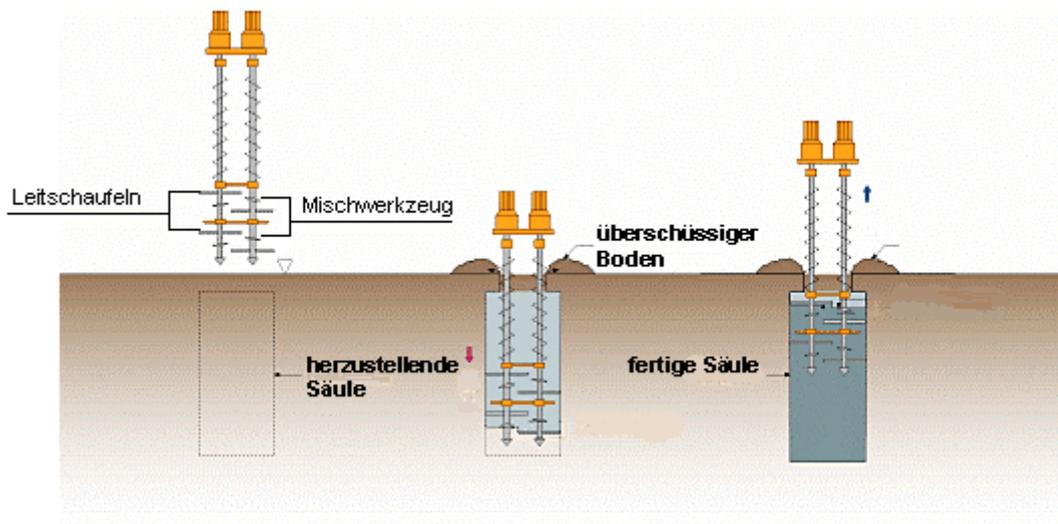


Abbildung 68: Herstellung einer CDM-LODIC Säule [25]

Für den Betrieb einer CDM-LODIC Anlage ist neben dem Trägergerät eine Mischanlage mit Silos für Bindemittel, Füller und Zuschläge notwendig. Wie bei allen bisher genannten Verfahren ist hier ein nachträgliches Einbringen von Bewehrungskörben bzw. I-Profilen für statisch wirksame Elemente möglich.

Wie bereits erwähnt besteht dieses System dadurch, dass seitliche Verdrängungen verringert werden. Damit ist der Einsatz in stark verbauten Gebieten ohne weitere Sicherungsmaßnahmen möglich. Natürlich weist dieses Hybridsystem alle Vorteile von herkömmlichen tiefreichenden Bodenstabilisierungsverfahren auf. Solche Systeme haben sich jedoch erst durchgesetzt, nachdem eine ausreichende Rechenkapazität gegeben war. Es ist nicht möglich, ohne computerunterstützte Mess-, Regel- und Steuerungstechnik diese Verfahren zu betreiben.

5 Bemessung und Prüfung

5.1 Allgemeines

Für die Planung einer tiefreichenden Bodenstabilisierung sind grundsätzlich zwei unterschiedliche Aspekte zu berücksichtigen. Zum einen die funktionale Bemessung, die die Art beschreibt, wie der behandelte Boden und der nicht behandelte Boden miteinander agieren müssen um das angestrebte Gesamtverhalten zu erreichen. Zum anderen, die Art der Ausführungsplanung, welche alle Maßnahmen beschreibt die notwendig sind, durch Festlegen von Prozesssteuerungsparametern, die erforderlichen Eigenschaften des Bodens zu erreichen [3].

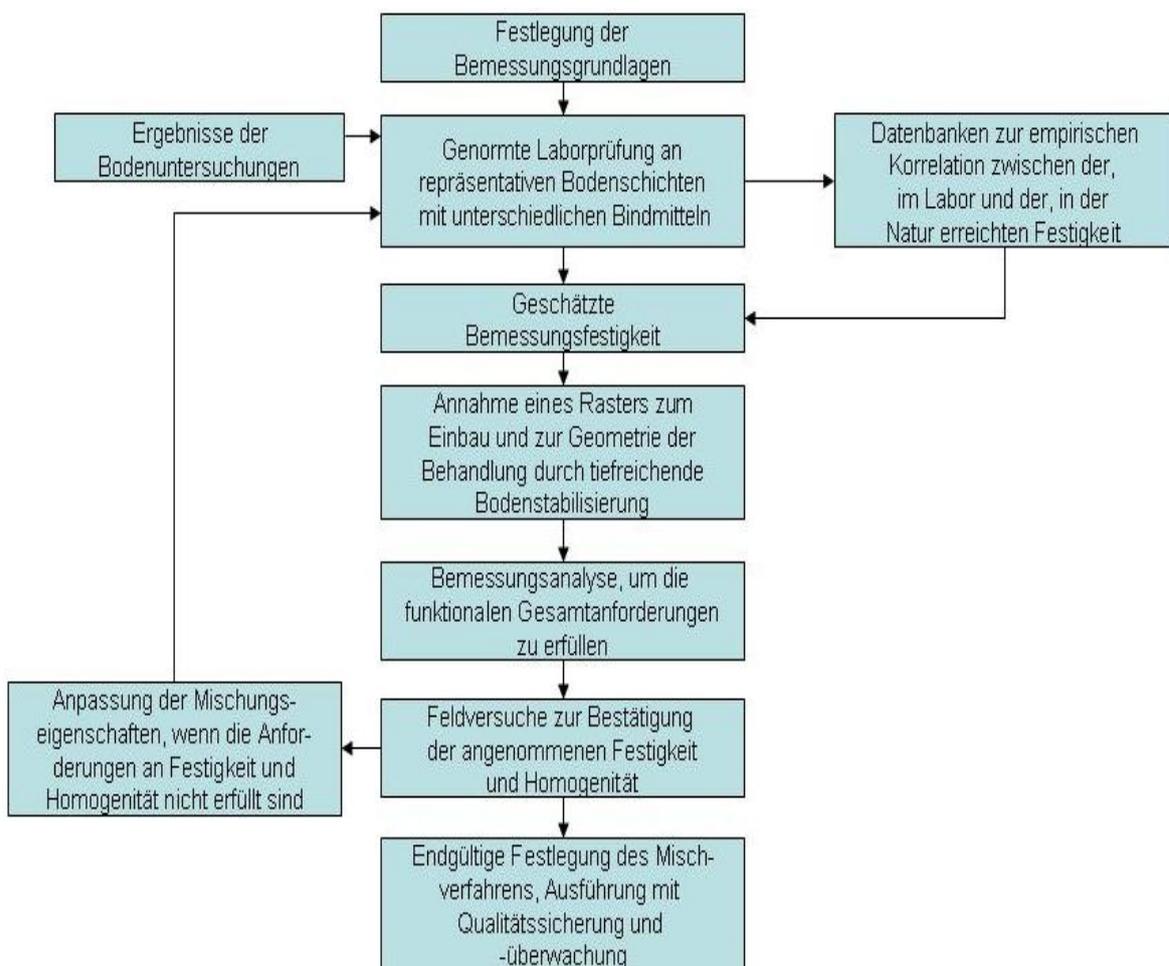


Abbildung 69: Iterativer Bemessungsprozess [3]

5.2 Bemessung

5.2.1 Bemessungsgrundsätze

Konstruktionen nach dem Verfahren der tiefreichenden Bodenstabilisierungen müssen dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit genügen.

Das bedeutet, dass die Konstruktion während der Herstellung und im Laufe der vorgesehenen Nutzungsdauer die Bedürfnisse, die durch den Kunden festgelegt wurden, erfüllt und die Planung sowie Ausführung den Anforderungen der EN 1997-1 entspricht.

Hauptaufgabe bei der Planung von Projekten, die mit dem System der tiefreichenden Bodenstabilisierung ausgeführt werden ist es, ein geeignetes Bindemittel zu kreieren, das unter einer bestimmten Dosierung dem Boden die geforderte Festigkeit im Labor und in der Natur verleiht. Dabei sollten Prüfungen in jeder repräsentativen Schicht im Boden vorgenommen werden [3].

Bei der Verwendung von MIP-Wänden als Verbauwand ist für die statische Bemessung nach gültigen technischen Regelwerken, wie sie bei Spundwänden angewendet werden, vorzugehen.

MIP-Säulen als Gründungselement werden statistisch als Einzelgründung, Pfahlgruppengründung, Pfahlkästen oder als kombinierte Pfahlplattengründung nachgewiesen. Sollen MIP-Säulen die Aufgabe einer Dichtwand, ohne statische Funktion erfüllen so ist die hydraulische und chemische Widerstandsfähigkeit nachzuweisen [36].

5.2.2 Setzungsverhalten

Lasten auf den stabilisierten Baugrund werden einerseits über das Pfahltragverhalten, wie Mantelreibung und Spitzendruck, und andererseits über das Tragverhalten des nicht stabilisierten Bodens zwischen Säulen abgetragen. Setzungen aus Kombinationen von Pfählen und Boden eines stabilisierten Bereichs können mit folgenden Annahmen und Formeln errechnet werden (siehe Abbildung 70):

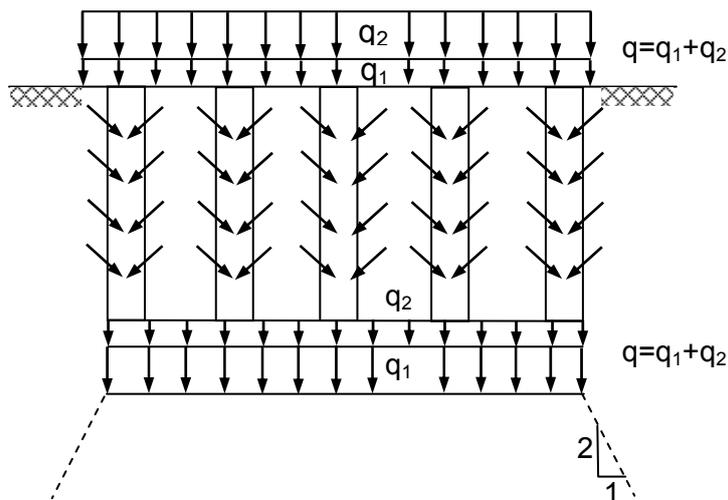


Abbildung 70: Prinzip der Belastungsverteilung bei Pfählen [52]

$$S_1 = \sum \frac{\Delta h}{a} \cdot \frac{q_1}{E_{col}} \quad [\text{Gl. 6}]$$

$$S_2 = \sum \frac{\Delta h}{1-a} \cdot \frac{q_2}{E_{oed}} \quad [\text{Gl. 7}]$$

$$S_m = \sum \frac{\Delta h \cdot q}{a \cdot E_{col} + (1-a) \cdot E_{oed}} \quad [\text{Gl. 8}]$$

- Δh Tiefe des stabilisierten Bodenkörpers
 q_1 Last auf Pfähle
 q_2 Last auf nicht stabilisierten Bodenbereich
 a Verhältnis Pfahlfläche zur Gesamtfläche
 E_{col} Kompressionsmodul des stabilisierten Pfahlkörpers
 E_{oed} Kompressionsmodul des ungestabilisierten Boden

Als ersten Schritt setzt man die Belastung $q_1 = q_{max}$. Die errechnete Setzung S_1 (Gl. 6) des Pfahls wird nun mit der Setzung S_2 (Gl.7) des ungestabilisierten Boden verglichen.

Die weitere Vorgehensweise besteht nun darin, dass man nun q_1 verringert und gleichzeitig q_2 erhöht. Diese Iterationsschritte werden solange wiederholt, bis $S_1 = S_2$ ist. Damit entspricht die errechnete Setzung S_m (Gl. 8) den Setzungen S_1 und S_2 .

Wenn $S_1 < S_2$, also die Pfähle keine weiteren Lasten aufnehmen können, dann ist die auftretende Setzung S_1 gleich der Setzung S_2 des stabilisierten Boden zu setzen [52].

Das beschriebene analytische Verfahren zur Bestimmung von Setzungen von Stabilisationspfählen ist ähnlich der herkömmlichen Berechnung von Setzungen. Dadurch, dass der

Boden kein homogenes Gefüge beschreibt ist die oben genannte Methode nur eine grobe Näherung, kann aber durchaus zur Abschätzung des Setzungsverhaltens herangezogen werden. Für genauere Untersuchungen empfiehlt es sich, mit Hilfe der Finite-Elemente Methode Setzungsberechnungen durchzuführen [52].

5.2.3 Einbauraster

Die Wahl des Raster nach den die Säulen hergestellt werden richtet sich nach den Anforderungen des Bauwerks. Um das Setzungsverhalten zu verbessern, werden die Säulen meist in einem gleichförmigen Dreiecks- oder Rechtecksraster eingebaut. Richtet sich die Anforderung eher an die Stabilität wie zum Beispiel bei Damm- oder Hangsicherungen werden Säulen wandartig im rechten Winkel zur erwartenden Gleitfläche eingebaut. Eine U-Form, elliptisch oder kreisförmig ausgerichtet, stellt eine Barriere gegen verschiedenste horizontale Belastungen (Erddruck, Gleitflächen usw.) dar [3].

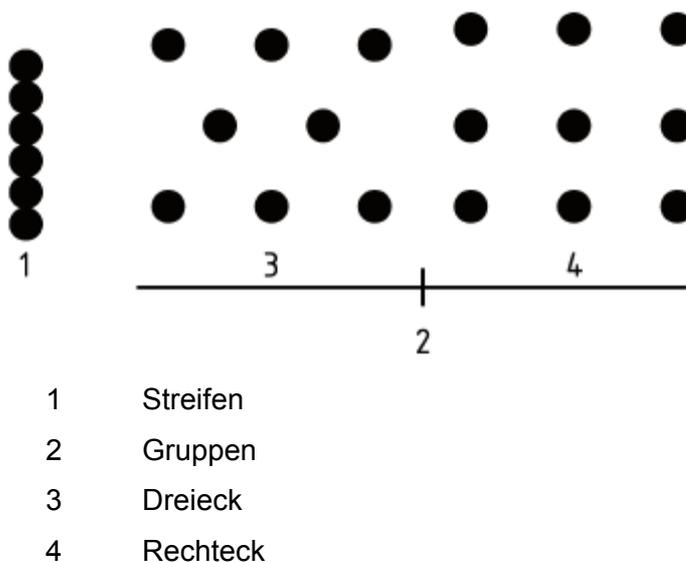


Abbildung 71: Beispiele von Behandlungsrastern für das Trockenmischverfahren [3]

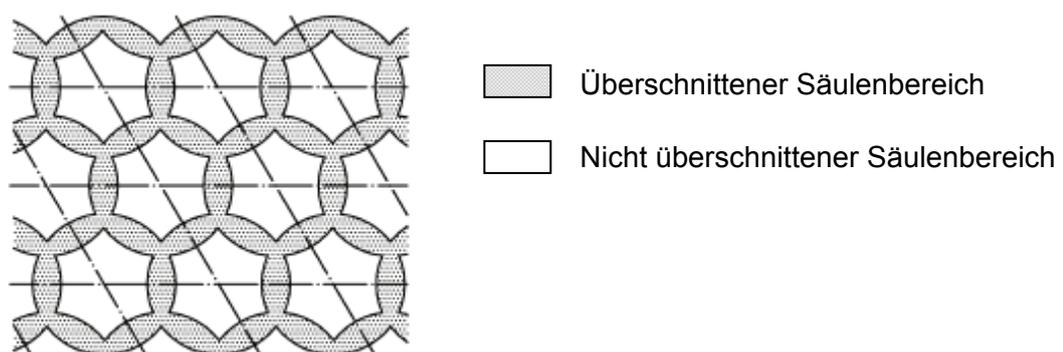
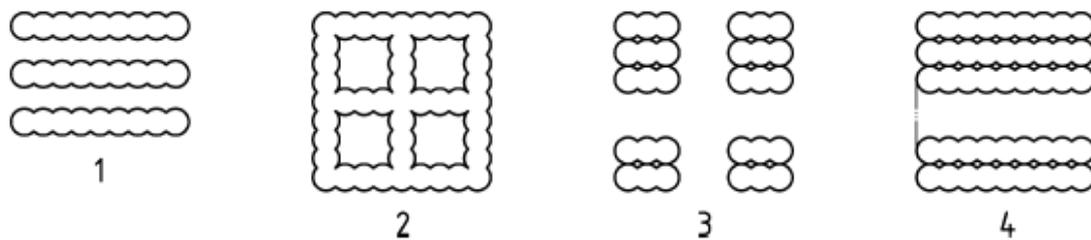


Abbildung 72: Blockartige Trockenmischraster mit überschrittenen Säulen [3]



- | | |
|---|-------------|
| 1 | Wandform |
| 2 | Gitterform |
| 3 | Blockform |
| 4 | Flächenform |

Abbildung 73: Beispiele von Behandlungsrastern für Nassmischverfahren an Land [3]

Bei der Anwendung als Einzelsäule wird dem Element eine Dübelwirkung beigemessen. Dabei ist der Dübelwiderstand ausschlaggebend für das Verhalten der Säulenreihe, wenn die Gleitfläche nahe der Basis einer Säulenreihe liegt. Wenn Säulenreihen aufgelöst werden so entspricht der Scherwiderstand je Säule in der Reihe wieder dem Wert einer Einzelsäule [3].

Wandform

Jedes Wandelement wird aus einzelnen, überlappenden Säulenkörpern hergestellt. Wandartige Elemente leiten Bauwerklasten in tiefere und tragfähige Schichten ab. Dabei werden oft kurze und lange Wandelemente kombiniert, mit dem Ziel, dass kurze Elemente die Steifigkeit der längeren bei geringeren Herstellungskosten erhöhen.

Gitterform

Als Gitterstruktur versteht man eine Kombination von block- bzw. wandartigen Elementen. Gitterstrukturen werden neben der eigentlichen Lastübertragung oft eingesetzt, um Bodenverflüssigungen vorzubeugen.

Blockform

Überlappende Säulen bilden einen blockartigen Untergrund und werden dort eingesetzt, wo schwere Lasten übertragen werden müssen. Die Herstellung von blockartig stabilisierten Bereichen ist vielfach kostspieliger als andere Behandlungsraster.

Flächenform

Wandartige Elemente werden hintereinander gereiht.

Andere Anwendungen

Abbildung 74 zeigt typische Anwendungsraster für den Einsatz im maritimen Bereich.

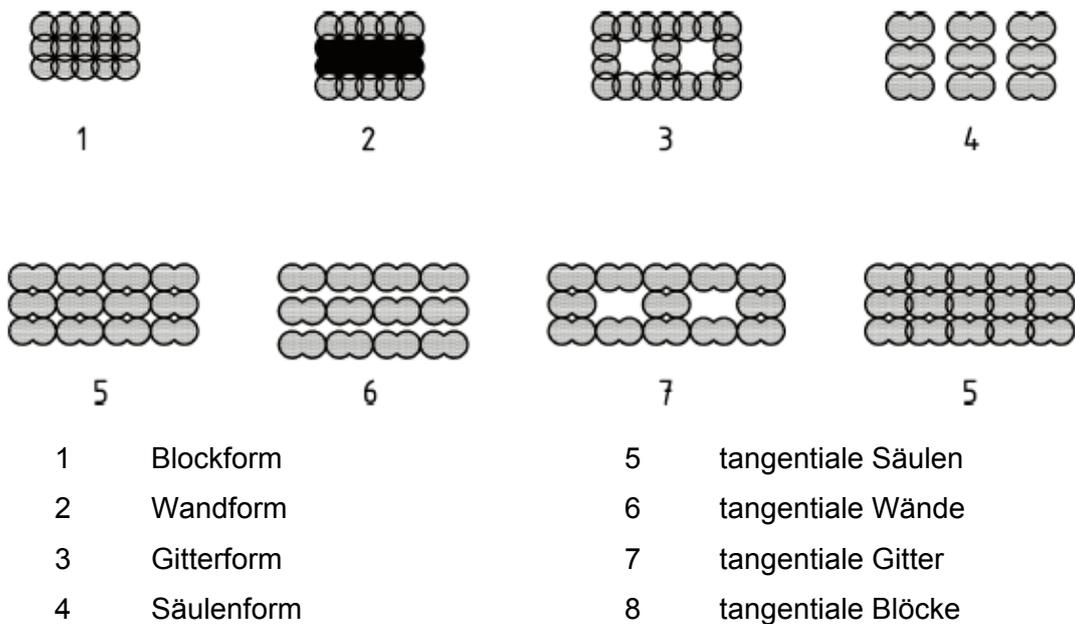


Abbildung 74: Beispiele von Behandlungsrastern für Unterwasser-Anwendungen [3]

5.3 Qualitätsüberwachung

5.3.1 Dokumentation

Um den geordneten Bauablauf und die Qualität der fertigen Elemente zu gewährleisten sind verschiedenartige Kontrollen vor, während und nach der Herstellung durchzuführen. Diese Kontrollen sind in Abhängigkeit von der geplanten Baumaßnahme und den vorliegenden Baugrundbedingungen anzuwenden. Neben der Bestimmung des Baugrundes und des dazugehörigen effektivsten Bindemittels, sowie dessen begleitende Prüfung, sind zur Qualitätssicherung bei den Verfahren der tiefreichenden Bodenstabilisierung folgende Parameter zu dokumentieren.

Bindemittel

- Produktions- und Lieferdatum
- Lagerungsbedingungen
- Zusammensetzung des Bindemittels
- Nachweis über die Qualität des Bindemittels

Bohrgerät und Ausrüstung

- Typ
- Gewicht und Leistung der Maschine
- Art des Mischwerkzeugs
- Andere relevante Daten der Drehbohrereinheit

Baustelle

- Beschreibung der Baustelle mit Höhenkoten
- Geotechnische Eigenschaften des Baugrunds
- Klimatische Bedingungen während der gesamten Bauzeit
- Etwaige Bodenkontaminationen
- Fotografische Dokumentation

Säulenparameter

- Ort, Datum, Beginn und Ende der Herstellungsphase
- Säulenummer
- Durchmesser
- Menge des abgegebenen Bindemittels (Suspension) beim Abbohr- und Ziehvorgang [l/min; kg/m]
- Aufgewendete Mischenergie [J/m^3]
- Ziehgeschwindigkeit [mm/s]

- Umdrehungsgeschwindigkeit des Mischwerkzeugs [U/min]
- Tiefe [m]
- Höhe Säulenfuß bzw. Säulenkopf [m]
- Einspeisedruck seitens der Mischanlage [MPa]
- Bindemittel- bzw. Suspension im Bohrgestänge
- Wasser/Zement Wert der Bindemittelsuspension
- Dichte der Bindemittelsuspension
- Gesamtzeit der Herstellung

Für die Erfassung dieser Daten stehen Mess- und Regeleinheiten (siehe Abbildung 75), Schreiber an der Mischanlage, sowie direkt am Drehbohrgerät zur Verfügung. Daten werden heute meist auf ein elektronisches Speichermedium geschrieben und täglich durch den Bauleiter oder Polier gesichert.



Abbildung 75: Typische Messeinheit am Drehbohrgerät [37]

5.3.2 Prüfung der Festigkeitsentwicklung

Um den Beanspruchungen gerecht zu werden, müssen bautechnische Anforderungen aufgestellt werden, die mit den geeigneten Prüfmethoden nachgewiesen werden können. Durch Variation der Parameter für das Herstellen von tiefreichenden Bodenstabilisierungskörpern zum Beispiel unterschiedliche Mischproben aus dem verfestigten Boden, verschiedene Bindemittelgehalte und Wasser-Feststoff-Werte, werden in Eignungsprüfungen die Rezepturen für einzelne Bauvorhaben ermittelt.

Laborprüfungen umfassen dabei:

- Nachweis der Eignung des Bindemittels
- Festlegung des Wasser-Bindemittel Wertes
- Festlegung der erforderlichen Bindemittelmenge je hergestellten m³ zur Erzielung der statisch erforderlichen und wirtschaftlichen einaxialen Druckfestigkeit
- Gegebenenfalls die Eignung von Zusatzstoffen

Da Prüfungen, die unter Laborbedingungen stattfinden, meist bessere Ergebnisse liefern sind Feldversuche zur Qualitätssicherung unumgänglich.

Das Verhältnis zwischen der im Labor ermittelten Festigkeit und der Festigkeit in-situ konnte aus einer Vielzahl ausgeführter Projekte mit ca. 0,5 bis 0,55 abgeleitet werden [27].

Zur Ermittlung der Festigkeit stehen mehrere Möglichkeiten zu Verfügung. So können Kernproben entnommen werden, Sondierungen oder ganze Pfähle oder Teile von Dichtwänden freigelegt und Prüfungen vorgenommen werden. Mitunter werden Probesäulen im Feld hergestellt und geprüft, um die geforderte Tragfähigkeit und Qualität sicherzustellen. Bei der tiefreichenden Bodenstabilisierungsmaßnahmen ist die Korrelation zwischen den im Labor festgelegten Parameter wie Abbohr- und Ziehgeschwindigkeit, Förderate des Bindemittels bzw. Suspension und Umdrehungsgeschwindigkeit des Mischwerkzeugs von ausgesprochener Wichtigkeit.

Parameter	Erfahrung und Korrelation
UCS (einaxiale Druckfestigkeit)	28-Tage-Festigkeit = 2,0 x 4-Tage-Festigkeit = 1,4–1,5 x 7-Tage-Festigkeit (Schluff, Ton) = 1,5–2,0 x 7-Tage-Festigkeit (Sand) 56-Tage-Festigkeit = 1,4–1,5 x 28-Tage-Festigkeit (Schluff, Ton)
UCS	Variationskoeffizient = 0,2–0,6 x Mittelwert = 0,3–0,5 überwiegend
Scherfestigkeit	= 0,40–0,50 x UCS, UCS < 1 N/mm ² = 0,30–0,35 x UCS, 1 < UCS < 4 N/mm ² = 0,20 x UCS, UCS > 4 N/mm ²
Zugfestigkeit	= 0,08–0,15 x UCS, max 0,2 N/mm ²
Sekantenmodul E 50 (50 % Bruch- spannung)	= 50–300 x UCS, UCS < 2 N/mm ² = 300–1000 x UCS, UCS > 2 N/mm ²
Bruchdehnung UCS	= 0,5–1,0 % für UCS > 1 N/mm ² = 1,0–3,0 % für UCS < 1 N/mm ²
Querdehnzahl	= 0,25–0,45 = 0,30–0,40 üblicherweise

Tabelle 11: Korrelation zwischen Scherfestigkeit, Zugfestigkeit und Verformbarkeit zur einaxialen Druckfestigkeit [27]

5.6 Pfahlprüfungen

5.6.1 Allgemeines

Das Tragverhalten von Pfählen beruht darauf, dass die Abtragung der Einwirkung der angreifenden Lasten über die Mantelreibung bzw. über den Spitzendruck am Pfahlfuß erfolgt. Beide Werte sind von der Pfahlsetzung abhängig.

Unter der Mantelreibung, die abhängig von der Pfahllänge ist, versteht man die Scherspannung zwischen Pfahl und Boden. Um die Tragfähigkeit eines Pfahles oder einer Pfahlgruppe zu bestimmen, gibt es mehrere Möglichkeiten, welche in den folgenden Seiten kurz beschrieben werden.

5.6.2 Innere Tragfähigkeit

Die innere Tragfähigkeit wird durch die geometrische Form des Pfahles und seine physikalische Eigenschaften bestimmt. Die Baustoffeigenschaften und Dimensionen von Pfählen sind so zu wählen, dass aufgebrachte Lasten ohne Schäden am Pfahl in den Boden eingeleitet werden können. Die innere Tragfähigkeit wird aufgrund genauer Kenntnisse

der Baustoffeigenschaften und Berechnungsmethoden (vergleiche Gl. 9) mit ausreichender Sicherheit bestimmt.

$$zul.Gebrauchslast = f_{ck} * \frac{1}{\gamma_c} * \alpha * A * \frac{1}{\gamma_{G,Q}} \quad [Gl. 9]$$

f_{ck}	Zylinderdruckfestigkeit	[N/mm ²]
γ_c	Teilsicherheitsbeiwert unbewehrter Beton	[]
α	Abminderungsfaktor Langzeitwirkung	[]
A	Säulendurchmesser	[m ²]
$\gamma_{G,Q}$	Teilsicherheitsbeiwert Lasteinwirkung	[]

5.6.3 Äußere Pfahlprüfung

Die Prüfung der äußeren Tragfähigkeit kann entweder statisch durch lastgesteuerte und/oder weggesteuerte Probelastungen erfolgen. Daneben stehen zusätzlich dynamische Prüfungsverfahren zum Nachweis des Tragverhaltens zur Verfügung.

Statische Pfahlprüfung

Bei der statischen Pfahlprüfung wird mit Hilfe von Probelastungen, die Lastübertragung vom Pfahl auf den Baugrund ermittelt. Die Probelastung wird dabei stufenweise in Richtung oder quer zum Pfahl erhöht. Der Aufbau einer statischen Prüfeinheit ist umfangreich und kostenintensiv. So sind Widerlager zu errichten, die über Traversen die Kräfte von den Hydraulikpressen auf den Pfahl übertragen. Die übertragenen Kräfte werden mittels Kraftmessdosen aufgenommen. Der Kraftverlauf im Pfahlschaft wird indirekt über die Längendeformation von Dehnmessstreifen gemessen. Aus der Längenänderung kann die dazugehörige Pfahlspannung und der Längskraftverlauf ermittelt werden [12].

Dynamische Pfahlprüfung

Die dynamische Pfahlprüfung nach der „high-strain“-Methode ist ein alternatives oder ergänzendes Verfahren neben der statischen Methode zur Feststellung der Tragfähigkeit von Pfählen. Ein schweres Fallgewicht belastet den Pfahl, sodass durch die Pfahlbewegung im Boden Reaktionskräfte geweckt werden. Am Pfahlkopf wird die Drehung und Beschleunigung gemessen und mittels Messgerät aufgezeichnet. Die Ermittlung der Trag-

fähigkeit kann nach der CASE-Methode über einen pauschalen Dämpfungswert vorgenommen und nach der CAPWAP-Methode (CASE Pile Wave Analysis Programm) erweitert werden. Letztere ist eine aufwendige Modellanalyse, die unterschiedliche Bodenreaktionen durch iterative Rechenvorgänge berücksichtigt.

Vor Beginn der dynamischen Pfahlprüfung muss die Druckfestigkeit des Pfahls bestimmt werden. Danach wird der Pfahlkopf mit einer Stahlhülle umschlossen, die vier Fenster für die Messgeberpaare (siehe Abbildung 76) aufweist. Damit beim Auftreffen des Freifallgewichts der Pfahl nicht beschädigt wird, muss der Pfahlkopf zum Beispiel mit Holz geschützt werden. Nachdem das Fallgewicht aufgetroffen, bewegt sich der Pfahl kurzzeitig und der Boden baut eine Gegenkraft - den dynamischen Widerstand, auf. Die Berechnungsannahmen erfordern es, dass bei der Durchführung des dynamischen Pfahltests alle Widerstände aktiviert werden. Dies lässt sich erreichen, wenn durch den einzelnen Schlag eine bleibende Verschiebung des Pfahls erzielt werden kann. Die Größe der erforderlichen Verschiebung ist vom umgebenden Boden abhängig und sollte für den Prüfschlag ≥ 2 mm erreichen [45].

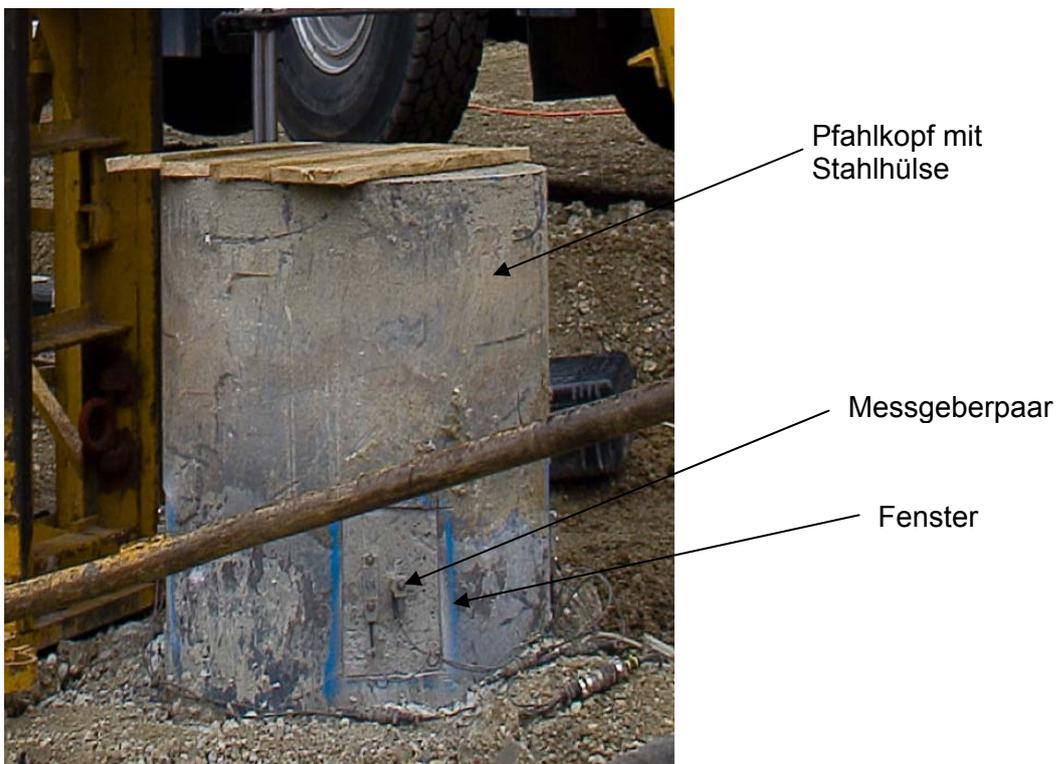


Abbildung 76: Messaufbau am Pfahlkopf [44]

Dynamische Pfahltests wurden mit vielen statischen Tests in Korrelation gebracht und zeigen große Übereinstimmung. Sie sind erheblich kostengünstiger und ohne Störungen des Bauablaufs durchzuführen. Sie können für alle Pfahlssysteme angewendet werden.



Abbildung 77: Aufbau dynamische Pfahlprüfung mit Fallgewicht [44]

5.6.4 Integritätsprüfung

Die Integritätsprüfung wird herangezogen, um die Qualität des Pfahls festzustellen. Mit der sogenannten „low-strain“ Integritätsprüfung sollen Fehlstellen und Unregelmäßigkeiten wie Risse und Einschlüsse erfasst werden.

Das Prinzip der Integritätsprüfung beruht auf Einleitung eines Stoßimpulses in den Pfahlkopf und der Messung der Bewegungen in Form von Beschleunigungen oder Geschwindigkeiten des Pfahlkopfes. Dieser Impuls wird mit einem speziellen Hammer ausgelöst (siehe Abbildung 78). Der Impuls durchläuft den Pfahl, wird am Fuß reflektiert und mittels Messaufnehmer am Pfahlkopf seine Laufzeit gemessen. Reflexionen treten bei Änderung der Querschnitseigenschaften, wie dem Elastizitätsmodul, der Dichte, der Querschnittsfläche oder dem Bodenwiderstand. Anhand der Laufzeit lässt sich dann feststellen in welcher Tiefe es zur Reflexion gekommen ist.

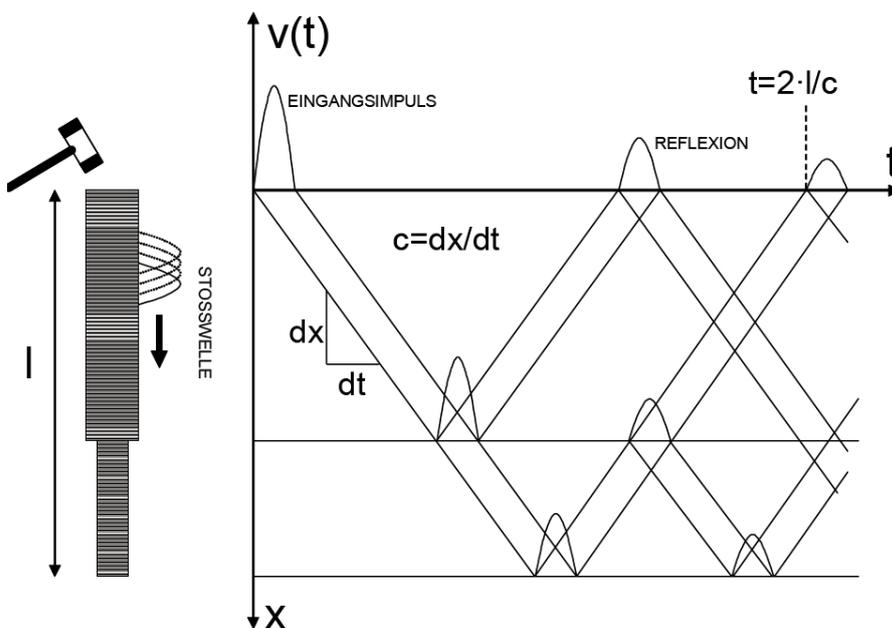


Abbildung 78: Wellenausbreitung bei Integritätsprüfung nach dem "low-strain"-Verfahren [45]

5.7 Schadenspotential

Man unterscheidet zwischen Schäden, die während der Bauphase eintreten, und jenen, die während der Nutzungsphase entstehen können.

Schäden in der Bauphase können eine unzureichende Vertikalität oder Abweichungen von der Sollage sein. Zu gering überschrittene Lamellenkörper führen zu Fehlstellen und beeinträchtigen damit die Dichtigkeit von Dichtwänden. Eine nur mangelhaft ausgeführte Durchmischung des Bodens mit der Suspension beeinträchtigt die innere Tragfähigkeit.

Schäden in der Nutzungsphase können zum Verlust der Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dichtigkeit führen. Der Verlust der Standsicherheit kann einen Grund-, Geländebruch oder den Bruch der tiefen Gleitfuge zufolge haben. Bei Verlust der Gebrauchstauglichkeit treten unzulässige Setzungen und Verformungen auf. Mitunter können auch während der Nutzungsphase Fehlstellen in Dichtwänden auftreten. Fehlstellen können auf mehrere Ursachen zurückgeführt werden. So kann eine falsche Zusammensetzung der Bindemittelsuspension oder eine ungenügende Durchmischung dieser mit dem Boden sich auf die Dichtigkeit der Wand auswirken. Wie bereits erwähnt, führt eine unzureichende Überlappung der Wandelemente zu Fehlstellen. Ferner ist beim Einbau von MIP-Körpern auf Grundwasserströmungen zu achten. Erosionen führen zu unterschiedlichen Suspensionskonzentrationen in der Mischung. Demzufolge wird die Homogenität und dadurch die Dichtigkeit der Dichtwand negativ beeinflusst [36].

6 Mischverfahren im Straßenbau

6.6 Einführung

Im Gegensatz zur tiefreichenden Bodenstabilisierung handelt es sich im Straßen- bzw. Wegebau um eine oberflächennahe Stabilisierung. Auf den folgenden Seiten werden kurz die Verfahren zur Stabilisierung von Tragschichten mit Bindemitteln nach RVS 8S.05.13 (6/2002) und die Wiederverwendung von Asphalt bei bituminösen Decken nach RVS 08.16.06 behandelt.

6.7 Mit Bindemittel stabilisierte Tragschichten

Man unterscheidet je nach verwendeten Bindemitteln folgende Stabilisierungen:

- Mit Zement stabilisierte Tragschichten (ST-Z)
- Mit Tragschichtbinder (hydraulisches Bindemittel niedriger Anfangs- und hoher Endfestigkeit) stabilisierte Tragschichten (ST-T)
- Mit Bitumen (Emulsion oder Schaumbitumen) stabilisierte Tragschichten (ST-B)
- Mit Bitumen (Emulsion oder Schaumbitumen) und Zement stabilisierte Tragschichten (ST-BZ)

In der Herstellung stabilisierter Tragschichten werden zwei Verfahren unterschieden. Zum einen das Zentralmischverfahren (ZMV) und zum anderen das Baumischverfahren (BMV). Beim Zentralmischverfahren wird das Stabilisierungsgemisch bestehend aus Grundstoff, Bindemittel und Wasser in einer stationären Mischanlage hergestellt. Der Einbau erfolgt auf der Baustelle mittels Fertiger oder Grader mit anschließender Verdichtung.

Die Herstellung mittels Baumischverfahren erfolgt über eine Bodenfräse bzw. einen Stabilisierer. Dabei wird der Grundstoff mit Wasser und Bindemittel aufgebracht und anschließend eingemischt sowie verdichtet [47].

6.7.1 Baumischverfahren (mixed-in-place)

Beim Mischverfahren muss der anstehende, zu verfestigende Boden zuerst vorverdichtet werden. Größere Steine (> 63 mm Durchmesser) sollten, um die nachfolgenden Arbeitsgeräte zu schonen, mit Eggen entfernt werden. Danach erfolgt die Verteilung des Binde-

mittels mit Streugeräten. Unmittelbar nach der Aufbringung des Bindemittels ist es in den anstehenden oder aufgetragenen Boden mit oder Eggen einzubringen. Dabei ist zur Erzielung des optimalen Wassergehalts eventuell Restwasser zuzugeben [47].

6.7.2 Zentralmischverfahren (mixed-in-plant)

Beim Zentralmischverfahren wird der Boden mit dem Bindemittel sowie den noch erforderlichen Wasseranteil in einer zentralen Mischanlage gemischt. Danach wird das fertige Boden-Bindemittel-Gemisch mit einem Lastkraftwagen an die Einbaustelle transportiert. Während des Transportes ist das Mischgut vor Regen und Verdunstung zu schützen und innerhalb zwei Stunden nach dem Mischen einzubauen. Der Einbau erfolgt lagenweise mit herkömmlichen Straßenfertigern, Gradern oder Planiertrauen. Zur nachfolgenden Verdichtung werden Gummiradwalzen oder Vibro-Kombiwalzen eingesetzt. Die Verdichtungsvorgänge müssen abgeschlossen sein, bevor das Gemisch erstarrt und nicht mehr zu verdichten ist [47].

6.7.3 Prüfungen

Vor der Baudurchführung sind die Eignung der verwendeten Grundstoffe (Kornzusammensetzung, organische Bestandteile, usw.) sowie deren Zusammensetzung zu prüfen. Bei mit Zement oder hydraulischem Bindemittel stabilisierten Tragschichten mit einem Asphaltanteil < 50% sind der optimale Wassergehalt und die einfache Proctordichte des Gemisches zu bestimmen. Des Weiteren sind während der Bauphase Probekörper mit mindestens zwei verschiedenen Bindemittelgehalten herzustellen und auf Festigkeit zu prüfen.

Neben den Eignungsprüfungen sind Kontrollprüfungen während der Bauausführung sowie Abnahmeprüfungen nach Fertigstellung vorzunehmen. Diese Kontrollen beinhalten die Prüfung von folgenden Parametern:

Mischwirkungsgrad, Sieblinie der Grundstoffe, Bindemittel- und Wassergehalt, Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, Bruchdehnung, Trockendichte und Verdichtungsgrad, Schichtdicke, Ebenheit, sowie die Abweichung von der Sollhöhe der stabilisierten Tragschicht [47].

6.7.4 Anwendung

Für Zement als Bindemittel lassen sich folgende Richtwerte für die Beimengung, bezogen auf die Trockenmasse des Bodens, angeben.

Kiessand	3 bis 6 Gew.-% bzw. 70 bis 120 kg/m ²
Sand, schluffiger Sand	6 bis 10 Gew.-% bzw. 120 bis 160 kg/m ²
Gleichkörniger Sand	8 bis 12 Gew.-% bzw. 140 bis 200 kg/m ²
Schluff	7 bis 12 Gew.-% bzw. 120 bis 200 kg/m ²
Ton	9 bis 16 Gew.-% bzw. 150 bis 240 kg/m ²

Tabelle 12: Richtwerte für Verfestigung mit Zement als Bindemittel [1]

Die Menge an Kalk für Tragschichten und selbstständige Befestigungen (z.B. Baustraßen) liegt zwischen 3 und 7 Gew.-% des trockenen Bodens. Bei ausgeprägt plastischen Böden im Bereich von etwa 5 bis 9 Gew.-% [1].

6.8 Wiederverwendung bituminöser Strassenbaustoffe

6.8.1 Einführung

Unter dem Sammelbegriff Recycling werden verschiedene Verfahren angeführt, die sich mit der Aufbereitung der Materialien an Ort und Stelle, sowie in Aufbereitungsanlagen beschäftigen. Beim Recycling In Place wird der Asphalt auf der Baustelle mit einem Kompakteinbaugerät in einem Arbeitsgang schonend erhitzt und durch gezielte Zugabe von Bitumen oder Regenerierungsmittel und sogenanntem Ergänzungsmischgut aufbereitet, und sofort wieder eingebaut [46].

6.8.2 Recycling In Place

Zur Wiederverwendung von bituminösen Strassenbaustoffen stehen je nach Art und Anforderung verschiedene Verfahren zu Verfügung wie z.B. das Remix-, Repave, Regrip, Reshape-Verfahren. Exemplarisch für die Wiederverwendung bituminöser Straßenbaustoffe wird das Remix-Verfahren vorgestellt.

Remix-Verfahren

Das Remix Verfahren wird eingesetzt wenn eine Verbesserung der Ebenheit und Griffigkeit erfolgen soll, oder zur Instandsetzung von rissigen oder verformten Schichten.

Das Verfahren besteht aus den Arbeitsschritten Aufnehmen, Mischen Einbauen und Verdichten. Bevor das Aufnehmen stattfindet wird die Decke mit Infrarotstrahlern langsam und schonend erwärmt, um keine ungünstige Beeinflussung der vorhandenen bituminö-

sen Stoffe zu forcieren. Die Aufheizzeit beträgt dabei ca. 3 bis 5 Minuten. Nach dem Aufheizen wird die vorliegende Deckenschicht mit Fräsen gelockert und zwischengelagert. Das Mischen setzt sich aus dem Mischen und Dosieren zusammen. Über einer Dosieranlage wird dem Altasphalt, Frischmischgut sowie im Bedarfsfall Bitumen zugegeben. Nach der Fertigstellung erfolgt der Wiedereinbau. Aufheizen, Aufreißen, Mischen und Dosieren werden heute mittels eines einzigen Arbeitsgerätes, allgemein als Remixer bezeichnet, durchgeführt. Abschließend erfolgt dann das Verdichten durch Vibrationswalzen bzw. Gummiradwalzen [48,46].

6.8.3 Recycling In Plant

Beim Recycling In Plant wird der wieder gewonnene Asphalt (durch Kalt- oder Warmfräsen beziehungsweise durch Aufbrechen) zu einer Mischanlage (Plant) transportiert und dort zwischengelagert. Im Falle von Warmfräsgut und Asphaltaufbruch ist eine weitere Aufbereitung durch Brechen und Sieben notwendig, um ein Asphaltgranulat zu erhalten. Beim Kaltfräsen fällt direkt verarbeitbares Granulat an. Das gewonnene Asphaltgranulat wird dem Mischprozess in Gewichts-Anteilen zugeführt, die zuvor durch die Eignungsprüfung festgelegt werden. Übliche Zugabewerte bei der Herstellung vom Mischgut für Trag-schichten liegen zwischen 20 bis 40%. Nach dem Aufbereiten kann das modifizierte Mischgut mit Lastkraftwagen zur Einbaustelle transportiert werden.

7 Kalkulationsbeispiel

Aufgrund der vielfältigen Verfahren wird in diesem Kapitel, ein in Österreich häufig angewendetes System – das Mixed in Place-Verfahren, hinsichtlich der Kosten beispielhaft für ähnliche Nassmischtechniken, betrachtet.

Trotz Kenntnis der bodenmechanischen und erdbautechnischen Parameter ist es schwierig, einen theoretischen Ansatz für die Bohrleistung von MIP-Säulen zu formulieren. Das Hauptproblem dabei ist die Heterogenität des Bodens. Als Lösung bietet sich ein empirischer Ansatz an, indem man Böden als „gut geeignet“, „mittelgut geeignet“ oder „weniger gut geeignet“ einteilt [60].

„gut geeignet“	Sand, Kies
„mittelgut geeignet“	Mergel, Schluff
„weniger gut geeignet“	organischer Boden (z.B.) Torf

⇒ Beispielhafte Berechnung der Kosten für die Herstellung eines MIP-Elements

Zur Erstellung der unten dargestellten Diagramme wurden folgende Berechnungsannahmen getroffen:

Anschaffungskosten für die verschiedenen Trägergeräte und Mischwerkzeuge wurden von Firmen zur Verfügung gestellt, sind aber lediglich als Anhaltswerte zu interpretieren. Schwierig gestaltet sich bei der Kalkulation die Abschätzung der aus der Nachkalkulation eruierten Betriebsstundenanzahl, die für die Anwendung der Neuwertmethode unerlässlich ist. Wie dem Anhang „Kalkulation“ zu entnehmen ist, wurden 10.000 Stunden für Trägergeräte als geschätzte Lebensdauer angenommen. Kosten der Bohrschnecken sowie der Baustelleneinrichtung wurden nach der öster. Baugeräteliste (ÖGBL) berechnet. Als Personalansatz wurde von 3 Arbeitern mit Mittellohnenkosten von 32 Euro pro Stunde ausgegangen.

Bohrleistung:	10 m/Std (<i>Firmenangabe; Boden „mittelgut geeignet“</i>)
Bindemittelzugabe:	500 kg/m ³ (aus Feld- und Laborversuchen)
Bindemittel:	Zement CEM III ca. 70 €/to (<i>Firmenangabe</i>)
Querschnitt MIP-Element:	ca. 0,3 m ² (MIP-Schnecke 3 x 0,33 m [31])

Hergestellte Wandfläche pro Stunde = Bohrleistung [m/Std] x Breite Mischwerkzeug [m]
 $10 \text{ [m/Std]} \times 3 \times 0,33 \text{ [m]} = \sim 10 \text{ [m}^2\text{/Std]}$

Hergestelltes Wandvolumen pro Stunde = Bohrleistung [m/Std] x Querschnitt MIP-Element [m²]
 $10 \text{ [m/Std]} \times 0,3 \text{ [m}^2\text{]} = 3 \text{ [m}^3\text{/Std]}$

Bindemittelverbrauch = hergestelltes Wandvolumen [m³/Std] x Bindemittelzugabe [kg/m³]
 $3 \text{ [m}^3\text{/Std]} \times 500 \text{ [kg/m}^3\text{]} = 1.500 \text{ [kg/Std]}$

Kosten Bindemittel

$$1,5 \text{ [to/Std]} \times 70 \text{ [€/to]} = 105,00 \text{ [€/Std]}$$

Kosten Trägergerät BG 20: 311,88 €/Std (vergleiche Anhang)

Kosten Mischwerkzeug

(3-fach Endlosschnecke bis 9,50 m): 78,08 €/Std. (vergleiche Anhang)

Kosten Baustelleneinrichtung: 42,42 €/Std (vergleiche Anhang)

Personal 3 Mann à 32 €/Std: 96,00 €/Std (vergleiche Anhang)

Gesamtkosten:

Kosten Bindemittel: 105,00 €/Std

Kosten Trägergerät: 311,88 €/Std

Kosten Mischwerkzeug: 78,08 €/Std

Kosten Baustelleneinrichtung: 42,42 €/Std

Kosten Personal: 96,00 €/Std

633,38 €/Std

Umlage der Gesamtkosten auf die Herstellung eines m² Wandfläche

$$\text{Bohrleistung} \times 1 \text{ m} = 10 \text{ m}^2\text{/Std.}$$

Kosten eines m² Wandfläche [€/m²] = Gesamtkosten [€/Std] / Bohrleistung [m²/Std]

$$\frac{633,38}{10,0} \cdot \frac{\text{€/Std}}{\text{m}^2\text{/Std}} = \underline{\underline{63,33 \frac{\text{€}}{\text{m}^2}}} \text{ (siehe Abbildung 80)}$$

Abbildung 79 und Abbildung 80 stellen den Einfluss der Bindemittelzugabe (Zement) auf die Herstellungskosten einer MIP-Wand dar. Durch Variation der Bindemittelzugabe (Suspension) kann die Festigkeit der MIP-Säule verändert werden. Die Bohrleistung ist abhängig vom vorhandenen Boden und variiert zwischen 10 bis 14 m/Std (Firmenangaben). Für größere Bohrtiefen (bis 16,5 m) wurde nach obigen Berechnungsverfahren Diagramm 80 erstellt.

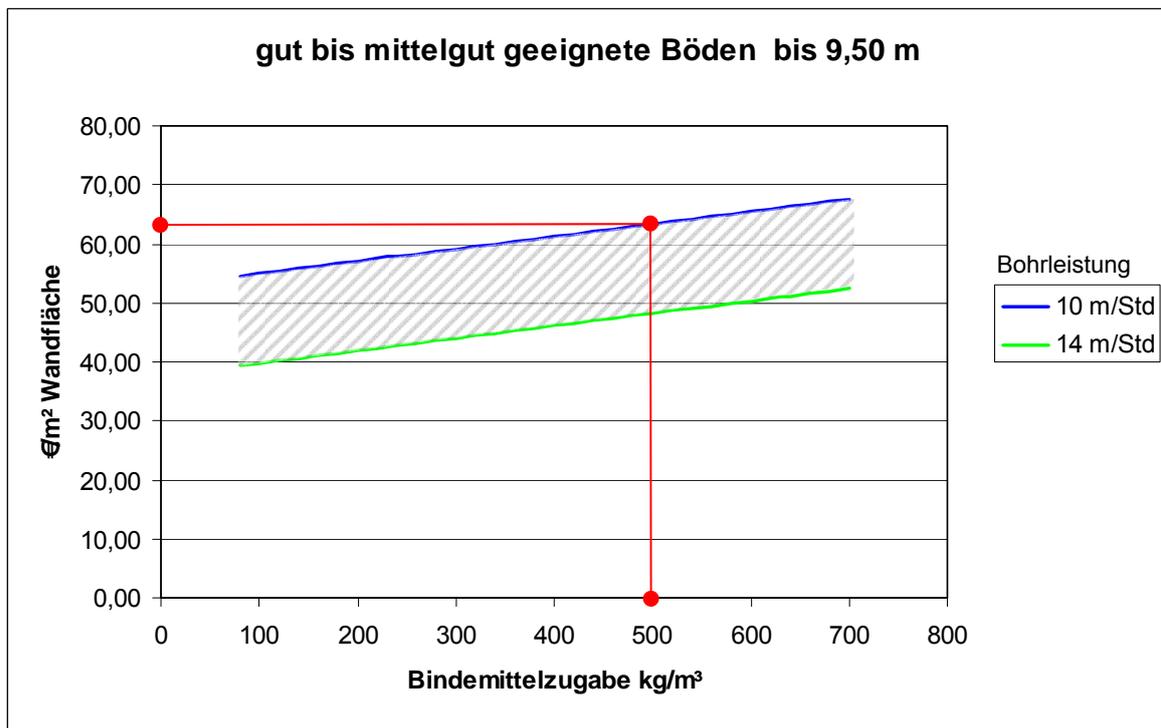


Abbildung 79: Einfluss der Bindemittelzugabe auf die Herstellungskosten einer MIP-Wand

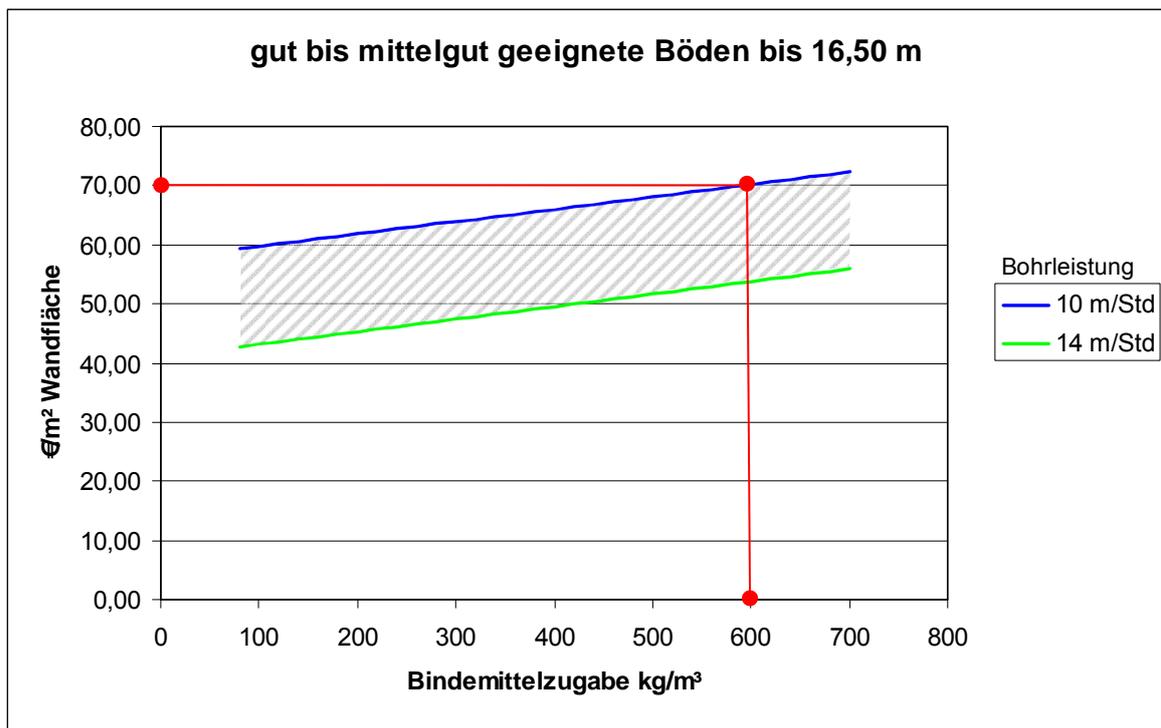


Abbildung 80: Einfluss der Bindemittelzugabe auf die Herstellungskosten einer MIP-Wand

Beispielhaft wird in Abbildung 80 die Verwendung des Diagramms zur Abschätzung der Herstellungskosten einer MIP-Wand vorgezeigt. Für den Fall eines „mittelgut geeigneten“ Bodens kann eine Bohrleistung von ca. 10 m/Std aus Erfahrungswerten angenommen werden. Um den bautechnischen Zweck des MIP-Elementes zu erfüllen wird von einer Bindemittelzugabe mit ca. 600 kg/m³ ausgegangen. Damit lassen sich die Herstellungskosten eines m² Wandfläche mit rund 70 € abschätzen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Die Baugrundverbesserung hat in den letzten Jahrzehnten bei der Gründung von Gebäuden und Bauwerken erheblich an Bedeutung gewonnen. Dabei hat sie wesentlich zur wirtschaftlichen Gestaltung von Gründungskonzepten beigetragen. Die Auswahl des geeigneten Verfahrens setzt vertiefte Kenntnisse des Zusammenwirkens von Produkt und Baugrund voraus. Eine kontinuierliche Qualitätskontrolle und Überwachung nehmen eine immer bedeutendere Rolle bei der Ausführung ein. Neue Verfahren der Baugrundverbesserung machen eine immer bessere Kenntnis gerade bei wenig tragfähigen Böden und ihrem Verhaltens unter Einwirkung erforderlich.

Auf Basis, der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Techniken werden in Abbildung 81 Verfahren zur tiefreichenden Bodenstabilisierung in Bezug auf ihre Anwendbarkeit bei unterschiedlichen Bodenverhältnissen dargestellt.

Ton		Schluff	Sand	Kies	Steine		
		Mixed in Place					
		Soil Mix Wall					
		Wet Speed Mixing					
Trockeneinmischtechnik							
		Cutter Soil Mixing					
Fräsmischinjektion							
Massenstabilisierung							
0,02		0,06		2	100		
							Korngrößen in [mm]

Abbildung 81: Anwendbarkeit von Verfahren bezogen auf den zu behandelnden Boden

Die Vorteile bzw. Einschränkungen bei der Anwendung von tiefreichenden Bodenstabilisierungsmaßnahmen sind in der unten dargestellten Tabelle 13 zusammengefasst.

Vorteile	Einschränkungen
üblicherweise hohe Produktivität, wirtschaftlich gerade bei großen Projekten	Begrenzung der Tiefe, abhängig vom Verfahren
anwendbar in nahezu allen Böden und Auffüllungen ohne Hindernisse	nicht oder nur eingeschränkt anwendbar in dicht gelagerten und steifen bis festen Böden, bei Blöcken
Säulenraster und -anordnung sehr variabel, genaue Anpassung an Aufgabenstellung	geneigte Säulen nur bedingt herstellbar, verfahrensabhängig
Eigenschaften der Säulen und des verbesserten Bodens können sehr genau geplant werden	Gleichmäßigkeit bzw. Homogenität und Qualität können bei bestimmten Bodenformationen stärker schwanken
Herstellung führt nur zu geringen Änderungen der horizontalen und vertikalen Spannungen im Boden, die zu Schäden an in der Nähe befindlichen Bauwerken führen könnten	Säulen können nicht unmittelbar neben oder unter Bauwerken hergestellt werden, bei Strahlunterstützung verfahrensabhängig möglich
keine Erschütterungen, geringer Lärmpegel	Veränderung durch Frost oder Austrocknung
sehr wenig Bohrgut beim Trockenmischverfahren	Bohrgut beim nassen Verfahren nicht vernachlässigbar
kann an Land und auf dem Wasser ausgeführt werden	Eigengewicht der Geräte ist zu beachten, verfahrensabhängig sehr verschieden
Qualität der Baugrundverbesserung kann im Zuge der Ausführung geprüft werden	Luftdruck und Suspensionsdruck, können zu Hebungen führen, Kontrolle der Ausführung
geringe Umwelteinflüsse	gezielte Behandlung nur einer Bodenschicht oder eines Tiefenbereichs nur eingeschränkt möglich

Tabelle 13: Vorteile und Einschränkungen der tiefreichenden Bodenstabilisierung [27]

Tabelle 14 wurde im Rahmen einer Evaluierung für ökoeffizientes Bauen am Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft sowie am Institut für Grundbau- und Bodenmechanik der Technischen Universität Wien gemeinsam mit ausführenden österreichischen Unternehmen für den Großraum Wien entwickelt und bewertet. Die Tabelle führt alle wichtigen Einflussgrößen der Nassmischverfahren an und diese wurden wie folgt bewertet:

+ Großer Einfluss **o Mittlerer Einfluss** **- Geringer Einfluss**

Topographie	
Angrenzende Bebauung (z.B. Wohn - oder Geschäftsviertel), Verkehrsflächen, Schutzgebiete	o
Technische Infrastruktur im Untergrund (Leitungen, Kanäle, etc.)	+
Begrenzte lichte Höhe (Oberleitungen, Brücken, etc.)	+
Klima	
Temperatur	o
Niederschlag	-
Wind	o
Allgemeine Parameter	
Schichtverhältnisse	o
Einschlüsse (Blöcke Fundamente, Verkit-tungen, Baustämme,...	+
Verkittungen, Konglomerate	+
Spezielle Parameter	
Korngrößenverteilung	+
Dichte	+
Lagerungsdichte	+
Konsistenz	+
Kompressibilität, Verdichtungsfähigkeit	-
Umlagerungsfähigkeit, Dilatationsverhalten	o
Scherverhalten	o
Wasser im Baugrund	
Wassergehalt	o
Durchlässigkeit	o
Höhe Grundwasserspiegel	+
Grundwasserströmung	+
Sonstige Parameter	
Organische Beimengungen	o
Aggressive Bestandteile	-

Tabelle 14: Bewertete Einflussgrößen der tieferreichender Bodenstabilisierungen für den Großraum Wien [36]

Einflüsse	Auswirkungen	
	Unmittelbar	Mittelbar
Abgase	x	
Lärm	x	
Erschütterungen		
Staub	x	
Baustoffbezogene Emissionen in den Untergrund	x	x
Anfall an verunreinigtem Bohrgut	x	
Baustellenabfälle, Reststoffe	x	

Tabelle 15: Umwelteinflüsse Mixed in Place-Verfahren [36]

Als unmittelbare Auswirkungen werden jene Konsequenzen verstanden, die ohne zeitliche Verzögerung im Umfeld der Bautätigkeit wirksam und bedeutend einfließen.

Als mittelbare Auswirkungen sind Folgewirkungen zu verstehen, die nicht zeitlich gebunden und auch abseits des Baustellenbereiches einen wirksamen oder bedeutenden Einfluss auf die Umwelt haben.

8.2 Ausblick

Durch die Vielfalt der Verfahren und der verfügbaren Ausrüstung, sowie der Flexibilität der geometrischen Anordnung der Säulenkörper, erweist sich die Technik der tiefreichenden Bodenstabilisierung als wertvolle Alternative zu den bekannten traditionellen Techniken. In Hinblick auf die Verwertung des anstehenden Bodens als Baustoff und die damit verbundenen Kostenreduktionen bieten die Verfahren gute wirtschaftliche Lösungen an. Des Weiteren ist durch die Reduktion der Zu- und Abfahrten von Transporten auf der Baustelle aus ökologischer Sicht noch ein hohes Potential hinsichtlich Dezimierung von Emissionen wie Abgasen, Lärm, Vibrationen, etc. vorhanden.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die hergestellten Erzeugnisse mit dem anstehenden Boden als Baustoff sich als kostengünstige aber auch ökologische Alternative zu traditionelle Techniken erweisen und in Zukunft sicherlich vermehrt auf Österreichs Baustellen anzutreffen sein werden.

Anhang

Kalkulationsblätter

Geräte-, Material und Personaldisposition

Drehbohrereinheit

Drehbohrgerät BG 20
inkl. Mäkler 210 kW, 60 to

Drehbohrgerät BG 28
inkl. Mäkler 310 kW; 96 to

Mischwerkzeug

Dreifach-
Endlosschnecke
MIP bis 9,50 m;
3 x 330 mm; (Firmenangabe)
Drehantrieb

Dreifach-
Endlosschnecke
MIP bis 16,50 m;
3 x 330 mm; (Firmenangabe)
Drehantrieb

Baustelleneinrichtung

Stahlsilo 60 m³
Behälterwaage
Förderschnecke 2,2 kW, 200 kg
Rührwerk 3.000 l 7,5 kW; 400 kg
Wasserbehälter, offen 3 m³ 465 kg
Mischanlage 33 kW; 3000 kg
Druck- und Mengenschreiber

Personal

Geräteführer
Bohrhelfer
Maschinist

Bindemittel

Zement CEM III

Kosten Trägergerät

Vorwerte

Verbrauch [l/kWh]	0,20
Dieselpreis [€/l]	0,90
Schmiermittelfaktor	1,10

Gerät

Drehbohrgerät BG 20	Neuwert	1.200.000,00	€ (Firmangabe)
inkl. Mäkler	Nutzungsjahre	10	
ÖGBL NR. (1996) 3101	Vorhaltemonate	90	
Leistung 210 kW	Zinssatz	6,50	%
Gewicht 60 to	Betriebsstunden	10.000	Std (Annahme)
	Ansatz für Rep.-kosten	70	%

Abschreibung

Neuwert / Betriebsstunden [€/Std]
 1.200.000 € / 10.000 Std

A 120,00 €/Std

Verzinsung

Nutzungsjahre x Neuwert x Zinssatz / (2 x Betriebsstunden)
 10 x 1.200.000 x 0,065 / (2 x 10.000)

V 39,00 €/Std.

Reparatur

(kalk. Abschreibung + kalk. Verzinsung) x Ansatz für Rep.-kosten
 (120,00+39,00) x 0,70

Rep. 111,30 €/Std

Betriebsstoffe

inkl. Schmierstoffe

41,58 €/Std $210 \times 0,90 \times 0,2 \times 1,10$
 [€/kWh]

Σ Gerätekosten
Drehbohrgerät

311,88 €/Std

Gerät

Drehbohrgerät BG 28	Neuwert	1.300.000,00 €	(Firmenangabe)
inkl. Mäkler	Nutzungsjahre	10	
ÖGBL NR. (1996) 3101	Vorhaltemonate	90	
Leistung 310 kW	Zinssatz	6,50 %	
Gewicht 96 to	Betriebsstunden	10.000 Std	(Annahme)
	Ansatz für Rep.-kosten	70,00 %	

Abschreibung

Neuwert / Betriebsstunden [€/Std.]

1.300.000 € / 10.000 Std

A 130,00 €/Std

Verzinsung

Nutzungsjahre x Neuwert x Zinssatz / (2 x Betriebsstunden)

10 x 1.300.000 x 0,065 / (2 x 10.000)

V 42,25 €/Std

Reparatur

(kalk. Abschreibung + kalk. Verzinsung) x Ansatz für Rep.-kosten

(130,00+42,25) x 0,70

Rep. 120,58 €/Std

Betriebsstoffe

inkl. Schmierstoffe

61,38 €/Std

310x0,90x0,2x1,10
[€/kWh]**Σ Gerätekosten****Drehbohrgerät****354,21 €/Std**

Kosten Mischerwerkzeug

Gerät

Dreifach- Endlosschnecke MIP bis 9,50 m; 3 x 330 mm; Drehantrieb ÖGBL Nr. (1996) 4316	Neuwert	300.000,00 €	(Firmenangabe)
	Nutzungsjahre	4	
	Vorhaltemonate	30	
	ÖGBL Abminderung		
	Abschreibung und Verzinsung	0,60	
	ÖGBL Abminderung		
	Reparatur	0,70	
	Reparaturanteil lt. ÖGBL	95,00 %	3,80/4,00%

Abschreibung

Neuwert / Vorhaltemonate x Abminderungsfaktor / 172 Std/Mo
 $300.000 / 30 \times 0,60 / 172 \text{ Std/Mo}$

A 34,88 €/Std

Verzinsung

Nutzungsjahre x Neuwert x Zinssatz x Abminderungsfaktor /
 / (2 x Vorhaltemonate) / 172 Std/Mo
 $4 \times 300.000 \times 0,065 \times 0,60 / (2 \times 30) / 172 \text{ Std/Mo}$

V 4,53 €/Std

Reparatur

Neuwert / Vorhaltemonate x Abminderungsfaktor / 172 Std/Mo
 $300.000/30 \times 0,95 \times 0,70 / 172 \text{ Std/Mo}$

Rep 38,66 €/Std

Gerätekosten

Dreifachschncke

78,08 €/Std

Gerät

Dreifach- Endlosschnecke MIP bis 16,50 m; 3 x 330 mm; inkl. Drehantrieb ÖGBL Nr. (1996) 4316	Neuwert	320.000,00 €	(Firmenangabe)
	Nutzungsjahre	4	
	Vorhaltemonate	30	
	ÖGBL Abminderung		
	Abschreibung und Verzinsung	0,60	
	ÖGBL Abminderung		
	Reparatur	0,70	
Reparaturanteil lt. ÖGBL	95,00 %	3,80/4,00%	

Abschreibung

Neuwert / Vorhaltemonate x Abminderungsfaktor / 172 Std/Mo
 $320.000 / 30 \times 0,60 / 172 \text{ Std/Mo}$

A 37,21 €/Std

Verzinsung

Nutzungsjahre x Neuwert x Zinssatz x Abminderungsfaktor /
 / (2 x Vorhaltemonate) / 172 Std/Mo
 $4 \times 320.000 \times 0,065 \times 0,60 / (2 \times 30) / 172 \text{ Std/Mo}$

V 4,84 €/Std

Reparatur

Neuwert / Vorhaltemonate x Abminderungsfaktor / 172 Std/Mo
 $320.000/30 \times 0,95 \times 0,70 / 172 \text{ Std/Mo}$

Rep 41,24 €/Std

Gerätekosten

Dreifachschncke 83,29 €/Std

Kosten für die Baustelleneinrichtung

Vorwerte

13,7603 ATS	1,00 €	
Stromkosten	0,20 €/kWh	
Schmiermittelfaktor	1,10	
Abminderungsfaktor A. u. V	0,60	
Abminderungsfaktor Rep	0,70	
GHPI	123,50 %	Stand 2006

Gerät

Stahlsilo 60 m³ ÖGBL NR. (1996) 1310-0060	Neuwert	139.000,00	ATS	
	Nutzungsjahre	6		
	Vorhaltemonate	50		
Gewicht: 6.000 kg	montl. A. u. V,	3.340,00	ATS	
	montl. Rep.	2.780,00	ATS	
	korr.montl .A.u.V	299,77	€	Umrechnung+GHPI
	korr.montl. Rep.	249,51	€	Umrechnung+GHPI
	A. u. V.	1,05	€/Std	299,77x0,6/172 Std/Mo
	Rep	1,02	€/Std	249,51x0,7/172 Std/Mo
Kosten Zementsilo		2,06	€/Std	

Gerät

Behälterwaage ÖGBL Nr. (1996) 1202-1000	Neuwert	91.000,00	ATS	
	Nutzungsjahre	6		
	Vorhaltemonate	50		
Gewicht: 320 kg	montl. A. u. V.	2.180,00	ATS	
	montl. Rep.	1.180,00	ATS	
	korr.montl .A.u.V	195,66	€	Umrechnung+GHPI
	korr.montl. Rep.	105,91	€	Umrechnung+GHPI
	A. u. V.	0,68	€/Std	195,66x0,6/172 Std/Mo
	Rep	0,43	€/Std	105,91x0,7/172 Std/Mo
Kosten Behälterwaage		1,11	€/Std	

Gerät			
Förderschnecke ÖGBL NR. (1996) 1230-0002	Neuwert	36.000,00	ATS
	Nutzungsjahre	6	
	Vorhaltemonate	50	
Leistung 2,2 kW	montl. A. u. V,	864,00	ATS
Gewicht 220 kg	montl. Rep.	468,00	ATS
	korr.montl .A.u.V	77,54	€ <i>Umrechnung+GHPI</i>
	korr.montl. Rep.	42,00	€ <i>Umrechnung+GHPI</i>
	A. u. V.	0,27	€/Std <i>77,54x0,6/172 Std/Mo</i>
	Rep	0,17	€/Std <i>42,00x0,7/172 Std/Mo</i>
	Betrieb	0,48	€/Std <i>2,20x0,2x1,10 [€/kWh]</i>
	<i>inkl. Schmierstoffe</i>		
	Kosten Förderschnecke	0,93	€/Std
Gerät			
Rührwerk 3.000 I ÖGBL NR. (1996) 4724-3000	Neuwert	139.000,00	ATS
	Nutzungsjahre	6	
	Vorhaltemonate	40	
Leistung 7,50 kW	montl. A. u. V,	4.170,00	ATS
Gewicht 400 kg	montl. Rep.	3.480,00	ATS
	korr.montl .A.u.V	374,26	€ <i>Umrechnung+GHPI</i>
	korr.montl. Rep.	312,33	€ <i>Umrechnung+GHPI</i>
	A. u. V.	1,31	€/Std <i>374,26x0,6/172 Std/Mo</i>
	Rep	1,27	€/Std <i>312,33x0,7/172 Std/Mo</i>
	Betrieb	1,65	€/Std <i>7,50x0,2x1,10 [€/kWh]</i>
	<i>inkl. Schmierstoffe</i>		
	Kosten Rührwerk	4,23	€/Std
Gerät			
Wasserbehälter, offen 3 m³ ÖGBL NR. (1996) 9355-0030	Neuwert	12.000,00	ATS
	Nutzungsjahre	10	
	Vorhaltemonate	75	
Gewicht 465 kg	montl. A. u. V,	216,00	ATS
	montl. Rep.	48,00	ATS
	korr.montl .A.u.V	19,39	€ <i>Umrechnung+GHPI</i>
	korr.montl. Rep.	4,31	€ <i>Umrechnung+GHPI</i>
	A. u. V.	0,07	€/Std <i>19,39x0,6/172 Std/Mo</i>
	Rep	0,02	€/Std <i>4,31x0,7/172 Std/Mo</i>
	Kosten Wasserbehälter	0,09	€/Std

Gerät

Mischanlage ÖGBL NR. (1996) 4704	Neuwert	150.000,00 €	(Firmenangabe)
Leistung 33 kW	Nutzungsjahre	8	
Gewicht 3000 kg	Vorhaltemonate	50	
max 8 m ³ /Std	montl. Satz A.u.V.	2,50 %	
	montl. Satz Rep.	2,00 %	
	ÖGBL Abminderung		
	Abschreibung und		
	Verzinsung	0,60	
	ÖGBL Abminderung		
	Reparatur	0,70	
	Reparaturanteil lt. ÖGBL	80,00 %	2,00/2,50%

Abschreibung

Neuwert/Vorhaltemonate x Abminderungsfaktor / 172 Std/Mo
 150.000 / 50 x 0,60 / 172 Std/Mo

A 10,47 €/Std

Verzinsung

Nutzungsjahre x Neuwert x Zinssatz x Abminderungsfaktor /
 / (2 x Vorhaltemonate) / 172 Std/Mo
 4 x 300.000 x 0,065 x 0,60 / (2 x 50) / 172 Std/Mo

V 2,72 €/Std

Reparatur

Neuwert/Vorhaltemonate x Rep.Satz x Abminderungsfaktor /
 / 172 Std/Mo
 150.000,00 / 50 x 0,80 x 0,70 / 172 Std/Mo

Rep 9,77 €/Std

Betrieb

inkl. Schmierstoffe

7,26 €/Std 33x0,2x1,10 [€/kWh]

Gerätekosten
Pumpstation

30,21 €/Std

Gerät

Druck- und Mengenschreiber ÖGBL NR. (1996) 4708	Neuwert	15.000,00	(Firmenangabe)
	Nutzungsjahre	4	
	Vorhaltemonate	25	
	montl. Satz A.u.V.	4,50	%
	montl. Satz Rep.	2,50	%
	ÖGBL Abminderung Abschreibung und Verzinsung	0,60	
	ÖGBL Abminderung Reparatur	0,70	
	Reparaturanteil lt. ÖGBL	55,56	% 2,50/4,50

Abschreibung

Neuwert / Vorhaltemonate x Abminderungsfaktor. / 172 Std/Mo
 $15.000 / 20 \times 0,60 / 172 \text{ Std/Mo}$

A 2,09 €/Std

Verzinsung

Nutzungsjahre x Neuwert x Zinssatz x Abminderungsfaktor /
 / (2 x Vorhaltemonate) / 172 Std/Mo
 $4 \times 15.000 \times 0,065 \times 0,6 / (2 \times 20) / 172 \text{ Std/Mo}$

V 0,34 €/Std

Reparatur

Neuwert / Vorhaltemonate x Rep.Satz x Abminderungsfaktor /
 / 172 Std/Mo
 $15.000/20 \times 0,55 \times 0,70 / 172 \text{ Std/Mo}$

Rep 1,36 €/Std

Kosten Mengenschreiber 3,79 €/Std

Gesamtkosten Baustelleneinrichtung

Position	Kosten
Stahlsilo 60 m ³	2,06 €/Std
Behälterwaage	1,11 €/Std
Förderschnecke	0,93 €/Std
Rührwerk 3.000 l	4,23 €/Std
Wasserbehälter, offen 3 m ³	0,09 €/Std
Mischanlage	30,21 €/Std
Druck- und Mengenschreiber	3,79 €/Std

Gesamtkosten 42,42 €/Std

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der mechanischen Bodenverbesserungsverfahren [32].....	8
Abbildung 2: Übersicht der Bodenverbesserungsverfahren mit Bindemitteln [32].....	11
Abbildung 3: Anwendungsmöglichkeiten der tiefreichenden Bodenstabilisierung [3].....	16
Abbildung 4: Überblick über die heute verwendeten In-situ-Mischverfahren [27].....	17
Abbildung 5: Flussdiagramm für die Ausführung der Trockenmischverfahren [3].....	18
Abbildung 6: Drei Beispiele üblicher nordischer Mischwerkzeuge [24]	19
Abbildung 7: Japanisches Standardmischwerkzeug [24]	20
Abbildung 8: Flussdiagramm für die Ausführung von Nassmischverfahren [3]	24
Abbildung 9: Dreifachschncke <i>links</i> ; Bohrstange mit Mischpaddel [24] <i>rechts</i>	25
Abbildung 10: DM-Maschine mit vier Mischwellen (<i>links</i>) [24]; DM-Maschine für maritime Arbeiten mit acht Mischwellen (<i>rechts</i>) [24]	26
Abbildung 11: Phasen der Herstellung einer Trockenmischsäule [14]	29
Abbildung 12: Wirkungsweise von Bodenverbesserungen mit Kalk [53].....	31
Abbildung 13: Bindemittelintrag am Mischwerkzeug	32
Abbildung 14: Empirische Anwendungsgrenzen von Bindemitteln [4].....	34
Abbildung 15: Festigkeitsentwicklung von unterschiedlichen Böden [4].....	36
Abbildung 16: Zusammenhang Kalkmenge und Druckfestigkeit [4]	38
Abbildung 17: Modell zur synergetischen Wirkungsweise von Mischbindern [4].....	39
Abbildung 18: MIP-Dreifachschncke zum Arbeiten zwischen den Ketten parallel zur Fahrtrichtung [31].....	41
Abbildung 19: Herstellungszyklus einer MIP-Lamelle [31].....	42
Abbildung 20: Herstellungszyklus einer Lamelle mit Darstellung der Drehrichtung [44] ...	43
Abbildung 21: Arbeitsfolge für das Pilgerschrittverfahren [31].....	44
Abbildung 22: Abfräsen einer fertigen MIP-Wand [31]	44
Abbildung 23: Anwendungsgrenzen MIP-Verfahren [44].....	45
Abbildung 24: Herstellung einer bewehrten MIP-Säule mit Bewehrungskorb [57]	45
Abbildung 25: Herstellung eines bewehrten MIP-Element mit Stahlprofilen [57].....	46
Abbildung 26: Dammabdichtung mittels MIP-Verfahren [57].....	47
Abbildung 27: Einkapselung mittels MIP-Verfahren [17]	48
Abbildung 28: Arbeitsfolge für das doppelte Pilgerschrittverfahren [17]	49
Abbildung 29: Übersicht der heute verwendeten Geräteeinheiten [31]	50
Abbildung 30: Hydraulischer Drehantrieb [29].....	51
Abbildung 31: MIP Dreifach Endlosschncke (<i>links</i>); MIP Einfachschcncke (<i>rechts</i>) [31] ..	52
Abbildung 32: Aufbau eines Dreifachschnckenbohrers mit Darstellung der Drehrichtungen [31]	53
Abbildung 33: MIP Mischanlage [31]	54
Abbildung 34: MEDEF Bedienpult im Fahrerhaus [31]	55
Abbildung 35: MIP Herstellungsprotokoll [31].....	56
Abbildung 36: SMW Dreifachbohrer mit Mischpaddel [31]	58
Abbildung 37: Neuentwicklung - SMW-Dreifachbohrwerkzeug [35]	59
Abbildung 38: Herstellungszyklus einer WSM Säule [58].....	63
Abbildung 39: Trägergerät mit Teleskopmäkler TM 16/20 [59].....	64
Abbildung 40: Bohrantriebe MDBA (<i>links</i>), TMBA (<i>rechts</i>) [59]	65
Abbildung 41: Wet Speed Mixing Mischerwerkzeug [58].....	66
Abbildung 42: Keller Grundbau Trockenmischeinheit [35].....	68
Abbildung 43: Trockenmischergerät [60]	69
Abbildung 44: Verfahrensschritte zur Herstellung einer Trockenmischsäule [60]	70
Abbildung 45: Fertiggestellte Trockenmischsäulen mit einem Durchmesser von 60 cm [35]	70

Abbildung 46: Mit dem Trockenmischverfahren erreichte Scherfestigkeit bei verschiedenen Böden [38].....	71
Abbildung 47: Kombinierte Säulen-Block Stabilisierung [35].....	72
Abbildung 48: Trockenmischeinheit mit nachlaufender mobiler Mischanlage [37]	73
Abbildung 49: Mischwerkzeug "PINNBORR" [35]	74
Abbildung 50: Mobiler LC-PREMIER [35]	74
Abbildung 51: Pilgerschrittverfahren bei der Herstellung einer CSM-Wand	77
Abbildung 52: Unterschneidung von kreuzenden Leitungen mit dem Fräskopf [21]	78
Abbildung 53: Zu Testzwecken ausgegrabenes CSM-Wandelement mit gut erkennbarem Negativabdruck des Fräswerkzeugs [20].....	79
Abbildung 54: "stangengeführte"- (links) und "seilgeführte"- (rechts) -CSM-Einheit [19]...	80
Abbildung 55: Fräskopf BCM 5 [20].....	81
Abbildung 56: Arbeitsbildschirm CSM-Steuereinheit [20]	82
Abbildung 57: CSM-Protokoll; vertikale Achsen: Tiefenverlauf, Pumpmenge pro Zeiteinheit, Pumpmenge aufsummiert, Suspensionsdruck; horizontale Achse: Zeit [20].....	83
Abbildung 58: Fräsbaum mit einer Breite von 1,0 m (<i>links</i>) bzw. 0,35 m (<i>rechts</i>) [39]	85
Abbildung 59: Einbau einer Dichtwand in einem Hochwasserschutzdamm [33]	86
Abbildung 60: Bodenfräse [35]	86
Abbildung 61: Auffräsen und Stabilisieren einzelner Bodenschichten [40].....	89
Abbildung 62: Blockstabilisierung [40]	89
Abbildung 63: Massenstabilisierung mit einem um die vertikale Achse rotierenden Mischwerkzeug [3]	90
Abbildung 64: Massenstabilisierung mit einem um die horizontale Achse rotierenden Mischwerkzeug [40]	91
Abbildung 65: Mobile Vorratsilos PF 7+7 (<i>links</i>) und digitaler Messschreiber zur Qualitätssicherung (<i>rechts</i>) [40].....	92
Abbildung 66: Bohrwerkzeug TSM [22]	93
Abbildung 67: Vergleich CDM (<i>links</i>), CDM-Lodic (<i>rechts</i>) [26].....	95
Abbildung 68: Herstellung einer CDM-LODIC Säule [25]	96
Abbildung 69: Iterativer Bemessungsprozess [3]	97
Abbildung 70: Prinzip der Belastungsverteilung bei Pfählen [52]	99
Abbildung 71: Beispiele von Behandlungsrastern für das Trockenmischverfahren [3]....	100
Abbildung 72: Blockartige Trockenmischraster mit überschrittenen Säulen [3].....	100
Abbildung 73: Beispiele von Behandlungsrastern für Nassmischverfahren an Land [3] .	101
Abbildung 74: Beispiele von Behandlungsrastern für Unterwasser-Anwendungen [3]....	102
Abbildung 75: Typische Messeinheit am Drehbohrgerät [37]	104
Abbildung 76: Messaufbau am Pfahlkopf [44]	108
Abbildung 77: Aufbau dynamische Pfahlprüfung mit Fallgewicht [44]	109
Abbildung 78: Wellenausbreitung bei Integritätsprüfung nach dem "low-strain"-Verfahren [45].....	110
Abbildung 79: Einfluss der Bindemittelzugabe auf die Herstellungskosten einer MIP-Wand	117
Abbildung 80: Einfluss der Bindemittelzugabe auf die Herstellungskosten einer MIP-Wand	118
Abbildung 81: Anwendbarkeit von Verfahren bezogen auf den zu behandelnden Boden	119

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bodenklassen nach ÖNORM B 2205 [56]	2
Tabelle 2: Bodenklassifikation nach ON B 4400 [55].....	4
Tabelle 3: Vergleich nordischer und japanischer Trockenmischtechnik [3].....	21
Tabelle 4: Typische Ausführungsparameter der nordischen und der japanischen Trockenmischtechnik [3].....	21
Tabelle 5: Für das Trockenmischverfahren üblicherweise verwendete Bindemittel [3].....	23
Tabelle 6: Wesentliche Leistungs- und Ausführungsmerkmale der europäischen und der japanischen Nassmischtechnik [3].....	27
Tabelle 7: Typische Ausführungsparameter der europäischen und der japanischen Nassmischtechnik [3].....	28
Tabelle 8: Technische Daten Drehantrieb RH 1000 [30].....	51
Tabelle 9: Technische Daten Bohrantrieb MDBA 3000 [59].....	65
Tabelle 10: ALLU PM Geräte zur Massenstabilisierung für verschiedene Behandlungstiefen [40].....	91
Tabelle 11: Korrelation zwischen Scherfestigkeit, Zugfestigkeit und Verformbarkeit zur einaxialen Druckfestigkeit [27].....	106
Tabelle 12: Richtwerte für Verfestigung mit Zement als Bindemittel [1]	113
Tabelle 13: Vorteile und Einschränkungen der tiefreichenden Bodenstabilisierung [27].	120
Tabelle 14: Bewertete Einflussgrößen der tiefreichender Bodenstabilisierungen für den Großraum Wien [36]	121
Tabelle 15: Umwelteinflüsse Mixed in Place-Verfahren [36]	122

Quellenverzeichnis

- [1] SCHNELL, W; VAHLAND, R.: Verfahrenstechnik der Baugrundverbesserung; Stuttgart; Teubner Verlag, 1997
- [2] PECH, A.; WÜRGER, E.: Gründungen; Wien; Springer Verlag/Wien, 2005
- [3] ÖNORM EN 14679: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) Tiefreichende Bodenstabilisierung; Österreichisches Normungsinstitut; Ausgabe 2006-09-01
- [4] WITT, K.J.: Geotechnikseminar Weimar 2002; In Schanz, Witt (Hrsg.); Schriftenreihe Geotechnik, Heft 7, 2002
- [5] SCHROEDER, D.: Bodenkunde in Stichworten; Stuttgart; Hirt in der Gebrüder Bornträger – Verlagsbuchhandlung; 1992
- [6] WEBER, K.; GARTSKA, B.: Ratgeber für den Tiefbau; München/Unterschleißheim; Werner Verlag; 2005
- [7] BUJA, H.O.: Handbuch des Spezialtiefbaus; Düsseldorf; Werner Verlag; 2001
- [8] BUJA, H.O.: Spezialtiefbau – Praxis von A – Z; Berlin; Bauwerk Verlag; 2002
- [9] KNOBLAUCH, H; SCHNEIDER, U.: Bauchemie; Düsseldorf; 4. Auflage; Werner Verlag; 1995
- [10] SMOLTCZYK, U.: Grundbau Taschenbuch Teil 1: Geotechnische Grundlagen; Berlin; Ernst & Sohn Verlag; 2001
- [11] SMOLTCZYK, U.: Grundbau Taschenbuch Teil 2: Geotechnische Verfahren; Berlin; Ernst & Sohn Verlag; 2001
- [12] SMOLTCZYK, U.: Grundbau Taschenbuch Teil 3: Gründungen; Berlin; Ernst & Sohn Verlag; 2001

-
- [13] Prospekt Bauer Maschinenbau GmbH: BG 20H Großdrehbohrgerät; Schrobenhausen; 2004
- [14] LARSSON, S.: Mixing Processes for Ground Improvement by Deep Mixing; Royal Institute of Technology Division of Soil and Rock Mechanics; Stockholm; 2003
- [15] CDIT: The Deep Mixing Method – Principle, Design and Construction; ed. by Coastal Development Institute of Technology (CDIT); Japan; A. A. Balkema; 2002
- [16] SCHMIDT, H.H.: Grundlagen der Geotechnik; Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden; Teubner Verlag; 2001
- [17] SÜNDERKAMP, M.: Einkapselung im MIP-Verfahren auf dem Gelände der ehemaligen Zeche Consolidation in Gelsenkirchen. Fachtagung Spezialtiefbau 2003 – München; 2003, Nr. 3, S. 8 – 11
- [18] <http://www.baumaschinen.de>; 09.12.2006
- [19] STÖTZER, E; GERRESSEN, F.W.; SCHÖPF, M.: CSM -Cutter Soil Mixing – Ein Verfahren zur Herstellung unterirdischer Wände. Tiefbau; 118.Jg., 2006, Nr. 6, S. 331 – 334
- [20] ARZBERGER,M.: CSM - Ein innovatives Verfahren zur Herstellung von Dicht- und Baugrubenwänden. Tiefbau; 48.Jg., 2004, Nr. 5, S. 16,17
- [21] BAUER Umweltgruppe: <http://www.bauerumweltgruppe.com>. 14.11.2006
- [22] WEHR, Jimmy; ELWART, K.: Neues Verfahren der Baugrundverbesserung: Tubular-Soil-Mix-Säulen (TSM-Säulen); KELLERfenster – Offenbach, 1.Jg., 2006, Nr.1, S. 7,8
- [23] BAUER, S.: Maschinen für neue Verfahren im Spezialtiefbau: 2. Fachtagung Baumaschinentechnik in Magdeburg; Magdeburg; 2004; S. 71 – 81

-
- [24] LARSSON, S.: State of Practice Report – Execution, monitoring and quality control; Royal Institute of Technology Division of Soil and Rock Mechanics; Stockholm; S. 2003; S. 732 – 786
- [25] SUGIYAMA, K.: The CDM-LODIC method – outline and applications; Proc. Tokyo Workshop 2002 on Deep Mixing; Tokyo; 2002; S. 326 – 331
- [26] KAMIMURA, K; KAMI, C; TAKAHASHI, T.: Development of large diameter deep mixing method with reduced displacement due to mixing (CDM-LODIC); Proc. Int. Conf. on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances; Stockholm; 2005; S. 533 – 537
- [27] TOPOLNICKI, M.: (2002) Quality control of wet deep mixing with reference to Polish practice and applications; Proc. Tokyo Workshop 2002 on Deep Mixing, Tokyo, 2002; S. 167-175
- [28] SCHOLZ-SOLBACH, K.: Thermische Effekte der tiefgründigen Bodenstabilisierung mit Branntkalk-Boden-Säulen; Dissertation; Weimar; Bauhaus-Universität Weimar; 2004;
- [29] EURODRILL GmbH; <http://www.eurodrill.de>; 22.10.2006
- [30] EURODRILL GmbH; RH 1000 / RH 1400 Hydraulische Drehantriebe; Drolshagen; 2005
- [31] Prospekt Bauer Spezialtiefbau GmbH: Mixed-in-Place-Verfahren; Schrobenhau- sen; 2003
- [32] ESTERMANN, U.: Bodenverfestigungs- und Bodenverbesserungsverfahren – An- wendungsgebiete und Anwendungsgrenzen; Tiefbau; 117 Jg.; Heft 6; S. 319-325; 2005
- [33] Prospekt SIDLA & SCHÖNBERGER Spezialtiefbau GmbH: Bodenverfestigung im Fräs-Misch-Injektionsverfahren (kurz: FMI-Verfahren); Schöllnach

-
- [34] Prospekt Hayward Baker Inc: Dry Soil Mixing; 2005;
<http://www.haywardbaker.com>; 04.02.2006
- [35] LCM; <http://lcm.se>; 15.01.2007
- [36] Ökokauf: Ökoeffiziente Entscheidungskriterien im Tiefbau; Wien; S. 91-100; 2005
- [37] Development of Design and Construction Methods to Stabilise Soft Organic Soils:
EuroSoilStab Design guide - Soft Soil Stabilisation; Brepress, 2002
- [38] SIGMUND, C.; THURNER, R.: Aktuelle Gründungen und Baugrubensicherungen
mittels tiefer Bodenvermörtelung – Design und Ausführung: Beiträge zum 21.
Christian Veder Kolloquium – Neue Entwicklungen der Bodenverbesserung; Tech-
nische Universität Graz; Heft 28; S. 103-121; 2006
- [39] Sidla & Schönberger Spezialtiefbau GmbH; <http://www.sidla-schoenberger.de>;
21.01.2007
- [40] ALLU; <http://allu.net>; 21.01.2007
- [41] RTG-Rammtechnik GmbH; <http://rtg-rammtechnik.de>; 17.12.2006
- [42] JODI, H.G; GÖGER, G.: Studienblätter zur Vorlesung Bauverfahren im Tiefbau;
TU-Wien; Inst. für Baubetrieb und Bauwirtschaft; Ausgabe 2002/2003
- [43] OBERNDORFER C.: Baugruben im Grundwasser; Diplomarbeit TU-Wien; Inst. für
Baubetrieb und Bauwirtschaft; 1996
- [44] KOISSER, S; ETZOLD, A: Mixed-in-place als Tiefgründung am Beispiel des Pro-
jekts Terminal Tower Linz; 6. Österreichische Geotechniktagung; ÖIAV; S. 71-81;
2007
- [45] STAHLMANN, J; KIRSCH, F.; SCHALLERT, M.: Pfahltests – modern dynamisch
und/oder konservativ statisch; 4. Kolloquium 'Bauen in Boden und Fels'; Techni-
sche Akademie Esslingen; S. 23-40; 2004

-
- [46] Wiederverwendung bituminöser Straßenbaustoffen
<http://www.biw.fh-deggendorf.de/alumni/2000/raml/strassenbaustoffe/index.htm>;
02.02.2007
- [47] Oberbauarbeiten – Tragschichten - Mit Bindemitteln stabilisierte Tragschichten:
RVS 08.17.01
- [48] Deckenarbeiten – Bituminöse Decken - Wiederverwendung von Asphalt: RVS
08.16.06
- [50] Laborversuche (Lockergestein) – Bodenklassifikation;
<http://www.uibk.ac.at/geotechnik>; 03.02.2007
- [51] Österreichische Baugeräteliste (ÖGBL); VIBÖ; Wien; 1996
- [52] KEMPFERT, H.-G.: Ground Improvement methods with special emphasis on
column-type techniques; Int. Workshop of Geotechnics of Soft Soils- Theory and
Practice- SCMEP; Netherlands, Verlag Glückauf, Seite 101 – 112; 2003
- [53] WISOTZKI, E.: Maßnahmen zur Baugrundverbesserung; Rostocker Berichte aus
dem Fachbereich Bauingenieurwesen; Heft 13; 2004
- [54] KÖNIG, H.: Maschinen im Baubetrieb – Grundlagen und Anwendung; Teubner
Verlag; Wiesbaden; 2005
- [55] ÖNORM B 4400: Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für Bautechnische
Zwecke und Methoden; Österreichisches Normungsinstitut; Wien; 1978
- [56] ÖNORM B 2205-1: Erdarbeiten - Werkvertragsnorm; Österreichisches Normungs-
institut; Wien; Ausgabe 2000 11 01
- [57] GÓRSKI, G.; CHOLEWA, D.: Mixed-in-Place Cutt off-Walls and Demountable
Flood Defence Systems (IBS); ICID 21st European Regional Conference;
Frankfurt; 2005

-
- [58] Prospekt ABI-GmbH: Wet Speed Mixing – WSM Bodenmischverfahren; Niedernberg; 2005
- [59] ABI-GmbH: <http://www.abi-gmbh.biz>; 18.02.2007
- [60] Wüster, O.: Untersuchung des Einarbeitungseffekts im Tiefbau am Beispiel der Herstellung von MIP-Säulen; <http://www.owue.de>; 25.02.2007
- [61] Brandl, H.: Verfahren zur Sicherung und Sanierung von Altlasten; Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift, 134.Jg, 1989; Nr. 2, S. 57-81
- [62] Wikipedia – Die freie Enzyklopädie; <http://de.wikipedia.org>; 25.05.2007