

Diploma Thesis

Processoriented Performance Specifications for Underground Construction

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Prozessorientierte Leistungsbeschreibung im Tiefbau

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Andreas Fritz Köninger, BSc

Matr.Nr.: 01129161

unter der Anleitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Gerald Goger**

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Leopold Winkler, BSc**

Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement
Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/234-01, 1040 Wien, Österreich

Wien, im November 2020

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während meinem Studium und bei der Erstellung dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Zuerst darf ich mich bei Herrn Prof. Gerald Goger und Herrn Leopold Winker bedanken, die meine Masterarbeit betreut und begutachtet haben. Trotz COVID-19-Krise und Lockdown war das Betreuungsverhältnis immer ein ausgesprochen gutes. Es war mir eine Freude, mein Studium mit einer derart interessanten Arbeit abzuschließen.

Ein ganz besonderer Dank gilt allen Unternehmen und Experten, die mich bei der Erstellung der Prozessdiagramme und der Beantwortung der Umfrage unterstützt haben.

Zum Abschluss möchte ich meiner Familie danken. Vielen Dank an meine Eltern Doris und Andreas, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben. Danke an meinen Bruder Fabian, der immer ein offenes Ohr für mich hat. Der größte Dank gilt meiner Freundin Lena, die mir seit fünf Jahren zur Seite steht und mir die „Wadln vieregrichtet“ hat.

Kurzfassung

Schlagwörter: Spezialtiefbau, Spundwände, Pfähle, Schlitzwände, Düsenstrahlverfahren, Gerätetechnik, Prozessdiagramme (BPMN 2.0), Aufwands- und Leistungswerte, Standardisierte Leistungsbeschreibung

Der Spezialtiefbau ist ein Bereich des Bauwesens der sich überwiegend mit Bautätigkeiten im Untergrund befasst. Die dabei hergestellten Bauteile sind zumeist in späterer Folge nicht mehr einsehbar. Dieser Umstand stellt Bauunternehmen und Aufsichtsorgane auf der Baustelle vor eine schwere Aufgabe. Detaillierte Bauverfahrenstechniken und Kalkulationsansätze – beginnend von der Angebotsphase bis zur Abrechnung – basieren überwiegend auf internem Expertenwissen. Bis jetzt existieren in Unternehmen nur interne Verfahrensbeschreibungen und Arbeitsanweisungen. Öffentlich zugänglichen Darstellungen der Abläufe jener Verfahren fehlen bisher in Praxis und Lehre.

Aus diesem Grund werden die Arbeitsabläufe bestimmter Herstellungsverfahren in dieser Arbeit detailliert erarbeitet und mithilfe von Prozessdiagrammen dargestellt. Die Visualisierung wurde mit der Modellierungssprache „Business Process Modeling and Notation 2.0“ vorgenommen. Es wurden elf, häufig angewandte, Herstellungsverfahren aus sechs Gewerken des Spezialtiefbaus (Spundwände, Verdrängungspfähle, Bohrpfähle, Mikropfähle, Schlitzwände und Düsenstrahlverfahren) ausgewählt.

Basis der Prozessdiagramme ist eine umfangreiche Analyse von Fachliteratur, Normen und Richtlinien. Die Analyse wurde durch Gespräche mit Fachexperten von Spezialtiefbauunternehmen ergänzt, die wichtige Zusatzinformationen zu den Verfahren gegeben haben. Mithilfe der Diagramme wurden anschließend Aufwände wie Gerät, Personal und Zeit qualitativ zu Prozessen und Teilprozessen zugeordnet. Die darauffolgende quantitative Umfrage stellte den Vergleich zwischen der Fachliteratur und den Erfahrungswerten der Praxis her. Die abschließende vergleichende Analyse der Prozessdiagramme mit der Standardisierten Leistungsbeschreibung beantwortete die Frage, ob die Ausschreibung von Bauprojekten derzeit prozessorientiert erfolgt.

Unter den Errungenschaften dieser Arbeit sind die ausgearbeiteten Prozessdiagramme der Verfahren. Sie veranschaulichen die Ausführungsprozesse mit einem hohen Detaillierungsgrad. Zudem ist es gelungen, den Prozessen und Gruppen Geräte, Personal sowie Zeitaufwände zuzuordnen. Die Ergebnisse der auf den Diagrammen basierenden Umfrage haben teils erhebliche Unterschiede der Leistungskennwerte aufgezeigt. Bei einem Drittel der Verfahren wurden die Tagesleistungswerte geringer, als in der Fachliteratur, angegeben. Bei den verbleibenden Verfahren wurden die Kennwerte zu Leistungen teils erheblich übertroffen. Der anschließende Vergleich der Prozessdiagramme mit der Standardisierten Leistungsbeschreibung hat verdeutlicht, dass sich ein Großteil der Prozesse in Form von Positionen wiederfindet. Ausgenommen davon sind tiefenabhängigen Prozesse und Prozesse, die als Nebentätigkeiten angesehen werden.

Die Arbeit hat gezeigt, wie umfangreich die Teilprozesse der Verfahren sind. Die Prozessdiagramme helfen, die Zusammenhänge besser zu verstehen und eignen sich demnach überaus gut zu Lehrzwecken. Ebenso zeigen die Ergebnisse der Umfrage, dass die Verfahren von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig sind und es demnach schwer ist, standardisierte Leistungsansätze darzustellen.

Abstract

Keywords: special civil engineering, sheet pile walls, piles, diaphragm walls, jet grouting, equipment technology, process diagrams (BPMN 2.0), effort and performance values, standardized performance description

Special civil engineering is a field of construction that primarily engages with underground construction activities. The components produced during this stage are usually not visible when the project is finished. The nature of these works is complex for construction companies and supervisory bodies. In this field, processes of construction methods and calculation approaches – from the tender to the invoicing phase – are largely based on internal expert knowledge. Currently, construction companies solely rely on internal process descriptions and work instructions. Publicly accessible standard descriptions of the processes and workflows are missing in practice and teaching.

Therefore, workflows of the most common manufacturing processes are described in detail in this thesis and are illustrated with the help of process diagrams. The visualisation was done with the modeling language “Business Process Modeling and Notation 2.0”. Out of six trades of special civil engineering (sheet piling, displacement piles, bored piles, micro piles, diaphragm walls and jet grouting), the eleven most common manufacturing processes were selected for visualisation.

Drafts of process diagrams are based on extensive research of technical literature, European standards and guidelines. They were further refined through technical discussions with experts from special civil engineering companies who provided important feedback. This detailed visualisation made a further allocation of efforts to processes and sub-processes possible. Furthermore, this thesis was able to draw a comparison between technical literature and practical experience by conducting a quantitative expert survey. Finally, a comparative analysis of the process diagrams with the standardised performance description answered the question whether current tender design is process-oriented.

Among the central achievements of this work are the detailed process diagrams of the eleven chosen procedures. Through them, it has been possible to allocate equipment, personnel and time efforts to each process and sub-process. As this outcome was qualitative, the quantitative perspective was added by the above mentioned survey. The results showed considerable differences to the data that technical literature suggests. For one third of the processes, experts indicated lower values than literature standards. For the remaining procedures, the experienced values were higher. While some differences were only minor, some comparisons suggest that technical literature does not well represent practical experience. The following comparison of process diagrams and standardized performance description clarified, that the processes are generally well presented in current tender design. Exceptions are depth-dependent processes and large process groups, which are regarded as secondary activities.

The work has shown the level of complexity of the procedures described. Therefore, process diagrams are well suited to visually help understand dependencies and allocate efforts. They can be of great support for designing tender offerings or teaching purposes. The results of the survey also show that the processes depend on a variety of influencing factors and that it is therefore difficult to create generally accepted performance specifications.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

AG Auftraggeber

BPMN Business Process Model and Notation

DSV Düsenstrahlverfahren

FSV Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr

HW Hochstrasser-Wiese

KDK Kraftdrehkopf

LB Leistungsbeschreibung

LP Leistungsprogramm

LV Leistungsverzeichnis

ÖBA Örtliche Bauaufsicht

ÖBGL Österreichische Baugeräteliste

PD Prozessdiagramm

SOB Schneckenortbeton

VdW Vor-der-Wand

W/B Wasser/Bindemittel

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	15
1.1	Motivation	15
1.2	Forschungsfrage	15
1.3	Forschungsabgrenzung	16
1.4	Methodik	16
2	Grundlagen	18
2.1	Spundwand	18
2.1.1	Anwendungsgebiete	19
2.1.2	Ausführungsformen	20
2.1.3	Verfahrenstechnik	22
2.1.4	Herstellungsverfahren	25
2.2	Pfahl	28
2.2.1	Anwendungsgebiete	30
2.2.2	Ausführungsformen	31
2.2.3	Verfahrenstechnik	33
2.2.4	Herstellungsverfahren	38
2.3	Schlitzwand	48
2.3.1	Anwendungsgebiete	49
2.3.2	Ausführungsformen	50
2.3.3	Verfahrenstechnik	51
2.3.4	Herstellungsverfahren	54
2.4	Düsenstrahlverfahren	57
2.4.1	Anwendungsgebiete	57
2.4.2	Ausführungsformen	58
2.4.3	Verfahrenstechnik	59
2.4.4	Herstellungsverfahren	60
2.5	Zusammenfassung	61
3	Gerätetechnik	65
3.1	Allgemein	66
3.1.1	Grundgeräte	66
3.1.2	Mäkler	67
3.1.3	Vorschubeinrichtung und Rollenkopf	68
3.1.4	Aufrichte- und Abstützzyylinder	69
3.1.5	Winden	69
3.1.6	Universal-Systeme	69
3.2	Spundwände	69
3.2.1	Trägergeräte	70
3.2.2	Geräte - Rammtechnik	70
3.2.3	Zusatzeinrichtungen für Rammen	71
3.2.4	Geräte - Vibrationstechnik	72

3.2.5	Zusatzeinrichtungen für Vibratoren	73
3.2.6	Geräte - Einpresstechnik	74
3.2.7	Hilfsmittel	76
3.3	Pfähle	76
3.3.1	Verdrängungspfähle - Rammen, Vibrieren, Pressen	77
3.3.2	Verdrängungspfähle - Drehbohren	77
3.3.3	Bohrpfähle - Drehbohren	79
3.3.4	Bohrpfähle - Schlagbohren	85
3.3.5	Bohrpfähle - Verrohrung	87
3.3.6	Mikropfähle	89
3.4	Schlitzwände	89
3.4.1	Trägergerät	89
3.4.2	Schlitzwerkzeuge	90
3.4.3	Entsandungsanlage	91
3.5	Düsenstrahlverfahren	92
3.5.1	Bohrgeräte	92
3.5.2	Bohr- und Injektionsgestänge	93
3.5.3	Bohrkronen und Düsenträger	93
3.5.4	Siloanlage	93
3.5.5	Injektionsmischer und Rührwerke	93
3.5.6	Hochdruckpumpen	94
3.5.7	Entsandungsanlage	94
3.5.8	Dekantierzentrifuge	94
3.6	Zusammenfassung	95
4	Prozesse	97
4.1	Spundwand - verankerte Wellenwand im Ramm-Verfahren	99
4.1.1	Bauleitung	99
4.1.2	Gewerbliches Personal - Rammgerät	99
4.1.3	Gewerbliches Personal - Ankerbohrgerät	100
4.2	Verdrängungspfahl - Ortbetonrammpfahl mit Fuß im Ramm-Verfahren	103
4.2.1	Bauleitung	103
4.2.2	Gewerbliches Personal - Rammgerät	103
4.3	Bohrpfahl - Einzelpfahl im Kelly-Verfahren	107
4.3.1	Bauleitung	107
4.3.2	Gewerbliches Personal - Drehbohranlage mit Kellystange	107
4.4	Bohrpfahl - tangierende Bohrpfahlwand im Schneckenortbeton (SOB)-Verfahren	111
4.4.1	Bauleitung	111
4.4.2	Gewerbliches Personal - Drehbohranlage mit Endlosschnecke	111
4.5	Bohrpfahl - überschnittene Bohrpfahlwand im Vor-der-Wand (VdW)-Verfahren	115
4.5.1	Bauleitung	115
4.5.2	Gewerbliches Personal - Drehbohranlage mit Doppelkopfantrieb	115
4.6	Bohrpfahl - Einzelpfahl im Schlagbohr-Verfahren	119
4.6.1	Bauleitung	119
4.6.2	Gewerbliches Personal - Seilbagger mit Schlagbohrwerkzeug	119
4.7	Mikropfahl - Dukttilpfahl im Ramm-Verfahren	123
4.7.1	Bauleitung	123
4.7.2	Gewerbliches Personal - Rammgerät	123

4.8	Mikropfahl - GEWI-Pfahl im Spülbohr-Verfahren	127
4.8.1	Bauleitung	127
4.8.2	Gewerbliches Personal - Bohrgerät	127
4.9	Schlitzwand - Zweiphasen-Schlitzwand im Greifer-Verfahren	131
4.9.1	Bauleitung	131
4.9.2	Gewerbliches Personal - Seilbagger mit Greifer	131
4.9.3	Gewerbliches Personal - Bewehren, Betonieren, Abschalelemente	132
4.9.4	Gewerbliches Personal - Misch- und Wiederaufbereitungsanlage	133
4.10	Schlitzwand - Zweiphasen-Schlitzwand im Fräs-Verfahren	137
4.10.1	Bauleitung	137
4.10.2	Gewerbliches Personal - Seilbagger	137
4.10.3	Gewerbliches Personal - Bewehren, Betonieren, Fugenelemente	138
4.10.4	Gewerbliches Personal - Misch- und Wiederaufbereitungsanlage	138
4.11	Düsenstrahlverfahren - Einzelsäulen, unabhängig der Verfahrenstechnik	141
4.11.1	Bauleitung	141
4.11.2	Gewerbliches Personal - Bohrgerät	141
4.11.3	Gewerbliches Personal - Hochdruckpumpe	143
4.11.4	Gewerbliches Personal - Rücklaufbehandlung	143
4.12	Zusammenfassung	147
5	Aufwands- und Leistungswerte	148
5.1	Allgemein	148
5.1.1	Einflussfaktoren	149
5.2	Online-Umfrage	150
5.2.1	Aufbau	150
5.2.2	Teilnehmer	151
5.2.3	Ergebnisse	152
5.2.4	Auswertung	153
5.3	Spundwände	154
5.3.1	Erfahrungswerte - Literatur	154
5.3.2	Erfahrungswerte - Praxis	154
5.3.3	Vergleich Literatur - Praxis	156
5.4	Verdrängungspfähle	157
5.4.1	Erfahrungswerte - Literatur	157
5.4.2	Erfahrungswerte - Praxis	158
5.4.3	Vergleich Literatur - Praxis	159
5.5	Bohrpfähle	160
5.5.1	Erfahrungswerte - Literatur	160
5.5.2	Erfahrungswerte - Praxis	161
5.5.3	Vergleich Literatur - Praxis	165
5.6	Mikropfähle	166
5.6.1	Erfahrungswerte - Literatur	166
5.6.2	Erfahrungswerte - Praxis	167
5.6.3	Vergleich Literatur - Praxis	169
5.7	Schlitzwände	170
5.7.1	Erfahrungswerte - Literatur	170
5.7.2	Erfahrungswerte - Praxis	171
5.7.3	Vergleich Literatur - Praxis	174

5.8	Düsenstrahlverfahren	174
5.8.1	Erfahrungswerte - Literatur	174
5.8.2	Erfahrungswerte - Praxis	175
5.8.3	Vergleich Literatur - Praxis	176
5.9	Zusammenfassung	177
6	Vergleich Prozessdiagramme – Standardisierte Leistungsbeschreibung	179
6.1	Allgemein	179
6.2	Spundwände	181
6.3	Verdrängungspfähle	182
6.4	Bohrpfähle	183
6.4.1	Kelly- und Greifer-Verfahren	184
6.4.2	SOB- und VdW-Verfahren	186
6.5	Mikropfähle	186
6.5.1	Duktilpfahl	186
6.5.2	GEWI-Pfahl	187
6.6	Schlitzwände	189
6.7	Düsenstrahlverfahren	191
6.8	Zusammenfassung	192
7	Ergebnisse - Zusammenfassung - Ausblick	194
7.1	Zusammenfassung	194
7.2	Forschungsfragen	195
7.3	Ausblick	197

Kapitel 1

Einleitung

Die an Bauwerke gestellten Anforderungen und Wünsche von Auftraggebern sind in den letzten Jahrzehnten massiv gestiegen. Ebenso gewinnt der Spezialtiefbau an Bedeutung. Er bietet mit einer Vielzahl von Verfahren und Techniken Lösungen, die diese Bauwerke meist erst ermöglichen. Der Kreativität zur Lösung der Problemstellungen sind dabei kaum Grenzen gesetzt. Diese Arbeit soll einen Überblick über die am häufigsten angewendeten Verfahren geben, diese ausführlich beschreiben und die dahinter liegenden Ausführungsprozesse darstellen.

Nachfolgend wird die Motivation der Arbeit beschrieben, die Forschungsfrage erläutert und eine Forschungsabgrenzung getroffen. Abschließend wird die Methodik zur Beantwortung der Forschungsfrage beschrieben. In Kapitel 2 werden Grundlagen zu den Gewerken erläutert sowie die Verfahrenstechnik und Herstellungsverfahren beschrieben. Kapitel 3 widmet sich der erforderlichen Gerätetechnik und dokumentiert den Stand der Technik. Es folgt Kapitel 4 mit den Prozessdiagrammen und deren Beschreibung sowie Kapitel 5 mit der Quantifizierung von Aufwands- und Leistungswerten aus Literatur und Praxis. Kapitel 6 stellt eine vergleichende Analyse zwischen einer Prozessdiagrammen und der standardisierten Leistungsbeschreibung her. Abschließend folgt in Kapitel 7 die Beantwortung der Forschungsfragen.

1.1 Motivation

In der Literatur ist der Spezialtiefbau im Verhältnis zu anderen Gewerken des Bauwesens unterrepräsentiert, vor allem unter Berücksichtigung der Bedeutung des Spezialtiefbaus für darauf aufbauende Gewerke. Zu den Standardwerken zählen etwa das *Handbuch des Spezialtiefbaus* von Buja oder das Buch *Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau: Baugrund - Baugruben - Baugrundverbesserung - Pfahlgründungen - Grundwasserhaltung* von Maybaum et al.

Sie geben einen ausgezeichneten Überblick über den Spezialtiefbau, kaum zu finden sind jedoch Angaben zu detaillierten Ausführungsprozessen, Arbeitsabläufen sowie Leistungswerten dieser. Dies ist mit Sicherheit der Vielzahl an Verfahren und den Unsicherheiten im Bezug auf den Untergrund geschuldet. Nichtsdestotrotz sollen in der gegenständlichen Arbeit Bandbreiten von Aufwand- und Leistungswerten unter definierten Rahmenbedingungen einzelner Verfahren erarbeitet werden. Hierfür sind die standardisierten Ausführungsprozesse der einzelnen Verfahren vorab zu beschreiben und zu visualisieren.

1.2 Forschungsfrage

Diese Diplomarbeit widmet sich den gängigsten Bauverfahren im Spezialtiefbau. Ziel der Arbeit ist es, für diese Bauverfahren Prozessdiagramme auszuarbeiten und den Standard-Prozessen (d.h. den maßgebenden und wiederkehrenden Arbeitsabläufen) qualitativ und quantitativ Aufwände zuzuordnen. Schlussendlich wird ein Vergleich der Standard-Prozesse aus den Diagrammen mit

den Positionen der *FSV-VI-005 20180901: Standardisierte Leistungsbeschreibung Verkehr und Infrastruktur (LB-VI)* [48] angestrebt. Folgende Fragestellungen wurden zu Beginn formuliert und im Laufe der Diplomarbeit beantwortet:

- Wie können standardisierte Ausführungsprozesse für Spezialtiefbauverfahren aufgenommen und beschrieben werden?
- Welcher Zusammenhang lässt sich aus den Ausführungsprozessen und den Leistungsparametern aus Literatur und Praxis abbilden?
- Sind die gegenständlichen Standardleistungsverzeichnisse aus Sicht des Ausführungsprozesses angepasst?

1.3 Forschungsabgrenzung

Der Spezialtiefbau bietet eine Vielzahl von Verfahren und Techniken. Zur Ausführung der Bauverfahren sind spezialisierte Unternehmen tätig. Diese wiederum spezialisieren sich auf Teilbereiche des Spezialtiefbaus. Der großen Verfahrensvielfalt geschuldet, sind in der Praxis immer wieder Abwandlungen bestehender Verfahren zu finden. Der Fülle an Verfahren wegen, wird die Diplomarbeit auf folgende Gewerke beschränkt:

- Spundwände
- Verdrängungspfähle
- Bohrpfähle
- Mikropfähle
- Schlitzwände
- Düsenstrahlverfahren

1.4 Methodik

Zu Erarbeitung dieser Arbeit wurde eine Vielzahl von Methodiken angewandt. Abb. 1.1 stellt die Vorgehensweise der Methodik graphisch dar. Zusätzlich ist angegeben, welche Informationen mit den Methoden gewonnen wurden und wo diese im Laufe der Arbeit eingeflossen sind.

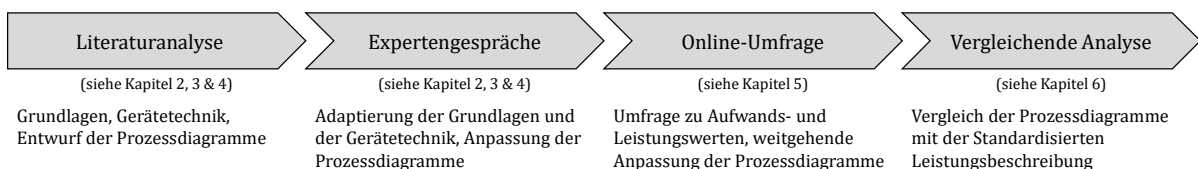


Abb. 1.1: Methodik-Ablauf

Zur Ausarbeitung der einleitenden Kapitel der Grundlagen und der Gerätetechnik wurde eine umfangreiche Literaturanalyse herangezogen. Hierfür wurden Fachbücher, Skripten, Normen, Richtlinien, Produktinformationen sowie Websites namhafter Baufirmen und Gerätehersteller verwendet.

In diesem Zuge hat sich herausgestellt, dass die Forschungsfragen auf Basis der Literaturanalyse nicht ausreichend beantwortet werden können. Zur Ermittlung und Darstellung der maßgebenden

Ausführungsprozesse wurde für jede Ausführungsvariation Gespräche mit Experten¹ geführt. Im Zuge der Gespräche wurden die Prozesse angepasst, mit Aufwände qualitativ verortet und der Dokumentations- und Personalaufwand in die Diagramme eingearbeitet.

Nach Anpassung der Diagramme wurde eine quantitative Online-Umfrage zur Bandbreitenermittlung der Aufwandswerte erstellt. Die Umfrage wurde im deutschsprachigen Raum an alle namhaften Spezialtiefbauunternehmen versendet. Die so generierten Werte geben einen Überblick über die Aufwandswerte der einzelnen Prozesse und bilden den Stand der Technik ab.

Zum Abschluss wurde eine vergleichende Analyse zwischen den erarbeiteten Standardprozessen und den Positionen der *FSV-VI-005 20180901: Standardisierte Leistungsbeschreibung Verkehr und Infrastruktur (LB-VI)* hergestellt. Die Analyse soll zeigen, welchen Prozessen direkt Positionen der Leistungsbeschreibung (LB) zugeordnet werden können.

¹Der Autor legt großen Wert auf Diversität und Gleichbehandlung. Im Sinne einer besseren Lesbarkeit wurde jedoch oftmals entweder die maskuline oder feminine Form gewählt. Dies impliziert keinesfalls eine Benachteiligung des jeweils anderen Geschlechts.

Kapitel 2

Grundlagen

Das Kapitel der Grundlagen widmet sich einer ausführlichen Analyse bestehender Literatur, Normen, Skripten. Des Weiteren wurde die Analyse mit Informationen von Web-Auftritten führender Spezialtiefbauunternehmen ergänzt. Ziel ist es, die Gewerke allgemein zu beschreiben, die Anwendungsgebiete aufzuzeigen und die Verfahrenstechnik zu beschreiben. Zum Abschluss jedes Unterkapitels werden die gängigsten Herstellungsverfahren der sechs Gewerke ausführlich dargestellt.

2.1 Spundwand

Bei Spundwänden handelt es sich um biege- und knicksteife in den Boden getriebene Elemente, welche miteinander durch eine Art Nut-Federprinzip (den Schlössern) verbunden sind. Die durch die Form der Bohlen bedingte wellenartige Grundrissform verleiht dem System aus Stahlprofilen eine sehr hohe Steifigkeit verglichen zu dessen Gewicht. Sie werden überwiegend zum Sichern von Geländesprüngen eingesetzt, übernehmen aber auch tragende und abdichtende Funktionen. Ausgehend vom Einsatz im Wasser- und Hafenbau eroberte das besonders wirtschaftliche System viele andere Gebiete des Bauwesens [114].

Die Ursprünge des Systems gehen auf die Römerzeit zurück. Damals wurden Hafenanlagen durch hölzerne Spundwände gesichert. Diese hatten den entscheidenden Nachteil, dass sie im Luft-Wasser-Wechselbereich morsch wurden und aufgrund der rammtechnisch schlechten Eigenschaft nur begingt tief einsetzbar waren. Erst Ende des 19. Jahrhunderts wurden erste Stahlspundwände von *Tryggve Larssen* in Deutschland erfunden. Das System bestand aus einem gewalzten U-Profil mit angenieteten Verbindungselementen, den Schlössern. Später gelang es, die Spundbohlen samt Schössern durch den Walzvorgang herzustellen. Konkurrenz bekam das U-Profil durch das von *Lamp* entwickelte Z-Profil. Im Laufe der Jahre wurden die Profile – entsprechend den Anforderungen der Bauwirtschaft – breiter und leichter (siehe Abb. 2.1). Die Vorteile liegen auf der Hand: sie lassen sich schneller einbauen und haben weniger Schlossdichtungen. Somit sind sie kostengünstiger [43, 81].

Das System kann mit einigen **Vorteilen** gegenüber den nachfolgend beschriebenen Verbauarten punkten [81, S. 93]:

- schneller Baufortschritt
- System ist sofort belastbar
- Aushub kann unmittelbar nach Einbringen der Bohlen erfolgen
- Einbau erfolgt weitgehend witterungsunabhängig
- Bauteile sind wiedergewinnbar

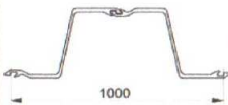
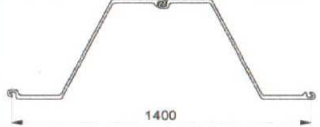
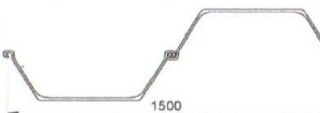
Type	RANSOME 1911	BZ 1933	AZ 1990	AZ - 700 2004
Z				
Type	TERRE-ROUGE 1912	LARSEN 1914	PU 1988	AU 2000
U				

Abb. 2.1: Profilentwicklung im Laufe der Zeit [43]

- anwendbar in nicht standfesten Böden und im Grundwasserbereich
- überschaubar Personal- und Geräteeinsatz
- Aufnahme von Vertikalkräften durch hohe Mantelreibung

Die wesentliche **Nachteile** [81, S. 93] von Spundwänden sind:

- Lärm und Erschütterungen durch das Einbringen der Bohlen
- weicher Verbau, Setzungsgefahr der Nachbarbebauung
- beschränkt in der Tiefe durch Transportlängen
- hohe Investitionskosten
- Einsatzgrenze durch Rammbarkeit des Bodens
- wenig flexible (z.B. bei Leitungskreuzungen)
- beim Ziehen der Bohlen entstehen Hohlräume (Setzungsgefahr)

2.1.1 Anwendungsgebiete

Die ersten Stahlspundwände fanden ihre Verwendung im Wasser- und Hafenbau. Darüber hinaus hat sich ihr Einsatzgebiet über viele Bereiche des Bauwesens ausgedehnt. Spundwände werden heute für Uferanlagen in Häfen, für Rampen im Verkehrswegebau, zur Landgewinnung sowie zur Sicherung von Altlasten bei Deponiebauwerken verwendet. Im Spezialtiefbau finden sie ihre Anwendung im Tunnelbau, als Baugrubensicherung sowie zur Herstellung von Dichtwänden [43].

Im Wasser- und Dammbau werden Spundwände oftmals dauerhaft eingesetzt und verbleiben im Untergrund. Die für Baugrubenverbauten eingesetzten Spundbohlen lassen sich nach den Bauarbeiten wiedergewinnen. Ihre Aufgabe – die Sicherung der Baugrube – ist demnach nur temporär. Statisch gesehen sind Spundwände als weiche Verbauart anzusehen und daher nur in bedingt neben bestehender Bebauung anwendbar. Wird ein Spundwandensystem neben setzungsempfindlichen Bauwerken eingesetzt, so muss zusätzliche Stabilität und Steifigkeit durch Gurte, Steifen, Konsolen oder Verankerungen gewährleistet werden [81].

2.1.2 Ausführungsformen

Die verwendeten gewalzten Stahlprofile werden je nach Anordnung zueinander und zu etwaigen zusätzlichen eingerammten Elementen wie I-Trägern in folgende Wandarten unterteilt [30, 43, 114]:

- Wellenwände
- Verbundwände
- Kombinierte Wände
- Zellenfangdämme

Jene Wände werden meist aus Doppelbohlen mit einer Breite von 1,20 m hergestellt. Leichte Profile werden in Längen bis zu 12 m angeboten, schwere hingegen bis 30 m. Wird ein wasserdichte Ausführung gefordert, so wurden die Spundbohlen früher verschweißt. Seit einigen Jahren haben sich Spundbohlen mit elastischen Schlossdichtungen am Markt durchgesetzt. Die Dichtungen bestehen aus Polyurethan und sind sowohl in im Salz- und Abwasserbereichen einsetzbar.

Wellenwände

Wellenwände werden durch das Aneinanderreihen handelsüblicher Spundwandbohlen gebildet, wobei zwischen *U-Profilen* und *Z-Profilen* unterschieden wird. Der maßgebende Unterschied liegt in der Lage der Schlösser. Bei *U-Profilen* liegen die Schlösser im Steg, bei *Z-Profilen* im Flansch. Daraus resultieren unterschiedliche statische Eigenschaften [43, 112, 114].

U-Profile: Das U-Profil (auch Larssen-Profil) als ursprüngliche Form der Spundwand wird überwiegend als Doppelbohle eingesetzt. Das Verbindungsschloss muss dafür bereits werksseitig verpresst oder verschweißt werden. Kommen Einzelbohlen zum Einsatz, so müssen diese im Zuge des Aushubs verschweißt oder verriegelt werden. Nur so wird die Übertragung großer Schubspannungen sichergestellt. Die Flansch- und Steghöhe verleihen dem Profil ausgezeichnete statische Eigenschaften. Zudem ist das System aufgrund seiner symmetrischen Form bestens für die Mehrfachverwendung und Vermietung geeignet. Der Einbau von Ankern und Gurte ist einfach herstellbar.

Z-Profile: Das Z-Profil (auch Hoesch-Profil) zeichnet sich durch die in den Flanschen angeordneten Schlösser aus. Durch den durchgehenden Steg lassen sich hervorragende statische Eigenschaften erzielen und die Durchbiegung wird begrenzt. Es kommen sowohl Einzel- als auch Doppelbohlen zum Einsatz. Einzelbohlen lassen sich im aufgrund der Anordnung der Schlösser im Gegensatz zu U-Profilen ohne Reduktion der Tragfähigkeit einbauen.

Leichtprofile: Leichtprofile sind schmale U-Profile, deren Höhe <150 mm nicht überschreitet. Einsatzgebiete sind der Graben- und Leitungsbau sowie als senkrechtes Ausfachungselement bei Trägerbohlwänden. Die Schlösser von Leichtprofilen werden durch das Umwalzen des jeweiligen Stahlbleches der Bohle hergestellt. Die Schlösser von Leichtprofilen sind nicht wasserdicht ausführbar.

Kanaldielen: Kanaldielen sind wellenförmige Stahlbelche, deren Höhe im Verhältnis zu U- oder Z-Profilen mit <100 mm sehr gering ist. Sie kommen überwiegend beim im Leitungsbau als temporäres Sicherungselement zum Einsatz. Hierfür werden die Kanaldielen in einer Kammerplatteneinheit geführt abgeteuft. Im Gegensatz zu U- oder Z-Profilen, deren Verbindung

durch Schlösser hergestellt wird, werden Kanaldielen mit einer Überlappung zum vorhergehenden Profilen eingebaut.

Verbundwände

Verbundwände aus U-Profilen werden als Jagged-U-Wände bezeichnet. Es werden abwechselnd Doppelbohlen in S- und Z-Form aneinandergereiht. Bei jenen Wänden muss zumindest jedes zweite Schloss – jene in der Wandachse – schubfest miteinander verbunden sein. Abb. 2.2a veranschaulicht, dass in der Wandachse die größten Schubkräfte auftreten. Durch den Einsatz von Verbundwänden lassen sich höhere Biege- und Schubsteifigkeiten erzielen.

Wird eine Spundwand als reine Dichtwand ausgeführt, so bietet sich eine Jagged-Z-Wand an. Die Wand, bestehend aus in umgekehrter Reihenfolge aneinandergereihten Z-Profilen, stellt eine durch verringerte Abmessungen, hoher Wandstärke und guter Rammpbarkeit besonders wirtschaftliche Lösung für Dichtwände dar (siehe Abb. 2.2b) [30, 43].

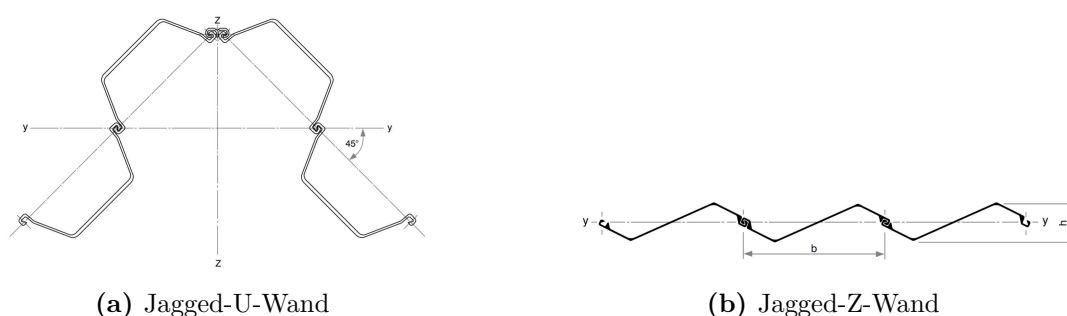


Abb. 2.2: Beispiele für Verbundwände [112]

Kombinierte Wände

Sollen noch höhere Geländesprünge überbrückt werden, muss man zu kombinierten Wandsystemen greifen. Sie bestehen aus Stahlspundwänden kombiniert mit anderen Stahlbauelementen, welche eine hohe Tragfähigkeit und Steifigkeit aufweisen. Sie finden vor allem bei hohen Kaimauern oder besonders tiefen Baugruben Anwendung. Eine Wand besteht aus einer Kombination von langen, schweren Tragbohlen und leichten Füllbohlen, die im Normalfall eine geringere Einbindung in den Untergrund haben. Die Füllbohlen (zwei Z-Bohlen oder drei U-Bohlen) leiten die Kräfte zu den Tragbohlen. Folgende Elemente unter dem Titel der kombinierten Wände kommen in Kombination zur Anwendung [43, 114]:

- I-Träger und Spundbohlen
- Pfahlprofile und Spundbohlen
- Rohrprofile und Spundbohlen
- u.v.m.

Zellenfangdämme

Zur Herstellung von Zellenfangdämmen werden Flachprofile (auch Union-Flachprofile) zu geschlossenen Kreiszellen verbunden. Die Flachprofile mit Schlössern haben eine geringe Biegesteifigkeit, eignen sich aber sehr gut zum Übertragen von Zugkräften. Der gebildete Fangdamm wird mit nicht bindigem Material verfüllt. Die Stabilität des Gesamtsystems wird durch das Eigengewicht erreicht [30, 43, 81, 112].

2.1.3 Verfahrenstechnik

Einbringverfahren

Das Einbringen von Spundwänden bedarf einer sehr hohen Genauigkeit. Bei der ersten Spundbohle ist eine lotrechte Aufstellung bzw. Einbringung besonders wichtig, für die weiteren Bohlen sind weitere Faktoren wie eine ausreichende Einfädellänge zu beachten. Diese kann durch eine Voraushub gewährleistet werden. Nach der Reihenfolge des Einbringens lassen sich nach Buja [32]

- das fortlaufende Einbringen,
- das staffelweise Einbringen und
- das fachweise Einbringen unterscheiden.

Fortlaufendes Einbringen: Das fortlaufende Einbringen ist das am häufigsten in der Praxis angewandte Verfahren. Hierbei wird jedes Rammelement sofort bis zur Endtiefe in den Untergrund getrieben. Dabei besteht die Gefahr, dass das freiliegende Schloss durch Widerstände im Boden ausweicht. Das Verfahren findet bei locker gelagerten Böden und Böden mit geringer Lagerungsdichte Anwendung. Sind Böden dichter gelagert muss auf andere Verfahren ausgewichen werden.

Staffelweises Einbringen: Bei jenem Verfahren werden die Bohlen staffelweise in den Boden eingebracht. Das Verfahren bietet sich durch die doppelte Schlossführung, und der daraus resultierenden erhöhten Rammsteifigkeit, besonders bei langen Bohlen an. Wird bei einer einzelnen Bohle innerhalb einer Staffel ein Hindernis angetroffen, lassen sich durch die beidseitige Führung einstweilen alle Nachbarbohlen bis zur Endtiefe einbringen. Zu einem späteren Zeitpunkt wird mit geeigneten Maßnahmen versucht, das Hindernis zu durchhören. Schlussendlich werden alle Bohlen bis auf Endtiefe vorgetrieben. Als Nachteil des staffelweisen (als auch des fachweisen) Einbringens sei erwähnt, dass die Bohlen zum Einfädeln auf das Doppelte ihrer Länge angehoben werden müssen.

Fachweises Einbringen: Für schwierige Böden hat sich das fachweise Einbringen als das schonendste Einrammen etabliert. Die Bohlen werden in einer Führung aufgestellt und eingefädelt. Im Anschluss werden die einzelnen Bohlen in kurzen Staffeln in zwei wiederkehrenden Arbeitsschritten eingebracht. Zuerst erfolgt das Rammen der Bohlen 1, 3, 5, usw., im Anschluss folgen die Bohlen 2, 4, 6, usw.. Bei besonders herausfordernden Verhältnissen bietet sich die Verstärkung der Bohlenfüße der vorauseilenden Bohlen an. Dies erleichtert das Rammen der nachfolgenden Bohlen.

Rammhilfen

Stößt man mit den unter Abschnitt 2.1.3 genannten Einbringverfahren an die Grenzen der Machbarkeit, stehen verschiedene Einbringhilfen zur Verfügung. Rammhilfen dienen der Minderung des Eindringwiderstandes während dem Einbringen [84]. Mit gezielt eingesetzten Maßnahmen wird die Überlastung der Geräte und das Beschädigen der Rammelemente weitgehend vermindert. Zu den Einbringhilfen gehören nach Buja [32] folgende Maßnahmen:

- Wahl von richtigem Profil und Stahlgüte
- Niederdruckspülen
- Hochdruckspülen
- Lockerungsbohren/Vorbohren

- Vorspaltsprengen

Wahl von richtigem Profil und Stahlgüte: Rammerleichterungen lassen sich mit der Wahl des Profils treffen. So sind beispielsweise Bohlen mit einer Breite von 500 mm steifer als 600 mm. Das Einbringen kann durch eine geringere Querschnittsfläche pro Bohle vereinfacht werden. So lässt sich bei geringerem Widerstand des geringeren Querschnitts mehr Rammenergie aufbringen. Des Weiteren bietet sich die Möglichkeit der Verwendung von Einzelprofilen anstelle der üblichen Doppelbohlen. Beide Maßnahmen führen unter Umständen zu einer Erhöhung des Rammaufwandes. Da die Preisunterschiede zwischen verschiedenen Stahlgüten nicht allzu groß sind, sollte bei zu wiedergewinnenden Profilen in höhere Stahlgüten investiert werden. Ein Ausgleich dieser Mehrkosten ist durch umfangreichere Verwendungsmöglichkeiten möglich.

Niederdruckspülen: Durch eine Spülvorrichtung am unteren Ende der Bohle wird bestehender Boden gelöst. Wasser wird durch im Bohlental befestigte Rohre, in den Untergrund gepumpt und bewirkt dort eine Lockerung des anstehenden Bodens. Spitzendruck und Mantelreibung werden durch das Aufwirbeln der Bodenkörner vermindert. Das aufsteigende Wasser soll sich gleichmäßig um den Umfang der Bohle legen, zusätzlich zugeführte Druckluft verstärkt die Wirkung. Die Wirksamkeit des Verfahrens wird durch die Anzahl, die Lage und die Größe der Spüllanzen sowie den Druck angepasst. Die Lanzen haben einen Durchmesser zwischen 25 und 40 mm und werden mit Drücken zwischen 10 und 20 bar beaufschlagt. Für das Verfahren eignen sich dicht gelagerte nichtbindige Böden. Zu beachten gilt es, dass durch den hohen Wassereintrag keine nachteiligen Bodeneigenschaften erzeugt werden dürfen. In Abhängigkeit der Verwendung der Spundwände zur Abtragung von Vertikallasten, sollten die letzten Meter der Rammung ohne Spülung erfolgen, in jedem Fall aber der letzte Meter.

Hochdruckspülen: Bei diesem Verfahren werden Spülrohre mit einem Durchmesser von bis zu 35 mm an den Bohlen mit Schellen befestigt. Die Spülrohre verengen sich am unteren Ende zu Düsen mit einem Durchmesser zwischen 2 und 500 mm. Während dem Einbringen der Bohle schneidet der Wasserstrahl den Boden mit Drücken bis zu 500 bar auf. Das aufsteigende Wasser vermindert die Mantelreibung entlang der Bohle. Der betriebene Aufwand ist nur dann zu vertreten, wenn andere Methoden ausscheiden und das Erreichen einer bestimmten Tiefe unabdingbar ist.

Lockerungsbohren/Vorbohren: Durch das Rammen entsteht am unteren Ende der Bohle ein stark verdichteter Pfropfen an Boden. Im schlimmsten Fall hat dieser Pfropfen eine größere Widerstandskraft, als durch die Rammung überwunden werden kann. Dadurch ist die Bohle, zumindest temporär, nicht mehr rammbaar. Diesem Zustand wird mit Bohrungen zur Lockerung, bzw. zum Austausch, des Bodens entgegengewirkt.

Werden *Bohrungen vor Beginn des Rammens* mit dem Rüttelverfahren durchgeführt, darf der Vorlauf der Bohrungen nicht allzu groß sein, da das Rütteln den Effekt der Lockerung wieder aufhebt. Bohren und Rammen erfolgt üblicherweise im Wechsel mit einem Gerät. Bei großen Bauvorhaben bietet sich die Verwendung von separaten Geräten an. Bohrungen erfolgen mit Schnecken, nach dem Ziehen dieser fällt das Bohrloch in sich zusammen. Dies bewirkt die Auflockerung des Bodens in Rammachse. Die Bohrungen sollten bei Aufnahme von Vertikalkräften einen Meter über Endtiefe enden.

Daneben gibt es die Möglichkeit des *Bohrens während des Rammens* in den Spundwandtälern. Der anstehende Boden wird beispielsweise bei Hindernissen während dem staffelweisen Einbringen aufgelockert werden.

Das *Vorbohren* kommt bei dicht gelagerten Böden mit Hindernissen zum Einsatz. Die Bohrungen werden verrohrt hergestellt, das Bohrgut gefördert und im Anschluss mit locker gelagertem Material verfüllt. Das Material sollte gleichkörnig sein und keine Neigung zur Verdichtung aufweisen.

Vorspaltsprengen: Als letzte Möglichkeit, Spundwände in schwer rammbare Böden einzubringen, bleibt die Vorspaltsprengung. Hierfür werden Bohrungen für Sprengladungen in Abständen zwischen 0,60 und 0,80 m bis zur Spundwandfuß abgeteuft. In die Bohrungen werden Plastikrohre eingestellt und gegen etwaigen Auftrieb gesichert. Es folgt die Füllung mit der Sprengladung, Millisekundenzünder und der Zündleitung. Die Größe der Ladung ist durch einen Sprengmeister an die gegebenen Festgesteinverhältnisse und die geforderte Auflockerung anzupassen. Im Anschluss erfolgt die Sprengung von jeweils 2 bis 6 Ladungen, welche den Fels nur lockert aber keinen Hohlraum schafft. Spätestens zwei Tage nach Sprengung muss gerammt werden, da sich der Fels ansonsten wieder konsolidiert. Rütteln ist wegen der verdichtenden Wirkung zu vermeiden. Bei Hindernissen oder steckengebliebenen Bohlen kommen kleine Sprengungen zum Einsatz.

Schlossdichtungen

Die Dichtheit spielt neben den statischen Funktionen einer Spundwand eine große Rolle. Als Baugrubenverbau eingesetzte Spundwände müssen, sofern der Grundwasserspiegel über der Baugrubensohle liegt, dicht hergestellt werden. Die Schlösser müssen einerseits eine ausreichende Beweglichkeit für den Rammvorgang aufweisen, im fertigen Zustand jedoch möglichst dicht sein. Eine selbstdichtende Wirkung durch das Verkeilen von Bodenpartikeln existiert nur bedingt. Folgende Maßnahmen können ergriffen werden:

- das Einbringen von speziellen flüssigen Füllern in den Schlossraum
- die Anwendung von wasserquellenden Dichtungstoffen oder elastischen PU-Dichtungen
- das Schweißen der Schlossverbindungen, falls möglich;
- das Injizieren von Bentonit-Zement oder von quellenden und aushärtenden chemischen Flüssigkeiten in die freien Schlösser während des Einbringens der Spundbohlen
- das Einbringen der Stahlspundbohlen in eine Einphasen-Schlitzwand
- die Kombination von verschiedenen zuvor erwähnten Techniken

Im Regelfall wird eine ausreichende Dichtheit durch den Verguss mit bituminösen Materialien erzielt. Beim Einbau ist darauf zu achten, dass das vergossene Schloss in Rammrichtung voraus einzusetzen ist. Der Verguss erfolgt vor Ort auf der Baustelle. PU-Dichtungen werden im Gegensatz dazu bereits im Werk in die Bohlen integriert. Um die Abdichtung nicht zu beschädigen sollten Rammhären zur Einbringung verwendet werden [84].

Schlosssprengungen

Probleme mit der Dichtheit einer Spundwand resultieren u.a. durch Schlosssprengungen. Hierbei läuft die einzubringende Spundbohle während des Einbringens aus dem Schloss. Als maßgebende Faktoren hierfür gelten insbesondere

- die Genauigkeit der horizontalen Positionierung und der Vertikalität der Tragelemente,
- die Baugrundverhältnisse und
- das Verformungsverhalten der Spundbohlen.

Mit einer gründlichen Vorerkundung des Bodens und geeigneten zusätzlichen Maßnahmen (wie Einbringhilfen) lässt sich die Gefahr von Schlosssprengungen minimieren. Sollte es dennoch dazu kommen, zeigen elektronische Signalgeber Fehlstellen im nicht sichtbaren Bereich an. Anschließend kann zu geeigneten Gegenmaßnahmen gegriffen werden. Fehlstellen, die erste im Zuge des Aushubs entdeckt werden, werden mittels Düsenstrahlverfahren, gezielten Injektionen oder das Aufschweißen von Blechen saniert [30, 84].

Vor- und Nachteile

Die Ursache des Vor- bzw. Nacheilens einzelner Spundbohlen liegen in den, durch die einseitige im Schloss wirkende Reibung bedingten, ausmittigen Reaktionskräften. Eine Verlagerung des Schwerpunktes des Rammbaren zur Ausgleichung der Kräfte ist üblicherweise nicht möglich. Ein Herabsetzen der Reibung im Schloss durch geeignete Verfahren ist zielführender. Neben dem Verschließen des vorauseilenden Schlosses der Bohle, welche das Eindringen von Material weitgehend verhindert, kann Schmiermittel eingebracht werden. Ein weiteres Hilfsmittel ist die Verfüllung des Schlosses mit Bentonit, bzw. einem Bentonit-Zement-Gemisch [84].

Verbindungen

Die geometrischen Formen der herzustellenden Spundwände machen Verbindungen erforderlich. Runde Wände sind auch ohne Verbindungen herstellbar, sofern der Radius nicht zu klein wird. Für scharfe Ecken bedarf es Verbindungselemente. Neben vorgefertigten Profilen wie geknickten Bohlen, Eckprofilen sowie Eck- bzw. Abzweigbohlen lassen sich derartige Verbindungen durch das Verschweißen zweier Bohlen herstellen. Eine Verlängerung von Bohlen wird mittels Stumpf- bzw. Laschenstoß erzielt. Für anspruchsvolle Untergründe bietet sich eine Verstärkung des Pfahlfußes an. Hierfür werden Stahlbleche (ähnlich einem Laschenstoß) angeschweißt. Die genannte Maßnahme führt zu einer Freischnitt und somit zur Verringerung der Mantelreibung während dem Einbringen. Der individuellen Adaptierung von Stahlspundbohlen durch Schweißarbeiten sind kaum Grenzen gesetzt [43, 84].

2.1.4 Herstellungsverfahren

Zur Herstellung von Spundwänden aus Stahl kommen folgende Verfahren zur Anwendung [81]:

- Schlagrammen
- Vibrieren/Rütteln
- Einpressen/Eindrücken
- Einstellen

Die Entscheidung, welches Verfahren verwendet wird, richtet sich nach Gesichtspunkten wie den Baugrundeigenschaften, dem verwendeten Profil und dem Umfeld der Baustelle. Das Rammen ist grundsätzlich allen Bodenarten möglich, dem gegenüber eignen sich das Rütteln und Einpressen nur für bestimmte Böden. Tab. 2.1, Tab. 2.2 und Tab. 2.3 geben eine Übersicht über die Eignung von Böden für bestimmte Verfahren.

Im Vorfeld ist der anstehende Boden auf die Rammbarkeit zu überprüfen. Ist auch nach einer ersten Beurteilung des Bodens durch die Sichtung des geotechnischen Gutachtens nicht klar feststellbar oder sind keine vergleichbaren Erfahrungen vorhanden, ob die Rammbarkeit gegeben ist, so empfiehlt es sich, eine Probe-Rammung durchzuführen. Die gewonnenen Daten helfen die Wirksamkeit des Einbringverfahrens zu verbessern. Zusätzlich kann die Wahl des Profils adaptiert und die Notwendigkeit von Einbringhilfen überprüft werden [84, 114].

Das Verfahren zum Einbringen der Spundbohlen soll lt. ÖNORM [84] unter den folgenden Gesichtspunkten gewählt werden:

- Erreichen der geforderten Tiefe des Spundwandfußes
- Einhalten der horizontalen Positionierung und der Vertikalität
- Vermeiden von nennenswerten Schäden an Spundbohlen und Schlössern
- Erreichen des vorgeschriebenen Durchlässigkeitskoeffizienten
- Sicherstellen, dass die Einbringkräfte entlang der neutralen Achse der Spundbohlen und Tragelemente wirken
- Einhalten der Einbringfolge der Tragelemente einer kombinierten Wand
- Erreichen der geforderten vertikalen Tragfähigkeit

Schlagrammen

Beim Schlagrammen wird die Spundbohle durch ein schweres herabfallendes Gewicht in den Baugrund getrieben. Mantelreibung und Spitzendruck werden durch die hohe dynamische Belastung – dem Impuls – kurzzeitig überschritten. Die Bohle dringt mit jedem Schlag Stück für Stück in den Boden ein. Das Rammgut, in diesem Fall die Spundbohle, wird im Schlagbereich durch die Rammhaube geschützt. Zudem garantiert das Rammhaubefutter (z.B. aus Hartholz) eine gleichmäßige Krafteinleitung.

Die erforderliche Rammenergie und somit die Größe des Rammbaren wird durch den anstehenden Boden bestimmt. Bei nicht-bindigen Böden steigt die Rammenergie mit der Lagerungsdichte, bei bindigen Böden mit zunehmender Festigkeit (d.h. in Abhängigkeit der Konsistenz) [30].

Tab. 2.1: Rammeignung der Böden [35]

Leichte Rammung	Mittelschwere Rammung	Schwere Rammung
Moor, Torf, Schlick, Klei, locker gelagerte und hindernisfreie Kiese und Sande, breiige und weiche Tone und Schluffe	steife Tone und Schluffe, mitteldicht gelagerte Kiese und Sande	dicht gelagerte Kiese, halbfeste und feste Tone und Schluffe, Geschiebemergel, Fels

Vibrieren/Rütteln

Beim Vibrieren werden Unwuchten im Vibrator derart geschaltet, dass sich die horizontalen Fliehkräfte aufheben, und sich die vertikalen verstärken. Der Antrieb der Unwuchten erfolgt elektrisch oder hydraulisch. Über die Spann- oder Klemmzangen werden die Vertikalkomponenten der Fliehkraft in das Rammgut übertragen, wobei die Spannkraft der Zangen mindestens das 1,2-fache der Fliehkraft sein sollte. Die Schwingungen im Boden führen zu einer starken Reduktion der Mantelreibung und des Spitzendruckes. Ist Feuchtigkeit im Untergrund vorhanden, bildet sich auf dem Rammgut ein Wasserfilm. Dieser dient als Gleitschicht. Wird der Vibrator durch einen Mäklär geführt, so ist dieser durch einen Schwingungsisolator vom Trägergerät getrennt. Diese Vorrichtung verhindert den Übertrag von Schwingungen.

Bei nicht-bindigen Böden sind eine geringe Lagerungsdichte und eine abgerundete Kornform die Faktoren für einen erfolgreichen Vibrationsvorgang. Zudem führt Feuchtigkeit zu einem Schmierfilm auf dem Rammgut und erleichtert somit das Eindringen. Bindige Böden sind nur bedingt für das Vibrieren geeignet. Zum einen besteht die Möglichkeit, dass es zu einer Verdichtung des Bodens im Fußbereich der Bohle kommt, auf der anderen Seite besteht die Gefahr einer Bodenverflüssigung und dem Verlust der Bodentragfähigkeit. Somit ist die Eignung von bindigen Böden wesentlich vom Wassergehalt und der Konsistenz abhängig.

Tab. 2.2: Eignung für das Vibrationsverfahren [35]

Gut	Bedingt	Ungeeignet
rundkörnige Kiese und Sande, weiche bis breiige Tone, Schluffe, weicher bis breiiger Löss und Schlick	eckige Kiese und Sande, steife Tone, Schluffe, steifer Löss	Kiese mit bindigen Beimengungen, sehr fest gelagerte und trockene Kiese und Sande, steifer bis fester Ton und Mergel

Zur Kalibrierung der geeigneten Herstellparameter (insbesondere dem statischen Moment und der Frequenz) bedient man sich zum einen zur Verfügung gestellten Diagrammen der Hersteller sowie geschultem Personal. Beim Vibrieren besteht zudem die Gefahr, dass sich auch Böden in größerer Entfernung umlagern und verdichten. Setzungen und Sackungen wären die Folge. Aus diesem Grund ist ein Mindestabstand zu Nachbarbebauungen einzuhalten. Zudem besteht beim An- und Ablufen von Vibratoren mit statischen Unwuchten die nicht zu vernachlässigende Gefahr des Durchfahrens der Eigenfrequenz von benachbarten Bauwerken. Die Entwicklung von resonanzfreien Vibratoren mit schwenkbaren Unwuchten löste dieses Problem.

Das Vibrieren punktet neben den beschriebenen Gefahren mit einigen Vorteilen gegenüber dem Schlagrammen. So ist die Lärmentwicklung im Gegensatz zum Rammen wesentlich geringer und das Verfahren lässt sich neben dem Rammen auch zum Ziehen der Bohlen verwenden. werden [30].

Einpressen/Drücken

Beim Pressverfahren werden die Spundbohlen durch eine rein statische Kraft in den Boden eingebracht. Die Kraft wird durch Hydraulikzylinder aufgebracht, welche mit den Spundbohlen durch Spannzangen verbunden sind. Zuvor ist nachzuweisen, ob die angedachte Presse ausreichend leistungsfähig ist. So muss die Presskraft Mantelreibung, Spitzendruck und die Schlossreibung überwinden. Bereits eingebracht Spundbohlen dienen als Wiederlager. Auch hier muss nachgewiesen werden, dass die eingebrachten Spundbohlen die Reaktionskräfte aufnehmen können.

Die maßgebenden Bodenparameter beim Pressverfahren sind ähnlich dem Vibrationsverfahren die Konsistenz bindiger Böden und die Lagerungsdichte nicht-bindiger Böden.

Tab. 2.3: Eignung für das Einpressverfahren [35]

Gut	Bedingt	Ungeeignet
Moor, Schlick, Klei, weiche bis steife Tone und Schluffe, locker bis mitteldicht gelagerte Sande und Kiese	feste Tone und Schluffe, mitteldicht bis dicht gelagerte Kiese und Sande	sehr feste Tone und Schluffe, sehr dicht gelagerte Kiese und Sande, alle Böden mit Steineinschlüssen

Das Einpressverfahren punktet vor allem durch die geräuschlose und nahezu erschütterungsfreie Einbringung der Bohlen gegenüber dem Ramm- und Vibrationsverfahren. Das Verfahren eignet sich zum Einsatz in städtischen Gebieten und darf auch direkt neben bestehender Bebauung eingesetzt werden. Wie auch Vibratoren eignen sich Spundwandpressen zum Rückbau/Ziehen von Spundbohlen [30, 84].

Einstellen

Beim Einstellen von Spundwänden handelt es sich um eine besondere Form der Einbringung. Das Einstellen (oder auch Einhängen) von Spundwänden wird vor allem in schwer- oder nicht-

rammbaren Böden angewendet und wird zur Herstellung von wasserdichten Baugruben verwendet. Hierfür wird in einem ersten Arbeitsschritt eine Schlitzwand im Einphasenverfahren ausgeführt. In einem zweiten Arbeitsschritt werden Spundbohlen in den suspensionsgestützten Schlitz eingestellt und in ihrer Lage gesichert. Ist der Schlitz (und somit die Abdichtungsfunktion) tiefer, so werden Spundwände in den Schlitz einhängt. Die selbst erhärtende Suspension garantiert die abdichtende Funktion während die Spundwand die statische Funktion übernimmt [38].

2.2 Pfahl

Bei Pfählen handelt es sich um eines der ältesten Gründungselemente. Pfahlbauten wurden bereits 3000 v. Chr. im gesamten Alpenraum errichtet. Römische Ingenieure rammten dafür Holzpfähle mit schweren Gewicht in den Boden. Erst im 20. Jahrhundert, mit der Neuentwicklung von Baumaterialien, wurde Holz nach und nach durch beständigere Materialien ersetzt [81].

Heute dienen Pfähle diversen Disziplinen des Bauwesens. Sie eignen sich bestens zum Ableiten von hohen Lasten in tieferliegende tragfähige Schichten Untergrunds. Pfähle übertragen hierfür die Einwirkungen durch Mantelreibung und/oder Spitzendruck in den Untergrund. Nach der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. [41] lassen sich Pfahlssysteme in folgende Gruppen gliedern:

- Verdrängungspfähle
- Bohrpfähle
- Mikropfähle

Verdrängungspfähle

Verdrängungspfähle zeichnen sich durch eine vollständige Verdrängung des Bodens aus. Es kommt zu keinem nennenswerten Aushub, die Entsorgung des Aushubs ist nicht erforderlich. Sie werden durch Rammen, Vibrieren, Einpressen, Drehen oder einer Kombination von diesen Einbringverfahren hergestellt. Geringe Hebungen an der Geländeoberfläche sind herstellungsbedingt möglich und müssen nachträglich entfernt werden. Grund für die Hebungen ist die fehlende Bodenaufflast. Der anstehende Boden weicht an der Geländeoberfläche nach oben und nicht seitlich aus. Die Pfähle werden entweder vorgefertigt auf die Baustelle geliefert oder werden vor Ort hergestellt [41, 114]. Nach der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. [41] werden folgende Gruppen von Verdrängungspfählen unterschieden:

- Fertigrammpfähle
- Ort betonrammpfähle
- Schraubpfähle (Vollverdrängungsbohrpfähle)
- Verpresste Verdrängungspfähle

Die entsprechenden ÖNORMen für Verdrängungspfähle fasst Ort betonrammpfähle und Schraubpfähle in die Gruppe der Ort betonpfähle zusammen [85].

Fertigrammpfähle

Fertigrammpfähle bestehen aus Holz, Stahl, Stahlbeton, Spannbeton oder Schleuderbeton. Die Pfähle kommen als Fertigteile auf die Baustellen. Die Produktion im Werk gewährleistet gleichbleibende Qualität. Nachteil ist, dass die Herstellung und Lieferung der Pfähle in festen Längen erfolgt. Bei Bedarf lassen sich Pfähle kürzen oder durch das Verbinden an vorgefertigten Stößen verlängern [30, 81].

Ortbetonrammpfähle

Zur Herstellung von Ortbetonrammpfählen werden Stahlrohre im Bereich des Fußes wasserdicht verschlossen und durch Rammen in den Untergrund getrieben. Ist die Endtiefe erreicht, wird der Fuß abgestoßen und der Bewehrungskorb einbaut. Während dem Betonieren wird die Verrohrung kontinuierlich gezogen [30].

Schraubpfähle (Vollverdrängungsbohrpfähle)

Schraubpfähle zeichnen sich durch eine optisch schrauben-ähnliche Form im Bereich des Fußes der Verrohrung aus. Nachdem die Verrohrung niedergebracht wurde, wird die Pfahlspitze abgeworfen und das Betonieren startet bei gleichzeitigem Ziehen der Verrohrung. Der Bewehrungskorb wird üblicherweise im Nachgang in den frischen Beton eingelassen. [30].

Verpresste Verdrängungspfähle

Bei jenen Pfählen handelt es sich um Stahlrammpfähle, welche während des Rammvorganges mit Zementmörtel oder Zementsuspension verpresst werden. Der Pfahlschaft kann aus den unterschiedlichsten Stahlprofilen (wie z.B. Rundstahl, H-Profil, Doppel-U-Profil, etc.) bestehen. Die Verdrängung des Bodens erfolgt durch eine angeschweißte Fußplatte [30].

Bohrpfähle

Für die Herstellung von Bohrpfählen wird der anstehende Boden gelöst und gefördert. Das Fördervolumen ist entweder das vollständige Volumen oder ein Teilvolumen des Bohrpfahles. In diesem Fall spricht man von Teilverdrängungspfählen [41, 114]. Die ÖNORM gliedert Bohrpfähle nach der Stützung der Bohrlochwandung während des Aushubs wie folgt [89]:

- Verrohrtes Bohren
- Bohren unter Stützflüssigkeit
- Bohren mit durchgehender Bohrschnecke
- Ungestütztes Bohren

Mikropfähle

Spricht man von Mikropfählen, so sind damit Pfähle deren Durchmesser bei Bohrpfählen kleiner 0,30 m und bei Verdrängungspfähle kleiner 0,15 m gemeint. Mikropfähle, früher "Verpresspfähle mit kleinem Durchmesser" benannt, zeichnen sich durch eine überwiegend auf Mantelreibung basierte Kraftübertragung aus. Sie kommen speziell bei sehr beengten Platzverhältnissen zum Einsatz. Die Herstellung erfolgt erschütterungs- und lärmarm und eignet sich daher für Bauen im Bestand [114]. Die Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. [41] gliedert Mikropfähle in

- Ortbetonpfähle und
- Verbundpfähle.

Ortbetonpfähle

Ortbetonpfähle sind Pfähle, die eine durchgehende Längsbewehrung aus Betonstahl aufweisen, welche von einer Zementmörtel- oder Beton-Verpressung umgeben ist. Aufgrund des chemischen Angriffs des Grundwassers muss die Betondeckung 30-40 mm betragen. Der Mindestdurchmesser ist mit 150 mm festgesetzt [30, 32].

Verbundpfähle

Verbundpfähle bestehen aus vorgefertigten stählernen Traggliedern oder Stahlbeton mit einem Mindestdurchmesser von 100 mm. Die Kraftübertragung wird durch einen Verpresskörper, der das Tragglied umschließt, hergestellt [30].

2.2.1 Anwendungsgebiete

Pfähle eignen sich besonders zur Abtragung von großen Bauwerkslasten in tragfähige Schichten des Untergrunds, sofern diese von nicht-tragfähigen Bodenschichten überlagert werden. Sie werden punktuell, linienförmig oder in Gruppen eingesetzt und verbleiben im Gegensatz zu Spundwänden üblicherweise im Untergrund.

Im städtischen Bereich werden Pfähle nicht alleine der Abtragung der Lasten wegen herangezogen, sondern dienen gleichzeitig als Baugrubenverbauwand. Aus wirtschaftlichen Gründen ist es bei diesem Anwendungsfall ratsam, die Pfähle in das Gründungskonzept des Bauwerkes zu integrieren. Die hohe Steifigkeit ermöglicht den Einsatz in setzungsempfindlichen Bereichen, wie neben unmittelbarer Bebauung oder im Nahbereich von erdverlegten Leitungen. Pfähle lassen sich in nahezu allen Baugrund- und Grundwasserverhältnissen herstellen. Mit speziellen Herstellungsmethoden lassen sich nahezu wasserdichte Pfahlwände herstellen. Werden *Bohrpfähle als Verbauwand* eingesetzt lassen sich nach Maybaum et al. [81, S. 113] folgende Vor- und Nachteile feststellen:

Die wesentliche **Vorteile** von Bohrpfahlwänden sind:

- nahezu wasserdicht herstellbar (nur tangierende Bohrpfahlwände)
- erschütterungsfreie und lärmarme Herstellung
- Ausführung auch in schwer- oder nicht rambaren Böden möglich
- verformungsarm, somit neben bestehender Bebauung anwendbar
- keine Begrenzung der Tiefe
- keine Setzungen neben dem Bohrloch
- Anpassung an Platzverhältnisse und Baugrenzen möglich

Dem gegenüber stehen **Nachteile** wie etwa:

- wesentlich höhere Kosten im Vergleich zu Spund- oder Trägerbohlwänden
- Pfähle sind nicht wiedergewinnbar
- wirtschaftlich nur dann, wenn Bohrpfahlwand in Bauwerk integriert wird
- große Anzahl an Fugen sind Schwachstellen für möglichen Wasserzutritt

Die Möglichkeit der wasserdichten Herstellung macht man sich im Schachtbau sowie bei der Anwendung als Dichtwänden zunutze [38, 41, 43, 114].

2.2.2 Ausführungsformen

Pfähle sind sehr vielfältig einsetzbar und lassen sich aufgrund der Art der Tragwirkung und Anordnung zueinander in folgende durch die Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. [41] definierte Pfahlgründungssysteme einteilen:

- Einzelpfähle
- Pfahlroste
- Pfahlgruppen
- Kombinierte Pfahl-Plattengründungen
- Pfahlkonstruktionen zur Baugrubenherstellung und Sicherung von Geländesprüngen

Einzelpfähle

Steht ein Pfahl weder über den Baugrund, noch über ein Bauwerk mit einem anderen Pfahl in Interaktion, bzw. sind die Wechselwirkungen vernachlässigbar klein, so wird dieser als Einzelpfahl bezeichnet [94].

Pfahlroste

Als Pfahlgruppen werden Pfähle bezeichnet, die durch einen Überbau miteinander interagieren. Sie sind so weit voneinander entfernt angeordnet, dass über den Baugrund keine wesentlichen Wechselwirkungen im Tragverhalten zwischen zwei Pfählen auftreten [94].

Pfahlgruppen

Pfähle von Pfahlgruppen sind über einen Überbau miteinander verbunden, im Gegensatz zu Pfahlrosten sind die Pfähle näher aneinander angeordnet. Dadurch kommt es zu einer gegenseitigen Beeinflussung im Tragverhalten. Diese Gruppenwirkung nennt man Pfahl-Pfahl-Interaktion. Die Pfähle von Pfahlgruppen werden je nach Anordnung im System *Innenpfahl*, *Randpfahl* und *Eckpfahl* bezeichnet [94].

Kombinierte Pfahl-Plattengründungen

Wird die gemeinsame Wirkung von Pfählen und der Fundamentplatte zur Abtragung von Lasten in den Untergrund eingesetzt, spricht man von der Kombinierten Pfahl-Plattengründung. Es ist eine besonders wirtschaftliche Methode der Gründung, da man sich die Vorteile von Flach- als auch Tiefgründungen zunutze macht. Das Tragverhalten kommt jenem der Flachgründung am nächsten, wobei die Pfähle als Setzungsbremse wirken und Setzungen um bis zu 60 % reduzieren [94].

Pfahlkonstruktionen zur Baugrubenherstellung und Sicherung von Geländesprüngen

Werden Pfähle zur Sicherung von Baugruben und Geländesprüngen eingesetzt, lassen sind in Abhängigkeit der Anforderungen an das Bauwerk und den Verbau drei verschiedene Typen von Bohrpfahlwänden unterscheiden [38, 43, 81, 91, 114]:

- aufgelöste Bohrpfahlwände
- tangierende Bohrpfahlwände
- überschchnittene Bohrpfahlwände

Bohrpfahlwände nehmen Erd- und gegebenenfalls Wasserdruck auf und sind in der Regel als biegesteif anzusehen. Die Maßnahmen sind entweder temporär oder dauerhaft [94].

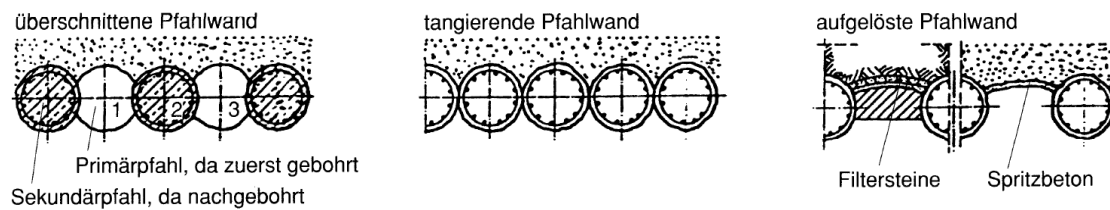


Abb. 2.3: Ausführungsarten von Bohrpfahlwänden [102]

Aufgelöste Bohrpfahlwände: Aufgelöste Bohrpfahlwände bestehen aus einzelnen Pfählen mit einem Achsraster größer als der Bohrdurchmesser. Das Achsraster wird nach Kriterien wie der Verbauhöhe, dem Pfahldurchmesser und den Untergrundverhältnissen bestimmt und liegt in der Regel zwischen ein und drei Meter. Während des lagenweisen Aushubs bildet sich in den Bereichen zwischen den Pfählen idealerweise ein Gewölbe aus, welches im Anschluss mit Spritzbeton gesichert wird. Das Tragverhalten entspricht in etwa jenem der Trägerbohlwände, wobei eine weit höhere Steifigkeit des Systems erreicht wird. Anfallendes Sickerwasser wird durch Drainagematten hinter dem Spritzbeton oder durch Filtersteine gefangen und einem Vorfluter zugeführt. Eine annähernd wasserdichte Herstellung der aufgelösten Bohrpfahlwand wird mithilfe von Düsenstrahlverfahren (DSV)-Zwickelabdichtungen realisiert.

Tangierende Bohrpfahlwände: Tangierende Bohrpfahlwände werden aus nebeneinander stehenden bewehrten Pfählen hergestellt. Zwischen den Einzelpfählen wird ein Abstand von fünf bis zehn Zentimeter eingehalten. Besonderes Augenmerk ist auf die Bohrgenauigkeit zu legen. Kommt es zu größeren Abweichungen als durch den Abstand vorgesehen, führt dies zu Problemen beim Abteufen des nächsten Pfahles. Die tangierende Bohrpfahlwand weist eine sehr hohe Biegesteifigkeit auf und eignet sich, Lasten aus Nachbarbebauungen abzufangen. Sollte die Biegesteifigkeit der Pfahlwand nicht ausreichen, besteht die Möglichkeit der Rückverankerung. Die Anker wird üblicherweise im Pfahlzwickel angeordnet, sodass jeder Pfahl gesichert ist. Alternativ dazu besteht die Möglichkeit, die Verankerung durch Gurte zu verbinden. Die Vergurtung stellt eine durchgehende Sicherung und Rückverankerung der Pfähle dar. Diese Maßnahme garantiert eine einwandfreie Kraftübertragung.

Überschnittene Bohrpfahlwände: Überschnittene Bohrpfahlwände bestehen aus Einzelpfählen, deren Achsabstand geringer als der Bohrdurchmesser ist. Das Überschneidungsmaß hängt von bestimmten Parametern wie dem Bohrverfahren, der Längsabweichung und dem Wasserdruck ab und ist in der Regel zwischen 10 und 20 % des Bohrdurchmessers. Die Pfähle werden im Pilgerschrittverfahren hergestellt. Auf die unbewehrten Primärpfähle folgen die bewehrten Sekundärpfähle. Die primären Pfähle haben eine rein ausfachende Funktion. Es bietet sich daher an, die Primärpfähle mit Beton geringerer Güte herzustellen. Dies erleichtert zudem die Herstellung des sekundären Pfahls. Da überschnittene Bohrpfahlwände überwiegend als wasserdichte Wände eingesetzt werden, gilt es auf die Bohrgenauigkeit ein besonderes Augenmerk zu legen. Um diese sicherzustellen werden im Vorfeld Bohrschablonen erstellt. Diese garantieren die Einhaltung des Achsrasters, wobei sich mit zunehmender Tiefe die Bohrabweichungen stärker auswirken und das Einhalten des enger Überschneidungsmaße schwierig wird. Aus diesem Grund ist mit zunehmender Tiefe der Baugrube eine größere Überschneidung zu wählen, um eine ausreichende Dichtheit des Systems zu gewährleisten.

2.2.3 Verfahrenstechnik

Die Verfahrenstechniken von Pfählen werden nachfolgend für

- Verdrängungspfähle,
- Bohrpfähle und
- Mikropfähle

beschrieben.

2.2.3.1 Verdrängungspfähle

Verdrängungspfähle verdrängen den anstehenden Boden seitlich, wodurch der Aushub und Abtransport des Aushubmaterial größtenteils entfallen. Zudem wird durch die Verdichtung und Umlagerung des in unmittelbarer Nähe des Pfahls anstehenden Bodens eine höhere Tragfähigkeit im Vergleich zu Bohrpfählen erreicht. Folgende Einbauverfahren sind möglich [30]:

- Schlagrammen
- Vibrieren/Rütteln
- Einpressen/Eindrücken
- Drehen

Das jeweilige Einbringverfahren ist auf Basis eines Auswahlprozesse anzuwählen. Faktoren hierfür sind die Baugrundbeschaffenheit, die Nachbarbebauung, die Abmessungen und das Material des Pfahles, sowie Anforderungen an den Umweltschutz. Grundsätzlich gilt, dass in nicht-bindigen Böden das schnell schlagende Rammen und das Einvibrieren zu hohen Tagesleistungen führt. Die Bodenkörner werden in einen halbflüssigen Zustand versetzt, welcher die Mantelreibung herabsetzt. Für bindige Böden gelten das langsam schlagende Rammen und das Einpressverfahren als wirtschaftliche Methoden. Die Schläge der Ramme führen zu hohen Porenwasserdrücken, die sich bei langsamer Schlagfolge wieder abbauen können. Auf eine detailliertere Beschreibung der einzelnen Verfahren wird an dieser Stelle verzichtet, diese ist in Abschnitt 2.1.4 zu finden [81]. Nachfolgend erfolgt eine Beschreibung der Verfahrenstechnik für die verschiedenen Arten von Verdrängungspfählen.

Fertigrammpfähle

Fertigrammpfähle werden durch Rammen, Vibrieren oder Pressen in den Untergrund eingebracht. Die Verfahren, einschließlich deren Eignung im Hinblick auf die Bodenbeschaffenheit sowie deren Vor- und Nachteile, wurden bereits im Abschnitt 2.1.4 für Spundwände beschrieben. Der Pfahlkopf ist beim Schlagrammen durch eine Rammhaube mit Rammhaubenfutter vor Beschädigung zu schützen [85].

Ortbetonrammpfähle

Bei diesen Pfählen werden an der Spitze verschlossene, dickwandige Rohre durch vollständige Bodenverdrängen in den Untergrund gerammt. Unterschieden wird zwischen:

- der Innenrammung (Frankipfahl) und
- der Kopframmung (Simplexpfahl).

Bei der *Innenrammung* wird das Vortriebsrohr durch einen Kies- oder Betonpfropfen am Fuß verschlossen. Die Einbringung erfolgt durch eine Freifall-Innenrammung. Im Gegensatz dazu erfolgt bei der *Kopframmung* das Einschlagen des Rohres mäklergeführt über eine Rammhaube. In diesem Fall ist das Rohr durch eine verlorene Fußplatte am Fuß verschlossen [30].

Schraubpfähle/Vollverdrängungspfähle

Vollverdrängungspfähle, bzw. Schraubbohrpfähle, werden überwiegend durch eine drehende und drückende Bewegung ohne Förderung von Material hergestellt. Zur Auswahl stehen u.a.

- der Schraubpfahl mit Schneidschuh (Atlaspfahl)
- der Schraubpfahl mit verlorener Fußplatte (Fundexpfahl) und
- der Vollverdrängungspfahl (Full Displacement Pile)

Die Verfahren unterscheiden sich somit durch die Ausführung der Spitze. Beim Fundexpfahl ist die Spitze als verlorene Fußplatte mit Schraubengängen (d.h. sie verbleibt im Boden) ausgeführt. Sie wird beim Betoniervorgang abgeworfen. Die Spitze des Atlaspfahles ist durch einen Schneidschuh ausgebildet. Der Schneidschuh formt eine am Pfahlschaft verlaufende Spiralwulst. Zu beachten gilt es, dass es durch die Verdrängung des Materials zu Hebungen im unmittelbaren Einflussbereich kommen kann [113]. Bei Vollverdrängungspfählen wird der Hohlraum durch eine am Fuß angeordnete Anfängerschnecke ausgebildet. Während dem Ziehen - bei gleichzeitigem Betonieren - wird das Bohrloch durch eine gegengleich gewundene Schnecke nachverdichtet und stabilisiert [21].

Verpresste Verdrängungspfähle

Von verpressten Verdrängungspfählen spricht man bei in den Boden eingerammten oder eingerüttelten Stahlprofilen, welche im Zuge des Einbringens mit Zementsuspension verpresst werden. Verpresste Verdrängungspfähle gliedern sich folgendermaßen in

- Verpressmörtelpfähle (VM-Pfähle),
- Rüttelinjektionspfähle (RI-Pfähle) und

Verpressmörtelpfähle bestehen in der Regel aus Stahlprofilen mit einem an der Pfahlspitze befestigten Pfahlschuh. Die Pfahlspitze kann spitz zulaufen oder flach ausgeführt werden. In jedem Fall jedoch ist der Pfahlschuh im Vergleich zum Pfahlschaft vergrößert ausgeführt. Der hergestellte Freischnitt wird verfüllt/verpresst. Ein *Rüttelinjektionspfahl* ist eine Abwandlung des VM-Pfahls. Das Tragglied besteht aus einem HEB- oder HEA-Träger und weist im Vergleich zum VM-Pfahl keinen großflächigen Verdrängungskörper am Pfahlfuß auf. Der Freischnitt, bzw. Hohlraum, bei RI-Pfählen wird durch an Flaschen und Steg aufgeschweißte Bleche (einer Aufdoppelung) erzeugt. Der Hohlraum wird kontinuierlich durch am Pfahlschaft angebrachte Leitungen mit Zementsuspension verfüllt. Der geringere Eindringwiderstand ermöglicht den Einbau mit dem Vibrations-/ Rüttelverfahren.

Je nach Material des Traggliedes müssen Pfahlschaft- und/oder Pfahlfuß nachverpresst werden. Mit diesem Vorgang wird nach Abbinden des Verpressgutes begonnen [85, 113].

2.2.3.2 Bohrpfähle

Bohrpfähle sind aus Ortbeton durch

- drehende
- drückende und/oder
- schlagende

Bewegung hergestellte Pfähle, die üblicherweise bewehrt sind. Bei der Herstellung wird der anstehende Boden gelöst und gefördert. Die Schaffung des Hohlraums erfolgt verrohrt oder unverrohrt. Die Förderung des Bohrgutes ermöglicht zudem die Begutachtung der angetroffenen Baugrundbeschaffenheit während der Ausführung. Für den Fall einer unverrohrten Herstellung kann das Bohrloch temporär durch eine Suspension gestützt werden. Die Bandbreite der Durchmesser reicht von 0,30 bis 3,00 m, die Länge ist an die jeweiligen Untergrundverhältnisse anpassbar, wobei bis zu 100 m erreichbar sind. Während der Ausführung entstehen kaum Lärm und Erschütterungen [41, 81].

Hinsichtlich der Stützung des Bohrloches teilt die Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. [41] Bohrpfähle wie folgt ein:

- ungestütztes Bohren
- verrohrttes Bohren
- suspensionsgestütztes Bohren
- erdgestütztes Bohren

Ungestützt hergestellte Bohrpfähle

Ist der Baugrund ausreichend standfest, bedarf es nicht notwendigerweise einer Stützung des Bohrloches. Zum Schutz des Bohrlochmundes und zur Führung des Bohrwerkzeuges wird dennoch ein kurzes Leitrohr gesetzt. Nicht standfeste Schichten des Bodens müssen gestützt werden. Jenes Verfahren sollte nur bei lotrechten oder schräggestellten Pfählen mit einer maximalen Neigung von 15:1 eingesetzt werden [41, 89].

Verrohrt hergestellte Bohrpfähle

Bei verrohrten Bohrpfählen wird eine Verrohrung in den Boden getrieben. Die Lösung und Förderung des Bohrgutes erfolgen im Schutze der Verrohrung. Für sehr großen Bohrtiefen besteht die Möglichkeit von teleskopartigen Bohrungen. Begonnen wird mit einem großen Durchmesser, der durch einen kleineren Durchmesser ersetzt wird bevor die Mantelreibung nicht mehr überwunden werden kann. Die Verrohrung kann bei temporärer Standfestigkeit des Bodens dem Aushub nacheilen. Bei nicht standfesten Böden hat die Verrohrung dem Aushub vorauszuweichen. Am Fuß der Verrohrung ist ein Schneidschuh angebracht, der einen Freischnitt zur Wandung des Rohres herstellt. Dies erleichtert das Einbringen durch Minderung der Mantelreibung.

Im Anschluss werden die Bewehrung eingestellt, Beton im Kontraktorverfahren eingebracht und die Verrohrung währenddessen kontinuierlich gezogen. Verrohrte Pfähle lassen sich in jedem Boden einsetzen, für Fels gilt dies nur mit Einschränkungen. Dabei erreichen die Pfähle Durchmesser bis zu 2,50 m und Tiefen bis 60 m. Besonders bei größeren Durchmessern eignen sich Pfähle auch zur Abtragung von Horizontallasten [41].

Suspensionsgestützt hergestellte Bohrpfähle

Zur Herstellung von flüssigkeitsgestützten Pfählen muss im ersten Schritt das Anfängerrohr (auch Leitrohr genannt) gesetzt werden. Während des diskontinuierlichen Aushubs ist darauf zu achten, dass der Spiegel der Suspension (üblicherweise Bentonitsuspension) nicht in den Bereich unterhalb des Anfängerrohres sowie unter eine Grenze von 1,50 m über dem Grundwasserspiegel fällt. Die Arbeitsgeschwindigkeit des Aushubwerkzeuges ist so anzupassen, dass es zu keiner Kolbenwirkung kommt. Diese würde einen Unterdruck während dem Ziehen bewirken und somit die Bohrlochwandung destabilisieren. Nach Abschluss des Aushubs erfolgt das Einstellen der Bewehrung und die Betonage im Kontraktorverfahren. Mit dem Verfahren entstehen Pfähle mit einem Durchmesser bis zu 3,00 m und einer Tiefe von 60 m. Mithilfe von Sonderbohrverfahren wie

dem direkten und indirekten Spülbohrverfahren können größere Tiefe unter erhöhtem Aufwand hergestellt werden [41, 89, 92].

Erdgestützt hergestellte Pfähle

Bei erdgestützten Pfählen wird eine über die komplette Länge des Bohrgestänges durchgehende Schnecke bis zur gewünschten Tiefe des Bohrloches abgeteuft. Die bodengefüllten Gänge übernehmen dadurch die Stützung. Die Anzahl der Umdrehungen sollte auf ein Minimum beschränkt werden, um die Störung des umliegenden Bodens gering zu halten. Die Seele der Schnecke ist hohl und durch eine verlorene Fußplatte zu verschließen. Im Anschluss wird die Schnecke mit gleichzeitiger Zufuhr des Betons durch das Seelenrohr gezogen. Gegebenenfalls wird im Anschluss ein Bewehrungskorb in den frischen Beton hinabgelassen. Es sind Außendurchmesser zwischen 0,40 und 1,20 m realisierbar [41, 89].

Eine weitere Unterteilung von Bohrpfählen wird hinsichtlich der Herstellung der Bohrlöcher getroffen:

- Trockenbohrverfahren
 - Drehbohren
 - Schlagbohren
- Nassbohrverfahren
 - direktes Spülbohren
 - indirektes Spülbohren

Trockenbohrverfahren

Jene Bohrverfahren erfolgen ohne Zusatz von Wasser oder einer Spülung. Übliche Bohrdurchmesser sind zwischen 600 und 2000 mm, möglich sind Durchmesser bis zu 3000 mm. Bohrungen lassen sich so bis zu einer Tiefe von 100 m herstellen. Begrenzt sind diese Bohrungen mit einer Neigung von 5:1. Die Verfahren eignen sich in allen Lockergesteinen, lokal auftretender Fels wird mit Meißeln durchörtert. Prinzipiell gilt, dass im Verhältnis zu schlagbohrenden Verfahren mit drehbohrenden Verfahren eine wesentlich höhere Bohrleistung zu erreichen ist [81].

Nassbohrverfahren

Diese Verfahren zeichnen sich durch die Förderung des Bohrgutes in einem Flüssigkeitsstrom aus. Die Flüssigkeit ist Wasser und wird in der Regel mit Tonmehl vermengt. Alternativ dazu wird ein Luft-Wasser-Gemisch verwendet. Der Flüssigkeitsstrom übernimmt zwei Aufgaben. Einerseits dient er der Förderung des Bohrkleins und andererseits stützt er das Bohrloch. Das Verfahren spielt für die Bohrpfahllherstellung nur eine untergeordnete Rolle. Es ist erst ab einer Tiefe von 30 m wirtschaftlich einsetzbar und kommt dann zur Anwendung, wenn bei großen Tiefen die Anwendungsgrenzen einer Verrohrung erreicht ist. Die Unterscheidung in direkte und indirekte Verfahren rührt aus dem Zufluss des Förderstromes zum Bohrlochtiefsten. Bei direktem Spülbohren erfolgt dieser durch das Bohrgestänge, bei indirekten über den Ringraum [81].

2.2.3.3 Mikropfähle

Mikropfähle sind gemäß *ÖNORM EN 14199:2016 10 15: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Mikropfähle* [87] Verdrängungspfähle mit einem Durchmesser kleiner 0,15 m und Bohrpfähle kleiner 0,30 m. Dementsprechend ähneln die Einbringverfahren jenen Pfählen mit größeren Durchmessern. Die Herstellung erfolgt demnach mit bohrenden oder verdrängenden Verfahren [91].

Gebohrte Mikropfähle

Die Bohrung wird üblicherweise drehend oder dreh-schlagend ausgeführt. Je nach Pfahlsystem und Untergrund ist eine Verrohrung vorzusehen. Bei verrohrten Pfählen wird das Tragglied/die Bewehrung in die Verrohrung eingestellt. Während dem Betonieren, bzw. der Verguss mit Mörtel wird die Verrohrung kontinuierlich gezogen. Bei unverrohrt hergestellten Bohrungen nutzt man das Tragglied als Bohrgestänge, an dessen Spitze eine verlorene Bohrkronen angebracht wird. Die Vermörtelung des Ringraumes erfolgt parallel zum Bohren. Das Verfahren ist erschütterungs- und lärmarm.

Verdrängte Mikropfähle

Zur Herstellung von Mikropfählen im Verdrängungsverfahren werden Tragglieder mit einer Fußplatte oder Rammspitze ausgerüstet. Es folgt das Einrammen/Einvibrieren in den Boden. Die Verfüllung des Hohlraumes erfolgt während dem Rammvorgang oder im Anschluss an diesen. Im Gegensatz zu gebohrten Mikropfählen ist mit wesentlich mehr Erschütterungen und Lärmemissionen zu rechnen.

2.2.3.4 Zusätzliche Maßnahmen

Fußaufweitung

Fußaufweitungen sind Querschnittvergrößerungen im Bereich des Pfahlfußes. Aufweitungen lassen sich bei allen Pfahlsystemen herstellen, wobei herstellungsbedingt Unterschiede festzustellen sind. Während bei Verdrängungspfählen das Ausrammen eines Beton- oder Kiespfropfen im Vordergrund steht, bedient man sich bei Bohrpfählen Räum- und Schneidwerkzeugen. Ein ausreichend tragfähiger Untergrund ist hierfür unerlässlich, da die Verrohrung ein Stück weit gezogen werden muss. Anschließend erfolgt eine gründliche Reinigung des Pfahlfußes. Es bedarf im Regelfall keiner zusätzlichen Bewehrung der Aufweitung. Das Betonieren hat in einem Zug zu erfolgen. Erwähnt sei an dieser Stelle, dass die Anwendung des Verfahrens aufgrund größerer Bohrdurchmesser seit Jahren rückgängig ist. Bei Mikropfählen besteht zusätzlich die Möglichkeit, Aufweitungen des Fußes mit Expansionskörpern herzustellen [32, 85, 87, 89, 92].

Fuß- und Mantelverpressung

Mithilfe von Fuß- und/oder Mantelverpressungen werden Setzungen von Pfählen reduziert. *Mantelverpressungen* lassen sich durch am Bewehrungskorb geführte Leitungen, die am Ende mit Manschettenventilen ausgestattet sind, realisieren. Die Verteilung der Ventile am Bewehrungskorb definiert den Nachpressbereich, welche nur im tragfähigen Boden sinnvoll ist. Nach Ansteifen des Pfahlbetons wird dieser mit Wasser aufgerissen und im Anschluss mit Zementsuspension verpresst. Die Vermörtelung führt zu einer optimalen Verzahnung mit dem Untergrund. Am Markt sind unterschiedliche Systeme erhältlich, die sowohl das Spülen als auch das Nachverpressen zulassen. Die Herstellung von *Fußverpressungen* erfolgt ähnlich, wobei das Aufreißen mit Wasser nicht erforderlich ist. Am Pfahlfuß angebrachte Manschettenrohre werden mit Zementsuspension gefüllt. Ein unter dem Pfahlfuß angeordneter Kieskörper dient der gleichmäßigen Verteilung der Suspension. Spätestens wenn sich der Pfahlkopf um einige Millimeter hebt (überwacht mit einem Nivelliergerät), ist der Prozess zu stoppen. Neben der separaten Anwendung der Verfahren erfolgt oftmals eine *gleichzeitige Fuß- und Mantelverpressung* [32].

Kappen

Bei in Ortbeton hergestellten Pfählen bedarf es eines weiteren Arbeitsschrittes. Herstellungsbedingt ist die Qualität des Betons im Bereich des Pfahlkopfes oftmals mangelhaft. Mit dem Kappen bis auf eine zuvor definierte Kapphöhe wird verunreinigter und/oder minderwertiger Beton beseitigt. Dies garantiert im Weiteren einen optimalen Kraftschluss zwischen Pfahl und

dem darauf aufbauenden Bauwerk. Um Risse und Beschädigungen am Pfahl unterhalb der Kapphöhe zu vermeiden, ist die Art und Größe des Abbruchgerätes sorgsam auszuwählen [85, 87, 89].

2.2.4 Herstellungsverfahren

Die Herstellungsverfahren von Pfählen werden nachfolgend für

- Verdrängungspfähle,
- Bohrspfähle und
- Mikropfähle

beschrieben.

2.2.4.1 Verdrängungspfähle

Im weiteren Verlauf werden die am häufigsten angewandten und angebotenen Herstellungsverfahren detailliert beschrieben. Die Beschreibungen werden mit alternativen Verfahrensbezeichnungen sowie gängigen Bohrdurchmessern und Bohrtiefen ergänzt.

Ortbetonrammpfähle mit Innenrammung

- weitere Bezeichnungen: Franki-Pfahl
- Rohrdurchmesser: 0,42 bis 0,61 m
- Bohrtiefe: bis 30 m
- Bohrlochsicherung: Verrohrung

Bei der Herstellung eines Verdrängungspfahles mit Innenrammung wird ein stählernes Vortriebsrohr durch Innenrammung abgeteuft (siehe Abb. 2.4). Das Rohr wird am Rohrfuß durch einen Betonpfropfen wasserdicht verschlossen, der sich im Rohr verspannt. Beim Abteufen fällt ein 2,0 bis 4,5 t schwerer Fallbär aus einer Höhe von 6 bis 7 m auf den Betonpfropfen, welcher das Rohr in die Tiefe mitzieht. Ist die Endtiefe erreicht, wird der Pfropfen bei festgehaltenem Rohr aus diesem ausgeschlagen, jedoch nicht komplett. Das soll sicherstellen, dass das Rohr stets trocken bleibt. Nach dem Einheben der Bewehrung startet das Betonieren. Es ist gängige Praxis, nicht im Kontraktorverfahren zu Betonieren, da das System wasserdicht verschlossen ist. Der Beton wird in einen Trichter eingefüllt, welcher einen konzentrierten Betonstrahl erzeugt. Jene Maßnahme stellt sicher, dass sich der Beton nicht entmischt [81].

Ortbetonrammpfähle mit Kopframmung

- weitere Bezeichnungen: Simplex-Pfahl
- Rohrdurchmesser: 0,34 bis 0,72 m
- Bohrtiefe: bis 30 m
- Bohrlochsicherung: Verrohrung

Bei der Herstellung von Simplex-Pfählen werden dickwandige Stahlrohre durch Kopframmung in den Boden geschlagen (siehe Abb. 2.5). Der Pfahl ist am Fuß durch eine lösbare Fußplatte verschlossen. Nach Erreichen der Endtiefe wird der Bewehrungskorb eingesetzt. Neben dem Betonieren wird gleichzeitig das Vortriebsrohrs gezogen. Das Ziehen erfolgt durch eine hydraulische Zieheinrichtung oder mit Vibrationsrüttlern. In diesem Zuge löst sich die im Boden verbleibende Fußplatte.

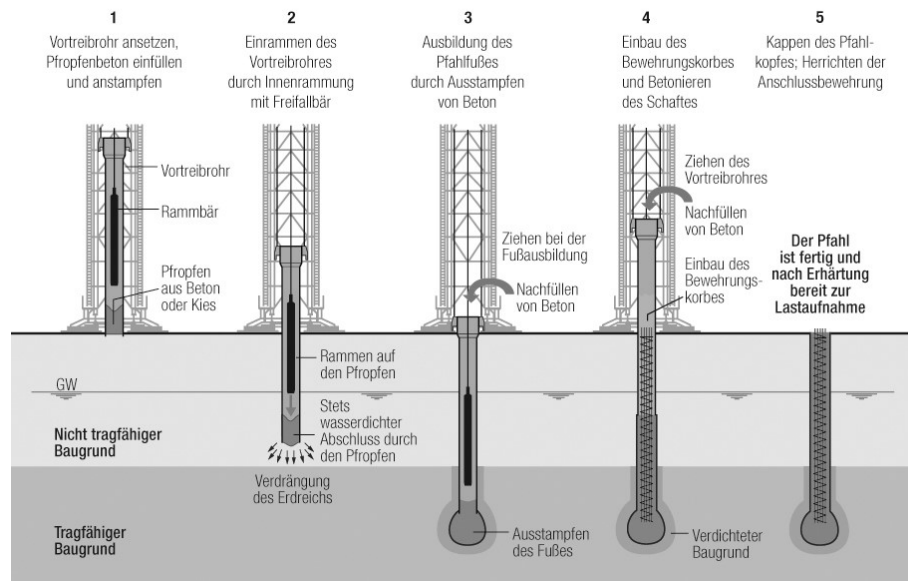


Abb. 2.4: Ort betonrammpfahl mit Innenrammung [47]

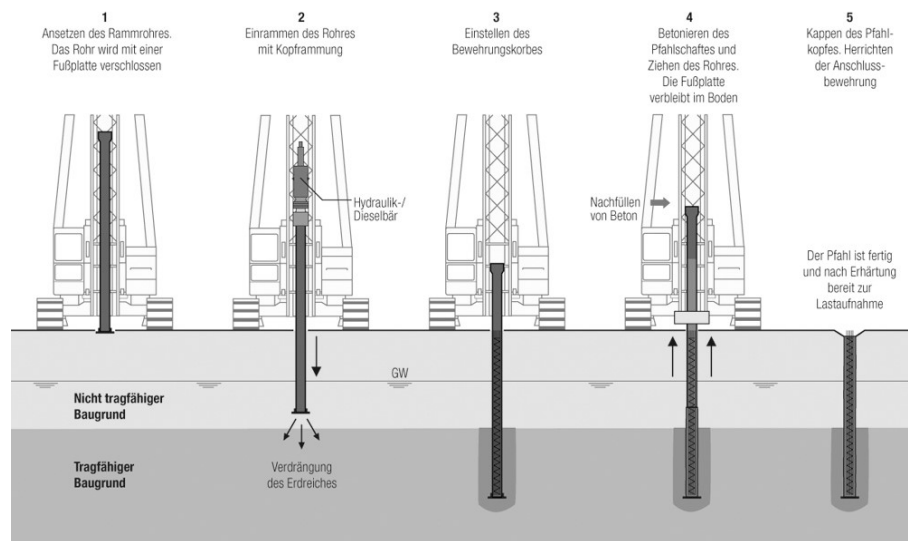


Abb. 2.5: Ort betonrammpfahl mit Kopframmung – Simplex-Pfahl [47]

Vollverdrängungspfähle mit Schneidschuh

- weitere Bezeichnungen: Atlas-Pfahl
- Rohrdurchmesser: 0,36 bis 0,56 m
- Bohrtiefe: den Bodenverhältnissen anpassbar
- Bohrlochsicherung: Verrohrung

Beim Atlas-Pfahl wird der anstehende Boden durch ein vorgetriebenes Stahlrohr seitlich verdrängt und verdichtet. Auf dem Vortriebsrohr ist ein Schneidschuh angebracht, welcher dem fertigen Pfahl seine charakteristische Form verleiht (siehe Abb. 2.6). Schneidschuh und Vortriebsrohr werden mit

drehender und drückender Bewegung in den Boden geschraubt. Die Messung von Anpressdruck und Drehmoment erlaubt den Vergleich mit vorab gemachten Bodenaufschlüssen. Ist die Endtiefe erreicht, wird der Bewehrungskorb eingestellt. Gleichzeitig mit dem Betoniertvorgang wird das Vortriebsrohr samt Schneidschuh durch Drehen in Gegenrichtung ausgebaut. Die Fußspitze löst sich dadurch und verbleibt im Boden. Durch die Verfüllung bildet sich ein 5 cm starker wendelförmiger Betonwulst auf dem Pfahlschaft aus. Das Verfahren bietet sich vor allem aufgrund der erschütterungs- und lärmfreien Herstellung an [81].

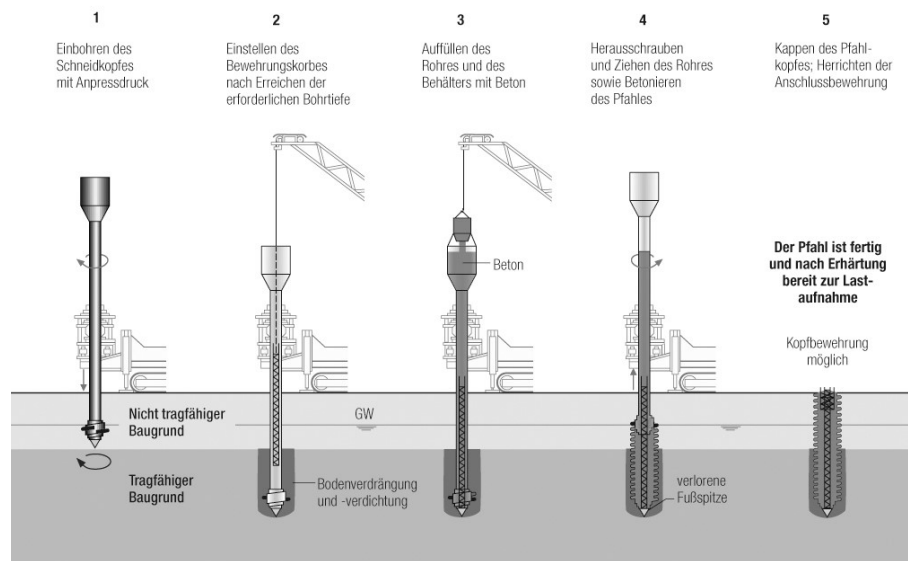


Abb. 2.6: Vollverdrängungspfahl mit Schneidschuh – Atlas-Pfahl [47]

Vollverdrängungspfähle mit verllorener Pfahls Spitze

- weitere Bezeichnungen: Fundex-Pfahl
- Rohrdurchmesser: 0,38 bis 0,52 m
- Bohrtiefe: 30 m
- Bohrlochsicherung: Verrohrung

Fundex-Pfähle sind Ortbetonpfähle, deren Vortriebsrohr wiedergewonnen wird, nicht jedoch die Pfahls Spitze (siehe Abb. 2.7). Die schraubenförmig ausgebildete Pfahls Spitze verbleibt nach dem Eindrehen, Bewehren und Betonieren im Boden. Das Rohr wird wieder gezogen [81].

Verpressmörtelpfähle, Rüttelinjektionspfähle

Die vorgefertigte und mit Injektionsleitungen ausgerüsteten Tragelemente aus Stahl werden mittels Rammen/Vibrieren in den Boden eingebracht. Während dieses Vorganges wird der geschaffene Hohlraum kontinuierlich mit Zementmörtel/Zementsuspension verfüllt. Die Suspension tritt unter hydrostatischem Druck am unteren Ende des Pfahlschaftes aus und ummantelt diesen gleichmäßig. Eine weitere Tragfähigkeitserhöhung erfolgt über eine im Anschluss erfolgende Verpressung. Hierfür ist der Hohlraum durch einen Stampfbetonpfropfen und einer abschließenden Stahlabdichtglocke zu verschließen und mit 5 bis 15 bar zu verpressen [113].

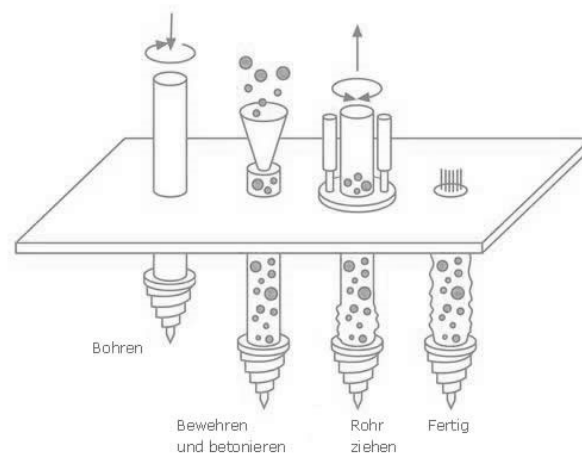


Abb. 2.7: Vollverdrängungspfahl mit verllorener Pfahlspitze – Fundex-Pfahl [81]

2.2.4.2 Bohrpfähle

Nach der Beschreibung der verschiedenen Verfahrenstechniken werden nun die einzelnen Herstellungsverfahren dargestellt. Nach König [64] lassen sich **mäklergeführten Verfahren** wie

- das Drehbohrverfahren mit teleskopierbarer Bohrstange,
- das Drehbohrverfahren mit langer Bohrschnecke,
- das Drehbohrverfahren mit Doppelkopfantrieb und
- das Drehbohrverfahren mit Verdrängungsbohrer,

und **seilgeführten Verfahren** wie

- das Schlagbohrverfahren mit Greifer und
- das Aufsatzbohrverfahren

unterscheiden. Kommt eine Verrohrung zum Einsatz, so wird diese üblicherweise durch zusätzlich Geräte in den Boden einbracht. Seilgeführte Herstellungsverfahren eignen sich besonders dann, wenn die Ebenen der Bohrung und jene des Standplatzes des Seilbaggers nicht die gleichen sind (z.B. auf Böschungen oder in Flüssen).

Drehbohrverfahren mit teleskopierbarer Bohrstange

- weitere Bezeichnungen: Kellybohr-Verfahren
- Rohrdurchmesser: 0,60 bis 3,00 m
- Bohrtiefe: 15 bis 90 m
- Bohrlochsicherung: keine, Verrohrung oder Stützflüssigkeit

Das Verfahren zeichnet sich durch die 2- bis 5-fach teleskopierbare „Kellystange“ aus (siehe Abb. 2.8). Die Einzelteile sind miteinander und mit dem Drehantrieb mechanisch verbunden. So lässt sich die an einem Maste geführt Kellystange auf das 5-fache der Grundlänge in das Bohrloch führen. Bei notwendiger Verrohrung des Bohrloches, wird diese über den Bohrteller in den Untergrund vorgeschoben. Reichen die Vorschubkraft und Drehmoment nicht aus, muss die

Verrohrung durch eine am Trägergerät befestigte Verrohrungsmaschine erfolgen. Die Förderung des Bohrgutes erfolgt diskontinuierlich mit drehenden Werkzeugen wie einer kurzen Bohrschnecke oder einem Kastenbohrer. Das Entleeren erfolgt durch drehendes Abschleudern von der Schnecke, bzw. durch Öffnen der Klappe beim Kastenbohrer. Nach dem Bohrvorgang wird die Bewehrung eingestellt und bei kontinuierlichem Ziehen der Verrohrung betoniert [64].

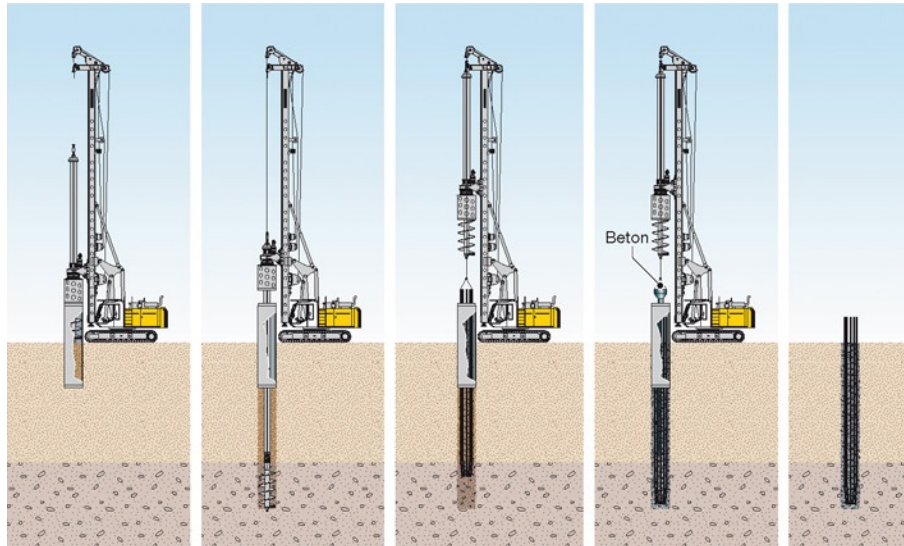


Abb. 2.8: Kellybohren [67]

Drehbohrverfahren mit langer Bohrschnecke

- weitere Bezeichnungen: Schneckenortbeton-Verfahren, Endlosschnecken-Verfahren
- Rohrdurchmesser: 0,50 bis 1,20 m
- Bohrtiefe: 10 bis 28 m
- Bohrlochsicherung: keine

Beim Bohren mit langer Schnecke handelt es sich um ein Verfahren mit kontinuierlicher Förderung des Bohrgutes (siehe Abb. 2.9). Bei dem besonders wirtschaftlichen Bohrverfahren ist die Bohrtiefe mit der maximal nutzbaren Bohrtiefe limitiert. Während dem Bohren wird der Boden teils gefördert, teils verdrängt. Die Betonage erfolgt durch das Seelenrohr bei gleichzeitigem Ziehen der Schnecke. Bei Schnecken mit großem Seelenrohr wird die Bewehrung bereits vor dem Betonieren eingesetzt. Alternativ dazu wird der Korb nachträglich eingerüttelt.

Drehbohrverfahren mit Doppelkopfantrieb

- weitere Bezeichnungen: Verrohrtes-Schneckenortbeton-Verfahren
- Rohrdurchmesser: 0,60 bis 1,20 m
- Bohrtiefe: 12 bis 20 m
- Bohrlochsicherung: Verrohrung

Schnecke und Bohrrohr werden von zwei unterschiedlichen Antrieben gegenläufig betrieben. Schnecke und Bohrrohr sind für den Vorgang des Abteufens miteinander gekoppelt (siehe

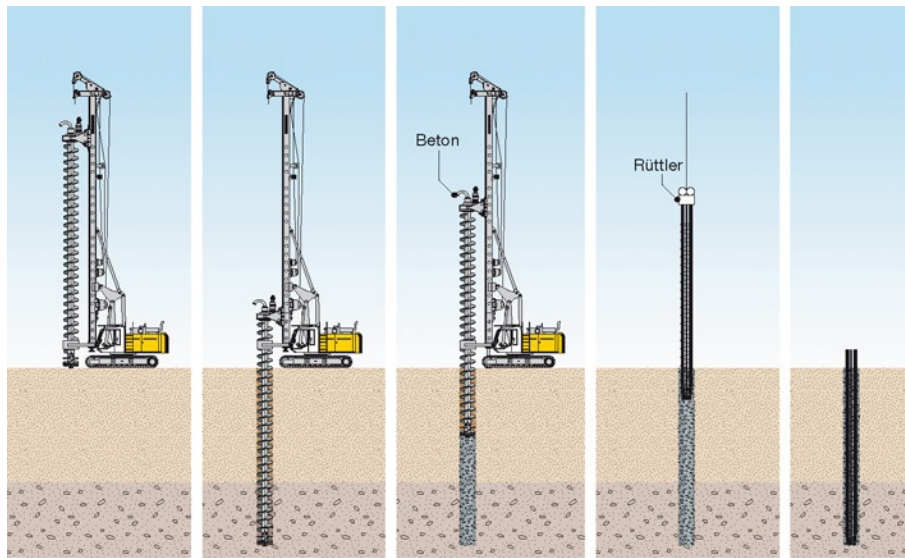


Abb. 2.9: Schneckenbohren [67]

Abb. 2.10). Das Betonieren erfolgt durch die Rohrseele bei gleichzeitigem Ziehen von Schnecke und Verrohrung [68].

Nach [64] wird zum Betonieren vorab die mit Bohrgut beladene Schnecke gezogen. Das Material nach einem Schwenk zur Seite durch eine Drehbewegung und Abschleudern entleert. Anschließend wird die Bewehrung eingesetzt und im Kontraktorverfahren betoniert. Bohrröhr und unterer Antrieb werden anschließend wieder gekoppelt und die Verrohrung wird gezogen [64].

Die Gespräche mit Experten diverser Spezialtiefbauunternehmen haben gezeigt, dass die Betonage durch das Seelenrohr gängige Praxis ist. Es kommt somit zu keinem Entkoppeln der Verrohrung nach dem Bohren. Zudem ist das Spiel zwischen den beiden Antrieben des Kraftdrehkopf (KDK) bei den meisten Doppelkopfantrieben nicht groß genug, um die Verrohrung bei komplett gezogener Schnecke wieder zu koppeln, bzw. anschließend zu ziehen.

Eine Sonderform von verrohrten Schneckenortbetonpfählen ist das **Vor-der-Wand-Verfahren**. Das System kommt unmittelbar neben bestehenden Bebauungen zum Einsatz. Die verwendete Gerätetechnik erlaubt es durch eine spezielle Bauart von Mälkler und Bohrantrieb, einen besonders geringen Abstand zur Nachbarbebauung einzuhalten [23].

Drehbohrverfahren mit Verdrängungsbohrer

- weitere Bezeichnungen: Vollverdrängerbohr-Verfahren
- Rohrdurchmesser: 0,40 bis 0,60 m
- Bohrtiefe: 10 bis 28 m
- Bohrlochsicherung: keine

Beim Bohren mit einem Verdrängungsbohrer ist aufgrund der hohen notwendigen Drehmomente und Schubkräfte in Durchmesser und Tiefe begrenzt. Zudem spielt die Bodenbeschaffenheit eine wichtige Rolle. Bei diesem Verfahren kommt es zu keinem Aushub, das konische Gewinde verdrängt das Material seitlich in die Bohrlochwandung (siehe Abb. 2.11). Damit eignet es sich für den Einsatz bei kontaminierten Böden, wo ein Aushub kostenintensiv zu entsorgen wäre. Zudem lässt sich durch der Verdrängung einer Verbesserung der Tragfähigkeit des Pfahls erreichen. Ist die Bohrlochtiefe erreicht, wird das Bohrloch bei gleichzeitigem Drehen durch die Seele der Schnecke betoniert. Gegebenenfalls wird im Anschluss ein Bewehrungskorb eingerüttelt [64].

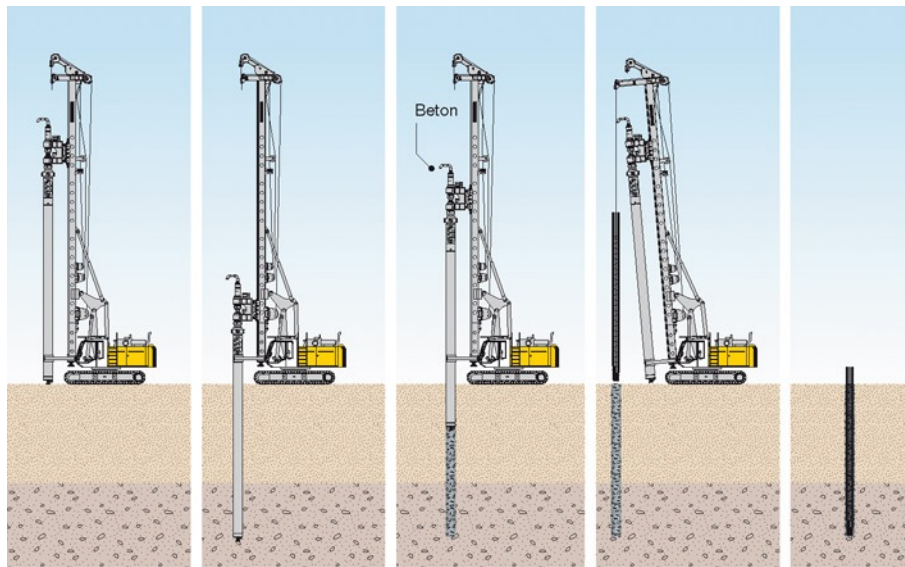


Abb. 2.10: Doppelkopfbohren [67]

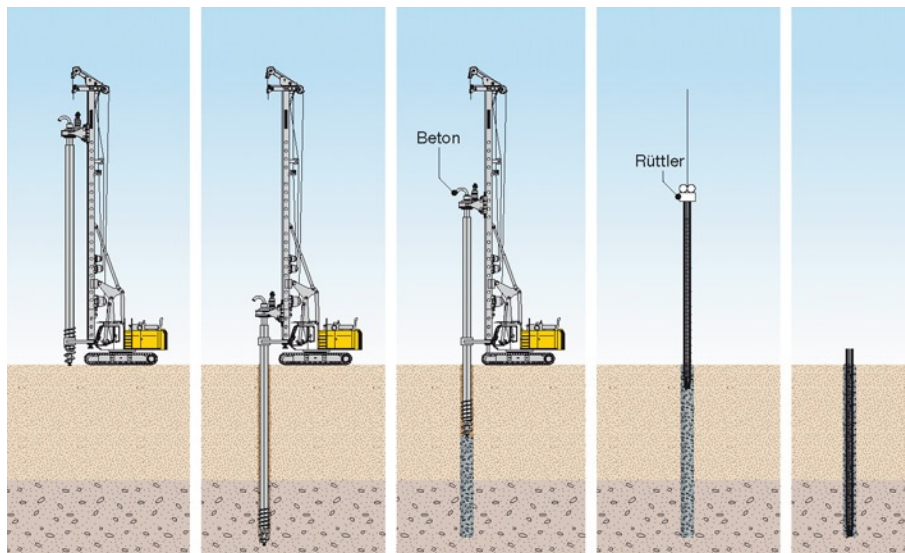


Abb. 2.11: Verdrängerbohren [67]

Schlagbohrverfahren mit Greifer

- Rohrdurchmesser: 0,60 bis 3,30 m
- Bohrtiefe: 20 bis 100 m
- Bohrlochsicherung: Verrohrung oder Stützflüssigkeit

Das Greiferbohrverfahren zur Herstellung von Pfählen zählt zu den ältesten. Bevorzugtes Einsatzgebiet sind heute Bohrpfähle großen Durchmessers. Das Greifern erfolgt üblicherweise im Schutze einer Verrohrung (siehe Abb. 2.12). Zum Einbringen des Bohrrohres stehen *Verrohrungsanlagen*, das *Vibrationsverfahren*, das *Hochstrasser-Wiese-Verfahren* oder das *Jumboverfahren* zur Auswahl. Die Lösung des Materials im Bohrrohr erfolgt mit einem Bohrgreifer. Der volle Greifer wird wieder aus dem Bohrloch gezogen, zur Seite geschwenkt und entleert. Zum Durchrötern von

Hindernisse wie großer Steine bedient man sich eines Fallmeißels [55].

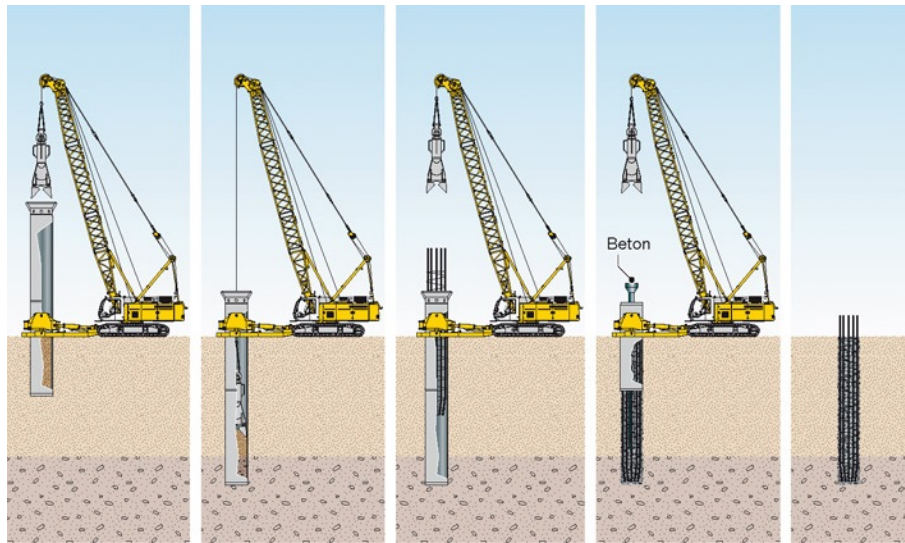


Abb. 2.12: Greiferbohren [67]

Verrohrungsmaschine: Die Verrohrungsmaschine ist am Trägergerät, dem Seilbagger, montiert und besteht aus zwei vertikal angeordneten Hydraulikzylindern. Diese Zylinder leisten die Vorschubenergie. Zusätzlich sorgen zwei horizontal angeordnete Zylinder für eine oszillierende Hin- und Herbewegung. Dies erleichtert das Einbringen in den Boden [52].

Vibrationsverfahren: Ähnlich dem Vibrationsverfahren für Spundwände wird das Bohrrohr durch Vibrationen gebracht. Die Vibrationen werden im Vibrationsbären durch statische Unwuchten erzeugt [102].

Hochstrasser-Wiese-Verfahren: Beim Hochstrasser-Wiese-Verfahren wird die Verrohrung durch eine pneumatisch oder dynamisch angetriebene Drehschwinge in den Boden getrieben. Das System wird auf das Bohrrohr aufgesetzt und versetzt es in eine oszillierende Bewegung. Das Gewicht des Gerätes und die Drehbewegung lassen das Rohr sinken [52].

Jumbo-Verfahren: Beim Jumbo-Verfahren wird das Bohrrohr mit einem Fallbären in den Untergrund getrieben. Vorteilhaft bei diesem Verfahren ist der sehr geringe Geräteaufwand sowie die einfache Handhabung. Allerdings kommt es zu Erschütterungen und Lärm. Die machbaren Längen liegen mit 7 bis 8 m eher gering. Anwendung findet diese Verfahren bei der Herstellung von Pumpensämpfen [102].

Aufsatzbohrverfahren

- Rohrdurchmesser: 1,00 bis 3,50 m
- Bohrtiefe: 20 bis 60 m
- Bohrlochsicherung: Verrohrung

Das an einem Seilbagger frei hängende Bohrgerät übernimmt die Aufgabe des Bohrens und des Vorschubs (siehe Abb. 2.13). Es besteht aus einem Kelly-Bohrantrieb mit integrierter

Vorschubeinheit, die sich an einem bereits zuvor eingerammten Bohrrohr mit einem Klemmrahmen verbindet. Die Übertragung der Vorschubkraft erfolgt über Hydraulikzylinder. Zur Förderung des Materials muss das Bohrgerät wieder abgehoben und entleert werden. Nach Erreichen der Endtiefe wird bewehrt und betoniert [64].

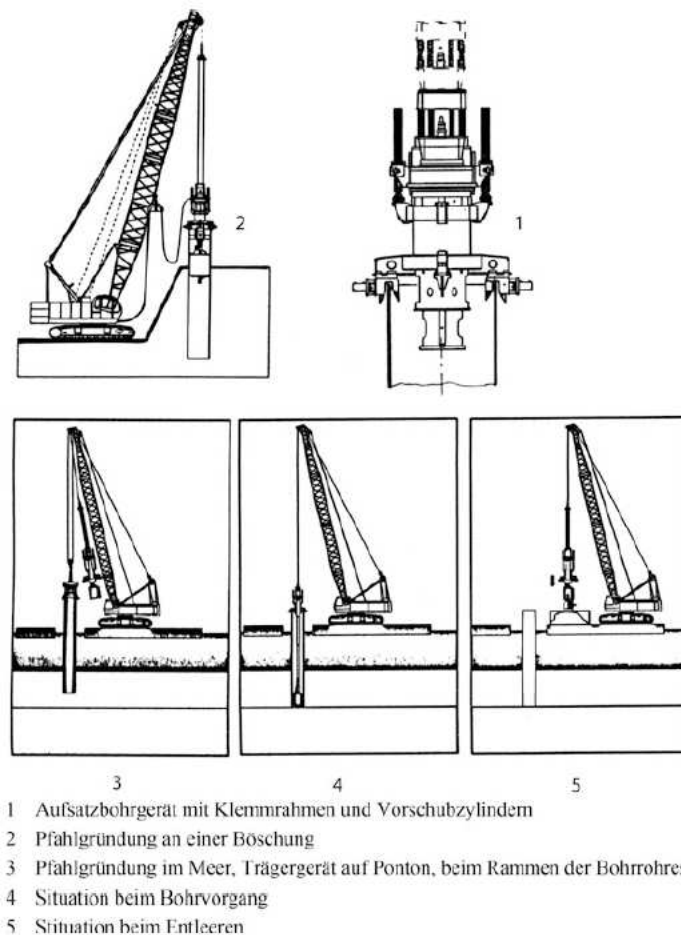


Abb. 2.13: Aufsatzbohren [67]

Spülbohrverfahren

- Rohrdurchmesser: 1,00 bis 2,50 m
- Bohrtiefe: 20 bis 200 m
- Bohrlochsicherung: Stützflüssigkeit

Sollen Bohrpfähle in besonders große Tiefen vorgetrieben werden, so eignen sich Spülbohrverfahren hierfür. Die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens ist erst ab einer Tiefe von 20 m gegeben. Eine Einteilung, deren Unterschiede Abb. 2.14 zeigt, erfolgt in

- direkte Spülbohrverfahren und
- indirekte Spülbohrverfahren.

Während beim direkten Verfahren die mit Bohrgut angereicherte Spülflüssigkeit im Ringraum zutage gefördert wird, erfolgt dies beim indirekten Verfahren durch das Bohrgestänge [32, 92].

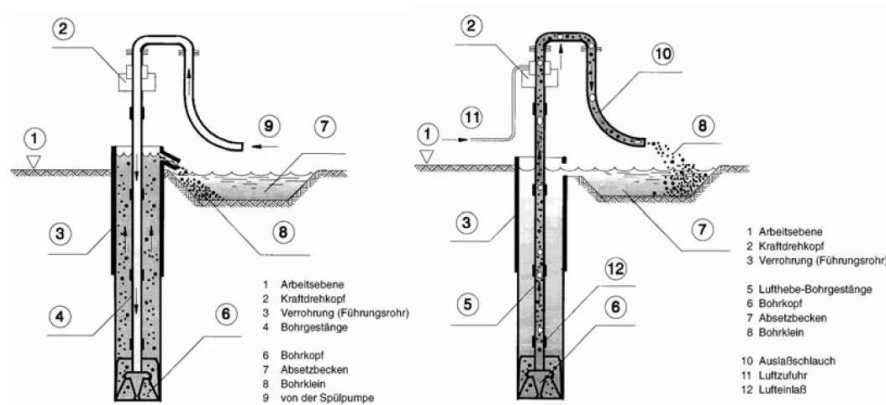


Abb. 2.14: (links) direktes und (rechts) indirektes Spülbohrverfahren [81]

Beim *direkten Spülbohrverfahren* wird ein Hohlbohrgestänge mit einem Kraftkopf angetrieben. Die durch das hohle Bohrgestänge gepumpte Spülung tritt beim Bohrmeißel aus, kühlt diesen, nimmt das Bohrgut auf und fördert es durch die aufwärts gerichtete Strömung im Ringraum zutage. Nach Abscheidung des Bohrkleins (Siebung und Aufbereitung) der Spülung beginnt der Prozess erneut.

Bei *indirekten Spülbohrverfahren* ändert sich die Fließrichtung der Spülflüssigkeit. Ein Großlochmeißel löst den anstehenden Boden, angetrieben von einem Drehtisch. Der Spülstrom, bestehend aus Spülflüssigkeit und Bohrklein, im inneren des Gestänges wird durch eine Vakuumpumpe zutage gefördert. Nach Aufbereitung des Spülmittels startet der Kreislauf erneut.

2.2.4.3 Mikropfähle

GEWI-Pfähle

GEWI-Pfähle sind Verbundpfähle, welche üblicherweise in ein bereits gebohrtes und verrohrtes Bohrloch eingestellt werden. GEWI-Stabstähle können bedarfsweise mit einem zusätzlichen Korrosionsschutz (siehe Abb. 2.15a und Abb. 2.15b) ausgestattet werden. Jene Stabstähle kommen bei Pfählen mit dauerhafter Tragwirkung zum Einsatz. Neben dem Einzelstab mit einem Durchmesser von bis zu 63,5 mm besteht die Möglichkeit, einen Mehrstab-GEWI-Pfahl mit bis zu drei Einzelstäben einzusetzen. Die Einzelstäbe lassen sich beliebig durch das Verbinden mit Muffen verlängern. Somit eignen sie sich überaus gut für den Einsatz bei beengten Platzverhältnissen. Nach dem Einsetzen wird das Traglied über das Bohrrohr verpresst. In bindigen Böden erfolgt bedarfsweise eine Nachverpressung des Injektionskörpers. Eine zumindest 20 mm starke Zementschicht gewährleistet einen ausreichenden Korrosionsschutz [32, 114].

Duktilpfähle

Duktilpfähle bestehen aus Schleudergusseisen-Rohren, die mit einem Schnellschlaghammer (siehe Abb. 2.16) in den Boden getrieben werden. Die Verbindung einzelner Schüsse erfolgt durch ein patentiertes Muffensystem. Die Rohre werden in Schüssen von 6 m mit einem Durchmesser 118 bis 170 mm auf die Baustelle geliefert. Bei der Wandstärke der duktilen Pfahlrohre stehen je nach statischen Anforderungen 7,5, 9,0 oder 10,6 mm zur Verfügung. Im Bedarfsfall sind kürzere Längen für Spezialanwendungen verfügbar. Zu unterscheiden sind

- Mantelreibungspfähle und
- Spitzendruckpfähle.

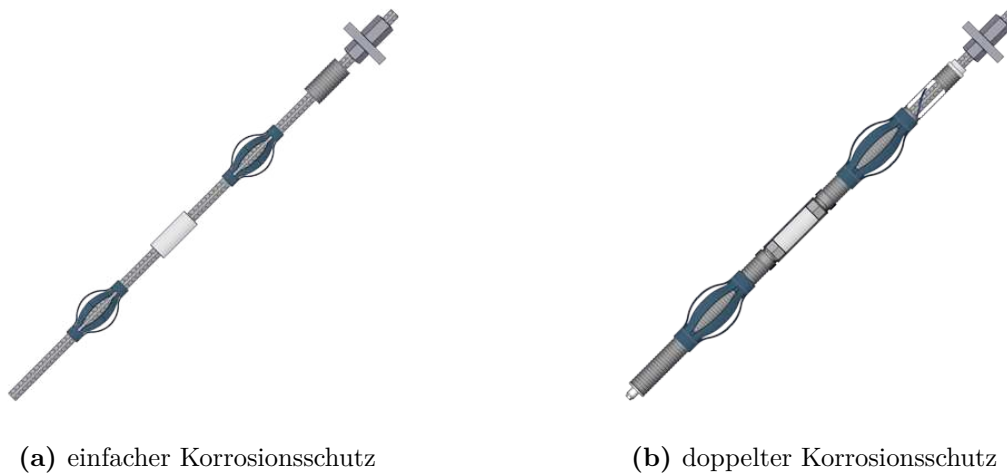


Abb. 2.15: GEWI-Stabstähle [106]

Mantelreibungspfähle werden mit einem querschnittsvergrößernden Rammschuh in den Boden gerammt, wodurch ein Freischnitt entsteht. Vor dem Rammen wird das Pfahlrohr am Fuß eingeschnitten. Der während dem Rammen in das Pfahlrohr gefüllte Beton verfüllt durch die Austrittsöffnungen den Freischnitt des Pfahles. Im Gegensatz zu Mantelreibungspfählen bleiben Spitzendruckpfähle, deren Rammschuh keinen Freischnitt erzeugt, unverfüllt [26, 36].

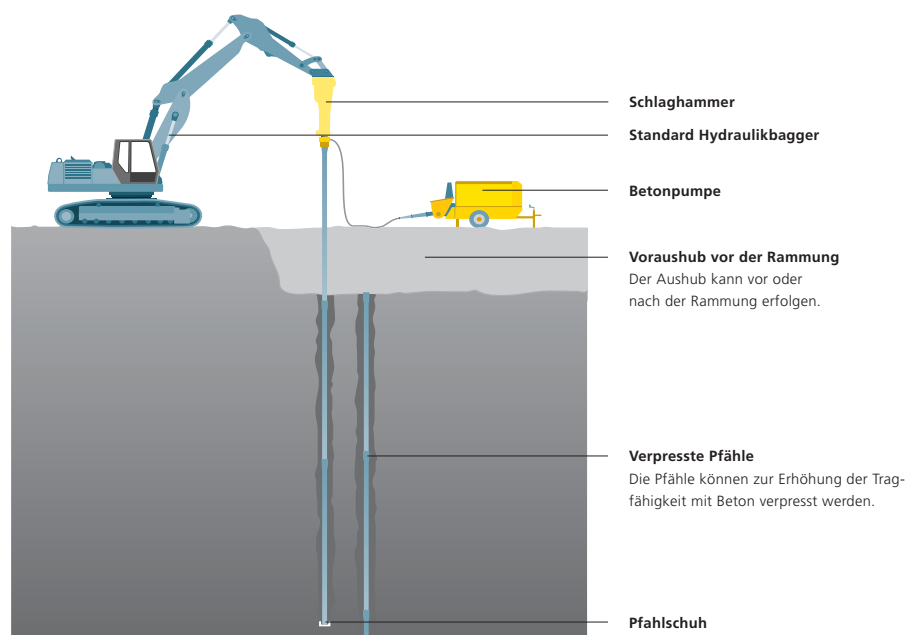


Abb. 2.16: Herstellung von Duktilen Rammpfählen [58]

2.3 Schlitzwand

Schlitzwände werden wandartige, in den Boden eingebrachte Elemente, die mit oder ohne Bewehrung ausgeführt werden können. Der offene Schlitz wird temporär mit einer Stützflüssigkeit

gesichert. Nach dem Erreichen der Endtiefe besteht die Möglichkeit, die Stützflüssigkeit durch Ort beton oder durch das Einhängen von Beton-Fertigteilen zu ersetzen und gegebenenfalls einen Bewehrungskorb einzubringen [38].

Schlitzwände können in nahezu jedem Baugrund abgeteuft werden. Problematisch bei der Herstellung sind Böden, in denen sehr durchlässigen Schichten vorzufinden sind. In durchlässigen Schichten besteht die Gefahr, dass die Stützflüssigkeit abfließt und nicht genügend Zufluss von Frischsuspension in den Schlitz gewährleistet werden kann. Stößt man im Laufe des Abteufens auf Felsen oder große Findlinge, werden diese mit einem Fallmeißel gelöst.

Werden Schlitzwände als Dichtwände konzipiert, können diese rein tragend oder dichtend bzw. tragend und dichtend sein. Die verformungsarme Bauweise eignet sich zudem bestens zum Abfangen von Lasten aus Nachbarbebauungen und somit zum Einsatz im städtischen Bereich [81].

Die wesentliche **Vorteile** [114] von Schlitzwänden gegenüber anderen Verbausystemen sind:

- wasserdicht
- verformungsarm, somit neben bestehender Bebauung anwendbar
- erschütterungsfreie und lärmarme Herstellung
- wirtschaftlich, sofern sie ins Bauwerk integriert werden
- keine Begrenzung der Tiefe, besonders mit speziellen Fräsen
- platzsparend, ohne große Zwischenräume zu bestehender Bebauung herstellbar
- durch geringe Anzahl an Fugen als wassersperrende Dichtwand/Baugrubenwand konkurrenzlos

Die **Nachteile** [114] von Schlitzwänden hingegen sind:

- aufwendige Baustelleneinrichtung durch das notwendige Equipment für Suspensionsaufbereitung
- kostenintensive Entsorgung der genutzten Suspension sowie des mit Suspension vermischten Aushubmaterials
- Aussparungen für Leitungen nur sehr aufwendig herstellbar

2.3.1 Anwendungsgebiete

Schlitzwände stehen in unmittelbarer Konkurrenz zu Bohrpfehlwänden. Während sie sich ähnlich steif verhalten, kann die abdichtende Funktion aufgrund des geringeren Fugenteils besser übernommen werden. Anwendung finden Schlitzwände gemäß *Richtlinie Schlitzwände* [93] für z.B.:

- Gründungselemente und Sonderlösungen von Tiefgründungen (z.B. Kastengründungen)
- Stützbauwerke mit und ohne besondere Dichtheitsanforderungen
- Böschungsstabilisierungen (Verdübelungen)
- Dichtwände (z.B. als Einphasen-Dichtwand)

Wird eine Schlitzwand als Dichtwand konzipiert, so finden sie zur Abdichtung des Untergrunds unter Staubauwerken, bzw. im Kern von Staudämmen, bis hin zur Umschließung von Altlasten im Deponiebau Anwendung [38, 114].

2.3.2 Ausführungsformen

Durch den geringeren Fugenanteil gegenüber Bohrpfahlwänden eignen sich Schlitzwände bestens als Dichtwände. Die Herstellung erfolgt in Lamellen, wobei die Länge einer Lamelle durch die Seillänge des Seilbaggers begrenzt ist. Wände mit rein abdichtender Funktion lassen sich nach Boley [30, S. 441] wie folgt unterscheiden:

- Dichtungsschlitzwände
- kombinierte Dichtungsschlitzwände

Wände, denen eine tragende Funktion zukommt, profitieren von der großen Steifigkeit des Systems. Schlitzwände eignen sich bestens zur Abtragung von Vertikal- und Horizontallasten. Die unterschiedlichen Ausführungsvarianten von tragenden Schlitzwänden definiert Boley [30, S. 441] wie folgt:

- bewehrte Ortbetonschlitzwände
- Schlitzwände mit eingestellten Spundwänden
- Schlitzwände mit eingestellten Trägern
- Beton-Fertigteilwände

Dichtungsschlitzwände

Jene Schlitzwände werden mit dem Einphasen-Verfahren (eine genaue Beschreibung des Verfahrens folgt in Abschnitt 2.3.3) hergestellt. Die Flüssigkeit im Schlitz übernimmt nicht nur die Stützung während der Herstellung, sondern ist auch gleichzeitig der endgültige Baustoff. Meist kommen hier verzögernd erhärtende Dichtwandmassen auf Zementbasis zum Einsatz [114].

Kombinierte Dichtungsschlitzwände

Zur Herstellung von kombinierten Dichtwänden wird zunächst eine unbewehrte Dichtungsschlitzwand hergestellt. In einem weiteren Arbeitsschritt wird den besonderen Anforderungen zur Sicherung von Altlasten Rechnung getragen und zusätzliche Maßnahmen zum Schutz gegen Diffusion und chemische Angriffe werden ergreifen.

Kunststoffbahnen haben sich bereits in der Vergangenheit bewiesen. Zur Überwindung der Scherkräfte müssen die Bahnen entweder auf schwere Einbaurahmen aufgespannt werden oder durch ein am Fuß befestigtes Ballastgewicht in den Schlitz versenkt werden. Die Verbindung der Kunststoffbahnen mit einer ausreichenden Überlappung oder mit Schlössern (mit oder ohne Quelldichtung) sichergestellt.

Für den Fall stark chemischer Angriffe haben die Firmen Flachglas AG und Philipp Holzmann AG ein patentiertes System aus einer Schlitzwand mit integrierter Dichtwand aus Glaselementen entwickelt. Glas ist besonders beständig gegen korrosives Wasser und eignet sich daher bestens für dieses System [57].

Bewehrte Ortbetonschlitzwände

Eine bewehrte Ortbetonschlitzwand wird im Zweiphasen-Verfahren (genaue Beschreibung des Verfahrens folgt in Kapitel 3) hergestellt. Das Abteufen der Schlitzwand erfolgt im Schutz einer nicht erhärtenden Stützflüssigkeit. Nach dem Erreichen der Endtiefe wird ein Bewehrungskorb in die Lamelle versenkt. Im Anschluss erfolgt die Betonage im Kontraktorverfahren. Die Stützflüssigkeit wird von unten nach oben verdrängt und wird bei den folgenden Lamellen wieder eingesetzt [114].

Schlitzwände mit eingestellten Spundwänden

Die Herstellung erfolgt im Einphasen-Verfahren. Verwendung findet diese Form der Schlitzwand vor allem dann, wenn die abdichtende Wirkung der Wand sehr tief reichen muss, die statische Wirkung schon durch die kürzeren Spundwandelemente gewährleistet werden kann. Beim Aushub wird die Dichtwandmasse luftseitig von der Spundwand entfernt. Das Verfahren wird häufig in Kombination für geschlossene Baugruben, sogenannten Grundwasserwannen, eingesetzt. Die horizontale Abdichtungsebene wird dafür mittels Sohlinjektionen realisiert. [38, 114].

Schlitzwände mit eingestellten Trägern

Bei dieser im Einphasenverfahren hergestellten Schlitzwand werden in einem Achsraster von ein bis drei Metern HEB- oder Doppel-U-Profile bzw. Betonfertigteilelemente in die flüssige Suspension eingestellt. Die ausfachende Suspension zwischen den Tragelementen übernimmt nach dem Aushub die abdichtende Wirkung, während die Fertigteilelemente die statische Funktion wahrnehmen. Bei Bedarf wird das System rückverankert. Es ist darauf hinzuweisen, dass die erhärtete Suspension gegen Austrocknung und Frosteinwirkung (z.B. durch das Abhängen mit isolierten Folien) zu sichern ist [114].

Beton-Fertigteilwände

Als eine Weiterentwicklung der klassischen Schlitzwand haben sich Fertigteilschlitzwände am Markt etabliert. Fertigteilwände punkten mit einer schnelleren Bauzeit, einer höheren Fluchtgenauigkeit und geringeren Nachbearbeitungszeiten gegenüber Ortbetonwänden. Das Erhärten der Suspension ist so zu wählen, dass das Ansteifen unmittelbar nach dem versetzten Elemente einsetzt. Zudem soll ein frühes Ansteifen das Ausfließen in den nächstgelegenen Schlitz verhindern. Anschlüsse von Wänden und Decken werden vorab in Form von Schweißgründen und Hartschaumstoffeinlagen in den Elementen verbaut [30, 94].

2.3.3 Verfahrenstechnik

Je nachdem welche Funktion, bzw. Funktionen, eine Schlitzwand erfüllen soll, wird zwischen folgenden Verfahren der Herstellung unterschieden:

- Einphasen-Verfahren
- Zweiphasen-Verfahren

Einphasen-Verfahren

Der Aushub einer Schlitzwand erfolgt im Schutze einer Stützflüssigkeit. Diese Flüssigkeit besteht im Normalfall aus einer Bentonit-(Ton-)Suspension, in Ausnahmefällen auch nur aus Wasser. Die Phase des Aushubs samt Stützung wird als die erste Phase beschrieben. Beim Einphasen-Verfahren ist die verwendete Suspension auf Zementbasis mit Beimengungen aus Tonen, Steinmehl und Ähnlichem (auch Dichtwandmasse genannt). Die selbsthärtende Suspension dient nicht rein dem Schutz der Wandung während dem Aushub, sondern verbleibt im Schlitz und ist endgültiger Wandbaustoff. Das Verfahren dient in erster Linie Abdichtungsmaßnahmen [114].

Zweiphasen-Verfahren

Die erste Phase des Zweiphasen-Verfahrens ist mit dem Einphasen-Verfahren ident, mit Ausnahme der Stützflüssigkeit, welche in diesem Fall nicht auf Zementbasis gemischt wird. Nach Erreichen der Endtiefe werden nun der Bewehrungskorb eingesetzt und im Kontraktorverfahren betoniert. Somit erfolgt ein vom Schlitztiefsten ausgehender kontinuierlicher Austausch der Stützflüssigkeit durch Beton. Die Stützflüssigkeit wird nach oben verdrängt und wird je nach Aufladung (mit Boden) regeneriert. Ist eine Regenerierung nicht mehr möglich, so ist die Suspension auszutauschen [114].

Leitwände

Bevor eine Schlitzwand, unabhängig des Verfahrens, ausgeführt wird, müssen einige vorbereitende Maßnahmen getroffen werden. Dazu gehört neben dem Einrichten der Baustelle die Herstellung von Leitwänden. Die Ausführung erfolgt entweder durch das Schalen und Betonieren vor Ort (Abb. 2.17a) oder die Verwendung von Fertigteilen (Abb. 2.17b). Während dem Aushub dienen die Leitwände dem Geräteführer als Orientierung für die Einteilung der Lamellen und dem Aushubwerkzeug als Führung. Kommt es zu Spiegelschwankungen der Stützflüssigkeit lässt sich das einfach beobachten und gegebenenfalls darauf reagieren. Der Suspensionsspiegel ist stets über Leitwand-Unterkante zu halten, mindestens jedoch bis 1 m über Grundwasserspiegel. Nach dem Aushub dienen die Leitwände als Auflager zur Befestigung von Einbauteilen (Fertigteile, Spundwände, Bewegungskörbe) sowie zum Ziehen der Fugen- und Abschalelemente [30, 88, 114].

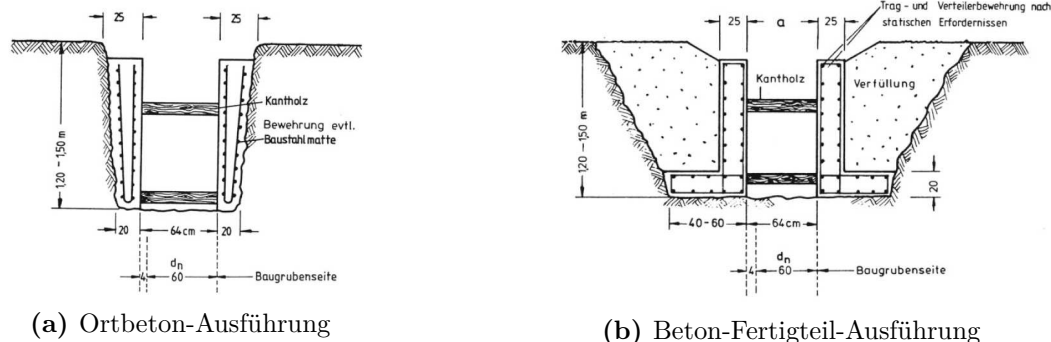


Abb. 2.17: Ausführungen von Leitwänden [30]

Herstellungsablauf

Bei der Herstellung von Schlitzwänden wird zwischen

- einem kontinuierlichen und
- einem abschnittsweisen Ablauf

unterschieden. Allgemein gilt, dass ein kontinuierlicher Ablauf mit dem Einphasen-Verfahren und der abschnittsweise Ablauf (Pilgerschritt-Verfahren) mit dem Zweiphasen-Verfahren gut kombinierbar sind.

Kontinuierliches Verfahren: Es erfolgt die Herstellung der Lamellen in kontinuierlicher Reihenfolge, nach Abschluss einer Lamelle wird die Nachfolgelamelle in Angriff genommen (siehe Abb. 2.18b). Während das Verfahren laut Literatur insbesondere zur Herstellung von Einphasen-Dichtwänden Anwendung findet, ist es laut einem Experten das Standard-Verfahren zur Herstellung von Zweiphasen-Schlitzwänden. Kommt das Verfahren in Kombination mit einer Zweiphasen-Schlitzwand zum Einsatz, resultieren automatisch Arbeitsunterbrechungen, weil der Beton der Voretappe ansteifen muss. Die Unterbrechungen lassen sich durch das Anordnen von zwei oder mehr Startlamellen verhindern. Im Falle einer Baugrubenumschließung ist es gängige Praxis, ausgehend von den zwei Startlamellen vier Folgelamellen auszuheben. Die vier Folgelamellen laufen so lange bis die Baugrube durch insgesamt zwei Endlamellen geschlossen wird. Die Fugenausbildung erfolgt erdseitig durch Abschallrohre oder Fugenfertigteile [52].

Pilgerschrittverfahren: Ein abschnittsweiser Aushub (siehe Abb. 2.18a), auch Pilgerschrittverfahren genannt, wird grob in zwei Phasen gegliedert. So werden in einem ersten Arbeitsschritt

Primärlamellen mit einer 2- bis 3-fachen Breite des Aushub-Werkzeuges hergestellt. Der breitere Aushub soll die Anzahl der herzustellenden Fugen verringern, da diese potenzielle Fehlstellen für Wasserzutritte sind. Nach Fertigstellung und Aushärtung (auf jeden Fall erst nach dem Ansteifen von Beton/Dichtwandmasse) werden im zweiten Schritt die Sekundärlamellen, üblicherweise nur die 1-fache Breite des Werkzeuges, hergestellt. (siehe Abb. 2.18) [52].

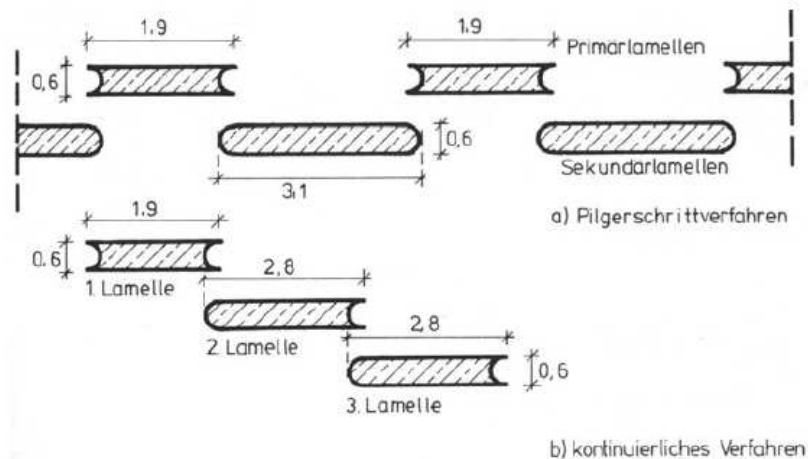


Abb. 2.18: Herstellungsablauf einer Schlitzwand im a) Pilgerschrittverfahren und im b) kontinuierlichen Verfahren [81]

Fugenausbildung

Die im Pilgerschritt-Verfahren hergestellten Lamellen führen zwangsläufig zu einer bestimmten Anzahl an Arbeitsfugen. Soll die Schlitzwand dicht sein, stellt dies ein Problem dar. Aus diesem Grund müssen die Lamellen mit einem Fugensystem, welches eine annähernde Wasserdichtheit gewährleistet, ausgeführt werden. Herstellungsbedingt ist die Ausbildung der verschiedenen Fugenkonstruktionen schwierig. Eine ausreichende Qualität wird durch eine sorgfältige Planung entsprechend des endgültigen Zweckes und einer sauberen Ausführung gewährleistet. Zu beachten gilt es, dass die Qualität der Fugenkonstruktion aufgrund der Rahmenbedingungen nicht mit jener im Hochbau zu vergleichen ist. Die in Abb. 2.19 dargestellten Fugenkonstruktionen stellen die am häufigsten angewandten dar [114].

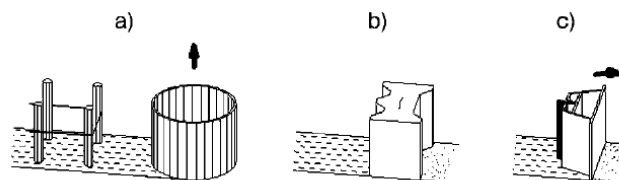


Abb. 2.19: Fugensysteme zwischen zwei Schlitzwandelementen; a) mit Abstellrohr, b) mit Betonfertigteil, c) mit Fugenbändern [114]

Abstellrohre: Die Verwendung von Abstellrohren ist eine sehr einfache, preisgünstige Variante. Abstellrohre werden bis in große Tiefen verwendet, die Wandstärke sollte jedoch nicht größer als 1,00 m sein. Durch die runde Form wird eine Verlängerung des Sickerwasserweges erzielt. Das Ziehen des Rohres muss bei ausreichender Steifigkeit (jedoch vor dem Erhärten) des Betons erfolgen, üblicherweise nach 3 bis 4 Stunden.

Das Abstellrohr findet überwiegend ihre Anwendung zur Herstellung von Schächten in Kombination mit dem Pilgerschritt-Verfahren.

Fugenfertigteile: Fugenausbildungen aus Fertigteilen ermögliche sehr gute Verzahnung der Lamellen. Das hohe Eigengewicht garantiert die Standsicherheit und Lagesicherheit im Schlitz, begrenzt allerdings die Einsatzlänge. Nachteil der Fertigteile sind systembedingt das Erstellen von zwei Fugen. Die erhöht das Risiko von Undichtigkeiten.

Abstellelemente mit Fugenbändern: Mit dem Einsatz von Fugenbändern lässt sich eine hohe Wasserdichtheit erzielen. Die Fugenbänder werden hierfür halbseitig in ein trapezförmiges Abschalelement eingezogen. Somit bindet beim Betonieren eine Hälfte des Fugenbandes in den Beton ein. Ist der Beton ausreichend erhärtet, wird das Abschalelement gezogen und somit die andere Hälfte des Fugenbandes freigelegt. Beim Betonieren der Nachbarlamelle bindet das Fugenband in selbige ein und es entsteht eine wasserdichte Verbindung.

Überfräsen: Neben den abgebildeten Formen der Fugenausbildung besteht die Möglichkeit des Überfräsens. Wie der Name bereits verrät ist dies nur mit Schlitzwandfräsen möglich. Nach ausreichender Erhärtung, bzw. Ansteifen, der Vorgängerlamelle wird das Abschalelement gezogen und der Aushub der Sekundärlamelle erfolgt. Hierfür wird die Vorgängerlamelle um 10 bis 30 cm überfräst um eine raue Oberfläche und eine gute Verzahnung herzustellen. Zudem stellt dies sicher, dass keine Bodenbestandteile mehr zwischen zwei Lamellen sind. So lässt sich eine durchgehende Dichtheit der Schlitzwand sicherstellen. Das Überfräsen wird sowohl beim Einphasen- als auch beim Zweiphasen-Verfahren eingesetzt.

Kappen

Nach Abschluss der eigentlichen Schlitzwandarbeiten ist verunreinigte und/oder minderwertige Beton an am Kopf der Schlitzwand bis zur zuvor definierten Kapphöhe zu entfernen (siehe Abschnitt 2.2.3.4) [88].

2.3.4 Herstellungsverfahren

Zur Herstellung von Schlitzwänden (Einphasen- und Zweiphasen-Verfahren) lassen sich drei verschiedene Arten der Herstellung unterscheiden:

- Schlitzten mit Tieflöffel
- Schlitzten mit Schlitzwandgreifer
- Schlitzten mit Schlitzwandfräse

Schlitzten mit Tieflöffel

- Schlitzwandbreite: 400 bis 800 mm
- Schlitzwandtiefe: ca. 12 m

In Ausnahmefällen kommt ein gewöhnlicher Hydraulikbagger mit Tieflöffel für den Aushub zum Einsatz (siehe Abb. 2.20). Das in der tiefe beschränkte Verfahren eignet sich insbesondere für kleine Baustellen und den Voraushub. Der Aushub erfolgt kontinuierlich und kann mit einem sehr geringen Fugenanteil (durch Tagesleistung vorgegeben) punkten [30, 81].

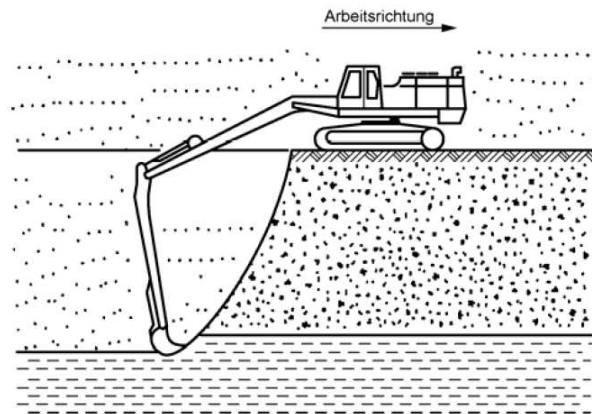


Abb. 2.20: Herstellung einer Schlitzwand mit Tieföffel [81]

Schlitzten mit Schlitzwandgreifer

- Schlitzwandbreite: 350 bis 1500 mm
- Schlitzwandtiefe: ca. 50 m

Werden Schlitzwandgreifer eingesetzt so ist zwischen *mechanischen Greifern* (Verschluss durch Seil) und *hydraulischen Greifern* (Verschluss durch hydraulische Zylinder) zu unterscheiden. Neben seilgeführten Greifern kommen Teleskopgreifer in Ausnahmefällen zum Einsatz. Der Aushub erfolgt diskontinuierlich, d.h. zum Entleeren des Greifers muss dieser gezogen, zur Seite geschwenkt und geöffnet werden (siehe Abb. 2.21). Anschließend wird der Greifer für den nächsten Hub in den Schlitz gelassen [24, 64]. Der Greifer kann gegenüber der Fräse nach Witt [114, S. 595] folgendermaßen punkten:

- vergleichsweise geringer Platzbedarf
- günstige Baustelleneinrichtung
- geringere Kosten bei kleineren Wandflächen (kleiner 8000 m²)
- geringere Kosten bei gut lösbaren Böden ohne Meißelarbeit
- geringere Kosten bei Wandtiefen kleiner 30 bis 40 m
- schneller Wechsel erforderlicher Werkzeuge (Greifer - Meißel)

Schlitzten mit Schlitzwandfräse

- Schlitzwandbreite: 350 bis 1800 mm
- Schlitzwandtiefe: ca. 110 m

Beim Fräsen lösen zwei gegenläufige Fräsräder den anstehenden Boden und vermischen ihn mit der Stützflüssigkeit. Die Flüssigkeit dient als Fördermedium für die Bodenteile, durch eine Ansaugung erfolgt der Transport zur weiteren Verarbeitung. Die mit Boden angereicherte Suspension wird in separaten Anlagen aufbereitet, die gereinigte Suspension wieder in den Schlitz zurückgeführt. Der zirkulierende Kreislauf garantiert eine ausreichende Höhe der Stützflüssigkeit. Üblicherweise werden Primärlamellen in 2,5-facher Breite hergestellt, die Sekundärlamelle in 1-facher Breite [24, 64]. Die Arbeitsabläufe sind in Abb. 2.22 dargestellt. Gegenüber dem Greifer hat die Fräse nach Witt [114, S. 595-596] folgende Vorteile:

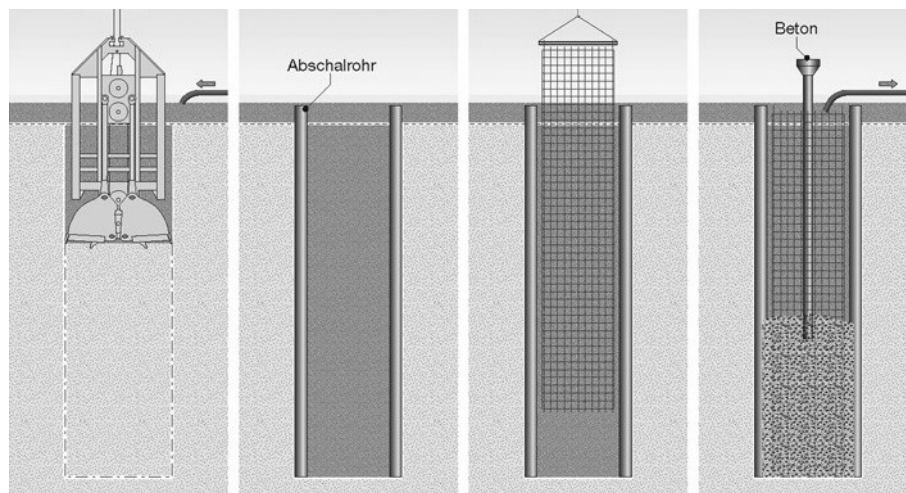


Abb. 2.21: Herstellung einer Schlitzwand mit Schlitzwandgreifer [70]

- sehr hohe Leistung
- nahezu erschütterungsfreie Arbeitsweise
- sehr große Tiefen erreichbar (größer 100 m)
- hohe Genauigkeit bezüglich der Vertikalabweichungen
- relativ gute Leistungen im Fels
- günstige Entsorgung des Aushubmaterials und höhere Einsatzquote der Stützflüssigkeit
- Überschneiden der Nachbarlamellen ohne Fugenabstellelemente, dadurch bessere Fugenaus-
bildung und Führung

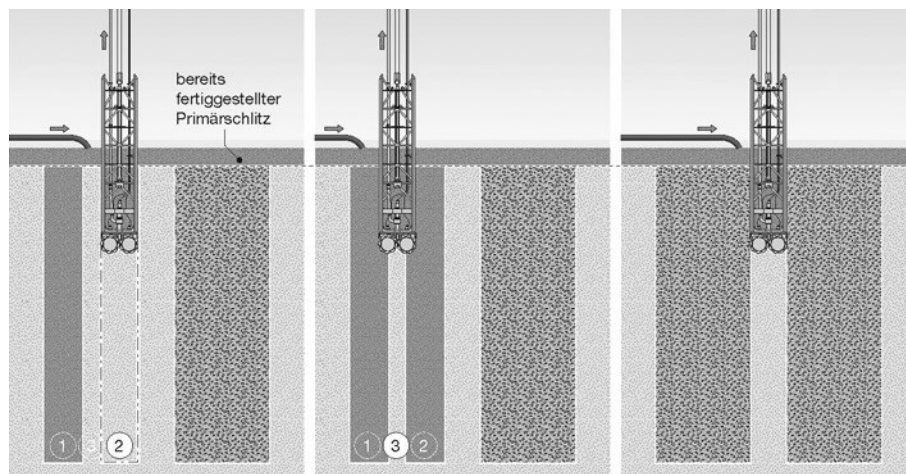


Abb. 2.22: Herstellung einer Schlitzwand mit Schlitzwandfräse [70]

2.4 Düsenstrahlverfahren

Das Düsenstrahlverfahren dient zur Verfestigung von Lockergestein und zur Abdichtung von Grundwasserströmungen im Untergrund. Beim Düsenstrahlverfahren handelt es sich um eine Bodenvermörtelung, hergestellt mit einem sich drehenden und mit Düsen bestückten Bohrgestänge. Die Düsen werden verfahrensabhängig mit Zementsuspension, Luft und Wasser beaufschlagt. Die Struktur des Bodens wird dadurch weitreichend verändert und es entsteht ein nahezu homogener Zement-Boden-Körper. Überschüssiges Material wird durch das Bohrloch zutage gefördert und muss dort in geeigneter Form gefasst werden. In Abhängigkeit der Dreh- und Ziehbewegung des Gestänges ist die Erstellung einer Vielzahl von Formen wie Säulen, Wänden also auch flächigen Körpern wie Lamellen und Sohlen möglich [33, 52, 95].

Maybaum et al. [81] stellen die Vorteile des Düsenstrahlverfahrens wie folgt zusammen:

- direkte Lastübertragung von Fundamenten auf Injektionskörper
- fugenloser Schluss an den Fundamentkörper
- erschütterungs- und lärmarme Herstellung
- geringe vertikale und horizontale Verformung
- geringe Setzungsgefahr
- temporäre und dauerhafte Abdichtung
- Einsatz von kleinem Gerät möglich
- im Grundwasser einsetzbar
- Festigkeitseigenschaften variabel einstellbar

Nachteile werden wie folgt zusammengefasst:

- Überwüchse, die vom Soll-Querschnitt abweichen, müssen nachträglich entfernt werden
- sehr kostenintensiv
- nicht beliebig tief anwendbar
- nicht in allen Böden anwendbar

2.4.1 Anwendungsgebiete

Das Düsenstrahlverfahren hat sich über die letzten Jahrzehnte als ein sehr vielfältig einsetzbares Instrument des Spezialtiefbaus erwiesen. Die Injektionskörper lassen sich in nahezu jeder erdenklichen Form herstellen. Diesen Umstand macht man sich vor allem bei Unterfangungen von Gebäuden, der Herstellung von Abdichtungswänden und -sohlen bei Baugruben, Gründungssanierungen von historischen Bauwerken sowie bei der Sanierung von kontaminierten Bodenbereichen zunutze. Ein durchaus häufiger Anwendungsfall von DSV-Elementen sind DSV-Sohlen. Die Sohlen sind entweder hochliegend oder tiefliegend. Tiefliegende Sohlen haben den Vorteil, dass sie sich durch das Eigengewicht des darüberliegenden Bodens eine hohe statische Sicherheit gegen Aufschwimmen aufweisen. Hochliegende Sohlen sind zwar in der Herstellung günstiger, sie müssen jedoch gegen das Aufschwimmen zusätzlich gesichert werden [81, 91]. Abb. 2.23 gibt einen Überblick über die Anwendungsgebiete.

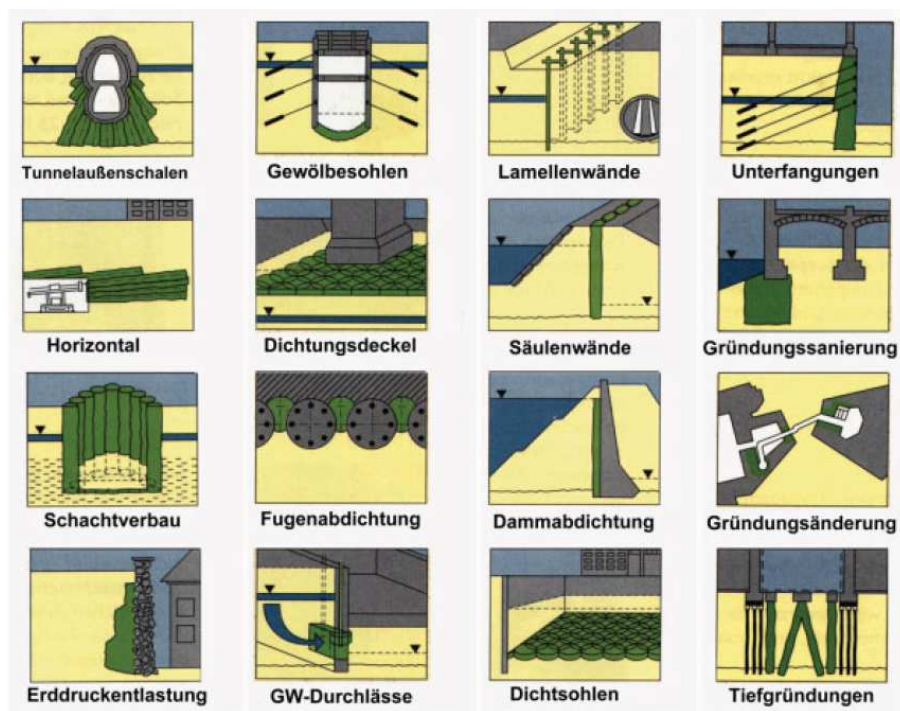


Abb. 2.23: Anwendungen des Düsenstrahlverfahrens [36]

2.4.2 Ausführungsformen

Das Düsenstrahlverfahren hat sich über die letzten Jahre hinweg als ein sehr zuverlässiges und geeignetes Verfahren für diverse bautechnische Herausforderungen etabliert. So lassen sich über die Einstellung der Düsenrotation und das Ziehen des Gestänges eine große Bandbreite an Formen herstellen. Eine Übersicht über mögliche Formen ist in Abb. 2.24 dargestellt. Die Überschneidung mehrerer Einzelelement erlaubt die Bildung großer zusammenhängender Injektionskörper [38, 43].

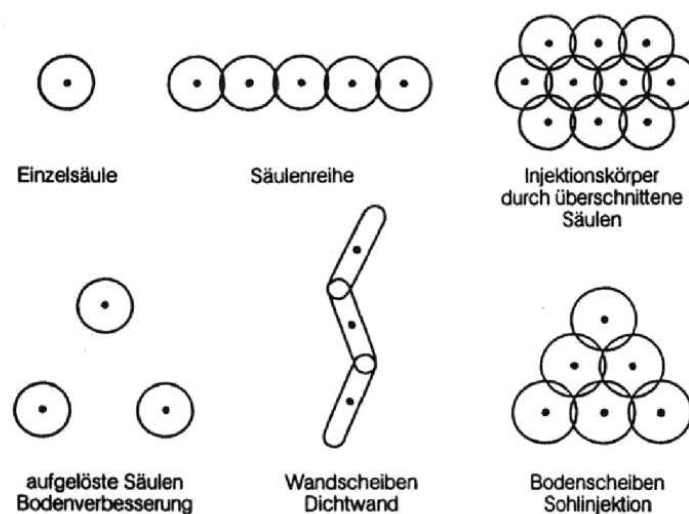


Abb. 2.24: Düsenstrahlkörper und Anordnungsmöglichkeiten [36]

2.4.3 Verfahrenstechnik

Herstellungsbedingt lässt sich das Düsenstrahlverfahren nach der Anzahl der eingebrachten Komponenten (Zementsuspension, Luft und Wasser) in drei Verfahren einteilen [52, 63]:

- Einphasenverfahren (Simplex)
- Zweiphasenverfahren (Duplex)
- Dreiphasenverfahren (Triplex)

Einphasenverfahren (Simplex)

Die einfachste Form des Düsenstrahlverfahrens ist das Simplex-Verfahren (siehe Abb. 2.25, links). Hier dient die aus dem Gestänge austretende Suspension gleichzeitig dem Lösen und Verflüssigen des anstehenden Bodens sowie als Bindemittel. Überschüssiges Material wird im Bohrloch nach oben gefördert und muss entsorgt werden. Nach Kolymbas [63] werden bindige Böden weitgehend mitgerissen und durch Suspension ersetzt während bei nicht-bindigen Böden Teile des Bodens im Injektionskörper verbleiben. Das Verfahren arbeitet mit Drücken zwischen 300 und 600 bar und eignet sich vor allem in geringen Tiefen und für eine horizontale Anwendung.

Zweiphasenverfahren (Duplex)

Beim Duplex-Verfahren (siehe Abb. 2.25, mittig) wird zusätzlich Druckluft mit geringem Druck durch das Gestänge eingebracht. Die Pressluft wird mit 3 bis 6 bar radial um den Suspensionsstrahl eingeblasen. Das Erodieren des anstehenden Bodens wird so unterstützt und der Wirkungsradius vergrößert. Zudem eignet es sich für tiefere Maßnahmen als das Simplex-Verfahren.

Dreiphasenverfahren (Triplex)

Beim Triplex-Verfahren (siehe Abb. 2.25, rechts) wird die Funktion des Lösen von einem mit Druckluft ummantelten Wasserstrahl übernommen. Die Düsen für Wasser und Druckluft sind etwas oberhalb der Suspensionsdüse und coaxial zu jener angeordnet. Das Wasser wird mit Drücken zwischen 300 und 600 bar eingepresst, die Pressluft zwischen 3 und 6 bar. Die Suspension hat in diesem Verfahren keine aufschneidende Wirkung mehr. Die Suspension füllt und mischt den verflüssigten Bodenkörper mit einem Druck zwischen 5 und 80 bar. Das Verfahren geeignet sich besonders für Gebäudeunterfangungen.

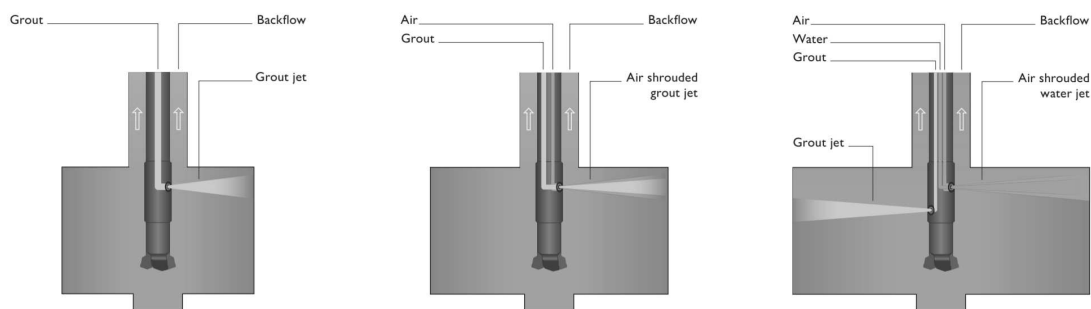


Abb. 2.25: Ein-, Zwei- und Dreiphasenverfahren [61]

Vorschneiden

Mithilfe des vorgeschalteten Vorschneidens lässt sich der Einsatzbereich des DSV entscheidend ausdehnen. Beim Vorschneiden wird der Boden mit Wasser oder Zementsuspension mit einem hohen Wasser/Bindemittel (W/B)-Wert vor dem eigentlichen Düsvorgang aufgeschnitten und gelöst. Das Vorschneiden ist nur in bindigen Böden erforderlich [30, 86].

Rücklauf

Besondere Beachtung ist dem Rücklauf zuzumessen. Dieser tritt durch den Bohrlochmund zutage und darf nicht unkontrolliert entweichen. So ist für eine adäquate Sammlung zu sorgen. Da beachtliche Mengen an Rücklauf anfallen, ist eine zeitweilige Zwischenlagerung auf der Baustelle zu berücksichtigen, bzw. eine Behandlung in Form einer Wiederaufbereitung zu erwägen. Zudem muss ein Konzept zur endgültigen Entsorgung ausgearbeitet werden [86].

2.4.4 Herstellungsverfahren

Zur Herstellung von DSV-Elementen bedarf es im Wesentlichen zweier Arbeitsschritte. Im ersten wird ein Bohrloch bis zur Endtiefe abgeteuft. Der Bohrwinkel wird dafür je nach Aufgabenstellung beliebig gewählt, auch horizontale Bohrungen sind möglich. Nach dem Abteufen des Bohrloches wird mit der eigentlichen Bodenvermörtelung begonnen. In das Bohrloch wird ein Gemisch aus Zement, Wasser und Luft mit bis zu 600 bar eingepumpt, welches den Boden aufreißt. Während dem Düsvorgang wird das Bohrgestänge langsam gezogen (mit 0,10 bis 0,50 m/min) und der anstehende Boden mit dem Gemisch vermengt. Die in der entsprechenden ÖNORM für das Düsenstrahlverfahren [86] definierten Parameter des Düsvorganges müssen an den jeweiligen Untergrund angepasst werden und sind nachfolgend aufgelistet:

- Anzahl und Durchmesser der Schneiddüse(n)
- Druck der Flüssigkeit(en)
- Durchflussrate der Flüssigkeit(en)
- Druck und Durchflussrate der Luft (sofern verwendet)
- Zusammensetzung der Suspension oder Flüssigkeit
- Drehgeschwindigkeit des
- Zieh- und Eindringgeschwindigkeit des Düsengestänges

Für den Ziehvorgang stehen zwei Möglichkeiten zur Auswahl, jenes mit fester Schrittweite und das kontinuierlich ziehende Verfahren. Abb. 2.26 zeigt den Unterschied der beiden Verfahren. Für das kontinuierliche Ziehen sind Rotationsgeschwindigkeit und Ziehgeschwindigkeit festzulegen, für das schrittweise die Rotationsgeschwindigkeit und die Anzahl der Wiederholungen (bzw. die Schrittlänge und Haltezeit pro Schritt).

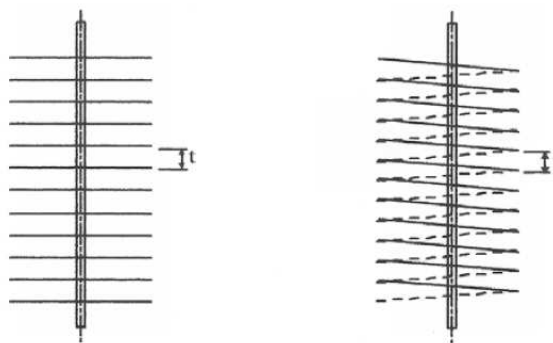


Abb. 2.26: Zieharten des Gestänges [30]

Mit den unter Abschnitt 2.4.3 beschriebenen Verfahren des Düsenstrahlverfahren lassen sich Durchmesser zwischen 0,80 und 2,80 m herstellen. Einige wenige ausführende Unternehmen sind in der Lage, mit besserer Bündelung der Strahlen sowie größerer Durchflussmengen und Drücken, Säulendurchmesser bis zu 5,00 m herstellen. Allgemein gilt, dass sich in sämtlichen Lockergesteinen Tiefen zwischen 3 bis 30 m erreichen lassen.

Zu beachten gilt es, dass Inhomogenitäten wie größere Hindernisse zu Bohrabweichungen führen können. In deren Injektionsschatten bildet sich kein homogener Körper aus. Die Bereiche im Injektionsschatten stellen somit Fehlstellen dar. In der Praxis bietet es sich an, die von der Planung vorgegebenen Düseparameter durch das Jetten einer Probesäule zu überprüfen und bei Bedarf anzupassen [33, 52, 81, 95].

2.5 Zusammenfassung

Das Kapitel der Grundlagen widmet sich der allgemeinen Beschreibung der in der Forschungsabgrenzung definierten Gewerke. Hierfür werden die Gewerke in Bezug auf Vor- und Nachteile gegenüber anderen Verfahren dargestellt sowie Anwendungsgebiete, Ausführungsformen, Verfahrenstechniken und die Herstellungsverfahren beschrieben.

Bei *Spundwänden* handelt es sich um biege- und knicksteife gewalzte Stahlprofile, welche in den Boden eingebracht werden. Die Verbindung erfolgt mit aufgewalzten Schlössern. Die Funktionsweise ähnelt der des Nut-Feder-Prinzips. Bei Bedarf werden die Bohlen mit Dichtungen für den wasserdichten Einsatz vorbereitet. Die Vorteile von Spundwänden liegen vor allem im schnellen Baufortschritt und der Wiedergewinnbarkeit der Bohlen. Lärm und Erschütterungen im Zuge des Einbaus wirken sich negativ aus und lassen sich kaum vermeiden. Das System zählt zu den weichen Verbauarten, Aussteifungen werden durch Verankerungen und Gurte vorgenommen. Überwiegende Anwendungsgebiete von Spundwänden sind temporäre Baugrubensicherungen sowie die Verwendung im Wasser- und Hafenbau. Aneinanderreihungen klassischer Spundbohlen – entweder U- oder Z-Profile – werden als Wellenwände bezeichnet. Verbundwände, kombinierte Wände und Zellenfangdämme werden hergestellt, indem dem zu klassischen Bohlen andere Stahlprofile hinzugefügt werden. Diese Systeme haben eine wesentlich größere Steifigkeit als Wellenwände. In Bezug auf das Einbringverfahren unterscheidet man das fortlaufende, das staffelweise und das fachweise Einbringen. Rammhilfen, wie die Wahl von richtigem Profil und Stahlgüte oder Maßnahmen wie das Nieder- und Hochdruckspülen erleichtern das Einbringen erheblich. Zur Einbringung von Spundbohlen eignen sich rammende, vibrierende und pressende Verfahren. Eine Sonderform, die in Kombination mit Schlitzwänden vorkommt, ist das Einstellen der Spundbohlen.

Pfähle dienen bereits seit Jahrhunderten als Gründungselemente. Die europäischen Normen unterscheiden zwischen Verdrängungspfählen, Bohrpfählen und Mikropfählen. Zu Mikropfählen sei erwähnt, dass es sich hierbei um Verdrängungspfähle mit einem Durchmesser kleiner 0,15 m und Bohrpfählen kleiner 0,30 m handelt. Aufgrund ihrer Tragwirkung und der Anordnung zueinander lassen sich Einzelpfähle, Pfahlroste, Pfahlgruppen und kombinierte Pfahlplattengründungen voneinander unterscheiden. Eine Sonderform stellen Konstruktionen zur Baugrubensicherung dar, welche als Pfahlwände bezeichnet werden. In Abhängigkeit des Achsabstandes werden aufgelöste, tangierende und überschchnittene Pfahlwände unterschieden. Die Vorteile von Pfählen sind die nahezu unbegrenzt herstellbare Tiefe und die erschütterungsfreie, lärmarme Herstellung. Die Kosten von Pfählen übersteigen die der Spundwände bei Weitem, weshalb Pfähle stets in das Gründungskonzept eines Projektes einzubinden sind.

Von *Verdrängungspfählen* spricht man, wenn es im Zuge des Einbringens zu keiner nennenswerten Förderung von Bohrgut kommt. Das Einbringen erfolgt durch Rammen, Vibrieren, Pressen

oder Drehen, bzw. einer Kombination derer. Verdrängungspfähle werden in vier Gruppen unterteilt. Fertigrammpfähle sind Pfähle, welche als Fertigteile (meist Holz, Stahl oder Stahlbeton) auf die Baustelle geliefert werden und dort eingebracht werden. Bei Ortbetonrammpfählen wird ein am Fuß verschlossenes Rohr in den Boden getrieben und nach Erreichen der Endtiefe mit Beton aufgefüllt. Die Verrohrung wird anschließend gezogen. Bei Schraubpfählen wird der anstehende Boden durch eine Schnecke verdrängt, der Hohlraum wird anschließend mit Beton verfüllt. Bei verpressten Verdrängungspfählen werden Stahlprofile in den Boden gerammt. Der entstandene Freischnitt wird mit Zementmörtel verfüllt oder verpresst.

Bei *Bohrpfählen* erfolgt gemäß Norm eine Gliederung nach der Stützung des Bohrloches. Es wird zwischen ungestützten, verrohrten, suspensionsgestützten und erdgestützten Bohrungen unterschieden. Eine weitere Möglichkeit der Einteilung erfolgt hinsichtlich der Herstellung der Bohrlöcher. Neben Trockenbohrverfahren wie dem Drehbohren und Schlagbohren stehen Nassbohrverfahren, das direkte und indirekte Spülbohren, zur Auswahl. Trockenbohrverfahren arbeiten ohne Zusatz von Wasser oder einer Spülung. Bei Nassbohrverfahren das Bohrklein durch einen Spülstrom gefördert. Zu den wichtigsten Drehbohrverfahren zählen das Bohren mit telekopierbarer Bohrstange (das Kellybohren), das mit langer Bohrschnecke (das Endlosschneckenbohren) sowie das mit Doppelkopfantrieb (das Doppelkopfbohren). Ergänzt werden sie durch das Schlagbohren mit Greifer o.ä. Werkzeug. Nassbohrverfahren werden in direkte und indirekte unterschieden. Während beim direkten Spülbohren der Zulauf der Spülung durch das Bohrgestänge erfolgt, geschieht dies beim indirekten durch den Ringraum. Zu erwähnen sein an dieser Stelle, dass Nassbohrverfahren eher eine Ausnahme darstellen und primär bei großen Tiefen und großen Durchmessern zum Einsatz kommen.

Die Norm gliedert *Mikropfähle* in Ortbeton- und Verbundpfähle. Ortbetonpfähle bestehen in diesem Fall aus einem stählernen Tragglied, welches durch eine Beton- oder Zementmörtelschicht ummantelt wird. Eine Betondeckung von 30 bis 45 mm ist aufgrund des Korrosionsschutzes in jedem Fall einzuhalten. Verbundpfähle sind vorgefertigte Tragglieder aus Stahl oder Stahlbeton. Die Kraftübertragung zu Untergrund wird mit einer Verpressung des Mantels bewerkstelligt.

Schlitzwände sind lamellenförmig, im Untergrund hergestellte Elemente. Vorab produzierte Leitwände dienen der Führung des Werkzeuges im Schlitz. Die Sicherung des Schlitzes erfolgt durch eine Stützflüssigkeit, welche temporär oder dauerhaft im Schlitz verbleibt. Üblicherweise finden Schlitzwände als Gründungselemente, als Stützbauwerke, zur Böschungsstabilisierung oder als Dichtwände Anwendung. Dementsprechend können Schlitzwände abdichtende, tragende oder eine Kombination derer zuteilwerden. Im Zuge der Verfahrenstechnik lassen sich Einphasen- und Zweiphasen-Schlitzwände unterscheiden. Die Einphasen-Schlitzwand ist als reine Dichtwand konzipiert, als Stützflüssigkeit dient bereits die selbsthärtende Dichtwandmasse. Bei Zweiphasen-Schlitzwänden wird die Stützflüssigkeit - üblicherweise Bentonit-Suspension - nach Erreichen der Endtiefe durch Beton ersetzt. Bei Bedarf wird die Schlitzwand mit einer Bewehrung versehen. Ablauftechnisch wird zwischen einer kontinuierlichen und der abschnittsweisen (auch Pilgerschritt-Verfahren genannt) Herstellung unterschieden. Abschalelement erlauben die Herstellung einer glatten Fuge und somit den sauberen Anschluss zur Vorgängerlamelle. Als Aushubwerkzeuge kommen Tieflöffel, Greifer oder Schlitzwandfräsen zum Einsatz.

Das *Düsenstrahlverfahren* ist eine Methode der Verfestigung und der Abdichtung des Untergrundes. Ein mit Düsen besetztes Bohrgestänge wird bis zu Endtiefe abgeteuft und im Anschluss unter gleichzeitigem Düsen gezogen. Das aus den Düsen austretende Gemisch schneidet den anstehenden Boden auf, vermischt sich mit ihm und bindet anschließend ab. In Abhängigkeit der Drehbewegung des Gestänges lassen sich Säulen, Teilsäulen oder flächige Körper (sowohl normal als auch parallel zur Achse des Gestänges) herstellen. Hauptsächliche Anwendungsgebiete des DSV sind Dichtsohlen, Unterfangungen, Gründungssanierungen sowie Sicherungsmaßnahmen im Tunnelbau. Der vermutlich größte Vorteil des DSV ist, dass nahezu jede erdenkliche Form

hergestellt werden kann. Im Gegensatz dazu wirken sich die hohen Kosten negativ aus. Die Beaufschlagung der Düsen erfolgt mit Zementsuspension, verfahrensbedingt zusätzlich Druckluft und/oder Wasser. Beim Simplex-Verfahren erfolgt das Düsen mit Zementsuspension, während beim Duplex-Verfahren der Strahl der Zementsuspension mit Druckluft ummantelt wird. Beim Triplex-Verfahren wird der Boden mit Wasser durch eine zusätzliche Düse vorab aufgeschnitten, Zementsuspension und Druckluft durchmischen den aufgeschnittenen Bereich. Durch den Bohrlochmund tritt überschüssiges Material - der Rücklauf - zutage. Maßgebende Parameter des DSVs sind der Druck, die Durchflussraten der Flüssigkeiten, die Anzahl der Düsen sowie Dreh- und Ziehgeschwindigkeit des Gestänges.

Einen abschließenden Überblick der Verfahrenstechnik bietet Abb. 2.27. Neben allgemeinen Informationen bietet die Übersicht Auskunft über die Eignung der Herstellungsverfahren in bestimmten Böden. Die Einteilung der Böden erfolgte gemäß *ÖNORM EN ISO 14688-2:2019 10 15: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 2: Grundlagen der Bodenklassifizierung* [90] in Ton (Cl), Schluff (Si), Sand (Sa), Kies (Gr) und Steine (Co). Die Eignung ist durch folgende Kennzeichnung dargestellt:

- X ... Verfahren geeignet
- (X) ... Verfahren bedingt geeignet
- - ... Verfahren nicht geeignet

Im Zuge der Beschreibung der Grundlagen (insbesondere der Herstellungsverfahren) wird ersichtlich, welche Menge an Verfahren am Markt verfügbar sind. Damit geht eine Vielzahl von Geräten in den unterschiedlichsten Größen einher. Das nachfolgende Kapitel widmet sich aus diesem Grund der Gerätetechnik und liefert neben umfassenden Beschreibungen von Geräten auch Angaben zu verfügbaren Größen. Basis hierfür ist einerseits die *Österreichische Baugeräteliste 2015* [45], andererseits Portfolios namhafter Gerätehersteller.

Gewerke	Arten	Anwendungsgebiete	Ausführungsformen	Verfahrenstechniken	Herstellungsverfahren	Tiefen	Cl	Si	Sa	Gr	Co
Spundwand	-	Überwindung von Geländesprünge, Baugrubensicherungen, Dichtwände, Sicherung von Altlasten	Wellenwände, Verbundwände, Kombinierte Wände, Zellenfangdämme	Einbringen: fortlaufend, staffelweise oder fachweise; Einbringhilfen: Nieder- und Hochdruckspülen, Lockerungsbohren, Vorspaltsprengen	Schlagrammen Vibrieren/Rütteln Einpressen/Eindrücken Einstellen	bis 26 m	(X)	(X)	X	X	-
	Fertigrammpfähle, Ort betonrammpfähle, Schraubpfähle, verpresste Verdrängungpfähle	Baugrubensicherungen, Fundamente		Schlagrammen Vibrieren/Rütteln Einpressen/Eindrücken Drehbohren	Ort betonrammpfahl mit Innenrammung/ Kopframmung Vollverdrängungspfähle mit Schneidstich/verlorener Spitze Verpressmörtelpfähle Rüttelinjektionspfähle	bis 30 m bis 30 m k.A.	(X)	(X)	X	X	-
Bohrpfähle	Verrohrs Bohren, Suspensionsgestütztes Bohren, Erdgestütztes Bohren, Ungestütztes Bohren	Baugrubensicherungen, Fundamente	Einzelpfähle, Pfahlgruppen, Kombinierte Pfahlplatten-gründungen, Konstruktionen zur Baugrubenerstellung und zur Sicherung von Geländesprünge	Trockenbohren: Drehbohren und Schlagbohren	Kellybohrverfahren SOB-Verfahren VdW-Verfahren Verdrängungsbohrverfahren Schlagbohrverfahren Aufsatzbohrverfahren	bis 90 m bis 28 m bis 20 m bis 28 m	X	X	X	X	X
				Nassbohren: direktes und indirektes Spülbohren	Spülbohrverfahren	bis 100 m bis 60 m	X	X	X	X	(X)
	Ort betonpfähle, Verbrundpfähle	Auftriebssicherungen, Fundamente		Schlagrammen, Vibrieren/Rütteln Einpressen/Eindrücken, Drehbohren	Duktilrammverfahren Stabverpressverfahren	ca. 55 m bis 30 m	(X)	X	X	X	-
		Überwindung von Geländesprünge, Baugrubensicherungen, Dichtwände, Sicherung von Altlasten, Fundamente	Dichtungsschlitzwände, Kombinierte Dichtungsschlitzwände, Ort betonschlitzwände, Schlitzwände mit eingestellten Trägern/Spundwänden, Beton-Fertigteilewände	Einphasen-Verfahren, Zweiphasen-Verfahren	Tiefloßel-Verfahren Greifer-verfahren	bis 12 m ca. 50 m	X	X	X	X	-
Schlitzwände	-				Fräs-Verfahren	bis 150 m	X	X	X	X	(X)
Düsenstrahlverfahren	-	Unterfangungen, Fugenabsichtungen, Fundamente,	Säulen, Wandscheiben, Sohlen	Einphasenverfahren Zweiphasenverfahren Dreiphasenverfahren	Spülbohren	bis ca. 40 m	(X)	X	X	X	-

Abb. 2.27: Verfahrensübersicht

Kapitel 3

Gerätetechnik

Das folgende Kapitel dient der ausführlichen Beschreibung maßgebender Geräte, welche zur Erbringung der Leistung erforderlich sind. Die Gliederung des Kapitels erfolgt nach Gewerken und innerhalb der Gewerke nach deren Verfahrenstechnik (siehe Tab. 3.1). Am Beispiel *Spundwände* erklärt: es erfolgt eine Beschreibung der Geräte für die *Rammtechnik*, die *Vibrationstechnik* und die *Einpresstechnik*.

Tab. 3.1: Übersicht der Einbringverfahren

Verfahrenstechnik	Spundwände	Verdrängungspfähle	Bohrpfähle	Mikropfähle	Schlitzwände	Düsenstrahlverfahren
Rammtechnik	X	X		X		
Vibrationstechnik	X	X		X		
Einpresstechnik	X	X		X		
Drehbohrtechnik		X	X	X		
Schlagbohrtechnik			X	(X)		
Spülbohrtechnik			(X)	(X)		
Schlitztechnik					X	
Hochdruck-Injektionstechnik						X

Im Anschluss an die Beschreibung der Geräte geben Tabellen eine Übersicht über die Bandbreite maßgebender Kennzahlen der Geräte und Maschinen. Basis hierfür ist die Österreichische Baugeräteliste (ÖBGL) [45] in ihrer aktuellen Version aus dem Jahr 2015. Ergänzend dazu bieten Geräte namhafter Hersteller in alphabetischer Reihenfolge einen Überblick über derzeit verfügbaren Gerätegrößen. Die Geräte folgender Hersteller werden in den Listen angeführt:

- ABI GmbH
- BAUER Maschinen GmbH
- BVV Spezialtieftbautechnik Vertriebs GmbH
- EURODRILL GmbH
- OBERMANN MAT GmbH
- GIKEN Ltd.
- KLEMM Bohrtechnik GmbH
- LIEBHERR-Werk Nenzing GmbH

- RTG Rammtechnik GmbH
- SENNEBOGEN Maschinenfabrik GmbH
- Stahl- und Apparatebau Hans LEFFER GmbH & Co. KG

Die Systematik der Tabellen folgt folgender Logik: nach Anführung der Quelle werden jeweils das kleinste und größte verfügbare Gerät der jeweiligen Quelle, bzw. Firma aufgezählt, wobei die Kenngröße der Geräteart durch die ÖBGL definiert und fett markiert ist.

3.1 Allgemein

Das folgende Kapitel beschreibt Grundgeräte und deren Grundausstattung zur Errichtung der zuvor beschriebenen Bauverfahren, welche sich wie folgt zusammensetzen:

- Grundgerät
- Mäkler (Mast) / Gittermastausleger
- Vorschubeinrichtung
- Aufrichte- und Abstützzyylinder
- Winden
- Universalsysteme

In den nachfolgenden Kapiteln wird die Kombination von Grundgerät samt zuvor aufgezählter Ausrüstung als Trägergerät bezeichnet. Auf deren Grundausstattung wird in den nachfolgenden Absätzen nicht näher eingegangen.

3.1.1 Grundgeräte

Hydraulikbagger

Die mechanische Bewegung der Bagger wird mit einer Hydraulik bewirkt, als Antrieb dienen meist Dieselmotoren. Für die Anwendung der in Kapitel 2 beschriebenen Verfahren bedarf es einer Anpassung der Grundausstattung der Geräte. Oftmals sind zusätzliche Hydraulikanschlüsse und Bedienelemente für An- und Aufbauelemente erforderlich. Hydraulikbagger teilen sich abhängig von Betriebsgewicht und Motorleistung in drei Baugrößen ein.

- Baugröße 1 (10 bis 30 t)
- Baugröße 2 (30 bis 60 t)
- Baugröße 3 (60 bis 235 t)

Während für Bagger der Baugröße 1 eine Ausstattung mit Mobil- oder Raupenfahrwerk möglich sind, haben die der Baugröße 2 und 3 nur noch Raupenfahrwerke. Für die in Kapitel 2 beschriebenen Tätigkeiten kommen überwiegend Hydraulikbagger der Baugröße 2 zum Einsatz.

Seilbagger

Seilbagger (auch Hydraulik-Seilbagger) zeichnen sich durch Ausstattung mit einem Gitterausleger aus. Sie sind als Weiterentwicklung zu konventionellen Hydraulik-Baggern anzusehen. Die ursprüngliche Bauart mit Mobilfahrwerk wurde über die Jahre von Raupenfahrwerken abgelöst, welche als HD- (heavy-duty) oder LC- (long-crawler) Fahrwerk ausgeführt werden können. Moderne Geräte verfügen über teleskopierbare Fahrwerke. Es wird eine Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten und die zu erfüllende Aufgaben vorgenommen [64, 113]. Bis zu Traglasten von 40 t sind die Geräte meist mit einem umklappbaren Grundausräger mit einer Länge von ca. 14 m ausgestattet. Für die meisten Arbeiten ist diese Länge ausreichend. Bei größeren Geräten müssen neben dem Ausleger auch die Fahrwerke für den Transport demontiert werden [32]. Raupenseilbagger finden vor allem bei folgenden Arbeiten Anwendung:

- Bohrpfahlarbeiten im Schlagbohrverfahren (bei großem Durchmesser)
- Schlitzwandarbeiten
- als Trägergeräte für schwere Drehbohranlagen und Rammeinheiten
- in der dynamischen Bodenverdichtung

Tab. 3.2 zeigt die Bandbreite an Größen von Seilbaggern nach ÖBGL sowie führender Gerätehersteller.

Tab. 3.2: Seilbagger >75 kW, hydraulisch

Quelle	Bezeichnung	Max. Nenn lastmoment	Max. Tragkraft	Winden- zugkraft	Motor- leistung	Gewicht
	-	t m	kN	kN	kW	kg
ÖBGL 2015 [45]	D.0.00.0051	51	k.A.	60	76	20 300
	D.0.00.1600	1600	k.A.	500	725	322 000
Bauer [20]	MC 76	k.A.	90	600	570	95 000
	MC 128	k.A.	200	700	709	170 000
Liebherr [75]	HS 8040.1	k.A.	40	240	230	42 900
	HS 8300	k.A.	300	1000	750	352 000
Sennebogen [103]	640E	k.A.	40	120	186	39 000
	6300E	k.A.	300	450	840	250 000

3.1.2 Mäkler

Mäkler dienen der Führung von Werkzeugen und Geräten, welche auf einem dafür vorgesehenen Führungsschlitten montiert werden. Die Führung gewährleistet eine hohe Genauigkeit während der Bauarbeiten. Zu unterscheiden sind [32, 113]:

- Anbaumäkler
- Schwingmäkler
- Aufsteckmäkler

Anbaumäkler

Der Anbaumäkler wird auf dem Geräteträger (Hydraulik- oder Seilbagger) frei hängend oder abgestützt montiert. Der Mäkler soll anhebbar, drehbar, absenkbar und neigbar sein, um den heutigen Anforderungen der Bauvorhaben gerecht zu werden. In den letzten Jahren haben sich Teleskopmäkler durchgesetzt, welche bis zu einer Höhe von 27 m ausfahrbar sind. Für diese Mäklergrößen ist es zu empfehlen, Geräteträger mit teleskopierbarem Fahrwerk zu verwenden. Werden Anbaumäkler in Kombination mit Seilbaggern (siehe Tab. 3.3) verwendet, können diese durch vertikales Verschieben des Mäklers auch an Stellen arbeiten, die für das Grundgerät nicht zugänglich sind [113].

Tab. 3.3: Rammmäkler für Seilbagger mit Sonder-Gitterausleger

Quelle	Bezeichnung	Nutzlast	Mäklerlänge	Gewicht
	-	t	m	kg
ÖBGL 2015	J.O.10.0010	10	20	16 000
	J.O.10.0080	80	60	60 000

Schwingmäkler

Schwingmäkler hängen frei schwingend an einem Seil und stützen sich nicht gegen das Trägergerät ab. Als Trägergeräte fungieren Seilbagger oder jegliche Art von Hebezeugen sein. Die Mäkler sind um 360° um die Längsachse drehbar. Während der Rammung ist das Rammgut solange in der Lage zu fixieren, bis der Schwingmäkler die Führung übernommen hat. Mithilfe einer Traverse sind Neigungen von bis zu 45° rammbar [113].

Aufsteckmäkler

Aufsteckmäkler kommen primär im Offshore-Bereich zum Einsatz und sitzen „frei-reitend“ auf dem einzubringenden Rammelement. Die Verwendung eines Aufsteckmäklers bietet sich vor allem dann an, wenn das Trägergerät nicht an den Einsatzort transportiert werden kann. Die Manipulation erfolgt über ein Seil an einem Trägergerät. Derzeit werden Elemente bis zu einem Durchmesser von 4,20 m gerammt. Das einzubringende Element muss, bis es selbst die Führung der Rammung übernimmt, in seiner Lage stabilisiert werden. Die Länge des Rammgutes ist durch die Höhe des Trägergerätes und die Höhe der Führung begrenzt [113].

3.1.3 Vorschubeinrichtung und Rollenkopf

Um ausreichenden Vorschub auf das Werkzeug zu gewährleisten, stehen entweder

- Vorschubzylinder,
- der Seilvorschub oder
- der Zahnradvorschub

zur Verfügung. Der Seilvorschub gewinnt in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung, während der kaum Anwendung findet. Am oberen Ende des Mastes ist ein Rollenkopf zum Anheben von Lasten angeordnet. Moderne Geräte erlauben es, den Rollenkopf um 10 bis 15° zu schwenken, sollten aufzunehmende Lasten nicht genau in der Bohrachse stehen. Rollen und Seile werden dadurch geschont.

Der Trend geht hin zum nach hinten umklappbarem Mast. Dies spart Zeit und Kosten im Hinblick auf Auf- und Abbau sowie Transport. Der Rollenkopf am oberen Ende des Mastes lässt sich hierfür abkippen, um die gesetzlich vorgeschriebene maximale Höhe des Transportzuges

einzuhalten. Wird der Mast nach vorne abgelegt oder übersteigt die Länge des Mastes 18 m, ist zumindest eine Teilmontage vorzunehmen [34].

3.1.4 Aufrichte- und Abstützzylinder

Bohrgeräte, deren Mast nach vorne abgelegt wird, verwenden den Hauptausleger des Hydraulikbagger als Abstützzylinder. Ein zusätzlich angebrachter Hydraulikzylinder verbindet den Mastfuß mit dem Trägergerät. Geräte mit nach hinten umklappbarem Mast, sowie bei Mastlängen ab 20 m, verfügen über zumindest zwei Abstützzylinder [34].

3.1.5 Winden

Die Winden dienen dem Aufrollen von Kelly-, Hilfs- und etwaigem Vorschubseil, deren Antrieb erfolgt über Hydraulikmotoren. Bei Seilbaggern werden die bereits im Grundgerät verbauten Winden verwendet. Die Anordnung der Winden erfolgt üblicherweise im unteren Drittel des Mäkler bzw. des Gitterauslegers [34].

3.1.6 Universal-Systeme

In den letzten Jahren haben sich die Geräte immer weiterentwickelt. Heutzutage kommen universell einsetzbare Gerätekombinationen (siehe Tab. 3.4) zu Einsatz. Die Geräte werden durch entsprechende Adaptierung der Arbeitsvorrichtung zum Rammen, Rütteln, Pressen oder auch zum Bohren und Ziehen verwendet. Mit einem Mäkler sind bei Universalgeräten eine Vielzahl von Baumaßnahmen des Tiefbaus bewältigbar. Die Mäkler sind teleskopierbar und werden für den Transport eingefahren. Schnellwechselanlagen ermöglichen den Wechsel zwischen verschiedenen Anbauelementen wie Ramm- und Ziehvorrichtungen, Bohrantrieben, Kraftdrehköpfen, Doppelkopfanlagen und in Einzelfällen auch Schnellschlaghämmern [113].

Tab. 3.4: Kombinierte Ramm- und Bohrgeräte

Quelle		Bezeichnung	Max. Ramm- gutlänge	Max. Mäklerlänge	Motor- leistung	Gewicht
		-	m	m	kW	kg
ÖBGL 2015	[45]	J.0.00.0013	13	k.A.	39	46 000
		J.0.00.0031	31	k.A.	750	90 000
Liebherr	[78]	LRB 16	k.A.	12,8	390	50 000
		LRB 355.1	k.A.	27,0	750	101 700
RTG Rammtechnik	[99]	RG 14 T	14	19	313	35 000
		RG 27 S	27	33	570	75 800

3.2 Spundwände

Zur Herstellung von Spundwänden bedarf es einer Reihe von Geräten. Sie sollen ein sicheres und wirtschaftliches Einbringen der Spundbohlen gewährleisten. Zudem muss bei der Wahl des Gerätes auf die jeweiligen Bodenverhältnisse Rücksicht genommen werden. Die erforderlichen Geräte sind nach Witt [113] wie folgt aufgelistet:

- Trägergeräte
- Geräte für Rammtechnik, Vibrationstechnik und Einpresstechnik

- Hilfsmittel

3.2.1 Trägergeräte

Die Trägergeräte der Spundwandherstellung sind in erster Linie nach Länge und Gewicht des Rammgutes auszuwählen. Kurze Bohlen bis zu einer Länge von 7,50 m und einem Gewicht von 1 t lassen sich mit einem am Löffelstiel eines Hydraulikbaggers (ab 86 kW Leistung) angebrachten Vibrationsbären einbringen. Bohlen mit einer Länge von 12 m und einem Gewicht von ca. 1,50 t je Doppelbohle können mit einem Hydraulikbagger kaum noch eingefädelt werden. Es bedarf den Einsatz eines Grundgerätes mit Mäklern und dem jeweiligen Einbringwerkzeug. Überwiegend kommen Hydraulikbagger mit leichten bis mittelschweren Mäklern zum Einsatz. Das hohe Gewicht von Mäklern, Rammbar, Rammgut und Winden bedingt Einsatzgewichte (ohne Anbau) zwischen 20 und 70 t. Mit zunehmender Länge und zunehmendem Gewicht des Rammgutes, gewinnen *Seilbagger* als Trägergeräte an Bedeutung. Die Einsatzgewichte liegen zwischen 50 und 90 t bei maximal möglichen Traglasten von 40 bis 100 t. Eine Sonderlösung bei den Trägergeräten stellen *Autokrane* dar. Sie finden in Kombination mit Vibrationsbären Anwendung. Autokrane eignen sich durch den teleskopierbaren Ausleger für den Einsatz in Bereichen, die für Bagger nicht befahrbar sind [101, 113].

3.2.2 Geräte - Rammtechnik

Freifallhammer

Freifallhämmer sind einer der ältesten Rammmethoden. Ein Schlaggewicht wird hydraulisch angehoben und nach Erreichen der einstellbaren Fallhöhe fallengelassen. Das Rammgewicht trifft nach dem freien Fall auf das Rammgut und bringt die Rammenergie auf das Rammgut auf. Das Verhältnis von Kolbengewicht zu Rammgut (inkl. Rammhaube) entspricht 1:2 bis 1,5:1 und wird an die jeweiligen Rahmenbedingungen angepasst. Bei gleichbleibender Schlagenergie sollte ein größeres Kolbengewicht bei geringerer Fallhöhe gewählt werden. Dies mindert Schäden am Bohlenkopf und übermäßige Lärmentwicklung. Die Schlagenergie kann stufenlos zwischen 10 und 100 % reguliert werden [113]. Tab. 3.5 stellt das Spektrum an verfügbaren Gerätegrößen dar.

Tab. 3.5: Hydraulik-Freifallbären

Quelle	Bezeichnung	Max. Schlagenergie kN m	Bärfall- gewicht kg	Gewicht kg
ÖBGL 2015 [45]	J.1.00.0012	12	1000	2700
	J.1.00.0300	300	25 000	36 500
Liebherr [73]	H 6	36–72	3000–6000	6150–9150
	H 15 L	150–225	10 000–25 000	10 800–23 800
RTG Rammtechnik [97]	HR 500	4,8	500	3250
	[96] HR 10000	117	10 000	12 900

Dieselsbären

Die wesentlichen Bauteile eines Dieselsbären sind der Kolben, ein Zylinder und das Schlagstück. Abgesehen vom Dieselöl wird kein zusätzliches Antriebsmittel benötigt, ein Dieselsbär ist Motor und Ramme zugleich. Die Wirkung beruht auf dem Prinzip der Schlagzerstäubung. Der im Zylinder geführte Kolben verdichtet beim Fallvorgang das Luft-Dieselöl-Gemisch. Beim Aufschlag wird das Gemisch zerstäubt und es entzündet sich explosionsartig. Der Kolben wird wieder

nach oben katapultiert. Durch die Auspufflöcher entweichen die Verbrennungsgase, Frischluft wird angezogen. Der Prozess des Rammens beginnt erneut. Dieselbären sind kaum anfällig für Störungen und einer der effektivsten Rammgeräte. Zudem sind Dieselbären auch bei extremen Temperaturverhältnissen einsetzbar [113]. Dieselbären sind in Abhängigkeit des einzubringenden Rammgutes in den in Tab. 3.6 angeführten Bandbreiten erhältlich.

Tab. 3.6: Dieselbären

Quelle	Bezeichnung	Max. Schlagenergie kN m	Bärfall- gewicht kg	Kraftstoff- verbrauch l/h	Gewicht kg
	-				
ÖBGL 2015	[45] J.1.10.0024	24	800	4,0	2300
	J.1.10.0333	333	10 000	30,0	21 570
Delmag	[40] D6-32	9–19	600	3,7	1620
	D400-32	855–1335	40 000	112	79 500

Doppeltwirkende Hydraulikhämmer

Dieses System besteht aus einem geschlossenen Zylinder, in dem ein Kolben durch Hydraulikdruck angehoben wird. Kurz vor Erreichen des oberen Endes des Zylinders wird der Druck umgeleitet, sodass er den Schlag des Zylinders zusätzlich beschleunigt. Es kann eine Schlagenergie von 2 G erreicht werden. Dies entspricht bei einer Hubhöhe von einem Meter einer Freifallhöhe von 2 m. Die Rammenergie wird bei jedem Schlag gemessen und wird variabel zwischen 5 und 100 % eingestellt. Pro Rammschlag lässt sich eine Energie von 35 bis 3500 kN m, 50 bis 60 Schläge werden pro Minute ausgeführt. Das Verhältnis von Kolbengewicht zu Rammgut wird mit 1:1 bis 1:2 festgelegt. Das System ist sehr flexibel einsetzbar und lässt geneigte Rammungen und das Rammen unter Wasser zu. [113].

Schnellschlaghämmer

Der Antrieb von Schlaghämmern ist Dampf oder Druckluft (siehe Tab. 3.7), welcher abwechselnd auf die beiden Seiten des Kolbens geleitet wird. Durch Auspufföffnungen auf beiden Seiten entweichen die Gase. Der Druck hebt den Kolben und beschleunigt ihn beim Fallen. Die Schlagenergie ist bei Schnellschlaghämmern wesentlich geringer als bei Freifallhämmern, die Schlagfolge mit 400 Schlägen pro Minute jedoch wesentlich höher. Das Kolbengewicht/Rammgut-Verhältnis wird mit 1:5 gewählt. Das Rammgut bleibt ständig in Bewegung und das Einbringen wird erleichtert. Mit entsprechender Ausrüstung lässt sich das System auch unter Wasser und zum Ziehen von Spundbohlen verwenden [113].

Tab. 3.7: Schnellschlaghammer, druckluftbetrieben

Quelle	Bezeichnung	Schlag- energie kN m	Kolben- gewicht kg	Max. Schlagzahl 1/min	Druckluft- bedarf m ³ /min	Gewicht kg
	-					
ÖBGL 2015	[45] J.2.00.0400	4,0	270	180	5,0	1500
	J.2.00.2200	22,0	1300	100	16,0	6100

3.2.3 Zusatzeinrichtungen für Rammen

Rammhilfen dienen dem Schutz und der schonenden Einbringung des Rammgutes [32, 37]. Zum Einsatz kommen:

- Rammhauben
- Schlagplatten
- Rammhaubenfutter

Rammhauben

Im Gegensatz zum Vibrationsverfahren, bei dem Rammgut und Gerät kraftschlüssig verbunden sind, muss die Rammenergie bei schlagenden Rammhären über eine Rammhaube an das Rammgut weitergegeben werden. Neben der Energieübertragung dienen Rammhauben der Führung des Rammgutes. Hierfür sind an der Unterseite keilförmige Schlitze und Vertiefungen angeordnet, welche das Aufsetzen der Rammhaube erleichtern. Für langsam schlagende Rammhären sind Rammhauben mit Futter vorzusehen.

Schlagplatten

Im Gegensatz zu Rammhauben erlauben Schlagplatten keine Führung. Der Einsatz von Schlagplatten erfolgt in Kombination mit Rammhären und Rammhämmern, mit welchen sie auch verbunden sind. Sie eignen sich nur zu Einbringung von Stahlprofilen.

Rammhaubenfutter

Das Rammhaubenfutter ist an der Oberseite von Rammhaube/Schlaghaube in eine dafür vorgesehene Vertiefung eingesetzt. Durch das Futter lassen sich Prellschläge weitgehend vermeiden. Folgende Wirkung erzielen Rammhaubenfutter nach Buja [32]:

- Schlagdämpfung bei empfindlichem Rammgut
- Schonung des Rammgutes bei schwierigen Böden
- möglichst gleichmäßige Verteilung der in das Rammhaubenfutter eingeleiteten Kräfte auf Rammhaube und Rammgut
- Verlängerung der Schlagdauer durch Speicherung der Rammenergie im Futter
- Verlängerung der Lebensdauer der Schlaghaube

Das Futter besteht in der Regel aus Holz (Faserrichtung stets horizontal, optimal sind Sperrhölzer), für schwere Rammarbeiten haben sich Plastik- und Hartgewebeplatten mit Zwischenlagen aus Stahl bewährt. Für Fertigbetonrammpfähle wird ein zusätzliches Futter aus Fichte oder Tanne zwischen Rammhaube und Pfahl eingebaut.

3.2.4 Geräte - Vibrationstechnik

Das Prinzip der Vibrationstechnik beruht auf einer Schwingungserzeugung, die den Boden in Vibration versetzt. Die Vibrationen versetzen den anstehenden Boden mithilfe der Bohle in einen semi-flüssigen Zustand. Spitzendruck und Mantelreibung werden durch das Vibrieren des Bodens gemindert. Es reicht eine geringe Auflast (zusätzlich zum Gewicht des Vibrationsbären und des Rammgutes) um das Rammgut einzubringen. Im Vibrationsbären werden die Schwingungen durch vertikal gerichtete Unwuchten erzeugt, Horizontalkräfte verschwinden somit. Sie drehen sich gegenläufig mit gleicher Frequenz. Zu unterscheiden sind elektrische und hydraulische Vibratoren. Obwohl elektrische Vibratoren in der Anschaffung günstiger sind, geht der Trend hin zu den hydraulischen Vibratoren (siehe Tab. 3.8), da sie stufenlos einstellbar sind. Die Geräte erreichen Drehzahlen von bis zu 2600 Umdrehungen. Dies ermöglicht eine bessere Anpassung an die vorherrschenden Bodenverhältnisse. Zur Führung der Vibrationsbären stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung [32, 113]:

- frei reitend (am Seil geführt)
- teilweise geführt (am Ausleger eines Hydraulikbaggers)
- voll geführt (am Mäkler eines Hydraulik- oder Seilbaggers)

Tab. 3.8: Vibrationsbären, hydraulisch

Quelle		Bezeichnung	Max. Fliehkraft	Statisches Moment	Leistungs- bedarf	Gewicht
		-	kN	N m	kW	kg
ÖBGL 2015	[45]	J.3.11.0400	400	0–70	130	1325
		J.3.11.3500	3500	0–600	670	10 500
Liebherr	[72]	LV 20	1160	0–196	k.A.	4400
RTG Rammtechnik	[98]	MR 75 V	750	0–130	250	3800
		MR 145 V	1450	0–280	460	5420
ABI	[8]	MRZV 12VV	600	0–120	200–260	3300
		MRZV 36VV	1500	0–360	470–570	5410

Freireitende Systeme

Frei reitende Systeme haben keine Führung, sie werden mit einem Hebezeug auf dem Rammgut. Somit bedarf es zusätzlicher Maßnahmen um die Führung zu gewährleisten. Für den Fall, dass das Rammgut nicht mit einem Führungsgerüst ausgerichtet wird, besteht die Möglichkeit an vorgerammte Spundbohlen anzubinden. Nachträgliche Korrekturen sind fast unmöglich. Für Rohre und Profile besteht die Möglichkeit des Einstellens in zuvor hergestellte Bohrlöcher [32].

Teilweise geführte Systeme

Bagger-Anbausysteme eignen sich nur für kleine Rammarbeiten wie das Nachrammen von Leichtprofilen oder die Einbringung kurzer Bohlen, deren Länge in etwa auf 8 bis 9 m begrenzt ist. Die Vibrationsramme wird mit einem Verbindungsbolzen am Ausleger montiert. Die Hydraulikversorgung erfolgt vom Trägergerät ausgehend über ein zum Vibrator geführtes Schlauchpaket [32].

Voll geführte Systeme

Mäklergeführte Systeme zeichnen sich durch eine ausgezeichnete Führung des Rammgutes aus, welche sich wiederum positiv auf die Herstellungsgenauigkeit auswirkt. Vorschubsysteme (Seil- oder Zylindervorschub) unterstützen den Rammvorgang durch eine Erhöhung der Vorschubkraft. Nachteil dieses Systems ist, dass das Rammgut neben dem Trägergerät gelagert muss [32].

3.2.5 Zusatzeinrichtungen für Vibratoren

Zu den wesentlichen Zusatzeinrichtungen von Vibratoren gehören nach Buja [37]

- Klemmzangen,
- Traversen und
- die Schwingungsdämpfung.

Klemmzangen

Klemmzangen dienen dem reibschlüssigen Verbund zwischen Vibrationsbär und Rammgut während dem Einbringen. Das Bauteil wird unter der Vibrationsramme angebracht. Unterscheiden lassen sich Einfach- und Zweifachklemmen, bzw. Duplex- und Quadro-Rohrklemmzangen, deren Unterschiede in Anzahl und Anordnung der Zangen liegen. Bei der Wahl von Art und Größe der Klemmzange (siehe Tab. 3.9) ist die Leistung der Vibrationsramme sowie die Form des Rammgutes entscheidend [32].

Tab. 3.9: Einfachklemmzangen

Quelle	Bezeichnung	Spannkraft	Richtwert für übertragbare Fliehkraft	Gewicht
	-	kN	kN	kg
ÖBGL 2015 [45]	J.3.12.0240	240	280	120–150
	J.3.12.3500	3500	4200	3000–3200
RTG Rammtechnik [98]	MRZ 85	1020	850	700
	MRZ 150	1800	1500	1235
ABI [7]	EKS 480	530	440	260
	EKS 720	720	600	490

Traversen

Kommen mehrere Klemmzangen an einem Rüttler zum Einsatz, werden diese über eine Traverse mit dem Rüttler verbunden. Die an Führungsschienen befestigten Klemmzangen lassen sich so an unterschiedliche Profilformen und -größen anpassen.

Schwingungsdämpfung

Vibrationsrammen müssen aufgrund der hohen dynamischen Wechselbeanspruchungen vom Trägergerät durch eine schwingungsisolierende Aufhängung getrennt werden. Ansonsten bestünde die Gefahr der Schädigung des Trägergerätes sowie dessen Anbauteilen. Die Schwingungsdämpfung hat zwei Aufgaben zu erfüllen: einerseits eine optimal Isolierung zum Trägergerät sowohl bei der Ramm- als auch der Zugarbeit, andererseits die aktive Unterstützung der Vibrationsramme während schwerer Zieharbeiten. Hierfür müssen die schwingungsdämpfenden Elemente eine sehr progressive Charakteristik mit steigender Belastung aufweisen. Während die meisten Hersteller den Schwingungsdämpfer im Vibrator verbauen, bietet das System Tünkers einen vom Rüttler getrennten Dämpfer [32, 37].

3.2.6 Geräte - Einpresstechnik

Die Einpresstechnik unterscheidet sich von den zuvor beschriebenen insofern, als das rein statischer Druck auf die Spundbohlen ausgeübt wird. Über ein Hydrauliksystem am Einbringgerät wird ein Presszylinder Hub für Hub in den Boden gepresst. Hierfür muss die Bohle den Einpresswiderstand bestehend aus Spitzendruck, Mantelreibung und Schlossreibung mithilfe der Einpresskraft überwinden [113]. Tab. 3.10 veranschaulicht die am Markt verfügbaren Gerätegrößen, welche an das einzupressende Rammgut angepasst werden müssen.

Freireitende Spundwandpressen

Mit einem Kran werden die Pressen auf Spundwandtafeln aufgesetzt. Die bis zu acht bereits ineinander gefädelt Spundwandbohlen sind in einem Führungsrahmen aufgestellt und durch diesen temporär gestützt. Jede Bohle ist über Zangen mit einem Presszylinder verbunden. Nun werden die Bohlen nacheinander und stufenweise in den Boden eingebracht. Als Gegenkraft

Tab. 3.10: Spundwandpressen

Quelle		Bezeichnung	Max. Presskraft kN	Max. Ziehkraft kN	Hub mm	Gewicht kg
ÖBGL 2015	[45]	J.0.30.0600	600	380	400	3800
		J.0.30.2000	2000	1500	1000	17 000
RTG Rammtechnik	[100]	MPU	4 x 800	4 x 600	420	6700
		MPZ-770	4 x 800	4 x 600	420	7950
ABI	[6]	HPS	3 x 600	3 x 380	450	3900
		HPZ 700	4 x 800	4 x 600	420	6470
GIKEN	[50]	Silent Piler F101	800	900	800	5800
	[49]	Silent Piler F 401	1500	1600	1000	25 600

für den Presszylinder dient einerseits das Eigengewicht der Spundwandpresse samt Bohlen, andererseits die bereits aktivierte Mantelreibung der zuvor eingebrachten Bohlen. Die Pressen werden ferngesteuert bedient und leisten bei einer Hublänge von 800 mm einen Einpressdruck bis zu 300 kN. Ein entscheidender Nachteil des Systems macht sich beim Antreffen von Hindernissen bemerkbar. In diesem Fall muss die ganze Tafel wieder ausgebaut und die Maschine abgebaut werden.

Mäklergeführte Spundwandpressen

Die durch einen Mäkler geführte Presse ist in der Handhabung einfacher als eine freireitende Presse. Eines der meist verwendeten Systeme ist das Hydro-Press-System der Firma ABI-GmbH. Vier Bohlen werden jeweils zu einer Tafel verbunden und aufgestellt. Nach dem Einfädeln in die vorhergehenden Bohlen erfolgt der Einpressvorgang, bei dem zuerst die beiden mittleren Bohlen mit Presszylindern um den Hub eingebracht werden. Anschließend folgen die beiden Außenbohlen. Die Hydro-Presse wird nach unten gefahren, bis die Zylinder eingefahren sind. Der Prozess wird solange wiederholt, bis die Endtiefe erreicht wird. Als Reaktionskraft dient das Eigengewicht des Trägergerätes samt Mäkler. Ein Einpressdruck von bis zu 760 kN bei einer Hublänge von 450 mm ist möglich.

Selbstschreitende Spundwandpressen

Selbstschreitende Pressen werden einmalig auf eine zuvor auf Endtiefe gebrachte Tafel aus drei Spundbohlen aufgesetzt und mit den Zangen darauf fixiert. Sind beim Start keine eingepressten Bohlen vorhanden, ist eine Startvorrichtung zu verwenden. In die letzte bereits eingebrachte Bohle wird mithilfe eines Kranes die nächste Bohle eingefädelt und hubweise eingepresst. Bevor die Bohle die Endtiefe erreicht, löst die Presse die Klemmverbindung und hebt sich selbst um eine Bohle in Arbeitsrichtung vorwärts. Die Klemmen werden wieder aktiviert und der Einpressvorgang wird fortgesetzt. Der Press- und Umsetzvorgang wird so oft wiederholt, bis alle Bohlen auf Endtiefe gebracht wurden. Der drehbare Oberwagen ermöglicht das Einbringen von bis zu zwei Bohlen im rechten Winkel. Nach der Installation ausreichender Reaktionskraft (durch die eingebrachten Bohlen) hebt der Kran die Presse ab und auf eine neue Reihe wieder auf. Neben rechten Winkeln lassen sich – abhängig vom Hersteller – runde Wände herstellen.

Wesentlicher Vorteil des Systems sind die geringen Abmessungen und das geringe Gewicht. Zusätzlich punktet das System durch eine geringe Lärmentwicklung. Selbstschreitende Pressen eignen sich sehr gut für den innerstädtischen Einsatz mit beengten Platzverhältnissen. Das Festhalten der Spundbohlen mit Spannzangen während dem Einheben neuer Bohlen verleiht dem Verfahren zusätzliche Sicherheit im Arbeitsablauf.

3.2.7 Hilfsmittel

Auf Baustellen, bei denen Spundwandarbeiten auszuführen sind, muss besonders auf die Ausstattung mit Hilfsmitteln geachtet werden. Da die Arbeiten des Tiefbaus vor den Hochbau-Tätigkeiten stattfinden, steht kein Kran zum Entladen, bzw. Aufrichten, der Spundbohlen zur Verfügung. Rammführungen, Anschlagmittel und weitere Hilfsmittel erleichtern den Ablauf der Arbeiten und tragen einen großen Beitrag zur Arbeitssicherheit bei [32].

Schäkel

Schäkel sind Anschlagelemente und dienen dem Anheben und vertikalen Ausrichten der Spundbohlen. Spezielle Ausführungsvarianten erlauben das Lösen des Schäkels vom Boden aus. Der Anschluss wird durch einen Schäkelbolzen hergestellt. Hierfür müssen die Stahlspundbohlen eine eigens dazu hergestellte Bohrung aufweisen. Die Methode überzeugt durch ihre Schnelligkeit, ihre Effizienz und mit der Arbeitssicherheit [32, 84].

Einfädelvorrichtung

Werden Spundwandelemente staffelweise eingebracht, muss das Einfädeln der Bohlen in luftiger Höhe erfolgen. Einfädelvorrichtungen werden am Fuß der einzubringenden Bohle mit einem Gewindedorn befestigt. Nach dem Hochziehen der Bohle wird die Bohle an die Spundwand angelehnt. Die Schlösser beider Bohlen liegen nun aneinander. Das Einfädeln erfolgt automatisch durch das Herablassen der Bohle, Arbeiten am Kopf der Bohle sind nicht erforderlich. Bevor die Bohle auf den Boden abgestellt wird, muss die Vorrichtung wieder entfernt werden. Die Maßnahme ermöglicht einen schnellen und sicheren Arbeitsfortschritt [32, 84].

Klemmvorrichtung

Klemmvorrichtungen verhindern das Mitziehen von Nachbarbohlen. Das Problem tritt sowohl beim Rammen als auch beim Ziehen der Bohlen auf. Ist beim Rammen der Eindringwiderstand geringer – bei weichen Böden – als die Schlossreibung, besteht die Gefahr des Mitziehens. Selbiges gilt beim Ziehen von Bohlen. Klemmvorrichtungen werden auf den Schlössern aufgesetzt und „verbinden“ Spundbohlen temporär. Alternativ besteht die Möglichkeit des Heftschweißens [32].

Verstärkungsschuhe

Die Verstärkungen im Fußbereich dienen der Durchörterung von Hindernissen. Der Bohlenfuß wird durch diese Maßnahme vor übermäßiger Abnutzung und Verformung geschützt. Zusätzlich bewirkt die Verstärkung einen gewissen Freischnitt, wodurch die Mantelreibung während dem Einbringen verringert. Diese Maßnahmen bewirken ein Mehr an Energie am Fuß der Bohle, welche sich für Durchörterungen vorteilhaft auswirkt. [32].

Anschlagklauen

Anschlagklauen erlauben ein einfaches Abheben einzelner Bohlen von einem Stapel. Es wird je eine Klaue an Fuß und Kopf der Bohle aufgesetzt, im Anschluss hebt ein geeignetes Hebezeug die Bohle ab [32].

3.3 Pfähle

Im weiteren Verlauf werden Geräte der Herstellung von Pfählen gegliedert für

- Verdrängungspfähle,
- Bohrpfähle und
- Mikropfähle

beschrieben.

3.3.1 Verdrängungspfähle - Rammen, Vibrieren, Pressen

Folgende Geräte dienen der Herstellung von gerammten, einvibrierten bzw. eingepressten Verdrängungspfählen:

- Trägergerät (inkl. Mäkler, Vorschubeinrichtung, Winden)
- Geräte für Rammtechnik, Vibrationstechnik und Einpresstechnik

3.3.1.1 Trägergerät

Als Trägergeräte kommen die in Abschnitt 3.2.1 angeführten und beschriebenen Geräte infrage. Deren Grundausstattung mit Mäkler, Vorschubeinrichtung und Winden ist mit diesen ident. In den meisten Fällen kommen Hydraulikbagger mit einem Dienstgewicht zwischen 20 und 40 t zum Einsatz. Leicht austauschbare Anbaugeräte erlauben eine universelle Verwendung der Trägergeräte [81].

3.3.1.2 Geräte (Rammtechnik, Vibrationstechnik, Einpresstechnik)

Die spezifischen Einbringgeräte zum Rammen, Vibrieren (siehe Abschnitt 3.2.2, Abschnitt 3.2.4) von Spundwänden werden zur Herstellung von Verdrängungspfählen gleichermaßen verwendet.

Die Einpresstechnik unterscheidet sich jedoch von jenen der Spundwände. Presspfähle werden überwiegend bei Baustellen mit beengten Platzverhältnissen (wie Bauwerkssanierungen, Fundamentertüchtigungen, etc.) eingesetzt. Die Geräte müssen dementsprechend klein sein. Es kommen kompakte und handliche Pressen, die mittels Hydraulik den Vorschub leisten, zum Einsatz. Der Pfahl wird schussweise ohne Spülhilfe hergestellt.

3.3.2 Verdrängungspfähle - Drehbohren

Werden Verdrängungspfähle mittels Drehbohren (auch SOB-Pfähle genannt) hergestellt, sind die folgenden Geräte erforderlich:

- Trägergerät (inkl. Mäkler, Vorschubeinrichtung, Winden)
- Kraftdrehkopf
- Endlosbohrschnecke

3.3.2.1 Trägergerät

Als Trägergeräte kommen die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Geräte samt Grundausstattung infrage, in der Regel jedoch nur Hydraulikbagger. Aufgrund der hohen Widerstandskräfte müssen Trägergerät und Vorschubeinrichtung mit entsprechend hoher Leistung und Vorschubkraft der Winden ausgestattet sein.

3.3.2.2 Kraftdrehkopf

Für gebohrte Verdrängungspfähle eignen sich nur Kraftdrehköpfe mit Betonierkopf (siehe Abb. 3.1), welche eine Sonderform der Kraftdrehköpfe mit Durchgang sind. Mitnehmerleisten sorgen dafür, dass das erzeugte Drehmoment an Bohrgestänge und somit am dem Verdrängungskörper weitergegeben wird. Ein KDK mit Betonierkopf ermöglicht das Betonieren noch während des Ziehvorgangs des Bohrrohres.

3.3.2.3 Endlosbohrschnecken

Endlosbohrschnecken lassen sich nach Buja [32, 34] in folgende Kategorien gliedern:

- Teilverdrängungsschnecken
- Vollverdrängungsschnecken

Der Unterschied dieser beiden Schnecken liegt im Seelenrohr. Während Teilverdrängerschnecken ein Seelenrohr mit kleinem Durchmesser haben, weisen Vollverdrängerschnecken eines mit großem Durchmesser auf. Teilverdrängerschnecken fördern einen Teil des Materials und sind somit den Bohrpfählen zuzurechnen. Eine detaillierte Beschreibung ist in Abschnitt 3.3.3.5 zu finden.

Vollverdrängerbohrschnecken

Vollverdrängerschnecken bestehen aus einem Seelenrohr mit großem Durchmesser und einem darauf aufgeschweißten Schneckengang. Der große Durchmesser des Seelenrohres führt zu einer Verdrängung von rund 80 % des anstehenden Bodenmaterial. Mögliche Ausführungen der Bohrspitze des Pfahles sind verlorene oder wiedergewinnbare Fußspitzen. Einzelelemente der Hohl-schnecken sind in Längen bis zu 10 m verfügbar und lassen sich beliebig gekoppelt. Übliche Einsatzlängen liegen trotzdem zwischen 4 und 10 m, da die Widerstandskräfte mit zunehmender Tiefe höher werden. Durchmesser bis 900 mm sind realisierbar.

Full Displacement Piling - Werkzeuge

Eine Weiterentwicklung der klassischen Hohl-schnecken sind die Bohrköpfe des Full Displacement Pilings der Firma BAUER Spezialtiefbau GmbH. Im Gegensatz zu herkömmlichen Vollverdrängungsschnecken haben die Bohrwerkzeuge keine über das ganze Bohrgestänge durchgehenden Schneckengänge, sondern nur im unteren Bereich des Werkzeuges. Ein Schneckenanfänger am Fuß des Pfahles löst den anstehenden Boden, der darüber liegende konische Bereich (der Verdrängungskörper) verdrängt den Boden in horizontaler Richtung. Es folgt ein zylindrischer Bereich, welcher der Stabilisierung der Bohrlochwandung dient. Während dem Ziehen mit gleichzeitiger Drehbewegung verdichtet eine gegenläufige Wendel den gelockerten Boden nach. Mit diesem Verfahren werden üblicherweise Durchmesser zwischen 360 und 620 mm (siehe Tab. 3.11) hergestellt, jedoch lassen sich auch größere Durchmesser ausführen.

Tab. 3.11: Vollverdränger-Bohrschnecken

Quelle		Bezeichnung	Schneidendurchmesser mm	Gewicht kg/m
ÖBGL 2015	[45]	K.7.03.0440	440	240
		K.7.03.0620	620	350
Leffer	[111]	VV400	400	150
		VV600	600	268
BVV	[39]	EV 250 N	250	k.A.
		EV 1000 N	1000	k.A.

Eine Spezialisierung des Bohrens mit diesem Bohrwerkzeug ist das Lost-Pit-Verfahren. Der offene Bohranfänger wird hierfür mit einer verlorenen Bohrspitze ausgestattet. Das System wird für Pfahldurchmesser zwischen 440 und 710 mm angeboten [21, 25].

3.3.3 Bohrpfähle - Drehbohren

Die zur Herstellung von Bohrpfählen benötigten Geräte sind sehr variantenreich und stehen in einem laufenden Weiterentwicklungsprozess. Nachfolgend sind die wichtigsten Geräte und Werkzeuge laut Buja [34, S. 221 ff.] aufgelistet:

- Trägergerät (inkl. Mäkler, Vorschubeinrichtung, Winden)
- Kraftdrehkopf (ggf. mit Rohrmitnehmer)
- Kellystange
- Drehbohrwerkzeuge
- Endlosbohrschnecken
- ggf. Betonpumpe
- ggf. Verrohrungsmaschine und Bohrröhre

3.3.3.1 Trägergerät

Als Grundgeräte für die Herstellung von Großbohrpfählen dienen heute *Hydraulikbagger* und *Seilbagger*, wobei Hydraulikbagger nur für kleine Bohrgeräte zum Einsatz kommen. Die Trägergeräte werden für den Aufbau der Bohrgeräte entsprechend ausgerüstet. Modifizierungen wie Drehdurchführungen für den hydraulischen Anschluss von Anbaugeräten, stärkere Antriebsmotoren und Hydraulikaggregate sind für den Einsatz erforderlich. Zudem achten Hersteller besonders darauf, dass Geräte für den Transport möglichst nicht zu zerlegen sind [34]. Schach und Otto treffen folgende in Tab. 3.12 angeführte Einteilung für Drehbohranlagen:

Tab. 3.12: Parameter von kleineren bis größeren Drehbohranlagen [101, S. 69]

Art/Größe des Gerätes	max.	max.	Einsatz gewicht	max Bohr- durch- messer	Abmessungen der Anlage		
	Drehmo- ment kN m	Motor- leistung kW			Länge m	Breite m	Höhe m
kleine Anlagen	60	70	20	1500	6,0	3,0	12,0
mittlere Anlagen	140	200	50	1500	8,0	3,5	20,0
	275	300	100	2000	10,0	4,5	25,0
große Anlagen	450	575	250	3000	12,0	7,0	35,0

In Anlehnung an die durch Schach und Otto definierten Anlagengrößen bieten Hersteller die in Tab. 3.13 angeführten Gerätegrößen von Drehbohranlagen an.

3.3.3.2 Kraftdrehkopf (ggf. mit Rohrmitnehmer)

Der Antrieb der Bohrwerkzeuge erfolgt über Drehantriebe (auch Kraftdrehköpfe), die in unterschiedlichen Ausführungen zum Einsatz kommen. Nachfolgend sind die wichtigsten Arten genauer beschrieben. Zur Veranschaulichung sind die unterschiedlichen Varianten in Abb. 3.1 dargestellt [32, 34].

Tab. 3.13: Drehbohrgeräte (Grundgerät inkl. Mast, Drehgetriebeführungsschlitten, Kelly-, Hilfs- und Vorschubwinde)

Quelle	Bezeichnung	Max. Drehmoment	Max. Vorschubkraft	Motor- leistung	Gewicht
	-	kN m	kN	kW	kg
ÖBGL 2015	[45] K.2.00.0035	35	k.A.	50	13 000
	K.2.00.0550	550	k.A.	660	220 000
Liebherr	[77] LB 20.1	200	200	230	52 800
	LB 55	550	560	565	159 000
Bauer	[17] BG 23 H BT 65	235	260	186–225	61 500
	BG 72 BT 180	721	600	709	236 000
Delmag	[4] RH 12/140	143	250	209	44 500
	[5] RH 40	400	570	470	123 300

Kraftdrehkopf mit Durchgang

Jene KDK bestehen im wesentlichen aus einem Gehäuse mit – meist zwei – aufgesetzten Hydraulikmotoren, einem Durchgang samt Mitnehmerleisten, der Führung mit Aufhängung (KDK-Schlitten) sowie dem Drehteller. Der Durchgang des Kraftdrehkopfes dient der Durchführung einer Kellystange. Der am Mätkler durch den Schlitten geführte KDK gibt das erzeugte Drehmoment über Mitnehmerleisten im Getriebegang an die Kellystange, diese wiederum über den Vierkant-Anschluss an das Bohrwerkzeug weiter.

Die Bezeichnung der angebotenen Systeme richtet sich entweder nach Drehmoment für den Bohrbetrieb oder jenem für kurzzeitige Verrohrungsarbeiten (siehe Tab. 3.14). Übliche Drehmomente liegen zwischen 100 und 450 kN m bei 60 Umdrehungen pro Minute.

Tab. 3.14: Kraftdrehköpfe für Drehbohrgeräte

Quelle	Bezeichnung	Max. Drehmoment	Drehzahl	Gewicht
	-	kN m	U/min	kg
ÖBGL 2015	[45] K.2.01.0040	40	k.A.	2400
	K.2.01.0600	600	k.A.	12 000
Bauer	[12] KDK 200 KL	200	33	k.A.
	[13] KDK 720 S	721	35	k.A.
Liebherr	[69] BA 120	120	54	k.A.
	BAT 510	510	36	k.A.
ABI	[2] RHP 150	154	28	3250
	[1] MDBA 7000-2	660	40	1800
Delmag	[4] BT 140 - Silent	143	30	3600
	[5] BT 400D	400	25	9000

Kraftdrehkopf mit Betonierkopf

Zur Herstellung von SOB-Pfählen werden Antriebe mit der Möglichkeit der Durchführung von Beton benötigt. Es handelt sich um eine Spezialform der KDK mit Durchführung, bei dem oben ein Anschluss für das Betonierrohr ist und unten die Schnecke mit Seelenrohr über Gewindezapfen angeschlossen wird.

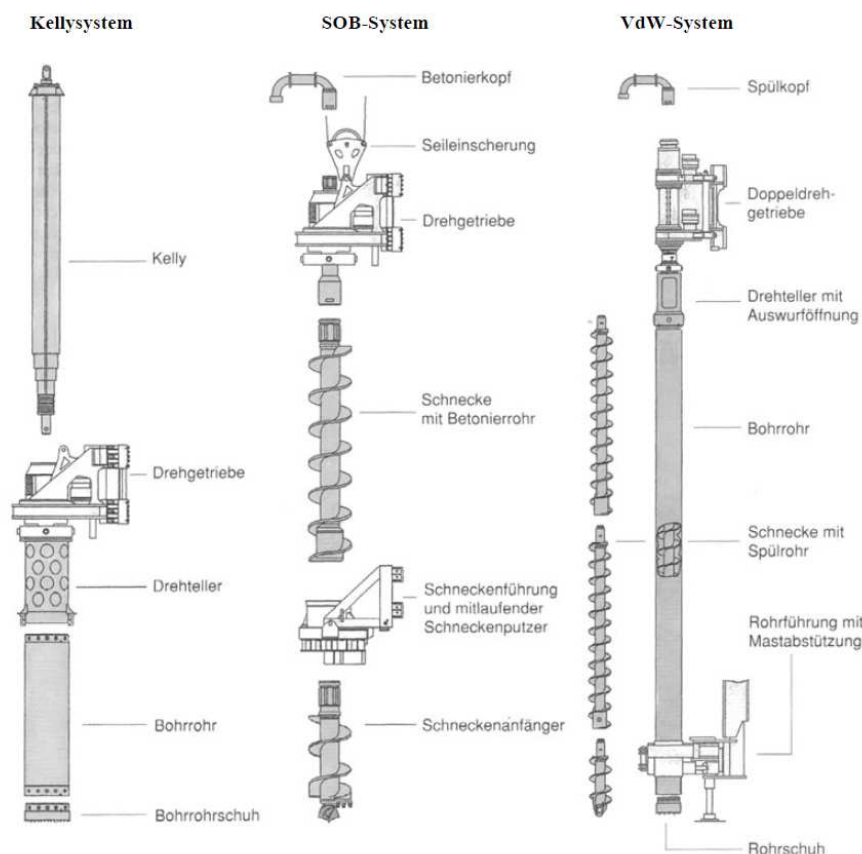


Abb. 3.1: Kraftdrehköpfe [81]

Doppelkopfb Bohrgetriebe

Bei der Herstellung von VdW-Pfählen bedient man sich Kraftdrehköpfen mit Doppelgetriebe. Die beiden Antriebe sind übereinander angeordnet, wobei der untenliegende Antrieb einen Durchgang hat und dem kontinuierlichen Einbringen der Verrohrung dient. Der oberhalb angeordnete KDK ist geschlossen und treibt die Bohrschnecke an. Die beiden Antriebe arbeiten stets gegenläufig. Das Bohrgut wird über unterhalb des Antriebes angeordnete Auswurföffnungen gefördert werden. In Tab. 3.15 wird das Spektrum der verfügbaren Größen von Doppelkopfb Bohrgetriebe dargestellt.

Tab. 3.15: Doppel-Kraftdrehköpfe (inkl. Betonierkopf)

Quelle	Bezeichnung	Max. Drehmoment Rohr	Max. Drehmoment Schnecke	Gewicht
	-	kN m	kN m	kg
ÖBGL 2015 [45]	K.2.02.0050	50	k.A.	3000
	K.2.02.0300	300	k.A.	12 000
Eurodrill [44]	VDW 6035	83	62	3400
	VDW 3015	300	150	8600
ABI [3]	VDW 6240	62	42	3650
	VDW 14070	140	70	4400

Rohrmitnehmer

Die Führung der Kraftdrehköpfe erlaubt die gleichzeitige Herstellung der Verrohrung. Ein mit dem KDK verbundener sogenannter Rohrmitnehmer (auch Drehteller genannt) bringt das Rohr durch drehende und drückende Bewegung in den Boden ein. Die heute am Markt verfügbaren Rohrmitnehmer erlauben Durchmesser von bis zu 2500 mm. Erfahrungen zeigen, dass sich Rohre mit einem Durchmesser von 900 mm und einem aufgebrachtem Drehmoment von 200 kN m bei günstigen Bodenverhältnissen in Tiefen bis 30 m vortreiben lassen.

3.3.3.3 Kellystange

Die Kellystange dient der Übertragung des Drehmomente von Drehantrieb auf das Bohrwerkzeug. Das wesentliche Merkmal ist ihre 2- bis 5-fache Teleskopierbarkeit, welche das Bohren in Tiefen über die Länge des Mastes hinaus erlaubt. Bohrtiefen bis 80 m sind ohne Bohrgestängeverlängerungen erreichbar.

Dabei werden Drehmomente bis 550 kN m übertragen (siehe Tab. 3.16). Durch Mitnehmerleisten und Verriegelungstaschen wird die Andrückkraft auf das Werkzeug übertragen. Sollte die Kellystange durchfallen, sorgt ein Federpaket am KDK oder am Kellyfuß für eine Abfederung. Da die Reparaturkosten sehr hoch sind, sollten jedem Bohrgerät Kellystangen in unterschiedlichen Längen zur Verfügung stehen und nur maximal notwendige Kellystangenlänge verwendet werden [30, 34].

Tab. 3.16: Teleskop-Kellystangen, 4-fach, für Drehbohranlagen

Quelle	Bezeichnung	Nenn- Drehmoment	Max. Bohrtiefe	Transport- länge	Gewicht
	-	kN m	m	m	kg
ÖBGL 2015 [45]	K.2.06.1215	115	15	6,0	3000
	K.2.06.5080	500	80	23,7	20 000
Bauer [19]	BK 110/305/4/16	305	40,25	17,25	2250
	BK 500/559/4/100	559	103,80	28,57	33 300
Liebherr [55]	MD 28/4/36	280	34	11,13	k.A.
	MD 36/4/60	360	58	17,50	k.A.

3.3.3.4 Drehbohrwerkzeuge

Entscheidend für die Erbringung der Leistung ist die Wahl des richtigen Werkzeuges, angepasst an die jeweiligen Bodenverhältnisse. Nachfolgend werden die wichtigsten Werkzeuge beschrieben [32, 34].

Vollschnecken

Vollschnecken werden in den unterschiedlichsten Konfigurationen angeboten, bestehen im wesentlichen aber aus einem Mittelrohr mit daran angebrachten Schneckengängen. Am Fuß befinden sich der Vorschneider und Schneidköpfe, die das Lösen des Bodens erleichtern.

Bei Vollschnecken ist zwischen *Kurzschnellen* und *Endlosschnellen* zu unterscheiden. Kurzschnellen fördern das die Materialförderung diskontinuierlich, d.h. zum Fördern des Materials muss die Schnecke nach dem Erreichen der Nutzlänge (zwischen 1 und 3 m) gezogen werden. Im Gegensatz erfolgt das Bohren bei Endlosschnellen kontinuierlich bis zum Erreichen der Endtiefe. Eine Übersicht der am Markt erhältlichen Kurzschnellen bietet Tab. 3.17

Tab. 3.17: Bohrschnecken für Vertikalbohrungen (Nutzlänge ca. 2,00 m)

Quelle		Bezeichnung	Schneidendurchmesser mm	Drehmoment kN m	Gewicht kg
ÖBGL 2015	[45]	K.7.00.0500	500	k.A.	790
		K.7.00.2350	2350	k.A.	4010
Liebherr	[71]	AU-FC	520	220	670
		AU-FC	1850	440	2240
Bauer	[14]	SB	520	k.A.	600–750
		SB-2	2500	k.A.	2900
Leffer	[109]	BS	490	k.A.	k.A.
		BS	1840	k.A.	k.A.

Bohrschappen

Schappen sind aus Rohren hergestellte Bohrwerkzeuge, die den anstehenden Boden durch am Fuß befestigte löffelförmige Schneiden oder kurzer Spiralen lösen und in das innere fördern. Fangbleche verhindern das Verlieren des Materials während dem Heben. Die Entleerung erfolgt durch Auseinanderklappen oder mittels seitlicher Entleerungskappen.

Bohreimer

Bohreimer sind eine spezielle Bauart von Schappen. Der Unterschied liegt in der Ausbildung des unteren Endes des Eimers. Die mit Schneidwerkzeugen besetzte Drehbohrklappe öffnet sich bei einer rechtsgerichteten Drehbewegung. Es folgt die gleichzeitige Lösung und Förderung in innere des Eimers. Mit einigen Linksdrehungen schließt die Klappe. Anschließend wird der Eimer gezogen. Zur Entleerung wird ein Federgestänge gegen den Kraftdrehkopf mit einer Drehbewegung gestoßen. Kurzes Aufstoßen schließt die Klappe wieder. Bohreimer eignen sich für jede Art von Boden unter- oder über Grundwasserspiegel. Bohreimer werden in Durchmessern bis zu 2500 mm und in Nutzlängen von etwa 1,50 m angeboten (siehe Tab. 3.18).

Tab. 3.18: Bohreimer (Nutzlänge ca. 1,50 m)

Quelle		Bezeichnung	Schneidendurchmesser mm	Gewicht kg
ÖBGL 2015	[45]	K.7.10.0520	520	885
		K.7.10.2350	2350	5850
Liebherr	[71]	BU-R	520	550
		BU-R	1850	4400
Bauer	[14]	KB	520	660–727
		KB-2	2500	5330–5730
Leffer	[109]	BE	490	k.A.
		BE	1830	k.A.

Kernrohre

Kernrohr sind mit einem Schneidring versehene Stahlrohre, welche mit einer Kellystange betrieben werden. Die Ringe sind mit Hartmetallstiften oder Rundschachtmeißeln besetzt. Hartmetallstifte werden primär zur Durchörterung von Beton eingesetzt, die Drehrichtung kann hierfür auch während der Bearbeitung geändert werden. Im Gegensatz dazu eignet sich Rundschachtmeißel zum Reißen von Fels, wobei hier nur eine Drehrichtung möglich ist. Aufgeschweißte Spiralraupen dienen der Förderung des Bohrkleins, dennoch neigen Kernrohre zum Verklemmen.

Pfahlfuß-Erweiterungsbohrer

Mit diesen Bohrern lässt sich eine Vergrößerung des Durchmesser des Pfahlschaftes auf die 2- bis 3-fache Größe herstellen. Das Verfahren kommt heutzutage kaum noch zu Anwendung. Der Aufwand in Bezug auf die Tragfähigkeit sowie das teils erhebliche Risiko bei der Herstellung ist nicht mehr gerechtfertigt. Zur Schaffung des Hohlraumes werden die Schneidarme ausgeklappt, während das geförderte Material in einen Auffangbehälter fällt.

3.3.3.5 Endlosbohrschnecken

Endlosbohrschnecken sind nach Buja [32, 34] in folgende Kategorien gegliedert.

- Teilverdrängungsschnecken
- Vollverdrängungsschnecken

Teilverdrängerschnecken

Bohrschnecken dieser Art verfügen über ein hohles Bohrgestänge (auch Seelenrohr) mit einem Mindestdurchmesser von 80 mm. Die Außenseite des Seelenrohre ist durch angeschweißte Schneckenwendeln gekennzeichnet. Die Führung am Mäkler wird durch eine Schneckenführung realisiert, welcher beim Ziehen zusätzlich als Schneckenputzer fungiert. Am Fuß der Schnecke ist ein sogenannter Anfänger angeordnet. Dieser dient der Lockerung des Bodens und soll ein leichtes Eindringen gewährleisten. Die Ausführung der Spitze und somit die Öffnung des Seelenrohres ist entweder verschlossen, verloren oder offen. Für den Fall einer offenen Bohrspitze liegt die Öffnung im Schneidschatten, sodass kein Material in das Seelenrohr eindringt. Mit Ausnahme des Anfängers, dessen Form vom Untergrund anhängig ist, sollte die Schnecke möglichst aus einem Stück sein. Für den Fall, dass deren Länge nicht ausreicht, werden Einzelelemente miteinander verbunden. Die Verbindung der bis zu 10 m langen Teilelemente erfolgt durch ein rechtsdrehendes Gewinde. Das Lösen bei Änderung der Drehrichtung wird durch eine Sicherung verhindert. Für den Spezialtiefbau werden Schnecken mit einem Außendurchmesser von 800 mm eingesetzt, der Innendurchmesser liegt bei diesen Schnecken bei 650 mm. Für spezielle Anwendungen sind Schnecken mit Durchmessern von 1200 mm verfügbar, wie Tab. 3.19 zeigt.

Tab. 3.19: Teilverdränger-Bohrschnecken

Quelle		Bezeichnung	Schneidendurchmesser	Nutzlänge	Gewicht
		-	mm	mm	kg/m
ÖBGL 2015	[45]	K.7.02.0400	400	k.A.	170
		K.7.02.1200	1200	k.A.	700
Bauer	[21]	CFA	500	254	k.A.
		CFA	1180	368/470	k.A.

3.3.3.6 Betonpumpen

Betonpumpen dienen der Betonförderung. Der Fahrmascher entlädt seine Ladung an Frischbeton in die Einfüllöffnung der Betonpumpe, die wiederum den Beton über eine Leitung bis zur Betonierkopf oberhalb des Kraftdrehkopfes transportiert. Kleinere Geräte bis zu einer Förderleistung von 100 m³/h werden als Anhängerbetonpumpe vertrieben. Pumpen mit einer höheren Förderleistung sind mit einem eigenen Raupenfahrwerk ausgestattet.

Tab. 3.20: Stationärbetonpumpen

Quelle	Bezeichnung	Fördermenge	Betondruck	Gewicht
	-	m ³ /h	bar	kg
Liebherr	[66] THS 80 D-K	71	125	5850
	THS 140 D-K	135	95	7700

3.3.4 Bohrpfähle - Schlagbohren

Mit Seilschlaggeräten lassen sich im Vergleich zu Drehbohrgeräten Bohrpfähle mit größerem Durchmesser und größerer Tiefe herstellen. Die Hauptkomponenten sind nach Buja [34]:

- Trägergerät (inkl. Gittermastausleger, Winden, etc.)
- Schlagbohrwerkzeuge
- ggf. Verrohrungsmaschine und Bohrröhre

3.3.4.1 Trägergerät

Seilbagger bestehen aus einem Trägergerät, üblicherweise mit Raupenfahrwerk, und einem Gittermastausleger. Dieser lässt sich bei modernen Geräten für den Transport nach hinten umlegen, solange dieser nicht eine Länge von 15 m überschreitet. Bei geringfügiger Überschreitung der Länge, ist die Auslegerspitze durch ein Gelenk nochmals umklappbar ausgeführt. Eine aufwendige Demontage lässt sich durch das Umklappen vermeiden. Ist der Ausleger länger, muss zumindest eine Teildemontage erfolgen. Sollte eine Teilmontage notwendig sein, besitzen die Geräte heute einen Aufrichtemast, der dem Verladen der Teile dient. Auf Beistellung von zusätzlichem Hebezeug lässt sich so verzichten. Die heute im Spezialtiefbau eingesetzten Seilbagger verfügen über Dienstgewichte bis 170 t und sind mit einer 3-Kreis-Regelhydraulik ausgerüstet, welche gleichzeitiges Bohren und Verrohren erlaubt [34].

3.3.4.2 Schlagbohrwerkzeuge

Seilbohrgreifer

Bei Seilbohrgreifern unterteilen sich in die drei Grundsysteme

- Scherengreifer,
- Rollengreifer und
- Hydrauliksysteme.

Für große Durchmesser (bis zu 3000 mm sind möglich) kommt überwiegend das Rollensystem zum Einsatz. Hydraulische Greifer haben sich im Gegensatz zu hydraulischen Schlitzwandgreifern noch nicht durchsetzen. Ein Großteil der Seilgreifer arbeitet mechanisch. Mechanische Seilgreifer werden in *Einseil-* und *Zweiseilgreifer* unterteilt [34].

Einseilbetrieb: Beim Einseilbetrieb wird der Greifer in geöffnetem Zustand in das Bohrloch abgesenkt. Bevor das Bohrlochtiefe erreicht ist, wird der Greifer fallengelassen. Das Aufschlagen löst einen Mechanismus aus, der beim Ziehen des Greifers, das Schließen der Schaufeln auslöst. Nach dem Herausziehen muss der Greifer langsam in eine Auslösekrone gefahren werden. Somit öffnet sich der Greifer und das Bohrgut fällt aus den Greiferschalen. Einseilgreifer werden mit Schneiddurchmessern zwischen 350 und in etwa 2500 mm angeboten (siehe Tab. 3.21).

Tab. 3.21: Einseil-Bohrgreiferkörper und Schaufelvorsatz

Quelle	Bezeichnung	Schneidendurchmesser mm	Bohrdurchmesser mm	Gewicht kg
ÖBGL 2015 [45]	K.6.10.0520	520	k.A.	1200
	K.6.11.0520			410
	K.6.10.2350	2350	k.A.	11 000
	K.6.11.2350			3300
Leffer [108]	L 370	350	470/390	660
	L 1840	1820	2000/1910	7500
Liebherr [55]	L 490 SK	490	600	k.A.
	L 2750 SK	2570	3000	k.A.

Zweiseilbetrieb: Greifer im Zweiseilbetrieb funktionieren mit zwei Seilen, einem am Schließmechanismus und einem am Kettengehänge des Bohrgreifers. Der Greifer wird beim Einbringen in das Bohrrohr aus gewünschter Höhe mit geöffneten Schalen fallengelassen. Bei Wiederholung dieses Vorganges, wird eine gewisse Meißelwirkung erzielt. Im Anschluss wird der Schließmechanismus ausgelöst und der Greifer gezogen. An geeigneter Stelle erfolgt die Entleerung. Die Handhabung des Zweiseilgreifers erfordert mehr Geschicklichkeit und Erfahrung, daher wird in der Praxis das Einseilverfahren favorisiert.

Hydraulikgreifer: Im Greifer sind Hydraulikzylinder eingebaut, deren Versorgung über zwei Hydraulikschläuche bewerkstelligt werden. Sie verlaufen entlang des Seiles und werden zu Trommeln am Mast geführt. Die beliebige Anzahl an Öffnungs- und Schließvorgänge lassen eine gute Lockerung im Bohrloch und somit eine gute Grableistungen zu. Zudem ist die Handhabung wesentlich einfacher als bei den mit Seilbetrieb gesteuerten Greifern.

Ventilschlagbüchsen

Schlamm- bzw. Schlagbüchsen finden gerne bei wasserführenden sandigen Böden Anwendung. Sie dienen dem Säubern der Bohrlochsohle. Der Boden der Büchsen ist mit ein oder zwei Klappen versehen. Beim Auftreffen öffnen sich die Klappen und das zu räumende Material dringt in die Büchse ein. Zum Entleeren werden systemabhängig die Klappen geöffnet, kleinere Büchsen werden einfach umgekippt [34].

Kiespumpen

Kiespumpen eignen sich besonders für den Einsatz bei kleinen Rohrdurchmessern und bei kiesigen Böden im Grundwasserbereich. Kiespumpen nehmen das Material über einen Ventilmechanismus auf. Im Bohrlochtiefsten wird ein Kolben auf- und abbewegt und das Material wird in die Büchse gezogen. Ventilkappen verhindern, dass aufgenommenes Material wieder herausfällt. Das Entleeren erfolgt durch Öffnung des unteren Teils bzw. durch umkippen [34].

Meißel

Meißel dienen der Durchörterung von Hindernissen und schwer lösbarem Böden. Hierfür werden geschweißte Stahlkörper mit einer Schneide aus gewünschter Fallhöhe in das Bohrloch fallengelassen. Zum Schutz des Bohrrohres sind in der oberen Hälfte Ringe angeordnet, die den Meißel im Bohrrohr führen. Aufgrund der hohen Einwirkungen sind Reparaturarbeiten am Meißel nicht vermeidbar. Meißel werden aus Blattmeißel und Kreuzmeißel (bei Bedarf mit Tangentialschneiden) hergestellt. Die Schneiden sind gewöhnlich hartmetallvergütet. Es sind Durchmesser bis zu 3000 mm bei einem Einsatzgewicht von bis 18 t verfügbar [32, 34].

3.3.5 Bohrpfähle - Verrohrung

3.3.5.1 Geräte zur Herstellung der Verrohrung

Oszillierende Verrohrungsmaschinen mit Axialkraft

Verrohrungsmaschinen sind ein Anbaugeräte für Hydraulik- und Seilbagger. Sie werden am Grundrahmen des Baggers befestigt, der Antrieb wird üblicherweise durch die Hydraulik des Trägergerätes bewerkstelligt. In Ausnahmefällen oder für besonders große Verrohrungsmaschinen finden separate Aggregate Verwendung. Die Steuerung erfolgt von der Führerkabine aus oder per Fernbedienung [34].

Zum Einbringen der Verrohrung wird das Rohr in eine hydraulische Rohrschelle eingespannt. Zwei Hydraulikzylinder dienen der Auf- und Abwärtsbewegung, zwei weitere der oszillierenden Drehbewegung. Die bewegliche Lagerung der beiden vertikal ausgerichteten Zylinder ermöglicht gleichzeitiges Drehen und Drücken. Durch das sogenannte SSchockieren wird die Rohrtour auf und ab bewegt, was den Ein- und Ausbau erleichtert. Derzeit am Markt befindliche Systeme leisten bis zu 8350 kN m Drehmoment und bringen Rohre mit einem Durchmesser bis zu 3000 mm (siehe Tab. 3.22) in den Boden ein. Die Geräte haben ein Dienstgewicht bis zu 50 t [34]. Verrohrungsmaschinen für Drehbohranlagen sind kleiner dimensioniert. Tab. 3.23 die Bandbreite an verfügbaren Gerätegrößen dar.

Tab. 3.22: Verrohrungsmaschinen für Seilbagger

Quelle	Bezeichnung	Max. Rohr- durchmesser	Max. Drehmoment	Max. Hubkraft	Gewicht
	-	mm	kN m	kN	kg
ÖBGL 2015	[45] K.4.00.0880	880	900	650	7000
	K.4.00.3000	3000	8350	7250	52 000

Tab. 3.23: Verrohrungsmaschinen für Drehbohranlagen

Quelle	Bezeichnung	Max. Rohr- durchmesser	Max. Drehmoment	Max. Hubkraft	Gewicht
	-	mm	kN m	kN	kg
ÖBGL 2015	[45] K.4.01.1000	1000	630	770	5000
	K.4.01.2500	2500	3000	2950	25 000
Bauer	[15] BV 1180	1180	1075	1450	7500
	BV 2000	2000	2965	2430	20 900
Liebherr	[80] VRM 120 KL	1200	1070	1000	7000
	VRM 250 KL	2500	3000	2950	25 000

Durchdrehende Verrohrungsmaschinen mit Axialkraft

Durchdrehende Verrohrungsmaschinen haben im Vergleich oszillierenden Vorteile im Hinblick auf das hohe Eigengewicht. Verrohrungsmaschinen sind mit einem eigenen Fahrwerk ausgestattet und als selbstständige Anlagen im Einsatz. Trotzdem haben sie sich nicht sonderlich am Markt durchgesetzt. Systeme am Stand der Technik leisten bis zu 4200 kN m Drehmoment bei einem Durchmesser von bis zu 3000 mm. Ihr Dienstgewicht liegt bei bis zu 68 t [34].

Rohrzieheinrichtungen mit reiner Axialkraft

Besteht keine Möglichkeit zur Aufnahme der Reaktionskräfte, z.B. beim Ziehen von Abschal-rohren einer Schlitzwand, kommen Ziervorrichtungen zum Einsatz. In den Vorrichtungen ist

ein Hydraulikaggregat, welches elektrisch betrieben wird, verbaut. Zu beachten gilt es, dass die Hubgeschwindigkeit relativ langsam ist [34].

Vibrationsverfahren

Das Vibrationsverfahren findet primär im Offshore-Bereich Anwendung. Da das Verfahren trotzdem in Ausnahmefällen auf Baustellen am Festland verwendet wird, sei an dieser Stelle der Gürtelrüttler erwähnt. Bei dem Verfahren wird das Rohr mit einer Schelle eingespannt und durch Vibrationen ins Schwingung versetzt. Der Rohrvortrieb erfolgt parallel zum Aushub [34].

Pneumatisches Hochstrasser-Wiese-Verfahren

Eine Besonderheit bei Rohrvortriebsmaschinen stellt das Hochstrasser-Wiese (HW)-Verfahren dar. Das Bohrohr wird mithilfe einer aufgesetzten Schwinge in vorgetrieben. Hierfür wird die mit Druckluft betriebene Schwinge in eine Hin- und Herbewegung versetzt. Anschlagnoppen leiten den Drehimpuls an die Rohre weiter. Somit entsteht eine oszillierende Drehbewegung, die die Reibung in der Ruheposition in eine Gleitreibung überleitet. Das Bohrohr dringt in den Untergrund ein. Vorzugsweise wird das Rohr im Ganzen eingebracht, Rohrdurchmesser bis 2500 mm sind möglich [34].

3.3.5.2 Bohrrohre

Nippelbohrrohre sind Stahlrohr mit Schnellverbindungen. Zwei Rohrschüsse werden je nach Durchmesser mit 8 bis 24 Schrauben miteinander verbunden. Die Verbindung müssen den hohen Zug- und Druckkräften sowie Drehmomenten standhalten und dürfen dabei deren Form nicht verlieren. Hierfür werden ausschließlich Verbindungen aus hochfestem Vergütungsstahl eingesetzt. Bei Bedarf neben der ohnehin luftdichten Ausführung der Verbindung diese mithilfe einer entsprechenden Dichtung wasserdicht ausführbar.

Ähnlich dem Nut-Feder-Prinzip wird über das Nippelteil des vorhergehenden Rohres das Muffenteil des nachfolgenden Rohres gesteckt, Keile übernehmen die lotrechte Ausrichtung der Verbindungslöcher. Anschließend werden die Verbindungselemente bestehend aus Konusring, Gewinding, Schraube und O-Ring (ebenfalls aus vergütetem Stahl) eingesetzt und miteinander verschraubt. Diese Teile sind den größten Belastungen ausgesetzt und verschleißbedingt auswechselbar. Am Fuß der Rohrtour ist ein Schneidschuh angebracht, dessen Zähne an die Bodenbeschaffenheit anzupassen sind.

Die Bohrrohre eignen sich sowohl für die Verrohrung mit Verrohrungsmaschinen als auch für das Drehbohrverfahren. Es werden Längen zwischen 1 und 6 m (in Meterschritten) und Durchmesser bis zu 3000 mm (siehe Tab. 3.24) angeboten. Neben einwandigen Rohr ist die doppelwandige Ausführung besonders bei Verwendung einer Verrohrungsmaschine bei Rohren ab einem Durchmesser von 1200 mm empfohlen. Beschädigungen am Rohr lassen sich somit weitgehend vermeiden. Besonderes Augenmerk ist auf die Reinigung nach Ausbau zu legen. Die Praxis hat gezeigt, dass eine Reinigung mit Hochdruckpumpen die besten Ergebnisse erzielt während vom nachträgliche einfetten abzuraten ist [34, 64].

3.3.5.3 Abfangschellen

Zum Ziehen der Bohrrohre ist eine Abfangschelle (siehe ??) erforderlich. Sie verhindert, dass nach dem Lösen der Verschraubung der noch im Boden befindliche Teil des Bohrrohres in das Bohrloch absackt. Es handelt sich um zweiteilige Schellen, die mit einem Zylinder geöffnet und geschlossen werden. Antrieb und Steuerung erfolgt entweder durch die Bordhydraulik der Drehbohranlage oder ein separates Hydraulikaggregat.

Tab. 3.24: Bohrrrohr, doppelwandig, Nutzlängen 1 bis 6 m

Quelle	Bezeichnung	Außen- durchmesser	Nutz- länge	Wandstärken innen/außen	Gewicht
	-	mm	m	mm	kg
ÖBGL 2015	[45] K.6.00.0621-6	620	1,0–6,0	10/15	465–2300
	K.6.00.2501-6	2500	1,0–6,0	20/20	4080–20 400
Liebherr	[71] Bohrröhre	620	1,0–6,0	8/12	450–2345
	Bohrröhre	2000	1,0–6,0	10/18	1590–9050
Bauer	[14] Bohrröhre	620	1,0–6,0	10/15	403–2081
	Bohrröhre	2500	1,0–6,0	15/20	2960–14 360

Tab. 3.25: Abfangschellen

Quelle	Bezeichnung	Max. Schellen- durchmesser	Gewicht
	-	mm	kg
ÖBGL 2015	[45] K.4.20.0620	620	670
	K.4.20.2500	2500	1500
Leffer	SPA 880	880	850
	SPA 1500	1500	1150

3.3.6 Mikropfähle

Zur Herstellung von Mikropfählen eignen sich ein Großteil der in Abschnitte 3.3.1 bis 3.3.5 beschriebenen Geräte. Da es sich verfahrenstechnisch um gleichartige Geräte handelt, deren Unterschied die Anpassung der Gerätegröße, -leistung und -ausrüstung für die Herstellung kleiner Durchmesser ist, wird auf eine detaillierte Beschreibung der Gerätetechnik für Mikropfähle verzichtet.

3.4 Schlitzwände

Schlitzwandarbeiten erfordern eine Reihe von Geräten und Maschinen. Nachfolgend sind die wichtigsten Geräte aufgelistet:

- Trägergerät
- ggf. Schlauchrollen, Schlauchtrommel
- Werkzeuge
- Aufbereitungsanlage

3.4.1 Trägergerät

Als Trägergeräte dienen Hydraulik- und Seilbagger mit Raupenfahrwerk wie sie bereits in Abschnitt 3.3.3.1 und Abschnitt 3.3.4.1 ausführlich beschrieben wurden, wobei Hydraulikbagger eine eher untergeordnete Rolle spielen. Bei der Verwendung von Schlitzwandfräsen und hydraulischen Schlitzwandgreifern ist das Trägergerät zusätzlich mit Schlauchrollen und Schlauchtrommeln auszustatten. Das Schlauchtrommelsystem muss für die entsprechende zu erreichende Tiefe ausgelegt werden [64, 81].

3.4.2 Schlitzwerkzeuge

Schlitzwandgreifer

Schlitzwandgreifer sind in mechanische und hydraulische Schlitzwandgreifer eingeteilt. Unabhängig vom Typ werden Greifer bis zu Tiefen von 50 m eingesetzt. Maulweiten zwischen 2,80 und 4,20 m bei Breiten zwischen 400 und 2000 mm (siehe Tab. 3.26 und Tab. 3.27) werden angeboten. Die Greifer haben bei einer Bauhöhe von bis zu 12 m ein Gewicht bis zu 20 t. [30, 55, 64].

Mechanische Schlitzwandgreifer: Der Schließmechanismus von Seilgreifern wird durch zwei Seile ausgelöst. Die Funktionsweise ist mit den von Bohrgreifern im Zweiseilbetrieb ident. Um möglichst hohe Schließkräfte zu erzeugen, wird das Schließseil nach dem Prinzip eines Flasenzuges 3 bis 6 mal eingesichert.

Tab. 3.26: Schlitzwandgreiferkörper (mechanisch) inkl. Greiferschalen

Quelle	Bezeichnung	Min. Schlitzbreite	Max. Maulweite	Gewicht
	-	mm	mm	kg
ÖBGL 2015 [45]	K.9.10.0428	400	2800	9800
	K.9.12.0428			1700
	K.9.10.2028	2000	2800	30 000
	K.9.12.2028			6000
Leffer [110]	SWG 2.8(3.4)-5/400-600	400–600	2800–3400	9800–11 600
	SWG 3.2-6/1000-1500	1000–1500	2400–3200	17 000–21 500

Hydraulische Schlitzwandgreifer: Hydraulische Schlitzwandgreifer öffnen und schließen die Greiferschalen durch hydraulische Zylinder. Die Hydraulikversorgung erfolgt über Schläuche ausgehend vom Trägergerät. Die Abmessungen ähneln denen der mechanischen Greifer. Eine Sonderform bilden am einer Kellystange geführte Greifer, deren mögliche Tiefe ist allerdings mit 30 m beschränkt. Die besonders präzise Führung im Schlitz erlaubt eine höherer Arbeitsgenauigkeit.

Tab. 3.27: Schlitzwandgreiferkörper (hydraulisch) inkl. Greiferschalen

Quelle	Bezeichnung	Min. Schlitzbreite	Max. Maulweite	Gewicht
	-	mm	mm	kg
ÖBGL 2015 [45]	K.9.11.0328	300	2800	9000
	K.9.12.0328			1500
	K.9.11.1528	1500	2800	27 000
	K.9.12.1528			4500
Liebherr [74]	HSG 5 L	500–1800	2800	16 800–25 100
	HSG 18 L	500–1800	3400	17 900–26 500
Bauer [16]	DHG V 2.400	600–1500	2400	13 910–18 390
	DHG V 4.200	600–1500	4200	19 000–24 130

Schlitzwandfräse

Der Einsatz von Schlitzwandfräsen ist erst ab einer Tiefe von 40 m und ab Wandgrößen von über 5000 m² wirtschaftlich. Derzeit lassen sich mit Standard-Geräten Tiefen bis 120 m erreichen, in Ausnahmefällen und mit speziellem Gerät bis zu 200 m. Das Lösen erfolgt mittels gegenläufig

drehender Fräsrädern, welche das Material zu einer Saugöffnung fördern. Das zerkleinerte Bohrgut-Suspension-Gemisch wird über Saugleitungen nach oben gefördert und zur Aufbereitungsanlage weitergeleitet.

Die Rollen der Fräse sind in Abhängigkeit des Bodens mit Rollenmeißel, Rundschaftmeißel oder Japanzähnen besetzt. Mit heutigen Fräsen lassen sich Breiten zwischen 500 und 3200 mm (siehe Tab. 3.28) herstellen, das Gewicht der Fräsen liegt zwischen 20 und 45 t [22, 30, 55, 81].

Tab. 3.28: Schlitzwandfräsen

Quelle	Bezeichnung	Min. Schlitzbreite	Stichlänge	Dreh- moment	Gewicht
	-	mm	mm	kN m	kg
Liebherr	[76] LSC 8-18 L	800–1800	2800	110	29 000–34 000
	LSC 8-18 L	800–1800	3200	110	38 000–46 000
Bauer	[22] BC 32	640–1500	2800–3200	91	25 600–34 000
	BC 50	1200–2000	2800–3200	120	45 500–70 000

Schlitzwandmeißel

Werden im Laufe des Aushubs Hindernisse oder dicht gelagerte Schichten angetroffen, werden diese mit Meißeln durchörtet und gelockert. Die am Seil des Baggers geführten Meißel werden in den Schlitz eingebracht und fallengelassen. Die Ausführungen sehen sehr unterschiedlich aus, häufig kommen Zahnmeißel oder Felsmeißel mit Schneidleisten zum Einsatz. Da Gewicht schwankt je nach Größe zwischen 3 bis 15 t [30].

3.4.3 Entsandungsanlage

Aufbereitungsanlagen¹ dienen dem Trennen der mit Bodenmaterial angereicherten Suspension in Feststoffe und wiederverwendbare Suspension. Die maximale Beschickungsmenge muss auf die Förderleistung der Schlitzwandfräse angepasst werden und wird in Kubikmeter pro Stunde angegeben. Mit großen Anlagen (siehe Tab. 3.29) lassen sich so bis zu 600 m³/h an mit Boden angereicherter Suspension reinigen. Die wichtigsten Bauteile der Anlagen sind

- ein Grobsieb,
- eine Auffangwanne,
- ein Zyklon mit zugehöriger Zyklonspeisepumpe und
- ein Feinsieb [11].

Grobsieb

Das Grobsieb dient dem Abscheiden von Steinen größer 5 mm. Die verunreinigte Suspension wird auf dem Grobsieb verteilt. Eine abwärts geneigte Siebstellung verhindert das Verkleben des Siebes. Rüttler verstärken zusätzlich die Förderung der Steine zum Auswurf hin. Das vorgereinigte Material mit einer Korngröße von maximal 5 mm gelangt in die Auffangwanne.

Zyklon

Zyklonpumpen fördern die vorgereinigte Suspension mit einem Druck von 2 bis 3 bar in die Zykclone. In ihnen wirken Zentrifugalkräfte, welche eine Trennung in einen Oberlauf mit Suspension und einen Unterlauf mit verunreinigter Suspension bewirkt. Der Reinigungsgrad wird durch mehrere kleine anstatt einem großen Zyklon erhöht.

¹In der Fachsprache gleichbedeutend als Entsandungsanlagen oder Separationsanlagen benannt.

Feinsieb

Die im Unterlauf entwichene eingedickte Suspension fällt auf ein aufwärts gerichtetes Feinsieb und wird weiter entwässern. Schwingungen fördern das Material hinauf bei gleichzeitiger Trennung in erdfeuchten Boden und gereinigte Suspension. Siebeinsätze zwischen 0,16 und 0,40 mm werden bei Feinsieben eingesetzt.

Doppelzyklonierung

Wird ein höherer Grad der Reinigung gefordert, bedient man sich der Doppelzyklonierung. Während die erste Reinigungsstufe aus einem Zyklonierungsvorgang in einem großen Zyklon geschieht, werden in der zweiten Stufe eine Reihe von kleinen Zyklonen verwendet. Hierfür muss eine zweite Auffangwanne installiert werden, welche die Suspension der ersten Reinigungsstufe auffängt.

Tab. 3.29: Entsandungsanlagen für Bentonitsuspensionen, einstufig

Quelle		Bezeichnung	Volumendurchfluss	Motorleistung	Gewicht
		-	m ³ /h	kW	kg
ÖBGL 2015	[45]	A.2.21.0050	50	15	6000
		A.2.21.0200	200	41	12 500
Bauer	[11]	BE 100-60 (L)	100 (100)	22 (17,3)	2800 (2350)
		BE 425-60	425	75	9700
Liebherr	[79]	SP 300 S	300	116	18 300
		SP 600 C	600	287	49 200

3.5 Düsenstrahlverfahren

Die Geräte der Herstellung von DSV-Körpern variieren sehr stark, je nachdem ob das Ein-, Zwei- oder Dreiphasen-Verfahren zu Anwendung kommt. Essenzielle Geräte sind:

- Bohrgeräte
- Bohr- und Injektionsgestänge
- Bohrkronen und Düsenträger
- Siloanlage
- Injektionsmischer und Rührwerke
- Hochdruckpumpen

3.5.1 Bohrgeräte

Trägergeräte sind je nach Einsatzort und äußeren Rahmenbedingungen Hydraulikbagger (mit entsprechender Ausrüstung als Großbohrgerät) sowie kleine Bohrgeräte für beengte Verhältnisse. Daneben eignen sich Drehbohrgeräte und Ankergeräte als Trägergeräte. Die Arbeitshöhen der Geräte liegen somit zwischen 2 und 30 m (siehe Tab. 3.30).

Die Trägergeräte werden dann mit der benötigten Ausrüstung (wie Lafetten, Bohrgestänge, Spülkopf, usw.) zum Bohren ausgestattet. Überwiegend kommen allerdings für das DSV adaptierte Ankerbohrgeräte zum Einsatz. Neben zusätzlichen Steuer-, Mess- und Überwachungseinrichtungen sind Mastverlängerungen und Bohrantriebe mit Spannvorrichtung erforderlich. Sie ermöglichen die Verwendung langer Bohrröhre und Spülgestänge [38, 43].

Tab. 3.30: Bohrgeräte für das Düsenstrahlverfahren

Quelle		Bezeichnung	Motorleistung	Max. Bohrtiefe	Gewicht
		-	kW	m	kg
Bauer	[18]	BG 15 H	230	29,9	56 100
		BG 30	403	35,5	107 000
Klemm Bohrtechnik	[62]	KR 709-3G	160	20,0	15 600
		KR 806-5G	180	21,2	21 900
Beretta	[28]	T21	14	k.A.	771
	[27]	T159-M1	147	50	17 500

3.5.2 Bohr- und Injektionsgestänge

Die Einzelelemente des Gestänges werden dicht zusammengeschraubt und haben Durchmesser zwischen 60 und 140 mm. Das Düsen erfolgt immer in einem Zug, dementsprechend sind Unterbrechungen für Verlängerungen/Verkürzungen des Gestänges nur in Ausnahmen zulässig. Eine Teilung wird bei beengten Platzverhältnissen gezwungenermaßen notwendig. Generell sollten möglichst wenige Verbindungen angestrebt werden, da diese – mit besonderem Augenmerk auf die hohen Drücke – immer Schwachstellen darstellen.

Am Trägergerät montierte Klemmköpfe ermöglichen neben der Übertragung von Drehmomenten auch das Aufbringen von Druckkräften. Die Gestänge der verschiedenen Verfahren unterscheiden sich wesentlich. Beim Zwei- und Dreiphasen-Verfahren werden zusätzliche Leitungen notwendig, um Druckluft und Wasser in das Bohrloch zu bringen. [81].

3.5.3 Bohrkronen und Düsenträger

Die Bohrkronen des DSV ähneln im Wesentlichen normalen Bohrköpfen, zusätzlich sind jedoch zwei radial angeordnete Düsen verbaut. Der Durchmesser dieser Düsen ist bis zu 8 mm. Für den Fall der Trennung von Bohren und Injizieren, sind bis zu vier Düsen anzuordnen. Da die Austrittsgeschwindigkeit bis zu 300 m/s beträgt und es zu hohem Materialverschleiß kommt, werden die Düsen aus gehärtetem Spezialstahl hergestellt. Dennoch neigen die Düsen zu Verschleißerscheinungen und müssen regelmäßig kontrolliert und getauscht werden [52, 81].

3.5.4 Siloanlage

Die Siloanlage dient der Lagerung von Zement und etwaigen Zusatzstoffen auf der Baustelle. Die Anlagen werden stets in Verbindung mit Förderschnecken verwendet. Sie sind heutzutage mit automatisierten Messeinrichtungen ausgestattet. Automatische Mischanlagen garantieren über den Bau hinweg die selbe Rezeptur [32].

3.5.5 Injektionsmischer und Rührwerke

Verwendung finden im Normalfall herkömmliche Turbomischer mit Rührwerk. Die Dosierungsanlage muss entsprechend leistungsfähig sein. Eine Alternative dazu sind vollautomatische Mischanlagen, welche heute als der Standard gelten. Während bei der Kapazität von Mischanlagen das Doppelte von regulären Injektionsarbeiten angenommen werden kann, ist der Zeitbedarf auf rund 10 % dessen zu setzen. [81].

3.5.6 Hochdruckpumpen

Die verwendeten Hochdruckpumpen müssen Drücken zwischen 100 und 600 bar bei Durchflussmengen bis zu 300 l/min (siehe Tab. 3.31) zur Verfügung stellen können. Druck- und Mengenregler dienen der Einhaltung der eingestellten Bohr-, Vorschneid und Düsparemeter (Suspensionsdruck und -volumen, Ziehgeschwindigkeit). Abhängig vom Verfahren ist zusätzlich zu Hochdruckpumpen für Suspension und Wasser ein Kompressor für Druckluft erforderlich [32, 43, 52, 81].

Tab. 3.31: Hochdruck-Injektionsanlagen, Hochdruckpumpen

Quelle	Bezeichnung	Motor. leistung	Max. Volumenstrom	Max. Menge	Gewicht
	-	kW	l/min	bar	kg
ÖBGL 2015 [45]	J.6.10.0107	107	220	220	3500
	J.6.10.0700	700	90	900	18 500
ÖBGL 2015 [45]	J.6.11.0110	110	110	400	10 000
	J.6.11.0390	390	520	700	16 000
Obermann MAT [82]	HD 130	55	345	150	2,600
	HD 115/1 (/2)	308 (616)	320 (640)	520	9500 (15 000)

3.5.7 Entsandungsanlage

Entsandungsanlagen wurden in Abschnitt 3.4.3 bereits ausführlich beschrieben und eignen sich für das DSV gleichermaßen.

3.5.8 Dekantierzentrifuge

Dekantierzentrifugen, auch Dekanter genannt, dienen als optionale weitere Reinigungsstufe von vorgereinigter Gebrauchtsuspension. Mit derartigen Geräten lassen sich feine und feinste Feststoffe aus Suspensionen separieren. Es wird einerseits die Fraktion der Feststoffe aus dem Gerät ausgeworfen, andererseits das Zentrat. Das Zentrat, dessen Aussehen Schmutzwasser ähnelt, lässt sich wieder zum Mischen von neuer Suspension verwenden, allerdings nicht beliebig oft [10]. Tab. 3.32 gibt einen Überblick über die erhältlichen Größen von Dekantierzentrifugen.

Tab. 3.32: Zentrifugen-Dekanter

Quelle	Bezeichnung	Rotor- durchm.	Massen- durchsatz	Volumen- durchsatz	Leistungs- bedarf	Gewicht
	-	mm	t/h	m ³ /h	kW	kg
ÖBGL 2015 [45]	A.3.05.0900	900	15	100	170	14 000
	A.3.05.1400	1400	30	150	270	22 000
Bauer [10]	BD90/75	600	18	90	105	12 500

Flockmittelstation

Als Zusatzausrüstung zur Dekantierzentrifuge führt Fa. Bauer eine Flockmittelstation an, welche die optimale Aufbereitung des Flockmittels zur Beimischung in den Dekanter gewährleisten soll. Die Anlage kann sowohl feste als auch flüssige Polyelektrolyte ansetzen und aufbereiten, welche dafür sorgen, dass sich feinste Partikel zusammenlagern. Dieser Prozess wird als Flockung

bezeichnet. Die in der *Produktinformation: BD 90/75 Dekantierzentrifuge, Stand 02/2016* angeführte Anlage stellt eine Polyelektrolyt-Konzentration von bis zu 1 % bei einer Mischleistung von $5 \text{ m}^3/\text{min}$ her.

3.6 Zusammenfassung

Das Kapitel der Gerätetechnik widmet sich sämtlichen Geräten, die zur Herstellung von Spundwänden, Pfählen, Schlitzwänden und DSV-Säulen erforderlich sind. Hierfür wurden zu Beginn die Grundgeräte samt deren Ausstattung mit Mäkler/Gittermastausleger, Vorschubeinrichtungen, Winden und die Aufrichte- und Abstützzylinder beschrieben. Die Beschreibung der Werkzeuge erfolgt in den jeweiligen Unterkapiteln der Gewerke. Immer höhere Anforderungen an die Flexibilität von Unternehmen und Geräten führte zur Entwicklung von Universal-Systemen. Die Gerätekombinationen, die mit einem Mäkler ausgestattet sind, ermöglichen die Erbringung der Leistung von mehreren Gewerken. Es werden kombinierte Ramm- und Bohrgeräte zur Herstellung von Spundwänden, für Elementen des Düsenstrahlverfahrens sowie zur Produktion von Pfählen eingesetzt. Schnellwechsellanlagen erlauben den raschen Tausch von Werkzeugen.

Die Wahl des Trägergerätes zur Einbringung von Spundbohlen richtet sich üblicherweise nach der Größe und dem Gewicht des Rammgutes. Der überwiegende Anteil daran sind Hydraulikbagger mit einem Mäkler, der der Führung von Werkzeug und Rammgut dient. Das gängigste Verfahren ist das Rammen. Hierfür wird ein Gewicht fallengelassen, welches die Schlagenergie auf die Spundbohle überträgt. Spitzendruck, Mantelreibung und Schlossreibung werden kurzzeitig überschritten, sodass das Rammgut eindringen kann. Die Systeme unterscheiden sich durch unterschiedliche Kolbengewichte und Schlagzahlen. Zum Schutz des Rammgutes sind Rammhauben vorzusehen. Neben dem Rammen gibt es das Vibrationsverfahren. Das durch Klemmen mit dem Rammgut verbundene Vibrationssystem versetzt das Rammgut mit Unwuchten in Schwingung. Der umliegende Boden wird dadurch in einen flüssigkeitsähnlichen Zustand versetzt. Die Systeme müssen stets durch eine Schwingungsdämpfung vom Trägergerät getrennt sein. Zuletzt steht die Einpresstechnik zur Verfügung. Die Systeme sind an einem Mäkler geführt, selbstschreitend oder freireitend und arbeiten allesamt mit dem Prinzip der Überwindung von Spitzendruck und Mantelreibung durch hohe statische Widerstandskräfte.

Die *Trägergeräte* zur Einbringung von Pfählen unterscheiden sich kaum von jenen der Spundwände. Einzige Ausnahme bilden Seilbagger mit Gittermastausleger, die für das Schlagbohren zum Einsatz kommen. Bedient man sich zur Einbringung von Pfählen der Ramm-, der Vibrations- oder der Einpresstechnik, sind die Gerätschaften mit den zuvor für Spundwände beschriebenen ident. Zum Schutz des Rammgutes (bei Stahlbeton- und Holzpfählen erforderlich) ist ein zusätzliches Futterholz zwischen Rammhaube und Rammgut vorzusehen. Im Falle des Drehbohrens werden drei verschiedene Methoden unterschieden. Beim *Kelly-Verfahren* werden Drehmoment und Vorschub mit einem KDK mit Durchgang über eine teleskopierbare Kellystange an das Drehbohrwerkzeug (Vollschnecken, Bohreimer, o.ä.) übertragen. Ist eine Verrohrung erforderlich, wird diese über einen unter dem KDK angeordneten Drehteller (auch Rohrmitnehmer) abgeteuft. Das *SOB-Verfahren* bedient sich eines KDKs mit Betonierkopf. Bohrwerkzeug ist eine Endlosschnecken mit hohlem Seelenrohr, die von einem Schneckenanführer angeführt wird. Je nach Größe des Seelenrohres und dem Anteil der Verdrängung spricht man von Teil- oder Vollverdrängungspfählen. Das *VdW-System* bedient sich eines KDKs mit Doppelkopfgetriebe. Ein Antrieb dient dem Vortrieb des Bohrrohres, der andere treibt gegenläufig dazu das in der Verrohrung geführte Bohrwerkzeug an. Das Bohrwerkzeug ist eine Endlosschnecke mit kleinem Seelenrohr. Beim *Greiferbohr-Verfahren* werden am Seil geführte Greifer, Ventilschlagbüchsen oder Kiespumpen zur Förderung des Material verwendet. Die Verrohrung des Bohrloches gilt als unabdingbar.

Diese wird in den meisten Fällen mit am Trägergerät befestigten oszillierenden Verrohrungsmaschinen eingebracht. Alternativ dazu stehen Anlagen des Hochstrasser-Wiese-Verfahrens sowie des Vibrationsverfahrens zur Verfügung.

Die Trägergeräte der Schlitzwandherstellung sind ausschließlich Seilbagger mit Gittermastausleger. Als Aushubwerkzeug dienen in den meisten Fällen mechanische oder hydraulische am Seil geführte Greifer. Ist eine Aushubleistung von mehr als $150 \text{ m}^3/\text{AT}$ gefordert, muss auf Schlitzwandfräsen zurückgegriffen werden. Zwei sich gegenläufig drehende, mit Rundschäftmeißel besetzte Fräsräder lösen den Boden und fördern diesen über ein Schlauchsystem zur Wiederaufbereitungsanlage. Die Anlagen entsanden die mit Boden angereicherte Suspension durch eine Kombination von Sieben und Zyklonen. Neben den beschriebenen Anlagen müssen eine Mischanlage, Vorratssilos zum Quellen der Betonitsuspension und ein System aus Pumpen und Schläuchen auf der Baustelle vorgehalten werden.

Zur Herstellung von DSV-Elementen sind eine Vielzahl von Geräten erforderlich. Bei Arbeiten im Bestand dienen kleine Bohrgeräte mit der entsprechenden Ausrüstung für das DSV als *Trägergeräte*. Auf Baustellen mit ausreichend Platz für großes, schweres Gerät kommen kombinierte Ramm- und Bohrgeräte zum Einsatz. Dementsprechend variieren Größe und Leistung der Geräte erheblich. Das *Bohr- und Injektionsgestänge* wird dicht zusammengeschraubt und sollte während dem Düsen nicht verlängert oder verkürzt werden. Zudem ist ein Minimum an Verbindungen von Vorteil, da jede Verbindung eine Schwachstelle im System darstellt. *Bohrkronen und Düsen* sind aufgrund der hohen Drücke aus gehärtetem Spezialstahl herzustellen. Die *Hochdruckpumpen* erzeugen Drücke bis zu 600 bar und müssen Durchflussmengen bis zu 300 l/min zur Verfügung stellen können. Messeinrichtungen ermöglichen das Anpassen der Parameter an die jeweiligen Tätigkeiten wie Bohren, Vorschneiden oder Düsen. Zur Rücklaufbearbeitung kommen neben der bereits beschriebenen *Entsandungsanlagen* zusätzlich *Dekantierzentrifugen* zum Einsatz. In den Zentrifugen werden Feststoffe und Zentrat voneinander getrennt. Bei bestimmten Böden wird eine Flockmittelstation erforderlich. Die Zuführung eines Flockmittels dient der Zusammenlagerung feinsten Partikel, sodass diese in den Zentrifugen abgeschieden werden können.

Für die wichtigsten Geräte wurde ein Vergleich der Gerätekennwerte (Leistung, Abmessungen und Gewicht) namhafter Hersteller mit den Kennwerten der ÖBGL durchgeführt. Der Vergleich zeigt, dass das Verhältnis von Leistung zu Gewicht in vielen Fällen die Kennwerte der ÖBGL übertrifft. Dieser Umstand lässt sich durch die Weiterentwicklung der Gerätetechnik erklären. Um ein Beispiel an dieser Stelle zu nennen: gemäß ÖBGL stellt die größte verfügbare Drehbohranlage ein Drehmoment von 550 kNm bei einem Einsatzgewicht von 220 t zur Verfügung. Die LB 55 von Fa. Liebherr wiegt bei gleichem Drehmoment lediglich 159 t und somit um knapp 25 % weniger.

Die allgemeine Beschreibung der Gewerke im Kapitel 2 sowie der Gerätetechnik im gegenständlichen Kapitel haben gezeigt, dass den vermeintlich einfachen Abläufen der Verfahren eine Vielzahl von Prozessen zugrunde liegen. Zum Teil werden ganze Gruppen von Prozessen in der Literatur nicht erwähnt. Die in den Beschreibungen vernachlässigten Teilprozesse, welche zum Gesamtverständnis eines Gewerkes einen erheblichen Beitrag leisten, werden in Kapitel 4 graphisch dargestellt und beschrieben. So werden elf ausgewählte Herstellungsverfahren mit Prozessdarstellungen visualisiert. Basis der Prozessdarstellungen sind Beschreibungen aus der Literatur, welche nach Gesprächen mit Fachexperten berichtigt und angepasst wurden.

Kapitel 4

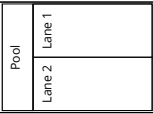
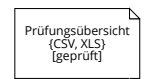
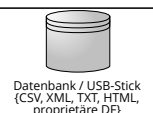
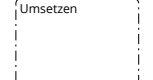
Prozesse

Das folgende Kapitel dient der Abbildung der Prozesse, die zur Erbringung der jeweiligen Bauleistungen erforderlich sind. Hierfür wird die als Standard geltende Modellierungssprache Business Process Model and Notation (BPMN) in der aktuellen Version 2.0 aus dem Jahr 2011 verwendet. Geschäftsprozesse lassen sich mit BPMN mit einer überaus reichhaltigen und präzisen Semantik darstellen. Somit eignet sich die Modellierungssprache bestens zur Abbildung der Arbeitsprozesse im Bauwesen. [53].

Die Prozessdiagramme der einzelnen Gewerke und Bauverfahren wurden mit dem Signavio Process Manager, einer webbasierten Softwarelösung der Signavio GmbH, erstellt [104]. BPMN bietet hierfür eine Vielzahl an Notationselementen. Zum besseren Verständnis der Prozessdiagramme werden die Elemente in Tab. 4.1 beschrieben.

Tab. 4.1: Symbole und Notation des BPMN 2.0

Symbol	Bezeichnung	Beschreibung
	Aufgabe	Eine Aufgabe ist eine Arbeitseinheit, die im Laufe des Prozesses zu erledigen ist.
	Zugeklappter Teilprozess	Das zusätzliche „Plus“ markiert eine Aufgabe als zugeklappten Teilprozess. Der Teilprozess wird in einem anderen Prozessdiagramm beschrieben.
	Sequenzfluss	Ein Sequenzfluss definiert die Abfolge der Ausführung.
	Nachrichtenfluss	Ein Nachrichtenfluss stellt die Nachrichten, bzw. den Informationsaustausch von einem an einen anderen Prozessteilnehmer dar.
	Exklusives Gateway	Ein exklusives Gateway stellt eine Verzweigung dar, welche den Fluss abhängig von einer Verzweigungsbedingung zu genau einer ausgehenden Kante leitet. Bei einer Zusammenführung wird auf die eingehenden Kanten gewartet, um den ausgehenden Fluss zu aktivieren.
	Paralleles Gateway	Ein paralleles Gateway stellt eine Verzweigung dar, an jener alle ausgehenden Kanten simultan aktiviert werden. Bei einer Zusammenführung wird auf die eingehenden Kanten gewartet, um den ausgehenden Fluss zu aktivieren.
	Komplexes Gateway	Ein komplexes Gateway stellt eine Verzweigung dar, an jener je nach Bedingung des Gateways alle oder nur bestimmte Kanten simultan aktiviert werden. Bei einer Zusammenführung wird auf die eingehenden Kanten gewartet, um den ausgehenden Fluss zu aktivieren.
	Start-Ereignis	Ein Start-Ereignis kennzeichnet den ersten Schritt und somit den Beginn eines Prozesses.

	Zwischen-Ereignis	Ein Zwischen-Ereignis kennzeichnet ein Ereignis zwischen Start- und End-Ereignis. Zwischenereignisse dienen zur Darstellung von Meilensteinen in einem Prozess.
	End-Ereignis	Ein End-Ereignis kennzeichnet den letzten Schritt und somit das Ende eines Prozesses.
	Ereignissymbol „Nachricht“	Der Empfang und Versand von Nachrichten kann den Prozess starten und beenden oder eintretende/auslösende Zwischenprozesse ermöglichen.
	Ereignissymbol „Zeit“	Das Symbol Zeit stellt periodische zeitliche Ereignisse Zeitpunkte oder Zeitspannen dar.
	Ereignissymbol „Fehler“	Ein Fehler in einem aktuellen Prozess aktiviert eine Kante, die ohne Fehler nicht aktiviert würde.
	Pools und Lanes	Pools und Lanes repräsentieren Verantwortlichkeiten für Aktivitäten und Prozesse. Pools und Lanes können Organisationen, Rollen oder ein System sein.
	Datenobjekt	Ein Datenobjekt repräsentiert Information im System. Es kann sich um Briefe, Dokumente, E-Mails oder Datensätze handeln.
	Datenspeicher	Datenspeicher sind Orte, an denen Daten des Prozesses gespeichert werden können und darauf zugegriffen werden kann.
	Gruppen	Gruppen dienen der Organisation und Gruppierung von zusammenhängenden Prozessen in einem Gesamtprozess.

Die Prozessdiagramme wurden für die zuvor beschriebenen sechs Gewerke erarbeitet, wobei aufgrund der Vielzahl an Verfahren die wichtigsten und am häufigsten vorkommenden Herstellungsverfahren beschrieben werden. Bei den Prozessdiagrammen handelt es sich um die Darstellung der Teilprozesse der Ausführung beginnend mit dem Einrichten der Baustelle bis hin zum Räumen der Baustelle. Folgende Herstellungsverfahren werden beschrieben:

- Spundwand - verankerte Wellenwand im Ramm-Verfahren
- Verdrängungspfahl - Ortbetonrammpfahl mit Fuß im Ramm-Verfahren
- Bohrpfahl - Einzelpfahl im Kelly-Verfahren
- Bohrpfahl - tangierende Bohrpfahlwand im SOB-Verfahren
- Bohrpfahl - überschnittene Bohrpfahlwand im VdW-Verfahren
- Bohrpfahl - Einzelpfahl im Schlagbohr-Verfahren
- Mikropfahl - Duktillpfahl im Ramm-Verfahren
- Mikropfahl - GEWI-Pfahl im Spülbohr-Verfahren
- Schlitzwand - Zweiphasen-Schlitzwand im Greifer-Verfahren
- Schlitzwand - Zweiphasen-Schlitzwand im Fräs-Verfahren
- Düsenstrahlverfahren - Einzelsäulen, unabhängig der Verfahrenstechnik

4.1 Spundwand - verankerte Wellenwand im Ramm-Verfahren

In diesem Unterkapitel werden die Arbeitsprozesse der Spundwand-Herstellung beschrieben und visualisiert. Die Beschreibung der Arbeitsschritte erfolgt entsprechend der Gliederung des Prozessdiagramms nach den Gruppen der Bauleitung und den Gruppen des gewerblichen Personals am Rammgerät sowie des Personals am Ankerbohrgerät. Die anschließende Visualisierung (siehe Abb. 4.1) stellt eine verankerte Spundwand als gerammte Wellenwand aus Doppelbohlen mit U- oder Z-Profilen dar.

4.1.1 Bauleitung

Vorbereitende Tätigkeiten

Nach Eingang der Pläne ist im Zuge der Planprüfung zu untersuchen, ob alle Bohlenpositionen mit dem vorgesehenen Gerät zu erreichen sind. Sofern dies zutrifft, startet die Arbeitsvorbereitung. Anderenfalls sind Änderungen mit dem Auftraggeber abzustimmen. Hierzu zählen die Auswahl eines Fertigungsverfahrens, die Termin- und Ablaufplanung, die Planung der Baustelleneinrichtung, die Ressourcenplanung sowie das Erstellen der Arbeitskalkulation [42]. Nach Abschluss der Tätigkeiten der Arbeitsvorbereitung wird die Rammfreigabe durch den Auftraggeber eingeholt. Die Freigabe dient der Absicherung, dass das Baufeld auf Kampfmittel und Einbauten untersucht wurde. Diese Untersuchungen nehmen projektabhängig zwischen zwei und vier Wochen in Anspruch. Daher ist es zu empfehlen, die Freigabe bereits vor Baustelleneinrichtung einzuholen. Nach der Rammfreigabe erfolgt die Arbeitsanweisung an das gewerbliche Personal.

Dokumentation

Während der Bautätigkeit hat das Baustellenführungspersonal für die geforderte Dokumentation gemäß ÖNORM zu sorgen. Die Datenauswertung des Rammgerätes, bzw. der Protokolle erfolgt primär für interne Zwecke. Bei dauerhaft im Boden verbleibenden Spundwänden Informationen zur Lage sowie Hinweise zur Verwendung, Wartung und Inspektion des Bauwerkes enthalten. Weitere wichtige Bestandteile sind der *ÖNORM EN 12063:1999 08 01: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Spundwandkonstruktionen* [84, Abschnitt 10] zu entnehmen. Der Örtliche Bauaufsicht werden die Herstellungsberichte sowie der tägliche Bautagesbericht übermittelt.

4.1.2 Gewerbliches Personal - Rammgerät

Vorbereitende Tätigkeiten

Für die Herstellung von verankerten Spundwänden bedarf es folgender Baustelleneinrichtung:

- Trägergerät (meist Hydraulikbagger) samt Rammeinrichtung und Rammgerät
- Spundbohlen
- Spannpresse

Beim Antransport von Rammgerät und Bohlen kommen schwere Fahrzeuge mit Überbreite und großen Längsabmessungen zum Einsatz. Bei der Planung der Baustelleneinrichtung ist auf diese Faktoren Rücksicht zu nehmen. Das Arbeitsplanum muss an Größe und Gewicht des Rammgerätes angepasst werden. Zudem sind Platzbedarf für das Rammen sowie für die Lagerung der Bohlen vorzusehen.

Vorauselende Einbringhilfen

Zu den vorauselenden Rammhilfen zählen Auflockerungsbohrung, welche mithilfe einer Endlos-schnecke niedergebracht werden. Die Lage der Bohrlöcher soll die Schlösser umfassen. Alternativ dazu stehen Lockerungssprengungen zur Verfügung. Die Bohrlöcher werden in Abständen von 60-120 cm angeordnet. Ist der anstehende Boden auch mithilfe von Einbringhilfen nicht rammbaar, müssen Bodenaustauschbohrungen ausgeführt werden. Die überschrittenen Bohrungen werden mit einem gut rammbaren Material verfüllt.

Einbringen, Begleitende Einbringhilfen

Vor dem Einbringen Bohlen sind nach Bedarf Vorbereitungen zu treffen. Hierzu zählen das Montieren (Aufschweißen) von Spülleitungen, das Verstärken des Bohlenfußes oder das Verlängern der Bohlen. Im Anschluss wird das Rammgerät positioniert und nimmt eine Spundbohle auf. Sofern es nicht die erste Spundbohle ist, ist die Bohle in die vorhergehende Bohle einzufädeln und anschließend auszurichten. Das Rammen der Spundbohle startet. Sind begleitende Einbringhilfen erforderlich, werden diese parallel zum Rammen ausgeführt bis die Endtiefe erreicht wird. Zu den begleitenden Rammhilfen zählen das Nieder- und Hochdruckspülen. Das Einbringen der Spundbohlen ist in einem Rammerbericht schriftlich zu dokumentieren.

Abschließende Tätigkeiten

Nach Abschluss der Arbeiten wird die Baustelle geräumt.

4.1.3 Gewerbliches Personal - Ankerbohrgerät**Ausheben**

Bevor die ersten Anker gesetzt werden, muss der anstehende Untergrund bis zum ersten Ankerhorizont ausgehoben werden.

Verankern

Vor Beginn der Verankerungsarbeiten wird das Ankerbohrgerät vor dem Bohrloch positioniert und die Neigung der Lafette entsprechend den Plänen ausgerichtet. Anschließend wird die Bohrung bis zur Endtiefe vorgetrieben. Es folgt der Einbau des Stahlzuggliedes und die Erstverpressung der Haftstrecke. Nach dem Abbinden des Injektionsgutes wird die Vergurtung montiert und die Haftstrecke nachverpresst. Die Montage des Ankerkopfes und die Druckverteilungsringe stellen eine gleichmäßige Krafteinleitung sicher. Nach dem Vorspannen des Ankers und dessen Prüfung ist der Anker fertig hergestellt.

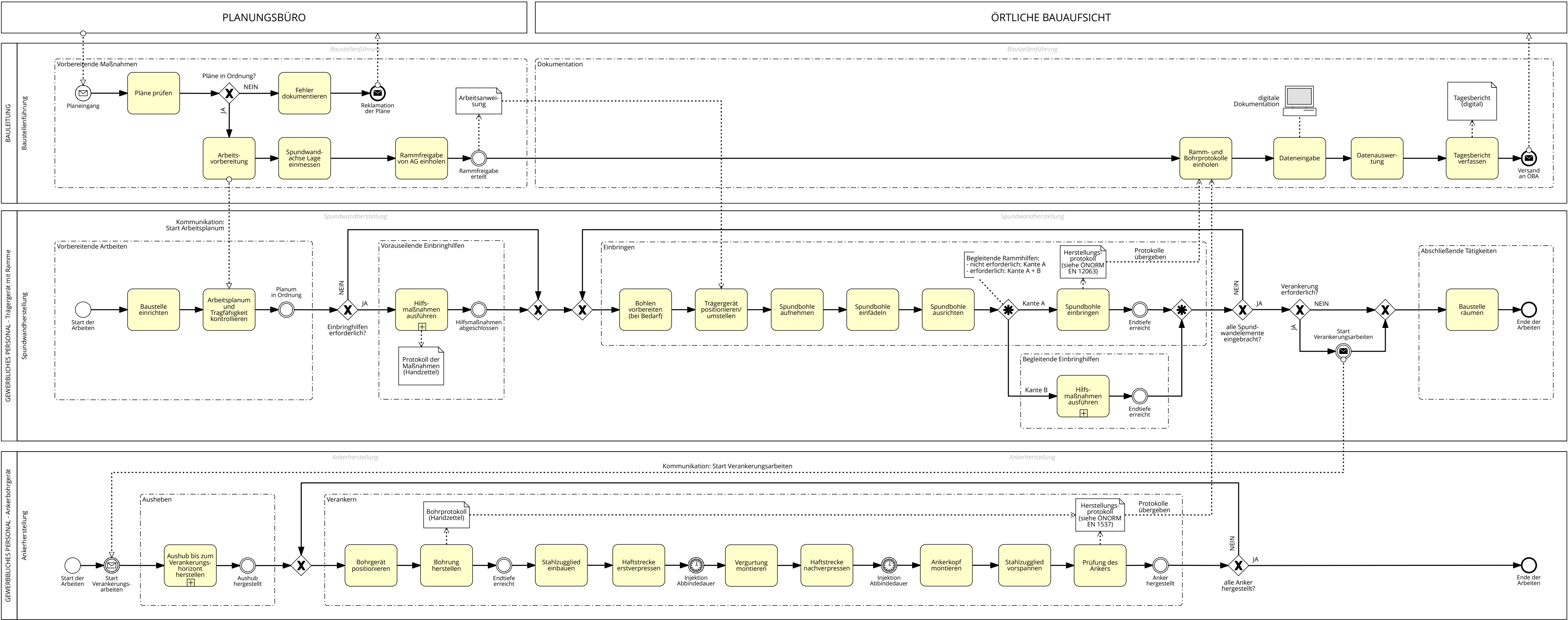


Abb. 4.1: Prozessdiagramm: Spundwand - verankerte Wellenwand im Ramm-Verfahren

4.2 Verdrängungspfahl - Ortbetonrammpfahl mit Fuß im Ramm-Verfahren

In diesem Unterkapitel werden die Arbeitsprozesse der Verdrängungspfahl-Herstellung beschrieben und visualisiert. Die Beschreibung der Arbeitsschritte erfolgt entsprechend der Gliederung des Prozessdiagramms nach den Gruppen der Bauleitung und der des gewerblichen Personals am Rammgerät. Die anschließende Visualisierung (siehe Abb. 4.2) stellt die Ortbetonrammpfahl-Herstellung mit Fuß dar.

4.2.1 Bauleitung

Vorbereitende Maßnahmen

Nach Durchsicht und Prüfung der Pläne startet die Arbeitsvorbereitung. Auf der Baustelle werden die Rammansatzpunkte vom Baustellenführungspersonal eingemessen und markiert. Vor Start der Arbeiten sind die Freigaben der Bewehrungspläne sowie der Rammarbeiten einzuholen. Die Rammfreigabe bescheinigt dem Baugrund die Sparten- und Kampfmittelfreiheit. Da diese Untersuchungen Zeit in Anspruch nehmen, sollten diese Freigaben bei größeren Projekten schon im Zuge der Arbeitsvorbereitung eingeholt werden. Nach Erteilung der Freigaben, ergeht die Arbeitsanweisung an das gewerbliche Personal.

Dokumentation

Bei Ausschreibungen von Ortbetonrammpfählen mit Fuß werden die Tiefen der Pfähle nicht immer vorgegeben. Erst im Zuge der Arbeiten werden die endgültigen Tiefen auf Basis der Rammenergie des Rammgerätes festgelegt. Aus diesem Grund stehen Bauleitung, gewerbliches Personal und Örtliche Bauaufsicht (ÖBA) in ständiger Kommunikation. Für den Fall, dass das Bauunternehmen eine Kiesverdichtung des Untergrundes im Bereich des Pfahlfußes in Erwägung zieht, muss diese Maßnahme mit der ÖBA abgestimmt werden.

Zusätzlich hat das Baustellenführungspersonal für die Dokumentation der Bauleistung zu sorgen. Demnach hat die Aufzeichnung aus zwei Teilen zu bestehen. Der erste Teil enthält allgemeine Angaben zur Baustelle, zum Verdrängungspfahl (Abmessungen, Typ, usw.), zum Herstellungsverfahren sowie zu den Baustoffkennwerten. Der zweite Teil muss auf die Pfahlart und das Herstellungsverfahren abgestimmt sein, wobei zwischen vorgefertigten Verdrängungspfählen und Ortbetonverdrängungspfählen unterschieden wird. Die Bestandteile der Aufzeichnungen können der *ÖNORM EN 12699:2015 09 01: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Verdrängungspfähle* [85, Abschnitte 10] entnommen werden.

Die Daten des Rammgerätes (sofern eine Datenaufzeichnung vorhanden) sind auszulesen und für interne Zwecke auszuwerten. Nach Herstellung eines Pfahles ist je ein Herstellungsprotokoll zu fertigen, welche im täglich samt dem Bautagesbericht an die ÖBA zu übermitteln sind. Für die Abrechnung muss die ÖBA die Protokolle und den Bautagesbericht zeichnen.

4.2.2 Gewerbliches Personal - Rammgerät

Vorbereitende Tätigkeiten

Die Arbeiten starten mit dem Einrichten der Baustelle. Hierfür werden folgende Geräte auf der Baustelle benötigt:

- Trägergerät samt Rammeinrichtung, Vortriebsrohr und Freifallbär
- zusätzlicher Bagger/Radlader

Im Anschluss erfolgt die Kontrolle des Arbeitsplanums auf dessen Zweckmäßigkeit und Tragfähigkeit.

Rammen

Nach dem Positionieren der Ramme wird das Vortriebsrohr am Rammansatzpunkt angesetzt und ausgerichtet. Im Anschluss wird Magerbeton in das Vortriebsrohr gefüllt und angestampft, sodass sich ein wasserdichter Pfropfen bildet. Es folgt das Rammen bis zu planmäßigen Endtiefe des Pfahles, sofern die Pläne eine erforderliche Endtiefe definieren.

Bei Ortbetonrammpfählen entscheidet nicht die planmäßige Tiefe, ob der Pfahl fertiggestellt ist, sondern die aufgebrachte Rammenergie. Sofern diese bei der planmäßigen Tiefe erreicht wird, wird der Betonpfropfen bei festgehaltenem Vortriebsrohr aus diesem ausgerammt. Es ist darauf zu achten, dass der Pfropfen nicht zur Gänze ausgerammt wird. Nur so kann ein Wassereintritt in das Vortriebsrohr verhindert. Am Fuß des Pfahles bildet sich dadurch eine Pfahlfußvergrößerung aus, die dem Pfahl einen hohen Spitzendruckwiderstand verleiht.

Wird die geforderte Rammenergie bei der geplanten Endtiefe nicht erreicht, stehen drei Maßnahmen zur Erreichung der Tragfähigkeit des Pfahles zur Verfügung:

Zum einen besteht die Möglichkeit einer *Kiesverdichtung* des Untergrundes. Kies wird in das Vortriebsrohr gefüllt und durch dem Rammbaren in den Boden ausgerammt. Die Maßnahme ist bei manchen Bauprojekten bereits als Eventualleistung ausgeschrieben. Die Ausführung ist mit der ÖBA abzustimmen, bzw. muss von der ÖBA freigegeben werden. Alternativ dazu kann der *Pfahlfußvergrößerung* durch eine weitere Zufuhr von Magerbeton und das Ausrammen dessen erreicht werden. Die letzte Möglichkeit ist die *Pfahlverlängerung* bis zu tragfähigeren Bodenschichten.

Mit Standardgeräten können Pfahliefen bis 16 m gerammt werden. Für größere Tiefen sollte einer der anderen Herstellungsverfahren herangezogen werden, da ansonsten das Vortriebsrohr bei jedem Pfahl verlängert und gekürzt werden muss. Die Dauer der beiden Vorgänge ist mit je 30 min in Summe etwa in der Größenordnung des Vortriebes eines Pfahles. Somit ist mit einem erheblichen Leistungsabfall zu rechnen.

Bewehren

Nach dem Ausrammen des Fußes wird der Bewehrungskorb in das stets trockene Vortriebsrohr eingestellt. Da die Länge des Pfahles nicht immer von vornherein bekannt ist, ist es gängige Praxis, die Bewehrungskörbe länger zu bestellen. Nach Pfahlherstellung wird sie auf die geforderte Länge der Anschlussbewehrung gekappt. Alternativ dazu werden zu kurze Körbe mittels Muffenstößen verlängert.

Betonieren

Beim Einbau des Betons wird aufgrund des geringen Querschnittes auf ein Betonschüttrohr verzichtet. Versuche haben gezeigt, dass es aufgrund des geringen Durchmessers zu keinem Qualitätsverlust des Betons kommt und deswegen das Einbringen ohne Betonschüttrohr für Ortbetonrammpfähle zulässig ist. Aus Sicherheitsgründen wird stets Unterwasserbeton eingebaut. Der Einbau des Betons ist gemäß *ÖNORM EN 12699:2015 09 01: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Verdrängungspfähle* [85] in einem Protokoll zu dokumentieren.

Kappen

Nach dem Abbinden des Betons werden die Pfahlköpfe freigelegt. Der Einbau der Sauberkeitsschicht markiert gleichzeitig die Kapphöhe. Mit dem Kappen des Pfahles wird die Anschlussbewehrung für die darüberliegenden Bauteile freigelegt. Ist der Bewehrungskorb zu lange, wird auch diese gekürzt.

Abschließende Tätigkeiten

Den Abschluss der Arbeiten bildet die tägliche Reinigung der Geräte und nach Herstellung der Pfähle das Räumen der Baustelle.

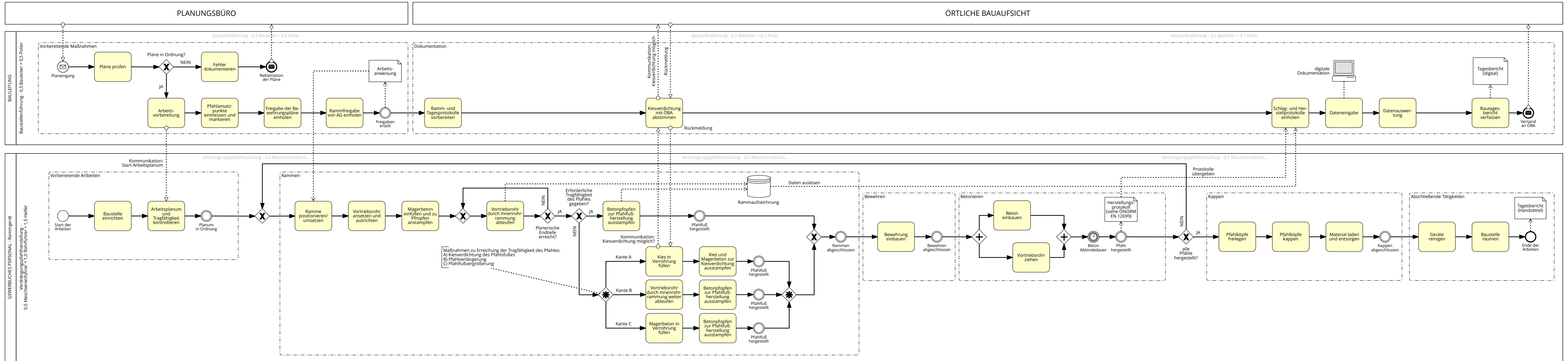


Abb. 4.2: Prozessdiagramm: Verdrängungspfahl - Ort betonrammpfahl mit Fuß im Ramm-Verfahren

4.3 Bohrpfahl - Einzelpfahl im Kelly-Verfahren

In diesem Unterkapitel werden die Arbeitsprozesse der Bohrpfahl-Herstellung beschrieben und visualisiert. Die Beschreibung der Arbeitsschritte erfolgt entsprechend der Gliederung des Prozessdiagramms nach den Gruppen der Bauleitung und der des gewerblichen Personals am Drehbohrgerät mit telekopierbarer Kellystange. Die anschließende Visualisierung (siehe Abb. 4.3) stellt die Bohrpfahl-Herstellung im Kelly-Verfahren dar.

4.3.1 Bauleitung

Vorbereitende Tätigkeiten

Nach Planeingang sind die Pläne zu prüfen. Sollten diese fehlerhaft sein, sind die Pläne an das Planungsbüro zu retournieren. Sind die Pläne in Ordnung, startet die Arbeitsvorbereitung. Hierzu zählen die Auswahl eines Fertigungsverfahrens, die Termin- und Ablaufplanung, die Planung der Baustelleneinrichtung, die Ressourcenplanung sowie das Erstellen der Arbeitskalkulation [42]. Vor Start der Bohrarbeiten muss eine Bohrfreigabe durch den Auftraggeber erfolgen. Die Bohrfreigabe umfasst die Bestätigung, dass eine Kampfmittelerkundung durchgeführt wurde sowie die Erkundung von Einbauten.

Dokumentation

Die Herstellung eines Pfahles ist entsprechend *ÖNORM EN 1536:2015 12 01: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bohrpfähle* [89, Anhang C.1 und C.2] zu dokumentieren, die Ausführung der Aufzeichnung ist in Abschnitt 4.4.1 beschrieben. Nach Erreichen der Endtiefe können stichprobenartig Tiefenabnahmen (falls gefordert) gemeinsam mit der Örtlichen Bauaufsicht vorgenommen werden. Die Datenauswertung der Protokolle erfolgt primär für interne Zwecke. Der Örtliche Bauaufsicht werden die Bohrpfahlprotokolle sowie der tägliche Bautagesbericht übermittelt.

4.3.2 Gewerbliches Personal - Drehbohranlage mit Kellystange

Vorbereitende Arbeiten

Zu den vorbereitenden Arbeiten gehört das Einrichten der Baustelle. Die Geräte der Baustelleneinrichtung sind nachfolgend aufgelistet:

- Drehbohranlage mit Mäkler, Kraftdrehkopf, Drehteller, Kellystange und Bohrwerkzeug
- Bohrrohre mit Bohrrohrschneidschuh, Abfangschelle
- zusätzlicher Bagger/Radlader
- Betonschüttrohre

Bei den heutzutage verwendeten selbstaufrichtenden Drehbohrgeräten dauert diese Arbeit im Normalfall weniger als einen Arbeitstag. Da die Drehbohranlagen ein sehr hohes Eigengewicht aufweisen, ist das Planum auf dessen Tragfähigkeit zu prüfen.

Bohren, Fördern

Nach Bohrfreigabe wird das Bohrgerät über dem Bohrloch positioniert. Anschließend wird das erste Bohrrohr aufgenommen, ausgerichtet und angesetzt. Mit dem Drehteller (auch Rohrmitnehmer) wird das Bohrrohr in den Boden eingebracht. Nach den ersten Metern wird die Lage und Vertikalität des Bohrrohres kontrolliert.

Das an den jeweiligen Boden angepasste Drehbohrwerkzeug löst und fördert den anstehenden Boden. Bei diesem Verfahren handelt es sich um eine diskontinuierliche Förderung. Das Werkzeug

wird nach Aufnahme des Bohrgutes aus dem Bohrloch gezogen, zur Seite geschwenkt und das Bohrgut abgeworfen. Ist kein neuer Rohrschuss erforderlich, wird das Bohrwerkzeug wieder in das Bohrloch geführt. Gegebenenfalls wird mit dem Rohrmitnehmer die Verrohrung nachgedreht. Nach dem Erreichen der Endtiefe wird die Bohrlochsohle mit einer Räumerleiste gereinigt. Das abgeworfene Material wird geladen und weggeschafft.

Während dem Bohren ist das Bohrgut zu untersuchen und die Bodenbeschaffenheiten sind zu dokumentieren. Falls der Auftrag die Probenentnahme beinhaltet, müssen die gestörten Bodenproben fachgerecht aufbewahrt werden.

In Abhängigkeit des Bodens besteht die Möglichkeit einer voraus- oder nachteilenden Verrohrung. Bei harten Böden bietet es sich an, das Bohrwerkzeug vorausseilen zu lassen. Jedoch muss zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein, dass ein Teil des Bohrwerkzeuges noch in der Verrohrung geführt wird. Das Vorausseilen des Bohrwerkzeuges verringert die Widerstände beim Verrohren. Vor dem nächsten Hub wird die Verrohrung mit dem Drehteller nach Bedarf nachgedreht. Bei Grundbruchgefahr und in weichen Böden hat stets die Verrohrung um etwa 1 m vor auszuseilen.

Im gespannten Grundwasser, ist unter Wasserauflast zu bohren. Wasser wird dem Bohrloch zugeführt, solange bis die Endtiefe erreicht ist. Die Wasserzufuhr erfolgt direkt durch eine Leitung ins Bohrloch oder über einen Ausgleichsbehälter mit einer Verbindungsleitung zum Bohrloch. Der Ausgleichsbehälter nimmt das verdrängte Wasser während des Eintauchens des Bohrwerkzeuges auf und gibt es nach dem Herausfahren wieder an das Bohrloch ab. Der mit dem Wasser erzeugte Überdruck dient der Minimierung der Grundbruchgefahr an der Bohrlochsohle.

Bewehren

Verrohrte hergestellte Pfähle werden durchgehend bewehrt. Der Bewehrungskorb wird mit der Hilfswinde des Drehbohrgerätes oder einem Hilfsbagger aufgenommen und in das Bohrloch hinabgelassen und auf der Bohrlochsohle abgestellt. Abstandshalter dienen der Sicherstellung einer ausreichenden Betondeckung des Bewehrungskorbes zur Bohrlochwandung.

Betonieren, Fördern

Vorbereitend wird ein Betonschüttrohr in die Verrohrung eingebaut. Ist das Bohrloch trocken, reicht ein Rohrelement samt Trichter. Der Beton wird durch einen gebündelten Strahl in das Bohrloch eingebracht. Hat sich im Bohrloch Grundwasser aufgespiegelt, muss das Betonschüttrohr bis zur Bohrlochsohle geführt und im Kontraktorverfahren betoniert werden. Das Betonschüttrohr muss ausreichend in den Beton einbinden. Etwas nachlaufend werden Betonschüttrohr und Verrohrung gezogen.

Bei der Pfahlherstellung unter Wasserauflast wird der mit Beginn des Betonierens das Wasser abgepumpt. Das verunreinigte Wasser muss nach einer etwaigen Zwischenlagerung mit Saugwägen abtransportiert und entsorgt werden.

Sämtliche Angaben zu den Pfahlabmessungen, der Bewehrung, dem Beton sowie zum Einbringen des Betons sind im Bohrpfahlprotokoll gemäß ÖNORM festzuhalten.

Kappen

Nach dem Abbinden des Betons sind die Pfahlköpfe freizulegen. Im Bereich neben den Pfahlköpfen ist eine Sauberkeitsschicht bis auf die Kapphöhe einzubauen. Nach dem Einbau werden die Köpfe gekappt und die Anschlussbewehrung wird freigelegt. Das abgebrochene Material wird geladen und weggeschafft. Der Pfahl ist nach dem Kappen fertiggestellt. Das Kappen stellt somit die Schnittstelle zu anderen Gewerken dar.

Abschließende Tätigkeiten

Zu den abschließenden Tätigkeiten gehört neben der täglichen Reinigung der Geräte das Räumen der Baustelle, welche üblicherweise ähnlich viel Zeit wie das Einrichten in Anspruch nimmt.

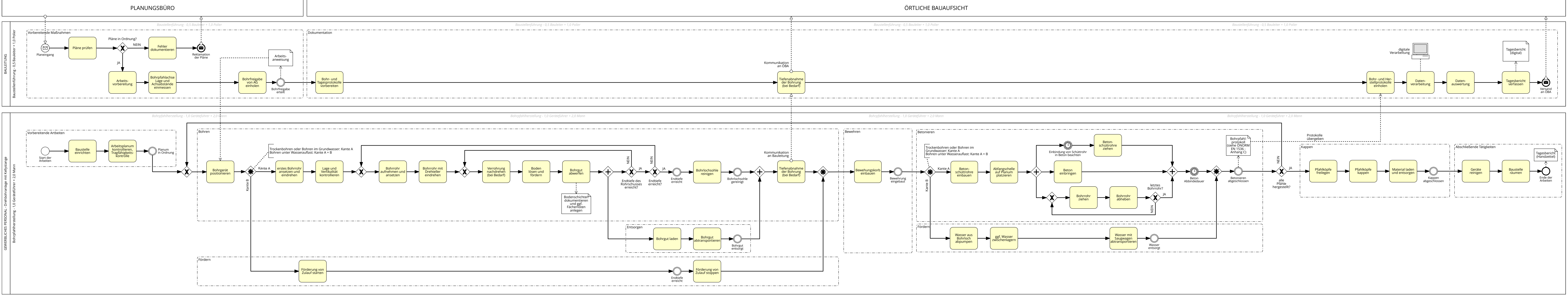


Abb. 4.3: Prozessdiagramm: Bohrpfahl - Einzelpfahl im Kelly-Verfahren

4.4 Bohrpfahl - tangierende Bohrpfahlwand im SOB-Verfahren

In diesem Unterkapitel werden die Arbeitsprozesse der Bohrpfahl-Herstellung beschrieben und visualisiert. Die Beschreibung der Arbeitsschritte erfolgt entsprechend der Gliederung des Prozessdiagramms nach den Gruppen der Bauleitung und der des gewerblichen Personals am Drehbohrgerät mit Endlosschnecke. Die anschließende Visualisierung (siehe Abb. 4.4) stellt die Bohrpfahl-Herstellung im SOB-Verfahren dar.

4.4.1 Bauleitung

Die Tätigkeiten der „Vorbereitenden Maßnahmen“ sind mit den Beschreibungen aus Abschnitt 4.3.1 ident.

Zur Dokumentation eines Pfahles ist die *ÖNORM EN 1536:2015 12 01: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bohrpfähle* [89] heranzuziehen. So hat die Aufzeichnung der Herstellung allgemeine Angaben zur Baustelle, allgemeine Angaben zum Verfahren sowie Angaben zur Ausführung zu enthalten. In Abhängigkeit von der Stützung der Bohrloches sind unterschiedliche Angaben in den Herstellungsprotokollen zu machen. Die ÖNORM bietet mit den Anhängen C.5 und C.6 Mustervordrucke für die Protokollierung der Herstellung von SOB-Pfählen.

4.4.2 Gewerbliches Personal - Drehbohranlage mit Endlosschnecke

Vorbereitende Tätigkeiten

Den Start der Arbeiten bildet das Einrichten der Baustelle sowie die Kontrolle des Arbeitsplans auf dessen Zweckmäßigkeit und die Tragfähigkeit Abschnitt 4.3.2. Zum Unterschied von Abschnitt 4.3.2 besteht die Baustelleneinrichtung bei SOB-Pfählen aus folgenden Geräten:

- Drehbohranlage mit Mäkler, Kraftdrehkopf (inkl. Betonierkopf), Schnecke mit Betonierrohr und Schneckenanfänger
- zusätzlicher Bagger/Radlader
- Rüttler (für Bewehrungskorb)

Bohren

Nach dem Positionieren wird die Endlosschnecke bis zur Endtiefe abgeteuft. Moderne Geräte führen eine Bohraufzeichnung und zeichnen automatisch Uhrzeit, Drücke, Tiefe, Umdrehungen, etc. auf und speichern dies auf einem Datenträger. Der Datenträger wird im Anschluss durch das Baustellenführungspersonal ausgelesen.

Betonieren, Entsorgen

Über den Betonierkopf am Kraftdrehkopf wird Beton durch das Seelenrohr der Schnecke gefördert. Etwas zeitversetzt wird mit dem Ziehen der Schnecke begonnen. Sobald dies geschieht, fällt ein Teil des Bohrgutes von der gezogenen Schnecke und es bildet sich zwangsläufig ein Kegel aus Bohrgut am Bohrlochmund. Sobald die Schnecke komplett gezogen ist, wird die Drehbohranlage zur Seite geschwenkt und der Rest des Bohrgutes abschüttelt. Mit einem Radlader ist der Bohrlochmund auf in etwa Kapphöhe freizuräumen.

Bewehren

Sollte eine Bewehrung erforderlich sein, wird diese nach dem Betonieren eingebaut. Mögliche Formen der Bewehrung sind eine Kopfbewehrung des Pfahles sowie eine durchgehende Bewehrung. Bei Bohrpfahlwänden ist die Bewehrung aufgrund der Momentenbeanspruchung durchgehend. Die Bewehrung wird mit einem zweiten Bagger in das bereits mit Beton verfüllte Bohrloch

eingedrückt. In etwa ab einer Korblänge von 7 m bedient man sich in der Praxis eines Rüttlers, welche das Einbringen erheblich erleichtert. Im Anschluss ist das Bohrpfahlprotokoll gemäß *ÖNORM EN 1536:2015 12 01: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bohrpfähle* [89, Anhang C] zu schreiben und der Bauleitung zu übergeben.

Sofern der Baustelle ein zweiter Bagger zur Verfügung steht, erfolgt das Abziehen auf Kapphöhe sowie der Einbau der Bewehrung stets durch diesen Bagger. Das Bohrgerät kann sofort nach dem Betoniervorgang mit der Bohrung des nächsten Loches beginnen.

Kappen

Das Kappen der Pfähle von SOB-Pfählen erfolgt äquivalent zu den in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Bohrpfählen.

Abschließende Tätigkeiten

Den Abschluss der Arbeiten bildet das Reinigen der Geräte sowie das Räumen der Baustelle.

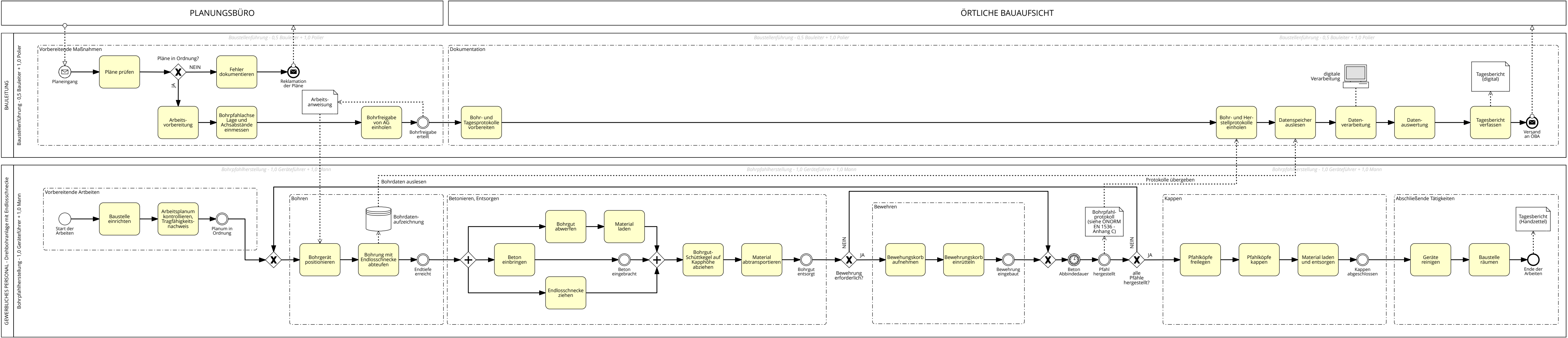


Abb. 4.4: Prozessdiagramm: Bohrpfahl - tangierende Bohrpfahlwand im SOB-Verfahren

4.5 Bohrpfahl - überschnittene Bohrpfahlwand im VdW-Verfahren

In diesem Unterkapitel werden die Arbeitsprozesse der Bohrpfahl-Herstellung beschrieben und visualisiert. Die Beschreibung der Arbeitsschritte erfolgt entsprechend der Gliederung des Prozessdiagramms nach den Gruppen der Bauleitung und der des gewerblichen Personals am Drehbohrgerät mit Doppelkopfantrieb. Die anschließende Visualisierung (siehe Abb. 4.5) stellt die Bohrpfahl-Herstellung im VdW-Verfahren dar.

4.5.1 Bauleitung

Die Tätigkeiten der „Vorbereitenden Maßnahmen“ sind mit den in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen ident. Die „Dokumentation“ hat gemäß *ÖNORM EN 1536:2015 12 01: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bohrpfähle* [89, Abschnitt 10] zu erfolgen, wobei die in Abschnitt 4.4.1 beschriebene Angaben der Herstellung zu machen sind. Als Mustervordrucke können die Anhänge C.1 und C.2 für verrohrte Pfähle herangezogen werden.

Zusätzlich muss das Baustellenführungspersonal vor Bohrbeginn einen Plan zur Einteilung der Pfähle in Primär- und Sekundärpfähle erstellen. Nach dem Ausschalen der Bohrschablone sind Primär- und Sekundärpfähle auf der Schablone eindeutig mit einem Farbspray oder ähnlichem zu markieren.

4.5.2 Gewerbliches Personal - Drehbohranlage mit Doppelkopfantrieb

Vorbereitende Maßnahmen

Den Start der Arbeiten bildet das Einrichten der Baustelle sowie die Kontrolle des Arbeitsplanums auf dessen Zweckmäßigkeit und die Tragfähigkeit siehe Abschnitt 4.3.2. Zum Unterschied von Abschnitt 4.3.2 besteht die Baustelleneinrichtung bei VdW-Pfählen aus folgenden Geräten:

- Drehbohranlage mit Mäkler, Doppelkopf-Kraftdrehkopf (inkl. Betonierkopf und Drehteller mit Auswurföffnung), Schnecke mit Betonierrohr und Schneckenanfänger, Bohrrohr
- zusätzlicher Bagger/Radlader
- Rüttler (für Bewehrungskorb)

Bohrschablone herstellen

Überschnittene Bohrpfahlwände haben neben ihrer tragenden auch eine abdichtende Wirkung. Aus diesem Grund ist ein hohes Maß an Genauigkeit beim Bohren gefordert. Die Bohrschablone dient dem Bohrwerkzeug und der Verrohrung als Führung. Hierfür wird ein seichter Graben ausgehoben, in welchem Abschalelemente eingelegt und fixiert werden. Der umliegende Bereich wird bewehrt und anschließend betoniert. Nach dem Abbinden des Betons und dem Ausschalen ist die Bohrschablone bereit für den Einsatz.

Bohren, Verrohren, Entsorgen

Zum Bohren wird eine Kombination aus Endlosschnecke und Verrohrung abgeteuft, bis die Solltiefe erreicht ist. Wie schon beim SOB-Verfahren erlauben moderne Geräte eine Bohraufzeichnung. Die Schnecke löst hierzu den anstehenden Boden, welche in der Verrohrung durch die Schneckengänge nach oben gefördert wird. Direkt unter dem Doppelkopfgetriebe befindet sich eine Auswurföffnung, durch welche das Material nach unten fällt. Man spricht von einer kontinuierlichen Borhgutförderung. Ähnlich dem SOB-Verfahren bildet sich am Bohrlochmund eine Kegel aus Bohrgut. Das Bohrgut wird kontinuierlich mit einem zweiten Bagger geladen und abtransportiert.

Betonieren

Während dem Betonieren durch das Seelenrohr wird die Kombination aus Verrohrung und Schnecke gezogen. Im Gegensatz zum SOB-Verfahren bleibt das Bohrgut in der Verrohrung und wird erst bei der nächsten Bohrung durch nachfolgendes Bohrgut zur Auswurföffnung transportiert. Ein Entleeren nach jeder Bohrung findet in diesem Sinne nicht statt.

Primärpfähle sind materialtechnisch von Sekundärpfählen zu unterscheiden. Für Primärpfähle wird ein langsam abbindender Beton verwendet, wodurch dieser in den darauf folgenden Stunden (bis zu zwei Tagen) noch von einem Sekundärpfahl überschritten werden kann.

Bewehren

Eine Bewehrung ist nur bei Sekundärpfählen vorzusehen, welche sich im Normalfall über die gesamte Länge des Pfahles erstreckt. Sie dient der Aufnahme der hohen Biegemomente. Der Einbau der Bewehrung erfolgt stets nach dem Betonieren. Ein zweiter, der Baustelle zur Verfügung stehender, Bagger nimmt den Bewehrungskorb auf und lässt ihn in das mit Beton gefüllte Bohrloch ab. Die Bewehrung von Bohrpfahlwänden ist meist durchgehend, weshalb man sich zum leichteren Einbringen des Korbes eines Rüttlers bedient. Abschließend ist die Herstellung des Pfahles im Bohrpfahlprotokoll gemäß *ÖNORM EN 1536:2015 12 01: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bohrpfähle* [89, Anhang C] zu dokumentieren.

Kappen

Vor dem Kappen der Pfähle ist die Innen- und Außenseite der Bohrschablone abzubrechen und wegzuschaffen. Das Kappen der Pfähle und Freilegen der Anschlussbewehrung, erfolgt äquivalent zu den in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Bohrpfählen.

Abschließende Tätigkeiten

Den Abschluss der Arbeiten bildet das Reinigen der Geräte sowie das Räumen der Baustelle.

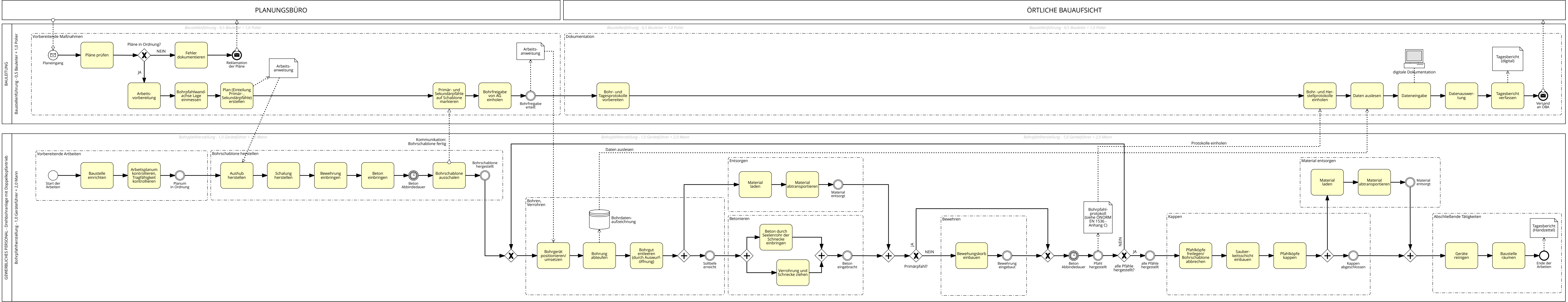


Abb. 4.5: Prozessdiagramm: Bohrpfahl - überschnittene Bohrpfahlwand im VdW-Verfahren

4.6 Bohrpfahl - Einzelpfahl im Schlagbohr-Verfahren

In diesem Unterkapitel werden die Arbeitsprozesse der Bohrpfahl-Herstellung beschrieben und visualisiert. Die Beschreibung der Arbeitsschritte erfolgt entsprechend der Gliederung des Prozessdiagramms nach den Gruppen der Bauleitung und der des gewerblichen Personals am Seilbagger mit Schlagbohrwerkzeug. Die anschließende Visualisierung (siehe Abb. 4.6) stellt die Bohrpfahl-Herstellung im Schlagbohr-Verfahren dar.

4.6.1 Bauleitung

Die Tätigkeiten der „Vorbereitenden Maßnahmen“ sind mit den in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Arbeitsabläufen ident. Die „Dokumentation“ der Herstellung eines Pfahles hat gemäß Abschnitt 4.4.1 zu erfolgen, wobei die Anhänge C.1 und C.2 von *ÖNORM EN 1536:2015 12 01: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bohrpfähle* [89, Abschnitt 10] als Mustervordrucken dienen.

4.6.2 Gewerbliches Personal - Seilbagger mit Schlagbohrwerkzeug

Vorbereitende Tätigkeiten

Den Start der Arbeiten bildet das Einrichten der Baustelle sowie die Kontrolle des Arbeitsplans auf dessen Zweckmäßigkeit und die Tragfähigkeit siehe Abschnitt 4.3.2. Zum Unterschied von Abschnitt 4.3.2 besteht die Baustelleneinrichtung bei Greiferbohr-Verfahren aus folgenden Geräten:

- Seilbagger mit Greifer (ggf. Meißel)
- Verrohrungsmaschine
- Bohrröhre und Bohrröherschneidschuh
- zusätzlicher Bagger/Radlader
- Betonschüttrohre

Verrohren

Mit Erteilung der Freigabe wird die Kombination aus Seilbagger und Verrohrungsmaschine über dem ersten Bohrloch positioniert. Nach dem Setzen des ersten Bohrröhres wird die Verrohrung mit der Verrohrungsmaschine nach und nach bis zur Endtiefe abgeteuft. Nach den ersten paar Metern wird die Lage und Vertikalität der Verrohrung erneut kontrolliert. Wird im Zuge der Arbeiten ein neuer Rohrschuss benötigt, muss dieser auf die bestehende Verrohrung aufgesetzt und mit ihr verschraubt werden. Das Verrohren startet erneut und wird so lange ausgeführt, bis die Endtiefe erreicht ist.

Greifern, Fördern

Ein Schlagbohrwerkzeug - an einem Seil geführt - löst den anstehenden Boden und nimmt diesen auf. Zur Förderung wird das Werkzeug aus dem Bohrloch gezogen und entleert. Sollten sich im Laufe des Aushubs undurchdringliche Bodenschichten oder Hindernisse aufmachen, müssen diese durchörtet werden. Hierfür ist ein Werkzeugwechsel von Schlagbohrwerkzeug auf einen Meißel erforderlich. Nach Durchörterung des Hindernisses wird das Werkzeug wieder gewechselt.

Nach dem Aushub, insbesondere bei Bohrungen im Grundwasser, ist die Bohrlochsohle nach Erreichen der Endtiefe zu reinigen. Hierfür ist das Bohrwerkzeug nach Absetzen der Feinteile (welche durch den Aushubvorgang aufgewirbelt wurden) ein letztes Mal in das Bohrloch zu führen.

Zeigt das Bohrprofil gespannte Grundwasserleiter im Untergrund auf, hat das Bohren unter Wasserauflast zu erfolgen. Die Beaufschlagung des Bohrloches mit Wasser wird direkt durch eine Leitung in das Bohrloch bewerkstelligt. Alternativ dazu besteht die Möglichkeit der Verwendung eines Ausgleichsbehälters. Behälter und Bohrrohr sind mit einer Leitung verbunden, somit sind sie kommunizieren Gefäße. Taucht der Greifer in das Bohrloch ein, wird das verdrängte Wasser durch den Behälter aufgenommen.

Während der Aushubarbeiten wird das entleerte Material geladen und abtransportiert. Die Materialverfuhr wird größtenteils durch Subunternehmer oder von Auftraggeberseite durchgeführt.

Abschließend ist nach Erfordernis eine Abnahme der Bohrlochtiefe mit dem Baustellenführungspersonal und der Örtlichen Bauaufsicht zu nehmen.

Bewehren

Die Bewehrung wird mit dem Seilbagger, ggf. einem zweiten Seilbagger, in das Bohrloch eingehoben und in der Lage fixiert. Bei verrohrten Pfählen wird die Bewehrung üblicherweise bis zur Bohrlochsohle geführt und auf der Bohrlochsohle aufgestellt.

Betonieren, Fördern

Vor der Betonage muss ein Betonschüttrohr in das Bohrloch gelassen werden. Für den Fall des Betonierens unter Wasser, muss das Kontraktorrohr bis zur Bohrlochsohle geführt werden. Während des Einbringens des Betons werden Schüttrohr und Bohrrohr (unter Bedingung einer ausreichenden Einbindung des Schüttrohres in den Beton) gezogen.

Erfolgt die Bohrung unter Wasserauflast, da Grundbruchgefahr besteht, wird im Zuge des Betonierens das verdränge Wasser gefasst. Das verschmutzte Wasser wird anschließend gegebenenfalls zwischengelagert und schlussendlich abtransportiert und entsorgt.

Im Anschluss ist das Bohrfahlprotokoll gemäß *ÖNORM EN 1536:2015 12 01: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bohrpfähle* [89, Anhang C] zu schreiben und der Bauleitung zu übergeben.

Kappen

Die in der Gruppe „Kappen“ zusammengefassten Tätigkeiten sind äquivalent zu den in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen.

Abschließende Tätigkeiten

Den Abschluss der Arbeiten bildet das Reinigen der Geräte sowie das Räumen der Baustelle.

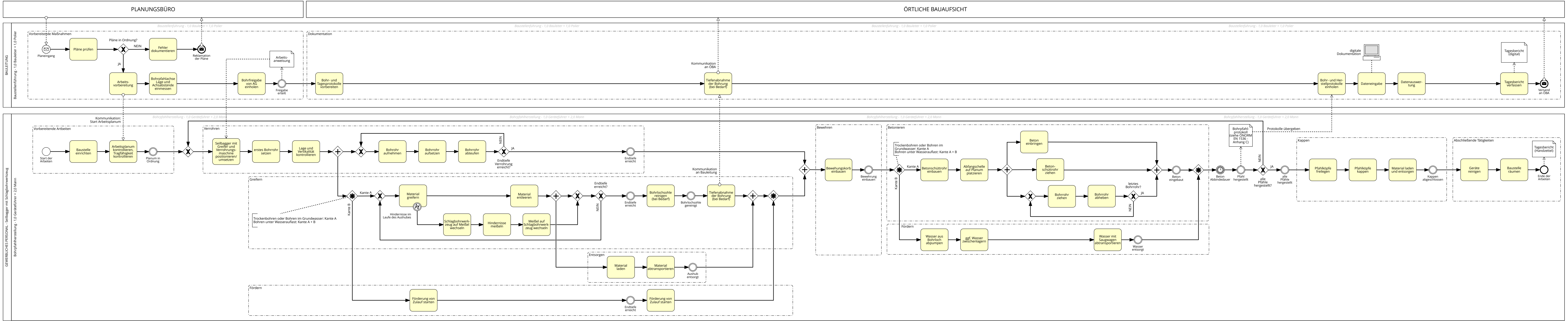


Abb. 4.6: Prozessdiagramm: Bohrpfahl - Einzelpfahl im Schlagbohr-Verfahren

4.7 Mikropfahl - Duktilpfahl im Ramm-Verfahren

In diesem Unterkapitel werden die Arbeitsprozesse der Mikropfahl-Herstellung beschrieben und visualisiert. Die Beschreibung der Arbeitsschritte erfolgt entsprechend der Gliederung des Prozessdiagramms nach den Gruppen der Bauleitung und der des gewerblichen Personals am Rammgerät. Die anschließende Visualisierung (siehe Abb. 4.7) stellt die Mikropfahl-Herstellung eines Duktilpfahles dar.

4.7.1 Bauleitung

Die Tätigkeiten der „Vorbereitenden Maßnahmen“ sowie der „Dokumentation“ sind mit den Beschreibungen in Abschnitt 4.3.1 ident.

Die Protokollierung der Bauleistung ist gemäß *ÖNORM EN 14199:2016 10 15: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Mikropfähle* [87, Abschnitt 10] auszuführen. Diese sieht vor, dass die Aufzeichnungen Angaben zur Baustelle, Angaben zur Herstellung des Mikropfahles sowie Angaben zur Ausführung. Exemplarisch wird in Anhang D der ÖNORM ein solches Mikropfahlprotokoll dargestellt.

4.7.2 Gewerbliches Personal - Rammgerät

Vorbereitende Tätigkeiten

Zum Einrichten der Baustelle zur Herstellung von Duktilpfählen bedarf es folgender Geräte:

- Hydraulikbagger mit Schnellschlaghammer
- ggf. Mischanlage mit Pumpe und Leitungen

Sind Mantelreibungspfähle herzustellen, ist zusätzlich eine Betonpumpe erforderlich. Nach Kontrolle der Tragfähigkeit des Arbeitsplanums starten die Arbeiten.

Rammen

Zum Ansetzen des ersten Rohrschusses transportiert der Bagger das Rohr, mit einem knapp unterhalb der Muffe gesetzten Textilschlupf, zum Rammansatzpunkt. Im Falle eines Mantelreibungspfahles ist am Spitzende eine Öffnung für den Mörtelaustritt herzustellen. Die Öffnung in Form eines gleichseitigen Dreieckes mit einer Kantenlänge von 3–5 cm wird mit einem Winkelschleifer in das Rohr geschnitten. Im Anschluss wird das Rohr an der Rammspitze abgesetzt. Der Helfer muss das Rohr kurzzeitig in seiner Lage fixieren, sodass der Baggerfahrer das Schlagstück des Hammers in das Rohr einfädeln kann. Nach dem Ausrichten des Rohres mit einer Wasserwaage beginnt das Rammen.

Der erste Rohrschuss wird bis kurz oberhalb des Planums in den Untergrund gerammt. Anschließend wird das nächste Rohr aufgenommen und in die Muffe gesteckt, das Rammen startet erneut. Bei Mantelreibungspfählen wird während dem Rammen Mörtel in den Pfahl gepumpt. Der am Pfahlfuß austretende Mörtel füllt den Ringraum zwischen Pfahl und Bohrlochwandung auf. Der Spiegel des Mörtels im Ringraum ist so zu halten, dass er weder absinkt, noch zu übermäßigem Austritt an der Oberfläche kommt.

Während dem Rammen dokumentiert der Geräteführer oder der Polier die Eindringgeschwindigkeit. Hierfür wird die Zeit in Sekunden für jeweils einen geramten Meter festgehalten. Zuvor mit einem Farbspray gesetzte meterweise Markierungen am Pfahl helfen dem Personal bei der Dokumentation.

Die Endtiefe gilt als erreicht, sobald eine Eindringgeschwindigkeit von 1 cm in 20 s unterschritten wird. Der Rammvorgang ist abgeschlossen. Für Mantelreibungspfähle gilt das Rammkriterium

nicht, da die erforderliche Länge vorab durch statische Berechnungen ermittelt wurde. Basis der Berechnungen sind die Widerstände resultierend aus Mantelreibung und Spitzendruck.

Nach Erreichen der Endtiefe von Spitzendruckpfählen wird das Rohr bedarfsweise mit Beton verfüllt. Hierfür wird der Prozess des Kappens vor diesen Arbeitsschritt gezogen.

Kappen

Beim Kappen wird der überstehende Pfahl mit einem Seitenschneider auf die gewünschte Kapphöhe abgeschnitten. Die Lastverteilungsplatte wird im Anschluss in den frischen Mörtel gedrückt. Der Pfahl ist nach diesem Arbeitsschritt fertig hergestellt. Die Herstellung des Pfahles ist in einem Rammbericht festzuhalten.

Anschließende Tätigkeiten

Zu den abschließenden Tätigkeiten zählt das Reinigen aller Geräte und das Räumen der Baustelle.

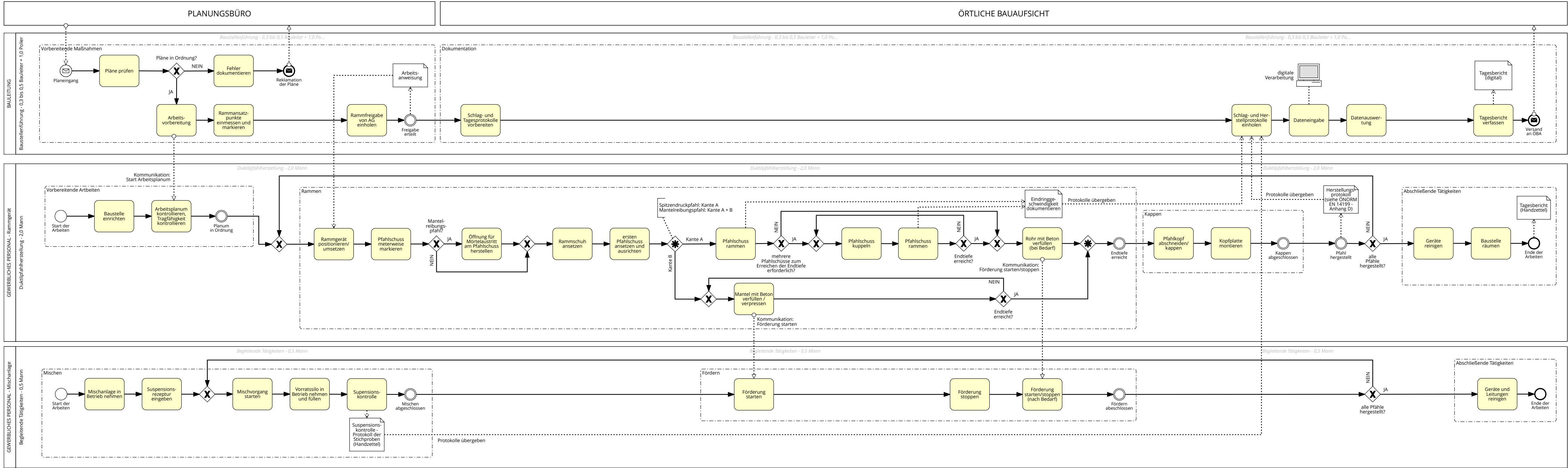


Abb. 4.7: Prozessdiagramm: Mikropfahl - Duktilpfahl im Ramm-Verfahren

4.8 Mikropfahl - GEWI-Pfahl im Spülbohr-Verfahren

In diesem Unterkapitel werden die Arbeitsprozesse der Mikropfahl-Herstellung beschrieben und visualisiert. Die Beschreibung der Arbeitsschritte erfolgt entsprechend der Gliederung des Prozessdiagramms nach den Gruppen der Bauleitung und der des gewerblichen Personals am Bohrgerät. Die anschließende Visualisierung (siehe Abb. 4.8) stellt die Mikropfahl-Herstellung eines GEWI-Pfahles dar.

4.8.1 Bauleitung

Die Tätigkeiten der „Vorbereitenden Maßnahmen“ sowie der „Dokumentation“ sind mit den in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen ident.

Die Herstellungsprotokolle sind gemäß *ÖNORM EN 14199:2016 10 15: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Mikropfähle* [87, Anhang D]) zu verfassen, wobei Angaben zur Baustelle, Angaben zur Herstellung des Mikropfahles sowie Angaben zur Ausführung in den Protokollen enthalten sein müssen.

4.8.2 Gewerbliches Personal - Bohrgerät

Vorbereitende Tätigkeiten

Die Arbeiten starten mit dem Einrichten der Baustelle. Zum Herstellen von GEWI-Pfählen werden folgende Geräte benötigt:

- Bohrgerät (ausgerüstet für Doppelkopfbohrungen)
- zusätzlicher Bagger/Radlader
- ggf. Hebegerät
- Mischanlage mit Pumpe und Leitungen
- Vorratssilo

Nach Antransport des Equipments wird die Tragfähigkeit des Arbeitsplanums geprüft. Die Arbeiten können anschließend starten.

Bohren

Zum Bohren wird eine verrohrte Spülbohrung bis zur Endtiefe abgeteuft. In dem mittels Doppelkopfbohrung hergestellten Bohrloch eilt das innere Bohrgestänge voraus, während die Verrohrung das Bohrloch stützt. Als Spülmedium wird stets Wasser verwendet. Nach Erreichen der Endtiefe wird das innere Bohrgestänge gezogen, während die Verrohrung im Bohrloch temporär verbleibt.

Vorbereiten

Parallel zum Bohren wird das Zugglied des späteren Pfahles, der GEWI-Stahl, auf den Einbau vorbereitet. Beim Ersten Arbeitsschritt werden Abstandshalte auf das Gewinde des GEWI-Stahls gedreht. Sie stellen beim späteren Betoneinbau eine ausreichende Betondeckung für den Korrosionsschutz sicher.

Anschließend können die Einzelstäbe bei Bedarf mit Muffen verlängert werden. Sind in der Ausschreibung Schrumpfschläuche gefordert, müssen sie vor dem Verbinden der Stäbe eingefädelt werden. Sind die Stäbe zusammengeschraubt, wird der Schrumpfschlauch abgeschrumpft. Handelt es sich um GEWI-Pfähle mit einfachem Korrosionsschutz, verhindern die Schrumpfschläuche das Lösen der Muffen.

GEWI-Pfählen mit doppeltem Korrosionsschutz stellen einen Sonderfall dar. Diese GEWI-Stähle sind werksseitig mit einem Ripprohr ummantelt, der Ringraum zwischen Stahl-Element und Ripprohr ist bereits mit Zementmörtel vergossen. Werden diese Stähle mit Muffen verbunden, sind Schrumpfschläuche verpflichtend vorzusehen.

Im Falle einer erforderlichen Nachverpressung des Pfahles, muss ein entsprechendes Schlauchsystem vorab auf den GEWI-Stählen installiert werden.

Einbauen

Zum Einbauen des Stabstahles wird vorab das Bohrloch mit Zementmörtel verfüllt. Das vorbereitete GEWI-Element wird im Anschluss in das Bohrloch eingestellt. Es folgt das Verpressen des Pfahles bei gleichzeitigem Ziehen der elementweise, Verrohrung. Im Anschluss lässt man den Zementmörtel abbinden. Anschließend folgt eine bedarfsweise Nachverpressung des Pfahles. Hierfür wird Zementmörtel mit hohem Druck in das Nachverpresssystem gepumpt, sodass der abgebundene Zement gesprengt wird und die entstandenen Hohlräume durch frischen Mörtel verfüllt werden. Die Nachverpressung führt zu einem höheren Widerstand der Mantelreibung. Der Einbau der Pfähle ist nach diesem Arbeitsschritt abgeschlossen.

Pfahlköpfe montieren

Die verpressten Pfähle samt deren Pfahlköpfe befinden sich nach dem Einbau unter der Geländeoberkante. Zum Montieren der Kopfplatten müssen die Pfahlköpfe freigelegt werden. Anschließend wird eine Sauberkeitsschicht auf Höhe der Fundamentunterkante eingebaut. Nach der Reinigung der Köpfe werden die Kopfplatten, fixiert durch je eine Mutter oberhalb und unterhalb, montiert. Mit diesem Arbeitsschritt ist Pfahlherstellung abgeschlossen.

Abschließende Tätigkeiten

Nach Abschluss der Arbeiten ist das Equipment zu reinigen und die Baustelle zu räumen.

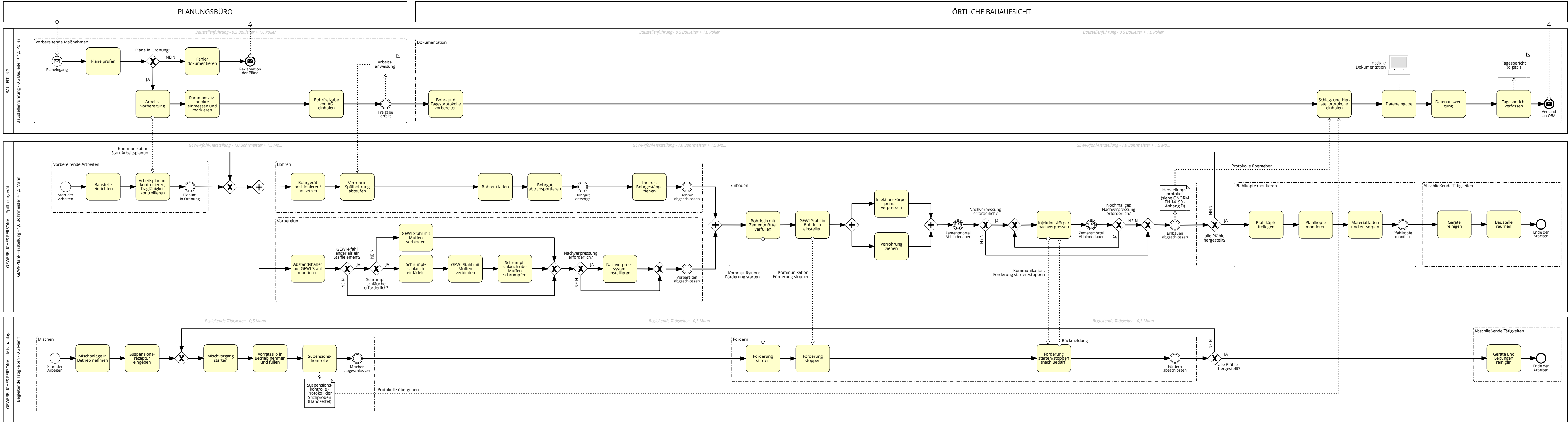


Abb. 4.8: Prozessdiagramm: Mikropfahl - GEWI-Pfahl im Spülbohr-Verfahren

4.9 Schlitzwand - Zweiphasen-Schlitzwand im Greifer-Verfahren

In diesem Unterkapitel werden die Arbeitsprozesse der Schlitzwand-Herstellung beschrieben und visualisiert. Die Beschreibung der Arbeitsschritte erfolgt entsprechend der Gliederung des Prozessdiagramms nach den Gruppen der Bauleitung und der des gewerblichen Personals am Seilbagger mit Greifer sowie des gewerblichen Personals an der Misch- und Wiederaufbereitungsanlage dar. Die anschließende Visualisierung (siehe Abb. 4.9) stellt die Schlitzwand-Herstellung im Greifer-Verfahren dar.

4.9.1 Bauleitung

Vorbereitende Maßnahmen

Nach Eingang und Kontrolle der Pläne startet die Arbeitsvorbereitung. Üblicherweise sind in den Plänen nur die fertigen Schlitzwände eingezeichnet. Auf Basis des geotechnischen Gutachtens, insbesondere der maximal erlaubten Öffnungsweite eines Schlitzes, wird die Lamelleneinteilung festgelegt. Nach Fertigstellung der Leitwände sind die Lamellen gegebenenfalls mit einem Farbspray auf den Leitwänden zu markieren.

Dokumentation

Im Zuge der Dokumentation der Arbeiten sind die Protokolle der Suspensionskontrollen, die Auswertung der Vertikalitätskontrolle, ein Herstellungsprotokoll gemäß *ÖNORM EN 14199:2016 10 15: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Schlitzwände* [88, Abschnitt 10]. Das Protokoll besteht aus zwei Teilen. Ersterer hat allgemeine Hinweise und Angaben zum Beton und zur Stützflüssigkeit zu enthalten. Der zweite Teil widmet sich den detaillierten Angaben zur Ausführung der einzelnen Schlitzwandelemente. In Anhang C der ÖNORM ist ein Mustervordruck zu finden. Die fertigen Protokolle werden der ÖBA zur Unterzeichnung übergeben.

4.9.2 Gewerbliches Personal - Seilbagger mit Greifer

Vorbereitende Maßnahmen

Beim Einrichten der Baustelle werden folgende Geräte auf die Baustelle transportiert und zusammengebaut:

- Seilbagger mit Greifer und Meißel
- zusätzlicher Seilbagger und Radlader
- Abschalelemente
- Betonschüttrohre
- Vorratssilos
- Mischanlage mit Pumpe und Leitungen
- ggf. Wiederaufbereitungsanlage

Neben dem Einrichten der Baustelle ist bei der Herstellung von Schlitzwänden dem Arbeitsplanum ein besonderes Augenmerk beizumessen. Der Untergrund muss für den Aufbau des schweren Gerätes ausreichend tragfähig sein. Da die Herstellung des Arbeitsplanums in aller Regel bauseits erfolgt, sollte die Tragfähigkeit im eigenen Interesse vor Start der Arbeiten überprüft werden.

Leitwände herstellen

Die Leitwände dienen der Führung des Werkzeuges und verhindern nebenbei das Nachrutschen von Boden in den offenen Schlitz. Zu unterscheiden sind Ortbeton- und Fertigteilbauweise. Bei den Interviews mit Experten konnte festgestellt werden, dass Leitwände aus Fertigteilen nur sehr selten zur Anwendung kommen. In erster Linie dort, wo ausreichend Platz für den größeren Aushub und die Lagerung der Fertigteile ist. Im urbanen Bereich werden fast ausschließlich Leitwände aus Ortbeton gefertigt.

Greifern

Nach Positionierung des Seilbaggers und Freigabe der Arbeiten startet der Aushub. Es ist insbesondere zu Beginn der Arbeiten darauf zu achten, dass der Greifer eine ausreichende Vertikalität aufweist. Unterstützt wird dieser Prozess durch Systeme zur Vertikalitätskontrolle wie beispielsweise die der Firma Jean Lutz SA [60]. Das System misst die Tiefe, die Abweichungen zur vertikalen Achse sowie Abweichung aufgrund von Drehung des Greifers.

Gängige Praxis ist es, Aushubleistung und Größe des Schlitzes so aufeinander anzupassen, dass eine Lamelle innerhalb eines Arbeitstages ausgehoben wird. Zudem wird überwiegend - gegensätzlich zur Beschreibung in der Literatur - mit einem kontinuierlichen Aushubverfahren gearbeitet. Bei einer Baugrube werden - in Abhängigkeit der Größe - zwei Start-Lamellen ausgehoben. Von den Starter-Lamellen gehen jeweils zwei Läufer-Lamellen aus, solange bis die Baugrube mit insgesamt zwei End-Lamellen geschlossen wird.

Entsorgen

Zur Entsorgung des Aushubes stehen zwei Varianten zur Auswahl. In den meisten Fällen wird das Material auf der Baustelle zwischengelagert, sodass überschüssige Bentonitsuspension abtropft. Später erfolgen Verladung und Abtransport des Materials.

Ist eine Zwischenlagerung auf der Baustelle aus Platzgründen nicht möglich, muss man sich der Direktverladung bedienen. Die Verladung erfolgt direkt mit dem Greifer in einen Sattelzug. Der Auflieger des Sattelzuges muss in diesem Fall dicht sein. Die Direktverladung kommt nur dann zur Anwendung (unter anderem wegen der höheren Kosten), wenn sie unumgänglich ist.

4.9.3 Gewerbliches Personal - Bewehren, Betonieren, Abschalelemente

Ziel einer effizienten Ausführung ist es, dass die Aushubarbeiten stets einen Tag in Anspruch nehmen. Tags darauf werden die Gruppen „Fugenelement lösen“ bis „Beton einbauen“ - auch in einem Arbeitstag - ausgeführt. Vor Start der Arbeiten ist der Pegel der Suspension im Schlitz zu prüfen. Sollte sich diese über Nacht abgesenkt haben, ist die Differenz auszugleichen.

Fugenelement lösen

Im Anschluss an die Kontrolle des Spiegels wird das Fugenelement der vorhergehenden, bereits betonierten Lamelle gelöst. Hierfür steht auf den meisten Baustellen ein zweiter Seilbagger zur Verfügung. So muss der Aushub nicht unterbrochen werden.

Entsanden

Unmittelbar nach dem Lösen des Fugenelementes beginnt das Entsanden der Arbeitssuspension. Hierfür wird eine Tauchpumpe in den Schlitz hinabgelassen und die Förderung zur Entsandungsanlage gestartet. Die Entsandung muss so lange fortgesetzt werden, bis ein maximaler Sandanteil von vier Prozent in der Arbeitssuspension erreicht wird. Zur Feststellung muss die Suspension im Schlitz regelmäßig beprobt werden. Die entsandete Suspension wird wieder in den Schlitz eingeleitet.

Alternativ zum zuvor beschriebenen Arbeitsablauf der kontinuierlichen Entsandung der Arbeitssuspension besteht die Möglichkeit des Austausches der Arbeitssuspension durch eine Betonier-

suspension. Nach Abpumpen der Arbeitssuspension wird diese gereinigt und für die anschließende Lamelle verwendet. Diese Methode ist zeiteffizienter, bedarf aber mehr Baustelleneinrichtung, da mehr Vorratssilos vorgehalten werden müssen.

Fugenelement einstellen

Während der Entsandung wird das Fugenelement als Abschluss zur nächsten Lamelle mithilfe des zweiten Seilbaggers eingebaut und in seiner Lage fixiert.

Bewehren

Nach Abschluss der Entsandung erfolgt der Einbau des Bewehrungskorbes. Je nach Tiefe des Schlitzes und Länge der Bewehrung müssen die vorgefertigten Körbe auf der Baustelle miteinander verbunden werden. Nach dem Einheben wird der Bewehrungskorb auf der Leitwand eingehängt und so in seiner Lage fixiert.

Betonieren

Nach Einbau des Betonschüttrohres startet das Betonieren. Es starten drei parallele Prozesse. Während der Beton über das Schüttrohr eingebaut wird, muss die verdrängte Suspension zur Entsandungsanlage gefördert werden. Das Ziehen des Betonschüttrohres erfolgt zeitversetzt, da das Rohr stets eine Einbindetiefe von drei Metern - vor dem Ziehen des ersten Abschnittes sechs Meter - aufweisen muss. Die Höhe des Betons und die des Schüttrohres müssen im Betoneinbringprotokoll gemäß *ÖNORM EN 14199:2016 10 15: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Schlitzwände* (Anhang C) [88] dokumentiert werden.

4.9.4 Gewerbliches Personal - Misch- und Wiederaufbereitungsanlage

Mischen

Das Mischen der Betonit-Suspension läuft heutzutage meist vollautomatisch ab. Nach dem Mischen wird die Suspension in Vorratssilo gepumpt, in denen das Bentonit - je nach Rezeptur - bis zu 24 Stunden quellen muss. Erst nach dem Quellen besitzt die Suspension ihre Eigenschaft zur Ausbildung eines Filterkuchens zwischen offenem Schlitz und anstehendem Boden. In Abhängigkeit des Bodens wird pro Lamelle die 1- bis 2-fache Menge des Volumens einer Lamelle an Suspension vorgemischt und bereitgehalten. Nach der Suspensionskontrolle ist die Stützflüssigkeit bereit für den Einsatz.

Fördern

Die Förderung erfolgt ebenso diskontinuierlich wie der Aushub. Gibt es keinen direkten Sichtkontakt mit dem gewerblichen Personal des Aushubes, bedient man sich Funkgeräten zur Kommunikation. Das Personal am Seilbagger kommuniziert dem Mischmeister, wann die Förderung zu Starten und Stoppen ist.

Wiederaufbereiten

Die Prozesse einer Entsandungsanlage sind bereits ausführlich in Abschnitt 3.4.3 beschrieben worden. Nach Abscheidung der Feststoffe wird die Arbeitssuspension beprobt. Nach bestandener Suspensionskontrolle wird die gereinigte Arbeitssuspension wieder in die Vorratssilos gepumpt und somit dem Arbeitsprozess zugeführt werden.

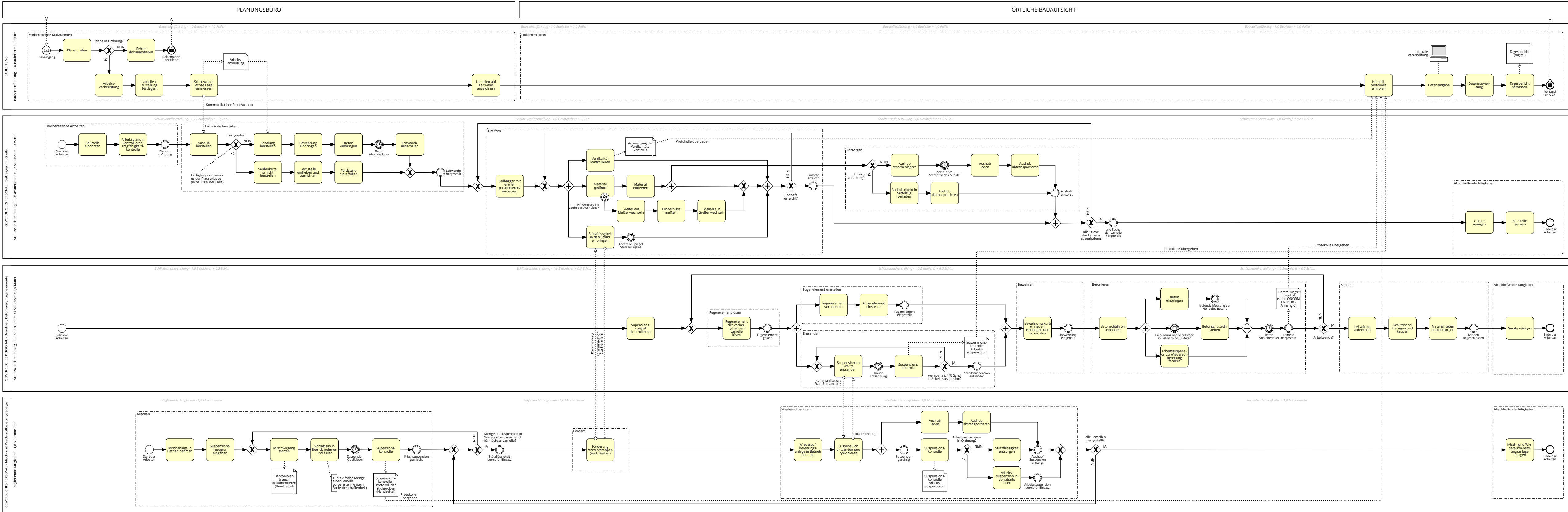


Abb. 4.9: Prozessdiagramm: Schlitzwand - Zweiphasen-Schlitzwand im Greifer-Verfahren

4.10 Schlitzwand - Zweiphasen-Schlitzwand im Fräs-Verfahren

In diesem Unterkapitel werden die Arbeitsprozesse der Schlitzwand-Herstellung beschrieben und visualisiert. Die Beschreibung der Arbeitsschritte erfolgt entsprechend der Gliederung des Prozessdiagramms nach den Gruppen der Bauleitung und der des gewerblichen Personals am Seilbagger mit Fräse sowie des Personals an der Misch- und Wiederaufbereitungsanlage dar. Die anschließende Visualisierung (siehe Abb. 4.10) stellt die Schlitzwand-Herstellung im Greifer-Verfahren dar.

4.10.1 Bauleitung

Die von der Bauleitung zu verrichtenden Tätigkeiten sind mit den Tätigkeiten des Prozessdiagramms *Schlitzwand - Zweiphasen-Schlitzwand im Greifer-Verfahren* aus Abschnitt 4.9.1 ident. Die Protokollierung der Bautätigkeiten von gefrästen Schlitzwänden hat wie in Abschnitt 4.9.1 beschrieben (gegreiferte Schlitzwände) gemäß ÖNORM zu erfolgen. Welche Angaben im Speziellen zu machen sind, ist der *ÖNORM EN 14199:2016 10 15: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Schlitzwände* [88, Abschnitt 10] zu entnehmen. Die angefertigten Protokolle werden der ÖBA zur Unterzeichnung übergeben.

4.10.2 Gewerbliches Personal - Seilbagger

Vorbereitende Tätigkeiten

Den Start der Arbeiten bildet das Einrichten der Baustelle sowie die Kontrolle des Arbeitsplanums auf dessen Zweckmäßigkeit und die Tragfähigkeit siehe Abschnitt 4.9.2. Zum Unterschied von Abschnitt 4.9.2 besteht die Baustelleneinrichtung bei mit Fräsen hergestellten Schlitzwänden aus folgenden Geräten:

- Seilbagger (mit Schlauchsystem) mit Fräse
- zusätzlicher Seilbagger und Radlader
- Abschalelemente
- Betonschüttrohre
- Vorratssilos
- Mischanlage mit Pumpe und Leitungen
- Wiederaufbereitungsanlage

Leitwände herstellen

Die Möglichkeiten der Leitwandherstellung und deren Teilprozesse laufen identisch zu den in Abschnitt 4.9.2 beschriebenen ab.

Fräsen

Nach Herstellung der Leitwände wird die Kombination aus Seilbagger und Fräse für den Aushub positioniert. Im Gegensatz zum Greifer wird der mit einer Fräse kontinuierlich ausgehoben. Der anstehende Boden wird durch zwei sich gegengleich drehende Fräsräder gelöst und zum Ansaugstutzen der Fräse gefördert. Von da aus wird die mit Fräsgut angereicherte Suspension zum Wiederaufbereitung gefördert.

Ein Hilffsystem, die Vertikalitätskontrolle [60], stellt sicher, dass der gefräste Schlitz in beide Achsrichtungen vertikal gefräst wird. Zudem wird mit dem System die Verdrehung der Fräse

gemessen. Im Falle von Abweichungen sind diese zu korrigieren. Moderne Fräsen verfügen zur Korrektur der Achsen über ausfahrbare Steuerklappen. Verdrehungen lassen sich mit Verdrehrichtungen korrigieren.

Während der Aushubarbeiten ist stets darauf zu achten, dass der Spiegel der Stützflüssigkeit auf einem gleichbleibendem Niveau ist.

4.10.3 Gewerbliches Personal - Bewehren, Betonieren, Fugenelemente

Die Tätigkeiten des gewerblichen Personals des Pools „Bewehren, Betonieren, Fugenelemente“ unterscheiden sich nicht von denen der Schlitzwandherstellung mit einem Greifer. In diesem Zuge wird auf Abschnitt 4.9.3 verwiesen.

4.10.4 Gewerbliches Personal - Misch- und Wiederaufbereitungsanlage

Mischen

Die Teilprozesse des „Mischens“ sind mit den in Abschnitt 4.9.4 beschriebenen Tätigkeiten ident.

Fördern

Mit dem Start des Aushubs wird die Förderung der Stützflüssigkeit in den Schlitz gestartet. Sobald die Fräse in Betrieb genommen wird, startet ebenso die Förderung des mit Fräsgut angereicherten Rücklaufes. Dieser wird zur weiteren Reinigung zur Entsandungsanlage transportiert. Zulauf und Rücklauf bilden demnach einen Kreislauf.

Wiederaufbereiten

Die Wiederaufbereitung der Arbeitssuspension läuft ebenso ident ab wie das „Mischens“ in Abschnitt 4.9.4 mit dem Unterschied, dass die Suspension während dem Fräsen kontinuierlich gereinigt wird. Dieser Umstand, sowie die höhere Aushubleistung gegenüber einem Greifer wirken sich vor allem auf die Größe der Wiederaufbereitungsanlage aus. Diese muss entsprechend größer dimensioniert werden.



4.11 Düsenstrahlverfahren - Einzelsäulen, unabhängig der Verfahrenstechnik

In diesem Unterkapitel werden die Arbeitsprozesse der DSV-Herstellung beschrieben und visualisiert. Die Beschreibung der Arbeitsschritte erfolgt entsprechend der Gliederung des Prozessdiagramms nach den Gruppen der Bauleitung und der des gewerblichen Personals am Bohrgerät sowie des Personals an der Hochdruckpumpe und der Rücklaufbehandlung dar. Die anschließende Visualisierung (siehe Abb. 4.11) stellt Herstellung von Säulen mit dem DSV dar.

4.11.1 Bauleitung

Vorbereitende Tätigkeiten

In der Vorbereitungsphase hat das Baustellenführungspersonal die eingegangenen Pläne des Planers zu prüfen. Sollten diese nicht in Ordnung sein, sind die Fehler zu dokumentieren und die Pläne an das Planungsbüro zu retournieren. Sind die Pläne in Ordnung, startet die Arbeitsvorbereitung. Ein wesentlicher Punkt dessen ist die Ausarbeitung eines Injektionskonzeptes mit Anzahl und Lage der Injektionspunkte zur Herstellung des ausgeschriebenen DSV-Körpers.

Vor Herstellung der eigentlichen DSV-Körper ist die hergestellte Probesäule durch das Baustellenführungspersonal zu prüfen. Sollte sich herausstellen, dass Planung und Realität nicht übereinstimmen, sind die Herstellungsparameter anzupassen und der Örtlichen Bauaufsicht in einem Probesäulenbericht (gem. ÖNORM) zu kommunizieren. Nach Freigabe der Parameter starten die Arbeiten. Sollten Erfahrungen unter vergleichbaren Bodenbedingungen bereits vorliegen, darf gemäß *ÖNORM EN 12716:2019 06 01: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Düsenstrahlverfahren* [86] auf die Herstellung des Probeelementes verzichtet werden.

Dokumentation

Die Bauleistungen sind vom Baustellenführungspersonal während der Ausführung zu dokumentieren. Die *ÖNORM EN 12716:2019 06 01: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Düsenstrahlverfahren* [86] sieht vor, dass die Protokolle folgende Informationen enthalten:

- zusammengefasste Tages- oder Schichtberichte der Düsenstrahlarbeiten
- Datum und Zeitpunkt der Aufzeichnung
- Parameter für das Düsenstrahlverfahren
- Beobachtungen hinsichtlich des Rückflusses
- Beschreibung der Probenentnahme und Prüfung
- unerwartete Ereignisse und Beobachtungen

Anhang D der ÖNORM sieht zur Aufzeichnung einen „Tagesbericht Misch- und Pumpenanlage“ und einen „Tagesbericht Düsgerät“ vor.

Die Aufzeichnungen der Suspensionskontrolle und die Tagesberichte sind am Ende des Arbeitstages einzuholen und gegebenenfalls zu digitalisieren. Auf Basis derer ist ein Bautagesbericht anzufertigen und an dieser Örtliche Bauaufsicht zu übermitteln.

4.11.2 Gewerbliches Personal - Bohrgerät

Vorbereitende Tätigkeiten

Vor Start der Bauarbeiten muss die Baustelle eingerichtet werden. Für die DSV-Arbeiten sind folgende Geräte auf der Baustelle unabdingbar:

- Bohrgerät mit Bohr- und Düsengestänge
- Mischanlage mit Hochdruckpumpe und Leitungen
- Vorratssilos
- Kompressor
- Entsandungsanlage
- Dekantierungsanlage inkl. Flockmittelanlage
- ggf. Absetzmulden

Im Anschluss ist des Arbeitsplanums zu kontrollieren, welches meist durch den Auftraggeber hergestellt wird. Daraufgehend wird der Rücklaufgraben ausgehoben, welche der Fangung der mit Bohrklein angereicherten Suspension dient.

Probesäule herstellen

In dieser Gruppe wird die Probesäule hergestellt und beprobt. Die Beprobung dient der Überprüfung der Herstellparameter. Es stehen mehrere Möglichkeiten der Überprüfung zur Verfügung. Gängige Praxis ist es, neben der Probesäule nachzubohren. Für den Fall, dass dies ab einer gewissen Tiefe ohne nennenswerten Widerstand möglich ist, ist davon auszugehen, dass die Probesäule bis zu diesem Radius gedüst wurde. Das Nachbohren dient somit zur Überprüfung des Durchmessers. Zur Überprüfung der Festigkeit ist nach dem Aushärten der Säule eine Kernbohrung zu ziehen und diese im Labor auf ihre Eigenschaften zu prüfen. In jeden Fall ist die Herstellung in einem Probesäulenbericht zu dokumentieren und der Bauleitung zu übermitteln. Bei Nichteinhaltung der in der Planung vorgesehenen Eigenschaften der Säule sind die Herstellungsparameter anzupassen.

Vorbohren

Beim Vorbohren handelt es sich um das Durchdringen von Materialien, welche über den zu düsenden Säulen liegen. Beispielsweise ist bei Unterfangungen das bestehende Fundament vorab zu durchbohren.

Spülbohren

Nach dem Vorbohren der Löcher wird das Bohrgerät positioniert. Das Abteufen der Spülbohrung erfolgt per Hand, d.h. die Geschwindigkeit wird durch den Bohrmeister manuell gesteuert. Bei der Spülbohrung kommt es zu einem Wasserverbrauch von 50 bis 100 l/min.

Fördern Rücklauf

Mit dem Start der Spülbohrung füllt sich der Rücklaufgraben. Ab diesem Zeitpunkt müssen die Pumpen zur Rücklaufförderung in Betrieb genommen werden. Die mit Bohrklein angereicherte Suspension wird der Rücklaufbehandlung zugeführt. Zudem sind regelmäßig Proben des Rücklaufes zu nehmen.

Vorschneiden

Das Vorschneiden ist - mit Ausnahmen - nur in bindigen Böden erforderlich. Hierfür sind die zuvor definierten Parameter (wie Druck, Durchflussmenge, etc.) in das Bohrgerät einzugeben. Das Vorschneiden erfolgt im Normalfall immer von unten nach oben, nur in Ausnahmen in entgegengesetzter Richtung. Während in den meisten Fällen mit Wasser vorgeschritten wird, kann es bei Unterfangungen notwendig sein, mit Zementsuspension vorzuschneiden. Grund dafür ist eine potenzielle Vermischung einer bereits fertig gedüsten Säule mit dem Wasser des Vorschneideprozesses. Ist das Vorschneiden abgeschlossen, wird das Bohrgestänge erneut bis zum Bohrlochtiefsten geführt.

Düsen

Nach dem Einstellen der Düsenparameter startet der Düsenvorgang. Während dem Düsen besteht die Gefahr, dass es zu einem „Stopfer“ kommt. Hierbei handelt es sich um eine Verlegung des Bohrlochmundes, bzw. des Ringraumes. Der Rücklauf kann nicht mehr austreten, was zwangsläufig zu einem Überdruck führt. Bei einem Fortsetzen der Arbeiten führt dies im schlimmsten Fall zu Hebungsschäden. Um die Verlegung zu lösen, ist ein Spülvorgang mit Wasser bei gleichzeitigem Auf- und Abbewegen des Düsengestänges erforderlich. Während dem Düsen hat der Bohrmeister in Düsprotokoll zu führen. Nach Erreichen der Säulenhöhe wird der Rest des Bohrgestänges gezogen.

4.11.3 Gewerbliches Personal - Hochdruckpumpe**Mischen**

Die heutzutage verwendeten Mischanlagen dosieren und mischen meist vollautomatisch. Nach dem Mischvorgang ist die Suspension durch den Mischmeister zu beproben und die Werte sind in das Protokoll der Suspensionskontrolle einzutragen.

Fördern

In der Prozessgruppe Fördern werden die Hochdruck-Pumpen entsprechend der jeweiligen Tätigkeiten des gewerblichen Personals am Bohrgerät bedient. Hierfür sind insbesondere die richtigen Drücke und Durchflussmengen des Wassers, bzw. der Zementsuspension einzustellen. Nach Abschluss des Düsenvorganges ist die Förderung zu stoppen.

4.11.4 Gewerbliches Personal - Rücklaufbehandlung**Entsanden, Dekantieren**

Die Prozesse und Wirkungsweisen von Entsandungs- und Dekantierungsanlagen wurden bereits ausführlich in Abschnitt 3.4.3 und Abschnitt 3.5.8 beschrieben.

Entsorgen

Die Prozessgruppe der Rücklaufentsorgung wird dann notwendig, wenn es nach der Vorreinigung des Rücklaufs zu keiner weiteren Reinigungsstufe durch eine Dekantierung kommt. Es stehen verschiedene Möglichkeiten der Entsorgung zur Verfügung.

Ist genügend Platz auf der Baustelle, besteht die Möglichkeit, den Rücklauf in ein Absetzbecken zu pumpen. Nach dem ersten Ansteifen, in jedem Fall jedoch vor dem Erhärten, muss der Rücklauf geladen und abtransportiert werden. Bei beengten Platzverhältnissen oder in innerstädtischen Bereichen wird der Rücklauf in Absetzmulden gepumpt. Zum Abtransport stehen das Absaugen mit Saugwägen oder der Abtransport der Mulden nach dem Ansteifen zur Auswahl.

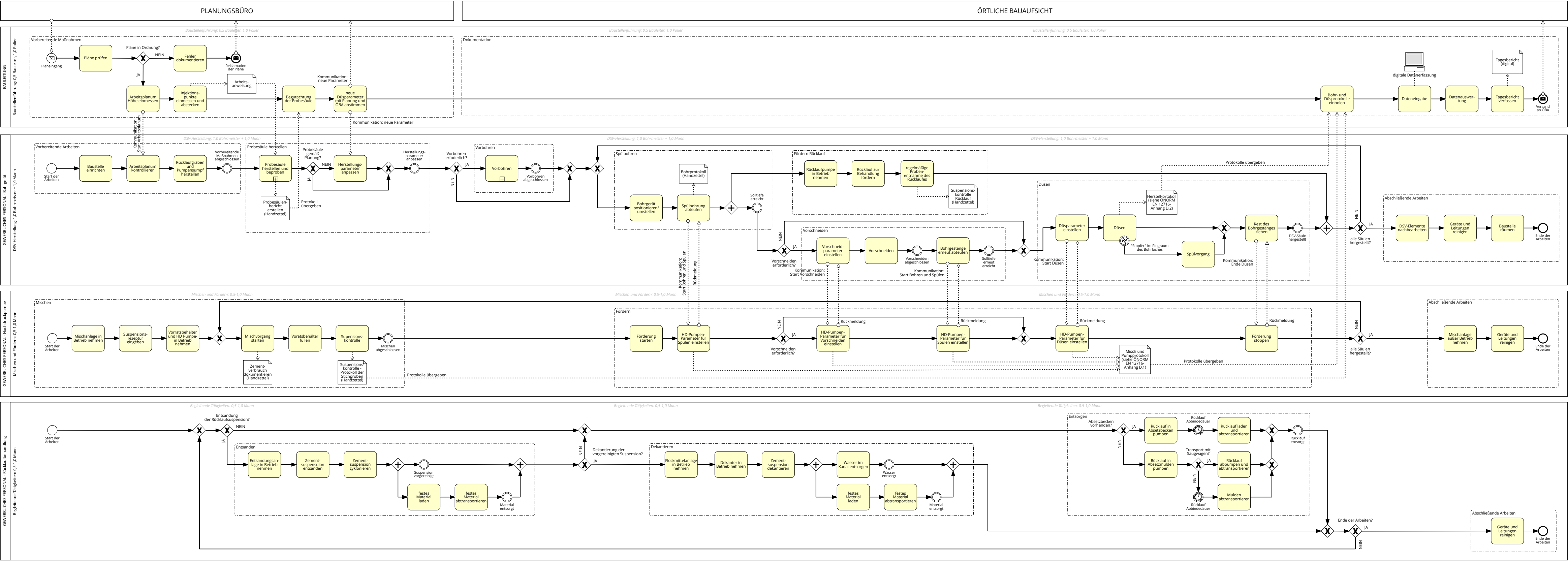


Abb. 4.11: Prozessdiagramm: Schlitzwand - Zweiphasen-Schlitzwand im Fräs-Verfahren

4.12 Zusammenfassung

Das Kapitel Prozesse widmete sich der detaillierten Darstellung und Beschreibung von elf verschiedenen Herstellungsverfahren des Spezialtiefbaus. Durch die Visualisierungen werden die komplexen Arbeitsabläufe und deren Abhängigkeiten voneinander dargestellt. Die Darstellung wurde mithilfe BPMN (Version 2.0) erstellt. Diese Modellierungssprache hat sich zur Abbildung von Geschäftsprozessen etabliert. Mit einer Vielzahl von Notationselementen lassen sich die Prozesse in einer überaus verständlichen Semantik abbilden. Eine Übersicht der Notationselemente samt deren Beschreibung ist in Tab. 4.1 zu finden.

Die Prozessdiagramme wurden im ersten Arbeitsschritt auf Basis von Fachliteratur, den Online-Auftritten von Bauunternehmen und Geräteherstellern erstellt. Zudem ist eigenes aus Lehrveranstaltungen generiertes Wissen in die Entwürfe der Diagramme eingeflossen. Im Anschluss wurde jedes der Diagramme mit Fachexperten (insbesondere Bauleitern von Spezialtiefbauunternehmen) in Form von persönlichen Gesprächen besprochen.

Der Vergleich mit den Prozessabläufen der Literatur (wie sie Maybaum et al. in tabellarischer Form in *Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau: Baugrund - Baugruben - Baugrundverbesserung - Pfahlgründungen - Grundwasserhaltung* [81] dargestellt) zeigt, dass diese nur in vereinfachter Form beschrieben werden. Zudem lassen tabellarische Darstellungen keine Entweder-Oder-Verzweigungen (in den Prozessdiagrammen als „Exklusives Gateway“ dargestellt) zu. Zusammengefasst wird festgestellt, dass die Prozessabfolgen der Fachliteratur eine gute Basis bilden, die auch weitgehend den Stand der Technik widerspiegelt. Die Beschreibungen weisen jedoch keinen hohen Detaillierungsgrad haben. Vor allem fehlen in der Literatur die Hinweise darauf, welcher Dokumentationsaufwand mit den Verfahren einher geht. Heutzutage ist die Dokumentation der erbrachten Leistung ein wesentlicher Bestandteil der Bauindustrie, weshalb der Dokumentationsaufwand in den Prozessdiagramme eindeutig gewissen Prozessen zugeordnet wird.

In einem weiteren Bearbeitungsschritt wurden fehlerhafte Bereiche der Diagramme überarbeitet sowie Aufwände in Bezug auf Personal, Gerät und Dokumentation zu Prozessen verortet. Die fertiggestellten Prozessdiagramme wiederum waren Basis für eine Online-Umfrage, die unter namhaften Bauunternehmungen verteilt wurde. In der Umfrage wurden Aufwandswerte zu Prozessgruppen und Teilprozessen sowie Tagesleistungswerte auf Basis von Rahmenbedingungen wie dem Boden oder der Tiefe erfragt. Die Ergebnisse der Umfrage sind im nachfolgenden Kapitel der *Aufwands- und Leistungswerte* zu finden. Ziel von Kapitel 5 ist es, einen Vergleich zwischen den in der Literatur abgebildeten Leistungswerten und den Ergebnissen der Umfrage herzustellen und diese zu analysieren.

Kapitel 5

Aufwands- und Leistungswerte

Das folgende Kapitel widmet sich den Aufwands- und Leistungswerten, welche essenziell für die Kalkulation sind, für die in Kapitel 4 beschriebenen Gewerke. Basis hierfür ist einerseits eine umfassende Literaturrecherche, sowie Interviews mit Experten aus der Praxis. Im Zuge der Experteninterviews wurden Korrekturen an den Prozessdiagramme aus Kapitel 4 vorgenommen und die maßgebenden Faktoren der Leistung erfragt.

Die Schlüsselfaktoren wurden in eine Online-Umfrage eingearbeitet. Ziel der Umfrage ist die Ermittlung von Bandbreiten von Aufwands- und Leistungswerten. Der Online-Umfragebogen, welcher mit dem Tool *2ask: Online-Umfrage-Tool* [105] erstellt wurde, ist anschließend an namhafte Bauunternehmen versandt worden. Die Ergebnisse der in der Umfrage gewonnen Daten wurden in die Unterkapitel *Erfahrungswerte - Praxis* eingearbeitet. Den Abschluss dieser Sektion bildet ein Vergleich zwischen Literatur und der Praxis.

5.1 Allgemein

In der Kalkulation müssen Bauprojekte auf monetärer Ebene richtig erfasst werden. Von besonderer Bedeutung ist es, dass der Kalkulant die Produktionsabläufe technologisch und wirtschaftlich richtig analysiert und erfasst. Aufwands- und Leistungswerte sind hierfür die maßgebenden Grundelemente der Kalkulation. Sie stellen die Verbindung zwischen Produktionsleistung und den Kosten her und erlauben es so, die Einzelkosten für Leistungspositionen zu berechnen. Das Produkt aus Einzelkosten und Menge ergibt schlussendlich die Einheitskosten einer Leistungsposition [29, 65]. Die Aufwands- und Leistungswerte können nach Kropik [65]

- aus persönlichen Erfahrungen stammen,
- einer systematischen ablaforientierten Überlegung des Kalkulanten entspringen,
- einer unternehmenseigenen Datenaufzeichnung entnommen werden oder
- Standardkalkulationen, Erfahrungswerte Fremder oder Literatur entnommen werden.

Aufwandswert

Der Aufwandswert ist ein Maß für die benötigten Arbeitsstunden (Lohnstunden) einer Arbeitskraft zur Erstellung der einzelnen Leistungseinheit einer Leistung. Aufwandswerte finden üblicherweise dort Anwendung, wo die menschliche Arbeitskraft der maßgebliche Faktor zur Erbringung einer Leistung ist.

$$\text{Aufwandswert } AW = \frac{\text{Arbeitsstunden } [h]}{\text{Mengeinheit } [m^2, m^3, \text{Stk.}, \text{etc.}]} \quad (5.1)$$

Leistungswert

Im Gegensatz dazu wird bei maschinenintensiven Arbeiten der Leistungswert verwendet. Diese geben an, welche Leistungsmenge ein Gerät in einer bestimmten Zeiteinheit erbringt.

$$\text{Leistungswert } LW = \frac{\text{Leistungsmenge } [m^2, m^3, \text{Stk.}, \text{etc.}]}{\text{Zeiteinheit } [h, AT, \text{etc.}]} \quad (5.2)$$

Da die Werte von vielen verschiedenen Faktoren abhängen, sollten diese nur als Richtwerte gesehen werden und stets eine Anpassung an die Rahmenbedingungen eines spezifischen Projektes erfolgen. Dies spiegelt sich unter anderem in der Literatur wider, wo vielfach Bandbreiten für die Werte definiert sind. Im Folgenden werden Aufwands- und Leistungswerte zu den entsprechenden Gewerken beschrieben. Im Spezialtiefbau ist es üblich, Leistungswerte auf einen Arbeitstag zu zehn Arbeitsstunden zu beziehen.

$$1 \text{ Arbeitstag } [AT] = 10 \text{ Leistungsstunden } [Std.] \quad (5.3)$$

Die in der Literatur recherchierten und aus Experteninterviews gewonnenen Leistungswerte werden in den folgenden Diagrammen dargestellt, Aufwandswerte hingegen werden zu Leistungswerten umgerechnet. Dies soll die Lesbarkeit erleichtern und einen Vergleich zwischen verschiedenen Verfahren vereinfachen. An dieser Stelle sei zu erwähnen, dass sofern nicht zwischen Lohn-Stunde und Zeit-Stunde unterschieden wird, der Leistungswert der Kehrwert des Aufwandswertes ist. Nach Kropik [65] ist es für die Kalkulation nicht unerheblich, ob mit einem Aufwandswert oder einem Leistungswert kalkuliert wird.

5.1.1 Einflussfaktoren

Die Aufwands- und Leistungswerte der Herstellung von Spezialtiefbau-Gewerken hängen von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab. Die wichtigsten Faktoren, der Boden und die herzustellende Tiefe, sind nachfolgend beschrieben und gehen maßgebend in die Umfrage zu den Tagesleistungswerten der Herstellungsverfahren ein.

5.1.1.1 Boden

Der Boden ist für jedes Gewerk des Spezialtiefbaus der entscheidende Einflussfaktor auf die Wahl von Verfahren, Geräte und Werkzeug. Mehr noch wirkt er sich auf die Leistung aus. Im Zuge der Umfrage werden rammende, drehbohrende, schlagbohrende und sonstige materialfördernde Verfahren abgefragt.

Für rammende Verfahren dient die „Rammeignung von Böden“ [81, S. 278] nach Maybaum et al. als Grundlage für die Auswahl der Böden. Für rammende Verfahren gehen Böden mit leichter, mittelschwerer und schwerer Rammung (siehe Tab. 2.1) in die Umfrage ein.

Für alle sonstigen Verfahren wurden Böden auf Basis eines repräsentativen Bodenprofils der Stadt Wien - Brückenbau und Grundbau (MA29) [107] definiert. Folgende Böden gehen bei den Verfahren in die Umfrage ein:

- Fein- und Mittelkies (mitteldicht gelagert)
- Fein- und Mittelsand (dicht gelagert)
- Schluff (steif bis halbfest)

Allgemein wird festgestellt, dass bei bindigen Böden die Konsistenz, bei nichtbindigen Böden die Lagerungsdichte der entscheidende Faktor auf die Leistung der Verfahren ist.

5.1.1.2 Tiefe

Neben dem Boden spielt die herzustellende Tiefe des jeweiligen Bauwerkes eine entscheidende Rolle. Die mit zunehmender Tiefe einhergehenden Leistungsminderungen sind dem Boden geschuldet. Als Beispiel sei an dieser Stelle das Einbringen von Spundbohlen genannt. Mit zunehmender Tiefe nehmen die Widerstandskräfte resultierend aus Mantelreibung und Schlossreibung zu. Dem gegenüber stehen Leistungsmindernde Faktoren bei geringer Tiefe. In diesem Fall nehmen Zeiten für das Umstellen, das Aufnehmen der Bohlen, das Ausrichten und Einfädelns (d.h. die unproduktive Zeiten) im Verhältnis zum Rammen (zu den produktiven Zeiten) zu und wirken sich dadurch negativ auf die Tagesleistung aus. Abb. 5.7 stellt diesen Effekt graphisch dar.

5.2 Online-Umfrage

Für den Vergleich zwischen Aufwands- und Leistungswerten der Literatur und Praxis, wurde auf das Werkzeug einer Online-Umfrage zurückgegriffen. Die Umfrage, welche mit dem Online-Umfrage-Tool *2ask* [105] durchgeführt wurde, liefert valide Daten aus der Wirtschaft.

5.2.1 Aufbau

Den Start der Online-Umfrage bilden allgemeine Informationen. Neben einer allgemeinen Beschreibung der Umfrage, einer Erklärung der Fragebeantwortung sowie dem Zeitaufwand wird darauf hingewiesen, dass die Teilnahme an der Umfrage anonym ist. Die Ergebnisse werden in dieser Arbeit nur als Mittelwert, bzw. in Bandbreiten veröffentlicht.

Der Aufbau der Umfrage gliedert sich in Anlehnung an die zuvor in Kapitel 4 erarbeiteten Prozessdiagrammen. Vor Beantwortung der Fragebögen zu den Verfahren mussten Teilnehmer eine Multiple-Choice-Auswahl (siehe Abb. 5.1) treffen, zu welchen Verfahren sie Auskünfte geben können. Durch diese Maßnahme wurde sichergestellt, dass jeder Teilnehmer nur die Fragebögen sieht, die er auch auf Basis seiner Erfahrungen beantworten kann.

Auswahl der Herstellungsverfahren

Über welche der Verfahren verfügen Sie über baupraktisches Expertenwissen und können Zeitaufwänden den Einzelprozessen zuordnen?

☐ Spundwand - verankerte Wellenwand im Ramm-Verfahren
☐ Verdrängungspfahl - Ort betonrammpfahl mit Fuß im Ramm-Verfahren
☐ Bohrpfahl - Einzelpfahl im Kelly-Verfahren
☐ Bohrpfahl - tangierende Bohrpfahlwand im SOB-Verfahren
☐ Bohrpfahl - überschrittene Bohrpfahlwand im VdW-Verfahren
☐ Bohrpfahl - Einzelpfahl im Greifer-Verfahren
☐ Mikropfahl - Duktulpfahl im Ramm-Verfahren
☐ Mikropfahl - GEWI-Pfahl im Spülbohr-Verfahren
☐ Schlitzwand - Zweiphasen-Schlitzwand im Greifer-Verfahren
☐ Schlitzwand - Zweiphasen-Schlitzwand im Fräs-Verfahren
☐ Düsenstrahlverfahren - Einzelsäulen, unabhängig der Verfahrenstechnik

Abb. 5.1: Auswahl der Herstellungsverfahren [105]

Nach dem Bestätigen der Auswahl gelangte der Teilnehmer nach der Reihe zu den von ihm ausgewählten Verfahren. Am Anfang jedes Fragebogens sind Rahmenbedingungen definiert, unter welchen der Fragebogen zu beantworten ist. Zur Veranschaulichung der Prozesse wurde ein Link zum jeweiligen Prozessdiagramm angefügt.

Im weiteren Verlauf sind die einzelnen Fragen der Gruppen zu beantworten, wobei die Zeitaufwände von Einzelprozessen sowie sinnvoll zusammengefassten (der auch parallel ablaufenden) Teilprozessen abgefragt werden wie Abb. 5.2 darstellt. Ein besonderes Augenmerk wurde in diesem Zuge auf den kritischen Weg des Standardprozesses gelegt, welcher als der immer wiederkehrenden Prozess der Leistungserbringung definiert wurde.

Gruppe "Bohren"

Bohrgerät positionieren [min]	
erstes Bohrrrohr aufnehmen und ansetzen + Lage und Vertikalität kontrollieren [min]	
Bohrrrohr aufnehmen und ansetzen [min/Bohrrrohr.]	
Bohrrrohr mit Drehteller eindrehen + Verrohrung nachdrehen (bei Bedarf) + Boden lösen und fördern + Bohrgut abwerfen [min/m] *	
Bohrlochsohle reinigen [min]	

* die mit Stern markierten Felder werden in den **Tagesleistungswerten** abgefragt.

Abb. 5.2: Umfrage: Aufwandswerte einer Gruppe = Prozess [105]

Tiefenabhängige Aufwandswerte, wie die Prozessgruppe „Bohrrrohr mit Drehteller eindrehen + Verrohrung nachdrehen (bei Bedarf) + Boden lösen und fördern + Bohrgut abwerfen“ mit der Einheit min/m waren im Gegensatz zu allen anderen offenen Fragen nicht zwingend zu beantworten.

Zum Abschluss jedes Herstellungsverfahrens wurden Tagesleistungswerte in tabellarischer Form angefragt. Als maßgebende Einflussfaktoren auf die Tagesleistungswerte wurden verschiedene Böden und herzustellende Tiefen definiert. Die angegebenen Tiefen sind an die Positionen des Standardisierten Leistungsverzeichnisses [48] angelehnt. Auf Basis der Tagesleistungswerte wurde auf die tiefenabhängigen Aufwandswerte zurückgerechnet, welche in Abschnitt 5.2.4 ausführlich beschrieben ist.

Treten bei Herstellungsverfahren durch den Einfluss von Grundwasser verfahrensbedingte Faktoren der Leistungsminderung auf, werden diese in einer separaten Fragestellung (siehe Abb. 5.4) ergründet.

Den Abschluss der Umfrage wurden allgemeine Daten zum Geschlecht, der Altersgruppe, der Beschäftigungsgruppe sowie der Erfahrung im Spezialtiefbau in Erfahrung gebracht.

5.2.2 Teilnehmer

Im Zuge der Verteilung der Umfrage wurde ein großes Teilnehmerfeld im deutschsprachigen Raum kontaktiert. Sämtliche namhaften Spezialtiefbauunternehmen Österreichs und Teile Deutschlands partizipierten bei der Umfrage. Ein besonderer Fokus wurde im Zuge dessen auf die Mitglieder

Tagesleistungswerte

Bitte geben Sie die Tagesleistungswerte in **[m/AT]** an. Die Tagesleistungswerte beinhalten alle Leistungen der Gruppen "Bohren", "Entsorgen", "Bewehren" und "Betonieren".

	0 - 10 m	0 - 20 m	0 - 30 m
Fein- und Mittelkies (<i>mitteldicht gelagert</i>)			
Fein- und Mittelsand (<i>dicht gelagert</i>)			
Schluff (<i>steif bis halbfest</i>)			

Abb. 5.3: Umfrage: Tagesleistungswerte eines Verfahrens [105]

Leistungsminderung

Geben Sie nachfolgend den **prozentuellen Faktor der Leistungsminderung im Vergleich zum Bohren im Trockenen** an.

Beispiel: Das Bohren im Grundwasser verursacht eine Leistungsminderung um 20 Prozent. --> Antwort: 20 [Prozent]

für das Bohren im Grundwasser [%]:

für das Bohren unter Wasserauflast [%]:

Abb. 5.4: Umfrage: Leistungsminderung eines Verfahrens [105]

VÖBU (Vereinigung Österreichische Bohr-, Brunnenbau- und Spezialtiefbauunternehmungen) gelegt.

Im Laufe der Umfrage konnten auf diese Weise 39 Teilnehmer für die Umfrage gewonnen werden. Eine Person der Teilnehmer war weiblich, 38 männlich. Neben dem Geschlecht waren die Teilnehmer der Umfrage aufgefordert, Angaben zu ihrer Position im Unternehmen zu machen, wobei Mehrfachnennungen möglich waren. Abb. 5.5 stellt das die Position der Teilnehmer am Bauprojekt dar.

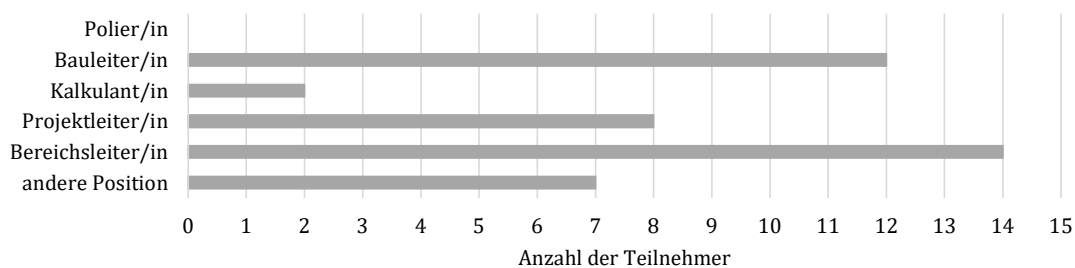


Abb. 5.5: Position der Teilnehmer im Unternehmen

Den Abschluss der Umfrage bildet die Frage nach der Erfahrung der Teilnehmer im Spezialtiefbau, die in Abb. 5.6 dargestellt ist.

5.2.3 Ergebnisse

Mit Abschluss der Umfrage wurden 73 beantwortete Fragebögen auf 39 Teilnehmer gezählt. Demnach hat jeder Teilnehmer der Umfrage im Durchschnitt 1,87 Fragebögen beantwortet. Die minimale Anzahl an beantworteten Fragebögen lag bei einem, die maximale bei sechs Fragebögen.

Tab. 5.1: Aufbau der Fragebögen

Fragebogen zu Prozessdiagramm XXX			
Rahmenbedingungen			
Rahmenbedingung 1:	XXX		
Rahmenbedingung 2:	XXX		
Rahmenbedingung 3:	XXX		
Gruppe (= Prozess)			
Teilprozess [min]	YYY		
Teilprozess [min]	YYY		
Teilprozess [min/m]*	YYY		
Teilprozess + Teilprozess = Teilprozessgruppe [min]	YYY		
Tagesleistungswerte in [Einheit/AT	Tiefe 1	Tiefe 2	Tiefe 3
Boden 1	X	X	X
Boden 2	X	X	X
Boden 3	X	X	X

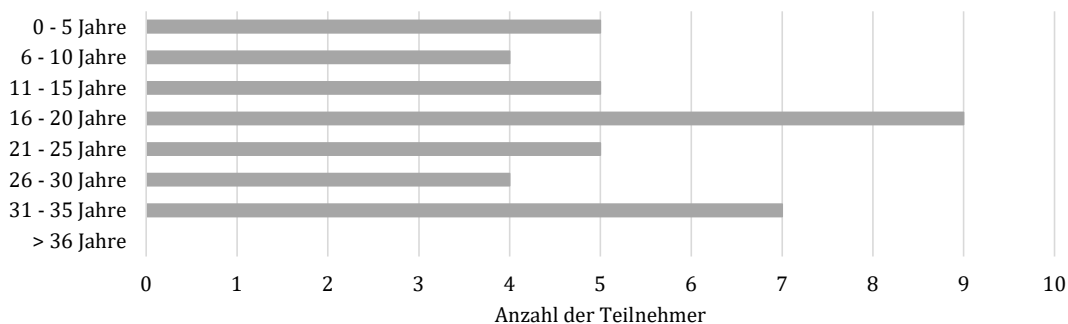


Abb. 5.6: Erfahrung der Teilnehmer im Spezialtiefbau

Zudem konnte durch eine umfragereiche Verteilung an diverse Spezialtiefbau-Unternehmen sichergestellt werden, jeder Fragebogen von zumindest zwei Teilnehmern beantwortet wurde. Bei neun von elf Fragebögen konnten sogar fünf oder mehr Antworten generiert werden.

5.2.4 Auswertung

Die eindeutig definierten Aufwandswerte und Tagesleistungswerte der Umfrage bedürfen keiner weiteren Auswertung. Die Aufwandswerte gehen in diese Arbeit als Bandbreite von minimalem bis maximalem Aufwandswert ein. Bei den Tagesleistungswerten werden in die gegenständigen Arbeit die Durchschnittswerte der Ergebnisse abgebildet.

Für tiefenabhängige Aufwandswerte bedarf es einer Rückrechnung, die gemäß Tab. 5.2 durchgeführt wurde. Die Zeilen 1 (Tiefen), 2 (Fixzeiten), 3 (tiefenabhängige Fixzeiten) und 4 (Tagesleistung) werden hierfür der Umfrage direkt entnommen. Zur Berechnung von Zeile 5 wird der Tagesleistungswert durch die Tiefe dividiert. In Zeile 6, der Rest-Zeit pro Arbeitstag, werden von 10 h/AT a 60 min die Fixzeiten multipliziert mit den Stück pro Arbeitstag abgezogen. Auf Basis dessen wird der Aufwandswert in Zeile 7 gebildet. Hierfür wird die Rest-Zeit durch die Tagesleistung dividiert. Die Zeilen 8 und 9 veranschaulichen den Minimal- und Maximal-Wert des Aufwandswertes. Diese beiden Werte gehen wiederum als Bandbreite in die Tabelle der Aufwandswerte des jeweiligen Prozessdiagrammes ein.

Tab. 5.2: Beispielhafte Rückrechnung tiefenabhängiger Aufwandswerte

Berechnungswerte									Beschreibung [Einheit]	Berechnung
Tiefe 1			Tiefe 2			Tiefe 3			Tiefen [m]	1
X									Fixzeiten [min]	2
X			X			X			tiefenabhängige Fixzeiten [min]	3
X	X	X	X	X	X	X	X	X	Tagesleistung [EH/AT]	4
X	X	X	X	X	X	X	X	X	Stück [Stk/AT]	5=4/1
X	X	X	X	X	X	X	X	X	Rest-Zeit [min/AT]	6=600-6*(2+3)
X	X	X	X	X	X	X	X	X	Aufwandswert [min/EH]	7=6/4
MIN-Wert									Minimal-AW [min/EH]	8=min(7)
MAX-Wert									Maximal-AW [min/EH]	9=max(7)

Vor Auswertung und Berechnung der Aufwandswerte, Tagesleistungswerte sowie tiefenabhängige Aufwandswerte wurden die Ergebnisse gesichtet. Damit sogenannte „Ausbreißer“ keinen Einfluss auf das Ergebnis der Umfrage haben, wurden jeweils der kleinste und der größte Wert aus den Berechnungen ausgenommen.

5.3 Spundwände

Im nachfolgenden Unterkapitel werden Erfahrungswerte aus der Literatur gesammelt dargestellt und mit den in der Online-Umfrage gewonnenen Erfahrungswerten der Spundwand-Herstellung verglichen.

5.3.1 Erfahrungswerte - Literatur

Die Bandbreite, der in der Literatur zu findenden Leistungswerte, bewegt sich für das Rammen zwischen 100 und 250 m²/AT. Für das Vibrationsverfahren sind mit 90–200 m²/AT etwas geringere Tagesleistungen realisierbar. Neben den im Diagramm angeführten Werten bietet Hüster in seinem Buch *Leistungsberechnung der Baumaschinen* ein Diagramm (siehe Abb. 5.7) mit Tagesleistungen für das Schlagrammen in Abhängigkeit von Rammtiefe und Rammeignung des anstehenden Bodens. In dem Diagramm ist ersichtlich, dass bei schlechter Rammeignung des Bodens die Tagesleistung durchaus bis unter 60 m²/AT fallen kann. Allgemein wird festgestellt, dass die Leistung besonders durch

- die Rammeignung des Bodens,
- das gewählte Einbringverfahren und
- der einzubringenden Tiefe der Spundwände beeinflusst wird.

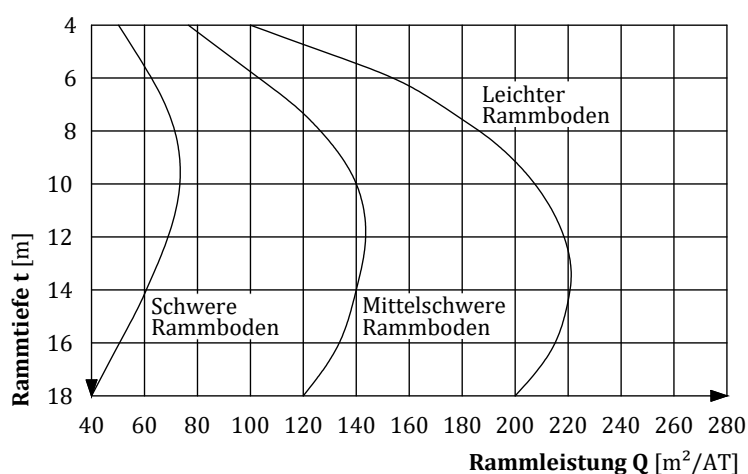
In Tab. 5.3 stellt Maybaum et al. Leistungsansätze sowie Zeitaufwände für Teilprozesse der Spundwandherstellung zusammen. Zur Rammtiefe, der Breite der Bohlen und dem anstehenden Boden sind keine weiteren Angaben angeführt. Zusätzlich führt Maybaum et al. in Tab. 5.4 Tagesleistungswerte an.

5.3.2 Erfahrungswerte - Praxis

Die im Zuge von Experteninterviews und der Online-Umfrage gewonnenen Aufwandswerte für Teilprozesse und in Gruppen zusammengefasste Teilprozesse sind in Tab. 5.5 dargestellt. Folgende Rahmenbedingungen wurden in der Umfrage vorgegeben:

Tab. 5.3: Kennwerte der Herstellung von Spundwänden (Literatur) [81, S. 108 ff.]

Prozess	Teilprozess	Kennwerte
Vorbereitende Tätigkeiten	Einrichten der Baustelle	1–1,50 AT
Einbringen der Doppelbohlen	Vorkehrungen gegen Voreilen	10 min je Doppelbohle
	Einrammen	4,50–12 min/m ²
	Rammen (Dieselhammer)	20 mm je 10 Hammerschläge
	Vibrieren (Vibrationsbär)	4–20 m/min
	Einpressen (Presse)	3–10 m/min
Abschließende Tätigkeiten	Umstellen des Gerätes	3 min je Doppelbohle
	Geräteausfall, -wartung	20 min / AT
	Räumen der Baustelle	1 AT

**Abb. 5.7:** Anhaltswerte für die Leistung von Schlagrammen bei Spundbohlen [56, S. 157]

- *Bohlenbreite:* 1,00 m (Doppelbohle)
- *Ausführungsform:* Wellenwand aus U- oder Z Profilen
- *Böden:* leichte, mittelschwere und schwere Rammung (gemäß Tab. 2.1)
- *Tiefen:* 0–6 m, 0–12 m, 0–14 m und 0–>14 m

Der Prozess „Spundbohle einbringen“ wurde wie in Abschnitt 5.2.4 beschrieben durch die Rückrechnung auf Basis der Tagesleistungswerte ermittelt. Für die Tiefengruppe 0–>14 m wurde in den Berechnungen eine Länge von 16 m gewählt. Diese Länge ist die maximal lieferbare Länge von Spundbohlen ohne Sondertransport.

Neben Aufwänden wurden Tagesleistungswerte für das Rammen von Spundbohlen abgefragt. Die Tagesleistungswerte wurden in tabellarischer Form abgefragt, wobei drei verschiedene Böden und vier unterschiedliche Rammtiefen als maßgebende Faktoren definiert wurden. Die Böden wurden auf Basis der Rammeignung (leichte, mittelschwere und schwere Rammung) (siehe Tab. 2.1) nach Maybaum et al. [81, S. 98] ausgewählt. Das Ergebnis der Umfrage wird in Tab. 5.6 dargestellt.

Tab. 5.4: Zusammenstellung Leistungswerte - Spundwände (Literatur)

Quelle		Verfahren	Rammtiefe	Bodenverhältnisse	Leistungswert
Bauer	[9]	Rammen	13 m	k.A.	186 m ² /AT
Maybaum et al.	[81]	Rammen	k.A.	k.A.	100–250 m ² /AT
Jacob et al.	[59]	Vibrieren	8,50 m	k.A.	200 m ² /AT
Brandl und Jodl	[31]	Vibrieren	10 m	Wien	200 m ² /AT
		Vibrieren	12 m		150 m ² /AT
		Vibrieren	14 m		120 m ² /AT
		Vibrieren	16 m		100 m ² /AT
		Vibrieren	18 m		90 m ² /AT
Hüster	[56]	Rammen	10 m	Grobkies, dicht	196 m ² /AT

Tab. 5.5: Ausfandswerte der Spundwandherstellung (Doppelbohlenbreite: 1000 mm)

Prozess	Teilprozess	Kennwerte
Vorbereitende Tätigkeiten	Einrichten der Baustelle	2,5–5 h
	Arbeitsplanum/Tragfähigkeit kontrollieren	
Einbringen	Trägergerät positionieren/umstellen	1–5 min
	Spundbohle aufnehmen	1–3 min
	Spundbohle einfädeln	0,5–2 min
	Spundbohle ausrichten	1–3 min
	Spundbohle einbringen	0,95–3,53 min /m ²
Abschließende Tätigkeiten	Baustelle räumen	2,5–5 h

Tab. 5.6: Tagesleistungswerte: gerammte Spundwand [m²/AT]

	0–6 m	0–12 m	0–14 m	0–>14 m
leichte Rammung	200–350	260–375	240–400	190–400
mittelschwere Rammung	160–250	210–300	190–300	150–300
schwere Rammung	120–150	150–200	130–250	100–250

5.3.3 Vergleich Literatur - Praxis

Vergleicht man die Erfahrungswerte aus Literatur und Praxis fällt auf, dass die an der Umfrage beteiligten Unternehmen die Tagesleistungen für das Rammen von Spundbohlen mit bis zu 400 m²/AT angeben. Im Gegensatz dazu ist die maximale Tagesleistung gemäß Literatur mit etwa 250 m²/AT unter guten Bedingungen (wie etwa einem leichten Rammboden) begrenzt. Betrachtet man die Zeitaufwände der Einzelprozesse fällt auf, dass die in der Literatur anberaumte Zeit für das Einrichten und das Räumen der Baustelle mit 1–1,5 AT relativ groß angegeben wird. Diese Prozesse beinhalten im Wesentlichen nur das Ent- und Verladen von Gerät und Bohlen sowie den Aufbau des Gerätes.

Die von Hüster angegebenen Verläufe der Tagesleistungswerte in Abhängigkeit der Tiefe und des Bodens werden wiederum bestätigt, wie Abb. 5.7 zeigt. Die Tagesleistungswerte nähern sich bei einer Tiefe zwischen 10 und 14 m (in Abhängigkeit der Rammbarkeit des Bodens) dem Maximum und nehmen bei größeren Tiefen wieder ab. Dieses Phänomen lässt sich einerseits durch häufigere Umstellvorgänge bei geringen Tiefen und größerer Reibungskräfte bei größeren Tiefen erklären.

5.4 Verdrängungspfähle

Im nachfolgenden Unterkapitel werden Erfahrungswerte aus der Literatur gesammelt dargestellt und mit den in der Online-Umfrage gewonnenen Erfahrungswerten der Verdrängungspfahl-Herstellung verglichen.

5.4.1 Erfahrungswerte - Literatur

Für Ortbetonrammpfähle, deren Durchmesser typischerweise zwischen 0,40 und 0,60 m sind, kann von Tagesleistungen mit 50–100 m ausgegangen werden. Während Brandl und Jodl nicht näher auf das Material der Fertiggrammpfähle eingehen, definiert Girmscheid Tagesleistungen für Stahlbetonfertigpfähle zwischen 90 und 120 m pro Tag in Abhängigkeit der Rammtiefe. Maybaum et al. hingegen geht von bis zu 200 m/AT aus, macht jedoch keine näheren Angaben zum Material. Die wesentlichen Einflussfaktoren auf Leistung und Kosten sind:

- die Rammeigenschaften des Untergrundes,
- die Leistung des Rammjärens,
- das Verhältnis von Rammgewicht zu Pfahlgewicht,
- die Oberflächenrauigkeit und
- die zu verdrängende Querschnittsfläche des Pfahles [81].

Neben den in nachfolgender Tab. 5.8 angeführten Leistungswerten bietet Hüster Diagramme (siehe nachfolgende Abb. 5.9 und Abb. 5.8) mit Anhaltswerten zu Tagesleistungen von Schlagrammen und Vibrationrammen in Abhängigkeit von Rammtiefe und Rammeignung des Bodens.

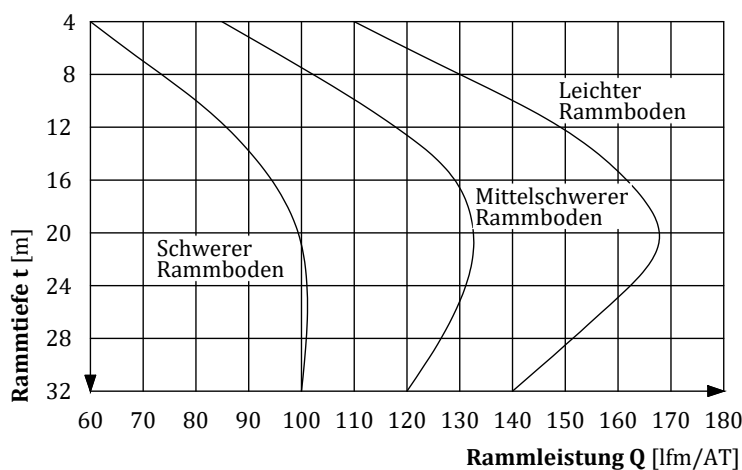


Abb. 5.8: Anhaltswerte für die Leistung von Schlagrammen bei Stahl- und Betonpfählen [56, S. 158]

Passend zum Prozessdiagramm des Ortbetonrammpfahles (siehe Abb. 4.2) gibt Maybaum et al. kalkulatorische Richtwerte an, welche in Tab. 5.7 dargestellt sind. Die Tabellen liefern jedoch keinen Hinweis auf die herzustellende Tiefe oder Querschnitt des Pfahles.

Tab. 5.7: Kennwerte der Herstellung von Ortbetonrammpfählen mit Fuß (Literatur) [81, S. 335]

Prozess	Teilprozess	Kennwert
Rammen	Ansetzen und Ausrichten der Rammeinheit	5 min
	Betonpfropfen einfüllen und anstampfen	10 min
	Abteufen des Rammrohres mit Innenrammung	9 min/m
	Pfahlfußherstellung, Ausrammen des Betonpfropfens	30–45 min
Bewehren	Einbau der Bewehrung	10–15 min
Betonieren	Betonieren, Ziehen der Verrohrung	2,40 min/m
Sonstiges	Freilegen und Kappen des Pfahlkopfes	30–60 min
	Umsetzen der Rammeinheit	5–10 min

Tab. 5.8: Zusammenstellung der Leistungswerte - Verdrängungspfähle (Literatur)

Quelle	Pfahlart	Tiefe	Querschn.	Leistungswert
Girmscheid [52]	Holz- und Stahlpfähle	k.A.	k.A.	200 m/AT
	Stahlbetonfertigpfahl	k.A.	0,24 x 0,24 m	120 m/AT
	Stahlbetonfertigpfahl	k.A.	0,30 x 0,30 m	105 m/AT
	Stahlbetonfertigpfahl	k.A.	0,37 x 0,37 m	90 m/AT
	Ortbetonrammpfahl	k.A.	0,40 m	80 m/AT
	Ortbetonrammpfahl	k.A.	0,50 m	70 m/AT
Maybaum et al. [81]	Stahlbetonfertigpfahl	k.A.	k.A.	100–200 m/AT
Brandl und Jodl [31]	Ortbetonrammpfahl	10–20 m	k.A.	50–100 m/AT
	Fertigrammpfahl	<10 m	k.A.	120 m/AT
	Fertigrammpfahl	10–20 m	k.A.	105 m/AT
	Fertigrammpfahl	>20 m	k.A.	90 m/AT

5.4.2 Erfahrungswerte - Praxis

Während des Experteninterviews wurden Faktoren, welche sich auf die Leistung der Herstellung auswirken, erfragt. Im Zuge des Interviews wurde der Boden als maßgebender Faktor genannt. Gegebenenfalls angetroffenes Grundwasser hat keinen Einfluss auf die Leistung, da das Bohrloch stets trocken ist. Untergeordnete Rollen spielen Durchmesser und Tiefe. Der Durchmesser hat kaum Einfluss, da mit zunehmendem Durchmesser größere Fallbären zum Einsatz kommen. Größere Tiefen wirken sich nicht direkt auf den Leistungswert zur Herstellung eines Pfahles aus. Vielmehr kommt es bei weniger tiefen Pfählen zur mehr Umstellzeiten pro AT. Die Tiefe wirkt sich demnach auf den Tagesleistungswert einer Baustelle aus. Eine Steigerung der Leistung in größeren Tiefen zu erzielen, indem der Fallbär in zunehmender Tiefe aus größerer Höhe fallenzulassen wird, ist nicht zu empfehlen. Im schlimmsten Fall führt dies zu einem Aufbersten des Vortriebsrohres.

Eine Ausnahme, die zu einer erheblichen Leistungsminderung führt, ist das Vortreiben von Rohren in Tiefen größer 18 m mit Standard-Rammgeräten. Das Vortriebsrohr muss für diesen Fall während dem Abteufen verlängert werden, für den Ausbau wieder gekürzt werden. Das Verlängern und Kürzen dauert je eine halbe Stunde und führt somit zu einem erheblichen Leistungsrückgang. Die Maßnahme ist, sofern sie nicht kalkuliert wurde, nur in Ausnahmefällen anzuwenden.

Auf Basis der Informationen aus dem Interview wurden in der Umfrage Aufwands- und Leistungswerte für drei Böden, welche nach sowie drei Tiefen festgelegt. Somit sind folgende Rahmenbedingungen in die Umfrage eingegangen:

- Durchmesser: 560 mm

- *Böden*: leichte, mittelschwere und schwere Rammung (gemäß Tab. 2.1)
- *Tiefen*: 0–15 m, 0–30 m und 0–>30 m

Die Ergebnisse der Umfrage zu Aufwandswerten ist in Tab. 5.9, jene der Leistungswerte in Tab. 5.10 zu finden.

Da Ortbetonrammpfähle nach Auskunft eines Experten üblicherweise nicht tiefer als 26 m ausgeführt werden, wurde im Zuge der Auswertung die Tiefengruppe 0–>30 m mit einem Rechenwert von 30 m berücksichtigt. Ab dieser Tiefe ist mit keiner, den Aufwand rechtfertigenden Steigerung der Tragfähigkeit, zu rechnen.

Tab. 5.9: Aufwandswerte der Ortbetonrammpfahlherstellung (Durchmesser: 560 mm)

Prozess	Teilprozess	Kennwerte
Vorbereitende Tätigkeiten	Einrichten der Baustelle	1 AT
	Arbeitsplanum/Tragfähigkeit kontrollieren	
Rammen	Ramme positionieren/umstellen	5–20 min
	Vortriebsrohr ansetzen und ausrichten	2–5 min
	Magerbeton einfüllen und zu Pfropfen anstampfen	5–10 min
	Vortriebsrohr durch Innenrohrrammung abteufen	1,43–4,60 min/m
	Betonpfopfen zur Pfahlfußherstellung ausstampfen	7–15 min
Bewehren	Bewehrung einbauen	5–15 min
Betonieren	Beton einbauen + Vortriebsrohr ziehen	10–20 min
Abschließende Tätigkeiten	Baustelle räumen	1 AT

Tab. 5.10: Tagesleistungswerte: Verdrängungspfahl mit Fuß [m/AT]

	0–15 m	0–30 m	0–>30 m
leichte Rammung	110–150	100–160	170
mittelschwere Rammung	90–150	90–160	170
schwere Rammung	40–120	60–130	140

5.4.3 Vergleich Literatur - Praxis

Bei genauerer Betrachtung der Aufwandswerte einiger Einzelprozesse fällt auf, dass die in der Fachliteratur genannten Werte teils um den Faktor 3 höher sind, als die von Experten genannten. Beispielsweise gibt Maybaum et al. das Abteufen des Vortriebsrohres durch Innenrammung mit 9 min/m an, dem gegenüber steht die Auswertung der Umfrage mit 1,43–4,60 min/m in Abhängigkeit von Boden und Tiefe. Ebenso wird für die Pfahlfußherstellung ein weit höherer Wert angegeben.

Gemäß den Ergebnissen der Umfrage lassen sich zudem zwischen 40 und 170 m Pfahl pro Arbeitstag herstellen. Dies stellt ein Mehr an Leistung zwischen 50 und 100 % gegenüber etablierten Fachbüchern dar.

5.5 Bohrpfähle

Im nachfolgenden Unterkapitel werden Erfahrungswerte aus der Literatur gesammelt dargestellt und mit den in der Online-Umfrage gewonnenen Erfahrungswerten der Bohrpfahl-Herstellung verglichen.

5.5.1 Erfahrungswerte - Literatur

Die Leistungsansätze zur Herstellung von Bohrpfählen sind in der Literatur sehr differenziert angegeben. Für das Drehbohren mit Kellystange sind Leistungen von 30–80 m/AT möglich, während mit dem SOB-Verfahren deutlich höhere Leistungen von 70–200 m/AT hergestellt werden können. Dem gegenüber steht das Schlagbohren mit einem Greifer mit Tagesleistungen von 10–50 m/AT. Maßgebende Einflussfaktoren sind neben dem anstehenden Boden

- das verwendete Verfahren,
- der Durchmesser und
- die Länge des Pfahles.

Die Zusammenstellung der Leistungsansätze aus Tab. 5.12 ist durch Messungen von Hofer aus der Masterarbeit „Evaluierung von REFA-Zeiterfassungsmethoden zur Entwicklung von Leistungsansätzen von Ressourcengruppen im Spezialtiefbau“ [54] und den darin enthaltenen Angaben der Firma Keller Grundbau GmbH ergänzt.

Ergänzend dazu werden in *Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau: Baugrund - Baugruben - Baugrundverbesserung - Pfahlgründungen - Grundwasserhaltung* von Maybaum et al. kalkulatorische Ansätze zu Aufwänden und Leistungen von Einzelprozessen angeführt, die in nachfolgender Tab. 5.11 dargestellt werden. Neben verschiedenen Durchmessern wird als Bodenklasse LN angeführt, was einem nichtbindigen Boden entspricht. Zur Tiefe hingegen werden keine Angaben gemacht.

Tab. 5.11: Kennwerte der Herstellung von Bohrpfählen mit Greifer (Literatur) [81, S. 313 ff.]

Prozess	Teilprozess	Kennwert
Vorbereitende Tätigkeiten	Einrichten der Baustelle	1–2 AT
	Behrschablone herstellen (Ortbeton)	0,75–1,20 h/m
	Alternative: verlegen von Fertigteilen	0,20–0,25 h/m ²
Schlagbohren	Umsetzen der Anlage, 1. Bohrrohr setzen	10–15 min
	Durchmesser 0,70 m bei gleichzeitigem Verrohren	10–14 m/h
	Durchmesser 1,20 m bei gleichzeitigem Verrohren	5–10 m/h
	Durchmesser 1,80 m bei gleichzeitigem Verrohren	8–10 m/h
	ggf. Reinigung der Bohrlochsohle	30 min
Bewehren	Einbau der Bewehrung	15–30 min
Betonieren	Einbau des Betonschüttrohrs	20–30 min
	Betonieren im Kontraktorverfahren	12 m/h
Abschließende Tätigkeiten	Freilegen und Kappen des Pfahlkopfes	30–60 min
	Räumen der Baustelle	1–2 AT

Tab. 5.12: Zusammenstellung der Leistungswerte - Bohrpfähle (Literatur)

Quelle	Verfahren	Durchm.	Länge	Leistungswert
Maybaum et al. [81]	VdW-System	0,90 m	15 m	28–42 m/AT
	SOB-System	0,60 m	15 m	33 m/AT
	Greifer-System	0,60 m	15 m	22–29 m/AT
Jacob et al. [59]	Kelly-System	0,88 m	10 m	50 m/AT
Girmscheid [52]	Schlagbohren	0,60 m	k.A.	15–30 m/AT
	Schlagbohren	1,10 m	k.A.	10–20 m/AT
	Drehbohren	0,60 m	k.A.	30–40 m/AT
	Drehbohren	1,00 m	k.A.	20–30 m/AT
	Drehbohren	1,30 m	k.A.	10–20 m/AT
Brandl und Jodl [31]	Greifer- und Kelly-System	0,60 m	k.A.	30–80 m/AT
	Greifer- und Kelly-System	0,90 m	k.A.	30–80 m/AT
	Greifer- und Kelly-System	1,20 m	k.A.	30–80 m/AT
	Greifer- und Kelly-System	1,50 m	k.A.	20–50 m/AT
	SOB-System	0,55 m	k.A.	100–200 m/AT
	SOB-System	0,65 m	k.A.	100–200 m/AT
	SOB-System	0,90 m	k.A.	80–150 m/AT
Keller Grundbau GmbH [54]	SOB-System	1,20 m	k.A.	70–120 m/AT
	k.A.	k.A.	k.A.	40 m/AT
Hofer [54]	Kelly-System	0,90 m	12,64 m	49,80 m/AT

5.5.2 Erfahrungswerte - Praxis

Für Bohrpfähle wurden in dieser Arbeit vier Prozessdiagramm angefertigt. Im Gespräch mit Experten wurden maßgebenden Einflussfaktoren auf die Leistung definiert. Als erster sei an dieser Stelle der *Boden* genannt, dessen Einfluss unmittelbar von der Lagerungsdichte abhängt. Zusätzlich spielen die Grundwasserverhältnisse eine entscheidende Rolle. Neben dem trockenen Bohren muss gegebenenfalls im Grundwasser oder unter Wasserauflast gebohrt werden, was zu Leistungsminderungen führt.

Neben dem Boden ist die *Tiefe* ein maßgebender Faktor. Mit zunehmender Tiefe werden die Spielzeiten der Verfahren mit diskontinuierlicher Materialförderung (Kelly- und Schlagbohr-Verfahren) größer. Andererseits nimmt – bei Betrachtung der Tagesleistungswerte – der Faktor der Zeiten für Nebentätigkeiten ab. Anders gesagt: bei einer Tagesleistung von 40 m/AT muss das Bohrgerät bei einer Bohrlochtiefe von 40 m einmal täglich umzusetzen, bei einer Bohrlochtiefe von 20 m zweimal täglich. Beim SOB- und VdW-Verfahren wirkt sich die Tiefe weniger stark aus, da einerseits die Bohrgutförderung kontinuierlich abläuft, andererseits die Verfahren in ihrer Tiefe beschränkt sind.

Den Informationen entsprechend gehen in die Umfrage zu Aufwands- und Leistungswerten von Bohrpfählen der *Boden* und die *Tiefe* als maßgebenden Einflussfaktoren auf die Leistung ein. Nachfolgend sind die in der Umfrage bearbeiteten Verfahren zur Herstellung von Bohrpfählen aufgelistet:

- Bohrpfahl als Einzelpfahl im Kelly-Verfahren
- Bohrpfahl als tangierende Bohrpfahlwand im SOB-Verfahren
- Bohrpfahl als überschnittene Bohrpfahlwand im VdW-Verfahren

- Bohrpfahl als Einzelpfahl im Schlagbohr-Verfahren

Bohrpfahl als Einzelpfahl im Kelly-Verfahren

Für das Bohren im Kelly-Verfahren wurden in der Umfrage zu Aufwands- und Leistungswerten folgende Rahmenbedingungen definiert:

- *Durchmesser:* 880 mm
- *Tiefen:* 0–10 m, 0–20 m und 0–30 m
- *Böden:* Fein- und Mittelkies (mitteldicht gelagert), Fein- und Mittelsand (dicht gelagert) und Schluff (steif bis halbfest)

Die Ergebnisse der Umfrage zu Aufwandswerten sind in Tab. 5.13, jene zu Leistungswerten in Tab. 5.14 dargestellt.

Tab. 5.13: Aufwandswerte der Bohrpfahl-Herstellung im Kelly-Verfahren (Durchmesser: 880 mm)

Gruppe	Prozess	Aufwandswert
Vorbereitende Arbeiten	Baustelle einrichten	0,50–1,00 AT
	Arbeitsplanum/Tragfähigkeit kontrollieren	
Bohren	Bohrgerät positionieren/umstellen	2–10 min
	Bohrrohr ansetzen und eindrehen	5–12 min
	Lage und Vertikalität kontrollieren	5–10 min
	Bohrrohr aufnehmen und ansetzen	
	Bohrrohr eindrehen	3,58–12,30 min /m
	Verrohrung nachdrehen (bei Bedarf)	
	Boden lösen und fördern	
	Bohrgut abwerfen	5–20 min
Bewehren	Bohrlochosole reinigen	5–20 min
	gesamte Gruppe	15–20 min
Betonieren	Betonschüttrohr einbauen	5–22 min
	Betonschüttrohre ziehen	20–90 min
	Beton einbringen	
	Bohrrohr ziehen/abheben	
Kappen	Pfahlköpfe freilegen	3–10 Stk/AT
	Pfahlköpfe kappen	
	Material laden und entsorgen	
Abschließende Arbeiten	Geräte reinigen	30 min/AT
	Baustelle räumen	0,50–1,00 AT

Tab. 5.14: Tagesleistungswerte: Bohrpfahl im Kelly-Verfahren [m/AT]

	0–10 m	0–20 m	0–30 m
Fein- und Mittelkies (mitteldicht gelagert)	60–80	50–70	45–60
Fein- und Mittelsand (dicht gelagert)	50–80	45–70	40–60
Schluff (steif bis halbfest)	50–80	45–80	40–60

Für den Fall des Bohrens im Grundwasser sowie unter Wasserauflast ist einer Leistungsmin-
derung zu rechnen. Die Teilnehmer wurden gebeten, einen prozentuellen Faktor der Leistungs-
minderung im Vergleich zum Bohren im Trockenen anzugeben. Folgendes Ergebnis lieferte die
Fragestellung:

- *Bohren im Grundwasser:* minus 10–30 %
- *Bohren unter Wasserauflast:* minus 15–40 %

Bohrpfahl als aufgelöste Bohrpfahlwand im SOB-Verfahren

Für das Bohren im SOB-Verfahren wurden in der Umfrage zu Aufwands- und Leistungswerten
folgende Rahmenbedingungen definiert:

- *Durchmesser:* 900 mm
- *Tiefen:* 0–10 m, 0–20 m
- *Böden:* Fein- und Mittelkies (mitteldicht gelagert), Fein- und Mittelsand (dicht gelagert)
und Schluff (steif bis halbfest)

Die Ergebnisse der Umfrage zu Aufwandswerten sind in Tab. 5.15, jene zu Leistungswerten in
Tab. 5.16 dargestellt.

Tab. 5.15: Aufwandswerte der Bohrpfahl-Herstellung im SOB-Verfahren (Durchmesser: 900 mm)

Gruppe	Prozess	Aufwandswert
Vorbereitende Arbeiten	Baustelle einrichten	0,50–1,00 AT
	Arbeitsplanum/Tragfähigkeit kontrollieren	
Bohren	Bohrgerät positionieren	5–10 min
	Bohrung mit Endlosschnecke abteufen	1,00–1,83 min/m
Betonieren	Bohrgut abwerfen und laden	7–35 min
	Beton einbringen	
	Endlosschnecke ziehen	5–10 min
	Bohrgut-Schüttkegel auf Kapphöhe abziehen	
Bewehren	Bewehrung aufnehmen	5–15 min
	Bewehrung einbauen	
Abschließende Arbeiten	Geräte reinigen	1 h/AT
	Baustelle räumen	1,00 AT

Tab. 5.16: Tagesleistungswerte: Bohrpfahl im SOB-Verfahren [m/AT]

	0–10 m	0–20 m
Fein- und Mittelkies (mitteldicht gelagert)	145–345	130–310
Fein- und Mittelsand (dicht gelagert)	150–300	130–250
Schluff (steif bis halbfest)	130–260	110–235

Bohrpfahl als aufgelöste Bohrpfahlwand im VdW-Verfahren

Für das Bohren im VdW-Verfahren wurden in der Umfrage zu Aufwands- und Leistungswerten
folgende Rahmenbedingungen definiert:

- *Durchmesser:* 620 mm

- *Tiefen:* 0–10 m, 0–20 m
- *Böden:* Fein- und Mittelkies (mitteldicht gelagert), Fein- und Mittelsand (dicht gelagert) und Schluff (steif bis halbfest)

Die Ergebnisse der Umfrage zu Aufwandswerten sind in Tab. 5.17, jene zu Leistungswerten in Tab. 5.18 dargestellt.

Tab. 5.17: Aufwandswerte der Bohrpfahl-Herstellung im VdW-Verfahren (Durchmesser: 620 mm)

Gruppe	Prozess	Aufwandswert
Vorbereitende Arbeiten	Baustelle einrichten	0,50 AT
	Arbeitsplanum/Tragfähigkeit kontrollieren	
Bohrschablone herstellen	Aushub herstellen	20–40 m/AT
	Schalung herstellen	
	Bewehrung einbringen	
	Beton einbringen	
	Bohrschablone ausschalen	
Bohren	Bohrgerät positionieren	3–10 min
	Bohrung abteufen	1,57–2,71 min/m
Betonieren	Beton durch Seelenrohr der Schnecke einbringen	10–30 min
	Verrohrung und Schnecke ziehen	
Bewehren	Bewehrung aufnehmen	5–15 min
	Bewehrung einbauen	
Abschließende Arbeiten	Geräte reinigen	1 h/AT
	Baustelle räumen	1,00 AT

Tab. 5.18: Tagesleistungswerte: Bohrpfahl im VdW-Verfahren [m/AT]

	0–10 m	0–20 m
Fein- und Mittelkies (mitteldicht gelagert)	130–230	140–200
Fein- und Mittelsand (dicht gelagert)	130–200	120–180
Schluff (steif bis halbfest)	120–175	120–160

Bohrpfahl als Einzelpfahl im Schlagbohr-Verfahren

Für das Bohren im Schlagbohr-Verfahren (o.a. Greifer-Verfahren) wurden in der Umfrage zu Aufwands- und Leistungswerten folgende Rahmenbedingungen definiert:

- *Durchmesser:* 1200 mm
- *Tiefen:* 0–20 m, 0–30 m und 0–40 m
- *Böden:* Fein- und Mittelkies (mitteldicht gelagert), Fein- und Mittelsand (dicht gelagert) und Schluff (steif bis halbfest)

Die Ergebnisse der Umfrage zu Aufwandswerten sind in Tab. 5.19, jene zu Leistungswerten in Tab. 5.20 dargestellt.

Wie bereits für das Bohren im Kelly-Verfahren erläutert, wirkt sich das Bohren im Grundwasser sowie unter Wasserauflast negativ auf die Leistung aus. Die Teilnehmer gaben im Zuge der Umfrage folgende prozentuelle Faktoren der Leistungsminderungen an:

Tab. 5.19: Aufwandswerte der Bohrpfahl-Herstellung im Schlagbohr-Verfahren (Durchmesser: 1200 mm)

Gruppe	Prozess	Aufwandswert
Vorbereitende Arbeiten	Baustelle einrichten	0,50 AT
	Arbeitsplanum/Tragfähigkeit kontrollieren	
Verrohren	Seilbagger/ Verrohrungsmaschine positionieren	10–20 min
	Bohrrohr aufnehmen/aufsetzen	10–15 min
	Lage und Vertikalität prüfen	
Greifern	Material greifern	4,37–14,39 min/m
	Material entleeren	
Bewehren	Bohrlochsohle reinigen (bei Bedarf)	5–10 min
	Bewehrungskorb einbauen	15–40 min
	Betonschüttrohr einbauen	10–30 min
Betonieren	Beton einbringen	60–150 min
	Betonschüttrohr ziehen	
	Bohrrohr ziehen/aufnehmen	
Abschließende Arbeiten	Geräte reinigen	1 h/AT
	Baustelle räumen	1,00 AT

Tab. 5.20: Tagesleistungswerte: Bohrpfahl im Schlagbohr-Verfahren [m/AT]

	0–20 m	0–30 m	0–40 m
Fein- und Mittelkies (mitteldicht gelagert)	40–80	30–60	20–40
Fein- und Mittelsand (dicht gelagert)	30–60	30–45	25–35
Schluff (steif bis halbfest)	35–80	30–60	25–40

- *Bohren im Grundwasser:* minus 10–20 %
- *Bohren unter Wasserauflast:* minus 20–50 %

5.5.3 Vergleich Literatur - Praxis

Kellybohr-Verfahren

Die Auswertung der Online-Umfrage brachte Tagesleistungswerte zwischen 40 und 80 m/AT für das Drehbohren im Kelly-Verfahren. Diese Angaben decken sich mit den Erfahrungswerten der Literatur. Auch in der Literatur werden der Boden sowie die Tiefe als maßgebende Faktoren der Leistung beschrieben.

Da die Fachliteratur keine Aufwandswerte für das Drehbohren im Kelly-Verfahren bietet, ist ein Vergleich mit den Ergebnissen der Umfrage an dieser Stelle nicht möglich.

SOB- und VdW-Verfahren

Der Vergleich von Erfahrungswerten aus Literatur und Praxis wird für das SOB- und das VdW-Verfahren aufgrund der Ähnlichkeit des Herstellungsprozesses zusammengefasst. Für VdW-Pfähle bietet die Literatur nur die von Maybaum et al. genannten 28–42 m an Tagesleistung. Für SOB-Pfähle hingegen werden zwischen 70 und 200 m/AT angegeben.

Dem gegenüber stehen die die Ergebnisse der Umfrage. Für SOB-Pfähle mit einem Durchmesser von 900 mm werden Tagesleistungswerte zwischen 110 und 310 m angegeben. Pfähle mit einem Durchmesser von 640 mm hergestellt im VdW-Verfahren erreichen Tagesleistungswerte von

bis zu 230 m. Der Größenunterschied der ähnlichen Verfahren ist durch die unterschiedlichen Anwendungsfälle erklärbar. Das VdW-Verfahren wird überwiegend innerstädtisch im Nahbereich andere Bauwerke verwendet. Dieser Umstand erfordert höhere Ansprüche an die Genauigkeit und ein Mehr an Vorsicht bei der Durchführung der Arbeiten.

Für beide Verfahren gilt es als unabdingbar, dass die kontinuierliche Versorgung mit frischem Beton gewährleistet ist. Anderenfalls kommt es unweigerlich zu Verzögerungen im Bauablauf.

Schlagbohr-Verfahren

Die in *Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau: Baugrund - Baugruben - Baugrundverbesserung - Pfahlgründungen - Grundwasserhaltung* [81] zu findenden Erfahrungswerte erlauben einen direkten Vergleich mit den in der Umfrage gewonnenen Werten. Maybaum et al. gibt für das Greifern eines Pfahles 5–10 m/h an. Umgerechnet auf die Einheit der Umfrage entspricht das einer Bandbreite von 6–12 min/m. Diese Angaben decken sich mit der aus der Umfrage errechneten Bandbreite von 4,37–14,39 min/m.

Ebenso bezugnehmend auf die Tagesleistungswerte stimmen die Werte aus Fachliteratur und Praxis überein. Beide Quellen geben eine vom Boden und der Tiefe anhängige Bandbreite der Leistung von 20 bis 80 m innerhalb eines Arbeitstages an.

5.6 Mikropfähle

Im nachfolgenden Unterkapitel werden Erfahrungswerte aus der Literatur gesammelt dargestellt und mit den in der Online-Umfrage gewonnenen Erfahrungswerten der Mikropfahl-Herstellung verglichen.

5.6.1 Erfahrungswerte - Literatur

Die einschlägige Fachliteratur bietet kaum Angaben zu Tagesleistungen für Mikropfählen. Für GEWI-Pfähle geben Girmscheid, Brandl und Jodl Tagesleistungen zwischen 20 m und 150 m an, mit Duktülpfählen sind hingegen bis zu 350 m pro Tag realisierbar, wie Tab. 5.22 zeigt. Maßgebender Einflussfaktor der Leistung ist die Länge des Pfahles. Zusätzlich erhob Hofer [54] in seiner Masterarbeit Daten der Firma Keller Grundbau GmbH, bzw. verarbeitete Messungen im Zuge der Herstellung von Mikropfählen mit Durchmesser 193,5 mm und einer Länge von 7–8 m.

Neben den Angaben zu Tagesleistungen gibt Girmscheid die Bohrleistung einer 3-Mann Partie mit bis zu 150 m pro Arbeitstag an. Maybaum et al. wiederum stellt kalkulatorische Kennwerte von Einzelprozessen der Herstellung von Stahlbetonfertigpfählen (in Tab. 5.21 dargestellt) zusammen.

Für schlanke Pfähle kann das in *Leistungsberechnung der Baumaschinen* [56] zu findende Diagramm zur Rammleistung, dargestellt in Abb. 5.9 herangezogen werden. Es bietet Tagesleistungen für das Vibrationsrammen in Abhängigkeit von Rammeigung und Rammtiefe.

Tab. 5.21: Kennwerte der Herstellung von Stahlbetonfertigpfählen (Literatur) [81, S. 292]

Prozess	Teilprozess	Kennwert
Rammen	Ansetzen und Ausrichten der Ramme	5 min
	Rammung des Pfahles auf erforderliche Tiefe	10–20 m/h
	Freilegen und Kappen des Pfahlkopfes	30–60 min
	Umsetzen und Aufnahme des nächsten Pfahles	5–10 min

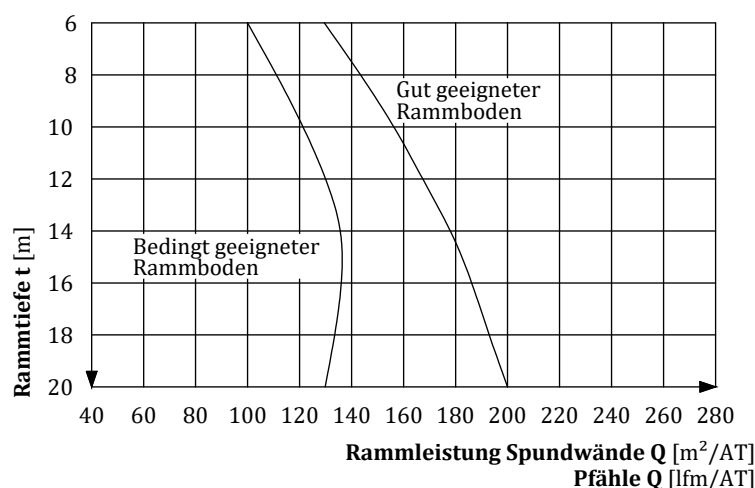


Abb. 5.9: Anhaltswerte für die Leistung von Vibrationsrammen und schlanken Pfählen [56, S. 157]

Tab. 5.22: Zusammenstellung der Leistungswerte - Mikropfähle (Literatur)

Quelle		Pfahlart	Länge	Leistungswert
Girmscheid	[52]	GEWI-Pfahl	k.A.	20–50 m/AT
		Duktilpfahl	>10 m	150 m/AT
		Duktilpfahl	10–20 m	200–300 m/AT
Brandl und Jodl	[31]	Duktilpfahl	>20 m	350 m/AT
		GEWI-Pfahl	<10 m	50–100 m/AT
		GEWI-Pfahl	10–20 m	100–150 m/AT
		GEWI-Pfahl	>20 m	100 m/AT
Keller Grundbau GmbH	[54]	k.A.	k.A.	60 m/AT
Hofer	[54]	k.A.	7–8 m	40,80 m/AT

5.6.2 Erfahrungswerte - Praxis

In dieser Arbeit wurden die zwei laut Experten gängigsten Mikropfählsysteme als Prozessdiagramme ausgearbeitet und anschließend besprochen. Zudem wurden die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Leistung erläutert. Es handelt sich hierbei um

- den Duktilpfahl im Ramm-Verfahren und
- den GEWI-Pfahl im Spülbohrverfahren.

Duktilpfahl im Ramm-Verfahren

Für Duktilpfähle gilt der *Boden* als maßgebender Parameter zur Leistungserbringung. Für den Boden gilt, dass mit zunehmender Lagerungsdichte die Rammbarkeit schwieriger wird. Da jedoch das Abbruchkriterium bei einer Eindringungsrate von 10 mm in 20 Sekunden liegt, ist die Endtiefe bei diesen Böden schneller erreicht. Die in Tab. 5.22 zusammengestellten Leistungswerte von Brandl und Jodl [31] lassen erahnen, dass neben dem Boden *Tiefe* ein relevanter Einflussfaktor auf die Leistung ist. Bei geringerer Tiefe fallen selbstverständlich Umsetzzeiten und Ansetzzeiten mehr ins Gewicht.

Die als Durchmesser zur Verfügung stehenden 118 mm und 170 mm wirken sich nicht nennenswert auf die Leistung aus, da für den größeren Durchmesser Schnellschlaghämmer mit einer größeren Schlagenergie zum Einsatz kommen.

Auf Basis der durch Literatur und Experteninterview gewonnenen Informationen gingen folgende Faktoren der Leistungserbringung in die Online-Umfrage ein:

- *Durchmesser:* 170 mm
- *Ausführungsart:* mit Mantelvermörtelung (250 mm)
- *Länge Pfahlschuss:* 6,00 m
- *Tiefen:* 0–15 m, 0–30 m und 0–>30 m,
- *Böden:* leichte, mittelschwere und schwere Rammung (gemäß Tab. 2.1)

Die Ergebnisse der Umfrage zu Aufwandswerten sind in Tab. 5.23, die zu Leistungswerten in Tab. 5.24 dargestellt. Die Berechnung der tiefenabhängigen Aufwandswerte wurde auf Basis der in der Standardisierten Leistungsbeschreibung gegliederten Tiefen durchgeführt. Die Tiefengruppe 0–>30 m ist 45 m in der Ermittlung berücksichtigt worden.

Zudem wurden in der Berechnung das Verlängern der Pfähle durch Teilprozess „Pfahlschuss kuppeln in min/Stk“ berücksichtigt. In Abhängigkeit der Tiefe des Pfahles ist die jeweilige Anzahl der Kupplungsprozesse zu den tiefenabhängigen Fixzeiten (wie in Abschnitt 5.2.4 beschrieben) addiert worden.

Tab. 5.23: Aufwandswerte der Herstellung von Duktülpfählen

Prozess	Teilprozess	Kennwert
Vorbereitende Tätigkeiten	Baustelle einrichten	1,5–3 h
	Arbeitsplanum kontrollieren	
Rammen	Rammgerät positionieren/umsetzen	3–5 min
	Pfahlschüsse meterweise markieren	1 min
	Öffnung für Mörtelaustritt herstellen	2 min
	Rammschuh ansetzen	1–2 min
	ersten Pfahlschuss ansetzen und ausrichten	2 min
	Pfahlschuss rammen	0,80–1,96 min/m
	Pfahlschuss kuppeln	2–3 min/Stk
Kappen	Pfahlschuss rammen	0,80–1,96 min/m
	Pfahlkopf abschneiden/kappen	25–40 Stk/AT
	Pfahlköpfe montieren	
Abschließende Tätigkeiten	Geräte reinigen	1,5–2 h
	Baustelle räumen	

Tab. 5.24: Tagesleistungswerte: verpresster Duktülpfahl [m/AT]

	0–15 m	0–30 m	0–>30 m
leichte Rammung	250–350	300–450	350–500
mittelschwere Rammung	200–325	250–350	300–400
schwere Rammung	150–300	150–325	150–300

GEWI-Pfahl im Spülbohrverfahren

Ebenso wie für Duktülpfähle gelten für GEWI-Pfähle der Boden und die Tiefe des Bohrloches als die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Leistung. Folgende Rahmenbedingungen wurden für die Online-Umfrage vorab definiert:

- *Durchmesser:* 63,5 mm
- *Ausführungsart:* verrohrt mit Durchmesser 203 mm
- *Tiefen:* 0–10 m, 0–20 m und 0–>20 m
- *Böden:* Fein- und Mittelkies (mitteldicht gelagert), Fein- und Mittelsand (dicht gelagert) und Schluff (steif bis halbfest)

Die Ergebnisse der Umfrage zu Aufwandswerten sind in Tab. 5.25, die zu Leistungswerten in Tab. 5.26 dargestellt. Die Berechnung der tiefenabhängigen Aufwandswerte wurde auf Basis der in der Standardisierten Leistungsbeschreibung gegliederten Tiefen durchgeführt. Die Tiefengruppe 0–>20 m ist eine Tiefe von 30 m in der Ermittlung berücksichtigt worden.

Tab. 5.25: Aufwandswerte der Herstellung von GEWI-Pfählen

Prozess	Teilprozess	Kennwert
Vorbereitende Tätigkeiten	Baustelle einrichten	1 AT
	Arbeitsplanum kontrollieren	
Bohren	Bohrgerät positionieren/umsetzen	5–15 min
	Verrohrte Spülbohrung abteufen	0,97–6,35 min/m
	Inneres Bohrgestänge ziehen	1–30 min
Einbauen	Bohrloch mit Zementmörtel verfüllen	2–20 min
	GEWI-Stahl ins Bohrloch einstellen	2–20 min/m
	Injektionskörper primärverpressen	5–30 min/m
	Verrohrung ziehen	3–15 min Vorgang
Pfahlköpfe montieren	Pfahlkopf freilegen	10–30 Stk/AT
	Pfahlköpfe montieren	
Abschließende Tätigkeiten	Geräte reinigen	1 AT
	Baustelle räumen	

Tab. 5.26: Tagesleistungswerte: GEWI-Pfahl im Spülbohr-Verfahren [m/AT]

	0–10 m	0–20 m	0–>20 m
Fein- und Mittelkies (mitteldicht gelagert)	70–120	75–110	70–120
Fein- und Mittelsand (dicht gelagert)	65–120	63–110	60–110
Schluff (steif bis halbfest)	60–120	55–100	50–90

5.6.3 Vergleich Literatur - Praxis

Der Vergleich von Erfahrungswerten wird im folgenden separiert für

- Duktülpfähle und

- GEWI-Pfähle

geführt. Ein Vergleich von Aufwandswerten bestimmter Einzelprozesse kann nicht hergestellt werden, da dazu keine Literatur vorhanden ist.

Duktilpfahl

Für das Rammen von Duktilpfählen bieten Brandl und Jodl in ihrer nicht veröffentlichten Studie „Ökoeffiziente Entscheidungskriterien im Tiefbau“ [31] detaillierte Anhaltswerte in Abhängigkeit der Länge von Duktilpfählen. Demnach sind Tagesleistungen zwischen 150 und 350 m herstellbar. Zur Rammeignung des Bodens, auf welche sich die Werte beziehen, werden keine näheren Angaben gemacht. Ebenfalls nicht beschrieben wird, ob es sich um Pfähle mit der ohne Mantelverpressung handelt.

Diesen Angaben gegenüber stehen die Ergebnisse der Umfrage. Demnach sind Leistungen zwischen 150 und 500 m pro Arbeitstag realisierbar. Die Werte beziehen sich auf Duktilpfähle mit Mantelverpressung. Der Vergleich zeigt, dass die Angaben aus der Fachliteratur um bis zu 40 % überschritten werden.

GEWI-Pfahl

Für GEWI-Pfähle geben Brandl und Jodl ebenso sehr detaillierte Werte mit 50 bis 150 m Länge fertiger Pfahl für Tagesleistungen an. Girmscheid hingegen geht nur von 20 bis 50 m pro Arbeitstag aus.

Im Zuge der Umfrage wurden die Werte von Brandl und Jodl bestätigt. In Abhängigkeit von anstehendem Boden und herzustellender Tiefe gehen die Umfrageteilnehmer von Leistungen zwischen 50 und 120 m pro Arbeitstag aus. Die Maximalwerte liegen demzufolge nur bei etwa 80 % der Leistung eines Tages im Vergleich zu den von Brandl und Jodl genannten.

5.7 Schlitzwände

Im nachfolgenden Unterkapitel werden Erfahrungswerte aus der Literatur gesammelt dargestellt und mit den in der Online-Umfrage gewonnenen Erfahrungswerten der Schlitzwand-Herstellung verglichen.

5.7.1 Erfahrungswerte - Literatur

Die in der Literatur zu findenden Leistungsansätze bewegen sich für mit dem Greifer ausgehobenen Schlitzwände zwischen 20 und 120 m²/AT. Für gefräste Schlitzwände wird eine Bandbreite von 100 bis 150 m²/AT angegeben. Girmscheid [52] gibt neben Leistungswerten fertiger Wände zudem Aushubleistungen an. Mit einem Greifer lassen sich demnach zwischen 20 und 100 m³/AT ausheben. Mit Fräsen lassen sich deutlich höhere Leistungen (zwischen 250 und 400 m³/AT) bewältigen. Die Tagesleistungen (siehe Tab. 5.28) werden neben dem Aushubverfahren maßgebend von

- den geometrischen Abmessungen der Schlitzwand und
- dem anstehenden Boden, insbesondere der Lagerungsdichte, beeinflusst.

In Ergänzung zu Erfahrungswerten von Tagesleistungen, stellt Maybaum et al. in Tab. 5.27 Ansätze zu Aufwands- und Leistungswerten zur Verfügung. Die Angaben beziehen sich auf eine mit Greifer ausgehobene Schlitzwand mit einer Tiefe von 10–12 m und einer Wanddicke von 1,20 m mit Untergrundverhältnissen der Bodenklasse 5.

Tab. 5.27: Kennwerte der Herstellung von Schlitzwänden mit Greifer (Literatur) [81, S. 144 ff.]

Prozess	Teilprozess	Kennwert
Vorbereitende Arbeiten	Baustelleneinrichtung	2 AT
	Aufbau der Aufbereitungsanlagen	1 AT
Leitwände herstellen	Orbetonbauweise	10–15 m/AT
	Fertigteilbauweise	30 m/AT
Ausheben	Umsetzen/Ausrichten des Trägergerätes	1–2 h/AT
	Aushub des Schlitzes	10–15 m ³ /h
Fugenkonstruktion	Abstellrohr ziehen/einstellen	1 h
Bewehren	Einhängen und positionieren des Korbes	4–5 h
Betonieren	Betonieren im Kontraktorverfahren	18 m ³ /h
Abschließende Arbeiten	Gerätewartung	0,50 h/AT
	Baustelle räumen	2 AT

Tab. 5.28: Zusammenstellung der Leistungswerte - Schlitzwände (Literatur)

Quelle	Verfahren	Stärke	Tiefe	Leistungswert
Maybaum et al. [81]	Greifer	k.A.	k.A.	80–200 m ² /AT
	Tieflöffel	0,60 m	15 m	240 m ² /AT
Ingenieurgemeinschaft für Grundbau[57]	Greifer	0,60 m	15 m	120 m ² /AT
	Fräse	0,60 m	15 m	150 m ² /AT
Girmscheid [52]	Greifer	0,40 m	k.A.	20–40 m ² /AT
	Greifer	0,60 m	k.A.	30–50 m ² /AT
	Greifer	0,80 m	k.A.	30–50 m ² /AT
Jacob et al. [59]	Greifer	0,60 m	10,50 m	150 m ² /AT
Brandl und Jodl [31]	Greifer	0,80 m	<10 m	80–90 m ² /AT
	Greifer	0,80 m	<20 m	80–100 m ² /AT
	Greifer	0,80 m	>20 m	<100 m ² /AT
	Fräse	0,80 m	>20 m	100 m ² /AT

5.7.2 Erfahrungswerte - Praxis

Zur Erarbeitung von Aufwands- und Leistungswerten wurden mithilfe von Experten zwei verschiedene Herstellungsverfahren der Schlitzwandherstellung genauer begutachtet.

- Schlitzwand im Greifer-Verfahren
- Schlitzwand im Fräs-Verfahren

Im Zuge der Gespräche mit Experten der Schlitzwandherstellung haben sich der *Boden* und die herzustellende *Tiefe* der Schlitzwand als die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Leistung herausgestellt.

Schlitzwand im Greifer-Verfahren

Die nachfolgenden Tabellen bieten eine Zusammenstellung der Aufwands- und Tagesleistungswerte der Schlitzwandherstellung im Greifer-Verfahren unter den folgenden Bedingungen:

- *Stichlänge:* 2,50–3,00 m
- *Lamellenlänge:* angepasst an die Tagesleistung

Tab. 5.29: Aufwandswerte der Schlitzwand-Herstellung mit Greifer (Lamellenbreite: 0,80 m)

Gruppe	Prozess	Aufwandswert
Vorbereitende Arbeiten	gesamte Gruppe	5–10 AT
Leitwände herstellen	Orbetonbauweise	20–40 m/AT
	Fertigteilbauweise	20–50 m/AT
Ausheben	Seilbagger positionieren/umstellen	15–30 min
	Material greifern/entleeren	4,14–5,99 min/m ²
	Vertikalität kontrollieren	
	Stützflüssigkeit in Schlitz einbringen	
Fugenelement lösen	gesamte Gruppe	15–45 min
Entsanden	gesamte Gruppe	45–120 min
Bewehren	gesamte Gruppe	20–90 min
Betonieren	Betonschüttrohr einbauen	15–50 min
	Beton einbringen	100–300 min
Kappen	gesamte Gruppe	10 m/AT
Abschließende Arbeiten	Geräte reinigen	1 h/AT
	Baustelle räumen	5–7 AT

- *Lamellenbreite:* 0,80 m
- *Tiefen:* 0–20 m, 0–30 m und 0–>30 m
- *Böden:* Fein- und Mittelkies (mitteldicht gelagert), Fein- und Mittelsand (dicht gelagert) und Schluff (steif bis halbfest)

Die Ergebnisse der Umfrage zu Aufwandswerten sind in Tab. 5.29, jene zu Leistungswerten in Tab. 5.30 dargestellt.

Bei der Berechnung des tiefenabhängigen Aufwandswertes, dem „Material greifern“, wurde die Lamellenlänge auf die Tagesleistung einer Lamelle angepasst. Dementsprechend wird täglich nur ein einmaliges Umstellen/Positionieren berücksichtigt. Geringfügige Neupositionierungen für das Ausheben eines weiteren Stiches wurden bewusst vernachlässigt. Gemäß den Berechnung der resultieren folgende Stichtlängen der nachfolgend aufgelistete Gliederung der Tiefen:

- 0–20 m: 7,00 m
- 0–30 m: 4,10 m
- 0–>30 m: 2,80 m

Die Tiefen wurden in Referenz zu den Positionen der Standardisierten Leistungsbeschreibung gewählt. Für die Tiefengruppe 0–>30 m ist eine Tiefe von 40 m in der Ermittlung des tiefenabhängigen Leistungswertes berücksichtigt worden.

Tab. 5.30: Tagesleistungswerte: Schlitzwand im Greifer-Verfahren [m²/AT]

	0–20 m	0–30 m	0–>30 m
Fein- und Mittelkies (mitteldicht gelagert)	120–170	90–150	90–125
Fein- und Mittelsand (dicht gelagert)	100–150	90–140	90–125
Schluff (steif bis halbfest)	120–160	100–150	90–100

Tab. 5.31: Aufwandswerte der Schlitzwand-Herstellung mit Fräse (Lamellenbreite: 1,50 m)

Gruppe	Prozess	Aufwandswert
Vorbereitende Arbeiten	gesamte Gruppe	5–10 AT
Leitwände herstellen	Orbetonbauweise	20–40 m/AT
	Fertigteilbauweise	20–50 m/AT
Ausheben	Seilbagger positionieren/umstellen	30–50 min
	Material fräsen	5,52–8,37 min/m ²
Fugenelement lösen	gesamte Gruppe	30 min
Entsanden	gesamte Gruppe	40–60 min
Bewehren	gesamte Gruppe	70–150 min
Betonieren	Betonschüttrohr einbauen	25–75 min
	Beton einbringen	360–650 min
Kappen	gesamte Gruppe	7,67 m/AT
Abschließende Arbeiten	Geräte reinigen	1 h/AT
	Baustelle räumen	5–7 AT

Schlitzwandherstellung im Fräs-Verfahren

Für Schlitzwände, die mit einer Fräse ausgehoben werden, wurden folgende Rahmenbedingungen vorab definiert:

- *Stichlänge:* 2,80 m
- *Lamellenlänge:* 2,80 m
- *Lamellenbreite:* 1,50 m
- *Tiefen:* 0–30 m, 0–50 m und 0–>50 m
- *Böden:* Fein- und Mittelkies (mitteldicht gelagert), Fein- und Mittelsand (dicht gelagert) und Schluff (steif bis halbfest)

Die Ergebnisse der Umfrage zu Aufwandswerten sind in Tab. 5.31, jene zu Leistungswerten in Tab. 5.32 dargestellt.

Im Gegensatz zu Schlitzwandgreifern werden Schlitzwandfräse aus wirtschaftlichen Gründen erst ab einer Tiefe von etwa 30 m eingesetzt. Da die standardisierte Leistungsbeschreibung nur eine Position für diese Tiefen bietet, wurden für die Umfrage gesonderte Tiefenbereiche gewählt. Der Bereich 0–>50 m wurde in den anschließenden Berechnungen der tiefenabhängigen Aufwandswerte mit einer Tiefe von 70 m berücksichtigt.

Tab. 5.32: Tagesleistungswerte: Schlitzwand im Fräs-Verfahren [m²/AT]

	0–30 m	0–50 m	0–>50 m
Fein- und Mittelkies (mitteldicht gelagert)	80–110	70–100	65–110
Fein- und Mittelsand (dicht gelagert)	80–110	70–100	65–90
Schluff (steif bis halbfest)	50–90	50–80	40–80

5.7.3 Vergleich Literatur - Praxis

Greifer-Verfahren

Zum Vergleich des Aufwandswerter für das „Greifern“ (bzw. Ausheben) werden die von Girmscheid in *Studienunterlagen zur Vorlesung: Bauverfahren des Spezialtiefbaus* [52] angegebenen täglichen Aushubleistungen herangezogen. Für das Greifern einer Schlitzwand werden 10 bis 15 m³/h genannt. Bei einer Schlitzwandstärken von 0,80 m entspricht dies einer 12,50 bis 18,75 m²/h. Wird anschließend der Anteil der Fixzeiten (siehe Abschnitt 5.2.4) von der täglichen Arbeitszeit abgezogen und eine Division der Restzeit des Arbeitstags durch die täglichen Leistung in m² durchgeführt, erhält man eine Bandbreite an Aufwandswerten von 3,09 bis 4,63 min/m. Das Ergebnis der Umfrage liegt mit einer Bandbreite von 4,14 bis 5,99 min/m um etwa 33 % über den Literaturwerten.

Nach Girmscheid lassen sich zudem Tagesleistungswerte von 125 bis 187,5 m² bei einer Wandstärke von 0,80 m zurückrechnen. Diese Werte werden durch die Teilnehmer der Umfrage, die eine Bandbreite von 90–170 m²/AT angeben, weitestgehend bestätigt.

Fräs-Verfahren

Wie für das Greifer-Verfahren zuvor beschrieben wird auf Basis der von Girmscheid angeführten Aushubleistung eines Arbeitstages auf die Bandbreite des Aufwandswerte des Einzelprozesses „Fräsen“ (bzw. Ausheben) rückgeschlossen. Die Aushubleistung wird mit 250 bis 400 m³/AT angegeben. Unter Annahme, dass täglich eine Lamelle ausgehoben wird, resultiert ein Zeitaufwand von 2,10 bis 3,36 min/m².

Die Ergebnisse der Umfrage weichen von den errechneten Werten mit 5,52 bis 8,37 min/m² erheblich ab. Die Abweichung ist auf den ersten Blick nicht erklärbar, insbesondere der Vergleich zur gegreiferten Schlitzwand herstellt wird. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Schlitzwänden ist die Wandstärke, wobei bei größerer Wandstärke üblicherweise leistungstärkeres Gerät zum Einsatz kommt.

Ebenso müssten auf Basis der von Girmscheid angegebenen Aushubleistungen täglich Lamellen mit einer Fläche zwischen 166,67 und 266,67 m² realisierbar sein. Die Teilnehmer der Umfrage hingegen gehen nur von 50 bis 110 m² aus. Zur Abklärung dieser Differenz müssen weitere Gespräche mit Experten durchgeführt werden.

5.8 Düsenstrahlverfahren

Im nachfolgenden Unterkapitel werden Erfahrungswerte aus der Literatur gesammelt dargestellt und mit den in der Online-Umfrage gewonnenen Erfahrungswerten des Düsenstrahlverfahrens verglichen.

5.8.1 Erfahrungswerte - Literatur

Maßgebender Einflussfaktor zur Herstellung von DSV-Elementen ist der anstehende Boden. So lassen sich in Abhängigkeit des Bodens zwischen 30–80 m Säulen pro Arbeitstag herstellen. Neben diesen Angaben bietet die Literatur Leistungsansätze in Bezug auf die Kubatur (siehe Tab. 5.34). Nach Maybaum et al., Brandl und Jodl können 15–45 m³ täglich gedüst werden. Die Daten werden durch die Angaben der Masterarbeit von Hofer [54] ergänzt. In dieser gab Firma Keller Grundbau GmbH neben einer Leistung von 60 m/AT (Ausfachungssäulen) und für Sohlen 11 Säulen pro Arbeitstag (10 h/AT) an. Hofer konnte diese Angaben im Zuge der Messung der Herstellung eines 9,25 m tiefen und 1 m starken Sohle bestätigen.

Ergänzend dazu bietet Maybaum et al. in Tab. 5.33 kalkulatorische Ansätze für Einzelprozesse des DSV. Die Angaben beziehen sich auf Säulen mit einem Durchmesser von 1,50 m und einer

Länge von 10 m. Die angegebene Bodenklasse LN entspricht einem nichtbindigen Boden mit Sand, Kies oder Sand und Kies mit bindigen Anteilen als Hauptbestandteilen.

Tab. 5.33: Kennwerte der Herstellung von DSV-Elementen (Literatur) [81, S. 159 ff.]

Prozess	Teilprozess	Kennwerte
Vorbereitende Tätigkeiten	Einrichten der Baustelle	1 AT
Bohren, (Vorschneiden), Düsen	Bohren und Düsen	0,05–0,10 h/m
	Ziehgeschwindigkeit (Düsen)	0,20–0,40 cm/min
	Umstellen Bohren auf Düsen	2 min
	Umsetzen des Gerätes	30 min
Abschließende Tätigkeiten	Reinigen der Geräte	30–45 h/AT
	Geräteausfall, -wartung	30 min/AT
	Räumen der Baustelle	1 AT

Tab. 5.34: Zusammenstellung der Leistungswerte - Düsenstrahlverfahren (Literatur)

Quelle	Boden	Leistungswert
Maybaum et al. [81]	k.A.	30 m/AT oder 15–45 m ³ /AT
Brandl und Jodl [31]	bindige Böden	15–30 m ³ /AT
	nicht-bindige Böden	20–40 m ³ /AT
Girmscheid [52]	Kies, Sand	80 m/AT
	mittelfester Material	60 m/AT
	hartes, schluffig-toniges Material	40 m/AT
Keller Grundbau GmbH [54]	k.A.	60 m/AT
Hofer [54]	k.A.	71,40 m/AT

5.8.2 Erfahrungswerte - Praxis

Mithilfe des Expertengesprächs und der Online-Umfrage wurden die Standardprozesse des DSVs mit Aufwandswerten der Praxis hinterlegt. Für die Befragung wurden folgende Eingangsparameter festgelegt:

- *Ausführungsform:* Säulen
- *Verfahrenstechnik:* Simplex-Verfahren
- *Durchmesser:* 1,30 m
- *Tiefen:* 0–10 m, 0–20 m und 0–>20 m
- *Böden:* Fein- und Mittelkies (mitteldicht gelagert), Fein- und Mittelsand (dicht gelagert) und Schluff (steif bis halbfest)

Die Ergebnisse der Umfrage zu Aufwandswerten sind in Tab. 5.35, jene zu Leistungswerten in Tab. 5.36 dargestellt.

Bei bindigen Böden ist bei der Herstellung von DSV-Körpern ein Vorschneiden des Körpers erforderlich. Bei nichtbindigen Böden wird dieser Prozess nicht benötigt. Aus diesem Grund wird bei der Berechnung der Aufwandswerte nichtbindiger Böden dieser Prozess vernachlässigt.

Der Tiefenbereich 0–>20 m wurde in den Berechnungen zur Ermittlung tiefenabhängiger Aufwandswerte (wie dem Spülbohren, dem Vorschneiden und dem Düsen) mit einer Tiefe von 30 m berücksichtigt.

Tab. 5.35: Aufwandswerte der DSV-Herstellung (Durchmesser: 1,30 m)

Gruppe	Prozess	Aufwandswert
Vorbereitende Arbeiten	Baustelle einrichten	1,50 AT
	Rücklaufgraben herstellen	15 min/AT
Probesäule herstellen	gesamte Gruppe	1–2 AT
Vorbohren	gesamte Gruppe	5–10 min/m
Bohren	Bohrgerät positionieren/umstellen	7–20 min
	Spülbohrung abteufen	1,6–1,95 min/m
Vorschneiden	Vorschneidparameter einstellen	1–3 min
	Vorschneiden	1,81–1,92 min/m
	Bohrgestänge erneut abteufen	2–40 min
Düsen	Düsparameter einstellen	1–3 min
	Düsen	4,48–11,37 min/m
	Bohrgestänge Rest ziehen	1–5 min
Abschließende Arbeiten	Geräte reinigen	1 h/AT
	Baustelle räumen	1,50 AT

Tab. 5.36: Tagesleistungswerte: DSV-Säulen im Simplex-Verfahren [m/AT]

	0–10 m	0–20 m	0–>20 m
Fein- und Mittelkies (mitteldicht gelagert)	35–80	30–100	35–100
Fein- und Mittelsand (dicht gelagert)	35–70	40–90	40–100
Schluff (steif bis halbfest)	25–50	35–60	35–60

5.8.3 Vergleich Literatur - Praxis

Der Vergleich von Aufwandswerte der Herstellung von DSV-Säulen wird mit den in *Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau: Baugrund - Baugruben - Baugrundverbesserung - Pfahlgründungen - Grundwasserhaltung* [81] angegebenen Werten der Herstellung einer Säule mit Durchmesser 1,50 m bewerkstelligt. Das Bohren und Düsen wird mit 0,05 bis 0,10 h/m angegeben, dies entspricht einer Bandbreite von 3 bis 6 min/m. Die in der Umfrage angegebenen Werte sind mit 1,60–1,95 h/m für das „Spülbohren“ und 4,48–11,37 h/m für das „Düsen“ in Summe etwa doppelt so hoch. Ein gegebenenfalls erforderlicher Vorschneidprozess ist in diesen Angaben noch nicht berücksichtigt.

Ein gegenteiliges Bild zeigt sich bei den Tagesleistungswerten. Während in der Literatur von 40 bis maximal 80 m pro Arbeitstag ausgegangen wird, liegen die Ergebnisse der mit 25–100 m/AT um etwa 25 % höher.

Neben dem anstehenden Boden und der herzustellenden Tiefe merkten die Experten in der Umfrage an, dass die Leistung erheblich durch nachfolgende Einflussfaktoren beeinflusst wird:

- Bauen im Innerstädtischen oder auf freiem Baufeld
- herzustellende Geometrie (Unterfangungen, Sohlen, Lamellenwände)

- Vorhandensein von Hindernissen oder schwer durchörterbaren Bodenschichten
- Beschränkungen der Höhe (z.B. im Kellern)

5.9 Zusammenfassung

Das vergangene Kapitel widmete sich den Aufwands- und Leistungswerten elf zuvor definierten Herstellungsverfahren. Das Ziel war der Vergleich zwischen in der Fachliteratur abgebildeten Aufwands- und Leistungswerten mit Erfahrungswerten von Experten aus der Praxis. Zur Gewinnung der Erfahrungswerte wurden persönliche Interviews sowie eine Online-Umfrage herangezogen. Die Umfrage wurde mit dem Online-Umfrage-Tool *2ask* [105] durchgeführt und an diverse namhafte Spezialtiefbauunternehmen im deutschsprachigen Raum verteilt. Abgefragt wurden die Zeitaufwände von Einzelprozessen sowie sinnvoll zusammenhängenden oder zusammengehörenden (parallel ablaufenden) Teilprozessen. Ein besonderes Augenmerk wurde in diesem Zuge auf den kritischen Weg des Standardprozesses gelegt, d.h. den immer wiederkehrenden Prozess der Leistungserbringung.

Die Resultate der Umfrage zeigen ein durchaus gemischtes Bild. Während für einen Großteil der Herstellungsverfahren die Angaben der Literatur mit den der Experten (bzw. Umfrageteilnehmern) deckungsgleich oder besser ausfallen, lassen sich bei einigen Verfahren die Angaben der Literatur nicht in die Praxis umsetzen. Nachfolgende Tab. 5.37 fasst die erzielbaren Erfahrungswerte der Tagesleistungen gemäß Literatur und Praxis zusammen. Ein prozentueller Unterschied bezogen jeweils auf Mindest- und Maximalleistungen veranschaulicht die Differenzen.

Tab. 5.37: Vergleich Tagesleistungen

Verfahren	Erfahrungswerte gem. Literatur	Erfahrungswerte gem. Umfrage	Abweichung MIN	Abweichung MAX
Spundwand (Ramme)	100–250 m ² /AT	100–400 m ² /AT	±0 %	+60 %
Verdrängungspfahl (Franki)	50–100 m ² /AT	40–170 m ² /AT	–25 %	+70 %
Bohrpfahl (Kelly)	50–100 m/AT	40–80 m/AT	–20 %	–25 %
Bohrpfahl (SOB)	70–200 m/AT	110–345 m/AT	+57 %	+72,5 %
Bohrpfahl (VdW)	28–42 m/AT	120–230 m/AT	+428 %	+447,6 %
Bohrpfahl (Greifer)	20–80 m/AT	25–80 m/AT	+20 %	±0 %
Mikropfahl (Duktilpfahl)	150–350 m/AT	150–500 m/AT	±0 %	+42,9 %
Mikropfahl (GEWI-Pfahl)	50–150 m/AT	55–120 m/AT	+10 %	–20 %
Schlitzwand (Greifer)	30–200 m ² /AT	90–170 m ² /AT	+300 %	–15 %
Schlitzwand (Fräse)	100–267 m ² /AT	55–120 m ² /AT	–45 %	–55 %
Düsenstrahlverfahren (Simplex)	40–80 m/AT	25–100 m/AT	–37,5 %	+25 %

Bei Betrachtung der in Tab. 5.37 dargestellten Ergebnisse stechen die des VdW-Verfahrens und die der gefrästen Schlitzwand markant heraus. Die Umfrage hat gezeigt, dass die Tagesleistung der Herstellung von VdW-Pfählen um mehr als das Vierfache überschritten werden kann. Zu beachten gilt es, dass die Umfrage keine äußeren Einflüsse außer dem Boden und der Tiefe berücksichtigt. Trotzdem ist die Richtigkeit der Angaben von Maybaum et al. (siehe Tab. 5.12) in Bezug auf die Angaben der Leistung zu hinterfragen. Dem gegenüber stehen verminderte Leistungen der Schlitzwandherstellung mit einer Fräse. Diese Differenz hat sich bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht abklären lassen. Hier bedarf es weiterführender Gespräche mit Fachexperten.

Die sonstigen Unterschiede der Bandbreiten sind durch den Boden und äußere Einflüsse auf die Baustelle erklärbar. Der Boden ist im Spezialtiefbau das maßgebliches Arbeitsmedium. Er kann

vorab nur stichprobenartig untersucht werden, lokale Hindernisse führen während der Arbeiten zu Leistungsminderungen. Auch die in der Umfrage hinterlassenen Kommentare der Fachexperten lassen darauf schließen, dass exakte Vorhersagen von Kennwerten zu Aufwand und Leistung im Spezialtiefbau nicht möglich sind.

Auch innerhalb der Fachliteratur weisen die Kennwerte teils weit gestreute Bandbreiten auf. Aussagen zu Rahmenbedingungen der Leistungserbringung werden kaum getroffen, was die Vergleichbarkeit der Werte zueinander schwer macht. Die Werte der Fachliteratur sind demnach als Versuch zu werten, möglichst allgemeine Werte zu finden. In ihrer Summe lassen sie allerdings kaum Rückschlüsse für spezielle Bauvorhaben zu.

Ist es das Ziel, für bestimmte Vorhaben detailliertere Werte zu finden, so kann dies mit dem in dieser Arbeit erstellten Umfragemodus gemacht werden. Die Umfrage ist hierfür auf ein Herstellungsverfahren einzuschränken und durch weitere Bedingungen der Herstellung zu ergänzen. Um beispielsweise detaillierte Aufwands- und Leistungswerte der Bohrpfahlherstellung zu generieren, müsste die Umfrage um weitere Durchmesser, Angaben zum Baufeld und weiterer Einflussfaktoren ergänzt werden.

Kapitel 6

Vergleich Prozessdiagramme – Standardisierte Leistungsbeschreibung

6.1 Allgemein

Werden Bauleistungen ausgeschrieben, muss die zu erbringende Leistung beschrieben werden. Zur Verfügung stehen hierfür die Leistungsbeschreibung mit einem Leistungsverzeichnis (LV) oder mit einem Leistungsprogramm (LP).

Mit einem LV erfolgt eine detaillierte Leistungsbeschreibung mit Mengen und Qualitäten einzelner Positionen, welche der Bieter mit Preisen versieht. Im Gegensatz dazu werden im Leistungsprogramm geforderte Flächen-, Funktions- und Qualitätsstandards definiert, die der Bieter zu erfüllen hat. In der Regel werden Leistungsprogramme mit einem Pauschalpreis angeboten. Den Standard stellt die Erstellung von Leistungsbeschreibungen mit einem LV dar [29].

Basis zur Erstellung eines Leistungsverzeichnisses sind standardisierte Leistungsbeschreibungen. Sie dienen der Beschreibung von standardisierten Leistungen, welche später als „Positionen“ in das LV eingehen. Im Falle der in dieser Arbeit bearbeiteten Verfahren des Spezialtiefbaus findet die *FSV-VI-005 20180901: Standardisierte Leistungsbeschreibung Verkehr und Infrastruktur (LB-VI)* [48] in der aktuellen Ausgaben aus dem Jahr 2015 Anwendung. Herausgeber der LB ist die Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV). Es handelt sich um eine Forschungsgesellschaft, die eine Plattform für Fachleute, die sich mit Planung, Bau, Erhaltung, Betrieb und Nutzung von Verkehrsanlagen befassen bildet. Zudem ist die FSV Ansprechpartnerin für Auftraggeber und Auftragnehmer und stellt somit ein Bindeglied für öffentlichen und privaten Sektor dar.

Durch den Einsatz von Standardisierten Leistungsbeschreibungen können sowohl das ausschreibende Unternehmen, als auch Bieter erhebliche Zeit- und Kosteneinsparungen erzielen. Zudem wird durch die Verwendung ein Datenträgeraustausch möglich gemacht [46]. Die Positionen der standardisierten LB sind wie folgt gegliedert:

- Leistungsgruppe (LG)
- Unterleistungsgruppe (ULG)
- Position
- Folgetext

Die Nummer einer Position setzt sich aus je zwei Stellen für die Leistungsgruppe, die Unterleistungsgruppe und die Position zusammen. Allenfalls wird die Kombination der vorherigen sechs Stellen durch eine weitere für den Folgetext einer wählbarer Vorbemerkungen oder Position mit geteiltem Text ergänzt [83].

Im nachfolgenden Kapitel soll ein Vergleich in tabellarischer Form die Unterschiede zwischen Standardisierter Leistungsbeschreibung und den in Kapitel 4 angefertigten Prozessdiagrammen

aufzeigen. Ergänzt wird der tabellarische Vergleich mit einer Beurteilung der Unterschiede. Die Tabellen sind wie folgt von links nach rechts aufgebaut:

- aus dem Prozessdiagramm:
 - Prozess
 - Teilprozess
- aus der Standardisierten Leistungsbeschreibung:
 - Positionsnummer
 - Positionskurztext
 - Positionseinheit

Der Übersichtlichkeit halber wird in den nachfolgenden Vergleichen auf die Darstellung von Positionen des Standard-LB verzichtet, welche sich nur schwer in den Prozessdiagrammen darstellen lassen. Im folgenden werden die schwer abzubildenden Positionen allgemein für alle Verfahren gültig beschrieben.

Zeitgebundene Kosten

Die zur Position der *Zeitgebundenen Kosten* zugehörigen Aufgaben sind in den Prozessdiagrammen nicht zur Gänze, bzw. teil nicht eindeutig dargestellt, da es sich um die laufenden Bereitschaftskosten der Produktion handelt. Dazu zählen unter anderem die Projektleitung, Bauleitung, Logistik, Material- und Gerätelager, Sanitär- und Mannschaftsunterkünfte, Vorhaltegeräte, Baubüro [65].

Umgelegt auf die Prozessdiagramme bedeutet das, dass die Leistung das Bereithalten und Betreiben der Baustelleneinrichtung, Geräte und Einrichtungen, die nicht in den Einheitspreisen der Leistungspositionen enthalten sind, sowie Gehälter und unproduktive Löhne des Pools der „Bauleitung“ damit abgegolten werden [48].

Stillliegezeiten

Für ununterbrochene *Stillliegezeiten*, die der Auftraggeber (AG) zu vertreten hat, sieht die Standard-LB die zwei Positionen

- Stillliegezeit Gerät und Bedienungspersonal bis 2 AT [h] und
- Stillliegezeit Gerät über 2 AT [AT]

vor. Arbeitsunterbrechungen, die bereits aus den Ausschreibungsunterlagen ersichtlich waren, sind nicht als Stillliegezeiten zur klassifizieren.

Gleisbereich

Mit den Positionen *Az Gleisbereich* werden alle Erschwernisse, welche in Bezug auf das Arbeiten im Gleisbereich auftreten, abgegolten. Der Gleisbereich wird als Raum zwischen den äußersten Gleisachsen zuzüglich beidseitig 3,50 m zu den äußersten Gleisachsen definiert.

Arbeiten im Gebäudeinneren oder mit Höhenbeschränkung

Die Aufzahlungen dieser Gruppe vergüten aller Erschwernisse, welche mit Arbeiten im Gebäudeinneren sowie für Arbeiten mit Höhenbeschränkung verbunden sind. Die Positionen berücksichtigen die Erschwernisse in Bezug auf das Auf- und Umstellen, das Abteufen, Schlitzen, Bohren, Rammen, etc. sowie die Erschwernisse Bezug auf den Einbau von Tragelementen, Bewehrungen und Beton. In den Kurztexten der Positionen sind Angaben zur Beschränkung der Höhe in Meter zu finden.

Prüfungen und Versuche

Ebenso wird in den Vergleichen darauf verzichtet, Positionen für durchzuführende Versuche und Prüfungen anzuführen. Jene Positionen sind, sofern nicht in der jeweiligen Unterleistungsgruppe angeführt, in der *Leistungsgruppe 90: Prüfungen*, *Unterleistungsgruppe 20: Prüfungen Spezialtiefbau* der Standardisierten Leistungsbeschreibung zu finden.

6.2 Spundwände

Die standardisierten Leistungsbeschreibungen für Spundwandarbeiten sind in der *Leistungsgruppe (LG) 19 – Baugrubenaushub und Baugrubensicherung* und *Unterleistungsgruppe (ULG) 21 – Spundbohlen* zu finden. Tab. 6.1 vergleicht die Prozesse der in der Arbeit erstellten Prozessdiagramme mit den Positionen der standardisierten LB.

Tab. 6.1: Vergleich Prozessdiagramm - Standard-LB [48]: Spundwände

Prozessdiagramm		Leistungsbeschreibung		
Prozess	Teilprozess	Nummer	Positionsbezeichnung	Einh.
Vorbereitende Tätigkeiten	Baustelle einrichten	192101A	Einrichten u. Umst. Spundbohlenarbeiten	PA
	Arbeitsplanum und Tragfähigkeit kontrollieren	192111	Bereithalten Arbeitsebene Spundbohlen	PA
Vorauselende Einbringhilfen	Hilfsmaßnahmen ausführen	192101D	Einrichten u. Umst. Auflockerungsbohren	PA
		192134	Az Auflockerungsbohrungen	m ²
		192104D	Räumen Auflockerungsbohren	PA
Einbringen	Bohlen vorbereiten	192118A	Az Spundbohlenwand wasserdicht mit Zusatzmaßnahmen	m ²
	Trägergerät positionieren/umstellen + Spundbohlen aufnehmen + Spundbohle einfädeln + Spundbohle ausrichten + Spundwand einbringen	192115	Spundbohlen einbringen x-x m	m ²
		192116	Spundbohlen bereithalten mit der Stahlsorte x, Widerstandsmoment x-x cm/m ³	m ²
		192119	Eckverbindung	m
Begleitende Einbringhilfen	Hilfsmaßnahmen ausführen	192101B	Einrichten u. Umst. Hochdruckspülen	PA
		192132	Az Spülen Hochdruck über 100 bar	m ²
		192104B	Räumen Hochdruckspülen	PA
Abschließende Tätigkeiten	Baustelle räumen	192112	Abtrag Arbeitsebene Spundbohlen	PA
		192104A	Räumen Spundbohlenarbeiten	PA

Beim Vergleich des Prozessdiagramms mit der Standardisierten Leistungsbeschreibung lassen sich Unterschiede in Bezug auf das Einbringen, auf temporäre/dauerhafte Verbauten und den Rückbau erkennen, die nachfolgend beschrieben werden.

Einbringen

In der Gruppe des Einbringens wird festgestellt, dass nicht jede der Tätigkeiten einer Leistungsposition zuordenbar ist. Die Teilprozesse „Trägergerät positionieren/umsetzen“, „Spundbohle

aufnehmen“, „Spundbohle einfädeln“, „Spundbohle ausrichten“ und „Spundbohle einbringen“ sind in der folgenden Position der LB zu berücksichtigen:

192115 - Spundbohle einbringen x-x m [m²]

Temporärer/Dauerhafter Verbau

Das gegenständliche Prozessdiagramm (PD) stellt den Einbau einer temporären Spundwand dar. Für einen temporären Spundwandverbau ist zum Bereithalten der Spundbohlen die Position

192116 Spundbohlen bereithalten, Stahlsorte x, Widerstandsmoment x-x cm/m³ [m²]

vorzusehen. Die Leistung der Position beinhaltet den An- und Abtransport der Spundbohlen, alle Zwischenlagerungen und Zwischentransporte auf der Baustelle sowie Reinigung und Reparatur der Spundbohlen. Gesondert vergütet werden das Einbringen und Ziehen der Bohlen (siehe Tab. 6.1. Im Falle eines dauerhaften Einbaus der Spundbohlen wäre die zuvor beschriebene durch folgende Position zu ersetzen:

192124 Spundbohlen verloren, Stahlsorte x, Widerstandsmoment x-x cm/m³ [m²].

Verlorene Spundbohlen gehen in das Eigentum des Auftraggebers über.

Rückbau

Der bei temporären Spundbohlen notwendige Rückbau ist aufgrund zeitlichen Differenz zwischen Einbau und Rückbau der Übersichtlichkeit halber nicht im PD dargestellt. Folgende Positionen sind hierfür zusätzlich in das Leistungsverzeichnis aufzunehmen:

192105 Einrichten Umst. Rückbau Spundbohlenarbeiten [PA]

192108B Zeitgeb. Kosten Rückbau SPW [PA]

192121 Spundbohlen ziehen, x-x m [m²]

192107 Baustellenräumung Rückbau Spundbohlen [PA]

6.3 Verdrängungspfähle

Die standardisierten Leistungsbeschreibungen für Spundwandarbeiten sind in der *Leistungsgruppe (LG) 20 – Spezialtiefbau* und *Unterleistungsgruppe (ULG) 24 – Verdrängungspfähle aus Ortbeton* zu finden. Tab. 6.2 vergleicht die Prozesse der in der Arbeit erstellten PD mit den Positionen der standardisierten LB.

Der Vergleich von PD und LB zeigt, dass sich zu den meisten Teilprozessen eine Position der Standard-LB zuordnen lässt. Somit ist davon auszugehen, dass die Teilprozesse des Diagramms das Herstellungsverfahren in seiner Summe abbilden. Ausgenommen davon sind Aufzahlungen für Mehraufwände und Erschwernisse wie

- das Einbringen in Bodenklasse (BKL) 5,
- für zusätzliche Einbringhilfen oder
- für schräges Einbringen in verschiedenen Neigungen.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde im Prozessdiagramm auf Pfahlprüfungen und dynamische sowie statische Versuche am Pfahl verzichtet.

Tab. 6.2: Vergleich Prozessdiagramm - Standard-LB [48]: Ortbetonrammpfähle mit Fuß

Prozessdiagramm		Leistungsbeschreibung		
Prozess	Teilprozess	Nummer	Positionsbezeichnung	Einh.
Vorbereitende Tätigkeiten	Baustelle einrichten	202401A	Baustelleneinrichtung	PA
	Arbeitsplanum und Tragfähigkeit kontrollieren	202404	Herstellen Arbeitsebene, Planung AG	PA
		202406	Bereithalten Arbeitsebene	PA
Rammen	Ramme positionieren + Vortriebsrohr ansetzen und ausrichten	202410	Auf- und Umstellen Pfahllage	Stk
	Magerbeton einfüllen und anstampfen	202416	Pfahlbeton	m ³
	Vortriebsrohr durch Innenrohr-rammung abteufen	202412x	Einbringen XX–XX m	m
	Betonpfopfen zur Pfahlfußherstellung ausstampfen	202415	Pfahlfußweiterung	Stk
Bewehren	Bewehrung einbauen	202419	Bewehrung B550B	t
		202420A	Az Überlängen Bewehrung >14 <=18 m	t
Betonieren	Beton einbauen + Vortriebsrohr ziehen	202416	Pfahlbeton	m ³
Kappen	Pfahlköpfe freilegen und kappen + Material laden und entsorgen	202423	Pfahlkopf	m ³
Abschließende Tätigkeiten	Baustelle räumen	202407	Abtrag Arbeitsebene	PA
		202402	Baustellenräumung	PA

6.4 Bohrpfähle

Die standardisierten Leistungsbeschreibungen für Spundwandarbeiten sind in der *Leistungsgruppe (LG) 20 – Spezialtiefbau* und *Unterleistungsgruppe (ULG) 01 – Bohrpfähle* zu finden. Tab. 6.3 nimmt die allgemein für Bohrpfähle gültigen Gruppen „Vorbereitende Tätigkeiten“, „Bohrschablone herstellen“, „Kappen“ und „Abschließende Tätigkeiten“ heraus und vergleicht die Prozesse der in der Arbeit erstellten Prozessdiagramme mit den Positionen der standardisierten LB.

Pfahlwände

Sind für das Bauvorhabens tangierende oder überschnittene Bohrpfahlwände herzustellen, stellt die Herstellung der Bohrschablonen einen Mehraufwand dar. Aushub, Schalung, Bewehrung und Beton werden nicht gesondert vergütet, vielmehr wird der gesamte Mehraufwand mit der Position

200125 – Az Bohrung Pfähle tangierende Bohrpfahlwand [m] oder

200126 – Az Bohrung Pfähle überschnittene Bohrpfahlwand [m]

je nach Art der Bohrschablone verrechnet. Abbruch, Laden und Wegschaffen der Bohrschablonen ist gesondert zu vergüten.

Nach Herstellung der Pfahlwände ist die Baugrube auszuheben. Die luftseitigen Pfahloberflächen sind von losen Bodenbestandteilen aus Gründen der Arbeitssicherheit zu reinigen. Sind

Tab. 6.3: Vergleich Prozessdiagramm - Standard-LB [48]: Bohrpfähle (allgemeine Gruppen)

Prozessdiagramm		Leistungsbeschreibung		
Prozess	Teilprozess	Nummer	Positionsbezeichnung	Einh.
Vorbereitende Tätigkeiten	Baustelle einrichten	200101	Einrichten und Umstellen	PA
	Arbeitsplanum und Tragfähigkeit kontrollieren	200104	Herstellen Arbeitsebene, Planung AG	PA
		200106	Bereithalten Arbeitsebene	PA
Bohrschablone herstellen	Aushub + Schalung herstellen + Bewehrung + Beton einbringen + Schablone ausschalen	200125	Az Bohrung Pfähle tangierende Bohrpfahlwand	m
		200126	Az Bohrung Pfähle überschrittene Bohrpfahlwand	m
Kappen	Pfahlköpfe freilegen, Bohrschablone abtragen + Pfahlköpfe kappen	200128	Abbruch, Laden und Wegschaffen Bohrschablonen	m
		200189X	Pfahlkopf vorbereiten DM xx-xx	Stk
	Material laden und entsorgen	200148E	Az Bohrpfahl Baurestmasse >30 %	m ³
Abschließende Tätigkeiten	Pfahlwand reinigen	200193	Reinigen	m ²
		200194	Entfernen von geologisch bedingten Betonüberprofilen	m ²
		200148F	Az. Bohrpfahl Baurestmasse >=50 %	m ³
	Geräte reinigen + Baustelle räumen	200107	Abtrag Arbeitsebene	PA
		200102	Baustellenräumung	PA

während der Pfahlherstellung durch die Geologie bedingte Überprofile am Pfahl entstanden, sind auch diese durch geeignete Maßnahmen zu entfernen. Das anfallende Material wird geladen und abtransportiert. Diese Tätigkeiten sind nicht in den Prozessdiagrammen enthalten, da das Freilegen der Pfahlwandoberfläche üblicherweise erst nach Baustellenräumung des Spezialtiefbauunternehmens geschieht.

Nach dem Vergleich der allgemein gültigen Positionen werden die spezifischen Positionen der Bohrpfahl-Herstellung verglichen. Da sind bestimmte Verfahren ähneln und die Standardisierte Leistungsbeschreibung nicht für jedes Herstellungsverfahren geeignete Positionen bietet, werden die Verfahren der Prozessdiagramme wie nachfolgend dargestellt gruppiert und anschließend der Vergleich geführt:

- Kelly- und Greifer-Verfahren
- SOB- und VdW-Verfahren

6.4.1 Kelly- und Greifer-Verfahren

Die in Tab. 6.3 dargestellten allgemeinen Positionen für Bohrpfahl-Herstellungsverfahren wird für das Kellybohren mit nachfolgender Tab. 6.4 ergänzt. Da die Positionen mit jenen des Greifer-Verfahrens übereinstimmen, wird darauf verzichtet, die Positionen des Greifer-Verfahrens in einer eigenen Tabelle darzustellen und auf Tab. 6.4 verwiesen.

Der Vergleich von Prozessdiagramm und Leistungsbeschreibung zeigt Unterschiede im Bezug auf das Verrohren und Bohren der Pfähle.

Tab. 6.4: Vergleich Prozessdiagramm - Standard-LB [48]: Kelly-Bohrpfähle

Prozessdiagramm		Leistungsbeschreibung		
Prozess	Teilprozess	Nummer	Positionsbezeichnung	Einh.
Bohren	Bohrgerät positionieren + erstes Bohrrohr ansetzen und eindrehen + Lage und Vertikalität kontrollieren	200110x	Aufstellen Bohranlage Bohrlänge 0-XXm	Stk
	Verrohrung nachdrehen + Boden lösen und fördern + Bohrgut abwerfen + Bohrlochsohle reinigen	200120x	Bohrung Pfähle verrohrt DM XX, 0-XXm	m
		200136x	Az Bohren im Grundwasser DM XX	m
	Werkzeugwechsel + Hindernisse durchörtern + Werkzeugwechsel	200145x	Durchörtern Hindernisse Pfahl DM XX	h
		200146	Az Durchörtern harte Bodenschichten	m
Entsorgen	Bohrgut laden + Bohrgut abtransportieren	200147	Bohraushub Bodenaushubdeponie	m ³
Fördern	Förderung von Zulauf starten + stoppen	200132x	Az Wasserauflast Bohrpfahl DM XX	m
Bewehren	Bewehrungskorb einbauen	200181	Bewehrung Bohrpfahl B550B	t
		200182A	Az Überlängen Bewehrung >14 <=18 m	t
Betonieren	Betonschüttrohr einbauen + Beton einbringen + Betonschüttrohr ziehen + Bohrrohr ziehen und abheben	200149x	Pfahlbeton CXX/XX/BS-TBX, DM XX	m
Fördern	Wasser aus Bohrloch pumpen + ggf. zwischenlagern + abtransportieren	200132x	Az Wasserauflast Bohrpfahl DM XX	m

Verrohren, Bohren (PD)

Im Prozessdiagramm des Kelly-Verfahrens sind Bohren und Verrohren in einem Prozess abgebildet. Im Gegensatz dazu, wurde bei der Herstellung von Bohrpfählen mit einem Greifer das *Verrohren* und *Bohren* in zwei getrennten Prozessen dargestellt. Grund dafür ist, dass zwei verschiedene Geräte (Verrohrungsmaschine und Seilbagger) zur Anwendung kommen. Die Standard-LB sieht für beide Verfahren die Position

200120x – Bohrung Pfähle verrohrt DM XX, 0-XXm [m]

vor. Zudem zeigen die Prozessdiagramme für das Aufstellen der Bohranlage und das Herstellen einer einer verrohrten Bohrung für Pfähle jeweils mehrere Einzelprozesse, die für die Leistungserbringung erforderlich sind. Da beide Verfahren mit diskontinuierlicher Materialförderung und Verlängerungen der Bohrrohre arbeiten, entstehen Prozessschleifen, die sich wiederholen. Für Bohrung im Grundwasser oder das Bohren unter Wasserauflast sieht die Standardisierte Leistungsbeschreibung die Vergütung des Mehraufwandes mit Aufzahlungen vor.

6.4.2 SOB- und VdW-Verfahren

Die in Tab. 6.3 dargestellten allgemeinen Positionen für Bohrpfahl-Herstellungsverfahren wird für das SOB-Verfahren mit nachfolgender Tab. 6.5 ergänzt. Die Abläufe des SOB- und des VdW-Verfahrens sind weitgehend ident, weshalb darauf verzichtet wird, den Vergleich für beide Verfahren zu führen. Der Vergleich des SOB-Verfahrens gilt demnach auch für das VdW-Verfahren.

Tab. 6.5: Vergleich Prozessdiagramm - Standard-LB [48]: SOB-Bohrpfähle

Prozessdiagramm		Leistungsbeschreibung		
Prozess	Teilprozess	Nummer	Positionsbezeichnung	Einh.
Bohren	Bohrgerät positionieren	200110x	Aufstellen Bohranlage Bohr- länge 0-XXm	Stk
	Bohrung mit Endlosschne- cke abteufen	200122x	Bohrung Pfähle SOB DM 90, 0-XXm	m
Betonieren, Entsorgen	Beton einbringen + End- losschnecke ziehen	200149x	Pfahlbeton CXX/XX/BS- TBX, DM XX	m
	Bohrgut abwerfen + laden + Bohrgutschüttkegel ab- ziehen + abtransportieren	200147	Bohraushub Bodenaushubde- ponie	m ³
Bewehren	Bewehrungskorb aufnehmen + einrütteln	200181	Bewehrung Bohrpfahl B550B	t
		200182A	Az Überlängen Bewehrung >14 <=18 m	t

Die Gegenüberstellung der Prozesse aus den Diagrammen in Kapitel 4 mit den Positionen der Standardisierten Leistungsbeschreibung zeigt, dass sich eindeutige Zuordnungen treffen lassen.

6.5 Mikropfähle

Im Folgenden werden die Prozesse und Einzelprozesse von

- Duktülpfählen und
- GEWI-Pfählen

mit den Positionen der *FSV-VI-005 20180901: Standardisierte Leistungsbeschreibung Verkehr und Infrastruktur (LB-VI)* verglichen.

6.5.1 Duktülpfahl

Die standardisierten Leistungsbeschreibungen zur Herstellung von Duktülpfählen sind in der *Leistungsgruppe (LG) 20 – Spezialtiefbau* und *Unterleistungsgruppe (ULG) 20 – Verdrängungspfähle aus duktilem Gusseisen* zu finden. Tab. 6.6 vergleicht die Prozesse der in der Arbeit erstellten Prozessdiagramme mit den Positionen der standardisierten LB.

Unterschiede zwischen Prozessdiagramm und Standardisierter Leistungsbeschreibung sind in der Gruppe des Rammens und jener des Mischens und Förderns.

Rammen (PD)

Für das Rammen - auch Einbringen - eines Duktülpfahles sieht die Standardisierte Leistungsbeschreibung die Position

202019x – Einbringen DN XX, 0-XXm, ohne Mantelvermörtelung [m]

Tab. 6.6: Vergleich Prozessdiagramm - Standard-LB [48]: Duktülpfähle

Prozessdiagramm		Leistungsbeschreibung		
Prozess	Teilprozess	Nummer	Positionsbezeichnung	Einh.
Vorbereitende Tätigkeiten	Baustelle einrichten	202001	Baustelleneinrichtung	PA
	Arbeitsplanum und Tragfähigkeit kontrollieren	202004	Herstellen Arbeitsebene, Planung AG	PA
		202006	Bereithalten Arbeitsebene	PA
Rammen	Rammgerät positionieren/umsetzen	202010	Auf- und Umstellen Pfahlanlage	Stk
	Pfahlschuss meterweise markieren + Öffnung für Mörtelaustr. herstellen + Rammschuh u.	202018x	Duktiles Pfahlrohr DN XX Wandstärke X,X liefern	m
	Pfahlschuss ansetzen u. ausrichten + rammen + kuppeln	202019x	Einbringen DN XX, 0-XXm, ohne Mantelvermörtelung	m
		202021A	Az Einbringen in Bodenklasse 5	m
		202019x	Az Rammschuh Bodenklasse 5	Stk
	Mantel mit Beton verfüllen/verpressen	202023x	Az Mantelvermörtelung DN XXX	l
Kappen	Pfahlkopf abschneiden/-kappen + Kopfplatte montieren	202027x	Pfahlkopfplatte XX/XX/XXmm	Stk
Abschließende Tätigkeiten	Geräte reinigen + Baustelle räumen	202002	Baustellenräumung	PA
		202007	Abtrag Arbeitsebene	PA

vor. Gemäß Prozessdiagramm hat die Position die Teilprozesse „Pfahlschuss meterweise markieren“, „Öffnung für Mörtelaustritt herstellen“, „Rammschuh ansetzen“ sowie die Teilprozesse „Pfahlschuss ansetzen, ausrichten, rammen und kuppeln“ zu beinhalten.

Mischen, Fördern (PD)

Der Vergleich zeigt, dass die Teilprozesse des Prozessdiagramms weitestgehend zu Positionen des Standard-LB zuordenbar sind. Mit Ausnahme der Prozesse *Mischen* und *Fördern*. Das „Verfüllen des Pfahlrohres mit Zementsuspension, Zementmörtel oder Feinkornbeton mit einer Mindestzylinderdruckfestigkeit von 20 N/mm“ [48, S. 967] ist in der Leistung der Position

202019x – Einbringen DN XX, 0-XXm, ohne Mantelvermörtelung [m]

enthalten. Das Verfüllen mit Zementsuspension ist gegebenenfalls bei Spitzendruckpfählen gefordert. Für Mantelreibungspfähle, deren Mäntel verfüllt/verpresst werden, sieht die standardisierte LB die Position

202023x – Az Mantelvermörtelung DN XXX [l]

vor. Der angegebene Durchmesser entspricht dem Durchmesser des Rammschuhes. Beide zuvor angeführten Positionen beinhalten die Verwendung des Rammschuhes.

6.5.2 GEWI-Pfahl

Die standardisierten Leistungsbeschreibungen für Spundwandarbeiten sind in der *Leistungsgruppe (LG) 20 – Spezialtiefbau* und *Unterleistungsgruppe (ULG) 24 – Mikropfähle aus Ortbeton* zu

finden. Tab. 6.7 vergleicht die Prozesse der in der Arbeit erstellten Prozessdiagramme mit den Positionen der standardisierten LB.

Tab. 6.7: Vergleich Prozessdiagramm - Standard-LB [48]: GEWI-Pfähle

Prozessdiagramm		Leistungsbeschreibung		
Prozess	Teilprozess	Nummer	Positionsbezeichnung	Einh.
Vorbereitende Tätigkeiten	Baustelle einrichten	201201	Baustelleneinrichtung	PA
	Arbeitsplanum und Tragfähigkeit kontrollieren	201205	Herstellen Arbeitsebene, Planung AG	PA
		201207	Bereithalten Arbeitsebene	PA
Bohren	Bohrgerät positionieren/umsetzen	201204	Auf- und Umstellen Anlage	Stk
	Spülbohrung abteufen + Bohrgut laden und entsorgen	201211x	Bohren DM XX mm, einschließlich Mantelverfüllung	m
		201215x	Az Verrohrung XX mm	m
Einbauen	Bohrloch verfüllen + GEWI-Stahl einstellen + Verrohrung ziehen + Verpressen	201225x	Tragelement liefern und einbauen	m
		201226x	Az mittlere/hohe Korrosionsbelastung	m
		101234A	Mehrverbrauch Zementsuspension	l
Kappen	Pfahlköpfe freilegen + Material laden und entsorgen	201232x	Az Ablängen Tragelemente	m
	Pfahlköpfe montieren	201236	Az Pfahlkopf Zug/Druck	Stk
Abschließende Tätigkeiten	Geräte reinigen + Baustelle räumen	201202	Baustellenräumung	PA
		201208	Abtrag Arbeitsebene	PA

Bohren, Vorbereiten, Einbauen, Mischen, Fördern (PD)

Der Vergleich der Teilprozesse des Prozessdiagramms mit den Positionen der Standard-LB zeigt, dass Teile der Prozesse *Bohren*, *Vorbereiten*, *Einbauen*, *Mischen* und *Fördern* nicht eindeutig einzelnen Positionen zugeordnet werden können. Das „Laden und Wegschaffen des Bohrgutes sowie das Liefern und einbauen der Mantelverfüllung (Zementsuspension, Zementmörtel, Feinkornbeton bzw. Ortbeton) bis zur 1,7-fachen theoretischen Menge mit einer Zylinderdruckfestigkeit von mind. 20 N/mm“ [48, S. 949 ff.] werden mit der Position

201211x – Bohren DM XX mm, einschließlich Mantelverfüllung [m]

vergütet. Für einen Suspensionsverbrauch, der das 1,7-fache der theoretischen Menge überschreitet, ist eine Position für den Mehrverbrauch vorgesehen. Mit der Position

201225x – Tragelement liefern und einbauen [m]

werden die systemspezifischen Kupplungen sowie das systembedingte Ablängen von Tragelementen vergütet, was Teilprozesse des *Vorbereitens* sind.

Nachverpressen

Für ein gegebenenfalls erforderliches Nachverpressen der Pfähle bietet die Standardisierte Leistungsbeschreibung keine eindeutig zuordenbare Position. Diese Kosten sind somit umzulegen und mit anderen Positionen zu kalkulieren.

6.6 Schlitzwände

Die standardisierten Leistungsbeschreibungen für Spundwandarbeiten sind in der *Leistungsgruppe (LG) 20 – Spezialtiefbau* und *Unterleistungsgruppe (ULG) 03 – Schlitzwände* zu finden. Tab. 6.8 vergleicht die Prozesse der in der Arbeit erstellten Prozessdiagramme mit den Positionen der standardisierten LB.

Im Falle der Schlitzwände hat der Vergleich beiderseits für mit einem *Greifer* als auch mit einer *Fräse* hergestellte Schlitzwände Gültigkeit. Die geringfügigen verfahrenstechnischen Unterschiede, welche aus den verschiedenen Aushubwerkzeugen resultieren, werden nicht durch die Standard-LB dargestellt.

Aushub entsorgen, Entsandten, Mischen, Fördern, Wiederaufbereiten (PD)

Für die Teilprozesse der Prozesse *Entsorgen*, *Entsandten*, *Mischen*, *Fördern* und *Wiederaufbereiten* lassen sich in der Standard-LB keine eindeutigen Positionen finden. Vielmehr sind all jene Tätigkeiten in der Beschreibung der Position

200314x – Schlitz herstellen XX cm, 0–XX m [m²]

enthalten. Demnach wird dieser Position „*das Laden und Wegschaffen des Aushubmaterials, die rheologische Überprüfung der Suspension und falls erforderlich das Ersetzen durch Frischsuspension, der Suspensionsverbrauch für die beschriebenen Bodenschichten, die Auswechslung bzw. das Entsandten der Suspension nach Erfordernis vor dem Betonierbeginn sowie das Ableiten, Laden und Wegschaffen der Suspension*“ [48, S. 858 ff.] vergütet.

Ausheben und Betonieren (PD)

Wie unter Abschnitt 6.4.1 für das „Bohren“ und „Verrohren“ eines Kelly-Pfahles beschrieben gilt auch bei den Prozessen „Ausheben“ und „Betonieren“ der Schlitzwandherstellung, dass nur eine Position mehreren Teilprozessen zur Verfügung steht. Dementsprechend sind alle Leistungen dieser Prozesse in diesen Positionen zu berücksichtigen.

Tab. 6.8: Vergleich Prozessdiagramm - Standard-LB [48]: Schlitzwände

Prozessdiagramm		Leistungsbeschreibung		
Prozess	Teilprozess	Nummer	Positionsbezeichnung	Einh.
Vorbereitende Tätigkeiten	Baustelle einrichten	200301	Baustelleneinrichtung	PA
	Arbeitsplanum und Tragfähigkeit kontrollieren	200304	Herstellen Arbeitsebene, Planung AG	PA
		200306	Bereithalten Arbeitsebene	PA
Leitwände herstellen	Aushub + Schalung herstellen + Bewehrung + Beton einbauen + Leitwände ausschalen	200311A	Leitwände herstellen	m
Ausheben	Seilbagger positionieren/umsetzen + Material greifern + entleeren	200314x	Schlitze herstellen XX cm, 0-XX m	m ²
	Greifer auf Meißel wechseln + Hindernisse meißeln + Meißel auf Greifer wechseln	200316x	Durchhörtern Hindernisse XX cm	h
		200317	Az Durchhörtern Bodenschichten	m ²
	Stützflüssigkeit in den Schlitz einbringen	200330A	Suspensionsverlust Störfall	m ³
Fugenelement lösen und einbauen	Fugenelement lösen + vorbereiten + einbauen	200332x	Schlitzwanddehnfugen XX cm	m
		200333x	Adaptierte Schlitzwanddehnfugen XX cm	m
Betonieren	Betonschüttrohr einbauen + Beton einbringen + Betonschüttrohr ziehen + Arbeitssuspension zur Wiederaufbereitungsanlage fördern	200318x	Schlitzwandbeton CXX/XX/BS-TBX, XX cm	m ²
Bewehren	Bewehrungskorb einheben, einhängen und ausrichten	200326	Bewehrung B550B	t
		200327A	Az Überlänge Bewehrung >14 <=18 m	t
Kappen	Leitwände abbrechen + Schlitzwand freilegen und kappen + Material ents.	200312A	Leitwand abtragen innenseitig	m
		200312B	Leitwand abtragen außenseitig	m
		200335x	Kappen XX cm	m
Abschließende Tätigkeiten	Geräte reinigen + Baustelle räumen	200350	Nacharbeiten	m ²
		200351	Abgleich Oberfläche	m ²
		200346	Aussparungen und Anschlüsse	m ³
		200302	Baustellenräumung	PA
		200307	Abtrag Arbeitsebene	PA

6.7 Düsenstrahlverfahren

Die standardisierten Leistungsbeschreibungen für Spundwandarbeiten sind in der *Leistungsgruppe (LG) 20 – Spezialtiefbau* und *Unterleistungsgruppe (ULG) 05 – Düsenstrahlverfahren (DSV)* zu finden. Tab. 6.9 vergleicht die Prozesse der in der Arbeit erstellten Prozessdiagramme mit den Positionen der standardisierten LB.

Tab. 6.9: Vergleich Prozessdiagramm - Standard-LB [48]: DSV-Elemente

Prozessdiagramm		Leistungsbeschreibung		
Prozess	Teilprozess	Nummer	Positionsbezeichnung	Einh.
Vorbereitende Tätigkeiten	Baustelle einrichten	200501	Baustelleneinrichtung	PA
		200504	Auf- und Umstellen Bohrgerät	Stk
	Arbeitsplanum und Tragfähigkeit kontrollieren	200505	Herstellen Arbeitsebene, Planung AG	PA
		200505	Bereithalten Arbeitsebene	PA
Vorbohren	Vorbohren	200526A	Az Bohrhindernis Mauerwerk	m
		200526B	Az Bohrhindernis Holz	m
		200526C	Az Bohrhindernis Beton	m
		200526D	Az Bohrhindernis Stahlbeton	m
		200526E	Az Bohrhindernis BKL 6+7	m
Spülbohren	Bohrgerät positionieren/umstellen	200516A	Auf- und Umstellen Bohrgerät DS-Säule	Stk
		200516B	Auf- und Umstellen Bohrgerät DS-Körper	Stk
		200516C	Auf- und Umstellen Bohrgerät DS-Wand	Stk
	Spülbohrung abteufen	200521x	Bohrung DS-Säule XX-XX m	m
Vorschneiden + Düsen	Vorschneiden + Bohrgestänge abteufen + Düsenvorgang + Bohrgestänges ziehen	200518x	DS-Körper X N/mm	m ³
		200519x	DS-Wand X N/mm, kf= X m/s, d= X cm	m ²
		200528x	DS-Säule DN XX cm, X N/mm	m
Abschließende Tätigkeiten	DSV-Element nachbearbeiten	200540x	DS-Säulenkopf/ DS-Körper/ DS-Wand Anschlussfuge vorbereiten DN XX	Stk, m ² , m
		200542	Abschrämen Überkubatur	m ²
		200543	Reinigen DS-Oberfläche	m ²
	Geräte reinigen + Baustelle räumen	200502	Baustellenräumung	PA
		200508	Abtrag Arbeitsebene	PA

Auf- und Umstellen (LB)

Die Standardisierte Leistungsbeschreibung von DSV-Elementen unterscheidet zwischen *Säulen*, *Wänden* und *Körpern*. Die Positionen für das Auf- und Umstellen des Bohrgerätes vergütet bei DS-Säulen das Umsetzen von Bohrloch zu Bohrloch. Bei DS-Wänden und DS-Körpern mit jener Position hingegen das Umsetzen von Wand zu Wand, bzw. von Körper zu Körper beschrieben. Das Umsetzen pro Bohrloch wird in den Positionen der Herstellung abgegolten.

Spülbohrungen (LB)

Im Gegensatz zu DS-Säulen, deren Bohrung mit der tiefenabhängigen Position

200521x – Bohrung DS-Säule XX-XX m [m]

vergütet wird, beinhalten die Leistungen zur Herstellung von DS-Körpern und DS-Wänden unverrohrte Bohrungen sowie das Auf- und Umstellen der Bohrgeräte für jedes Bohrloch.

Mischen, Fördern, Entsandern, Dekantieren, Entsorgen (PD)

Ein Blick auf das Prozessdiagramm zeigt, dass die Prozesse und Teilprozesse des gewerblichen Personals an der *Mischanlage* sowie an der *Wiederaufbereitungsanlage* in der Standardisierten LB nicht gesondert ausgewiesen werden. Vielmehr sind das „Liefern, Aufbereiten und Einpressen der Suspension zur Herstellung von DS-Säulen, -Körpern und -Wänden sowie das Ableiten, Laden und Wegschaffen des anfallenden Rückflussmaterials“ [48, S. 897 ff.] in den Positionen

200518x – DS-Körper X N/mm [m³],

200519x – DS-Wand X N/mm, kf= X m/s, d= X cm [m²] und

200528x – DS-Säule DN XX cm, X N/mm [m] enthalten.

6.8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein Zusammenhang zwischen den in Kapitel 4 ausgearbeiteten Prozessdiagrammen und den jeweils dem Gewerk zugeordneten Positionen der *FSV-VI-005 20180901: Standardisierte Leistungsbeschreibung Verkehr und Infrastruktur (LB-VI)* [48] hergestellt. In einer kritischen Diskussion wurden die Unterschiede ausgearbeitet, wofür die Prozesse und Teilprozesse tabellarisch den Positionen gegenübergestellt wurden. Ziel war es herauszufinden, ob die Standardisierte Leistungsbeschreibung prozessorientiert ist.

Im Zuge der Auswertung der Gegenüberstellung wurde festgestellt, dass die Positionen der *FSV-VI-005 20180901: Standardisierte Leistungsbeschreibung Verkehr und Infrastruktur (LB-VI)* zu etwa 80 % prozessorientiert dargestellt werden. Bei diesen Prozessen und Einzelprozessen der Prozessdiagramme kann eine eindeutige Zuordnung zu Positionen der Standardisierten Leistungsbeschreibung getroffen werden.

Dem gegenüber stehen Prozesse wie das „Einbringen“ von Spundwänden, das „Verrohren“ und „Bohren“ von Kelly- und Greifer-Bohrpfählen, das „Rammen“ von Duktülpfählen oder das „Ausheben“ und „Betonieren“ von Schlitzwänden. Alle diese Prozesse bestehen aus einer Vielzahl von Teilprozessen, die sich im Wesentlichen jeweils einer Position der Standardisierten Leistungsbeschreibung zuordnen lassen. Die meisten der genannten Prozesse sind diskontinuierliche Abläufe, die sich in Schleifen wiederholen. Somit stellt sich die Frage, ob eine Teilung dieser Positionen sinnvoll ist, zumal dies Tätigkeiten sind, deren Abrechnung nur schwer möglich wäre. Bei Zusammenfassung der Teilprozesse zu einem Prozess, sind auch diese Leistungsbeschreibungen prozessorientiert. Die Standardisierte Leistungsbeschreibung ist hier innerhalb eines Gewerkes immer eindeutig formuliert und lässt keinen Zweifel daran, welcher Prozess welcher Position zuzuordnen ist. Entscheidend ist es, zu wissen, welche Teilprozesse mit einer Position zu vergüten sind.

Ein differenzierteres Bild zeigen Leistungen wie das Mischen, Fördern und Bereithalten von Zement- oder Bentonit-Suspensionen. Diese Tätigkeiten sind mit einem großen Maschinenaufwand zu betreiben, die Kosten jedoch stets in andere Positionen umzulegen. Hier würde die Neudefinition von Leistungspositionen helfen zu verstehen, wo Kosten wirklich entstehen. Dieses Wissen ist bei der Erstellung bzw. der Prüfung von Mehrkostenforderungen überaus sinnvoll.

Äußeren Umständen, wie dem Arbeiten mit beschränkter Raumhöhe und dem verfahrensbedingten Mehraufwand einer überschnittenen Bohrpfahlwand wird durch Aufzählungen (in der Standardisierten Leistungsbeschreibung Az. abgekürzt) Rechnung getragen.

Nach der Aufarbeitung der Grundlagen und der Gerätetechnik, dem Ausarbeiten der Prozessdiagramme sowie deren Vergleich mit Erfahrungswerten zu Aufwand und Leistung aus der Praxis können im abschließende Kapitel die Forschungsfragen beantwortet werden. Ergänzt wird das Kapitel mit einer Zusammenfassung der Diplomarbeit.

Kapitel 7

Ergebnisse - Zusammenfassung - Ausblick

Das letzte Kapitel widmet sich der Beantwortung der zu Beginn der Arbeit gestellten Forschungsfragen. Bevor die Forschungsfragen beantwortet werden, wird die Arbeit in wenigen Absätzen zusammengefasst. Den Abschluss bildet der Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf zu prozessorientierten Leistungsbeschreibungen.

7.1 Zusammenfassung

Diese Diplomarbeit widmete sich der prozessorientierten Leistungsbeschreibung im Tiefbau. Hierfür würde das Forschungsgebiet auf sechs Gewerke des Spezialtiefbaus eingegrenzt. Es wurden Spundwände, Verdrängungspfähle, Bohrpfähle, Mikropfähle, Schlitzwände und das Düsenstrahlverfahren für die Bearbeitung ausgewählt.

Das einleitende Kapitel der Grundlagen (siehe Kapitel 2) bietet ausführliche Beschreibungen der einzelnen Gewerke. Die Beschreibungen beinhalten Informationen der verwendeten Materialien, Ausführungsformen, Verfahrenstechniken sowie Herstellungsverfahren. Zum Abschluss dieses Kapitels wird eine ausführliche Verfahrensübersicht (siehe Abb. 2.27) der Gewerke geboten. Die Übersicht enthält neben Zusammenfassungen der zuvor beschriebenen Bestandteile Informationen zur Eignung eines Verfahrens in bestimmten Böden.

Mit verschiedenen Böden und Tiefen gehen unweigerlich unterschiedliche Geräte und Gerätegrößen einher. Dementsprechend veranschaulicht das Kapitel der Gerätetechnik (siehe Kapitel 3) die Vielfalt der am Markt verfügbaren Geräte und Werkzeuge. Neben einer ausführlichen Beschreibung wurden zu den wichtigsten Geräten und Maschinen Herstellerdaten abgerufen. Eine tabellarische Übersicht zeigt das kleinste und das größte Gerät der Kategorie. Diese Tabellen vermitteln dem Leser einen Eindruck der Bandbreite der Größe von Geräten. Eine Gegenüberstellung dieser Bandbreiten mit der *Österreichische Baugeräteliste 2015* dient dem Vergleich und der Klassifizierung der Geräte, wie sie für die Kalkulation benötigt wird.

Neben dem Wissen über die zu verwendende Gerätetechnik ist die Kenntnis über Arbeitsabläufe von besonderer Bedeutung. Die Mitarbeiter eines Unternehmens müssen die Zusammenhänge und Abhängigkeiten von Verfahren verinnerlicht haben. Zu diesem Zweck wurden die Arbeitsabläufe von elf ausgewählten Herstellungsverfahren in Kapitel 4 visualisiert. Die Darstellung wurde mithilfe der Modellierungssprache „Business Process Modeling and Notation 2.0“ bewerkstelligt. Basis der Erstellung waren Fachliteratur und Wissen aus Lehrveranstaltungen. Eine Anpassung der Diagramme wurden nach Gesprächen mit Fachexperten aus der Bauindustrie vorgenommen. Diese dienten der Richtigstellung der Prozessdiagramme und der qualitativen Verortung von Aufwänden wie Gerät, Personal und Zeit. Zusätzlich dazu wurde der Dokumentationsaufwand der Herstellungsverfahren in die Diagramme eingearbeitet.

Die validierten Prozessdiagramme waren wiederum Basis für die quantitative Ausarbeitung von Aufwands- und Leistungswerten im Kapitel 5. Mit dem Ziel, einen Vergleich zwischen Erfahrungswerten aus Literatur und Praxis herzustellen, wurden die Standardprozesse aus den

Prozessdiagrammen in Form einer Online-Umfrage abgefragt. Innerhalb eines Herstellungsverfahrens waren die Teilnehmer aufgefordert, Einzelprozesse mit Zeitaufwänden zu belegen und Tagesleistungswerte in Abhängigkeit von Boden und Tiefe anzugeben. Die mit *2ask: Online-Umfrage-Tool* durchgeführte Umfrage wurde an alle namhaften Spezialtiefbauunternehmen im deutschsprachigen Raum verteilt. Die Auswertung der Umfrage hat veranschaulicht, dass es bei Tagesleistungswerten bestimmter Herstellungsverfahren teils erhebliche Unterschiede gibt. Die prozentualen Unterschiede bestehen sowohl in positiver als auch in negativer Richtung.

Das abschließende Kapitel (siehe Kapitel 6) diente dem Vergleich der erhobenen Prozesse mit der *FSV-VI-005 20180901: Standardisierte Leistungsbeschreibung Verkehr und Infrastruktur (LB-VI)*. Die Gegenüberstellung von Prozessen und Teilprozessen mit den Positionen der Leistungsbeschreibung erfolgte in tabellarischer Form. Die Gegenüberstellung hat gezeigt, dass die Positionen weitestgehend prozessorientiert formuliert sind. Ausnahmen bilden die tiefenabhängige Prozesse und Prozesse, die als Nebentätigkeiten angesehen werden. Äußeren Einflüssen, die einen Mehraufwand verursachen, wird mit sogenannten „Aufzahlungen“ Rechnung getragen.

7.2 Forschungsfragen

Wie können standardisierte Ausführungsprozesse für Spezialtiefbauverfahren aufgenommen und beschrieben werden?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wurde zunächst eine umfangreiche Literaturrecherche zu Verfahrenstechniken und Herstellungsverfahren diverser Spezialtiefbauverfahren durchgeführt. Im Zuge der Recherche und auf Basis der in Abschnitt 1.3 getroffenen Forschungsabgrenzungen des Forschungsgebietes wurden elf repräsentative Herstellungsverfahren analysiert. Diese Verfahren sind sechs Gewerken des Spezialtiefbaus entnommen. Die gewählten Verfahren wurden im Sinne einer prozessorientierten Ausführung dargestellt und beschrieben.

Auf Basis von Fachliteratur, Fachexpertengespräche und eigener Praxiserfahrung wurden die Tätigkeiten der Ausführung ausgearbeitet. Die anschließende Visualisierung der Arbeitsabläufe wurde mit Prozessdiagrammen bewerkstelligt. Die Diagramme wurden mit dem *Signavio Process Manager* in der Modellierungssprache BPMN angefertigt. Diese webbasierte Softwarelösung bietet eine Vielzahl von Notationselementen zur Beschreibung von Ausführungsprozessen. Die Elemente der Diagramme wurden in tabellarischer Form in Kapitel 4 detailliert beschrieben.

In einem weiteren Arbeitsschritt wurden die Prozessdiagramme mit Experten aus der Bauwirtschaft besprochen und adaptiert. Fehlende Prozesse und Teilprozesse wurden nachträglich eingearbeitet. Durch diese Gespräche wurde der Detaillierungsgrad erhöht und die Vollständigkeit der Prozessdiagramme sichergestellt. Neben den Prozessdiagrammen bietet das Kapitel 4 ausführliche Beschreibungen der jeweiligen Prozesse und Teilprozesse.

Welcher Zusammenhang lässt sich aus den Ausführungsprozessen und den Leistungsparametern aus Literatur und Praxis abbilden?

Die in der Literatur dargestellten Leistungsparameter für Herstellungsverfahren des Spezialtiefbaus beziehen sich größtenteils auf Tagesleistungswerte. Diese Werte werden in den zum Großteil ohne die Berücksichtigung von äußeren Einflussfaktoren wie Boden, herzustellender Tiefe, Durchmesser, etc. angegeben. Dies macht einen Vergleich der Werte kaum möglich. Angaben zu Zeitaufwänden von Einzelprozessen lassen sich nur in *Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau: Baugrund - Baugruben - Baugrundverbesserung - Pfahlgründungen - Grundwasserhaltung* nach Maybaum et al. [81] finden.

Im Zuge dieser Arbeit wurde eine detaillierte Umfrage auf Basis von elf Prozessdiagrammen erarbeitet. Ziel der Umfrage war es, Zeitaufwände der Prozesse und Teilprozesse festzulegen. Ergänzend dazu wurden Tagesleistungswerte der Verfahren unter den Eingangsparametern Boden und herzustellender Tiefe abgefragt.

Die Auswertung der Umfrage zeigt, dass sich in etwa einem Drittel der elf abgefragten Herstellungsverfahren die von der Fachliteratur dargestellten Tagesleistungswerte nicht in die Praxis umsetzen lassen. Dem gegenüber stehen die Ergebnisse von 7 Herstellungsverfahren, bei welchen die Tagesleistungswerte um teils bis zu 70 % übertroffen wurden. Ausgenommen davon ist ein Ausreißer mit einem Mehr von etwa 450 % an Leistung. In diesem Fall ist jedoch der Vergleichswert der Literatur anzuzweifeln.

Die Umfrage verdeutlicht, dass die genannten Gewerke des Spezialtiefbaus von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängen. Die hinterlassenen Kommentare lassen darauf schließen, dass die Werte nur grobe Anhaltspunkte sind und nicht für die Kalkulation herangezogen werden dürfen. Neben dem Boden und der Tiefe gelten vielmehr die Lage der Baustelle, die Platzverhältnisse während der Arbeiten, die Gerätegrößen und viele mehr als weitere wesentliche Einflussfaktoren auf die Leistung.

Sind die gegenständlichen Standardleistungsverzeichnisse aus Sicht des Ausführungsprozesses angepasst?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wurde ein Vergleich zwischen den in Kapitel 4 erstellten Diagrammen der Ausführungsprozesse und der Standardisierten Leistungsbeschreibung [48] hergestellt. Mithilfe einer tabellarischen Gegenüberstellung wurde versucht, jedem Teilprozess der Prozessdiagramme eine Position der Standardisierten Leistungsbeschreibung zuzuordnen.

Im Zuge der Ausarbeitung hat sich herausgestellt, dass sich etwa 80 % der Teilprozesse direkt zu einer Leistungsposition zuordnen lassen. Positionen, deren Abbildung in Prozessdiagrammen schwer ist, sind davon ausgenommen. Hierzu zählen beispielsweise die zeitgebundenen Kosten einer Baustelle. Diese Position beinhaltet viele Teilprozesse. Dazu zählen Kosten des Baustellenführungspersonals sowie Teile der Baustelleneinrichtung, die über einen bestimmten Zeitraum hinweg der Baustelle zugeordnet sind. Diese Zusammenfassung in einem Prozess zu den zeitgebundenen Kosten ist aus baupraktischer Sicht sinnvoll, da nicht jeder Teilprozess gesondert vergütet werden kann. Zudem würde eine Auffächerung jener Position zu einem erheblichen Mehraufwand während der Abrechnung führen.

Der Übersichtlichkeit halber wurde in den Prozessdiagrammen darauf verzichtet, Stillliegezeiten (die durch den Auftraggeber zu vertreten sind) abzubilden. Zudem ist die Abbildung von Stillliegezeiten schwer. Es handelt sich um Störungen im Ausführungsprozess, die zu jedem Zeitpunkt und an jeder Stelle des Ausführungsprozesses entstehen können.

Des Weiteren nicht abgebildet sind Positionen für Aufzahlungen. Aufzahlungen dienen der Vergütung von Erschwernissen (etwa dem Arbeiten im Gleisbereich oder im Inneren von Gebäuden), deren Abbildung den Umfang der Diagramme sprengen würde. Die erstellten Prozessdiagramme dienen vielmehr der Darstellung der Standardprozesse.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass sich zu einem Großteil der Prozesse und Teilprozesse eine Leistungsposition der Standardisierten Leistungsbeschreibung zuordnen lässt. Ausgenommen davon sind Teilprozesse innerhalb eines Prozesses, deren Summe an Zeitaufwänden im Minutenbereich liegt. Als Beispiel sei an dieser Stelle das Einbringen von Spundbohlen genannt. Die Position beinhaltet gemäß Langtext „das Aufstellen, Umstellen und Abbauen allfällig erforderlicher Gerüste, alle Maßnahmen zu Erzielung des planmäßigen Einbringens sowie alle Ladearbeiten“ [48, S. 768]. Somit sind die Teilprozesse „Spundbohle aufnehmen“, „Spundbohle einfädeln“, „Spundbohle ausrichten“ und „Spundbohle einbringen“ mit dieser Position zu vergüten. Der

Prozess des „Einbringens“ von Spundbohlen sowie ähnliche Prozesse beschreiben eine Summe an Teilprozessen, deren Gesamtdauer im Minutenbereich liegt. Somit stellt sich die Frage, ob eine Teilung dieser Positionen sinnvoll wäre, zumal die Abrechnung dieser Leistungen kaum möglich ist. Fasst man die Teilprozesse zu einem Prozess zusammen, sind auch diese Positionen der Leistungsbeschreibung prozessorientiert.

Ein anderes Bild zeigen Leistungen wie Tätigkeiten rund um das Mischen, Fördern und Bereithalten von Zement- oder Bentonit-Suspensionen. Diese Tätigkeiten sind mit einem großen Personal- und Maschinenaufwand zu betreiben. Die Leistungsbeschreibung sieht für diese Prozesse jedoch stets nur die Materialposition vor. Hier würde die Neudefinition von Leistungspositionen helfen zu verstehen, wo Kosten wirklich entstehen. Dieses Wissen ist vor allem dann von Nutzen, wenn es im Zuge der Ausführung durch unvorhersehbare Umstände zu Mehrkosten kommt.

7.3 Ausblick

Die effiziente Gestaltung von Arbeitsabläufen und -prozessen gewinnt zunehmend an Bedeutung – Stichwort „Lean Construction“. Schulen, Universitäten und Unternehmen müssen einen großen Fokus auf die Erfassung und das Verständnis der Arbeitsabläufe legen. Eine visuelle Darstellung komplexer Prozessabläufe, die durch Abhängigkeiten voneinander geprägt sind, trägt zu einem besseren Verständnis bei. Die in dieser Arbeit erstellten Prozessdiagramme veranschaulichen die Prozesse und Abläufe der bearbeiteten Herstellungsverfahren im Spezialtiefbau. Die Diagramme lassen sich somit bestens zur Ausbildung neuer Mitarbeiter von Spezialtiefbauunternehmen sowie im schulischen und studentischen Lehrbetrieb einsetzen.

In diesem Sinne gilt es für die Forschung weitere Herstellungsverfahren des Spezialtiefbaus sowie andere Verfahren des Bauwesens mithilfe von Prozessdiagrammen aufzuarbeiten. Neben dem besseren Verständnis eignen sich die Diagramme zur Optimierung von Arbeitsprozessen im Hinblick auf Zeit- und Kosteneffizienz.

Zusätzlich gilt es, die Fachliteratur in Bezug auf Aufwände von Prozessen und Teilprozessen zu aktualisieren. Die Technik entwickelt sich in einer Geschwindigkeit weiter, dass Literatur von vor 10 Jahren nicht mehr den Stand der Technik widerspiegelt. Ungeachtet der Einflussfaktoren auf die Herstellungsverfahren des Spezialtiefbaus, gilt es ein Nachschlagewerk zu Tagesleistungen nach dem Vorbild von Hüster (*Leistungsberechnung der Baumaschinen* [56]) zu schaffen. Die in dieser Arbeit erstellte quantitative Online-Umfrage kann die Basis einer großangelegten Forschungsarbeit zu Erfahrungswerten aus der Praxis sein. Da der Spezialtiefbau ein sehr maschinenabhängiges Gewerbe ist, wird es als sinnvoll erachtet, namhafte Gerätehersteller mit an Bord einer solchen Forschungsarbeit zu holen.

Vorab gilt es jedoch als unabdingbar, die genauen Rahmenbedingungen einer solchen Umfrage abzuklären. Hierzu bedarf es zwischen Forschungsgebieten übergreifender Abstimmungen zu Einflussfaktoren des Spezialtiefbaus. Diese müssen Spezifikationen wie den anstehenden Boden, die herzustellende Tiefe eines Gewerkes, die Größe und Dauer einer Baustelle u.v.m in Betracht ziehen. Ebenso spielt die Maschinenteknik eine immer bedeutendere Rolle während der Herstellung. Für jede Baustelle ist ein geeignetes Gerät zu finden, welches einerseits über ausreichend Leistung verfügt, andererseits mit den Rahmenbedingungen einer Baustelle kombinierbar ist.

Literatur

- [1] ABI GmbH. *Produktinformation: Bohrantriebe MDBA, Stand 09/2017*. 2017.
- [2] ABI GmbH. *Produktinformation: Bohrantriebe RHP, Stand 02/2017*. 2017.
- [3] ABI GmbH. *Produktinformation: Doppelkopfbohr-System VDW, Stand 01/2020*. 2020.
- [4] ABI GmbH. *Produktinformation: Drehbohranlage RH 12/140, Stand 05/2019*. 2019.
- [5] ABI GmbH. *Produktinformation: Drehbohranlage RH 40, Stand 05/2019*. 2019.
- [6] ABI GmbH. *Produktinformation: Hydro-Press-System HPS HPU HPZ, Stand 04/2020*. 2020.
- [7] ABI GmbH. *Produktinformation: Klemmzangen EKS SKS MZK, Stand 07/2017*. 2017.
- [8] ABI GmbH. *Produktinformation: Vibratoren MRZV-VV, Stand 01/2016*. 2016.
- [9] H. Bauer. *Baubetrieb*. 3., vollständig neu bearbeitete Auflage. Berlin: Ernst W. + Sohn Verlag, 2017.
- [10] BAUER Maschinen GmbH. *Produktinformation: BD 90/75 Dekantierzentrifuge, Stand 02/2016*. 2016.
- [11] BAUER Maschinen GmbH. *Produktinformation: BE - Entsandungsanlagen, Stand 09/2015*. 2015.
- [12] BAUER Maschinen GmbH. *Produktinformation: BG 20 H Rotary Drilling Rig, Stand 08/2019*. 2019.
- [13] BAUER Maschinen GmbH. *Produktinformation: BG 72 Rotary Drilling Rig, Stand 10/2017*. 2017.
- [14] BAUER Maschinen GmbH. *Produktinformation: Bohrwerkzeuge und Bohrröhre, Stand 03/2016*. 2016.
- [15] BAUER Maschinen GmbH. *Produktinformation: BV Verrohrungsmaschine, Stand 03/2019*. 2019.
- [16] BAUER Maschinen GmbH. *Produktinformation: DHG V Diaphragm Wall Hydraulic Grab, Stand 03/2018*. 2018.
- [17] BAUER Maschinen GmbH. *Produktinformation: Geräteprogramm 2019/2020, Stand 03/2019*. 2019.
- [18] BAUER Maschinen GmbH. *Produktinformation: HDI Bauer Hochdruckinjektion, Stand 03/2017*. 2017.
- [19] BAUER Maschinen GmbH. *Produktinformation: Kellystangen, Stand 03/2020*. 2020.
- [20] BAUER Maschinen GmbH. *Produktinformation: MC Seilbagger, Stand 02/2018*. 2018.
- [21] BAUER Maschinen GmbH. *Produktinformation: Single Pass Ausrüstung, Stand 12/2019*. 2019.
- [22] BAUER Maschinen GmbH. *Produktinformation: Trench Cutter Systems, Stand 04/2020*. 2020.

- [23] BAUER Spezialtiefbau GmbH. *BAUER Bohrpfähle*. 2018.
- [24] BAUER Spezialtiefbau GmbH. *BAUER Schlitz- und Dichtwände*. 2015.
- [25] BAUER Spezialtiefbau GmbH. *FDP - Vollverdrängerbohren - Full Displacement Piling*. 2018.
- [26] BAUER Spezialtiefbau GmbH. *Produktinformation: BAUER Dukti Pfahl System, Stand 06/2017*. 2015.
- [27] Beretta Alfredo S.r.l. *Produktinformation: Beretta T159-M1; Stand 03/2007*. Besana, 2007.
- [28] Beretta Alfredo S.r.l. *Produktinformation: Beretta T21; Stand 02/2008*. Besana, 2008.
- [29] F. Berner, B. Kochdörfer und R. Schach. *Grundlagen der Baubetriebslehre 1 - Baubetriebswirtschaft*. 2., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012. ISBN: 978-3-8348-1363-3.
- [30] C. Boley. *Handbuch Geotechnik: Grundlagen - Anwendungen - Praxiserfahrungen*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012. ISBN: 978-3-8348-0372-6.
- [31] H. Brandl und H. G. Jodl. „Ökoeffiziente Entscheidungskriterien im Tiefbau“. Wien, 2005.
- [32] E. O. Buja. *Spezialtiefbau-Praxis von A - Z*. Berlin: Bauwerk, 2002.
- [33] H. O. Buja. „Der Spezialtiefbau - Aktueller Stand der Geräte- und Verfahrenstechnik“. In: *Bautechnik Spezial* (2004), S. 25–109.
- [34] H. O. Buja. *Handbuch der Baugrunderkennung - Geräte und Verfahren*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009. ISBN: 978-3-8348-0544-7.
- [35] H. O. Buja. *Handbuch des Spezialtiefbaus*. 3., überarbeitete Auflage. Köln: Bundesanzeiger-Verlag, 2015. ISBN: 978-3-8462-0377-4.
- [36] H. O. Buja. *Handbuch des Spezialtiefbaus: Geräte und Verfahren*. 2., neu bearbeitete und wesentlich erweiterte Auflage. Düsseldorf: Werner-Verlag, 2001.
- [37] H. O. Buja. *Praxishandbuch: Ramm- und Vibrationstechnik*. Berlin: Bauwerk Verlag, 2007. ISBN: 978-3-934369-85-6.
- [38] H. O. Buja. *Spezialtiefbaupraxis Band 2 von 2: Grundlagen - Gerätetechnik - Anwendungen - Praxiserfahrungen*. Norderstedt: Books on Demand, 2014. ISBN: 978-37357-7669-3.
- [39] BVV Spezialtiefbau Vertriebs GmbH. *Produktinformation: BVV Pfahlbohren, Zugriff am 31.08.2020*.
- [40] DELMAG GmbH & Co. KG. *Produktinformation: Diesalbären, Stand 10/2018*. 2015.
- [41] Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. *Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ – EA „Pfähle“*. 2. Auflage. Berlin: Ernst W. + Sohn Verlag, 2012. ISBN: 978-3-433-60156-3.
- [42] M. Duschel und W. Plettenbacher. *Handbuch Arbeitsvorbereitung und Lean Construction im Baubetrieb*. 2. Auflage. Wien: Linde, 2020.
- [43] K. Eichler, F. Berndt, S. Binde, G. Dausch, U. Höhne, J. Hölterhoff, D. Koch, M. Kollnberger, P. Müller, K. Smettan und J. Uhlendahl. *Spezialtiefbau: Erkundung und Ausführung - Technik und Umwelt - Methoden und Auswirkungen - Baustoffe und Verfahren*. 5., neu bearbeitete Auflage. Tübingen: Expert-Verlag, 2018. ISBN: 978-3-8169-3431-8.
- [44] Eurodrill GmbH. *Produktinformation: Drehantriebe für Drehbohrgeräte, Zugriff am 20.05.2020*.
- [45] Fachverband der Bauindustrie der Wirtschaftskammer Österreich. *Österreichische Baugeräteliste 2015*. Gütersloh: Bauverlag BV GmbH, 2015. ISBN: 978-3-7625-3671-0.

- [46] Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr. *Online-Auftritt: FSV*. URL: <http://www.fsv.at/cms/start.aspx> (Zugriff am 24. 07. 2020).
- [47] FRANKI Grundbau GmbH & Co KG. *Verdrängungspfähle*. URL: <https://www.franki.de/leistungen/verdraengungspfaehle/> (Zugriff am 07. 04. 2020).
- [48] FSV-VI-005 20180901: *Standardisierte Leistungsbeschreibung Verkehr und Infrastruktur (LB-VI)*. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV), Sep. 2018.
- [49] Giken Ltd. *Produktinformation: Silent Piler F101 fpr U & Z Sheet Piles, Stand 12/2018*. 2018.
- [50] Giken Ltd. *Produktinformation: Silent Piler F101 fpr U Sheet Piles, Stand 11/2016*. 2016.
- [51] G. Girmscheid. *Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse*. 4. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. ISBN: 978-3-642-13794-5.
- [52] G. Girmscheid. *Studienunterlagen zur Vorlesung: Bauverfahren des Spezialtiefbaus*. 15. Auflage. Zürich: Eigenverlag des IBI an der ETH, 2013.
- [53] J. Göpfert und H. Lindenbach. *Geschäftsprozessmodellierung mit BPMN 2.0*. München: Oldenbourg Verlag, 2013. ISBN: 978-3-486-71805-8.
- [54] C. H. Hofer. „Evaluierung von REFA-Zeiterfassungsmethoden zur Entwicklung von Leistungsansätzen von Ressourcengruppen im Spezialtiefbau“. Masterarbeit. Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, 2016.
- [55] K. Hudlmaier. *Spezialtiefbau Kompendium Band II: Verfahrenstechnik und Geräteauswahl*. Berlin: Ernst W. + Sohn Verlag, 2009. ISBN: 978-3-433-02933-6.
- [56] F. Hüster. *Leistungsberechnung der Baumaschinen*. 5. Auflage. Aachen: Shaker, 2005. ISBN: 978-3-8322-2028-0.
- [57] Ingenieurgemeinschaft für Grundbau, Spezialtiefbau, Umwelt- und Geotechnik and Prof. Dr.-Ing. Jessberger und Partner. *Handbuch für die Einkapselung von Altablagerungen*. Karlsruhe: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 1990.
- [58] ITW Ingenieurunternehmung AG. *Produktinformation: Pfähle aus duktilem Guss*, Zugriff am 14.10.2020. Balzers, Liechtenstein.
- [59] D. Jacob, C. Müller und M. Oehmichen. *Kalkulieren im Ingenieurbau: Strategie - Kalkulation - Controlling*. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. ISBN: 978-3-658-18109-3.
- [60] Jean Lutz SA. *Anwendungsbereich: Schlitzwand*. URL: <http://www.jeanlutzsa.fr/de/schlitzwand/> (Zugriff am 10. 06. 2020).
- [61] Keller Holding GmbH. *The Soilcrete® - Jet Grouting Process*.
- [62] Klemm Bohrtechnik GmbH. *Produktinformation: Lieferprogramm, Stand 02/2019*. 2019.
- [63] D. Kolymbas. *Geotechnik - Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau*. 5. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. ISBN: 978-3-662-58472-9.
- [64] H. König. *Maschinen im Baubetrieb: Grundlagen und Anwendung*. 4., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 978-3-658-03289-0.
- [65] A. Kropik. *Studienunterlagen zur Vorlesung: Kalkulation und Kostenrechnung im Baubetrieb*. Wien: Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement, 2018.
- [66] Liebherr-Betonpumpen GmbH. *Produktinformation: Stationärbetonpumpen, Stand 02/2018*. 2018.

- [67] Liebherr-International Deutschland GmbH. *Bohren als Verfahren im Spezialtiefbau*. URL: <https://www.liebherr.com/de/aut/produkte/baumaschinen/spezialtiefbau/verfahren/bohren/bohrverfahren.html> (Zugriff am 01.04.2020).
- [68] Liebherr-International Deutschland GmbH. *Doppelkopfbohren*. URL: <https://www.liebherr.com/de/aut/produkte/baumaschinen/spezialtiefbau/verfahren/bohren/bohrverfahren.html> (Zugriff am 01.04.2020).
- [69] Liebherr-International Deutschland GmbH. *Produkte Spezialtiefbau*. URL: <https://www.liebherr.com/de/aut/produkte/baumaschinen/spezialtiefbau/spezialtiefbau.html> (Zugriff am 19.05.2020).
- [70] Liebherr-International Deutschland GmbH. *Schlitzten als Verfahren im Spezialtiefbau*. URL: <https://www.liebherr.com/de/aut/produkte/baumaschinen/spezialtiefbau/verfahren/schlitzten/schlitzten.html> (Zugriff am 02.04.2020).
- [71] Liebherr-Werk Nenzing GmbH. *Produktinformation: Drehbohrwerkzeuge, Stand 03/2011*. 2011.
- [72] Liebherr-Werk Nenzing GmbH. *Produktinformation: Hochkantrüttler LV 20 und LV 20 F, Stand 03/2019*. 2019.
- [73] Liebherr-Werk Nenzing GmbH. *Produktinformation: Hydraulic Impact Hammer H 6 and H 15 L, Zugriff am 19.05.2020*.
- [74] Liebherr-Werk Nenzing GmbH. *Produktinformation: Hydraulische Schlitzwandgreifer HSG 5-18, Stand 06/2019*. 2019.
- [75] Liebherr-Werk Nenzing GmbH. *Produktinformation: Hydroseilbagger HS-Serie, Stand 02/2020*. 2020.
- [76] Liebherr-Werk Nenzing GmbH. *Produktinformation: Liebherr Schlitzwandfräse LSC 8-18, Stand 08/2019*. 2019.
- [77] Liebherr-Werk Nenzing GmbH. *Produktinformation: Lösungen für den Spezialtiefbau, Stand 03/2020*. 2020.
- [78] Liebherr-Werk Nenzing GmbH. *Produktinformation: Ramm- und Bohrgeräte LRB-Serie, Stand 02/2020*. 2020.
- [79] Liebherr-Werk Nenzing GmbH. *Produktinformation: Separation Plant for Slurry Wall Applications SP 600 C, Zugriff am 23.07.2020*.
- [80] Liebherr-Werk Nenzing GmbH. *Produktinformation: Verrohrungsmaschinen, Stand 04/2010*. 2010.
- [81] G. Maybaum, P. Mieth, W. Oltmanns und R. Vahland. *Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau: Baugrund - Baugruben - Baugrundverbesserung - Pfahlgründungen - Grundwasserhaltung*. 2., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011. ISBN: 978-3-8348-1614-6.
- [82] Obermann MAT GmbH. *Produktinformation: Lieferprogramm, Stand 03/2020*. 2020.
- [83] ÖNORM A 2063:2015 07 15: *Austausch von Leistungsbeschreibungs-, Elementkatalogs-, Ausschreibungs-, Angebots-, Auftrags- und Abrechnungsdaten in elektronischer Form*. Wien: Austrian Standards, Juli 2015.
- [84] ÖNORM EN 12063:1999 08 01: *Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Spundwandkonstruktionen*. Wien: Austrian Standards, Aug. 1999.

- [85] *ÖNORM EN 12699:2015 09 01: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Verdrängungspfähle*. Wien: Austrian Standards, Sep. 2015.
- [86] *ÖNORM EN 12716:2019 06 01: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Düsenstrahlverfahren*. Wien: Austrian Standards, Juni 2019.
- [87] *ÖNORM EN 14199:2016 10 15: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Mikropfähle*. Wien: Austrian Standards, Okt. 2016.
- [88] *ÖNORM EN 14199:2016 10 15: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Schlitzwände*. Wien: Austrian Standards, Dez. 2015.
- [89] *ÖNORM EN 1536:2015 12 01: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bohrpfähle*. Wien: Austrian Standards, Dez. 2015.
- [90] *ÖNORM EN ISO 14688-2:2019 10 15: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 2: Grundlagen der Bodenklassifizierung*. Wien: Austrian Standards, Okt. 2019.
- [91] Österreichische Bautechnik Vereinigung. *Merkblatt Baugrubensicherung*. Ausgabe Dezember 2014. Wien: Österreichische Bautechnik Vereinigung, 2014.
- [92] Österreichische Bautechnik Vereinigung. *Richtlinie Bohrpfähle*. Ausgabe August 2019. Wien: Österreichische Bautechnik Vereinigung, 2019.
- [93] Österreichische Bautechnik Vereinigung. *Richtlinie Schlitzwände*. Ausgabe August 2019. Wien: Österreichische Bautechnik Vereinigung, 2019.
- [94] A. Pech, E. Würger, A. Pauser und R. Hofmann. *Gründungen*. Wien: Springer-Verlag, 2015. ISBN: 3-211-21497-6.
- [95] H. Prinz und R. Strauß. *Ingenieurgeologie*. 6. Auflage. Berlin: Springer Spektrum, 2018. ISBN: 978-3-662-54710-6.
- [96] RTG Rammtechnik GmbH. *Produktinformation: HR 3000 - 10000 FAMBO Hydraulikhämmer, Stand 02/2015*. 2015.
- [97] RTG Rammtechnik GmbH. *Produktinformation: HR 500 - 2750 FAMBO Hydraulikhämmer, Stand 02/2015*. 2015.
- [98] RTG Rammtechnik GmbH. *Produktinformation: Hydraulikrüttler, Stand 12/2017*. 2017.
- [99] RTG Rammtechnik GmbH. *Produktinformation: RG-System - Rammgeräte & Anwendungen, Stand 02/2019*. 2019.
- [100] RTG Rammtechnik GmbH. *Produktinformation: Spundwandpressen, Stand 09/2017*. 2017.
- [101] R. Schach und J. Otto. *Baustelleneinrichtung: Grundlagen - Planung - Praxishinweise - Vorschriften und Regeln*. 3., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. ISBN: 978-3-658-16066-1.
- [102] J. M. Seitz und H.-G. Schmidt. *Bohrpfähle*. Berlin: Ernst W. + Sohn Verlag, 2000.
- [103] SENNEBOGEN Maschinenfabrik GmbH. *Produktinformation: HD-Seilbagger, Zugriff am 28.05.2020*.
- [104] Signavio GmbH. *Signavio Process Manager*. URL: <https://www.signavio.com/de/products/process-manager/> (Zugriff am 04.08.2020).
- [105] orbiz Software GmbH. *2ask: Online-Umfrage-Tool*. 2020. URL: <https://www.2ask.com/> (Zugriff am 03.07.2020).

- [106] SPANTEC Spann- & Ankertechnik GmbH. *Mikrpfahl-System*. URL: <https://www.spantec-gmbh.de/de/products/geotechnics/> (Zugriff am 14.10.2020).
- [107] Stadt Wien - Brückenbau und Grundbau (MA29). *Geotechnisch-geologisches Datenerfassungsprogramm (GEODE) - Abbildung Bodenprofil*. URL: <https://www.wien.gv.at/verkehr/grundbau/images/boden.jpg> (Zugriff am 03.08.2020).
- [108] Stahl- und Apparatebau Hans Leffer GmbH & Co. KG. *Produktinformation: Bohrgreifer*, Zugriff am 19.05.2020.
- [109] Stahl- und Apparatebau Hans Leffer GmbH & Co. KG. *Produktinformation: Bohrwerkzeuge für Drehbohren*, Zugriff am 19.05.2020.
- [110] Stahl- und Apparatebau Hans Leffer GmbH & Co. KG. *Produktinformation: Schlitzwandgreifer*, Zugriff am 20.05.2020.
- [111] Stahl- und Apparatebau Hans Leffer GmbH & Co. KG. *Produktinformation: Vollverdrängerschnecken*, Zugriff am 19.05.2020.
- [112] ThyssenKrupp GfT Bautechnik GmbH. *Spundwandhandbuch; Stand 02/2017*. Essen, 2007.
- [113] K. J. Witt. *Grundbau-Taschenbuch Teil 2: Geotechnische Verfahren*. 8. Auflage. Berlin: Ernst W. + Sohn Verlag, 2017. ISBN: 978-3-433-01845-3.
- [114] K. J. Witt. *Grundbau-Taschenbuch Teil 3: Gründungen und geotechnische Bauwerke*. 8. Auflage. Berlin: Ernst W. + Sohn Verlag, 2017. ISBN: 978-3-433-03153-7.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Methodik-Ablauf	16
2.1	Profilentwicklung im Laufe der Zeit [43]	19
2.2	Beispiele für Verbundwände [112]	21
a	Jagged-U-Wand	21
b	Jagged-Z-Wand	21
2.3	Ausführungsarten von Bohrpfahlwänden [102]	32
2.4	Ortbetonrammpfahl mit Innenrammung [47]	39
2.5	Ortbetonrammpfahl mit Kopframmung – Simplex-Pfahl [47]	39
2.6	Vollverdrängungspfahl mit Schneidschuh – Atlas-Pfahl [47]	40
2.7	Vollverdrängungspfahl mit verlorener Pfahlschulter – Fundex-Pfahl [81]	41
2.8	Kellybohren [67]	42
2.9	Schneckenbohren [67]	43
2.10	Doppelkopfbohren [67]	44
2.11	Verdrängerbohren [67]	44
2.12	Greiferbohren [67]	45
2.13	Aufsatzbohren [67]	46
2.14	(links) direktes und (rechts) indirektes Spülbohrverfahren [81]	47
2.15	GEWI-Stabstähle [106]	48
a	einfacher Korrosionsschutz	48
b	doppelter Korrosionsschutz	48
2.16	Herstellung von Duktilen Rammpfählen [58]	48
2.17	Ausführungen von Leitwänden [30]	52
a	Ortbeton-Ausführung	52
b	Beton-Fertigteil-Ausführung	52
2.18	Herstellungsablauf einer Schlitzwand im a) Pilgerschrittverfahren und im b) kontinuierlichen Verfahren [81]	53
2.19	Fugensysteme zwischen zwei Schlitzwandelementen; a) mit Abstellrohr, b) mit Betonfertigteil, c) mit Fugenbändern [114]	53
2.20	Herstellung einer Schlitzwand mit Tieflöffel [81]	55
2.21	Herstellung einer Schlitzwand mit Schlitzwandgreifer [70]	56
2.22	Herstellung einer Schlitzwand mit Schlitzwandfräse [70]	56
2.23	Anwendungen des Düsenstrahlverfahrens [36]	58
2.24	Düsenstrahlkörper und Anordnungsmöglichkeiten [36]	58
2.25	Ein-, Zwei- und Dreiphasenverfahren [61]	59
2.26	Zieharten des Gestänges [30]	60
2.27	Verfahrensübersicht	64
3.1	Kraftdrehköpfe [81]	81
4.1	Prozessdiagramm: Spundwand - verankerte Wellenwand im Ramm-Verfahren	101
4.2	Prozessdiagramm: Verdrängungspfahl - Ortbetonrammpfahl mit Fuß im Ramm-Verfahren	105

4.3	Prozessdiagramm: Bohrpfahl - Einzelpfahl im Kelly-Verfahren	109
4.4	Prozessdiagramm: Bohrpfahl - tangierende Bohrpfahlwand im SOB-Verfahren . .	113
4.5	Prozessdiagramm: Bohrpfahl - überschchnittene Bohrpfahlwand im VdW-Verfahren	117
4.6	Prozessdiagramm: Bohrpfahl - Einzelpfahl im Schlagbohr-Verfahren	121
4.7	Prozessdiagramm: Mikropfahl - Duktulpfahl im Ramm-Verfahren	125
4.8	Prozessdiagramm: Mikropfahl - GEWI-Pfahl im Spülbohr-Verfahren	129
4.9	Prozessdiagramm: Schlitzwand - Zweiphasen-Schlitzwand im Greifer-Verfahren .	135
4.10	Prozessdiagramm: Schlitzwand - Zweiphasen-Schlitzwand im Fräs-Verfahren . . .	139
4.11	Prozessdiagramm: Schlitzwand - Zweiphasen-Schlitzwand im Fräs-Verfahren . . .	145
5.1	Auswahl der Herstellungsverfahren [105]	150
5.2	Umfrage: Aufwandswerte einer Gruppe = Prozess [105]	151
5.3	Umfrage: Tagesleistungswerte eines Verfahrens [105]	152
5.4	Umfrage: Leistungsminderung eines Verfahrens [105]	152
5.5	Position der Teilnehmer im Unternehmen	152
5.6	Erfahrung der Teilnehmer im Spezialtiefbau	153
5.7	Anhaltswerte für die Leistung von Schlagrammen bei Spundbohlen [56, S. 157] .	155
5.8	Anhaltswerte für die Leistung von Schlagrammen bei Stahl- und Betonpfählen [56, S. 158]	157
5.9	Anhaltswerte für die Leistung von Vibrationsrammen und schlanken Pfählen [56, S. 157]	167

Tabellenverzeichnis

2.1	Rammeignung der Böden [35]	26
2.2	Eignung für das Vibrationsverfahren [35]	27
2.3	Eignung für das Einpressverfahren [35]	27
3.1	Übersicht der Einbringverfahren	65
3.2	Seilbagger >75 kW, hydraulisch	67
3.3	Rammmäkler für Seilbagger mit Sonder-Gitterausleger	68
3.4	Kombinierte Ramm- und Bohrgeräte	69
3.5	Hydraulik-Freifallbären	70
3.6	Dieselbären	71
3.7	Schnellschlaghammer, druckluftbetrieben	71
3.8	Vibrationsbären, hydraulisch	73
3.9	Einfachklemmzangen	74
3.10	Spundwandpressen	75
3.11	Vollverdränger-Bohrschnecken	78
3.12	Parameter von kleineren bis größeren Drehbohranlagen [101, S. 69]	79
3.13	Drehbohrgeräte (Grundgerät inkl. Mast, Drehgetriebeführungsschlitten, Kelly-, Hilfs- und Vorschubwinde)	80
3.14	Kraftdrehköpfe für Drehbohrgeräte	80
3.15	Doppel-Kraftdrehköpfe (inkl. Betonierkopf)	81
3.16	Teleskop-Kellystangen, 4-fach, für Drehbohranlagen	82
3.17	Bohrschnecken für Vertikalbohrungen (Nutzlänge ca. 2,00 m)	83
3.18	Bohreimer (Nutzlänge ca. 1,50 m)	83
3.19	Teilverdränger-Bohrschnecken	84
3.20	Stationärbetonpumpen	85
3.21	Einseil-Bohrgreiferkörper und Schaufelvorsatz	86
3.22	Verrohrungsmaschinen für Seilbagger	87
3.23	Verrohrungsmaschinen für Drehbohranlagen	87
3.24	Bohrrohr, doppelwandig, Nutzlängen 1 bis 6 m	89
3.25	Abfangschellen	89
3.26	Schlitzwandgreiferkörper (mechanisch) inkl. Greiferschalen	90
3.27	Schlitzwandgreiferkörper (hydraulisch) inkl. Greiferschalen	90
3.28	Schlitzwandfräsen	91
3.29	Entsandungsanlagen für Bentonitsuspensionen, einstufig	92
3.30	Bohrgeräte für das Düsenstrahlverfahren	93
3.31	Hochdruck-Injektionsanlagen, Hochdruckpumpen	94
3.32	Zentrifugen-Dekanter	94
4.1	Symbole und Notation des BPMN 2.0	97
5.1	Aufbau der Fragebögen	153
5.2	Beispielhafte Rückrechnung tiefenabhängiger Aufwandswerte	154
5.3	Kennwerte der Herstellung von Spundwänden (Literatur) [81, S. 108 ff.]	155

5.4	Zusammenstellung Leistungswerte - Spundwände (Literatur)	156
5.5	Ausfandswerte der Spundwandherstellung (Doppelbohlenbreite: 1000 mm) . . .	156
5.6	Tagesleistungswerte: gerammte Spundwand [m^2/AT]	156
5.7	Kennwerte der Herstellung von Ortbetonrammpfählen mit Fuß (Literatur) [81, S. 335]	158
5.8	Zusammenstellung der Leistungswerte - Verdrängungspfähle (Literatur)	158
5.9	Ausfandswerte der Ortbetonrammpfählherstellung (Durchmesser: 560 mm) . . .	159
5.10	Tagesleistungswerte: Verdrängungspfahl mit Fuß [m/AT]	159
5.11	Kennwerte der Herstellung von Bohrpfählen mit Greifer (Literatur) [81, S. 313 ff.]	160
5.12	Zusammenstellung der Leistungswerte - Bohrpfähle (Literatur)	161
5.13	Aufwandswerte der Bohrpfahl-Herstellung im Kelly-Verfahren (Durchmesser: 880 mm)	162
5.14	Tagesleistungswerte: Bohrpfahl im Kelly-Verfahren [m/AT]	162
5.15	Aufwandswerte der Bohrpfahl-Herstellung im SOB-Verfahren (Durchmesser: 900 mm)	163
5.16	Tagesleistungswerte: Bohrpfahl im SOB-Verfahren [m/AT]	163
5.17	Aufwandswerte der Bohrpfahl-Herstellung im VdW-Verfahren (Durchmesser: 620 mm)	164
5.18	Tagesleistungswerte: Bohrpfahl im VdW-Verfahren [m/AT]	164
5.19	Aufwandswerte der Bohrpfahl-Herstellung im Schlagbohr-Verfahren (Durchmesser: 1200 mm)	165
5.20	Tagesleistungswerte: Bohrpfahl im Schlagbohr-Verfahren [m/AT]	165
5.21	Kennwerte der Herstellung von Stahlbetonfertigpfählen (Literatur) [81, S. 292] .	166
5.22	Zusammenstellung der Leistungswerte - Mikropfähle (Literatur)	167
5.23	Aufwandswerte der Herstellung von Duktülpfählen	168
5.24	Tagesleistungswerte: verpresster Duktülpfahl [m/AT]	168
5.25	Aufwandswerte der Herstellung von GEWI-Pfählen	169
5.26	Tagesleistungswerte: GEWI-Pfahl im Spülbohr-Verfahren [m/AT]	169
5.27	Kennwerte der Herstellung von Schlitzwänden mit Greifer (Literatur) [81, S. 144 ff.]	171
5.28	Zusammenstellung der Leistungswerte - Schlitzwände (Literatur)	171
5.29	Aufwandswerte der Schlitzwand-Herstellung mit Greifer (Lamellenbreite: 0,80 m)	172
5.30	Tagesleistungswerte: Schlitzwand im Greifer-Verfahren [m^2/AT]	172
5.31	Aufwandswerte der Schlitzwand-Herstellung mit Fräse (Lamellenbreite: 1,50 m) .	173
5.32	Tagesleistungswerte: Schlitzwand im Fräs-Verfahren [m^2/AT]	173
5.33	Kennwerte der Herstellung von DSV-Elementen (Literatur) [81, S. 159 ff.]	175
5.34	Zusammenstellung der Leistungswerte - Düsenstrahlverfahren (Literatur)	175
5.35	Aufwandswerte der DSV-Herstellung (Durchmesser: 1,30 m)	176
5.36	Tagesleistungswerte: DSV-Säulen im Simplex-Verfahren [m/AT]	176
5.37	Vergleich Tagesleistungen	177
6.1	Vergleich Prozessdiagramm - Standard-LB [48]: Spundwände	181
6.2	Vergleich Prozessdiagramm - Standard-LB [48]: Ortbetonrammpfähle mit Fuß . .	183
6.3	Vergleich Prozessdiagramm - Standard-LB [48]: Bohrpfähle (allgemeine Gruppen)	184
6.4	Vergleich Prozessdiagramm - Standard-LB [48]: Kelly-Bohrpfähle	185
6.5	Vergleich Prozessdiagramm - Standard-LB [48]: SOB-Bohrpfähle	186
6.6	Vergleich Prozessdiagramm - Standard-LB [48]: Duktülpfähle	187
6.7	Vergleich Prozessdiagramm - Standard-LB [48]: GEWI-Pfähle	188
6.8	Vergleich Prozessdiagramm - Standard-LB [48]: Schlitzwände	190
6.9	Vergleich Prozessdiagramm - Standard-LB [48]: DSV-Elemente	191