

ArcelorMittal Spundwand



ArcelorMittal

# Rammfibel für Stahlsplundbohlen





# Rammfibel für Stahlspundbohlen

# Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeines	7
2. Der Boden	8
2.1. Lage der Baustelle	8
2.2. Bodenkenngrößen	9
2.3. Beurteilung des Einbringverfahrens in verschiedenartige Böden	10
2.4. Auswahl des Spundwandprofils	11
3. Einbringgeräte	13
3.1. Allgemeines	13
3.2. Vibrierendes Einbringen	13
3.2.1. Normalfrequente Vibratoren	15
3.2.2. Hochfrequente Vibratoren	15
3.2.3. Gerätedimensionierung	15
3.2.4. Abbruchkriterien	15
3.3. Schlagendes Einbringen	16
3.3.1. Dieselhämmer	16
3.3.2. Rammhauben	16
3.3.3. Einfach wirkende Hydraulikhämmer	20
3.3.4. Doppelt wirkende Hydraulikhämmer	20
3.3.5. Schnellschlaghämmer	21
3.3.6. Abbruchkriterien	22
3.4. Spundbohlenpressen	22
3.4.1. Selbstschreitende Spundbohlenpressen	24
3.4.2. Mäklergeführte Spundbohlenpressen	24
3.5. Spezialgeräte und Sonderanfertigungen	25
4. Rammführungen	27
4.1. Allgemeines	27
4.2. Mäklführung	29
4.2.1. Rammen mit Teleskopmäkler	29
4.2.2. Rammen mit Starrmäkler	29
4.3. Führungsrahmen	31
4.4. Kombinierte Wände	31



4.5. Kreiszellen mit AS 500® Flachprofilen	32
4.6. Flachzellen mit AS 500® Flachprofilen	33
5. Einbringverfahren	34
5.1. Allgemeines	34
5.2. Fortlaufendes Einbringen	34
5.3. Staffelweises Einbringen	35
5.4. Fachweises Einbringen	36
5.5. Einbringen kombinierter Wände	37
5.6. „C1“ und „C23“ Wände	39
5.7. Einstellen in Schlitz- oder Mixed-In-Place Wände	39
5.8. Einbringen unter Wasser	40
5.9. Rammprotokolle	41
5.10. Leistungsannahmen	42
6. Transport und Lagerung	43
6.1. Allgemeines	43
6.2. Transport	43
6.3. Lagerung	43
6.4. Schäkel und Hebezeuge	44
6.5. Einfädelvorrichtungen	45
7. Einbringhilfen	46
7.1. Spülen	46
7.1.1. Allgemeines	46
7.1.2. Spülen mit Niederdruck	46
7.1.3. Spülen mit Hochdruck	47
7.2. Bohren	47
7.3. Fräsen	48
7.4. Sprengen	49
7.4.1. Allgemeines	49
7.4.2. Lockerungssprengung	49
7.4.3. Schocksprengung	49
7.5. Weitere praktische Einbauhilfen	49

8. Rammgenauigkeit	52
8.1. Einbringtoleranzen	52
8.2. Kontrolle der Wandlänge	52
8.3. Vor- und Nacheilen, Schiefstellung	53
8.4. Mitziehen	54
8.5. Messungen	55
9. Besondere technische Aspekte	57
9.1. Proberammungen	57
9.2. Arbeiten bei begrenzter lichter Höhe	57
9.3. Bauseitiges Einziehen zu Mehrfachbohlen	59
9.4. Abschätzung der vertikalen Tragfähigkeit	59
9.5. Schallentwicklung und Lärmschutz	60
9.6. Erschütterungen	62
9.6.1. Allgemeines	62
9.6.2. Meßsysteme	63
9.6.3. Erschütterungsbeurteilung auf Menschen	63
9.6.4. Erschütterungsbeurteilung auf Gebäude	63
9.6.5. Empfehlungen zur Erschütterungsverringern	63
9.7. Schlosssprungdetektoren	64
9.8. „Jagged Walls“	65
9.9. Schrägrammung	65
9.10. Spezialbohlen	67
9.10.1. Durchführungen – Spundwandbrillen	69
9.10.2. Ineinanderpassen von Schlossprofilen	69
9.11. Spundwandumschliessungen	70
9.11.1. Spundwandkästen	70
9.11.2. Kreisrammungen	71
9.12. Fuß- und Kopfverstärkungen	72
9.13. Felsrammung und Felsdübel	72
9.14. Rammen bei tiefen Temperaturen	73
9.15. Schlossdichtungen	73

9.16. Ankeranschlüsse	74
9.17. Spundwandabdeckungen	75
9.18. Messungen am bestehenden Bauwerk	76
9.19. Kastenpfähle ("Boxpiles")	76
9.20. Schweissen und Stösse	77
9.21. Rammrichtung	78
10. Flachprofile AS 500®	79
10.1. Allgemeines	79
10.2. Lagerung	79
10.3. Transport	80
10.4. Aufnehmen	80
10.5. Einrammvorgang	80
10.5.1. Führungsgerüst	80
10.5.2. Aufstellen von Flachprofilen	80
10.5.3. Einrammen	81
10.6. Rückbau	82
10.7. Annahmen zum Zeitaufwand	82
11. Ziehen von Spundbohlen	83
11.1. Allgemeines	83
11.2. Maßnahmen vor und während des Einrammens	83
11.3. Ziehvorgang, Abschätzen der Ziehkraft	84
11.4. Elektro-Osmose	84
11.5. Wiederverwendung von Spundbohlen	85
12. Sanierung von Schäden	86
12.1. Verformungen am Bohlenkopf	86
12.2. Schlossschäden	87
13. Referenzen	88
Anhang A	90
A.1. Rammprotokoll – Schlagrammung	90
A.2. Rammprotokoll – Vibrationsrammung	91



Hochwasser schützen an der Maas in Geijp, Maastricht, 2019

# 1. Allgemeines

Das vorliegende Handbuch soll eine praktische Hilfe zum erfolgreichen Einbau von Stahlspundbohlen sein. Es werden Informationen aus der Baupraxis und jahrelanger Erfahrung aus der Bauplanung kurz und anwenderfreundlich in Text und Bild dargestellt.

Dem Anwender soll aufgezeigt werden, wie wichtig es ist, Bodenbedingungen, Rammgut und Rammgerät der jeweiligen Situation anzupassen, um so, ggf. durch den Einsatz von Rammhilfen, ein technisch und wirtschaftlich gutes Einbringergebnis zu erreichen.

Die Rammfibel gibt eine Übersicht über den aktuellen Stand der Rammtechnik, angefangen beim Vibrationsbär, über Schlagrammen bis zu hydraulischen Pressen und neuesten Spezialgeräten (Stand 2020, siehe Kapitel 3.5).

Das Buch bietet im Weiteren eine Beschreibung der Einbringverfahren, der notwendigen und möglichen Zusatzausrüstungen, einschließlich Rammführungen sowie die Erläuterung verschiedener Methoden, die für die ordnungsgemäße Ausführung von Rammarbeiten von Nutzen sind.

Wo vorhanden, wird auf weiterführende Literatur oder einschlägiges Regelwerk verwiesen.

Natürlich erhebt das vorliegende Handbuch keinen Anspruch auf Vollständigkeit, und trotz sorgfältiger Planung und Vorbereitung kann der Baustoff Boden immer wieder Überraschungen bereithalten, für die neue ingenieurtechnische Lösungsansätze gefunden werden müssen.

## 2. Der Boden

### 2.1. Lage der Baustelle

Für das erfolgreiche Durchführen einer Spundwandbaustelle ist eine sorgfältige Baustellenvorbereitung unabdingbar. Topographische und geologische Randbedingungen sind so genau wie möglich zu erkunden und zu dokumentieren. Bohrungen oder Sondierungen sollen möglichst nahe an der tatsächlichen Rammachse liegen. Zur Geologie muss vermerkt werden, dass der Baustoff Boden, selbst bei umfangreicher Erkundung jederzeit Unerwartetes bereithalten kann.

Transportwege können, je nach Länge der Spundbohlen, ein entscheidender Kostenfaktor sein. Lagerflächen sollen vorhanden sein oder müssen entsprechend vorbereitet werden. Hindernisse, wie über- oder unterirdische Leitungen, Verkehrswege oder sensible Nachbarbebauung, sind vor Baubeginn zu erkunden. Gegebenenfalls ist ein Beweissicherungsverfahren durchzuführen, um späteren Schadenersatzforderungen begegnen zu können.

Sämtliche Hebegeräte sind, im Hinblick auf notwendige Hubhöhen und Traglasten, ausreichend zu dimensionieren.

Die jeweils gültigen Sicherheitsvorschriften sind einzuhalten, um ein sicheres Arbeiten zu gewährleisten.

Zur Beurteilung der Rammbarkeit des Bodens und der Auswahl eines geeigneten Spundwandprofils sind folgende Informationen notwendig:

- Schichtung des Baugrunds, Ansprache durch gezogene Bohrkerne;
- Höhe des Grundwasserspiegels;
- Scherparameter, Kohäsion;
- Ergebnisse von Ramm- und Drucksondierungen;
- Wichte des Bodens.

Des Weiteren können folgende Daten hilfreich sein:

- Korngröße, Kornverteilung, Ungleichförmigkeitszahl;
- Einschlüsse oder Störzonen;
- Porenanteil, Porenzahl;
- Wasserdurchlässigkeit des Bodens, Feuchtigkeitsgehalt.

Je umfangreicher die Bodenerkundung, umso geringer wird das Baugrundrisiko.

## 2.2. Bodenkenngrößen

Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen Ergebnissen aus Bodenerkundungen und Lagerungsdichte bzw. der Konsistenz hergestellt. Die Tabellen dienen als zusätzliches Hilfsmittel zu den eigenen Erfahrungswerten.

Die Lagerungsdichte in Bezug zu Ergebnissen von Ramm- und Drucksondierungen bei nichtbindigen Böden:

DPH <sub>(1)</sub>	SPT <sub>(2)</sub>	CPT <sub>(3)</sub>	Pressiometerversuch		Lagerungs- dichte
$n_{10}$	$n_{30}$	$q_c$ MN/m <sup>2</sup>	$p_l$ MN/m <sup>2</sup>	$E_M$ MN/m <sup>2</sup>	
	< 4	2,5	< 0,2	1,5	sehr locker
3	4 bis 10	2,5 bis 7,5	0,2 bis 0,5	1,5 bis 5,0	locker
3 bis 15	10 bis 30	7,5 bis 15	0,5 bis 1,5	5,0 bis 15	mitteldicht
15 bis 30	30 bis 50	15 bis 25	1,5 bis 2,5	15 bis 25	dicht
> 30	> 50	> 25	> 2,5	> 25	sehr dicht

(1) Sondierung mit schwerer Rammsonde (Dynamic Probing Heavy)

(2) Standard Penetration Test (SPT)

(3) Drucksondierung (Cone Penetration Test)

Die Zustandsform bindiger Böden stellt sich nach EN ISO 14688-2 wie folgt dar:

SPT	CPT	Pressiometerversuch	Bezeichnung	undrÄnirte Scherfestigkeit
$n_{30}$	$q_c$ MN/m <sup>2</sup>	$p_l$ MN/m <sup>2</sup>	$E_M$ MN/m <sup>2</sup>	$c_u$ kN/m <sup>2</sup>
			Äusserst gering	< 10
< 2	< 0,25	< 0,15	sehr gering	10 bis 20
2 bis 4	0,25 bis 0,5	0,15 bis 0,35	gering	20 bis 40
4 bis 8	bis 1,0	bis 0,55	mittel	40 bis 75
8 bis 15	bis 2,0	bis 1,0	hoch	75 bis 100
15 bis 30	bis 4,0	bis 2,0	sehr hoch	150 bis 300
> 30	> 4,0	> 2,0	Äusserst hoch	> 300

\* SPT Versuche werden eher für nichtbindige Böden verwendet.

Es ist zu beachten, dass jede Methode eine gewisse Bandbreite von Bodendefinitionen angibt. Lokale Erfahrungen oder gegebenenfalls eine Proberammung können zur weiteren Beurteilung der Rammbarkeit in Betracht gezogen werden.

Weitere Informationen können dem Merkblatt „Einteilung des Baugrunds in Homogenbereiche nach VOB/C (MEH)“ der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) von 2017 entnommen werden.



### 2.3. Beurteilung des Einbringverfahrens in verschiedenartige Böden

Für jede in Kapitel 2.2 beschriebene Bodenart gibt es bevorzugte Einbringmethoden, die nachfolgend kurz aufgezeigt werden.

#### Verfahren : Schlagrammung

Im Prinzip in jedem Boden anwendbar, bis hin zu verwittertem Fels. Gute Einbauleistung in bindigen und harten rolligen Böden.

Fussverstärkungen können zusätzlich vorgesehen werden (siehe Kapitel 9.12).

#### Verfahren : Vibrationsrammung - normalfrequent



Sande und Kiese mit runder Kornform sowie weiche bindige Böden sind für die Vibrationsrammung besonders gut geeignet. In Böden mit eckigem Korn und in bindigen Böden mit steifer Konsistenz sollte auf eine möglichst große Arbeitsamplitude geachtet werden, um einen ausreichend breiten Spalt im Erdreich zu öffnen.

Es lässt sich feststellen, dass trockene Böden einen größeren Eindringwiderstand aufweisen als Böden, die feucht sind, unter Wasser liegen oder vollständig wassergesättigt sind.

Wasserspülung oder Vorbohren können die Einbauleistung signifikant erhöhen.

#### Verfahren : Vibrationsrammung - hochfrequent, mit variablem statischen Moment

Sehr gut geeignet für nichtbindige Böden und nahe bestehender Bebauung. Der Arbeitsabstand zu Nachbargebäuden kann weniger als 1 m betragen. Durch die relativ kleine Arbeitsamplitude und die verstellbaren Unwuchten werden Resonanzschwingungen vermieden. Das Verfahren ist nicht sehr effektiv in steifen bindigen Böden, da hier eine starke Dämpfung der Vibratorleistung zu erwarten ist.

#### Verfahren : Pressen



Gut geeignet für innerstädtische Baustellen, bei denen Erschütterungen nicht erwünscht sind. Pressen können mäklergeführt sein oder platzsparend auf der Spundwand positioniert werden.

Beste Einbauleistungen können in locker bis mitteldichten bindigen oder feuchten rolligen Böden erreicht werden. Das Verfahren ist gut kombinierbar mit Wasserspülung oder Vorbohren.

#### Verfahren : Einstellen

Bei schwierigen geologischen Verhältnissen oder in der Nähe von zu sensibler Bausubstanz ist das Einstellen von Spundwandprofilen in einen Bentonitschlitz eine gute Lösung. Bei Deichsanierungen oder für verbleibende Außenwände von Tiefgaragen kommen Stahlelemente in „mixed-in-place“ Wänden zum Einsatz, um Langlebigkeit und Wasserdichtheit zu gewährleisten.

Müssen Altlasten saniert und eingekapselt werden, kann man die sehr gute Wasserdichtheit der Spundwand mit dem Korrosionsschutz einer Bentonit-Zementsuspension kombinieren.



## 2.4. Auswahl des Spundwandprofils

Rammgut, Boden und Rammgerät sind immer im Zusammenhang zu betrachten, um die wirtschaftlichste Lösung für ein gegebenes Bauvorhaben zu erzielen.

Das mittels statischer Berechnung festgelegte Spundwandprofil muss sich bis zu der erforderlichen Eindringtiefe einrammen lassen. Die Rammbarkeit eines Profils ist eine Funktion seiner Querschnittseigenschaften, der Länge, der verwendeten Stahlgüte, des Rammgerätes und Rammverfahrens. Die Querschnittseigenschaften einer Spundbohle sind abhängig von der Wandstärke sowie Breite und Tiefe des Profils.

Das nachfolgende Diagramm zeigt den empirischen Zusammenhang zwischen Bodeneigenschaften, Bohlenlänge und Widerstandsmoment. Anhand der Kurven kann der Konstrukteur schnell überprüfen, ob das ausgewählte Profil den Anforderungen an den Einbau entspricht.

Als Faustregel gilt zusätzlich: „Die empfohlene maximale Länge des Spundwandprofils (in cm) entspricht dem elastischen Widerstandsmoment (in  $\text{cm}^3/\text{m}$ )“.

Je größer die Mantelfläche des Profils ist, umso größer ist auch die erforderliche Rammenergie. Um einen Energieverlust durch übermäßige Bewegung ("Flattern") der Bohle zu vermeiden, muss sorgfältig darauf geachtet werden, dass das gewählte Profil den gegebenen Bodenbedingungen entspricht, und steif genug ist, um die Rammenergie bis zum Bohlenfuss zu übertragen. Zum Einvibrieren der breiten AU- und AZ-Profile ist die Verwendung von Doppelklemmzangen zu empfehlen. Je nach Profilart stellt sich in den meisten bindigen und bestimmten nichtbindigen Böden eine Pfropfenbildung am Ende der Bohle ein. Je breiter das Profil, desto geringer ist die Neigung zur Pfropfenbildung.

Die aufzubringende Rammenergie ist im Wesentlichen abhängig von der Bodenbeschaffenheit. Hieraus ergibt sich, dass es für die Einrammbarkeit eines gegebenen Profils in einer bestimmten Stahlgüte einen Grenzbereich gibt. Mit steigender Stahlgüte erhöht sich die aufnehmbare Spannung, woraus sich ein höherer Widerstand gegen Kopf- und Fussverformungen ableiten lässt. Werden Ramarbeiten bei tiefen Temperaturen (geringer als  $-5^\circ$ ) durchgeführt, sind ebenfalls besondere Maßnahmen vorzusehen.

Die Bodenschichten und die dazugehörigen Parameter sollen derart berücksichtigt werden, dass im Allgemeinen die härteste Schicht als Referenz für den zu erwartenden Rammwiderstand benutzt heranzuziehen ist.

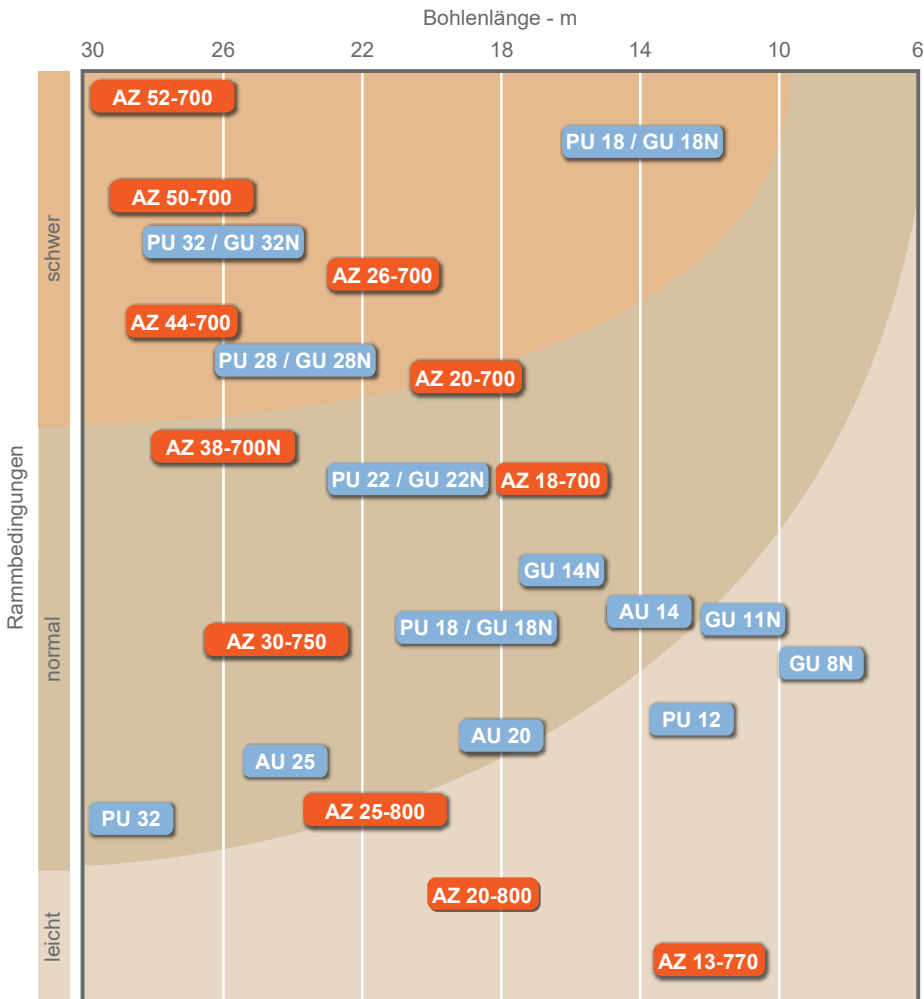
Das Einbringen kombinierter Wände ist stets mit besonderer Sorgfalt zu betrachten, da hier andere Randbedingungen herrschen: im Allgemeinen werden die Tragbohlen zuerst gerammt. Sie bilden eine beidseitige Führung für die Zwischenbohlen. Die Zwischenbohlen sind zudem im Allgemeinen

kürzer (60-80%), was den Einbau erleichtert. Als Zwischentafeln sind Z-Bohlen grundsätzlich zu bevorzugen, da durch die Lage des Mittelschosses eine grössere Rotation und damit Anpassung an die bereits gerammten Tragbohlen möglich ist. U-Bohlen sind hier eher unflexibel und werden sofort auf Zug in der Längsachse des Profils belastet.

Soll in anstehenden Fels gerammt werden, sind entsprechende Maßnahmen bereits in der Planungsphase vorzusehen. Ein ausreichend steifes Profil, Fussverstärkungen und/oder Vorbohren sind hier zu erwähnen.

Kreiszellen werden separat betrachtet.

Es existieren heute verschiedene Computerprogramme, die eine Vorhersage des Rammvorgangs erleichtern. Für das Einbringen mit schlagenden Geräten sind diese recht genau, für den Einbau mittels Vibrationsbär gibt es noch Forschungsbedarf.



## 3. Einbringgeräte

### 3.1. Allgemeines

Die Auswahl des richtigen Gerätes ist von fundamentaler Bedeutung für den erfolgreichen und sicheren Verlauf einer Rammbaustelle. Inzwischen bietet die Gerätetechnik eine große Auswahl an Vibratoren, Hämmern und Pressen an, um für den entsprechenden Einsatz das am besten passende Gerät auszuwählen.

Für alle Einbringgeräte gilt, dass sie entweder frei am Kran hängend oder geführt an einem Mäklermast verwendet werden können.

Wird ein Mäklergerät eingesetzt, hat der Geräteführer die Kontrolle über die Lagegenauigkeit des Rammgutes und es wird nur eine einfache Führung am Boden benötigt. Nachteilig ist der beschränkte Arbeitsradius der Maschine.

Wird freihängend am Kran gearbeitet, hängt der Arbeitsradius von der Traglast und Mastlänge des Hebeegerätes ab. Es ist eine Rammführung mit 2 Ebenen vorzusehen, um die Bohlen in den vorgeschriebenen Toleranzmaßen einbauen zu können.

### 3.2. Vibrierendes Einbringen

Die Vibrationsrammung ist inzwischen die häufigste Art des Einbringens. Mit modernen Geräten ist materialschonendes Arbeiten auch im innerstädtischen Bereich möglich. Durch den Einsatz von hochfrequenten Vibratoren mit variabler Schwungmasse und regulierbarem Hydraulikfluss können störende Vibrationen an benachbarten Gebäuden nahezu ausgeschlossen werden. Normalfrequente Vibratoren sind inzwischen so ausgelegt, dass auch harte bindige Bodenschichten durchörtert werden können.

Bei der Vibrationsrammung wird die Spundbohle in Schwingung gebracht, um das Eindringen in die vorhandenen Bodenschichten zu ermöglichen. Das Prinzip des Einvibrierens besteht darin, die Reibung und den Spitzenwiderstand zwischen Bohle und Boden zu verringern. Durch die Schwingungen wird der Boden um die Bohle herum vorübergehend in einen pseudoflüssigen Zustand versetzt, was eine merkliche Verringerung der Eindringwiderstände zur Folge hat. Hierdurch wird es möglich, die Bohle mit einer nur sehr geringen zusätzlichen Last – d. h. Eigengewicht plus Gewicht des Vibrators – in den Boden einzubringen. Bei mäklergeführten Geräten ist das Aufbringen einer zusätzlichen Vorspannung eine Option. Vibratoren erzeugen Schwingungen dadurch, dass Exzentergewichte über ein Getriebe durch einen oder mehrere Motoren angetrieben werden. Die Gewichte drehen sich mit gleicher Frequenz aber in entgegengesetzter Richtung, wodurch der horizontale Anteil der Kräfte aufgehoben



wird und nur der vertikale Kraftanteil wirksam bleibt. Vibratoren werden durch Hydraulikmotoren, Elektromotoren oder eine Kombination aus diesen angetrieben. Unter dem Vibrationsgehäuse befestigte, hydraulisch betätigte Klemmzangen gewährleisten eine sichere Befestigung und eine direkte Schwingungsübertragung auf die Spundbohle. Das Vibratorgehäuse wird durch Dämpfer entweder nach oben oder zur Seite so abgeschirmt, dass Schwingungen nicht auf den Kran oder das Trägergerät übertragen werden.

Wird ein Baggeranbauvibrator benutzt, ist die notwendige Mindestleistung und das Mindestgewicht des Grundgerätes gemäß Herstellerangabe zu beachten. Eine Überbeanspruchung durch zu geringe Motorisierung oder zu schweres Rammgut ist zu vermeiden. Im Allgemeinen werden Baggeranbauvibratoren für kleine temporäre Spundbohlen eingesetzt. Geräte mit „side-grip“ erlauben flexibles und schnelles Arbeiten auch bei beengten Platzverhältnissen.



Baggeranbauvibrationsbär



Side-grip Vibrationsbär

Bei modernen Hydraulikvibratoren ist die Schwingungsfrequenz stufenlos veränderbar. Das System kann so an wechselnde Bodenbedingungen angepasst werden. Der Einsatz unter Wasser ist generell möglich, eventuell notwendige Modifikationen sind beim jeweiligen Hersteller anzufragen.

Vibratoren lassen sich sehr wirkungsvoll zum Ziehen von Spundbohlen einsetzen. Durch die Vibration wird der Widerstand zwischen Boden und Spundbohle verringert und das Ziehen kann mit geringerem statischen Kraftaufwand durchgeführt werden. Detailliert wird das Ziehen in Kapitel 11 behandelt. Zur Einteilung der Vibrationsbären wird die Arbeitsfrequenz herangezogen. Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit müssen die Fliehkraft und das statische Moment betrachtet werden.

Generell ist die Wahl von ausreichend dimensionierten Klemmzangen wesentlich für einen erfolgreichen Baufortschritt. Die Klemmkraft der Zangen soll mindestens das 1,2-fache der Fliehkraft des Vibrators betragen. Die Reibflächen müssen ausreichend groß dimensioniert sein und übermäßig abgenutzte Reibflächen müssen ersetzt werden, um Schäden an der Spundbohle oder dem Gerät zu



Beispiel für eine Dreifachklemmzange für U-Bohlen



Einfachklemmzange

vermeiden. Bei breiten Z- und U-Doppelbohlen sind passende Doppelklemmzangen zu bevorzugen, entsprechende Wendeplatten zur Montage sind bei allen Geräteherstellern verfügbar. Andere Klemmzangenanordnungen für Mehrfachbohlen sind möglich. Es ist in diesem Fall darauf zu achten, dass die Doppelbohlen verpresst oder verschweißt sind, um Schäden durch ungewollte Schiefstellung, zum Beispiel durch Hindernisse im Boden, zu vermeiden.

### 3.2.1. Normalfrequente Vibratoren

Die Frequenz von Standard-Vibratoren liegt zwischen 800 und etwa 2000 Umdrehungen pro Minute. Die Fliehkräfte erreichen inzwischen 8000 bis 10000 kN, im off-shore-Bereich sind kombinierte Maschinenkonfigurationen bis 32000 kN verfügbar. Für Spundwandarbeiten werden in der Regel Geräte bis 3000 kN eingesetzt.

Der Vorteil der Normalfrequenz ist die große Arbeitsamplitude, die durch ein großes statisches Moment erreicht wird. Dicht gelagerte rollige Böden und steife bindige Schichten können gut durchfahren werden. Da beim Anlaufen des Gerätes die Resonanzfrequenz des Bodens getroffen werden kann, sind erhebliche Vibrationen auf benachbarte Strukturen nicht auszuschließen. Schon bei der Planung der Baustelle sollte dies berücksichtigt werden. Einige normalfrequente Vibratoren sind mit veränderbarem statischen Moment lieferbar.

### 3.2.2. Hochfrequente Vibratoren

Die Vibratoren mit hoher Frequenz, d.h. grösser als 2000 Umdrehungen pro Minute, sind meistens mit variablem statischen Moment ausgerüstet. Die hierbei erzeugten Bodenerschütterungen werden sehr rasch gedämpft und verursachen somit keine Probleme an benachbarter Bebauung. Ein Durchfahren der Resonanzfrequenz des Bodens kann vollständig vermieden werden. Das statische Moment ist deutlich geringer, die erforderliche Fliehkraft wird durch die höhere Drehzahl erzeugt. Die Arbeitsamplitude ist kleiner und die beste Arbeitsleistung wird in nicht bindigem Boden erbracht. Bei langsamer Rammung muss darauf geachtet werden, dass die Schlösser nicht zu warm werden. Gegebenenfalls können die Schlösser mit Wasser gekühlt werden.

### 3.2.3. Gerätedimensionierung

Eine Bestimmungsgröße für die Wahl des geeigneten Vibrationsbären ist die Fliehkraft. Die notwendige Maschinengröße kann mit der folgenden Näherungsformel abgeschätzt werden :

$$F = 15 \cdot \left( t + \frac{2G}{100} \right) \cdot E \quad [\text{kN}]$$

F = Fliehkraft in kN  
 t = Rammtiefe in m  
 G = Masse der Bohle in kg  
 E = Einflussfaktor Boden (1,0 – 1,3)

### 3.2.4. Abbruchkriterien

Allgemein wird eine Eindringgeschwindigkeit von 50 cm pro Minute als unterer Grenzwert angesehen. Als Abbruchkriterium kann definiert werden: Falls kein Rammfortschritt nach 5 Minuten kontinuierlichem Vibrieren zu erreichen ist, soll gestoppt werden, um Schäden an Gerät oder Bohle zu vermeiden. Ein Ausreißen der Spundbohlenköpfe durch Materialermüdung kann so vermieden werden. Ist die statisch notwendige Endtiefe noch nicht erreicht, muss entweder ein größerer Vibrationsbär eingesetzt werden, oder es ist zum schlagenden Einbringen zu wechseln.

Bei der Geräteauswahl muss neben der Fliehkraft auch auf das statische Moment geachtet werden und ob für die vorhandenen Bodenverhältnisse die richtige Art von Vibrationsbär verfügbar ist.

Sind die Spundbohlenschlösser mit Dichtmitteln versehen, sind gegebenenfalls andere empfohlene Eindringgeschwindigkeiten zu beachten.

### 3.3. Schlagendes Einbringen

#### 3.3.1. Dieselhämmer

Der Dieselhammer ist ein sehr effektives Einbringgerät und weit verbreitet. Er ist für fast alle Pfahlgrößen einsetzbar.

Es wird der Kolben anfänglich auf eine vorgegebene Höhe angehoben und dann automatisch freigegeben. Der herabfallende Kolben komprimiert die Luft in der Druckkammer und veranlasst die Kraftstoffpumpe, Kraftstoff auf die Oberseite des Schlagstücks zu sprühen. Durch den Aufprall des Kolbens auf das Schlagstück wird der Dieselkraftstoff zerstäubt und entzündet sich in der hochverdichteten Luft. Durch die Explosionsenergie wird der Kolben nach oben geschleudert, treibt die Bohle nach unten, und der Hammerzyklus beginnt erneut.

Der Dieselhammer ist selbstregulierend. Bei größerem Widerstand vergrößert sich die Hubhöhe des Kolbens, die Schlagzahl wird langsamer. Prellschläge durch zu große Hubhöhen sind durch Auswahl eines ausreichend dimensionierten Hammers zu vermeiden.

Bei Proberammungen sind Schlagzahl und, wenn möglich, der Kolbenhub zu messen, um Rückschlüsse auf die eingebrachte Rammenergie ziehen zu können. Eine theoretische Berechnung der Pfahltragfähigkeit ist möglich, z.B. über die Formel von Hiley.

Dieselhämmer arbeiten besonders gut in bindigen und sehr dicht gelagerten Böden. Unter normalen Baustellenbedingungen wird ein Verhältnis von 1:1 bis 2:1 zwischen Kolbengewicht und Gewicht aus Bohle plus Rammhaube gewählt. Die Rammhaube dient zum Schutz des Bohlenkopfes und zur wirksamen Einleitung der Schlagenergie. Für Dieselhämmer bietet ArcelorMittal eigene Rammhauben an. Ist eine Schrägrammung vorgesehen, ist zu prüfen welche Neigung für das Gerät zulässig ist. Für Dieselhämmer sind Neigungen bis etwa 1:5 technisch noch möglich.

Generell ist der Einsatz von Vibrationsrammen nach dem schlagenden Einbau nur zum Ziehen der Bohlen sinnvoll möglich.



Dieselhammer am Mäklermast montiert und im Einsatz im Wandverbund

#### 3.3.2. Rammhauben

Zur optimalen Kraftübertragung des Hammerschlages auf die Spundbohle, ist eine Rammhaube mit passendem Rammfutter erforderlich. Sie kann zwischen einigen hundert Kilogramm bis mehrere Tonnen wiegen und besteht meist aus Gussstahl, aber auch geschweißte Konstruktionen aus höherfestem Stahl sind möglich. Ein Futterfach auf der Oberseite der Rammhaube dient zur sicheren Aufnahme des Rammfutters.



Auf der Unterseite der Rammhaube sind Führungen für die Rammelemente angebracht. Die Führungen sollen zur Bohle hin keilförmig gestaltet sein, um das Aufsetzen auf das Rammgut zu erleichtern. Für U-Bohlen ist die Verwendung von Einzel-, Doppel- und Dreifachbohlen möglich, Doppel- und Dreifachbohlen sollten in den gefädelten Schlössern verpresst oder verschweißt sein, um Relativbewegungen unter dem Hammer zu vermeiden. Z-Bohlen sind am besten als verpresste oder verschweißte Doppelbohlen schlagbar. Das Schlagen von Einzelbohlen sollte möglichst vermieden werden. Die Geradheit des Bohlenkopfes ist in jedem Fall zu prüfen, gegebenenfalls ist nachzuschneiden. Bei Verwendung von Spezialbohlen ist zu prüfen, ob sie in die Rammhaube passen oder ob eine Anpassung der Bohle notwendig ist.

Bei Verwendung eines Mäklermastes kann der korrekte Abstand der Gleitführung mit Hilfe von Distanzstücken angepasst werden. Das Rammfutter dient als Dämpfer, um die Schläge des Hammers zu mindern und Prellschläge zu vermeiden. Als Rammfutter werden im Allgemeinen Hartholz, Stahlseile oder spezielle Futterplattensysteme aus abwechselnden Lagen von Kunststoff, Aluminium und Stahl verwendet.

Wird Holz verwendet, kann die Lebensdauer des Futters durch Auflegen einer 20-30 mm dicken Stahlplatte verlängert werden. Die Platte muss gegen Herunterfallen gesichert werden. Schläge auf den stählernen Rand des Futterfachs sind unbedingt zu vermeiden. Das Holz ist entsprechend früh genug auszutauschen.

Ein Systemfutter aus Wechsellagen von Kunststoff und Metallplatten bietet eine längere Lebensdauer als das Hartholz. Beim Einsatz von Stahlseilen ist als oberer Abschluss eine ca. 75mm dicke Stahlplatte vorteilhaft. Die Seile können entweder geschnitten und kreuzweise eingelegt werden oder sie werden in das Futterfach passend kreisförmig eingelegt. Gegenüber der Holzausfachung ist die Beanspruchung der Rammhaube bei den anderen beiden Varianten grösser, eine tägliche Überprüfung auf Beschädigungen ist in jedem Fall anzuraten, um einen eventuellen Rammhaubenbruch rechtzeitig feststellen zu können.



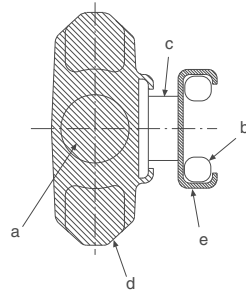
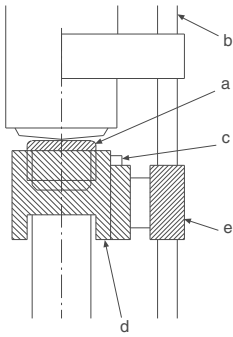
Rammhaube aus Gussstahl



Schweisskonstruktion

Für Dieselhämmer und einfach wirkende Hydraulikhämmer sind gegossene und geschweißte Rammhauben von ArcelorMittal verfügbar.





- a = Rammhaubenfutter
- b = Mäklär
- c = Gleitführung
- d = Rammhaube
- e = Mäklärführung

Die Mäklärführung (e) gehört nicht zum Lieferumfang von ArcelorMittal.



Rammhaube unter Hammer



Rammhaube auf Spundwand





### 3.3.3. Einfach wirkende Hydraulikhämmer

Das Schlaggewicht dieser Hammertypen wird zwischen Stützen oder in Kästen geführt und steuerbar hydraulisch gehoben. Nach Erreichen der voreingestellten Höhe erfolgt durch Ventilumsteuerung ein freier Fall des Schlaggewichtes. Die hydraulische Hebung wird über zwei Kolben bei seitlicher und über



einen Kolben bei direkter achsialer Hebung des Schlaggewichtes erzeugt.

Dieser Hammertyp lässt sich leicht anpassen, so dass er für das Rammen aller Profile bei jeglichen Bodenarten über und unter Wasserniveau geeignet ist. Dabei gilt das gleiche, für Dieselhämmer beschriebene Verhältnis von Kolbengewicht zu Rammgutgewicht von 1:1 bis 2:1.

Es stehen Kolbengewichte bis zu 11 Tonnen bei einer variablen Fallhöhe bis zu 1,2 m zur Verfügung. Bei maximalem Kolbengewicht und größter Hubhöhe lässt sich eine Schlagfolge von 40 Schlägen pro Minute bei automatischer Regelung erzielen. Projektbezogen können Sonderkonstruktionen angefertigt werden.

Bei gleicher Schlagenergie ist die Verwendung eines schweren Kolbens mit kurzem Hub stets vorzuziehen, um sowohl die Schäden am Bohlenkopf als auch die Lärmemission so gering wie möglich zu halten. Moderne Fallhämmer sind schallgedämpft lieferbar. Schrägrammung ist je nach Gerät möglich, hier sind die Herstellerangaben zu beachten.

Die Hammersteuerungen arbeiten mit großer Genauigkeit und bei richtigem Einsatz lassen sich mit diesem Hammertyp Wirkungsgrade von 75–80% erreichen. Dabei können die relevanten Informationen gleichzeitig über Datenschreiber gespeichert werden.

### 3.3.4. Doppelt wirkende Hydraulikhämmer

Diese Art von Hämmer besteht aus einem geschlossenen Zylinder, in dem ein Kolben durch Hydraulikdruck angehoben wird. Bei der Abwärtsbewegung wird der Kolben mit zusätzlicher Energie beaufschlagt, was bis zu einer Beschleunigung von  $2 \cdot g$  führt. Der maximale Hub von 1 m entspricht dann einem freien Fall aus einer Höhe von 2 m.

Hämmer dieser Art werden für eine maximale Energie pro Rammschlag zwischen 35 kNm und 3000 kNm bei einer Schlagfolge von 50 bis 60 Schlägen pro Minute angeboten. Die elektronische Regelung gewährleistet eine optimale Steuerung des Einrammens der Bohlen und die Konstruktion ermöglicht die Einbeziehung einer Reihe von Sicherheits-, Überwachungs- und Anzeigeräten. Die auf die Bohle aufgebrauchte Nettoenergie, die bei jedem Rammschlag gemessen und an der Steuertafel angezeigt wird, lässt sich in einem Bereich zwischen dem gerätespezifischen Maximal- und Minimalwert kontinuierlich regulieren.

Hydraulikhämmer können unter jedem Winkel über und unter dem Wasserspiegel arbeiten und sind sowohl zum Einrammen als auch zum Ziehen von Bohlen geeignet. Unter Standard-Baustellenbedingungen wird normalerweise ein Kolbengewicht gewählt, das in einem Verhältnis von 1:2 bis 1:1 zum Gewicht der Bohle plus Rammhaube steht.

Für die Rammung einer Wellenspundwand ist der Einsatz von Hydraulikhämmern mit einer Energie

zwischen 35 kNm und 90 kNm pro Rammschlag üblich, für Tragbohlen kombinierter Wände werden die Geräte entsprechend grösser dimensioniert.

Die Rammhauben für Hydraulikhämmer sind gerätespezifisch und können beim jeweiligen Hersteller angefragt werden. Sie bestehen meist aus höherfestem Schmiedestahl und nicht aus Stahlguss, da die Schlagenergie höher als bei Dieselhämmern ist.



### 3.3.5. Schnellschlaghämmer

Bei Schnellschlaghämmern wird der Schlagkolben beim Heben und Fallen durch Druckluft oder Dampf angetrieben, wobei echte Dampfrahmen inzwischen nicht mehr eingesetzt werden.

Luft bzw. Dampf steht unter Druck an einem Ventilkasten an, der sie abwechselnd zu den beiden Seiten des Kolbens führt, während die jeweils entgegengesetzte Seite mit den Auspufföffnungen verbunden ist. Beim Fallen trifft der Kolben auf ein flaches, am Zylinder befestigtes Schlagstück, das oben auf der einzurammenden Spundbohle sitzt. Der Druck hebt dann den Kolben und beschleunigt ihn wieder beim Fallen.

Im Vergleich zu Fallhämmern mit dem gleichen Gesamtgewicht ist der Kolben eines Schnellschlaghammers viel leichter. Das Gewicht beträgt nur 10–20% des Gesamtgewichts des Hammers, wird aber durch den auf der Oberseite des Kolbens wirkenden Druck von 5–8 bar wirkungsvoll verstärkt.



Die Hämmer sind so ausgelegt, dass sie in Verbindung mit den normalerweise verfügbaren Kompressoren einen hohen Wirkungsgrad haben. 90% der Rammenergie stammen aus der Wirkung der Druckluft oder des Dampfes.

Das Kolbengewicht der Hämmer, die für Stahlspundbohlen eingesetzt werden, liegt zwischen 100 und 1300 kg, und die Fallhöhe, die normalerweise mit dem Hammergewicht steigt, schwankt zwischen 110 mm und 500mm. Die Gesamtschlagenergie des größten Schnellschlaghammers liegt bei etwa 30 kNm pro Rammschlag, d. h. sie ist viel geringer als die der größten Fallhämmer. Dagegen ist die Schlagfolge höher. Sie liegt bei etwa 100 Schlägen pro Minute bei den größten Geräten und 400 Schlägen pro Minute bei den kleinsten Maschinen. Die relativ hohe Schlagfolge bewirkt, dass sich die Bohle ständig in Bewegung befindet, was den Rammvorgang erleichtert.



Luftbetriebener Schnellschlaghammer

Es ist nicht ratsam, eine Rammhaube zwischen dem Schlagstück und der Spundbohle zwischenzuschalten, da dies einen enormen Wirkungsgradverlust zur Folge hat. Schnellschlaghämmer können auch für den Einsatz unter Wasser und für das Ziehen von Bohlen ausgestattet werden. Bei Dauerrambetrieb wird die Rammgeschwindigkeit normalerweise auf 150 mm/min begrenzt, während über kurze Betriebszeiten eine Geschwindigkeit bis zu 50 mm/min zulässig ist. Normalerweise wird ein Verhältnis von mindestens 1:5 von Kolbengewicht zum Gewicht der Bohle gewählt.

### 3.3.6. Abbruchkriterien

Ein Eindringen von 25 mm pro 10 Hammerschläge, dies entspricht einer „Hitze“, sollte als Grenzwert für den Einsatz von Dieselhämmern angesehen werden. In jedem Fall sind die Empfehlungen des Hammerherstellers zu beachten. Ist der entsprechende Grenzwert erreicht, ist entweder die Arbeit einzustellen oder es muss auf einen größeren Hammer umgestellt werden.

Unter bestimmten Umständen ist ein Eindringen von 1 mm pro Schlag kurzzeitig zulässig. Arbeiten über einen längeren Zeitraum mit so geringem Fortschritt können zu Schäden an Hammer und Spundwand führen.

## 3.4. Spundbohlenpressen

Der erschütterungsarme Einbau von Spundwänden mit hydraulischen Pressen hat sich in den letzten Jahren zu einer Standardbauweise entwickelt. Verschiedene Systeme sind im Markt verfügbar, Zusatzeinrichtungen wie Bohrschnecken oder Spüllanzen sind erhältlich. Alle Pressverfahren haben gemeinsam, dass zunächst die Maschine, dann, mit zunehmender Tiefe, die bereits eingebrachten Bohlen als Reaktionspfähle für die einzubringende Bohle wirken.

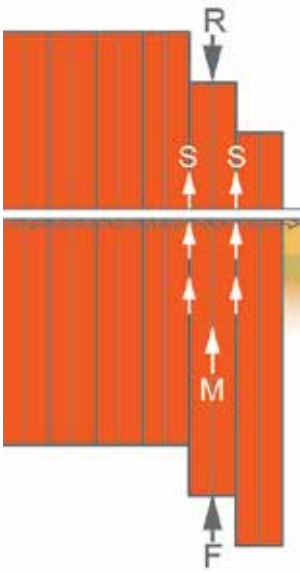
Besonders effektiv sind Pressverfahren in weichen bis halbfesten bindigen Böden. Lockere bis mitteldichte Sande können auch durchpresst werden. Es ist darauf zu achten, dass bei breiteren Spundbohlen eine grössere Mantelreibung überwunden werden muss. Im Zweifel empfehlen wir, Rücksprache mit dem Hersteller zu halten.

In jedem Fall ist es sinnvoll, die Bohlenschlösser mit Fett, Beltan® Plus oder Bauschaum zu füllen und am Bohlenende das freie Schloss mit einer Schraube oder ähnlichem zu verschließen. Diese einfache Maßnahme verhindert das Eindringen von Bodenteilchen in das Schloss und minimiert erheblich die Schlossreibung während des Einbaus. Je nach eingesetzter Verfüllmasse kann es bei tiefen Temperaturen vorkommen, dass die Masse zu steif wird. In diesem Fall kann Vorwärmen Abhilfe schaffen oder die Bohlen sind frostgeschützt zu lagern.

Während des Einbaus ist die Vertikalität der Bohlen genau zu kontrollieren, um Schiefstellungen und damit erhöhte Einbauwiderstände zu vermeiden. Kombinierte Wände sind nicht oder nur bedingt mit Hilfskonstruktionen pressbar.



## Ermittlung der Presskraft



### Mantelreibung M

Nichtbindiger Boden

Bohlenlänge im Boden < 10m

Bohlenlänge im Boden > 10m

Bindiger Boden

Bohlen in weichem Boden

Bohlen in hartem Boden

kN/m<sup>2</sup>

40,0

70,0

15,0

30,0

### Spitzenwiderstand F

Nichtbindiger Boden

Bohlenlänge im Boden < 10m

Bohlenlänge im Boden > 10m

Bindiger Boden

Bohlen in weichem Boden

Bohlen in hartem Boden

kN/m<sup>2</sup>

3,5

5,0

1,0

2,0

### Schlossreibung S

Sehr genauer Einbau, weicher Boden

Sehr genauer Einbau, Feinsand

Leicht geneigter Einbau

Stark geneigter Einbau

Schlossschmierung

kN/m

10

50

25

40

10

Überschlägliche Bestimmung der erforderlichen Presskraft R in [kN] pro Zylinder in Abhängigkeit von Länge und Geometrie der zu pressenden Spundbohle:

$$R(L) = M + F + S \text{ (für einseitige Schlossreibung)}$$

$$R(L) = M + F + 2 \cdot S \text{ (für beidseitige Schlossreibung)}$$

wobei gilt:

M = Mantelreibung in kN/m<sup>2</sup>

F = Spitzenwiderstand in kN/m<sup>2</sup>

S = Schlossreibung in kN/m (Beidseitig oder einseitig je nach Pressverfahren)

L = Länge der Spundbohle

Die Werte für Mantelreibung, Spitzenwiderstand und Schlossreibung können je nach den tatsächlichen Gegebenheiten stark abweichen. Ein Rammversuch oder die Einbeziehung lokaler Erfahrung sind in jedem Fall ratsam.

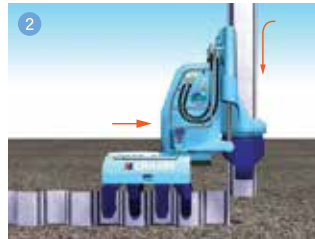


### 3.4.1. Selbstschreitende Spundbohlenpressen

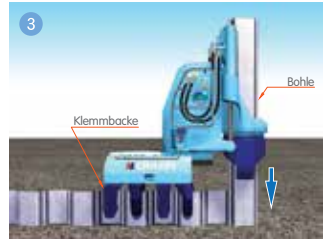
Selbstschreitende Pressen drücken Einzel- oder Doppelbohlen nacheinander auf Endtiefe. Zum Start dient ein ballastierter Führungsrahmen als Widerlager bis die ersten Bohlen eingebracht sind, und sich die Presse an diesen Bohlen festhalten kann. Die Pressen arbeiten völlig unabhängig von einem Trägergerät. Zusatzausrüstungen für Wasserspülverfahren und Bohrwerkzeug zur Bodenauflockerung sind verfügbar, ebenso ein Kran, mit dessen Hilfe die Baustelleneinrichtung auf eine minimale Fläche reduziert wird. Kreis- und Eckkonstruktionen sind mit U- oder Z-Bohlen möglich.



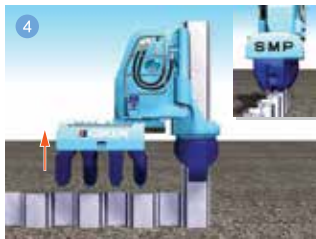
Die Spundbohle ist komplett eingepresst.



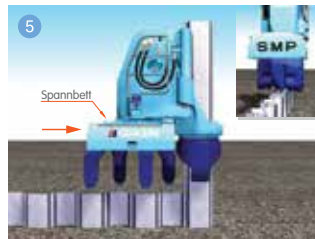
Die nachfolgende Spundbohle wird vom Presskopf gegriffen



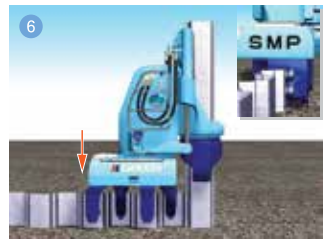
Die Spundbohle wird einige Meter eingepresst, bis sie eine gewisse Stabilität erreicht.



Der Presskopf wird hochgefahren und die Spundbohle eingespannt. Das Spannbett wird hochgefahren.



Das Spannbett wird um eine Bohlentellung verschoben.



Das Spannbett wird abgesenkt und hydraulisch eingestellt. Das Einpressen kann fortgesetzt werden.

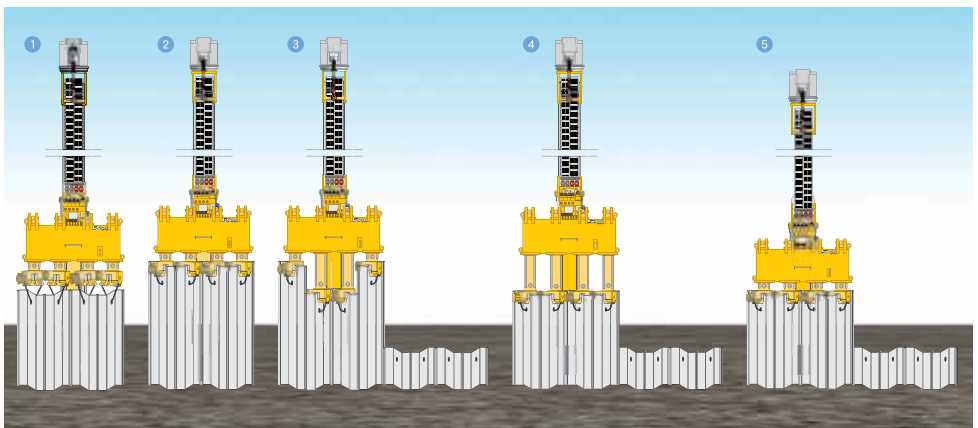
#### Arbeitstakt einer selbstschreitenden Spundbohlenpresse

### 3.4.2. Mäklergeführte Spundbohlenpressen

Als Trägergerät dient ein Standardgrundbagger mit Starmäklär oder Teleskopmäklär, an denen wahlweise die Presse oder ein Vibrationsbär angebaut werden kann. Die Pressen haben normalerweise 3 oder 4 Zylinder und entwickeln Presskräfte zwischen 80 t und 300 t. Zum Abteufen werden die Spundbohlen zu Drei- oder Vierfachtafeln zusammengestellt und unter der Presse mit Knebelketten fixiert. Das Anheben erfolgt dann zusammen mit der Presse, was zu einem rationellen Arbeitszyklus beiträgt. Die Mehrfachtafeln können leicht auf der Baustelle zusammengebaut werden, um den

Transport einfach und kostengünstig zu gestalten oder wenn Dichtmasse erst auf der Baustelle in die Schlässe gefüllt wird.

Wasserspülung oder Vorbohren können als Rammhilfen verwendet werden



Arbeitstakt einer mäklergeführten Presse

### 3.5. Spezialgeräte und Sonderanfertigungen

Neben den herkömmlichen Rammgeräten gibt es inzwischen zahlreiche Spezialausführungen und Sonderkonstruktionen, die für Projekte gebaut worden sind, wie z. B.:

- Tandemvibratoren;
- zusammengeschaltete Vibratorgruppen;
- Hydraulikhämmer auf Wasserbasis (ohne Hydrauliköl);
- Resonanzgeräte („Resonator“);
- Schienengebundene Fahrzeuge für Eisenbahnprojekte.

Besonders der Einbau mittels Resonanzverfahren ist interessant, da so gut wie keine Schwingungen entstehen und der Einsatz in innerstädtischen oder in stabilitätsgefährdeten Bereichen, z. B. in alten Erddeichen, ohne Weiteres möglich ist. Es gibt keine rotierenden Exzentergewichte mehr. Durch einen Hochleistungskolben wird das Rammgut zum Schwingen in der jeweiligen Eigenfrequenz angeregt und quasi in eine Feder umgewandelt. Durch die Bewegungen des Rammgutes wird der Boden verdrängt und das Rammgut kann in den anstehenden Boden eindringen.

Bei allen Geräten kann der Einsatz von Einbringhilfen entsprechend Kapitel 8 zweckmäßig sein.



Resonator



Wasserbetriebener Schlaghammer



Zwei-Wege-Gerät mit kurzem Mast für Rammarbeiten entlang von Eisenbahnstrecken mit begrenztem Arbeitsraum zur Seite und nach oben.

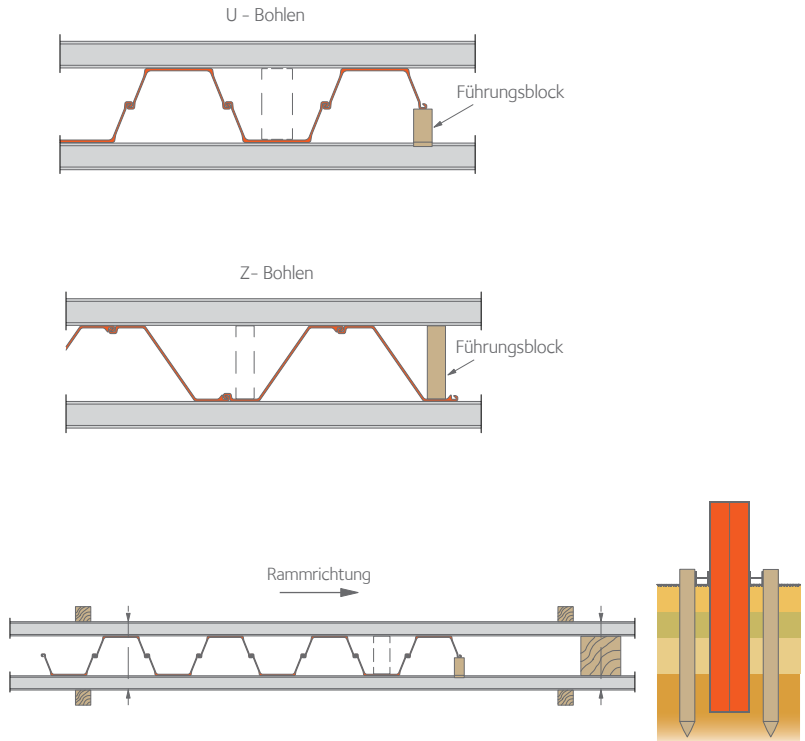


Schienengebundene Eisenbahnramme.

## 4. Rammführungen

### 4.1. Allgemeines

Die korrekte horizontale und vertikale Ausrichtung beim Einbringen von Stahlspundbohlen ist von besonderer Wichtigkeit. Sie lässt sich durch den Einsatz wirkungsvoller Bohlenführungen sicherstellen, die auch ein Ausweichen zur Seite verhindern.



Jedes zu rammende Element sollte im Idealfall in zwei Ebenen geführt werden. Durch Maximierung des Abstandes zwischen diesen beiden Führungsebenen lässt sich die Genauigkeit und Wirksamkeit der Führung verbessern. Bei sehr langen Spundbohlen sind unter Umständen Zwischenführungen erforderlich, um ein Durchbiegen oder andere damit verbundene Effekte beim Einrammen zu verhindern.



Verstellbare Rammführung



Beispiel für eine einfache Führungszange



Führung mit 2 Ebenen



## 4.2. Mäklerführung

### 4.2.1. Rammern mit Teleskopmäkler



Moderne Teleskopmäkler eignen sich hervorragend für kleine und mittelgroße Baustellen. Die Geräte sind leicht zu transportieren und innerhalb kürzester Zeit einsatzbereit. Bei dieser Methode werden Vibrationsbär und Bohle an einem hydraulisch verstellbaren Mäklermast geführt. Es ist wichtig, dass der Mäkler immer lotrecht steht, ein Nachjustieren ist leicht durch den Gerätefahrer möglich. Es können wahlweise auch Fallhämmer oder Pressen angebaut werden. Durch die Vorspannung die durch den Mäklermast aufgebracht werden kann, ist es möglich, relativ kleine Hochkantvibratoren zu verwenden. Kombigeräte erlauben den schnellen Umbau auf Bohrbetrieb, so dass mit nur einem Gerät in der Rammtrasse vorgebohrt und anschließend vibriert werden kann.

### 4.2.2. Rammern mit Starrmäkler



Der Starrmäkler kann im Allgemeinen an das gleiche Trägergerät angebaut werden wie der Teleskopmäkler. Durch die stabilere Bauart können größere Belastungen aufgenommen oder Schrägrammungen in begrenztem Umfang durchgeführt werden. Es gibt die Möglichkeit über einen Seilzug eine Vorspannung aufzubringen, was die Verwendung eines leichteren Vibrationsbären erlaubt. Das Rammgerät ist normalerweise quer zum Mast verbaut, was Arbeiten sehr nahe an Hindernissen möglich macht.



Hängemäkler bestehen normalerweise aus einer Gittermastkonstruktion und können an normale Seilbagger angebaut werden. Sie erlauben sehr große Nutzlängen und –lasten, z.B. für die Rammung von Tragpfählen kombinierter Wände. Durch die sehr exakte Bohlenführung über den Mast, ist lagegenaues Einbauen gut möglich. Durch die Gerätegeometrie ist ein weiter Arbeitsradius zu erreichen. Eine zusätzliche einfache Führung wird am Fuß der Bohle empfohlen, um den Pfhlansatzpunkt so genau wie möglich zu treffen.



Schwingmäkler werden oft für die Schrägpfahlrammung, z.B. langer Ankerpfähle, benötigt. Vibrationsbären oder Hydraulikhämmer sind montierbar und können nacheinander verwendet werden. Nutzlängen von über 60 m sind schon erreicht worden. Die Spundbohle oder der Träger kann mit hängendem oder auch liegendem Schwingmäkler aufgenommen werden. Danach wird das Trägergerät in Rammstellung gebracht und der Schwingmäkler samt Bohle, die oben mit der Spannzange oder der Rammhaube geführt ist, so weit abgelassen, bis das Rammgut auf dem Grund steht. Beim Rammern wird am Mäklerfuß ein Adapterstück angebracht. Dieses hält den Abstand zwischen Pfahl und Schwingmäkler so, dass beide parallel zueinander laufen und damit auch die Längsachsen des Rammgerätes und des Rammgutes fluchten. Kurze freihängende Modelle sind ebenfalls im Markt erhältlich. Aufsteckmäkler werden meistens zum Nachschlagen bereits gerüttelter Spundwände oder Pfähle verwendet. Sie führen den Hammer durch Festhalten am Kopf des Rammgutes. Sogenannte „Freireiterbeine“ gehören auch in diese Kategorie.





### 4.3. Führungsrahmen

Wird ohne Mäkler freireitend gearbeitet, ist eine stabile Rammführung mit 2 Ebenen in jedem Fall zu empfehlen. Der Abstand zwischen oberer und unterer Führung sollte mindestens ein Drittel der Bohlenlänge betragen, aber nicht weniger als 3 m. Die Z- oder U-Bohle sollte mit geringem Spiel von ca. 1 cm auf jeder Seite hineinpassen. Zur Verringerung der Reibung zwischen Spundbohle und Führung können Kunststoffplatten (Neopren o.ä.) oder, bei beschichtetem Rammgut, auch Rollen verwendet werden.

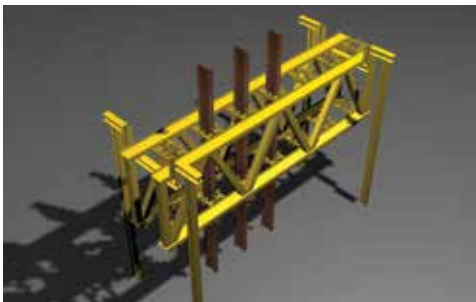


Die Führungszange sollte aus zwei kräftigen Doppel-T-Trägern bestehen und möglichst weit unten, d. h. im Allgemeinen auf dem Boden angeordnet werden. Gegen seitliches Verschieben sind die Zangen durch kräftige eingerammte Träger oder Abspreizungen zu festen Punkten hin zu sichern. Die Länge der Führung sollte mindestens über 6 Doppelbohlen reichen, wobei zusätzlich die vorhandene Wand um ca. 1,5 m überdeckt werden soll. Der gegenseitige Abstand der Träger ist durch Abstandshalter sicherzustellen. Bügel aus Stahl- bzw. Schraubenbolzen müssen darüber hinaus angeordnet werden. Unmittelbar vor jeder zu rammenden Bohle sollte in Rammrichtung voraus ein Führungselement, bestehend aus Abstandshalter und Bügel, angeordnet werden. Das freie Flanschende bei Z-Bohlen bzw. das freie Schloss der U-Bohle sollte während der Rammung durch einen Führungsklotz gehalten werden, dies verhindert ein Drehen der Bohlen innerhalb der Führung.

Beim Rammen im Wasser wird der obere Teil des Führungsrahmens möglichst dicht über dem Wasserspiegel an temporären Stahlpfehlern befestigt.

### 4.4. Kombinierte Wände

Bei kombinierten Wänden ist die Lagegenauigkeit der Tragbohlen besonders wichtig. Wenn ein ausreichend dimensioniertes Mäklengerät zur Verfügung steht, reicht eine einfache Kammführung oder ein einfacher Führungsrahmen am Boden oder nahe der Wasseroberfläche aus. Wenn im Wasser gerammt wird, ist eine ausreichend tragfähige Hubinsel zu verwenden. Tideunabhängiges Arbeiten



Führungsrahmen mit zwei Ebenen für das HZ®-M System

ist damit möglich. Einfache Pontons sind zudem anfällig für Wellengang oder Bewegungen durch Kranbetrieb und ein sicheres und ordnungsgemäßes Arbeiten ist nicht gewährleistet. Es sollten mindestens 6 Tragpfähle in die Führung passen, wobei der letzte gerammte Pfahl als Ankerpfahl dient und so der korrekte Trägerabstand immer gewährleistet ist.

Der Einsatz von vertikalen Rammführungen ist möglich, verlangt aber eine genaue Planung vor Baubeginn.



Als Sonderformen kann eine Vertikalführung zwischen zwei HZ<sup>®</sup>-M Trägern Verwendung finden



Eine nach vorne geöffnete Kammführung, greift nur die hinteren Flansche der HZ<sup>®</sup>-M Träger.

Beim Rammen von Rohren ist zu beachten, dass diese eine Tendenz zum Verdrehen haben. Die Rotation kann mit einfachen Führungen am angeschweißten Verbindungsschloss verhindert oder begrenzt werden. Träger oder Kastenprofile sind lagesicherer und in harten Böden rammstabiler.



Beispiel für einen einfachen Führungsrahmen für Rohre



Beispiel für eine Führung für CAZ-Kastenpfähle

Für die Zwischenbohlen ist keine separate Führung notwendig, da die bereits gestellten Tragbohlen diese Funktion übernehmen. Z-Bohlen sind immer den U-Bohlen vorzuziehen, da durch das mittig im Flansch, ausserhalb der Schwerachse angeordnete Schloss mit Rotationsvermögen eine grössere Anpassungsfähigkeit gegeben ist.

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit sollte die Führung so konstruiert sein, dass durch einfache Anpassung der Breite verschiedene Profile gerammt werden können.

#### 4.5. Kreiszellen mit AS 500<sup>®</sup> Flachprofilen

Zum Aufstellen von Kreiszellen aus AS 500 Flachbohlen ist unbedingt ein Führungsgerüst notwendig. Je nach Länge der Bohlen sind zwei oder mehr Führungsebenen erforderlich. Der Außendurchmesser der Führung muss etwas kleiner sein, als der Zellendurchmesser. In der Praxis hat sich bewährt, bei

einer nominellen Profilbreite von 500 mm, den Zellenumfang mit 503 mm pro Profil zu berechnen. Beim Aufstellen müssen die Flachbohlen vorübergehend an der Führung befestigt werden, bis die Zelle geschlossen ist. Die Befestigung kann über angeschweißte Haken oder kleine Stahlprofile erfolgen. Beim Rammen wird die entsprechende Befestigung gelöst und die Bohle kann sich im Schloss bewegen.

Die Führungsebenen sollten in der Höhe verschiebbar sein, um ein Herausziehen während des Füllens zu erlauben. Es werden normalerweise Hilfspfähle zur sicheren Gründung des Rahmens genutzt. Für die Zwickelzellen muss ebenfalls eine Führung vorgesehen werden.

Bei kleinen Zellendurchmessern kann es notwendig sein, werkseitig geknickte Spundbohlen einzusetzen. Je nach Bohlenlänge sind 4,0-4,5° Schlossverdrehung möglich, zusätzlich kann die Einzelbohle bis zu ca. 12° geknickt werden.

Die Stabilität der Rammführung wird von den Randbedingungen der Baustelle vorgegeben.

Weitere Informationen zu Flachprofilen sind im Kapitel 10 zu finden.



Führungsgerüst Hauptzelle



Führungsgerüst Zwickelzellen

#### 4.6. Flachzellen mit AS 500® Flachprofilen

Der Aufbau von Flachzellen ist ungleich schwieriger, als hier fortlaufend gearbeitet werden muss, um eine ausreichende Stabilität zu gewährleisten. Es ist eine Staffelrammung anzuwenden. Die Details des Einbaus sind projektspezifisch zu planen.



## 5. Einbringverfahren

### 5.1. Allgemeines

Bei allen Baumaßnahmen muss die Ausführung an die lokalen Gegebenheiten angepasst werden. Die jeweils geltenden Sicherheitsvorschriften müssen zu jeder Zeit eingehalten werden. Der Transport und das Einbringen der Spundbohlen dürfen hierbei keine Ausnahme sein.

Die erste Bohle muss lot- und fluchtgerecht aufgestellt werden, um beste Einbauleistungen in Übereinstimmung mit dem Rammplan zu erzielen. Die Vertikalität ist mit Wasserwaage oder anderen geeigneten Mitteln zu überprüfen. Bei den nachfolgenden Bohlen muss beachtet werden, dass eine ausreichende Einfädellänge gesichert ist, um gefahrloses Aufstellen und Ansetzen des Rammhärens zu ermöglichen. Dies lässt sich z. B. durch einen Voraushub erreichen, wodurch gleichzeitig die Einrammlänge verkürzt wird. Der Kran ist immer mit ausreichend Hubhöhe und Hakenlast zu dimensionieren, um alle Hebevorgänge sicher durchführen zu können.

Bei Wellenspundwänden lässt sich das Rammen von Doppelbohlen am schnellsten und wirtschaftlichsten bewerkstelligen. U-Bohlen können ohne weiteres als Einzelbohlen gerammt werden. Es sind aber die Vorgaben aus der Statik hinsichtlich der Schubkraftübertragung in den Schlössern zu beachten.

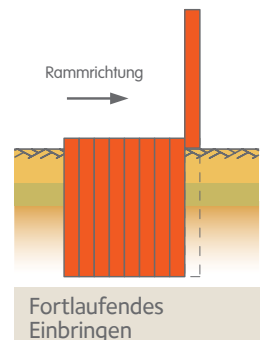
Das Rammen von Einzel-Z-Bohlen ist nur in Ausnahmefällen zu empfehlen, da die Profilsteifigkeit gegenüber der Doppelbohle reduziert ist. Für Eckkonstruktionen oder für jagged-AZ®-Wände kann die Rammung von Z-Einzelbohlen planmäßig vorgesehen werden.

Die Zwischentafeln kombinierter Wände sollten immer als unverpresste oder maximal teilverpresste Doppel (AZ®)- oder Dreifachbohlen (PU®/GU®) eingebaut werden, um die Toleranzen der Lagegenauigkeit der Tragföhle ausgleichen zu können.

Bei sehr langen Spundbohlen kann eine Transportverschweissung aus Sicherheitsgründen in Erwägung gezogen werden.

### 5.2. Fortlaufendes Einbringen

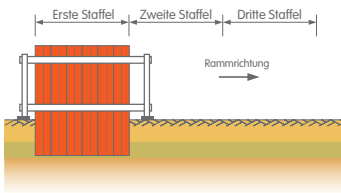
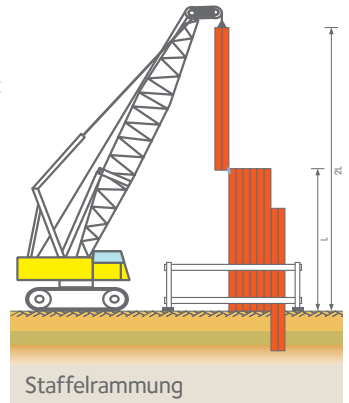
Das am häufigsten anzutreffende Rammverfahren ist das fortlaufende Rammen, bei dem jede Rammeinheit aufgenommen und sofort auf Endtiefe eingebaut wird. Diese Art des Einbringens kann bei locker gelagerten Böden und kurzen Bohlenlängen durchgeführt werden. Gefährdet ist das in Rammrichtung vorausliegende Schloss, das durch Widerstände im Boden ausgelenkt werden kann. Besteht der Boden aus dicht gelagerten Kiesen bzw. Sanden, aus festen bindigen Böden oder sind Hindernisse im Baugrund zu erwarten, dann ist staffel- oder fachweise Rammung zu empfehlen.



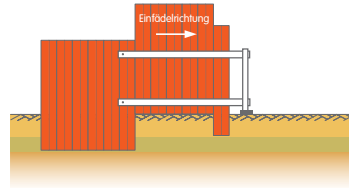
### 5.3. Staffelweises Einbringen

Das staffelweise Einbringen stellt im Allgemeinen lot- und fluchtgerechte Spundwände, besonders in sehr harten oder sehr weichen Bodenschichten sicher. Durch die beidseitige Schlossführung der Bohlen erhält man eine erhöhte Rammsteifigkeit und die Gefahr von Vor- oder Nacheilen der Bohlen wird verringert. Ebenso ist eine bessere Kontrolle der Wandlänge möglich. Bei großen Bohlenlängen sollte dieses Verfahren immer bevorzugt angewandt werden. Es wird meist in zwei oder drei Staffeln gerammt, wobei die erste Staffel nicht tiefer als  $0,6x$  der gesamte Einrammtiefe ( $t$ ) abgeteuft werden sollte. Als übliche Staffelung kann  $0,4x t - 0,35x t - 0,25x t$  für drei Staffeln angenommen werden. Bei stark unterschiedlichen Bodenschichtungen ist die Staffelung so zu wählen, dass die Staffelungsenden jeweils leicht in die harte Schicht einbinden.

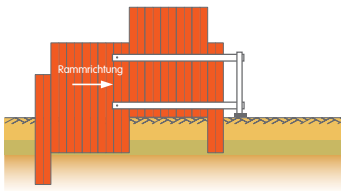
Trifft innerhalb einer Staffelung eine Bohle auf ein Hindernis, können trotzdem die Nachbarbohlen auf Tiefe gebracht werden, und der Rammfortschritt wird insgesamt nicht wesentlich behindert. Zu einem späteren Zeitpunkt kann versucht werden, das Hindernis zu durchrammen oder mit Hilfsmaßnahmen die Bohle auf Endtiefe zu bringen. Ist kein weiterer Rammfortschritt zu erzielen, kann die Bohle abgebrannt werden. Dies sollte aber immer die letzte Alternative darstellen und muss im Hinblick auf statische Erfordernisse und Dichtigkeit der Wand geprüft werden.



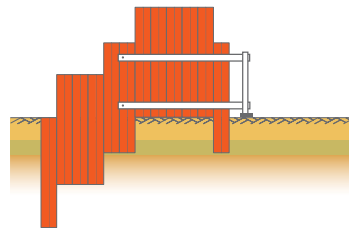
Staffeldruckung, Schritt 1



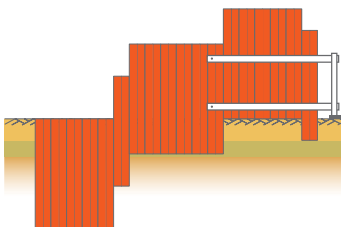
Staffeldruckung, Schritt 2



Staffeldruckung, Schritt 3



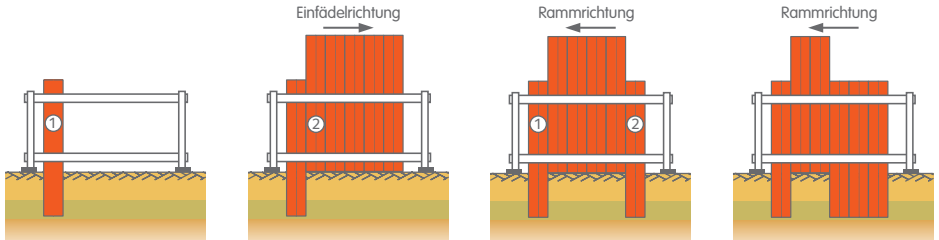
Staffeldruckung, Schritt 4



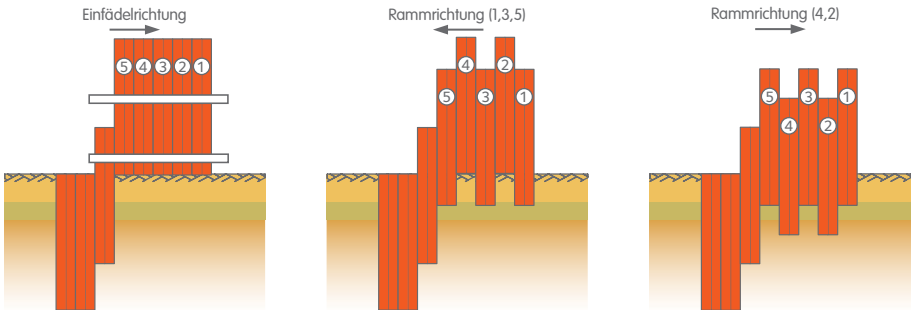
Staffeldruckung, neue Staffel

## 5.4. Fachweises Einbringen

In schwierigen, meist stark geschichteten Untergrundverhältnissen werden die Bohlen am besten fachweise eingerammt. Hierbei stellt man die Bohlen sicher in einer doppelten Führung auf oder rammt sie soweit in den Boden, dass ein fester Stand gegeben ist. Zum Durchhörtern des meist mit harten Schichten durchsetzten Untergrundes wird anschließend im Pilgerschrittverfahren in kurzen Staffeln gerammt: zuerst die Bohlen 1, 3, 5, usw. und anschließend die Bohlen 2, 4, usw. Steht sehr dicht gelagertes Sand-Kies-Gemisch oder Fels an, kann es ratsam sein, die zuerst tiefer zu rammdenden Bohlen 1, 3, 5, usw. am Fuß und an den Schössern zu verstärken. Diese Bohlen meißeln dann den Boden auf und erleichtern das Nachrammen der Bohlen 2, 4, usw. Verstärkungen am Bohlenkopf können bei sehr harter Rammung sinnvoll sein. Die aufzuschweißenden Bleche sollten etwa die gleiche Materialstärke haben, wie die Spundwand.

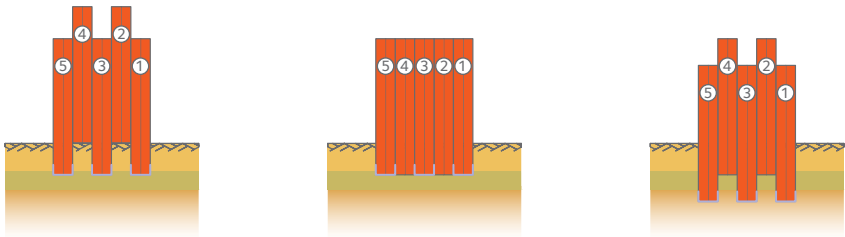


Fachweises Rammen



Pilgerschrittrammung

Nur die verstärkten Ramelemente 1,3,5 werden voraus gerammt; die anderen 2,4, usw. werden anschliessend auf gleiche Tiefe nachgerammt.

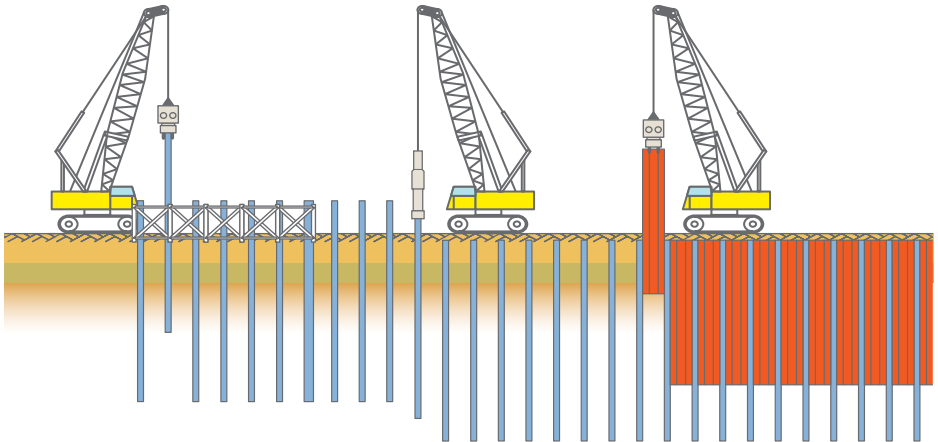


Pilgerschrittrammung

## 5.5. Einbringen kombinierter Wände

Kombinierte Stahlpundwände werden durch wechselweise Anordnung verschiedenartiger Profile oder Rammelemente gebildet. Dabei wechseln sich lange und schwere Tragbohlen mit hohem Widerstandsmoment mit kürzeren, leichteren und meist kürzeren Zwischenbohlen ab. Tragbohlen können Pfähle unterschiedlichster Art sein: Träger, Rohre oder zusammengeschweißte Kastenspundwände (siehe Kap. 9.19). Wichtig ist, dass ausreichend widerstandsfähige Schlösser zum sicheren Verbinden mit den Füllbohlen vorhanden sind.

In jedem Fall sind Doppelbohlen in Z-Form als Füllbohlen zu bevorzugen, da durch das ausserhalb der Schwerachse liegende Mittelschloss mit Rotationsfähigkeit eine gute Anpassung gegeben ist, die den Einbau zwischen den Tragpfählen wesentlich erleichtert. Doppel- oder Dreifach-U-Bohlen erlauben nur geringe Toleranzabweichungen der Tragpfähle, da alle Schlösser genau in der Schwerachse des Profils liegen und Anpassung an die Tragelemente nur über Verformung erreicht werden kann. Bei großen Profillängen oder harten Bodenverhältnissen ist hier mit Erschwernissen bei der Rammung zu rechnen.



Schematische Darstellung des Einbaus von kombinierten Wänden

Wesentlich für die Rammung ist, dass ein stabiles, schweres, ausreichend festes und gerades Rammgerüst vorgesehen wird, das der Länge und dem Gewicht der Bohlen angepasst ist. Im Allgemeinen werden die Tragbohlen zuerst gerammt. Das Einrammen muss mit äußerster Sorgfalt durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass sie gerade und lotrecht oder mit der vorgeschriebenen Neigung parallel zueinander stehen und die erforderlichen Abstände haben. Durch die Rammfolge muss sichergestellt sein, daß der Bohlenfuss der Tragbohlen gleichmäßig und auf seinem gesamten Umfang und möglichst nie einseitig, auf teilweise verdichtetem Boden auftrifft. Dies läßt sich durch Einrammen in der nachstehend genannten Folge erreichen:

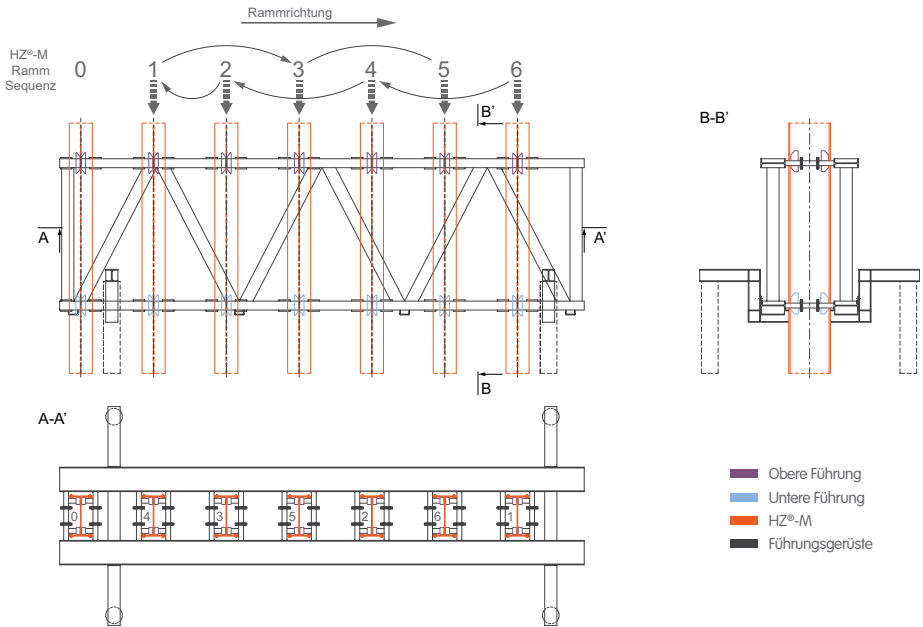
6 - 4 - 2 - 1 - 3 - 5 (Pilgerschritt)

oder:

2 - 6 - 4 - 5 - 3 - 1

Für den Einbau der Füllbohlen ist kein Pilgerschritt notwendig.





Die Tragbohlen sollen möglichst ohne Unterbrechung auf Endtiefe, oder wenigstens bis zur Oberkante Rammführung, eingebracht werden. Während des Rammens sollte ihre Ausrichtung mittels Theodoliten laufend überprüft werden. Nach dem Entfernen des Führungsgerüsts ist eine abschließende Überprüfung der Lagegenauigkeit durchzuführen, um sicherzustellen, dass die Abweichungen bei den Abständen zwischen den Tragbohlen innerhalb der zulässigen Grenzen liegen. Sollten die Abweichungen außerhalb der vorher spezifizierten oder akzeptablen Toleranzen liegen, müssen entweder die Zwischenbohlen angepasst oder die Tragbohlen gezeugen und erneut eingerammt werden.

Zur Bewältigung schwieriger Rammbedingungen muss unter Umständen auf Rammhilfen wie Vorbohren oder Spülen innerhalb der Tragbohlen zurückgegriffen werden. Kopf- und Fussverstärkungen sind für Trag- und Zwischenbohlen möglich. Sichelschnitt und Fussabtreppung für Tragbohlen gemäss Kapitel 9.12 haben sich gut bewährt. Sind harte Bodenschichten vorhanden, die mit ausreichend steifen Tragbohlen durchfahren werden können, kann auch nur für die Zwischenbohlen Vorbohren oder Spülen in Erwägung gezogen werden.



Beispiel einer Rammführung für eine kombinierte HZ®-M Wand, adaptierbar für verschiedene Tragprofile

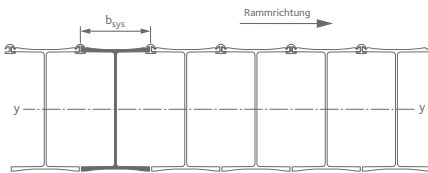


In keinem Fall sollte fortlaufend gerammt werden, da die Zwischenbohlen zu weich sind, um die Tragbohle zu führen. Eine Schiefstellung der Wand ist eine mögliche Folge.

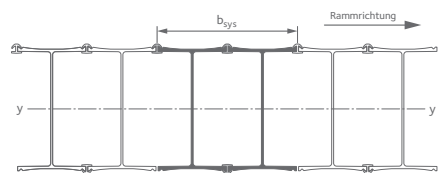
Will man Rückschlüsse auf die Tragfähigkeit der Tragpfähle ziehen, ist das Nachschlagen mit Hydraulik- oder Dieselhammer auf den letzten 2 m erforderlich. Entsprechende Daten können den anzufertigenden Rammprotokollen entnommen werden.

### 5.6. „C1“ und „C23“ Wände

In besonderen Fällen kann es erforderlich sein, eine Wand nur aus HZ®-M Tragbohlen herzustellen. Zum Beispiel, wenn hohe Lasten abzutragen sind, keine Rückverankerung oder Aussteifung möglich oder nur eine sehr geringe Verformung der Wand zulässig ist. Die Einzeltragbohlen („C1“) oder Doppeltragbohlen („C23“) können mit RH- oder RZD/RZU- Schlössern verbunden werden. Aufgrund der Fertigungstoleranzen und zum einfacheren Einbau werden diese speziellen Wandformen nur auf einer Seite durchgehend miteinander verbunden. Die Rammung erfolgt am besten fachweise (Kap. 5.4) oder stoffelweise (Kap. 5.3)



C1 - Wand



C23 - Wand



C1-Wand mit RH Verbindung



C1-Wand mit RZD-RZU Verbindung

### 5.7. Einstellen in Schlitz- oder Mixed-In-Place Wände



In manchen Projekten kann es Vorteile bringen, die Tragfähigkeit und Wasserdichtheit der Spundwand mit dem Korrosionsschutz des Betons zu verbinden. Besonders für Deiche oder in der Nähe sensibler Bebauung kann das Einstellen der Spundwand in eine Dichtwand ein langlebiges und wirtschaftliches Verbauelement darstellen, welches ohne große Erschütterung hergestellt werden kann. Für wasserdichte und tragfähige Außenwände von Tiefgaragen oder für sichere

und langlebige Einkapselung von Altlasten ist eine eingestellte Spundwand die beste Lösung.

Die Schlitzwand kann mit Ein- oder Zweiphasensuspension hergestellt werden. Die mixed-in-place-Wand (MIP-Wand) muss den lokalen Bodenverhältnissen angepasst werden, um das optimale Einbauergebnis zu erreichen. Die Spundbohlen können dann entweder mittels leichter Vibration oder mit der Presskraft des Mäklermastes eingestellt werden. Als Dichtmittel empfiehlt sich

Bitumen oder eine Lippendichtung. Im Falle von vorhandenen Altlasten ist das Dichtungsmaterial in der Planungsphase auf die Anwendbarkeit im gegebenen Milieu zu prüfen. Für den Schlitzbetrieb notwendige Abschalelemente können leicht auf der Baustelle aus Spundwandprofilen oder Trägern angefertigt werden.



Beispiel für ein Abschalelement

## 5.8. Einbringen unter Wasser

Für das Einbauen unter der Wasseroberfläche stehen mehrere Methoden zur Verfügung. Wird ein Schlaghammer eingesetzt, kann eine sogenannte „Rammjungfer“, also eine Verlängerung, zwischen Hammer und Bohlenkopf eingesetzt werden. Die Länge der Jungfer ergibt sich aus der Forderung, dass der Hammer stets oberhalb des Wasserspiegels bleiben soll. Gleiches ist möglich für Vibrationsbären. Hier wird die Klemmzange an das untere Ende eines stabilen Stahlträgers angebaut, dieser wiederum wird fest mit dem Rammgerät verbunden. Es ist wichtig, dass das zusätzliche Gewicht der Verlängerung in die Leistungsberechnung des Vibrators mit einbezogen wird, da sonst eine zu geringe Arbeitsamplitude vorhanden sein kann. Verlängerungen bedingen immer das Verwenden eines größeren Vibrationsbären, da zusätzliche Masse bewegt werden muss.

Druckluftangetriebene Schnellschlaghämmer können unter Wasser arbeiten, vorausgesetzt der Auspuff wird bis über den Wasserspiegel geführt. Einige hydraulische Vibrationsbäre und Hydraulikbäre lassen sich ebenfalls ohne große zusätzliche Massnahmen unter Wasser verwenden. Hier ist Rücksprache mit dem Maschinenhersteller zu halten. Es ist zweckmäßig, Unterwasserrammungen als Staffelerammung durchzuführen, denn diese Methode erlaubt das Einfädeln der Spundbohlen am Staffelende über Wasser. Modernste Hämmer können sogar Wasser als Ersatz für Hydrauliköl nutzen.



Vibrationsbär mit Verlängerung



Verlängerung für Schlaghammer („Rammjungfer“)

## 5.9. Rammprotokolle

Für jeden gerammten Pfahl sollte ein Rammprotokoll erstellt werden, auf dem die wichtigsten Daten zur Rammung festgehalten werden. In modernen Rammgeräten sind inzwischen automatisierte Systeme integriert, die es möglich machen, am Ende des Arbeitstages eine Dokumentation auszudrucken, die die wichtigsten Details zu jedem eingebauten Pfahl enthält. Die erstellten Rammprotokolle erlauben eine Plausibilitätsprüfung der vorliegenden Bodenaufschlüsse und helfen bei der Ausbauplanung, falls die Spundbohlen nach der Baumassnahme wieder gezogen werden sollen.

Das Protokoll sollte Angaben enthalten über:

- Datum;
- Ort;
- Rammgerät;
- Einbringzeiten pro Tiefeneinheit (Vibrationsbär & Hammer & Presse);
- Schlagzahlen pro Tiefeneinheit (Hammer);
- Fallhöhe Rammgewicht (Hammer);
- hydraulischer Druck (Vibrationsbär & Presse & Hydraulikhammer);
- Auffälligkeiten (Bemerkungen).

<b>Rammprotokoll</b>				Datum _____	
Baustelle _____				Seite _____	
Kunde _____					
Rammgerät _____					
Fahrer _____					
Spundwandprofil _____					
Profillänge _____					
Spundbohle Nr.	Typ	Ramm-tiefe m	Geräte-leistung (hydr. Druck)	Rüttelzeit	Bemerkungen

Beispiel für ein Rammprotokoll – Vibrationsrammung

<b>Rammprotokoll</b>				Datum _____		
Baustelle _____				Seite _____		
Kunde _____						
Rammgerät _____						
Fahrer _____						
Spundwandprofil _____						
Profillänge _____						
Spundbohle Nr.	Typ	Ramm-tiefe m	Fall-höhe m	Schläge pro 100 cm Eindringung	Zeit	Bemerkungen

Beispiel für ein Rammprotokoll – Schlagrammung

Eine Druckvorlage befindet sich im Anhang A.

## 5.10. Leistungsannahmen

Die tatsächlich erreichbare tägliche Einbauleistung auf einer Spundwandbaustelle hängt besonders von folgenden Faktoren ab:

- Bodenbeschaffenheit;
- Art und Leistung des Rammgeräts;
- Länge, Gewicht und Steifigkeit des Profils;
- Profilart;
- Erfahrung der Rammkolonne;
- Arbeitszeiten.

In weichen Böden können durchaus Rammleistungen von mehreren hundert Quadratmeter pro Arbeitstag erzielt werden. Unverbindliche Richtwerte für die Kalkulation der Tagesleistung zum Erstellen einer Wellenspundwand im Vibrationsverfahren sind in der nachfolgenden Tabelle angegeben. Für schlagendes Rammen können 50 % der Tabellenwerte angenommen werden. Oft wird aber eine Kombination von beidem verwendet. Spundwandpressen werden hier nicht betrachtet.

Als theoretische Planungsgrundlage für die Einbauleistung pro Stunde kann angenommen werden:

Bodenbeschaffenheit	Rammbedingungen	Bohlenlänge		
		6 - 12 m	bis 20 m	bis 31 m
locker (SPT 0-20)	leicht	4 - 5	3 - 4	2 - 3
normal (SPT 20-40)	mittel	3 - 4	2 - 3	1 - 2
hart (SPT > 40)	schwer	2 - 3	1 - 2	1

Durchschnittliche Einbringleistung in Doppelbohlen pro Stunde mit Vibrationsverfahren.  
Für schlagendes Einbringen können 50 % der Tabellenwerte angenommen werden

Bei kombinierten Wänden ist der Einbau der Tragbohlen maßgebend. Hier können sich, je nach Boden und Profil, starke Unterschiede zeigen. Bei langen Profilen (>28 m) und schwerer Rammung sollte dennoch das Einbringen von mindestens 3-4 Tragbohlen pro Tag möglich sein.

Richtwerte für Zellenkonstruktionen sind im Kapitel 10.7 angegeben.



## 6. Transport und Lagerung

### 6.1. Allgemeines

Bei jeder Arbeit mit Spundbohlen hat die Gewährleistung der Sicherheit von Mensch und Material absolute Priorität. Beim Transport und zum Heben sind ausreichend tragfähige und geprüfte Vorrichtungen und passende Geräte zu verwenden. Hinsichtlich der Abnahme des Materials auf der Baustelle wird auf die EAU 2020 (Kap. 8.1.2.3) verwiesen.

### 6.2. Transport

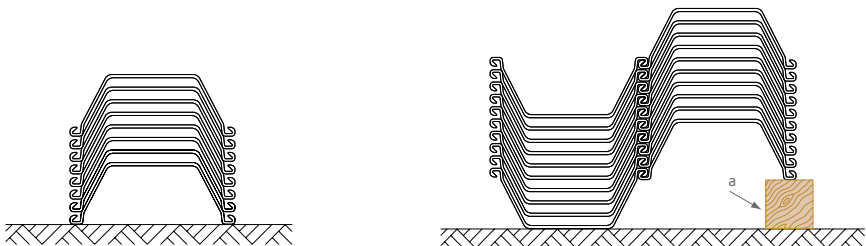


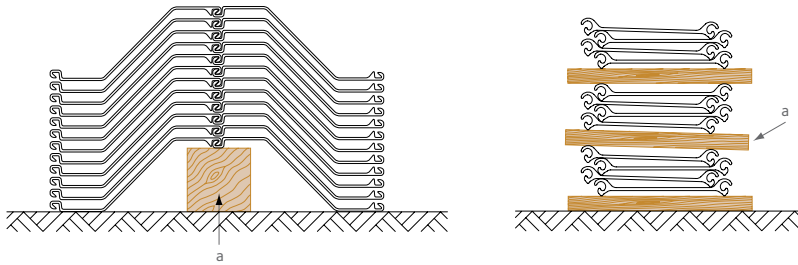
Je nach vorhandener Situation kann es erforderlich sein, spezielle Transportmittel schon bei der Planung der Baustelle vorzusehen. Besondere Geländegängigkeit, sehr lange Profile oder schwierige Zufahrten können zu großen Herausforderungen werden.

### 6.3. Lagerung

Zur korrekten Lagerung von Spundbohlen sind die Empfehlungen der DIN EN 12063 zu beachten. Entweder bestimmt die Tragfähigkeit des Bodens oder die Kippgefahr des Stapels die maximale Anzahl der übereinander zu legenden Bohlen. Bei Z- und U-Doppelbohlen sind Hölzer (a) so anzubringen, dass eine ausreichende Stützung der Bohlen gewährleistet ist und plastische Verformungen ausgeschlossen sind.

Werden Zwischenlagen eingebaut, müssen die Hölzer in einer Flucht liegen. Bei beschichteten Bohlen ist jede Bohle mit einem Holz zu trennen, um ein Beschädigen der Beschichtung zu vermeiden.





## 6.4. Schäkel und Hebezeuge

Neben den gebräuchlichen Standard-Schäkeln gibt es speziell entwickelte Sicherheitsschäkel für das Aufnehmen von Spundbohlen. Diese Schäkel ermöglichen es, die Aufhängung der Bohle am Kran vom Boden aus zu lösen. Für den Anschluss der Schäkel ist ein spezielles Loch am Bohlenkopf erforderlich, durch das der Schäkelbolzen geführt wird. Diese Methode ist schnell, effizient und sicher.



Zum einfachen und sicheren Anheben horizontal gestapelter Bohlen sind spezielle Anschlagklauen verfügbar. Es handelt sich hierbei um einfache Vorrichtungen, die so ausgeführt sind, dass sie eine einzelne oder mehrere Bohlen eines Stapels greifen können und somit ein leichtes Trennen und Heben der Bohlen ermöglichen.

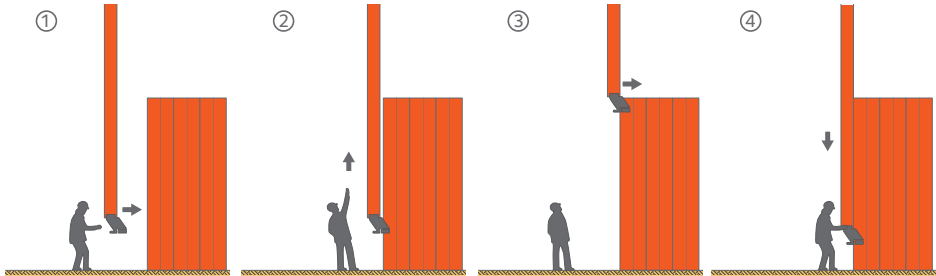
Man findet besonders bei Teleskopmäklengeräten sogenannte Knebelketten, die direkt am Vibrationsbär montiert sind. Sie erlauben sicheres Heben und Einfädeln der Spundbohle in die Klemmzange. Ein Umfallen ist nicht möglich, da das Profil immer am Gerät gesichert ist. Die Lochung der Spundbohlen ist entsprechend der Größe der Knebelketten werkseitig zu bestellen, oder bauseits anzupassen. Die Position der Klemmzangen ist ebenfalls zu berücksichtigen.

Vom Einsatz abgeschnittener Schlosstücke ist dringend abzuraten, da ein unkontrolliertes Materialversagen möglich ist. Das Heben mittels am Bagger angebautes Greifer sollte nur mit den dafür entwickelten Spezialgeräten und durch geschultes Personal erfolgen, um Bohlen Schäden zu vermeiden.



## 6.5. Einfädelvorrichtungen

Im Bauablauf kommt es immer wieder vor, dass Spundbohlen in großer Höhe eingefädelt werden müssen. Aus Gründen der Arbeitssicherheit kann einerseits mit einer Hebebühne gearbeitet werden, was nicht immer zweckmäßig ist. Zum anderen sind automatische Einfädelvorrichtungen konstruiert worden, die es nicht mehr nötig machen, Personal zum Bohlenkopf zu heben, um manuell den Schlossverbund herzustellen. Der Monteur setzt diese Vorrichtungen jeweils nur am Boden an (1), sie wird mitsamt der einzufädelnden Bohle durch den Kran nach oben gezogen (2) und schließlich drückt ein Federmechanismus das Fädelschloss in die korrekte Position (3). Beim Ablassen wird automatisch ins Schloss eingefädelt (4). Der Mechanismus ist für alle Spundbohlentypen erhältlich. Sicheres Einfädeln ist somit selbst bei starkem Wind möglich.



(1) Aufnehmen der Bohle mit Sicherheitsschäkel.

(2) Der Spundwandefädler wird an der Unterkante der einzufädelnden Bohle ca. 1 m über Flur angesetzt und durch einen Gewindedorn an der Bohle befestigt. Die Bohle mit Einfädler wird an die Spundwand angelehnt, so dass die Spundwandschlösser beider Bohlen aneinander anliegen.

(3) Mit Hilfe des schwenkbar angeordneten Rollensatzes wird der Einfädler an der aufgestellten Bohle befestigt und die Spundwandschlösser durch Federvorspannung der leicht zu betätigenden Seilzüge aneinandergedrückt. Die einzufädelnde Bohle wird beim Hochziehen in Zugrichtung beweglich an der aufgestellten Bohle geführt, jedoch gegen Pendeln durch den Spundwandefädler gesichert. Bei Erreichen der Einfädelhöhe wird durch die Federvorspannung die Bohle in Einfädelposition gedrückt. Beim Absenken fädelt sich die Bohle selbsttätig in das Schloss der aufgestellten Bohle ein.

(4) Mit wenigen Handgriffen wird anschließend der Spundwandefädler von beiden Bohlen gelöst und abgenommen. Mit dem ausgeklinkten Sicherheitsschäkel beginnt dann ein neuer Arbeitstakt.



## 7. Einbringhilfen

### 7.1. Spülen

#### 7.1.1. Allgemeines

Der Einbau mit Spülhilfe kann mit allen Einbringverfahren kombiniert werden und erhöht die Produktivität der Baustelle signifikant. Geräteüberlastung, Verformung an den Rammelementen sowie Bodenerschütterungen können vermindert werden.

Der Spülvorgang sieht so aus, dass durch ein oder mehrere Spülrohre ein Wasserstrahl an den Fuß des Rammelementes geleitet wird. Das eingepresste Wasser lockert den Boden und transportiert gelöstes Material ab. Am Rammelement wird so der Spitzenwiderstand herabgesetzt und je nach Bodenstruktur durch abströmendes und aufsteigendes Wasser auch die Mantelreibung und die Schlossreibung verringert.

Das Hilfsmittel Spülen wird in seinen Einsatzmöglichkeiten durch die Festigkeit des Bodens, aber auch durch die Anzahl der Spüllanzen und die Größe des Wasserdruckes begrenzt. Eine Proberammung zur Bestimmung der Parameter ist zu empfehlen. Generell sollen die Spüllanzen nicht zu groß gewählt werden, um Erosion des Bodens, und damit eine eventuelle Minderung der Tragfähigkeit oder unplanmäßige Setzungen zu vermeiden.

Bei Bedarf kann nach der Wasserspülung eine Zementsuspension injiziert werden, die für zusätzliche Wasserdichtheit oder höhere Tragfähigkeit am Bohlenfuss sorgt. Eine Ziehspaltverpressung nach dem Wiedergewinnen der Bohlen ist durch die Spüllanzen möglich.

#### 7.1.2. Spülen mit Niederdruck

Das Niederdruckspülverfahren eignet sich bestens in dichtgelagerten, nichtbindigen Böden und schluffigen Sanden, aber auch in trockenen, gleichkörnigen und mit Kies vermischten Sandböden ist ein guter Einbauerfolg zu erwarten.





Im Allgemeinen wird Spülhilfe in Verbindung mit Vibration eingesetzt. Durch die verminderte Reibung kann auch mit kleineren Geräten eine gute Einbauleitung erreicht werden. An einer Spundwanddoppelbohle werden zwei bis vier Lanzen von etwa 1" Durchmesser möglichst stabil befestigt und mit je einer Pumpe von etwa 20 bar Leistung bestückt. Die Spitze der Spüllanze soll sich auf gleicher Höhe mit dem Spundwandfuß befinden. Ist die Lanze kürzer wird der Wasserfluss zur anderen Bohlenseite behindert, ist die Lanze länger besteht die Gefahr des Umbiegens und damit ein Wirkungsverlust.

Es ist darauf zu achten, dass der Spülvorgang gleichzeitig mit dem Vibrieren beginnt. Damit wird verhindert, dass eindringendes Bodenmaterial die Rohre bzw. Düsen verstopft.

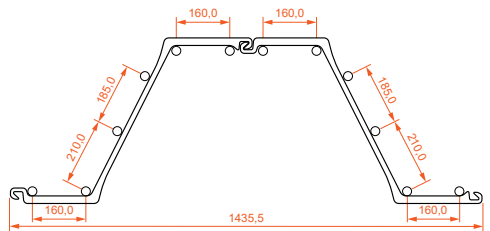
Im Allgemeinen werden die Bodenkenndaten nur geringfügig und temporär während des Spülens verändert. Sind später vertikale Lasten abzutragen, ist besonders sorgfältig vorzugehen und eventuell auf den letzten 1–2m ohne Spülung zu arbeiten.

### 7.1.3. Spülen mit Hochdruck

Dieses Verfahren eignet sich zum Einbringen von Spundbohlen in extrem dichten und auch bindigen Böden. In setzungsgefährdeten Bereichen ist das Hochdruckspülen sehr gut geeignet, da geringere Wassermengen erforderlich sind als bei der Spülung mit Niederdruck.

Die Bodenkennwerte bleiben durch den Spülvorgang unverändert, dies ist durch Bodenuntersuchungen nach dem Einbringen von Spundbohlen in Kalk- und Geschiebemergel sowie Tone der Unterkreide nachgewiesen worden.

Die Spüllanzen werden aus Präzisionsrohren (z. B. 30 x 5 mm) gefertigt, der Spüldruck an der Pumpe beträgt 250 bis 500 bar. Es müssen Spezialdüsen im eingeschraubten Düsenhalter (Rundstrahldüsen mit 1,5 bis 3,0 mm) verwendet werden. Gelegentlich sind auch Flachstrahldüsen sinnvoll. Der durch Kolbenpumpen gelieferte Wasserstrahl liegt bei 60 bis 120 l pro Minute je Düse.



Die Lanzen sind in längs der Bohle angeschweißten Rohrschellen so zu führen, dass sie wiedergewonnen werden können. Die Spülköpfe müssen an der Spundbohle so befestigt werden, dass die Düsen um 5 bis 10 mm am Bohlenfuß zurückstehen.

Während der Durchführung dieser Arbeiten ist eine intensive Überwachung erforderlich, um eine Anpassung an die örtlichen Bedingungen zu gewährleisten. Der Durchmesser der Düsen muss an die Bodenbeschaffenheit angepasst werden, ebenso wie die Anzahl und die Anordnung der Lanzen.

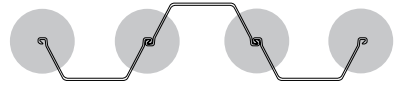
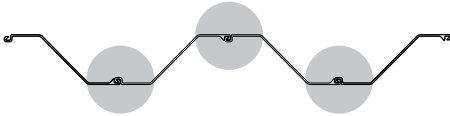
Insgesamt ist das Niederdruckverfahren anwenderfreundlicher und einfacher.

## 7.2. Bohren

In harten bindigen Böden ist Vorbohren eine sehr effektive Einbringhilfe. Der Bohrdurchmesser soll ungefähr 1/3 der Bohlenbreite betragen. Die Bohrschnecke muss ausreichend steif sein, um ein

Ausweichen im Boden zu verhindern. Der effektivste Bohrlochabstand ist vor Ort zu Beginn der Arbeiten empirisch festzulegen. Bei schwierigen Rammbedingungen kann sich dieser Abstand bis hin zur überschrittenen Bohrung verringern. Der Boden hat durch die Bohrflöcher die Möglichkeit verdrängt zu werden, wodurch der Eindringwiderstand der Spundbohlen verkleinert wird.

Wenn größere Lochdurchmesser erforderlich sind, müssen sie mit geeignetem Material aufgefüllt werden. Selbst Böden mit harten Gesteinsschichten oder Fels können durch diese Methode für das Rammen gut vorbereitet werden. In Einzelfällen kann ein Bodenaustausch in Betracht gezogen werden. Meist wird im Bereich der Schlösser die Bohrung angesetzt.



Beispiel für ein Bohrraster bei Verwendung von Z-Bohlen

Beispiel für ein Bohrraster bei Verwendung von U-Bohlen



Vorbohren für Zwischenbohlen einer kombinierten HZ®-M Wand



Bohrschnecke im Einsatz

### 7.3. Fräsen

Muss die Spundbohle in felsartige Böden eingebaut werden, kann das Öffnen eines Schlitzes mittels Fräse eine Option sein. Fräsen können sowohl trocken, als auch unter Wasser sehr wirtschaftlich eingesetzt werden. Durch Auswahl des geeigneten Trägergerätes sind große Arbeitstiefen zu erreichen. Die Fräsen sind als Standardanbaugeräte im Markt erhältlich.



## 7.4. Sprengen

### 7.4.1. Allgemeines

Das Sprengverfahren kann in Bodenarten angewendet werden, die als schwierig oder absolut ungeeignet für das Einrammen von Spundbohlen angesehen werden. Die Einflüsse auf die benachbarte Bebauung sind bei der Planung zu berücksichtigen.

### 7.4.2. Lockerungssprengung

Es werden in der Spundwandtrasse eine Reihe von gegenüberliegenden Bohrlöchern mit verdämmten Ladungen besetzt, so dass nach der Sprengung ein V-förmiger Bereich entsteht, in dem das Gestein in Abhängigkeit von der Ladung und Verdämmung mehr oder weniger stark zerstört ist. Der so entstandene „Schotterboden« ist als schwer rammbar einzustufen. Es ist die Wahl eines rammsteifen Profils erforderlich, um Verformungen an den Spundbohlen zu vermeiden. Eine Verstärkung des Bohlenfußes gemäß Kapitel 9.12 kann zweckmäßig sein.

### 7.4.3. Schocksprengung



Bei diesem Verfahren werden Bohrlöcher im Abstand von 0,6 bis 1,2 m bis zur Solltiefe niedergebracht. Der Bohrlochabstand und die Ladungsgrößen müssen der Festigkeit des Gesteins angepasst werden. Es werden immer zwei bis acht benachbarte Bohrlöcher gleichzeitig gezündet. Das Gestein wird dabei von den aufeinandertreffenden Druckwellen gelockert, ohne jedoch weggeblasen zu werden. In den Bereichen der Sprengladungen entstehen etwa 0,4 bis 0,8 m breite, lotgerecht begrenzte aufgelockerte Zonen.

Um den größtmöglichen Nutzen aus diesem Verfahren zu ziehen, sollten die Stahlspundbohlen so bald wie möglich nach dem Sprengen in die gelockerte Zone eingebracht werden. Auch hier sind Fussverstärkungen sinnvoll.

## 7.5. Weitere praktische Einbauhilfen

Die Baustellenpraxis hat gezeigt, dass mit relativ einfachen Mitteln der Einbau von Spundbohlen wesentlich erleichtert werden kann. Eine Schraube zum Verschließen des in Rammrichtung vorne liegenden Schlosses verhindert das Eindringen von Bodenteilchen und vermindert erheblich die Schlossreibung. Wird das Schloss zusätzlich mit Beltan® Plus, Fett oder Bauschaum gefüllt, ist der Effekt um so grösser.



## „Schlossräumer“

Der Einbau von Zwischenbohlen kombinierter HZ®-M Wände kann erleichtert werden, wenn man die Tragbohlen mit sogenannten Schlossräumern versieht. Am Ende des RZU und RZD Schlosses wird ein Vierkanteisen angeschweißt, das den Boden aufbricht und den Widerstand für die Zwischentafel reduziert.



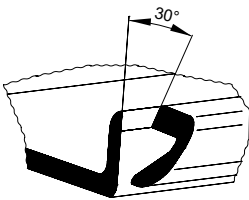
Schlossräumer



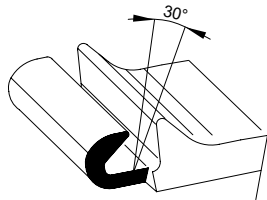
Flacheisen am Bohlenende

Durch das Anbringen von Flacheisen am Ende des Fädelschlosses können Schlossschäden während des Einrammens verhindert werden.

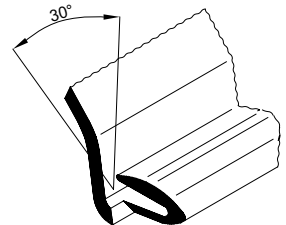
Um den Schlossinnenraum von Sand, Steinen oder auch Resten von Schlitzwandsuspension zu säubern, können schräg angeschnittene Schlossabschnitte verwendet werden, oder die einzubauende Bohle wird direkt entsprechend vorbereitet. Das im Larssenschloss eingeschlossene Material wird so nach außen gedrückt.



Z-Bohle, ungerade Klaue



Z-Bohle, gerade Klaue



U-Bohle

Die gleiche Vorbereitung der Spundbohlenschlösser ist bei Verwendung von Dichtungssystemen des Typs ROXAN® Plus oder Akila® vorzusehen.

## „Sägebohlen“

Sind Objekte aus Holz im Baufeld wie z.B., alte Gründungspfähle oder Baumstämme zu erwarten, so kann mit Hilfe einer „Sägebohle“ das Hindernis durchtrennt bzw. durchrammt werden. Eine Erfolgsgarantie kann jedoch nicht gegeben werden.



Für den Fall, dass die Rammbedingungen nicht gut voraussehbar sind, kann es zweckmäßig sein, unverpresste Doppelbohlen zunächst als Doppelbohlen zu rammen und bei unzureichendem Einbaufortschritt auf die Einzelbohle zu wechseln. Damit wird das zu vibrierende Gewicht halbiert und eine größere Tiefe kann erreicht werden. Dabei ist zu beachten, dass bei Verwendung von U-Bohlen die Belastbarkeit der Wand entsprechend der geänderten Schubkraftübertragung anzupassen ist.

Während des Einbringvorgangs von unverpressten Profilen sind Relativverschiebungen der Doppelbohlen durch konstruktive Massnahmen zu verhindern.



## 8. Rammgenauigkeit

### 8.1. Einbringtoleranzen

Im Rammplan wird die Lage und Stellung der Bohlen angegeben. Abweichungen hiervon sind durch Liefertoleranzen, Art der Rammung und die Bodenverhältnisse möglich. Als allgemeine Forderung zur Erstellung einer lot- und fluchtgerechten Wellenspundwand können folgende Einbringtoleranzen angesehen werden:

a) Abweichungen aus der Wandflucht in Höhe der Rammebene		± 50 mm
b) Abweichungen der Bohlen von		
Oberkante		± 20 mm
Unterkante		± 120 mm
c) Abweichung von der Vertikalen :		
	bei	bei fortlaufender
	Staffelrammung	Rammung
Quer zur Wandebene in % der Einrammtiefe	± 1 %	± 1 %
In Wandrichtung (Vor- und Nacheilen)	± 1 %	± 0,5 %

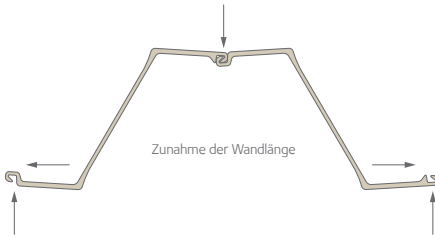
Bauwerks- und Projektbedingt können engere oder weitere Toleranzwerte vereinbart werden. Engere Toleranzwerte gelten besonders für die Tragpfähle kombinierter Wände, bei denen die Gebrauchstauglichkeit der Zwischentafeln nicht beeinträchtigt werden darf. Zulässige Verdrehung und Schiefstellung sind zwischen den Projektbeteiligten zu vereinbaren, immer auch unter Beachtung der technischen Durchführbarkeit. Weitere Informationen zu Toleranzen von kombinierten Wänden sind im HZ®-M Katalog von ArcelorMittal und in den Empfehlungen des Ausschusses für Ufereinfassungen (EAU) zu finden.

### 8.2. Kontrolle der Wandlänge

Mit Veränderung der Profilhöhe der eingesetzten Rammelemente kann die Profilhöhe beeinflusst werden. Besonders stark ist der Effekt bei Z-Doppelbohlen, da durch die Lage des Mittelschlusses eine große Rotationsfähigkeit gegeben ist. Je grösser der werkseitig mögliche Abstellwinkel im Schloss, desto grösser ist die mögliche Änderung der Wandlänge. Technisch gesehen kann bei unzureichender Bohlenführung eine signifikante Abminderung des Widerstandsmomentes eintreten. Durch Kontrolle und Beschränkung des Spiels in der Führung, etwa durch Holzblöcke, kann die Bohle nahe an der Soll-Lage gehalten werden. Blöcke im Bohlentale verkleinern, Blöcke im Bohlenrücken vergrößern die Profilhöhe. Bei vielfacher Wiederholung kann die Wandlänge im erforderlichen Ausmaß korrigiert werden. In der theoretischen Solllage aufgeschweisste Laschen am unteren Ende der Bohle können die Lagegenauigkeit des Profils verbessern und verringern zudem den Einbauwiderstand.



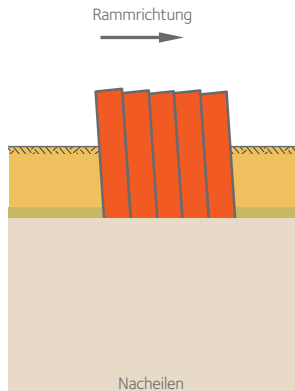
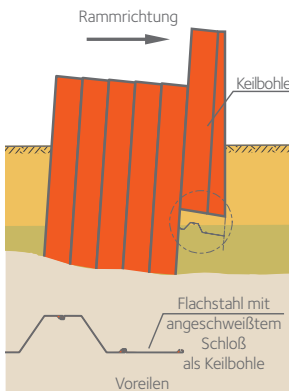
Für U-Bohlen sind keine großen Abweichungen zu erwarten, da sämtliche Schlösser in der Wandmitte liegen. Wenn theoretische Wandmaße genau einzuhalten sind, müssen unter Umständen Passbohlen eingesetzt werden.



### 8.3. Vor- und Nacheilen, Schiefstellung

Eine Schiefstellung der Bohlen quer zur Wandachse lässt sich durch den Einsatz von Mäklergeräten oder ausreichend steif dimensionierten Rammführungen vermeiden. Wenn die Bohlen trotzdem eine Schiefstellung in Querrichtung entwickeln, die korrigiert werden muss, sollten sie gezogen und unter Verwendung geeigneterer Methoden (z.B. Staffelrammung) erneut eingebracht werden.

Das Voreilen, also eine Schiefstellung der Bohlen in der Wandachse in Arbeitsrichtung, ist ein seit langem bekanntes Phänomen beim Spundwandrammen. Es tritt hauptsächlich in weichen Böden auf und kann damit erklärt werden, dass im Fädelschloss mehr Reibung überwunden werden muss, als beim Eindringen des freien Spundwandendes in den Boden. Die Wand „fällt“ nach vorne. Als Gegenmaßnahme kann Staffel- oder Fachrammung angewandt werden. Es kann versucht werden mittels Seilzug in die Gegenrichtung die Schiefstellung zu korrigieren.



Wird ein Mäklermast eingesetzt, kann mit diesem der Schiefstellung entgegen gewirkt werden oder man setzt den Vibrationsbär außermittig auf die Bohle und versucht so, die Richtung zu korrigieren. Im schlimmsten Fall müssen Keilbohlen eingesetzt werden.

Das Nacheilen findet man hauptsächlich in harten Böden, hier muss das freie Ende der Bohle erst einmal den Boden öffnen, während im Fädelschloss die Bohle leichter in den bereits gestörten Boden eindringen kann. Gegenmaßnahmen

sind die gleichen wie bei Voreilen, nur dass in die andere Richtung eine Kraft aufgebracht werden muss. Sind Doppel-U-Bohlen einzubauen, kann man sich den Effekt zunutze machen, dass die Bohlen am Fuß nie ganz bündig sind. Durch Drehen der Bohle kann man den längeren Teil dort rammen, wo mehr respektive weniger Energie gebraucht wird.

Eine Vorverformung des Steges ist nicht empfehlenswert, da die Gefahr besteht, dass die Bohle aus der Wandflucht gedrückt wird.



Aufrichten der Wand durch Seilzug

Korrektur durch Seilzug

Eingeschweisste Lasche zur Fixierung des Profils in der vorgesehenen Breite

Mögliche Korrekturmaßnahmen bei Schiefstellung der Bohlen in Richtung der Wandachse.

### 8.4. Mitziehen

Beim Rammen in weichen Böden, insbesondere bei zusätzlicher Schiefstellung der Bohlen, kann die Schlossreibung größer als der Eindringwiderstand werden und ein Mitziehen der Nachbarbohlen verursachen. Beim Einstellen in einen Schlitz kann das gleiche Phänomen auftreten. In einem solchen Fall kann die betroffene Bohle immer durch Aufstockung verlängert werden, falls Ziehen zur Korrektur der Einbauhöhe nicht möglich ist.

Um zu verhindern, dass bereits eingerammte Bohlen hinuntergezogen werden, können mehrere Bohlen mit einem Träger zusammengeschaubt oder mehrere Spundwandschlösser durch Heftschweißen fest miteinander verbunden werden. Als weitere Vorsichtsmaßnahme gegen das Mitziehen kann ein Bolzen vor dem Einrammen in das vorauseilende Schloss eingeführt werden, um ein Eindringen von Erde und dadurch eine größere resultierende Schlossreibung zu verhindern.

Alternativ kann eine temporäre Klemmvorrichtung genutzt werden, welche ein Mitziehen der Nachbarbohle verhindert. Blockieren der Bohlen mit Hilfe eines Bolzens, der durch die werkseitige Lochung gesteckt wird, hilft in den meisten Fällen auch.



Haltevorrichtungen für eingestellte Spundbohlen



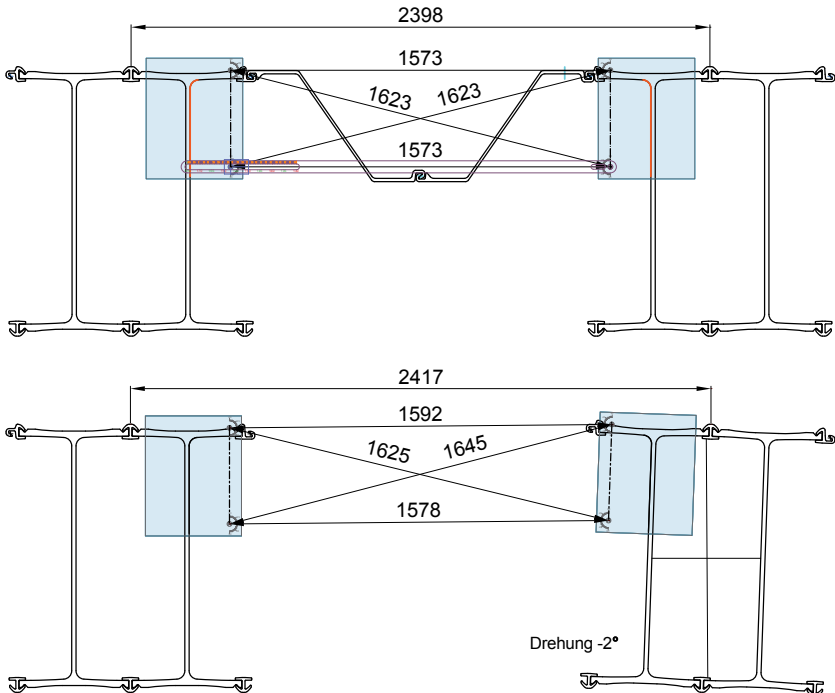
## 8.5. Messungen

Vor und während des Rammens sind folgende Punkte laufend zu beachten:

- Lage der Bohlen in der Rammführung;
- Stellung zur Lotrechten, gemessen in 2 Achsen;
- Eindringgeschwindigkeit unter der Rammwirkung;
- Zustand des Bohlenkopfes;
- eventuelle Rauchentwicklung, die auf lokale Überhitzung hindeuten könnte.

Beim Auftreten von Rammabweichungen, gleich welcher Art, sind sofort Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Für die Tragbohlen kombinierter Wände kann z.B. das nachfolgend beschriebene Messverfahren angewandt werden.



Messbeispiel

Die tatsächliche Neigung einer eingebrachten Spundwand kann über Inklinometer mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Die Inklinometerrohre können bereits werkseitig oder auf der Baustelle montiert werden.



Werkseitig montierte Inklinometerrohre; HZ<sup>®</sup>-M Träger mit Fussverstärkungen



## 9. Besondere technische Aspekte

### 9.1. Proberammungen

Proberammungen sind besonders dann erforderlich, wenn aus rammtechnischer Sicht schwierig zu beurteilende Böden anstehen. Ziel der Proberammung ist es, das am besten geeignete Spundwandprofil und das dazu passende Rammgerät zu ermitteln. Des Weiteren kann abgeschätzt werden, ob die errechnete geforderte Rammtiefe oder auch die Pfahltragfähigkeit erreicht werden kann. Die Proberammung sollte möglichst in oder nahe der späteren Spundwandtrasse durchgeführt werden. Anzahl und Art der Pfähle sowie der Ort der Proberammung hängen von der Art und Größe der Baumaßnahme und den zu erwartenden Unregelmäßigkeiten des Untergrundes ab.

Proberammungen sind mit großer Sorgfalt durchzuführen. Das Rammgut und der Rammbar sind ständig zu beobachten, ausführliche Rammprotokolle sind zu führen. Durch späteres Freilegen oder Ziehen der Bohlen kann ein zutreffendes Urteil über das Verhalten der Bohlen gefällt werden.

Schwingungsmessungen können Aufschluss geben, ob während der Bauzeit Probleme an der benachbarten Bebauung zu erwarten sind.



### 9.2. Arbeiten bei begrenzter lichter Höhe

Bei Ramarbeiten unter Brücken oder innerhalb bestehender Strukturen reicht oft die Höhe zwischen Rammplanum und dem Überbau nicht zum direkten Einfädeln der Bohlen aus. Mit der Benutzung kurzer Bohlenabschnitte, auf die weitere Abschnitte aufgeständert werden, läßt sich jede erforderliche Bohlenlänge erreichen. Dieses Verfahren ist durch das Aufschweißen von Laschen unter der Ramme umständlich, zeitraubend und teuer, weswegen es nur in Ausnahmefällen angewendet wird.

Eine mögliche Arbeitsvariante besteht darin, die Bohlen außerhalb der Brücke einzufädeln und in ein an den Brückenüberbau befestigtes Traggerüst zu hängen. Die zur Aufhängung erforderlichen Bolzen ermöglichen das schrittweise Einziehen der Bohlentafel unter die Brücke. Bei immer noch knapper Höhe kann ein vorher ausgehobener Graben zusätzlich Raum schaffen. Wenn alle Bohlen eingefädelt und aufgehängt sind, braucht nur noch abgerammt zu werden; entsprechend modifizierte

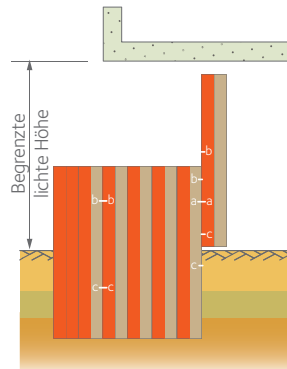
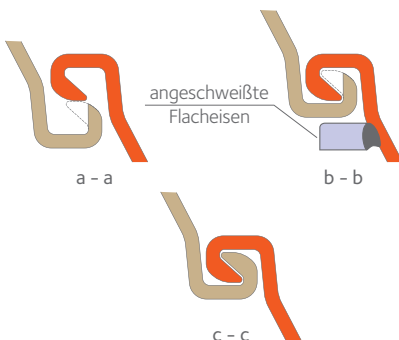
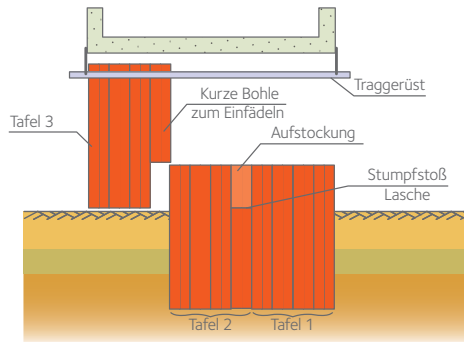
Rammgeräte sind verfügbar oder können angepasst werden.

Die Rammung geschieht am zweckmäßigsten mit Schnellschlaghämmern oder Vibrationsbären. Unter Umständen wird zunächst mit einem kleinen Hammer vorgerammt, bis der Raum für den stärkeren Hammer ausreicht. Lässt sich auch trotz eines Voraushubs ein leichter Hammer nicht aufsetzen, so ist die Rammung mit einem sogenannten „Rucksack“ möglich, bei dem das Gerät in eine spezielle Führung gehängt wird und die Führung wiederum die Kraft auf die Spundbohle überträgt.

Lassen die Bodenverhältnisse es zu, so ist auch der Einsatz kompakter Baggeranbauvibratoren mit seitlich angebrachter Spannange („Side grip“) möglich.



Ein weiteres, einfaches Verfahren ist das Tafelweise Einbauen, welches in nachfolgender Zeichnung dargestellt ist. Bei der Fädelbohle der Tafel wird auf der erforderlichen Länge der Schlossdreikant an der oberen Bohlenhälfte abgebrannt. Die nächste Bohle kann dann seitlich (a-a) eingehakt werden. Die Bohlen haben nun im Boden die gewöhnliche Schlossführung (c-c), die obere Schlossführung wird durch das nachträgliche Anschweißen von Flacheisen vor der Rammung (b-b) erreicht.



#### Tafelweises Einbauen

### 9.3. Bauseitiges Einziehen zu Mehrfachbohlen



Zur Transportoptimierung oder aufgrund von anderen Baustellenrandbedingungen kann es sinnvoll sein, auf der Baustelle Einzel- oder Doppelprofile zu Mehrfachtafeln zusammen zuziehen, z.B. für das Einbringen mit einer 4-Zylinderpresse (siehe Kapitel 3.4.2). Die Profile sind hierfür auf einer ebenen Fläche auszulegen. Bevorzugt wird Holz unter die Bohlen gelegt zur Verminderung der Reibung. Die Fädelschlösser werden in die korrekte Position gebracht und sodann mit einer Seilwinde, einem Radlader oder Gabelstapler ineinander gezogen oder geschoben. Lose gelieferte Eckprofile (ausser C9) können auf die gleiche Weise montiert werden.

### 9.4. Abschätzung der vertikalen Tragfähigkeit

Die Tragfähigkeit von Spundbohlen in Bezug auf vertikale Lasten wird häufig unterschätzt. Zur Einleitung von vertikalen Lasten vom Bauwerk in den Spundwandkopf hat ArcelorMittal die Allgemeine Bauartgenehmigung Z-15.6-235 erwirkt. Zur Planung und Berechnung bietet ArcelorMittal sowohl eine Broschüre zur „Schneidenlagerung auf Spundbohlen“ an sowie ein zugehöriges Berechnungsprogramm.

Zur Einleitung der Vertikallasten von der Spundwand in den Baugrund wird auf die Berechnungsgrundlagen der EAU 2020 (8.2.5) und die EA-Pfähle verwiesen. Zum Nachweis der tatsächlichen Tragfähigkeit ist es auf jeden Fall zu empfehlen, Probelastungen durchzuführen. Zeigt sich dabei, dass die Bohlenlänge unzureichend ist, können die Spundbohlen leicht aufgestockt und tiefer eingerammt werden.

Rückschlüsse auf die Tragfähigkeit können gezogen werden, wenn nach Beendigung der Rammarbeiten der erforderliche Eindringwiderstand erreicht ist und die Hammerleistung den Bodenbedingungen und dem Bohlenprofil entsprechen. Es gilt die Regel: „Ein schlagend gerammter Pfahl ist ein getesteter Pfahl“.

Die Tragfähigkeit eines mittels Schlagrammung eingebrachten Rammgutes kann näherungsweise über anerkannte Rammformeln berechnet werden.

Bei einvibrierten Pfählen ist aufgrund der vielen unbestimmbaren Variablen eine formelmässige Vorhersage der vertikalen Tragfähigkeit derzeit nicht möglich. Vibrierte Pfähle müssen entweder in-situ getestet oder auf den letzten 2-3 m nachgeschlagen werden. Wichtig ist, die Eindringung in mm während der letzten 10 Schläge zu messen um einen Durchschnittswert pro Schlag ermitteln zu können.

Generell gilt, dass sich einige Wochen nach Einbau die Pfahltragfähigkeit weiter erhöht. Als Faustformel kann angenommen werden:

- bei nicht bindigen Böden 5-20% Erhöhung
- bei bindigen Böden bis zu 60% Erhöhung

Die Zunahme ist abhängig von der Bodenart, Kornform, Kornverteilung, Lagerungsdichte, Pfahltyp und Werkstoff des Pfahls.

## Rammformel nach Stern

Die Pfahltragfähigkeit kann vereinfacht mit dem Eindringwiderstand bei Schlagend-rammend gleichgesetzt werden. Der Eindringwiderstand ( $W$ ) kann mit Hilfe der Formel nach Stern berechnet werden:

$$W = \frac{F \cdot E}{L} \cdot \left[ -S + \sqrt{S^2 + \frac{2 \cdot R \cdot L \cdot H}{F \cdot E} \cdot \frac{R + Q \cdot k^2}{R + Q}} \right]$$

wobei gilt:

$W$	= Grenztragfähigkeit des Pfahls (ohne Sicherheit)	in kN
$F$	= Querschnittsfläche Rammgut	in $m^2$
$L$	= Länge des Rammgutes	in m
$Q$	= Gesamtgewicht Rammhaube und Rammgut	in N
$H$	= Fallhöhe des Schlaggewichts	in m
$S$	= Durchschnittliches Eindringen des Pfahls pro Schlag in der letzten Hitze (10 Schläge)	in mm
$E$	= Elastizitätsmodul des Pfahlmaterials ( $E_{\text{Stahl}}$ : 210.000)	in $N/mm^2$
$R$	= Schlaggewicht	in N
$k$	= Federfaktor 0,25–0,8 (im Durchschnitt 0,65)	



Beispiel einer Probelastung für eine Spundwand

Bei sehr langen Pfählen (>30m) empfiehlt es sich, mit Hilfe der Stosswellengleichung die Tragfähigkeit abzuschätzen. Weitere Möglichkeiten bieten die Rammformeln von Delmag, Hiley, Redtenbacher oder Weisbach.

Es ist zu beachten, dass sämtliche Rammformeln nur näherungsweise Ergebnisse liefern. Um die vorher beschriebenen Einflüsse mit einzubeziehen und exakte Werte für die Tragfähigkeit zu erhalten, sind in jedem Fall Probelastungen durchzuführen.

## 9.5. Schallentwicklung und Lärmschutz

Die Schallentwicklung und -ausbreitung ist abhängig von der verwendeten Einbringmethode, der Gerätetechnik und dem Spundbohlentyp.

Diesel-, Hydraulik- und Drucklufthämmmer erzeugen ein stoßweises Impulsgeräusch, auch bei erhöhter Schlagrate. Beim Einbringen mit Vibratoren ist ein dauerhafter Schallpegel mit Schwankungen wahrnehmbar. Bei Einbringung unter Verwendung von Pressen ist das erzeugte Geräusch gleichmäßig und kommt hauptsächlich vom Antrieb des Trägergerätes.

Schlaglärm ist normalerweise weniger akzeptabel als ein gleichmäßiges Geräusch. Es spielen jedoch noch andere Kenndaten der Schallquelle eine wichtige Rolle für die Beurteilung der Annehmbarkeit des Lärms, wie die Nähe zu Nachbarbebauung und die Nutzung der benachbarten Gebäude. Zusätzlich können andere Baustellengeräusche als sehr störend empfunden werden, z. B. quietschende Rollenlager, Baustellenverkehr u. ä. Die Dauer der Spundwandarbeiten ist normalerweise verhältnismäßig kurz im Vergleich zum Zeitraum der Bauarbeiten insgesamt.

Oft werden Rammarbeiten auf bestimmte Tageszeiten beschränkt. Hierbei ist der Kurzzeiteffekt der Rammzyklen zu berücksichtigen, da er einen Einfluss auf die Festlegung der Grenzwerte hat.





Schallschutzmassnahmen für Hammer (links) und Vibrationsbär (rechts)

Nachstehend sind die charakteristischen Schalldruckpegel für die verschiedenen Rammgeräte aufgeführt:

Schlaghammer	90 ~ 115 dB (A)
Schnellschlaghammer	85 ~ 110 dB (A)
Vibrationsbär	70 ~ 90 dB (A)
Presse	60 ~ 75 dB (A)
Messungen in einem Abstand von 7 m	

Zur Minderung des Schallpegels gibt es verschiedene Möglichkeiten. Er kann entweder direkt an der Quelle verringert werden, etwa durch den Einsatz von speziell angepassten Schalldämmsystemen für den Hammer oder Vibrationsbär, oder, wenn dies nicht möglich ist, kann die Einwirkung auf die Umgebung durch temporäre Abschirmungen gemindert werden. Hier führen oft spezifische Baustellenlösungen zum gewünschten Erfolg.

Bei der Geräteauswahl kann anhand der Herstellerangaben das leiseste Gerät ausgesucht werden und bei den Klemmzangen von Vibrationsbären ist auf möglichst geringen Verschleiß der Reibflächen zu achten.

Nicht zuletzt die Wahl der einzubauenden Profile und deren Lieferform hat einen spürbaren Einfluss auf die Lärmverteilung während des Rammens. Bei der Verwendung von Einzelbohlen wird die Lärmentwicklung geringer sein als beim Einsatz von verpressten oder verschweissten Doppelbohlen. Die Verwendung einer steiferen Bohle wird sich ebenfalls positiv auf die Minderung des Schalldruckpegels in der Umgebung auswirken.

In der nachfolgenden Tabelle sind typische Werte für die Intensität von Lärm in verschiedenen Lebensbereichen zum Vergleich zusammengestellt:

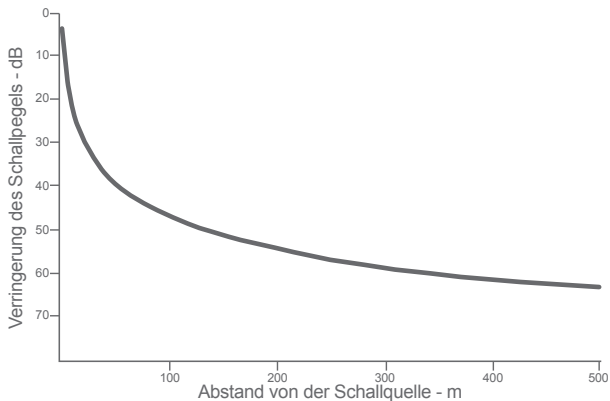
Laute Fabrik/Werkstatt	90 dB (A)
Belebte Straße	85 dB (A)
Radio bei voller Lautstärke	70 dB (A)
Normales Sprechen	55/63 dB (A)
Wohngebiet	35 dB (A)



Die nachfolgende Tabelle enthält beispielhaft die für Tiefbauarbeiten typischen Schallpegel:

Rammhammer	110 dB (A)
Bagger	100 dB (A)
Druckluft-Abbauhammer ohne Schallisolierung	90 dB (A)
Kompressor	85 dB (A)
Messungen in einem Abstand von 7 m	

Der willkürlich gewählte Abstand von 7 m zwischen Maschine und Meßpunkt ist ein weiterer wichtiger Faktor. Jeder Lärm wird durch größer werdende Entfernung gedämpft. Je weiter der Schall vom Ursprung aus durch die Luft übertragen wird, umso schwächer wird er. Der Dämpfungsfaktor entspricht etwa einer Verringerung um 6 dB (A) für jede Verdoppelung des Abstandes von der Schallquelle. In der nachfolgenden Abbildung ist dies graphisch dargestellt:



### Lärmpegel in Abhängigkeit von der Entfernung

Durch den Einsatz von Rammhilfen, wie Spülen oder Vorbohren des Bodens, kann das Eindringen erleichtert, der Schallpegel verringert und die Rammzeit verkürzt werden. Weitere Hinweise werden in der DIN EN 12063 aufgeführt.

## 9.6. Erschütterungen

### 9.6.1. Allgemeines

Beim Einrammen einer Spundbohle wird ein Teil der Rammenergie in den benachbarten Boden übertragen und kann dort unter Umständen an der Oberfläche in Form von Schwingungen wahrgenommen werden. Diese Schwingungen können für die Bewohner umliegender Gebäude störend sein und Anlass zur Besorgnis geben, dass unter Umständen Eigentum beschädigt wird. Eine Risikoabschätzung ist vor Beginn der Baumaßnahme zweckmäßig, eine Beweissicherung von vorhandenen Gebäudeschäden in jedem Fall anzuraten. Auf der Grundlage von vorhandenen Daten über die Art und Länge der Bohlen, den verwendeten Hammertyp und die eingeleitete Energie sowie die jeweiligen Bodenbedingungen, kann eine erste Analyse durchgeführt werden. Wichtig dabei ist die Beurteilung über die Empfindlichkeit benachbarter Bauwerke gegenüber Erschütterungen und eine Entscheidung über Abhilfemaßnahmen oder Abbruchkriterien der Rammarbeiten. DIN 4150 Teil 3 gibt Richtwerte für Schwingungsauswirkungen an, dennoch muss immer der jeweilige Zustand des Gebäudes und des Bodens berücksichtigt werden. Das Gebäude z. B. kann bereits durch

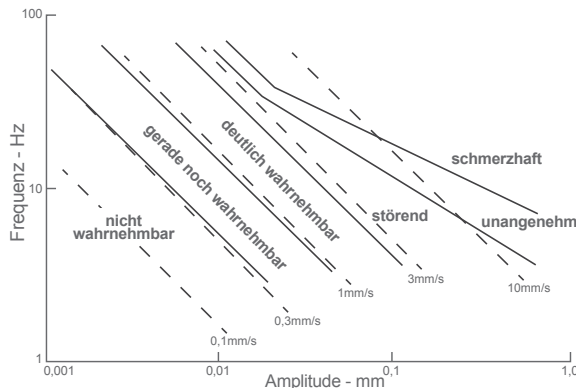
unterschiedliche Setzungen aufgrund ungleichmäßiger Belastung unter Spannung stehen, so daß selbst eine geringe dynamische Beanspruchung ausreichen kann, um einen Schaden auszulösen. Die nächste Fassung der DIN EN 12063 wird ebenfalls ein Kapitel über Schwingungen im zuge von Rammarbeiten enthalten.

### 9.6.2. Meßsysteme

Inzwischen gibt es eine Reihe von Systemen, die sehr gut für die Messung während der Rammarbeiten benutzt werden können. Das Meßsystem besteht im Allgemeinen aus einem Meßwertaufnehmer (z.B. Geophon), der elektrische Signale proportional zu den vertikalen und horizontalen Schwingungen erzeugt, sowie einem System zur Anzeige der Signale. Es kann eine Signalanlage integriert werden, die dem Gerätfahrer über optische oder akustische Signale mitteilt, ob unzulässige Schwingungswerte erreicht werden.

### 9.6.3. Erschütterungsbeurteilung auf Menschen

Ein durchschnittlicher Schwellenwert für die Wahrnehmung von Erschütterungen durch den Menschen liegt bei etwa 0,1 bis 0,5 mm/s. Im Allgemeinen werden die wahrgenommenen Erschütterungen vom Menschen überschätzt. Einen einfachen Anhaltspunkt für die menschliche Empfindsamkeit gegenüber Erschütterungen bietet die Rieher-Meister-Skala.



Rieher-Meister-Skala

### 9.6.4. Erschütterungsbeurteilung auf Gebäude

Die Reaktion eines Bauwerks auf eine Bodenerschütterung läßt sich entweder durch eine dynamische Analyse oder durch ein empirisches Abschätzen bestimmen. Hinweise sind in zahlreichen europäischen Normen und in einer Reihe von Veröffentlichungen zu finden. In jedem Fall ist die messtechnische Erfassung während der Baumaßnahme die beste Möglichkeit, die realen Erschütterungen in Relation zu den Grenzwerten der DIN 4150, Teil 3, zu setzen.

### 9.6.5. Empfehlungen zur Erschütterungsverringerung

Die auf der Baustelle beeinflussbaren Parameter sind im Wesentlichen die Wahl des Rammgerätes, der Arbeitsweise und die Kontrolle der eingesetzten Energie. Schlaghämmer können durch Variation von Fallhöhe und Schlagkolbengewicht reguliert werden. Der Einsatz von hohen Gewichten bei geringer Fallhöhe wirkt erschütterungsreduzierend.

Moderne Vibrationstechnik erlaubt inzwischen den Einsatz in sehr geringem Abstand zu bestehender Bebauung. Generell verursachen hochfrequente Vibratoren mit verstellbarem statischen Moment nur sehr mäßige Erschütterungen, da die Resonanzfrequenzen von Boden und Gebäude nicht durchfahren

werden. Des Weiteren stehen Maschinen mit zusätzlich veränderbarem Hydraulikdurchfluss im Markt zur Verfügung, die kaum noch Vibrationen im Umfeld der Maschine verursachen. In sensiblen Bereichen wie z.B. Deichertüchtigungen kann die Spundwand somit schnell und effektiv eingebracht werden.

Fast vollkommen erschütterungsfrei ist das Arbeiten mit hydraulischen Pressen, wobei allerdings die erzielbare Einbringtiefe limitiert ist.

Das neu entwickelte Resonanzverfahren (Kap. 3.5) arbeitet in einem so hohen Frequenzbereich, dass ebenfalls keine Schwingungen in spürbaren Größen entstehen.

Einbringhilfen in Verbindung mit einem der oben genannten Rammssysteme sind immer empfehlenswert und führen zu gutem Erfolg.

Das Einstellen der Spundwand in Schlitzwände oder Mixed-In-Place-Wände kann auch als erschütterungsarme Einbringmethode angewendet werden (siehe Kapitel 5.7).

## 9.7. Schlosssprungdetektoren

Zum Überprüfen der Schlossintegrität im unzugänglichen Bodenbereich der Bohle bietet ArcelorMittal das DIXERAN-System an. Es kann bauseits mit geringem Aufwand montiert und angewendet werden. Die genaue Produktbeschreibung ist als spezielle Broschüre erhältlich.

Die Anzahl der einzubauenden Detektoren ist vor Baubeginn festzulegen und sollte der Komplexität der Baumassnahme angepasst sein.



Dixeran Signalgeber



Anschlusskabel



Kontrollbox

## 9.8. „Jagged Walls“

Als „Jagged Walls“ bezeichnet man Verbundwände, bei denen das Z- oder U-Profil in einer speziellen Geometrie angeordnet ist. Bei der Jagged-U-Wand sind Doppelprofile um 45° zur normalen Wandachse gedreht und werden mit Omega-Profilen verbunden. Man erhält auf diese Weise eine sehr steife Wand mit großem Widerstandsmoment, die dann oft schon unverankert eine ausreichende Tragfähigkeit erreicht. Wird zusätzlich eine Verankerung vorgesehen, ist die Anschlusskonstruktion etwas aufwendiger. Der Vorteil ist, dass Standardprofile eingesetzt werden, die nach dem Ende der Arbeiten wieder verwendet werden können. Eine kombinierte Wand als Alternative ist wesentlich aufwendiger herzustellen. Das Rammen geschieht am besten mit einem schwenkbaren Mäklärgerät, da die Profile jeweils in die Einbaurichtung gedreht werden müssen. Eine einfache Führung am Boden erleichtert das lagegenaue Ansetzen der Profile und sorgt für das Einhalten der korrekten Wandgeometrie, um einen Verlust an Widerstandsmoment durch Rammabweichungen zu verhindern. Eine „Jagged Wall“ aus Z-Profilen wird meist als reine Dichtwand eingesetzt, da sie kaum eine statische Funktion übernehmen kann. Die Lösung ist interessant, da sie ein geringes Flächengewicht aufweist und eine geringe Bauhöhe bietet.

Da das Rammen von Einzel-Z-Bohlen etwas schwieriger ist, muss besonderer Wert auf die Bodenerkundung gelegt werden.



Jagged U-Wall



Jagged Z-Wall

## 9.9. Schrägrammung

Am häufigsten werden Schrägpfähle als Ankerpfähle für schwere Wände eingebaut. In seltenen Fällen werden aus architektonischen Gründen geneigte Wellenspundwände oder kombinierte Wände geplant. Schwierig sind hierbei immer Anschlüsse an vertikale Bauteile der Wand oder der Anschluss von Flügelwänden. Bei geneigter Kurvenrammung wird die Spundwand zusätzlich quer zur Achse belastet und beim Einbau ist besondere Sorgfalt notwendig. Je kürzer die Bohlen, umso einfacher gestaltet sich der Einbau.

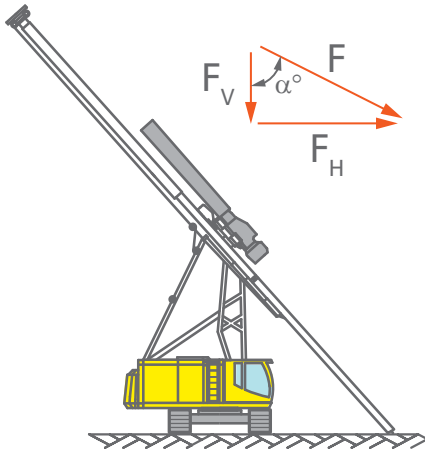


Schrägpfähle sind entweder reine Mantelreibungspfähle oder sie werden als Mantelverpresspfähle

ausgebildet. Reibungspfähle sind in der Regel länger, Verpresspfähle können auf kürzerer Strecke mehr Last aufnehmen. Für beide Pfahlarten muss zur Bestimmung der tatsächlichen Tragfähigkeiten eine Probelastung durchgeführt werden, um die Annahmen der statischen Berechnung zu bestätigen. Bei reinen Mantelreibungspfählen ist eine eventuelle Verlängerung einfach durchzuführen.

Der Einbau geschieht normalerweise zunächst mittels Vibrationsbär. Die Rammung bis auf Endteufe wird am besten mit einem Hydraulikhammer durchgeführt, da hier die wenigsten Energieverluste zu erwarten sind. Es sind immer die Herstellerangaben zur maximal erlaubten Arbeitsneigung zu beachten.

Als Rammführung dient entweder ein Schräg- oder Hängemäkler, bei Wellenspundwänden sollte eine angepasste Bohlenführung benutzt werden.



Kräfteverteilung am Schrägmäkler

### Vortriebskraft

$$F_V = F \cdot \cos(\alpha)$$

### Auflagerkraft

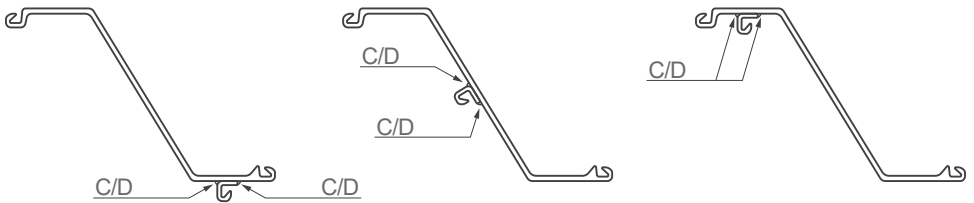
$$F_H = F \cdot \sin(\alpha)$$



## 9.10. Spezialbohlen

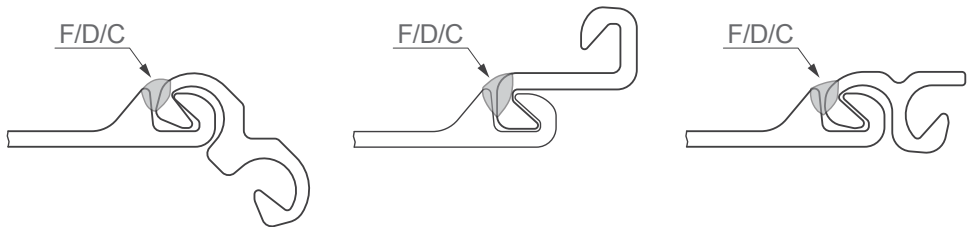
Oftmals kann es notwendig werden, die Spundbohlengeometrie den Baustellengegebenheiten anzupassen. Es ist nicht immer ratsam, Spezialbohlen nach theoretischem Plan bereits vor Beginn der Bauarbeiten zu bestellen. Es sollte immer vor Ort gemessen und erst dann bauseits oder mit werkseitig geordnetem Material angepasst werden. Verkürzen oder Verlängern von U- oder Z-Bohlen ist einfach durchzuführen. Eine besondere Broschüre zu Schweißen von Stahlspundwänden ist bei ArcelorMittal verfügbar.

Ecken in Spundwandkonstruktionen können auf verschiedene Arten konstruiert werden. Am einfachsten ist die Verwendung von speziellen warmgewalzten Eckprofilen von ArcelorMittal, die vor dem Einbringen in der planmässig vorgegebenen Position angeschweisst werden. Die Eckprofile C9, C14, Delta13 und Omega18 können lose, lose gefädelt oder werkseitig verschweisst geliefert werden. Das C9-Schloss bietet grösstmögliche Flexibilität, es kann in allen möglichen Positionen und Winkeln angebracht werden.



### Beispiel für eine C9 Montage an einem AZ-Profil in verschiedenen Positionen

Der Einbau der anderen Eckprofile erfolgt im Allgemeinen zusammengezogen und verschweisst mit einer Spundbohle. Das Einbringen von losen Eckprofilen ist aufgrund der fehlenden Steifigkeit der Profile und in Ermangelung von geeigneten Klemmzangenansatzpunkten nicht zu empfehlen.



Für alle Eckprofile werden folgende Schweisskonfigurationen empfohlen:

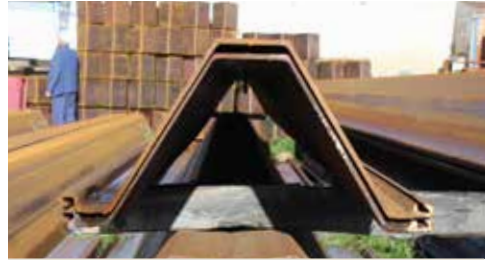
- F Heftnaht am Kopf, 100 mm, Mindestschweisnahtdicke 6 mm
- D Unterbrochene Schweissnaht, 100 mm (3x/Meter), zusätzlich 200 mm an Kopf und Fuss, Mindestnahtdicke 6 mm
- C Durchgehende Schweissnaht, Mindestschweisnahtdicke 6 mm

Eckprofil Schweisskonfiguration gemäss Werkempfehlung für C14, Delta13 und Omega18 je nach bauseitigen oder statischen Erfordernissen

Falls erforderlich, können Spundbohlen verbreitert oder verengt werden. Eingeschweisste Bleche sollten die gleiche Dicke haben, wie das Spundwandmaterial. Auf verändertes Einbringverhalten und Toleranzmasse ist zu achten!

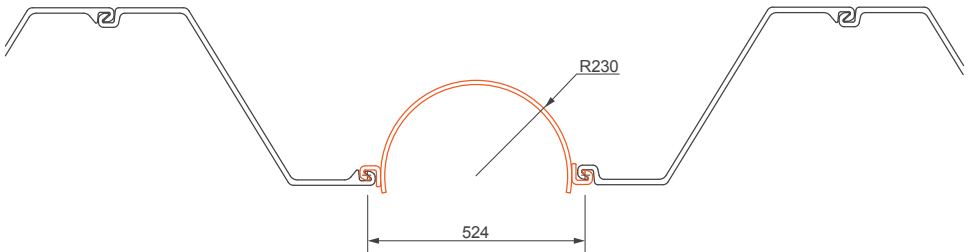


Verbreiterte Bohle



Verengte Bohle

Spezielle Federbohlen können flexible Lösungen darstellen, wenn die Geometrie der bestehenden Wand es erfordert.



Beispiel einer Federbohle



Beispiel einer ausgeführten Panzerung

Zur Sicherung der Spundwand gegen Schiffsanprall können die Spundbohlen mit einer Panzerung aus speziell angepassten Blechen versehen werden. Die Panzerbleche werden im Allgemeinen vor dem Einbringen montiert, sie können aber auch nachträglich angebracht werden. Hinweise zur Ausbildung von Stosspanzerungen finden sich in Kapitel 7.2.4 der EAU 2020.

Wenn eine unplanmäßige Neigung in Wandlängsrichtung auszugleichen ist oder ein gegen die Vertikale geneigter Anschluss herzustellen ist, kann dies mit Keilbohlen durchgeführt werden. Es ist darauf zu achten, dass die Geometrie unter die Ramme passt und die Spezialbohle einbaubar ist. Vertikale Anschlüsse für planmäßig schräg gerammte Bohlen erfordern immer eine sorgfältige dreidimensionale Planung.





Beispiel für die Eckausbildung einer geneigten Wand

### 9.10.1. Durchführungen - Spundwandbrillen

Besonders beim Bau von Dükern oder in Anfahrerschächten von Mikro-Tunneln kann es erforderlich sein, Rohrleitungen mit unterschiedlichen Durchmesser durch die Spundwand hindurch zu führen. Diese Durchdringungen können starr oder flexibel und bei Bedarf auch wasserdicht konstruiert werden. Das Einbringen kann entweder als vormontiertes Gesamtelement oder in konstruktiv zu definierenden Einzelteilen geschehen. Der nachträgliche Einbau durch die gerammte Spundwand ist ebenfalls möglich.

Aufgrund der Form werden Mehrfachdurchdringungen auch als „Spundwandbrillen“ bezeichnet. Es ist von Vorteil für Konstruktion und Einbau, eine möglichst einfache Geometrie der Durchdringung zu wählen.



Beispiele zu Durchführungen durch Spundwände

### 9.10.2. Ineinanderpassen von Schlossprofilen

Sämtliche Spundwandprofile von ArcelorMittal können miteinander kombiniert werden, da an allen U- und Z-Profilen das gleiche Larssenschloss angewalzt ist.

Wird eine neue Spundwand an die bestehende Wand eines Bauwerks angeschlossen, die eine andere Schlossgeometrie aufweist, so kann zum Beispiel die letzte Bohle gezogen werden, der Flansch mit Schloss abgeschnitten und an die erste neue zu rammende Bohle angeschweisst werden. Diese Spezialbohle wird nun in die alte Wand eingefädelt und auf Tiefe gerammt. Die neuen Spundbohlen werden nun planmässig und fluchtgerecht eingebracht, die Wand hat keine Fehlstelle an der Verbindungsstelle.

## 9.11. Spundwandumschliessungen

### 9.11.1. Spundwandkästen

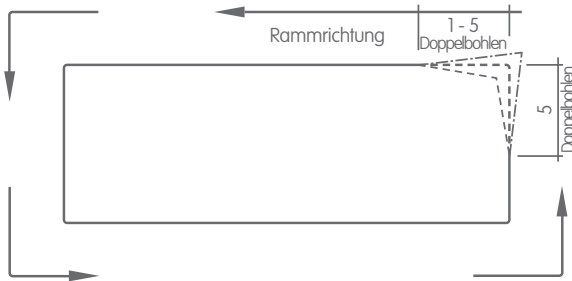
Soll ein geschlossener Kasten aus Spundwandprofilen gerammt werden, gibt es zwei Möglichkeiten, die sicher zum Erfolg führen.

Je nach Länge der einzubauenden Bohlen kann der Kasten mit entsprechender Fixierung in einen Führungsrahmen gestellt und geschlossen werden. Erst nach dem Schließen des Kastens werden die Bohlen staffelweise eingerammt, ähnlich dem Aufrichten von Kreiszellen. Der vorhandene Kranausleger muss ausreichend lang sein, so dass jede Bohle in die zuvor aufgestellte Bohle eingefädelt werden kann. Zweckmäßigerweise wird hier mit frei hängendem Vibrator gearbeitet. Die Rammtiefe pro Bohle ist den vorhandenen Verhältnissen anzupassen. Die Rammung sollte mindestens in zwei Schritten erfolgen.



Steht ein Mäklergerät zur Verfügung, oder sind die Bohlen sehr lang, beginnt man etwa 5 Bohlen vor der Ecke mit dem Stellen und Einrammen. Es wird in eine Richtung gearbeitet, bis der Kasten geschlossen werden kann. Das Schließen kann dadurch erleichtert werden, dass die Wandenden nach innen oder nach außen an die realen Abmessungen angepasst werden können. Es ist wichtig, die Bohlen speziell in den Eckbereichen lot- und fluchtgerecht einzubringen. Eine mögliche Tendenz zur Schräge muss korrigiert werden, notfalls mit Keilbohlen.

Müssen genaue Abmessungen eingehalten werden, dann ist die Verwendung von Passbohlen unerlässlich.



## 9.11.2. Kreisrammungen

Die Länge und Geradheit der Bohlen haben einen wesentlichen Einfluss auf die erreichbare Drehung zwischen den einzelnen Bohlen. Für das Larssenschloss können theoretisch 5 Grad Verdrehung im Schloss angenommen werden, bei Bohlenlängen über 20 m etwas weniger (~4 Grad). Auf einigen Baustellen ist mit entsprechendem Krafteinsatz schon mehr Drehung erreicht worden; dies ist allerdings nicht zu empfehlen. Knickbohlen können jederzeit bis ca. 25 Grad werkseitig hergestellt werden. Eine Drehung im Schloss erhöht wesentlich die Reibung in den Spundwandschlössern und vergrößert somit den Einbringwiderstand.

Bei Kreisen geringen Durchmessers empfiehlt es sich, nach Möglichkeit alle Bohlen mit Hilfe einer Rammführung aufzustellen, anzurammen und den Kreis zu schließen. Das Einrammen sollte dann stufenweise durchgeführt werden, jeweils mit einem kurzen Versatz zwischen benachbarten Bohlen, um eine gegenseitige Führung zu gewährleisten.

Bei großen Kreisen ist das staffelweise Einbringen zu empfehlen. Dieses Einbringverfahren erleichtert das Einhalten der vertikalen Stellung der Bohlen und damit das Schließen des Kreises. Unter Umständen ist es dabei auch erforderlich, den Ringschluss durch geringfügiges Vergrößern oder Verkleinern des Radius oder durch das Einfügen einer speziell gefertigten Passbohle herzustellen.

Kleine Kreisdurchmesser lassen sich unter Umständen nicht durch einfache Schlossdrehung erreichen, so dass geknickte Bohlen oder andere Spezialbohlen eingesetzt werden müssen.

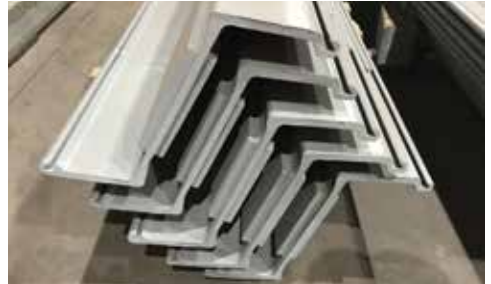


Generell sind bei Kreisrammung die Z-Bohlen durch das außen liegende Schloss vorteilhaft, welches etwas mehr geometrische Toleranz erlaubt. Zudem müssen U-Bohlen meist aus statischen Gründen als verpresste oder verschweisste Doppelbohlen verwendet werden, wodurch die Flexibilität der Doppelbohle weiter reduziert wird.

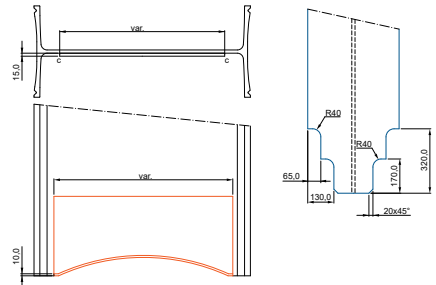
## 9.12. Fuß- und Kopfverstärkungen

Sind im Baufeld Hindernisse im Boden zu erwarten, wie z. B. Steine, Findlinge, Betonreste und Baumstämme, oder harte Bodenschichten zu durchdringen, kann es wirtschaftlich sein, Fussverstärkungen an der Spundbohle anzubringen. Zum Profil passende Stahlgussteile sind im Markt erhältlich (siehe auch Bild Seite 56). Es können auch einfache Stahlplatten, die die gleiche Dicke der Spundbohle haben sollten, ein- oder beidseitig angeschweißt werden. Die Verstärkungen sorgen für eine vergrößerte Steifigkeit der Bohle beim Durchdringen von schwierigen Böden und helfen ihre Form zu bewahren.

Kopfverstärkungen durch aufgeschweißte Platten sind eine Option, wenn bei langen Rammzeiten die Gefahr eines Sprödbruchs im Bereich der Klemmzangen des Vibrationsbären besteht oder sich unter den Hammerschlägen Verformungen am Bohlenkopf zeigen.



Bei den Tragpfählen von kombinierten Wänden hat sich die Fussabtreppung mit Sichelschnitt bewährt, wenn die Rammung durch harte Bodenschichten oder in weichen Fels durchgeführt werden soll. Die Rammgutvorbereitung kann im Werk oder auf der Baustelle erfolgen. Einzel- oder Doppelträger sind möglich. Wird ein ausreichend groß dimensionierter Schlaghammer verwendet, kann unter Umständen auf das Vorbohren verzichtet werden.



## 9.13. Felsrammung und Felsdübel

Rammen im Fels ist mit entsprechender Vorbereitung ohne weiteres möglich. In verwittertem Fels, leichten Sedimentgesteinen wie Sandstein, Kalkstein und Schluffstein mit Druckfestigkeiten von nicht mehr als 5–8 MN/m<sup>2</sup> sollte das Mindestwiderstandsmoment nicht kleiner als 3600 cm<sup>3</sup>/m sein. Die Stahlgüte sollte mindestens S355GP oder höher sein. Fussverstärkungen oder vorgefertigte Pfahlschuhe aus hartem und widerstandsfähigem Gussstahl, zusammen mit einem starken Schlaghammer, können zu einem erfolgreichen Rammergebnis führen. Das Verhältnis von Schlaggewicht zu Rammgut plus Rammhaube sollte nicht weniger als 2:1 betragen. Die Erfahrung zeigt, dass bei kombinierten Wänden rammsteife HZ<sup>®</sup>-M Profile sehr gute Tagesleistungen erbringen können, wenn Fussabtreppung und Sichelschnitt verwendet werden. Beim Einbau von Rohren als Tragelement kann Vorbohren sehr wirkungsvoll sein. Dies erfordert allerdings erhöhten Maschineneinsatz.





Wenn Einrammen in den Fels nicht möglich ist, kann durch Felsdübel („Rock Bolts“) ein ausreichendes Fussaflager ausgebildet werden. Die Spundbohlen werden vor dem Einbau mit Rohren, Durchmesser 8-10 cm, bestückt. Nach dem Abteufen auf Endtiefe, oder wenn kein weiteres Eindringen in den Boden möglich ist, wird durch das angeschweißte Rohr mit einer Bohrlafette in den anstehenden Fels gebohrt.

Die Einbindetiefe beträgt je nach statischen Erfordernissen ca. 1–2 m. Der Dübel wird mittels Zementsuspension in seiner Position fixiert, die Mindestlänge des Dübels beträgt 2 m. Eine spezielle Broschüre „Rock Bolts“ ist bei ArcelorMittal erhältlich.



Falls Rammen im Fels und Verdübelung nicht zum gewünschten Erfolg führen, kann ein Kreiszellenfangedamm in Betracht gezogen werden, siehe Kapitel 10.

## 9.14. Rammen bei tiefen Temperaturen



Werden Spundwandprofile im Winter bei dauerhaft tiefen Temperaturen unter  $-5^{\circ}\text{C}$  eingebaut oder in arktischen Regionen eingesetzt, sind besondere Empfehlungen zu beachten.

Der Stahl soll mindestens der Güte S355GP oder höher entsprechen und Kerbschlagzähigkeitswerten von mindestens 27 kJ bei  $-20^{\circ}\text{C}$  aufweisen. Je nach Bodenverhältnissen soll das Widerstandsmoment der Spundbohle nicht kleiner als  $1800\text{ cm}^3/\text{m}$  sein.

Aufgrund der chemischen Zusammensetzung ist die Stahlgüte AMLoCor von ArcelorMittal ebenfalls gut für Tieftemperaturrammung geeignet, da sich dieser Spezialstahl für den Wasserbau weniger spröde verhält als Baustahl für Spundwände. Weitere Spezialstähle können angefragt werden.

## 9.15. Schlossdichtungen

Um die für ein spezifisches Projekt geforderte Wasserdichtheit zu erreichen, gibt es verschiedene Alternativen die Spundwandschlösser abzudichten. Die einfachste Möglichkeit besteht darin, abzuwarten bis einsickerndes Wasser die Schlösser mit ausgeschwemmten Feinanteilen des Bodens auf natürlichem Weg verschlossen hat.

Eine gängige Baustellenanwendung ist das Verfüllen der Schlösser mit Bitumenmaterial. Dieses kann entweder heiß oder kalt verwendet werden. Es sind die jeweiligen Herstellerangaben zu beachten. Die bituminöse Dichtung kann auch als Schmierstoff benutzt werden, um die Schlossreibung während des Einbaus zu verringern. Lippendichtungen und Queldichtungen sind mit besonderer

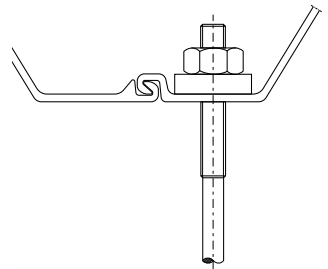
Sorgfalt einzubauen, um die Wirksamkeit zu erhalten. Bei Flachprofilen ist es nicht ratsam, Dicht- oder Gleitmittel zu verwenden, um die Schlosszugfestigkeit in vollem Umfang zu erhalten. Eine spezielle Broschüre zur Dichtigkeit von Spundwandbauwerken wird von ArcelorMittal zur Verfügung gestellt. Für die endgültige Erstellung eines Rammplanes sind Informationen über das gewünschte Dichtungsmaterial, Rammbeginn, Rammrichtung und Wasserdruckseite erforderlich.

## 9.16. Ankeranschlüsse

Die Verankerung einer Verbauwand muss entsprechend der Erfordernisse des Projekts dimensioniert werden. Die gängigen Ankervarianten sind Verpressanker oder passive Systeme mit Gewindestäben oder Rundstahlankern. Gerammte Schrägpfähle oder sogenannte „Klappanker“ kommen oft bei schweren Kaimauern zum Einsatz. Wasserdichte Ankerköpfe können bei hohem Grundwasserstand erforderlich sein. Eine exzentrische Verankerung vereinfacht den Anschluss an Z-Spundbohlen. Kataloge mit technischen Details und Ankervarianten sind bei ArcelorMittal erhältlich.



Klassischer Ankeranschluss für Z-Bohlen



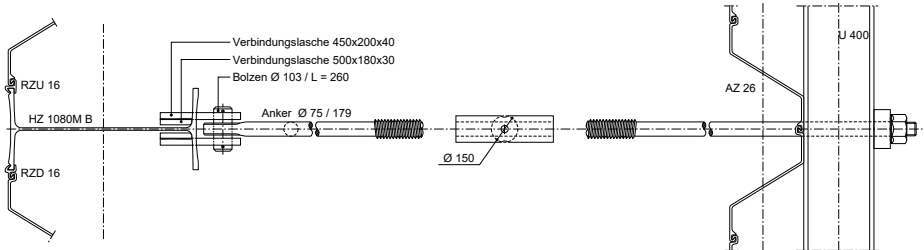
Exzentrische Verankerung für Z-Bohlen



U-Bohlen mit Gurtung entlang einer Bahnlinie



U-Profil als Gurtung für temporären Verbau



Beispiel einer Verankerung mit HZ<sup>®</sup>-M Anschluss (links) und Spundwand mit Gurtung (rechts)



Wasserdichter Anschluss für einen Verpressanker



Schrägpfahlanschluss

## 9.17. Spundwandabdeckungen

Nach dem Ende der Rammung kann es erforderlich sein, die Spundwand mit einer Abdeckung aus Stahl oder Stahlbeton zu versehen. Es können vorgefertigte Elemente verwendet werden. Eine Beschichtung ist bei Bedarf möglich. Mit Hilfe von entsprechenden Systemschalungen kann auch ein Ort beton-Kopfbalken hergestellt werden.

Eine detaillierte Empfehlung mit Allgemeine Bauartgenehmigung zur „Schneidenlagerung auf Spundbohlen“ ist bei ArcelorMittal erhältlich. Ebenso ein Programm zur Dimensionierung des Kopfbalkens. Hauptsächliches Anwendungsgebiet sind Wasserbauwerke oder Gründungen von Gebäuden und Brücken, bei denen die Spundwand als verbleibendes Gründungselement zur Abtragung von Lasten eingesetzt wird.



Abdeckung mit Stahlprofil



Brückenwiderlager mit planmässiger Einleitung vertikaler und horizontaler Kräfte



## 9.18. Messungen am bestehenden Bauwerk

Um Aussagen über die Standsicherheit eines Bauwerks machen zu können, ist es notwendig den Profiltyp, die Stahlgüte und die Profillänge zu kennen. Für den Fall, dass keine Bestandsunterlagen eines Bauwerks mehr vorhanden sind, lassen sich durch spezielle zerstörungsfreie Messmethoden zumindest grundlegende Aussagen zu Wanddicke und Profillänge machen.

Die noch vorhandene Wandstärke kann mit Hilfe von Ultraschall Messgeräten bestimmt werden. Die Messungen können sowohl über als auch unter Wasser durchgeführt werden. Um Messfehler möglichst gering zu halten, ist eine gute Fixierung des Messkopfes an der Wand erforderlich, auch sollte die Oberfläche gereinigt sein. Werden Messungen im Abstand von mehreren Jahren gemacht, muss darauf geachtet werden, dass immer an der gleichen Stelle gemessen wird.

Die nachträgliche Bestimmung der Länge von Spundbohlen oder Pfählen im Boden kann über seismische Messungen mit guter Genauigkeit ( $<0,5$  m) bestimmt werden.

Sind aufwendige Messkampagnen oder grössere Reparaturen an Hafenumauern durchzuführen, können mit Hilfe von mobilen Docks Teile einer Wand trocken gelegt werden.

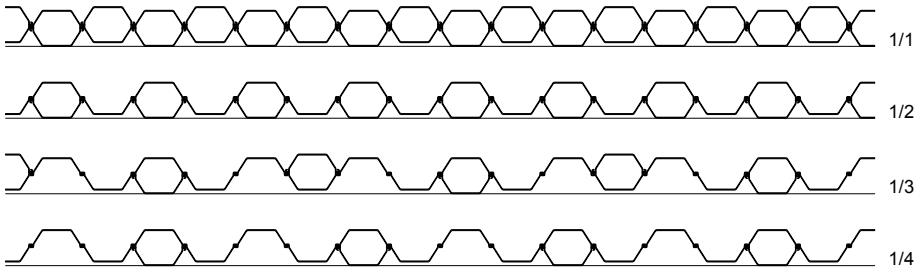
## 9.19. Kastenpfähle ("Boxpiles")

Stahlspundwände können sehr einfach zu Systemen mit hoher Biegetragfähigkeit kombiniert werden. Z- und U-Spundbohlen können zu Kastenprofilen zusammengesetzt und verschweisst werden. Dies kann auch noch nachträglich auf der Baustelle erfolgen, falls die statischen Erfordernisse sich kurzfristig geändert haben. In Verbindung mit normalen Spundwänden als Zwischentafeln können wirtschaftliche kombinierte Wände hergestellt werden.

Der Einbau erfolgt, wie in Kapitel 4.4 und 5.5 beschrieben, mittels Vibrationsbär und Schlagramme.



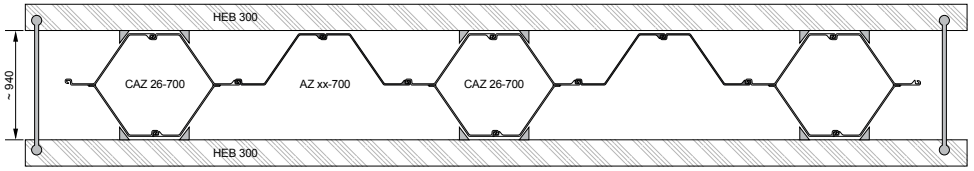
Z-Kastenpfahlwand (CAZ): Ausführung entweder mit Zwischentafeln oder als reine Pfahlwand möglich



U-Kastenpfahlwand in verschiedenen Ausführungsvarianten

Der Vorteil der Kastenpfähle liegt darin, dass Schlösser bereits vorhanden sind und der Systemabstand dem der Spundwand entspricht. Weitere Vorteile können sich aus dem Transport ergeben, falls die Spundbohlen erst auf der Baustelle zu Kastenpfählen verschweisst werden. Das Stossen von Pfählen zu grösseren Längen ist, mit entsprechender Vorbereitung, ohne weiteres möglich. CAZ-Pfähle sind bereits in Längen von über 70 m eingebaut worden. Meist werden Kastenpfähle ohne Anker genutzt, da die hohe Systemsteifigkeit eine freistehende und voll eingespannte Wand zulässt. Sind

Ankeranschlüsse vorzusehen, ist eine sorgfältige Planung notwendig, um ein leichtes Einbauen auf der Baustelle zu gewährleisten.



Beispiel für eine CAZ-Rammführung



Fertiggestellte Wand aus AZ® Kastenpfählen (CAZ)



Lagerfläche von CAZ

## 9.20. Schweißen und Stösse

Das Anschweißen von Konsolen, Panzerblechen oder anderen Bauteilen, sowie das nachträgliche Verlängern von Spundbohlen, HZ®-M-Pfählen oder HP-Pfählen, z.B. nach erfolgter Probelastung, ist ohne weiteres auf der Baustelle möglich. Die Schweißfacharbeiter müssen die entsprechende Qualifikation vorweisen. Es sind die einschlägigen lokalen Normen und Regelwerke zu beachten. Weitere Hinweise finden sich unter anderem in der EAU 2020 (Kap. 8.1.4.2) oder in der Broschüre von ArcelorMittal „Schweißen von Stahlspundwänden“.



Beispiel für einen Baustellenstoss



Ausrichten der korrekten Schlossposition um ein Ineinandergleiten der Profile zu erlauben

## 9.21. Rammrichtung

Im Gegensatz zu Spundbohlen mit Knopf- und-Klaue Schloss gibt es bei den von ArcelorMittal verwendeten Larssen Schlössern keine bevorzugte Rammrichtung. Es wird allerdings oft das gerade Schloss voraus gerammt, da standardmässig Doppelbohlen in Form I gewählt werden.

Es sollte immer vor dem Einbau geprüft werden, dass die gelieferte Form den Planvorgaben entspricht.

Sind Eckschlösser bauseits anzubauen, sollen diese immer bereits an einer Spundbohle montiert eingebracht werden und für die nächste Bohle als Fädenschloss dienen. Ein einzelnes Eckprofil weist keine ausreichende Rammsteifigkeit auf und kann meist nicht alleine abgeteuft werden.



Spundwandarbeiten am Flughafen Frankfurt

## 10. Flachprofile AS 500®

### 10.1. Allgemeines

Flachbohlenkonstruktionen kommen zum Einsatz, wenn sehr harte Bodenschichten vorherrschen und ein Einrammen in den Boden nicht möglich ist. Durch die Gewichtskraft der gefüllten Zelle wird eine ausreichende Standsicherheit erreicht. Es sind sowohl verbleibende als auch temporäre Bauwerke möglich. Eine Wiederverwendung der gezogenen Spundbohlen ist natürlich möglich. Flachprofile sind für den Bau von Kreiszellenfangedämmen bestimmt. Für den Fall, dass die Ringzugkräfte zu groß werden, ist eine Flachzellenkonstruktion erforderlich. Die nominelle Breite der Profile ist 500 mm. Die einzelnen Profiltypen unterscheiden sich durch die Materialdicke (9,5–13,0 mm) und die zulässige Zugfestigkeit der Verbindungsschlösser (Stahlgüte). Für die Dimensionierung des erforderlichen Außendurchmessers des Rammgerüsts ist eine nominelle Profilbreite von 503 mm anzunehmen. Damit ist garantiert, dass der Durchmesser ausreichend ist für den notwendigen Ringschluss der Bohlen vor der eigentlichen Rammung. Die Flachbohle ist die einzige Spundwandart, die eine festgelegte Schlosszugfestigkeit haben muss. ArcelorMittal kann hier Werte bis zu 6000 kN/m garantieren.

In sehr weichen Böden kann eine Zellenkonstruktion sinnvoll sein, um durch Bodenverbesserung innerhalb der Zelle eine stabile Struktur zu schaffen.

Zellenlösungen können optimiert werden, indem z.B. die Zwickelzellen nur einseitig nach vorne ausgebildet oder zur Rückseite gestaffelt gekürzt werden. Sogenannte offene Zellenkonstruktionen sind nur im Zusammenhang mit entsprechend intensiver Prüfung zu empfehlen und nicht für Erdbebengebiete geeignet. Je nach Bohlenlänge ist ein theoretischer Abstellwinkel von 4,0–4,5° anzunehmen.

### 10.2. Lagerung

Aufgrund ihrer geringen Biegefestigkeit müssen Flachprofile vorsichtig gelagert, transportiert und aufgenommen werden. Zwei oder mehr Anschlagpunkte sind je nach Bohlenlänge zu berücksichtigen. Durch falsche Lagerung oder ungünstiges Anheben können bleibende Verformungen eintreten, die eine Verwendung der Bohlen schwierig, schlimmstenfalls unmöglich machen.



Werden die Bohlen übereinander gestapelt, ist darauf zu achten, dass sämtliche zwischengelegten Hölzer in der gleichen Flucht liegen. Ungleichmäßig verteilte Abstandhalter können zu plastischen Verformungen führen. Die Höhe der Bohlenstapel ist der Tragfähigkeit des Bodens anzupassen. Beschichtete Bohlen sind stets mit größtmöglicher Sorgfalt zu behandeln. Farbe zum Reparieren eventueller Beschädigungen kann mitgeliefert werden.

### 10.3. Transport



Zum Verladen von Flachprofilen sind Hubtraversen oder eingefädelt gelochte Profilabschnitte zu verwenden. In besonderen Fällen können werkseitig Bohlenpakete zusammengestellt werden, die über die Transportstrecke eine ausreichende Sicherheit gegen Beschädigung bieten können.

### 10.4. Aufnehmen



Bohlen bis etwa 15 m Länge können für das Einfädeln am oberen Ende angeschlagen werden. Das Anschlagen am Bohlenkopf kann über die normale Lieferlochung erfolgen. Bohlen größerer Länge sind zusätzlich in den Drittelpunkten zwei- oder dreimal anzuschlagen, um plastische Verformungen infolge Überbeanspruchung auszuschließen. Die Verwendung von Doppel- oder sogar Dreifachbohlen kann vorteilhaft sein, da sie eine größere Steifigkeit als Einzelbohlen aufweisen. Zudem wird die Einbringzeit verkürzt.

Vibrationsbären mit Mehrfachklemmzangen zum gleichzeitigen Einbau mehrerer Spundbohlen sind verfügbar.

### 10.5. Einrammvorgang

#### 10.5.1. Führungsgerüst

Das Aufstellen und Rammen der wenig knick- und biegesteifen Flachprofile erfordert besondere Sorgfalt. Es sind Führungskonstruktionen zu verwenden, die der Zellenform angepasst sind und mindestens zwei Führungsebenen aufweisen. Die einzelnen Bohlen sind an der Führung zu fixieren, bis die Zelle geschlossen ist. Zweckmäßigerweise beginnt man mit den Abzweigbohlen. Zur Kontrolle der Lage sollten die Positionen der einzelnen Bohlen am Führungsrahmen markiert werden.

Die Konstruktion und Form der Führung hängt von der Größe des Fangedamms und den Baustellenbedingungen ab. Die Führung kann im Wasser positioniert werden oder an Land vorgefertigt sein. Wichtig ist, dass die verschiedenen Ebenen vertikal verschiebbar sind, um beim Verfüllen der Zelle entsprechend gezogen werden zu können. Die Führungsebenen können als Arbeitsplattform für die Mannschaft ausgebildet werden (Siehe hierzu auch Kapitel 4.5 und 4.6).

#### 10.5.2. Aufstellen von Flachprofilen

Nachdem das Führungsgerüst sicher verankert ist, werden die Bohlen um die Arbeitsplattform angeordnet und fixiert, bis die Zelle geschlossen ist. Erst dann kann die Rammung in Abschnitten von nicht mehr als 1,0 m bis 1,5 m beginnen. Durch die limitierte Rammung wird eine gegenseitige Führung der Bohlen sichergestellt und ein Ausweichen des Bohlenfusses verhindert. Eine stetige

Kontrolle der Vertikalität ist äußerst wichtig und spart letzten Endes oft Zeit während des Aufrichtens der Zelle. Die genaue und lotrechte Positionierung der Abzweigbohlen minimiert die tatsächlichen Einbautoleranzen. Die Bohlen sollen von den beiden benachbarten Abzweigbohlen ausgehend zur Mitte hin aufgestellt werden, Die mittlere Bohle oder das mittlere Bohlenpaar dient dabei dazu, den Bogen zu schließen, da hier die größte Flexibilität gegeben ist. Vor dem Auffüllen der Kreiszelle müssen die ersten zwei bis drei Bohlen der Zwickelzellen in die Abzweigbohle eingestellt werden, da ein späteres Einfädeln durch die unvermeidliche Aufweitung der Zelle erschwert wird. Eine Zelle besteht immer aus einer geraden Anzahl von Profilen.



### 10.5.3. Einrammen

Das Einbringen der Profile erfolgt je nach Bodenbeschaffenheit mit Vibratoren oder leichten Schlaghämmern. In jedem Fall sollte die Ausrüstung leicht und einfach zu handhaben sein, um ein stoffweises Einbringen zu erleichtern. Die Verwendung von Doppelbohlen oder Dreifachbohlen kann empfehlenswert sein, da dabei die Rammenergie auf eine größere Fläche übertragen wird.



Je nach Bodenbeschaffenheit, können die Rammarbeiten durch Bohren oder Spülen erleichtert werden.

Nach Fertigstellung der Zelle muss sichergestellt werden, dass ungeeigneter Boden daraus entfernt wird, bevor mit gut verdichtbarem Material die Zelle gefüllt wird. Sobald die Füllung ein sicheres Niveau erreicht hat, wird das Führungsgerüst herausgehoben und zur nächsten Position versetzt.



## 10.6. Rückbau

Der Rückbau von Zellenkonstruktionen erfolgt in umgekehrter Reihenfolge, wie der Aufbau. Zunächst wird ca. 1/3 der Zellenfüllung ausgebaggert, dann muss der Führungsrahmen wieder eingesetzt werden, um die Zelle für den Rückbau zu stabilisieren. Es folgt der weitere Aushub. Zumindest die



Abzweigbohlen müssen an der Führung fixiert werden, um unkontrolliertes Verhalten der Restzelle zu verhindern, denn nachdem die erste Flachbohle gezogen worden ist, verlieren die Ringzugkräfte ihre Rückverankerung über die Bohlenschlösser. Im weiteren Verlauf sollte die Füllung soweit möglich entfernt werden, um die Ringzugkräfte bestmöglich abzubauen. Weitere Einsätze der ausgebauten Bohlen sind ohne weiteres möglich. Das Material ist visuell auf Beschädigungen zu überprüfen und gegebenenfalls zu reparieren, falls eine Wiederverwendung vorgesehen ist.

Die Zelle kann auch durch partielles Ausbaggern und anschließendes Abbrennen der Bohlen zurückgebaut werden, wenn eine weitere Verwendung nicht geplant ist.

## 10.7. Annahmen zum Zeitaufwand

Um den Zeitaufwand zum Erstellen einer Zelle abzuschätzen, sind die Randbedingungen der Baustelle in Betracht zu ziehen. Besonders die geografische Lage der Baustelle, Windlasten, Wellengang, Strömungen über und unter Wasser, Einbau von Land oder Wasser aus sowie die vorhandene Gerätetechnik haben signifikanten Einfluss auf die Arbeitsleistung.

Beispiel zur Kalkulation der Bauzeit einer Kreiszelle mit 12 m Durchmesser und Spundbohlenlänge 16 m, Einbau im Wasser :

- Aufbau und Positionierung des Führungsgerüsts ~1,5 Tage
- Stellen, Ausrichten und temporäre Fixierung der Bohlen bis zum Ringschluss ~ 2 Tage
- Abschnittsweises Rammen der Bohlen auf Soll-Tiefe in maximal 1m-Schritten ~ 1 Tag
- Mittiges Verfüllen der Zelle und Rückbau des Führungsrahmens ~1,5 Tage

Anschließend wird die nächste Zelle nach gleichem Zeitplan gebaut.

Die Zwickelzellen sind normalerweise für den Bauzeitenplan unkritisch.



# 11. Ziehen von Spundbohlen

## 11.1. Allgemeines

Spundbohlen können mit geeigneten Methoden und Geräten auch nach langer Standzeit im Boden wieder gezogen werden. Es gilt die Faustregel, dass zum Ausbau mindestens die gleiche Energie notwendig ist, wie zum Einbau benötigt wurde.

Eine Wiederverwendung der gezogenen Bohlen ist gut möglich, Verluste durch Abschneiden von deformierten Bohlenköpfen müssen einkalkuliert werden.

## 11.2. Maßnahmen vor und während des Einrammens

Ist es geplant, Spundbohlen wieder zu ziehen, so ist diese Leistung detailliert im Bauablauf einzuplanen. Einflussgrößen für die Planung sind: Profilart, Bohlenlänge, Einrammtiefe, Bodenverhältnisse, Standzeit im Boden, Rammverfahren, sowie eventuelle Wiederverwendung. Zur Verringerung der Reibung und um zu verhindern, dass die Schlösser sich mit der Zeit zusetzen und sich schwer bewegen lassen, wird empfohlen, die Schlösser mit Fett oder Beltan® Plus zu füllen. Eine planmäßig erforderliche Schlossdrehung ist durch Konstruktionsbohlen zu ersetzen, die im Fädelschloss die Nulllage gewährleisten und so die Schlossreibung minimieren.

In dichtgelagerten Böden kann der Einsatz von verlorenen Rammshuhen Erleichterungen beim Ziehen bewirken. Der Rammschuh wird unmittelbar vor dem Eindringen auf den Bohlenfuß geschoben und nicht angeschweißt. Durch den Überstand des Schuhs über die Spundwand entsteht entlang der Mantelfläche beim Einrammen eine aufgelockerte Zone.

Eine möglichst lotrechte Stellung der Bohle im Boden erleichtert die Zieharbeit. Um dies zu erreichen, ist ein rammsteifes Profil vorzusehen und ein Rammverfahren, das die Einbringung lot- und fluchtgerechter Bohlen gewährleistet.

Um den Aufwand für die Zieharbeiten abzuschätzen, ist es zweckmäßig, für jede Bohle einen Rammbericht zu führen. Die Rammberichte weisen im besten Fall die Bohlen aus, die beim Ziehen die geringsten Widerstände erwarten lassen. Wenn keine Rammprotokolle der Spundbohlen verfügbar sind, sollte die erste zu ziehende Bohle sorgfältig ausgesucht werden. In diesem Fall sollte so lange an den Bohlen in der Mitte einer Wand probiert werden, bis sich eine Bohle bewegen läßt.

Wird eine Unterwasserbetonsohle gegen die gerammte Spundwand gegossen, so kann bei Sohldicken zwischen ein und zwei Metern davon ausgegangen werden, dass die horizontale Komponente der Vibrationskraft ausreicht, um den Verbund zwischen Beton und Stahl zu lösen, so dass die Spundbohlen ohne Probleme wieder gezogen werden können. Wird über grössere Höhen das Betonbauwerk gegen die Spundwand errichtet, ist es ratsam, eine Trennschicht aus Kunststoff zwischen Beton und Stahl vorzusehen und die Spundwandtäler mit Kies oder anderem rolligen Material zu füllen. Beim Ziehen wird so der entstehende minimale Spalt zwischen Boden und Bauwerk geschlossen.

Als rechnerischer Wert für die Reibung zwischen Betonsohle und Spundwand kann aus Erfahrung 100-1500 kN/m<sup>2</sup> angenommen werden, immer abhängig von den lokalen Randbedingungen, der Oberflächenbeschaffenheit und den Rammtoleranzen.

### 11.3. Ziehvorgang, Abschätzen der Ziehkraft

Zum Ziehen stehen Vibratoren und Pfahlzieher von unterschiedlichen Größen zur Verfügung. Sie lockern die Bohle aus ihrer Stellung und bringen sie in Verbindung mit der Zugkraft des Trägergerätes in Bewegung. Die Gerätegröße sollte nicht kleiner sein, als das benutzte Einbaugerät. Es muss unbedingt beachtet werden, dass die zulässigen Zugkräfte nach den Angaben der Gerätehersteller eingehalten werden.

Die Verbindung des Vibrators mit der Bohle erfolgt wie beim Einbringen über die hydraulischen Klemmzangen. Bei den Pfahlziehern verwendet man Klemmzangen oder Greiferzangen mit Durchsteckbolzen. Aufgeschweißte Kopfverstärkungen können bei schweren Zieharbeiten erforderlich werden.

Lässt sich die erste Bohle in einer geschlossenen Wand trotz aller Vorkehrungen nicht lockern, so kann Schlagen mit einem Rammhammer eventuell den Verbund zwischen Spundbohle und Boden lösen.

Lockerungsbohrungen in den Bohlentälern oder auch Entspannung des Bodens mit Spülhilfe können hilfreich sein. Während des Ziehens ist das Kühlen der Schlösser mit Wasser zu empfehlen.

Die notwendige Zugkraft am Kran kann mit Hilfe folgender Formel abgeschätzt werden:

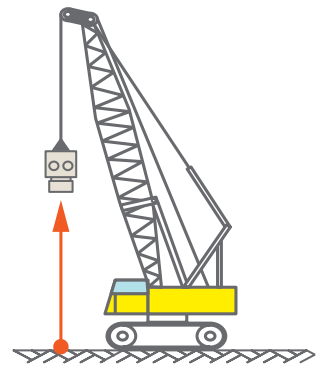
$$F_{\text{zug}} = [(G_v + G_R) \cdot g] + \frac{(R_M \cdot A)}{10}$$

Wobei:

$F_{\text{zug}}$	= Kraft am Kranhaken	in kN
$G_v$	= Gewicht Vibrationsbär	in kg
$G_R$	= Gewicht Rammgut	in kg
$g$	= 9,81	in m/s <sup>2</sup>
$R_M$	= Mantelreibung Bohle-Boden	in kN/m <sup>2</sup>
$A$	= wirksame Oberfläche Spundwand	in m <sup>2</sup>

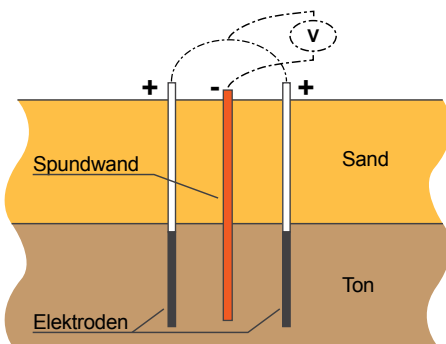
Für den Einfluss der Schlossreibung und als Sicherheitsfaktor ist ein zu definierender Prozentsatz auf  $F_{\text{zug}}$  aufzuschlagen.

Die zulässigen Lastgrenzen der verwendeten Geräte sind einzuhalten.



schematische Darstellung des Ziehvorgangs

### 11.4. Elektro-Osmose



Schema der Elektro-Osmose

In kohäsiven Böden kann der Ziehwiderstand nach langer Standzeit sehr hoch werden.

Über die Verweildauer ist der Boden an der Spundbohle „angewachsen“ und einen festen Verbund mit dem Rammgut eingegangen. Der seit langem bekannte Effekt der Elektro-Osmose kann zur Entwässerung bindiger Bodenarten genutzt werden. Kehrt man den Effekt um, wird das gebundene Porenwasser entlang der Spundwand angereichert, was dazu führt, dass der Herausziehewiderstand einer Spundbohle verringert werden kann. Derzeit laufen Forschungsprojekte, um die Methode für die Baupraxis nutzbar zu machen.

## 11.5. Wiederverwendung von Spundbohlen

Sowohl Z-Profile, aber besonders U-Profile als Einzel- oder verpresste Doppelbohlen, eignen sich zur mehrfachen Verwendung. PU-Profile mit verstärkten Ecken sorgen für große Rammsteifigkeit und vermindern den Verschleiß pro Einsatz. Die Wahl einer höheren Stahlgüte wirkt sich positiv auf die Lebensdauer aus, auch sollte ein Mindestwiderstandsmoment von  $1800\text{cm}^3/\text{m}$  vorgesehen werden. Je nach Bodenbeschaffenheit und Rammverfahren können fünf bis zehn Einsätze möglich sein. Reparaturmaßnahmen und Längenverkürzungen durch Abschneiden von deformierten Bohlenköpfen oder Bohlenfüßen sind einzukalkulieren. Ein Verfüllen der Fädelschlösser wirkt sich ebenfalls positiv auf die Lebensdauer der temporären Spundwand aus (siehe Kap. 7.5).

Gebrauchte Bohlen sollen den Toleranzmaßen der DIN EN 10248-1/2 entsprechen, die Schlösser müssen intakt und gängig sein, sowie frei von Hindernissen.

Im Sinne der Kreislaufwirtschaft sind Stahlspundwände immer eine gute und wirtschaftliche Lösung für alle Arten von Tief- und Wasserbaumaßnahmen.



## 12. Sanierung von Schäden

In den meisten Fällen sind unentdeckte Hindernisse im Baugrund die Ursache für übermäßige Verformungen und eventuell nachfolgende Schlossschäden. In seltenen Fällen können auch systematische Einbaufehler vorliegen, oder im Larssenschloss gefangener und verfestigter Feinsand blockiert die nachfolgend einzubauende Bohle. Gegenmaßnahmen hierzu sind in Kapitel 7.5 beschrieben. Weitere grundsätzliche Informationen finden sich im Kapitel 8.1.8 der EAU 2020.

### 12.1. Verformungen am Bohlenkopf

Bei sehr langen Rüttelzeiten mit nur geringem Rammfortschritt oder bei sehr schwerer Schlagrammung kann es vorkommen, dass der Kopf der Spundwand plastisch verformt wird, oder schlimmstenfalls ein Bruch durch Materialversprödung eintritt, der im Allgemeinen um die Klemmzangen und durch die Lochung der Spundwand verläuft.

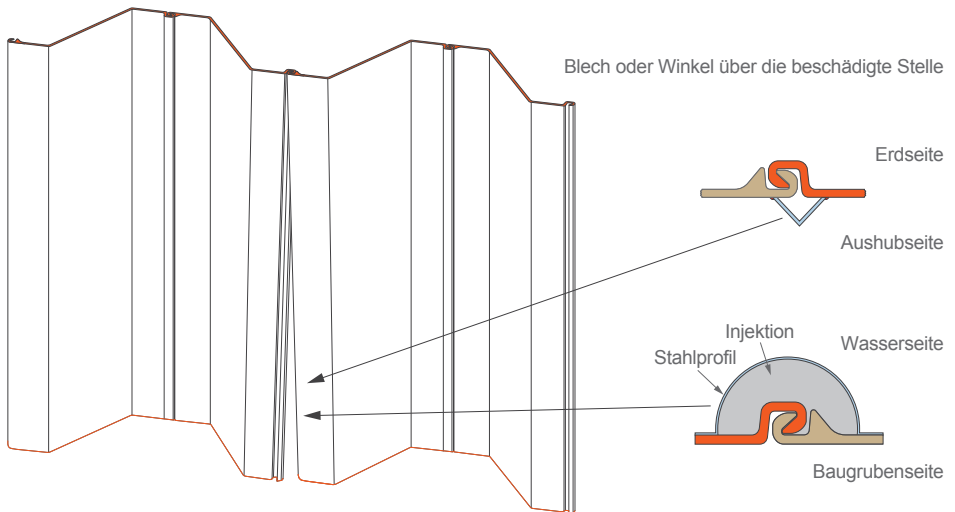
Der verformte oder gerissene Teil der Spundbohle sollte durch Abbrennen entfernt werden. Ist im weiteren Verlauf der Arbeiten das Anbringen eines Kopfbalkens vorgesehen, sollte Kapitel 8.1.4.4 der EAU 2020 („Abtrennen der Kopfenden gerammter Stahlprofile“) beachtet werden. Entsprechende Längenzuschläge zur berechneten Spundwand können bereits in der Planung vorgesehen werden. Abgenutzte Reibflächen von Klemmzangen sind rechtzeitig auszutauschen, um eine übermäßige Belastung des Bohlenkopfes während des Rüttelns zu vermeiden.

## 12.2. Schlossschäden

Ist es trotz einwandfreier Bauausführung im Wandverlauf zu Schlossschäden gekommen, so müssen diese in ihrer Lage dokumentiert werden, um die am besten geeignete Sanierungsmethode zu bestimmen. Insgesamt ist die Sanierung von Wänden aus Spundwandprofilen relativ einfach durchzuführen.

Es können, auch unter Wasser, Bleche aufgeschweißt werden, die Bodenverlust und damit einhergehende Oberflächensetzungen verhindern. Auch kann eine Spundwand vor die beschädigte Stelle gerammt und der entstandene Zwischenraum mit Beton verfüllt werden. Hinter der Wand sind HDI-Säulen (Hochdruckinjektion) eine wirkungsvolle Option, um die Wandintegrität wiederherzustellen.

Das Ziehen und Wiedereinbauen von unbeschädigten Ersatzprofilen kann in Betracht gezogen werden. Kopfverformungen, wie in Kapitel 12.1 beschrieben, sind zu vermeiden.



Sanierungsmassnahmen bei Schlossschäden

## 13. Referenzen

### Literatur:

Vibrofonçage, Guide Technique 2016

DIN EN 12063 Ausgabe 1999-05 : Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten - (Spezialtiefbau) - Spundwandkonstruktionen

Technical European Sheet Piling Association (TESPA) manual on the installation of steel sheet piling.

DIN EN 10248-1, DIN EN 10248-2 Ausgabe 1995-08 Warmgewalzte Spundbohlen aus unlegierten Stählen

Teil1: Technische Lieferbedingungen

Teil2: Grenzabmasse und Formtoleranzen

EAU 2004, EAU 2012, EAU 2020 und zugehörige Jahresberichte

EA Pfähle, 2. wesentlich überarbeitete und erweiterte Auflage Januar 2012, 2022 und zugehörige Jahresberichte

Zulassung Schneidenlagerung Z\_15.6-235

CUR (Schlossräumer)

### Copyrights:

ABI GmbH, Niedernberg, Deutschland

ArcelorMittal Sheet Piling

Bauer-RTG

Birminghammer

Dawson Construction Plant Ltd, MiltonKeynes, UK

Delmag

Dieseko

D & K Spezialtiefbau

Giken Europe B.V.

IHC-IQIP

Liebherr, Nenzing

Menck

Pajot

PTC





# Anhang A

## A.1. Rammprotokoll – Schlagammung

<b>Rammprotokoll</b> Baustelle _____ Kunde _____	Datum _____ Seite _____
--	----------------------------

Rammgerät _____ Fahrer _____ Spundwandprofil _____ Profillänge _____	
---	--

Spund- bohle Nr.	Typ	Ramm- tiefe m	Fall- höhe m	Schläge pro 100 cm Eindringung	Zeit	Bemerkungen





Erdleicherstärkung, Deutschland | ©D&K

Ausgabe 08.2022

### Hinweis

Alle Informationen und Empfehlungen in dieser Dokumentation dienen nur der allgemeinen Information. Die Angaben sind ohne Gewähr. Für fehlerhafte oder fehlende Angaben sowie missbräuchliche Nutzung der gemachten Angaben kann ArcelorMittal Commercial RPS S.à r.l. nicht haftbar gemacht werden. Nutzung der Informationen auf eigene Gefahr und eigenes Risiko. ArcelorMittal Commercial RPS S.à r.l. kann in keinem Fall für Schäden, Verdienstausfall, finanzielle Verluste oder andere Nachteile, die sich aus der Nutzung der Informationen aus dieser Dokumentation oder aus der Unmöglichkeit ihrer Nutzung ergeben sollten, haftbar gemacht werden. Änderungen am Lieferprogramm vorbehalten

Gedruckt auf FSC Papier

Das FSC-Siegel bescheinigt, dass das Holz aus Wäldern oder Anpflanzungen stammt, die in einer verantwortungsvollen und nachhaltigen Weise bewirtschaftet werden (laut den Prinzipien des FSC: Berücksichtigung der sozialen, wirtschaftlichen, ökologischen und kulturellen Bedürfnisse der heutigen und künftigen Generationen). [www.fsc.org](http://www.fsc.org).



**ArcelorMittal Commercial RPS S. à r.l.**  
Spundwand

66, rue de Luxembourg  
L-4221 Esch sur Alzette (Luxemburg)

[spundwand@arcelormittal.com](mailto:spundwand@arcelormittal.com)  
[spundwand.arcelormittal.com](http://spundwand.arcelormittal.com)

 Hotline: (+352) 5313 3105

 ArcelorMittalSP

 ArcelorMittal Sheet Pilling (group)