

Tiefgaragen

Vergleichsstudie | Deutschland

Teil 1 | Wirtschaftlichkeitsanalyse



Hinweis

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde 2023 vom deutschen Ingenieurbüro GRBV Ingenieure im Bauwesen für ArcelorMittal durchgeführt. Die Entwurfsannahmen wurden für eine Tiefgarage in Bodenverhältnissen ermittelt, die im nördlichen Raum Deutschlands anzutreffen sind.

ArcelorMittal betont, dass GRBV eine objektive und unvoreingenommene Fallstudie durchgeführt hat. Die Analyse ist eine rein hypothetische Fallstudie mit ihren Einschränkungen in Bezug auf die Zuverlässigkeit von Kosten und Verfahren, da diese Aspekte in den verschiedenen Märkten und/oder Untergründen sehr veränderlich unterschiedlich sein können.

Bei dieser Fallstudie handelt es sich nicht um ein projektspezifisches Design. Daher können weder ArcelorMittal noch GRBV Ingenieure im Bauwesen für Entscheidungen verantwortlich gemacht werden, die in bestimmten Projekten auf der Grundlage des Designs oder der Schlussfolgerungen des von GRBV erstellten Berichts getroffen werden.

Der Text in dieser Broschüre ist eine Zusammenfassung des Berichts. Er wurde bearbeitet, um sich auf die wichtigsten Punkte des Berichts mit einem Minimum an technischen Erläuterungen zu konzentrieren. Obwohl der Inhalt und die Schlussfolgerungen mit dem ursprünglichen Bericht übereinstimmen, fügten die Ingenieure von ArcelorMittal einige Bemerkungen und Kommentare hinzu, die die im ursprünglichen Bericht enthaltenen Informationen ergänzen. Einige Abbildungen, Tabellen und Skizzen wurden bearbeitet, entfernt oder durch neue ersetzt, die von ArcelorMittal erstellt wurden. Bei Fehlern in der Transkription sind nur der Text und andere Elemente aus dem Originalbericht von GRBV verbindlich.

Der Originalbericht von GRBV ist auf Anfrage erhältlich.

Inhaltsverzeichnis

Teil 1 – Wirtschaftlichkeitsanalyse	2
1. Einleitung	3
2. Randbedingungen	4
2.1. Geometrie/Bauteile	4
2.2. Bauphasen	4
2.3. Baugrundverhältnisse	5
2.4. Hydrologische Angaben	5
2.5. Berechnungsgrundlagen	5
2.6. Konstruktive Maßnahmen	6
3. Untersuchte Bauweisen	9
3.1. Spundwand, permanent	9
3.2. Spundwand, temporär	10
3.3. Überschnittene Bohrpfahlwand, permanent	11
3.4. Schlitzwand, permanent	12
4. Zusammenfassung	13
4.1. Bemessungsergebnisse	13
4.2. Kosten	14
5. Auswertung	15
5.1. Bewertungskriterien	15
5.2. Bewertung	16
6. Fazit	18
7. Referenzen	19

Teil 1 - Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Stadtentwicklung steht vor vielen Herausforderungen, da die Bevölkerung in den Städten schneller wächst als der verfügbare (bezahlbare) Wohnraum. Großstädte kämpfen darum, ein Gleichgewicht zwischen Wachstum und Wohlergehen der Bürger zu finden. Lärm und Staus in der Nähe von Baustellen sind ebenfalls ein negativer Aspekt des Bauens, so dass nach Beginn eines neuen Bauprojekts die Ausführungsduer ein wichtiger Indikator ist, der bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden sollte. Stahlbauteile haben den Vorteil, dass sie als vorgefertigte Elemente auf die Baustelle geliefert werden, schnell eingebaut und direkt den Belastungen ausgesetzt werden können. Erfahrungsgemäß kann die Ausführungsgeschwindigkeit bei Stahlelementen, wie beispielsweise Spundwänden, doppelt so hoch sein wie im Vergleich zu anderen Baustoffen. Heutzutage sind die Baukosten nicht mehr der einzige Faktor, der berücksichtigt werden muss. In einigen Ländern werden ökologische und soziale Kriterien bereits im Vergabeverfahren umgesetzt, vor allem bei öffentlichen Ausschreibungen.

Im Jahr 2022 beauftragte ArcelorMittal **das deutsche Ingenieurbüro GRBV Ingenieure im Bauwesen** sich mit diesem Thema zu befassen und **mehrere Alternativen für den Bau der Außenwand von Tiefgaragen** unter durchschnittlichen Bodenbedingungen und mit einem Grundwasserspiegel in geringer Tiefe detailliert zu vergleichen. Die Fallstudie betrachtet eine zweigeschossige Tiefgarage, die mit der Standard-Bottom-up-Methode gebaut wird. Dazu wird eine abgestützte Wand mit einer unter Wasser gegossenen Betonbodenplatte ausgeführt.

In einer zweiten Phase wird auf der Grundlage der Ergebnisse der Fallstudie eine **Lebenszyklusanalyse (LZA)** durchgeführt, um den CO₂-Fußabdruck in die Auswahl der Lösung einzubeziehen, die zu den niedrigsten **Gesamtlebenszykluskosten** führt, einschließlich der Belastungen oder Vorteile des Endes der Lebensdauer (Rückbau, Recycling der Bauelemente). Die Ökobilanz wird von einem unabhängigen Experten begutachtet. Wir glauben, dass eine Ökobilanz eine faire und transparente Methode ist, um verschiedene Lösungen und Materialien,

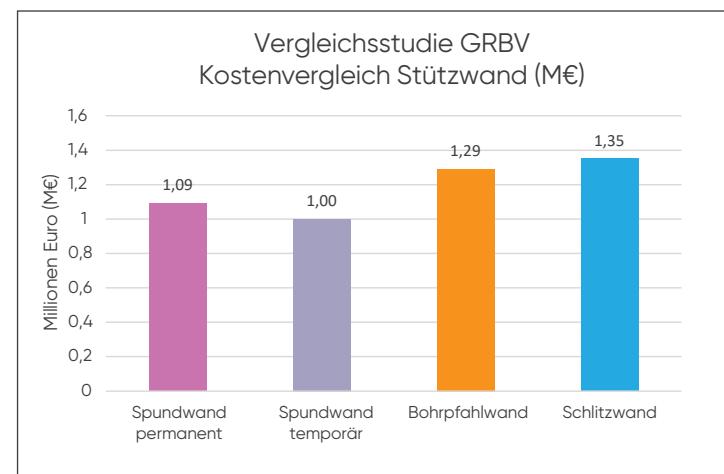
vorzugsweise auf der Grundlage spezifischer **Umwelt-Produktdeklarationen (EPD)** der Hersteller und nicht auf der Grundlage generischer Daten aus Datenbanken, zu vergleichen.

Bei der Wahl einer Lösung sind mehrere Schlüsselindikatoren zu berücksichtigen, wobei der wichtigste die Baukosten (einschließlich des Entwurfs) sind. Der Kostenindikator aus der von GRBV durchgeföhrten Analyse ist in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Die Fallstudie bezieht sich auf eine Tiefgarage mit 2 Untergeschossen, aber die Ergebnisse wären für eine 3-geschossige Tiefgarage ziemlich ähnlich. Beachten Sie, dass die Schlussfolgerungen nicht einfach auf andere Situationen oder Länder umgesetzt werden können.

Die **Spundwand ist die kostengünstigste Lösung.** Der Unterschied beträgt etwa 18 % im Vergleich zur Bohrpfahlwand und etwa 24 % im Vergleich zur Schlitzwand. Zusätzlich wurde eine temporäre Spundwandlösung betrachtet.

Kosten	Spundwand permanent	Spundwand temporär	Bohrpfahlwand	Schlitzwand
M€	1,09	1,00	1,29	1,35
Differenz	Referenzwert	- 8%	+ 18%	+ 24%

M€ = Million Euro



In dieser Fallstudie ist die Stahlspundwandlösung für die Stützwand der Tiefgarage mit 2 Ebenen mindestens 18% kostengünstiger.

1. Einleitung

In der Regel wird für die Herstellung einer Tiefgarage eine Baugrube mit Verbauwänden hergestellt. Die Wahl der Verbauart hängt im Normalfall von den gegebenen Randbedingungen wie z.B. Bodenbeschaffenheit, Grundwasserspiegel, Baugrubentiefe, logistische Gegebenheiten und Belastungen ab. Innerhalb der Baugrube wird anschließend die Tiefgarage mit Stahlbetonwänden errichtet. Die gewählte Verbauwand verbleibt entweder im Boden oder wird bei Möglichkeit wieder gezogen (nur bei Spundwänden / Trägerbohlwänden möglich).

Das beschriebene Vorgehen stellt für die Ausführung von Tiefgaragen unter bestimmten Randbedingungen eine gängige Methode und erprobte Bauweise dar. Im Hinblick auf Nachhaltigkeit, Ressourcenschonung, Raumgewinn und Wirtschaftlichkeit bieten Verbauwände als permanente Wandsysteme weitere Optimierungsmöglichkeiten.

Die folgenden Wandsysteme sollen auf die beschriebenen Punkte hin untersucht und verglichen werden:

- V1: Spundwand, permanent;
- V2: Spundwand, temporär (nur als Baugrubenwand);
- V3: überschnittene Bohrpfahlwand, permanent;
- V4: Schlitzwand, permanent.

Bei der Untersuchung werden die Randbedingungen wie Geometrie, Bodenkennwerte, Wasserstand und Baugrubensohle für alle Wandsysteme gleichgesetzt. Als Beispielprojekt wird eine innerstädtische Bebauung mit Nachbargebäuden ausgewählt.

Das zu bebauende Grundstück wird mit einem rechteckförmigen Grundriss mit den Maßen 28 x 50 m festgelegt. Der Neubau wird als ein 4-geschossiges Gebäude mit einer 2-geschossigen Tiefgarage geplant.

Die Nutzungsdauer bei Hochbauten und auch für Tiefgaragen aus Stahlbeton liegt bei 50 Jahren. Die gewählten permanenten Wandsysteme müssen diese mindestens erfüllen.

Der Umfang der Arbeit bestand darin verschiedene Alternativen zu entwerfen und die Baukosten der Wände unter Berücksichtigung finanzieller Aspekte im Zusammenhang mit der Ausführungsgeschwindigkeit zu vergleichen.

Die in diesem Projekt erhaltene Mengenermittlung dient als Input für eine nachfolgende Lebenszyklusanalyse (Teil eines anderen Projekts).



2. Randbedingungen

2.1. Geometrie / Bauteile

Das zu beplanende Baufeld wird mit einer Fläche von 28 x 50 m vorgegeben. Der Neubau soll auf einer Fläche von 28 x 28 m errichtet werden. Die Tiefgarage umfasst 2 Geschosse, welche jeweils eine lichte Raumhöhe von 2,70 m aufweisen. Im vorliegenden Beispiel wird von einem Grundwasserspiegel knapp unter der Geländeoberkante ausgegangen. Dadurch wird für die Baugrube und die Errichtung der Tiefgarage eine Unterwasserbetonsohle erforderlich. Die Unterwasserbetonsohle sorgt dafür, dass während der Bauarbeiten kein Wasser durch den Boden von unten in die Baugrube eindringen kann. Zusätzlich übernehmen die Sohle und die darin einbindenden Mikroverpresspfähle den Auftriebsdruck, welcher durch das Lenzen der Baugrube entsteht. Für die Bemessung wird eine 1,40 m starke Betonsohle plus einer Ausgleichs- / Drainageschicht von 30 cm angenommen. Zur Berücksichtigung von Toleranzen während des Aushubes werden nochmals 30 cm abgezogen. Für die Berechnung der einzelnen Systeme haben die UW-Sohle und die Verpresspfähle keinen Einfluss auf die Ergebnisse (Randbedingungen bei allen Systemen gleichgesetzt). Siehe Abbildung 2-1: Prinzipschnitt Tiefgarage.

2.2. Bauphasen

Für die Bauausführung wird der folgende Bauablauf vorgegeben:

1. Herstellung Verbau in Abhängigkeit der gewählten Bauweise
 - a. V1 - Spundwand permanent:
 - i. Auflockerungsbohrungen der Rammtrasse
 - ii. Pressen/Vibrieren der Spundwände
 - b. V2 - Spundwand temporär:
 - i. Auflockerungsbohrungen der Rammtrasse
 - ii. Pressen/Vibrieren der Spundwände
 - c. V3 - Bohrpfahlwand:
 - i. Herstellen der Bohrpfähle inkl. Betonage und Bewehrung (weitere Schritte erst nach Aushärtung des Betons)
 - d. V4 - Schlitzwand:
 - i. Herstellen der Schlitzwand inkl. Betonage und Bewehrung (weitere Schritte erst nach Aushärtung des Betons)

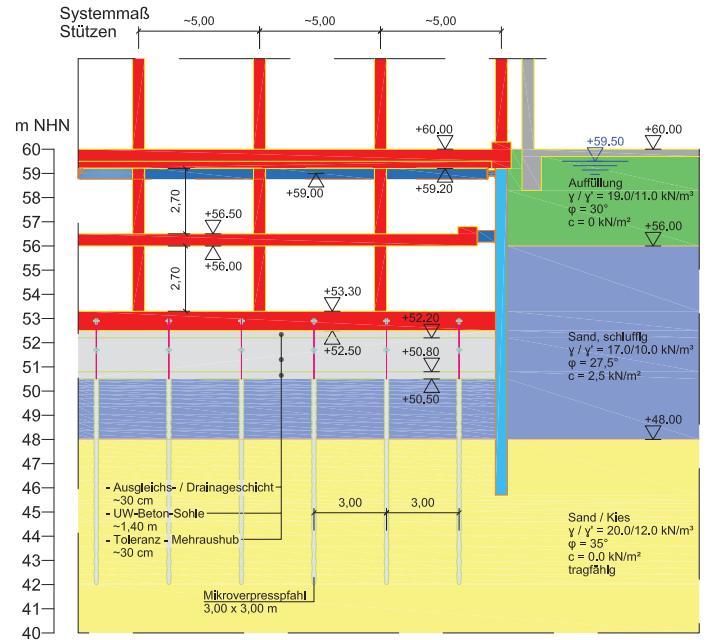


Abbildung 2-1: Prinzipschnitt Tiefgarage.

2. Einbau Steifenlage auf +59,00 mNHN (vorausgehend: Voraushub bis +58,50 mNHN + parallel Absenkung Grundwasser auf +58,00 mNHN) (BZ I)
3. Unterwasseraushub bis +50,50 mNHN (BZ II)
4. Einbau UW-Beton inklusive Ausgleichsschicht, Auftriebspfähle und Drainageschicht + Lenzen der Baugrube auf +50,50 mNHN (BZ III)
5. Betonage Sohle Kellergeschoß U2, Stützen, Decke über U2, temporäre Umsteifung von Decke über U2 an Verbauwand (\rightarrow nicht für "V2-Spundwand temporär"), Ausbau der Steifenlage (BZ IV)
6. Betonage Stützen, Decke über U1 inklusive Stahlbetonanschluss an Verbauwand (\rightarrow nicht für "V2-Spundwand temporär") (EZ), Ziehen der Spundwände temporär (V2).

2.3. Baugrundverhältnisse

Für den Baugrund wird ein gängiges, durchschnittliches Baugrundprofil mit den folgenden Schichten gewählt:

1. Auffüllung
2. Schluffige Schicht, nicht tragfähig
3. Sand-/Kiesgemisch, tragfähig

Für die einzelnen Schichten werden die in der Tabelle 2-1 angegebenen Bodenkennwerte vorgegeben.

Schicht	Nr.	Schichtunterkante	Wichte		Reibungswinkel	Kohäsion	Spitzenwiderstand Drucksonde	
			[kN/m ³]	[mNHN]				
			γ	γ'	[°]	$c_{k'}/c_{u,k}$	[kN/m ²]	[MN/m ²]
Auffüllung	1	+56,00	19	11	30	-		5
schluffige Schicht	2	+48,00	17	10	27,5	2,5		5
Sand-/Kiesgemisch	3	ab +48,00	20	12	35	-		15

Tabelle 2-1: Bodenkennwerte.

2.4. Hydrologische Angaben

Der Bemessungswasserstand liegt bei +59,50 mNHN und muss in der Baugrube abgesenkt werden. Die Absenkung erfolgt phasenweise im Zuge der einzelnen Bauphasen.

Nach Herstellung der Unterwasserbetonsole (UWBS) liegt der Baugrubenwasserstand auf der Höhe der UK Sohle mit Toleranzen bei +50,50 mNHN.

2.5. Berechnungsgrundlagen

2.5.1. Einwirkungen

Nach Fertigstellung der Tiefgarage wird der Hochbau mit 4 Geschossen errichtet. Die daraus entstehenden Vertikallasten werden über die Außenwände und Stützen in den Untergrund geleitet. Dadurch erhalten auch die Verbauten im Endzustand Vertikallasten, mit Ausnahme der temporären Spundwand. Die Vertikallast wird als Streckenlast mit $N_k = 350 \text{ kN/m}$ festgelegt.

Aufgrund der nahen Nachbarbebauung grenzt der Verbau direkt an den Bestand an. Die Nachbargebäude sind auf Streifenfundamenten flach gegründet.

Die UK des Streifenfundamentes wird mit +58,00 mNHN und einer Breite von 1,0 m vorgegeben. Die OK Fußboden des Nachbargebäudes liegt bei +60,00 mNHN.

Die Fundamentenlast wurde unter Annahme der Abmessungen und Materialien des Bestandsgebäudes mit $G_k = 350 \text{ kN/m}$ ermittelt.

Zusätzlich wird eine Last von $p_k = 5 \text{ kN/m}^2$ auf Höhe des Geländes ab Hinterkante Bestandsfundament angesetzt. Damit ist die Belastung aus dem Eigengewicht der Bodenplatte und weiterer Auflasten abgedeckt.

2.5.2. Technische Vorschriften

Die benutzten Normen, Empfehlungen und Richtlinien sind dem Kapitel 7 "Referenzen" zu entnehmen.

2.5.3. Teilsicherheitsbeiwerte

Die Teilsicherheitsbeiwerte für die Bemessung der Verbauwände werden dem EC7 (DIN EN 1997-1), Tabelle A 2.1 und A 2.3 bzw. der EAB, Tabellen A 6.1 und A 6.2 entnommen.

Gemäß EC7-1 bzw. DIN 1054 (2010) sind Baumaßnahmen für vorübergehende Zwecke in die Bemessungssituation BS-T und Dauerbauwerke in BS-P einzustufen. Für die vorliegende Untersuchung werden die Verbauarten Schlitzwand und Bohrpfahlwand als Dauerbauwerke untersucht. Die Spundwand wird jeweils als Dauerbauwerk und vorübergehendes Bauwerk untersucht.

2.5.4. Fußeinspannung

Die Ermittlung der Fußeinspannung erfolgt programmintern in Abhängigkeit von der gewählten Länge und den statischen Erfordernissen.

2.5.5. Verformung

Bei der Herstellung von Verbauwänden sind systembedingte Verformungen im Baugrund hinter und vor der Wand zu erwarten.

Spundwände werden nach EAB als biegeweiche und Bohrpfahlwände sowie Schlitzwände als biegesteife Konstruktionen angesehen. Die biegesteifen Konstruktionen gelten zusätzlich als verformungsarm.

Erfahrungsgemäß treten die in der statischen Berechnung ausgewiesenen horizontalen Verformungen zu etwa 50 % auf. Horizontale Verformungen im Baugrund haben auch immer vertikale Verformungen zur Folge.

Für die biegeweiche Konstruktion (Spundwand permanent und temporär) werden zur Ermittlung der realistischen Verformung die kritischen Bemessungsschnitte zusätzlich mit dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma = 1,0$ berechnet.

Als kritische Bemessungsschnitte werden Ergebnisse mit hoher Verformung bezeichnet. Die Verformungen im Bereich der Bestandsfundamente bis ca. 0,5 m unterhalb der UK (+57,50 mNHN) werden auf max. 30 mm begrenzt, um Schäden am Nachbargebäude zu vermeiden.

2.5.6. Dauerhaftigkeit

Um die Baugrubenwände als Außenwände im Kellergeschoss verwenden zu können, müssen die einzelnen Verbauarten in Abhängigkeit ihrer Nutzung den Anforderungen für dauerhafte Bauwerke entsprechen. Neben der Standsicherheit und Tragsicherheit muss auch die Dauerhaftigkeit der gewählten Lösung über die geplante Standzeit von 50 Jahren für Tiefgaragen gemäß DIN 1045 und DIN EN 1990 sichergestellt sein. Im Allgemeinen beschreibt die Dauerhaftigkeit die Widerstandsfähigkeit der Bauteile gegenüber äußeren Einflüssen, um deren Tragfähigkeit in dem geforderten Nutzungszeitraum sicherzustellen. Zu den äußeren Einflüssen gehören z.B. Hitze, Kälte, Feuchte und chemische oder mikrobiologische Angriffe. Die Dauerhaftigkeitsanforderungen für Wandarten aus Stahl unterscheiden sich grundsätzlich von denen aus Stahlbeton.

2.5.7. Software

Die EDV-Berechnung erfolgt mit dem Programm GGU-Retain, Vers. 11.21 von Prof. Dr.-Ing. Johann Buß und diversen Microsoft Excel Tabellen. Die geotechnischen Nachweise werden programmintern geführt und werden nicht gesondert ausgewiesen.

2.6. Konstruktive Maßnahmen

2.6.1. Wasserdichtheit

Aufgrund des anstehenden Grundwassers sind Maßnahmen für die Trockenlegung der Baugrube erforderlich. Entweder kann eine Grundwasserabsenkung durchgeführt oder

die Baugrube als eine wasserdichte Trogbaugrube ausgeführt werden. Im innerstädtischen Bereich kommt eine Grundwasserabsenkung auf Grund der Nachbarbebauung und den damit einhergehenden Risiken, wie z.B. Setzungen,

nicht in Frage. Bei einer Trogbaugrube wird das anstehende Wasser aus der Grube abgepumpt, weshalb nahezu wasserdichte Wände und eine wasserdichte Sohle mit Dichtanschluss erforderlich sind. Bei einem anstehenden natürlichen Stauer in den die Wände einbinden, kann eine Dichtsohle entfallen. Als wasserdichte Baugrubenwände kommen Spundwände, überschnittene Bohrpfahlwände und Schlitzwände zum Einsatz. Die kritischen Stellen der wasserdichten Wände sind die Verbindungsstellen der eingesetzten Wandelemente oder auch die Anschlussstellen zwischen den Wänden und Sohlen sowie anderen horizontalen Bauelementen.

Spundwand

Bei einer Spundwand werden mehrere Spundbohlen durch Schlosser miteinander verbunden. Zur Gewährleistung einer wasserdichten Baugrubenwand ist es erforderlich, die Spundwandschlosser wasserdicht auszuführen. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Einbringen von Produkten wie Bitumen oder Polymerdichtungen in die Schlosser
- Verschweißen der Bohlen
 - im Werk als Doppel- oder Dreifachbohlen (zusätzliches Dichten bzw. Schweißen vor Ort erforderlich; mit dem gewählten Einbringverfahren Pressen nicht möglich)
 - vor Ort (unterhalb des Wassers schwierig ausführbar)

Weitere mögliche Ausführungen der Dichtung mit dem Einfüllen von Bentonit, Injektionen oder Suspension kommen für einen temporären Verbau nicht in Frage.

Bohrpfahlwand

Wird eine Bohrpfahlwand überschnitten ausgeführt, ist diese als wasserdicht anzusehen. Dafür muss die Überschneidung der Pfähle ausreichend groß gewählt werden, um Toleranzen bei der Ausführung auszugleichen. In der DIN EN 1536 sind die zulässigen Abweichungen bei der Herstellung von Bohrpfählen festgehalten. Dabei wird zwischen der Abweichung in der Lage und der Neigung unterschieden. Um die Abweichung in der Lage stärker zu begrenzen kann eine Bohrschablone als Bohrhilfe verwendet werden. Bei sehr tiefen Baugruben und somit langen Pfählen ist die Abweichung in der Neigung von starker Bedeutung. Werden die genannten zulässigen Abweichungen bei der Wahl der Überschneidung berücksichtigt, sind keine

weiteren Maßnahmen für die Dichtigkeit erforderlich. Lokale Fehlstellen können mit Injektionen in den Zwickeln ausgebessert werden. Da die Wand als spätere Kellerwand dienen soll, ist auch auf die Ästhetik bei der Füllung von Fehlstellen zu achten.

Schlitzwand

Auch Schlitzwände werden mit einer Überschneidung ausgeführt. Jedoch ist die Anzahl der Fugen bei einer Schlitzwand im Vergleich zur Bohrpfahlwand wesentlich geringer. Dadurch werden auch die möglichen Fehlstellen verringert, welche ebenfalls mit Injektionen verschlossen werden können. Zusätzliche Dichtungsmaßnahmen sind bei einer Schlitzwand nicht erforderlich.

Dichtsohle

Neben der vertikalen Abdichtung ist eine horizontale Abdichtung der Baugrube zu berücksichtigen. Insbesondere die Verbindung zwischen Wand und Sohle bietet ein erhöhtes Gefährdungspotenzial für Fehlstellen und Wassereinbrüche. Bei der Herstellung der Sohle ist bei der Spundwand und auch bei der Bohrpfahlwand darauf zu achten, dass der Beton in die Zwickel bzw. die Täler fließt. Hingegen ist bei einer Schlitzwand aufgrund der geraden Vorderkante der Wand die Herstellung nicht durch die Geometrie erschwert. In Bezug auf die Dichttheit der einzelnen Wandarten mit einer Dichtsohle bieten die Wände aus Beton einen besseren Verbund zwischen Wand und Sohle als die Spundwand aus Stahl. Die Bohrpfahlwand und Schlitzwand sind im Vergleich verformungsärmer und weisen ein geringeres Risiko einer Spaltbildung auf.

2.6.2. Anschluss UWBS

Der Anschluss zwischen einer Verbauwand und einer Unterwasserbetonsohle ist bei Baugruben im Wasser oft notwendig, um eine stabile und sichere Struktur zu gewährleisten.

Je nach den spezifischen Anforderungen des Projektes und den geologischen Bedingungen vor Ort kann der Anschluss zwischen Verbauwand und Unterwasserbetonsohle durch verschiedene Methoden realisiert werden. Nachfolgend werden einige übliche Verfahren zur Errichtung der Verbindung aufgeführt:

Schweißen

Bei Spundwänden können Kraggen zur Kraftaufnahme im Bereich der geplanten Betonsole angeschweißt werden. Dies erfordert genaue Schweißverfahren und -qualifikationen, um eine starke und dauerhafte Verbindung sicherzustellen. Unter Wasser sind Schweißarbeiten schwierig auszuführen.

Vorgefertigte Verbindungselemente

In einigen Fällen können vorgefertigte Verbindungselemente wie Bolzen, Platten, Bewehrungsstäbe oder andere mechanische Verbindungen genutzt werden, um die Verbauwand mit der Unterwasserbetonsole zu verbinden.

Ohne Elemente

Die Verbindung zwischen Sohle und Verbauwand kann auch ohne zusätzliche Elemente erfolgen. Dafür ist jedoch eine sorgfältige Reinigung der Kontaktflächen unter Wasser durchzuführen. Der Abtrag der Vertikallasten erfolgt bei dieser Methode über die Reibung zwischen Beton und Stahl bzw. Beton.

2.6.3. Feuerschutz

Bei Gebäuden und deren Baumaterialien wird zwischen Baustoffklassen in Bezug auf deren Brandverhalten und Feuerwiderstandsklassen unterschieden. Baustoffklassen geben im Allgemeinen an, ob das Material brennbar

oder schwer entflammbar ist. Hingegen gibt die Feuerwiderstandsklasse an, wie viele Minuten die Funktionalität des Bauteils mindestens dem Feuer standhält. Dabei werden die drei Leistungskriterien Tragfähigkeit, Raumabschluss und Wärmedämmung zusammen berücksichtigt.

Zur Erhöhung des Feuerwiderstandes besteht für Stahlbauteile die Möglichkeit eines Beschichtungssystems. Die Beschichtung schäumt sich im Brandfall auf, wodurch der Wärmedurchgang zur Spundwand verzögert wird. Die Beschichtung bietet eine hohe Dauerhaftigkeit und zusätzlich kann ein gewünschter Farbton gewählt werden. Zum Schutz der Beschichtung kann das Aufbringen der Schicht erst nach Einbringen der Bohlen und nach dem Lenzen der Baugrube erfolgen. Die Kosten für die Beschichtung richten sich nach der angestrebten Feuerwiderstandsklasse.

Bei Stahlbetonbauteilen wird die Feuerwiderstandsklasse anhand der Betondeckung und der Betonzusammensetzung gemessen. Durch die in der DIN EN 1992-1-1 geforderte Mindestbetondeckung kann bereits die höchste Feuerwiderstandsklasse erreicht werden. Bei der Herstellung von Schlitz- und Bohrpfahlwänden wird im Vergleich zu Standard-Außenwänden eine höhere Betondeckung gewählt. Demzufolge sind keine weiteren Maßnahmen zur Erhöhung des Feuerwiderstands erforderlich.



3. Untersuchte Bauweisen

3.1. Spundwand, permanent

Die Spundwand ist eine Wand aus Stahlspundbohlen, die in den Boden gerüttelt, gerammt oder gepresst wird. Das Einbringenverfahren ist abhängig von der Beschaffenheit des Bodens. Bei steifen und festen Böden kann die Rammtrasse vor dem Einbringen durch Auflockerungsbohrungen vorbereitet werden. Die Bohlen sind über ein Schloss miteinander verbunden und können in verschiedenen Stahlsorten und Querschnitten hergestellt werden. In Bereichen mit geringem Platzangebot und bei anstehendem Wasser wird aufgrund des geringen Querschnittes und der Dichtigkeit der Spundbohlen auf die Spundwand als Baugrubenwand zurückgegriffen.

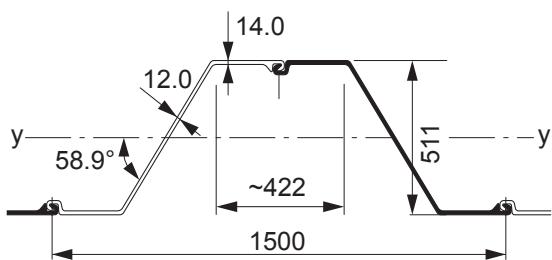


Abbildung 3-1: Profil AZ 32-750 mit Abmessungen in mm.

Die Bemessung erfolgt mit dem Spundwandprofil AZ 32-750. Zur Berücksichtigung des vorgegebenen lichten Abstandes zwischen Bestand und Herstellung der Verbauwände ergibt sich aus der Breite der Spundwand und der Breite des Rüttlers ein Abstand von $a_{Sp} = 0,90 \text{ m}$ für die Bemessung in GGU-Retain (siehe Abbildung 3-2).

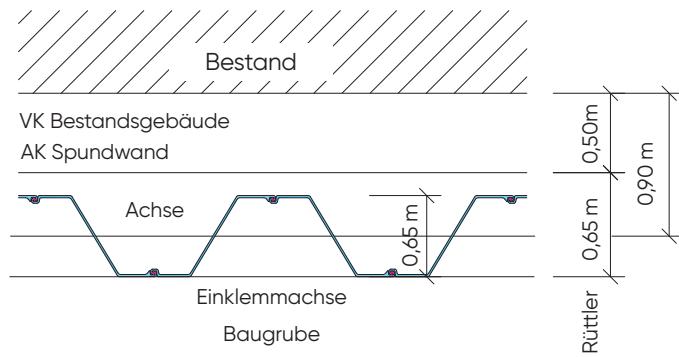


Abbildung 3-2: Abstand Achse SPW zur Außenkante Bestand.

Die Spundwand ist eine biegeweiche Konstruktion, bei der systembedingte Verformungen zu erwarten sind. Darauf ist bei der Wahl des Spundwandprofils im Bereich von setzungsempfindlichen Bauwerken zu achten. Die Dauerhaftigkeit der Spundwand hängt von ihrer Korrosionsbeständigkeit ab. Falls es durch Randbedingungen erforderlich ist, kann die Korrosionsbeständigkeit durch Beschichtungen erhöht werden. In den vorliegenden Böden ist eine sehr geringe Abtragungsgeschwindigkeit von 0,01 mm/Jahr beidseitig zu erwarten. Bei einer Standzeit von 50 Jahren ergibt sich eine Gesamtabrostung von 1,0 mm. Das entspricht einem Verlust des Widerstandsmomentes von ca. 7 %. Bei den gewählten Randbedingungen beeinflusst die Abminderung in diesem Fall nicht die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Bauwerkes. Die vorgegebene Standzeit von 50 Jahren für Tiefgaragen kann somit von der Spundwand als Außenwand erbracht werden.

Die Spundwand bietet einige Vorteile wie eine kurze Bauzeit, eine kleine erforderliche BE-Fläche, einen maximalen Flächenertrag, beherrschbare Ausführungsrisiken und sie ist kostengünstig auszuführen. Es gibt jedoch auch Nachteile wie größere Hindernisse im Baugrund, die die Herstellung stören könnten, Lärmemissionen und Erschütterungen durch das Rammen und Einvibrieren. Diese können jedoch durch das Einpressen der Spundwand umgangen werden.

Als Spundwandprofil wurde eine AZ 32-750 in der Stahlsorte S 355 GP und einer Länge von $L = 14,50 \text{ m}$ gewählt. Neben dem gewählten Profil sind auch andere Profile mit gleichwertigen Querschnittswerten ($W = 3.200 \text{ cm}^3/\text{m}$) wählbar. Bei der Wahl des Spundwandprofils ist die Grenzverformung maßgebend und nicht die Auslastung des Querschnittes. Die Länge der Spundwand ergibt sich aus dem Nachweis der vertikalen Tragfähigkeit.

Zur Aussteifung der Baugrube wurden Rohre des Querschnittes $660,4 \times 20 \text{ mm}$ gewählt. Auch hier sind gleichwertige Steifen ($W = 6.250 \text{ cm}^3$) aus anderen Profil-Reihen möglich. Das Rohrprofil wurde bei allen Varianten ausgewählt, um eine Vergleichbarkeit zu erhalten. Lediglich der Abstand und somit die erforderliche Anzahl der Steifen ist unterschiedlich und an die jeweilige Steifenlast angepasst.

Der Anschluss zwischen der Spundwand und der Stahlbetonzwischendecke bzw. Sohle im EG kann ebenfalls wie bei der UWBS durch mechanische Elemente erfolgen. Im Vergleich zum Anschluss der UWBS ist es jedoch wesentlich einfacher die Elemente zu befestigen, da die Ausführung

im Trockenen stattfinden kann. Da die Zwischendecke als Aussteifung dient ist der Anschluss kraftschlüssig auszuführen, damit die Kräfte weitergeleitet werden können. Durch die Verbindungselemente wird die Tragfähigkeit der Spundwand nicht vermindert.

3.2. Spundwand, temporär

Spundwände können nach Herstellung des Gebäudes wieder gezogen und für weitere Projekte wiederverwendet werden. Im Vergleich zur permanenten Spundwand ist dafür jedoch die Herstellung einer Kellerwand erforderlich und es resultiert eine verringerte Nutzfläche von etwa 7 % im Vergleich zu Variante 1.

Im Gegensatz zu den anderen Bauweisen erfordert die temporäre Spundwand keine Anschlusskonstruktion zwischen Wand und Zwischengeschossdecke.

Die Bemessung der temporären Wand erfolgt wie bei der permanenten Wand mit dem Profil AZ 32-750. Auch der Abstand zwischen Wand und Bestandsfundament ist mit $a_{sp} = 0,90$ m gleich groß (siehe Kap. 3.1.). Im Vergleich zu der permanenten Wand erhält die temporäre Spundwand keine Auflasten aus dem Neubau.

Die Verwendung von Spundwänden als temporäre Baugrubenwände hat sich als effektive Methode zur Realisierung von Bauprojekten etabliert. Dabei stößt man auf diverse technische Aspekte, die sorgfältig evaluiert werden müssen, um eine erfolgreiche Umsetzung zu gewährleisten. In diesem Kontext ist die biegeweiche Konstruktion der Spundwand von besonderem Interesse, da systembedingte Verformungen zu erwarten sind.

Da die Spundwand nur als temporäre Baugrubenwand verwendet wird, ist eine Untersuchung der Dauerhaftigkeit und somit des Korrosionsschutzes nicht erforderlich. Ein weiterer Aspekt ist der Feuerwiderstand, der aufgrund des temporären Einsatzes der Spundwand nicht erforderlich ist, da diese Funktion von der umgebenden Kellerwand übernommen wird.

Die gewählte Bauweise bietet diverse Vorteile wie eine kurze Bauzeit, eine geringe benötigte Baueinrichtungsfläche sowie niedrige Unterhaltungskosten. Zudem zeichnet sich das System durch Nachhaltigkeit aus, da eine

Wiederverwendung der Bohlen nach dem Ziehen möglich ist. Das Ziehen kann jedoch erst erfolgen, wenn die Sohle des Erdgeschosses fertiggestellt wurde und sie die Aussteifung der Wände übernimmt. Im Vergleich zu den anderen Varianten ist gemäß der Gesamtherstellkosten (vgl. Kapitel 4.2) die temporäre Spundwand die günstigste Ausführungsvariante.

Die logistische und geometrische Herausforderung des Ziehens der Bohlen neben bestehenden Bauwerken stellt ebenfalls eine Herausforderung dar. Das Baugerät muss dafür auf der bereits errichteten Tiefgarage platziert werden. Um die Lasten des Baugerätes abtragen zu können, sind dafür Aussteifungen in den Kellergeschossen vorzusehen.

Beim Ziehen von Bohlen ist im Nahbereich und somit im Bereich der Bestandsfundamente mit Setzungen zu rechnen.

Die Wahl des Profils AZ 32-750, S 355 GP, L = 14,50 m, oder eines gleichwertigen Profils aus einer anderen Reihe (W = 3.200 cm³/m), erfolgte aufgrund der Grenzverformungen und Tragfähigkeitsaspekte. Hinsichtlich der Querschnittsauslastung wäre auch ein schwächeres Profil möglich gewesen.

Die Berechnung der Spundwandlänge orientiert sich am Nachweis der vertikalen Tragfähigkeit, um eine sichere Stabilität der Baugrube zu gewährleisten.

3.3. Überschnittene Bohrpahlwand, permanent

Eine Bohrpahlwand besteht in der Regel aus Bohrpählen aus Ortbeton. Zur Herstellung der Pfähle stehen verschiedene Bohrverfahren zur Verfügung, welche den Randbedingungen entsprechend gewählt werden können. Auch das Wandsystem kann entsprechend der Gegebenheiten zwischen aufgelöster, tangierender oder überschnittener Pfahlwand gewählt werden. Die Bohrpfähle können bewehrt oder unbewehrt ausgeführt werden, abhängig von dem gewählten System und Tragverhalten.

Die Bohrpahlwand gilt als sehr robuste und verformungsarme Bauweise. Robust bedeutet, dass das System bei Überlastung Tragreserven durch Umlagerung aktivieren kann. Insbesondere in Bereichen setzungsempfindlicher Bauteile eignet sich die Bohrpahlwand als steife Verbauart.

Aufgrund des anstehenden Wassers bei dem vorliegenden Beispiel, ist die Bohrpahlwand überschnitten auszuführen. Die Herstellung erfolgt im verrohrten Drehbohrverfahren mit Ortbeton, welches eine erschütterungsarme Vorgehensweise darstellt. Die Wand wird im Pilgerschrittverfahren hergestellt, wobei jeder zweite Pfahl bewehrt ist, siehe Abbildung 3-3.

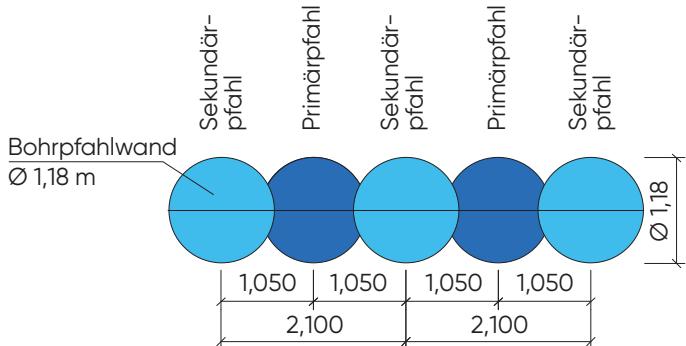


Abbildung 3-3: Prinzipskizze überschnittene Bohrpahlwand.

Der Pfahldurchmesser wird mit $d = 1,18 \text{ m}$ festgelegt. Für die Gerätetechnik erfordert es keinen zusätzlichen Platzbedarf über den lichten Abstand von $0,50 \text{ m}$ hinaus. Dadurch ergibt sich ein Abstand vom Verbau zum Bestand mit $a_B = 1,09 \text{ m}$ für die Bemessung in GGU.

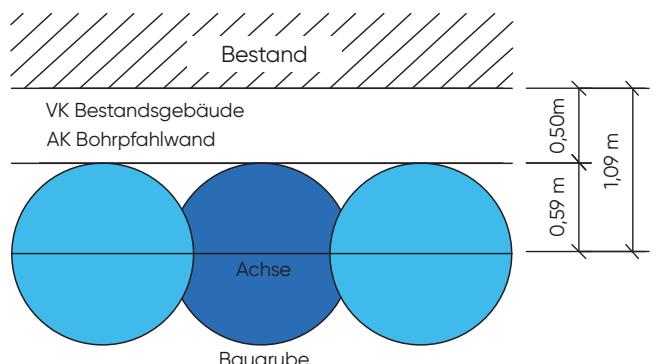


Abbildung 3-4: Abstand Achse BPW zur Außenkante Bestand.

Die Dauerhaftigkeit wird durch die Betondeckung und somit dem Schutz der Bewehrung gewährleistet, jedoch ist die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit durch Korrosion der Stahlbewehrung eingeschränkt. Die Nutzungsdauer beträgt etwa 50 Jahre. Zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit kann die Betondeckung erhöht werden. Im Vergleich zur temporären Spundwand mit Kellerwand ist die Bohrpahlwand dicker und robuster.

Die Bohrpahlwand bietet verschiedene Vorteile, wie beispielsweise die Robustheit der Bauweise, die Fähigkeit vertikale Lasten effizient in den Baugrund zu leiten, die Eignung für tiefe innerstädtische Baugruben, eine erschütterungsarme Herstellung sowie eine geringe Wandverformung. Insbesondere im Bestandsbereich ist die Bohrpahlwand eine wirkungsvolle Lösung, um Setzungen zu minimieren.

Jedoch gibt es auch Nachteile, wie eine längere Bauzeit im Vergleich zu Variante 1 und 2, höhere Bauausführungskosten von etwa 10 % als bei Variante 2, ein aufwendigerer Anschluss von Sohle und Decke sowie etwa 9 % weniger Nutzfläche im Vergleich zu Variante 1.

Für die überschnittene Bohrpahlwand wurde ein Durchmesser der Pfähle von $d = 1,18 \text{ m}$ mit einem Abstand von $a = 1,05 \text{ m}$ und einer Betongüte von C25/30 gewählt. Jeder zweite Pfahl wird unbewehrt ausgeführt. Die statisch erforderliche Länge beträgt 13,90 m für den maßgeblichen Schnitt und wird mit $L = 14,50 \text{ m}$ gewählt. Aufgrund der robusten Bauweise ist die Verformung bezogen auf die Wandhöhe mit max. 9,3 mm sehr gering.

Der Anschluss einer Bohrpahlwand an eine Zwischendecke kann mittels mechanischer Elemente wie Bolzen oder Bewehrungsstäbe hergestellt werden. Eine alternative Methode ist die Verwendung einer Gurtung, die jedoch

möglichlicherweise nicht ästhetisch ansprechend ist. Es ist zu beachten, dass die Einbindung solcher Elemente die Tragfähigkeit der Pfähle beeinflussen kann.

3.4. Schlitzwand, permanent

Als Schlitzwände werden Stützwände aus Beton oder Stahlbeton bezeichnet, welche in flüssiggestützten Erdschlitzten betoniert oder durch Betonfertigteile gefüllt werden. Die Schlitzte werden durch Schlitzwandfräsen oder Schlitzwandgreifer ausgehoben. Zur Stützung des oberen Schlitzbereiches sind Leitwände aus Beton als Vorarbeiten herzustellen. Bei der Herstellung der Wand wird zwischen dem kontinuierlichen Verfahren oder dem Pilgerschrittverfahren gewählt. Die Abdichtung der Fugen erfolgt mit einer speziellen Fugenkonstruktion.

Die Schlitzwand bietet eine robuste und wasserdichte Baugrubenwand. Die Aufnahme von hohen Lasten durch Nachbarbebauung kann ohne Probleme und mit geringen Verformungen abgetragen werden.

Die Breite des Schlitzes wird mit $t = 1,00$ m festgelegt. Für die Gerätetechnik erfordert es keinen zusätzlichen Platzbedarf über den lichten Abstand von 0,50 m hinaus. Für erforderliche Leitwände kann der 0,50 m breite Streifen verwendet werden. Dadurch ergibt sich ein Abstand vom Verbau zum Bestand mit $a_s = 1,00$ m für die Bemessung in GGU.

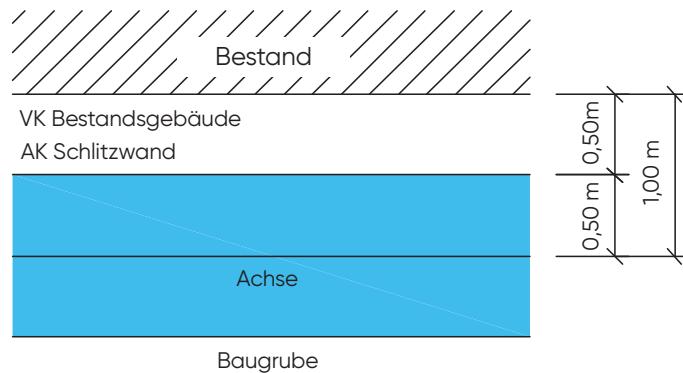


Abbildung 3-5: Abstand Achse SLW zur Außenkante Bestand.

Die Schlitzwand wird, wie auch die Bohrpahlwand, als äußerst robuste, biegesteife und verformungsarme Bauweise betrachtet. Die Dauerhaftigkeit wird durch

den Schutz der Bewehrung gewährleistet, wobei die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit aufgrund der Gefahr von Korrosion der Stahlbewehrung gefährdet sein können. Die Lebensdauer beträgt etwa 50 Jahre bis zur Sanierung, wofür eine erhöhte Betondeckung als Schutzmaßnahme dient.

Die Vorteile der Schlitzwand umfassen ihre Robustheit, die Eignung für die Ableitung von vertikalen Lasten, die Möglichkeit der Errichtung tiefer innerstädtischer Baugruben, die geräusch- und erschütterungsarme Herstellung sowie eine geringe Verformung. Aufgrund der geringen Verformungen eignet sich die Schlitzwand sehr gut im Bereich von Bestandsbauwerken.

Allerdings sind auch einige Nachteile zu berücksichtigen. Diese umfassen eine verlängerte Bauzeit im Vergleich zu Variante 1 und 2, höhere Baukosten von ca. 15 % im Vergleich zu Variante 2, einen aufwendigeren Anschluss von Sohle und Decke sowie eine reduzierte Nutzfläche von etwa 6 % im Vergleich zu Variante 1.

Die folgenden Werte wurden für die Bemessung der Schlitzwand gewählt: Breite $t = 1,0$ m, Betongüte C25/30 und Länge $L = 16,00$ m.

Die Verbindung einer Schlitzwand mit einer Zwischendecke ähnelt der Vorgehensweise bei einer Bohrpahlwand und kann über mechanische Elemente wie Bolzen oder Bewehrungsstäbe erreicht werden. Eine alternative Methode ist die Verwendung einer Gurtung, die jedoch möglicherweise keine ästhetisch ansprechende Lösung darstellt. Es ist zu berücksichtigen, dass die Integration solcher Elemente die Tragfähigkeit der Schlitzte beeinträchtigen kann. Mittels einem geplanten Überstand der Bewehrung ist es möglich, die Erdgeschossohle mit der Schlitzwand zu verbinden.

4. Zusammenfassung

4.1. Bemessungsergebnisse

In den nachfolgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Bemessung zusammengefasst:

Variante	Bezeichnung	GOK	BGS	Wandtyp	Stat. erf. Wandlänge	OK Wand	UK Wand ¹⁾	L_{Wand} OK Wand UK Wand	Gewählt L_{Wand}	Gewählt UK Wand
[-]	[-]	[mNHN]	[mNHN]	[-]	[m]	[mNHN]	[mNHN]	[m]	[m]	[mNHN]
V1	Spundwand ausgesteift, permanent			AZ 32-750; S 355 GP	14,30	60,00	45,50	14,50	14,50	45,50
V2	Spundwand temporär als Baugrubenverbau	60,00	50,50	AZ 32-750; S 355 GP	14,30	60,00	45,50	14,50	14,50	45,50
V3	Überschnittene Bohrpfahlwand, ausgesteift, permanent			Ø 1,18 m	13,90	60,00	45,50	14,50	14,50	45,50
V4	Schlitzwand ausgesteift, permanent			t = 1,00 m	15,99	60,00	44,01	15,99	16,00	44,00

* UK Wand: Mindesteinbindung von 2,5 m in das Sand-/Kiesgemisch.

* OK Sand-/Kiesgemisch: 48,00 mNHN.

Tabelle 4-1: Zusammenfassung geometrische Ergebnisse Verbauvarianten.

Variante	Bezeichnung	Max. Verformung		Bewehrungsgehalt	Max. Ausnutzung	Steife, Rohr 660,4 x 20				
		GZT ¹⁾	GZG ²⁾ TZB = 1,0					Max. Steifenlast $N_{(g+q),h,k}$	Bemessungs- last $N_{(g+q),h,d}$	Abstand
[-]	[-]	[cm]	[cm ²] / [cm ² /m]	[-]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[m]	[-]	[-]
V1	Spundwand ausgesteift, permanent	7,3	5,8	-	0,74	403	472	3,75	0,97	
V2	Spundwand temporär als Baugrubenverbau	7,3	5,8	-	0,74	318	368	4,50	0,94	
V3	Überschnittene Bohrpfahlwand, ausgesteift, permanent	0,9		84,3 cm ²	0,85	323	378	4,20	0,92	
V4	Schlitzwand ausgesteift, permanent	0,6		26,1 cm ² /m	0,78	354	409	4,00	0,87	

¹⁾ GZT Grenzzustand der Tragfähigkeit.

²⁾ GZG Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.

Tabelle 4-2: Zusammenfassung Bemessungsergebnisse Verbauvarianten.

4.2. Kosten

Die den Kostenschätzungen zu Grunde gelegten Bauteilabmessungen und -ausführungen sowie Stückzahlen beruhen auf der statischen Vorbemessung gemäß Kapitel 3.

Die Kosten beinhalten die reinen Herstellkosten der Baugrubenkonstruktion zzgl. der Kosten für die erforderlichen Erdarbeiten und Rohbauarbeiten der Tiefgarage.

Es ergeben sich folgende Gesamtherstellkosten der Varianten 1 bis 4:

V1 SPW	V2 SPW t.	V3 BPW	V4 SLW
3.193.575 €	3.100.475 €	3.390.185 €	3.584.875 €
103%	100%	109%	116%
4.080 €/m ²	3.960 €/m ²	4.330 €/m ²	4.580 €/m ²

Tabelle 4-3: Vergleich Herstellkosten Verbauvarianten 1-4.

Die Gesamtkosten der Varianten beziehen sich lediglich auf das vorliegende Beispiel und die gewählten Randbedingungen. Bei abweichenden Randbedingungen können sich die Kosten ändern. Bei ähnlichen Randbedingungen können die Kosten in €/m² als Anhaltswert verwendet werden.

Wie der Tabelle 4-3 zu entnehmen ist, sind die Kosten der Variante 2: Spundwand temporär am geringsten. Im Gegensatz dazu sind die Mehrkosten für die Spundwand als permanente Lösung (V1) mit 3 % geringfügig höher als bei Variante 2. Die Variante 3 ist mit 9 % und die Variante 4 mit 16 % in der Herstellung kostenintensiver als Variante 2.

In der Ermittlung der Gesamtkosten ist der Verlust von Einnahmen durch eine geringere Nutzfläche nicht enthalten, da es sich bei den Gesamtkosten um die reinen Herstellkosten handelt. Der Anteil ist jedoch nicht unerheblich und sollte bei der Wahl der Verbauart berücksichtigt werden. In der Bewertung der Varianten fließt die Nutzfläche durch den Vergleich der bereitgestellten Fläche mit ein.



5. Auswertung

5.1. Bewertungskriterien

Die Bewertung der Verbauarten erfolgt gemäß den vereinbarten Kriterien. Dabei werden den Kriterien unterschiedliche Wichtungen zugeordnet, um ihre Relevanz hervorzuheben. Die folgenden Bewertungskriterien werden angewendet:

1. Investitionskosten
2. Flächenbereitstellung, Nutzflächen
3. Unterhaltungskosten
4. Bauzeit
5. Baulogistik, Beeinträchtigung "Bau-Umfeld"
6. Ausführungsrisiken
7. Nachhaltigkeit

Definition der einzelnen Kriterien:

Investitionskosten

→ Die Gesamtkosten, die für die Herstellung des Bauwerkes anfallen

Flächenbereitstellung

→ Tatsächliche Fläche, welche für die geplante Nutzung zur Verfügung steht, hier Tiefgarage/Stellplätze

Unterhaltungskosten

→ Betriebskosten oder laufende Kosten, um die Nutzung des Bauwerks aufrecht zu erhalten

Bauzeit

→ Erforderliche Zeit bis zur Fertigstellung des Bauwerks

Baulogistik

→ Koordination von Materialflüssen, Arbeitskräften, Maschinen und anderen Ressourcen zur Sicherstellung des Bauablaufes und des Terminplans

Ausführungsrisiken

→ Risiken, welche bei der Ausführung der einzelnen Arbeiten auftreten können und mit welcher Wahrscheinlichkeit

Nachhaltigkeit

→ Berücksichtigung von langfristigen positiven Auswirkungen auf die Umwelt, die Gesellschaft und die Wirtschaft, ohne die Bedürfnisse zukünftiger Generationen zu gefährden

Kriterium	Wichtung	V1 Spundwand permanent	V2 Spundwand temporär	V3 Bohrpfahlwand	V4 Schlitzwand
Investitionskosten	20%	+	++	-	--
Flächenbereitstellung Nutzflächen	15%	++	-	+	+
Unterhaltungskosten	10%	++	(++)	+	++
Bauzeit	10%	++	++	+	-
Baulogistik, Beeinträchtigung "Bau-Umfeld"	10%	++	++	+	--
Ausführungsrisiken	10%	-	-	++	+
Nachhaltigkeit	25%	++	+	-	-

++ = sehr gut

+ = gut

- = weniger gut

-- = nicht gut

5.2. Bewertung

5.2.1. Ergebnisse der Bewertung

Die Bewertung der Varianten gemäß den im Kapitel 5.1 beschriebenen Kriterien kann der Tabelle auf der vorherigen Seite entnommen werden.

5.2.2. Begründung der Bewertung

Investitionskosten

Im Vergleich zu den anderen Kriterien sind die Investitionskosten mit 20% Wichtung das zweitwichtigste Kriterium. Die Kosten entscheiden darüber, ob die Realisierung eines Projektes umgesetzt wird oder nicht. Stellt sich das Projekt als unwirtschaftlich heraus, wird es nicht umgesetzt. Die Bewertung der Investitionskosten beruht auf der Kostenermittlung des Beispielprojektes (vgl. Kap. 4.2).

Flächenbereitstellung

Gerade im innerstädtischen Bereich ist die Ausnutzung von verfügbaren Flächen bis auf jeden cm essenziell. Die Gebäude sollten die vorhandene Fläche bestens ausnutzen und die größte mögliche Nutzfläche bieten, indem schlanke Tragwerke verwendet werden. Zusätzlich bietet die Nutzfläche eine Einnahmequelle über die Nutzungsdauer des Gebäudes. Die Wichtung des Kriteriums "Nutzfläche" wird mit 15 % berücksichtigt.

Die größte Nutzfläche kann mit der Variante 1 erreicht werden. Durch das schlanke Profil und durch die Verwendung der Verbauwand als Außenwand wird Baufläche eingespart. Die anderen drei Varianten hingegen haben eine größere Querschnittsfläche bzw. benötigen zusätzlich noch die Stahlbetonaußenwand. Im Vergleich zu Variante 1 bieten die Varianten 2, 3 und 4 ca. 6-9 % weniger Nutzfläche.

Unterhaltungskosten

Das Kriterium der Unterhaltungskosten wurde mit 10 % gewichtet. Die Kosten spielen im Unterhalt des Gebäudes und der Standzeit eine wichtige Rolle. Bei den Unterhaltungskosten muss zwischen den Betriebskosten für rein ästhetische Zwecke (Renovierung) und den Kosten für die Aufrechterhaltung des Bauwerks (Sanierung) unterschieden werden. Innerhalb der geplanten Standzeit

von 50 Jahren kann eine Sanierung der Stahlbetonwände und auch der Stahlwände 1 bis 2 mal erforderlich werden. Um das äußere Erscheinungsbild der Wände aufrechtzuerhalten, können bei allen Wandarten die Reinigung und Erneuerung der Oberflächen erforderlich werden. Dabei kann die Geometrie der Bohrpfahlwand sowie der Spundwand die Arbeiten im Vergleich zur Schlitzwand und zur klassischen Stahlbeton-Außenwand erschweren.

Bauzeit

Eine kürzere Bauzeit bedeutet auch weniger Kosten, da das Bauwerk schneller bezogen werden kann, Geräte für eine kürzere Zeit vorgehalten werden oder auch Arbeitskräfte für eine kürzere Zeit benötigt werden. Die Wichtung des Kriteriums der Bauzeit wird ebenfalls mit 10 % festgelegt. Aufgrund der erforderlichen Vorarbeiten bei der Herstellung der Schlitzwand (Leitwand herstellen) ist die Bauzeit bei der Variante 4 am längsten. Auch die Bohrpfahlwand erfordert Vorarbeiten, wie Herstellung einer Bohrschablone, wodurch die Variante ebenfalls eine längere Bauzeit aufweist als die Varianten 1 und 2. Bei der Herstellung der Spundwand sind keine Vorarbeiten erforderlich. Ohne die Berücksichtigung von Ausführungsrisiken bei der Herstellung der einzelnen Wände, ist die Bauzeit der Spundwand am kürzesten. Bei der temporären Lösung muss die Zeit für das Ziehen der Wände mitberücksichtigt werden.

Baulogistik

Besonders im innerstädtischen Bereich mangelt es an Bereitstellungsflächen für die erforderlichen Baustelleneinrichtungen. Eine große BE beeinträchtigt das Bau-Umfeld stärker als eine kleine BE. Eine kleine BE kann möglicherweise auf dem vorhandenen Baufeld untergebracht werden, wobei eine größere eine Straßensperrung oder Nachbarflächen erfordert. Das Kriterium Baulogistik wird mit 10 % gewichtet. Die Baustelleneinrichtung für Schlitzwände erfordert einen großen Flächenbedarf für die erforderlichen zusätzlichen Geräte (Separationsanlage, Pumpe, Mischanlage für Betonsuspension, Leitungssystem falls erforderlich). Bei der Ortbeton Bohrpfahlwand hingegen ist der erforderliche Platzbedarf für die BE (Baustelleneinrichtung) kleiner.

Zur Herstellung ist es notwendig, dass das Betonmischgerät bis an den Pfahl fahren kann. Auch für die Spundwand wird keine extra Anlage benötigt und im Vergleich zu der Bohrpahlwand muss kein zusätzlicher Fahrweg freigehalten werden.

Ausführungsrisiken

Das größte Risiko bei Verbauwänden bieten Hindernisse im Baugrund. Auch bei vorheriger engmaschiger Sondierung des Bodens können Hindernisse nie gänzlich ausgeschlossen werden. Ob ein Hindernis ein Risiko für die Ausführung wird, hängt von der Wahl der Verbauart, dem Einbringverfahren und der Art des Hindernisses (großer Stein, alter Beton, Holzpfähle etc.) ab.

Bei Spundwänden welche gerammt oder eingepresst werden ist jegliche Art von Hindernis störend. Die Spundbohlen können dann entweder nicht auf die geplante Endtiefen gebracht werden und/oder können sich beim Antreffen eines Hindernisses verbiegen und unbrauchbar werden. Ebenfalls könnte es zu einem Schlosssprung kommen, wenn die Spundwand auf ein Hindernis trifft. Sollte es sich jedoch bei dem vorliegenden Untergrund um einen geeigneten Boden zum Rammen bzw. Pressen handeln und dennoch ein Hindernis auftauchen, dann gibt es einige Möglichkeiten das Problem zu lösen. Die Möglichkeiten sind entweder mit einem nachträglichen Nachweis zu überprüfen, ob die erreichte Tiefe der Spundwand ausreichend ist, die Lage der Bohle anzupassen, wodurch sich die Geometrie der Nutzflächen ändert (Kosten), oder es werden Austauschbohrungen vorgenommen, um das Hindernis zu beseitigen. Bei der letzten Möglichkeit steigen jedoch die Kosten des Bauwerks durch den Einsatz eines Bohrgerätes und auch die Bauzeit verlängert sich.

Auch bei der Ausführung der Schlitzwand können Hindernisse im Boden hinderlich sein. Im Vergleich zur Spundwand entscheidet die Art und die Lage des Hindernisses bei der Schlitzwand, ob es entfernt werden kann oder Probleme bereitet. Befindet sich ein Großer Stein bzw. Betonbrocken oder ein Holzpfahl mittig im Schlitz kann der Greifer das Hindernis herausheben. Die Entfernung eines Gegenstandes am Rand des Schlitzes ist schwieriger umzusetzen. Zusätzlich zu einem Hindernis im Boden können beim Einsetzen des Korbes einer Schlitzwand die Fugenbänder beschädigt und somit die Dichtheit der Baugrube gefährdet werden.

Im Gegensatz zu der Spundwand und auch der Schlitzwand sind Hindernisse bei der Herstellung einer Bohrpahlwand weniger risikoanfällig. Bei Hindernissen können diese in den meisten Fällen durchbohrt werden. Der Verschleiß der Bohrkrone ist dadurch größer (Kosten erhöhen sich minimal) und die Bohrgeschwindigkeit wird verringert. Im Vergleich zur Spundwand müssen jedoch weder ein zusätzliches Gerät anrücken, noch die Geometrie geändert oder zusätzliche Nachweise geführt werden.

Nachhaltigkeit

Im Baugewerbe kann Nachhaltigkeit durch Berücksichtigung der Lebensdauer von Bauwerken, Wiederverwendung von Ressourcen sowie Minimierung des Ressourcenverbrauchs mit besonderem Blick auf Rohstoffe, welche als Mangelware und als nicht nachwachsend gelten (z.B. Sand für Betonherstellung), berücksichtigt werden.

Als Baustoff ist Stahl für das nachhaltige Bauen aufgrund der hohen Festigkeit und der Möglichkeit beim Rückbau wiederverwendet werden zu können gut geeignet. Zusätzlich können die Reste des Stahls (Schrott) zu hochwertigem Stahl wiederverwertet werden.

Stahlbeton hingegen ist aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Betonzuschlägen sowie der Erfordernis einer Betondeckung (Erhöhung des Materialverbrauchs) zum Schutz der Bewehrung nicht nachhaltig genug. Für die Zukunft ist es auch im Baugewerbe erforderlich nachhaltig zu agieren. Die Wichtung des Kriteriums Nachhaltigkeit wird als wichtigstes Kriterium mit 25 % berücksichtigt. Die nachhaltigste Lösung für die Wahl der Verbauwand bei dem vorliegenden Projekt ist die permanente Spundwand. Die Spundbohlen werden aus Stahl hergestellt und die Wand dient im Endzustand zusätzlich als Kelleraußenwand. Bei einem Rückbau des gesamten Gebäudes kann der Stahl wiederverwendet werden. Auch bei der temporären Spundwand kann der Stahl wiederverwendet werden. Die Bohlen können nach Herstellung der Tiefgarage gezogen werden und für weitere Verbauten genutzt werden. Jedoch ist im Vergleich zu Variante 1 eine Stahlbetonaußenwand erforderlich. Bei der Bohrpahlwand und Schlitzwand wird Beton als Baustoff verwendet. Beide Varianten dienen als Kelleraußenwand und erübrigen somit eine zusätzliche Kellerwand. Im Vergleich zu einer herkömmlichen Kellerwand wie in Variante 2 sind die Verbauwände jedoch massiver und erfordern somit einen höheren Materialanteil an Bewehrung sowie Beton.

6. Fazit

Die permanente Spundwand erweist sich gemäß der Bewertungsmatrix als bevorzugte Variante. Sie erzielt in den meisten Kriterien hervorragende Ergebnisse, insbesondere in Bezug auf die Nachhaltigkeit. Die permanente Spundwand ist als langfristiges Bauwerk geplant, wodurch kein Bedarf an einer zusätzlichen Außenwand besteht. Des Weiteren ist Stahl im Vergleich zu Stahlbeton bei einem späteren Rückbau leichter und besser wiederverwertbar. Lediglich im Hinblick auf Ausführungsrisiken schneidet die Spundwand etwas schlechter ab, da sie im Vergleich zu Bohrpfahlwänden und Schlitzwänden Schwierigkeiten bei der Bewältigung von Hindernissen im Boden aufweisen kann.

Abschließend lässt sich sagen, dass diese Untersuchung wichtige Grundlagen für zukünftige Projekte legt. Mit Blick auf die Zukunft steigt auch in der Baubranche das Bedürfnis nach neuen und effizienteren Lösungsansätzen für herkömmliche Ausführungen. Mit der Untersuchung wurde dargelegt, dass ein Umdenken möglich ist und in Bezug auf den Bau von Tiefgaragen künftig auch andere Ausführungen eine bessere Option bieten können.



7. Referenzen

Deutsche Normen, Empfehlungen und Richtlinien, die in dieser Fallstudie von GRBV verwendet werden.

Normen

DIN 1054	Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1.
DIN 4020	Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2.
DIN 4084	Baugrund – Geländebruchberechnungen.
DIN 4085	Baugrund – Berechnung des Erddrucks.
DIN 4124	Baugruben und Gräben, Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten.
DIN EN 1990	Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.
DIN EN 1991	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke.
DIN EN 1992	Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken.
DIN EN 1993	Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten.
DIN EN 1997	Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik.
DIN EN 12063	Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Spundwandkonstruktionen.
DIN EN ISO 14688	Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden sowie die jeweiligen Nationalen Anhänge.

Literatur

- [1] Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugruben", EAB, 6. Auflage, 2021.
- [2] Empfehlungen des Arbeitskreises "Pfähle", EA-Pfähle, 2. Auflage, 2012.
- [3] Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" Häfen und Wasserstraßen, EAU, 12. Auflage, 2020.
- [4] Handbuch Eurocode 7 – Geotechnische Bemessung – Band 1: Allgemeine Regeln, 1. Auflage, 2011.
- [5] Handbuch Eurocode 7 – Geotechnische Bemessung – Band 2: Erkundung und Untersuchung, 1. Auflage, 2011.
- [6] Schneider Bautabellen für Ingenieure, 21. Auflage, 2014.



Hinweis

Alle Informationen und Empfehlungen in dieser Dokumentation dienen nur der allgemeinen Information. Die Angaben sind ohne Gewähr. Für fehlerhafte Angaben 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 in Luxemburg

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.

ArcelorMittal Commercial RPS S.à r.l.
Spundwand
66, rue de Luxembourg
L-4221 Esch-sur-Alzette
spundwand@arcelormittal.com
spundwand.arcelormittal.com