

Bemessung von Baugrubenwänden unter Berücksichtigung der Grundwasserströmung

Sonja Letzelter, Bundesanstalt für Wasserbau

Lara Dechant, Bundesanstalt für Wasserbau

Dr.-Ing. Bernhard Odenwald, Bundesanstalt für Wasserbau

Einleitung

Umschließungswände von Baugruben, deren Sohle tief unter dem außerhalb der Baugrube anstehenden (Grund)-Wasserspiegel liegt, sind starken Kräften durch die Wasserdrücke und durch die maßgeblich von der Grundwasserströmung beeinflussten Erddrücke ausgesetzt. Für die Bemessung von Baugrubenwänden wird oft eine hydrostatische Wasserdruckverteilung angenommen. Dabei wird diese Annahme als auf der sicheren Seite liegend betrachtet. Um dies genauer zu untersuchen, wird im nachstehenden Beitrag der Einfluss unterschiedlicher Ansätze zur Berücksichtigung des Grundwasserdrucks und der Grundwasserströmung auf die erforderliche Mindesteinbindetiefe unter der Baugrubensohle und die Beanspruchung der Baugrubenwand untersucht. Bei offener Wasserhaltung an der Baugrubensohle wird unterschieden zwischen:

- hydrostatischem Wasserdruckansatz beidseitig der Wand,
- linearem Grundwasserpotentialabbau sowohl auf der Außenseite als auch auf der Baugrubenseite der Wand und
- linearem Potentialabbau auf der Außenseite der Wand und hydrostatischem Wasserdruckansatz auf der Baugrubenseite aufgrund der Anordnung von Entspannungsbrunnen baugrubenseitig der Wand.

Die Berechnungen basieren auf dem üblicherweise für die Dimensionierung von Spundwänden verwendeten Verfahren von Blum, bei dem die Bemessungsgrößen unabhängig von den Baugrundverformungen ermittelt werden. D. h. für die Ermittlung der Einwirkungen aus aktivem Erddruck sowie der Erdwiderstände wird von einer starren, sich ausschließlich verdrehenden Wand ausgegangen. Weitere Erläuterungen zur Spundwandbemessung nach Blum sind in EAB (2021) gegeben. Bei den hier durchgeführten Untersuchungen wird jeweils eine voll eingespannte, frei auskragende Spundwand und eine im Baugrund frei aufgelagerte, am Kopf ausgesteifte Spundwand zugrunde gelegt. Zum Vergleich wird zusätzlich eine im Baugrund frei aufgelagerte Spundwand mit einer Aussteifung an der Baugrubensohle durch eine Unterwasserbetonsohle betrachtet.

Modell

Das für die Berechnungen verwendete grundlegende Modell mit einer Baugrubenwand in einem Gewässer, die in den aus Festgestein gebildeten Baugrund einbindet, ist in Abbildung 1 dargestellt. Auf der Außenseite der Baugrubenumschließungswand befinden sich der maßgebende Wasserspiegel auf NHN+9,0 m und die Felsoberfläche auf NHN+1,5 m. Die trockengelegte Baugrubensohle auf der Innenseite der Baugrubenwand weist eine Höhe von NHN+ 0,0 m auf,

wodurch sich eine Wasserspiegeldifferenz zwischen der Wasser- und der Baugrubenseite der Wand von 9 m ergibt. Für die Berechnungen wird vereinfachend angenommen, dass der auf der Wasserseite anstehende Fels zwischen NHN+1,5 m und NHN+0,0 m stark verwittert ist, so dass in diesem Bereich kein Potentialabbau bei der Wandumströmung angesetzt wird. Dadurch ergeben sich für den Potentialabbau gleiche wirksame Einbindelängen der Wand auf der Wasserseite und der Baugrubenseite. Der auf die Baugrubenwand wirkende, resultierende Wasserdruck für den Wasserdruckansatz A (hydrostatischer Wasserdruck) ist ebenfalls in Abbildung 1 dargestellt.

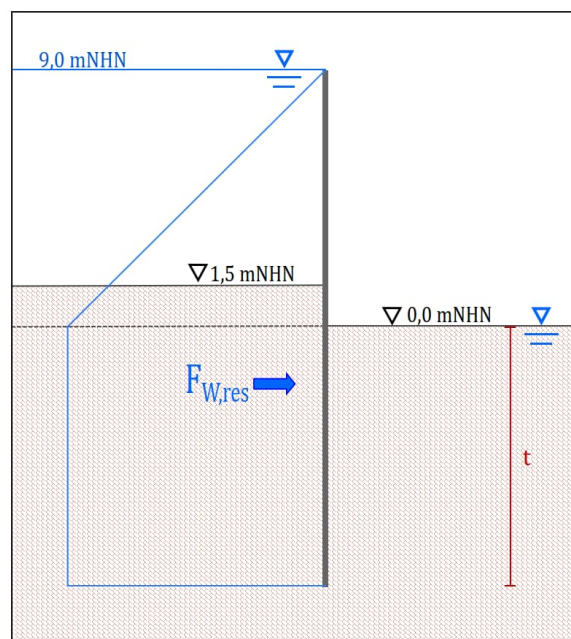


Abbildung 1: Grundlegendes Berechnungsmodell mit Wasserdruckansatz A

Für die Bemessung der Baugrubenwände wird als Baugrund vereinfachend ein homogener Fels mit den in Tabelle 1 folgenden Parametern angesetzt. Die angesetzten Scherparameter sind als Gebirgsparameter des Felses zu verstehen, da angenommen wird, dass keine Trennflächen des Felses in Richtung möglicher Scherfugen verlaufen.

Tabelle 1: Felsparameter für die Modellrechnungen

Felsparameter	Einheit	Wert
charakteristischer Wert des Reibungswinkels	φ'_k in $^\circ$	35
charakteristischer Wert der Kohäsion	c'_k in kN/m^2	15
Feuchtwichte	γ in kN/m^3	24
Wichte unter Auftrieb	γ' in kN/m^3	14
Neigung der Wand	α in $^\circ$	0
Neigung der Geländeoberfläche	β in $^\circ$	0
Aktiver Wandreibungswinkel	$\delta_a = 2/3 \varphi'_k$ in $^\circ$	23,33
Passiver Wandreibungswinkel	δ_p in $^\circ$	0

Um den Nachweis der Summe der Vertikalkräfte sicher zu erfüllen, wird in den Berechnungen ein passiver Wandreibungswinkel von $\delta_p = 0$ angesetzt, wodurch sich die Mindesteinbindetiefe der Spundwand erhöht. Die Ermittlung des aktiven Erddrucks und des passiven Erdwiderstands erfolgt mithilfe des Ansatzes von ebenen Gleitflächen. Falls erforderlich, wird für den aktiven Erddruck der Mindesterddruck nach EAB (2021) verwendet. Die Bemessung der Baugrubenwände erfolgt unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte für die vorübergehende Bemessungssituation nach EAB (2021).

Die Dimensionierung der Wandlänge erfolgt auf Grundlage des Nachweises des Erd-(Fels-)Widerlagers, so dass die aus den Bemessungswerten der Einwirkungen aus Wasserdruck und aktivem Erddruck ermittelte Widerlagerkraft B (bzw. C) gerade dem Bemessungswert des maximal mobilisierbaren Erd-(Fels-)Widerstands entspricht (Ausnutzungsgrad $\mu = 1,0$). Basierend darauf werden zur Dimensionierung des Spundwandquerschnitts der Querkraft- und der Momentenverlauf sowie das Bemessungsmoment ermittelt.

Wasserdruckansätze

Beim hydrostatischen Wasserdruckansatz wird auf beiden Seiten der Wand eine hydrostatische Wasserdruckverteilung entsprechend dem jeweils anstehenden Wasserstand angesetzt. Dabei wird am Wandfuß eine der Wasserstandsdifferenz entsprechende Wasserdruckdifferenz angenommen (Ansatz A). Dies ist jedoch nur gerechtfertigt, wenn der Wandfuß in eine nahezu wasserundurchlässige Baugrundsicht einbindet, so dass die Baugrubenwand im Baugrund nicht signifikant umströmt wird.

Bei einem durchlässigen Baugrund, der sowohl aus einem Lockergestein als auch aus einem klüftigen Festgestein bestehen kann, ist nach EAB (2021) jedoch der Einfluss der Umströmung der Baugrubenwand auf die Erdrücke (bzw. Felsdrücke) zu berücksichtigen. Auf der Wasserseite erhöht sich die Wichte des Baugrunds aufgrund der Strömung des Wassers in Richtung des Spundwandfußes, während die Wichte des Baugrunds auf der Baugrubenseite durch das nach oben strömende Wasser reduziert wird (EAB 2021). Dabei ist die Änderung der Wichte abhängig vom hydraulischen Gradienten, der sich durch den Potentialabbau entlang der Baugrubenwand ergibt. In den hier unter Berücksichtigung der Wandumströmung durchgeführten Berechnungen wird vereinfachend ein linearer Potentialabbau angenommen. Da sich im Allg. bei der Zuströmung zur Baugrube eine Konzentration der Strömung infolge des begrenzten Strömungsquerschnitts einstellt, ist der Potentialabbau auf der Baugrubenseite der Wand zumeist größer als auf der Außenseite. Hier wird jedoch zur Vereinfachung der Berechnung vorausgesetzt, dass jeweils die Hälfte des Potentialabbaus auf der Wasserseite und auf der Baugrubenseite der Wand erfolgt (Ansatz B).

Bei der Berücksichtigung von Entspannungsbrunnen auf der Baugrubenseite entlang der Wand wird angenommen, dass sich durch die Wirkung der Entspannungsbrunnen auf der Baugrubenseite an der Wand eine hydrostatische Wasserdruckverteilung einstellt. Dadurch erfolgt der Abbau der Potentialdifferenz zwischen Wasser- und Baugrubenseite vollständig auf der Wasserseite der Wand (Ansatz C). Dadurch vergrößert sich der hydraulische Gradient auf der Wasserseite der Baugrubenwand, was gegenüber Ansatz B zur einer weiteren Erhöhung der Wichte des

Festgesteins infolge der vertikal nach unten gerichteten Grundwasserströmung führt. Auf der Baugrubenseite der Wand wird infolge der Wirkung der Entspannungsbrunnen dagegen von einer hydrostatischen Wasserdruckverteilung und demnach von einer zu vernachlässigenden vertikalen Strömung ausgegangen.

Variante 1: Baugrubenwand für Baugrube mit Unterwasserbetonsohle

In dieser Variante wird angenommen, dass vor dem Lenzen der Baugrube ein Aushub unter Wasser bis NHN-1,5 m und danach der Einbau einer wasserdichten Unterwasserbetonsohle bis NHN+0,0 m stattgefunden hat. Dadurch findet nach dem Lenzen der Baugrube keine Umströmung der Spundwand statt, so dass der Abbau der gesamten Potentialdifferenz innerhalb der Unterwasserbetonsohle erfolgt. Der auf die Wand wirkende, resultierende Wasserdruck wirkt auf der Wasserseite der Wand nur bis zur Unterkante der Unterwasserbetonsohle (mit der resultierenden Kraft $F_{W,res}$). Unterhalb der Unterwasserbetonsohle ist der beidseitig auf die Wand wirkende Wasserdruck ausgeglichen.

Für die Berechnung wird angenommen, dass die Unterwasserbetonsohle wesentlich steifer ist als der Fels und damit als unverschiebliches Auflager (Steife) für die Wand wirkt. Vereinfacht wird diese Steifenkraft S auf Höhe von NHN-0,75 m (halbe Höhe der Unterwasserbetonsohle) auf der Baugrubenseite angesetzt. Um dieses Auflager (Steife) verdreht sich die Spundwand, so dass sie sich oberhalb in Richtung Baugrubenseite und unterhalb in Richtung Wasserseite verdreht (Abbildung 2). Dementsprechend wirkt eine aus aktivem Erddruck resultierende Kraft E_{akt} auf der Wasserseite oberhalb der Steife und auf der Baugrubenseite unterhalb der Steife. Unterhalb der Steife wirkt auf der Wasserseite die aus dem mobilisierten Erdwiderstands resultierende Kraft B . Für die Ermittlung der erforderlichen Einbindetiefe t wird von einer im Baugrund frei aufgelagerten Spundwand ausgegangen.

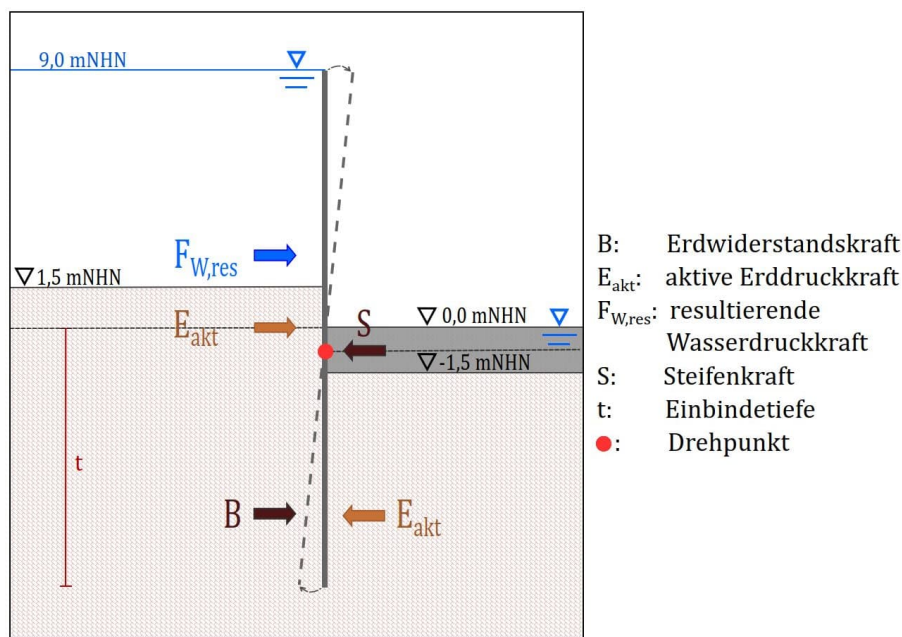


Abbildung 2: Statisches Modell für Baugrubenwand mit Unterwasserbetonsohle

Variante 2: Voll eingespannte, frei auskragende Baugrubenwand

Bei der Bemessung von frei auskragenden, im Baugrund voll eingespannten Baugrubenwänden (Abbildung 3) werden im Allg., nach dem vereinfachten Ansatz von Blum dimensioniert. Für voll bzw. teileingespannte Spundwände wird bei diesem Verfahren in der Zone des Rammtiefenzuschlags der Wasserdruck auch bei einer Umströmung der Wand vernachlässigt. Da die Umströmung der Spundwand und die daraus resultierende Potentialverteilung jedoch einen Einfluss auf die Spundwandlänge hat, wird in diesem Beitrag eine andere Methode zur Berechnung der Spundwandlänge verwendet.

Bei dem Verfahren nach Blum werden für die Bemessung von Baugrubenwänden die anzusetzenden Kräfte bis zu einem theoretischen Fußpunkt aus dem Momentengleichgewicht um den theoretischen Fußpunkt berechnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die Baugrubenwand um diesen Punkt verdreht (EAB 2021). In diesem Fall wird vereinfachend und auf der sicheren Seite liegend nach Blum eine Ersatzkraft C angesetzt, in der die unterhalb des theoretischen Fußpunktes wirkenden Erddruckkräfte zusammengefasst werden. Zudem wird unterhalb des theoretischen Fußpunktes ein Rammtiefenzuschlag berücksichtigt, der nach EAB (2021) für voll eingespannte Spundwände mindestens 20 % der Einbindetiefe der Spundwand beträgt. Im Bereich des Rammtiefenzuschlags werden sowohl die resultierende Wasserdruckdifferenz als auch die Beeinflussung des aktiven Erddrucks und des Erdwiderstands durch die Strömungskräfte bei Umströmung der Wand vernachlässigt.

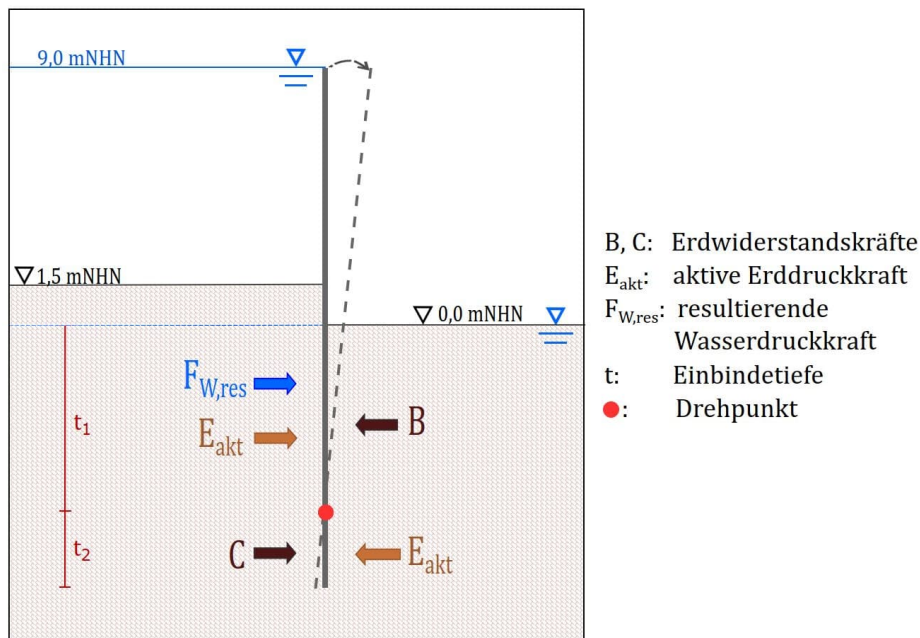


Abbildung 3: Statisches Modell für voll eingespannte, frei auskragende Baugrubenwand

Bei voll eingespannten, frei auskragenden Spundwänden hat die Umströmung des Spundwandfußes unterhalb des theoretischen Fußpunkts jedoch einen nicht zu vernachlässigbaren Einfluss auf die erforderliche Spundwandlänge. Deshalb wird in diesem Beitrag die Einbindelänge t der voll eingespannten Wand in den Baugrund nicht mit dem Verfahren nach Blum bestimmt. Hier

erfolgt eine vollständige Berechnung der unbekanntenen Größen: erforderliche Teileinbindetiefe t_1 und aus dem mobilisierten Erdwiderstand auf der Baugrubenseite resultierende Kraft B oberhalb des theoretischen Fußpunkts sowie erforderliche Teileinbindetiefe t_2 und aus dem mobilisierten Erdwiderstand auf der Wasserseite resultierende Kraft C unterhalb des theoretischen Fußpunkts (Abbildung 3). Die gesamte erforderliche Einbindetiefe der Wand ergibt sich aus der Summe der Teileinbindetiefen ($t = t_1 + t_2$).

Für die Berechnung werden oberhalb des Drehpunktes auf der Wasserseite die aus dem aktiven Erddruck resultierende Kraft E_{akt} und auf der Baugrubenseite die Auflagerkraft B , die sich aus dem mobilisierten Erdwiderstand ergibt, angesetzt. Unterhalb des Drehpunktes wird dagegen auf der Baugrubenseite die aus dem aktiven Erddruck resultierende Kraft E_{akt} und auf der Wasserseite die aus dem mobilisierten Erdwiderstand resultierende Auflagerkraft C angesetzt. Da beim Momentengleichgewicht um den Drehpunkt die Auflagerkraft C nicht wie beim Verfahren von Blum entfällt, ist eine deutlich aufwändigere Berechnung der unbekanntenen Auflagerkräfte B und C sowie der Teileinbindelängen t_1 und t_2 erforderlich. In den Berechnungen werden die Wasserdruckansätze A , B und C zugrunde gelegt. Auf der Wasserseite der Baugrubenwand wird in den Ansätzen B und C zusätzliche eine resultierende Kraft $F_{W,res}$ aus den wirkenden Wasserdrücken berücksichtigt. Infolge der Wandumströmung entstehen hydraulische Gradienten, die eine Änderung der effektiven Wichten des Festgesteins bewirken.

Variante 3: Frei aufgelagerte Baugrubenwand mit Kopfaussteifung

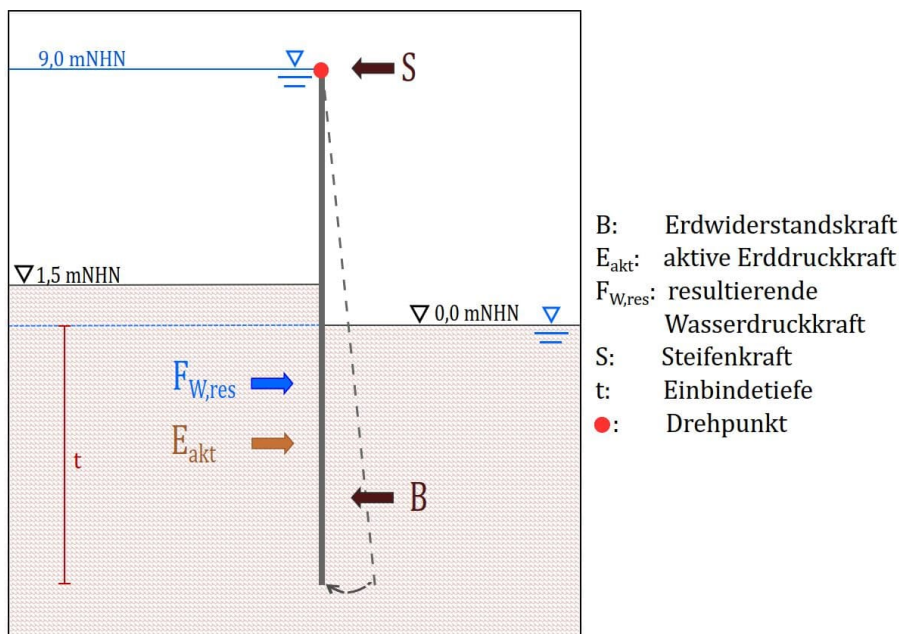


Abbildung 4: Statisches Modell für frei aufgelagerte Baugrubenwand mit Kopfaussteifung

In dieser Variante wird eine auf der Baugrubenseite mit einer Steife am Spundwandkopf abgestützte Baugrubenwand berücksichtigt. Auch hier wird davon ausgegangen, dass die Steife als unverschiebliches Auflager für die Wand wirkt, so dass sich die Spundwand um diesen Punkt in

Richtung Baugrubenseite verdreht. Als Beanspruchungen sind auf der Wasserseite die aus den Wasserdrücken resultierende Kraft $F_{W,res}$ sowie die aus dem aktiven Erddruck resultierende Kraft E_{akt} anzusetzen. Auf der Baugrubenseite wirkt die stabilisierende, aus dem Erdwiderstand resultierende Kraft B (Abbildung 4). Für die Ermittlung der erforderlichen Einbindetiefe t der Baugrubenwand wird von einer im Baugrund frei aufgelagerten Spundwand ausgegangen. Wie bei Variante 2 werden in den Berechnungen zur Ermittlung der erforderlichen Einbindetiefe t der Spundwand und der Schnittgrößen die Wasserdruckansätze A, B, und C betrachtet.

Ergebnisse

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt.

Tabelle 2: *Ergebnisse der Variantenberechnungen*

Variante	statisches System	Wasserdruckansatz	Einbindelänge t in m
1	frei aufgelagert, Unterwasserbetonsohle		4,84
2A		hydrostatisch	14,24
2B	voll eingespannt, frei auskragend	linearer Potentialabbau	14,64
2C		Entspannungsbrunnen	12,90
3A		hydrostatisch	5,67
3B	frei aufgelagert mit Kopfsteife	linearer Potentialabbau	6,31
3C		Entspannungsbrunnen	4,48

Bei der Variante 2 (voll eingespannte, frei auskragende Spundwand) werden deutlich größere erforderliche Einbindetiefen berechnet als bei den Varianten 1 und 3, bei denen eine freie Auflagerung der Baugrubenwand im Baugrund sowie eine Aussteifung der Wand berücksichtigt sind.

Bei den Varianten 2 und 3 ergibt sich die größte erforderliche Einbindetiefe bei Ansatz des linearen Wasserdruckansatzes (Ansatz B) unter vereinfachter Berücksichtigung der Wandumströmung und der daraus resultierenden Wasserdruck- und Strömungskräfte. Diese ist größer als die ermittelte erforderliche Einbindetiefe bei Verwendung des hydrostatischen Wasserdruckansatzes (Ansatz A). Die geringste erforderliche Einbindetiefe ergibt sich jeweils bei Berücksichtigung von Entspannungsbrunnen (Ansatz C) auf der Baugrubenseite entlang der Baugrubenwand.

Schlussfolgerungen

Aus den Berechnungsergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Bei Verwendung des vereinfachten hydrostatischen Wasserdruckansatzes beidseitig der Baugrubenwand (Ansatz A) ergeben sich für die Bemessung der Wand im Allg. nicht auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse. Dies gilt insbesondere für vergleichsweise kurze Baugrubenwände, wie in Variante 3B. Hier wird bei Verwendung des (nicht auf der sicheren Seite liegenden) vereinfachten Ansatzes eines linearen Potentialabbaus eine erhebliche größere erforderliche Einbindetiefe ermittelt. Dies ist begründet durch die bei der Wandumströmung bewirkten, großen hydraulischen Gradienten, die insbesondere auf der Baugrubenseite der Wand zu einer starken Reduzierung der Wichte des Baugrunds und damit der mobilisierbaren Erdwiderlagerkraft führen.
- Bei der Berücksichtigung von Entspannungsbrunnen auf der Baugrubenseite der Spundwand ergeben die Berechnungen kürzere Einbindetiefen der Baugrubenwand als bei Ansatz eines linearen Potentialabbaus beidseitig der Wand. Dies ist durch die fehlende aufwärts gerichtete Strömungskraft zur Baugrubensohle bei Anordnung von Entspannungsbrunnen begründet, wodurch sich eine größere mobilisierbare Erdwiderlagerkraft als bei voller Umströmung der Baugrubenwand ergibt.
- Eine Aussteifung der Baugrubenwand sowohl am Spundwandkopf aber auch an der Baugrubensohle (z. B. durch eine Unterwasserbetonsohle) bewirkt eine deutliche Reduzierung der erforderlichen Einbindetiefe der Baugrubenwand im Vergleich zur frei auskragenden, im Baugrund voll eingespannten Spundwand.

Literatur

EAB (2021): Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hg.) (2021): Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“ (EAB). 6. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn.