

Florian Degiuli M. Sc.

Pfahlgründungen

Leistungsbeschreibung des BauStatik-Moduls S513.de Stahlbeton-Pfahl, elastisch gebettet – EC 2, DIN EN 1992-1-1:2011-01

Pfahlgründungen stellen die gängigste Form von Tiefgründungen dar. Pfähle werden verwendet, um Bauwerkslasten in tieferliegende, tragfähigere Bodenschichten zu übertragen. Das Modul S513.de ermittelt die Tragfähigkeit des Baugrundes für axial und quer beanspruchte Pfähle und führt die erforderlichen Nachweise durch.

The screenshot displays the 'Eingabe' (Input) window for a 'Stahlbeton-Pfahl, elastisch gebettet' (Steel-concrete pile, elastic bedding) in the S513.de module. The interface is divided into several sections:

- System:** Includes 'Übernahme aus Position' (I/N), 'Konstruktionstyp' (Bohrpfahl, Typ: unabhängig), and 'Rasterparameter' (I_y, I_z).
- Pfahlgeometrie:** Specifies diameter (D_s = 0,600 m), length (I = 5,000 m), and shaft diameter/length (Schaftdurchmesser/-längenangabe).
- Feldigenschaften:** Lists 'J/N' and 'Pos' with descriptive text regarding material, load, and position details.
- Diagramm:** A 3D perspective view of the pile and a 2D cross-section showing a 60 cm diameter pile with a 5.00 m length, embedded in a soil profile with a ground level at +0.00 and a water table at -1.00.
- Table:** A table at the bottom right lists the pile type as 'Bohrpfahl' with a length (L_{ges}) of 5,00 m and diameter (D_s) of 0,60 m.

Allgemeines

Pfahlgründungen kommen zur Anwendung, wenn der Baugrund oder die Größe der auftretenden Belastung die Anwendung einer Flachgründung nicht zulassen (vgl. Bild 1). Pfähle weisen besonders für axiale Belastungen ein günstiges Tragverhalten auf. Vertikale Gründungslasten werden über die Mantelreibung und den Spitzendruck in den Baugrund übertragen. Greifen darüber hinaus auch horizontale Lasten oder Momente am Pfahlkopf an, so ist der Pfahl horizontal elastisch zu lagern.

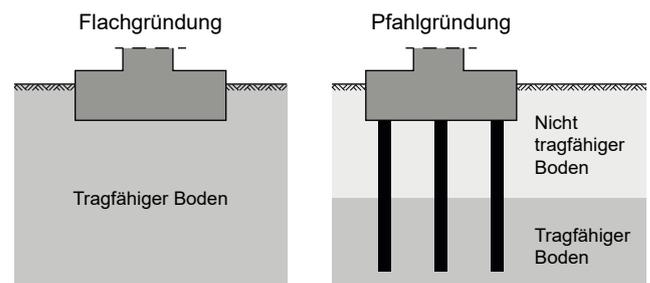


Bild 1. Gründungsarten

System

Im Kapitel „System“ sind neben der Ausführungsart des Pfahls die Pfahlgeometrie, die axialen Pfahlwiderstände sowie die Baugrundsituation vorzugeben.

Konstruktionstyp und Pfahlgeometrie

Die Wahl des Konstruktionstyps legt fest, ob Bohrpfähle oder Verdrängungspfähle zu bemessen sind. Bohrpfähle können mit einem beliebigen runden Querschnitt nachgewiesen werden. Wahlweise kann eine Fußverbreiterung zur Steigerung des Spitzenwiderstandes angesetzt werden. Bei den Verdrängungspfählen kann neben einem runden auch ein quadratischer Querschnitt mit beliebiger Kantenlänge berechnet werden.

Durch die Vorgabe der Pfahlgründungsart („unabhängige Einzelpfähle“, „verbundene Pfähle“) wird festgelegt, ob bei der Bemessung eine Gruppenwirkung der Pfähle berücksichtigt wird.

Die Pfahlänge kann manuell vorgegeben oder automatisch durch das Modul ermittelt werden. Bei der automatischen Ermittlung der Pfahlänge ist zusätzlich die Schrittweite Δl und die maximale Pfahlänge l_{\max} zu definieren. Bei der Bemessung wird bis zum Erreichen von l_{\max} die Pfahlänge solange um die vorgegebene Schrittweite Δl vergrößert, bis alle geotechnischen Nachweise erfüllt sind.

Axiale Pfahlwiderstände

Die axialen Pfahlwiderstände werden für die Nachweisführungen für druckbeanspruchte Pfähle durch eine Widerstands-Setzungs-Linie sowie für zugbeanspruchte Pfähle durch eine Widerstands-Hebungs-Linie abgebildet. Die Widerstands-Linien für Druck- und Zugbeanspruchung können wahlweise über drei Wege ermittelt werden:

- **Ermittlung aus statischen Probelastungen**
DIN 1054 [2] empfiehlt die Ermittlung der Widerstands-Linien anhand von Pfahlprobelastungen, da nur sie ausreichend zuverlässig sind. Jede Probelastung setzt sich aus einer Setzungs- bzw. Hebungsstufe mit zugehöriger Last zusammen. Nach DIN EN 1997-1 [1], Abs. 7.6.2.2 bzw. Abs. 7.6.3.2 wird daraus die charakteristische Widerstands-Setzungs-(Hebungs-)Linie abgeleitet. Für Zug- und Druckbeanspruchungen können separate Werte vorgegeben werden.
- **Ermittlung aus Erfahrungswerten**
Liegen keine Ergebnisse aus Probelastungen vor, bietet DIN 1054 [2] die Möglichkeit, axiale Pfahlwiderstände auch auf Grundlage von Erfahrungswerten abzuleiten. Die Erfahrungswerte für den Pfahlspitzendruck $q_{b,k}$ und für den Pfahlmantelwiderstand $q_{s,k}$ sind in EA-Pfähle [3] bereitgestellt. Ihre Ermittlung erfolgt in Abhängigkeit des vorliegenden Baugrundes (bindiger bzw. nichtbindiger Boden, Fels).
- **Manuelle Vorgabe der Widerstands-Linien**
Bei vorliegender charakteristischer Widerstands-Setzungs-(Hebungs-)Linie, z.B. vom Bodengutachter vorgegeben, kann diese als Grundlage direkt im Programm eingetragen werden. Auch hier können für Zug- und Druckbeanspruchungen separate Linien vorgegeben werden.

Vorbemerkung	System	Belastungen	Bemessung	Ausgabe
Erläuterung				
Übernahme aus Position				
J/N	<input type="checkbox"/> Übernahme durchführen			
Konstruktionstyp				
Typ	Bohrpfahl	Ausführung		
Gruppe	verbundene	Einzelpfahl/Pfahlgruppe		
Rasterparameter				
l_y	2.000	m	Rastermaß in y-Richtung	
l_z	2.000	m	Rastermaß in z-Richtung	
Lage	Lage 1	Lage in der Pfahlgruppe		
Pfahlgeometrie				
D_s	0.600	m	Schaftdurchmesser/-kantenlänge	
<input type="checkbox"/> J/N	<input type="checkbox"/> Pfahlfuß verbreitern			
l	5.000	m	Länge	
<input type="checkbox"/> J/N	<input type="checkbox"/> Länge automatisch ermitteln			
Axiale Pfahlwiderstände				
R	statisch			
Probelastung				
J/N	<input checked="" type="checkbox"/> Probelastung für Druckpfahl eingeben			
	s [cm]	$R_{m,1}$ [MN]	$R_{m,2}$ [MN]	$R_{m,3}$ [MN]
		$R_{m,4}$ [MN]	$R_{m,5}$ [MN]	$R_{m,6}$ [MN]
		$R_{m,7}$ [MN]	$R_{m,8}$ [MN]	
1	0.0	0.00		
2	1.0	3.00		
3	2.0	4.00		
4	3.0	4.80		
5	4.0	5.60		
6	5.0	6.10		
7	6.0	6.40		
8	8.0	6.60		
Probelastung				
J/N	<input type="checkbox"/> Probelastung für Zugpfahl eingeben			
Bodenschicht 01				
Bez	Sand			
h_b	3.400	m	Höhe der Schicht	
φ	30.00	°	charakteristischer Reibungswinkel	
γ	19.00	kN/m ³	Wichte des feuchten Bodens	
γ'	11.00	kN/m ³	Wichte des Bodens unter Auftrieb	
E_s	100.00	MN/m ²	Steifemodul	
c_a	0.00	kN/m ²	Kohäsion für aktiven Erddruck	
c_p	0.00	kN/m ²	Kohäsion für passiven Erddruck	
δ_a		°	Wandreibungsw. aktiver Erddruck	
δ_p		°	Wandreibungsw. passiver Erddr.	
Bodenschicht 02				
Bez				
Wasserstand ständig				
J/N	<input checked="" type="checkbox"/> ständiges Grundwasser eingeben			
hws	-1.000	m	Höhenkote bzgl. Gelände (0.0 m)	

Bild 2. Eingabe „System“

Baugrundsituation und Wasserstand

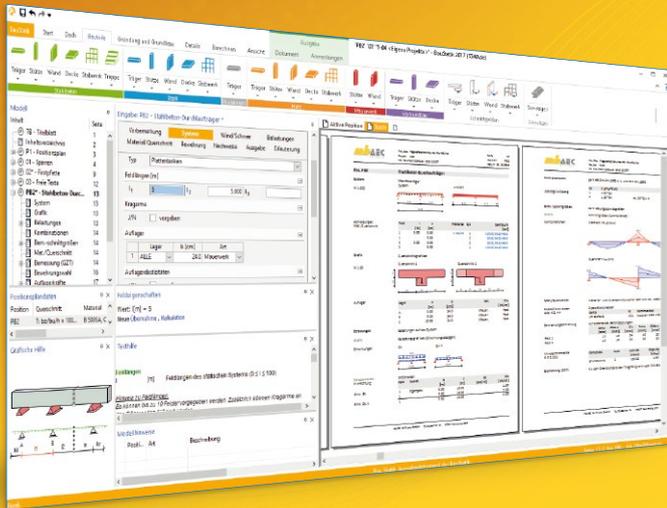
Der nachzuweisende Pfahl bzw. die Pfahlgruppe liegt in ebenem Gelände, wobei der Bodenaufbau horizontal geschichtet definiert werden kann.

Für jede Schicht werden die notwendigen Bodenparameter abgefragt. Wahlweise kann auch Grundwasser berücksichtigt werden.

BauStatik 2020



Die „Dokument-orientierte“ Statik



Täglich 1000-fach im Einsatz beweist die BauStatik ihre Praxistauglichkeit. Sie ist seit Jahren Trendsetter mit innovativen Leistungsmerkmalen wie der „Dokument-orientierten Statik“, der „Lastübernahme mit Korrekturverfolgung“, der „Vorlagentechnik“, „Alternativpositionen“, „Nachtrags-/Austauschseiten“ usw. Dies sind nur einige der Details, die man im Ingenieuralltag nicht mehr missen möchte.

Die BauStatik ist ein Bestandteil der mb WorkSuite. Die mb WorkSuite umfasst Software aus dem gesamten AEC-Bereich: Architecture. Engineering. Construction.

Die Standard-Pakete

Mit der „Dokument-orientierten Statik“ bietet mb eine umfangreiche, leistungsfähige Lösung für die Positionsstatik an. Jedes der über 200 BauStatik-Module kann einzeln oder in Paketen erworben und eingesetzt werden. Für eine Grundausstattung mit BauStatik-Modulen haben sich drei **Standard-Pakete** etabliert, die individuell ergänzt werden können.

BauStatik compact 2020
Das Einsteigerpaket

Diese preisgünstige Variante beinhaltet mit 20 BauStatik-Modulen die notwendigen Komponenten für statische Berechnungen in kleinen und mittleren Ingenieurbüros. Paketinhalt siehe www.mbaec.de

990,- EUR

BauStatik classic 2020
Das klassische Paket

Dieses Paket enthält über 50 BauStatik-Module. Mit diesen zusätzlichen Modulen können auch größere Bauvorhaben effektiv berechnet werden.

Paketinhalt siehe www.mbaec.de

3.490,- EUR

BauStatik comfort 2020
Das Komfort-Paket

Mit diesem Paket stehen mehr als 80 BauStatik-Module zur statischen Berechnung in den Bereichen Beton-/Stahlbeton-, Holz-, Stahl-, Mauerwerks- und Grundbau zur Verfügung. Paketinhalt siehe www.mbaec.de

5.490,- EUR

© mb AEC Software GmbH. Alle Preise zzgl. Versandkosten und ges. MwSt. Für Einzelplatzlizenzen Hardlock je Arbeitsplatz erforderlich (95,- EUR). Folgelizenz-/Netzwerkbedingungen auf Anfrage. Es gelten unsere Allg. Geschäftsbedingungen. Änderungen & Irrtümer vorbehalten. Unterstütztes Betriebssystem: Windows® 10 (64)
Stand: Januar 2020

Belastungen

Auflagerlasten

Als Belastungen können axiale Kopfbeanspruchungen in Form von Normalkräften (Zug- oder Druckbeanspruchungen) eingetragen werden. Darüber hinaus sind bei horizontal gebetteten Pfählen auch Momente und Horizontallasten am Kopf möglich.

Eigengewicht

Die Eigenlast des Pfahls kann wahlweise für die Standsicherheitsnachweise berücksichtigt werden.

Negative Mantelreibung

Setzt sich der umgebende Boden mehr als der Pfahl, so führt dies zu einer negativen Mantelreibung τ_n , die integriert über die davon betroffene Pfahlmantelfläche eine zusätzliche axiale Einwirkung auf den Pfahl bewirkt. Diese zusätzliche Einwirkung muss nach DIN EN 1997-1 [1] berücksichtigt werden. DIN 1054 [2] empfiehlt hierzu die Vorgehensweise von [3].

	EW	F _x [kN]	F _z [kN]	F _y [kN]	M _y [kNm]	M _z [kNm]
1	Gk - Eige	1000.000		200.000		

Bild 3. Eingabe „Belastungen“

Nach [3] ist die negative Mantelreibung in der Tiefe bis zum „neutralen Punkt“ zu berücksichtigen. Der neutrale Punkt stellt dabei die Grenze zwischen positiver und negativer Mantelreibung dar. Für bindige und nichtbindige Böden liefert [3] folgende Näherungsansätze:

Ansatz für bindige Böden:

$$\tau_{n,k} = \alpha \cdot c_{u,k} \quad (1)$$

Ansatz für nichtbindige Böden:

$$\tau_{n,k} = K_0 \cdot \tan(\varphi'_k) \cdot \sigma'_v = \beta \cdot \sigma'_v \quad (2)$$

mit

α	Anpassungsfaktor für bindige Böden
$c_{u,k}$	charakteristische Scherfestigkeit des Bodens
β	Anpassungsfaktor für nichtbindige Böden
σ'_v	effektive Vertikalspannung
k_0	Erdruchdruckbeiwert
φ'_k	charakteristischer Reibungswinkel des Bodens

Im Modul S513.de sind die Lage des neutralen Punktes, die Mantelreibung $\tau_{n,k}$ und die zugehörige Einwirkungsart manuell vorzugeben. Die negative Mantelreibung kann betragsmäßig nicht größer als die positive lastabtragende Mantelreibung werden.

Bemessung

Im Kapitel „Bemessung“ werden Vorgaben bzgl. der Kombinatorik, der Bemessungssituation, der geotechnischen Standsicherheitsnachweise und der Stahlbetonbemessung getätigt.

Kombinatorik und Bemessungssituation

Die Kombinationsbildung erfolgt im Modul S513.de standardmäßig automatisch. Alternativ kann die Kombinationsbildung manuell vom Anwender vorgegeben werden.

Das erforderliche Sicherheitsniveau eines Bauwerks ist von der Bemessungssituation abhängig. Gemäß DIN EN 1997 [1] und DIN 1054 [2] kann der Anwender zwischen folgenden Bemessungssituationen wählen:

- Bemessungssituation BS-P: ständige Situationen (persistent)
- Bemessungssituation BS-T: vorübergehende Situationen (transient)
- Bemessungssituation BS-A: außergewöhnliche Situationen (accidental)

Grundbaunachweise

Nachweise bei axial beanspruchten Pfählen

Für axial belastete Pfähle ist im Grenzzustand GEO-2 nachzuweisen, dass der Baugrund die vertikalen Gründungslasten aufnehmen kann. Der Pfahlwiderstand wird auf Grundlage der DIN EN 1997-1 [1], Abs. 7.6.2.1 (bei Druckpfählen) bzw. Abs. 7.6.3.1 (bei Zugpfählen) über die Widerstands-Setzungs-(Hebungs-)Linie bestimmt (vgl. Bild 6).

Zur Ermittlung des Bemessungswertes der Tragfähigkeit $R_{c,d}$ bzw. $R_{t,d}$ werden die Teilsicherheitsbeiwerte γ_b und γ_s für den Spitzendruck und für die Mantelreibung entsprechend DIN 1054 [2], Tabelle A2.3 angesetzt.

$$F_{c,d} \leq R_{c,d} \quad (3)$$

$$F_{t,d} \leq R_{t,d} \quad (4)$$

mit

$F_{c,d}, F_{t,d}$	Bemessungswerte der axialen Einwirkung
$R_{c,d}, R_{t,d}$	Bemessungswerte des Pfahlwiderstandes

Zusätzlich ist bei zugbeanspruchten Pfählen innerhalb einer Gruppe zu überprüfen, ob das Eigengewicht des durch die Mantelreibung am Pfahl angehängten Bodens ausreicht, die einwirkende Zugkraft aufzunehmen. Sofern eine Einwirkungskombination mit resultierenden, abhebenden Pfahlkopfbeanspruchungen entsteht, ist im Grenzzustand UPL der Nachweis nach DIN 1054 [2], Abs. 7.6.3.1 A (4a) zu führen. Für den Nachweis ist das zusammenhängende Bodenvolumen gemäß Bild 4 zu betrachten.

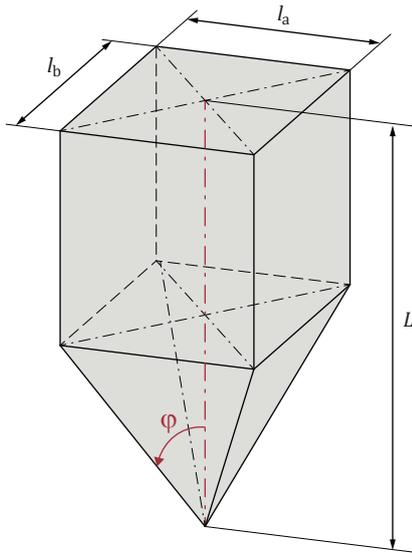


Bild 4. Geometrie des am Einzelpfahl angehängten Bodens

Nachweise bei quer beanspruchten Pfählen

Durch horizontale Lasten und Momente entstehen Beanspruchungen, die ebenfalls in den Baugrund zu übertragen sind. Hierzu wird der Pfahl über seine Länge gebettet gelagert.

Das Tragverhalten von quer zur Pfahlachse beanspruchten Pfählen ist gekennzeichnet durch die Bewegung des Pfahls gegen den Boden oder die Bewegung des Bodens gegen den Pfahl.

Nach DIN 1054 [2], Abs. 7.7.1 A (3a) sind beim Ansatz einer Bettung zur Aufnahme der horizontalen Belastungen zwei Tragfähigkeitsnachweise zu führen.

Zum einen darf die aus der Beanspruchung resultierende charakteristische Bettungsspannung $\sigma_{h,k}$ die für den ebenen Fall bestimmte passive charakteristische Erddruckordinate $e_{ph,k}$ in keiner Tiefe z überschreiten. Ist dies der Fall, wird im Modul automatisch der Bettungswert bzw. der Steifemodul reduziert, bis die Randbedingung eingehalten ist (vgl. Bild 5).

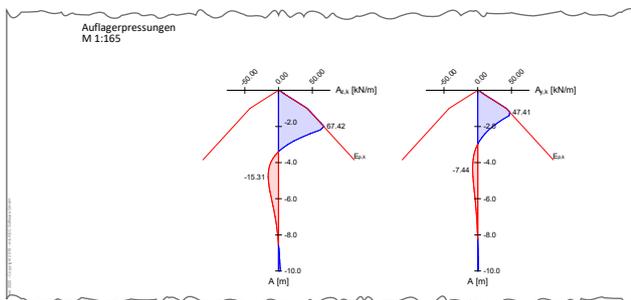


Bild 5. Anpassung der charakteristischen Bettungsspannung

Darüber hinaus ist gemäß DIN 1054 [2], Abs. 9.7.4 A (2) sicherzustellen, dass im Grenzzustand GEO-2 der Bemessungswert des seitlichen Bodenwiderstands $B_{h,d}$, der sich aus dem Integral der Bettungsspannung bis zum Verschiebungsnulldpunkt ergibt, nicht größer sein darf als der bis zur selben Tiefe integrierte Bemessungswiderstand des räumlichen passiven Erddrucks $E_{ph,d}^r$.

$$B_{h,d} \leq E_{ph,d}^r \tag{5}$$

mit

- $B_{h,d}$ Bemessungswert der horizontalen Beanspruchung
- $E_{ph,d}^r$ Bemessungswert der Horizontalkomponente des räumlichen Erdwiderstandes

Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

Sind die Verformungen der Pfahlgründung für das Gesamttragwerk von Bedeutung (zulässige Setzungen), ist der Nachweis gegen Verlust der Gebrauchstauglichkeit zu führen. Der Nachweis ist erbracht, wenn folgende Bedingung gemäß [3], Abs. 6.4.1 erfüllt ist:

$$F_d(SLS) = F_k \leq R_d(SLS) = R_k \tag{6}$$

mit

- F_k charakteristische Beanspruchung des Pfahls im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
- R_k charakteristische Beanspruchung des Pfahls im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Der charakteristische Pfahlwiderstand R_k ergibt sich aus der Widerstand-Setzungs-Linie in Abhängigkeit der zulässigen Grenzsetzung $s_{2,k}$, die vom Anwender in der Eingabe vorgegeben wird.

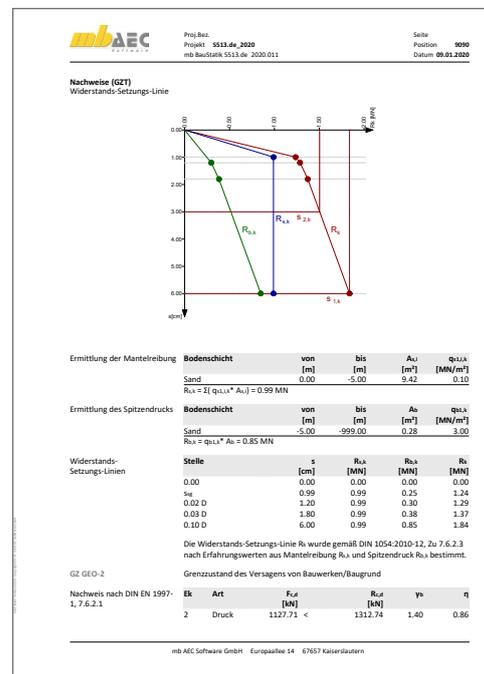


Bild 6. Ausgabe „Nachweise (GZT)“

Stahlbetonbemessung

Horizontale Normalkräfte und Momente am Pfahlkopf erzeugen durch die horizontale Bettung über die Pfahllänge Biege- und Querkraftbelastungen. Für diese Pfahlschnittgrößen kann im Modul S513.de optional eine Stahlbetonbemessung auf Grundlage der DIN EN 1992-1-1 [4] durchgeführt werden.

Hierzu werden im Eingabekatalog die Betonfestigkeitsklasse, die Stahlgüte der Längs- und Bügelbewehrung sowie der Achsabstand der Längsbewehrung vorgegeben.

Die Berücksichtigung der Mindestlängs- und Mindestquerbewehrung kann über den Eingabedialog an- und ausgeschaltet werden.

Ausgabe

Es wird eine vollständige, übersichtliche und prüffähige Ausgabe zur Verfügung gestellt. Der Ausgabeumfang kann in gewohnter Weise gesteuert werden.

Neben maßstabsgetreuen Systemskizzen werden die Schnittgrößen, Kombinationen, Material- und Querschnittsparameter sowie die Nachweise unter Angabe der Berechnungsgrundlage in übersichtlicher tabellarischer Form ausgegeben.

Florian Degiuli M.Sc.
mb AEC Software GmbH
mb-news@mbaec.de

Literatur

- [1] DIN EN 1997-1:2014-03, Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln.
- [2] DIN 1054:2010-12, Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1.
- [3] EA-Pfähle: Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“, 2. Auflage, AK 2.1, Hrsg. DGGT. Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2012.
- [4] DIN EN 1992-1-1:2011-01, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.

The screenshot shows the output of the 'Bemessung (GZT)' module. It includes the following sections:

- Nachweis nach DIN EN 1997-1, 9.7.4:** A table with columns Ek, Richt., Bu,d [kN], E_{p,d} [kN], V_{u,d}, and η. Values include 2, Y, 423.83, 568.68, 1.40, 0.71 and 2, z, 210.56, 400.52, 1.40, 0.53.
- GZ SL5:** Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.
- Nachweis nach DIN EN 1997-1, 7.6.4.1:** A table with columns Ek, Art, E_d [kN], R_d, s_d, and η. Values include 4, Druck, 825.24, 1504.60, 3.0, 0.56.
- Bemessung (GZT):** Stahlbetonbemessung gem. DIN EN 1992-1-1:2011-01. Material: Beton C 30/37, Elastizitätsmodul, Betonstahl B 500SA, E_{st} = 30000 N/mm².
- Betondeckung:** Table with columns d_f [mm] and c_{min} [mm]. Values: 60, 50.
- Druck-/Zugbemessung:** Ermittlung der Pfahlbewehrung.
- erf. Längsbew.:** Table with columns Ek, x [m], N_d [kN], M_{u,d} [kNm], M_{t,d} [kNm], A_s [cm²], A_{s,min} [cm²]. Values include 1, -0.00, -1100.99, 373.85, -310.34, 19.93, 14.14 and 1, -5.00, -, -, -, 0.00, 14.14.
- erf. Querkraftbew.:** Table with columns Ek, x [m], V_{u,d} [kN], B₁ [T], z₁ [m], A_{sw} [cm²/m], A_{sw,min} [cm²/m]. Values include 1, -4.00, 200.03, 19.8, 0.45, 5.22, 10.47 and 1, -5.00, -73.73, 18.4, 0.45, 0.00, 11.14.
- Zusammenfassung:** Zusammenfassung der Nachweise. Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Table with columns Nachweis and η. Values: Erdwiderlager (OK, 0.71), Tragfähigkeit (OK, 0.86).

Bild 7. Ausgabe „Bemessung (GZT)“

Preise und Angebote

S513.de Stahlbeton-Pfahl,
elastisch gebettet –
EC 2, DIN EN 1992-1-1:2011-01
Leistungsbeschreibung siehe
nebenstehenden Fachartikel

399,- EUR

Es gelten unsere Allgemeinen Geschäftsbedingungen. Änderungen und Irrtümer vorbehalten. Alle Preise zzgl. Versandkosten und MwSt. – Hardlock für Einzelplatzlizenz je Arbeitsplatz erforderlich (95,- EUR). Folgelizenz-/Netzwerkbedingungen auf Anfrage. – Stand: März 2020

Unterstütztes Betriebssystem: Windows 10 (64)

Preisliste: www.mbaec.de