

Kunde: **GERMAN LNG TERMINAL GmbH**

Projekt: **GERMAN LNG-TERMINAL**

Vorgehensweise zur Bemessung des
Landungssteiges

Dokument Nr: **GG-OC01-100-MAR-BAS-00415_05**

Datum	Status	Erstellt	Geprüft	Genehmigt	Validiert
14.10.2022	05	Cantelmo	Krug	Fernandez	Layton

Vorgehensweise zur Bemessung des Landungssteges

INHALT

1. EINFÜHRUNG	6
2. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	6
3. ANZUWENDENDE VORSCHRIFTEN UND NORMEN	7
4. REFERENZ-PROJEKTUNTERLAGEN	9
5. ALLGEMEINE GESTALTUNGSPRINZIPIEN	10
5.1. Ziel dieses Dokuments.....	10
5.2. Globale Designziele.....	10
6. EINGANGSDATEN	11
7. ANFORDERUNGEN AN DAS DESIGN	13
7.1. Allgemein	13
7.1.1. Nutzungsdauer	13
7.1.2. Bemessung	13
7.2. Grenzzustand	14
8. AUSLEGUNGSMETHODOLOGIE	15
8.1. Geometrie	15
8.1.1. Vorgeschlagenes Strukturkonzept.....	15
8.1.2. Vorläufige Gesamtabmessungen	16
8.1.3. Strukturmodell für FEM-Software	16
8.1.4. Boden-Pfahl-Interaktion	18
8.1.5. Korrosion und Seebewuchs.....	19
8.2. Entwurfsprozess.....	20

8.2.1. Lastmodellierung	20
8.3. Strukturanalyse	24
8.3.1. Modellierung	24
8.3.2. Auswirkungen der Strukturverformung	24
8.3.3. Seismischer Entwurf	25
8.3.4. Allgemeine Entwurfskriterien	25
8.3.5. Gründung	25
9. DESIGN	26
9.1. Nachbearbeitung des Vorentwurfs	26
9.2. Entwurf zur Bemessung	26
10. DURCHFÜHRUNG DER BEMESSUNG	27
10.1. Stahlpfähle	27
10.2. Stahlaufbauten	27
10.3. Stahlbetondecke	27
10.4. Kontrolle der Verformung	28
11. LITERATURVERZEICHNIS	29

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 8-1: Beispiel einer Anlegerstruktur mit Plattenbalkendecke aus Stahlbeton.....	16
Abbildung 8-2: FEM-Modellierung von Plattenbalkenstrukturen	17
Abbildung 8-3: Dehnungsdurchdringungselement im Plattenbalken.....	18
Abbildung 8-4: Theoretische Bodenoberfläche bei Gründung auf Böschungen	19
Abbildung 8-5: Rohrleitungsbelastung auf der Anlegerbrücke	20
Abbildung 8-6 Wellenlasten auf Pfählen am Anleger 1	22
Abbildung 8-7 Typische Festmacherlast an Dalben	23

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1: Übersicht der Begriffe und Abkürzungen.....	6
Tabelle 3-1: Liste anzuwendender Vorschriften und Normen	7
Tabelle 4-1: Referenz-Projektunterlagen	9
Tabelle 6-1: Zusammenfassung der Anforderungen an die Eingabedaten.....	11

1. EINFÜHRUNG

Dieses Dokument beschreibt die Vorgehensweise für die Bemessung des zu errichtenden Landungssteges des German LNG-Terminals in Brunsbüttel.

Zu dem Landungssteg gehören die Anleger 1 und 2, die Anlegerbrücke, Unterstützungsplattformen sowie die Anleger- und Festmacherdalben-Monopiles.

Dieses Dokument erklärt den logischen Prozess, wie von den Designvorgaben und Überlegungen, über einen Vorentwurf mit Unterstützung eines FEM Finite-Element-Software-Programmes ein Grundkonzept entwickelt wird und anschließend durch detaillierte Nachbearbeitung die Bemessung des Landungsstegbauwerkes erfolgt.

2. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Die folgende Liste zeigt die im gesamten Dokument verwendeten Begriffe und Abkürzungen:

Tabelle 2-1: Übersicht der Begriffe und Abkürzungen

Abkürzung	Langform	Beschreibung
BS	British Standard	Britische Norm
CPT	Cone Penetration Test	Drucksondierungstest
FEM	Finite-Element-Method	Finite-Element-Verfahren
HSE	Health, Safety, Environment	Gesundheits-, Sicherheits- und Umweltschutz
ISO	International Standardisation Organisation	Internationale Organisation für Normung
LNG	Liquid Natural Gas	Flüssigerdgas
OBE	Operational Basis Earthquake	Betriebserdbeben, Erdbebenbelastung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
OCIMF	Oil Companies International Marine Forum	Internationales Forum der Mineralölgesellschaften
SLS	Servicability Limit State	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
SSE	Safe Shut-down Earthquake (Design Earthquake)	Sicherheitserdbeben, Erdbebenbelastung im Grenzzustand der Tragfähigkeit

3. ANZUWENDENDE VORSCHRIFTEN UND NORMEN

Für die Bemessung des Landungssteges sind die relevanten deutschen Gesetze und Vorschriften sowie europäische EU-Richtlinien verbindlich anzuwenden.

Tabelle 3-1: Liste anzuwendender Vorschriften und Normen

Nummer	Bezeichnung	Titel
[1]	WasG SH 2019	Wassergesetz des Landes Schleswig-Holstein (LWG 753-8 v.13)
[2]	EAU2012	Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen, Häfen und Wasserstraßen, 9. Ausgabe - Juli 2015
[3]	DIN EN 1990	Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung
[4]	DIN EN 1991	Eurocode: Einwirkungen auf Tragwerke
[5]	DIN EN 1992	Bemessung und Konstruktion von Betontragwerken
[6]	DIN EN 1993	Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten
[7]	DIN EN 1997	Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik
[8]	DIN 1054	Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1
[9]	DIN EN 1536-10	Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bohrpfähle
[10]	DIN EN 12699-07	Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Verdrängungspfähle
[11]	DIN EN 14199-07	Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Mikropfähle
[12]	DIN 19704-1	Stahlwasserbauten - Teil 1: Berechnungsgrundlagen
[13]	DIN 19704-2	Stahlwasserbauten - Teil 2: Bauliche Durchbildung und Herstellung
[14]	DIN 19704-3	Stahlwasserbauten - Teil 3: Elektrische Ausrüstung

Nummer	Bezeichnung	Titel
[15]	DIN EN ISO 28460:2011-04	Erdöl- und Erdgasindustrien - Anlagen und Ausrüstung für Flüssigerdgas - Schnittstelle zwischen Schiff und Land und Hafenbetrieb
[16]	ISO/TR 79:2015-04	Referenzmaterialien - Beispiele für Referenzmaterialien mit qualitativen Eigenschaftsmerkmalen
[17]	DIN EN 1473	Anlagen und Ausrüstung für Flüssigerdgas - die Auslegung von landseitigen Anlagen
[18]	OCIMF	Richtlinien für Festmachervorrichtungen 3. Ausgabe: 2008
[19]	PIANC	Richtlinien für die Konstruktion von Fendersystemen: 2002
[20]	PIANC	Seismische Konstruktionsrichtlinien für Hafenstrukturen
[21]	CIRIA, CUR, CETMEF (2007)	The rock manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). C683, CIRIA, London (Das Steinhandbuch. Die Verwendung von Stein in der Wasserbautechnik (2. Ausgabe))
[22]	BS 6349-1	"Wasserbau". (Handbuch: Allgemein)
[23]	BS 6349-2	"Wasserbau". Code of practice for the design of quay walls, jetties and dolphins (Handbuch: Verfahrensanweisungen für die Konstruktion von Kaimauern, Anlegern und Dalben)
[24]	TRAS 310:2011-12-15	Technische Regeln für Anlagensicherheit - Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser
[25]	TRAS 320:2015-07-16	Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind sowie Schnee- und Eislasten
[26]	DIN EN ISO 19906:2020-01	Erdöl- und Erdgasindustrie - Offshore-Bauwerke für den Arktis-Bereich
Nummer	Bezeichnung	Titel

[27]	STLK-W, ZTV-W	Standard Leistungskatalog und Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau des Bundes-ministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)
------	---------------	---

Anmerkung: Die TRAS 310 sowie die TRAS 320 sind anzuwenden, wenn ein Unternehmen (hier GLNG) unter die 12. BImSchV (Störfall-Verordnung / Major Accident Ordinance „SEVESO“ Regulations) fällt.

4. REFERENZ-PROJEKTUNTERLAGEN

Dieses Dokument bezieht sich auf die in folgender Tabelle zusammengefassten zusätzlichen Informationen und Dokumente:

Tabelle 4-1: Referenz-Projektunterlagen

- | | |
|--|--|
| 1. Landungssteg – Bemessungsgrundlage | GG-OC01-100-MAR-BAS-00061 (Unterlage 2.6.1) |
| 2. Vertäuerungsberechnung für das LNG Terminal Brunsbüttel | BV Report 19.09.2019 Teil F (Unterlage 12.6) |
| 3. Nautische Simulation | BV Report 01.03.2019 Teil D (Unterlage 12.4) |

5. ALLGEMEINE GESTALTUNGSPRINZIPIEN

5.1. Ziel dieses Dokuments

Dieses Dokument behandelt die Vorgehensweise für die Bemessung des Landungssteges und insbesondere:

- Anlegerbrücke
- Anleger 1 und Anleger 2
- Dalben / Monopiles und Laufstege
- Unterstützungsplattformen

Dieses Dokument konzentriert sich auf:

- Vorgabe von geometrischen Daten und Anforderungen für den Entwurf der Landungssteg - Bauwerk,
- Entwurfsansätze für die Strukturmodellierung und Strukturnachweise,
- Besonderheiten bei der Gestaltung.

5.2. Globale Designziele

Der Entwurf des Landungssteges muss sicherstellen, dass die Strukturen des Bauwerkes folgende Bedingungen erfüllt:

- Tragfähigkeit – bleibt stabil im Auslegungsbereich der Belastungsbedingungen.
- Festigkeit – besitzt ausreichende Festigkeit, um den zulässigen Lasten zu widerstehen.
- Gebrauchstauglichkeit – die Gebrauchstauglichkeit muss über die gesamte Nutzungsdauer gewährleistet sein
- Konformität – erfüllt HSE-Vorschriften und lokale Anforderungen

Die Bemessung des Landungssteges muss so robust ausgeführt werden, dass das Bauwerk nicht durch außergewöhnliche Ereignisse, wie z.B. ein Hochwasser mit niedriger Eintrittswahrscheinlichkeit, versagt.

In solchen außergewöhnlichen Situationen darf der Landungssteg einige begrenzte Schäden hinnehmen, es muss aber gewährleistet und sichergestellt sein, dass kritische Ausrüstungen nicht versagen und dass die Tragfähigkeit der Hauptstruktur erhalten bleibt.

6. EINGANGSDATEN

Die wichtigsten Eingangsdaten, die für die Bemessung des Landungssteges erforderlich sind, und die damit verbundenen Werte sind im Dokument Anleger – Bemessungsgrundlage, (Referenz 1, Tractebel-Spezifikation GG-OC01-100-MAR-BAS-00061) enthalten.

Die folgende Tabelle enthält nur eine kurze Zusammenfassung der Eingabedaten, die vor den Designaktivitäten vorliegen oder bestimmt werden müssen.

Tabelle 6-1: Zusammenfassung der Anforderungen an die Eingabedaten

Funktionelle Anforderungen	• Vorgeschlagenes Strukturkonzept • Nutzungsdauer • Vorgeschlagene Anordnung und Beschränkungen • Vorhabengrenze • Schnittstellen zu bestehenden Strukturen und Ausrüstung
Umweltdaten	• Betriebs- und Extremwasserstände • Betriebs- und extreme Wellenhöhe und -dauer • Betriebs- und Extremströmungsgeschwindigkeiten und -Richtungen • Bemessungswindgeschwindigkeit • Minimale und maximale Temperatur und Temperaturgradient • Morphologische Auswirkungen (Erosion, Verschlickung, usw.) • Maximale Eisdicke • Salzgehalt • Mittlere Eistemperatur auf der Unterseite des Eises
Informationen zum Meeresboden	• Bathymetrische Informationen. • Verfügbare Bodenuntersuchung. • Verfügbare Bodenprüfung. • Bodendaten, die für die FEM-Modellierung und Analyse benötigt werden. • Boden- und Wassereigenschaften zur Überprüfung der Haltbarkeit. • Anfälligkeit für Bodenverflüssigungsphänomene.

Seismische Daten	• Horizontale Spitzengrundbeschleunigung OBE. • Horizontale Spitzengrundbeschleunigung SSE. • Vertikale Spitzengrundbeschleunigung OBE. • Vertikale Spitzengrundbeschleunigung SSE. • Reaktionsauslegungsspektren bei 5% Dämpfung, für die oben genannten verschiedenen Situationen. • Materialdämpfungswerte für verschiedene Situationen.
Belastungen	Ständige Belastungen Betriebliche Belastungen: <u>Verkehrslasten:</u> • Verkehrslasten auf den Hauptdecks (Anlegerbrücke, Dalben, Lade- und Stützplattformen) • Verkehrslasten auf Zugangstreppen, Laufstegen und Leitern • Fahrzeugzugangs- und Verkehrsbelastung <u>Ausrüstung:</u> • Rohrleitungsbelastungen (einschließlich des Gewichts der Rohre, Fittings und Ventile, Befestigungen und Isolierung sowie des Inhalts der Rohre) • Details zur Installation von Rohren (Rohrschuhe und Verbindungen) • Jegliche Ausrüstung (Ventile, Ladearme) • Vorgeschlagene Festmacherausrüstung (Anzahl der Haken und Größe) • Vorgeschlagene Anlegerausrüstung (Fender) und Anlegeverfahren
Materialien	• Beton (Dichte, charakteristische Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul, Variation des Elastizitätsmoduls, Kriechen und Schwinden, Zementart, Zusatzstoffe) • Bewehrungsstahl (Streckgrenze, Bruchfestigkeit, Elastizitätsmodul) • Baustahl (0,2 % oder 1 % der Dehngrenze, minimale Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul, linearer Wärmekontraktionskoeffizient, Festigkeit, minimal und maximal zulässige Blechdicke, Beschichtungen und/oder Korrosionsschutzsysteme) • Sonstige geplante Baustoffe

7. ANFORDERUNGEN AN DAS DESIGN

7.1. Allgemein

Die wichtigsten Anforderungen an die Bemessung und Strukturmodellierung sind im Dokument Landungssteg – Bemessungsgrundlage (Referenz 1, Tractebel Spezifikation GG-OC01-100-MAR-BAS-00061 2.6.1) aufgeführt.

7.1.1. Nutzungsdauer

Die Design - Nutzungsdauer beträgt 50 Jahre.

Die Planung basiert auf der Annahme, dass ein geeignetes Instandhaltungssystem für die angenommene Konstruktion und den verwendeten Materialien eingeführt wird, um die geplante Nutzungsdauer der Anlagen zu erreichen.

Besondere Sorgfalt ist bei der Gestaltung für unzugängliche Bauteile zu legen, damit die Nutzungsdauer mit den zugehörigen Wartungsregeln erreicht werden kann. Abschnitte oder Komponenten des Bauwerks, die nach der Installation nur begrenzt oder gar nicht zugänglich sind, müssen die Nutzungsdauer ohne Wartung überstehen können. Dies gilt im Besonderen für Bereiche wie die Unterseite der Deckstrukturen, die Fenderausrüstungen und alle Elemente, die von Wasser bedeckt werden.

7.1.2. Bemessung

Die Bemessung des Landungssteges erfolgt nach den Regeln der Tragwerksplanung unter Berücksichtigung der Anforderungen des Eurocodes, der EAU 2012 und der ZTV-W.

Die Entscheidung darüber, welches Bemessungsereignis für die verschiedenen Elemente des Entwurfs verwendet werden soll, wenn das Bemessungsereignis nicht durch Vorschriften vorgeschrieben ist, ist unter Berücksichtigung der konstruktiven Nutzungsdauer des Bauteils, der Folgen im Falle eines Ausfalls und der Kostenoptimierung zu treffen.

Der Landungssteg (Anlegerbrücke, Anleger, Überwachungsgebäude und -ausrüstung) werden als Strukturen angesehen, bei denen die Folgen eines Versagens so groß sind, dass ein Versagen nicht akzeptabel ist. Daher muss das Bauwerk in der Lage sein, alle Bemessungsereignisse auch mit größeren Wiederkehrperioden zu überstehen.

7.2. Grenzzustand

Der Entwurf muss in Übereinstimmung mit der Grenzzustandsmethode durchgeführt werden.

8. AUSLEGUNGSMETHODOLOGIE

8.1. Geometrie

8.1.1. Vorgeschlagenes Strukturkonzept

Das vorgeschlagene Strukturkonzept und die Grundgeometrie wurde vor Beginn der Entwurfstätigkeiten definiert.

Die Wahl des vorgeschlagenen Strukturkonzepts wurde bestimmt unter Beachtung der Leistungsanforderungen an den Landungssteg mit Berücksichtigung der Tragwerkrelevanten Anforderungen, wie z.B. Nutzungsdauer der Konstruktion, Verformungsbegrenzungen, Anforderungen an die strukturelle Stabilität usw., den lokalen geotechnischen Bedingungen, der vorgesehenen Installationsmethode und der Einwirkung auf das Bauwerk durch Umweltbedingungen während der Bauausführung und während der Nutzungsdauer der Bauwerkes.

Für die Anlegerbrücke wird eine Plattenbalkenkonstruktion aus Stahlbeton an den Pfahlreihen mit Stahlfachwerkaufbau zur Überbrückung der Zwischenräume zwischen den Pfahlreihen vorgeschlagen.

In Situationen, in denen die Pfahlarbeiten auf ein Minimum reduziert werden müssen, ist eine modulare Konstruktion mit Stahlfachwerkaufbau (Stahlbinder) eine gute Lösung, da damit Spannweiten von bis zu 50 m erreicht werden können. Als Alternative zu den Stahlfachwerkaufbau können diese Konstruktionen auch als Stahlbetonplatten ausgeführt werden, allerdings mit kürzeren Spannweiten und erheblich mehr Pfahlinstallationen.

Dieses Konzept hat sich in zahlreichen früheren LNG-Importterminals bewährt.

Für die Anleger 1 und 2, sowie für den Bereich des Überwachungsgebäudes-Schiffsanleger wird eine Plattenbalkenstruktur vorgesehen.

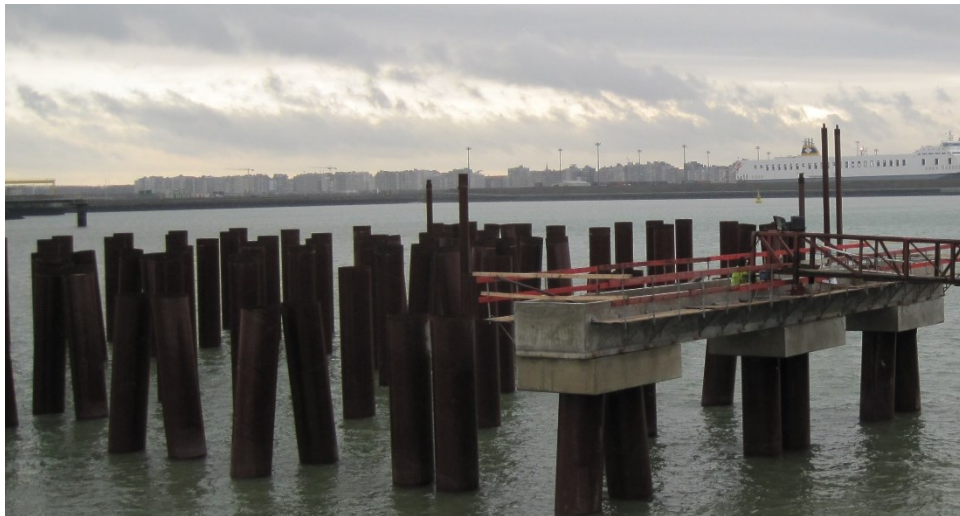


Abbildung 8-1: Beispiel einer Anlegerstruktur mit Plattenbalkendecke aus Stahlbeton

Die Anleger- und Festmacherdalben werden als Monopiles ausgeführt.

8.1.2. Vorläufige Gesamtabmessungen

Vorläufige Abmessungen der Landungsstegstruktur basieren im Allgemeinen auf Erfahrungen unter Berücksichtigung der Gesamthöhe des Bauwerks, des vorgeschlagenen Strukturkonzepts, der Umweltlasten und der geotechnischen Bedingungen.

8.1.2.1. ANLEGERBRÜCKE

Typischerweise beträgt die Spannweite zwischen aufeinanderfolgenden Pfahlraster zwischen 15 m und 50 m, je nach Art des Überbaus.

Überbauten aus Stahlbetonträgern (vorgespannt oder nicht) haben eine durchschnittliche Länge von 25 m, während sich die Länge bei einer Anlegerbrücke mit Stahlbindern bis zu 50 m erstrecken kann.

8.1.3. Strukturmodell für FEM-Software

Die Plattenbalkenstrukturen wurden als Vorentwurf mit einem FEM-Paket für die Strukturanalyse modelliert.

Die Pfähle wurden als balkenartiges Element und die Decke unter Verwendung von Schalenelementen mit gleichwertigen Dickeneigenschaften modelliert, um die Quer- und Längsträger zu berücksichtigen. Der Mittelpunkt der Ebene des Decks wurde auf der Höhe des Schwerpunktes des Decks modelliert. Jede zusätzliche Exzentrizität von Trägern und Platten wurde in das Modell aufgenommen, um Effekte zweiter Ordnung zu berücksichtigen.

Ein Screenshot der vorläufigen Modellierung ist in der Abbildung unten enthalten.

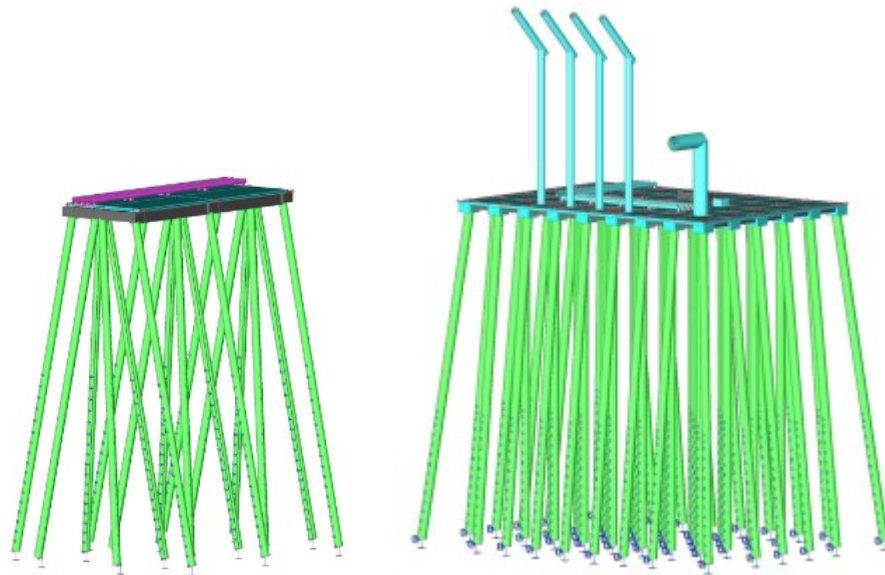


Abbildung 8-2: FEM-Modellierung von Plattenbalkenstrukturen

8.1.3.1. PFAHL-PLATTENBALKEN-SCHNITTSTELLE

Die Schnittstelle zwischen Plattenbalken und Pfahl wurde als völlig starr modelliert. Die Oberseite des Pfahls ist wegen der Dehnungsdurchdringung unter dem Deck anzuordnen. Die Dehnungsdurchdringung des Pfahlprofils in das Deck wurde als ein Element mit Eigenschaften modelliert, die der Oberseite des Pfahls entsprechen, wie in Abbildung 8-3 dargestellt. Das Element zwischen der Dehnungsdurchdringung und dem Schwerpunkt des Plattenbalkens sollte als starre Verbindung modelliert werden. Im Vorentwurf wurde die Länge des Dehnungseindringungselementes mit

$$l_{sp} = 0.022 f_y d_{bl} \text{ angenommen.}$$

Dabei ist d_{bl} der Durchmesser der Längsbewehrung im Pfahl.

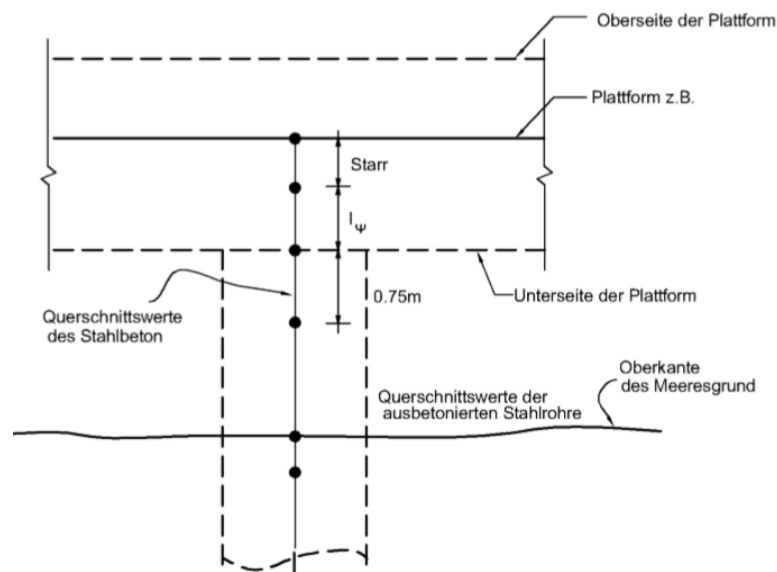


Abbildung 8-3: Dehnungsdurchdringungselement im Plattenbalken

Für den betongefüllten Abschnitt der Pfähle wird ein gerissener Stahlbetonquerschnitt angenommen, um die Dehnung im Stahlrohr zu berücksichtigen.

Falls die Platten- und Balkenelemente als äquivalentes 2D-Element modelliert werden, sollte eine äquivalente Materialdicke der Decke im Modell verwendet werden, um die Idealisierung der Betonplatte zu berücksichtigen und die korrekte Massenverteilung im Modell sicherzustellen.

8.1.4. Boden-Pfahl-Interaktion

Für die Vorentwurfsphase wurde ein elastisches Modell des Bodens (Federtyp) mit variabler Steifigkeit für verschiedene Bodenschichten und basierend auf der Tiefe ausgewählt.

In der Detailplanungsphase müssen die Pfahlfundamente unter Verwendung von oberen und unteren linearen oder nichtlinearen Bodenfedern modelliert werden (Winkler-Fundamentmodell). Für nichtlineare Analysen ist die p-y-Methode, die am häufigsten verwendete Methode in dieser Kategorie. Es verwendet ein elastisches Trägerstützenelement zur Modellierung des Pfahls und nichtlineare horizontale Federn zur Darstellung der Bodenreaktionen.

Für an das Ufer angrenzende Bereiche wurde bei Vorhandensein von Deckwerksböschungen die virtuelle Bodenoberfläche als die Hälfte der tatsächlichen Deckwerksböschung angenommen, wie in der Abbildung unten dargestellt.

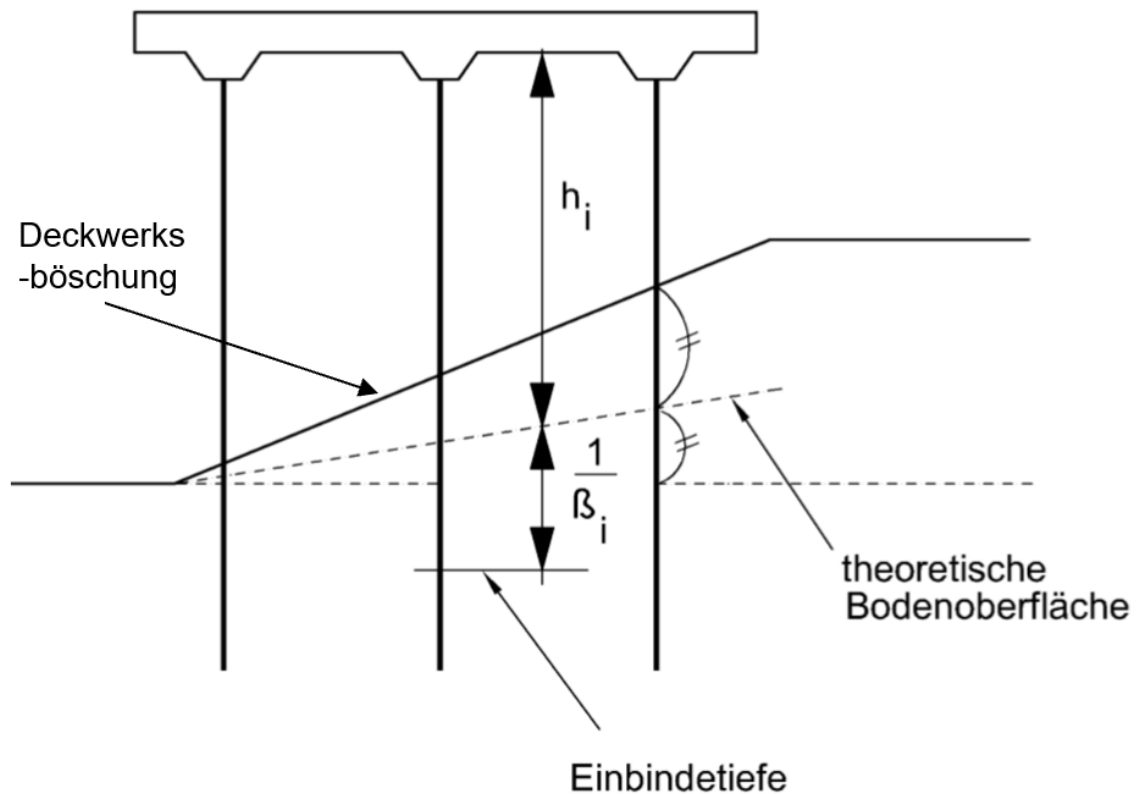


Abbildung 8-4: Theoretische Bodenoberfläche bei Gründung auf Böschungen

8.1.5. Korrosion und Seebewuchs

Die Auswirkungen von Korrosion und Seebewuchs werden im Modell berücksichtigt.

Die Korrosion verursacht einen lokalen Dickenverlust und eine Verringerung der Steifigkeit. Dies kann bei der Bewertung der strukturellen Kapazität der Elemente vernachlässigt werden, da ein Modell mit erhöhter Steifigkeit wahrscheinlich größere Spannungen an den kritischen Stellen erzeugt, sollte aber bei der Bewertung der seitlichen Verformungen berücksichtigt werden, da es ein kritisches Szenario für den Entwurf der Struktur sein kann.

Die mit dem Seebewuchs verbundenen Auswirkungen werden begrenzte Folgen in Bezug auf die strukturelle Kapazität haben, müssen jedoch berücksichtigt werden, um das zusätzliche Gewicht und die zusätzlichen Widerstandslasten zu berücksichtigen, die auf den durch das Seebewuchs erzeugten zusätzlichen Flächen berechnet werden.

8.2. Entwurfsprozess

8.2.1. Lastmodellierung

8.2.1.1. EIGENGEWICHT

Das Eigengewicht des Baumaterials wurde von der FEM-Software auf der Grundlage der folgenden Materialdichte bewertet:

- Baustahl 7,85 t/m³
- Ortbeton 2,40 t/m³

Auftriebseffekte wurden unter Berücksichtigung einer spezifischen Dichte von 1,025 t/m³ für Elbewasser berücksichtigt.

8.2.1.2. ROHRLEITUNGEN

Es wird davon ausgegangen, dass die Lagerungen der Rohrabschnitte und der Rohr-Tragwerke entweder vertikal unterstützt oder vollständig fixiert sind (in Transition und/oder Rotation).

In einigen Fällen sind Rohrschuhe in der Lage, Biegemomente sowohl in Längs- als auch in Axialrichtung zu übertragen, aber dies muss mit dem Rohrleitungsplaner und auf der Grundlage des vorgeschlagenen Konzepts für die Rohrhalterungen bestätigt werden.

Ein Beispiel für rohrleitungsinduzierte Punktlasten auf die Anlegerbrücke ist in der folgenden Abbildung 8-5 dargestellt.

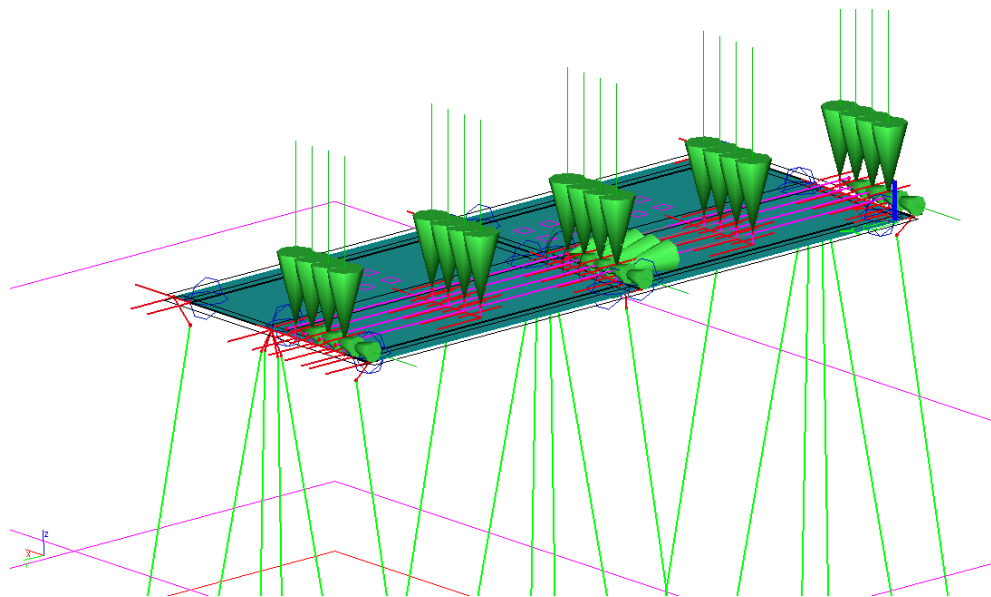


Abbildung 8-5: Rohrleitungsbelastung auf der Anlegerbrücke

8.2.1.3. VERKEHRSLASTEN

Verkehrslasten werden im Allgemeinen als verteilte Last modelliert, die auf die Plattendecke wirken. In einigen Fällen können diese mit Punktlasten/Kräften kombiniert werden, die an verschiedenen Stellen auf dem Deck wirken.

Im speziellen Fall von Fahrzeuglasten muss das Modell die Möglichkeit berücksichtigen, dass solche Lasten an verschiedenen Stellen der Decksstruktur angeordnet werden können. Bewegliche Lasten können in die FEM-Software eingegeben werden, die dann verschiedene Kombinationen und eine Hüllkurve erstellt, um die maßgebende konservative Bemessungssituation zu definieren.

8.2.1.4. AUSRÜSTUNG UND AUFBAUTEN

Das Gewicht jeder Ausrüstung, die sich auf dem Deck befindet, wird entweder als verteilte oder als Punktlast modelliert, um die Massenverteilung korrekt zu modellieren.

8.2.1.5. UMWELTBELASTUNGEN

Wellen, Wind und strömungsinduzierte Lasten werden als Kräfte modelliert, die über die der Umwelteinwirkung ausgesetzten Oberflächen wirken.

Der Wind wirkt über Wasser und erzeugt einen gleichmäßigen Druck oder Sog, der auf der Grundlage der vorgegebenen Windgeschwindigkeit berechnet wird.

Wellenbelastungen können mit einer nichtlinearen Verteilung modelliert werden. Die Wellenlastwerte erreichen ihr Maximum beim einem Hochwasserstand und nehmen dann mit der Tiefe ab. Ein zusätzlicher Druck wird über dem Wasserspiegel bis zur maximalen Reichweite der Wellen ausgeübt, die der Wellenkammhöhe entspricht. In frühen Phasen des Entwurfs können die Lasten mit Hilfe der Morison-Gleichung berechnet werden, die eine gute Annäherung an den quasistatischen Effekt bietet, der durch Wellenlasten induziert wird. In der Detailkonstruktionsphase sollten mögliche dynamische Komponenten der Wellenlasten berücksichtigt werden, um das mögliche Risiko einer Erhöhung der horizontalen Last zu bewerten.

Strömungsbelastungen können als rechteckige Druckverteilung für das gesamte Ausmaß unterhalb der Wasserlinie bis zum Meeresboden modelliert werden.

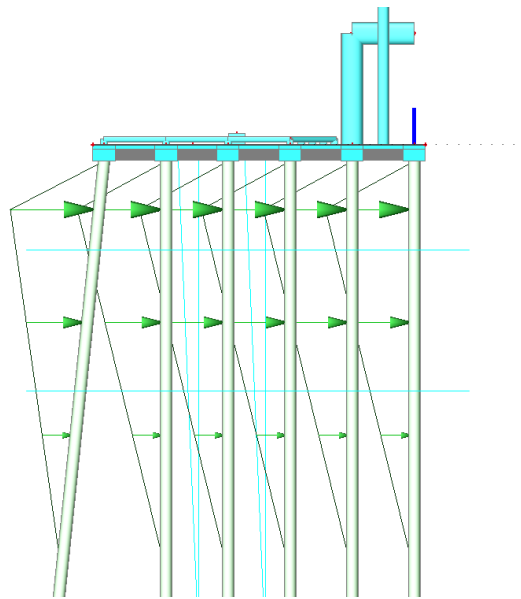


Abbildung 8-6 Wellenlasten auf Pfählen am Anleger 1

8.2.1.6. TREIBEISBLÖCKE

Die Eislasten auf Strukturen werden auf der Grundlage der Empfehlungen der EAU berechnet, und müssen auf Grundlage der lokalen Bedingungen bestätigt werden.

Die Modellierung der Eislasten kann als rechteckig verteilter Druck dargestellt werden, der über die Länge des Aufpralls des Eisblocks wirkt.

8.2.1.7. FESTMACHERLASTEN

Festmacherlasten (Verankerungslasten des Schiffes) werden als Knotenkräfte unter verschiedenen Winkeln aufgebracht, um unterschiedliche Verankerungskonfigurationen zu berücksichtigen. Die Last wurde in der richtigen Höhe aufgebracht, um die Größe des Festmacherhakens zu berücksichtigen (alternativ ist ein zusätzliches Biegemoment einzubeziehen, um die Exzentrizität der Last zu berücksichtigen).

Festmacherlasten werden in der Vertäuerungsberechnung (Referenz 2, BV-Report Teil F) beschrieben.

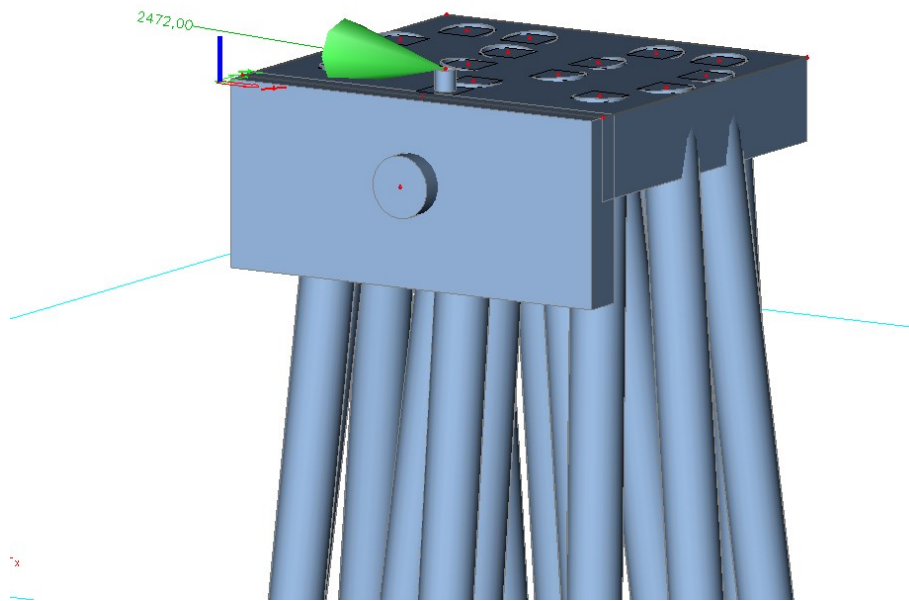


Abbildung 8-7 Typische Festmacherlast an Dalben

8.2.1.8. ANLEGELASTEN

Die maximale Anlegelast basiert auf der maximalen Reaktion, die durch den Fender hervorgerufen wird.

Fenderlasten werden als Knotenkräfte an der Stelle des Fenders aufgebracht. Die Belastung umfasst auch die potenzielle Reibung, die bei der Annäherung des Schiffes entsteht, sowie ein zusätzliches Biegemoment, das die Exzentrizität der Belastung berücksichtigt.

Die Nautische Simulation (Referenz 3, BV-Report Teil D) beschreibt die verschiedenen Anlegemöglichkeiten an den Landungssteg des LNG-Terminals.

8.3. Strukturanalyse

8.3.1. Modellierung

Die Strukturanalyse wurde mit der FEM (Finite Elemente) Software SCIA-Engineering durchgeführt und die korrekte 3D-Geometrie der Struktur reproduziert.

Das FEM-Modell basiert auf einer Vereinfachung der Strukturgeometrie und des Strukturverhaltens, und die Art der Analyse kann auf der Grundlage des gewünschten Genauigkeitsgrads (sowie der Komplexität) ausgewählt werden.

Für den Entwurf des Landungssteges wurde ein linear-elastisches Modell verwendet. Dieses Modell geht davon aus, dass der Stahlbeton in allen Abschnitten keine Risse hat und die Materialien sich in einem linear-elastischen Bereich verhalten.

Die Ergebnisse der Modellierung wurden dann zur Validierung dieser Annahme verwendet, d.h. um sicherzustellen, dass das Verhalten der Struktur unter den Betriebslasten (SLS) tatsächlich in ihrem elastischen Bereich liegt. Ein anderer Ansatz wird im äußersten Grenzzustand verwendet, wo ein plastisches Verhalten akzeptabel ist.

Der zuvor beschriebene Ansatz wird in der Ausführungsplanung weiter detailliert, wobei Nichtlinearitäten, Effekte zweiter Ordnung und das plastische Verhalten berücksichtigt werden müssen.

8.3.2. Auswirkungen der Strukturverformung

Die Schnittgrößen und Momente können in der Regel mit Hilfe von den beiden folgenden Ansätzen ermittelt werden:

- Analyse erster Ordnung, unter Verwendung der Anfangsgeometrie der Struktur oder
- Analyse zweiter Ordnung, unter Berücksichtigung des Einflusses der Verformung der Struktur.

Die Auswirkungen der Strukturverformung (Effekte zweiter Ordnung) sind dann zu berücksichtigen, wenn sie die Aktionseffekte signifikant erhöhen oder das Strukturverhalten signifikant verändern. Für den Landungssteg wurden Effekte zweiter Ordnung in die Analyse der Dalben einbezogen, bei denen unter den Bemessungslasten größere Verformungen zu erwarten sind.

8.3.3. Seismischer Entwurf

Der seismische Entwurf wird die Auswirkungen von Erdbeben und zugehörigen Einwirkungen berücksichtigen. Die Kriterien für den Entwurf sind, dass die Verschiebungskapazitäten der Struktur größer sind als die Verschiebungsbelastung.

8.3.4. Allgemeine Entwurfskriterien

Der Landungssteg des LNG-Terminals ist als duktiles System konzipiert. Die Schnittstelle zwischen Pfahl und Plattenbalkendecke bildet einen wesentlichen Bestandteil der Struktur und wurde für duktilen Verhalten ausgelegt.

Das Tragwerksystem basiert auf dem Konzept eines Rahmens mit starken Trägern (Plattenbalkendecke) und schwachen Stützen (Pfähle). Die Plattenbalkenstruktur muss so ausgelegt sein, dass plastische Gelenke in den Stahlpählen und nicht im Stahlbeton entwickelt werden.

8.3.5. Gründung

8.3.5.1. PFAHLTRAGFÄHIGKEIT

Die Tiefe und Größe der Gründungspfähle muss gegen den Bemessungswert der Pfahltragfähigkeit geprüft werden. Die Tragfähigkeit der Gründungspfähle muss auf Grundlage von verfügbaren und verifizierten CPT-Daten berechnet werden. Dabei ist DIN EN 1997-1 mit Bemessungsansatz DA2 zu berücksichtigen.

Die Berechnungen können auf dem von Lüking und Becker [Literatur 11.2] vorgeschlagenen Ansatz basieren, der für offene Stahlrohrprofile gültig ist und auf der in EA-Pfähle sowie EAU vorgeschlagenen Methode basiert.

8.3.5.2. ANFÄLLIGKEIT DES BODENS FÜR ZYKLISCHE BELASTUNGEN

Die Anfälligkeit der Gründungsböden für Verdichtung und übermäßige Setzungen durch erdbebeninduzierte zyklische Belastungen ist zu berücksichtigen.

Entsprechende Auswirkungen auf den Schermodul und jede Variation der dynamischen Bodeneigenschaften mit den durch das Bemessungserdbeben induzierten Dehnungsniveaus sind zu berücksichtigen.

9. DESIGN

9.1. Nachbearbeitung des Vorentwurfs

Die erste Phase der Strukturanalyse wird im Allgemeinen als "Vorentwurf" bezeichnet und umfasst den Aufbau des Modells und die Strukturberechnungen.

Nach Abschluss dieser ersten Phase muss der Fachplaner die Ergebnisse des Modells interpretieren und bewerten, diese Phase wird im Allgemeinen als Nachbearbeitung bezeichnet.

Je nach Ergebnis muss das Modell aus dem Vorentwurf angepasst werden.

9.2. Entwurf zur Bemessung

Der überarbeitete Vorentwurf wird in einem weiteren Schritt mittels einer FEM-Berechnungsmethode als Entwurf final bestimmt.

10. DURCHFÜHRUNG DER BEMESSUNG

10.1. Stahlpfähle

Der Nachweis eines Stahlpfahls ist wie in DIN EN 1993-1-1 beschrieben durchzuführen, mit:

- 1) Klassifizierung von Querschnitten
- 2) Widerstand im Querschnitt
- 3) Knickung von Bauteilen (Knickung unter axialer Kompression oder laterale Torsionsbeulen unter Biegung)
- 4) Kombinierte axiale Belastung und Biegung, wo anwendbar.

10.2. Stahlaufbauten

Der Nachweis aller Stahlaufbauten ist wie in DIN EN 1993-1-1 beschrieben durchzuführen, mit:

- 1) Klassifizierung der Querschnitte
- 2) Widerstand in den Querschnitten
- 3) Knicken von Bauteilen (Knicken unter axialer Kompression oder seitliches Torsionsknicken unter Biegung)
- 4) ggf. kombinierte axiale Belastung und Biegung.
- 5) ggf. Überlegungen zu Scher- und Torsionsbelastungen

10.3. Stahlbetondecke

Die Bemessung der Stahlbeton-Elemente erfolgt in der Regel auf der Grundlage der folgenden Schritte:

- 1) Beurteilung der Dauerhaftigkeitsanforderungen und Bestimmung der Betonfestigkeit
- 2) Analyse der Struktur, um kritische Momente und Axialkräfte zu erhalten
- 3) Bestimmung der Bemessungsmomente, Scher- und Axialkräfte
- 4) Bestimmung der erforderliche Bewehrungsfläche unter Berücksichtigung der Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit
- 5) Überprüfung der Stababstände und der Detaillierung der Bewehrung

10.4. Kontrolle der Verformung

Die Überprüfung der seitlichen Verformung und Durchbiegung des Decks ist entscheidend für die Funktionsfähigkeit der Struktur und der auf dem Deck installierten Ausrüstung.

11. LITERATURVERZEICHNIS

1. Bowles, J. E. (1997). *Foundation analysis and design. Inc. 502-503, and 935*. McGraw-Hill International Editions & Sons, .
2. Lüking, J. a. (2015). Harmonisierung der Berechnungsverfahren der axialen Tragfähigkeit für offene Profile nach EA-Pfähle und EAU. Bautechnik, 161-176.
3. Michael Tomlinson, J. W. (October 8, 2014). Pile Design and Construction Practice. CRC Press.
4. Nemetschek, G. (kein Datum). SCIA Engineering. Von <https://www.scia.net/en> abgerufen