



Johann Lanzinger, BSc

BEWEHRUNGSFÜHRUNG IN PFAHLKOPFPLATTEN

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dr. Ing. habil. Nguyen Viet Tue
Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Michael Mayer, BSc

Institut für Betonbau
Lessingstraße 25, 8010 Graz

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Masterarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst zu haben. Sowohl inhaltlich als auch wörtlich entnommene Inhalte wurden als solche kenntlich gemacht.

Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum: _____ Unterschrift: _____

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich während meines Studiums und des Schreibens dieser Arbeit unterstützt haben.

Zunächst danke ich Herrn Prof. Nguyen Viet Tue, der es mir ermöglicht hat, eine Arbeit in einem spannenden Themenbereich zu verfassen. Ein besonderer Dank geht an meinen Betreuer Michael Mayer, der mich bei allen Fragen tatkräftig unterstützt und motiviert hat.

Weiters bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mich in allen Lebenslagen unterstützt und mir das Studium an der TU-Graz ermöglicht haben.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Freunden Victoria, Michael, Christoph, Markus und allen Mitgliedern des Stahlbau-Zeichensaals bedanken. Durch euch ist mein Studium zu einer unvergesslichen Zeit in meinem Leben geworden.

Kurzfassung

Durch die Zuhilfenahme von Finite-Elemente Programmen ist es möglich, Bauteile in relativ kurzer Zeit zu bemessen. Allerdings sind kritische Punkte der Bewehrungsführung aus solchen Ergebnissen nicht immer sofort ersichtlich. Die Betrachtung des Kraftflusses und weitergehend das Modellieren von Stabwerkmodellen ermöglicht es, solche kritischen Punkte zu erkennen und in der Bewehrungsführung zu beachten.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Bewehrungsführungen für verschiedene Formen und Belastungen von Pfahlkopfplatten erarbeitet. Am Beginn steht eine Literaturrecherche zum besseren Verständnis der Bemessungsmethodik mittels Stabwerkmodellen. Aus dieser Recherche werden die wichtigsten Bemessungsregeln und Methoden in den Grundlagen zusammengefasst.

Nach dem Festlegen der zu betrachtenden Geometrien der Pfahlkopfplatten werden diese mittels FE-Modellen und zweidimensionalen Stabwerkmodellen bemessen. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Bemessungsmethoden qualitativ miteinander verglichen.

Aufbauend auf den Stabwerken für die Bemessung werden dreidimensionale Stabwerksysteme erstellt, auf deren Grundlage Bewehrungsführungen für die verschiedenen Formen und Belastungen der Pfahlkopfplatten abgeleitet werden können.

Die erstellten Bewehrungsführungen sollen, ergänzend zu reinen FE-Berechnungen, aufzeigen, in welchen Bereichen von Pfahlkopfplatten eine Zusatzbewehrung erforderlich ist.

Stichwörter: Pfahlkopfplatte, Stabwerkmodelle, Bewehrungsführung

Abstract

Reinforcement guidance in pile head plates

With the help of finite element programs, it is possible to design building components in a relatively short time. However, critical points in the reinforcement layout are not always immediately apparent from such results. The consideration of the force flow and, furthermore, the modeling of struts and tie models enables such critical points to be recognized and taken into account in the reinforcement management.

This master thesis examines the reinforcement arrangement of various pile head plates. First a literature research examines the methods using struts and tie models for the design of concrete structures.

After determining the geometries and loads, the pile head plates will be rated by firstly using a FE-Programm and secondly by using struts and tie models. Afterwards the results of these different design methods will be compared.

Based on the two-dimensional versions used for the design, three-dimensional struts and tie models will be developed and used to create a guideline of the reinforcement management of the various pile head plates.

These guidelines are supposed to ease the creation of reinforcement management based on the results of FE-Programms.

Keywords: Pile head plate, struts and tie models, reinforcement guidance

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage und Motivation	1
1.2	Zielsetzung	1
1.3	Aufbau der Arbeit	1
2	Grundlagen	2
2.1	Pfahlkopfplatten	2
2.2	Stabwerkmodelle	4
2.2.1	Anwendungsgebiete	4
2.2.2	Bemessungsmethodik	4
2.2.3	Bemessungsvorgang	6
2.3	Bewehrungsführung	15
2.3.1	Bewehrungsführung bei Platten	18
2.3.2	Bewehrungsführung bei Pfählen	18
3	Entwicklung von Bewehrungskonzepten	20
3.1	Ablauf	20
3.1.1	Bemessungslastfälle	21
3.1.2	Variantenbeschreibung	21
3.1.3	Beschreibung FE-Modell	24
3.1.4	Beschreibung Stabwerkmodell	25
3.2	Variantenstudie	26
3.2.1	Variante 1 Lastfall 1	26
3.2.2	Variante 1 Lastfall 2	29
3.2.3	Variante 2 Lastfall 1	32
3.2.4	Variante 2 Lastfall 2	35
3.2.5	Variante 3 Lastfall 1	38
3.2.6	Variante 3 Lastfall 2	41
3.2.7	Variante 4 Lastfall 1	44
3.2.8	Variante 4 Lastfall 2	47
4	Bewehrungsführung	50
4.1	Allgemeine Bewehrungsregeln	50
4.2	Bewehrungskonzepte	51
4.2.1	Konzept Variante 1 Lastfall 1	52
4.2.2	Konzept Variante 1 Lastfall 2	53
4.2.3	Konzept Variante 2 Lastfall 1	54

4.2.4	Konzept Variante 2 Lastfall 2	55
4.2.5	Konzept Variante 3 Lastfall 1	56
4.2.6	Konzept Variante 3 Lastfall 2	57
4.2.7	Konzept Variante 4 Lastfall 1	58
4.2.8	Konzept Variante 4 Lastfall 2	60
4.3	Bewehrungsführung Widerlagerwand und Pfahl	62
4.3.1	Widerlagerwand	62
4.3.2	Pfahl	62
5	Zusammenfassung und Ausblick	63
	Abbildungsverzeichnis	64
	Tabellenverzeichnis	66
	Literaturverzeichnis	67

Formelzeichen

A_c	Gesamtfläche des Betonquerschnitts
A_s	Querschnittsfläche des Betonstahls
$A_{s,req}$	Querschnittsfläche des erforderlichen Betonstahls
d_g	Durchmesser des Größtkorns einer Gesteinskörnung
d_s	Durchmesser eines Bewehrungsstabes
F_{td}	Bemessungswert der Zugkraft in der Längsbewehrung
$F_{td,Rd}$	Widerstandswert eines Bewehrungsstabes
f_{bd}	Bemessungswert der Verbundfestigkeit
f_{ctd}	Bemessungswert der zentrischen Betonzugfestigkeit
f_{yd}	Bemessungswert der Streckgrenze des Betonstahls
k_1	Beiwert für die Berechnung der Stababstände
k_2	Beiwert für die Berechnung der Stababstände
l_0	Bemessungswert der Übergreifungslänge eines Stoßes
$l_{0,min}$	erforderlicher Grundwert der Übergreifungslänge eines Stoßes
l_{bd}	Bemessungswert der Verankerungslänge
$l_{b,min}$	Mindestwert der Verankerungslänge
$l_{b,reqd}$	erforderlicher Grundwert der Verankerungslänge
l_s	lichter Stababstand zwischen parallelen Einzelstäben oder Lagen
T	Zugkraft eines Bewehrungsstabes
U_s	Umfang eines Bewehrungsstabes
$\alpha_1 - \alpha_6$	Beiwerte für die Bestimmung der Verankerungslänge
η_1	Beiwert zur Berücksichtigung der Verbundbedingungen während des Betonierens
η_2	Beiwert zur Berücksichtigung des Stabdurchmessers
τ_b	Bemessungswert der Verbundspannung

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Motivation

Durch die Bemessung mittels Computerprogrammen ist es möglich, relativ schnell komplexe Tragwerke zu modellieren und auch zu bemessen. Oftmals ist die geringe Übersichtlichkeit, Nachvollziehbarkeit, Darstellung der Ergebnisse und die Bemessung von Detailpunkten eine Problematik bei der Bemessung mittels Computerprogrammen.

Wie bereits in [Tue, 2021] gezeigt, bietet die Verwendung des Kraftflusses und weitergehend die Bemessung mittels Stabwerkmodell sowohl eine anschauliche, als auch nachvollziehbare Ergänzung zur konstruktiven Durchbildung von Betontragwerken. Als Problem stellt sich hier die begrenzte Verwendbarkeit von Stabwerkmodellen dar, da für jeden Lastfall ein gesondertes Stabwerk entwickelt werden muss. Diese Entwicklung bedeutet oftmals einen unwirtschaftlichen Zeitaufwand, deshalb werden im Rahmen dieser Arbeit FE-Ergebnisse mit Stabwerkmodellen verglichen und etwaige Abweichungen aufgezeigt.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist das Erstellen einer Übersicht für die Bewehrungsführung von Pfahlkopfplatten mit ausgewählten Geometrien bei Integralbrücken. Da sich bei der Bemessung von Brücken sehr viele verschiedene Lastfallkombinationen bzw. Spannungszustände ergeben, dürfen die Ergebnisse nur als Richtwerte angesehen werden. Das Erstellen eines vollständigen Regelwerkes ist nicht vorgesehen. Das Beachten der jeweiligen Rahmenbedingungen und Erkennen von kritischen Bemessungsstellen sind stets notwendig.

1.3 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden die wichtigsten Regeln und Empfehlungen der Literaturrecherche zum Bemessen mittels Stabwerkmodellen zusammengefasst.

Das Kapitel 3 enthält das Festlegen der zu betrachtenden Pfahlkopfplattengeometrien, das Erstellen von zweidimensionalen Stabwerksystemen der jeweiligen Pfahlkopfplatten und einen Vergleich der FE- und Stabwerkbemessung. Anschließend werden aufbauend auf den zweidimensionalen Systemen dreidimensionale Stabwerksysteme erstellt.

Unter Zuhilfenahme der vorher entwickelten Stabwerke werden in Kapitel 4 Bereiche herausgearbeitet, in welchen für die ausgewählten Pfahlkopfplatten eventuelle Zusatzbewehrung oder eine Verdichtung der gewählten Bewehrung sinnvoll sein kann.

2 Grundlagen

In Kapitel 2 wird zunächst das System der Pfahlkopfplatte erklärt. Anschließend folgt eine Zusammenfassung der Bemessungsmethoden mittels Stabwerkmodellen. Als Grundlage hierfür dienen [Schlaich, 2001] und [Zilch, 2010]. Am Ende des Kapitels folgt eine Zusammenfassung der Hinweise zur Bewehrungsführung aus [EC-2] und [ÖNorm 1536].

2.1 Pfahlkopfplatten

Pfahlgründungen in Kombination mit einer Plattengründung sind eine häufig verwendete Gründungsart für Brücken. Sie ermöglichen die Abtragung von Lasten auch auf weniger tragfähigen Böden. Eine optimierte Bewehrungsführung einer Pfahlkopfplatte ist durch eine reine FE-Berechnung nicht immer ersichtlich. Die Analyse des Kraftflusses und weitergehend die Verwendung eines Stabwerkmodells kann die Bewehrungsfindung deutlich erleichtern. Die Verwendung von Stabwerkmodellen zur Bemessung von Pfahlkopfplatten wird auch im [EC-2, Seite 180] vorgeschlagen.

Pfahlkopfplatten, in der Literatur auch als Kombinierte Pfahl-Plattengründung genannt, sind eine Konstruktion von Pfählen und einer Bodenplatte. Ziel dieser Konstruktion ist die Reduzierung der Setzungen durch die kombinierte Lastabtragung über Mantelreibung und Spitzendruck der Pfähle und die Sohlnormalspannungen der Bodenplatte. Durch die kombinierte Tragwirkung der Pfähle mit der Bodenplatte ist es möglich, die benötigte Anzahl der Pfähle zu reduzieren, wobei diese günstige Wirkung in der Praxis häufig unberücksichtigt bleibt. [Conrad, 2012, Seite 572]

Da Pfahlkopfplatten oft eine eher gedrungene Geometrie besitzen ist es nicht immer möglich die Bemessung auf Grundlage der Biegetheorie durchzuführen. Es handelt sich viel mehr um ein Scheibenproblem, das mit Hilfe von Stabwerkmodellen abgebildet werden kann. [Tue, 2015, Seite 287]

Abbildung 2.1 und Abbildung 2.2 zeigen Teile der Bewehrung in Pfahlkopfplatten zu unterschiedlichen Herstellungszeitpunkten.



Abbildung 2.1: Pfahlbewehrung einer Pfahlkopfplatte [KHP]



Abbildung 2.2: Pfahlkopfplatte Neckartalübergang [LBW]

2.2 Stabwerkmodelle

Abschnitt 2.2 dient dazu, einen Überblick über die Bemessung unter Zuhilfenahme von Stabwerkmodellen zu erlangen. Für den Großteil der Arbeit liegt das Hauptaugenmerk auf die in Kapitel 2.2.3 erwähnten Punkte 1,2 und 13.

2.2.1 Anwendungsgebiete

Die Bemessung mittels Kraftfluss bzw. Stabwerkmodell fand bereits in der Anfangsphase der Stahlbetonbauweise Anwendung und ist bis heute die Grundlage der Querkraftbemessung von Balken. Das Stabwerkmodell gemäß [EC-2] findet vor allem Verwendung bei der Bemessung von Bereichen, in denen Standardbemessungsverfahren nicht anwendbar sind. Diese sind Bereiche statischer oder geometrischer Diskontinuitäten ("D-Bereiche").

Aufgrund der vielen auftretenden Lastfälle ist die Bemessung mittels Stabwerkmodellen nicht mehr relevant. Trotzdem bietet sie zur Analyse des Kraftflusses und der Bewehrungsführung eine gute Näherung.

2.2.2 Bemessungsmethodik

Tragwerksunterteilung

In Stahlbetonbauteilen gibt es Bereiche, bei denen die Bernoulli-Hypothese, das Ebenbleiben des Querschnitts, erfüllt ist ("B-Bereiche") und andere, auf die diese Hypothese nicht zutrifft ("D-Bereiche"). Diese Unterteilung ist für ein möglichst methodisches Vorgehen wichtig.

B-Bereiche

Bei diesen Bereichen verändert sich der Querschnitt und die Belastung über die Länge nicht, oder nur kontinuierlich. Solange sich der Beton im ungerissenen Zustand befindet, können die Beanspruchungen nach der Technischen Biegelehre berechnet werden. Sobald der Beton in den gerissenen Zustand übergeht, müssen entweder ein Stabwerkmodell oder ein Standardbemessungsverfahren des Stahlbetonbaus verwendet werden. Der Unterschied zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Bereichen kann durch Spannungstrajektorien, wie in Abbildung 2.3 gezeigt, veranschaulicht werden.

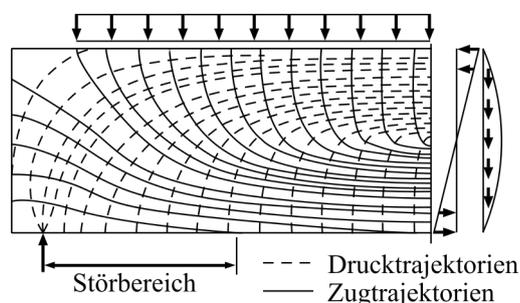


Abbildung 2.3: Spannungstrajektorien eines Balkens nach[Zilch, 2010, Seite 128]

D-Bereiche

In diesen Bereichen gibt es sprunghafte Änderungen in der Querschnittsgeometrie oder der Belastung. Typische Beispiele hierfür sind unter anderem Ausklinkungen, Durchbrüche und Einzellasten. Solange sich der Bereich im ungerissenen Zustand befindet, besteht die Möglichkeit, die Bemessung mittels finiter-Elemente durchzuführen. Sobald der Bereich den gerissenen Zustand erreicht, liefern linear elastische Berechnungen mittels finiter-Elemente-Methode, vor allem im Detail, häufig von der Realität abweichende Ergebnisse. An dieser Stelle bietet das Stabwerksmodell eine gute Lösung.

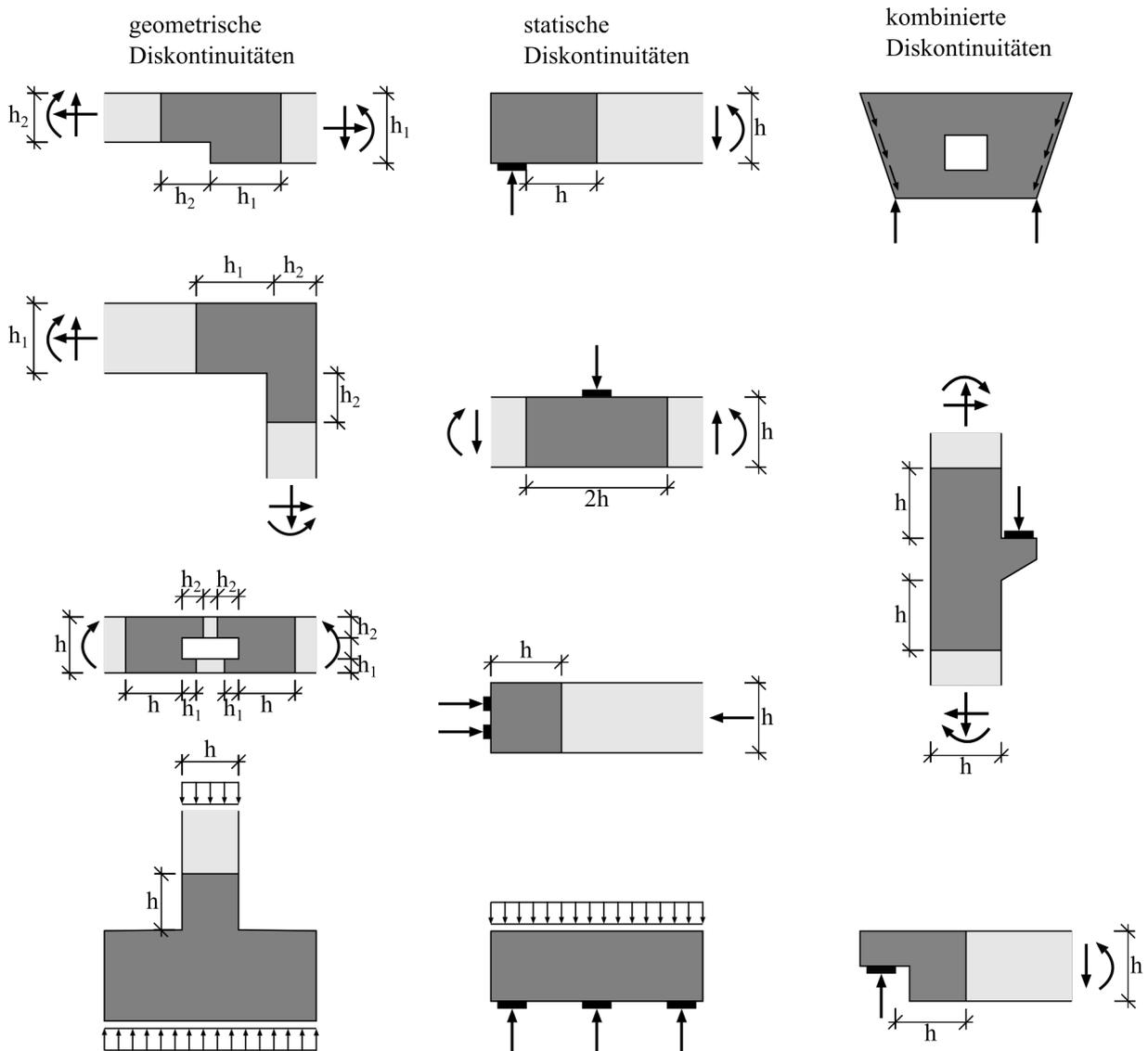


Abbildung 2.4: Größe von D-Bereichen nach[Zilch, 2010, Seite 133]

2.2.3 Bemessungsvorgang

Die Berechnung von B-Bereichen stellt durch die standardisierten und computergesteuerten Bemessungsverfahren keine Herausforderung mehr dar. Damit auch für die Berechnung der D-Bereiche ein möglichst methodisches und nachvollziehbares Bemessen möglich ist, wird nach folgendem Ablauf vorgegangen. Dieser Ablauf orientiert sich an den Konzepten von [Zilch, 2010] und [Schlaich, 2001]. Eine nähere Betrachtung der Punkte 8 bis 12 erfolgt in den nachfolgenden Abschnitten.

1. Idealisieren und Modellieren des Tragwerks. Hier werden die Belastungen und das statische System definiert, auf dem die weiteren Berechnungen basieren.
2. Gliederung von räumlichen Tragwerken in verschiedene Ebenen. Dies ermöglicht die getrennte Bemessung mittels ebener Stabwerkmodelle. Die übliche Einteilung eines Tragwerks erfolgt in zueinander senkrechten und falls notwendig parallelen Ebenen. Dreidimensionale Stabwerkmodelle können auf zweidimensionalen Modellen aufgebaut werden. Auf das Einhalten des Knotengleichgewichts jedes einzelnen Knotens ist Acht zu geben.
3. Ermitteln der Schnittgrößen und Auflagerkräfte am zuvor idealisierten Tragwerk.
4. Unterteilung in B-Bereiche und D-Bereiche laut Abschnitt 2.2.2
5. Bemessen der B-Bereiche mittels Standardbemessungsverfahren des Stahlbetonbaus. Fallweise können diese Bereiche ebenfalls mittels Stabwerkmodelle bemessen werden.
6. Randbedingungen der D-Bereiche. Diese beinhalten Lasten, die direkt auf den Bereich wirken und Spannungen bzw. Kräfte im Schnittbereich der B-Bereiche und D-Bereiche. Die Kräfte im Schnittbereich müssen aus den Bemessungen des B-Bereichs übernommen werden.
7. Überprüfen des Gleichgewichts der einzelnen D-Bereiche
8. Entwickeln eines geeigneten Stabwerkmodells
9. Berechnen der Stabkräfte
10. Bemessen der Zugstreben gemäß [EC-2]
11. Bemessen der Druckstreben gemäß [EC-2]
12. Bemessen der Knotenpunkte gemäß [EC-2]
13. Konstruktive Durchbildung

2.2.3.1 Entwickeln des Stabwerkmodells

Bei der Bemessung von Stabwerkmodellen ist es möglich, den Kraftfluss durch die Wahl der Bewehrungsführung bzw. der Steifigkeit des Bauteils zu steuern. „*Das innere Tragsystem wird durch die Bemessung festgelegt, nicht umgekehrt.*“ [Zilch, 2010, Seite 134]. Dies bedeutet, dass bei einsetzender Rissbildung ein Umlagern des Kraftflusses stattfindet und sich vor allem die Zugkräfte zur Bewehrung hin umlagern. Dieses Umlagern der Kräfte setzt eine Verformung des Bauteils voraus. Da Stahlbeton nur ein begrenztes Verformungsvermögen besitzt, kann es vorkommen, dass bestimmte Bereiche eines Tragwerks bereits ihre Verformungskapazität ausgeschöpft haben und es vor dem Einstellen des gewünschten Tragverhaltens zum Versagen des Bauteils kommt.

Die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit sind ebenfalls zu beachten. Deshalb ist es notwendig, die gewünschte Umlagerung und Verformung zu optimieren.

Grundsätze für die Modellierung

Um sowohl ein baustoffgerechtes Bemessen als auch die spätere Ausführbarkeit sicherzustellen, werden die folgenden Grundsätze zur Modellierung definiert:

- Die Bewehrungsführung, wenn möglich parallel oder senkrecht zur Bauteiloberfläche. Gerade Stäbe mit wenigen Abbiegungen sind zu bevorzugen.
- Oberflächennahe Bewehrung, um die Begrenzung der Rissbreite zu erleichtern.
- Benachbarte Bewehrungsstränge, die sich im gleichen Zugbereich befinden, können in der gemeinsamen Schwerlinie zusammengefasst werden.
- Die Bewehrungsführung soll für verschiedene Lastfälle anwendbar sein.
- Der Winkel zwischen Druck- und Zugstreben sollte bei 30° bis 60° liegen.
- Entwerfen von möglichst einfachen Modellen im ersten Schritt. Anschließendes Verfeinern von Teilbereichen unter der Verwendung von Subsystemen.

Für die Modellfindung stehen unter anderem die folgenden Methoden zu Verfügung:

Lastpfadmethode

Bei der Modellierung mittels Lastpfadmethode werden zunächst die Belastungsflächen entsprechend der gegenüberliegenden Auflagerkräfte aufgeteilt und angesetzt. Die Lastpfade nehmen einen möglichst kurzen und stromlinienförmigen Verlauf innerhalb des Bauteils. Sie dürfen sich nicht kreuzen und starten bzw. enden in den Schwerpunkten der Spannungsflächen. Durch die Krümmung der Lastpfade entstehen Umlenkkräfte, die bei der Modellierung ebenfalls berücksichtigt werden müssen.

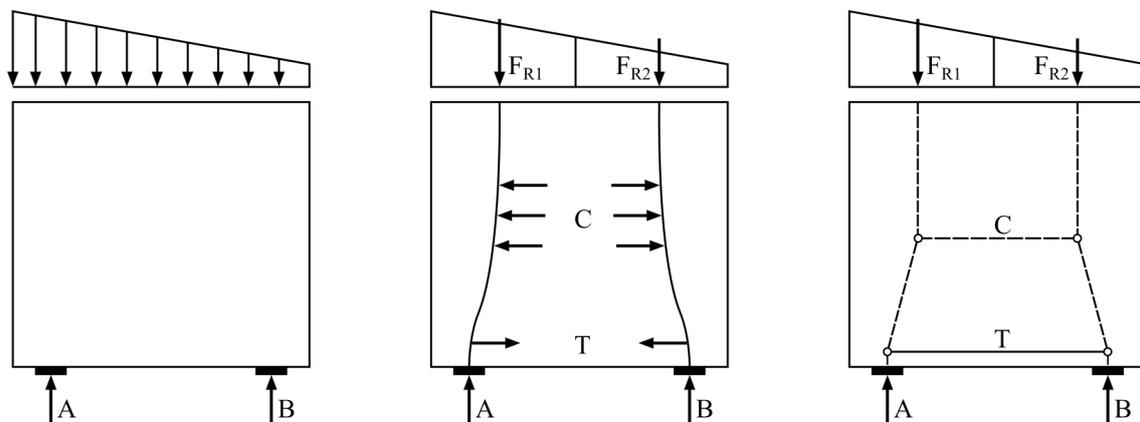


Abbildung 2.5: Modellierung mittels Lastpfadmethode nach [Zilch, 2010, Seite 135]

Orientierung an der Spannungsverteilung

Bei der Modellierung unter Zuhilfenahme der Spannungsverteilung (z.B. aus einer linear elastischen FEM-Berechnung) ist es möglich, den Verlauf der Lastpfade an den Hauptspannungsrichtungen abzulesen.

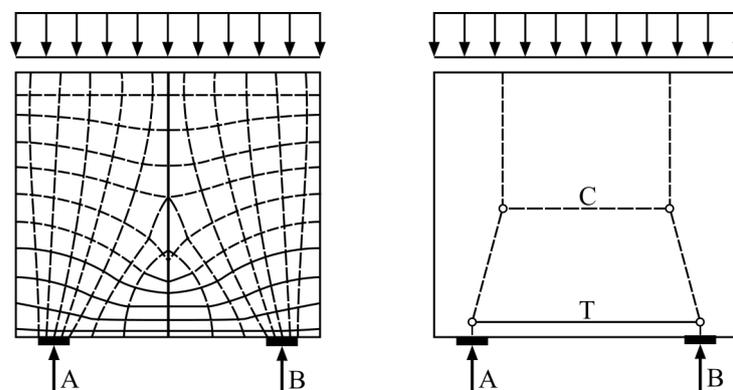


Abbildung 2.6: Modellierung mittels Spannungsverteilung [Schlaich, 2001, Seite 348]

Es besteht auch die Möglichkeit, diese beiden Methoden zu kombinieren, dies bietet sich vor allem bei der Bemessung von sehr komplexen Tragstrukturen an.

2.2.3.2 Bemessen der Zugstreben

Für die Bemessung der Zugstreben wird vorausgesetzt, dass die Fließgrenze des Stahls im Grenzzustand der Tragfähigkeit erreicht ist. Daraus ergibt sich die folgende Formel zur Bemessung der Zugstrebe:

$$F_{td} \leq F_{t,Rd} = A_s * f_{yd} \quad (2.1)$$

bzw. die benötigte Stahlfläche zu:

$$A_{s,req} = \frac{F_{td}}{f_{yd}} \quad (2.2)$$

Bei der Anordnung wird geraten, die benötigte Bewehrung über die gesamte Breite der Zugzone zu verteilen, um eine Begrenzung der Rissbreite zu erleichtern. Falls eine mehrlagige Bewehrung notwendig ist, muss der Gesamtschwerpunkt der einzelnen Lagen wieder in der Schwerlinie des Fachwerkmodells liegen.

Verankerung

Die Verankerung der Bewehrung erfolgt bei gekrümmten Stäben über die Umlenkpressung. Bei geraden Stäben erfolgt die Verankerung über eine Abstützung des Betons auf den Rippen der Bewehrung. Matten werden über die angeschweißten Querrippen verankert. Auch die Oberflächenrauigkeit hat einen Einfluss auf den Verbund zwischen Bewehrung und Beton. Zusammengefasst werden diese Wirkungsweisen in der folgenden Gleichung zur Ermittlung der Verbundspannung:

$$\tau_b = \frac{T}{\pi * d_s * l_{bd}} \quad (2.3)$$

Ebenfalls zu beachten sind die entstehenden Querkzugkräfte bei gekrümmten Stäben und Ringzugkräfte bei geraden Stäben. Diese können unter Umständen den Beton aufspalten und zu großen Längsrissen führen oder den Beton absprengen. Um diese Schäden zu vermeiden, muss, falls notwendig, eine Querbewehrung vorgesehen werden.

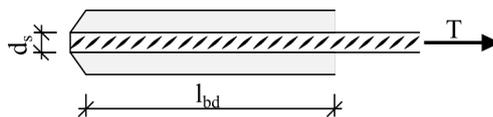


Abbildung 2.7: Skizze zur Bemessung der Verankerungslänge

2.2.3.3 Bemessen der Druckstreben

Anders als Zugstreben, die durch lineare eindimensionale Elemente modelliert werden, werden Betondruckstreben durch zwei- oder auch dreidimensionale Spannungsfelder repräsentiert. Für die Modellierung gibt es 3 typische Formen:

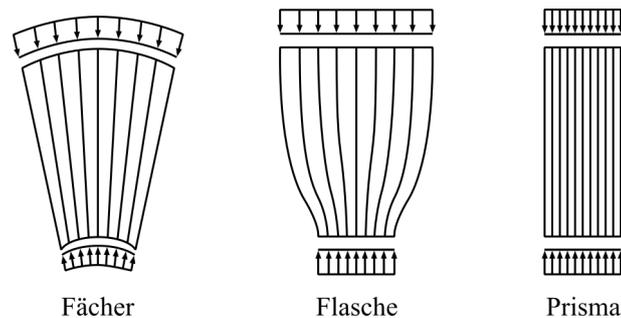


Abbildung 2.8: Formen von Druckfeldern [Schlaich, 2001, Seite 365]

Die prismatische Verteilung ist hauptsächlich in den Druckgurten von B-Bereichen zu finden. Fächerförmige Felder verbinden verschmierte Knoten mit konzentrierten Knoten z.B. im Endauflagerbereich von Balken. Ein flaschenförmiges Spannungsfeld entsteht bei der Verbindung von zwei konzentrierten Knotenpunkten. Die kritischen Punkte von Druckstreben befinden sich in der Nähe von konzentrierten Knoten, da hier die Spannungsfelder die größte Krümmung erfahren und dadurch nennenswerte Umlenkkräfte entstehen. Diese Umlenkkräfte rufen Querspannungen hervor, die berücksichtigt werden müssen. Da die Krümmung der Spannungsfelder am Übergang zu den Knoten am größten ist und diese ohnehin bemessen werden müssen, entfällt ein gesonderter Nachweis der Druckstreben.

2.2.3.4 Bemessen der Knotenpunkte

Knotenpunkte von Stabwerkmodellen setzen sich aus zumindest 3 Stäben zusammen. Es wird unterschieden in verschmierte und konzentrierte (singuläre) Knoten. Ein Nachweis von verschmierten Knoten ist nicht notwendig, diese sind durch Konstruktionsregeln abgedeckt. Sollte vorausgesetzt sein, dass ein verschmierter Knoten ungerissen bleibt, muss das Spannungsfeld des Betons überprüft werden.

Konzentrierte Knoten treten bei der Einleitung von Einzellasten, Auflagerkräften, Bereichen konzentrierter Bewehrung und geometrischer Diskontinuitäten auf. Da hier Kräfte in einem sehr kleinen Bereich umgeleitet werden müssen, stellen konzentrierte Knoten die kritischen Punkte eines Tragwerks dar. Zu beachten ist, dass bei Knoten mit zumindest einem Zugstab auf jeden Fall die Verankerung dieses Stabes nachzuweisen ist. Je nach Typ der Streben können die Knoten in die folgenden 3 Typen unterschieden werden:

- Druck-Druck-Druck-Knoten
- Druck-Druck-Zug-Knoten
- Druck-Zug-Zug-Knoten

Druck-Druck-Druck Knoten treten unter anderem bei Einzellasten und Konsolen auf. Da sich hier ein günstig wirkender zweiachsialer Druckspannungszustand einstellt, ist es möglich, die effektive Festigkeit des Betons laut [Zilch, 2010, Seite 142] um 10% gegenüber der einachsialen Festigkeit zu erhöhen. Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit ist sicherzustellen, dass die Spannungen in den Knotenrändern die Betondruckfestigkeit nicht überschreiten. Die Abmessungen a_0 und a_1 können frei gewählt werden, die restliche Geometrie des Knotens ist über die Winkel Θ_2 und Θ_3 festgelegt.

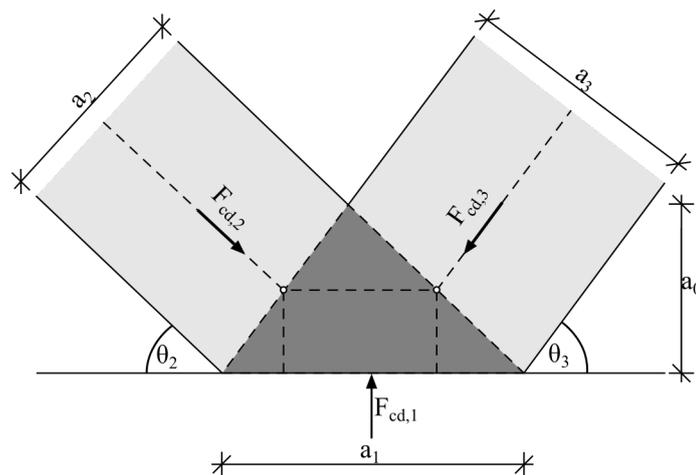


Abbildung 2.9: typischer Druck-Druck-Druck-Knoten [Zilch, 2010, Seite 143]

Druck-Druck-Zug-Knoten, deren Bewehrung im Knoten endet und verankert werden muss, tritt beispielsweise bei Endauflagern von Balken und wandartigen Trägern und exzentrischer Einleitung von konzentrierten Kräften z.B. Konsolen auf. Die Verankerung solcher Bewehrung kann folgendermaßen erfolgen:

- Anker am Stabende
- Verankerung über Verbund gerader Stäbe
- Verankerung über Verbund mit zusätzlichen Maßnahmen (Endhaken, Schlaufen, angeschweißte Stäbe, etc.)

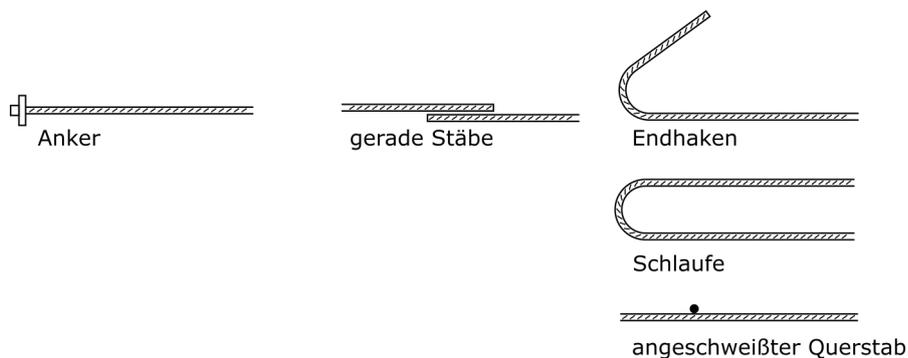


Abbildung 2.10: Verankerungsmöglichkeiten

Die Art der gewählten Verankerung wirkt sich dabei auf die Abmessungen des Knotens aus. Bei einer Verankerung mittels eines Ankerkörpers wird der Bewehrungsstab auf die volle Tragfähigkeit ausgelegt. Hier erfolgt die Einleitung der Zugkraft als konzentrierte Druckkraft hinter dem Knoten und kann eventuell einen Nachweis auf Teilflächenpressung benötigen. Die Verankerung über Verbund wurde bereits im Abschnitt 2.2.3.2 behandelt. Für die Bemessung der benötigten Verankerungslänge wird in die Gleichung 2.3 der Bemessungswert für die Verbundfestigkeit eingesetzt und auf die Verankerungslänge umgerechnet.

$$l_{b,rqd} = \frac{F_{td}}{f_{bd} * U_s} = \frac{d_s * f_{yd}}{4 * f_{bd}} \quad (2.4)$$

Zu beachten ist, dass der Wert der Verbundfestigkeit von vielen Faktoren abhängt. Bei Querdruck (bei Druck-Zug-Knoten meistens der Fall) kann die Verbundfestigkeit nach [Zilch, 2010, Seite 144] um 50% erhöht werden. Erfolgt die Ausbildung des Bewehrungsstabes als Schlaufe oder Haken, wirkt eine Kombination aus Kontaktpressung und Verbund. Bei dieser Variante werden laut [Zilch, 2010, Seite 144] nur mehr 50-70% der Zugkraft über Verbund abgetragen.

Bei der Verwendung von Haken oder Schleifen ist zu beachten, dass durch die Umlenkung der Zugkraft eine Pressung des Betons erfolgt. Hier ist ein Nachweis der zulässigen Betondruckspannung notwendig, bei der der Einfluss des zu erwartenden Querzuges zu beachten

und die Betonfestigkeit dementsprechend abzumindern ist. Dieser Nachweis entfällt bei einer einlagigen Bewehrung, da hier durch den Mindestbiegerollendurchmesser sichergestellt ist, dass die zulässige Betonspannung nicht überschritten wird.

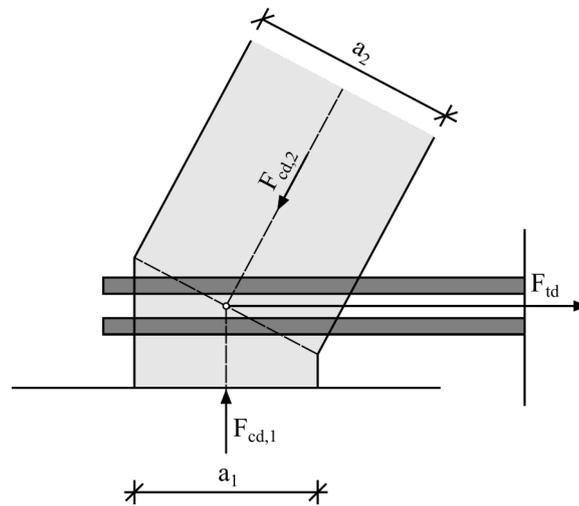


Abbildung 2.11: typischer Druck-Druck-Zug-Knoten ohne Überstand der Bewehrung [Zilch, 2010, Seite 144]

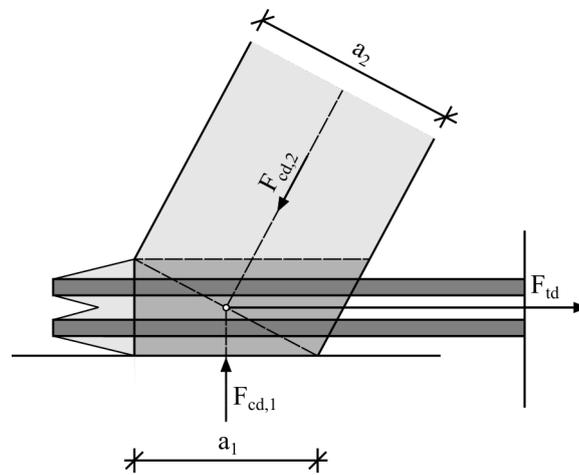


Abbildung 2.12: typischer Druck-Druck-Zug-Knoten mit Überstand der Bewehrung [Zilch, 2010, Seite 144]

Druck-Zug-Zug-Knoten treten beispielsweise bei Rahmenecken und abgesetzten Widerlagern auf. Hier wird dem Zugstab ein Richtungswechsel aufgezwungen, durch den Umlenkpressungen entstehen. Nachzuweisen ist, dass die Druckspannungen nicht die effektive Druckfestigkeit überschreiten. Zu beachten ist die Reduktion der effektiven Druckfestigkeit aufgrund des in zwei Richtungen wirkenden Querkuges. Dies kann bei einer einlagigen Bewehrung vernachlässigt werden, da hier die Einhaltung der zulässigen Spannung durch den zulässigen Biegerollendurchmesser sichergestellt ist.

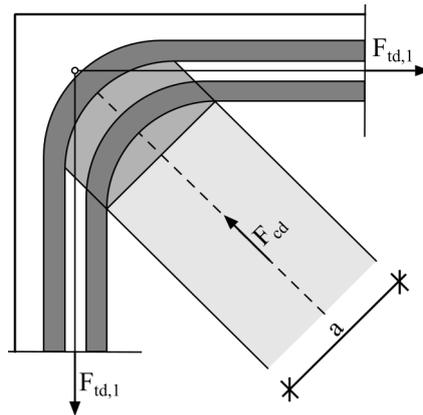


Abbildung 2.13: typischer Druck-Zug-Zug-Knoten[Zilch, 2010, Seite 146]

2.3 Bewehrungsführung

Die Bewehrungsführung nimmt einen großen Einfluss auf die Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von Bauteilen. Besonderes zu beachten ist hierbei die Herstellbarkeit der Bauteile, die Rissbildung und Diskontinuitäten der Bewehrung (Stöße und Verankerungen) [König, 2008, Seite 385].

Das Kapitel 2.3 soll einen Überblick über einige der in [EC-2] festgelegten allgemeinen Bewehrungsregeln liefern. In den Kapiteln 2.3.1 und 2.3.2 wird näher auf die Besonderheiten bei Platten- bzw. Pfahltragwerken eingegangen.

Die folgenden Punkte werden näher betrachtet:

- Stababstände
- Verankerung
- Biegen der Bewehrung
- Stöße

Da dieses Kapitel nur einen Überblick verschafft und dadurch nicht alle Bewehrungsregeln enthält, ist für eine ordnungsgemäße Bemessung die Zuhilfenahme des Eurocodes immer noch notwendig.

2.3.0.1 Stababstände

Der Stababstand ist gemäß [EC-2] so zu wählen, dass ein ordnungsgemäßes Einbauen des Betons sichergestellt werden kann. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf einem ausreichenden Verbund (die Bewehrung muss vollständig vom Beton ummantelt sein) und der Verdichtbarkeit. Übergreifende Stäbe dürfen sich entlang der Übergreifungslänge berühren. Der minimale lichte Abstand ist definiert als:

$$l_s = \max[k_1 * d_s; d_g + k_2; 20 \text{ mm}] \quad (2.5)$$

2.3.0.2 Biegen der Bewehrung

Bei der Wahl des kleinsten Biegerollendurchmessers von Betonstählen müssen sowohl Biegerisse im Stab, als auch ein Betonversagen im Bereich der Stabbiegung ausgeschlossen sein. Um eine Schädigung der Bewehrung zu verhindern, ist das Einhalten eines Mindest-Biegerollendurchmessers sicherzustellen.

Stabdurchmesser	Mindestwerte der Biegerollendurchmesser für Haken, Winkelhaken, Schlaufen
$d_s \leq 16 \text{ mm}$	$4 * d_s$
$d_s \geq 16 \text{ mm}$	$7 * d_s$

Tabelle 2.1: Mindest-Biegerollendurchmesser laut [EC-2]

2.3.0.3 Verankerung

Das Thema der Verankerung wurde bereits in Kapitel 2.2.3 erläutert. Ergänzend werden die Formeln für die Verbundfestigkeit des Betons und für den Bemessungswert der Verankerungslänge angeführt:

$$f_{bd} = 2,25 * \eta_1 * \eta_2 * f_{ctd} \quad (2.6)$$

$$l_{bd} = \alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * \alpha_4 * \alpha_5 * \alpha_6 * l_{b,rqd} \geq l_{b,min} \quad (2.7)$$

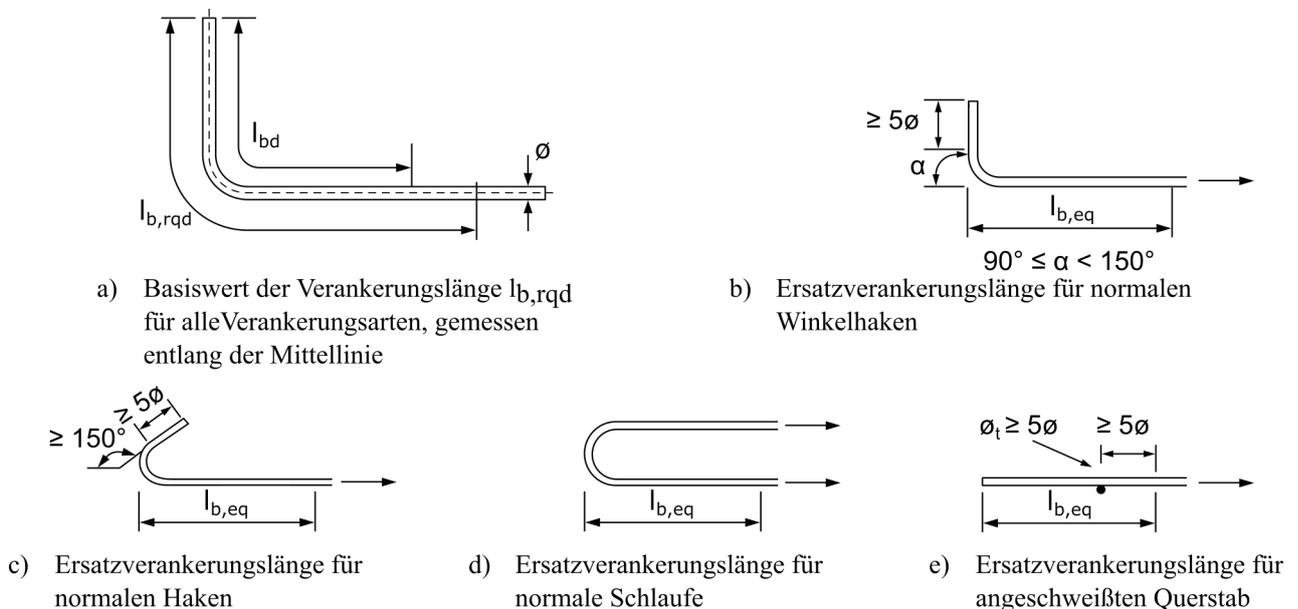


Abbildung 2.14: Verankerungsarten laut [EC-2]

2.3.0.4 Stöße

Bei der Durchbildung von Stößen ist sicherzustellen, dass die Kraftübertragung zwischen den Bewehrungsstäben sichergestellt ist, keine Betonabplatzungen im Bereich des Stoßes und keine größeren Risse auftreten. Stöße sollen versetzt, symmetrisch und in nicht hochbeanspruchten Bereichen angeordnet werden. Der lichte Abstand zwischen den zu übergreifenden Stäben sollte $4 * d_s$ bzw. 50mm nicht überschreiten, der Längsabstand von benachbarten Stößen sollte nicht größer als $0,3 * l_0$ sein. Die Übergreifungslänge ergibt sich zu:

$$l_0 = \alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * \alpha_4 * \alpha_5 * \alpha_6 * l_{b,rqd} \geq l_{0,min} \quad (2.8)$$

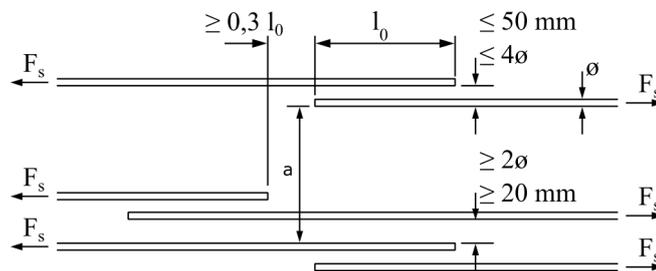


Abbildung 2.15: benachbarte Stöße laut [EC-2]

2.3.1 Bewehrungsführung bei Platten

Bei einachsig gespannten Platten muss die Querbewehrung gemäß [EC-2] mindestens 20% der Längsbewehrung entsprechen. Bei gelenkig gelagerten Platten ist mindestens die Hälfte der erforderlichen Längsbewehrung bis zum Auflager durchzuführen und zu verankern. Wird ein Abheben der Ecken verhindert, ist eine Drillbewehrung vorzusehen. Entlang eines freien Randes ist eine Randbewehrung anzuordnen, welche in der Regel durch die schon vorhandene Bewehrung abgedeckt ist. Es ist ein Maximalabstand der Bewehrungsstäbe von $s_{max,slabs}$ einzuhalten.

Bewehrungsrichtung	Achsabstand der Bewehrung
Hauptbewehrung	$1,5 h \leq 250 \text{ mm}$
Querbewehrung	$3,0 h \leq 350 \text{ mm}$

Tabelle 2.2: max. Abstand der Bewehrungsstäbe von Platten laut [EC-2]

Bei Platten mit zweiachsiger Tragwirkung ist der Wert der Hauptbewehrung für beide Richtungen anzusetzen.

Die **Mindestbetondeckung** ist ebenfalls bei der Planung der Bewehrungsführung zu beachten, um die Tragfähigkeit eines Bauwerks über die gesamte Lebensdauer sicherzustellen. Bei der Berechnung der Betondeckung sind vor allem die auf das Bauteil wirkenden Umwelteinflüsse zu beachten. Das Berechnungsverfahren der Mindestbetondeckung ist in [EC-2] Teil 1 Kapitel 4 zu finden.

2.3.2 Bewehrungsführung bei Pfählen

Die folgenden Regeln zur Bewehrungsführung basieren auf [ÖNorm EN 1536].

2.3.2.1 Längsbewehrung

Für bewehrte Bohrpfähle ist eine Mindestanzahl von 4 Stäben mit einem Durchmesser von je 12mm als Längsbewehrung vorzusehen. Der Abstand zwischen den Stäben der Längsbewehrung sollte möglichst groß gewählt werden, trotzdem sollte ein Wert von 400mm nicht überschritten werden. Eine mehrlagige Längsbewehrung ist nach Möglichkeit zu vermeiden. Der lichte horizontale Abstand zwischen den Längsstäben darf 100mm nicht unterschreiten. Bei Kreisquerschnitten ist eine symmetrische Bewehrung vorzusehen. Die Längsbewehrung muss einem Mindestwert nach Tabelle 2.3 entsprechen.

Nennquerschnitt des Bohrpfahles	Querschnittsfläche der Längsbewehrung
$A_c \leq 0,5 m^2$	$A_s \geq 0,5 A_c$
$0,5 m^2 < A_c \leq 1,0 m^2$	$A_s \geq 0,0025 m^2$
$A_c > 1,0 m^2$	$A_s \geq 0,25 A_c$

Tabelle 2.3: Mindestlängsbewehrung für Pfähle laut [ÖNorm EN 1536]

2.3.2.2 Querbewehrung

Die Mindestwerte für den lichten Abstand der Querbewehrung sind analog der Längsbewehrung zu wählen. Längsstäbe in Ecken sollen durch eine Querbewehrung gehalten werden. Die Durchmesser sind nach Tabelle zu wählen.

Querbewehrung	Durchmesser der Querbewehrung
Rechteckige und runde Bügel oder Wendelbewehrung	$\geq 6 mm$ und \geq ein Viertel des Größtdurchmessers der Längsbewehrung
Stäbe von Baustahlmatten als Querbewehrung	$\geq 5 mm$

Tabelle 2.4: Empfohlene Durchmesser der Querbewehrung für Pfähle laut [ÖNorm EN 1536]

2.3.2.3 Mindestbetondeckung

Bei Pfählen muss die Mindestbetondeckung laut [EC-2] hinsichtlich der Expositionsklassen und des Verbundes eingehalten werden. Aufgrund der Ausführung ergeben sich hierbei weitere Werte der Mindestbetondeckung, die nicht unterschritten werden sollten. Für Pfähle mit einem Durchmesser von $D > 0,6 m$ sollte die Mindestbetondeckung 60 mm nicht unterschreiten, für Pfähle mit einem Durchmesser von $D \leq 0,6 m$ sollte ein Wert von 50 mm eingehalten werden.

Zusätzlich sollte bei folgenden Fällen die Mindestbetondeckung auf 75 mm vergrößert werden:

- bei unverrohrten Pfählen in weichem Baugrund
- bei Unterwasserbeton mit 32 mm Größtkorn der Gesteinskörnung
- bei Verwendung von Silikastaub als Zementersatz
- wenn die Bewehrung nachträglich in den frischen Beton eingebracht wird
- bei unebener Oberfläche der Borhlochwände

3 Entwicklung von Bewehrungskonzepten

In Kapitel 2.2.1 wurde erläutert, dass es nicht zweckmäßig ist, für jeden auftretenden Lastfall ein gesondertes Stabwerkmodell zur Bemessung zu erstellen. Verglichen mit FE-Modellen liefern Stabwerkmodelle allerdings anschaulichere Ergebnisse, welche das Erstellen von Bewehrungsführungen deutlich erleichtern. Aus diesem Grund wird nachfolgend die Ähnlichkeit der Bemessungsergebnisse von FE-Modellen und Stabwerkmodellen untersucht und darauf aufbauend ein Bewehrungskonzept für verschiedene Lastfälle erstellt. In diesem Kapitel wird auf das Erstellen der zum Vergleich dienenden Modelle näher eingegangen. Die dazu entwickelten Bewehrungskonzepte werden in Kapitel 4 erläutert.

3.1 Ablauf

Der Ablauf sieht das Erstellen eines FE-Modells mittels des Softwarepakets SOFiSTiK mit anschließender Ausgabe des Bemessungsergebnisses vor. Als Vergleich dazu dient ein händisch entwickeltes Stabwerkmodell, dessen Stabkräfte mittels Ruck-Zuck ermittelt werden. Anschließend folgt ein Vergleich der ermittelten erforderlichen Bewehrungsmengen. Da es sich um einen allgemeinen Vergleich handelt, wird dieser nur qualitativ dargestellt, auf das Ausführen von spezifischen Geometrien, Lasten und Bewehrungsmengen wird verzichtet.

Als Vergleichsobjekte dienen vier verschiedene Pfahlkopflattengeometrien mit jeweils zwei Bemessungslastfällen. Daraus ergeben sich insgesamt acht verschiedene Bemessungssituationen, die im weiteren Verlauf als „Varianten“ bezeichnet werden. Auf die genauen Einzelheiten der Geometrien und Lastfälle wird nachfolgend näher eingegangen.

3.1.1 Bemessungslastfälle

Es werden zwei Lastfälle zur Bemessung herangezogen, diese sind dargestellt in Abbildung 3.1. Lastfall 1 stellt ein überdrücktes Widerlager dar, das an der Erdseite mit $0,35 * f_{cd}$ und an der Luftseite mit $0,15 * f_{cd}$ belastet ist. Lastfall 2 ist ein Widerlager mit einem öffnenden Moment, das an der Erdseite mit $0,60 * f_{cd}$ und an der Luftseite mit f_{ctm} belastet ist.

Die Wahl der Lastfälle beruht auf einer einfeldrigen Brücke, belastet durch Eigengewicht und Erddruck.

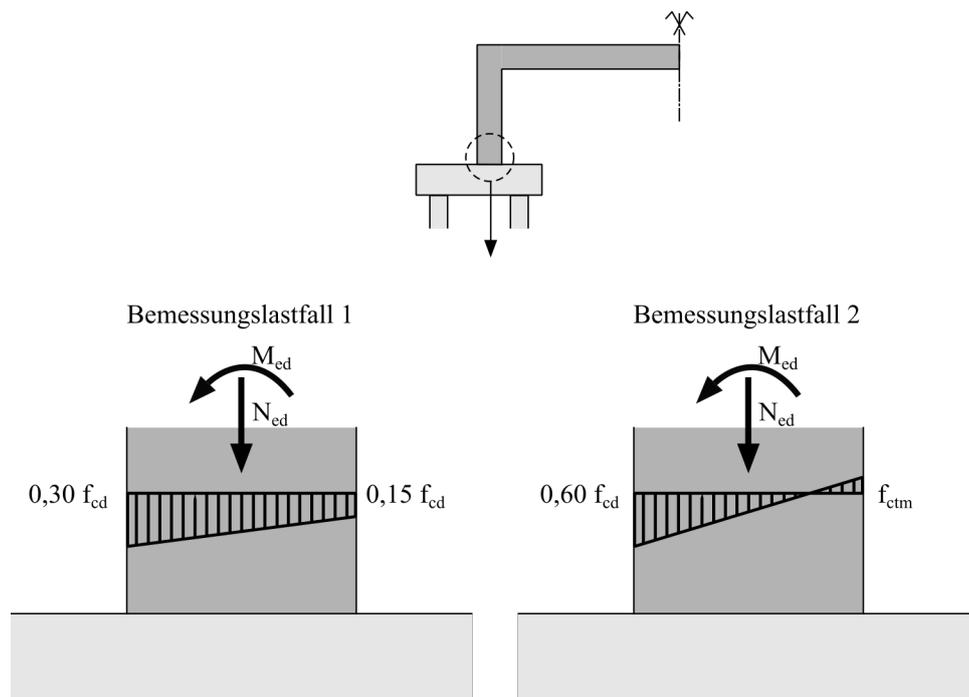


Abbildung 3.1: Bemessungslastfälle

3.1.2 Variantenbeschreibung

In den Abbildungen 3.2, 3.3, 3.4 und 3.5 sind die Abmessungen der zu betrachtenden Varianten dargestellt. Die Plattenstärke, Durchmesser der Pfähle und Dicke der Widerlagerwand sind bei allen Pfahlkopfplatten gleich groß. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten besteht in den Abständen der Pfähle zueinander, dem Abstand der Randpfähle zum Plattenrand und der Positionierung der Widerlagerwand auf der Pfahlkopfplatte. Die Abmessungen wurden so gewählt, dass sich möglichst viele verschiedene Kraftflüsse einstellen können.

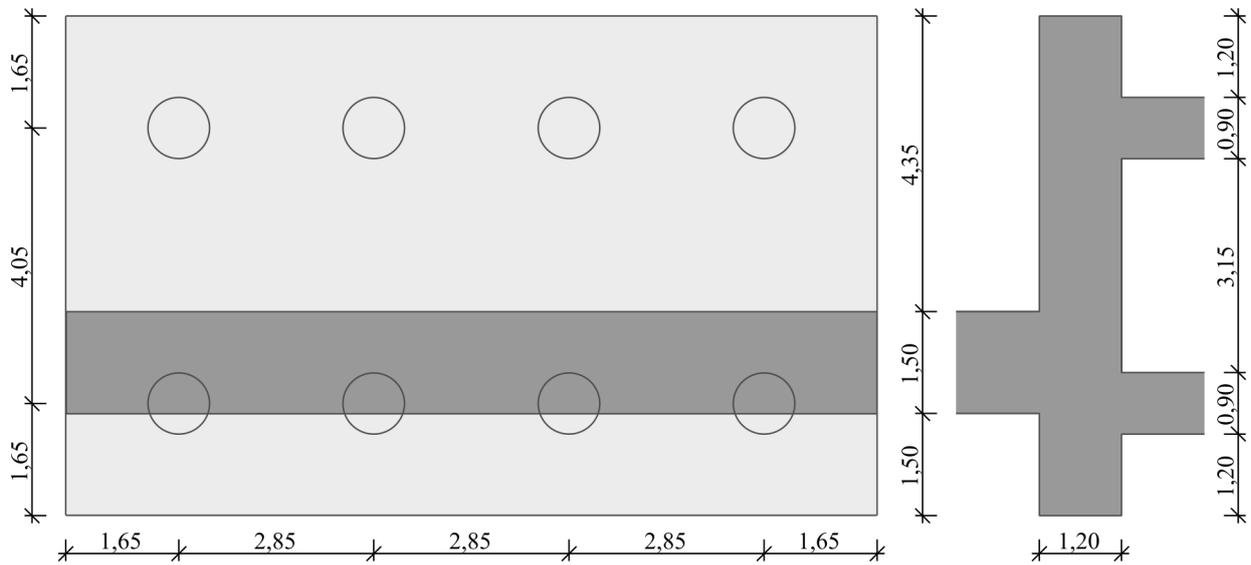


Abbildung 3.2: Abmessungen Variante 1

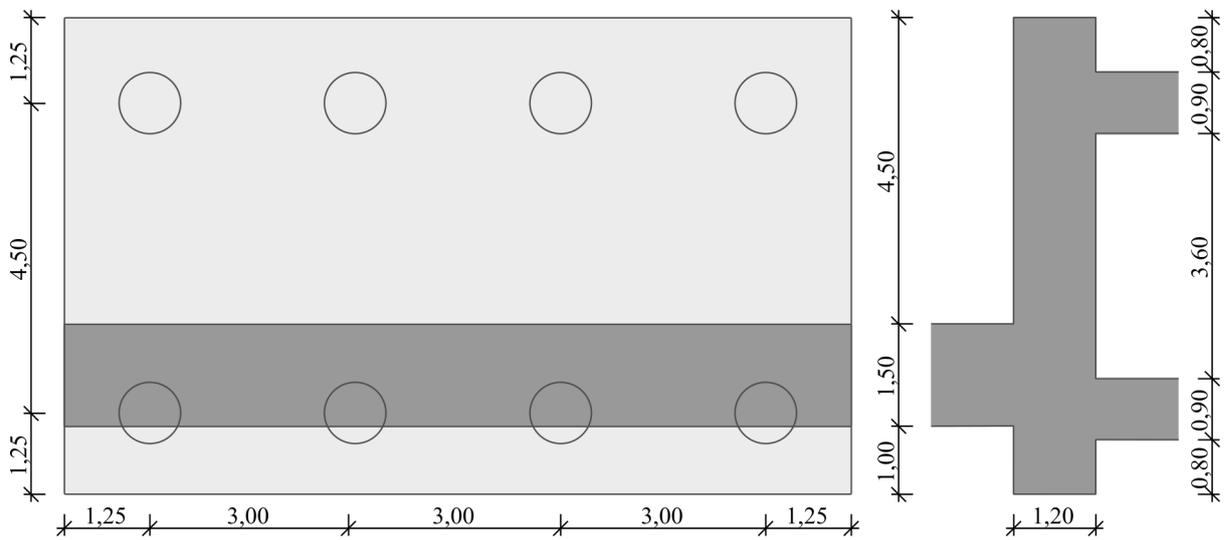


Abbildung 3.3: Abmessungen Variante 2

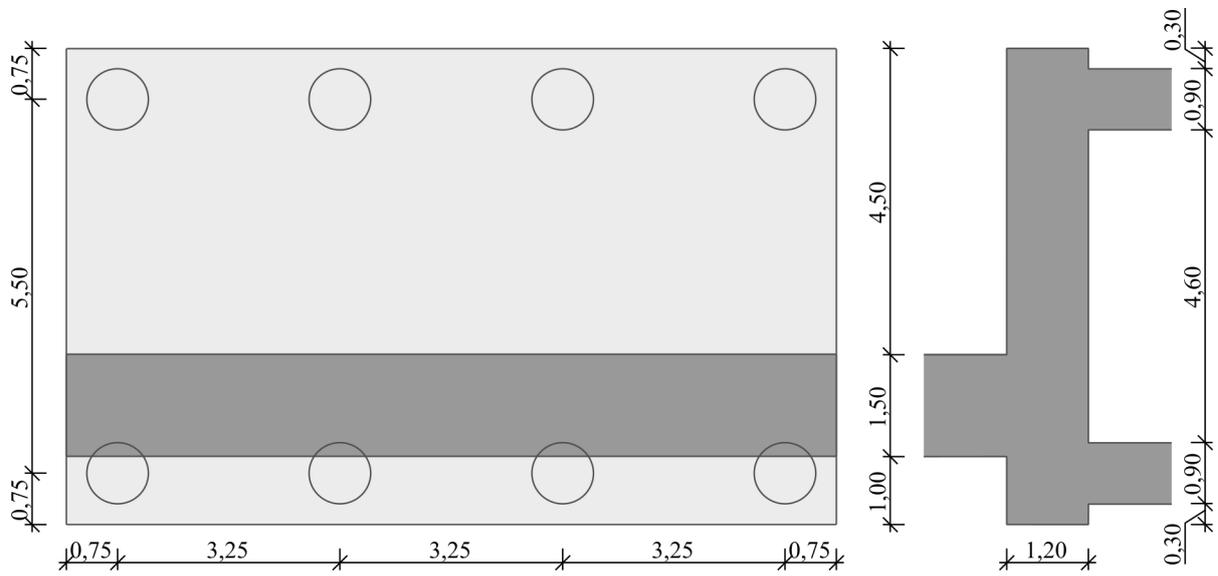


Abbildung 3.4: Abmessungen Variante 3

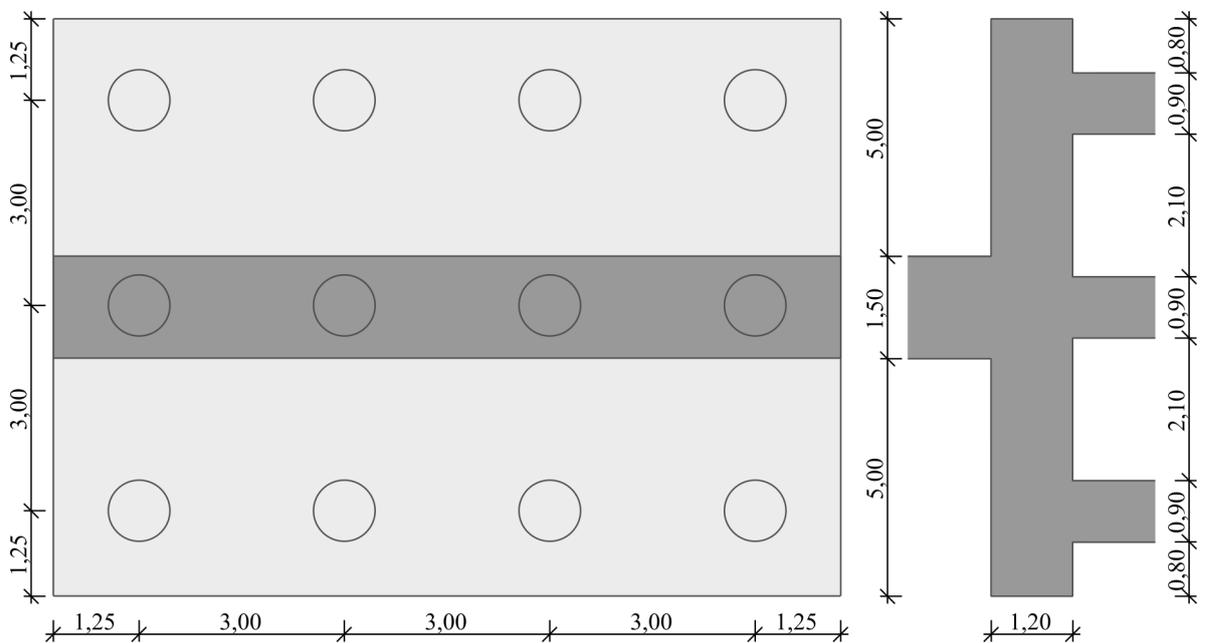


Abbildung 3.5: Abmessungen Variante 4

3.1.3 Beschreibung FE-Modell

Das FE-Modell setzt sich aus den folgenden Elementen zusammen:

- Schalenelement für die Platte
- Stabelemente für die Pfähle
- Stabelement zur Lasteinleitung

Verbunden werden die einzelnen Elemente über starre Kopplungen. Die Abmessungen in der horizontalen Ebene der Platte variieren unter den einzelnen Varianten, die Dicke von 1,20 m ist konstant über alle Varianten. Als Lagerpunkte dienen Einzelfedern an den Fußpunkten und eine Federbettung entlang der Ränder der Pfähle.

Für die Berechnung der Querbettung wurde für den Boden ein Steifemodul von 30.000 kPa angenommen. Durch die Division des Steifemoduls des Bodens durch den Durchmesser des Pfahls ergibt sich gemäß [EC-7] für die Querbettung ein Wert von $33.333 \frac{kN}{m^3}$.

Sowohl Länge als auch Durchmesser der Pfähle sind bei allen Varianten gleich. Die Last wird am oberen Rand der Platte als Stablast appliziert. Der Stab zur Einleitung der Belastung besitzt eine große Torsionssteifigkeit und einen sehr kleinen Durchmesser, um eine einwandfreie Lasteinleitung in die Platte zu gewährleisten.

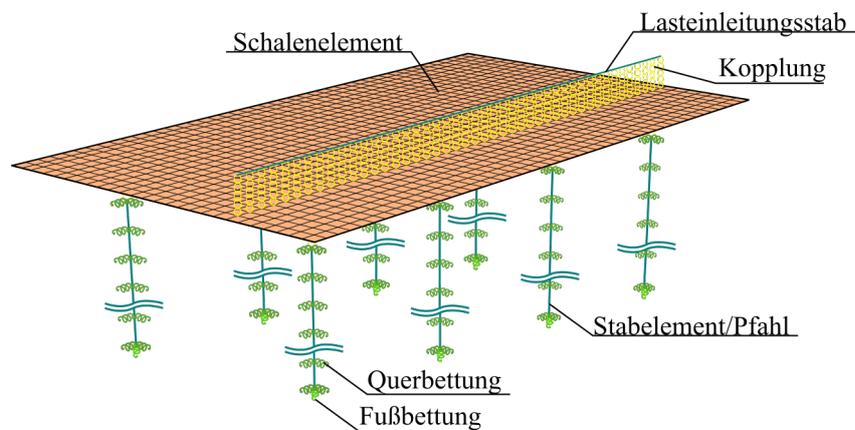


Abbildung 3.6: Finite Elemente Modell der Pfahlkopfplatte ohne Querschnitte (Variante 1)

3.1.4 Beschreibung Stabwerkmodell

Die Stabwerkmodelle der jeweiligen Varianten werden zunächst händisch nach den in Abschnitt 2.2 genannten Regeln entworfen. Die Belastungen für die Stabwerke ergeben sich vereinfacht aus den Einflussflächen zwischen den Pfählen (der halbe Abstand eines Pfahls zum Pfahl links und rechts davon). Anschließend erfolgt die Modellierung und Berechnung der Stabkräfte mittels Ruck-Zuck. Aus den hieraus gewonnenen Kräften werden mittels Gleichung 2.2 die erforderlichen Bewehrungsmengen ermittelt und können mit denen der FE-Bemessung verglichen werden.

Aufbauend auf den zuvor entwickelten zweidimensionalen Stabwerksystemen werden dreidimensionale Stabwerke gebildet. Die Belastungen im dreidimensionalen Bereich werden ebenfalls als Punktlasten in der Mitte zwischen zwei Pfählen angesetzt und breiten sich dann von dort zu den Pfählen hin aus. Aus diesen dreidimensionalen Modellen kann im Anschluss ein Bewehrungskonzept für die jeweiligen Varianten entwickelt werden.

Zu beachten ist, dass sich bei dem Erstellen der dreidimensionalen Modelle Stäbe ergeben können, die eventuell eine Modifikation des zweidimensionalen Stabwerks nach sich ziehen.

3.2 Variantenstudie

3.2.1 Variante 1 Lastfall 1

Variante 1 stellt eine Pfahlkopfplatte dar, dessen Pfähle überdrückt sind und daher keine Zugkraft von der Platte in die Pfähle weitergeleitet werden muss. Da der erste Lastfall einem überdrückten Widerlager entspricht, ist hier keine Einleitung einer Zugkraft in die Platte zu berücksichtigen. An dem widerlagerwandnahen Pfahl kann die Last direkt abgetragen werden. Dies ist bei dem widerlagerwandfernen Pfahl nicht möglich, da hier die Mindestneigung der Betondruckstrebe unterschritten wird. Es bildet sich ein fachwerkähnliches Stabwerksystem. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer unteren Bewehrungslage, die als Zugband fungiert und einer Bügelbewehrung, um das Knotengleichgewicht herzustellen. Abbildung 3.7 stellt ein mögliches dreidimensionales Stabwerk für diesen Lastfall dar.

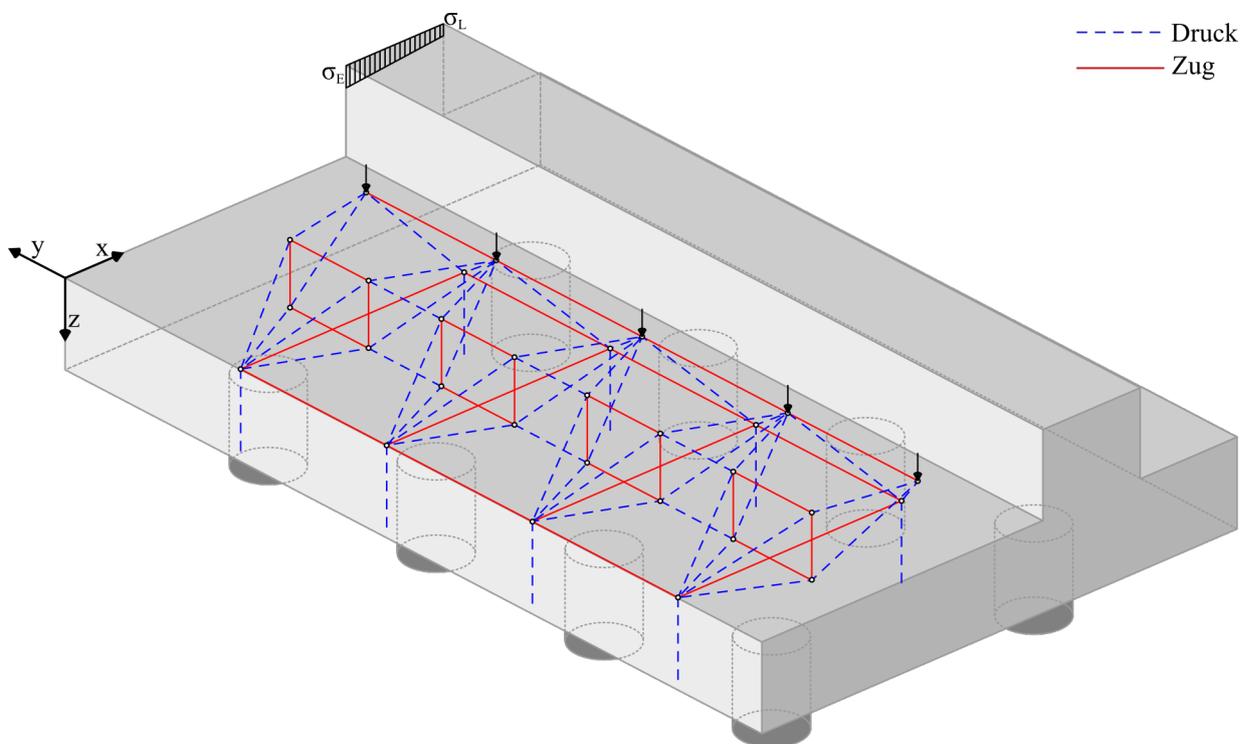


Abbildung 3.7: Variante 1 Lastfall 1 - 3D - Modell

In Abbildung 3.8 sind Draufsicht, Schnitt und Ansicht des dreidimensionalen Systems der Abbildung 3.7 dargestellt.

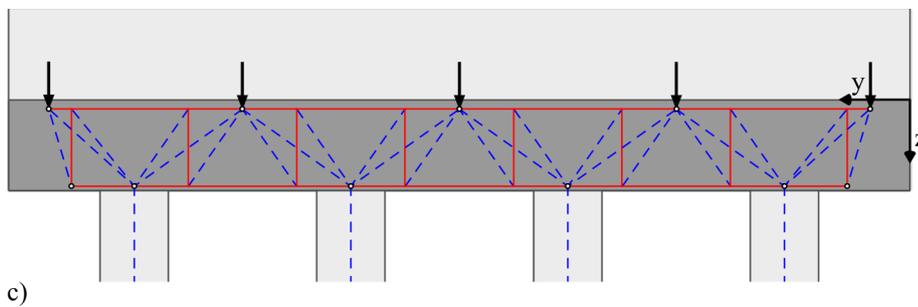
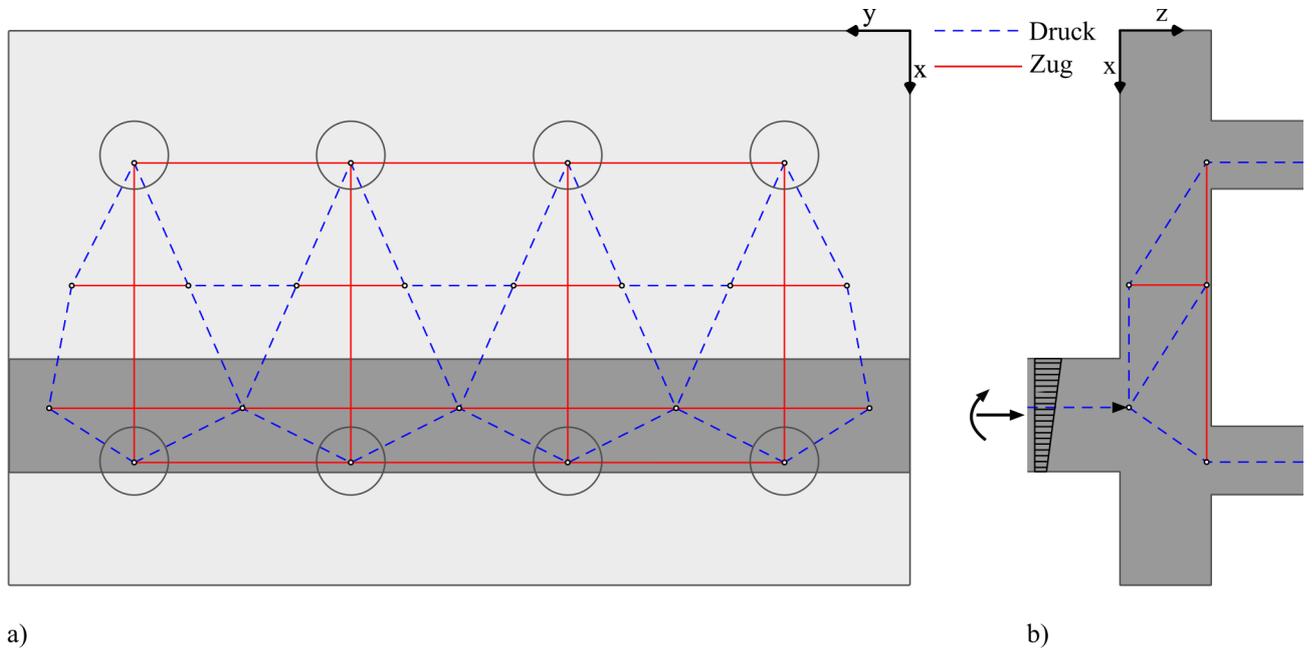


Abbildung 3.8: Variante 1 Lastfall 1 - a) Draufsicht, b) Schnitt, c) Ansicht

Ein qualitativer Vergleich der benötigten Bewehrungsmengen der FE - und der Stabwerksberechnung ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Dieser zeigt, dass die Ergebnisse der Längsbewehrung der beiden Berechnungsmethoden, unter Berücksichtigung des Einflusses von Spannungspitzen der FE-Berechnung, sehr gut korrelieren.

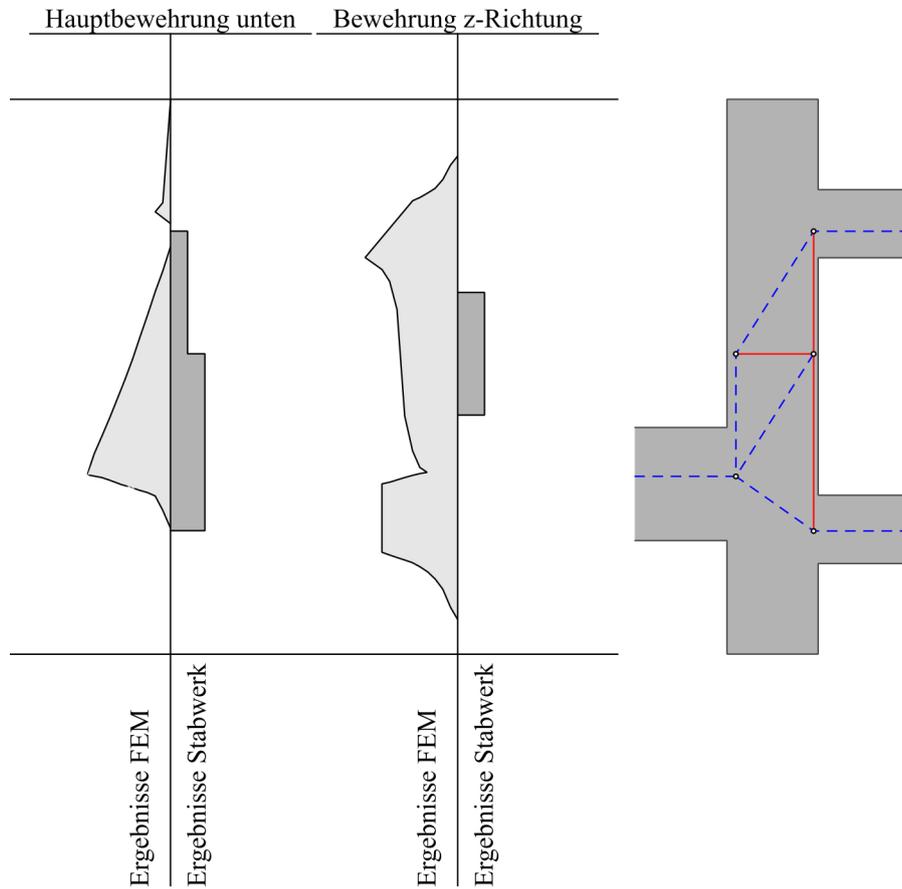


Abbildung 3.9: Variante 1 Lastfall 1 - Bewehrungsvergleich

3.2.2 Variante 1 Lastfall 2

Bei Variante 1 mit Lastfall 2 sind die Pfähle überdrückt, somit muss keine Zugkraft aus der Platte weitergeleitet werden. Der Unterschied zum ersten Lastfall ergibt sich hier aus der zu verankernden Zugkraft aus dem Widerlager. An dem widerlagerwandnahen Pfahl kann die Last direkt abgetragen werden, dies ist bei dem widerlagerwandfernen Pfahl nicht möglich, da hier die Mindestneigung der Betondruckstrebe unterschritten wird. Daraus bildet sich ein fachwerkähnliches Stabwerksystem. Es stellt sich hier ein Sprengwerk unterhalb der Widerlagerwand ein, aus dem sich die Notwendigkeit einer oberen Bewehrungslage ergibt, die als Zugband fungiert. Weiters ist eine zusätzliche Bewehrung in z-Richtung notwendig um ein Knotengleichgewicht zu erreichen. Es ergibt sich eine untere Bewehrungslage, die als Zugband wirkt, und eine Bügelbewehrung zum Erfüllen des Knotengleichgewichts. In Abbildung 3.10 ist ein mögliches dreidimensionales Stabwerk für diesen Lastfall dargestellt.

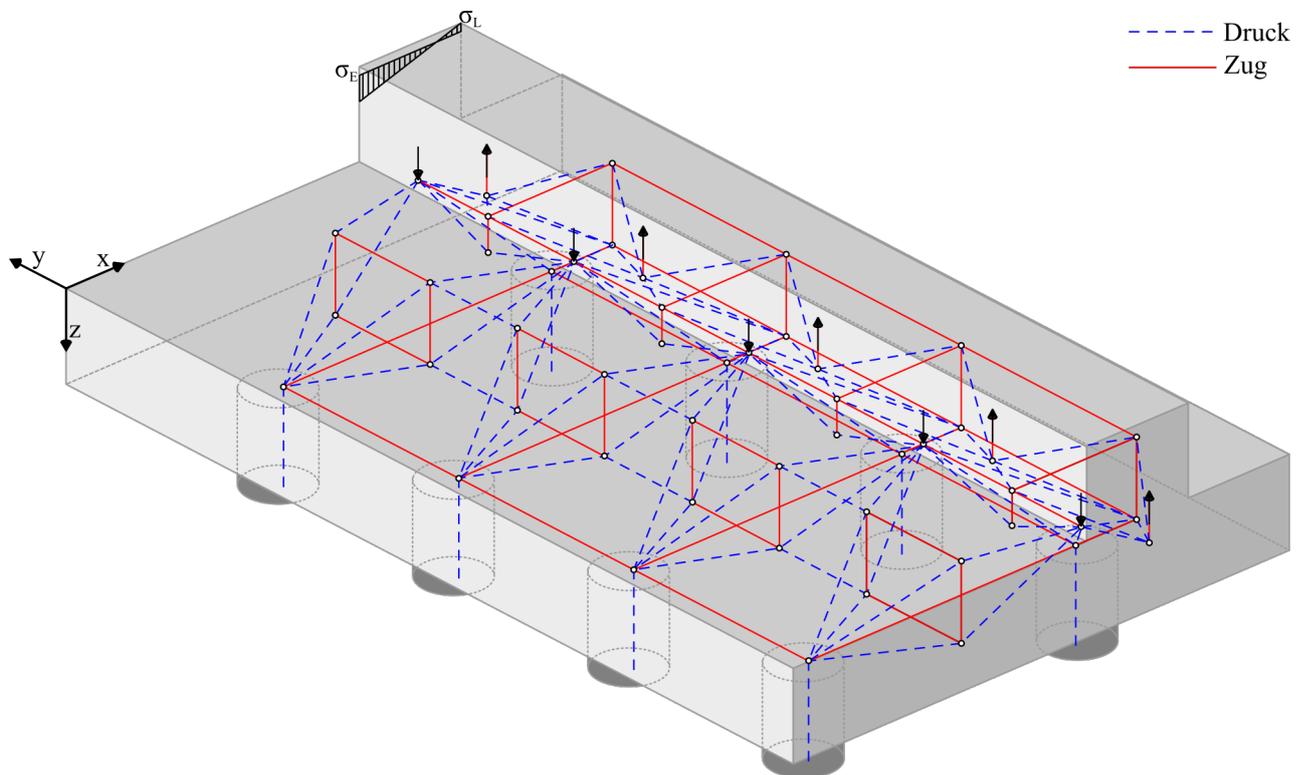


Abbildung 3.10: Variante 1 Lastfall 2 - 3D - Modell

In Abbildung 3.11 sind Draufsicht, Schnitt und Ansicht des dreidimensionalen Systems der Abbildung 3.10 dargestellt.

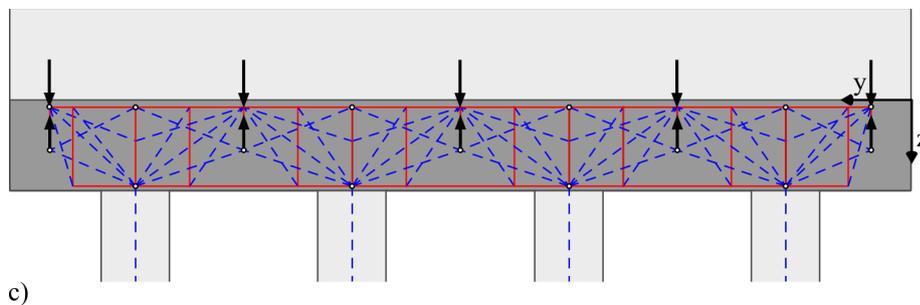
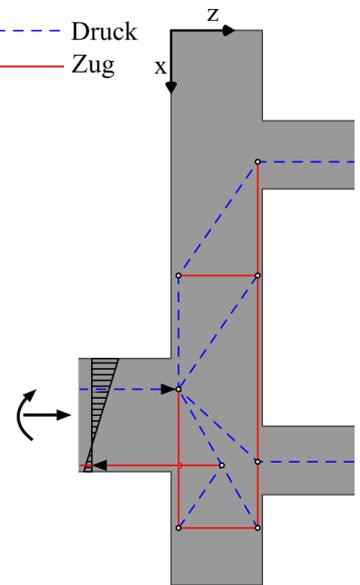
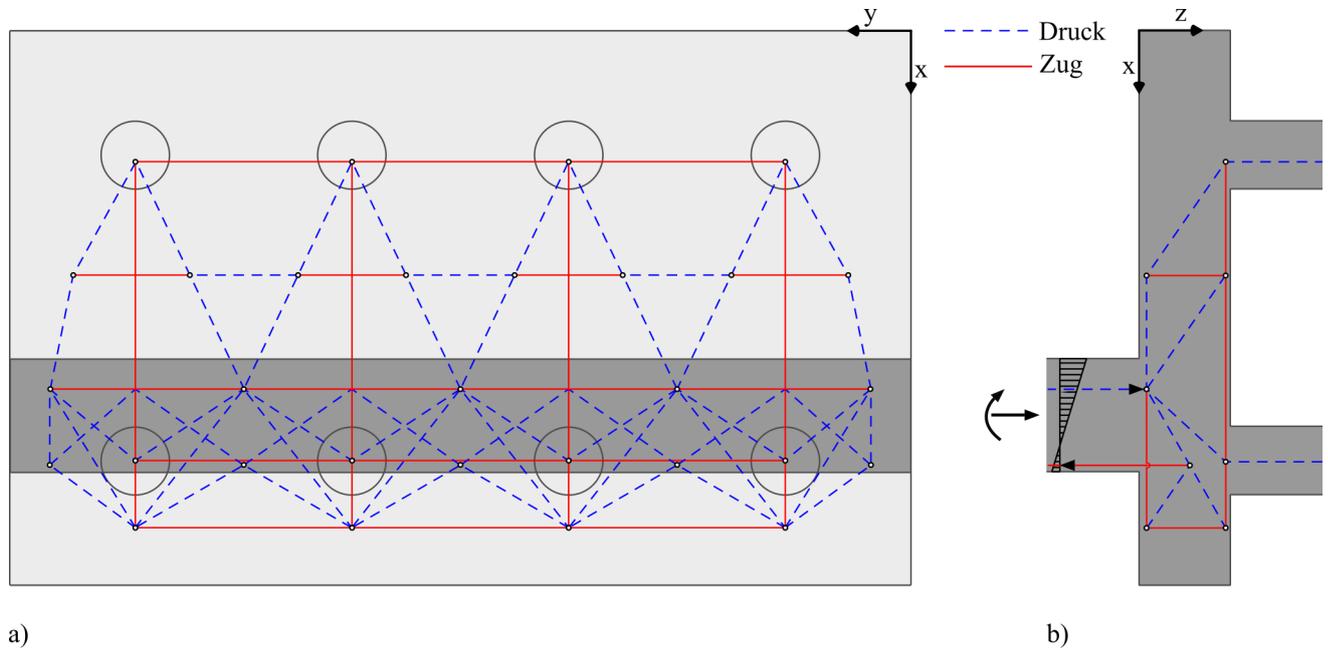


Abbildung 3.11: Variante 1 Lastfall 2 - a) Draufsicht, b) Schnitt, c) Ansicht

Ein qualitativer Vergleich der benötigten Bewehrungsmengen der FE - und der Stabwerksberechnung ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Dieser zeigt, dass die Ergebnisse der Längsbewehrung der beiden Berechnungsmethoden, unter Berücksichtigung des Einflusses von Spannungspitzen der FE-Berechnung, sehr gut korrelieren.

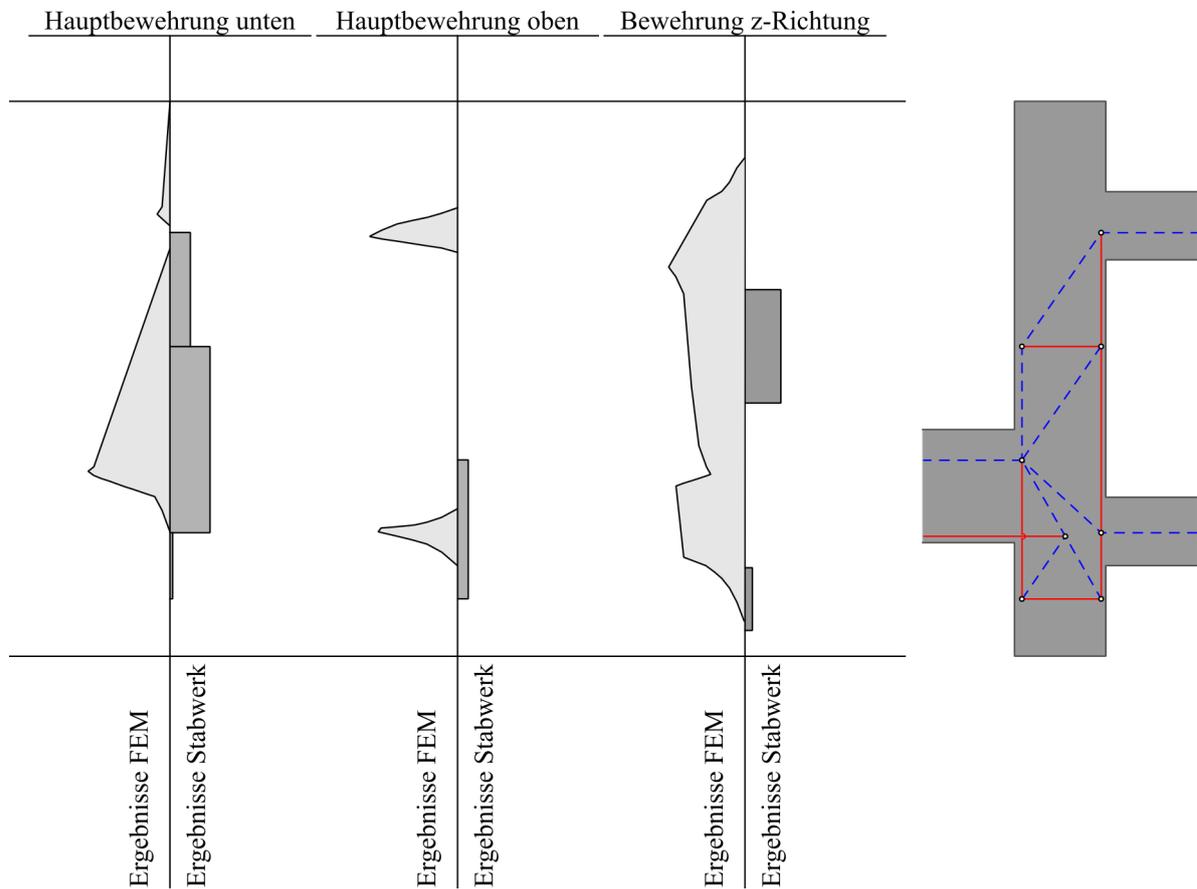


Abbildung 3.12: Variante 1 Lastfall 2 - Bewehrungsvergleich

3.2.3 Variante 2 Lastfall 1

Variante 2 zeigt ein System, bei dem der widerlagerferne Pfeiler nicht mehr überdrückt ist. Dementsprechend muss hier eine Zugkraft verankert werden. An dem widerlagerwandnahen Pfahl kann die Last direkt abgetragen werden, dies ist bei dem widerlagerwandfernen Pfahl nicht möglich, da hier die Mindestneigung der Betondruckstrebe unterschritten wird. Es bildet sich ein fachwerkähnliches Stabwerksystem aus. Da die Pfähle hier genügend Abstand zum Rand der Platte haben, kann die Zugkraft, ähnlich der Einleitung einer Zugkraft der Widerlagerwand, über ein Sprengwerk verankert werden. Dadurch ergibt sich nun für das dreidimensionale System ein Bewehrungskasten um den Bereich des widerlagerfernen Pfahls. Aus dem Knotengleichgewicht ergeben sich eine Bewehrungslage sowohl an der Plattenunterseite als auch an der Plattenoberseite sowie eine Bügelbewehrung. Auf die Ausführung der Bewehrung als Rahmeneck wird aufgrund der einfacheren Bewehrungsführung entlang des Plattenrandes verzichtet.

Abbildung 3.13 stellt ein mögliches dreidimensionales Stabwerk für diesen Lastfall dar.

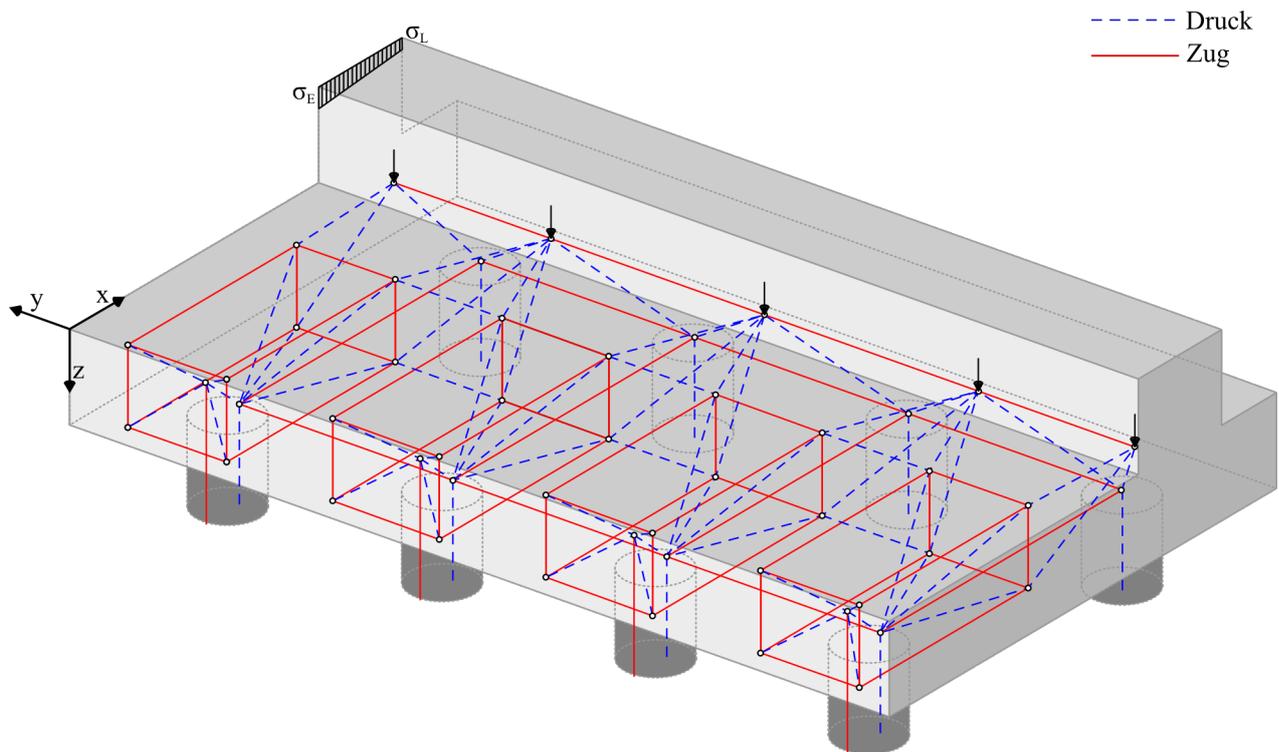


Abbildung 3.13: Variante 2 Lastfall 1 - 3D - Modell

In Abbildung 3.14 sind Draufsicht, Schnitt und Ansicht des dreidimensionalen Systems der Abbildung 3.13 dargestellt.

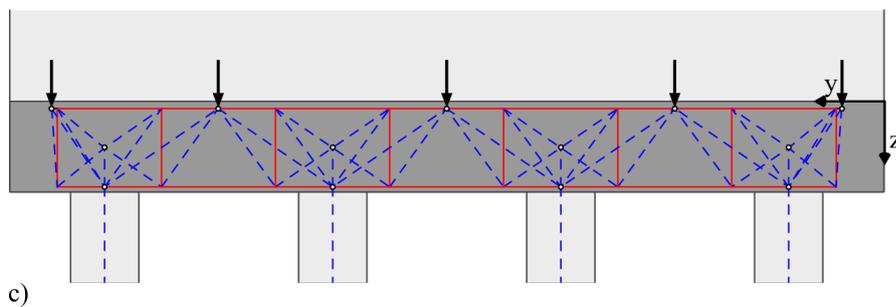
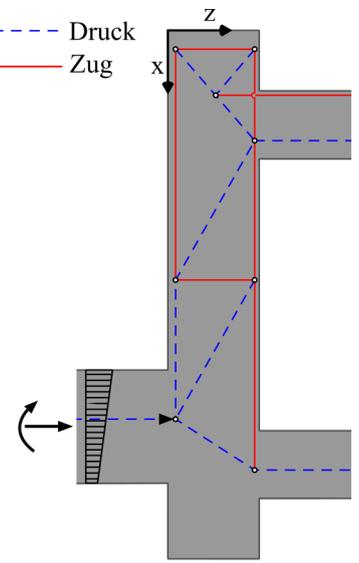
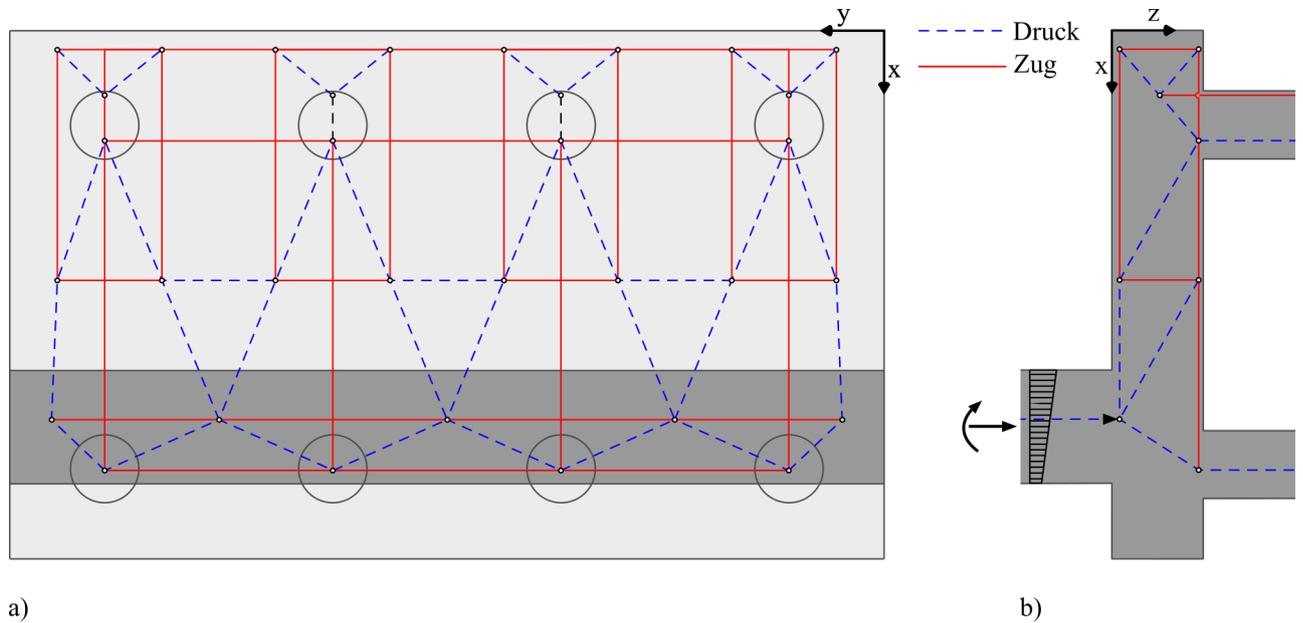


Abbildung 3.14: Variante 2 Lastfall 1 - a) Draufsicht, b) Schnitt, c) Ansicht

Ein qualitativer Vergleich der benötigten Bewehrungsmengen der FE - und der Stabwerksberechnung ist in Abbildung 3.15 dargestellt. Dieser zeigt, dass die Ergebnisse der Längsbewehrung der beiden Berechnungsmethoden, unter Berücksichtigung des Einflusses von Spannungspitzen der FE-Berechnung, sehr gut korrelieren.

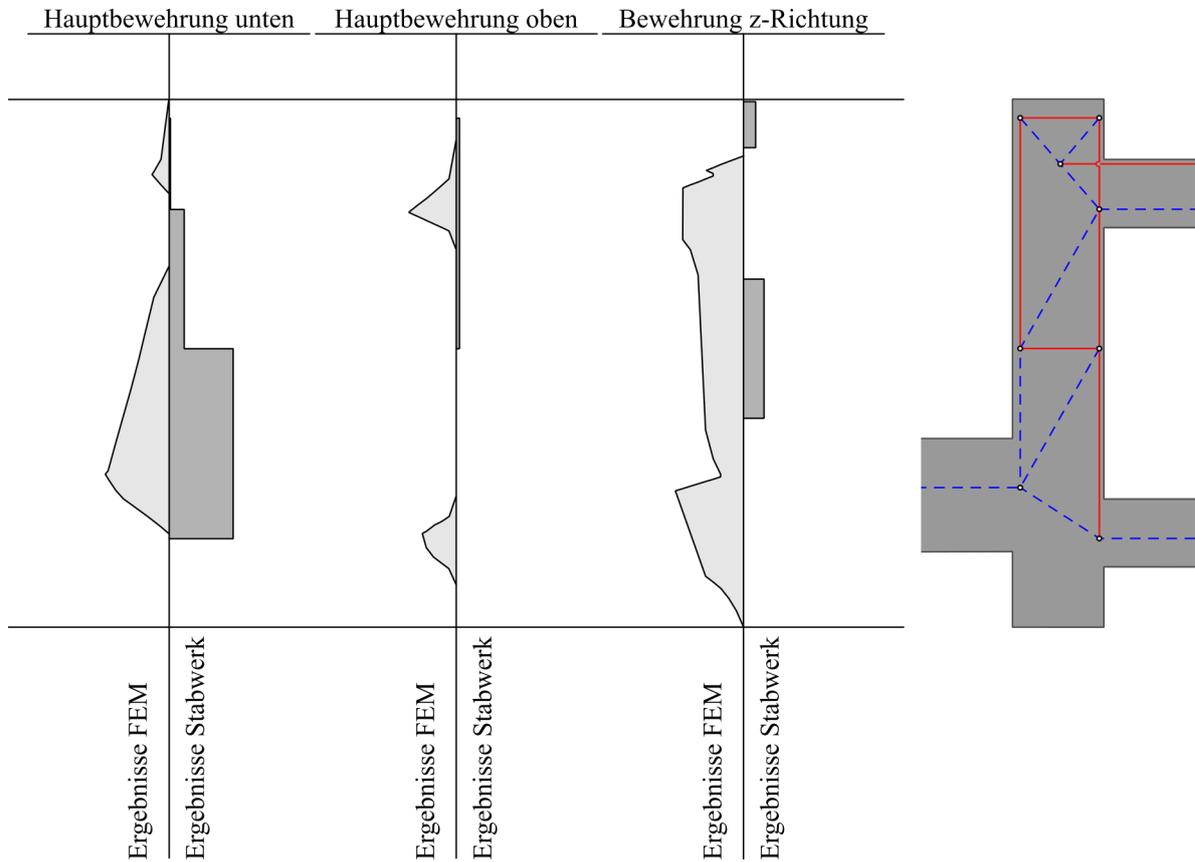


Abbildung 3.15: Variante 2 Lastfall 1 - Bewehrungsvergleich

3.2.4 Variante 2 Lastfall 2

Auch im zweiten Lastfall der zweiten Variante ist der widerlagerferne Pfahl nicht überdrückt, die Verankerung dieser Zugkraft und der des Widerlagers erfolgt über ein Sprengwerk. An dem widerlagerwandnahen Pfahl kann die Last direkt abgetragen werden, dies ist bei dem widerlagerwandfernen Pfahl nicht möglich, da hier die Mindestneigung der Betondruckstrebe unterschritten wird. Es bildet sich ein fachwerkähnliches Stabwerksystem aus. Durch das Einstellen des Sprengwerks über dem Pfahl ergibt sich ein Bewehrungskasten. Es ergeben sich eine Bewehrungslage in der Plattenunterseite und der Plattenoberseite und eine Bügelbewehrung. Auf die Ausführung der Bewehrung als Rahmeneck wird aufgrund der einfacheren Bewehrungsführung entlang des Plattenrandes verzichtet.

In Abbildung 3.16 ist ein mögliches dreidimensionales Stabwerk für diesen Lastfall dargestellt.

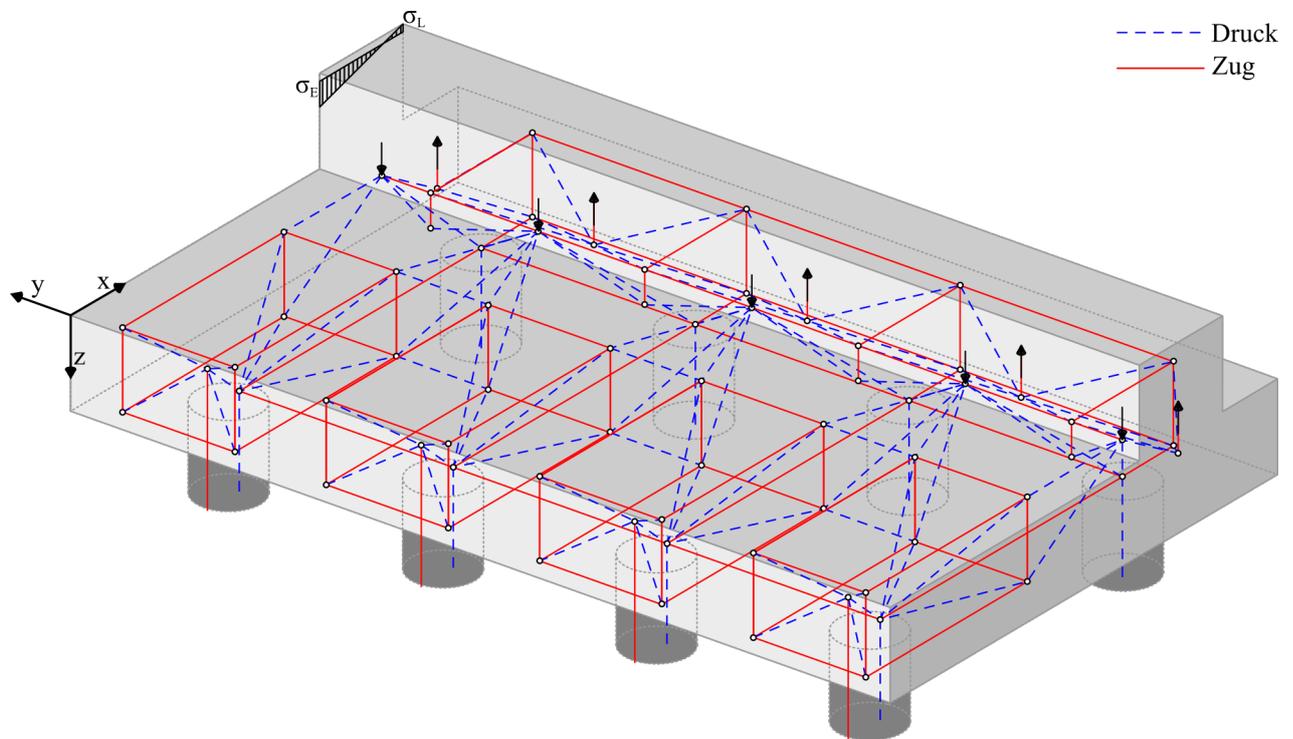


Abbildung 3.16: Variante 2 Lastfall 2 - 3D - Modell

In Abbildung 3.17 sind Draufsicht, Schnitt und Ansicht des dreidimensionalen Systems der Abbildung 3.16 dargestellt.

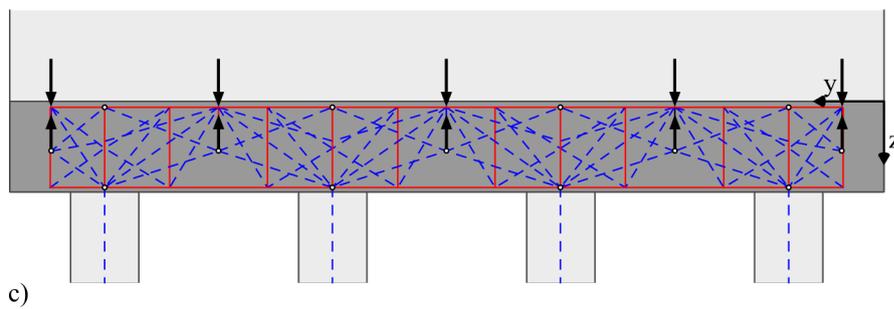
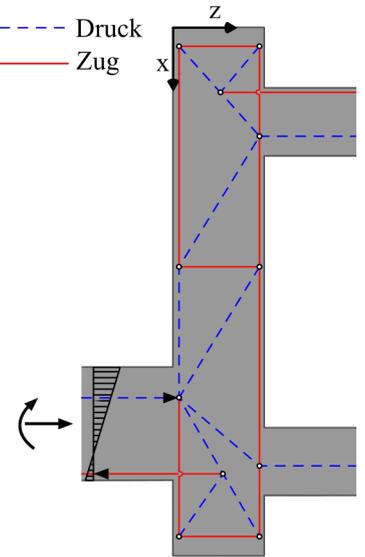
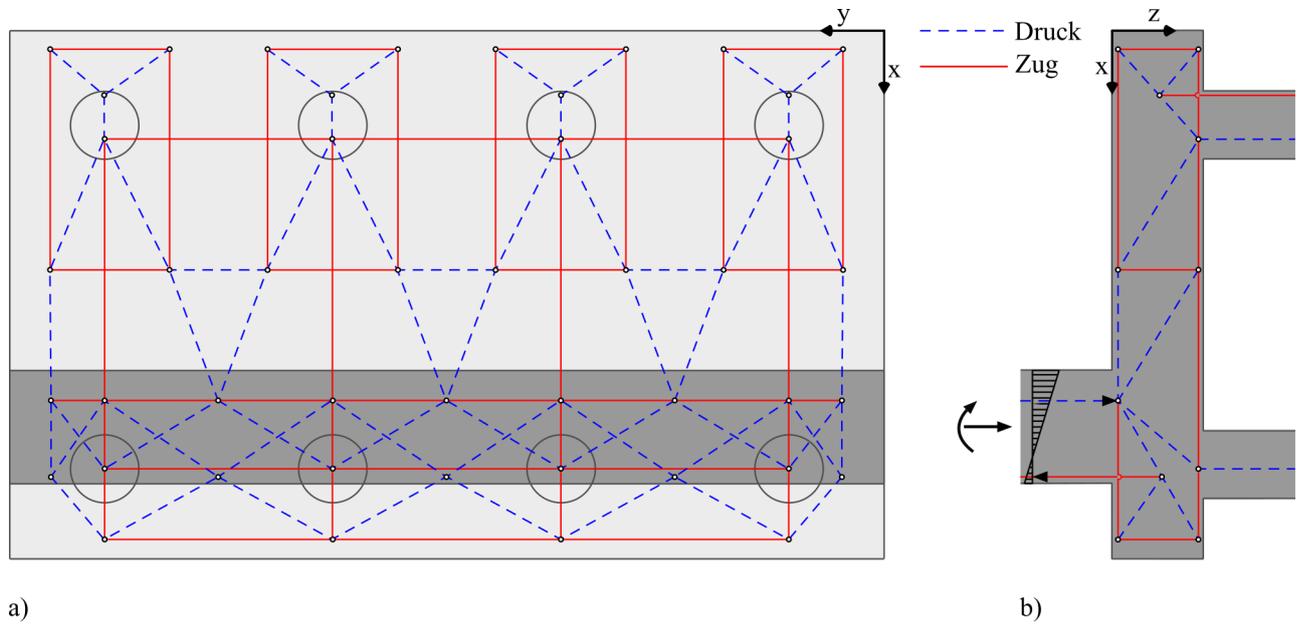


Abbildung 3.17: Variante 2 Lastfall 2 - a) Draufsicht, b) Schnitt, c) Ansicht

Ein qualitativer Vergleich der benötigten Bewehrungsmengen der FE - und der Stabwerksberechnung ist in Abbildung 3.18 dargestellt. Dieser zeigt, dass die Ergebnisse der Längsbewehrung der beiden Berechnungsmethoden, unter Berücksichtigung des Einflusses von Spannungspitzen der FE-Berechnung, sehr gut korrelieren.

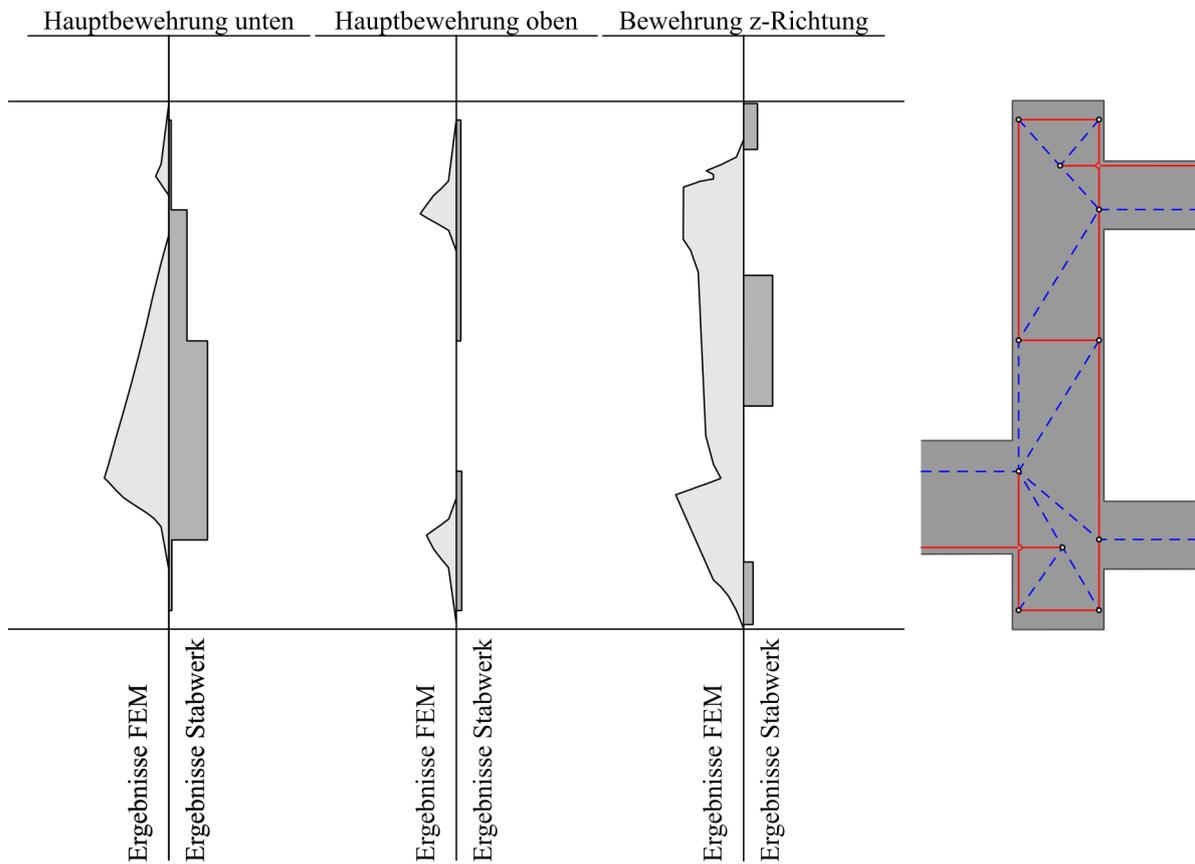


Abbildung 3.18: Variante 2 Lastfall 2-Bewehrungsvergleich

In Abbildung 3.20 sind Draufsicht, Schnitt und Ansicht des dreidimensionalen Systems der Abbildung 3.19 dargestellt.

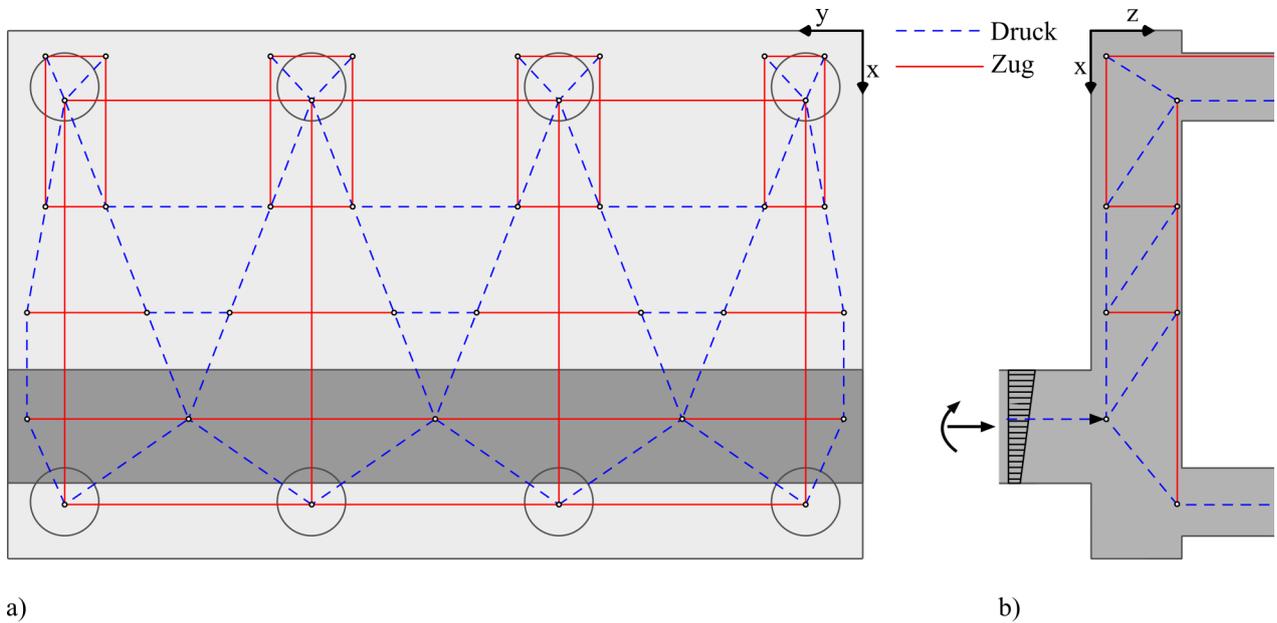


Abbildung 3.20: Variante 3 Lastfall 1 - a) Draufsicht, b) Schnitt, c) Ansicht

Ein qualitativer Vergleich der benötigten Bewehrungsmengen der FE - und der Stabwerksberechnung ist in Abbildung 3.21 dargestellt. Dieser zeigt, dass die Ergebnisse der Längsbewehrung der beiden Berechnungsmethoden, unter Berücksichtigung des Einflusses von Spannungspitzen der FE-Berechnung, sehr gut korrelieren.

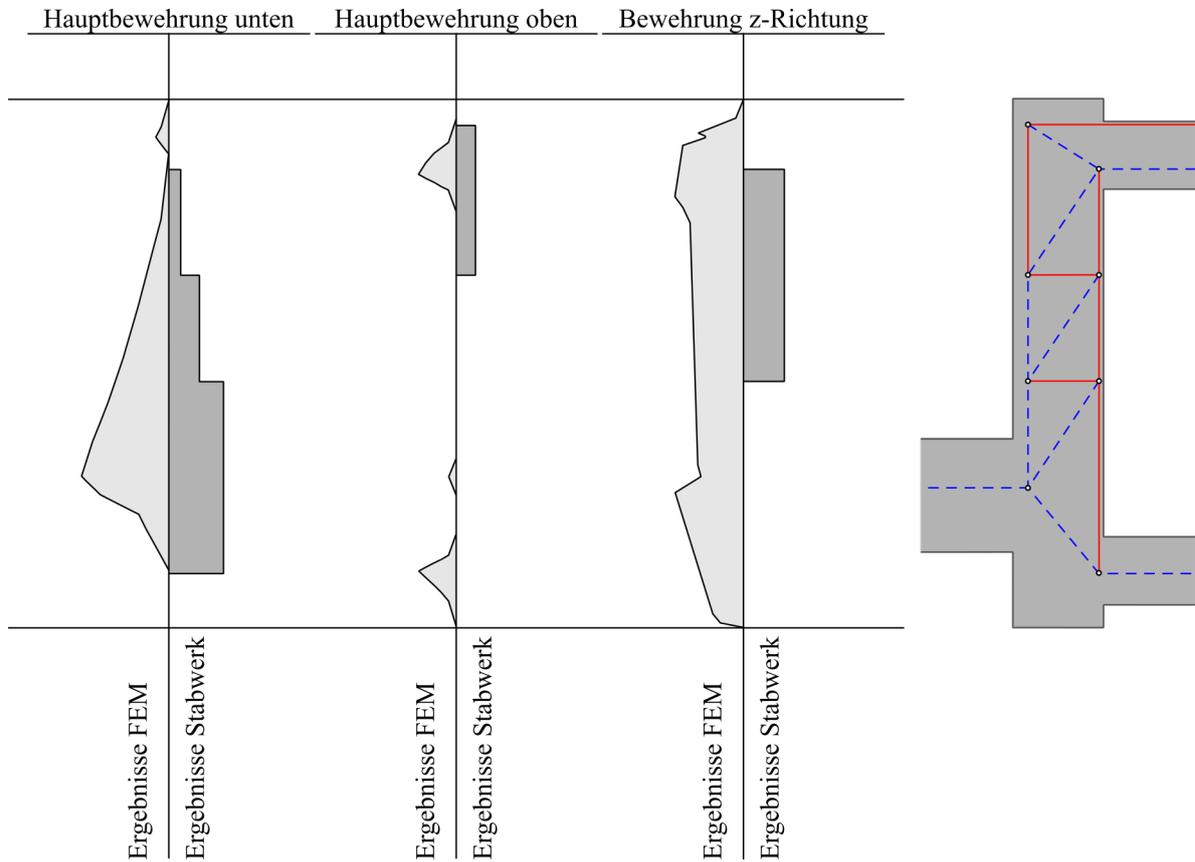


Abbildung 3.21: Variante 3 Lastfall 1 - Bewehrungsvergleich

3.2.6 Variante 3 Lastfall 2

Bei Lastfall 2 der Variante 3 wird die Zugkraft der Widerlagerwand wieder über ein Sprengwerk abgetragen. An dem widerlagerwandnahen Pfahl kann die Last direkt abgetragen werden, dies ist bei dem widerlagerwandfernen Pfahl nicht möglich, da hier die Mindestneigung der Betondruckstrebe unterschritten wird. Es bildet sich ein fachwerkähnliches Stabwerksystem aus. Da der widerlagerferne Pfahl wieder nicht überdrückt ist und nicht genügend Platz für die Ausbildung eines Sprengwerks ist, stellt sich hier ein „Rahmeneck“ zur Übertragung der Zugkraft ein. Als Bewehrung ergibt sich eine unter Lage, eine Lage an der Oberseite und eine Bügelbewehrung.

In Abbildung 3.22 ist ein mögliches dreidimensionales Stabwerk für diesen Lastfall dargestellt.

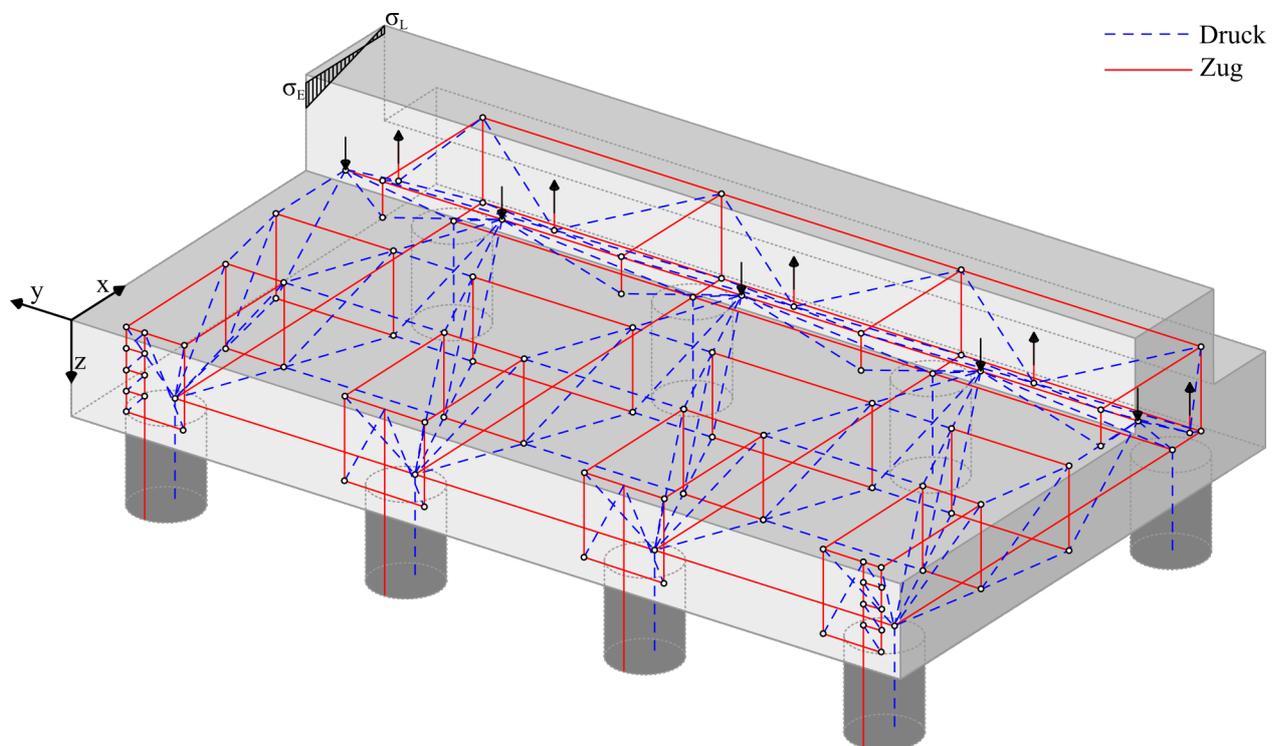


Abbildung 3.22: Variante 3 Lastfall 2 - 3D - Modell

In Abbildung 3.23 sind Draufsicht, Schnitt und Ansicht des dreidimensionalen Systems der Abbildung 3.22 dargestellt.

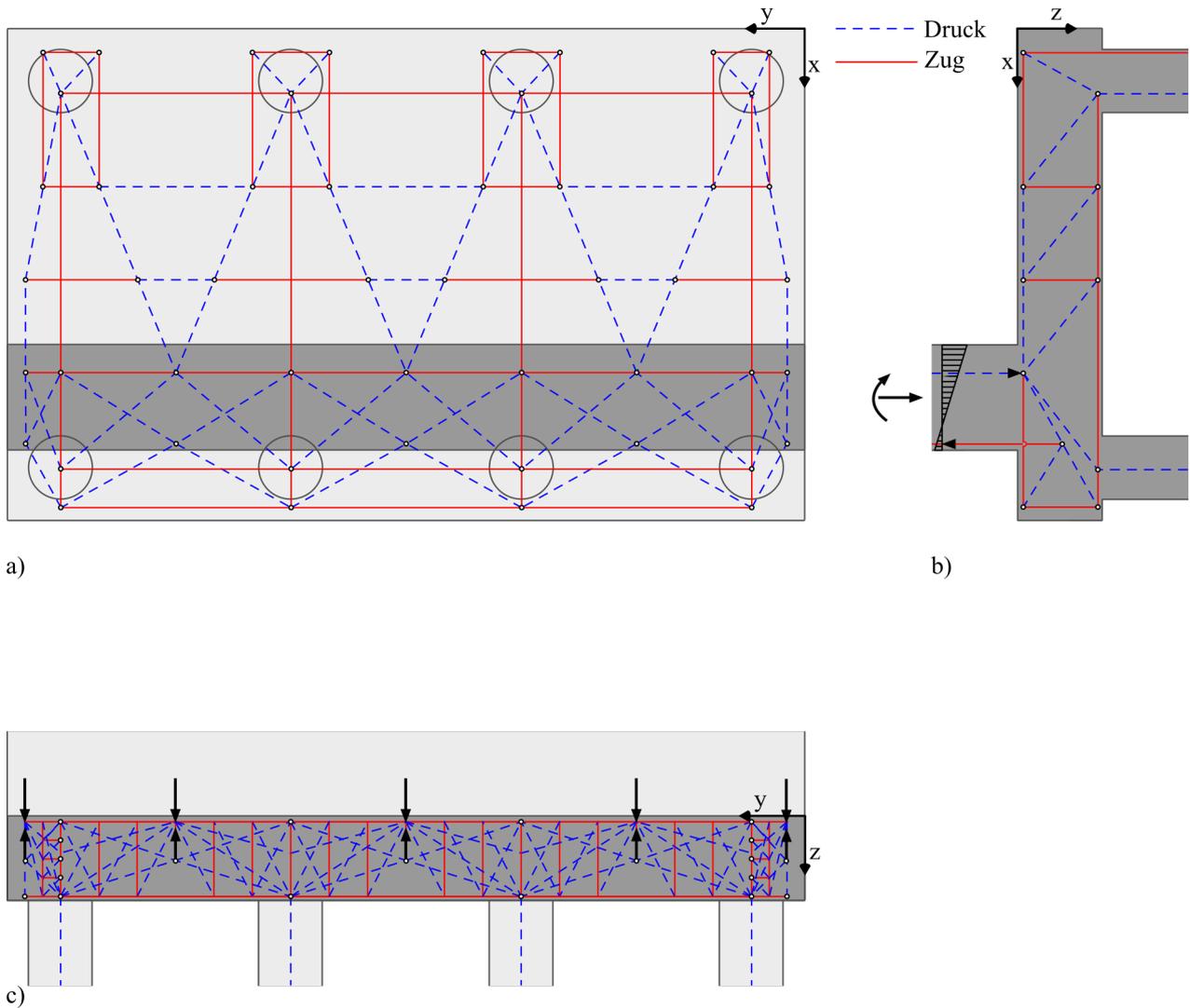


Abbildung 3.23: Variante 3 Lastfall 2 - a) Draufsicht, b) Schnitt, c) Ansicht

Ein qualitativer Vergleich der benötigten Bewehrungsmengen der FE - und der Stabwerksberechnung ist in Abbildung 3.24 dargestellt. Dieser zeigt, dass die Ergebnisse der Längsbewehrung der beiden Berechnungsmethoden, unter Berücksichtigung des Einflusses von Spannungspitzen der FE-Berechnung, sehr gut korrelieren.

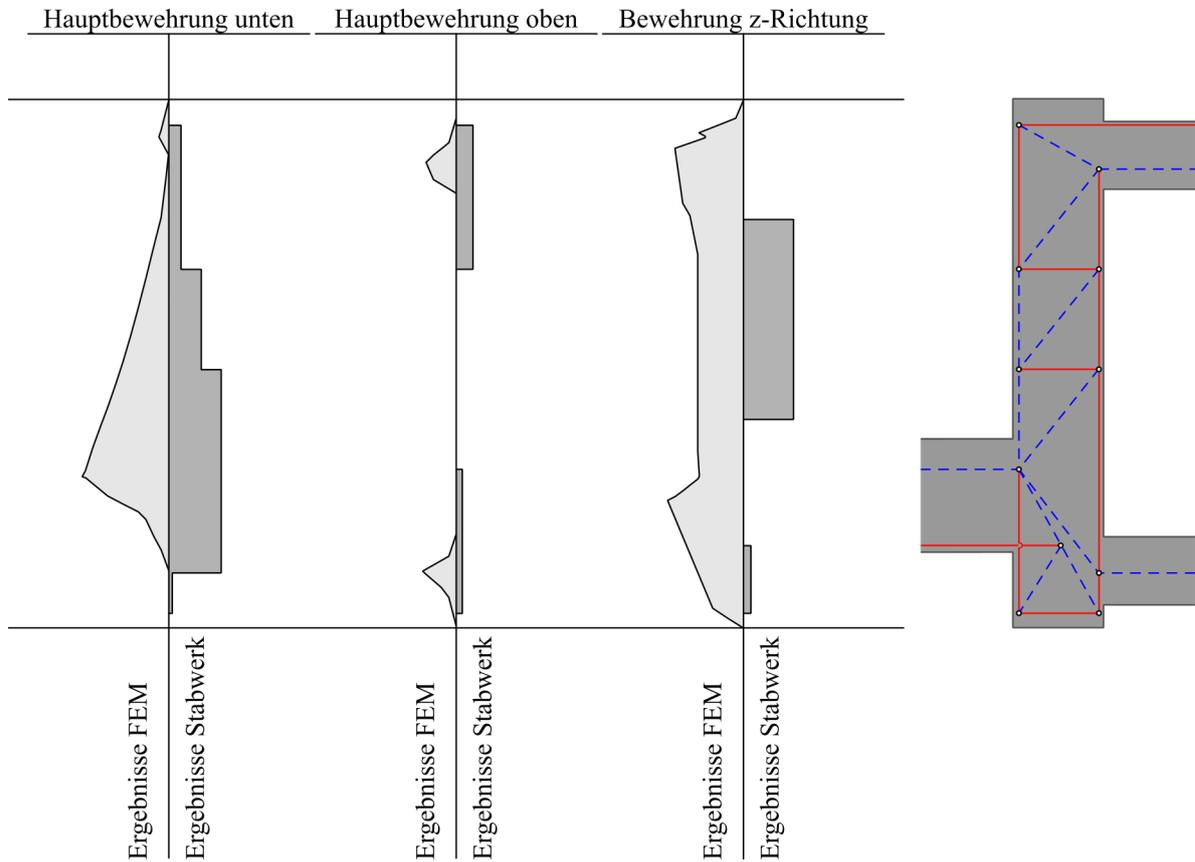


Abbildung 3.24: Variante 3 Lastfall 2 - Bewehrungsvergleich

3.2.7 Variante 4 Lastfall 1

Variante 4 stellt bei Lastfall 1 ein System mit drei Pfahlreihen und einer überdrückten Widerlagerwand dar. Die Lasten werden über ein fachwerkähnliches System zu den äußeren Pfählen abgetragen. Aufgrund des gewählten Stabwerkmodells gibt es keine direkte Abtragung zum mittleren Pfahl, deshalb wird die Last zur Seite geleitet, über zwei vertikale Zugstäbe aufgehängt und anschließend zum mittleren Pfahl abgetragen. Es ergibt sich eine untere Bewehrungslage und eine Bügelbewehrung.

Abbildung 3.25 stellt ein mögliches dreidimensionales Stabwerk für diesen Lastfall dar.

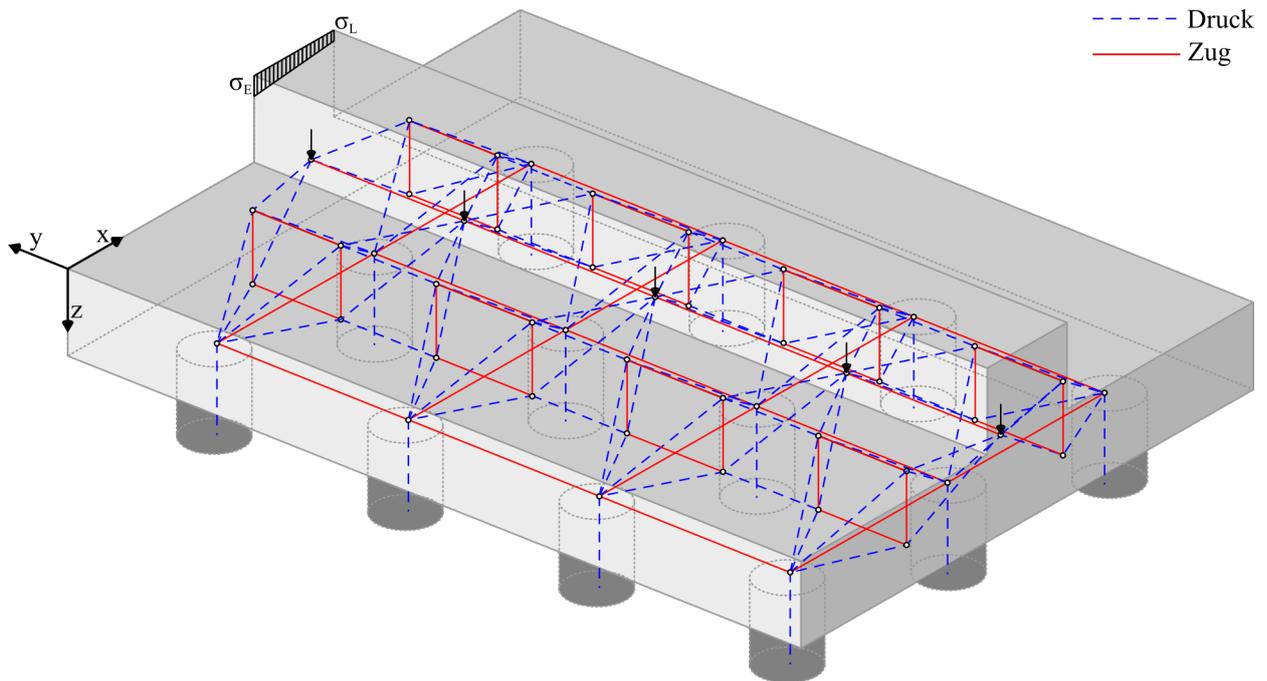


Abbildung 3.25: Variante 4 Lastfall 1 - 3D - Modell

In Abbildung 3.26 sind Draufsicht, Schnitt und Ansicht des dreidimensionalen Systems der Abbildung 3.25 dargestellt.

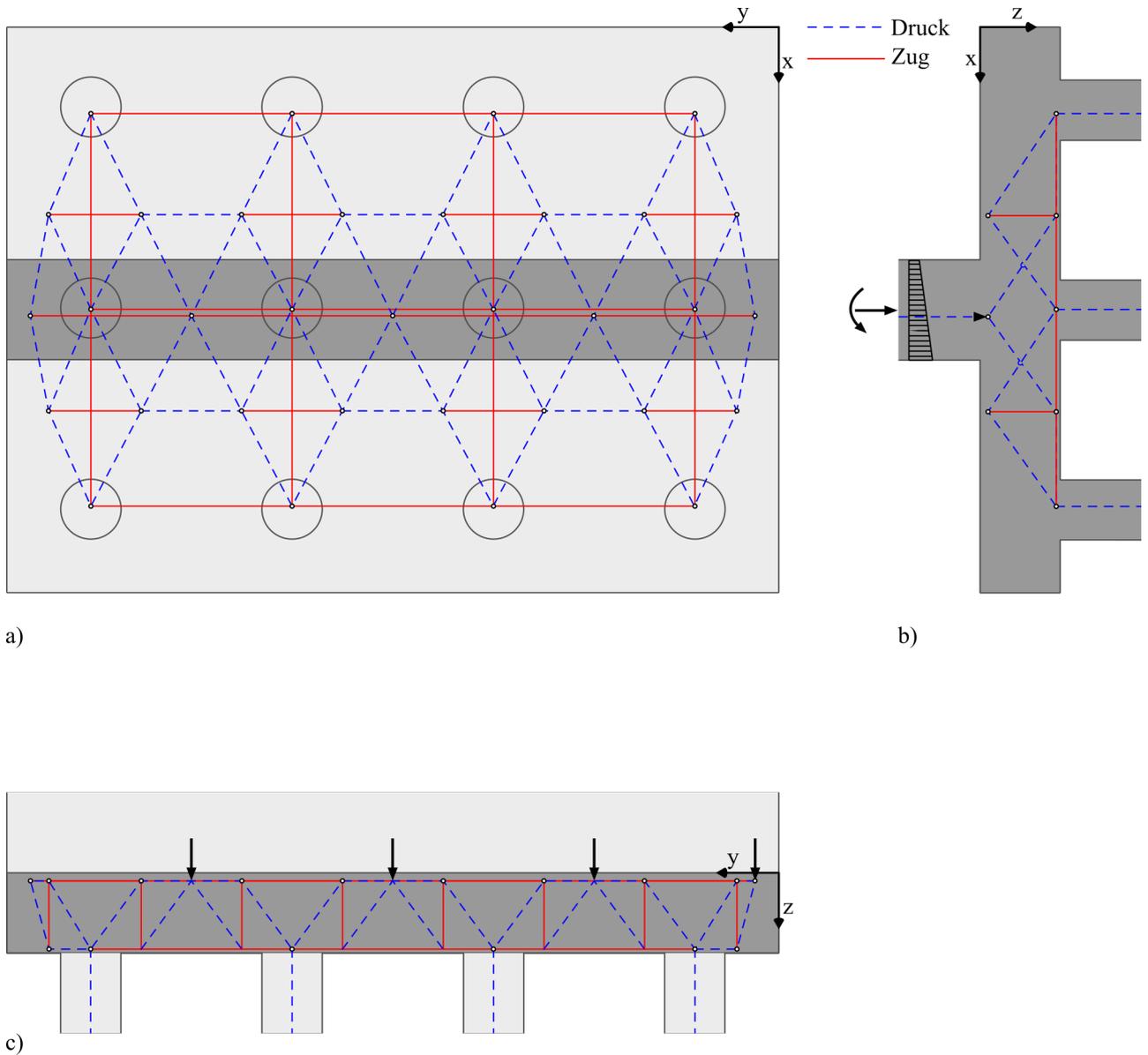


Abbildung 3.26: Variante 4 Lastfall 1 - a) Draufsicht, b) Schnitt, c) Ansicht

Ein qualitativer Vergleich der benötigten Bewehrungsmengen der FE - und der Stabwerksberechnung ist in Abbildung 3.27 dargestellt. Dieser zeigt, dass die Ergebnisse der Längsbewehrung der beiden Berechnungsmethoden, unter Berücksichtigung des Einflusses von Spannungspitzen der FE-Berechnung, sehr gut korrelieren.

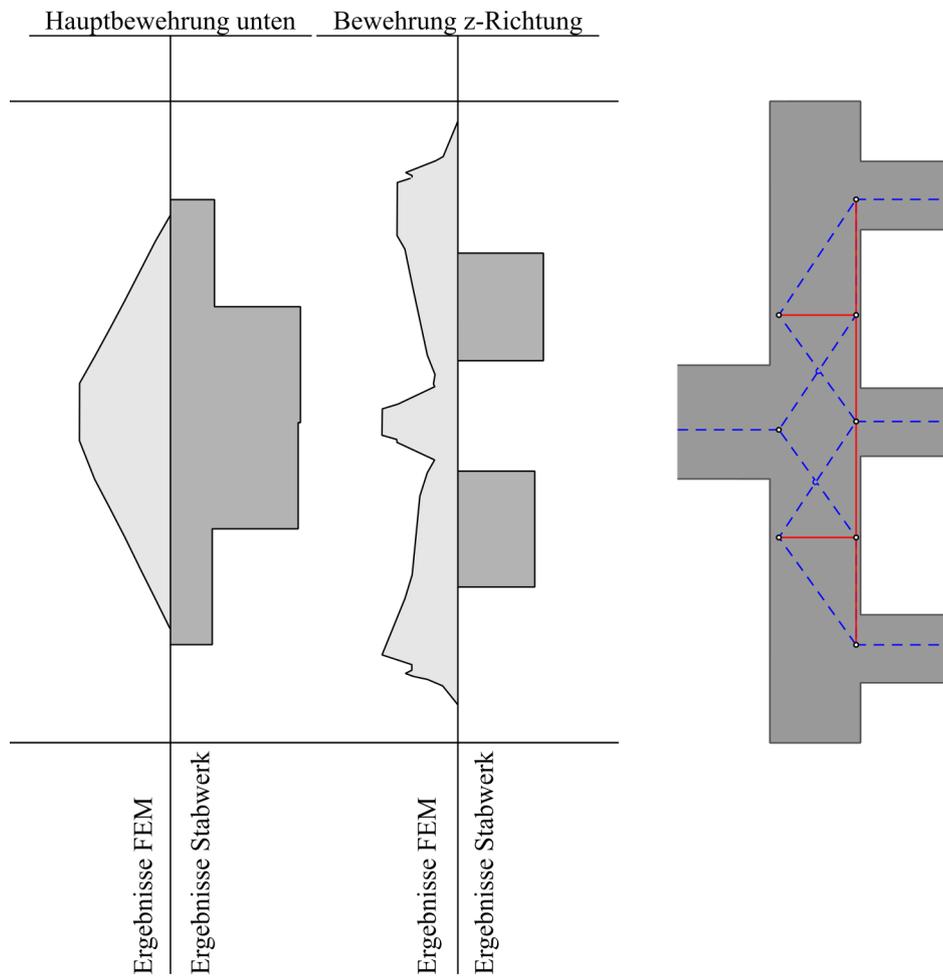


Abbildung 3.27: Variante 4 Lastfall 1-Bewehrungsvergleich

3.2.8 Variante 4 Lastfall 2

Bei Variante 4 unter Lastfall 2 handelt es sich um ein System mit drei Pfahlreihen und einer auf Druck und Zug beanspruchten Widerlagerwand. Die Lasten werden über ein facherkähnliches System zu den äußeren Pfählen abgetragen. Aufgrund des gewählten Stabwerkmodells gibt es keine direkte Abtragung zum mittleren Pfahl, deshalb wird die Last zur Seite geleitet, über zwei vertikale Zugstäbe aufgehängt und anschließend zum mittleren Pfahl abgetragen. Zur Verankerung der Zugkraft aus der Widerlagerwand stellt sich ein Sprengwerk unter der Wand ein. Als Bewehrung ergibt sich eine untere Bewehrungslage und eine Bügelbewehrung. Aufgrund des Sprengwerks ist eine obere Bewehrungslage sowie eine Bügelbewehrung notwendig, damit eine zu flache Druckstrebe vermieden werden kann. In Abbildung 3.28 ist ein mögliches dreidimensionales Stabwerk für diesen Lastfall dargestellt.

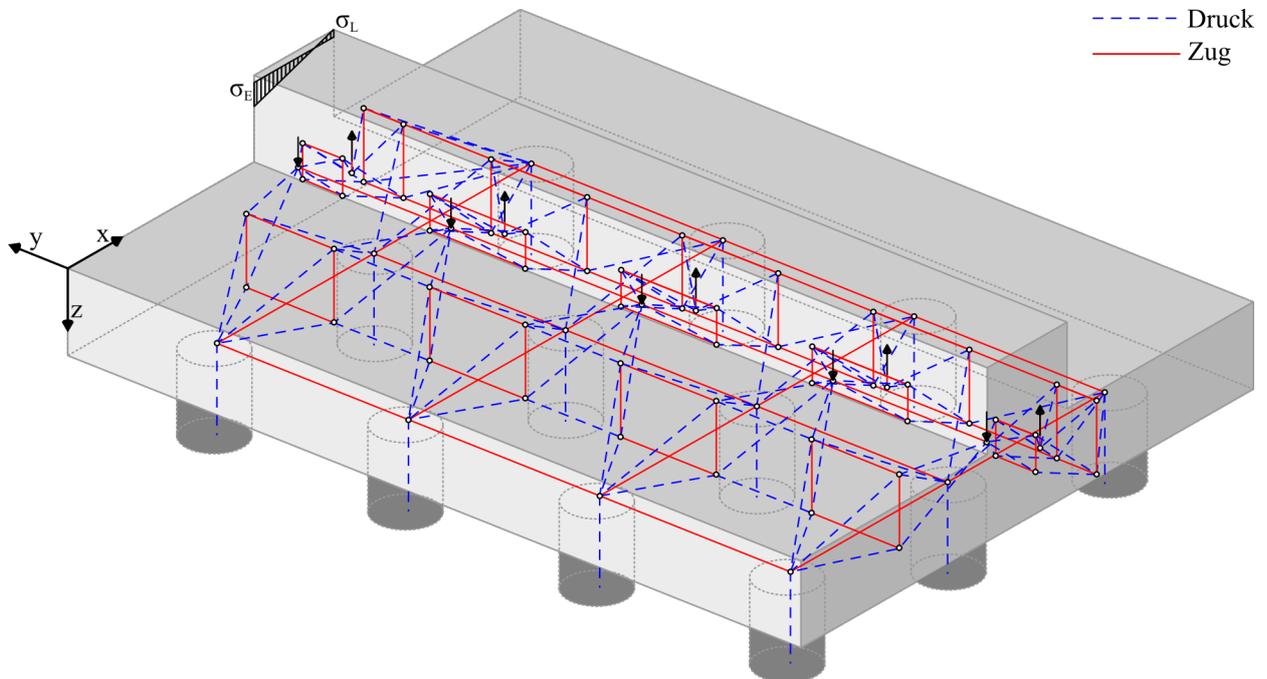


Abbildung 3.28: Variante 4 Lastfall 2 - 3D - Modell

In Abbildung 3.29 sind Draufsicht, Schnitt und Ansicht des dreidimensionalen Systems der Abbildung 3.28 dargestellt.

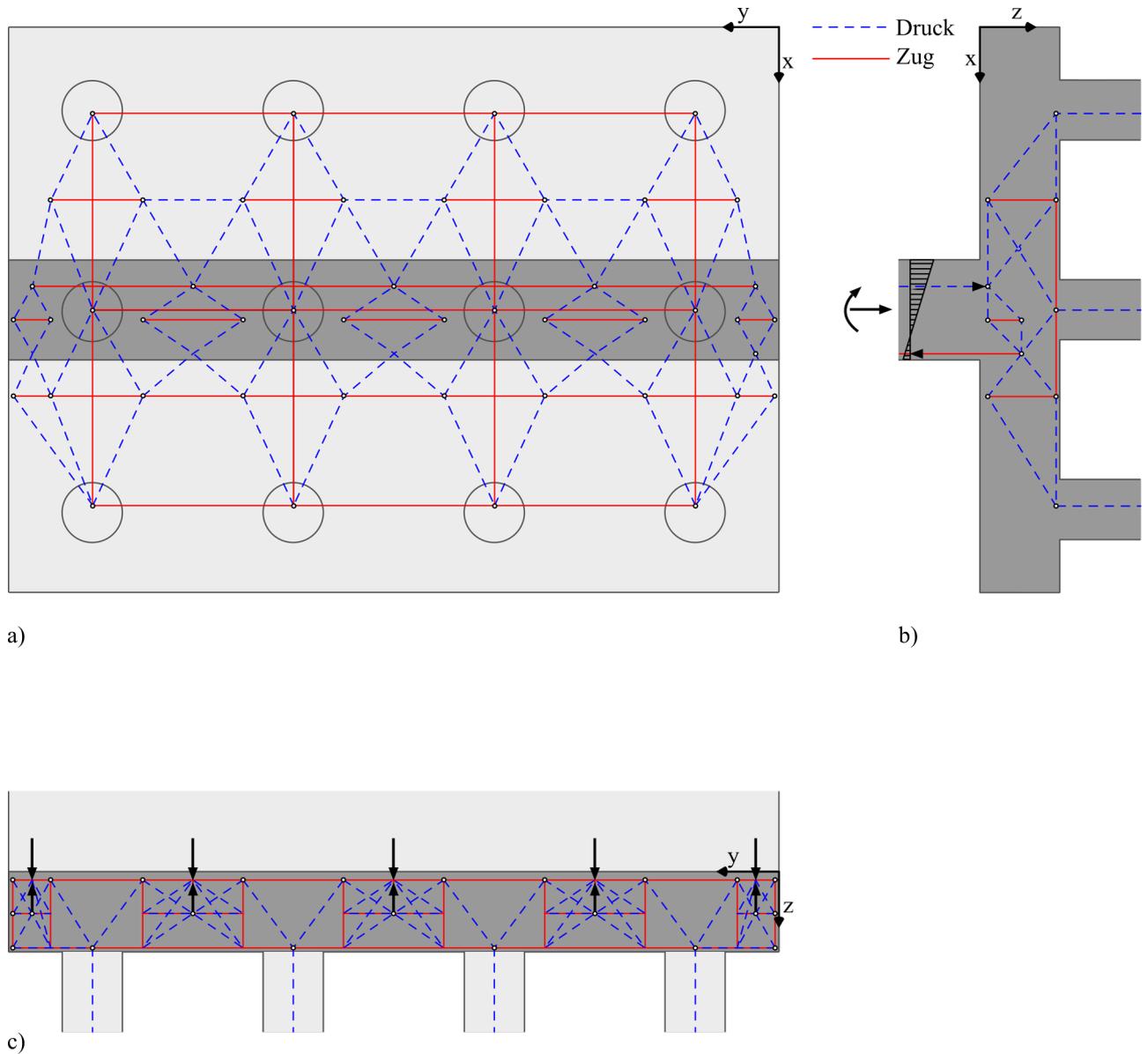


Abbildung 3.29: Variante 4 Lastfall 2 - a) Draufsicht, b) Schnitt, c) Ansicht

Ein qualitativer Vergleich der benötigten Bewehrungsmengen der FE - und der Stabwerksberechnung ist in Abbildung 3.30 dargestellt. Dieser zeigt, dass die Ergebnisse der Längsbewehrung der beiden Berechnungsmethoden, unter Berücksichtigung des Einflusses von Spannungspitzen der FE-Berechnung, sehr gut korrelieren.

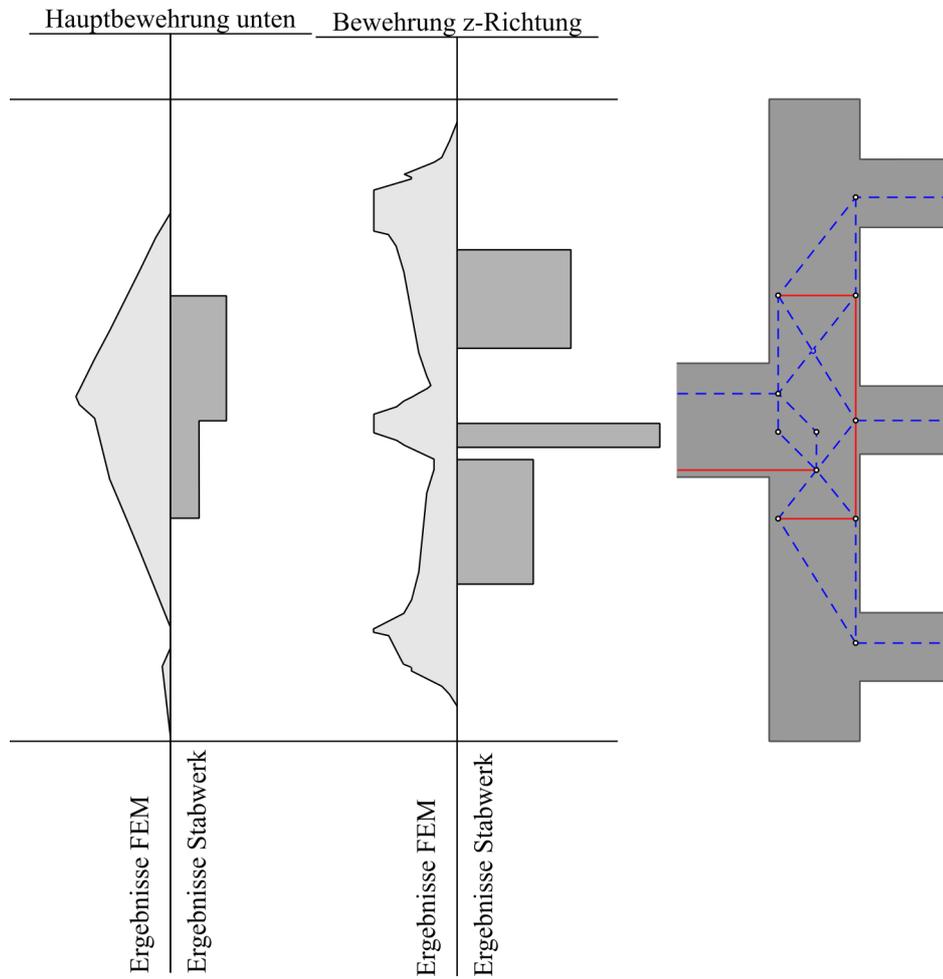


Abbildung 3.30: Variante 4 Lastfall 2 - Bewehrungsvergleich

4 Bewehrungsführung

Aufbauend auf den dreidimensionalen Stabwerken ist es möglich, ein Konzept zur Bewehrungsführung für bestimmte Bemessungssituationen zu erstellen. Nachfolgend werden für die in Kapitel 3 vorgestellten Varianten Konzepte zur Bewehrungsführung dargestellt. Hierdurch sollen kritische Punkte aufgezeigt werden, welche aus einer FE-Berechnung nicht immer sofort ersichtlich sind.

4.1 Allgemeine Bewehrungsregeln

Nach der Analyse der Varianten sind wiederkehrende Knotenpunkte zu erkennen, die auf die gleiche Weise behandelt werden können. Diese Detailpunkte sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Generell ist festzustellen, dass es einen Unterschied zwischen den Knoten am Randbereich der Pfahlkopfplatte und den Knoten in der Mitte der Pfahlkopfplatte gibt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Kräfte in Plattenmitte in y -Richtung ausgleichen können. Am Rand ist dies nicht möglich, deshalb müssen die Kräfte über eine Bewehrung verankert werden.

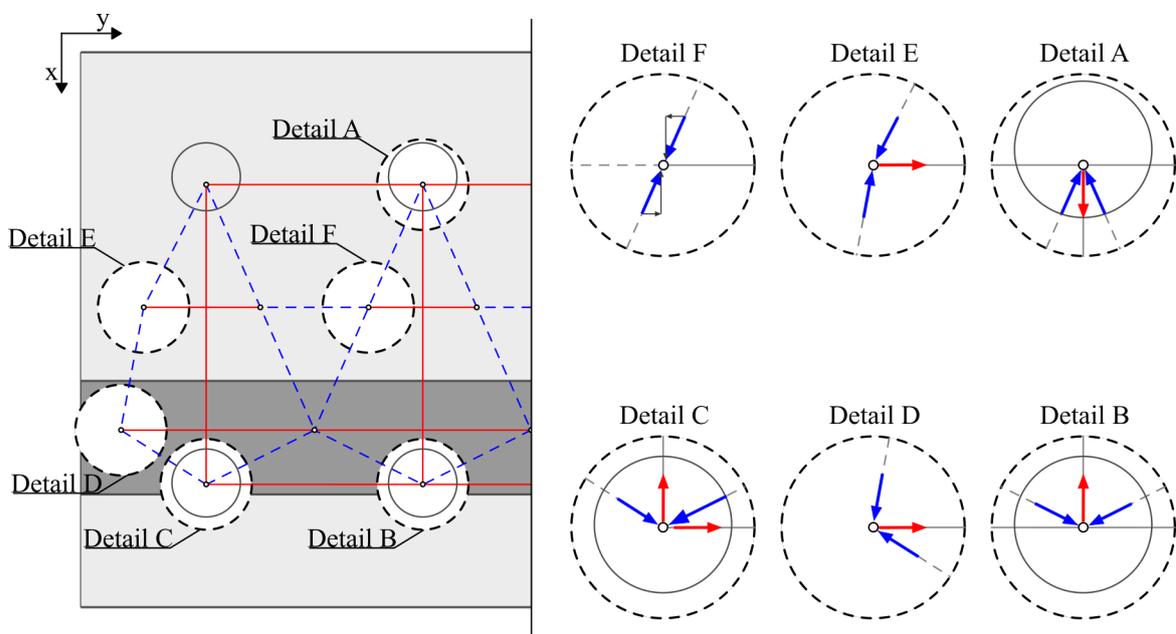


Abbildung 4.1: Detailpunkte für die Bemessung

Die Detailpunkte A und B stellen Knoten in der Mitte der Platte über den Pfählen dar. Es ist zu erkennen, dass sich die Kräfte in y-Richtung ausgleichen. In x-Richtung ist dies nicht der Fall, deshalb ist ein Zugstab notwendig, der diese beiden Knoten miteinander verbindet. Detail C befindet sich am Rand der Platte, die Druckkräfte können sich nicht mehr in y-Richtung ausgleichen, da die Einflussbreiten und dadurch die Druckkräfte unterschiedlich groß sind. Hier muss die übermäßige Druckkraft über einen Zugstab in y-Richtung in die Platteninnenseite verankert werden.

Der Punkt D ist ebenfalls Teil des Randbereichs. Bei Detail D müssen die y-Komponenten der Druckkräfte über einen Zugstab verankert werden. Dies geschieht über Bügel, die den Randbereich der Platte umfassen.

Bei Detailpunkten E und F ist wieder der Unterschied zwischen Randbereich und Plattenmitte erkenntlich. Da im Knoten von Detail E die Druckkräfte umgelenkt werden müssen, ist ähnlich zu Detail D eine Bügelbewehrung am Randbereich notwendig. Das Detail F zeigt, dass sich die y-Komponenten der Druckkräfte ausgleichen. Deshalb muss keine Bewehrung in diese Richtung berücksichtigt werden. Sollte es jedoch notwendig sein, die Druckkräfte umzulenken, müssen die Umlenkkräfte mittels eines Zugstabes ausgeglichen werden.

Für Bewehrungsstäbe direkt unterhalb der Widerlagerwand ist zu beachten, dass aufgrund der einwirkenden Normalkraft die Querdehnung der Platte behindert wird und dadurch eine notwendige Bewehrung stark verringert bzw. vernachlässigt werden kann.

Aus den Stabwerkmodellen in Abschnitt 3.2 und Abbildung 4.1 ist zu erkennen, dass die Hauptbewehrung der Platte, aufgrund des sich bildenden Sprengwerks, entlang der Achsen der Pfähle angeordnet werden sollte. Dies deckt sich mit den Aussagen von [Schlaich, 2001, Seite 458]. Weitere Empfehlungen von [Schlaich, 2001] sind das Vermeiden von Stäben außerhalb der Pfahlbreite, Umschließungsbügel bei starker Bewehrungskonzentration und dass sich die Bewehrung auf der kürzesten Verbindung zwischen den Pfählen befinden sollte. Da die Querbewehrung im Regelfall einen kleineren Durchmesser als die Hauptbewehrung besitzt und sich dies positiv auf die Rissbildung auswirkt, bildet die Querbewehrung die äußerste Lage.

4.2 Bewehrungskonzepte

Unter Zuhilfenahme der in Abschnitt 3.2 erstellten dreidimensionalen Stabwerksysteme und den in Abschnitt 4.1 erwähnten Detailpunkten können Bewehrungskonzepte zu den Varianten erstellt werden. Die folgenden Abbildungen sind qualitativ und stellen nur die zum Erfüllen des Knotengleichgewichts benötigte Bewehrung dar. Auf die Darstellung einer detaillierten konstruktiven Bewehrung (z.B. für die Rissbreitenbegrenzung) wird verzichtet. In diesem Kapitel wird auf die Bewehrungsführung in der Pfahlkopfplatte eingegangen. Das Kapitel 4.3 gibt einen Überblick über die Bewehrungsführung in den Pfählen und der Widerlagerwand.

4.2.1 Konzept Variante 1 Lastfall 1

In der unteren Bewehrungsebene befindet sich zwischen den Pfählen in Haupt- und Querrichtung eine Bewehrung, die als Zugband dient. In Querrichtung gibt es sowohl in der unteren als auch in der oberen Bewehrungsebene eine Bewehrung zur Aufnahme der in Abbildung 4.1 Detail E und Detail D besprochenen Umlenkkräfte.

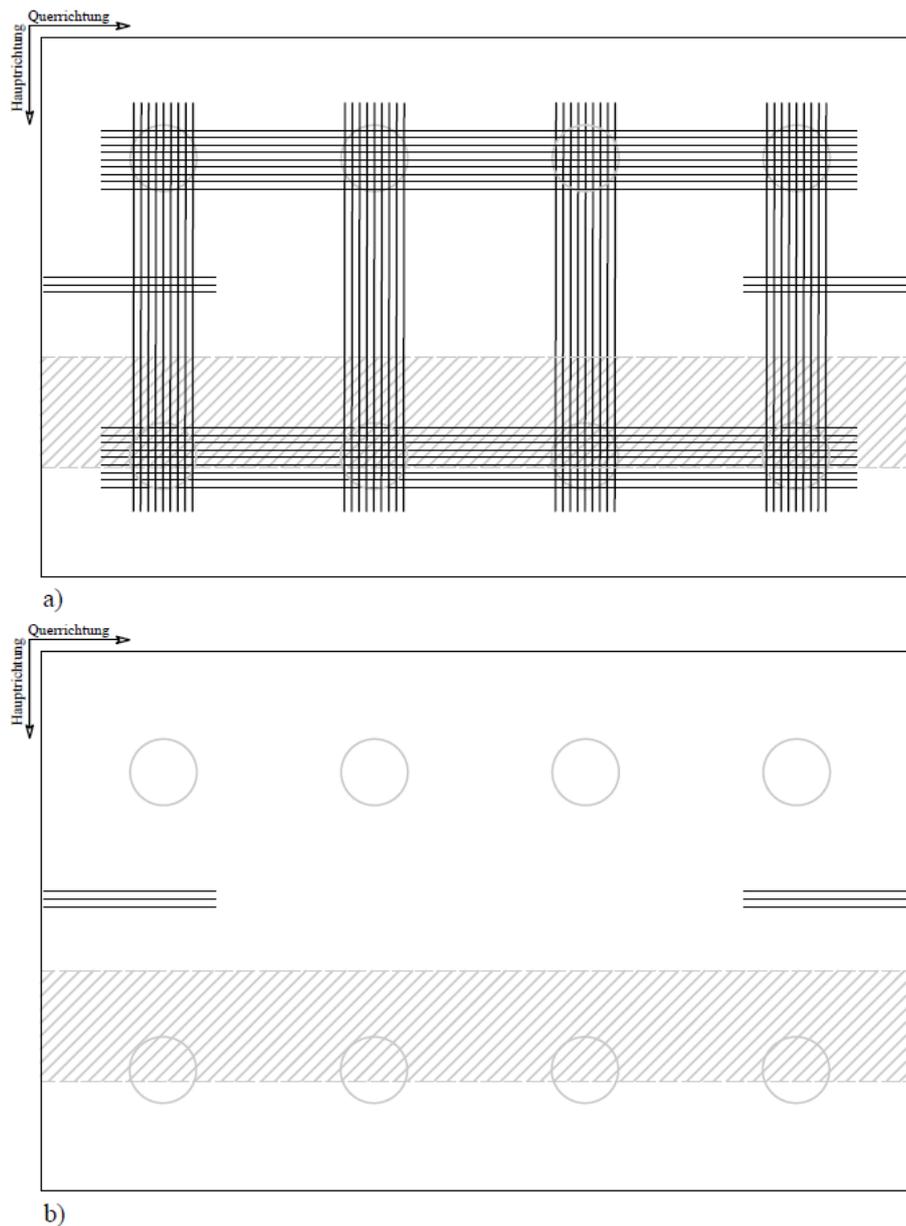


Abbildung 4.2: Variante 1 Lastfall 1 - a)Bewehrung unten, b)Bewehrung oben

4.2.2 Konzept Variante 1 Lastfall 2

In der unteren Bewehrungsebene befindet sich zwischen den Pfählen in Haupt- und Querrichtung eine Bewehrung, die als Zugband dient. In Querrichtung gibt es sowohl in der unteren als auch in der oberen Bewehrungsebene eine Bewehrung zur Aufnahme der in Abbildung 4.1 Detail E und Detail D besprochenen Umlenkkräfte. Aufgrund der eingeleiteten Zugkraft aus der Widerlagerwand ist eine Querbewehrung und eine Bügelbewehrung in Haupttrichtung notwendig.

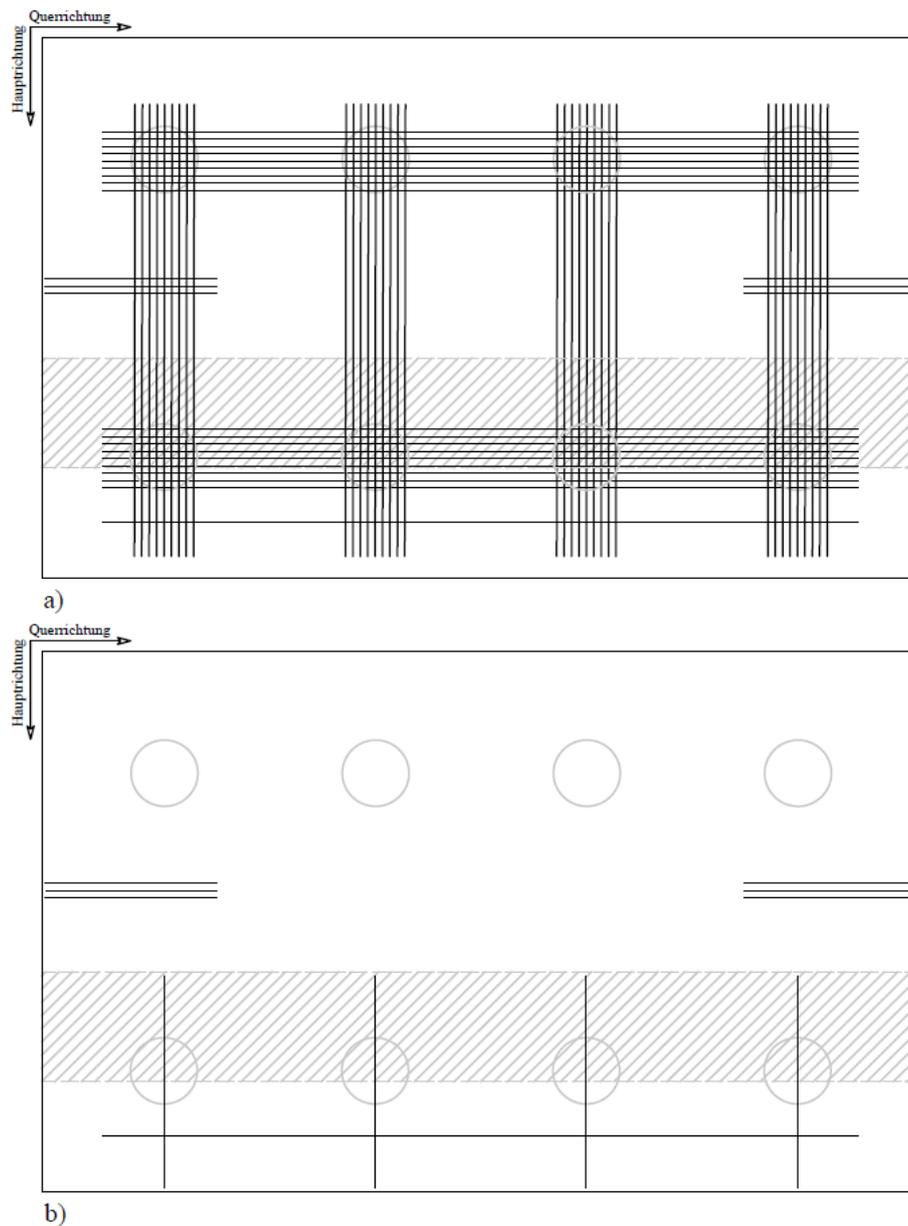


Abbildung 4.3: Variante 1 Lastfall 2 - a)Bewehrung unten, b)Bewehrung oben

4.2.3 Konzept Variante 2 Lastfall 1

In der unteren Bewehrungsebene befindet sich zwischen den Pfählen in Haupt- und Querrichtung eine Bewehrung, die als Zugband dient. In Querrichtung gibt es sowohl in der unteren als auch in der oberen Bewehrungsebene eine Bewehrung zur Aufnahme der in Abbildung 4.1 Detail E und Detail D besprochenen Umlenkkräfte. Um die widerlagerfernen Pfähle bilden sich Bewehrungskästen. Diese sollten als U-Bügel mit ausreichender Übergreifungslänge ausgeführt werden.

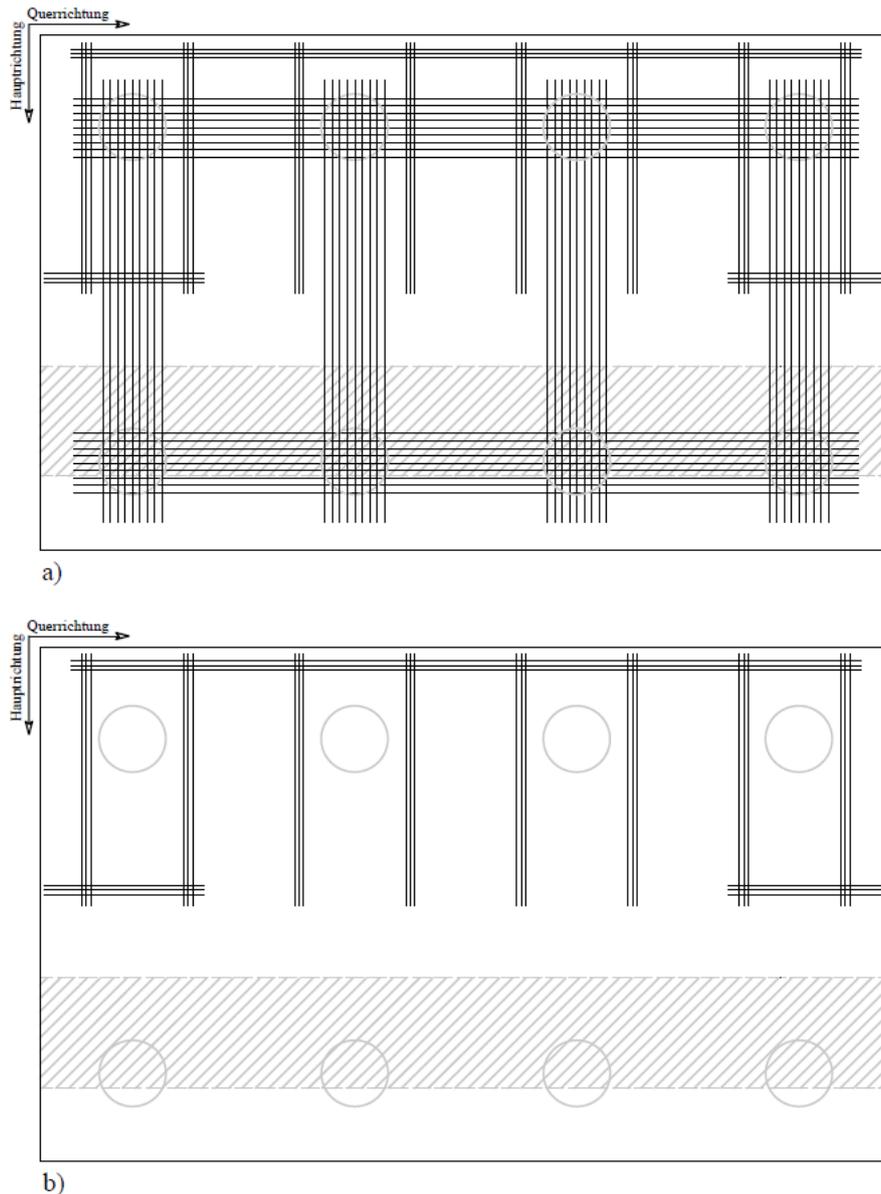


Abbildung 4.4: Variante 2 Lastfall 1 - a)Bewehrung unten, b)Bewehrung oben

4.2.4 Konzept Variante 2 Lastfall 2

In der unteren Bewehrungsebene befindet sich zwischen den Pfählen in Haupt- und Querrichtung eine Bewehrung, die als Zugband dient. In Querrichtung gibt es sowohl in der unteren als auch in der oberen Bewehrungsebene eine Bewehrung zur Aufnahme der in Abbildung 4.1 Detail E und Detail D besprochenen Umlenkkräfte. Aufgrund der eingeleiteten Zugkraft aus der Widerlagerwand ist eine Querbewehrung und eine Bügelbewehrung in Haupttrichtung notwendig. Um die widerlagerfernen Pfähle bilden sich Bewehrungskästen. Diese sollten als U-Bügel mit ausreichender Übergreifungslänge ausgeführt werden.

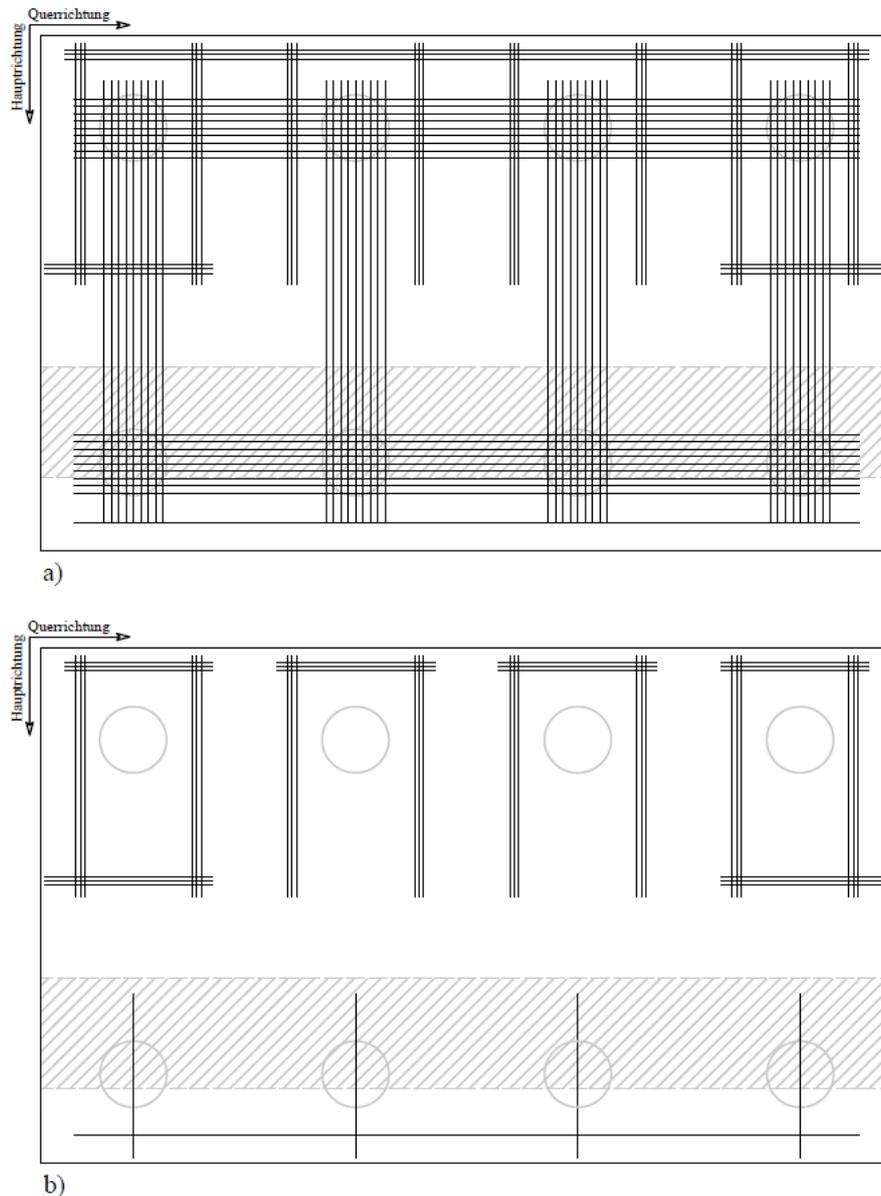


Abbildung 4.5: Variante 2 Lastfall 2 - a)Bewehrung unten, b)Bewehrung oben

4.2.5 Konzept Variante 3 Lastfall 1

In der unteren Bewehrungsebene befindet sich zwischen den Pfählen in Haupt- und Querrichtung eine Bewehrung, die als Zugband dient. In Querrichtung gibt es sowohl in der unteren als auch in der oberen Bewehrungsebene eine Bewehrung zur Aufnahme der in Abbildung 4.1 Detail E und Detail D besprochenen Umlenkkräfte. Um die widerlagerfernen Pfähle sind Bügelbewehrungen notwendig. Diese sollten als U-Bügel mit ausreichender Übergreifungslänge ausgeführt werden.

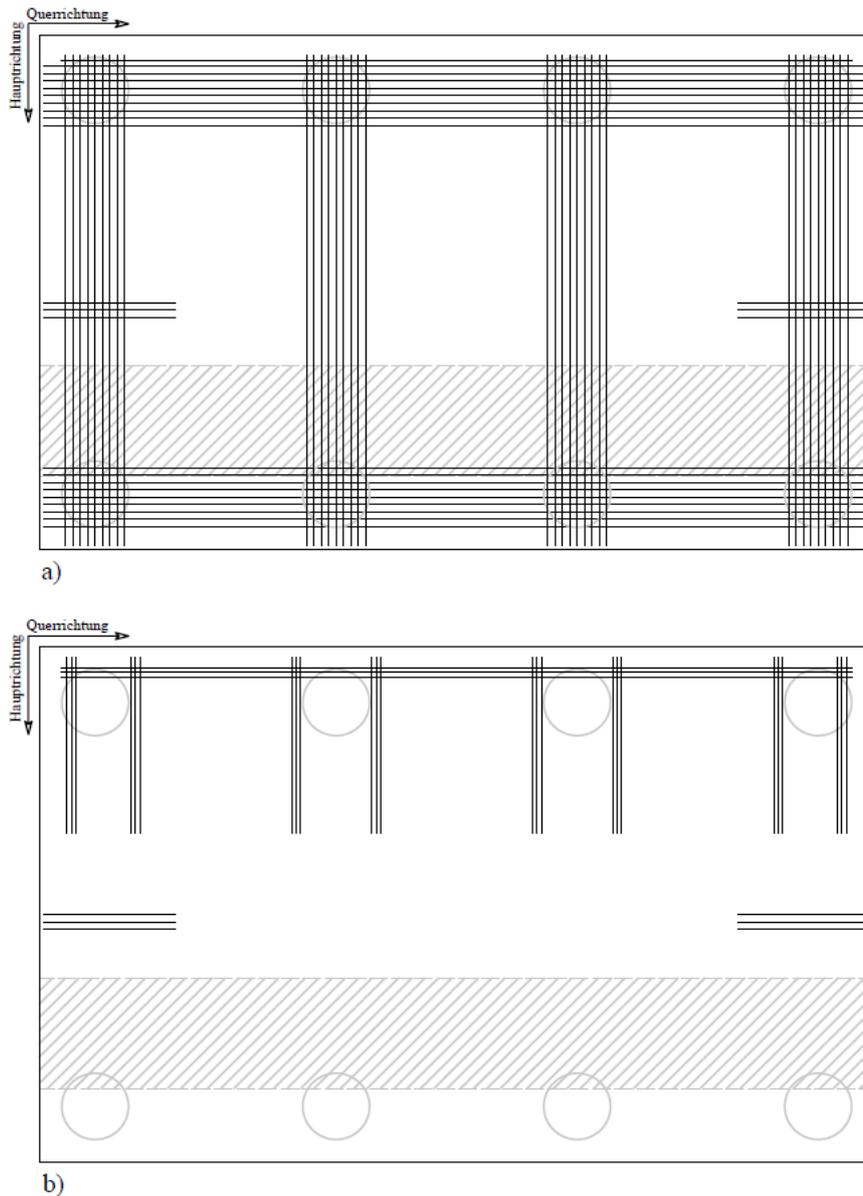


Abbildung 4.6: Variante 3 Lastfall 1 - a)Bewehrung unten, b)Bewehrung oben

4.2.6 Konzept Variante 3 Lastfall 2

In der unteren Bewehrungsebene befindet sich zwischen den Pfählen in Haupt- und Querrichtung eine Bewehrung, die als Zugband dient. In Querrichtung gibt es sowohl in der unteren als auch in der oberen Bewehrungsebene eine Bewehrung zur Aufnahme der in Abbildung 4.1 Detail E und Detail D besprochenen Umlenkkräfte. Aufgrund der eingeleiteten Zugkraft aus der Widerlagerwand ist eine Querbewehrung und eine Bügelbewehrung in Hauptrichtung notwendig. Um die widerlagerfernen Pfähle sind Bügelbewehrungen notwendig. Diese sollten als U-Bügel, mit ausreichender Übergreifungslänge ausgeführt werden.

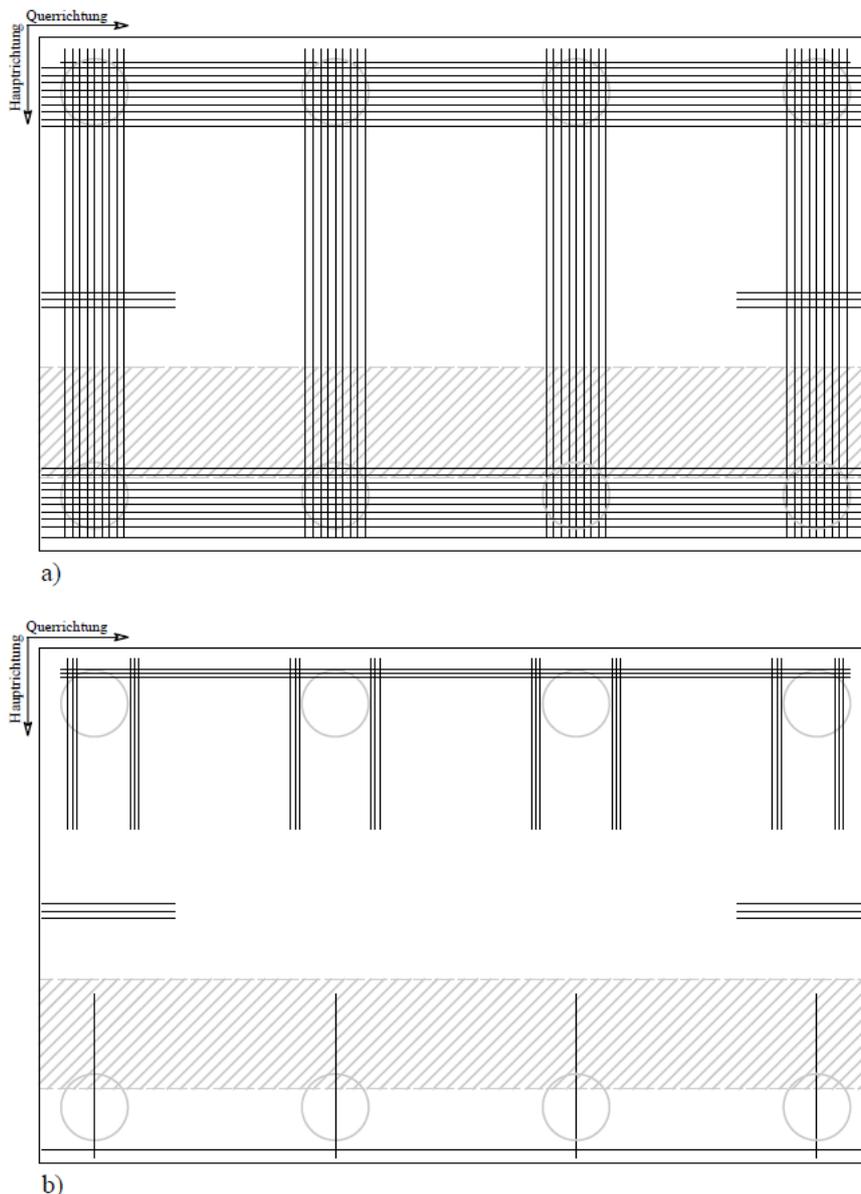


Abbildung 4.7: Variante 3 Lastfall 2 - a) Bewehrung unten, b) Bewehrung oben

4.2.7 Konzept Variante 4 Lastfall 1

In der unteren Bewehrungsebene befindet sich zwischen den Pfählen in Haupt- und Querrichtung eine Bewehrung, die als Zugband dient. In Querrichtung zwischen innerem und äußerem Pfahl gibt es sowohl in der unteren als auch in der oberen Bewehrungsebene eine Bewehrung zur Aufnahme der in Abbildung 4.1 Detail E und Detail D besprochenen Umlenkkräfte.

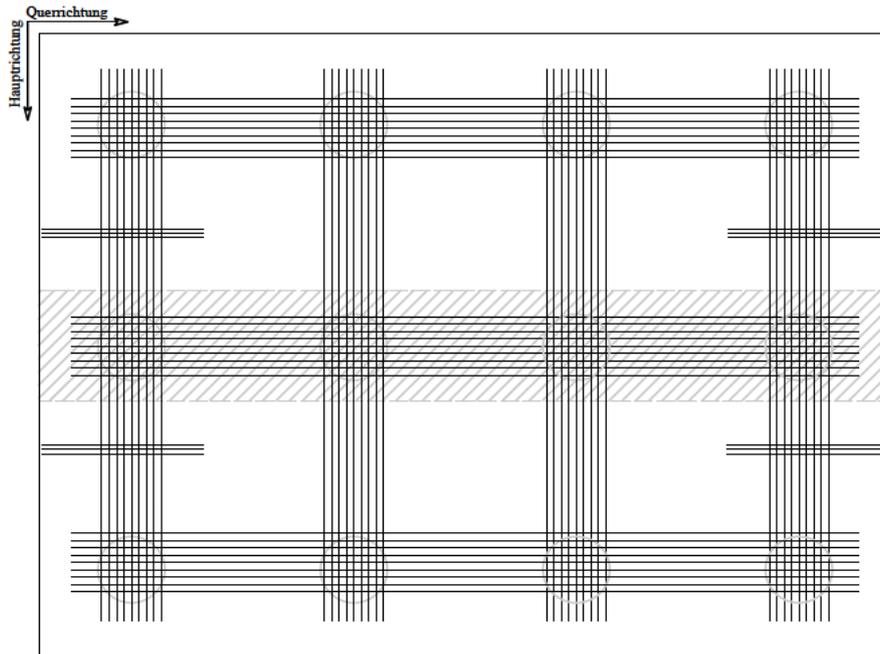


Abbildung 4.8: Variante 4 Lastfall 1 - Bewehrung unten

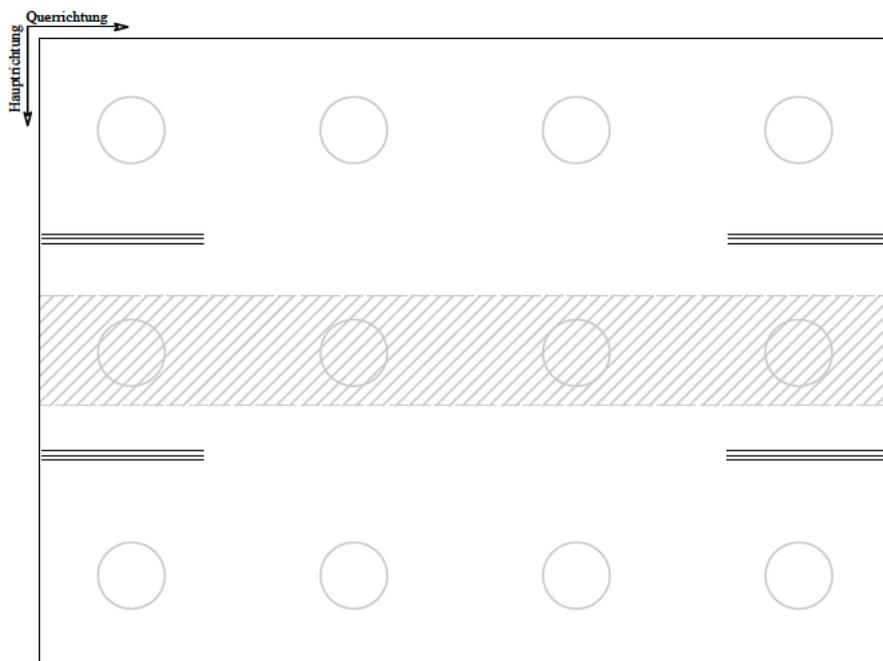


Abbildung 4.9: Variante 4 Lastfall 1 - Bewehrung oben

4.2.8 Konzept Variante 4 Lastfall 2

In der unteren Bewehrungsebene befindet sich zwischen den Pfählen in Haupt- und Querrichtung eine Bewehrung, die als Zugband dient. In Querrichtung zwischen innerem und äußerem Pfahl, gibt es sowohl in der unteren als auch in der oberen Bewehrungsebene eine Bewehrung zur Aufnahme der in Abbildung 4.1 Detail E und Detail D besprochenen Umlenkkräfte. Aufgrund der eingeleiteten Zugkraft aus der Widerlagerwand ist ein Bewehrungskasten um die Lasteinleitung notwendig. Diese sollten als U-Bügel, mit ausreichender Übergreifungslänge ausgeführt werden.

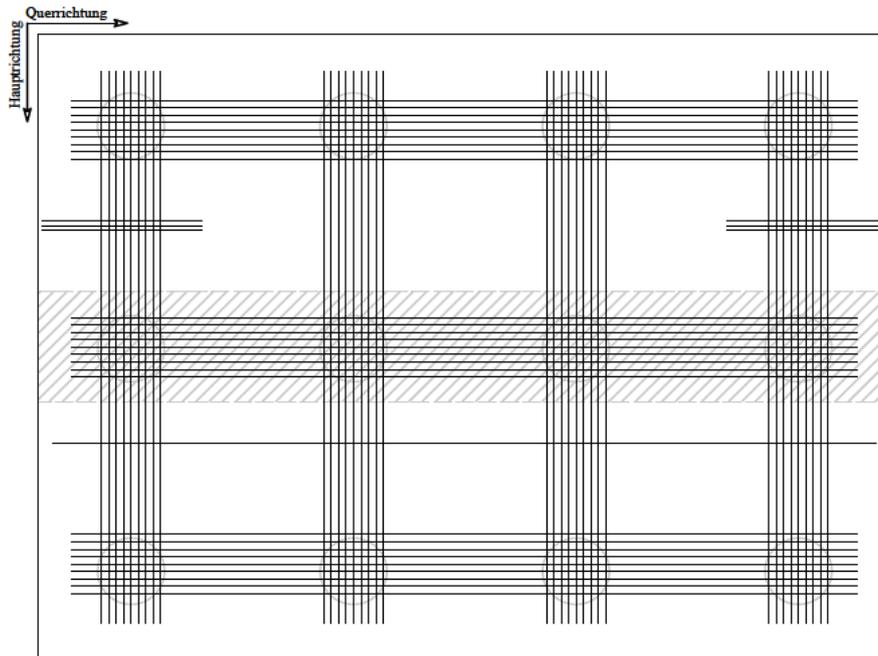


Abbildung 4.10: Variante 4 Lastfall 2 - Bewehrung unten

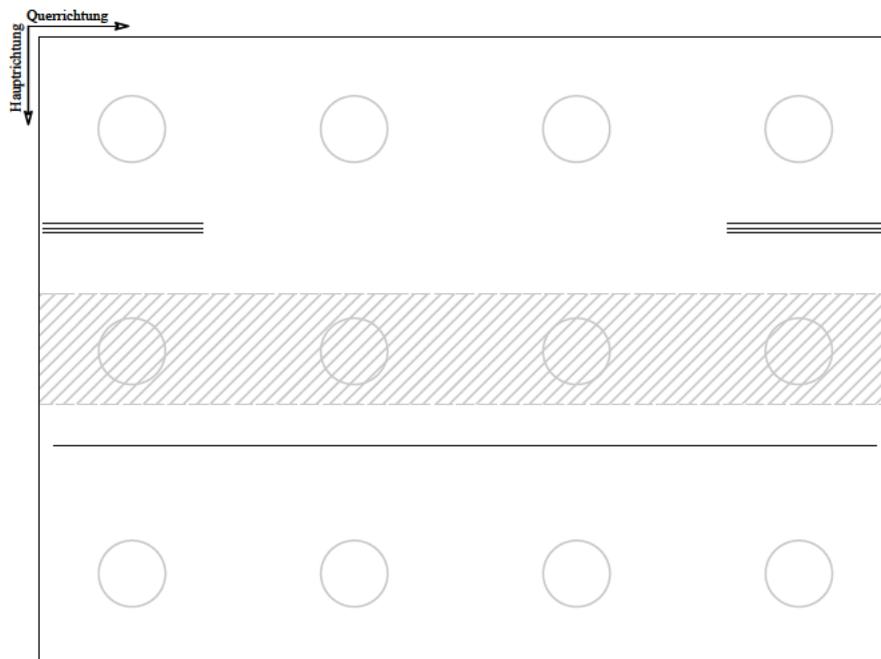


Abbildung 4.11: Variante 4 Lastfall 2 - Bewehrung oben

4.3 Bewehrungsführung Widerlagerwand und Pfahl

4.3.1 Widerlagerwand

Um bei der Widerlagerwand eine ausreichende Verankerungslänge zu erreichen, wird die Bewehrung bis zur unteren Bewehrungsebene geführt und dort mittels eines Hakens verankert.

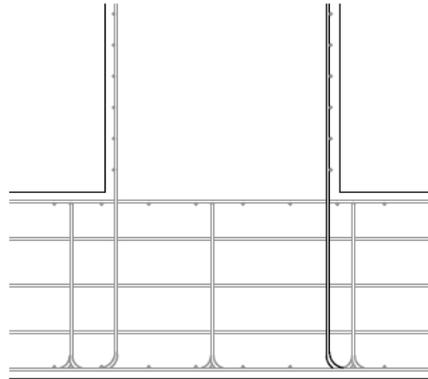


Abbildung 4.12: Bewehrungsführung Widerlagerwand

4.3.2 Pfahl

Da die Pfähle kreissymmetrisch bewehrt sind, lassen sie sich nur schwer in die obere Bewehrungsebene einbinden. Deshalb wird die Bewehrung der Pfähle bis in die Platte fortgeführt. Bei einer Pfahlkopfplattengeometrie, die die Ausbildung eines Rahmenecks erfordert, ist auf die ausreichende Verankerungslänge bzw. Übergreifungslänge der oberen Bewehrung zu achten und falls notwendig über einen Haken in die untere Bewehrungsebene zu verankern.

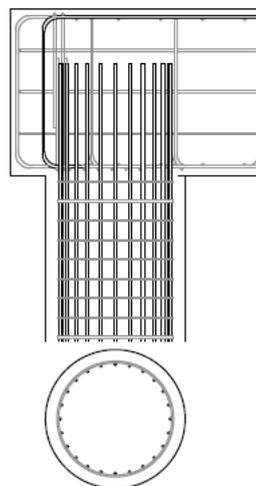


Abbildung 4.13: Bewehrungsführung Widerlagerwand

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit dient als Hilfestellung für die Bewehrungsanordnung in Pfahlkopfplatten unter Zuhilfenahme von Stabwerkmodellen. Eine ausführliche Literaturrecherche war die Grundlage zum besseren Verständnis der Bemessungsmethodik mittels Stabwerksystemen. Die Bemessungsregeln und Methoden dieser Literatur wurden in Kapitel 2 zusammengefasst.

Für den weiteren Verlauf der Arbeit wurden vier verschiedene Pfahlkopfplattengeometrien gewählt. Die Unterschiede bestehen in den Abständen der Pfähle, der Positionierung der Widerlagerwand und der Größe der Platte. Als Belastung wurden zwei Lastfälle untersucht, zunächst eine überdrückte und anschließend eine überwiegend biegebeanspruchte Wand. Diese Geometrien wurden zunächst mittels des FE-Programms Sofistik modelliert, auf die beiden Lastfälle beansprucht und bemessen. Um festzustellen, ob die Ergebnisse eines FE-Modells mit denen eines Stabwerkmodells vergleichbar sind, wurden die vier Pfahlkopfplatten auch als zweidimensionale Stabwerke modelliert und anschließend mittels Ruck-Zuck bemessen. Aus dem Vergleich war ersichtlich, dass sich die Stabwerkmodelle den Ergebnissen der FE-Berechnung sehr gut annähern.

Aufbauend auf den zweidimensionalen Modellen wurden dreidimensionale Stabwerksysteme erstellt. Auf die Bemessung dieser Modelle wurde verzichtet, da sie nur als Hilfestellung für die Bewehrungsfindung dienen müssen.

Abschließend wurde auf Grundlage der dreidimensionalen Stabwerke eine mögliche Bewehrungsführung je Pfahlkopfplatte und Lastfall erstellt. Hierdurch wird aufgezeigt, in welchen Bereichen im Vergleich zu den FE-Ergebnissen eventuell eine Zusatzbewehrung oder Bewehrungskonzentrationen erforderlich werden können.

Die Bemessung von Bauteilen mittels FE-Programmen ist der Standard im Bauwesen, jedoch können die Ergebnisse aus diesen Programmen teilweise unübersichtlich sein und die richtige Bewehrungsführung erschweren. Die Ergebnisse aus Stabwerkmodellen bieten hier eine übersichtliche Alternative. In der Praxis ist es jedoch nicht möglich, für jeden Lastfall ein separates Stabwerkmodell zu entwickeln und auf dessen Basis eine Pfahlkopfplatte zu bemessen. Durch die Ergebnisse dieser Arbeit kann für ausgewählte Geometrien aufgezeigt werden, in welchen Bereichen eine konzentrierte Bewehrungsanordnung sinnvoll sein kann. In dieser Arbeit wurden vier Pfahlkopfplatten mit jeweils zwei Lastfällen näher untersucht. Da die Baupraxis nicht nur auf diese Varianten beschränkt ist, sollten in Zukunft weitere Geometrien und Lastfälle untersucht werden.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Pfahlbewehrung einer Pfahlkopfplatte [KHP]	3
2.2	Pfahlkopfplatte Neckartalübergang [LBW]	3
2.3	Spannungstrajektorien eines Balkens nach[Zilch, 2010, Seite 128]	4
2.4	Größe von D-Bereichen nach[Zilch, 2010, Seite 133]	5
2.5	Modellierung mittels Lastpfadmethode nach [Zilch, 2010, Seite 135]	8
2.6	Modellierung mittels Spannungsverteilung [Schlaich, 2001, Seite 348]	8
2.7	Skizze zur Bemessung der Verankerungslänge	9
2.8	Formen von Druckfeldern [Schlaich, 2001, Seite 365]	10
2.9	typischer Druck-Druck-Druck-Knoten [Zilch, 2010, Seite 143]	11
2.10	Verankerungsmöglichkeiten	12
2.11	typischer Druck-Druck-Zug-Knoten ohne Überstand der Bewehrung [Zilch, 2010, Seite 144]	13
2.12	typischer Druck-Druck-Zug-Knoten mit Überstand der Bewehrung [Zilch, 2010, Seite 144]	13
2.13	typischer Druck-Zug-Zug-Knoten[Zilch, 2010, Seite 146]	14
2.14	Verankerungsarten laut [EC-2]	16
2.15	benachbarte Stöße laut [EC-2]	17
3.1	Bemessungslastfälle	21
3.2	Abmessungen Variante 1	22
3.3	Abmessungen Variante 2	22
3.4	Abmessungen Variante 3	23
3.5	Abmessungen Variante 4	23
3.6	Finite Elemente Modell der Pfahlkopfplatte ohne Querschnitte (Variante 1) .	24
3.7	Variante 1 Lastfall 1 - 3D - Modell	26
3.8	Variante 1 Lastfall 1 - a)Draufsicht, b)Schnitt, c)Ansicht	27
3.9	Variante 1 Lastfall 1 - Bewehrungsvergleich	28
3.10	Variante 1 Lastfall 2 - 3D - Modell	29
3.11	Variante 1 Lastfall 2 - a)Draufsicht, b)Schnitt, c)Ansicht	30
3.12	Variante 1 Lastfall 2 - Bewehrungsvergleich	31
3.13	Variante 2 Lastfall 1 - 3D - Modell	32
3.14	Variante 2 Lastfall 1 - a)Draufsicht, b)Schnitt, c)Ansicht	33
3.15	Variante 2 Lastfall 1 - Bewehrungsvergleich	34
3.16	Variante 2 Lastfall 2 - 3D - Modell	35
3.17	Variante 2 Lastfall 2 - a)Draufsicht, b)Schnitt, c)Ansicht	36
3.18	Variante 2 Lastfall 2-Bewehrungsvergleich	37
3.19	Variante 3 Lastfall 1 - 3D - Modell	38

3.20	Variante 3 Lastfall 1 - a)Draufsicht, b)Schnitt, c)Ansicht	39
3.21	Variante 3 Lastfall 1 - Bewehrungsvergleich	40
3.22	Variante 3 Lastfall 2 - 3D - Modell	41
3.23	Variante 3 Lastfall 2 - a)Draufsicht, b)Schnitt, c)Ansicht	42
3.24	Variante 3 Lastfall 2 - Bewehrungsvergleich	43
3.25	Variante 4 Lastfall 1 - 3D - Modell	44
3.26	Variante 4 Lastfall 1 - a)Draufsicht, b)Schnitt, c)Ansicht	45
3.27	Variante 4 Lastfall 1-Bewehrungsvergleich	46
3.28	Variante 4 Lastfall 2 - 3D - Modell	47
3.29	Variante 4 Lastfall 2 - a)Draufsicht, b)Schnitt, c)Ansicht	48
3.30	Variante 4 Lastfall 2 - Bewehrungsvergleich	49
4.1	Detailpunkte für die Bemessung	50
4.2	Variante 1 Lastfall 1 - a)Bewehrung unten, b)Bewehrung oben	52
4.3	Variante 1 Lastfall 2 - a)Bewehrung unten, b)Bewehrung oben	53
4.4	Variante 2 Lastfall 1 - a)Bewehrung unten, b)Bewehrung oben	54
4.5	Variante 2 Lastfall 2 - a)Bewehrung unten, b)Bewehrung oben	55
4.6	Variante 3 Lastfall 1 - a)Bewehrung unten, b)Bewehrung oben	56
4.7	Variante 3 Lastfall 2 - a)Bewehrung unten, b)Bewehrung oben	57
4.8	Variante 4 Lastfall 1 - Bewehrung unten	58
4.9	Variante 4 Lastfall 1 - Bewehrung oben	59
4.10	Variante 4 Lastfall 2 - Bewehrung unten	60
4.11	Variante 4 Lastfall 2 - Bewehrung oben	61
4.12	Bewehrungsführung Widerlagerwand	62
4.13	Bewehrungsführung Widerlagerwand	62

Tabellenverzeichnis

2.1	Mindest-Biegerollendurchmesser laut [EC-2]	16
2.2	max. Abstand der Bewehrungstäbe von Platten laut [EC-2]	18
2.3	Mindestlängsbewehrung für Pfähle laut [ÖNorm EN 1536]	19
2.4	Empfohlene Durchmesser der Querbewehrung für Pfähle laut [ÖNorm EN 1536]	19

Literaturverzeichnis

- [*KHP*] König und Heunisch Planungsgesellschaft Leipzig - NL Graz. unveröffentlichtes Foto.
- [*LBW*] Landesarchiv Baden-Württemberg. *Neckartalübergang Neckarsulm in km 635,100 BW 2 = Vorlandbrücke Obereisesheim, Bewehrung der Pfahlkopfplatte Pfeiler B gebaut 1965 - 1967.*
- [*Conrad, 2012*] Boley, C., & Adam, D. (2012). *Handbuch Geotechnik : Grundlagen, Anwendungen, Praxiserfahrungen ; mit 185 Tabellen* (1. Aufl.. ed., Praxis).
- [*König, 2008*] König, G., Nguyen, V. T., & Schenck, G. (2008). *Grundlagen des Stahlbetonbaus : Einführung in die Bemessung nach DIN 1045-1* (3., aktualisierte Aufl.. ed., Studium : Bauwesen).
- [*EC – 2*] Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [*EC – 7*] Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln, Teil 1-3: Pfahlgründungen
- [*ÖNorm EN 1536*] ÖNorm EN 1536: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau—Bohrpfähle
- [*Schlaich, 2001*] Schlaich, J., Schäfer, K. (2001). Konstruieren im Stahlbetonbau. In *Betonkalender 2001: Konstruieren im Stahlbetonbau.*
- [*Tue, 2021*] Nguyen, V. T., Della Pietra, R., & Mayer, M. (2020). Integralbrücken - Tragverhalten und Anregungen zur Bemessung einschließlich Integralisierung von Bestandsbrücken. In *Beton Kalender 2021: Fertigteile, Integrale Bauwerke* (Vol. 110-2, pp. 608-672).

- [Tue, 2015] Nguyen, V. T. (2015). *Berechnung und Bemessung von Betonbrücken* (1 Aufl., Wilhelm Ernst & Sohn, 10245 Berlin)
- [Zilch, 2010] Zilch, K., & Zehetmaier, G. (2010). *Bemessung im konstruktiven Betonbau : Nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2)* (2., neu bearb. u. erw. Aufl.. ed.).